Uvod u spregnute konstrukcije od čelika i betona iz studentske perspektive

Boduljak, Stjepan; Bošnjak, Antonia; Jurić, Valentina; Lucić, Manda; Lucić, Nikola; Perić, Ana; Pervan, Benjamin; Vrdoljak, Ivan; Vujčić, Tin

Authored book / Autorska knjiga

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Publication year / Godina izdavanja: **2020**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:909591

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

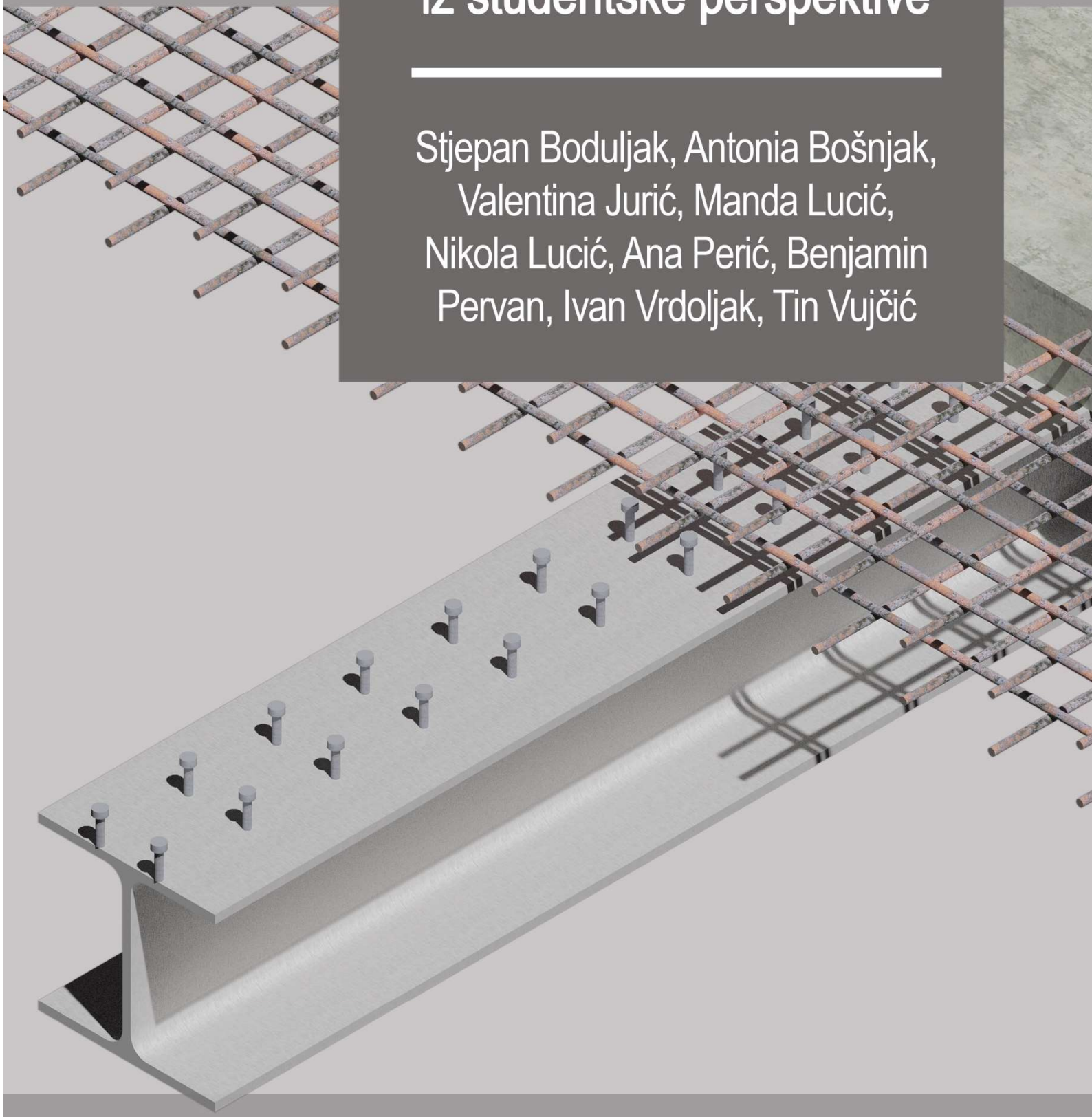
Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Uvod u spregnute konstrukcije od čelika i betona iz studentske perspektive

Stjepan Boduljak, Antonia Bošnjak, Valentina Jurić, Manda Lucić, Nikola Lucić, Ana Perić, Benjamin Pervan, Ivan Vrdoljak, Tin Vujčić



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Stjepan Boduljak, Antonia Bošnjak, Valentina Jurić, Manda Lucić, Nikola Lucić, Ana Perić, Benjamin Pervan, Ivan Vrdoljak, Tin Vujčić
UVOD U SPREGNUTE KONSTRUKCIJE OD ČELIKA I BETONA IZ STUDENTSKE PERSPEKTIVE

Recenzenti:
prof. dr. sc. Damir Markulak, dipl. ing. građ.
doc. dr. sc. Tihomir Dokšanović, mag. ing. aedif.

Lektorica:
Vesna Zobundžija, prof.

Izdavač:
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
Za izdavača:
izv. prof. dr. sc. Damir Varevac, dipl. ing. građ., dekan

Uredili, obradili tekst, grafičke priloge i naslovnu stranicu:
Stjepan Boduljak, Antonia Bošnjak, Valentina Jurić, Manda Lucić, Nikola Lucić, Ana Perić, Benjamin Pervan, Ivan Vrdoljak, Tin Vujčić

ISBN: 978-953-6962-58-7

Osijek, ožujak 2020. godine

© Sva prava zadržava autor. Ni jedan dio ove knjige ne smije se reproducirati ili distribuirati u bilo kojem obliku ili na bilo koji način, uključujući fotokopiranje, skeniranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi oblik zapisa itd., bez prethodne pismene dozvole autora.
U pripremi i obradi ove knjige učinjeni su svi napori da se ne pojave pogreške. Izdavač i autor ne preuzimaju odgovornost za eventualnu pojavu pogrešaka i omaški u izloženoj materiji, kao ni za njihove posljedice.

Sadržaj

Predgovor autora 1
Predgovor recenzenata 3
Spregnute konstrukcije (2019./2020.) 5
Rezultati provjere na kraju semestra 8
1 Specifičnosti projektiranja spregnutih greda u zgradama – preporučeni raster, razredba presjeka i provjere za GSN 14
1.1 Prednosti 15
1.2 Spregnute konstrukcije i preporuke 16
1.3 Posmični moždanici 17
1.4 Razredba poprečnih presjeka 17
1.5 Granična stanja 19
2 Modeliranje spregnutih konstrukcija za proračun 20
2.1 Elastični globalni proračun 20
2.2 Zaostajanje posmika, proračunska širina betonske ploče 21
2.3 Omjer modula elastičnosti 22
2.4 Raspucavanje betona 23
3 Utjecaj dugotrajnih deformacija betona na spregnute konstrukcije 25
3.1 Dugotrajne deformacije betona 25
3.2 Utjecaj puzanja betona na spregnute konstrukcije 27
3.3 Utjecaj skupljanja betona na spregnute konstrukcije 28
4 Plastična otpornost poprečnih presjeka na savijanje 30
4.1 Otpornost na savijanje kod potpune posmične veze 31
4.2 Otpornost na savijanje kod djelomične posmične veze 34
4.3 Otpornost na savijanje presjeka obloženog betonom 35
5 Elastična otpornost poprečnog presjeka na savijanje 36
5.1 Određivanje naprezanja po visini spregnutog presjeka 36
5.2 Otpornost poduprtih nosača 38
5.3 Otpornost nepoduprtih nosača 40
5.4 Preraspodjela momenata pri raspucavanju betona 41
6 Otpornost poprečnog presjeka na vertikalni posmik 42
6.1 Međudjelovanje M + V 42

6.2 Otpornost poprečnih presjeka djelomično obloženih betonom ... 44
7 Bočno-torzijsko izvijanje spregnutih nosača ... 46
7.1 Elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja M_{cr} ... 46
7.2 Metoda obrnutog U-okvira ... 48
7.3 Opći dokaz bočno-torzijskog izvijanja ... 49
7.4 Određivanje faktora smanjenja χ_{LT} ... 50
7.5 Pojednostavnjeni dokaz bočno-torzijskog izvijanja ... 50
8 Sredstva za sprezanje ... 52
8.1 Općenito ... 52
8.2 Osnovna svojstva valjkastih moždanika s glavom ... 53
8.3. Konstrukcijsko ponašanje valjkastih moždanika s glavom u monolitnoj ploči ... 54
8.4. Konstrukcijsko ponašanje moždanika s glavom u ploči s profiliranim čeličnim limom ... 54
8.5. Proračunska otpornost moždanika ... 55
9 Posmični spoj ... 58
9.1 Važnost posmične veze ... 58
9.2 Stupanj sprezanja i posmično međudjelovanje ... 59
9.3 Potpuni posmični spoj ... 60
9.4 Djelomična posmična veza ... 62
9.5 Konstrukcijske preporuke ... 63
10 Uzdužni posmik u betonskoj ploči ... 66
10.1 Osnove ... 66
10.2 Površine posmika ... 67
10.3 Model otpornosti ... 68
10.4 Profilirani čelični limovi ... 68
11 Granično stanje uporabljivosti kod spregnutih greda ... 70
11.1 Progib ... 70
11.2 Širina pukotina u betonu ... 71
12 Spregnuti stupovi ... 72
12.1 Općenito ... 72
12.2 Otpornost na lokalno izbočivanje ... 74
12.3 Metode proračuna spregnutih stupova ... 74
13 Otpornost poprečnog presjeka spregnutih stupova ... 76
13.1 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na tlak ... 76

13.2 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na zajedničko djelovanje momenta savijanja i uzdužne tlačne sile ... 77
13.3 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na poprečnu silu ... 79
14 Otpornost spregnutih stupova na tlak ... 81
14.1 Proračunska krutost na savijanje ... 82
14.2 Primjena teorije drugog reda ... 83
14.3 Primjena teorije prvog reda ... 86
15 Otpornost spregnutih stupova na tlak i savijanje ... 88
15.1 Otpornost elementa izloženog uzdužnoj tlačnoj sili i jednoosnom savijanju ... 88
15.2 Otpornost elementa izloženog uzdužnoj tlačnoj sili i dvoosnom savijanju ... 91
16 Spregnute ploče s profiliranim limovima za zgrade ... 93
16.1 Općenito ... 93
16.2 Konstrukcijsko oblikovanje ... 93
16.3 Način ostvarivanja sprezanja ... 95
17 Analiza djelovanja na spregnute ploče i njihovo konstrukcijsko ponašanje ... 96
17.1 Stupanj sprezanja (posmični spoj) ... 96
17.2 Veza između čelika i betona ... 97
17.3 Krhko i duktilno ponašanje spregnute ploče ... 97
17.4 Tipovi sloma ... 98
17.5 Djelovanja na spregnute ploče ... 98
17.6 Proračun spregnutih ploča ... 99
17.7 Proračunska širina ... 99
17.8 Provjere za granično stanje nosivosti i uporabljivosti ... 100
18 Otpornost poprečnih presjeka spregnutih ploča ... 102
18.1 Profilirani čelični lim kao oplata ... 102
18.2 Proračun spregnutih ploča ... 102
18.3 Otpornost na vertikalni posmik ... 105
18.4 Otpornost spregnute ploče na proboj ... 106
19 Otpornost spregnutih ploča na uzdužni posmik ... 108
19.1 Metoda m-k ... 108
19.2 Metoda djelomičnog spoja ... 110
19.3 Otpornost na uzdužni posmik kod ploča koje su usidrene na krajevima ... 112
20 Primjer - proračun spregnute grede prema HRN EN 1994-1-1 ... 114

21 Primjer - proračun spregnutog stupa prema HRN EN 1994-1-1 141
22 Primjer - proračun spregnute ploče prema HRN EN 1994-1-1 159
Literatura 175

Predgovor autora

Poštovani čitatelju/kolega,
ovaj materijal nastao je kao studentska interpretacija gradiva koje obuhvaća kolegij Spregnute konstrukcije. Pod mentorstvom prof. dr. sc. Damira Markulaka i doc. dr. sc. Tihomira Dokšanovića, tijekom zimskog semestra akademske godine 2019./2020., uz gradivo koje je predviđeno planom i programom kolegija, naučili smo ponešto i o tehnikama predavanja, prenošenja znanja, a u konačnici i o sebi samima. Predavanja su najvećim dijelom bila koncipirana tako da se studenti angažiraju u ulozi predavača i na temelju obrađenih i prezentiranih materijala napišu sažetke tema koje su izlagali. Sve su zadane teme bile definirane u skladu s planom i programom kolegija, a spomenuti sažetci objedinjeni u skriptima koja upravo čitate. Vježbe su provedene na „klasičan" način, tako da su obrađivani primjeri proračuna spregnute grede, spregnutog stupa i spregnute ploče i oni su bili temelj za izradu semestarskih zadataka. Ti su primjeri, koje je izradio doc. dr. sc. Tihomir Dokšanović, također uključeni u ova skripta kako bi se, uz teorijske obrade pojedinih tema, dobio i praktičan uvid u rješavanje zadataka.

Neki su se od nas po prvi puta našli u ulozi predavača te pokušavali prenijeti nova znanja svojim kolegama. Također, za razliku od dosadašnjih seminara i prezentacija koje smo imali tijekom studija, kroz ovakav oblik provođenja nastave dobili smo jasnu povratnu informaciju u vidu kritika naših kolega studenata, kao i profesora, te smo na taj način zasigurno poboljšali svoje predavačke vještine i javni nastup. Uz to, bilo je potrebno proučiti literaturu te iz različitih izvora izvući ono što smatramo najbitnijim i to pokušati što jasnije prenijeti svojim kolegama. Na taj se način razvija inženjersko razmišljanje i izvrsno nas priprema za našu, vrlo blisku budućnost.

Ovakav način provođenja nastave predstavljao nam je i izvrsnu podlogu za sljedeće važno poglavlje u našem akademskom obrazovanju – izradu diplomskoga rada, budući da smo se tijekom dosadašnjeg studija u maloj mjeri susreli s proučavanjem literature, pisanjem stručnih ili znanstvenih tekstova te prezentiranjem usvojenog znanja.

U međusobnom razgovoru tijekom semestra zaključili smo kako se nakon 5 godina, uglavnom istog, „klasičnog" načina predavanja *ex cathedra*, ovakav princip učenja na temelju kontinuiranog rada na nekom projektu (eng. *project-based learning*), što je u ovom slučaju bila izrada nastavnih skripata, u velikoj mjeri pokazao kao dobar omjer uloženog truda i dobivenog rezultata. Valja napomenuti i kako smo, budući da smo znali da predavanje održava naš/a kolega/ica, na predavanje dolazili opuštenije te smo i gradivo pamtili lakše, povezujući ga s osobom koja ga je prezentirala.

Kao nedostatak ovakvog načina provođenja nastave želimo istaknuti „ovisnost" kvalitete održane nastave o samom studentu koji je određenu temu izlagao, odnosno o stupnju njegove pripreme i uloženog truda (što je ovisilo i o ostalim obvezama na studiju u danom trenutku). Iako smo svjesni da je način pristupa određenim obvezama osobna stvar i u profesionalnom i u privatnom funkcioniranju pojedinca, za potrebe ovakvog izvođenje nastave tome bi se moglo doskočiti uvođenjem obveznih prethodnih konzultacija s profesorima, kako bi se studenta moglo usmjeriti na dodatni angažman i pravovremeno rješavanje eventualnih nejasnoća. To uglavnom i jest bio slučaj kod većine kolega, tako da je nastava obično održana

bez većih poteškoća, ali ovim našim prijedlogom bi možda te prethodne konzultacije trebalo postaviti kao obvezu prije samog izlaganja teme.

Valja napomenuti i kako je izborni kolegij Spregnute konstrukcije 2019./2020. akademske godine upisalo 9 studenata, što je svakako pridonijelo mogućnosti provođenja ovakvog načina nastave. Atmosfera je stoga bila opuštenija i svi su studenti lakše komunicirali, a i profesori su mogli svakome pojedinačno pojašnjavati određene nejasnoće. Međutim, naš je zaključak da bi interakcija uvijek mogla biti na višoj razini te bi tijekom prezentiranja bilo dobro redovito pozivati ostale studente na konstruktivnu raspravu.

Na kraju semestra, u posljednjem redovitom terminu nastave, provedena je provjera znanja u obliku online kviza u okviru kojega smo, na opušten način, bez stresa od formalnog ispitivanja, provjerili koliko smo znanja usvojili od onoga što smo obrađivali tijekom cijelog semestra. Možemo reći kako smo uglavnom zadovoljni vlastitim znanjem, pogotovo s obzirom na to da se provjera dogodila u okviru redovitih termina predavanja. Međutim, vjerujemo da bi rezultati bili i bolji da se provjera dogodila s vremenskim odmakom i nakon što bismo bili primorani sjesti i naučiti gradivo, kako smo navikli tijekom dosadašnjeg obrazovanja.

Na kraju bismo htjeli izraziti veliku zahvalnost profesoru Damiru Markulaku i asistentu Tihomiru Dokšanoviću koji su nam svojim konzultacijama i vođenjem olakšali shvaćanje, a potom i prezentiranje gradiva s kojim se prvi puta susrećemo. Smatramo da je njihov angažman u izvođenju ovakve nastave bio daleko najveći te vjerujemo da se upravo zbog toga velik broj profesora libi odvažiti na projekt ovakvog tipa.

Nadamo se kako će ova skripta budućim generacijama studenata biti dobra smjernica pri praćenju i savladavanju gradiva ovoga kolegija. Nama će period tijekom kojega smo pisali ova skripta zasigurno ostati u trajnom sjećanju i kao lijepa uspomena na studentske dane.

Studenti autori



Predgovor recenzenata

Naučiti učiti je vještina koja se svakako nalazi na kritičnom putu inženjera (i ne samo njih) budućnosti. To je visoka i nužna dimenzija naših mogućnosti koja zahtijeva razvoj samosvjesnosti i osigurava samoodrživost procesa učenja, a ipak je najčešće potpuno zanemarena u sadašnjim tehničkim studijskim programima. U publikaciji *National Academy of Engineering* iz Washingtona (*The Engineer of 2020*) jasno stoji da će "inženjeri morati prihvatiti odgovornost za svoje kontinuirano obrazovanje, a fakulteti će ih morati pripremiti za taj zadatak tako što će ih naučiti kako da uče". Isto tako, u Preporukama Europskog parlamenta i Vijeća (od 18. prosinca 2006.), između ostaloga naglašava se da „naučiti učiti zahtijeva da osoba zna i razumije svoje poželjne strategije učenja, snage i slabosti svojih vještina i kvalifikacija te sposobnost traganja za obrazovnim mogućnostima i smjernicama te dostupnoj podršci". Iz toga jasno proizlazi da je zadaća fakulteta (kao uostalom i drugih institucija u sustavu obrazovanja) studente naučiti učiti i tako ih pripremiti za uspješan ulazak i opstanak u sve zahtjevnijem profesionalnom okruženju.

Potpuno je jasno da zadržavanje dosadašnje prakse primarnog usmjeravanja na količinu znanja koju treba „uliti" u studente, podrazumijevanja da oni već znaju kako učiti ili da će to negdje „usput" naučiti, neće polučiti željene rezultate. To svakodnevno potvrđujemo kada se god kao nastavnici žalimo da se studenti ne zalažu dovoljno, da nisu zainteresirani za učenje, kako sve žele riješiti na najlakši i najbrži mogući način (argumenti koji zasigurno nisu posve neistiniti), ali istovremeno tvrdoglavo nastavljamo održavati nastavu po ustaljenim obrascima, izbjegavajući svaku pomisao da dio problema (a i njegovog rješenja) koji prepoznajemo leži i u nama. Jer to bi značilo da se i mi moramo promijeniti i prilagoditi situaciji te uložiti dodatan trud u nešto za što smatramo da je posloženo i dobro funkcionira. Ovi su materijali nastali upravo kao rezultat želje za promjenom ustaljenih obrazaca, inicijative da se približimo studentskom načinu razmišljanja i omogućimo im priliku da pokažu svoje zalaganje, svoj način gledanja na problematiku – ukratko, da budu uključeni kao aktivni sudionici procesa učenja, a ne puki promatrači i repetitori. Naime, poznata je činjenica da je bez stvarne uključenosti u neki proces iluzorno očekivati aktivni doprinos u razvoju toga procesa. Na to nas je potaknuo već dobro poznat fenomen „studentskih" skripata za pripremanje ispita koja se ustrajno predaju iz ruke u ruku, iz generacije u generaciju, koja se čuvaju daleko od dohvata nastavnika, a koja istovremeno nastavnicima najčešće zadaju poprilične glavobolje zbog brojnih netočnih informacija i pogrešnih interpretacija koje opetovano ispravljaju na pismenim ili slušaju na usmenim ispitima. Ipak, bilo bi nekorektno ne prepoznati trud koji stoji iza izrade takvih materijala, želju da se (pre)opširno gradivo sažme i prilagodi predznanju studenata (ali najčešće i načinu ispitivanja profesora) i u konačnici nauči predviđeno gradivo. Stoga je proizašla ideja da se potakne izrada takvih materijala, ali ovaj puta u „kontroliranim uvjetima", odnosno pod paskom predmetnih nastavnika. Rezultat je tih nastojanja, formuliranih kao svojevrsni projekt, skripta koja upravo čitate, a koja su izradili studenti. Naime, zahvaljujući i relativno manjem broju studenata (što ipak ne znači da to nije moguće provesti i za nešto veću grupu), nastavu smo osmislili na način da je predviđeni program kolegija podijeljen u odgovarajuće teme koje su podijeljene studentima. Njihov je zadatak bio te teme obraditi i shvatiti, naravno uz našu pomoć i konzultacije, prezentirati ih u odgovarajućem obliku pred svojim kolegama te potom izraditi sažetak za potrebe izrade ovih skripata. Organizaciju načina predavanja i obrade teme u pisanim sažetcima prepuštali smo studentima, kako bi odražavala njihov način razmišljanja, a kasnije smo te materijale pregledavali i korigirali pogreške (u nekoliko navrata do konačne

varijante). Nešto više o samoj proceduri odvijanja nastave, dojmovima i zaključcima može se pročitati u dijelu skripata koji opisuje zadatak.

Zaključno možemo reći da su studenti pokazali i želju i inicijativu da se okušaju u drugačijem načinu odvijanja nastave te da smo s njihovim naporima i rezultatima zadovoljni (naravno, uvijek može bolje i dobro je da je tako). Bila je to prilika i da sami spoznamo neke drugačije načine gledanja na probleme koje smo obrađivali, budemo bliži praktičnim poteškoćama koje studenti imaju pri pripremi i prezentaciji materijala, a svakako i pri pisanju sažetaka. Sve što nam se činilo relevantno i što smo smatrali korisnim za neke sljedeće projekte ovakvog tipa, nastojali smo zapisati i dokumentirati kako bismo druge potakli i olakšali im takva nastojanja. Ako se uhvatite u koštac s takvim ili sličnim projektom, uvijek imajte na umu da učitelj i učenik zajedno stvaraju učenje.

Ovom prilikom još jednom zahvaljujemo studentima na njihovom angažmanu te se nadamo da će budući studenti kolegija Spregnute konstrukcije koristiti i ove materijale u savladavanju predviđenog gradiva.

Damir Markulak

Tihomir Dokšanović

Spregnute konstrukcije (2019./2020.)

ZADATAK: Izrada radnih materijala (nastavna skripta) iz kolegija Spregnute konstrukcije.
TRAJANJE: Cijeli semestar, odnosno za vrijeme trajanja nastave iz kolegija.
SUDIONICI: Studenti koji su upisali kolegij kao autori te nastavnici iz kolegija kao recenzenti.

OBRAZLOŽENJE CILJA I SVRHE: Osnovni je cilj izrada radnih materijala za upoznavanje sa spregnutim konstrukcijama od čelika i betona, kao rezultata suradnje studenata i nastavnika. Naime, nastavnici često uočavaju da studenti na ispitima koriste gotovo iste rečenice (uz njihov ograničen broj) za odgovore na teorijska pitanja - posebno na usmenim ispitima. Ta je činjenica uočljiva kada studenti na neka pitanja odgovaraju netočno, budući da u tom slučaju isti netočni odgovor ponavlja velik broj studenata. Isti je slučaj s razinom razumijevanja materije, tako da se u velikom broju slučajeva studenti zaustavljaju na nekoliko (uglavnom istih) rečenica pri odgovaranju na pitanja, a nisu u stanju na zahtjev objasniti svoj odgovor. Prema riječima samih studenata, za pripremu teorijskog dijela kolegija često koriste „skripta“ koja su spontano pripremali studenti pripremajući se za određeni ispit. Razumljivo je da u to vrijeme nisu u potpunosti savladali nastavno gradivo pa je i vjerojatnost pogrešaka u tako izrađenim materijalima vrlo velika. Po polaganju ispita, izrađena se „skripta“ predaju drugim studentima koji ih eventualno nadopunjavaju, tako da ona za studente često postaju osnovni literaturni izvor za pripremu gradiva.
U tom smislu, uvažavajući želju studenata da materijali za pripremu ispita budu manje opsežni te njima pristupačniji, nastala je ideja da studenti budu (ostanu) autori takvih materijala, no da ih recenziraju predmetni nastavnici. Naime, studenti ne žele, a niti fizički mogu svi biti zainteresirani detaljno proučavati baš svaki kolegij na studiju, što nastavnicima često izmiče iz spoznaje. Na taj način pokušat će se ostvariti zajednički cilj - da studenti na raspolaganju imaju materijale koji su im bliski i iz kojih su voljni učiti, a da oni istovremeno budu korektno napisani bez bitnih pogrešaka.

METODE RADA: Predmetni nastavnici izradit će popis tema za koje će studenti izraditi odgovarajuće sažetke u formi 2 - 3 stranice A4 formata (ovisno o složenosti teme, može biti više ili manje). Teme će biti definirane naslovom te planiranim datumom izlaganja. Studenti biraju 2 - 3 teme i pripremaju ih, u suradnji s nastavnicima, za izlaganje i diskusiju pred ostalim studentima. Izbor željenih tema s pripadnim datumom izlaganja izvršit će se na platformi Google Classroom, i to prema načelu da je tema „potrošena“ nakon kronološki prve evidentirane rezervacije. Krajnji je cilj dobiti sažete i precizne informacije o zadanoj temi u navedenom obimu i formatu, no inačice koje će studenti javno izlagati ne moraju odmah biti takve, odnosno mogu biti detaljnije, ne moraju biti uređene i sl. Naime, u fazi izlaganja/diskusije cilj je prepoznati bitne informacije, diskutirati o njima te u konačnici zajednički formirati naputak nositelju teme kako da ju konačno uobliči. U tom je smislu poželjno da se za konačnu inačicu dokumenta, koja će se „uložiti“ u publikaciju, koriste izvorni crteži i tablice (osim fotografija čiji će se izvori citirati) te da se propisano uredi kako bi se zadržao ujednačen prijelom (predložak u .docx formatu bit će dostupan na stranicama predmeta). Ovako pripremljene, izložene i konačno obrađene teme studentima se priznaju kao teorijski dijelovi kolokvija, odnosno usmenog ispita. Stoga je poželjno birati teme koje su obuhvaćene jednim kolokvijem (prvim ili drugim), najbolje koje su i terminski bliske, kako bi se lakše moglo evidentirati ispunjavanje obveza. Međutim, studenti mogu pristupiti usmenom ispitu ako nisu zadovoljni dobivenom ocjenom ili to žele.

POPIS TEMA

R. br.	NASLOV	STUDENT
1.	Specifičnosti projektiranja spregnutih greda u zgradama – preporučeni raster, razredba presjeka i provjere za GSN.	**Ivan Vrdoljak**
2.	Modeliranje spregnutih konstrukcija za proračun	**Ana Perić**
3.	Utjecaj dugotrajnih deformacija betona na spregnute konstrukcije	**Stjepan Boduljak**
4.	Plastična otpornost poprečnih presjeka na savijanje	**Stjepan Boduljak**
5.	Elastična otpornost poprečnih presjeka na savijanje	**Tin Vujčić**
6.	Otpornost poprečnog presjeka na vertikalni posmik i međudjelovanje savijanja i posmika.	**Nikola Lucić**
7.	Bočno-torzijsko izvijanje spregnutih nosača	**Manda Lucić**
8.	Posmični moždanici općenito i njihova zadaća. Moždanici s glavom.	**Valentina Jurić**
9.	Posmični spoj i konstrukcijske preporuke za njegovo ostvarivanje	**Benjamin Pervan**
10.	Uzdužni posmik u betonskoj ploči	**Ana Perić**
11.	Granično stanje uporabljivost kod spregnutih greda	**Manda Lucić**
12.	Vrste spregnutih stupova i pregled proračunskih metoda	**Valentina Jurić**
13.	Otpornost spregnutih stupova na razini poprečnog presjeka	**Benjamin Pervan**
14.	Otpornost spregnutih stupova na tlak	**Antonia Bošnjak**
15.	Otpornost spregnutih stupova na tlak i savijanje	**Antonia Bošnjak**
16.	Spregnute ploče s profiliranim limovima za zgrade – sastavni dijelovi, način ostvarivanja sprezanja, konstrukcijsko oblikovanje.	**Nikola Lucić**
17.	Analiza djelovanja na spregnute ploče i njihovo konstrukcijsko ponašanje	**Tin Vujčić**
18.	Otpornost poprečnih presjeka spregnutih ploča	**Ivan Vrdoljak**
19.	Otpornost spregnutih ploča na uzdužni posmik	**Benjamin Pervan**

Nakon izlaganja tema predviđeni su diskusija, pregled materijala, mrežni kviz znanja.

RADNE BILJEŠKE:

- svaki član tima koji ne izlaže treba pratiti izlaganje i na kraju komentirati, postaviti pitanje i sl.
- nakon predavanja svaki student komentira i daje svoje prijedloge ili kritike
- nakon što svaki student iznese svoje mišljenje pred cijelom timom, nastavnik „zaokruži" cjelinu i pomogne istaknuti najvažnije aspekte – koristeći ploču, prikazane prezentacije i sl.
- tema diskusije nisu samo stručni aspekti obrađene teme, nego i način obrade teme – prezentacijske vještine, interakcija te tehnička provedba
- pri sastavljanju pisanog materijala, studenti uče uočiti važno iz šireg opsega dostupnih materijala, sažeti to, pravilno citirati, složiti materijale na odgovarajući način i sl., a to se sve odvija kroz najmanje dva kruga recenziranja njihovih materijala
- nastavnici se pri recenziranju trude što manje utjecati na stil obrade teme, puštajući da on odgovara trenutačnim spoznajama i sklonostima samih studenata, kako bi konačni materijali bili u skladu s postavljenim ciljem projektne nastave.

UOČENO TIJEKOM NASTAVE:

- Studenti su vrlo kritični jedni prema drugima i potpuno otvoreno komentiraju način izlaganja, stilove predavanja i slično.
- Studenti se u izlaganjima fokusiraju na najbitnije informacije i najčešće koriste od 15 do 25 minuta za izlaganje materije.
- Studenti se češće odlučuju za korištenje gotovih grafičkih priloga iz postojećih materijala, a puno rjeđe za samostalnu izradu tih materijala.
- Tek nekolicina studenata je tijekom izlaganja svoje teme nastojala ostvariti interakciju s ostalim studentima.
- U prezentiranim materijalima primijećena je tendencija korištenja starije literature bez pravovaljane provjere ispravnosti, odnosno studenti se često zadovoljavaju pronalaženjem odgovarajućih online materijala u skladu sa svojim pretraživanjem, no rjeđe obraćaju pozornost na možebitnu zastarjelost tih materijala.
- Studenti su u pripremama materijala češće koristili norme za proračun konstrukcija (dostupne preko digitalnog repozitorija hrvatskih normi HZN4You) i upoznali se s njihovom strukturom i načinom obrade problematike, što je pozitivan trend s obzirom na to da se radi o prvotnom izvoru informacija koje su sadržane u većini knjiga koje obrađuju problematiku proračuna konstrukcija.
- U nekim se diskusijama moglo čuti da studenti radije dolaze na predavanja kada znaju da predaju njihove kolege te su dodatno zainteresirani vidjeti kako su oni priredili svoje seminare.
- S obzirom na to da je većina studenata imala po dvije teme koje su terminski raspoređene na početku, odnosno sredinom ili krajem semestra, primijećeno je kako je druga (ili treća) prezentacija istog studenta bitno kvalitetnija od prve, kako u smislu obrade materijala tako i u načinu prezentiranja; slično se može zaključiti i za studente koji su prezentirali teme u kasnijim terminima.
- U diskusijama je uočeno da studenti lakše prepoznaju gradivo iz drugih kolegija koje su ranije slušali i povezuju ga s trenutačnim gradivom, što je većini nastavnika zapravo teže, jer ne poznaju tako dobro sadržaj drugih kolegija (odnosno, što je pojedini nastavnik naglasio u temi koja se sada obrađuje u ovom kolegiju).
- Iz diskusije je zamijećeno da studenti uočavaju da je neke teme jako teško „zanimljivo" prezentirati, dok su neke druge puno podesnije; taj zaključak pokušali smo prokomentirati i za određene kolegije u cjelini.

Rezultati provjere na kraju semestra

Ukupni rezultati	
Ukupno točnih odgovora (%)	71,67 %
Ukupno netočnih odgovora (%)	28,33 %

Povratna informacija					
Broj odgovora	7				
Koliko Vam je ovo iskustvo bilo ugodno? (od 5)	5,00 od 5				
Jeste li nešto naučili?	100,00 % Da		0,00 % Ne		
Biste li preporučili?	100,00 % Da		0,00 % Ne		
Kako se osjećate?	◉	85,71 % Pozitivno	◉	14,29 % Neutralno	◉	0,00 % Negativno

1. Sprezati se mogu samo elementi izrađeni od različitih materijala.

Točan odgovor	Ne	
Točnih odgovora	88,89 %	
Sažetak pitanja		
Mogućnosti	Da	Ne
Broj odgovora	8	1
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	4,58	3,90

2. Učinak sprezanja se očituje u _____.

Točan odgovor	ograničenju pomaka na krajevima nosača			
Točnih odgovora	100,00 %			
Sažetak pitanja				
Mogućnosti	smanjenju krutosti presjeka	povećanju nosivosti na poprečnu silu	ograničenju pomaka na krajevima nosača	ograničenju duktilnosti nosača
Broj odgovora	0	0	9	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	-	12,64	-

3. Koja je fraza povezana s uzimanjem u obzir učinaka raspucavanja betona?

Točan odgovor	Smanjenje negativnih momenata nad unutarnjim ležajevima			
Točnih odgovora	88,89 %			
	Sažetak pitanja			
Mogućnosti	Uzdužna posmična sila	Zaostajanje posmika	Sredstva za sprezanje	Smanjenje negativnih momenata nad unutarnjim ležajevima
Broj odgovora	0	1	0	8
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	7,90	-	10,54

4. Zbog dugotrajnih deformacija betona se naprezanja u čeličnom dijelu nosača _____.

Točan odgovor	povećavaju		
Točnih odgovora	88,89 %		
	Sažetak pitanja		
Mogućnosti	povećavaju	smanjuju	ne mijenjaju
Broj odgovora	8	0	1
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	6,76	-	3,80

5. Redoslijed izvođenja spregnute konstrukcije važan je kod proračuna nosača prema teoriji plastičnosti.

Točan odgovor	Ne	
Točnih odgovora	22,22 %	
	Sažetak pitanja	
Mogućnosti	Da	Ne
Broj odgovora	7	2
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	8,83	10,65

6. Elastični proračun s djelomičnom preraspodjelom smanjuje moment za iznos koji NE ovisi o?

Točan odgovor	Rasponu nosača			
Točnih odgovora	77,78 %			
	Sažetak pitanja			
Mogućnosti	Odabranoj krutosti presjeka u modelu (EI_1 ili EI_2)	Razredu poprečnog presjeka	Rasponu nosača	Kvaliteti konstrukcijskog čelika
Broj odgovora	0	2	7	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	23,30	19,09	-

7. Pri proračunu plastične otpornosti spregnutog presjeka na savijanje vrijedi sljedeća pretpostavka

Točan odgovor	sva vlakanca po visini presjeka dosežu proračunske čvrstoće			
Točnih odgovora	11,11 %			
Sažetak pitanja				
Mogućnosti	neutralna os određuje se iz poznavanja naprezanja na rubovima	beton u vlaku uzima se u obzir	sva vlakanca dosežu proračunske čvrstoće	puzanje i skupljanje betona uzima se u obzir
Broj odgovora	5	2	1	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	26,82	9,05	9,60	-

8. Stupanj sprezanja može se svesti na omjer broja ugrađenih moždanika i broja moždanika potrebnih za puno sprezanje.

Točan odgovor	Da	
Točnih odgovora	100,00 %	
Sažetak pitanja		
Mogućnosti	Da	Ne
Broj odgovora	9	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	2,43	-

9. Odaberi tvrdnju relevantnu kod proračuna elastične otpornosti spregnutih nosača na savijanje.

Točan odgovor	Redoslijed građenja bitan je kod proračuna			
Točnih odgovora	55,56 %			
Sažetak pitanja				
Mogućnosti	Nije moguće primijeniti za presjeke 1. i 2. razreda	Redoslijed građenja bitan je kod proračuna	Naprezanja se određuju isključivo preko čeličnog dijela presjeka	Skupljanje i puzanje nije potrebno uzeti u obzir
Broj odgovora	1	5	1	2
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	19,40	13,66	20,10	23,45

10. Odaberi NETOČNU tvrdnju vezanu uz bočno-torzijsko izvijanje spregnutih nosača.

Točan odgovor	Kritično je u sredini raspona			
Točnih odgovora	77,78 %			
	Sažetak pitanja			
Mogućnosti	Kritično je u sredini raspona	Postupak proračuna sličan je postupku kod čeličnih konstrukcija	Model za proračun je obrnuti "U" okvir	Pri proračunu je potrebno znati način izgradnje
Broj odgovora	7	0	0	2
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	16,27	-	-	16,35

11. Razred spregnutog poprečnog presjeka utječe na raspored moždanika.

Točan odgovor	Da	
Točnih odgovora	33,33 %	
	Sažetak pitanja	
Mogućnosti	Ne	Da
Broj odgovora	6	3
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	9,75	5,00

12. Pri dokazu otpornosti na uzdužni posmik između betonskog i čeličnog dijela nosača NE sudjeluje _____.

Točan odgovor	uzdužna armatura			
Točnih odgovora	55,56 %			
		Sažetak pitanja		
Mogućnosti	betonska ploča	uzdužna armatura	moždanici	poprečna armatura
Broj odgovora	1	5	0	3
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	2,60	13,38	-	17,43

13. Otpornost presjeka spregnutog stupa na tlak moguće je povećati zbog troosnog naprezanja za:

Točan odgovor	okrugle šuplje presjeke ispunjene betonom			
Točnih odgovora	100,00 %			
		Sažetak pitanja		
Mogućnosti	pravokutne šuplje presjeke ispunjene betonom	djelomično ubetonirane presjeke	okrugle šuplje presjeke ispunjene betonom	potpuno ubetonirane presjeke
Broj odgovora	0	0	9	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	-	8,93	-

14. Kojoj ordinati na dijagramu međudjelovanja M + N za poprečni presjek stupa na apscisi odgovara $M_{max,Rd}$?

Točan odgovor	0,5 $N_{pm,Rd}$
Točnih odgovora	100,00 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	$N_{pl,Rd}$	$N_{pm,Rd}$	0,5 $N_{pm,Rd}$
Broj odgovora	0	0	9
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	-	9,00

15. Pripadajući dio V_{Ed} koji djeluje na čelični dio spregnutog presjeka stupa ovisi o raspodjeli $M_{pl,Rd}$ na čelični dio.

Točan odgovor	Da
Točnih odgovora	88,89 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	Ne	Da
Broj odgovora	1	8
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	17,30	13,45

16. Veličina udjela konstrukcijskog čelika u nosivosti spregnutog presjeka utječe na otpornost stupa na M + N tako da:

Točan odgovor	manji udio povećava $M_{max,Rd}$
Točnih odgovora	66,67 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	veći udio povećava $M_{pl,Rd}$	manji udio povećava $M_{pl,Rd}$	veći udio povećava $M_{max,Rd}$	manji udio povećava $M_{max,Rd}$
Broj odgovora	0	0	2	6
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	-	28,25	25,52

17. Pojednostavnjena metoda proračuna stabilnosti spregnutih stupova korištenjem krivulja izvijanja moguća ja za _____.

Točan odgovor	stupove opterećene osnim tlakom
Točnih odgovora	33,33 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	stupove opterećene savijanjem	stupove opterećene osnim tlakom	stupove opterećene tlakom i savijanjem	stupove opterećene savijanjem i posmikom
Broj odgovora	0	3	6	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	7,67	13,45	-

18. Odaberi istinitu tvrdnju povezanu s krutošću spregnutih stupova.

Točan odgovor	Razlikuju se dvije krutosti, $(EI)_{eff}$ i $(EI)_{eff,II}$
Točnih odgovora	100,00 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	Krutost je jednolika duž duljine	Razlikuju se dvije krutosti, $(EI)_{eff}$ i $(EI)_{eff,II}$	Učinci dugotrajnih djelovanja zanemaruju se pri određivanju krutosti	Pojednostavnjeni postupak proračuna može se uvijek primijeniti
Broj odgovora	0	9	0	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	-	15,28	-	-

19. Posmični se spoj između čeličnog lima i betonskog dijela spregnute ploče prema HRN EN 1994-1-1 NE može ostvariti

Točan odgovor	prirodnim prianjanjem između lima i betona
Točnih odgovora	77,78 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	prirodnim prianjanjem između lima i betona	Razlikuju se dvije krutosti, $(EI)_{eff}$ i $(EI)_{eff,II}$	zatvorenim oblikom lima	deformiranjem rebara na krajevima lima zatvorenog oblika
Broj odgovora	7	0	2	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	6,66	-	13,65	-

20. Eksperimentalna ispitivanja spregnute ploče potrebna su zbog određivanja

Točan odgovor	otpornosti na uzdužni posmik
Točnih odgovora	66,67 %

Sažetak pitanja

Mogućnosti	otpornosti na savijanje	otpornosti na proboj	otpornosti na uzdužni posmik	otpornosti na vertikalni posmik
Broj odgovora	3	0	6	0
Prosječno vrijeme za odgovor (sekundi)	19,70	-	7,32	-

1 Specifičnosti projektiranja spregnutih greda u zgradama – preporučeni raster, razredba presjeka i provjere za GSN

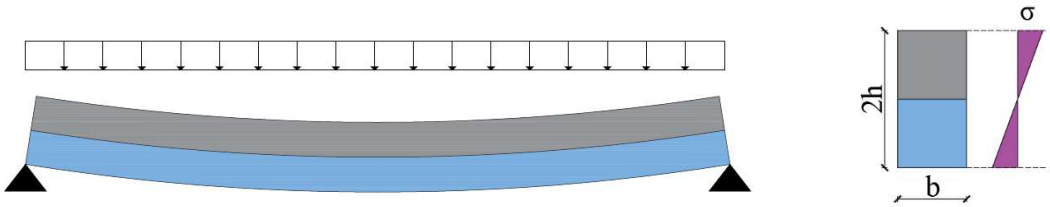
Spregnuti sustav predstavlja sklop sastavljen od elemenata izrađenih od materijala različitih ili jednakih fizikalno-mehaničkih svojstava, povezanih na način da tvore jednu cjelinu. Kako bi se sustav ponašao kao cjelina, ključni zadatak je u potpunosti osigurati preuzimanje posmične sile, odnosno, ne dopustiti relativne pomake između dva povezana elementa (slika 1.1). Na taj način, moment otpora je dvostruko veći i iskorištava se puno veći potencijal oba materijala. Kada, na primjer, dva elementa od istih materijala i jednakog pravokutnog presjeka *b*/*h* jedan na drugom ne bi bili povezani, svaki bi od elemenata preuzimao dio opterećenja proporcionalno svom udjelu u ukupnoj krutosti na savijanje (slika 1.2). Kako bi se ograničili relativni pomaci između elemenata, nužno ih je povezati sredstvima za sprezanje, tzv. moždanicima.

A) Moment otpora nespregnutog sustava (nema posmične veze):

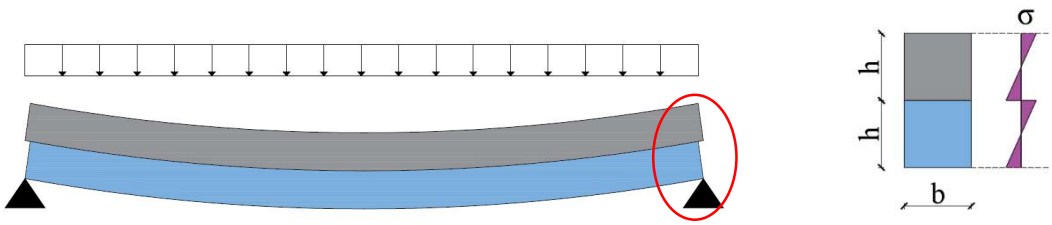
$$W_y = 2 \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot h^2 \tag{1.1}$$

B) Moment otpora spregnutog sustava (potpuna posmična veza):

$$W_y = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{b \cdot (2h)^2}{6} = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h^2 \tag{1.2}$$



Slika 1.1 - Prikaz nosača s punom posmičnom vezom i pripadajući dijagram normalnih naprezanja



Slika 1.2 - Prikaz nosača bez posmične veze i pripadajući dijagram normalnih naprezanja

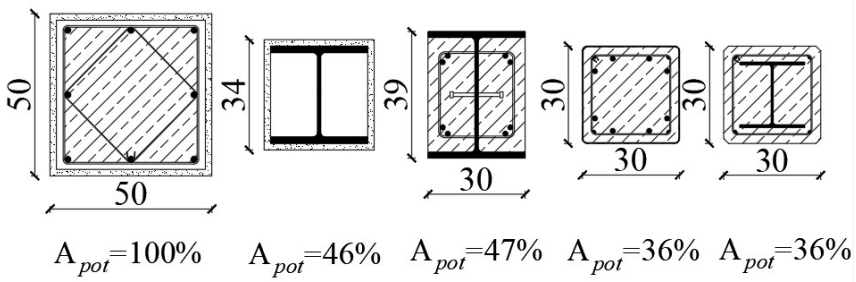
Svaki materijal ima svojih prednosti i nedostataka te se može reći da ne postoji savršeni materijal koji bi zadovoljio sve zahtjeve pri projektiranju i građenju. Beton i čelik su, zbog svojih izraženih prednosti, danas među najzastupljenijim materijalima u građevinarstvu. Naravno, kao i svi drugi materijali, i oni imaju svojih nedostataka, no cilj sprezanja je iskorištavanje najboljih svojstava oba materijala i međusobnom nadopunjavanju. Naime, beton odlično podnosi tlak te je otporniji na požar i koroziju, dok se čelik vrlo

dobro ponaša pri vlačnim naprezanjima i ima vrlo visoku duktilnost. Kombinacijom, odnosno sprezanjem ova dva materijala, omogućuju se premošćivanja većih raspona, tanje međukatne ploče i vitkiji stupovi, dok je izgradnja brža i prilagodljivija u odnosu na konstrukcije od armiranog betona. Kako najveću ulogu u ukupnoj otpornosti imaju čelični profili, proračun spregnutih konstrukcija najviše se oslanja na norme za proračun čeličnih konstrukcija (HRN EN 1993-1-1 [1]). To također objašnjava zašto se spregnutim konstrukcijama najčešće bave inženjeri specijalizirani za čelične konstrukcije [2].

1.1 Prednosti

Osnovna prednost spregnutog nosača je povećanje krutosti na savijanje. Porastom momenta tromosti znatno se smanjuju progibi nosača, dok se u nešto manjoj mjeri povećava moment otpora. Također, zbog smanjenja ukupnog opterećenja stvorena je mogućnost primjene za veće raspone. Kako se sprezanjem krutost elementa povećava, mogu se birati manje konstrukcijske dimenzije. Ako je potrebno dobiti racionalnije dimenzije, moguće je pri izvedbi privremeno poduprijeti nosač. Kada se konstrukcija izvodi bez prethodnog podupiranja, čelični nosač u početku mora preuzeti vlastitu težinu i težinu betona koji nije dosegao svoju potrebnu čvrstoću, dok se sprezanje aktivira samo za dodatno stalno i korisno opterećenje. U slučaju podupiranja, čeličnom nosaču će podupore pomoći nositi konstrukciju dok beton ne dosegne potrebnu čvrstoću, a zatim se skidaju. Tada je spregnuti nosač sposoban preuzeti vlastitu težinu, dodatna stalna i korisno opterećenje. Na taj način dimenzije čeličnog nosača mogu biti manje u odnosu na slučaj bez podupiranja. Treba uzeti u obzir da podupiranje nekada nije moguće izvesti zbog prirodne prepreke (npr. rijeke).

Kod spregnutih stupova osnovu čine čelični profili čija je osnovna zadaća preuzimanje opterećenja. Spregnuti stupovi mogu se izvesti na nekoliko načina: čelični profili mogu biti djelomično obloženi betonom, potpuno ubetonirani ili služe kao izgubljena oplata (šuplji presjeci koji se ispunjavaju betonom). Spregnuti stupovi imaju puno manje dimenzije od armiranobetonskih stupova i mogu biti raznih oblika (slika 1.3) [2].

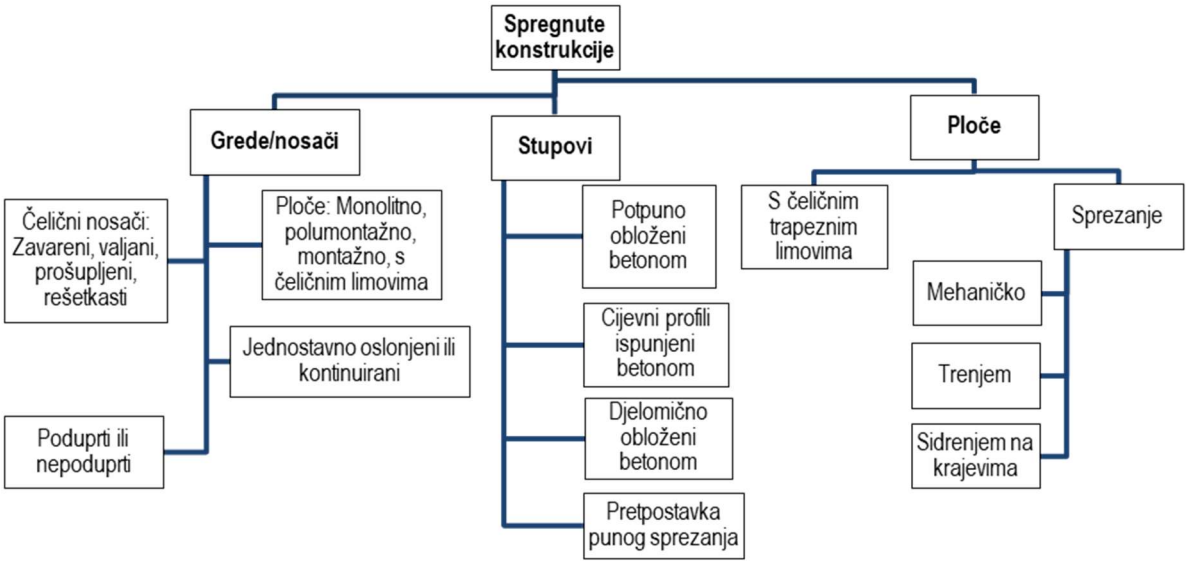


Slika 1.2 - Usporedba različito oblikovanih stupova unutar zgrade za jednake uvjete

Spregnute ploče najčešće podrazumijevaju kombinaciju betona i čeličnih profiliranih limova te se vrlo dobro nadopunjuju sa spregnutim gredama i stupovima. Njihova funkcija je višestruka, imaju ulogu izgubljene oplate tijekom betoniranja i očvrsnuća betona, bočno pridržavaju čelične nosače, sigurna su radna platforma i po očvrsnuću betona sudjeluju u prenošenju opterećenja zajedno s betonskim dijelom i armaturom. Profilirani limovi mogu biti različitih oblika, a sprezanje betona i čelika osigurava se aktiviranjem prionjivosti, trenja i/ili specifičnog mehaničkog povezivanja [2].

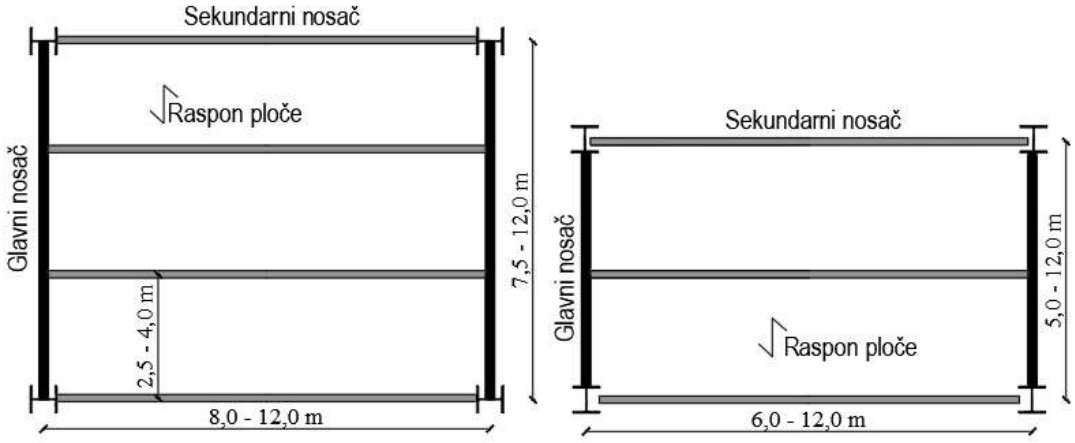
1.2 Spregnute konstrukcije i preporuke

Ovisno o ulozi koju element preuzima u konstrukciji, razlikujemo grede, stupove i ploče. Svaki od navedenih elemenata može biti različitih oblika i izveden na različite načine. Uobičajene vrste spregnutih konstrukcija prikazane su na slici 1.4 [2].



Slika 1.3 - Vrste spregnutih konstrukcija

Kao i kod čeličnih konstrukcija, koncept izvođenja zasniva se na korištenju rastera glavnih i sekundarnih nosača, preko kojih je položena betonska ili spregnuta ploča. Ovisno o uvjetima opterećenja i zahtijevanoj požarnoj otpornosti, debljine ploča trebale bi se kretati između 12 i 18 cm [2]. Razredi betona kod spregnutih konstrukcija najčešće su C25/30 i C30/37, a čelici razreda S355 [2]. Kao što je ranije spomenuto, najčešće se koriste moždanici s glavom, promjera 19 ili 22 mm. Ako je greda slobodno oslonjena, preporučuju se visine spregnutih nosača u intervalu od *L*/20 do *L*/18 za sekundarne nosače te *L*/18 – *L*/15 za primarne ploče, gdje je *L* raspon nosača [2]. Visine za kontinuirane grede trebale bi se kretati od *L*/25 do *L*/22 za sekundarne, odnosno *L*/22 – *L*/18 za primarne nosače [2]. Uobičajeni rasponi nosača prikazani su na slici 1.5.

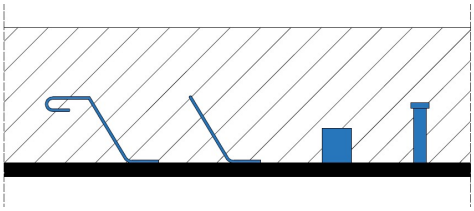


Slika 1.4 - Preporučeni rasponi nosača

1.3 Posmični moždanici

Kako je već ranije spomenuto, kontakt između čelika i betona najčešće se osigurava različitim oblicima moždanika. Osnovna zadaća moždanika je onemogućiti proklizavanja između čeličnog i betonskog dijela na kontaktnoj plohi pa je logično da će ponašanje posmične veze ovisiti o broju i razmaku između moždanika. Oni se ugrađuju na većim ili manjim razmacima pa se posmična sila prenosi diskontinuirano.

Moždanici se dijele na krute i duktilne. Kod krutih moždanika pomaci nisu dozvoljeni, osim zbog deformacija betona, dok se kod duktilnih moždanika ostvaruje elastoplastično ponašanje koje dopušta određene deformacije. Postoji više vrsta moždanika, a neki od njih su prikazani na slici 1.6. U današnje vrijeme, zbog jasnog i povoljnog konstrukcijskog ponašanja te jednostavne ugradnje, moždanici s glavom su najkorišteniji. Ugradnja moždanika s glavom izvodi se poluautomatski pomoću posebnog pištolja. Ugradnja moždanika odvija se vrlo brzo te uz moždanik dolazi i prsten koji služi za izoliranje spoja od vanjskih utjecaja.



Slika 1.5 - Vrste moždanika

1.4 Razredba poprečnih presjeka

Raspored unutarnjih sila V, N i momenta savijanja M pri graničnom stanju nosivosti možemo odrediti po teoriji elastičnosti ili po teoriji plastičnosti. Koju ćemo teoriju odabrati za globalni proračun ovisi ponajviše o rotacijskoj sposobnosti poprečnog presjeka. Plastični proračun dozvoljava maksimalnu preraspodjelu momenata savijanja duž raspona sve do stvaranja tzv. kinematičkog lanca, odnosno do stvaranja posljednjeg plastičnog zgloba u konstrukciji. Razlikujemo četiri razreda poprečnog presjeka, a osnovne karakteristike razreda su [3]:

- Razred 1 - plastični poprečni presjek koji dozvoljava najveću rotaciju. Za globalni proračun može se primijeniti teorija plastičnosti.
- Razred 2 - kompaktni poprečni presjeci koji imaju nešto ograničenu plastičnu rotaciju. Pretpostavlja se samo rotacija u presjeku, odnosno dozvoljava se primjena jednog plastičnog zgloba na mjestu maksimalnog momenta savijanja. Globalni proračun provodi se po teoriji elastičnosti, a analiza otpornosti po teoriji plastičnosti.
- Razred 3 - polukompaktni presjeci. U radu sudjeluje puni presjek, ali samo s elastičnom rotacijom, odnosno granična naprezanja s plastifikacijom mogu se doseći samo na rubovima presjeka. Primjenjuje se elastični proračun za djelovanja i otpornost presjeka.
- Razred 4 - vitki presjeci, za koje je mjerodavna teorija elastičnosti. Presjeci se smanjuju na tzv. proračunsku površinu zbog izbočivanja, a proračun se dalje provodi kao za 3. razred.

Svrstavanje poprečnog presjeka spregnutog elementa u određeni razred ovisi o lokalnoj vitkosti pojasnice (c/t) i hrpta (c/t) čeličnog nosača, položaja plastične neutralne osi i stupnja armiranja betonske pojasnice. Kod poprečnih presjeka 1. i 2. Razreda, uz ograničenja lokalnih vitkosti pojasnice i hrpta,

potrebno je za betonsku pojasnicu u vlačnoj zoni osigurati potrebnu duktilnu armaturu (razreda B ili C). Minimalna površina armature A_s prikazana je izrazom (1.3), a pripadni faktor izrazom (1.4) [4]:

$$A_s \geq \rho_s \cdot A_c \tag{1.3}$$

$$\rho_s = \delta \frac{f_y}{235} \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{sk}} \sqrt{k_c} \tag{1.4}$$

gdje su:

- A_c površina poprečnog presjeka betonske pojasnice unutar proračunske širine
- f_y nominalna (karakteristična) vrijednost granice popuštanja čelika u N/mm^2
- f_{sk} karakteristična vrijednost granice popuštanja armature u N/mm^2
- f_{ctm} srednja vrijednost vlačne čvrstoće betona
- k_c koeficijent koji uzima u obzir raspodjelu naprezanja u presjeku prije raspucavanja betona
- δ faktor koji iznosi 1,1 ili 1,0, ovisno o razredu poprečnog presjeka.

Kako postoje određene posebnosti razredbe poprečnih presjeka spregnutih konstrukcija u odnosu na čelične konstrukcije, razlikuje se:

A) razredba spregnutog poprečnog presjeka kod kojeg čelični profil nije obložen betonom
B) razredba spregnutog poprečnog presjeka kod kojeg je čelični profil obložen betonom.

Slučaj A)

Za čeličnu tlačnu pojasnicu koja bi inače bila višeg razreda, pretpostavlja se da pripada 1. ili 2. razredu zbog pridržanja moždanicima, ako je zadovoljeno ograničenje razmaka moždanika od ruba tlačne pojasnice [4]: za punu betonsku ploču prema izrazu (1.5); za ploču izvedenu profiliranim čeličnim limom prema izrazu (1.6); za ploču izvedenu profiliranim čeličnim limom prema izrazu (1.7).

$$e_L \leq 22 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y} \tag{1.5}$$

$$e_L \leq 15 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y} \tag{1.6}$$

$$e_Q \leq 9 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y} \tag{1.7}$$

Slučaj B)

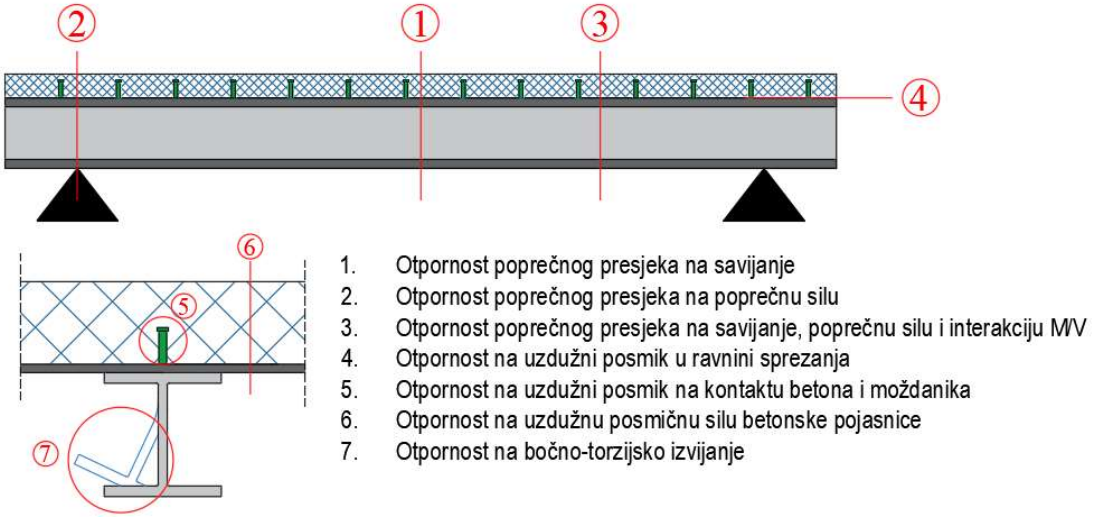
Kod spregnutih poprečnih presjeka, gdje je čelični profil obložen betonom, zahtijeva se da taj beton spriječi izbočivanje hrpta. Radi toga potrebno je postaviti uvjete kojima se osigurava dobra povezanost čeličnog i betonskog dijela [4]:

- beton koji oblaže čelični profil armiran u uzdužnom smjeru
- $0{,}8 \leq b_c/b \leq 1{,}0$
- vilice provučene kroz rupe na čeličnom profilu i/ili moždanici zavareni na hrbat
- razmak moždanika ili vilica provučenih kroz hrbat u uzdužnom smjeru ≤ 400 mm
- razmak između čeličnih pojasnica i moždanika ≤ 200 mm
- kod čeličnih profila viših od 400 mm, gdje su sredstva za povezivanje s hrptom postavljena u dva ili više redova, dozvoljen je naizmjenični raspored.

1.5 Granična stanja

Kao i kod konstrukcija od drugih materijala, spregnute konstrukcije nužno je provjeravati na granično stanje nosivosti i uporabljivosti. Ako čelični nosač pri izvođenju nije poduprt, potrebno ga je proračunati po pravilima za čelične konstrukcije za fazu betoniranja. Kod spregnutih nosača izloženih savijanju (greda), potrebno je provesti provjere na razini otpornosti kritičnih poprečnih presjeka, otpornosti na uzdužni posmik, otpornosti na bočno-torzijsko izvijanje te otpornosti na posmično izbočivanje i otpornosti hrpta na poprečne sile, na mjestima gdje je to simbolično naznačeno na slici 1.7.

Provjera graničnog stanja uporabljivosti je zahtjevnija kod spregnutih konstrukcija u odnosu na klasične čelične konstrukcije. Kao i kod ostalih konstrukcija, i ovdje je provjera vezana za funkcionalnost, vibracije i deformacije konstrukcije. Za provjere se primjenjuje elastični proračun, uz nužno uzimanje u obzir specifičnosti spregnutih konstrukcija poput pada krutosti zbog raspucavanja betona, učinka dugotrajnih deformacija zbog skupljanja i puzanja, ograničenja veličine pukotina i slično.



Slika 1.6 - Provjere za GSN [2]

2 Modeliranje spregnutih konstrukcija za proračun

Prema normi HRN EN 1994-1-1 [5], učinci djelovanja na spregnute konstrukcije mogu se proračunavati korištenjem elastičnog globalnog proračuna, nelinearnog globalnog proračuna te krutoplastičnog globalnog proračuna. Budući da su nelinearni globalni proračun i krutoplastični proračun zbog svoje kompleksnosti neprikladni za inženjersku praksu, uglavnom se primjenjuje elastični globalni proračun.

2.1 Elastični globalni proračun

Elastični globalni proračun primjenjuje se za proračun učinaka djelovanja kod poprečnih presjeka spregnutog nosača kojima se otpornost temelji na plastičnoj ili nelinearnoj otpornosti, kod graničnog stanja uporabljivosti uz odgovarajuću korekciju za nelinearne učinke te kod dokaza za granično stanje zamora [2].

Potrebno je uzeti u obzir učinke zbog raspucavanja betona, puzanja i skupljanja betona te načina izvođenja [4]. Važno je napomenuti kako norma HRN EN 1994-1-1 [5] dopušta primjenu elastičnog globalnog proračuna u situacijama kada je proračun otpornosti presjeka temeljen na plastičnoj otpornosti [2].

2.1.1 Deformirana geometrija

Kad govorimo o deformiranoj geometriji, govorimo o odstupanju osi u odnosu na ravnu liniju koja spaja rubne točke elementa, nepreciznosti izvedbe, te o neizbježnim manjim ekscentričnostima prisutnim u priključcima neopterećene konstrukcije.

Učinci deformirane geometrije uzimaju se u obzir primjenom proračuna po teoriji 2. reda, koji se mora primijeniti kada je povećanje reznih sila, uzrokovanih deformiranjem, veće od 10 % u odnosu na vrijednosti proračunane po teoriji 1. reda [2].

2.1.2 Globalne i lokalne nesavršenosti

Pravila za globalne i lokalne nesavršenosti, kao i za velik dio karakteristika spregnutih konstrukcija, velikim se dijelom vežu za normu koja vrijedi za čelične konstrukcije (HRN EN 1993-1-1 [1]). Globalne i lokalne nesavršenosti mogu se uzeti u obzir preko istovrijednih geometrijskih nesavršenosti. Važno je istaknuti da se nesavršenost elementa obavezno mora uzeti u obzir prilikom provjere stabilnosti [2].

2.1.3 Utjecaj ponašanja priključaka

Razlikuju se tri modela priključaka [2]:

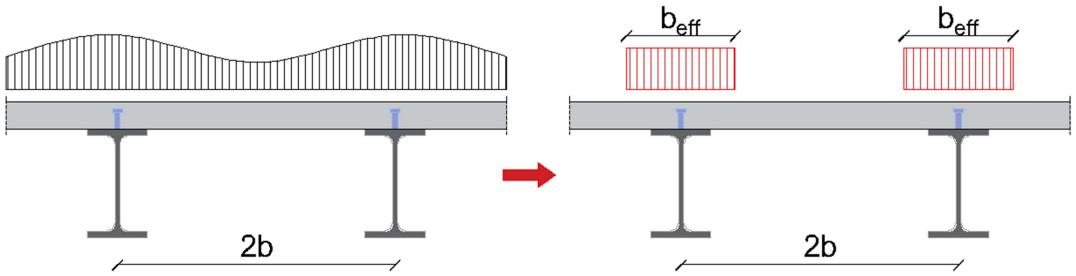
1) jednostavni – smije se pretpostaviti da priključci ne prenose momente savijanja ($M = 0$, $\phi \neq 0$); uglavnom se primjenjuju u čeličnim konstrukcijama
2) djelomično kontinuirani – ponašanje priključaka potrebno je uzeti u obzir u proračunu, jer je $M \neq 0$, $\phi \neq 0$; u spregnutim konstrukcijama najviše se primjenjuje ova grupa priključaka

3) kontinuirani – krutost i/ili otpornost priključka dopušta pretpostavku punog kontinuiteta elemenata u proračunu ($M \neq 0$, $\phi = 0$) → ponekad neekonomično, jer se troši puno čelika za armaturu da bi se osiguralo planirano ponašanje.

Učinak ponašanja priključaka na raspodjelu unutarnjih sila i momenata u konstrukciji općenito se može zanemariti, osim ako su takvi učinci znatni, što je slučaj upravo kod primjene djelomično kontinuiranih priključaka [2].

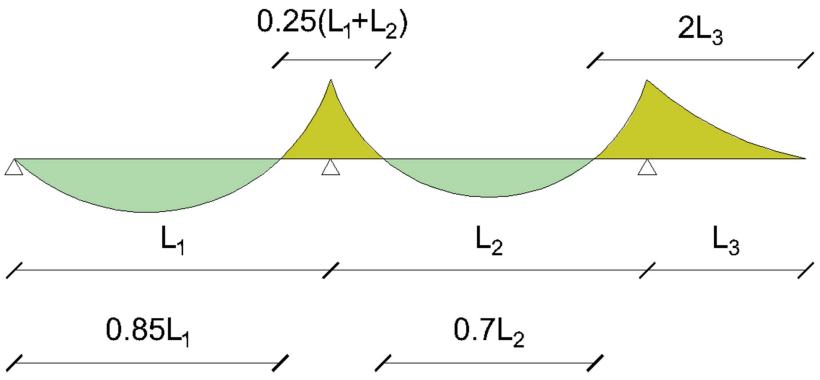
2.2 Zaostajanje posmika, proračunska širina betonske ploče

Prijenos posmične sile između čeličnog nosača i betonske ploče u potpunosti će aktivirati ploču samo ako je njezina širina između susjednih nosača relativno mala, što u praksi obično nije slučaj. Stoga raspodjela naprezanja u ploči nije jednolika (odgovara paraboli 4. stupnja) te ovisi o rasponu, vrsti opterećenja i rubnim uvjetima. U praktičnim se proračunima oni uzimaju u obzir konceptom proračunske širine, kojom se za globalni elastični proračun pretpostavlja jednoliko naprezanje na širini b_{eff} (slika 2.1) [2].



Slika 2.1 - Zamjena nejednolike raspodjele naprezanja jednolikim naprezanjem na proračunskoj širini betonske ploče

Prema normi HRN EN 1994-1-1 [5], za određivanje proračunske širine betonske ploče primjenjuje se jednostavan proračunski model prema proračunskim rasponima nosača L_e (razmacima nul-točaka momentnog dijagrama) [4]. Na primjeru kontinuiranog nosača na slici 2.2, prikazani su proračunski rasponi.



Slika 2.2 - Proračunski rasponi nosača na primjeru kontinuiranog nosača

Ovisno o području na nosaču, proračunska širina betonske ploče određuje se pomoću dva različita izraza [4]:

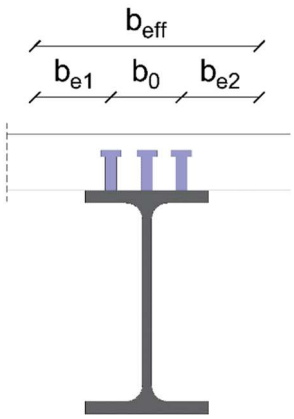
1) Područje u polju i nad središnjim osloncima prema izrazu (2.1), u skladu sa slikom 2.3:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei} = b_0 + b_{e1} + b_{e2} \tag{2.1}$$

$$b_{ei} = \min \begin{cases} \frac{L_e}{8} \\ b_i \end{cases} \tag{2.2}$$

gdje su:

- b_0 poprečni razmak između moždanika
- b_{ei} vrijednost proračunske širine pojasnice sa svake strane hrpta – određuje se prema (2.2)
- L_e približan razmak između nul-točaka dijagrama momenata savijanja
- b_i razmak od moždanika do točke u sredini između susjednih hrptova, mjereno u polovici visine betonske pojasnice.



Slika 2.3 - Veličine potrebne za određivanje b_{eff}

2) Područje krajnjeg oslonca prema izrazu (2.3).

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i b_{ei} = b_0 + \beta_1 b_{e1} + \beta_2 b_{e2} \tag{2.3}$$

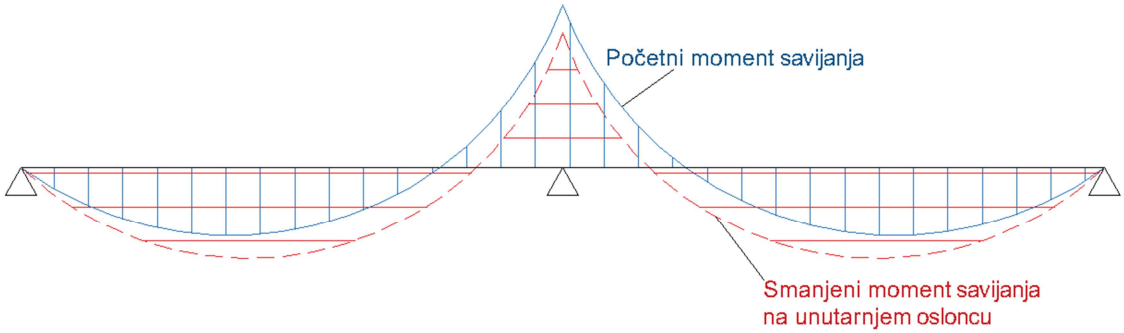
$$\beta_i = \left(0{,}55 + 0{,}025 \frac{L_e}{b_{ei}}\right) \leq 1{,}0 \tag{2.4}$$

2.3 Omjer modula elastičnosti

Za elastične se proračune često koristi omjer modula elastičnosti čelika i betona (*n)*, pomoću kojega se mogu uzimati u obzir učinci dugotrajnih deformacija betona, trajanja opterećenja i mnogi drugi. Na taj se način dva materijala svode na jedan – konkretno, betonska se pojasnica zamijeni istovrijednom čeličnom pojasnicom i tako se provodi daljnji proračun [2] (Poglavlje 3).

2.4 Raspucavanje betona

Raspucavanje betona u području unutarnjih oslonaca, gdje je moment savijanja negativan, i posljedičan gubitak krutosti bitno utječe na raspodjelu momenata savijanja kod kontinuiranih nosača. Dolazi do smanjenja momenta savijanja iznad ležaja jer krutost pada, a posljedično se povećava moment savijanja u polju, pri čemu sustav mora ostati u ravnoteži (slika 2.4) [4].



Slika 2.4 - Smanjenje momenta savijanja

Norma HRN EN 1994-1-1 [5] razlikuje dvije metode uzimanja u obzir učinaka raspucavanja betona o kojima ovisi koliko će se smanjiti negativni moment savijanja [4]:

1. Metoda neraspucanog presjeka – proračun reznih sila uz pretpostavku neraspucanih presjeka → krutost EI_1. Zanemaruje se raspucavanje betona i proračun se provodi s krutošću neraspucanog presjeka EI_1; zbog toga je potrebno više smanjiti moment savijanja iznad ležaja (u odnosu na metodu raspucanog presjeka).
2. Metoda raspucanog presjeka – proračun na raspucanom presjeku → krutost EI_2. Proračun se provodi na raspucanom presjeku s krutosti EI_2 i zbog toga što se modelira realnije stanje, smije se manje smanjiti moment iznad ležaja. Raspucavanje se smije pretpostaviti u području 15 % dužina susjednih raspona nosača, ako je zadovoljena nejednadžba (2.5).

$$\frac{L_{min}}{L_{max}} \leq 0{,}6 \tag{2.5}$$

Smanjenje momenta savijanja ovisi o razredu konstrukcijskog čelika i razredu poprečnog presjeka, jer kada beton raspuca, o kvaliteti i razredu poprečnog presjeka čelika ovisi koliko će čelični nosač moći realno nositi opterećenja. Dopušteni postotci smanjenja negativnog momenta savijanja prikazani su u tablici 2.1 [4].

Tablica 2.1 - Dopušteno smanjenje negativnog momenta savijanja

Metoda proračuna	Razred konstrukcijskog čelika	Razred poprečnih presjeka			
		1	2	3	4
Metoda 1 – neraspucani presjek	S235 S275 S355	40%	30%	20%	10%
	S420 S460	30%	30%	0%	0%
Metoda 2 – raspucani presjek	S235 S275 S355	25%	15%	10%	0%
	S420 S460	15%	15%	0%	0%

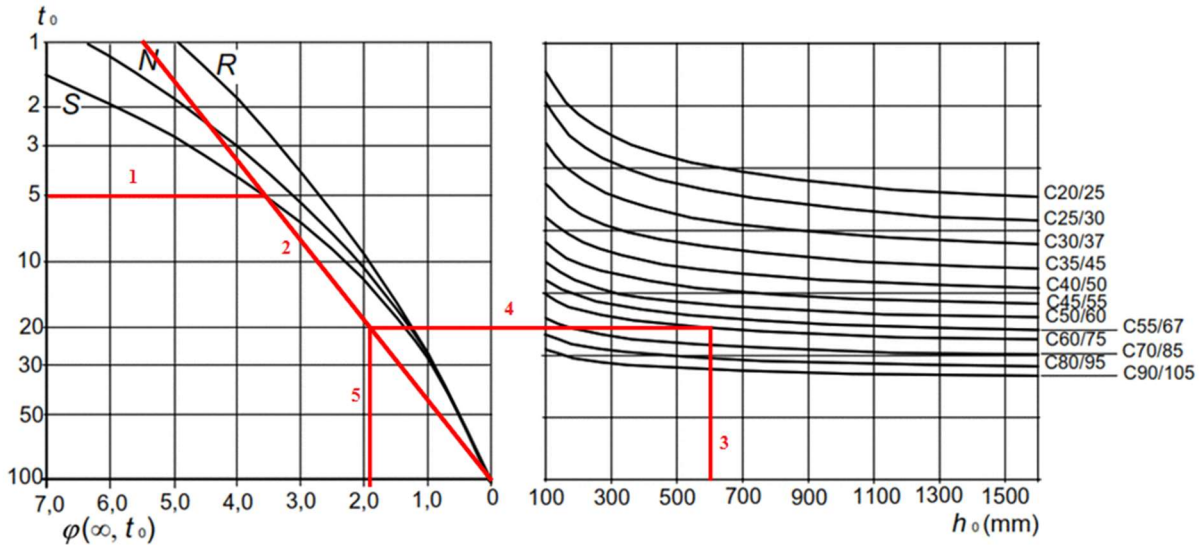
3 Utjecaj dugotrajnih deformacija betona na spregnute konstrukcije

Dugotrajne deformacije betona su skupljanje i puzanje, a te pojave povećavaju konačne deformacije betona nastale od elastičnih deformacija zbog opterećenja. Ove deformacije utječu na spregnute konstrukcije zbog spriječenih slobodnih deformacija betona (postojanje moždanika) koji je podložan puzanju i skupljanju, dok kod čelika nema tih pojava pri ambijentalnoj temperaturi [4].

3.1 Dugotrajne deformacije betona

Puzanje betona je vremenska deformacija koja ovisi o opterećenju, dok skupljanje ne ovisi o opterećenju nego se javlja kao posljedica hidratacije i sušenja betona. Puzanje betona ovisi o relativnoj vlažnosti zraka, dimenzijama betonskog elementa, tlačnoj čvrstoći betona i starosti betona u trenutku početka opterećivanja konstrukcije. Skupljanje betona ovisi o vodocementnom faktoru, sadržaju cementa, vrsti cementa i uvjetima skladištenja [4].

Kako bi se izbjegao složeni proračun viskoznih deformacija betona, koristi se pojednostavnjeni postupak temeljen na koeficijentu puzanja $\varphi\,(t,\, t_0)$ koji uzima u obzir navedene faktore. Za potrebe proračuna spregnutih konstrukcija potrebna je konačna vrijednost koeficijenta puzanja $\varphi\,(\infty,\, t_0)$. Ona se u slučaju linearnog puzanja može očitati iz dijagrama koji se razlikuju ovisno o relativnoj vlažnosti zraka [6]. Na slici 3.1 prikazan je način očitavanja vrijednosti koeficijenta puzanja s dijagrama koji je dan za relativnu vlažnost od 50 %.



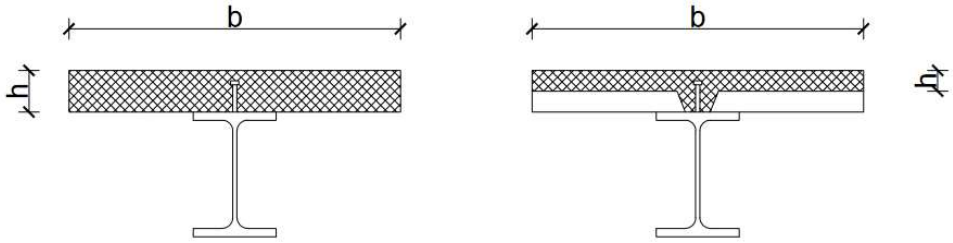
Slika 3.1 - Dijagrami za očitavanje koeficijenta puzanja $\varphi\,(\infty,\, t_0)$ za RH = 50 % [6]

Krivulja s lijevog dijela dijagrama odabire se na temelju cementa korištenog za pripravu betona. Krivulja S je mjerodavna za CEM 32,5 N, krivulja N za CEM 32,5 R i CEM 42,5 N, a krivulja R za CEM 42,5 R, CEM 52,5 N i CEM 52,5 R . Ako je beton u trenutku opterećivanja star više od 100 dana, uzima se tangenta na odgovarajuću krivulju u točki (0,100) [6].

Prividna veličina h_0 u milimetrima računa se prema izrazu (3.1), unutar kojega je površina poprečnog presjeka $A_c = h \cdot b$ u mm^2.

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} \tag{3.1}$$

Opseg poprečnog presjeka koji je izložen sušenju (u izravnom kontaktu sa zrakom) u, za betonsku ploču izvedenu na čeličnim limovima iznosi *b*, a za onaj koji je izveden na oplati koja se naknadno skida jednak je 2*b* [4], gdje je *b* za spregnute ploče širina betonske ploče koja "pripada" jednom čeličnom profilu (slika 3.2).



Slika 3.2 - Geometrijska svojstva presjeka potrebna za određivanje prividne veličine h_0

Kako bi se puzanje moglo smatrati linearnim, najveća tlačna naprezanja u betonu moraju biti manja od 45 % njegove karakteristične tlačne čvrstoće, odnosno: $|\sigma_c| \leq 0{,}45\, f_{ck}(t_0)$, temperatura zraka mora biti između -40 °C i +40 °C, relativna vlažnost između 40 % i 100 %, te trajanje opterećenja treba biti minimalno 70 godina kako bi se ono moglo smatrati konačnim $(t = \infty)$ [6].

Ako naprezanja prelaze $0{,}45\, f_{ck}(t_0)$, potrebno je uzeti u obzir nelinearnost korištenjem nelinearnog koeficijenta puzanja $\varphi_n\,(\infty, t_0)$, međutim u spregnutim je konstrukcijama potreba za time vrlo rijetka [4].

Promjenom deformacije uz stalno opterećenje mijenja se i modul elastičnosti betona te se razlikuju sekantni modul elastičnosti E_{cm} i tangentni modul elastičnosti $E_{c,t}$ u vremenu *t*. Nakon što se odredi koeficijent puzanja, moguće je izračunati tangentni modul elastičnosti betona E_c u trenutku deformacije puzanja $(t = \infty)$, pomoću izraza (3.2) [3].

$$E_c = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} \tag{3.2}$$

Deformacija zbog skupljanja sastoji se od deformacije skupljanja zbog sušenja i deformacije autogenog betona. Prilikom sušenja betona količina vode u betonu se smanjuje te se tako smanjuje i volumen betona, odnosno on se "skuplja". Ova se pojava naziva deformacijom skupljanja zbog sušenja te se označava s ε_{cd}. Također postoji autogena deformacija skupljanja ε_{ca}, koja se razvija tijekom očvršćivanja betona te linearno ovisi o čvrstoći betona [4].

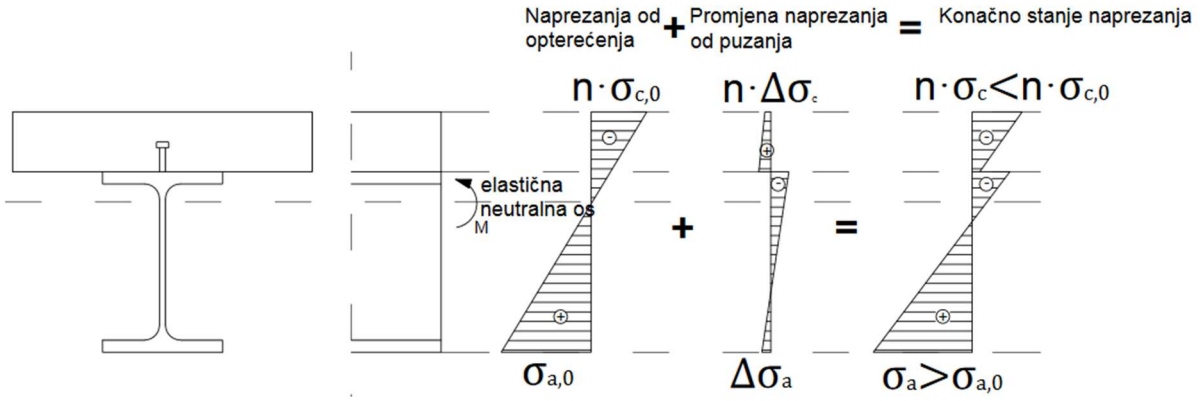
Deformacije zbog skupljanja mogu se izračunati izrazima prikazanim u normi HRN EN 1992-1-1 [6] te je ukupna deformacija skupljanja jednaka njihovom zbroju, u skladu s izrazom (3.3):

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \tag{3.3}$$

Preporuča se da ukupna deformacija skupljanja kod spregnutih nosača bude od $500 \cdot 10^{-6}$ do $200 \cdot 10^{-6}$, ovisno o uvjetima okoline i vrsti betona [4].

3.2 Utjecaj puzanja betona na spregnute konstrukcije

Zbog viskoznih deformacija betona konstantno se mijenja stanje naprezanja poprečnog presjeka te dolazi do preraspodjele naprezanja. S vremenom se, uz stalno opterećenje, deformacija betona povećava te se istovremeno naprezanje u betonu smanjuje, zbog čega se povećava dio naprezanja koji čelik mora preuzeti [4]. Porast naprezanja u čeliku kao posljedica puzanja najveći je u pojasnici koja se nalazi uz betonsku ploču, a nešto manji u drugoj pojasnici. Preraspodjela naprezanja zbog puzanja prikazana je na slici 3.3. Za dimenzioniranje će najčešće biti mjerodavno naprezanje u donjoj pojasnici nosača, ali treba voditi računa i o naprezanju gornje pojasnice kojoj može biti ugrožena nosivost [3].



Slika 3.3 - Prikaz preraspodjele naprezanja zbog puzanja

Učinak puzanja betona se kod primjene elastičnog globalnog proračuna može uzeti u obzir omjerom modula elastičnosti n_L koji ovisi o tipu opterećenja. Ovaj se omjer računa izrazom (3.3) [6]:

$$n_L = n_0 \cdot (1 + \psi_L \cdot \varphi(t, t_0)) \tag{3.3}$$

gdje su:

n_0 omjer modula elastičnosti $n_0 = E_a/E_{cm}$ ili $n_0 = E_{st}/E_{cm}$ za kratkotrajno opterećenje

E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona

$\varphi(t, t_0)$ koeficijent puzanja koji ovisi o starosti betona na početku opterećivanja t_0 i vremenu u kojemu se računa t

ψ_L koeficijent puzanja koji ovisi o vrsti opterećenja.

Normom HRN EN 1994-1-1 [5] propisuju se vrijednosti koeficijenata puzanja ovisno o vrsti opterećenja ψ_L te se nakon određivanja koeficijenta može odrediti smanjeni modul elastičnosti.

Indeks *L* se mijenja ovisno o vrsti opterećenja:

- *L=P* - konstantno stalno opterećenje (eng. *permanent*) $\psi_P = 1{,}10$
- *L=S* - primarno i sekundarno naprezanje zbog skupljanja (eng. *shrinkage*) $\psi_S = 0{,}55$
- *L=PT* - sekundarno naprezanje zbog puzanja, ovisno o vremenu) $\psi_{PT} = 0{,}55$
- *L=D* - naprezanje zbog prednapinjanja pomoću planirano unesene deformacije $\psi_D = 1{,}50$.

Kada je potrebno izračunati učinke više ovih djelovanja istovremeno, određuje se naprezanje u karakterističnim točkama (najviše i najniže točke betona i čelika u poprečnom presjeku) svakog zasebno te se na kraju zbrajaju kako bi dobili konačno stanje naprezanja [4].

Iz toga slijedi izraz (3.4) za smanjeni modul elastičnosti $E_{c,eff}$.

$$E_{c,eff} = \frac{E_a}{n_L} = \frac{E_a}{n_0 \cdot (1 + \psi_L \cdot \varphi(t, t_0))} = \frac{E_{cm}}{1 + \psi_L \cdot \varphi(t, t_0)} \tag{3.4}$$

U zgradarstvu se može uzeti približna vrijednost $E_{c,eff} = E_{cm}/2$, ako se ne radi o zgradama s iznimno velikim stalnim opterećenjem (skladišta, knjižnice) te kada nije u pitanju prednapeti beton [6].

Također su mogući postupci smanjene krutosti na savijanje EI_{eff} i postupak uz određivanje idealnog momenta tromosti $I_{i,L,}$ koji uzima u obzir i armaturu koja se prema HRN EN 1994-1-1 može zanemariti [4].

3.3 Utjecaj skupljanja betona na spregnute konstrukcije

Zbog skupljanja betona kod statički određenih sustava, u poprečnim se presjecima spregnutih konstrukcija javljaju naprezanja od skupljanja koja se nazivaju primarnim naprezanjima, a u konstrukcijskim elementima relativne deformacije i izduženja. Ako je sustav statički neodređen, uz primarna se naprezanja javljaju i dodatna sekundarna naprezanja kao posljedica preraspodjele momenata savijanja u statički neodređenom nosaču [4].

Utjecaji primarnih i sekundarnih naprezanja zbog skupljanja betona u nekim se slučajevima mogu zanemariti, ako se radi o proračunu učinka djelovanja za granično stanje nosivosti, ako su poprečni presjeci 1. ili 2. razreda te ako ne postoji opasnost od bočno-torzijskog izvijanja. Ako jedan od ovih uvjeta nije ispunjen, ti učinci se moraju uzeti u obzir. Za teoriju plastičnosti, utjecaj skupljanja i puzanja općenito nije potrebno uzimati u obzir [4].

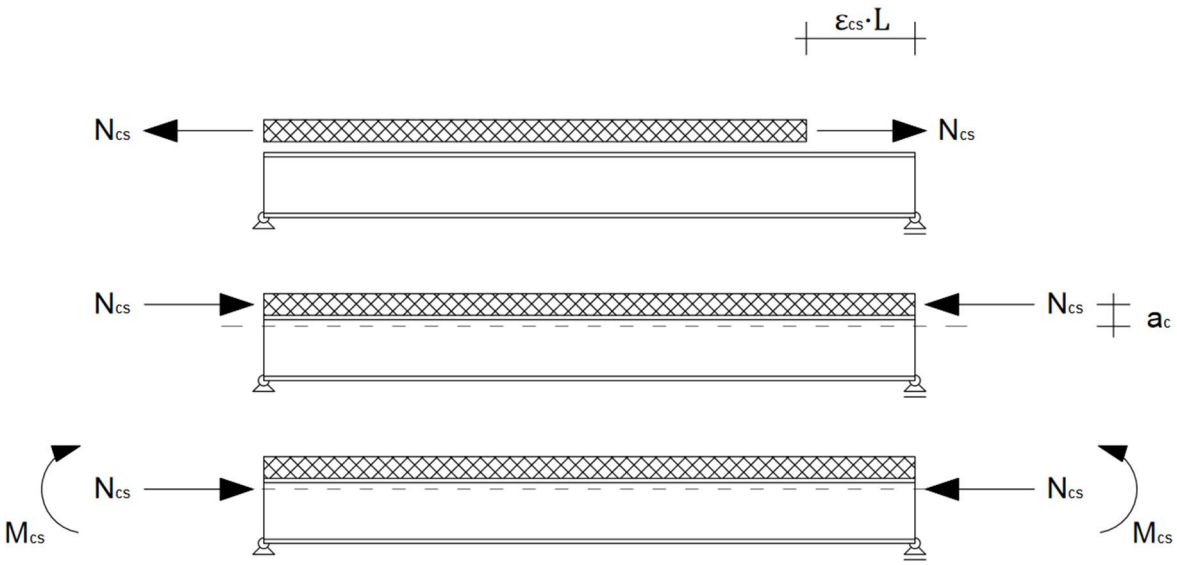
Utjecaj skupljanja betona može se uzeti u obzir smanjenim modulom elastičnosti betona prema izrazu (3.5):

$$E_s = \frac{E_{cm}}{n_c} \tag{3.5}$$

Ako je poznato da je ukupna relativna deformacija zbog skupljanja jednaka ε_{cs}, njegova se ukupna deformacija može dobiti izrazom (3.6), u kojemu je L duljina nosača prije deformacije.

$$u_{cs} = \varepsilon_{cs}(\infty) \cdot L \tag{3.6}$$

Betonska se pojasnica zbog skupljanja nastoji skratiti za vrijednost $\varepsilon_{cs}(\infty) \cdot L$. Kako bi se ta deformacija spriječila, u betonu je potrebna vlačna sila N_{cs}. Sila jednakog iznosa mora na betonski dio presjeka djelovati tlačno kako bi se očuvala ravnoteža. Međutim, kako se radi o spregnutom nosaču, za određivanje ukupnih utjecaja premješta se u težište spregnutog presjeka u skladu sa slikom 3.4. Kao posljedica se javlja moment savijanja M_{cs} [4].



Slika 3.4 - Model za proračun utjecaja zbog skupljanja na statički određenom spregnutom nosaču

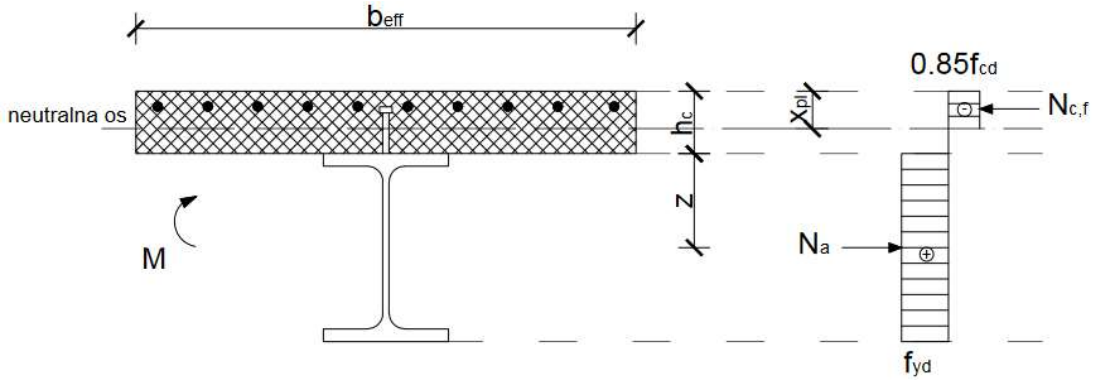
Za spregnuti presjek tada vrijede izrazi (3.7) i (3.8) za određivanje dodatnih sila zbog skupljanja.

$$N_{cs} = E_s \cdot \varepsilon_{cs}(\infty) \cdot A_c \tag{3.7}$$

$$M_{cs} = +N_{cs} \cdot a_c \tag{3.8}$$

4 Plastična otpornost poprečnih presjeka na savijanje

Plastična otpornost poprečnih presjeka na savijanje može se koristiti za poprečne presjeke 1. ili 2. razreda. Plastično ponašanje čelika i nelinearno ponašanje betona kod spregnutih nosača uzima se u obzir s proračunskim vrijednostima naprezanja f_{yd} i $0.85 \cdot f_{cd}$. Postupak se pojednostavnjuje tako da se zanemaruju naprezanja u betonu ako je on u vlačnoj zoni te naprezanja u armaturi ako je betonski dio u tlačnoj zoni. Uz to se zanemaruje dio betonske ploče u visini lima ako je izvedena u čeličnom limu položenom okomito na nosač. Izgled naprezanja pri savijanju, kada je neutralna os u betonskoj pojasnici, prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 - Prikaz raspodjele naprezanja prilikom plastične otpornosti spregnutog presjeka na savijanje

Iz uvjeta ravnoteže sila koje djeluju na poprečni presjek može se napisati $\Sigma N_i = 0$, pri čemu je svaki blok naprezanja prikazan uzdužnom silom $N_i = A_i \cdot f_{id}$, može se izvesti jednadžba (4.1). Stoga vrijedi da je proračunska plastična otpornost poprečnog presjeka na savijanje određena izrazom (4.2):

$$\Sigma A_i \cdot f_{id} = \Sigma N_i = 0 \tag{4.1}$$

$$M_{Rd} = \Sigma N_i \cdot z_i = \Sigma A_i \cdot f_{id} \cdot z_i = \Sigma W_{pl,i} \cdot f_{id} \tag{4.2}$$

gdje je:

z_i udaljenost hvatišta rezultante uzdužne sile i-tog bloka naprezanja od neutralne osi

$W_{pl,i}$ plastični moment otpora i-tog bloka naprezanja.

Za određivanje proračunske otpornosti na savijanje M_{Rd} izrazito je bitno kakva je posmična veza između čeličnog i betonskog dijela presjeka te se razlikuju dva slučaja:

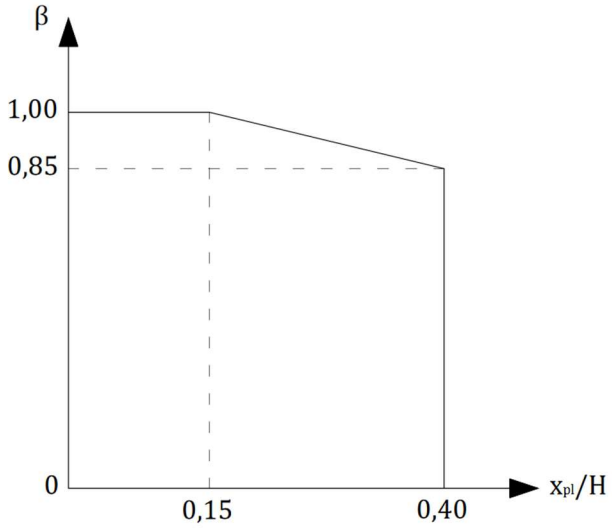
1 potpuna posmična veza, s kojom je ostvareno $M_{Rd} = M_{pl,Rd}$

2 djelomična posmična veza, s kojom je ostvareno $M_{Rd} < M_{pl,Rd}$.

Treba spomenuti da je potrebno smanjiti $M_{pl,Rd}$ ako je čelični dio spregnutog presjeka od S420 i S460, jer može doći do drobljenja betona prije nego dođe do plastifikacije u donjem rubu čeličnog nosača. Zbog ovoga se $M_{pl,Rd}$ smanjuje kada je plastična neutralna os udaljena od tlačnog ruba više od 15 % ukupne visine presjeka, a ako udaljenost prelazi 40 %, moraju se koristiti nelinearne metode ili teorija elastičnosti [5].

Smanjenje otpornost presjeka na savijanje u tim slučajevima radi se pomoću koeficijenta β, određenog izrazom (4.3), na temelju omjera udaljenosti neutralne osi od tlačnog ruba i ukupne visine presjeka s odgovarajućeg dijagrama (slika 4.2).

$$M_{Rd} = \beta \cdot M_{pl,Rd} \tag{4.3}$$



Slika 4.2 - Dijagram za određivanje koeficijenta β

4.1 Otpornost na savijanje kod potpune posmične veze

Posmična veza je potpuna ako su moždanici u stanju u potpunosti preuzeti uzdužnu posmičnu silu između betonskog i čeličnog dijela presjeka te u tom slučaju postoji samo jedna plastična neutralna os koja dijeli presjek na tlačni i vlačni dio. Plastična neutralna os može biti u betonskom dijelu presjeka (područje 1), u pojasnici čeličnog nosača (područje 2) ili u hrptu čeličnog nosača (područje 3) [2].

Za određivanje položaja neutralne osi potrebno je poznavati veličine sila u betonskom dijelu presjeka $N_{c,f}$, i čeličnom dijelu presjeka $N_{pl,a}$, u skladu s izrazima (4.4) i (4.5).

$$N_{c,f} = h_c \cdot b_{eff} \cdot 0.85 f_{cd} \tag{4.4}$$

$$N_{pl,a} = A_a \cdot f_{yd} \tag{4.5}$$

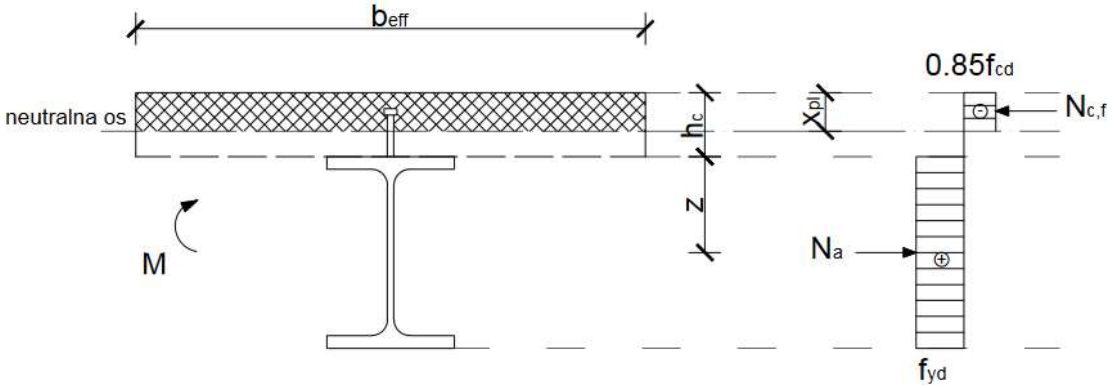
Spregnuti poprečni presjek, kojemu je plastična neutralna os u području 1 (betonska ploča), prikazan je na slici 4.3. Neutralna os je u betonskoj ploči ako je najveća moguća uzdužna sila u betonskoj pojasnici u tlaku veća od one u čeličnom nosaču u vlaku, u skladu s nejednadžbom (4.6). U ovome slučaju, iz ravnoteže horizontalnih unutarnjih sila položaj neutralne osi može se odrediti izrazom (4.7):

$$N_{c,f} > N_{pl,a} \tag{4.6}$$

$$x_{pl} = \frac{N_{pl,a}}{b_{eff} \cdot 0.85 f_{cd}} < h_c \tag{4.7}$$

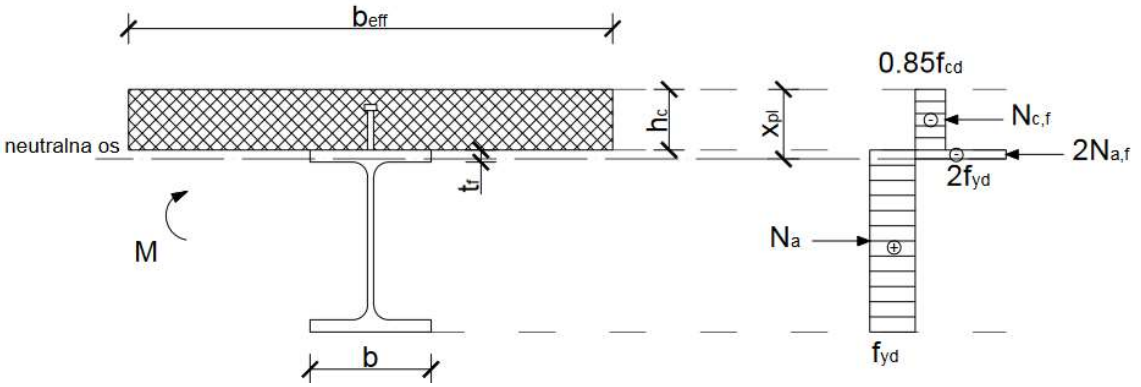
Tada je plastična otpornost na savijanje određena izrazom (4.8).

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left(0.5 \cdot h_a + h_c - 0.5 \cdot x_{pl}\right) \tag{4.8}$$



Slika 4.3 - Plastična otpornost spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u betonskoj ploči

Spregnuti poprečni presjek kojemu je plastična neutralna os u području 2 (pojasnica čeličnog nosača), prikazan je na slici 4.4. Uvjet koji potvrđuje takav položaj neutralne osi prikazan je izrazom (4.9), unutar kojega je N_{aw} plastična otpornost hrpta određena izrazom (4.10).



Slika 4.4 - Plastična otpornost spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u pojasnici čeličnog nosača

$$N_{aw} \leq N_{c,f} \leq N_{pl,a} \tag{4.9}$$

$$N_{aw} = \left(A_a - 2b \cdot t_f\right) \cdot f_{yd} \tag{4.10}$$

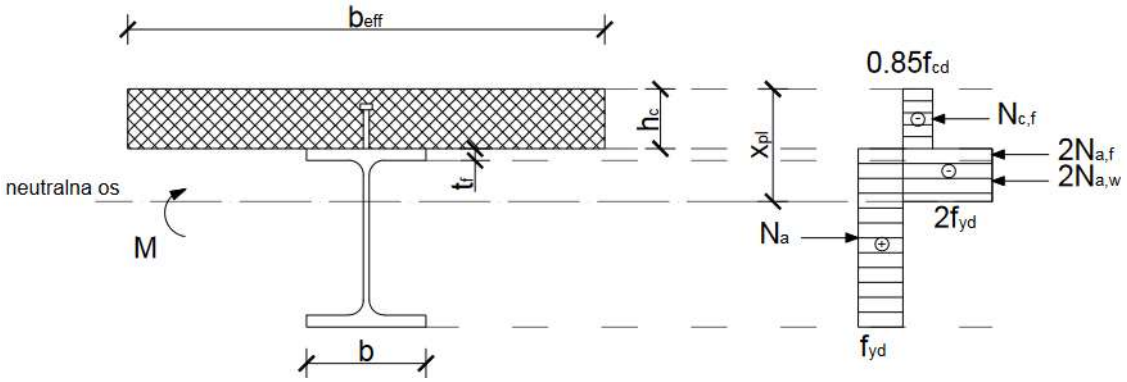
Kao pojednostavnjenje se dodaju dva međusobno suprotna bloka naprezanja u dio čelika koji je u tlaku kako bi se i dalje u proračunu moglo smatrati da su vlačna naprezanja u cijelom čeličnom dijelu poprečnog presjeka, te njihova rezultanta djeluje u težištu čeličnog presjeka. U ovome slučaju, iz ravnoteže horizontalnih unutarnjih sila položaj neutralne osi može se odrediti izrazom (4.11):

$$x_{pl} = h_c + \frac{A_a}{2 \cdot b_a} - \frac{N_c}{2 \cdot f_{yd} \cdot b_a} \tag{4.11}$$

Tada je plastična otpornost na savijanje određena izrazom (4.12):

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left(\frac{h_a + h_c - x_{pl}}{2}\right) + N_{c,f} \cdot \left(\frac{x_{pl}}{2}\right) \tag{4.12}$$

Spregnuti poprečni presjek, kojemu je plastična neutralna os u području 3 (hrbat čeličnog nosača), prikazan je na slici 4.5. Uvjet koji potvrđuje ovakav položaj neutralne osi prikazan je izrazom (4.13):



Slika 4.5 - Plastična otpornost spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u hrptu čeličnog nosača

$$N_{aw} > N_{c,f} \tag{4.13}$$

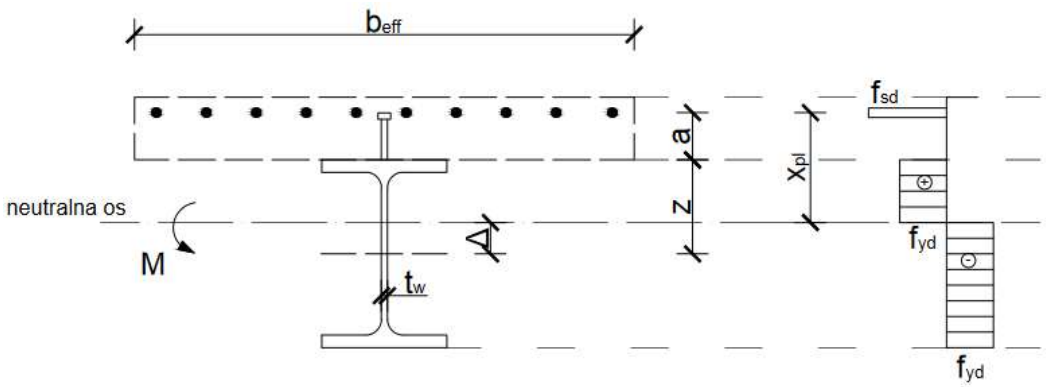
Kao pojednostavnjenje se također dodaju dva međusobno suprotna bloka naprezanja u dio čelika koji je u tlaku kako bi se dalje u proračunu moglo smatrati da su vlačna naprezanja u cijelom čeličnom dijelu poprečnog presjeka, te njihova rezultanta djeluje u težištu presjeka. Zbog jednostavnosti, zanemaruje se radijus zakrivljenosti između pojasnice i hrpta. U ovome slučaju, iz ravnoteže horizontalnih unutarnjih sila položaj neutralne osi može se odrediti izrazom (4.14):

$$x_{pl} = h_c + t_f + \frac{A_a - 2 \cdot t_f \cdot b_a}{2 \cdot t_w} - \frac{N_c}{2 \cdot f_{yd} \cdot t_w} \tag{4.14}$$

Tada je plastična otpornost na savijanje određena izrazom (4.15):

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left(\frac{h_a + h_c - t_f - x_{pl}}{2}\right) + 2 \cdot f_{yd} \cdot b_a \cdot t_f \left(\frac{x_{pl} - h_c}{2}\right) + N_{c,f} \cdot \left(\frac{x_{pl} + t_f}{2}\right) \tag{4.15}$$

Osim ova tri osnovna slučaja, moguće je da betonska ploča bude u vlaku kada se beton u potpunosti zanemaruje, a u obzir se uzima armatura ili da je čelični profil obložen betonom. Tada se poštuje pravilo da se u vlaku zanemaruje beton, a u tlaku armatura. Slučaj s betonskom pločom u vlaku prikazan je na slici 4.6. Ovakvo stanje naprezanja najčešće je iznad ležaja nosača.



Slika 4.6 - Plastična otpornost spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u hrptu čeličnog nosača za negativni moment savijanja

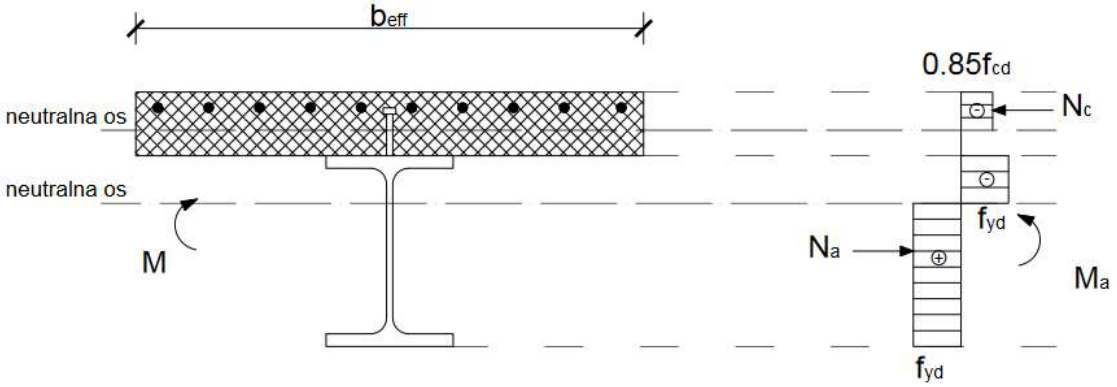
4.2 Otpornost na savijanje kod djelomične posmične veze

Kod djelomične posmične veze potrebno je umanjiti uzdužnu silu u betonu stupnjem sprezanja η, koji je omjer broja postavljenih moždanika i broja moždanika potrebnih za potpuno sprezanje, prema izrazu (4.16). Vrijednost stupnja sprezanja ne smije biti manja od 0,4 te ne smije preći 1,0. Djelomično sprezanje smije se koristiti samo kod plastičnog proračuna (1. i 2. razred poprečnog presjeka), kada djeluje pozitivan moment te moždanici moraju biti duktilni kako bi omogućili pomake između betonskog i čeličnog dijela poprečnog presjeka. Spomenuta umanjena sila u betonskom dijelu dobije se izrazom (4.17).

$$\eta = \frac{n}{n_f} \tag{4.16}$$

$$N_c = \eta \cdot N_{c,f} \tag{4.17}$$

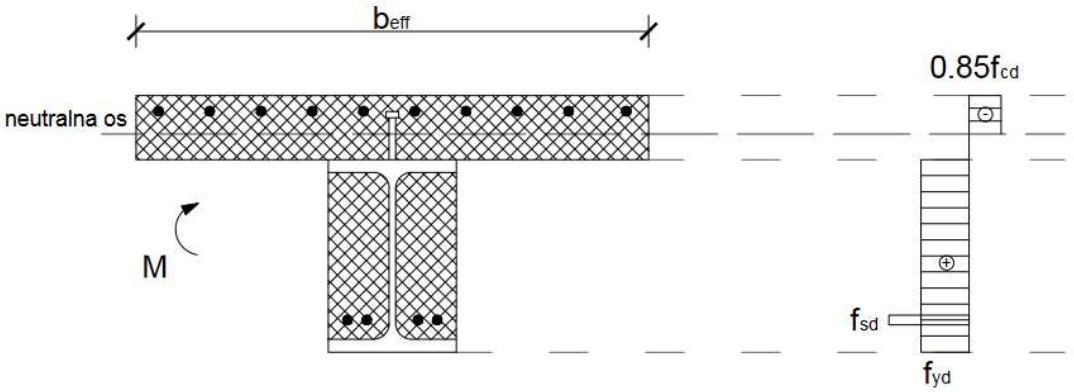
Kod djelomične posmične veze postoje dvije plastične neutralne osi jer je međudjelovanje čeličnog i betonskog dijela presjeka djelomično [2] pa se dio tlačne sile prenosi i čeličnim nosačem. Stanje naprezanja za taj slučaj prikazano je na slici 4.7.



Slika 4.7 - Plastična otpornost djelomično spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u hrptu čeličnog nosača

4.3 Otpornost na savijanje presjeka obloženog betonom

Ovo je slučaj kada se čelični profil obloži betonom koji je s čeličnim profilom potpuno spregnut. Oblažu se hrbat i unutarnje površine pojasnica čeličnog profila, a beton koji mora biti armiran, povezuje se s profilom moždanicima zavarenim na profil, poprečnom armaturom zavarenom na profil ili poprečnom armaturom koja prolazi kroz profil i povezuje dvije strane obloge. Stanje naprezanja za poprečni presjek obložen betonom prikazano je na slici 4.8.



Slika 4.8 - Plastična otpornost obloženog spregnutog presjeka na savijanje kada plastična neutralna os leži u hrptu čeličnog nosača

5 Elastična otpornost poprečnog presjeka na savijanje

Za razliku od plastične otpornosti, primjena elastične otpornosti obavezna je za poprečne presjeke 3. i 4. razreda, ali je dozvoljeno njezino korištenje za sva četiri razreda. Prilikom proračuna po teoriji elastičnosti, u spregnutim konstrukcijama moramo voditi računa o fazama izvedbe spregnutog nosača (hoće li nosač biti poduprt za vrijeme izgradnje ili ne), o učincima nastalim zbog puzanja i skupljanja betona te o modulu elastičnosti betona E_c koji se mijenja pod utjecajem dugotrajnog djelovanja.

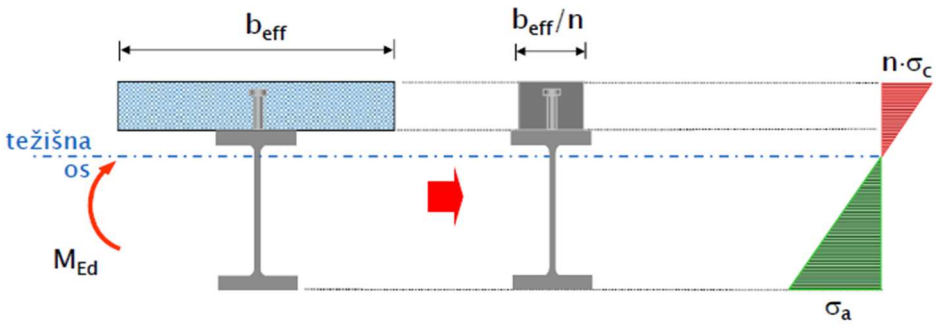
Prilikom određivanja naprezanja, promatraju se četiri specifične točke u presjeku: gornji i donji rub betonske ploče te gornji i donji rub čeličnog nosača (jer su prema teoriji elastičnosti najveća naprezanja na rubovima presjeka). Ta rubna naprezanja ne smiju prekoračiti proračunske granice, tj. f_{yd} za čelik, f_{cd} za beton te f_{sd} za armaturu.

5.1 Određivanje naprezanja po visini spregnutog presjeka

Naprezanja po visini presjeka mogu se odrediti na dva načina. Prvi način, koji se češće koristi, je proračunski (zamjenski) presjek, a drugi način je metoda raspodjele reznih sila po poprečnom presjeku, koja omogućava zaseban proračun dijelova spregnutog presjeka [2].

5.1.1. Proračunski (zamjenski) presjek

Proračunski presjek formira se tako da se za presjek usvoji jedinstveni modul elastičnosti, tj. modul elastičnosti čelika, na način da se odredi omjer modula elastičnosti čelika i betona n, s kojim se podijeli širina betonske ploče te se ona svede na čelik (slika 5.1).



Slika 5.1 - Svođenje spregnutog presjeka na proračunski poprečni presjek [7]

Kako se učinci puzanja pri primjeni teorije elastičnosti ne smiju zanemariti, uzimaju se u obzir smanjenjem modula elastičnosti betona, odnosno povećanjem vrijednosti omjera modula. Omjer modula elastičnosti za dugotrajna djelovanja određen je izrazom (5.1):

$$n_L = n_0(1 + \psi_L \cdot \varphi_L) \tag{5.1}$$

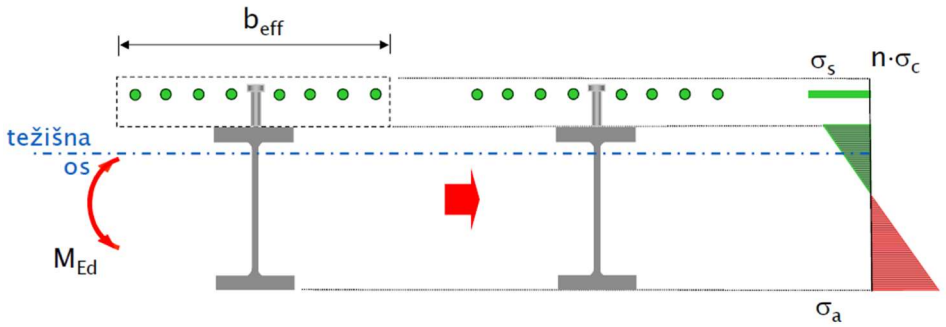
gdje su:

$n_0 = E_a / E_{cm}$	omjer modula elastičnosti za kratkotrajno djelovanje
E_a	modul elastičnosti čelika
E_{cm}	sekantni modul elastičnosti betona
ψ_L	faktor puzanja koji ovisi o opterećenju
φ_L	koeficijent puzanja koji se određuje prema HRN EN 1992-1-1 [6].

Norma HRN EN 1994-1-1 [5] dozvoljava pojednostavnjeno određivanje utjecaja puzanja i skupljanja, ali samo kod konstrukcija koje nemaju dominantna stalna opterećenja poput skladišta, knjižnica i sl. Pojednostavnjeni omjer modula za dugotrajna djelovanja određen je izrazom (5.2), u kojemu je proračunski modul elastičnosti betona $E_{c,eff} = 0{,}5 \cdot E_{cm}$:

$$n = \frac{E_a}{E_{c,eff}} = \frac{E_a}{0{,}5 \cdot E_{cm}} \tag{5.2}$$

Primjena proračunskog poprečnog presjeka primjenjiva je i kod negativnih momenata savijanja (kontinuirani nosač, iznad ležaja). Kako se beton u vlaku zanemaruje, proračunski poprečni presjek tvore samo čelični nosač i armatura u vlačnoj zoni te nije potrebno svođenje na jedinstveni modul elastičnosti jer su oboje od čelika (slika 5.2).



Slika 5.2 - Proračunski poprečni presjek prilikom negativnog momenta savijanja [7]

5.1.2. Raspodjela unutarnjih sila po poprečnome presjeku

Posebnost ove metode je da se unutarnje sile koje djeluju na presjek raspoređuju na betonsku ploču i čelični nosač, ovisno o krutosti (slika 5.3) . Uzdužna sila za određeni dio određuje se tako što se ukupna uzdužna sila pomnoži s omjerom uzdužne krutosti dijela za koji se određuje sila i ukupne uzdužne krutosti spregnutog presjeka, u skladu s izrazima (5.3) i (5.4):

$$N_c = N \cdot \frac{E_c \cdot A_c}{E_a \cdot A_e} = N \cdot \frac{A_c/n}{A_e} \tag{5.3}$$

$$N_a = N \cdot \frac{E_a \cdot A_a}{E_a \cdot A_e} = N \cdot \frac{A_a}{A_e} \tag{5.4}$$

Analogno uzdužnoj sili, moment savijanja koji preuzima određeni dio presjeka određuje se tako što se ukupni moment savijanja pomnoži s omjerom krutosti na savijanje dijela za koji se određuje moment i ukupne krutosti na savijanje spregnutog presjeka, prema izrazima (5.5) i (5.6):

$$M_c = \frac{E_c \cdot I_c}{E_a \cdot I_e} \cdot M = \frac{E_a \cdot \frac{I_c}{n}}{E_a \cdot I_e} \cdot M = \frac{\frac{I_c}{n}}{I_e} \cdot M \tag{5.5}$$

$$M_a = \frac{E_a \cdot I_a}{E_a \cdot I_e} \cdot M = \frac{I_a}{I_e} \cdot M \tag{5.6}$$

Nakon što se vanjska djelovanja rasporede po dijelovima presjeka, naprezanja se određuju posebno za svaki dio (materijal), neovisno o drugom dijelu. Pri djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja, naprezanja u betonu i čeliku određuju se izrazima (5.7) i (5.8):

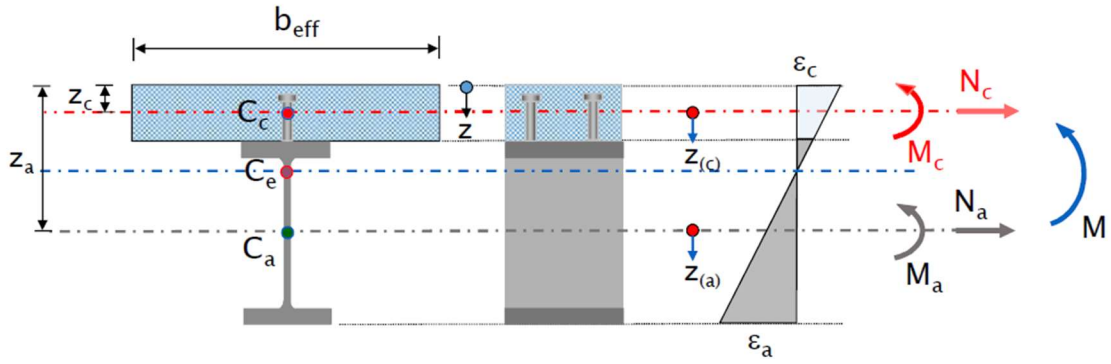
$$\sigma_c = \frac{N_c}{A_c} \pm \frac{M_c}{I_c} \cdot z_{(c)} \tag{5.7}$$

$$\sigma_a = \frac{N_a}{A_a} \pm \frac{M_a}{I_a} \cdot z_{(a)} \tag{5.8}$$

gdje su:

$z_{(c)}$ udaljenost težišta betonskog dijela presjeka do krajnjeg ruba betona

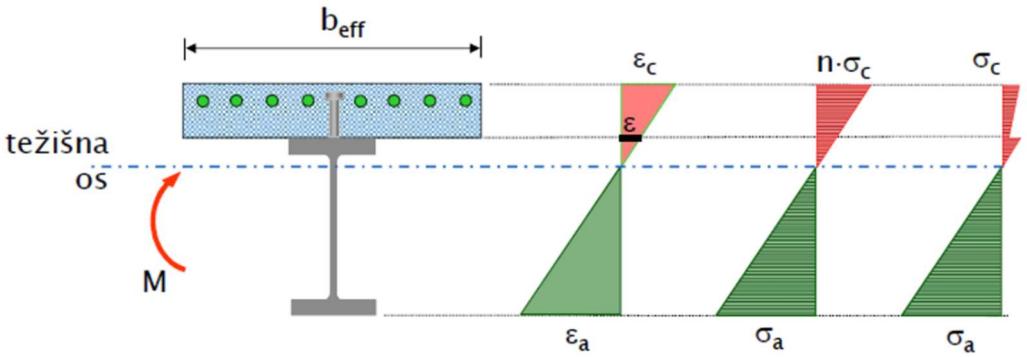
$z_{(a)}$ udaljenost težišta čeličnog dijela presjeka do krajnjeg ruba čelika.



Slika 5.3 - Raspodjela sila na dijelove poprečnog presjeka s obzirom na krutosti [7]

5.2 Otpornost poduprtih nosača

Prilikom izgradnje, spregnute konstrukcije mogu biti poduprte ili ne. Podupore pridržavaju čelični nosač, oplatu te svježi beton, sve dok on ne očvrsne da se postigne sprezanje pa se nosač opterećuje tek nakon toga. Time se znatno pojednostavnjuje proračun otpornosti presjeka te se onemogućuje stvaranje početnog progiba čeličnog nosača pod opterećenjem betona. Raspored naprezanja kod poduprtih nosača prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4 - Određivanje naprezanja kod poduprtih nosača [7]

Proračunska otpornost na savijanje poduprtih nosača određuje se kao najmanja vrijednost od otpornosti na savijanje gornjeg ruba betonske ploče te gornjeg i donjeg ruba čeličnog nosača, u skladu s izrazom (5.9):

$$M_{el,Rd} = \min\left\{W_{at,el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}; W_{ab,el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}; W_{ct,el} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_C}\right\} \quad (5.9)$$

$$W_{at,el} = \frac{I_{id}}{x_1} \quad (5.10)$$

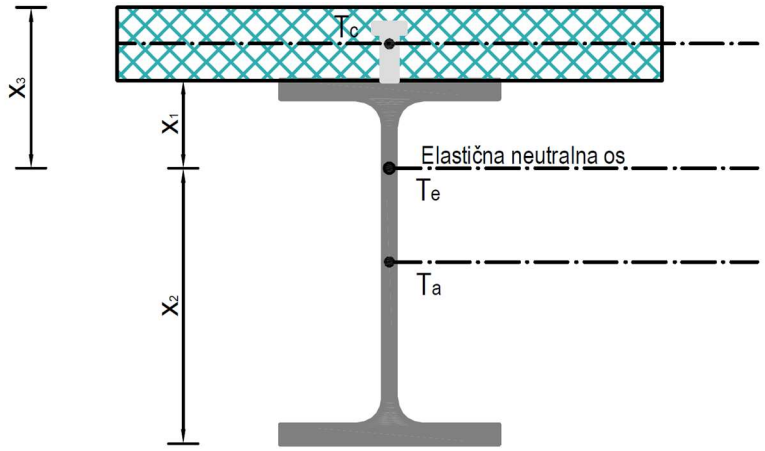
$$W_{ab,el} = \frac{I_{id}}{x_2} \quad (5.11)$$

$$W_{ct,el} = \frac{I_{id}}{x_3} \quad (5.12)$$

$$I_{id} = I_a + \frac{I_c}{n} + A_a \cdot \frac{A_c}{n} \cdot a^2 \left(A_a + \frac{A_c}{n}\right) \quad (5.13)$$

gdje su:

$W_{at,el}$ moment otpora gornjeg ruba čeličnog nosača
$W_{ab,el}$ moment otpora donjeg ruba čeličnog nosača
$W_{ct,el}$ moment otpora gornjeg ruba betonske ploče
I_{id} idealni moment tromosti spregnutog poprečnog presjeka
x_1 udaljenost od težišta spregnutog presjeka do gornjeg ruba čeličnog nosača (slika 5.5)
x_2 udaljenost od težišta spregnutog presjeka do donjeg ruba čeličnog nosača (slika 5.5)
x_3 udaljenost od težišta spregnutog presjeka do gornjeg ruba betonske ploče (slika 5.5).



Slika 5.5 - Prikaz udaljenosti težišta spregnutog presjeka do rubova presjeka

5.3 Otpornost nepoduprtih nosača

Kako izvedba podupora nije jeftina te ponekad iz uvjeta izgradnje (npr. visoko mjesto izvedbe nosača) nije moguće poduprijeti nosač, potrebno je razmotriti mogućnost takve gradnje te njezin utjecaj na otpornost. Često čelični nosač ima dovoljno kapaciteta da izdrži naprezanja zbog težine svježeg betona i oplate, ali može doći do trajnih progiba nosača koji mogu predstavljati problem pri graničnom stanju uporabljivosti.

Posebnost je spregnutih nosača prilikom nepoduprte faze izvedbe da elastična otpornost na savijanje $M_{el,Rd}$ ovisi o udjelu ukupnog opterećenja koje djeluje na nosač prije nego je došlo do sprezanja [4], prema izrazu (5.14), u kojemu je $M_{c,Ed}$ moment savijanja koji djeluje na spregnuti presjek:

$$\mathrm{M_{el,Rd}} = \mathrm{M_{a,Ed}} + \mathrm{k} \cdot \mathrm{M_{c,Ed}} \tag{5.14}$$

$$k = min\{k_{at}; k_{ab}; k_{ct}\} \tag{5.15}$$

$$k_{at} = \left|\frac{f_y/\gamma_M}{\sigma_{at}}\right| \tag{5.16}$$

$$k_{ab} = \left|\frac{f_y/\gamma_M}{\sigma_{ab}}\right| \tag{5.17}$$

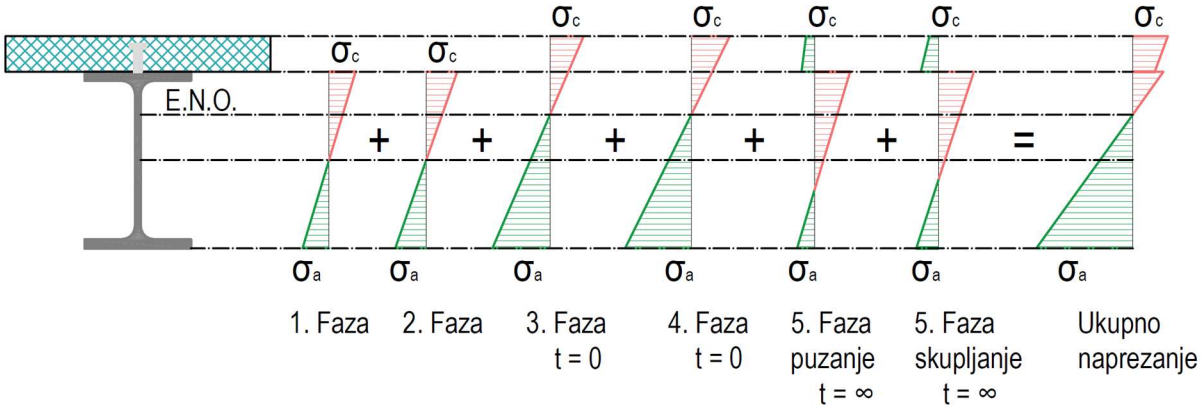
$$k_{ct} = \left|\frac{f_{ck}/\gamma_C}{\sigma_{ct}}\right| \tag{5.18}$$

Da bi se dosegla elastična otpornost na savijanje, u krajnjem vlakancu poprečnog presjeka moraju se povećati naprezanja dok se ne dostigne proračunska vrijednost čvrstoće [4]. To se simulira korištenjem faktora *k*, za koji se usvaja minimalna vrijednost izraza (5.16) - (5.18). On predstavlja omjere proračunskih čvrstoća i naprezanja u kritičnim točkama presjeka, tj. rubovima.

Posebnost nepoduprtih nosača jest da se ukupna naprezanja u poprečnom presjeku određuju superpozicijom nekoliko različitih faza (slika 5.6):

1. faza - čelični nosač nosi samo sebe
2. faza - čelični nosač opterećen svježim betonom i oplatom

3. faza - spregnuti nosač opterećen dodatnim stalnim opterećenjem
4. faza - spregnuti nosač opterećen uporabnim/korisnim opterećenjem
5. faza - utjecaj dugotrajnih deformacija betona na nosač.



Slika 5.6 - Određivanje naprezanja kod nepoduprtih nosača

Treba zaključiti da je za određivanje naprezanja kod nepoduprtih nosača, korištenjem proračunskog poprečnog presjeka, potrebno odrediti 3 različita proračunska poprečna presjeka (jedan za trenutačne faze 3 i 4 te dva za 5. fazu), uz osnovni presjek čeličnog profila u 1. i 2. fazi.

5.4 Preraspodjela momenata pri raspucavanju betona

Primjenom teorije elastičnosti, učinke raspucavanja betona u vlaku moramo uzeti u obzir. Oni se očituju smanjenjem krutosti u raspucanoj zoni, što uzrokuje preraspodjelu momenata savijanja, tj. padom negativnih momenata savijanja, a porastom pozitivnih. Na koji se način učinci uzimaju u obzir, obrađeno je u drugom poglavlju (potpoglavlje 2.4) te su dani i prikladni načini proračuna.

6 Otpornost poprečnog presjeka na vertikalni posmik

Kod proračuna otpornosti na vertikalni posmik ne postoji jednostavna metoda kojom bi se odredio točan doprinos betonske ploče, budući da to ovisi o rasporedu moždanika i raspucavanju ploče u zoni negativnih momenata (unutarnjih oslonaca). Zbog toga se uvodi pretpostavka da ukupnu poprečnu silu V_{Ed} preuzima samo hrbat čeličnog poprečnog presjeka [2].

To znači da se kod proračuna otpornosti na vertikalni posmik na odgovarajući način primjenjuju norme za čelične konstrukcije, odnosno norma HRN EN 1993-1-1 [1] za proračun posmične otpornosti čeličnog presjeka, tako da je dokaz u skladu s izrazom (6.1):

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd} \tag{6.1}$$

Plastična otpornost na posmik dobiva se pomoću izraza (6.2), a kod primjene teorije elastičnosti mora biti zadovoljen izraz (6.3).

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \tag{6.2}$$

$$\tau_{Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} \tag{6.3}$$

Ako je potrebno provjeravati posmično izbočivanje čeličnog hrpta, proračunska posmična otpornost $V_{b,Rd}$ određuje se prema HRN EN 1993-1-5 [8].

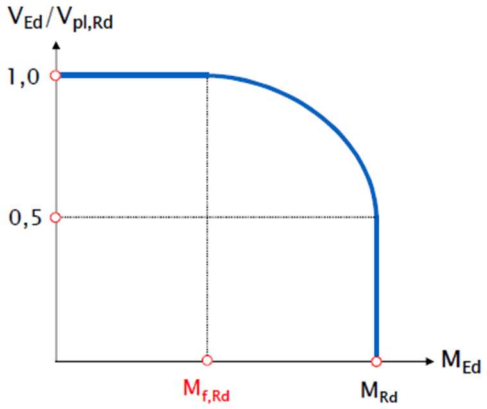
6.1 Međudjelovanje M + V

Međudjelovanje momenta savijanja i poprečne sile uzima se u obzir ako ukupna poprečna sila V_{Ed} premašuje polovinu odgovarajuće posmične otpornosti ($V_{pl,Rd}$ ili $V_{b,Rd}$) na način da se smanji otpornost poprečnog presjeka na savijanje $M_{y,V,Rd}$ (slika 6.1). Takvi se slučajevi mogu pojaviti na unutarnjim osloncima kontinuiranih nosača i na mjestima djelovanja vertikalnih koncentriranih sila [2].

Za presjeke 1. i 2. razreda utjecaj poprečne sile se kod proračuna otpornosti na savijanje uzima u obzir smanjenjem granice popuštanja čelika f_y, prema izrazu (6.4):

$$f_{y,red} = (1 - \rho) \cdot f_y \tag{6.4}$$

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \tag{6.5}$$



Slika 6.1 – Utjecaj poprečne sile na smanjenje momenta otpornosti M_{Rd}

U skladu s navedenim kriterijem, smanjena otpornost na moment savijanja zbog djelovanja poprečne sile za poprečni presjek *I* s jednakim pojasnicama i savijanjem oko jače osi, određuje se prema izrazu (6.6) (slika 6.2):

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_w{}^2}{4 \cdot t_w}\right) \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \leq M_{y,c,Rd} \tag{6.6}$$

gdje su:

$M_{y,c,Rd}$ proračunska otpornost na savijanje

$A_w = h_w \cdot t_w$ površina hrpta.

Kod zavarenih (pločastih) elemenata, sukladno normi HRN EN 1993-1-5 [8], ako je $\bar{\eta}_3$ veće od 0,5, međudjelovanje momenta savijanja i poprečne sile uzima se u obzir preko izraza (6.7):

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)(2 \cdot \bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1{,}0 \quad \text{za} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \tag{6.7}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \tag{6.8}$$

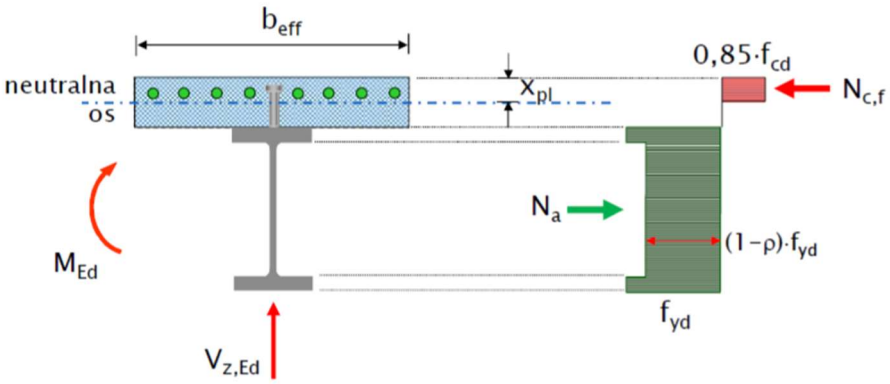
$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \tag{6.9}$$

gdje su:

$M_{f,Rd}$ proračunski plastični moment otpornosti presjeka koji se sastoji od proračunske površine pojasnica

$M_{pl,Rd}$ proračunska plastična otpornost presjeka koja se sastoji od proračunske površine pojasnica i cijelog proračunskog hrpta, neovisno o razredu presjeka

$V_{bw,Rd}$ doprinos hrpta u proračunskoj otpornosti na djelovanje poprečne sile.



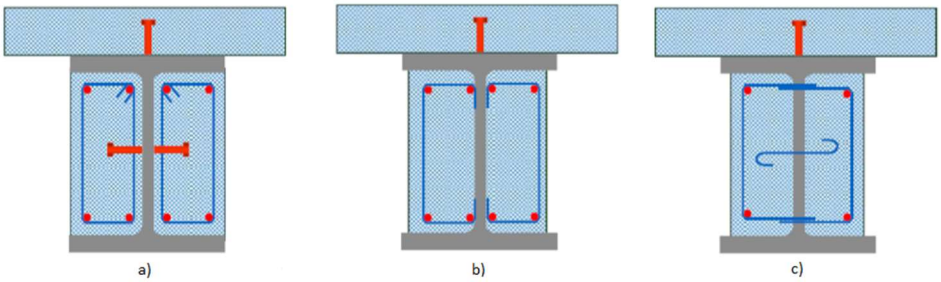
Slika 6.72 – Raspodjela naprezanja u poprečnom presjeku zbog djelovanja momenta savijanja i poprečne sile [7]

6.2 Otpornost poprečnih presjeka djelomično obloženih betonom

Djelomično obloženi presjeci mogu se definirati kao oni kod kojih su hrptovi i unutarnje površine pojasnica obloženi betonom. Kod određivanja posmične otpornosti koristi se princip superpozicije, odnosno zbrajanja posmičnih otpornosti betonskog i čeličnog dijela. Kako bi se osigurala mogućnost korištenja superpozicije, obložni bi beton trebao zadržati posmičnu otpornost do plastičnog popuštanja hrpta čeličnog presjeka, stoga se u proračunu primjenjuje teorija plastičnosti [4].

Neke od prednosti djelomičnog oblaganja betonom su vatrozaštita hrpta, smanjenje razreda presjeka, povećana otpornost na bočno-torzijsko izvijanje, vertikalni posmik te istovremeno djelovanje savijanja i poprečne sile.

Obložni beton je armiran, a veza između čelika i betona mora biti ostvarena moždanicima i sponama koje mogu biti zatvorene (slika 6.3.a) kao kod betonskih konstrukcija ili otvorene, uz uvjet da su zavarene za hrbat zavarima pune nosivosti (slika 6.3.b). Treća mogućnost je da spone prolaze kroz izrađene rupe u hrptu (slika 6.3.c) [4].



Slika 6.3 – Tipovi i razmještaj spona [7]

Doprinos obloženog hrpta posmičnoj otpornosti uzima se u obzir kod presjeka razreda 1 i 2, uz uvjet da je zadovoljen izraz (6.10), u kojemu je *d* svijetla visina hrpta, a t_w debljina hrpta:

$$\frac{d}{t_w} \leq 124\varepsilon \qquad (6.10)$$

Ako proračunska vrijednost poprečne sile koju preuzima čelični presjek $V_{a,Ed}$ premaši polovinu njegove proračunske plastične otpornosti $V_{pl,a,Rd}$, treba uzeti u obzir utjecaj poprečne sile na proračunski moment otpornosti $M_{pl,Rd}$ [2]. Međudjelovanje poprečne sile i momenta savijanja uzima se u obzir na isti način kao i kod neobloženih presjeka, uz korekciju izraza (6.5) u izraz (6.11):

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{a,Ed}}{V_{pl,a,Rd}} - 1\right)^2 \tag{6.11}$$

Zbog nedostatka točnijeg proračuna, pretpostavlja se da raspodjela ukupne poprečne sile V_{Ed} na čelični ($V_{a,Ed}$) i betonski ($V_{c,Ed}$) dio odgovara doprinosu tih dijelova na plastični moment otpornosti $M_{pl,Rd}$, pa iz toga slijede izrazi (6.12) i (6.13) [2]:

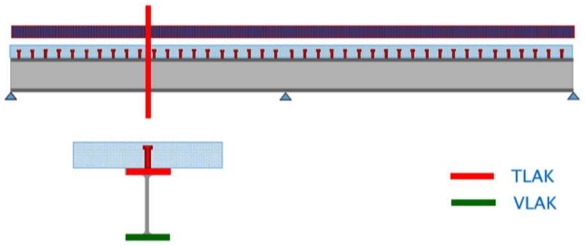
$$V_{a,Ed} = V_{Ed} \frac{M_{a,pl,Rd}}{M_{pl,Rd}} \tag{6.12}$$

$$V_{c,Ed} = V_{Ed} - V_{a,Ed} \tag{6.13}$$

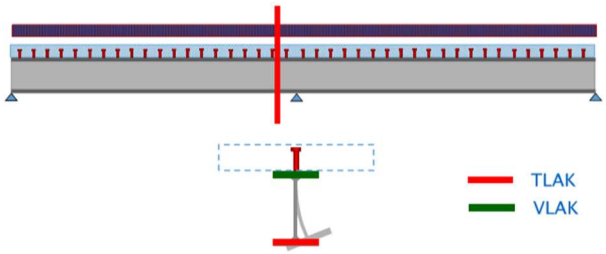
7 Bočno-torzijsko izvijanje spregnutih nosača

Za proračun otpornosti spregnutog nosača na bočno-torzijsko izvijanje bitan je način izgradnje nosača. Ako je čelični nosač poduprt za vrijeme izvođenja betonske ploče, potrebno je bočno-torzijsko izvijanje provjeriti na spregnutom nosaču. Ako čelični nosač nije poduprt za vrijeme betoniranja ploče, potrebno je prvo proračunati otpornost čeličnog nosača na bočno-torzijsko izvijanje, a zatim i otpornost spregnutog nosača.

Betonska ploča općenito pridržava gornju pojasnicu čeličnog nosača i kada je gornja pojasnica u tlaku, nema problema s bočno-torzijskim izvijanjem, što je prikazano na slici 7.1. Problem bočno-torzijskog izvijanja javlja se kada je donja pojasnica čeličnog nosača u tlaku (kontinuirani nosači – područje iznad srednjih ležaja), što je prikazano na slici 7.2.



Slika 7.1 – Gornja pojasnica čeličnog nosača u tlaku (nema problema bočno-torzijskog izvijanja) [7]



Slika 7.2 – Donja pojasnica čeličnog nosača u tlaku (postoji problem bočno-torzijskog izvijanja) [7]

7.1 Elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja M_{cr}

Betonska ploča spregnutog nosača predstavlja kontinuirano bočno pridržanje gornje pojasnice čeličnog nosača koje se modelira pomoću rotacijske krutosti k_s. Rotacijska krutost povećava elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja M_{cr}, koji je moguće odrediti pomoću izraza (7.1):

$$M_{cr} = \frac{k_c \cdot C_4}{L} \sqrt{\left(G_a \cdot I_{at} + \frac{k_s \cdot L^2}{\pi}\right) \cdot E_a \cdot I_{afz}} \tag{7.1}$$

gdje su:

k_c svojstvo spregnutog poprečnog presjeka
C_4 faktor raspodjele momenata savijanja unutar dužine L
L dužina nosača između točaka u kojima je donja pojasnica čeličnog nosača bočno pridržana
G_a modul posmika čelika

I_{at} St. Venantov torzijski moment površine čeličnog poprečnog presjeka
k_s rotacijska krutost čeličnog nosača
I_{afz} moment tromosti donje pojasnice čeličnog poprečnog presjeka oko osi *z-z*.

Faktor k_c za čelične profile koji su simetrični oko obje osi moguće je odrediti pomoću izraza (7.2):

$$k_c = \frac{\frac{h_s \cdot I_y}{I_{ay}}}{\frac{\frac{h_s^2}{4} + i_x^2}{e} + h_s} \tag{7.2}$$

$$e = \frac{A \cdot I_{ay}}{[A_a \cdot z_c \cdot (A - A_a)]} \tag{7.3}$$

Faktor k_c za čelične profile koji su simetrični oko jedne osi moguće je pomoću izraza (7.4):

$$k_c = \frac{I_y}{I_{ay}} \cdot \frac{h_s}{\frac{(z_f - z_s)^2 + i_x^2}{e} + 2 \cdot (z_f - z_j)} \tag{7.4}$$

$$z_f = \frac{h_s \cdot I_{afz}}{I_{az}} \tag{7.5}$$

$$z_j = z_s - \int \frac{z \cdot (y^2 + z^2) dA}{2 \cdot I_{ay}} \tag{7.6}$$

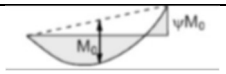
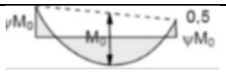
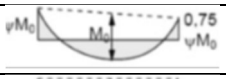
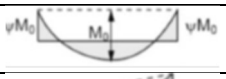
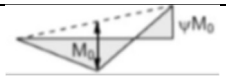
Ako je zadovoljeno $I_{afz} > 0{,}5 \cdot I_{az}$, tada vrijedi izraz (7.7):

$$z_j = 0{,}4 \cdot h_s \cdot \left(\frac{2 \cdot I_{afz}}{I_{az}} - 1 \right) \tag{7.7}$$

gdje su:
h_s razmak težišta pojasnica čeličnog poprečnog presjeka
I_y moment tromosti raspucanog spregnutog poprečnog presjeka oko osi *y-y*
I_{ay} moment tromosti čeličnog poprečnog presjeka oko osi *y-y*
I_{az} moment tromosti čeličnog poprečnog presjeka oko osi *z-z*
I_{at} St. Venantov torzijski moment površine čeličnog poprečnog presjeka
I_{afz} moment tromosti donje pojasnice čeličnog poprečnog presjeka oko osi *z-z*
i_x polarni radijus tromosti čeličnog poprečnog presjeka
z_c razmak između težišta čeličnog poprečnog presjeka i težišta armature, koji se približno može usvojiti kao razmak između težišta čeličnog poprečnog presjeka i sredine betonske ploče
z_s razmak između težišta čeličnog poprečnog presjeka i njegovog centra posmika, uzima se da je pozitivan ako centar posmika i težište tlačne pojasnice leže na istoj strani.

Vrijednost faktora C_4 ovisi o vrsti opterećenja i statičkom sustavu, što je prikazano tablicama 7.1, 7.2, 7.3, u skladu s HRN EN 1994-1-1 [5].

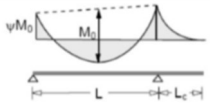
Tablica 7.1 – Faktori C_4 za nosače s poprečnim opterećenjem

Oblik momentnog dijagrama	Odnos momenata savijanja ψ								
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
	41,5	30,2	24,5	21,1	19,0	17,5	16,5	15,7	15,2
	33,9	22,7	17,3	14,1	13,0	12,0	11,4	10,9	10,6
	28,2	18,0	13,7	11,7	10,6	10,0	9,5	9,7	8,9
	21,9	13,9	11,0	9,6	8,8	8,3	8,0	7,8	7,6
	28,4	21,8	18,6	16,7	15,6	14,8	14,2	13,8	13,5
	12,7	9,8	8,6	8,0	7,7	7,4	7,2	7,1	7,0

Tablica 7.2 – Faktori C_4 za nosače s koncentriranim momentima na rubovima

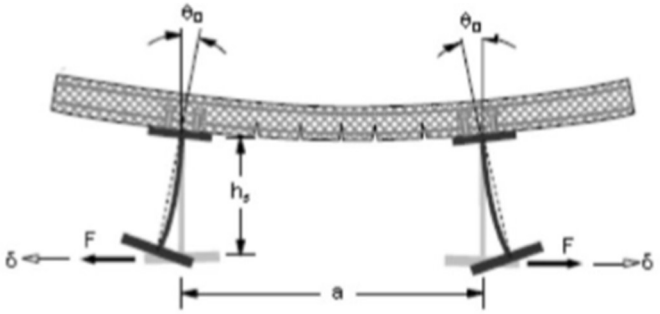
Oblik momentnog dijagrama	Odnos momenata savijanja ψ				
	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
	11,1	9,5	8,2	7,1	6,2
	11,1	12,8	14,6	16,3	18,1

Tablica 7.3 – Faktori C_4 za nosače s konzolom

Oblik momentnog dijagrama	Odnos momenata savijanja ψ			
	0,00	0,50	0,75	1,00
	11,1	8,2	7,1	6,2
	11,1	14,6	16,3	18,1

7.2 Metoda obrnutog U-okvira

Ako je betonska ploča oslonjena na više čeličnih nosača, elastični kritični moment bočno-torzijskog izvijanja M_{cr} može se odrediti prema modelu obrnutog U-okvira (slika 7.3).



Slika 7.3 – Model obrnutog U-okvira

Prema ovoj metodi rotacijska krutost čeličnog nosača k_s određuje se pomoću kuta zaokreta, odnosno rotacijske krutosti. Ukupna se rotacijska krutost sastoji od rotacijske krutosti betonske ploče ($1/k_1$), rotacijske krutosti zbog savijanja hrpta čeličnog nosača ($1/k_2$) i rotacijske krutosti moždanika ($1/k_3$). Općenito se smatra da je da posmična veza izvedena moždanicima koji nisu duktilni pa je $1/k_3 = 0$.

Rotacijska krutost raspucane betonske ploče u poprečnom smjeru na čelični nosač određena je izrazom (7.8), a za čelične poprečne presjeke bez obložnog betona vrijedi izraz (7.9). Za čelične poprečne presjeke s obložnim betonom vrijedi izraz (7.10). Ukupna rotacijska krutost tada se određuje pomoću izraza (7.11):

$$k_1 = \alpha \cdot \frac{(\mathrm{EI}_2)}{a} \tag{7.8}$$

$$k_2 = \frac{E_a \cdot t_w^3}{4 \cdot (1 - \nu_a^2) \cdot h_s} \tag{7.9}$$

$$k_2 = \frac{E_a \cdot t_w \cdot b_c^2}{16 \cdot h_s \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot n \cdot t_w}{b_c}\right)} \tag{7.10}$$

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \tag{7.11}$$

gdje su:

k_2 rotacijska krutost hrpta čeličnog nosača
ν_a Poissonov omjer za čelik
n omjer modula elastičnosti za dugotrajne učinke
b_c debljina obložnog betona
$\alpha = 2$ rubni raspon s konzolom ili bez konzole
$\alpha = 3$ središnji raspon
$\alpha = 4$ unutarnji raspon, ako unutar konstrukcije ima 4 ili više nosača
a osni razmak između čeličnih nosača.

7.3 Opći dokaz bočno-torzijskog izvijanja

Otpornost na bočno-torzijsko izvijanje kontinuiranih spregnutih nosača provodi se prema izrazu (7.12).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot M_{Rd} \tag{7.12}$$

Vrijednost faktora smanjenja χ_{LT} smije se uzeti iz norme HRN EN 1993-1-1 [1], točka 6.3.2.2 ili 6.3.2.3.

Za poprečne presjeke razreda 1 ili 2, moment M_{Rd} treba odrediti u skladu s točkom 6.2.1.2 iz norme HRN EN 1994-1-1 [5] za gredu čija se otpornost temelji na teoriji plastičnosti, u skladu s točkom 6.2.1.4 iz norme HRN EN 1994-1-1 [5] za gredu čija se otpornost na savijanje temelji na nelinearnoj teoriji, ili u skladu s točkom 6.3.2 iz norme HRN EN 1994-1-1 [5] za djelomično obloženu gredu, pri čemu se f_{yd} određuje pomoću parcijalnog koeficijenta γ_{M1} danog u normi EN 1993-1-1 [1], točka 6.1(1).

Za poprečne presjeke 3. razreda M_{Rd} treba odrediti pomoću izraza (6.4) iz norme HRN EN 1994-1-1 [5], ali za negativan proračunski moment savijanja koji uzrokuje vlačno naprezanje u armaturi ili tlačno

naprezanje u najudaljenijem donjem vlaknu čeličnog profila, pri čemu se odabire manja vrijednost. Vrijednost f_{yd} treba odrediti pomoću parcijalnog koeficijenta γ_{M1} danog u normi EN 1993-1-1 [1], točka 6.1(1),
gdje su:
M_{Rd} proračunska otpornost na savijanje
χ_{LT} faktor smanjenja za bočno-torzijsko izvijanje - ovisan o bezdimenzijskoj vitkosti $\bar{\lambda}_{LT}$ prema izrazu (7.13):

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{Rk}}{M_{cr}}} \tag{7.13}$$

Ako je ista ploča povezana s jednim ili više čeličnih elemenata na koje je oslonjena, a koji su približno paralelni razmatranoj spregnutoj gredi i ako su ispunjeni uvjeti iz točke 6.4.3(c), (e) i (f), HRN EN 1994-1-1 [5], proračun kritičnog elastičnog momenta bočno-torzijskog M_{cr} smije se temeljiti na modelu „kontinuiranog obrnutog U-okvira“.

7.4 Određivanje faktora smanjenja χ_{LT}

Opći postupak određivanja faktora smanjenja u skladu je s izrazima (7.14) i (7.15), a postupak za valjanje i istovrijedne zavarene profile s izrazima (7.16) i (7.17):

$$\Theta_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{LT}^2\right] \tag{7.14}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \tag{7.15}$$

$$\Theta_{LT} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2\right] \tag{7.16}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Theta_{LT} + \sqrt{\Theta_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \tag{7.17}$$

gdje su (prema hrvatskom nacionalnom dodatku):
$\beta = 0{,}75$
$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0{,}4$

7.5 Pojednostavnjeni dokaz bočno-torzijskog izvijanja

Ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti, moguće je primijeniti pojednostavnjeni dokaz bočno-torzijskog izvijanja:

1) Poprečni presjeci su 1., 2. ili 3. razreda.
2) Dužina najvećeg raspona ne premašuje najkraći za 20 %.
3) Dužina konzolnog dijela nosača ne premašuje 15 % dužine susjednog raspona.
4) Na svim je rasponima jednoliko raspodijeljeno opterećenje.
5) Proračunsko stalno opterećenje je minimalno 40 % ukupnog proračunskog opterećenja.

6) Gornja pojasnica čeličnog profila je s betonskom pločom povezana na odgovarajući način dovoljnim brojem moždanika.
7) Ploča je vezana s drugim nosačima tako da formira obrnuti U-okvir.
8) Raspon spregnute ploče jednak je razmaku čeličnih profila.
9) Na svakome je osloncu donja pojasnica čeličnog profila bočno pridržana, a hrbat ukrućen.
10) Granične visine profila, dane u tablici 7.4, ne smiju biti premašene.

Tablica 7.4 – Granične vrijednosti visine čeličnih profila (u mm)

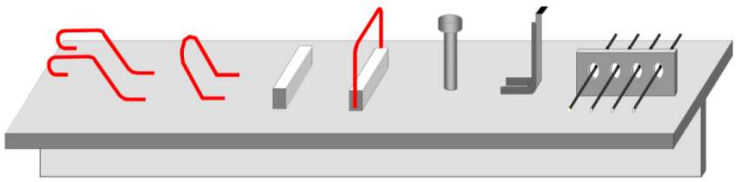
Čelični profil	Kvaliteta čelika			
	S235	S275	S355	S420 i S460
IPE	600	550	400	270
HE	800	700	650	500

Za poprečne presjeke obložene betonom, na visinu se može dodati 200 mm za kvalitetu čelika do S355, a za kvalitetu čelika S420 i S460 150 mm.

8 Sredstva za sprezanje

8.1 Općenito

Posmična veza kod konstrukcijskih elemenata koji su sastavljeni od dva jednaka ili različita materijala ostvaruju se pomoću spojnih sredstava. U svrhu osiguravanja zajedničkog djelovanja betonske ploče i čeličnog nosača, osmišljena su različita sredstva za ostvarivanje postavljenog cilja koja se nazivaju moždanicima. Danas postoji mnogo oblika moždanika koji se primjenjuju i u spregnutim konstrukcijama. Prva sredstva za sprezanje bila su napravljena od čelika za armaturu, čiji su oblici bili u obliku otvorenih sidara ili zatvorenih petlji. Za djelotvoran prijenos posmične sile iz čeličnog nosača u betonsku ploču potrebno je ugraditi i poprečnu armaturu. Također, korišteni su i tzv. čelični blok moždanici, koji su se izrađivali od čeličnih šipki pravokutnog poprečnog presjeka, dijelova L, T ili U profila i slično. Koristili su se samostalno ili u kombinaciji s petljama izrađenim od čelika za armaturu. Navedene vrste spojnih sredstava prikazane su na slici 8.1.



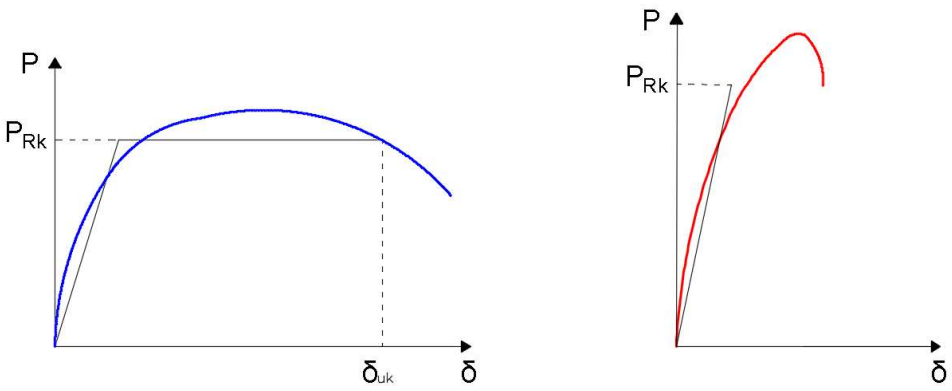
Slika 8.1 – Različite vrste moždanika

Valjkasti moždanici s glavom su najčešća sredstva za sprezanje u modernim spregnutim konstrukcijama te ujedno i jedina sredstva koja su normativno obrađena. Pritom se moždanici mogu ponašati različito s obzirom na mogućnost većeg ili manjeg proklizavanja. S tog gledišta, moždanici se dijele na:

- duktilne moždanike (vitki)
- neduktilne moždanike (krhki).

Duktilni moždanici prije otkazivanja mogu ostvariti znatne pomake između čelika i betona. Dakle, duktilni su moždanici oni koji imaju dostatni kapacitet deformacije da bi se opravdala pojednostavnjena pretpostavka o plastičnom ponašanju posmične veze između čelika i betona.

Krivulja posmik–proklizavanje (P-δ) dobiva se eksperimentom u laboratoriju (*push-out-test*). Na slici 8.2. prikazana je razlika između duktilnih i neduktilnih moždanika [4].

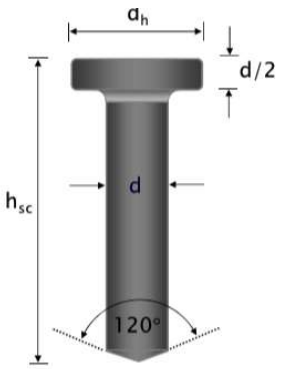


Slika 8.2 – Krivulje sila - pomak duktilnih (lijevo) i neduktilnih (desno) moždanika

Zahtjev duktilnosti svodi se na sposobnost deformacije moždanika u posmičnoj vezi čelik-beton. Ako je karakteristični kapacitet proklizavanja veći od δ_{uk} = 6 mm, moždanici se mogu smatrati duktilnim [4].

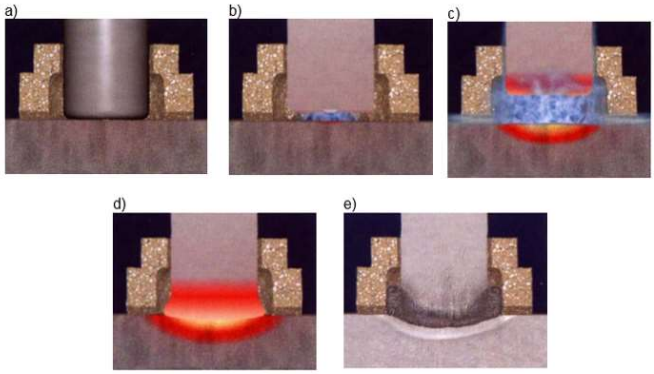
8.2 Osnovna svojstva valjkastih moždanika s glavom

Moždanike s glavom karakterizira valjkasto tijelo promjera *d*. Promjeri moždanika su 13, 16, 19, 22 i 25 mm. Glava moždanika ne treba imati promjer manji od 1,5 *d*, ni visinu manju od 0,4 *d*. Uobičajena visina moždanika (h_{sc}) je između 65 i 150 mm. Izrađuju se od materijala čija je vlačna čvrstoća $f_u \leq 500$ N/mm^2. Na slici 8.3 prikazan je moždanik s glavom sa svojim dimenzijama.



Slika 8.3 – Moždanik s glavom

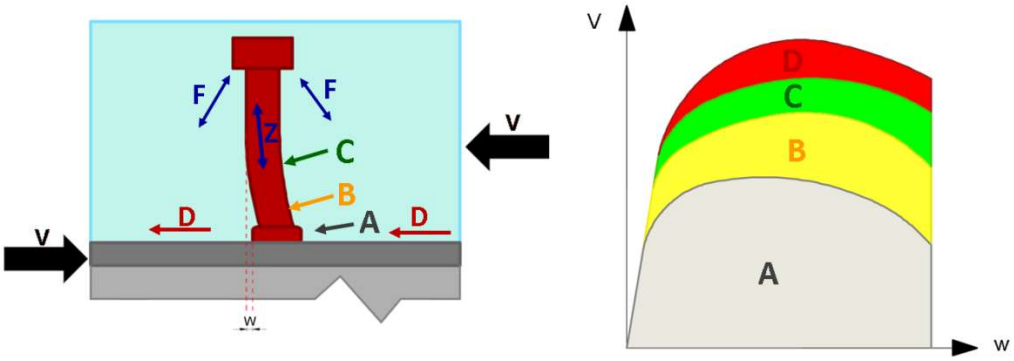
Ugradnja valjkastih moždanika s glavom izvršava se elektrolučnim zavarivanjem, pištoljem ili strojno u radionici. Najrasprostranjeniji je postupak zavarivanja moždanika s keramičkim prstenom. Moždanik se stavlja u pištolj koji je sastavni dio uređaja za zavarivanje, potom se na vrh moždanika postavlja keramički prsten. Nakon toga se u točno određenom trajanju pušta struja, uspostavlja se električni luk te se moždanik malo udalji od radnog komada kako bi se uspostavljenim električnim lukom postiglo ravnomjerno zagrijavanje, lokalno taljenje i omekšanje materijala na mjestu spoja. Nakon toga djeluje pritisak u određenom trajanju koji potiskuje moždanik i daje konačni oblik zavarenom spoju. Detalji vezani uz faze nastajanja elektrolučnog zavara moždanika prikazani su na slici 8.4 (a do e) [9].



Slika 8.4 – Faze elektrootpornog zavarivanja moždanika

8.3. Konstrukcijsko ponašanje valjkastih moždanika s glavom u monolitnoj ploči

Ukupni model nosivosti moždanika s glavom u punoj betonskoj ploči ilustriran je pomoću slike 8.5. Posmična se sila na moždanik u monolitnoj ploči u početku prenosi većim dijelom preko korijena moždanika (zavara) na beton – slika 8.5 (A). Zbog povećanja sile, povećaju se i tlačna naprezanja u betonu u zoni priključka (zavara) moždanika, što dovodi do lokalnog oštećenja betona, a time dolazi do preraspodjele posmične sile u tijelo moždanika koje se onda savija – slika 8.5 (B). Dakle, nosivost u području (A) određena je drobljenjem betona uz korijen moždanika. Posljedica su plastične deformacije u tijelu moždanika, a kako se glava moždanika još uvijek nalazi u neoštećenom dijelu, zbog horizontalnog pomaka na donjem dijelu dolazi do savijanja i vlačne sile *Z* u moždaniku te odgovarajuće tlačne sile *F* u betonu između donje strane glave moždanika i pojasnice čeličnog nosača. Dakle, u području (B) nosivost je određena posmičnom deformacijom tijela moždanika pri dnu do stvaranja plastičnog zgloba. Horizontalna komponenta sile *Z* dovodi do skošenja tijela moždanika – slika 8.5 (C) – te se nosivost ograničava fleksijskim i uzdužnim deformacijama tijela moždanika. Tlačne sile u betonu *F*, koje se nalaze ispod glave moždanika, aktiviraju pripadni dio okolnog betona i stvaraju dodatno trenje na kontaktnoj plohi između čelika i betona – slika 8.5 (D). Do otkazivanja nosivosti dolazi posmično vlačnim lomom iznad korijena moždanika [4].

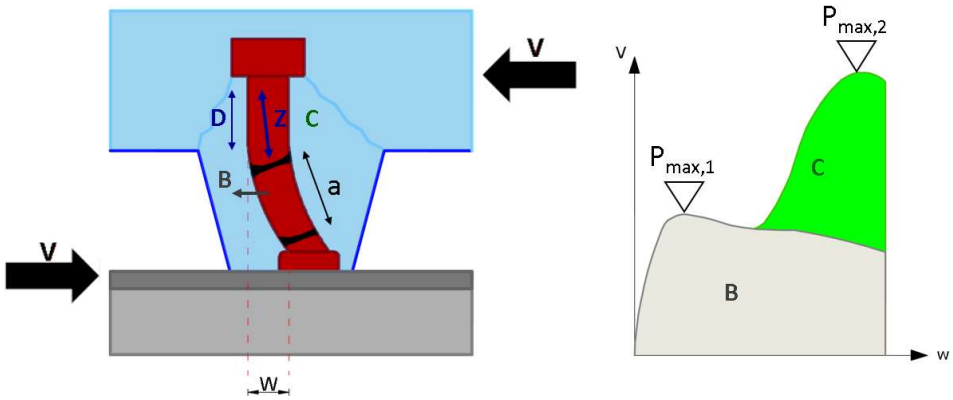


Slika 8.5 – Model nosivosti moždanika s glavom u punoj betonskoj ploči [7]

8.4. Konstrukcijsko ponašanje moždanika s glavom u ploči s profiliranim čeličnim limom

Ponašanje moždanika s glavom u spregnutoj ploči s trapeznim limovima ovisi o geometriji lima, odnosno o veličini i obliku vala u koji je ugrađen. Ponašanje moždanika u takvom slučaju, odnosno model nosivosti moždanika s glavom u ploči s profiliranim čeličnim limom, s rebrima okomitim na čelični nosač, prikazan je na slici 8.6. Posmična veza kod ploče izvedene s profiliranim limom ne može se ostvariti s otpornošću betona jer će povećanjem posmične sile V otkazati beton unutar rebra. Ukupna posmična sila V mora se preuzeti pomoću savijanja tijela moždanika – slika 8.6 (B). Kod dovoljne širine betona unutar profiliranog rebra formiraju se, kod dostizanja prvog maksimuma nosivosti ($P_{max,1}$) u tijelu moždanika, dva plastična zgloba. Tada prijenos posmične sile ovisi o razmaku plastičnih zglobova a. Zbog povećanja proklizavanja *w* i spriječenog vertikalnog pomaka glave moždanika, nastaje vlačno naprezanje u tijelu moždanika Z i tlačne sile u betonu D. Povećanjem sile V dostiže se drugi maksimum nosivosti ($P_{max,2}$) zbog otkazivanja tlačne sile u betonu D ili vlačne sile u tijelu moždanika Z. Najveća sila $P_{max,2}$ dosegnuta je kada dolazi do loma većeg dijela betonskog dijela – slika 8.6 (C) ili na mjestu zavara moždanika. Prijevremeno

otkazivanje većine betonskih rebara javlja se zbog premale širine betona oko moždanika. To znači da se drugi plastični zglob u tijelu moždanika ne može ostvariti, a krivulja nosivosti određena je onda s prvim maksimumom $P_{max,1}$ [4].



Slika 8.6 – Model nosivosti moždanika s glavom u ploči s profiliranim čeličnim limom, s rebrima okomitim čelični nosač [7]

8.5. Proračunska otpornost moždanika

Proračunska otpornost valjkastog moždanika s glavom u P_{Rd} može se odrediti pomoću dva izraza – jedan za slom preko moždanika $(P_{Rd}^{(1)})$, a drugi za slom betona $(P_{Rd}^{(2)})$. Mjerodavna otpornost moždanika je ona koja daje manju vrijednost (Tablica 8.1), u skladu s izrazom (8.1), dok se faktor korekcije potreban u izrazu (8.3) određuje prema izrazu (8.4) i (8.5):

$$P_{Rd} = min\,(P_{Rd}^{(1)}, P_{Rd}^{(2)}) \tag{8.1}$$

$$P_{Rd}^{(1)} = \frac{0{,}8 \cdot f_u \cdot (\frac{\pi \cdot d^2}{4})}{\gamma_v} \tag{8.2}$$

$$P_{Rd}^{(2)} = \frac{0{,}29 \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \tag{8.3}$$

$$\alpha = 0{,}2\left[\left(\frac{h_{sc}}{d}\right) + 1\right], \text{za } 3 \le \frac{h_{sc}}{d} \le 4 \tag{8.4}$$

$$\alpha = 1, \text{za } \frac{h_{sc}}{d} > 4 \tag{8.5}$$

gdje su:

d promjer tijela moždanika

f_u granična vlačna čvrstoća materijala od kojega je izrađen moždanik, ali ne veća od 500 N/mm^2 (uobičajena čvrstoća je 450 N/mm^2)

f_{ck} karakteristična čvrstoća betona

E_{cm} srednja vrijednost sekantnog modula elastičnosti betona

γ_v parcijalni faktor za proračunsku posmičnu otpornost moždanika s glavom $(\gamma_v = 1{,}25)$

α faktor korekcije koji uzima u obzir omjere vitkosti moždanika.

Faktor smanjenja 0,8 u izrazu (8.2) uzima u obzir interakciju unutarnjih sila u moždaniku. Faktor smanjenja 0,29 u izrazu (8.3) uzima u obzir višeosno stanje napona u betonu blizu unosa sila u moždanik [4].

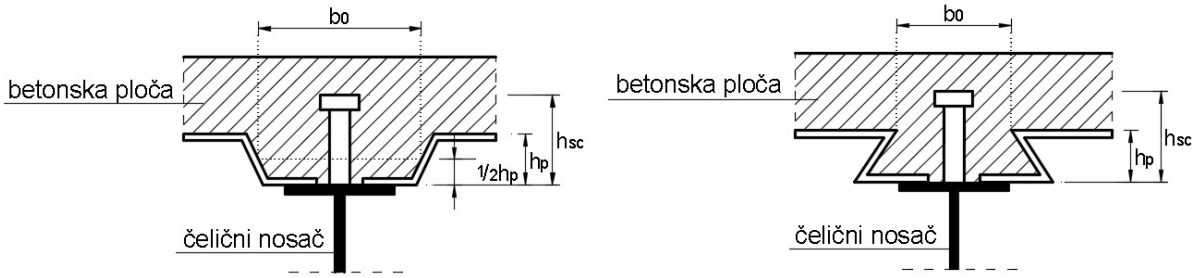
Tablica 8.1 – Proračunske nosivosti moždanika s glavom, za koje vrijedi $h_{sc}/d > 4$ i $\alpha = 1,0$ prema HRN EN 1994-1-1 [5] u kN

d [mm]		16	19	22	25
$P_{Rd}^{(1)}$	$(f_u = 450\ N/mm^2)$	57,9	81,7	109,5	141,4
$P_{Rd}^{(2)}$	C 20/25	**46,0**	**64,9**	**87,0**	**112,3**
	C 25/30	**52,3**	**73,7**	**98,9**	**127,7**
	C 30/37	58,1	81,9	109,8	141,8
	C 35/45	64,1	90,4	121,2	156,5
	C 40/50	69,8	98,4	131,9	170,3
	C 45/55	75,3	106,2	142,3	183,8
	C 50/60	80,6	113,9	152,3	196,7

Koeficijent smanjenja nosivosti moždanika kod ploče s profiliranim čeličnim limom ovisi o položaju profiliranog lima u odnosu na čelični nosač. Kada se koriste profilirani limovi koji su postavljeni paralelno u odnosu na smjer pružanja čeličnog nosača, potrebno je odgovarajuću proračunsku otpornost pomnožiti s faktorom smanjenja k_l prema izrazu (8.6), unutar kojega je h_{sc} visina moždanika, ali ne veća od h_p + 75 mm.

$$k_l = 0,6 \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1\right) \leq 1,0 \tag{8.6}$$

Slučaj kada su rebra profiliranog lima paralelna s čeličnim nosačem prikazan je na slici 8.7.



Slika 8.7 – Profilirani lim položen na čelični nosač tako da su mu rebra paralelna s nosačem

Ako se profilirani limovi postavljaju poprečno u odnosu na smjer pružanja čeličnog nosača, tada se proračunska otpornost mora pomnožiti s koeficijentom smanjenja k_t koji se odredi prema izrazu (8.7):

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \cdot \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1\right) \leq k_{t,max} \tag{8.7}$$

U izrazu (8.7) n_r je broj moždanika s glavom u jednom rebru (ne smije prelaziti 2 u proračunima). Trebaju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti:

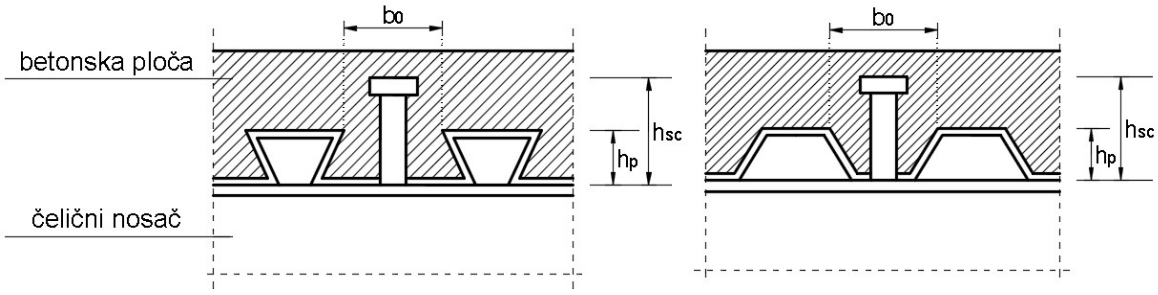
- promjer moždanika $d \leq$ 20 mm
- visina vala profiliranog lima $h_p \leq 85$ mm
- $b_0 \geq h_p$.

Koeficijent smanjenja nosivosti moždanika s glavom k_t može se maksimalno uzeti (gornja granica $k_{t,max}$) prema tablici 8.2.

Tablica 8.2 – Gornja granična vrijednost $k_{t,max}$ koeficijenta smanjenja k_t

Broj moždanika po rebru profila	Debljina lima *t* [mm]	Moždanici promjera manjeg od 20 mm zavareni za čelični nosač kroz trapezni lim	Moždanici promjera 19 i 22 mm zavareni za čelični nosač kroz rupu u trapeznom limu
$n_r = 1$	≤ 1,0 > 1,0	0,85 1,0	0,75 0,75
$n_r = 2$	≤ 1,0 > 1,0	0,70 0,80	0,60 0,60

Slučaj kada su rebra profiliranog lima okomita na čelični nosač prikazan je na slici 8.8.



Slika 8.8 – Profilirani lim položen na čelični nosač tako da su mu rebra okomita na nosač

Ako moždanici moraju osigurati zajedničko djelovanje za gredu i spregnutu ploču, moraju se proračunati za kombinaciju sila korištenjem izraza za međudjelovanje [2]:

$$\frac{F_l^2}{P_{l,Rd}^2} + \frac{F_t^2}{P_{t,Rd}^2} \leq 1 \qquad (8.8)$$

U izrazu (8.8) oznake su sljedeće:

F_l i F_t proračunska posmična sila

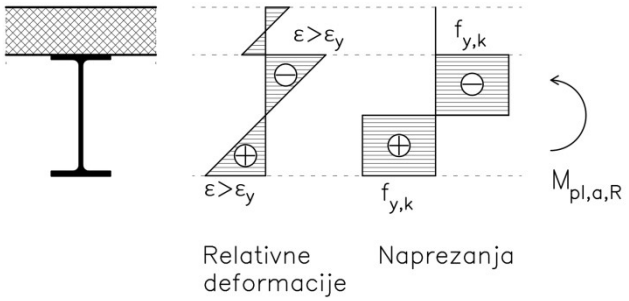
$P_{l,Rd}$ i $P_{t,Rd}$ odgovarajuće proračunske otpornosti moždanika na smicanje.

9 Posmični spoj

Ostvarivanje posmičnog spoja u spregnutim nosačima izvedenima od čelika i betona važno je sa stajališta nosivosti poprečnog presjeka na savijanje – stupanj posmičnog spoja diktira koliku vrijednost momenta savijanja spregnuti poprečni presjek može prenositi. HRN EN 1994-1-1 [5] daje preporuke za izvedbu posmičnog spoja koristeći valjkaste moždanike s glavom, pri čemu se razlikuje potpuni i djelomični posmični spoj.

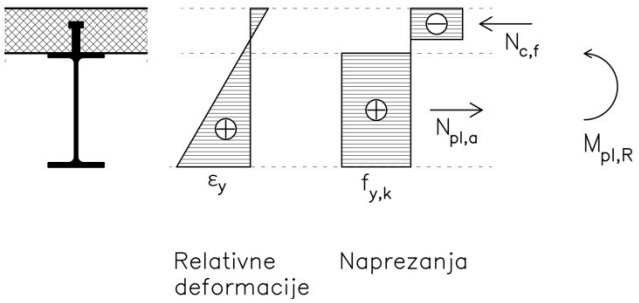
9.1 Važnost posmične veze

Za spregnute nosače izvedene od čelika i betona, usporedit će se tri karakteristična slučaja. Promatra se jednostavno oslonjena greda raspona *L* na koju djeluje opterećenje koje dovodi do plastifikacije poprečnog presjeka. Prvi je slučaj kada ne postoji posmični spoj, na čelični nosač oslonjena je betonska ploča. U tom je slučaju presjek u stanju preuzeti moment koji je jednak $M_{pl,a,R}$. Sila u vezi čelik-beton ne postoji, pomak u vezi između čelika i betona najveći je na osloncu te se smanjuje prema polovini raspona [4]. Stanje naprezanja i deformacija prikazano je na slici 9.1.



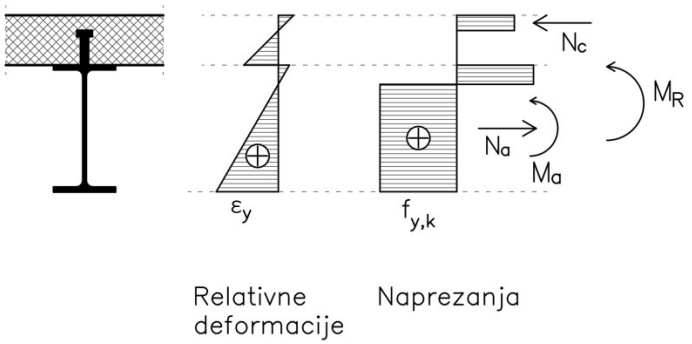
Slika 9.1 - Relativne deformacije i naprezanja spregnutog nosača bez posmične veze prema [4]

Drugi je slučaj kada je ostvaren potpuni posmični spoj između čeličnog nosača i betonske ploče i nosač se promatra do stanja sloma. U tom je slučaju poprečni presjek u stanju preuzeti moment koji je jednak $M_{pl,R}$ [4]. Sila u vezi čelik-beton najveća je na osloncu te se smanjuje prema polovini raspona, no kod polovine raspona dolazi do povećanja sile u vezi. Razlog tomu je činjenica da se čelični nosač plastificira te moždanici na sebe preuzimaju dodatnu silu. Zbog toga moždanici moraju imati dovoljnu sposobnost deformiranja kako bi opravdali proračunske pretpostavke [2]. Pomaka u vezi nema, a stanje naprezanja i deformacija prikazano je na slici 9.2.



Slika 9.2 - Relativne deformacije i naprezanja spregnutog nosača s potpunom posmičnom vezom prema [2]

Treći je slučaj kada je ostvaren djelomični posmični spoj između čeličnog nosača i betonske ploče. U tom je slučaju poprečni presjek u stanju preuzeti moment koji je jednak M_R [4]. Sila u vezi je jednolika, najveća je na osloncu i polagano se smanjuje prema polovini raspona. Prilikom djelomičnog posmičnog spoja zahtijeva se primjena duktilnih moždanika pa su oni u stanju preraspodijeliti dodatne sile koje nastaju zbog plastifikacije čeličnog nosača [2]. Pomak u vezi postoji, no manji je nego kada nema posmičnog spoja. Stanje naprezanja i deformacija prikazano je na slici 9.3.



Slika 9.3 - Relativne deformacije i naprezanja spregnutog nosača s djelomičnom posmičnom vezom prema [2]

9.2 Stupanj sprezanja i posmično međudjelovanje

Stupanj sprezanja definira se prema izrazu (9.1). Dakle, stupanj sprezanja je odnos sile koju prenosi ugrađeni broj moždanika i sile koja je potrebna da se ostvari potpuni posmični spoj. Najmanji stupanj sprezanja koji mora biti ostvaren kako bi se nosač smatrao spregnutim iznosi 0,4:

$$\eta = \frac{N_c}{N_{c,f}} = \frac{n}{n_f} \tag{9.1}$$

gdje su:

N_c sila u betonu za ugrađeni broj moždanika
$N_{c,f}$ sila koja se mora javiti u betonu kako bi se ostvarila potpuna posmična veza
N ugrađeni broj moždanika
n_f broj moždanika koji treba biti ugrađen za potpunu posmičnu vezu.

Posmična interakcija (posmična krutost spoja) ovisi o početnoj krutosti moždanika i njihovog broja. Ako je stupanj sprezanja jednak 0, može se reći da nema posmične krutosti. Ako je stupanj sprezanja između 0 i 1, može se reći da postoji djelomična posmična krutost. Ako je stupanj sprezanja jednak ili veći od 1, može se reći da postoji potpuna posmična krutost. Potpuna posmična krutost odgovara situaciji kada su relativni pomaci čeličnog nosača i betonske ploče dovoljno mali da se mogu zanemariti. Apsolutna posmična krutost bila bi ostvarena kod neizmjerne krutosti moždanika ili njihovog neizmjernog broja, što nije realan slučaj. Stupanj sprezanja promatra se s aspekta nosivosti spoja, a posmično međudjelovanje s aspekta deformacija spoja [4].

9.3 Potpuni posmični spoj

Primjena potpunog posmičnog spoja moguća je kod svih tipova nosača, no obvezna je kod poprečnih presjeka 3. i 4. razreda te kod negativnog momenta savijanja. Broj potrebnih moždanika određuje se prema izrazu (9.2), gdje su $V_{L,Ed}$ proračunska uzdužna posmična sila i P_{Rd} otpornost jednog moždanika:

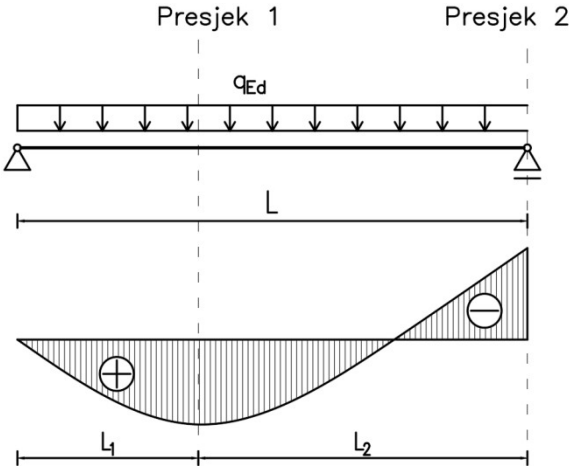
$$n_f = \frac{V_{L,Ed}}{P_{Rd}} \tag{9.2}$$

Određivanje proračunske uzdužne posmične sile ovisi o položaju na nosaču. Na slici (9.4) prikazana je polovina kontinuiranog nosača preko dva raspona. Za područje L_1 proračunska uzdužna posmična sila određuje se prema izrazu (9.3):

$$V_{L,Ed} = \min\left(A_a \cdot f_{yd}; b_{eff} \cdot h_c \cdot 0.85 \cdot f_{cd}\right) \tag{9.3}$$

gdje su:

A_a ploština čeličnog nosača
f_{yd} proračunska granica popuštanja čeličnog nosača
b_{eff} proračunska širina betonske ploče
h_c visina betonske ploče
f_{cd} proračunska tlačna čvrstoća betona.



Slika 9.4 - Polovina kontinuiranog nosača preko dva oslonca

U područjima negativnih momenata savijanja (područje L_2), proračunska uzdužna posmična sila određuje se prema izrazu (9.4), gdje su A_s ploština armature i f_{sd} proračunska granica popuštanja armature.

$$V_{L,Ed} = A_s \cdot f_{sd} + min\left(A_a \cdot f_{yd}; b_{eff} \cdot h_c \cdot 0.85 \cdot f_{cd}\right) \tag{9.4}$$

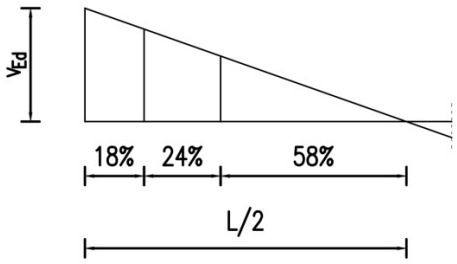
Dobivenu vrijednost $V_{L,Ed}$ moguće je smanjiti sukladno iskorištenosti spregnutog poprečnog presjeka na moment savijanja. Kod primjene potpunog posmičnog spoja i teorije elastičnosti, potrebno je moždanike rasporediti prema posmičnom toku koji se određuje prema izrazu (9.5), unutar kojega su V_{Ed} proračunska poprečna sila i S statički moment tromosti presjeka.

$$v_{Ed} = V_{Ed} \cdot \frac{S}{I} \tag{9.5.}$$

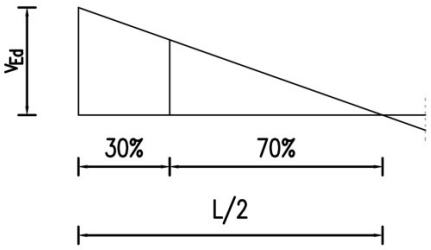
Kada se odredi dijagram posmičnog toka, moguće ga je podijeliti na nekoliko odsječaka istih površina, pri čemu je dopušteno stupnjevati svaki odsječak za najviše 10 % [10]. Uvriježene su dvije metode, a to su:

- podjela polovine nosača na tri odsječka
- podjela polovine nosača na dva odsječka.

Ako se polovina nosača podijeli na tri odsječka, relativne duljine svakog odsječka iznose 18, 24 i 58 % (slika 9.5). Ako se polovina nosača podijeli na dva odsječka, relativne duljine svakog odsječka iznose 30 i 70 % (slika 9.6). U svaki odsječak postavlja se isti broj moždanika [10]. Prilikom ugradnje moždanika potrebno je poštivati pravila o ugradnji moždanika.



Slika 9.5 - Raspored moždanika kod potpunog posmičnog spoja, podjela na 3 odsječka



Slika 9.6 - Raspored moždanika kod potpunog posmičnog spoja, podjela na 2 odsječka

Kod proračuna posmičnog spoja za spregnute poprečne presjeke koji se proračunavaju po teoriji elastičnosti, proračun se svodi na određivanje posmičnog toka, v_{Ed}. Nosač je također moguće podijeliti na nekoliko odsječaka s istom poprečnom silom, no nije dopušteno stupnjevanje dijagrama posmičnog toka. Tada je za svaki odsječak potrebno odrediti posmičnu otpornost po jedinici duljine pomoću izraza (9.6), unutar kojega je e_L osni (svijetli) razmak moždanika:

$$v_{Rd} = \frac{P_{Rd}}{e_L} \tag{9.6}$$

Nakon što se odredi posmična otpornost po jedinici duljine, potrebno je provjeriti da poprečna sila u polovini raspona ne prelazi ukupnu posmičnu otpornost. Moždanici se raspoređuju prema odabranim razmacima koji moraju biti unutar dopuštenih granica.

9.4 Djelomična posmična veza

Primjena djelomičnog posmičnog spoja moguća je ako vrijede sljedeći uvjeti:

- područje pozitivnih momenata savijanja
- poprečni presjeci unutar kritičnih duljina su razreda 1 ili 2.

Za primjenu djelomičnog posmičnog spoja koriste se duktilni moždanici. Moždanik se može smatrati duktilnim ako su zadovoljeni uvjeti:

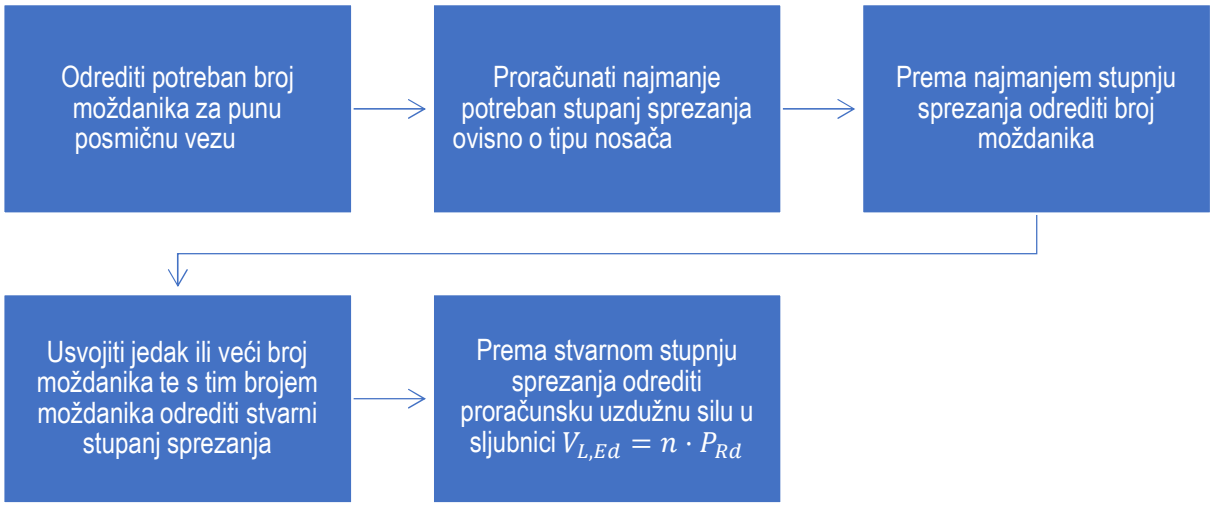
- stupanj posmične veze zadovoljava najmanji potrebni stupanj posmične veze, ovisno o tipu nosača
- promjer moždanika veći je od 16 mm te manji od 25 mm
- visina moždanika nakon zavarivanja veća je od $4 \cdot d$.

Najmanji stupanj sprezanja razlikuje se ovisno o tipu nosača. Ako se radi o dvoosno simetričnom presjeku, najmanji stupanj sprezanja određuje se prema izrazu (9.7). Ako se radi o valjanom čeličnom nosaču s čeličnim trapeznim limovima i duktilnim moždanicima, najmanji stupanj sprezanja određuje se prema izrazu (9.8):

$$L_e \leq 25\ m \rightarrow \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y}\right) \cdot (0.75 - 0.03 \cdot L_e)\ ; \eta \geq 0.4$$
$$L_e > 25\ m \rightarrow \eta \geq 1.0 \qquad (9.7)$$

$$L_e \leq 25\ m \rightarrow \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y}\right) \cdot (1.00 - 0.04 \cdot L_e)\ ; \eta \geq 0.4$$
$$L_e > 25\ m \rightarrow \eta \geq 1.0 \qquad (9.8)$$

Tijek proračuna spregnutog nosača s djelomičnim posmičnim spojem prikazan je na slici 9.7.



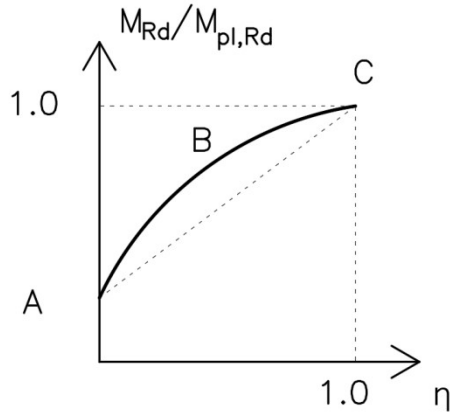
Slika 9.7 - Algoritam proračuna djelomične posmične veze

Kod primjene duktilnih moždanika i djelomičnog posmičnog spoja, moguće je moždanike rasporediti jednoliko unutar raspona ako vrijede sljedeći uvjeti:

- zadovoljen je najmanji stupanj sprezanja
- svi presjeci unutar kritične duljine su razreda 1 ili 2
- $M_{pl,Rd}/M_{pl,a,Rd} \leq 2.5$,

gdje je $M_{pl,a,Rd}$ plastična otpornost čeličnog nosača na savijanje.
Osim na navedeni način, moždanike je moguće rasporediti kao i kod potpune posmične veze.

Dijagram na slici (9.8.) prikazuje odnos plastične otpornosti spregnutog poprečnog presjeka na savijanje i stupnja posmičnog spoja.



Slika 9.8 - Odnos plastične otpornosti spregnutog presjeka i stupnja posmičnog spoja

Točka A na slici 9.8. predstavlja situaciju kada nije ostvaren posmični spoj te se otpornost na savijanje svodi na plastičnu otpornost čeličnog nosača na savijanje. Točka C na slici 9.8. predstavlja situaciju kada je ostvaren potpuni posmični spoj. Točka B na slici 9.8. predstavlja situaciju kada je ostvaren djelomični posmični spoj. Plastična otpornost spregnutog poprečnog presjeka na savijanje kod djelomične posmične određuje se prema izrazu (9.9):

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + \left(M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}\right) \cdot \frac{N_c}{N_{c,f}} \tag{9.9}$$

9.5 Konstrukcijske preporuke

Konstrukcijske preporuke detaljno su prikazane u [5], od kojih su u nastavku izdvojene najvažnije.

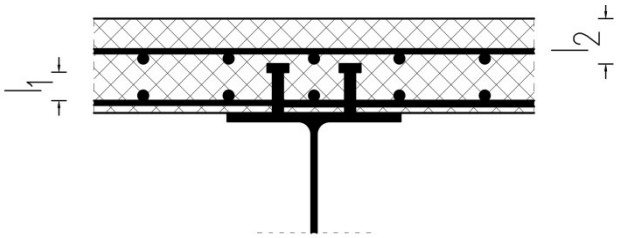
Ako je stabilnost čeličnog nosača ili betonske ploče uvjetovana njihovim spojem, razmak moždanika mora biti dovoljno mali kako bi pretpostavka bila zadovoljena. Za tlačnu pojasnicu koja je 3. ili 4. razreda može se smatrati da je 1. ili 2. razreda (korištenje plastične teorije proračuna umjesto elastične teorije proračuna) ako razmak moždanika zadovoljava:

- $22 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y}$, ako postoji kontakt s pločom duž čitavog nosača (puna ploča)
- $15 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y}$, ako ploča nije u kontaktu duž nosača (ploča s rebrima poprečno na gredu)
- svijetli razmak od ruba tlačne pojasnice do moždanika treba biti manji od $9 \cdot t_f \cdot \sqrt{235/f_y}$.

Razmaci moždanika u smjeru djelovanja uzdužne posmične sile ne smiju biti manji od $4 \cdot d$. Razmaci moždanika u smjeru poprečno na smjer djelovanja uzdužne posmične sile ne smiju biti manji od $2.5 \cdot d$ kod punih ploča te $4 \cdot d$ kod ostalih slučajeva. Najveći razmak moždanika ne smije biti veći od $\min(6 \cdot d, 800\ mm)$. Ukupna visina moždanika treba biti veća od $3 \cdot d$. Promjer glave moždanika treba biti veći od $1.5 \cdot d$, a visina glave moždanika treba biti veća od $0.4 \cdot d$. Kod elemenata koji su izloženi vlaku ili zamoru, promjer moždanika treba biti manji od $1.5 \cdot t_f$, gdje je t_f debljina pojasnice na koju je moždanik zavaren. Ako moždanici nisu zavareni izravno iznad hrpta, promjer zavarenog moždanika treba biti manji od $2.5 \cdot t$, gdje je *t* debljina dijela za koji je moždanik zavaren. Ako se moždanici s glavom primjenjuju s čeličnim profiliranim limom u zgradarstvu, gornja ploha moždanika treba biti na udaljenosti najmanje $2 \cdot d$ od gornjeg ruba čeličnog lima. Najmanja širina žlijeba čeličnog lima treba biti veća od 50 mm. Ako se u profilirani lim moždanici ne mogu postaviti po sredini žlijeba, treba ih postaviti naizmjence s obje strane žlijeba duž raspona.

Na slici 9.9. vrijednost L_1 je udaljenost koja se opire silama odizanja te ona mora biti najmanje 30 mm mjereno od donje plohe moždanika do donje armature. L_2 predstavlja zaštitni sloj betona koji treba biti veći od vrijednosti:

- najmanje 20 mm
- određen prema HRN EN 1992-1-1 [6] sukladno razredu okoliša i namjeni objekta, umanjen za 5 mm.

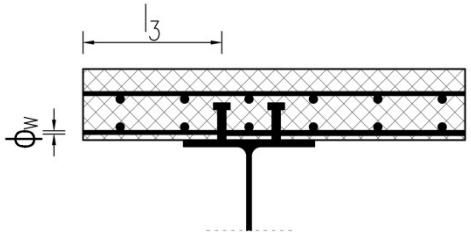


Slika 9.9 - Konstrukcijske preporuke za zaštitni sloj i visinu betona protiv odizanja

Moguće je izostaviti zaštitni sloj ako se tako zahtijeva te tada vrh moždanika smije biti poravnan s gornjom plohom betonske ploče. Ova situacija moguća je samo u suhim i neagresivnim sredinama, gdje se ne očekuju problemi s korozijom. Prilikom izvedbe potrebno je osigurati prikladno zbijanje betona oko osnovice moždanika. Posmični spoj ne treba izložiti deformiranju sve dok beton ne postigne čvrstoću valjka od 20 MPa.

Na slici 9.10 vrijednost L_3 predstavlja udaljenost od ruba betonske ploče do osi najbližeg moždanika. Ako je ta udaljenost manja od 300 mm, zbog sprječavanja uzdužnog cijepanja betonske pojasnice moždanicima treba:

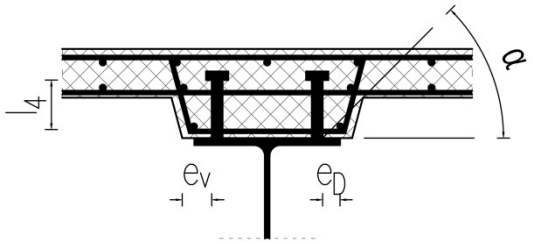
- osigurati poprečnu armaturu sponama oblika U koje prolaze oko moždanika te iste spone postaviti što je moguće niže, pri čemu treba poštivati dovoljan zaštitni sloj s donje strane
- spone oblika U trebaju biti promjera najmanje $0.5 \cdot d$
- udaljenost L_3 ne treba biti manja od $6 \cdot d$ kod primjene moždanika s glavom.



Slika 9.10 - Konstrukcijske preporuke za poprečnu armaturu i zaštitu od uzdužnog cijepanja

U područjima s negativnim momentima savijanja vlačna armatura mora biti odgovarajuće usidrena i prilagođena razmaku moždanika.

Na slici 9.11 L_4 predstavljena je udaljenost koja se opire odizanju. Mjerena od donje plohe moždanika do poprečne armature, ne bi trebala biti manja od 40 mm. Zaštitni sloj od ruba vute do moždanika e_V ne treba biti manji od 50 mm, dok udaljenost između ruba vute i ruba pojasnice grede na koju je moždanik zavaren, ne treba biti manji od e_D 20 mm. Ako se upotrebljava betonska vuta između donje plohe betonske ploče i čeličnog nosača, strane vute trebaju ležati izvan linije povučene pod kutom od 45° iz vanjskog ruba moždanika, što predstavlja oznaka α. Debljina čelične ploče ili pojasnice na koju se moždanik zavaruje mora biti dostatna kako bi se osiguralo pravilno zavarivanje i pravilan prijenos opterećenja od moždanika na ploču, bez lokalnog sloma ili prekomjernog deformiranja.



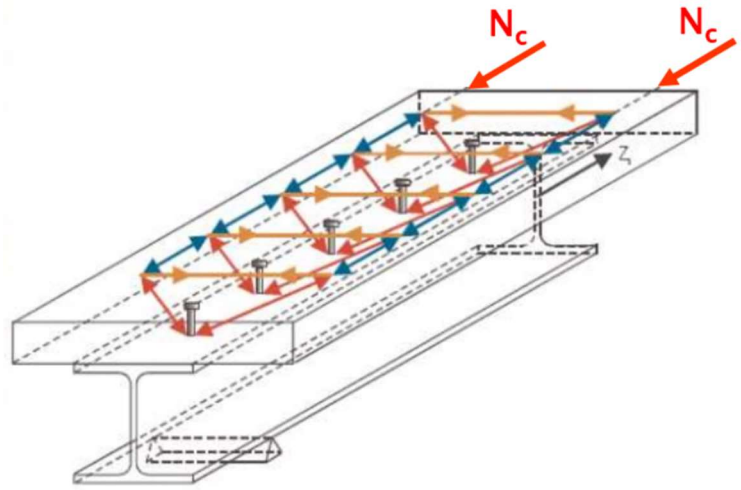
Slika 9.11 - Konstrukcijske preporuke za betonsku vutu

10 Uzdužni posmik u betonskoj ploči

10.1 Osnove

Posmični spoj na kontaktu čeličnog i betonskog dijela spregnutog poprečnog presjeka mora preuzeti proračunske uzdužne sile nastale u dijelovima spregnutog poprečnog presjeka zbog sprezanja. To izaziva koncentrirane sile na mjestu moždanika, koje pak uzrokuju složeno stanje naprezanja u betonskoj ploči koje može dovesti do lokalnog posmičnog sloma ili cijepanja ploče. Stoga je potrebno odgovarajućom poprečnom armaturom osigurati cjelovitost i pouzdanost relativno tanke betonske ploče u ravnini posmika [5].

Kao i u betonskim konstrukcijama, prema [5] se potrebna površina poprečne armature određuje korištenjem analogije s rešetkastim nosačem (analogija rešetke po Moerschu), pri čemu tlačne dijagonale predstavljaju betonski dio (crvene strelice na slici 10.1), a poprečnu armaturu vlačne zatege (narančaste strelice na slici 10.1).



Slika 10.1 - Formiranje raspodjele sila unutar betonske pojasnice [2]

Kao i prilikom proračuna betonskih konstrukcija, kut između elemenata rešetke Θ bira projektant, kao vrijednost u rasponu od 26,5° do 45° ako je betonska pojasnica u tlaku, odnosno u rasponu od 38,6° do 45° ako je betonska pojasnica u vlaku [4]. Pritom se prednost daje manjim kutovima jer će time proračunom određena potrebna poprečna armatura biti manja te će se više iskoristiti betonska pojasnica.

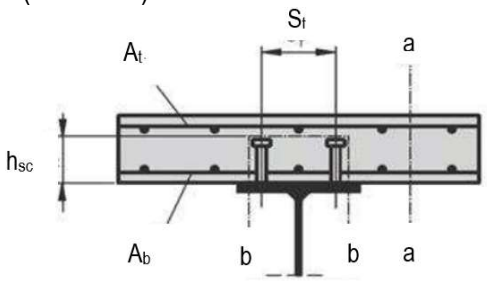
Važno je osigurati da proračunski uzdužni posmik po jedinici duljine grede i posmičnoj površini bude usklađen s proračunom i razmakom moždanika [2].

Potrebno je dokazati da je proračunsko naprezanje zbog uzdužnog posmika ν_{Ed} na bilo kojoj potencijalnoj površini ploče na kojoj može nastupiti slom, manje od proračunske otpornosti betonske ploče na uzdužni posmik za tu površinu [2]. Za svaki tip posmične površine proračunsko naprezanje zbog uzdužnog posmika određuje se iz proračunskog uzdužnog posmika po jedinici duljine grede, uzimajući u obzir broj posmičnih ravnina i duljinu posmične površine [5].

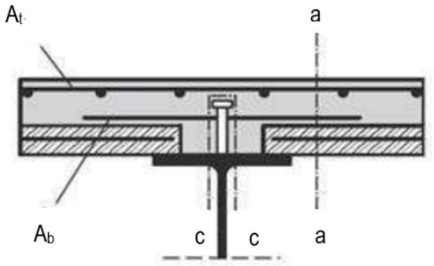
10.2 Površine posmika

Dokaz otpornosti na uzdužni posmik potrebno je provesti za kritične presjeke u betonskoj pojasnici te površine kontura moždanika [4]. Pritom se razlikuju četiri karakteristične površine [2]:

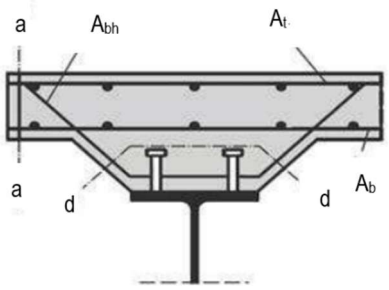
1. Tip a-a → betonska ploča (puni presjek kroz ploču izvan čelične grede) (slika 10.2)
2. Tip b-b → „U“ presjek kroz čeličnu pojasnicu i pripadni dio betonske ploče do neposredno iznad moždanika (slika 10.2)
3. Tip c-c → presjek b-b, ali za slučaj s jednim moždanikom (slika 10.3)
4. Tip d-d → presjek b-b, ali kod presjeka s vutom, pri čemu presjek ide kroz kose stranice vute, a ne kroz čeličnu pojasnicu (slika 10.4).



Slika 10.2 - Posmične površne a-a i b-b [5]



Slika 10.83 - Posmične površine a-a i c-c [5]



Slika 10.94 - Posmične površine a-a i d-d [5]

Za svaki od tipova posmičnih površina definira se njezina duljina u ravnini presjeka i pripadni broj presjeka poprečne armature po jedinici duljine (A_{sf}/s_f), što je prikazano u tablici 10.1 [2].

Tablica 10.1 - Pripadni broj presjeka poprečne armature po jedinici duljine [5]

Tip	A_{sf}/s_f
a-a	$A_b + A_t$
b-b	$2A_b$
c-c	$2A_b$
d-d	$2A_{bh}$

10.3 Model otpornosti

Model otpornosti betonske ploče na uzdužni posmik temelji se na normi HRN EN 1992-1-1 [6]. Uzdužne posmične sile po jedinici dužine u presjeku betonske pojasnice $V_{L,Ed}$ računaju se iz razlike uzdužnih sila dijela betonske pojasnice, a dokaz otpornosti s obzirom na uzdužni posmik u kritičnom se presjeku provodi prema modelu rešetkastog nosača [4].

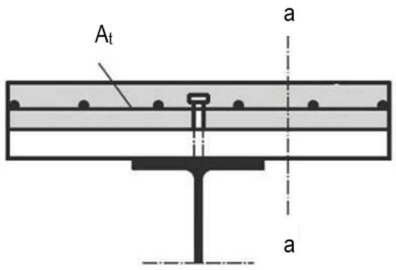
Odabrana poprečna armatura mora biti propisno usidrena, a propisano je i osiguranje minimalne površine armature u skladu s normom HRN EN 1992-1-1 [6].

10.4 Profilirani čelični limovi

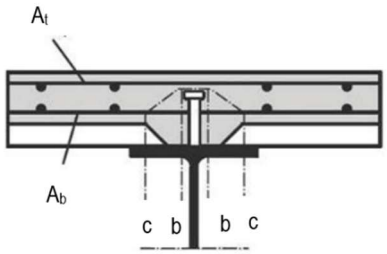
U slučaju korištenja spregnutih ploča s profiliranim trapeznim čeličnim limovima potrebno je razmotriti može li se učinak lima uključiti u model otpornosti. Norma HRN EN 1994-1-1 [5] daje pravila koja se za tu svrhu odnose na trapezne čelične limove čija su rebra postavljena okomito na spregnuti nosač ili se pružaju paralelno s njime (nema pravila za kutove između). Osim o smjeru polaganja lima, njegov doprinos na prijenos uzdužnog posmika ovisit će o postojanju kontinuiteta lima (primjerice, je li lim prekinut na mjestu čeličnog nosača) i rubnim detaljima (primjerice, jesu li pričvršćeni moždanicima zavarenim kroz njih) [2].

Debljina ploče h_f uzima se kao debljina betona iznad lima. Ako se koristi profilirani čelični lim s mehaničkim sprezanjem ili sprezanjem pomoću trenja i s rebrima postavljenim okomito na nosač, kontinuirano duž gornje pojasnice čeličnog nosača, dopušta se uzimanje u obzir njegovog doprinosa poprečnoj armaturi za kritični presjek a-a. Ako se profilirani lim koristi okomito na nosač i proračunska otpornost moždanika je određena korištenjem odgovarajućeg faktora k_t, nije potrebno razmatrati posmičnu površinu b-b. Ako nije provjereno ispitivanjima, kod određivanja kritičnog presjeka c-c, ne smije se uključiti visina rebra profiliranog lima u visinu h_f [4].

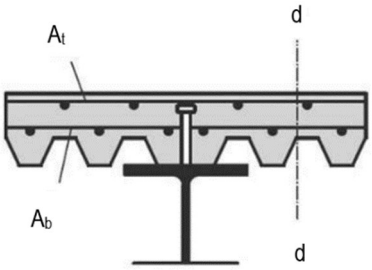
Norma HRN EN 1994 -1-1 [5] definira posmične površine na način opisan u poglavlju 10.2, prikazane na slikama 10.5, 10.6 i 10.7.



Slika 10.510 - Posmična površina a-a [5]



Slika 10.6 - Posmične površine b-b i c-c [5]



Slika 10.7 - Posmična površina d-d [5]

Za svaki od tipova posmičnih površina definira se njezina duljina u ravnini presjeka i pripadni broj presjeka poprečne armature po jedinici duljine (A_{sf}/s_f), prikazan u tablici 10.2 [2].

Tablica 10.2 - Pripadni broj presjeka poprečne armature po jedinici duljine [5]

Tip	A_{sf}/s_f
a-a	A_t
b-b	$2A_b$
c-c	$2A_b$
d-d	$2A_{bh}$

11 Granično stanje uporabljivosti kod spregnutih greda

Granično stanje uporabljivosti uključuje provjeru vibracija, progiba i stvaranja pukotina u betonu. Osnovna je zadaća osigurati funkcionalnost konstrukcije i svakog elementa pod normalnim uvjetima uporabe, osigurati ugodu boravka ljudima i odgovarajući izgled građevine.

Za proračun naprezanja u obzir se moraju uzeti:

1) zaostajanje posmika
2) puzanje i skupljanje
3) način izgradnje (poduprto ili nepoduprto)
4) nepotpunost posmične veze
5) neelastično ponašanje čelika i betona (ako postoji)
6) izobličenja zbog torzije i krivljenja nosača (ako postoji)
7) raspucanost betona i vlačna krutost betona.

U zgradama bez izvođenja prednapinjanja i kod mirnog opterećenja ne zahtijeva se ograničenje naprezanja. Jednako vrijedi i za spregnute stupove.

Procjena vibracija je bitna za nosače velikih raspona. Kod konstrukcija zgrada često se mogu izbjeći točnije analize.

11.1 Progib

Kod spregnutih nosača progib ovisi o: redoslijedu izgradnje, raspucanosti betona u području vlačnih naprezanja, skupljanju i puzanju betona, popuštanju čelika zbog djelomične plastifikacije nad unutarnjim osloncem i nepotpune posmične veze.

Redoslijed izgradnje

Ako je spregnuti element nepoduprt tijekom izgradnje, progibi za čelični element određuju se prema HRN EN 1993-1-1 [1], dok se za opterećenje koje djeluje na spregnuti element (tj. nakon očvrsnuća betona) progibi izračunavaju na spregnutom elementu. U oba se slučaja primjenjuje teorija elastičnosti.

Nepotpunost posmične veze

Nepotpunost posmične veze može se zanemariti ako je stupanj sprezanja η> 0,5 ili ako naprezanje moždanika za nazovistalnu kombinaciju ne prelazi 75 % proračunske vrijednosti otpornosti moždanika, a ploča je izvedena s profiliranim limom s rebrima okomito na os nosača s visinom rebra h_p< 80 mm. Ako je 0,4 ≥ η ≥ 0,5 nepotpunost posmične veze se ne može zanemariti. Tada se progib određuje prema izrazu (11.1).

$$\delta = \delta_c + \alpha \cdot (\delta_a - \delta_c) \cdot (1 - \eta) \tag{11.1}$$

Gdje su:

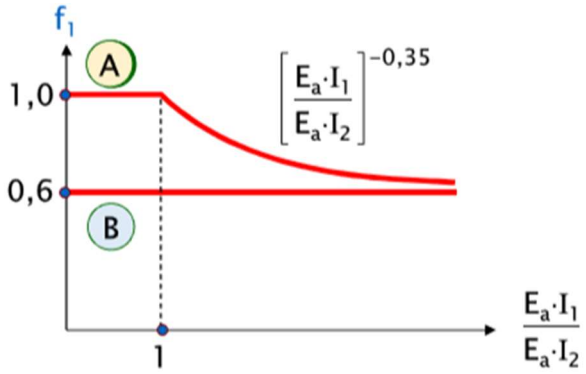
δ_c progib pri potpunoj posmičnoj vezi

δ_a progib nespregnutog čeličnog nosača

η stupanj sprezanja
α = 0,5 za nepoduprtu konstrukciju
α = 0,3 za poduprtu konstrukciju.

Raspucanost betona u području vlačnih naprezanja

Za nosače 1., 2. i 3. razreda može se primijeniti pojednostavnjena metoda za procjenu utjecaja raspucavanja betona. Za svaki unutarnji ležaj gdje vrijedi $\sigma_{ct} > 1{,}5 \cdot f_{ctm}$, gdje je σ_{ct} vlačno naprezanje u betonu, a f_{ctm} vlačna čvrstoća betona, moment savijanja pomnoži se s faktorom smanjenja f_1, a odgovarajuće povećanje momenata zbog očuvanja ravnoteže provodi se za susjedna polja. Faktor smanjenja f_1 odabire se uz pomoć krivulje A ili B koje su prikazane na slici 11.1.



Slika 11.1 – Krivulje za određivanje faktora smanjenja f_1 [7]

Krivulja A koristi se ako se raspon svih polja ne razlikuje za više od 25 % i ako je na svim rasponima jednoliko opterećenje. Ako ovi uvjeti nisu zadovoljeni, koristi se krivulja B.

Popuštanje čelika zbog djelomične plastifikacije nad unutarnjim osloncem

Popuštanje čelika u obzir se uzima pomoću faktora smanjenja f_2 kojim se moment nad ležajem dodatno smanjuje u odnosu na moment smanjen faktorom f_1 - f_2 = 0,5 ako je f_y dosegnut prije nego što betonska ploča očvrsne; f_2 = 0,7 ako je f_y dosegnut nakon što betonska ploča očvrsne.

11.2 Širina pukotina u betonu

Pukotine u betonu nastaju zbog male vlačne čvrstoće betona i njihov se nastanak ne može spriječiti. Procjena širine pukotina, odnosno njihovo ograničenje, može se provesti na dva načina:

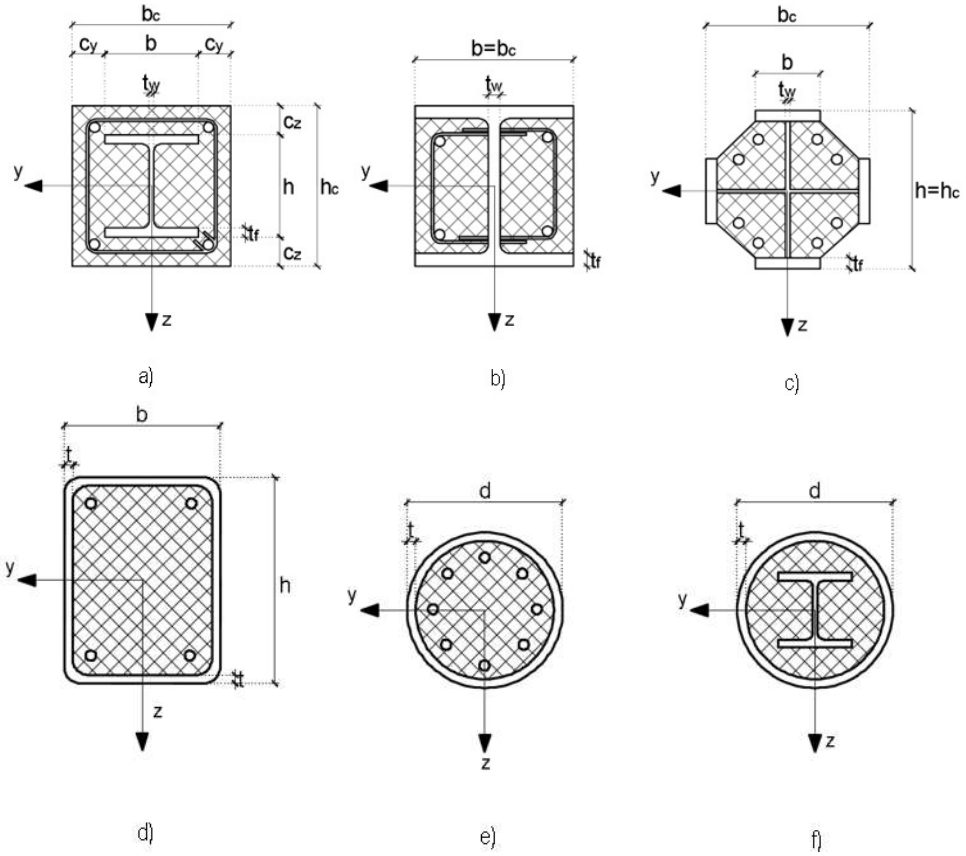
1) Primjenom točnije metode kontrole širine pukotina dane u HRN EN 1992-1-1 [6], kao i kod armiranobetonskih konstrukcija, pri čemu ograničenje širine pukotina ovisi o razredu izloženosti, ali uz proračun naprezanja u vlačnoj armaturi σ_s prema HRN EN 1994-1-1 [5].
2) Kao pojednostavnjenje i konzervativniji pristup, ograničenje širine pukotina može se postići ugradnjom minimalne armature A_s s razmakom ili promjerima šipki koje ne prelaze granice koje su dane u HRN EN 1994-1-1 (primjenjivo za sve presjeke bez natega za prednapinjanje koji su izloženi znatnom vlaku zbog ograničenja prisilnog deformiranja, na primjer zbog primarnih i sekundarnih učinaka skupljanja, u kombinaciji s učincima izravnog opterećenja ili bez njih).

12 Spregnuti stupovi

12.1 Općenito

Spregnuti stupovi su konstrukcijski elementi koji su opterećeni tlačnim silama uz koje mogu djelovati i momenti savijanja. Velika fleksibilnost primjene, znatna ekonomičnost, kratko vrijeme izvedbe, izvanredna nosivost i dojmljiv estetski izgled najjači su argumenti sve veće primjene spregnutih stupova. Sve do 50-ih godina čelični su se stupovi oblagali betonom zbog vatrozaštite, ali se beton nije uzimao u proračun nosivosti i stabilnosti elemenata konstrukcije. S ispitivanjima koje je proveo O. Faber počela je primjena spregnutih stupova u kojima se u nosivost, osim čeličnog dijela elementa, uključivao i betonski, a nove metode proračuna istražuju se i danas.
Prema konstrukcijskom oblikovanju, spregnuti se stupovi mogu podijeliti na tri osnovne vrste [4]:

- stupovi s poprečnim presjecima kod kojih su čelični profili potpuno obloženi betonom (slika 12.1.a)
- stupovi s poprečnim presjecima djelomično obloženi betonom (slike 12.1.b, 12.1.c)
- stupovi s poprečnim presjecima iz pravokutnih ili kružnih čeličnih cijevi koje su ispunjene betonom (slike 12.1.d, 12.1.e, 12.1.f).



Slika 12.1 – Različite vrste poprečnih presjeka spregnutih stupova

Postoji još skupina spregnutih stupova koji se sastoje od cijevi ispunjenih betonom i s umetnutom čeličnom jezgrom. Kako bi se osigurao položaj čelične jezgre u odnosu na šuplji čelični presjek, primjenjuju se umetnuti limovi koje u radionici treba zavariti i na jezgru i na šuplji presjek. Stupovi s umetnutom čeličnom jezgrom ne mogu se proračunati prema pojednostavnjenoj metodi danoj u HRN EN

1994-1-1 [5]. Tri materijala (čelična cijev, beton, čelična jezgra) u spregnutom presjeku ponašaju se prema različitim materijalnim nelinearnim odnosima pa se dokaz pouzdanosti provodi na temelju postupka usklađenog s europskim normama koje se temelje na eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima [11].

Da bi se stup mogao smatrati spregnutim, mora zadovoljavati uvjet kojim se dokazuje da je doprinos čelika u ostvarivanju plastične otpornosti presjeka $N_{pl,Rd}$ dostatan. Taj se uvjet iskazuje parametrom poprečnog presjeka δ određenim izrazom (12.2), koji mora biti u granicama definiranima izrazom (12.1) [4]

$$0{,}2 \leq \delta \leq 0{,}9 \tag{12.1}$$

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \tag{12.2}$$

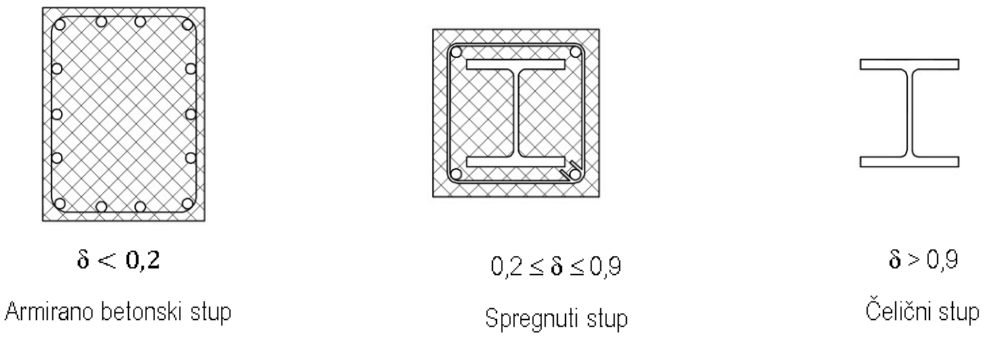
U izrazu (12.2) oznake su sljedeće:
A_a površina poprečnog presjeka čelika
f_{yd} proračunska granica popuštanja čelika
$N_{pl,Rd}$ plastična otpornost poprečnog presjeka spregnutog stupa.

Plastična otpornost poprečnog presjeka spregnutog stupa $N_{pl,Rd}$ određuje se prema izrazu (12.3):

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd} \tag{12.3}$$

U izrazu (12.3) oznake su sljedeće:
$N_{pl,a,Rd}$ proračunska plastična otpornost presjeka konstrukcijskog čelika
$N_{pl,c,Rd}$ proračunska plastična otpornost presjeka betona
$N_{pl,s,Rd}$ proračunska plastična otpornost presjeka armature.

Ako nije zadovoljen uvjet vezan uz δ, stup se može smatrati čeličnim ili armiranobetonskim (slika 12.2).

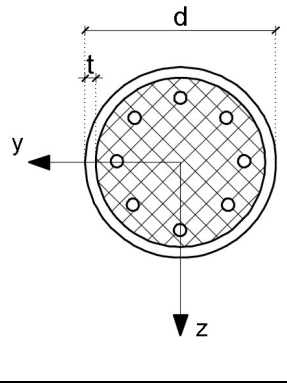
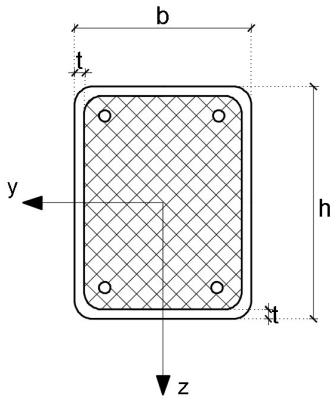
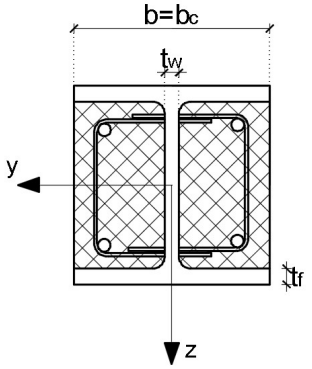


Slika 12.2 – Različite vrste poprečnih presjeka spregnutih stupova

12.2 Otpornost na lokalno izbočivanje

Lokalno izbočivanje čeličnih dijelova kod potpuno ubetoniranih dijelova može se zanemariti ako su osigurane dovoljne veličine zaštitnih slojeva c_y i c_z. Zaštitni slojevi imaju više uloga te njihove vrijednosti trebaju biti unutar ograničenja za najveću i najmanju debljinu. Kod djelomično obloženih presjeka armiranobetonska obloga sprječava lokalnu nestabilnost čeličnog hrpta i sprječava rotaciju čelične pojasnice na mjestu njezinog spajanja s hrptom. Učinak lokalnog izbočivanja može se zanemariti i kod ostalih vrsta spregnutih stupova ako nisu prekoračene najveće vrijednosti prema tablici 12.1 [4].

Tablica 12.1 – Maksimalne vrijednosti za *d/t, h/t i b/t$_f$*

Kružni šuplji čelični presjek	Pravokutni šuplji čelični presjek	Djelomično obložen čelični presjek
		
$\max\left(\frac{d}{t}\right) = 90 \cdot \frac{235}{f_y}$	$\max\left(\frac{h}{t}\right) = 52 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$\max\left(\frac{b}{t_f}\right) = 44 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

12.3 Metode proračuna spregnutih stupova

Kod dimenzioniranja spregnutih stupova potrebno je provjeriti:

- otpornost na lokalno izbočivanje
- pouzdanost uvođenja opterećenja u stup
- otpornost na posmik između čeličnog i betonskog dijela spregnutog elementa
- otpornost elementa.

Proračun spregnutih stupova temelji se isključivo na teoriji drugog reda prema dvije različite metode dane u HRN EN 1994 -1-1 [5]. Provjera prema prvoj metodi proračuna provodi se s učincima na osnovi teorije drugog reda, s geometrijskim i materijalnim nesavršenostima, lokalnim nestabilnostima, utjecajima raspucavanja betona, materijalnim nelinearnostima te puzanjem i skupljanjem betona. Ta se metoda naziva opća i primjenjuje se kod spregnutih stupova s nesimetričnim i nejednolikim poprečnim presjecima duž osi stupa [4].

Za proračun momenata savijanja i unutarnjih sila primjenjuje se elastoplastična analiza. Pretpostavlja se da je sve do otkazivanja, između čelika i betona ostvarena potpuna posmična veza (potpuno sprezanje), vrijedi hipoteza ravnih presjeka te je osiguran odgovarajući unos sile u tlačni element. Vlačna čvrstoća betona se zanemaruje [4].

Druga metoda proračuna spregnutih stupova temelji se na uvođenju istovrijedne geometrijske nesavršenosti i naziva se pojednostavnjenom metodom. Primjenjuje se kod spregnutih stupova koji imaju dvoosno simetričan i jednolik poprečni presjek duž osi stupa te za pojednostavnjenu metodu vrijede sljedeća ograničenja [4]:

- Metoda se može primijeniti i ako se unutar poprečnog presjeka nalaze dva čelična profila koja nisu međusobno spojena.
- Odnos visine i širine spregnutog poprečnog presjeka (h_c/b_c) mora biti u granicama između 0,2 i 5,0. Ovaj je uvjet dan radi izbjegavanja bočno-torzijskog izvijanja.
- Bezdimenzijska vitkost spregnutog stupa $\overline{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$ mora biti $\leq 2{,}0$.
- Debljine zaštitnog sloja betona moraju zadovoljiti sljedeća ograničenja:
  - u smjeru osi y: max $c_y \leq 0{,}4\ b$
  - u smjeru osi z: max $c_z \leq 0{,}3\ h$.
- Za potpuno obložene čelične presjeke površina uzdužne armature A_s ne smije biti manja od 0,3 % površine betona i veća od 6 % površine betona.

Razvoj novih oblika spregnutih stupova doveo je do oblikovanja poprečnih presjeka koji se ne mogu dimenzionirati prema pojednostavnjenim (linearnim) metodama. U takvim je slučajevima potrebno dokaz provesti prema općoj metodi. Sve se odredbe odnose na kvalitete čelika S235 do S460 i na normalno teške betone razreda čvrstoće C20/25 do C50/60.

13 Otpornost poprečnog presjeka spregnutih stupova

Otpornost spregnutih stupova na razini poprečnog presjeka određuje se zbrajanjem doprinosa pojedinih dijelova poprečnog presjeka [2]. Potrebno je provjeriti nosivost poprečnog presjeka s obzirom na tlačnu silu, moment savijanja, kombinaciju tlačne sile i momenta savijanja te na poprečnu silu.

13.1 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na tlak

Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na tlak sastoji se od zbroja pripadnih otpornosti na tlak svih komponenti koje sačinjavaju spregnuti poprečni presjek, a to su: čelični nosač, beton i armatura [4]. Plastična otpornost određuje se prema izrazu (13.1):

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot \alpha \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd} \tag{13.1}$$

gdje su:

- A_a ploština čeličnog nosača
- f_{yd} proračunska granica popuštanja konstrukcijskog čelika
- A_c ploština betonskog dijela poprečnog presjeka
- f_{cd} proračunska tlačna čvrstoća betona
- A_s ploština armature
- f_{sd} proračunska granica popuštanja armature.

Vrijednost parametra α ovisi o tipu poprečnog presjeka. Kod čeličnih nosača koji su djelomično ili potpuno obloženi betonom α iznosi 0,85 [5]. Kod čeličnih šupljih profila koji su ispunjeni betonom α iznosi 1,0, s time da je kod kružnih šupljih profila moguće povećanje tlačne otpornosti betona zbog tro-osnog stanja naprezanja u kojemu se nalazi, ako su ispunjeni uvjeti za vitkost i odnos ekscentriciteta i promjera čelične cijevi. Isto tako, navedeno se povećanje otpornosti ostvaruje uz uvjet da je čelični nosač dovoljno krut da spriječi najveći dio bočnog širenja betona zbog tlačne sile. Naime, bočno širenje betona uzrokuje dodatna naprezanja u čeliku, što rezultira smanjenjem granice popuštanja [2]. Uvjeti za povećanje otpornosti betona prema [5] su: $\lambda < 0{,}5$, $e/d < 0{,}1$, $e = M_{Ed}/N_{Ed}$. U uvjetima su λ bezdimenzijska vitkost spregnutog stupa, e ekscentricitet, d promjer čeličnog kružnog šupljeg profila, M_{Ed} proračunski moment savijanja i N_{Ed} proračunska tlačna sila.

Povećana proračunska otpornost poprečnog presjeka na tlak određuje se prema izrazu (13.2):

$$N_{pl,Rd} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}\right) + A_s \cdot f_{sd} \tag{13.2}$$

gdje su:

- t debljina stijenke čeličnog kružnog šupljeg profila
- η_a faktor učinka troosnog naprezanja za čelični nosač
- η_c faktor učinka troosnog naprezanja za betonski dio poprečnog presjeka
- f_y karakteristična granica popuštanja konstrukcijskog čelika koja se može usvojiti kao f_{yk}.

Faktori učinka obodnog naprezanja određuju se ovisno o odnosu proračunske ekscentričnosti, koja se određuje s najvećim momentom savijanja prema teoriji I. reda, $M_{max,Ed}$, i promjera čeličnog nosača, d [4]. Ako je $0 < e/d \leq 0{,}1$, faktori učinka određuju se prema izrazu (13.3) za čelični te (13.4) za betonski dio poprečnog presjeka:

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \cdot (10 \cdot e/d) \tag{13.3}$$

$$\eta_c = \eta_{c0} + (1 - 10 \cdot e/d) \tag{13.4}$$

gdje su:

η_{a0} vrijednost učinka troosnog naprezanja za čelični nosač kada je $e = 0$ (izraz 13.5)

η_{c0} vrijednost učinka troosnog naprezanja za betonski dio presjeka kada je $e = 0$ (izraz 13.6):

$$\eta_{a0} = 0.25 \cdot \left(3 + 2 \cdot \bar{\lambda}\right) \leq 1.0 \tag{13.5}$$

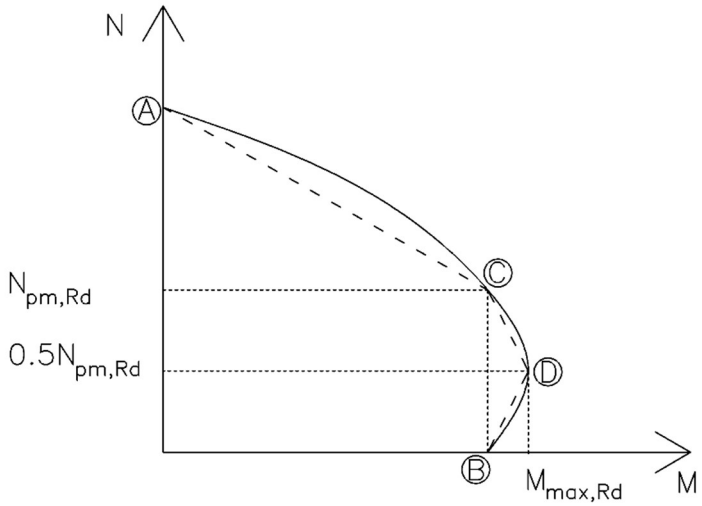
$$\eta_{c0} = 4.90 - 18.50 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \geq 0 \tag{13.6}$$

Kada je $e/d > 0{,}1$, η_a iznosi 1,0 dok η_c iznosi 0, odnosno u obzir se ne uzimaju promjene mehaničkih svojstava čelika ili betona.

Povećanje vrijednosti momenta savijanja smanjuje pozitivno djelovanje učinka troosnog stanja naprezanja na otpornost betona. Povećanje tlačne čvrstoće betona zbog naprezanja ne može se uzeti u obzir kod šupljih čeličnih nosača pravokutnog poprečnog presjeka koji su ispunjeni betonom jer se stranice pravokutnika deformiraju zbog širenja betona pod tlakom [4].

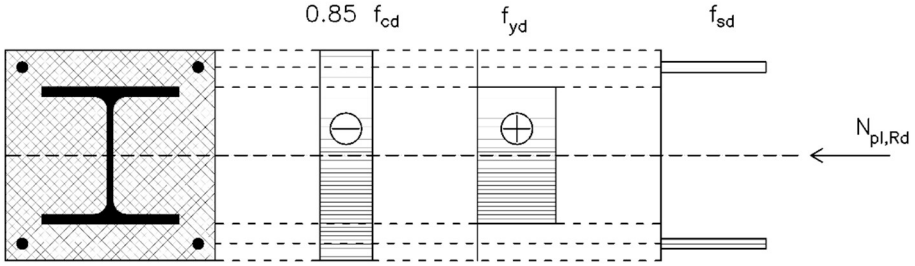
13.2 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na zajedničko djelovanje momenta savijanja i uzdužne tlačne sile

Veličina uzdužne sile koja djeluje na poprečni presjek direktno određuje vrijednost otpornosti poprečnog presjeka na moment savijanja. Zbog toga je potrebno odrediti krivulju međudjelovanja prilikom zajedničkog djelovanja uzdužne tlačne sile i momenta savijanja [5]. U praksi se interakcijska krivulja najčešće pojednostavnjuje poligonalnom linijom [2]. Krivulja i poligonalna linija s karakterističnim točkama prikazane su na slici 13.1.



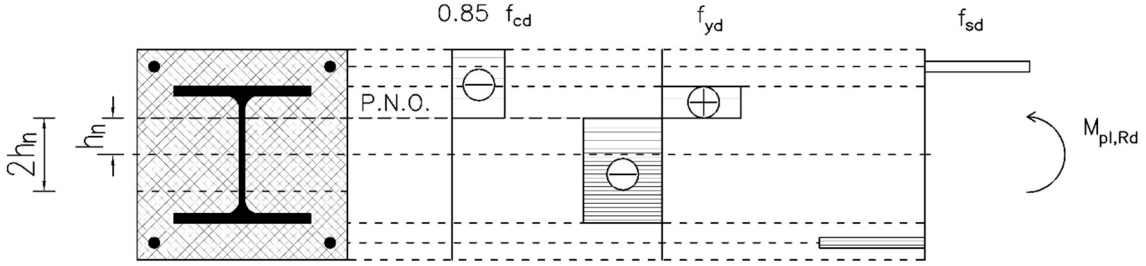
Slika 13.1 - Interakcijska krivulja i interakcijski poligon

Točka A predstavlja otpornost poprečnog presjeka na uzdužnu tlačnu silu, $N_{pl,Rd}$. Stanje naprezanja u točki A prikazano je na slici 13.2.



Slika 13.2 - Stanje naprezanja u točki A

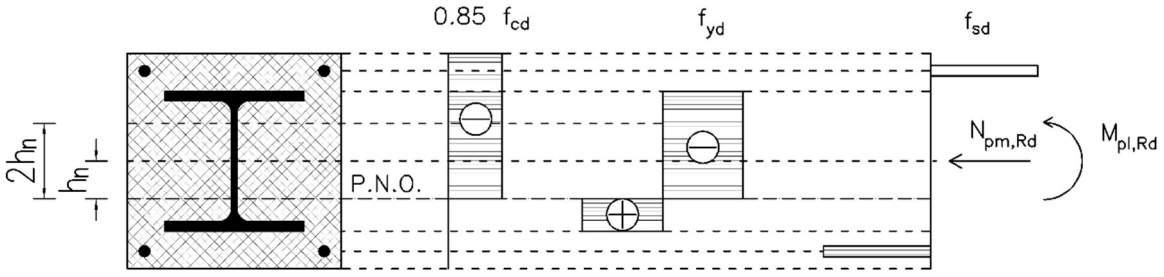
Točka B predstavlja otpornost poprečnog presjeka na jednoosno savijanje, $M_{pl,Rd}$. Stanje naprezanja u točki B prikazano je na slici 13.3.



Slika 13.3 - Stanje naprezanja u točki B

Točka C predstavlja otpornost poprečnog presjeka na jednoosno savijanje uz uzdužnu silu koja je jednaka proračunskoj vrijednosti otpornosti betonskog dijela poprečnog presjeka, $N_{pm,Rd}$. Iz slike 13.1 može se vidjeti da je u točki C otpornost poprečnog presjeka na savijanje ista kao i u točki B. Stanje naprezanja u točki C prikazano je na slici 13.4. Otpornost betonskog dijela poprečnog presjeka određuje

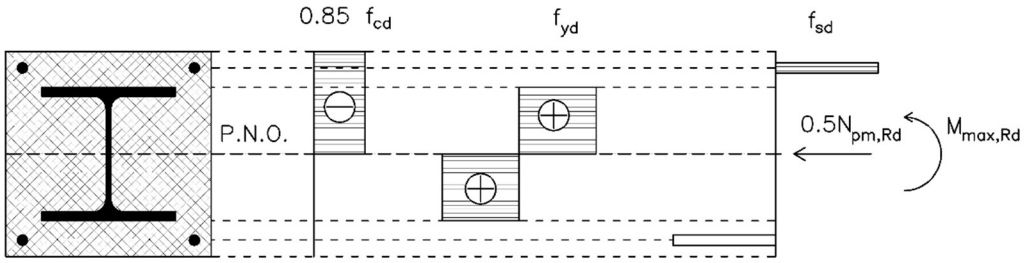
se prema izrazu (13.7), uz napomenu da vrijednost koeficijenta α ovisi o vrsti poprečnog presjeka te se određuje na isti način kao što je prikazano u potpoglavlju 13.1.



Slika 13.4 - Stanje naprezanja u točki C

$$N_{pm} = \alpha \cdot A_c \cdot f_{cd} \tag{13.7}$$

Točka D predstavlja najveću otpornost na moment savijanja te se ta otpornost ostvaruje uz uzdužnu tlačnu silu koja je jednaka polovini proračunske otpornosti betonskog dijela poprečnog presjeka. Stanje naprezanja u točki D prikazano je na slici 13.5. Otpornost na moment savijanja u točki D određuje se prema izrazu (13.8)



Slika 13.5 - Stanje naprezanja u točki D

$$M_D = W_{pa} \cdot f_{yd} + W_{ps} \cdot f_{sd} + \frac{1}{2} \cdot W_{pc} \cdot 0.85 \cdot f_{cd} > M_{pl,Rd} \tag{13.8.}$$

U izrazu (13.8) treba uočiti da uz dio izraza koji se odnosi na doprinos betonskog dijela stoji vrijednost ½, što odgovara situaciji da je uzdužna tlačna sila jednaka polovini $N_{pm,Rd}$, odnosno neutralna os nalazi se u težištu poprečnog presjeka.

Najčešće je potrebno odrediti otpornost poprečnog presjeka na moment za poznatu uzdužnu silu [4]. Određivanje te otpornosti ovisi o osi savijanja, vrsti poprečnog presjeka te njegovim svojstvima [2].

13.3 Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na poprečnu silu

Uobičajeno se pretpostavlja da poprečnu silu unutar spregnutog poprečnog presjeka samostalno preuzima čelični dio poprečnog presjeka te ako je vrijednost proračunske poprečne sile manja od polovine plastične otpornosti na poprečnu silu, nije potrebno smanjivati otpornost spregnutog poprečnog presjeka na savijanje [4]. Ako proračunska poprečna sila prelazi polovinu otpornosti čeličnog nosača na poprečnu

silu, moguće je uključiti i betonski dio presjeka u nosivost na poprečnu silu [4]. U tome slučaju, poprečna sila koja djeluje na čelični nosač određuje se sukladno udjelu otpornosti čeličnog nosača na moment savijanja u ukupnoj otpornosti na moment savijanja spregnutog poprečnog presjeka, što je prikazano izrazom (13.9):

$$V_{a,Ed} = V_{Ed} \cdot \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \tag{13.9.}$$

gdje su:

V_{Ed} proračunska poprečna sila
$M_{pl,a,Rd}$ plastična otpornost na savijanje čeličnog nosača
$M_{pl,Rd}$ plastična otpornost na savijanje spregnutog poprečnog presjeka.

Na taj se način poprečna sila koja djeluje na čelični dio može reducirati ispod polovine otpornosti čeličnog nosača na poprečnu silu [4]. Poprečna sila koja djeluje na betonski dio poprečnog presjeka određuje se prema izrazu (13.10):

$$V_{c,Ed} = V_{Ed} - V_{a,Ed} \tag{13.10.}$$

Provjera otpornosti betonskog dijela na poprečnu silu radi se prema HRN EN 1992-1-1 [6]. Ako je potrebno uzeti u obzir utjecaj poprečne sile, reducira se proračunska granica popuštanja za posmičnu površinu tako da se granica popuštanja pomnoži s faktorom smanjenja ρ_w. Faktor smanjenja granice popuštanja određuje se kao 1 – ρ [4]. Parametar ρ određuje se prema izrazu (13.11):

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{a,Ed}}{V_{pl,a,Rd}} - 1\right)^2 \tag{13.11.}$$

gdje je $V_{pl,a,Rd}$ plastična proračunska otpornost čeličnog nosača na poprečnu silu, koja se određuje prema izrazu (13.12):

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} \tag{13.12.}$$

gdje je A_v posmična površina, koja se određuje ovisno o tipu čeličnog nosača.

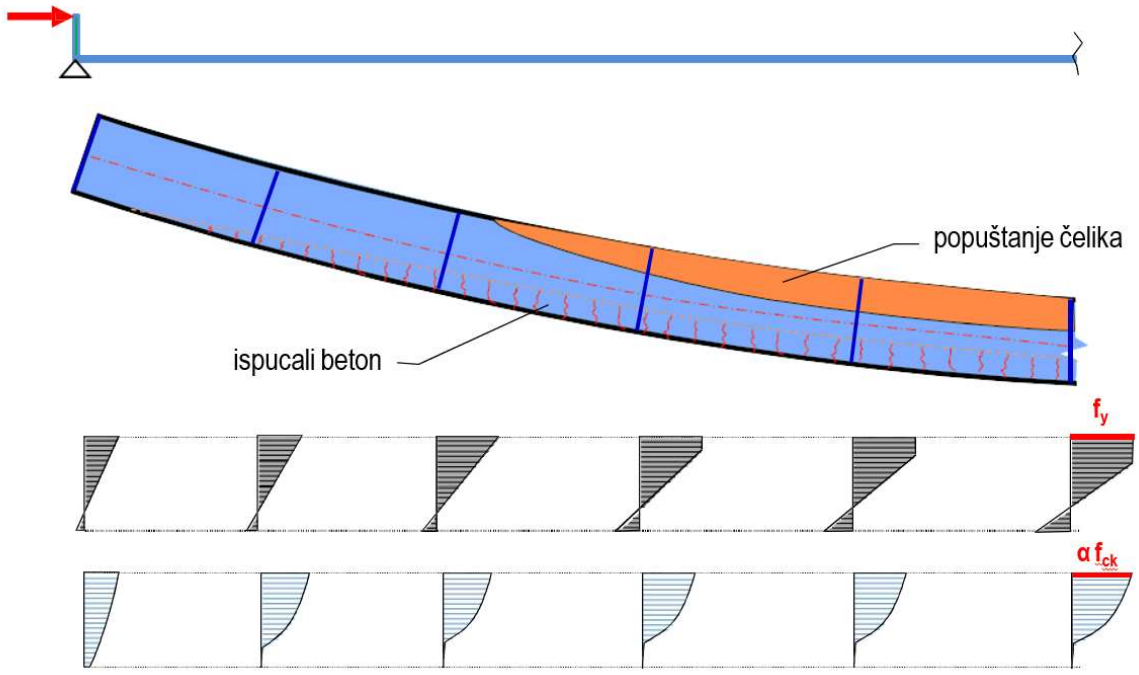
Ako je hrbat čeličnog nosača obložen betonom te ako je granična vitkost $b/t \leq 124 \cdot \varepsilon$, ne treba provoditi dokaz izbočivanja zbog poprečne sile [4].

14 Otpornost spregnutih stupova na tlak

Eulerova kritična sila N_{cr}, između ostalog ovisi o krutosti promatranog elementa na savijanje EI. Učinci poput raspucavanja betona, dugotrajnih deformacija, udjela nosivosti konstrukcijskog čelika (δ) u spregnutom presjeku i sl., povećavaju nepouzdanosti u određivanju krutosti na savijanje spregnutog stupa [2].

U vlačnoj zoni poprečnih presjeka dolazi do stvaranja pukotina u betonu. Beton ne može preuzimati vlačna naprezanja nakon nastanka pukotine te se iz tog razloga elastična neutralna os presjeka s raspucanim betonskim dijelom pomiče. Zbog nastalog ekscentriciteta osno opterećen stup tretira se kao stup opterećen tlačnom silom i momentom savijanja [4].

Stvarna krutost spregnutog stupa je nelinearno promjenjiva duž njegove visine, pri čemu je najveća uz oslonce, a najmanja pri sredini (slika 14.1). Za praktične se proračune stoga primjenjuje pojednostavnjeni postupak koji se bazira na korištenju proračunskih (zamjenskih) krutosti koje su nepromjenjive duž stupa [2].



Slika 14.1 - Tlačni element (stup) spregnutog poprečnog presjeka [2]

U većem broju slučajeva spregnute će stupove biti moguće projektirati prema pojednostavnjenoj metodi obuhvaćenoj stavkom 6.7.3, HRN EN 1994-1-1 [5]. Međutim, ponekad su konstrukcijski elementi promjenjivog presjeka duž svoje duljine ili imaju nesimetričan poprečni presjek. U tom je slučaju obavezna primjena opće metode, stavka 6.7.2, EN 1994-1-1 [5], koja omogućava primjenu naprednih metoda temeljenih na odgovarajućem programskom paketu [4].

14.1 Proračunska krutost na savijanje

Razlikuju se karakteristična vrijednost proračunske krutosti na savijanje $(EI)_{eff}$ i proračunska krutost na savijanje prema teoriji drugog reda $(EI)_{eff,II.}$ Vrijednost $(EI)_{eff}$ koristi se kod proračuna kritične sile N_{cr} i relativne vitkosti $\bar{\lambda}$ te proračuna po teoriji 1. reda, a određuje se kao zbroj pojedinačnih krutosti dijelova stupa uz korištenje popravnog faktora zbog raspucavanja betona [4], prema izrazu (14.1):

$$(EI)_{eff} = E_a \cdot I_a + K_e \cdot E_{cm} \cdot I_c + E_s \cdot I_s \tag{14.1}$$

U izrazu (14.1) oznake su sljedeće:
I_a, I_c, I_s momenti tromosti čelika, neraspucanog betona i armature
E_a, E_s moduli elastičnosti konstrukcijskog čelika i armature
E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona
K_e faktor korekcije za pojavu pukotina u betonu (K_e = 0,6).

Elastična kritična sila izvijanja N_{cr} određuje se primjenom izraza (14.2), a pripadna bezdimenzijska vitkost izrazom (14.3):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_{eff}}{L_{cr}^{\ 2}} \tag{14.2}$$

$$\lambda_{cr} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \tag{14.3}$$

gdje su:
$(EI)_{eff}$ karakteristična vrijednost proračunske krutosti
L_{cr} duljina izvijanja stupa
$N_{pl,Rk}$ karakteristična vrijednost plastične otpornosti na uzdužnu tlačnu silu.

Ako je opterećenje stupa dugotrajno, tj. uzimaju se u obzir učinci skupljanja i puzanja betona, vrijednost modula elastičnosti E_{cm} u izrazima (14.1) i (14.6) mora se smanjiti na vrijednost $E_{c,eff}$ prema izrazu (14.4):

$$E_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}}\right) \cdot \rho_t} \tag{14.4}$$

gdje su:
$N_{G,Ed}$ proračunska vrijednost dijela tlačne sile zbog stalnog opterećenja
N_{Ed} ukupna proračunska vrijednost tlačne sile
ρ_t koeficijent puzanja koji ovisi o starosti betona (t) u promatranom trenutku i trenutka opterećivanja stupa (t_0).

Točniji proračun učinaka puzanja i skupljanja provodi se pomoću modula n_L. Važno je naglasiti da se zbog raspucavanja betona proračunska krutost na savijanje proračunava za svaku ravninu savijanja posebno [2].

14.2 Primjena teorije drugog reda

Utječu li deformacije na povećanje reznih sila, utvrđuje se pomoću faktora α_{cr}, koji se određuje prema izrazu (14.7). Ako je faktor $\alpha_{cr} < 10$, deformacije sustava utječu znatno na povećanje reznih sila te je potrebna primjena teorije drugog reda. Pritom je elastična kritična sila određena krutošću na savijanje $(EI)_{eff,II}$. U suprotnom se proračun radi prema teoriji prvog reda (potpoglavlje 14.3). Da bi se odredio α_{cr}, pretpostavlja se da je stup obostrano zglobno pridržan, a elastična se kritična sila $N_{cr,eff}$ određuje rabeći Eulerov izraz (14.5) [2, 4]:

$$N_{cr,eff} = F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_{eff,II}}{L_{cr}^{\ 2}} \tag{14.5}$$

U izrazu (14.5) oznake su sljedeće:

L fizikalna duljina sustava

$(EI)_{eff,II}$ proračunska vrijednost krutosti na savijanje za primjenu teorije 2. reda.

Proračunska vrijednost krutosti na savijanje, koja se koristi kod određivanja unutarnjih sila po teoriji 2. reda, definirana je izrazom (14.6):

$$(EI)_{eff,II} = K_o \cdot (E_a \cdot I_a + E_s \cdot I_s + K_{e,II} \cdot E_{cm} \cdot I_c) \tag{14.6}$$

U izrazu (14.6) oznake su sljedeće:

E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona mora se smanjiti na $E_{c,eff}$, prema izrazu 14.4 ako je opterećenje dugotrajno

$K_{e,II}$ faktor korekcije (uzima se 0,5)

K_0 faktor dobiven kalibracijom (uzima se 0,9)

$(EI)_{eff,II}$ proračunska krutost na savijanje koja se primjenjuje za proračun unutarnjih sila kod proračuna prema teoriji 2. reda.

Faktor α_{cr} izračunava se prema izrazu (14.7):

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \tag{14.7}$$

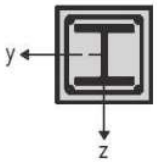
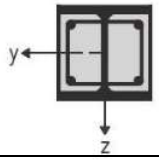
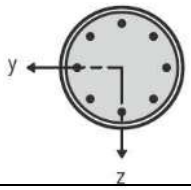
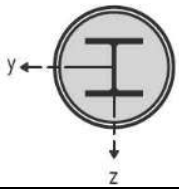
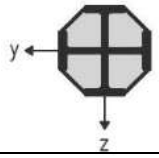
U izrazu (14.7) oznake su sljedeće:

F_{cr} elastično kritično opterećenje izvijanja prema izrazu (14.5)

F_{Ed} proračunsko vertikalno opterećenje koje djeluje na konstrukciju.

Utjecaj geometrijskih i materijalnih nesavršenosti može se uzeti u obzir pomoću istovrijedne geometrijske nesavršenosti iz tablice 14.1. Nesavršenost se modelira kao bočni pomak u sredini visine stupa od njegove uzdužne osi (osi simetrije). Pretpostavlja se da je zakrivljeni oblik sinusoidan te da leži u ravnini okvira kojega se analizira. Primjena kružnog luka je također prihvatljiva [4].

Tablica 14.1 - Krivulje izvijanja i nesavršenosti elemenata za spregnute stupove [5]

Poprečni presjek	Ograničenja	Osi izvijanja	Krivulja izvijanja	Nesavršenosti elementa
Presjek obložen betonom 		y-y	b	L/200
		z-z	c	L/150
Presjek djelomično obložen betonom 		y-y	b	L/200
		z-z	c	L/150
Kružni i pravokutni šuplji poprečni presjeci 	$\rho_s \leq 3\%$	bilo koja	a	L/300
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	bilo koja	b	L/200
Kružni šuplji čelični presjeci s dodatnim I presjekom 		y-y	b	L/200
		z-z	b	L/200
Presjek djelomično obložen betonom s križnim I presjekom 		bilo koja	b	L/200

Učinak teorije 2. reda može se približno uzeti u obzir faktorom *k* prema izrazu (14.8):

$$M_{Ed,II} = M_{Ed,I} \cdot k \tag{14.8}$$

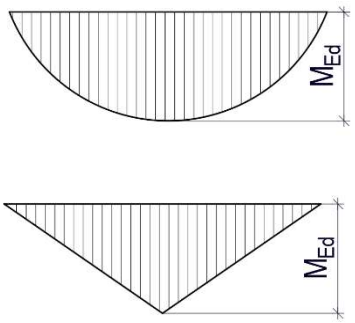
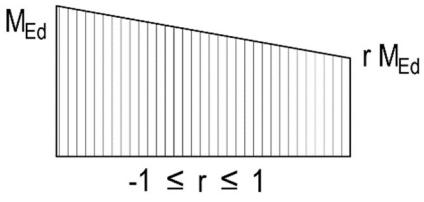
U izrazu (14.8) oznake su sljedeće:
$M_{Ed,II}$ moment savijanja prema teoriji drugog reda
$M_{Ed,I}$ moment savijanja prema teoriji prvog reda
k faktor kojim uzimamo u obzir učinke teorije drugog reda.

Faktor *k* dan je izrazom (14.9):

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1{,}0 \tag{14.9}$$

U izrazu (14.9) oznake su sljedeće:
β faktor istovrijednog momenta prema tablici 14.2
$N_{cr,eff}$ kritična tlačna sila, oko mjerodavne osi, dobivena s krutošću na savijanje $(EI)_{eff,II}$ s proračunskom duljinom koja se uzima kao duljina stupa.

Tablica 14.2 - Faktor istovrijednog momenta β za određivanje momenta prema teoriji 2. reda

Raspodjela momenta	Faktor momenta β	Komentar
	Moment savijanja prvog reda zbog nesavršenosti elementa ili bočnog (lateralnog) opterećenja: $\beta = 1{,}0$	M_{Ed} je maksimalni moment savijanja unutar dužine stupa, ne uzimajući u obzir učinke drugog reda.
	Momenti na krajevima elementa: $\beta = 0{,}66 + 0{,}44\ r$ ali $\beta \geq 0{,}44$	M_{Ed} i $r\ M_{Ed}$ su momenti na krajevima elementa iz globalne analize prvog ili drugog reda

Potrebno je dokazati nejednadžbu (14.10):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d \cdot M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \qquad (14.10)$$

U izrazu (14.10) oznake su sljedeće:

M_{Ed} najveći moment koji se pojavljuje duž osi stupa (uključujući nesavršenosti i, ako je potrebno, teoriju II. reda)

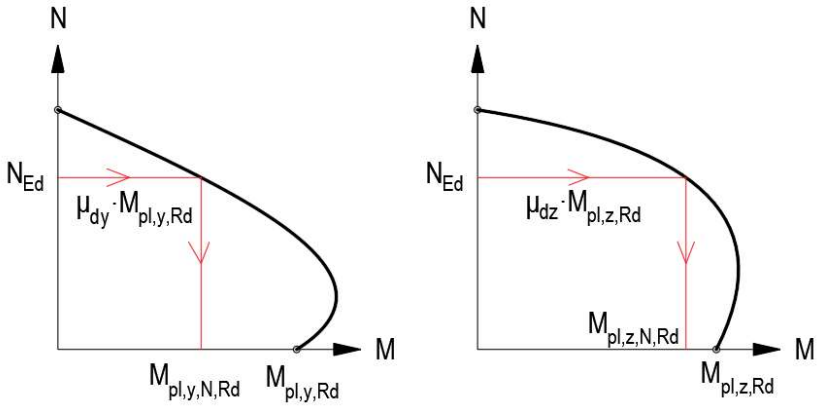
$M_{pl,N,Rd}$ plastična otpornost na savijanje, uzimajući u obzir uzdužnu silu N_{Ed} koja je dana s vrijednošću $\mu_d \cdot M_{pl,Rd}$

$M_{pl,Rd}$ plastična otpornost na savijanje, prikazana točkom B u dijagramu međudjelovanja *N-M* (poglavlje 13)

μ_d faktor za proračun elementa opterećenog uzdužnom tlačnom silom i jednoosnim savijanjem, koji se određuje prema slici 14.2 i izrazu (14.11):

$$\mu_d = \frac{M_{pl,N,Rd}}{\alpha_M \cdot M_{pl,Rd}} \qquad (14.11)$$

Faktor α_M uzima u obzir činjenicu da moment potpune plastičnosti $M_{pl,Rd}$ ne može biti dosegnut radi ograničenja deformacije betona. Vrijednosti faktora α_M su [4]:
α_M = 0,9 (čelici S 235, S 275 i S355)
α_M = 0,8 (čelici S 420 i S 460).



Slika 14.2 - Prikaz značenja faktora μ_d u dijagramu međudjelovanja prema [2]

14.3 Primjena teorije prvog reda

Proračun po teoriji prvog reda provodi se ako je $\alpha_{cr} \geq 10$, što znači da očekivane deformacije nisu u toj mjeri velike da bi znatnije utjecale na povećanje reznih sila. Teorija prvog reda koristi se za osno opterećene tlačne stupove te se može koristiti kao prvotna provjera elementa opterećenog tlačnom silom i savijanjem. Postupak dokaza spregnutog stupa na izvijanje istovjetan je postupku kod čistih čeličnih stupova, uz složeniji proračun krutosti spregnutog stupa koji u obzir uzima učinke raspucavanja i puzanja

betona. Korištenjem europskih krivulja izvijanja uzimaju se u obzir nesavršenosti elementa te se dobije ista nosiva sila kao što je to utvrđeno laboratorijskim ispitivanjem [2].

Pridruživanjem odgovarajuće krivulje izvijanja pojedinom tipu presjeka, može se odrediti faktor smanjenja χ za odgovarajuću relativnu vitkost $\bar{\lambda}$ stupa. Dokaz nosivosti svodi se na zadovoljenje uvjeta da proračunska vrijednost uzdužne sile N_{Ed} bude manja ili jednaka smanjenoj plastičnoj otpornosti presjeka u skladu s izrazom (14.12):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad (14.12)$$

Kod određivanja $N_{pl,Rd}$ prema izrazu (14.12), proračunska vrijednost granice popuštanja konstrukcijskog čelika f_{yd} proračunava se s parcijalnim koeficijentom γ_{M1}. Kod spregnutih stupova koriste se samo krivulje izvijanja *a*, *b* i *c*. Linije izvijanja u HRN EN 1993-1-1 [1] određene su izrazima (14.13) i (14.14).

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{ali} \quad \chi \leq 1 \qquad (14.13)$$

$$\Phi = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_0}\right) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \overline{\lambda_0} = 0{,}2 \qquad (14.14)$$

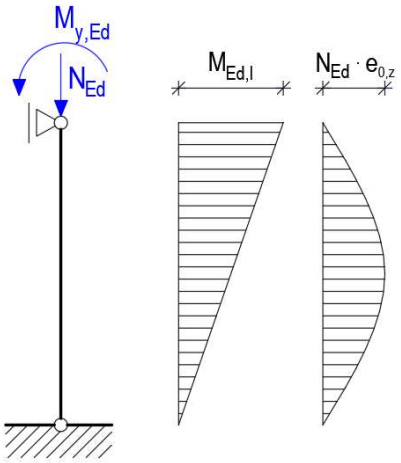
Sažeti postupak dokaza osno tlačno opterećenih spregnutih stupova [2]:

1. "Izračun" duljina izvijanja $L_{cr,y}$, $L_{cr,z}$
2. Izračunati karakterističnu otpornost $N_{pl,Rk}$
3. Izračunati proračunski modul elastičnosti betona $E_{c,eff}$
4. Izračunati proračunsku krutost na savijanje $(EI)_{eff}$
5. Izračunati kritičnu uzdužnu silu N_{cr}
6. Izračunati relativnu vitkost $\bar{\lambda}$
7. Odabrati odgovarajuću krivulju izvijanja (*a*, *b* ili *c*)
8. Odrediti faktor smanjenja χ
9. Izračunati proračunsku otpornost elementa pri osnom tlaku $N_{b,Rd.}$

15 Otpornost spregnutih stupova na tlak i savijanje

15.1 Otpornost elementa izloženog uzdužnoj tlačnoj sili i jednoosnom savijanju

Kako se kod proračuna stabilnosti spregnutih stupova proračun mora temeljiti na linearno-elastičnoj teoriji 2. reda, treba razlikovati dijagrame momenata savijanja od vanjskog opterećenja i od uzimanja u obzir nesavršenosti. Iako je u HRN EN 1994-1-1 [5] dan približni postupak uzimanja u obzir učinaka 2. reda preko jednog faktora k, koji se pokazao vrlo konzervativnim, u praksi se često koristi sličan pristup, ali s dva faktora k_1 i k_2 - slika 15.1.



Slika 15.1 - Raspodjela momenta savijanja od momenta kao vanjskog djelovanja – dijagram lijevo te zbog nesavršenosti – dijagram desno prema [2]

Dakle, potrebno je izračunati najveći moment savijanja u polovini dužine elementa $M_{Ed,max,L/2,}$ uzimajući u obzir povećanje momenta zbog učinaka teorije 2. reda. Tako dobiveni moment ne smije biti manji od najvećeg momenta na elementu dobivenog po teoriji prvog reda.

Ako postoje samo momenti savijanja na krajevima elementa $M_{Ed,1}$ odnosno $M_{Ed,2,}$ za navedeni postupak vrijedi izraz (15.1) [4]:

$$M_{Ed,max,L/2} = k_1 \cdot M_{Ed,L/2} + k_2 \cdot N_{Ed} \cdot e_0 \geq \begin{cases} M_{Ed,1} \\ M_{Ed,2} \end{cases} \qquad (15.1)$$

U izrazu (15.1) oznake su sljedeće:

$M_{Ed,max,L/2}$	najveći proračunski moment savijanja u polovini duljine tlačnog elementa po teoriji 2. reda
$M_{Ed,L/2}$	proračunski moment savijanja u polovini duljine tlačnog elementa dobiven prema teoriji 1. reda
N_{Ed}	proračunska uzdužna tlačna sila
e_0	istovrijedna geometrijska nesavršenost prema tablici 14.1
k_1	faktor povećanja momenta za osnovni momentni dijagram prema izrazu (14.9) i tablici 14.2

k_2 faktor povećanja momenta za momentni dijagram od istovrijedne geometrijske nesavršenosti prema izrazu (14.9) i tablici 14.2

$M_{Ed,1}$ i $M_{Ed,2}$ proračunski momenti savijanja na krajevima promatranog tlačnog elementa.

Za stup koji je istovremeno opterećen uzdužnom tlačnom silom i savijanjem provodi se dokaz oko obje osi odvojeno, prema izrazu (15.2):

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d \cdot M_{pl,Rd}} \le \alpha_M \qquad (15.2)$$

U izrazu (15.2) oznake su sljedeće:

M_{Ed} najveći moment koji se pojavljuje duž osi stupa (uključujući nesavršenosti i ako je potrebno teoriju II. reda)

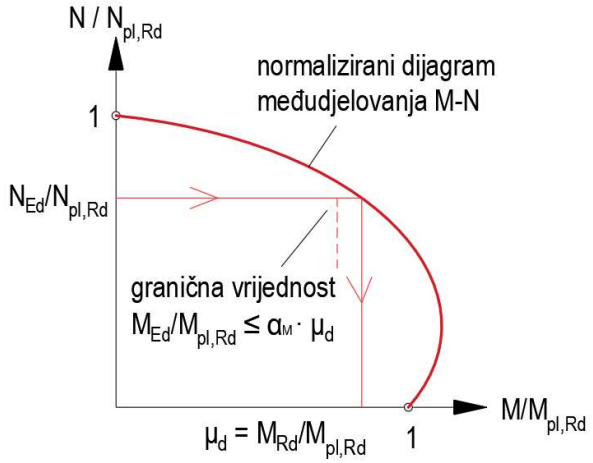
$M_{pl,N,Rd}$ plastična otpornost na savijanje, uzimajući u obzir uzdužnu silu N_{Ed} koja je dana s vrijednosti $\mu_d \cdot M_{pl,Rd}$

$M_{pl,Rd}$ plastična otpornost poprečnog presjeka na savijanje, prikazana točkom B u dijagramu međudjelovanja N-M (poglavlje 13)

μ_d faktor za proračun elementa opterećenog uzdužnom tlačnom silom i jednoosnim savijanjem (može biti μ_{dy} i μ_{dz}) .

Faktor α_M uzima u obzir činjenicu da moment potpune plastičnosti $M_{pl,Rd}$ ne može biti dosegnut radi ograničenja deformacije betona. Vrijednosti faktora α_M su [2]:
α_M = 0,9 (čelici S 235, S 275 i S355)
α_M = 0,8 (čelici S 420 i S 460).

Princip metode proračuna otpornosti elementa izloženog uzdužnoj tlačnoj sili i jednoosnom savijanju shematski je prikazan na slici 15.2, koja predstavlja normaliziranu inačicu dijagrama međudjelovanja M-N.



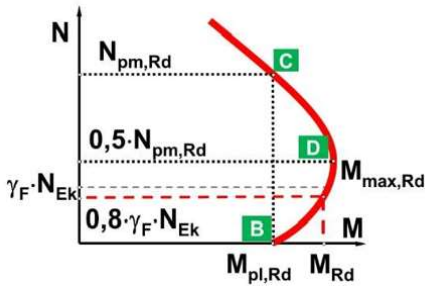
Slika 15.2 – Otpornost stupa s obzirom na uzdužnu tlačnu silu i jednoosno savijanje prema [4]

Ako na spregnuti stup djeluje proračunska uzdužna tlačna sila N_{Ed}, on posjeduje dovoljnu otpornost ako je $M_{Ed} \le \alpha_M \cdot \mu_d \cdot M_{pl,Rd}$.

Najveća otpornost na savijanje spregnutih stupova postignuta je kada plastična neutralna os leži u sredini poprečnog presjeka. Pripadajuća otpornost s obzirom na uzdužnu tlačnu silu $N_{pl,Rd}$ tada iznosi 0,5 vrijednosti plastične otpornosti s obzirom na tlačnu uzdužnu silu betonskog dijela poprečnog presjeka, u skladu s izrazom (15.3):

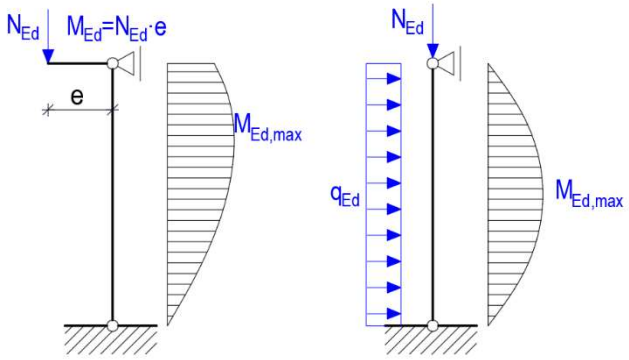
$$N_{pl,Rd} = 0,5 \cdot N_{pm,Rd} \tag{15.3}$$

Ako je proračunska vrijednost tlačne uzdužne sile N_{Ed} manja od 0,5 $N_{pm,Rd}$, povećanje uzdužne tlačne sile dovodi do povećanja otpornosti na savijanje, što je vidljivo na slici 15.3.



Slika 15.3 - Povećanje otpornosti na savijanje kada je $N_{Ed} < 0,5\ N_{pm,Rd}$ [2]

Ako su uzdužna tlačna sila i moment savijanja međusobno ovisni te djeluju istovremeno, smije se iskoristiti povećanje otpornosti na savijanje (slučaj lijevo na slici 15.4). Vrijednost μ_d koristi se za proračun plastične otpornosti na savijanje $M_{pl,Rd}$. Dakle, vrijednosti $\mu_d > 1,0$ mogu se primijeniti samo onda kada proračunski moment savijanja M_{Ed} ovisi direktno o tlačnoj uzdužnoj sili N_{Ed}. U suprotnom (slučaj desno na slici 15.4) potreban je dodatan dokaz u kojemu se parcijalni faktori γ_F, za one unutarnje sile koje dovode do povećanja otpornosti, moraju smanjiti za 20 % [5].



Slika 15.4 - Moment savijanja i tlačna sila linearno ovisni – slučaj lijevo, moment savijanja i tlačna sila neovisni – slučaj desno

15.2 Otpornost elementa izloženog uzdužnoj tlačnoj sili i dvoosnom savijanju

Ako je element opterećen uzdužnom tlačnom silom i dvoosnim savijanjem, provodi se provjera otpornosti za uzdužni tlak i jednoosno savijanje posebno za svaku ravninu u kojoj se događa savijanje te dodatno i otpornost na uzdužni tlak i dvoosno savijanje.

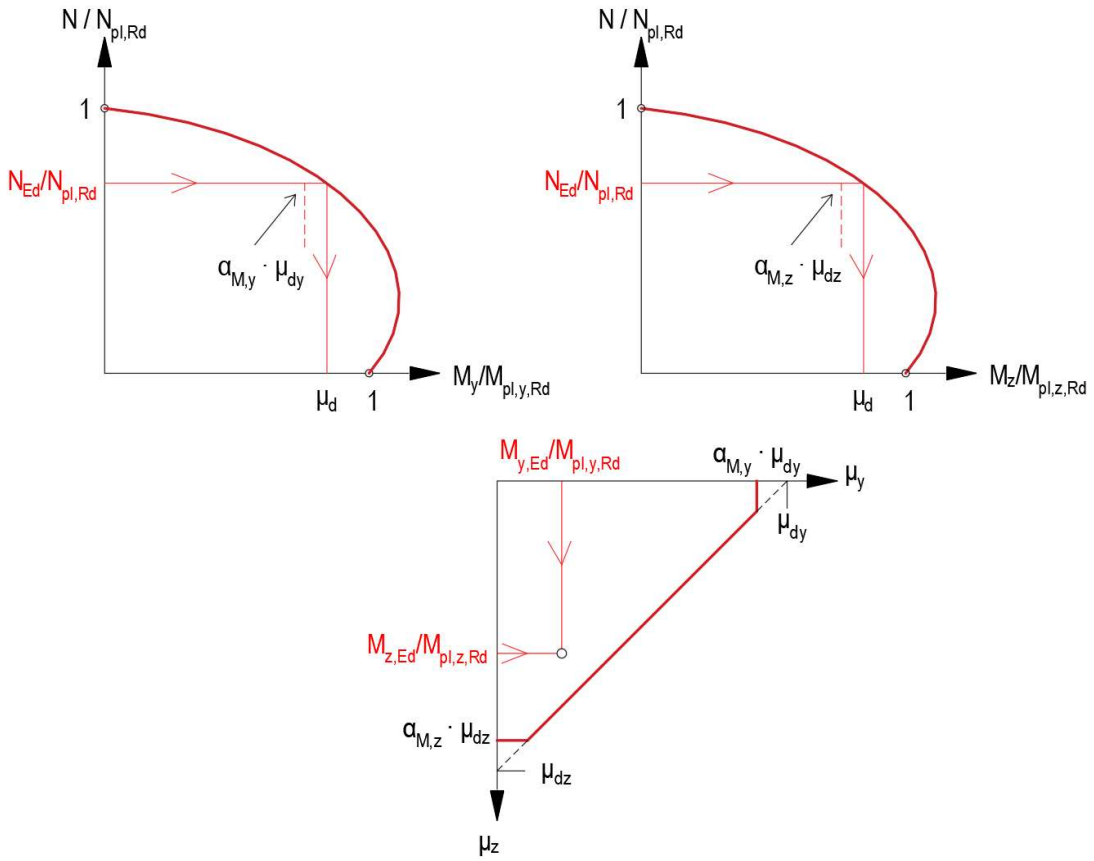
Potrebno je uzeti u obzir nesavršenosti u ravnini za koju se smatra da će u njoj doći do otkazivanja. Za drugu ravninu utjecaj nesavršenosti se zanemaruje. Ova se situacija može predstaviti s dva uvjeta - izrazi (15.4) i (15.5), gdje su oznake istovjetne onima u izrazu (15.2), ovisno o osi oko koje se savijanje provjerava.

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} \leq \alpha_{M,y} \tag{15.4}$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq \alpha_{M,z} \tag{15.5}$$

Ako nije očito u kojoj ravnini savijanja će doći do otkazivanja, preporučljivo je uzeti u obzir nesavršenosti u obje ravnine [4].

Na slici 15.5 prikazana je otpornost elementa zbog uzdužnog tlaka i dvoosnog savijanja.



Slika 15.5 - Otpornost elementa zbog uzdužne tlačne sile i dvoosnog savijanja prema [4]

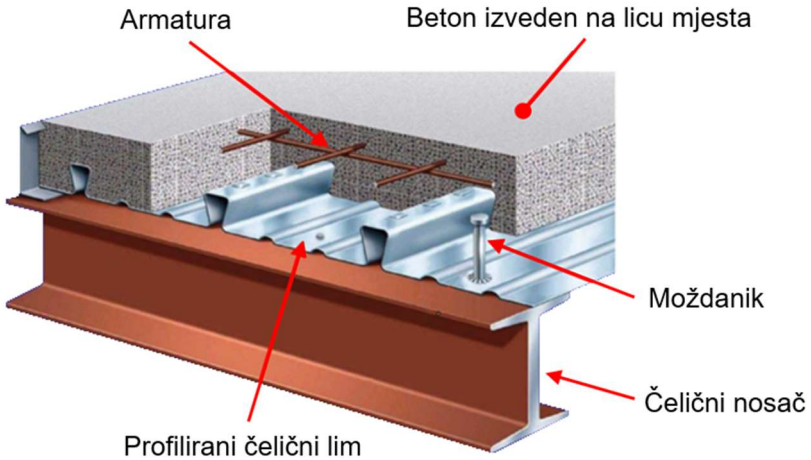
Linearni izraz međudjelovanja mora biti zadovoljen između dva proračunska momenta, jer moraju biti zadovoljena ograničenja dana izrazima (15.4) i (15.5). Proračunski momenti $M_{y,Ed}$ i $M_{z,Ed}$ izračunavaju se uzimajući u obzir nesavršenosti u obje ravnine i povećanje zbog učinka teorije drugog reda. Konačno, izraz za međudjelovanje je (15.6) - oznake u izrazu istovjetne su onima u izrazu (15.2):

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{dy} \cdot M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\mu_{dz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \leq 1,0 \qquad (15.6)$$

16 Spregnute ploče s profiliranim limovima za zgrade

16.1 Općenito

Spregnute ploče se najčešće primjenjuju kod višekatnih zgrada, a izvode se od profiliranih čeličnih limova i betona koji očvršćivanjem aktivira spregnuto djelovanje, čime se omogućava prijenos uzdužne posmične sile na njihovom kontaktu. Metode proračuna spregnutih ploča temelje se na ispitivanjima, što je obuhvaćeno u temeljnoj normi za projektiranje spregnutih konstrukcija HRN EN 1994-1-1 [5]. Zbog oblika profiliranog lima, spregnute ploče opterećenje prenose dominantno u jednom smjeru, zbog čega treba voditi računa o rasponima sekundarnih nosača na koje se oslanjaju. Profilirani limovi, osim što služe kao zamjena za vlačnu armaturu, služe kao izgubljena oplata, radna platforma te osiguravaju stabilizaciju za nosače ispod sebe [2]. Mogu biti i sastavni dio spregnutog nosača, a osnovni dijelovi spregnute ploče prikazani su na slici 16.1. U tom smislu treba napomenuti da moždanici nisu nužno sastavni dijelovi spregnutih ploča.



Slika 16.1 – Sastavni dijelovi *spregnute* ploče oslonjene na spregnuti nosač

Razlozi primjene spregnutih ploča su brojne prednosti, među kojima su:

- brza i jednostavna izvedba
- relativno veliki rasponi
- male dimenzije (manja vlastita težina)
- nema potrebe za oplatom, vlačnom armaturom i podupiranjem do 3.5 m raspona
- duktilno ponašanje
- povećavaju otpornost nosača na bočno-torzijsko izvijanje
- manji opseg radova na gradilištu.

16.2 Konstrukcijsko oblikovanje

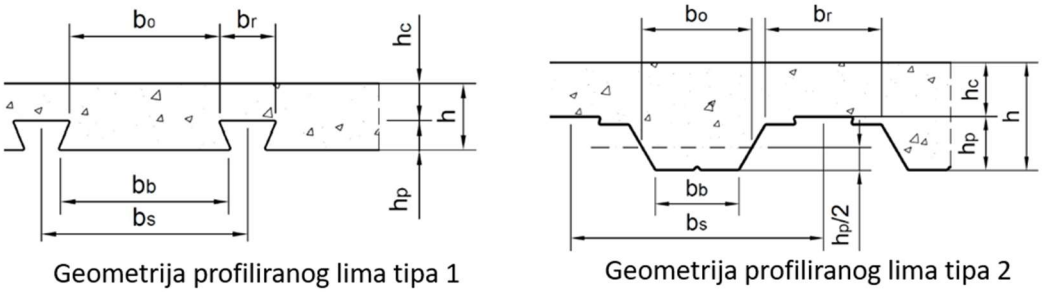
Čelični profilirani limovi izrađeni su hladnim oblikovanjem i najčešće su pocinčani ili plastificirani s donje strane, što rezultira urednim podgledom bez potrebe za dodatnom obradom. Debljine limova kreću se od 0,75 do 1,5 mm, a izvode se u raznim oblicima, visinama, širinama i razmakom rebara. Razlikuju se dva

osnovna oblika profiliranih limova s obzirom na nagib hrpta rebra, otvoreni i zatvoreni, koji su shematski prikazani slikom 16.2 [2].



Slika 16.2 – Osnovni oblici profiliranih limova

Da bi se ostvarilo spregnuto djelovanje između čelika i betona, potrebno je pridržavati se određenih pravila formiranja poprečnog presjeka, kao i uvjeta oslanjanja spregnute ploče. Na slici 16.3 prikazana su dva osnovna tipa profiliranih limova s geometrijskim oznakama pomoću kojih će biti definirani osnovni konstrukcijski zahtjevi za izvedbu poprečnih presjeka.



Slika 16.3 – Osnovni tipovi profiliranog lima

Konstrukcijski zahtjevi za projektiranje poprečnih presjeka:

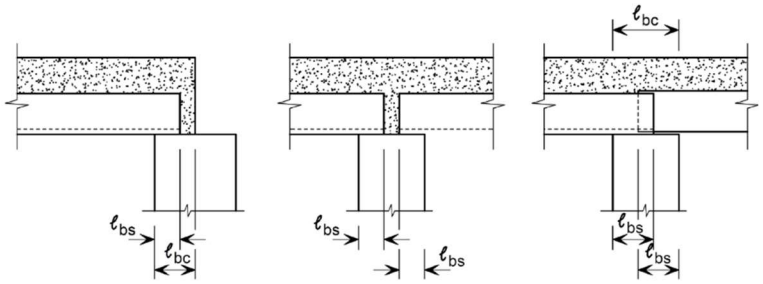
- omjer b_r/b_s mora biti manji od 0,6
- najmanja ukupna debljina spregnute ploče iznosi 80 mm ($h \geq 80$ mm)
- najmanja debljina betona iznad rebra profiliranog lima iznosi 40 mm ($h_c \geq 40$ mm)
- ako je ploča sastavni dio spregnutog nosača ili se upotrebljava kao posmična dijafragma, ranije navedene minimalne debljine moraju se uvećati za 10 mm ($h \geq 90$ mm, $h_c \geq 50$ mm)
- najveći promjer zrna agregata ovisi o debljini betona iznad rebra (h_c), proračunskoj širini profiliranog lima (b_0) i određen je izrazom (16.1):

$$D_k \leq min\begin{Bmatrix} 0{,}4\ h_c \\ b_0/3 \\ 31{,}5\ mm \end{Bmatrix} \qquad (16.1.)$$

- količina armature u oba smjera ne smije biti manja od 80 mm^2/m, a razmak šipki ne smije prelaziti 2h ili 350 mm
- minimalne dužine oslanjanja spregnute ploče, ovisno o materijalu od kojega su izvedeni oslonci prema HRN EN 1994-1-1 [5] dane su tablicom 16.1, a na slici 16.4 shematski su prikazani načini oslanjanja [4].

Tablica 16.1 – Minimalne dužine oslanjanja spregnutih ploča

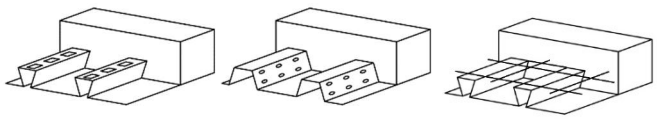
Materijal oslonca	ℓ_{bs} (mm)	ℓ_{bc} (mm)
Čelik / beton	50	75
Ostali materijali	70	100



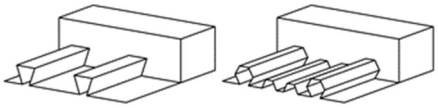
Slika 16.4 – Načini oslanjanja spregnutih ploča

16.3 Način ostvarivanja sprezanja

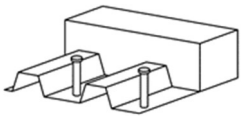
Prema HRN EN 1994-1-1 [5], prirodno prianjanje između čelika i betona nije prihvaćeno kao pouzdana metoda ostvarivanja posmične veze [4]. Takva veza ponaša se neduktilno, stoga se osiguranje posmične veze, koje mora biti učinkovito i trajno, postiže na načine prikazane slikom 16.5.



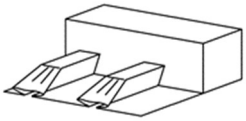
a) Mehaničko sprezanje



b) Sprezanje trenjem zatvorenim oblicima



c) Sidrenje moždanicima na krajevima



d) Sidrenje deformacijom rebara na krajevima

Slika 16.5 – Načini ostvarivanja sprezanja

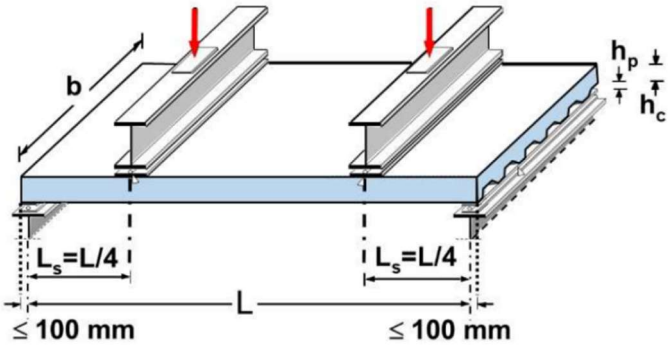
Prema HRN EN 1994-1-1 [5], sidrenjem na krajevima pomoću zavarenih moždanika (c) povećava se učinkovitost posmične veze, ali samo u kombinaciji s mehaničkim sprezanjem (a) ili sprezanjem trenjem (b), dok sidrenjem deformacijom rebara na krajevima učinkovitost se posmične veze povećava samo u kombinaciji sa sprezanjem trenjem (b).

17 Analiza djelovanja na spregnute ploče i njihovo konstrukcijsko ponašanje

Ponašanje spregnutih ploča u velikoj je mjeri određeno stupnjem sprezanja. U svom ponašanju objedinjuju ponašanje armiranobetonske ploče (gdje je čelični lim vlačna armatura usidrena u beton) te spregnutih nosača (gdje lim sa svojom krutošću sudjeluje u prijenosu momenta savijanja) [2].

Kako kod spregnutih ploča ne postoje sredstva za sprezanje u klasičnom smislu, stupanj sprezanja određuje se ispitivanjem, normiranim postupkom prema HRN EN 1994-1-1 [5]. U tom se postupku slobodno oslonjena ploča opterećuje silama na četvrtinama raspona od svakog ležaja (slika 17.1). Ispitivanjem se dobiva krivulja ponašanja *sila - progib* (*P-δ*) pomoću koje se definira stanje posmičnog spoja između betona i čeličnog lima.

Za daljnje razmatranje ponašanja spregnutih ploča potrebno je poznavati pojmove makroklizanja i mikroklizanja. Makroklizanje je proklizavanje između betona i čeličnog lima vidljivo golim okom i može se mjeriti, a mikroklizanje je lokalno klizanje nevidljivo golim okom, pri kojemu nastaju sile sprezanja na kontaktnoj plohi.



Slika 17.1 - Normirani postupak ispitivanja spregnute ploče [7]

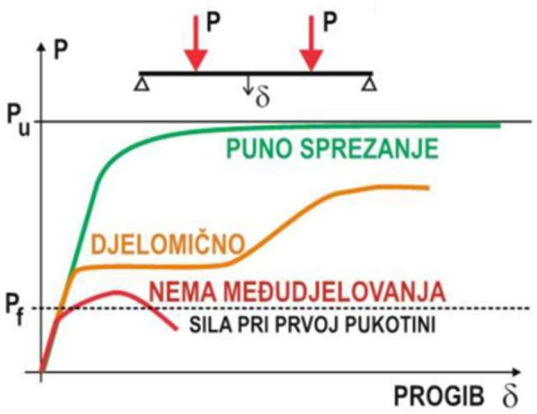
17.1 Stupanj sprezanja (posmični spoj)

Slično kao kod spregnutih nosača, sprezanje može biti potpuno ili djelomično, a u slučaju da ono nije adekvatno ostvareno, ne radi se o spregnutom elementu.

Prilikom potpunog sprezanja, globalno makroklizanje ne postoji, tj. uzdužna posmična sila je potpuno preuzeta, što dovodi do dosezanja granične sile P_u (slika 17.2). Do sloma pri potpunom sprezanju najčešće dolazi zbog sloma u betonu ili čeliku [4].

Djelomičnim sprezanjem uzdužna posmična sila nije potpuno preuzeta te dolazi do ograničenog makroklizanja. Zbog toga je granično opterećenje manje nego kod potpunog sprezanja (slika 17.2). Pri djelomičnom sprezanju, do sloma dolazi otkazivanjem posmičnog spoja na kontaktnoj plohi između čeličnog lima i betona [4].

Kada sprezanje nije postignuto, nema prijenosa uzdužne posmične sile te dolazi do neograničenog makroklizanja. Tada je granično opterećenje najmanje od razmatrana tri moguća slučaja (slika 17.2)



Slika 17.2 - Krivulje ponašanja pri različitim stupnjevima sprezanja [7]

17.2 Veza između čelika i betona

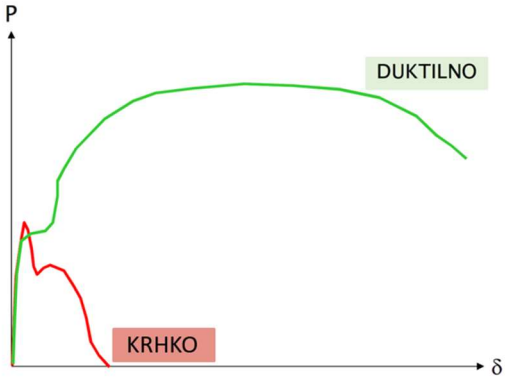
Između čeličnog lima i betona, kod spregnutih ploča općenito postoje tri vrste veze [2]:

a) Fizikalno-kemijska – postoji kod svih limova i uvijek je malog intenziteta te je aktivna do pojave prve pukotine
b) trenje – razvija se odmah prilikom pojave mikroklizanja
c) mehaničko sidrenje – aktivira se nakon pojave prve pukotine, a ovisi o obliku kontaktne plohe između čeličnog lima i betona.

17.3 Krhko i duktilno ponašanje spregnute ploče

Kao i u ostalim vrstama konstrukcija, način sloma može biti duktilan ili krhak. Kod spregnutih ploča to ovisi o vrsti čeličnog lima, načinu ostvarenja sprezanja te dimenzijama ploče.

Pri krhkom slomu do pada nosivosti dolazi odmah nakon što je na jednom kraju ploče došlo do popuštanja sila prionjivosti. Tada se cijela posmična sila mora preuzeti trenjem i mehaničkim sidrenjem izbočinama ili udubinama na limu, što se na krivulji *sila – pomak* ($P - \delta$) očituje kao očvršćivanje (slika 17.3), međutim do sloma dolazi prije nego što se razvije prvo makroklizanje.



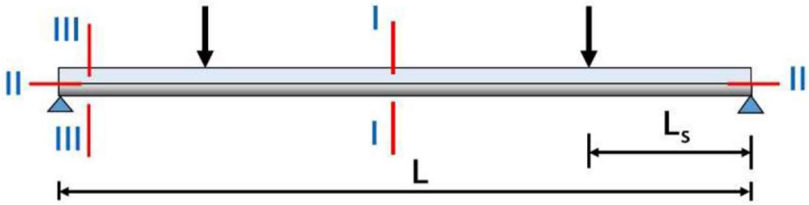
Slika 17.3 - Krhko i duktilno ponašanje ($P - \delta$ krivulja)

Spregnuta ploča smatra se duktilnom ako je opterećenje prilikom sloma barem 10 % veće od opterećenja prilikom zabilježenog proklizavanja kraja ploče od 0,1 mm [5]. Kada pri najvećem opterećenju progib ploče prelazi *L*/50, tada se opterećenje pri slomu definira kao opterećenje pri kojemu je progib u sredini ploče jednak *L*/50.

17.4 Tipovi sloma

S obzirom na uzroke sloma spregnute ploče, razlikuju se tri tipa sloma [2]:

a) Tip I – do sloma dolazi prekoračenjem otpornosti na savijanje $M_{pl,Rd}$, a događa se pri srednjim i većim rasponima te visokom stupnju sprezanja, s time da treba razlikovati otpornost na pozitivni i negativni moment savijanja (slika 17.4)
b) Tip II – slom zbog prekomjernog uzdužnog posmika, tj. granična nosivost je dosegnuta na posmičnom spoju (slika 17.4)
c) Tip III – slom se događa zbog velikog vertikalnog posmika u blizini ležajeva, a događa se kod debelih ploča na malim rasponima koje su izložene velikom opterećenju, s time da postoji i mogućnost proboja ploče (slika 17.4).



Slika 17.4 - Tipovi sloma spregnutih ploča

17.5 Djelovanja na spregnute ploče

Kod spregnutih ploča vrlo je bitno razlikovati proračunske situacije tijekom izgradnje i uporabe. Tijekom izgradnje čelični lim služi kao oplata za vrijeme betoniranja i očvrsnuća betona te mora podnijeti vlastitu težinu, težinu betona, radnika, opreme itd. Posebnost je ove situacije da prema HRN EN 1991-1-1 [12] specifičnu težinu betona treba uzeti u iznosu od 26 kN/m^3 jer je beton u neočvrsnutom stanju te postoji mogućnost nagomilavanja.

Dodatna je posebnost učinak ulegnuća. Kako je čelični lim vrlo tanak, sigurno će se prognuti zbog opterećenja za vrijeme izgradnje, što će uzrokovati povećanje debljine ploče. Učinak ulegnuća smije se zanemariti ako je progib ploče δ određen prema graničnom stanju uporabljivosti manji od 10 % visine ploče. Ako se učinak ne može zanemariti, tada se visina ploče povećava za 0,7 δ po cijeloj duljini ploče.

Za vrijeme betoniranja, po čeličnom se limu kreću radnici s alatom i određenom opremom. Kako bi se to uzelo u obzir, definirana je radna površina dimenzija 3 x 3 m na kojoj djeluje opterećenje od 1,5 kN/m^2 te preostala površina ploče na kojoj djeluje opterećenje od 0,75 kN/m^2.

Za vrijeme uporabe, tj. nakon nastupanja spregnutog djelovanja, opterećenje se određuje prema HRN EN 1991-1-1 [12] s obzirom na vrstu i namjenu konstrukcije.

17.6 Proračun spregnutih ploča

Kao i kod analize opterećenja, bitno je razlikovati faze izgradnje spregnute ploče te s njima uskladiti proračun. Proračun čeličnog lima za vrijeme betoniranja potrebno je provesti prema HRN EN 1993-1-1 [1], a nakon sprezanja prema HRN EN 1994-1-1 [5].

Globalni proračun spregnutih ploča može se provesti pomoću tri metode: linearno-elastične, krutoplastične i elastoplastične.

Proračun prema linearno-elastičnoj teoriji obvezan je za granično stanje uporabljivosti. Također je dozvoljena preraspodjela momenata iznad ležaja, ali se preporuča samo do 10 % bez dodatnog ispitivanja (osim ako se zanemaruju učinci raspucavanja betona kada je dozvoljena preraspodjela do 30 %).

Primjena krutoplastične metode dozvoljena je samo za granično stanje nosivosti, uz uvjet da je dokazana dostatna rotacijska sposobnost. Ako su ploče raspona manjeg od 3 m i razreda armature C, nije potreban dokaz rotacijske sposobnosti.

Elastoplastična metoda uvijek je dozvoljena te u proračun uključuje i materijalnu nelinearnost.

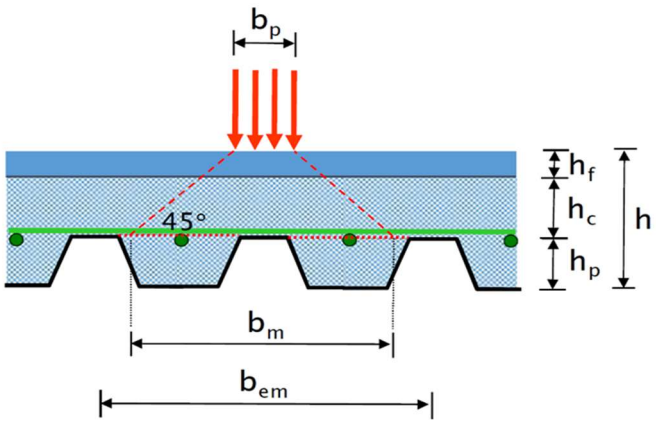
17.7 Proračunska širina

Kada na ploču djeluju koncentrirana ili linijska opterećenja (npr. strojevi, zidovi, kotači automobila) potrebno je odrediti proračunsku širinu b_m, tj. širinu na kojoj se to opterećenje raspoređuje (slika 17.5). Proračunska širina ovisi o smjeru opterećenja, odnosno ovisi o tome djeluje li opterećenje paralelno na raspon ploče ili okomito. U oba slučaja proračunska širina se određuje pomoću izraza (17.1), na razini iznad lima pod kutom rasprostiranja od 45°, gdje se za paralelna djelovanja b_p uzima kao širina opterećenja, a za okomita djelovanja kao duljina opterećenja:

$$b_m = b_p + 2 \cdot (h_c + h_f) \tag{17.1}$$

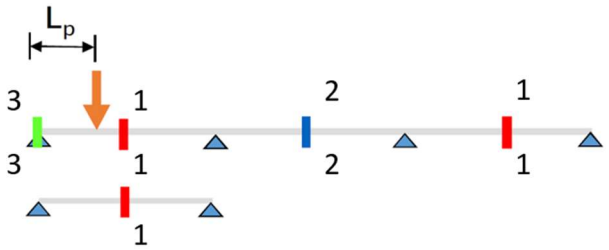
gdje su:

b_p širina ili duljina opterećenja
h_c visina betona iznad čeličnog lima
h_f visina završnog sloja ploče.



Slika 17.5 - Proračunska širina [7]

Za slučaj kada visina čeličnog lima ne premašuje 60 % ukupne visine spregnute ploče, dozvoljen je pojednostavnjeni proračun proračunskih širina. Različite situacije određivanja proračunske širine prikazane su na slici 17.6.



Slika 17.6 - Izračun proračunskih širina za različite položaje mjerodavnih presjeka

Presjek 1 – 1 na slici 17.6 predstavlja proračunsku širinu kada se opterećenje nalazi u polju jednostavno oslonjene grede i krajnjim poljima kontinuiranih nosača te djeluju moment savijanja i poprečna sila. Tada se proračunska širina određuje prema izrazu (17.2):

$$b_{em} = b_m + 2 \cdot L_p \cdot \left(1 - L_p/L\right) \tag{17.2}$$

gdje su:
L_p udaljenost opterećenja od bližeg ruba ploče
L raspon ploče.

Presjek 2 – 2 na slici 17.6 predstavlja proračunsku širinu kada se opterećenje nalazi u unutarnjim poljima kontinuiranih nosača te djeluju moment savijanja i poprečna sila. Tada se proračunska širina određuje prema izrazu (17.3):

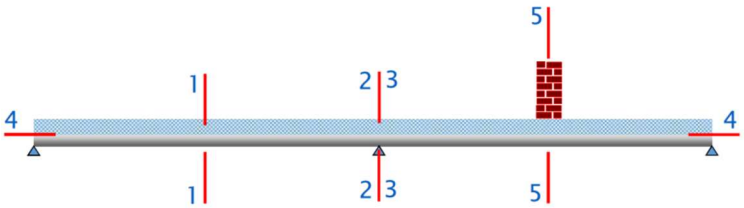
$$b_{em} = b_m + 1{,}33 \cdot L_p \cdot \left(1 - L_p/L\right) \tag{17.3}$$

Presjek 3 – 3 na slici 17.6 predstavlja proračunsku širinu kada se opterećenje nalazi na ležajevima te djeluje poprečna sila. Tada se proračunska širina određuje prema izrazu (17.4):

$$b_{ev} = b_m + L_p \cdot \left(1 - L_p/L\right) \tag{17.4}$$

17.8 Provjere za granično stanje nosivosti i uporabljivosti

Sukladno gore navedenim tipovima sloma, provjere otpornosti za granično stanje nosivosti proizlaze iz mogućih načina sloma, a karakteristični presjeci koje treba provjeriti prikazani su na slici 17.7:



Slika 17.7 - Mjesta provjera otpornosti za GSN

gdje se:
u presjeku 1 – 1 provjerava otpornost na savijanje
u presjeku 2 – 2 provjerava otpornost na savijanje iznad ležaja
u presjeku 3 – 3 provjerava otpornost na vertikalni posmik
u presjeku 4 – 4 provjerava otpornost na uzdužni posmik
u presjeku 5 – 5 provjerava otpornost na vertikalni posmik i proboj ploče.

Za granično stanje uporabljivosti obvezna je primjena teorije elastičnosti. Potrebno je provjeriti da je vertikalni progib manji od dopuštenog, da su vibracije unutar prihvatljivih vrijednosti te provesti kontrolu raspucavanja betona.

18 Otpornost poprečnih presjeka spregnutih ploča

18.1 Profilirani čelični lim kao oplata

Proračun otpornosti poprečnog presjeka spregnutih ploča mora se provesti za dvije proračunske situacije - za vrijeme izvedbe, dok beton još nema dovoljnu čvrstoću i kada beton dovoljno očvrsne te se aktivira spregnuto djelovanje između čeličnog lima i betona. Na sustav za vrijeme izvedbe djeluju vlastita težina čeličnog lima i betona, oprema za izgradnju te svježi beton koji se može nagomilati zbog progiba čeličnog lima. Kako za vrijeme izvedbe ključnu ulogu preuzima čelični lim, provjere nosivosti se provode prema HRN EN 1993-1-3 [13]. Važan problem u fazi izvedbe je moguće ulegnuće čeličnog lima, a ta je pojava prethodno opisana u potpoglavlju 17.5. Za progib nastao zbog vlastite težine lima i težine svježeg betona, bez opterećenja za vrijeme građenja, u literaturi [4] se može naći preporuka da ne bude veći od *L*/180, gdje je *L* proračunski raspon između oslonaca. Podupiranje se tijekom izvedbe kod spregnutih ploča ne preporučuje jer produljuje trajanje izvedbe i povećava cijenu. Određivanje unutarnjih sila i momenata savijanja za profilirani čelični lim provodi se teorijom elastičnosti.

Elastična otpornost na savijanje čeličnog lima dokazuje se prema izrazu (18.1):

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = \frac{f_{ypk}}{\gamma_M} \cdot W_{eff} \tag{18.1}$$

gdje su:

M_{Ed} proračunski moment savijanja
M_{Rd} proračunska otpornost na savijanje čeličnog lima
f_{ypk} karakteristična granica popuštanja čeličnog profiliranog lima
γ_M parcijalni koeficijent za materijal profiliranog čeličnog lima
W_{eff} proračunski moment otpora poprečnog presjeka čeličnog profiliranog lima.

18.2 Proračun spregnutih ploča

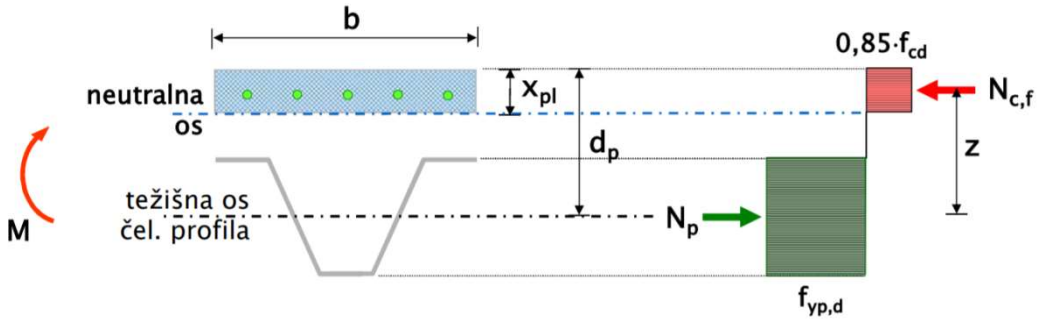
Dokaz nosivosti spregnutih ploča na savijanje definiran je izrazom (18.2), u kojemu su M_{Ed} proračunski moment savijanja, a M_{Rd} proračunska otpornost na savijanje spregnutog poprečnog presjeka.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1{,}0 \tag{18.2}$$

Kao i kod spregnutih nosača, otpornost spregnutih ploča najčešće se određuje pomoću teorije plastičnosti (uz pretpostavku blok-naprezanja po poprečnom presjeku ploče), no moguće je proračune provesti i prema teoriji elastičnosti (s preraspodjelom ili bez nje) te prema elastoplastičnoj teoriji. Zbog pridržanja čeličnog lima betonom s gornje strane, granične vitkosti tlačnih dijelova presjeka za presjeke 1. razreda su dvostruko veće u odnosu na uobičajene čelične presjeke. Kako bi se spriječilo prerano drobljenje betona kod proračuna armiranobetonskih greda, tlačne deformacije su ograničene.. Proračunska granica popuštanja čelika koji se koriste za profilirane limove kreće se između 280 i 420

N/mm^2. Ove vrijednosti niže su nego kod čelika za armaturu, a otpornost lima na savijanje pridonosi tome da su spregnute ploče manje osjetljive na prerano drobljenje betona. Za proračun spregnutih ploča na savijanje usvojena su određena pojednostavnjenja radi lakšeg proračuna: naprezanja betona u vlačnoj zoni su zanemarena pa su naprezanja betona u uvali profiliranog lima također zanemarena [4].

Otpornost spregnutih ploča na savijanje određuje se na vrlo sličan način kao i kod spregnutih greda, pod uvjetom da je osiguran puni posmični spoj. Kod kontinuiranih ploča razlikuju se otpornost na pozitivne i negativne momente savijanja. Otpornost na pozitivne momente savijanja dosegnuta je pri popuštanju čeličnog lima pri vlačnom naprezanju ili drobljenju betona u tlaku. Kao i kod spregnutih greda, proračunska plastična otpornost na savijanje $M_{pl,Rd}$ određuje se iz dijagrama unutarnjih sila po visini poprečnog presjeka. Koriste se blok-dijagrami, odnosno raspodjela naprezanja po visini je pravokutna. Plastična neutralna os kod spregnutih ploča može se nalaziti u betonskoj ploči (slika 18.1) ili u profiliranom čeličnom limu (slika 18.2) [2].



Slika 18.1 - Dijagram unutarnjih sila spregnute ploče kada se plastična neutralna os nalazi u betonskoj ploči (pozitivan moment) [7]

Prvi korak za izračun otpornosti na savijanje je određivanje položaja plastične neutralne osi. Izračunati ga se može iz ravnoteže unutarnjih horizontalnih sila u skladu s izrazima (18.3)-(18.5):

$$N_p = N_{c,f} \tag{18.3}$$

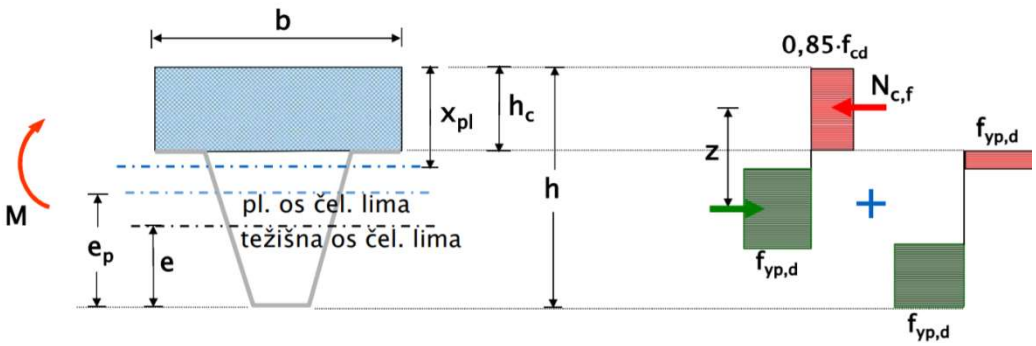
$$b \cdot x_{pl} \cdot 0{,}85 \cdot f_{cd} = A_{pe} \cdot f_{yp,d} \tag{18.4}$$

$$x_{pl} = \frac{A_{pe} \cdot f_{yp,d}}{b \cdot 0{,}85 \cdot f_{cd}} \tag{18.5}$$

Nakon određivanja položaja plastične neutralne osi, može se izraziti proračunska vrijednost plastične otpornosti presjeka na savijanje prema izrazima (18.6) i (18.7):

$$M_{pl,Rd} = A_p \cdot f_{yp,d} \left(d_p - \frac{x_{pl}}{2} \right) \tag{18.6}$$

$$M_{pl,Rd} = A_p \cdot f_{yp,d} \left(d_p - \frac{A_{pe} \cdot f_{yp,d}}{b \cdot 1{,}70 \cdot f_{cd}} \right) \tag{18.7}$$



Slika 18.2 - Raspored unutarnjih sila za slučaj kada je plastična neutralna os u čeličnom limu (pozitivan moment) [7]

Proračun je puno složeniji ako se plastična neutralna os nalazi u čeličnom limu jer se tada beton i čelični lim nalaze djelomično u vlaku i djelomično u tlaku. Nadalje, za tlačni dio čeličnog lima potrebno je odrediti proračunsku širinu zbog izbočivanja pa je cijeli postupak iteracijski. Kako bi se postupak pojednostavnio, norma HRN EN 1994-1-1 [5] daje pojednostavnjene izraze kojima se ukupna otpornost $M_{pl,Rd}$ rastavlja na dvije komponente, pri čemu se tlačna sila u betonu ($N_{c,f}$) uravnotežuje s odgovarajućim dijelom lima u vlaku (N_p) te se dodaje preostala otpornost vlačnog i tlačnog dijela lima izražena kao moment M_{pr} [4]. Opisani postupak je prikazan preko izraza (18.8)-(18.10).

$$M_{Rd} = M_{pr} + N_{c,f} \cdot z \tag{18.8}$$

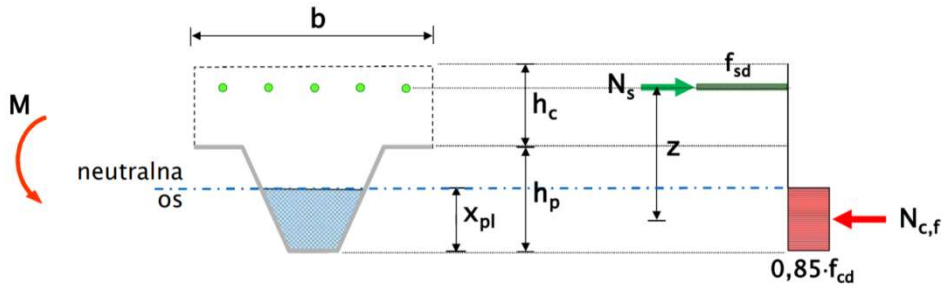
$$z = h - 0{,}5 \cdot h_c - e_p + (e_p - e) \tag{18.9}$$

$$M_{pr} = 1{,}25 \cdot M_{pa} \left(1 - \frac{N_{c,f}}{A_{pe} \cdot f_{yp,d}}\right) \leq M_{pa} \tag{18.10}$$

Pri djelovanju negativnih momenata čelični lim se nalazi u tlaku, a njegov doprinos može se uzeti u obzir ako je izveden kontinuirano preko ležajeva te ako u fazi izvedbe nije proračunan tako da je u obzir uzeta preraspodjela momenata savijanja zbog plastifikacije nad osloncima. Stoga se najčešće pri određivanju otpornosti na negativni moment savijanja ne uzima u obzir čelični lim. Otpornost na savijanje tada čine armatura (N_s) i betonski dio presjeka spregnute ploče koji je u tlaku ($N_{c,f}$), što je vidljivo na slici 18.3, a opisano je izrazima (18.11) i (18.12), kojima je b' srednja širina rebra [2].

$$x_{pl} = \frac{A_s \cdot f_{sd}}{b' \cdot 0{,}85 \cdot f_{cd}} \tag{18.11}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{sd} \cdot z \tag{18.12}$$



Slika 18.3 - Raspored unutarnjih sila za slučaj kada je plastična neutralna os u čeličnom limu (negativan moment) [7]

18.3 Otpornost na vertikalni posmik

Kod otpornosti spregnute ploče na vertikalni posmik najprije je potrebno dokazati otpornost poprečnog presjeka na vertikalni posmik za vrijeme izvedbe. Kako za vrijeme izvedbe isključivo čelični lim prenosi posmik, nužno je dokazati njegovu nosivost koristeći normu HRN EN 1993-1-3 [13], dok se za vrijeme uporabe vertikalni posmik prenosi preko betonske ploče pa se za potrebne provjere upućuje na korištenje norme HRN EN 1992-1-1 [6]. Kako bi se dogodio slom uzrokovan vertikalnim posmikom, potrebno je prevenirati slom preko uzdužnog posmika, a to se postiže korištenjem limova s učinkovitim udubljenjima ili ispupčenjima. Karakteristično za slom uzrokovan posmikom jest pojavljivanje pukotine u betonu pod kutom od 45°. Kako bi spregnuta ploča zadovoljila dokaz nosivosti na vertikalni posmik, mora vrijediti izraz (18.13) [2]:

$$\frac{V_{V,Ed}}{V_{V,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{18.13}$$

gdje su:

$V_{v,Ed}$ proračunska poprečna sila kao učinak djelovanja na jediničnoj širini spregnute ploče

$V_{v,Rd}$ proračunska otpornost spregnute ploče na vertikalni posmik na jediničnoj širini spregnute ploče.

Proračunska otpornost spregnute ploče na vertikalni posmik određuje se pomoću izraza (18.14):

$$V_{v,Rd} = V_{Rd,c} = max\left[C_{Rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}; v_{min}\right] b_0 \cdot d_p \tag{18.14}$$

gdje su:

f_{ck} karakteristična tlačna čvrstoća betona

A_p proračunska površina čeličnog lima u vlaku unutar promatrane širine b_0

b_0 srednja širina rebra

$C_{Rd,c}$ faktor čija je preporučena vrijednost jednaka $0{,}18/\gamma_c$.

Za izračun proračunske otpornosti potrebno je odrediti vrijednosti određene izrazima (18.15)-(18.17):

$$\rho_l = \frac{A_p}{b_0 \cdot d_p} \leq 0{,}02 \tag{18.15}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2{,}0 \; s\; d\; u\; milimetrima \tag{18.16}$$

$$v_{min} = 0{,}035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \tag{18.17}$$

gdje je d_p prosječna visina spregnute ploče.

18.4 Otpornost spregnute ploče na proboj

Zbog velikog koncentriranog opterećenja na maloj površini može doći do otkazivanja spregnute ploče zbog proboja. Kako do proboja ne bi došlo, potrebno je zadovoljiti nejednadžbu (18.18):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{p,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{18.18}$$

gdje su:

V_{Ed} proračunska poprečna sila

$V_{p,Rd}$ proračunska posmična otpornost na proboj.

Kao i za otpornost na vertikalni posmik, za određivanje otpornosti na proboj upućuje se na normu HRN EN 1992-1-1. Izračun otpornosti na proboj vrlo je sličan onome za vertikalni posmik, s tim što je ovdje potrebno odrediti mjerodavno posmičnu površinu poprečnog presjeka. Posmična površina računa se kao umnožak proračunske debljine ploče d i kritične posmične obodne dužine C_p (Slika 18.4) [2]. Proračunska posmična otpornost na proboj prema HRN EN 1992-1-1 [6] određuje se izrazom (18.19):

$$V_{p,Rd} = C_p \cdot h_c \cdot v_{Rd} \tag{18.19}$$

$$v_{Rd} = max\left[C_{Rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}}; v_{min}\right] \tag{18.20}$$

gdje su:

C_p kritična obodnica, određena razmatrajući obodnicu površine na koju djeluje opterećenje, uz širenje opterećenja pod 45°, prema izrazu (18.21)

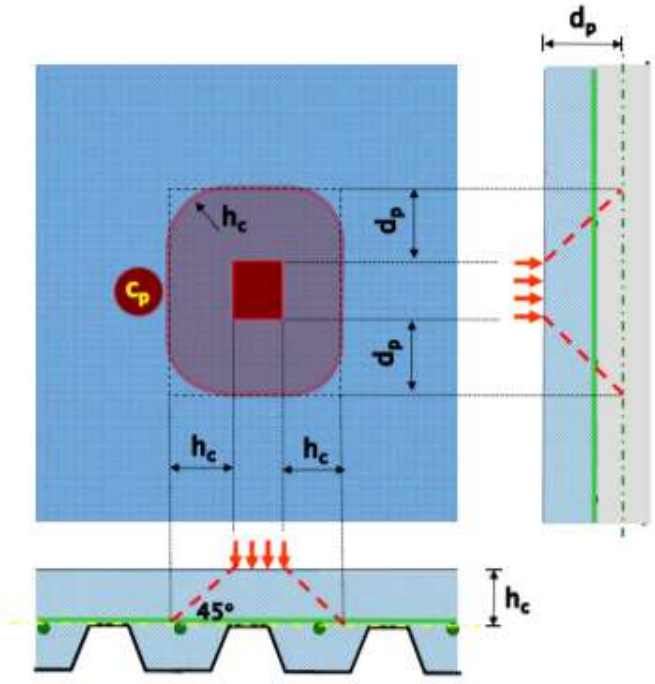
h_c debljina ploče

ρ_l $\sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz} \leq 0{,}02}$

$\rho_{l,y}$, ρ_{lz} odnose se na prianjajuću vlačnu armaturu u *y-y* i *z-z* smjerovima. Vrijednosti se moraju odrediti kao srednje vrijednosti, uzimajući u obzir širinu ploče jednaku širini stupa uvećanoj za 3*d*.

$$C_p = 2 \cdot \pi \cdot h_c + 2 \cdot \left(2 \cdot d_p + a_p - 2 \cdot h_c\right) + 2 \cdot b_p + 8 \cdot h_f \tag{18.21}$$

Kako spregnuta ploča ima različitu krutost u dva smjera, nužno je proračunati otpornost za oba smjera. Pretpostavka je da se opterećenje širi pod kutom od 45° (slika 18.4). Širina rasprostiranja u smjeru okomitom na pružanje rebara određuje se na gornjem dijelu lima, dok se u paralelnom smjeru računa na razini osi čeličnog lima.



Slika 18.4. - Kritični opseg za posmik pri proboju [7]

19 Otpornost spregnutih ploča na uzdužni posmik

Preuzimanjem uzdužnog posmika između čeličnog lima i betona osigurava se spregnuto djelovanje. Dokaz se temelji na određivanju uzdužne proračunske posmične otpornosti $\tau_{u,Rd}$ na posmičnom rasponu L_s [4], a posmična otpornost treba biti veća od proračunske uzdužne posmične sile. U HRN EN 1994-1-1 [5] dane su dvije metode za provedbu ovog dokaza: *m-k* metoda i metoda djelomičnog spoja. Za obje metode su u dodatku B.3 HRN EN 1994-1-1 [5] dana pravila o provođenju obveznih ispitivanja na uzorcima spregnute ploče, približno u realnoj veličini. Metode proračuna primjenjive su ovisno o ponašanju ploče s obzirom na duktilnost. Uzdužno ponašanje ploče može se smatrati duktilnim ako opterećenje sloma premašuje opterećenje pri kojemu dolazi do proklizavanja od 0,1 mm za više od 10 %. Ako pri dosezanju maksimalnog opterećenja progib u sredini premašuje L/50, kao opterećenje sloma treba uzeti opterećenje pri kojemu je progib u sredini L/50 [5].

19.1 Metoda m-k

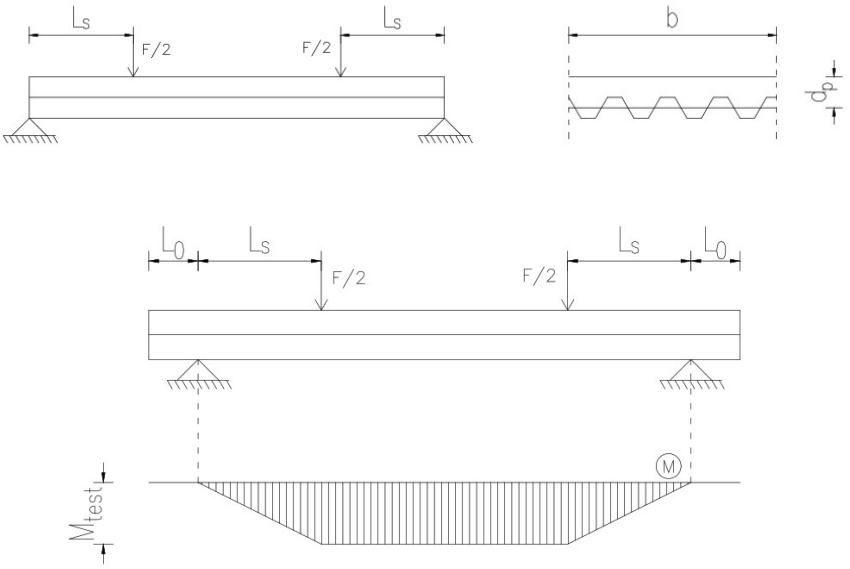
Metoda je primjenjiva za opći slučaj ponašanja ploče. Potrebno je dokazati da najveća proračunska vertikalna poprečna sila V_{Ed} na širini ploče *b* ne prelazi proračunsku uzdužnu otpornost $V_{l,Rd}$ koja se računa prema izrazu (19.1.):

$$V_{l,Rd} = \frac{b \cdot d_p}{\gamma_{VS}} \cdot \left(\frac{m \cdot A_p}{b \cdot L_s} + k \right) \tag{19.1}$$

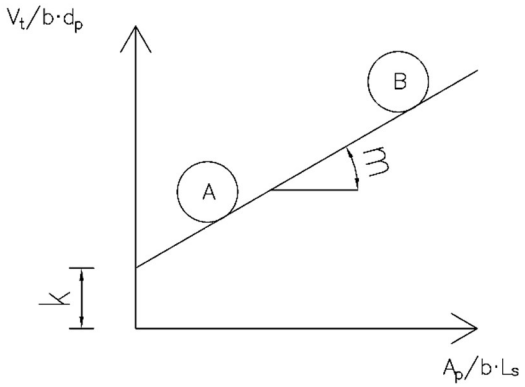
gdje su:

b širina poprečnog presjeka ploče u mm
d_p prosječna visina spregnute ploče u mm
γ_{VS} parcijalni koeficijent (vrijednost usvojena prema nacionalnom dodatku u iznosu od 1,25)
L_s posmična duljina u mm
A_p ploština poprečnog presjeka čeličnog lima u mm^2
m, k proračunska vrijednost faktora u N/mm^2 određena ispitivanjem ploča, sukladno zahtjevima metode.

U analogiji s ponašanjem tla, koeficijent *m* odgovarao bi vrijednosti kohezije, dok bi koeficijent *k* odgovarao unutarnjem trenju (Mohr-Coulombov zakon) [2]. Koeficijenti *m* i *k* određuju se ovisno o ponašanju ploče. Ako je ponašanje ploče duktilno, vertikalna reprezentativna poprečna sila iz ispitivanja V_t iznosi 0,5 vrijednosti opterećenja pri slomu W_t. Ako je ponašanje ploče krhko, ta vrijednost poprečne sile smanjuje se faktorom 0,8 [5]. Postav ispitivanja za određivanje koeficijenata *m* i *k* prikazan je na slici 19.1, a na slici 19.2. dan je prikaz obrade rezultata ispitivanja.



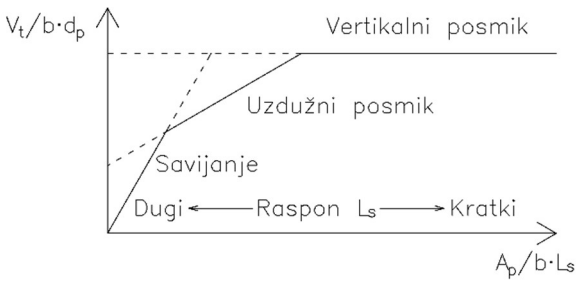
Slika 19.1 – Postav ispitivanja za određivanje koeficijenata m i k prema [5]



Slika 19.2 - Način otkazivanja spregnute ploče ovisno o rasponu

Točke A i B na slici 19.1 predstavljaju skup rezultata dvaju zasebnih tipova uzoraka koji mogu biti iste debljine, no različitog raspona. Utjecaj betona kod proračunske uzdužne posmične otpornosti može se zanemariti [4].

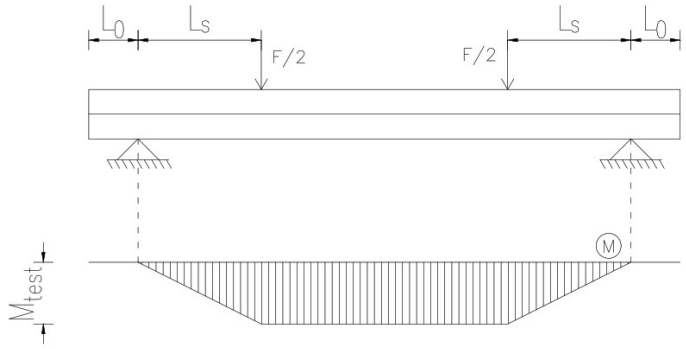
Vrijednost posmične duljine L_s ovisi o statičkom sustavu te o položaju opterećenja. Kod nosača raspona L, opterećenog jednoliko raspodijeljenim opterećenjem, L_s iznosi $L/4$, gdje je L raspon ploče. Kod nosača koji je opterećen dvama jednakim i simetrično postavljenim koncentriranim silama, L_s se usvaja kao razmak između sile i bližeg oslonca. Kod kontinuiranog nosača posmična duljina određuje se primjenom istovrijednog raspona, gdje se za unutarnje raspone L_s usvaja kao 0,8 L, dok se za vanjske raspone L_s usvaja kao 0,9 L. Ako se radi o drugačijim rasporedima opterećenja ili statičkim sustavima, moguće je za posmični raspon uzeti vrijednost M_{Ed}/V_{Ed}, gdje je M_{Ed} najveći moment savijanja, dok je V_{Ed} najveća poprečna sila u blizini oslonca promatranog raspona. Posmični raspon predstavlja udaljenost na kojoj se aktivira otpornost na uzdužni posmik [5]. Ako je posmična duljina relativno velika, na većem se potezu aktivira posmična otpornost te je mjerodavan način sloma otkazivanje savijanjem. Suprotno tome, ako je posmični raspon relativno kratak, mjerodavan način sloma je otkazivanje zbog vertikalnog posmika. Unutar te dvije krajnosti nalazi se otkazivanje zbog uzdužnog posmika, što se jasno vidi na slici 19.3.



Slika 19.3 - Način otkazivanja spregnute ploče ovisno o rasponu

19.2 Metoda djelomičnog spoja

Metodu djelomičnog spoja moguće je primijeniti samo kod ploča s duktilnim ponašanjem. Kod profiliranih limova s glatkom površinom najveća posmična otpornost je gotovo jednaka kao otpornost pri prvom proklizavanju. Kod limova s udubljenjima i ispupčenjima postoji razlika zbog istovremenog trenja i mehaničkog sprezanja [2]. Metoda se bazira na naprezanju $\tau_{u,Rd}$, dok se uzdužna posmična otpornost kontrolira provjerom otpornosti na savijanje. Naprezanje $\tau_{u,Rd}$ djeluje na kontaktnoj plohi čelik-beton i određuje se ispitivanjem na pločama koje ispunjavaju zahtjeve posmičnog spoja. Ispitivanje se provodi prema pravilima danim u dodatku B.3, HRN EN 1994-1-1 [5]. Prilikom ispitivanja potrebno je odrediti moment savijanja na mjestu djelovanja koncentriranog opterećenja za sva djelovanja, M_{test}. Postav ispitivanja za određivanje naprezanja $\tau_{u,Rd}$ prikazan je na slici 19.4.



Slika 19.4 – Postav ispitivanja za određivanje $\tau_{u,Rd}$ prema [2] [5]

Prateći putanju A → B → C na slici 19.5, odredi se stupanj sprezanja η_{test} [2] [5]. Koristeći stupanj sprezanja η_{test} odredi se τ_u prema izrazu (19.2):

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{c,f}}{b \cdot (L_s + L_0)} \tag{19.2}$$

gdje su:

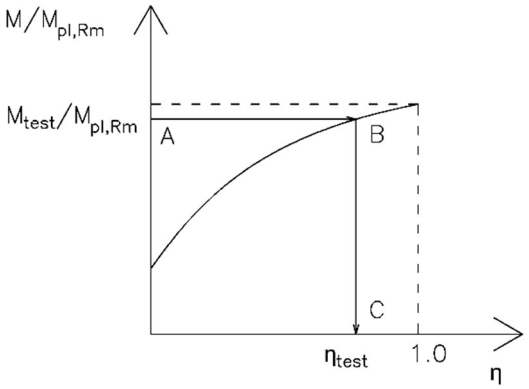
$N_{c,f}$ uzdužna sila koja je manja od vrijednosti sile u betonskoj ploči ili u čeličnom limu, određena izrazom (19.3)

L_0 duljina prepusta.

$$N_{c,f} = \min\left(\frac{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot h_c}{\gamma_c}, \frac{A_p \cdot f_{yp}}{\gamma_{ap}}\right) \tag{19.3}$$

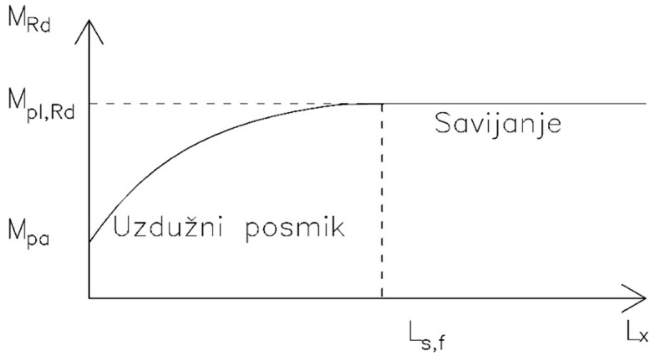
Najmanja duljina potrebna za puno sprezanje $L_{s,f}$ određuje se prema izrazu (19.5):

$$L_{s,f} = \frac{N_{c,f}}{b \cdot \tau_{u,Rd}} \tag{19.5}$$



Slika 19.5 - Određivanje $\tau_{u,Rd}$

Ovisno o položaju promatranog presjeka duž raspona definira se način sloma, što je prikazano na slici 19.6. Za svaki presjek duž raspona potrebno je dokazati da je proračunski moment savijanja M_{Ed} manji od proračunske otpornosti na savijanje M_{Rd}.



Slika 19.6 - Način otkazivanja ovisno o položaju duž raspona

Ako se promatrani presjek nalazi na $L_x = 0$, uzdužnu posmičnu silu prenosi samo čelični lim te je otpornost na savijanje jednaka otpornosti na savijanje čeličnog lima M_{pa}. Ako se promatrani presjek nalazi na $L_x \geq L_{s,f}$, ostvaren je potpuni posmični spoj te je otpornost na savijanje jednaka $M_{pl,Rd}$. Ako se promatrani presjek nalazi na $L_x < L_{s,f}$, ostvaren je djelomičan spoj te je kritična otpornost uzdužnog posmika [4].

Proračunski moment otpornosti M_{Rd} određuje se kao i za situaciju kada na ploču djeluje pozitivni moment savijanja, s tim da se sila $N_{c,f}$ zamjenjuje silom N_c, koja se određuje prema izrazu (19.6), dok se krak z određuje prema izrazu (19.7):

$$N_c = \tau_{u,Rd} \cdot b \cdot L_x \leq N_{c,f} \quad (19.6)$$

$$z = h - 0.5 \cdot x_{pl} - e_p + (e_p - e) \cdot \frac{N_c}{A_{pe} \cdot f_{yp,d}} \quad (19.7)$$

gdje su:

- L_x udaljenost promatranog presjeka od oslonca
- x_{pl} položaj neutralne osi u betonskom dijelu ploče
- e_p položaj plastične neutralne osi čeličnog lima
- e položaj težišta čeličnog lima.

Sila N_c smije se uvećati pomoću μ ako je $\tau_{u,Rd}$ određen uz dodatnu uzdužnu posmičnu otpornost koja je uzrokovana reakcijom na osloncu. Preporučena vrijednost nazivnog faktora μ iznosi 0,5 [4].

19.3 Otpornost na uzdužni posmik kod ploča koje su usidrene na krajevima

Kada dolazi do situacije da uzdužna otpornost spregnute ploče nije dovoljna s obzirom na uzdužnu posmičnu silu, moguće je povećati uzdužnu posmičnu otpornost sidrenjem ploče na njezinim krajevima. Sidrenjem ploče na krajevima koristeći zavarene moždanike s glavom, povećava se uzdužna sila u betonu za proračunsku otpornost sidrenja na krajevima. Primjena ovog načina sidrenja uobičajeno se primjenjuje uz metodu djelomičnog spoja. Cijela posmična sila preuzima se moždanicima, a jednaka je vlačnoj sili u čeličnom limu za granično stanje nosivosti [2]. Proračunska otpornost moždanika na uzdužni posmik određuje se prema izrazu (19.8):

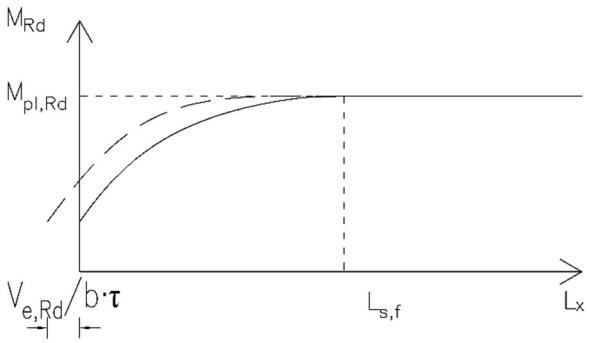
$$P_{pb,Rd} = k_\phi \cdot d_{d0} \cdot t \cdot f_{yp,d} \leq P_{Rd} \quad (19.8)$$

$$k_\phi = 1 + \frac{a}{d_{d0}} \leq 6.0 \quad (19.9)$$

gdje su:

d_{d0} promjer zavara u korijenu ($d_{d0} \approx 1{,}1\ d$)
d promjer moždanika
$f_{yp,d}$ proračunska granica popuštanja čeličnog lima
t_p debljina trapeznog čeličnog lima
k_Φ koeficijent
P_{Rd} proračunska otpornost moždanika s glavom
a razmak od osi moždanika do kraja profiliranog lima (ne smije biti manji od 1,5 d_{d0}).

Sila N_c povećava se za vrijednost proračunske otpornosti sidrenja na krajevima. Povećanje sile N_c rezultira povećanjem područja ispod krivulje M_{Rd} te omogućava prijenos većeg momenta savijanja u usporedbi sa situacijom kada nema sidrenja ploče na kraju [4]. Grafički prikaz povećanja otpornosti na savijanje prikazan je na slici 19.7.



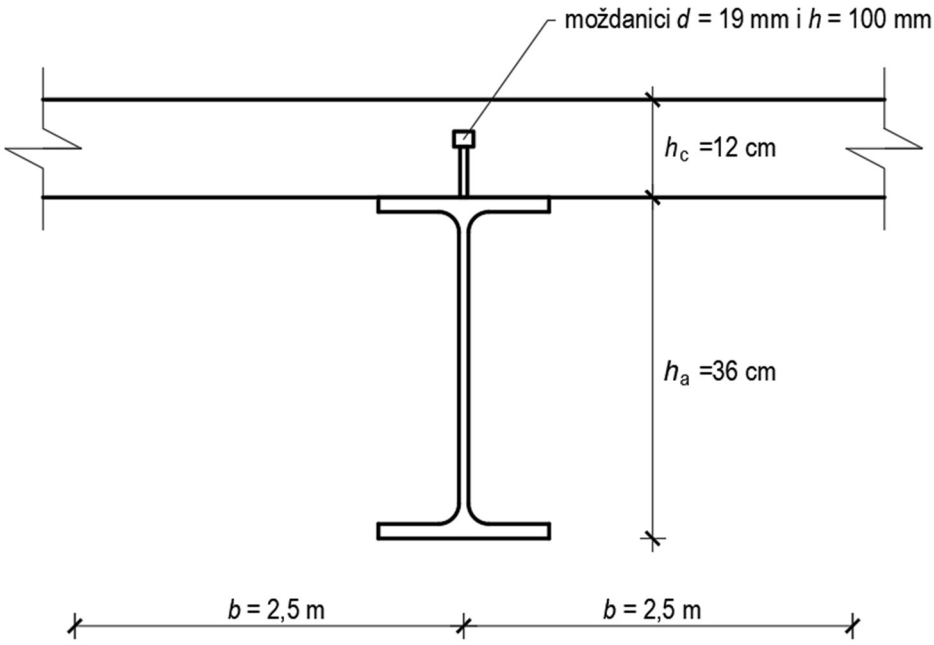
Slika 19.7 - Povećanje područja otpornosti na moment savijanja

20 Primjer - proračun spregnute grede prema HRN EN 1994-1-1

1. Osnovni podatci

- raspon grede: L = 10,0 metara
- razmak čeličnih greda b = 2,5 metara
- bočno pridržana greda

1.1. Poprečni presjek spregnutog nosača i geometrijska svojstva čeličnog profila



- površina poprečnog presjeka:	A_a = 72,73 cm^2	
- masa profila	G = 57,1 kg/m'	
- visina poprečnog presjeka:	h_a = 360 mm	
- širina pojasnice:	b = 170 mm	
- debljina pojasnice:	t_f = 12,7 mm	
- debljina hrpta:	t_w = 8,0 mm	
- radijus zaobljenja:	r = 18,0 mm	
- momenti tromosti:	I_y = 16 270 cm^4	**IPE 360**
	I_z = 1 043 cm^4	
- momenti otpora:	$W_{el,y}$ = 903,6 cm^3	
	$W_{el,z}$ = 122,8 cm^3	
	$W_{pl,y}$ = 1 019 cm^3	
	$W_{pl,z}$ = 191,1 cm^3	
- torzijska konstanta	I_t = 37,32 cm^4	
- konstanta krivljenja	I_w = 313 600 cm^6	

1.2. Materijali

Konstrukcijski čelik

- Kvaliteta

  S 275

- Mehanička svojstva

  t_{max} = 12,7 mm < 40 mm
  - f_y = 275 N/mm^2
  - f_u = 430 N/mm^2

  E = 210 000 MPa

Beton

- Razred čvrstoće

  C25/30

- Cement

  klasa N (normalan prirast ranih čvrstoća)

- Mehanička svojstva

  f_{ck} = 25 MPa

  $f_{cm} = f_{ck} + 8\ (MPa) = 25 + 8 = 33\ MPa$

  $E_{cm} = 22 \times \left[(f_{ck} + 8) / 10 \right]^{0.3}$

  $E_{cm} = 22 \times \left[(25 + 8) / 10 \right]^{0.3} = 31.476\ GPa$

Moždanici

- Kvaliteta

  S 235

- Mehanička svojstva

  f_y = 235 MPa

  f_u = 450 MPa

  $E_s = E_a$ = 210000 MPa

2. Granično stanje nosivosti – stadij izgradnje

2.1. Analiza opterećenja

Stalno djelovanje

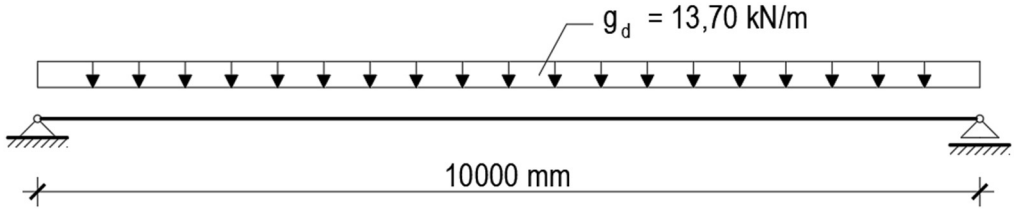
- vlastita težina čeličnog profila	$57,1 \times \frac{9.81}{1000} = 0,56\ kN/m'$
- vlastita težina betonske ploče	$0,12 \times 2,5 \times 25 = 7,50\ kN/m'$
	$g_k = 8,06\ kN/m'$

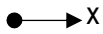
Promjenjivo djelovanje

- radnici, alati, oprema i sl. na radnom području	$0,75 \times 2,5 = 1,88\ kN/m'$
	$q_k = 1,88\ kN/m'$

Proračunsko djelovanje $q_{Ed} = \gamma_G \times g_k + \gamma_Q \times q_k = 1.35 \times 8,06 + 1.5 \times 1,88 = 13,69\ kN/m'$

Proračunske rezne sile i momenti savijanja





Moment savijanja

$$M_{y,Ed} = \frac{q_{Ed} \times L^2}{8} = \frac{13,69 \times 10^2}{8} = 171,13 \text{ kNm}$$

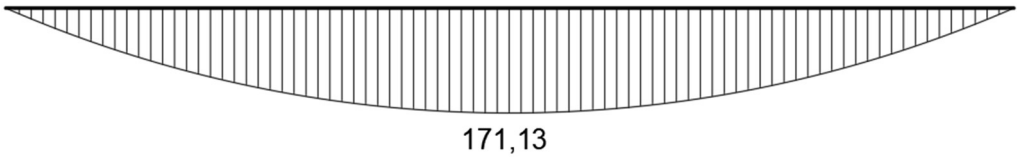
$$M(x)_{y,Ed} = \frac{q_{Ed} \times X}{2} \times (L - X)$$

Poprečna sila

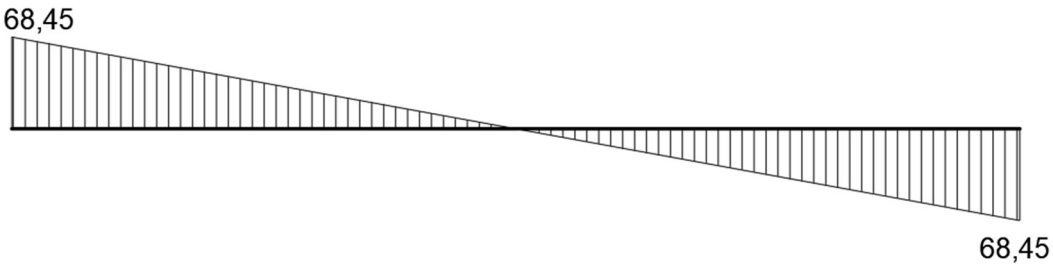
$$V_{z,Ed} = \frac{q_{Ed} \times L}{2} = \frac{13,69 \times 10}{2} = 68,45 \text{ kN}$$

$$V(X)_{z,Ed} = q_{Ed} \times \left(\frac{L}{2} - X\right)$$

Dijagram momenata savijanja, $\mathbf{M_{y,Ed}}$ [kNm]



Dijagram poprečnih sila, $\mathbf{V_{z,Ed}}$ [kN]



2.2. Razredba poprečnog presjeka

2.2.1. Hrbat

- Osnovni parametri
  - unutarnji dio
  - izložen savijanju
  - $c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 360 - 2 \cdot 12,7 - 2 \cdot 18 = 298,6 \; mm$
  - $t = t_w = 8,0 \; mm$

- Odnos visine i debljine

$$\frac{c}{t} = \frac{298,6}{8,0} = 37,33$$

- Uvjet za razred 1

$$\frac{c}{t} \le 72 \cdot \varepsilon \text{ (za S 275} \rightarrow \varepsilon = 0,92)$$

$$37,33 < 66,56 \rightarrow \textbf{Razred 1}$$

2.2.2. Pojasnica

- Osnovni parametri
  - vanjski dio
  - izložen tlaku
  - $c = \frac{b - t_w - 2r}{2} = \frac{170 - 8,0 - 2 \cdot 18}{2} = 63,0\,mm$
  - $t = t_f = 12,7mm$

- Odnos širine i debljine

$$\frac{c}{t} = \frac{63,0}{12,7} = 4,96$$

- Uvjet za razred 1

$$\frac{c}{t} \le 9 \cdot \varepsilon \text{ (za S 275} \rightarrow \varepsilon = 0,92)$$

$$4,96 < 8,32 \rightarrow \textbf{Razred 1}$$

Poprečni presjek 1. razreda

2.3. Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

- Proračunska otpornost na savijanje

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1019 \cdot 27,5}{1,0} = 28\ 023\ kNcm = 280,23\ kNm$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1,0;\ \frac{171,13}{280,23} = 0,61 < 1,0$$

2.4. Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

- Provjera mogućnosti izbočivanja hrpta

$$\frac{h_w}{t_w} \le 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

– svjetla visina hrpta

$$h_w = h - 2 \cdot t_f = 360 - 2 \cdot 12,7 = 334,6\ mm$$

– faktor

$$\eta = 1,2$$

$$\frac{334,6}{8,0} = 41,83 < 72 \cdot \frac{0,92}{1,2} = 55,2 \rightarrow \text{nema opasnosti od izbočivanja hrpta}$$

- Proračunska plastična otpornost na poprečnu silu

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \rightarrow V_{pl,Rd} = \frac{35,14 \cdot 27,5}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 557,92\ kN$$

– posmična površina (valjani profil, I i H, opterećenje paralelno s hrptom)

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + \left(t_w + 2 \cdot r\right) \cdot t_f \ge \eta \cdot h_w \cdot t_w$$
$$A_V = 72,73 - 2 \cdot 17 \cdot 1,27 + (0,8 + 2 \cdot 1,8) \cdot 1,27 = 35,14\ cm^2 > 1,20 \cdot 33,46 \cdot 0,8 = 32,12\, cm^2$$
$$A_V = 35,14\ cm^2$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \le 1,0;\ \frac{68,45}{557,92} = 0,12 < 1,0$$

Napomena za 3. i 4. razred:

- Za provjeru proračunske elastične otpornosti na djelovanje poprečne sile smije se upotrijebiti sljedeći kriterij:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \le 1,0$$

gdje se τ_{Ed} smije odrediti iz izraza $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t}$

2.5. Otpornost poprečnog presjeka na zajedničko djelovanje savijanja i poprečne sile

- Ako je sljedeći uvjet zadovoljen, učinak poprečne sile na otpornost na moment smije se zanemariti

$$V_{Ed} \leq 0{,}5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow 34{,}23\,kN < 0{,}5 \cdot 557{,}92 = 278{,}96\,kN$$

- Odabir mjerodavnog poprečnog presjeka za interakciju

x = 2,5 m
V_{Ed} = 34,23 kN; $M_{y,Ed}$ = 128,34 kNm

Napomena za slučaj da uvjet nije zadovoljen:

- $M_{y,V,Rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_w^2}{4 \cdot t_w}\right) \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ ali $M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$

gdje $M_{c,Rd}$ odgovara proračunskoj otpornosti na savijanje, $A_w = h_w \cdot t_w$, $\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1\right)^2$

3. Granično stanje nosivosti – stadij uporabe

3.1. Analiza opterećenja

Stalno djelovanje

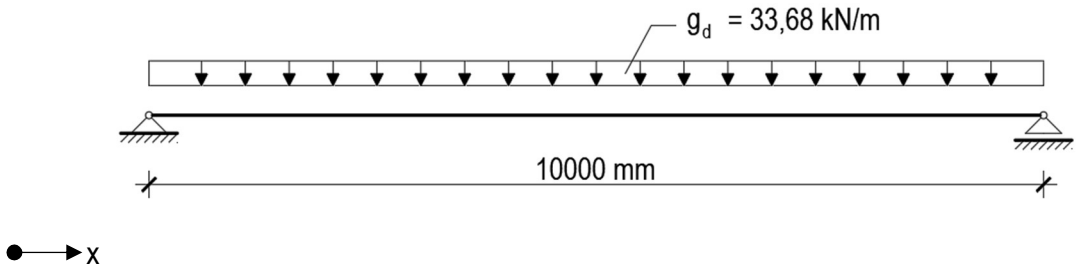
- vlastita težina čeličnog profila	$57,1 \times \frac{9.81}{1000} = 0,56$ kN / m'
- vlastita težina betonske ploče	$0,12 \times 2,5 \times 25 = 7,50$ kN / m'
- dodatno stalno opterećenje	$1,2 \times 2,5 = 3,00$ kN / m'
	$g_k = 11,06$ kN / m'

Promjenjivo djelovanje

- uporabno opterećenje (kategorija C4)	$5,00 \times 2,5 = 12,5$ kN / m'
	$q_k = 12,5$ kN / m'

Proračunsko djelovanje $q_{Ed} = \gamma_G \times g_k + \gamma_Q \times q_k = 1.35 \times 11,06 + 1.5 \times 12,5 = 33,68$ kN / m'

Proračunske rezne sile i momenti savijanja



Moment savijanja

$$M_{y,Ed} = \frac{q_{Ed} \times L^2}{8} = \frac{33,68 \times 10^2}{8} = 421,00 \text{ kNm}$$

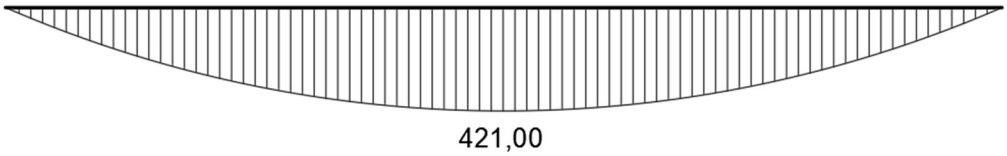
$$M(x)_{y,Ed} = \frac{q_{Ed} \times X}{2} \times (L - X)$$

Poprečna sila

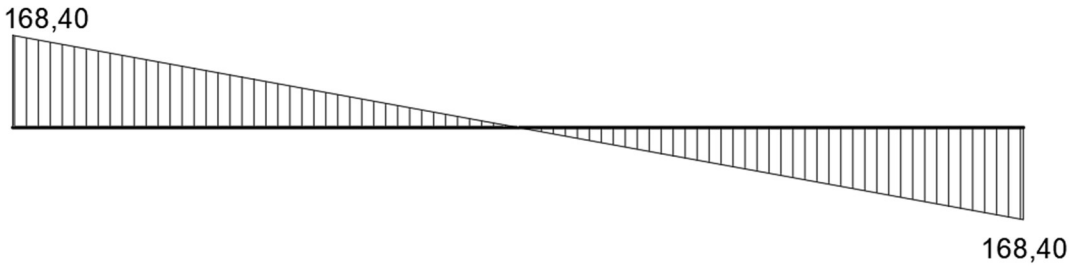
$$V_{z,Ed} = \frac{q_{Ed} \times L}{2} = \frac{33,68 \times 10}{2} = 168,40 \text{ kN}$$

$$V(X)_{z,Ed} = q_{Ed} \times \left(\frac{L}{2} - X\right)$$

Dijagram momenata savijanja, $\mathbf{M_{y,Ed}}$ [kNm]



Dijagram poprečnih sila, $\mathbf{V_{z,Ed}}$ [kN]



3.2. Provjera zaostajanja posmika

- Presjek u polju
  - proračunska širina betonske ploče

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei}$$

  - razmak između rubnih moždanika

$$b_0 = 0\ \text{cm}$$

  - sudjelujuće širine

$$b_{ei} = \frac{L_e}{8} \leq b_i$$

  - razmak nul-točaka dijagrama momenata savijanja

$$L_e = 10\ \text{m}$$

  - širine na raspolaganju

$$b_1 = b_2 = 125\ \text{cm}$$

  - sudjelujuće širine

$$b_{e1} = b_{e2} = \frac{1000}{8} = 125\ \text{cm} = b_1 = 125\ \text{cm} \rightarrow b_{e1} = b_{e2} = 125\ \text{cm}$$

  - proračunska širina betonske ploče

$$b_{eff} = 0 + 125 + 125 = 250\ \text{cm}$$

- Presjek iznad ležaja

- proračunska širina betonske ploče

$$b_{eff} = b_0 + \sum \beta_i \times b_{ei}$$

- korekcijski faktori

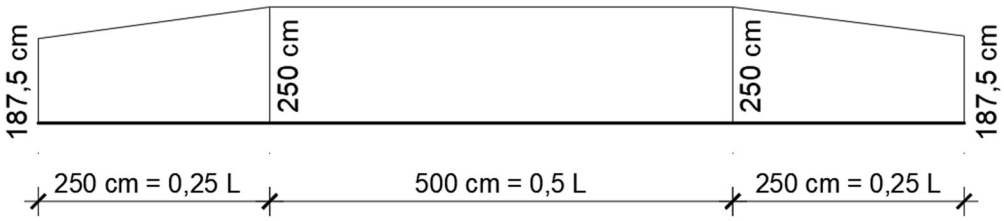
$$\beta_i = \left(0.55 + 0.025 \times \frac{L_e}{b_{ei}} \right) \leq 1.0$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \left(0,55 + 0,025 \times \frac{1000}{125} \right) = 0,75 < 1,0$$

- proračunska širina betonske ploče

$$b_{eff} = 0 + 0,75 \times 125 + 0,75 \times 125 = 187,5 \text{ cm}$$

- Raspodjela proračunske širine betonske ploče po duljini nosača



3.3. Određivanje položaja neutralne osi

- Proračunska plastična otpornost betona u tlaku

$$N_c = 0.85 \times b_{eff} \times h_c \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0.85 \times 250 \times 12 \times \frac{2,5}{1,5} = 4250 \text{ kN}$$

- Proračunska plastična otpornost čeličnog nosača

$$N_a = A_a \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 72,73 \times \frac{27,5}{1,0} = 2000,1 \text{ kN}$$

- Plastična neutralna os u betonskoj ploči

$$N_a < N_c$$
$$2000,1 < 4250 \rightarrow \textbf{plastična neutralna os je u betonskoj ploči}$$

- Udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba spregnutog poprečnog presjeka

$$x_{pl} = \frac{N_a}{0.85 \times f_{cd} \times b_{eff}} = \frac{2000,1}{0.85 \times 1,67 \times 250} = 5,64 \text{ cm}$$

3.4. Razredba poprečnog presjeka

- Cijeli čelični nosač je u vlaku → **poprečni presjek 1. razreda**

3.5. Otpornost poprečnog presjeka na savijanje

- Proračunska otpornost na savijanje

$$M_{pl,Rd} = N_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_c - \frac{x_{pl}}{2} \right) = 2000,1 \times \left(\frac{36}{2} + 12 - \frac{5,64}{2} \right) = 54363 \text{ kNcm} = 543,63 \text{ kNm}$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \; ; \; \frac{421,00}{543,63} = 0,77 < 1,0$$

3.6. Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

- Proračunska plastična otpornost na poprečnu silu

$$V_{pl,Rd} = 557,92 \; kN$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,0 \; ; \; \frac{168,40}{557,92} = 0,30 < 1,0$$

3.7. Otpornost poprečnog presjeka na zajedničko djelovanje savijanja i poprečne sile

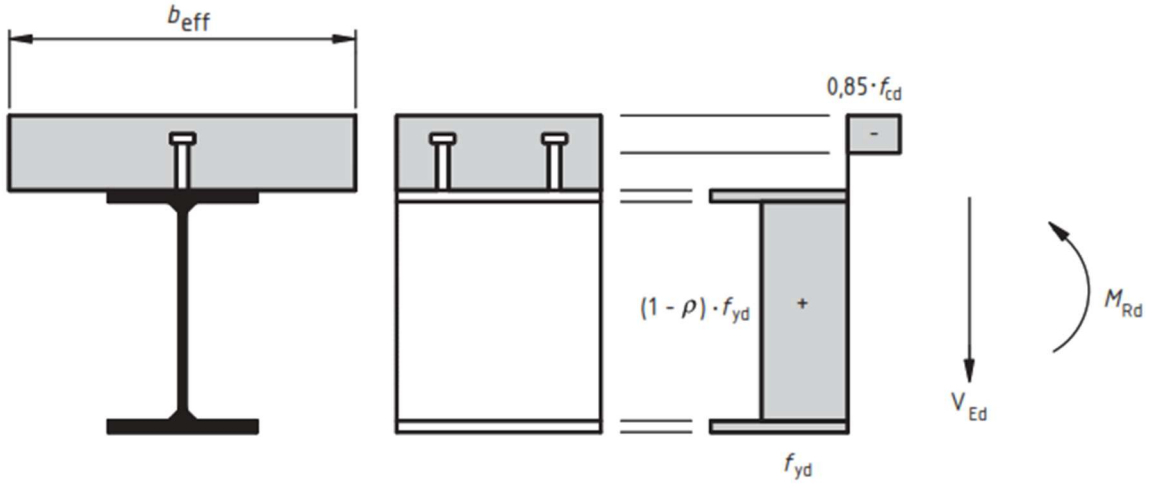
- Ako je sljedeći uvjet zadovoljen, učinak poprečne sile na otpornost na moment smije se zanemariti

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow 84,2 \; kN < 0,5 \cdot 557,92 = 278,96 \; kN$$

- Odabir mjerodavnog poprečnog presjeka za interakciju

x = 2,5 m
V_{Ed} = 84,2 kN; $M_{y,Ed}$ = 315,75 kNm

Napomena za slučaj da uvjet nije zadovoljen:



- $A_w = h_w \cdot t_w, \ \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$
- Proračunska plastična otpornost hrpta i pojasnica

$$N_{aw} = A_w \times \frac{(1-\rho) \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{af} = (A_a - A_w) \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

- Udaljenost neutralne osi od gornjeg ruba spregnutog poprečnog presjeka

$$0.85 \times f_{cd} \times b_{eff} \times x_{pl} = N_{aw} + N_{af}$$

$$x_{pl} = \frac{N_{aw} + N_{af}}{0.85 \times f_{cd} \times b_{eff}}$$

- Proračunska otpornost na savijanje

$$M_{pl,Rd} = (N_{aw} + N_{af}) \times \left(\frac{h_a}{2} + h_c - \frac{x_{pl}}{2} \right)$$

3.8. Određivanje potrebnog broja moždanika

- Proračunska otpornost jednog moždanika

$$P_{Rd} = MIN\left(P_{Rd}^{(1)}; P_{Rd}^{(2)} \right)$$

- Otpornost moždanika određena odrezom pri korijenu moždanika

$$P_{Rd}^{(2)} = 0,8 \times f_u \times \frac{\pi \times d^2}{4 \times \gamma_V} = 0,8 \times 45 \times \frac{\pi \times 1,9^2}{4 \times 1,25} = 81,66\ kN$$

- Promjer moždanika (od 16 do 25 mm)

$d = 19\ mm$

- Otpornost moždanika određena drobljenjem betona

$$P_{Rd}^{(1)} = \frac{0.29 \times \alpha \times d^2 \times \sqrt{f_{ck} \times E_{cm}}}{\gamma_V} \rightarrow P_{Rd}^{(1)} = \frac{0,29 \times 1,0 \times 1,9^2 \times \sqrt{2,5 \times 3147,6}}{1,25} = 74,29\,kN$$

- korekcijski faktor

$$\alpha = 0.2 \times \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \rightarrow 3 \le \frac{h_{sc}}{d} \le 4$$

$$\alpha = 1 \rightarrow \frac{h_{sc}}{d} > 4$$

- visina moždanika

$h_{sc} = 100\ mm$

- omjer visine i promjera moždanika

$$\frac{h_{sc}}{d} = \frac{100}{19} = 5,26 > 4 \rightarrow \alpha = 1$$

- Proračunska otpornost jednog moždanika

$$P_{Rd} = MIN\left(81,66;74,29\right) = 74,29\ kN$$

- Proračunska uzdužna sila u betonskoj pojasnici

$$F_l = MIN\left(N_a;N_c\right) = MIN\left(2000,1;4250\right) = 2000,1\,kN$$

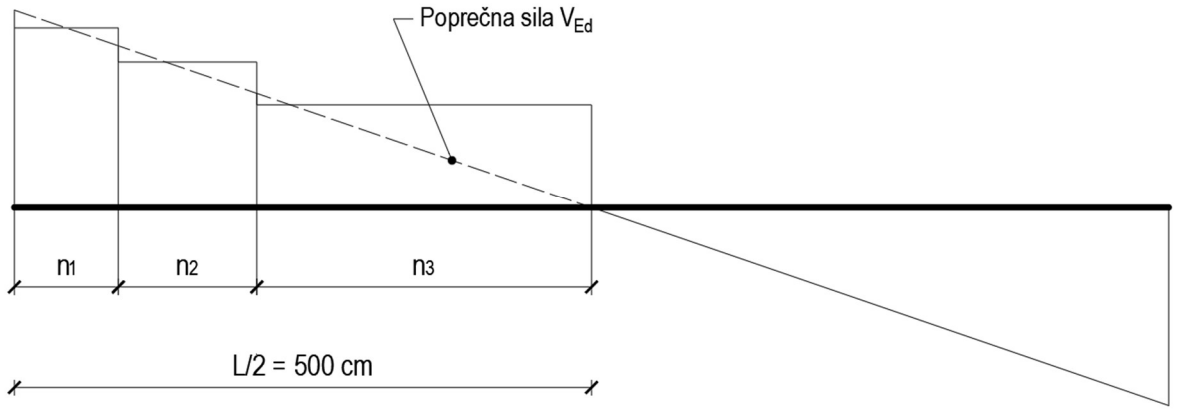
- Smanjena uzdužna sila ovisno o iskorištenosti na savijanje

$$F_{l,red} = F_l \times \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = 2000,1 \times \frac{421,00}{543,63} = 1548,93\ kN$$

- Potreban broj moždanika

$$n = \frac{F_{l,red}}{P_{Rd}} = \frac{1548,93}{74,29} = 20,85 \text{ moždanika} \approx 21 \text{ moždanik (za pola raspona)}$$

- Raspodjela moždanika duž raspona prema posmičnom toku (površini poprečne sile)



Napomena: linija posmičnog toga smije se stepenasto urezati za najviše 10 %.

- Proračun područja s jednakim posmičnim tokovima

$$A_v = \frac{1}{2} \times V_{Ed} \times L$$

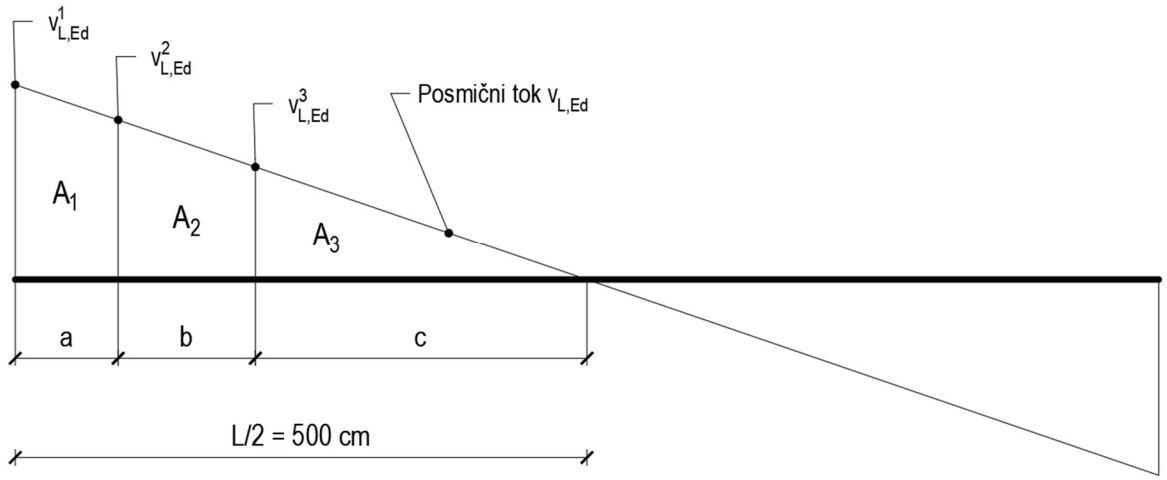
$$n_i = \frac{A_{Vi}}{A_V} \times n$$

$$\Sigma n_i \geq n$$

- Razmak grupa moždanika

$$5 \times d \leq s \leq \min\left(6 \times h_c ; 800 \text{ mm}\right)$$

- Posmični tok (područja s jednakim posmičnim tokom)

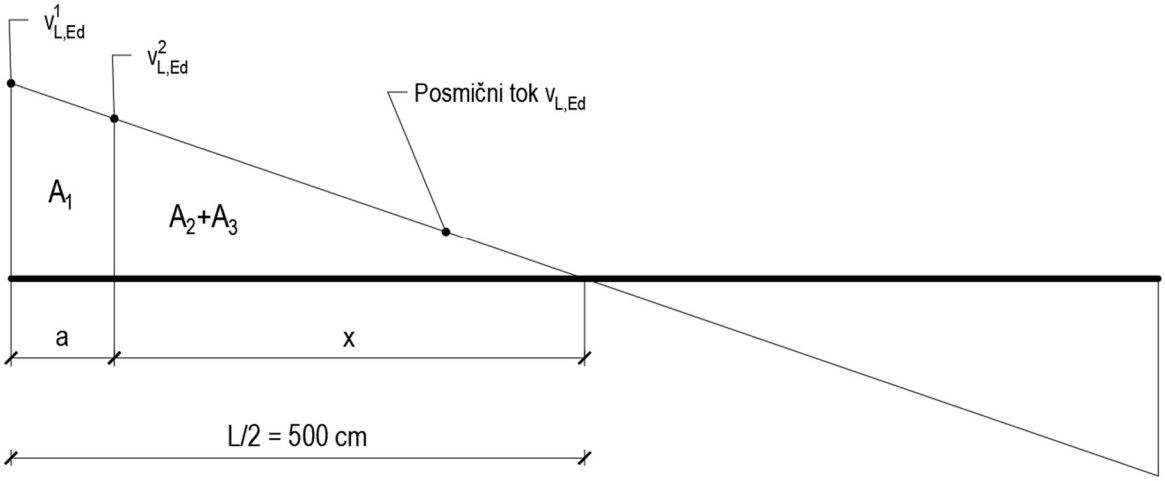


$$A_1 = A_2 = A_3 = F_{l,red} / 3 = 1548,93 / 3 = 516,31\,\text{kN}$$

- Posmiči tok kod ležaja

$$v^1_{L,Ed} = \frac{2 \times F_{l,red}}{L/2} = \frac{2 \times 1548,93}{5} = 619,57\,\text{kN/m}$$

- Duljina prvog područja i iznos posmičnog toka na početku drugog područja



$$\frac{v^2_{L,Ed} \times x}{2} = A_2 + A_3 \text{ (površina trokuta područja duljine x)}$$

$$v^2_{L,Ed} \times x = 2 \times (A_2 + A_3) \rightarrow v^2_{L,Ed} \times x = 2 \times (516,31 + 516,31) = 2065,24$$

$$\frac{v^1_{L,Ed}}{v^2_{L,Ed}} = \frac{a+x}{x} \text{ (omjer trokuta)}$$

$$\frac{619,57}{v^2_{L,Ed}} = \frac{5}{x} \rightarrow \begin{matrix} 619,57 \times x = 5 \times v^2_{L,Ed} \\ 123,91 \times x = v^2_{L,Ed} \end{matrix}$$

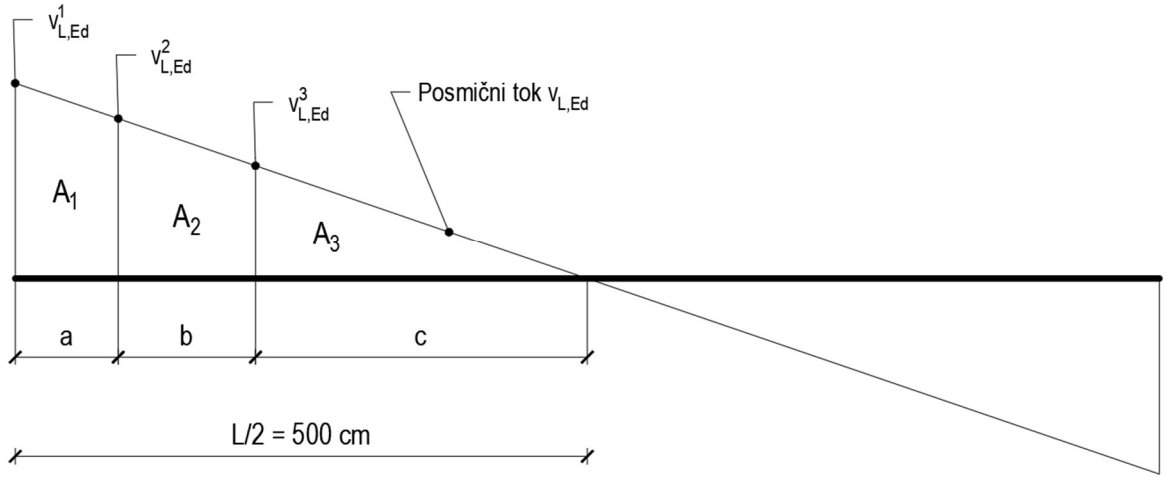
$$(123,91 \times x) \times x = 2065,24$$

$$\rightarrow x^2 = 16,67 \qquad \rightarrow 123,91 \times 4,08 = 505,55 \text{ kN/m} = v^2_{L,Ed}$$

$$x = 4,08 \text{ m}$$

$$a = \frac{L}{2} - x = 5 - 4,08 = 0,92 \text{ m} \ (18,4\% \text{ od } L/2)$$

- Duljina drugog područja i iznos posmičnog toka na početku trećeg područja



$$\frac{v^3_{L,Ed} \times c}{2} = A_3 \text{ (površina trokuta područja duljine c)}$$

$$v^3_{L,Ed} \times c = 2 \times A_3 \rightarrow v^3_{L,Ed} \times c = 1032,8$$

$$\frac{v^2_{L,Ed}}{v^3_{L,Ed}} = \frac{b+c}{c} \text{ (omjer trokuta)}$$

$$123,91 \times c = v^3_{L,Ed}$$

$$(123,91 \times c) \times c = 1032,8$$

$$\rightarrow c^2 = 8,34 \qquad \rightarrow 123,91 \times 2,89 = 357,74\ kN/m = v^3_{L,Ed}$$

$$c = 2,89\ m$$

$$b = x - c = 4,08 - 2,89 = 1,19\ m \ \ (23,28 \text{ od } L/2)$$

$$c = 2,89\ m \ \ (57,28 \text{ od } L/2)$$

- U svakom području stavlja se jednak broj moždanika, na jednakom razmaku:

$$n_i = \frac{n}{3} = \frac{21}{3} = 7$$

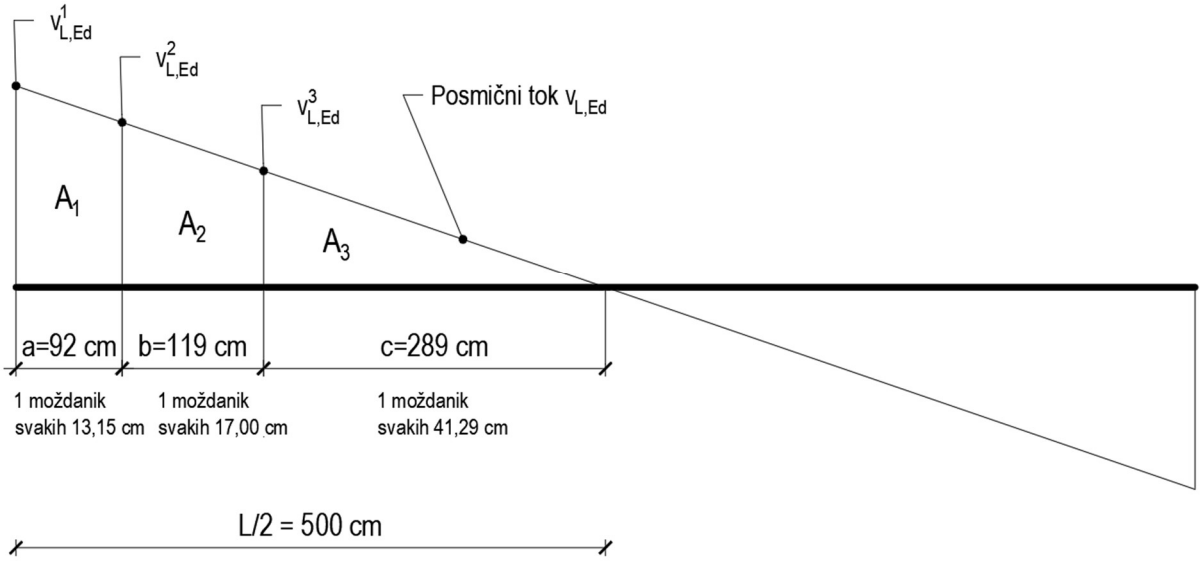
$$s_a = \frac{a}{n} = \frac{92}{7} = 13,14\ cm$$

$$s_b = \frac{b}{n} = \frac{119}{7} = 17,00\ cm$$

$$s_b = \frac{c}{n} = \frac{289}{7} = 41,29\ cm$$

$$5 \times d \le s \le \min(6 \times h_c; 800\ mm)$$

$$5 \times 1,9 = 9,5\ cm \le s \le \min(6 \times 12 = 72\ cm =; 80\ cm)$$



4. Granično stanje uporabivosti

4.1. Analiza opterećenja

Stalno djelovanje

- vlastita težina čeličnog profila	$57{,}1 \times \frac{9.81}{1000} = 0{,}56$ kN / m'
- vlastita težina betonske ploče	$0{,}12 \times 2{,}5 \times 25 = 7{,}50$ kN / m'
- dodatno stalno opterećenje	$1{,}2 \times 2{,}5 = 3{,}00$ kN / m'
	$g_{k,1} = 8{,}06$ kN / m'
	$g_{k,2} = 3{,}00$ kN / m'

Promjenjivo djelovanje

- uporabno opterećenje (kategorija C4)	$5{,}00 \times 2{,}5 = 12{,}5$ kN / m'
	$q_k = 12{,}5$ kN / m'

4.2. Proračun progiba

4.2.1. Progib u stadiju izvedbe

- U stadiju izvedbe progibu doprinose vlastita težina čeličnog profila i betonske ploče

$$\delta_0 = \frac{5}{384}\frac{g_{k1} \times L^4}{E_a \times I_a} = \frac{5}{384}\frac{\frac{8,06}{100} \times 1000^4}{21000 \times 16270} = 3,07 \text{ cm}$$

4.2.2. Progib spregnutog nosača (t=28 dana) od početka opterećivanja

- Progib od dodatnog stalnog djelovanja

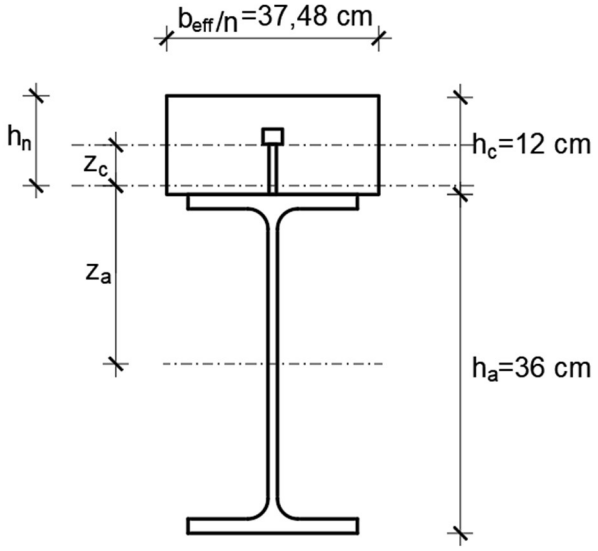
$$\delta_1 = \frac{5}{384}\frac{g_{k2} \times L^4}{E_a \times I_0}$$

- Zamjenski poprečni presjek za t=0, kratkotrajno opterećenje
  - omjer modula elastičnosti za kratkotrajna djelovanja

$$n_0 = \frac{E_a}{E_{cm}} = \frac{21000}{3147,6} = 6,67$$

  - proračunska širina betonske ploče

$$\frac{b_{eff}}{n_0} = \frac{250}{6,67} = 37,48 \text{ cm}$$



  - površina čeličnog profila i idealne betonske ploče te spregnutog poprečnog presjeka

$$A_{c,0} = \frac{b_{eff} \times h_c}{n_0} = \frac{250 \times 12}{6,67} = 449,78 \text{ cm}^2$$

$$A_a = 72,73 \text{ cm}^2$$

$$A_{i,0} = A_{c,0} + A_a = 449,78 + 72,73 = 522,51 \text{ cm}^2$$

- udaljenost elastične neutralne osi spregnutog poprečnog presjeka do gornjeg ruba betonske ploče

$$h_n = \frac{A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_c\right) + A_{c,0} \cdot \left(\frac{h_c}{2}\right)}{A_{i,0}} = \frac{72,73 \times \left(\frac{36}{2} + 12\right) + 449,78 \cdot \left(\frac{12}{2}\right)}{522,51} = 9,34 \text{ cm}$$

- udaljenosti težišta betonskog i čeličnog dijela poprečnog presjeka od težišta idealnog poprečnog presjeka

$$z_c = h_n - \frac{h_c}{2} = 9,34 - \frac{12}{2} = 3,34 \text{ cm}$$

$$z_a = \frac{h_a}{2} + h_c - h_n = \frac{36}{2} + 12 - 9,34 = 20,66 \text{ cm}$$

- moment tromosti idealnog poprečnog presjeka

$$I_0 = I_a + A_a \times z_a^2 + I_{c,0} + A_{c,0} \times z_c^2 = 16270 + 72,73 \times 20,66^2 + \frac{37,48 \times 12^3}{12} + 449,78 \times 3,34^2$$

$$I_0 = 16270 + 31044 + 5397 + 5018 = 57729 \text{ cm}^4$$

- Progib zbog dodatnog stalnog djelovanja

$$\delta_1 = \frac{5}{384} \frac{g_{k2} \times L^4}{E_a \times I_0} = \frac{5}{384} \frac{\frac{3,00}{100} \times 1000^4}{21000 \times 57729} = 0,32 \text{ cm}$$

- Progib zbog udjela promjenjivog djelovanja pri učestaloj kombinaciji

$$q_d = \psi_1 \times q_k = 0,7 \times 12,5 = 8,75 \text{ kN/m'}$$

$$\delta_{2,1} = \frac{5}{384} \frac{q_d \times L^4}{E_a \times I_0} = \frac{5}{384} \frac{\frac{8,75}{100} \times 1000^4}{21000 \times 57729} = 0,93 \text{ cm}$$

4.2.3. Progib spregnutog nosača zbog puzanja pod kvazistalnim djelovanjem (t = ∞ dana)

- Progib je razlika progiba u trenutku t = ∞ dana i pri prvom opterećenju t = 28 dana

$$q_d = g_{k,2} + \psi_2 \times q_k = 3,0 + 0,6 \times 12,5 = 10,5 \ \ kN/m'$$

$$\delta_{2,2} = \frac{5}{384}\frac{q_d \times L^4}{E_a \times I_L} - \frac{5}{384}\frac{q_d \times L^4}{E_a \times I_0}$$

- Zamjenski poprečni presjek za t = ∞, dugotrajno opterećenje
  - omjer modula elastičnosti za dugotrajna djelovanja

$$n_L = n_0 \times \left(1 + \psi_L \times \varphi\left(t, t_0\right)\right)$$

  - množitelj puzanja (za stalna opterećenja)

$$\psi_L = 1.1$$

  - koeficijent puzanja

$$\varphi\left(t, t_0\right) = \varphi_0 \times \beta_c\left(t, t_0\right)$$

- osnovna vrijednost koeficijenta puzanja

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \times \beta\left(f_{cm}\right) \times \beta\left(t_0\right)$$

- koeficijent koji uzima u obzir relativnu vlažnost zraka

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.10 \times \sqrt[3]{h_0}} \times \alpha_1\right] \times \alpha_2$$

  - Koeficijenti α_i

$$f_{cm} < 35\,MPa \ \rightarrow \ \alpha_i = 1$$

$$f_{cm} \geq 35\,MPa \ \rightarrow \ \alpha_i = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{ni} ; \ n_1 = 0.7; n_2 = 0.2; n_3 = 0.5$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1,0$$

Napomena: usvojena relativna vlažnost 50 %

  - Srednji polumjer presjeka

$$h_0 = \frac{2 \times A_c}{u} ; \ h_0 = \frac{2 \times \left(b \times h_c\right)}{2 \times b} = h_c = 120\,mm$$

- Opseg betonske ploče koji je u izravnom dodiru sa zrakom, *u*

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{50}{100}}{0.10 \times \sqrt[3]{120}} \times 1,0 \right] \times 1,0 = 2,014$$

- koeficijent kojim se uzima u obzir učinak čvrstoće betona

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16.8}{\sqrt{33}} = 2,925$$

- koeficijent koji uzima u obzir utjecaj starosti betona u trenutku početka djelovanja opterećenja (oplata se skida pri starosti betona od 28 dana, a skupljanje počinje pri starosti od 1 dan)

$$\beta(t_0) = \frac{1}{\left(0.1 + t_0^{0.20}\right)} = \frac{1}{\left(0.1 + 28^{0.20}\right)} = 0.488 \,;\; \beta(t_0) = \frac{1}{\left(0.1 + t_0^{0.20}\right)} = \frac{1}{\left(0.1 + 1^{0.20}\right)} = 0.909$$

- osnovna vrijednost koeficijenta puzanja

$\varphi_0 = 2,014 \times 2,925 \times 0,488 = 2,875$ (betonska ploča na čeličnom nosaču, *t* = 28 dana)

$\varphi_0 = 2,014 \times 2,925 \times 0,909 = 5,355$ (skupljanje, *t* = 1 dan)

- vremenska funkcija puzanja

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0.3}$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{\infty - 28}{430 + \infty - 28} \right)^{0.3} = 1.00$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{\infty - 1}{430 + \infty - 1} \right)^{0.3} = 1.00$$

- Koeficijent ovisan o relativnoj vlažnosti i h_0

$$\beta_H = 1.5 \times \left[1 + (0.012 \times RH)^{18} \right] \times h_0 + 250 \times \alpha_3 \le 1500 \times \alpha_3$$

$$\beta_H = 1,5 \times \left[1 + (0,012 \times 50)^{18} \right] \times 120 + 250 \times 1,0 \le 1500 \times 1,0$$

$$\beta_H = 430,0 < 1500$$

- koeficijent puzanja

$\varphi(\infty, t_0 = 28 \text{ dana}) = 2,875 \times 1,00 = 2,875$ (betonska ploča na čeličnom nosaču)

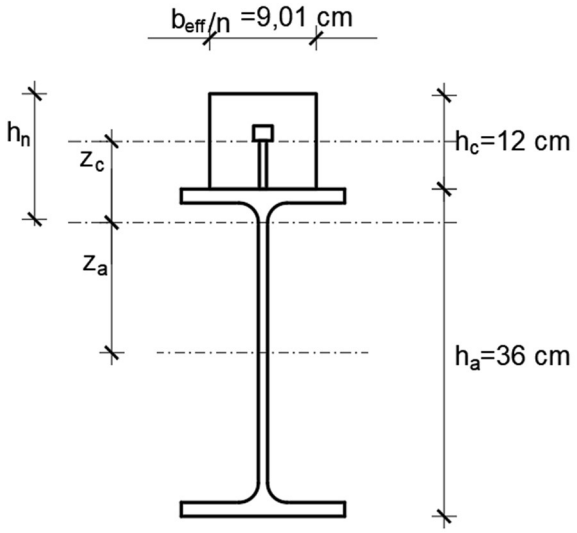
$\varphi(\infty, t_0 = 1 \text{ dan}) = 5,355 \times 1,00 = 5,355$ (skupljanje)

- omjer modula elastičnosti za dugotrajna djelovanja

$$n_L = n_0 \times \left(1 + \psi_L \times \varphi\left(\infty, t_0 = 28 \text{ dana}\right)\right) = 6,67 \times \left(1 + 1,1 \times 2,875\right) = 27,76$$

- proračunska širina betonske ploče

$$\frac{b_{eff}}{n_L} = \frac{250}{27,76} = 9,01 \text{ cm}$$



- površina čeličnog profila i idealne betonske ploče te spregnutog poprečnog presjeka

$$A_{c,L} = \frac{b_{eff} \times h_c}{n_L} = \frac{250 \times 12}{27,76} = 108,07 \text{ cm}^2$$

$$A_a = 72,73 \text{ cm}^2$$

$$A_{i,L} = A_{c,L} + A_a = 108,07 + 72,73 = 180,80 \text{ cm}^2$$

- udaljenost elastične neutralne osi spregnutog poprečnog presjeka do gornjeg ruba betonske ploče

$$h_n = \frac{A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_c\right) + A_{c,0} \cdot \left(\frac{h_c}{2}\right)}{A_{i,0}} = \frac{72,73 \times \left(\frac{36}{2} + 12\right) + 108,07 \cdot \left(\frac{12}{2}\right)}{180,80} = 15,65 \text{ cm}$$

- udaljenosti težišta betonskog i čeličnog dijela poprečnog presjeka od težišta idealnog poprečnog presjeka

$$z_c = h_n - \frac{h_c}{2} = 15,65 - \frac{12}{2} = 9,65 \text{ cm}$$

$$z_a = \frac{h_a}{2} + h_c - h_n = \frac{36}{2} + 12 - 15,65 = 14,35 \text{ cm}$$

- moment tromosti idealnog poprečnog presjeka

$$I_L = I_a + A_a \times z_a^2 + I_{c,L} + A_{c,0} \times z_c^2 = 16270 + 72,73 \times 14,35^2 + \frac{9,01 \times 12^3}{12} + 108,07 \times 9,65^2$$

$$I_L = 16270 + 14977 + 1297 + 10064 = 42608 \text{ cm}^4$$

- Progib

$$\delta_{2,2} = \frac{5}{384}\frac{q_d \times L^4}{E_a \times I_L} - \frac{5}{384}\frac{q_d \times L^4}{E_a \times I_0} = \frac{5}{384}\frac{\frac{10,5}{100} \times 1000^4}{21000 \times 42608} - \frac{5}{384}\frac{\frac{10,5}{100} \times 1000^4}{21000 \times 57729}$$

$$\delta_{2,2} = 1,53 - 1,13 = 0,4 \text{ cm}$$

4.2.4. Progib spregnutog nosača zbog skupljanja

$$\delta_{2,3} = \frac{1}{8}\frac{M_{cs} \times L^2}{E_a \times I_S}$$

- Zamjenski poprečni presjek za t = ∞, primarno i sekundarno naprezanje zbog skupljanja

- omjer modula elastičnosti za dugotrajna djelovanja

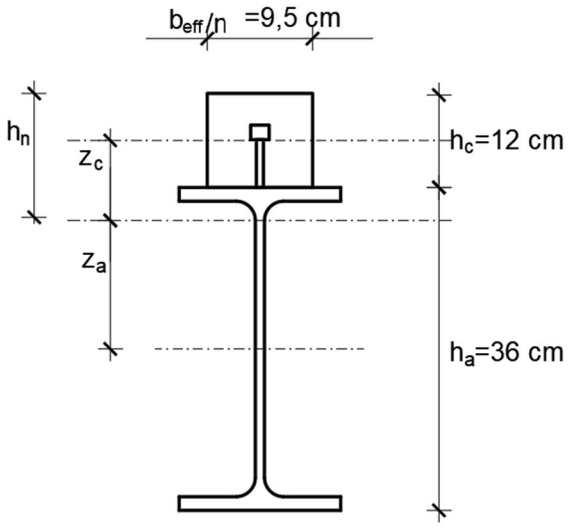
$$n_L = n_0 \times \left(1 + \psi_L \times \varphi\left(\infty, t_0 = 1 \text{ dan}\right)\right) \rightarrow n_L = 6,67 \times \left(1 + 0,55 \times 5,355\right) = 26,31$$

- množitelj puzanja (za primarne i sekundarne učinke od skupljanja)

$$\psi_L = 0,55$$

- proračunska širina betonske ploče

$$\frac{b_{eff}}{n_L} = \frac{250}{26,31} = 9,5 \text{ cm}$$



- površina čeličnog profila i idealne betonske ploče te spregnutog poprečnog presjeka

$$A_{c,L} = \frac{b_{eff} \times h_c}{n_L} = \frac{250 \times 12}{26,31} = 114,03 \text{ cm}^2$$

$$A_a = 72,73 \text{ cm}^2$$

$$A_{i,L} = A_{c,L} + A_a = 114,03 + 72,73 = 186,76 \text{ cm}^2$$

- udaljenost elastične neutralne osi spregnutog poprečnog presjeka do gornjeg ruba betonske ploče

$$h_n = \frac{A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_c\right) + A_{c,0} \cdot \left(\frac{h_c}{2}\right)}{A_{i,0}} = \frac{72,73 \times \left(\frac{36}{2} + 12\right) + 114,03 \cdot \left(\frac{12}{2}\right)}{186,76} = 15,35 \text{ cm}$$

- udaljenosti težišta betonskog i čeličnog dijela poprečnog presjeka od težišta idealnog poprečnog presjeka

$$z_c = h_n - \frac{h_c}{2} = 15,35 - \frac{12}{2} = 9,35 \text{ cm}$$

$$z_a = \frac{h_a}{2} + h_c - \frac{h_n}{2} = \frac{36}{2} + 12 - 15,35 = 14,65 \text{ cm}$$

- moment tromosti idealnog poprečnog presjeka

$$I_S = I_a + A_a \times z_a^2 + I_{c,L} + A_{c,0} \times z_c^2 = 16270 + 72,73 \times 14,65^2 + \frac{9,5 \times 12^3}{12} + 114,03 \times 9,35^2$$

$$I_S = 16270 + 15610 + 1368 + 9969 = 43217 \text{ cm}^4$$

- moment savijanja zbog tlačne sile od skupljanja

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot z_c \; ; \; N_{cs} = \varepsilon(\infty) \times E_a \times A_{c,L}$$

- deformacija zbog skupljanja

$$\varepsilon_{cs}(t,t_0) = \varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t,t_0)$$

- autogeno skupljanje

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \times \varepsilon_{ca}(\infty) \qquad \varepsilon_{ca}(t) = 1 \times 0,000375 = 0,0000375$$
$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \times (f_{ck} - 10) \times 10^{-6} = 2,5 \times (25 - 10) \times 10^{-6} = 0.0000375$$
$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp\left(-0.2 \times t^{0.5}\right) = 1 - \exp\left(-0.2 \times \infty^{0.5}\right) = 1$$

- skupljanje zbog sušenja

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t,t_s) \times k_h \times \varepsilon_{cd,0}$$

  - Nominalna vrijednost slobodnog skupljanja zbog sušenja

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \times \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp\left(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH}$$

  - Koeficijent relativne vlažnosti

$$\beta_{RH} = 1,55 \times \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] = 1,55 \times \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] = 1,356$$

  Napomena: usvojena relativna vlažnost 50 %

  - Referentna vrijednost srednje tlačne čvrstoće

$$f_{cmo} = 10\,\text{MPa}$$

  - Koeficijenti brzine očvršćivanja cementa

$$\alpha_{ds1} = 4 \rightarrow \text{N}$$
$$\alpha_{ds2} = 0.12 \rightarrow \text{N}$$

  - Nominalna vrijednost slobodnog skupljanja zbog sušenja

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \times \left[(220 + 110 \times 4) \times \exp\left(-0,12 \times \frac{33}{10} \right) \right] \times 10^{-6} \times 1,356 = 0,000512$$

  - Koeficijent k_h

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$$\rightarrow k_h = 1,0 - \frac{0,15}{200-100} \times (120-100) = 0,97$$

- Funkcija tijeka isušivanja betona

$$\beta_{ds}(t,t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0.04\times\sqrt{h_0^3}} = \frac{(\infty-1)}{(\infty-1)+0.04\times\sqrt{120^3}} = 1.0$$

- skupljanje zbog sušenja

$$\varepsilon_{cd}(t) = 1,0 \times 0,97 \times 0,000512 = 0,000497$$

- ukupna deformacija zbog skupljanja

$$\varepsilon_{cs}(t,t_0) = 0,0000375 + 0,000497 = 0,000534 = 0,534‰$$

- moment savijanja zbog tlačne sile od skupljanja

$$N_{cs} = 0,000534 \times 21000 \times 114,03 = 1278,73 \text{ kN}$$
$$M_{cs} = 1278,73 \times 9,35 = 11956 \text{ kNcm}$$

- Progib

$$\delta_{2,3} = \frac{1}{8}\frac{M_{cs}\times L^2}{E_a \times I_S} = \frac{1}{8}\frac{11956\times 1000^2}{21000\times 43217} = 1,65 \text{ cm}$$

4.3. Ograničenja progiba

- Stropovi

$$\delta_{ukupno} \le \frac{L}{250}$$

$$\delta_{promjenjivo} \le \frac{L}{300}$$

4.4. Kriteriji progiba i nadvišenje

- Ukupni progib

$$\delta_{ukupno} \leq \frac{L}{250}$$

$$\delta_0 + \delta_1 + \delta_{2,1} + \delta_{2,2} + \delta_{2,3} \leq \frac{L}{250} \quad \rightarrow \text{ne zadovoljava}$$

$$3,07 + 0,32 + 0,93 + 0,40 + 1,65 = 6,37 \text{ cm} > \frac{1000}{250} = 4 \text{ cm}$$

- Progib zbog promjenjivog djelovanja

$$\delta_{promjenjivo} \leq \frac{L}{300}$$

$$\delta_{2,1} + \delta_{2,2} + \delta_{2,3} \leq \frac{L}{300} \quad \rightarrow \text{zadovoljava}$$

$$0,93 + 0,40 + 1,65 = 2,98 \text{ cm} < \frac{1000}{300} = 3,33 \text{ cm}$$

- Nadvišenje čeličnog profila

$$\delta_p = \delta_0 = 3,07 \text{ cm}$$

$$\delta_1 + \delta_{2,1} + \delta_{2,2} + \delta_{2,3} \leq \frac{L}{250}$$

$$0,32 + 0,93 + 0,40 + 1,65 = 3,3 \text{ cm} < \frac{1000}{250} = 4 \text{ cm}$$

4.5. Dokaz vibracija

- Za proračun vibracija za progib uzima se vlastita težina za spregnuto stanje i krutost na savijanje za kratkotrajno opterećenje

$$\delta_1 = 0,32 \text{ cm} = 3,2 \text{ mm}$$

$$f = \frac{18}{\sqrt{\delta}} = \frac{18}{\sqrt{3,2}} = 10,06 \text{ Hz} \geq 4 \text{ Hz}$$

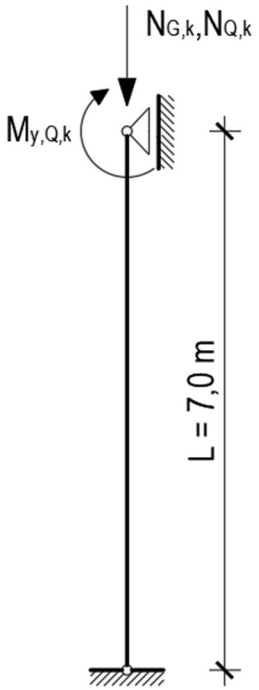
4.6. Pukotine

- Ne zahtijeva se kontrola širine pukotina jer je ploča u tlaku.
- Preporučeno je korištenje uzdužne armature u vlačnoj zoni ploče unutar njezine proračunske širine u iznosu najmanje 0,4 % površine betona.

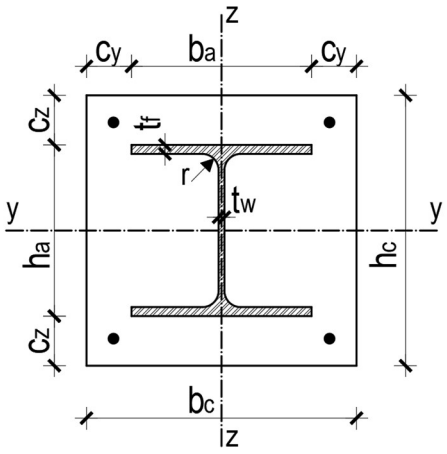
21 Primjer - proračun spregnutog stupa prema HRN EN 1994-1-1

1. Osnovni podatci

1.1. Statički sustav



1.2. Poprečni presjek spregnutog stupa i geometrijska svojstva čeličnog profila



HEB 260

- površina poprečnog presjeka:	A_a = 118,40 cm^2
- težina profila	G = 93,0 kg/m'
- visina presjeka:	h_a = 260 mm
- širina pojasnice:	b_a = 260 mm
- debljina pojasnice:	t_f = 17,5 mm
- debljina hrpta:	t_w = 10,0 mm
- radijus zaobljenja:	r = 24,0 mm
- momenti tromosti:	I_y = 14 920 cm^4
	I_z = 5 135 cm^4
- momenti otpora:	$W_{el,y}$ = 1 148 cm^3
	$W_{el,z}$ = 395,0 cm^3
	$W_{pl,y}$ = 1 283 cm^3
	$W_{pl,z}$ = 602,2 cm^3
- torzijska konstanta:	I_t = 123,80 cm^4
- konstanta krivljenja:	I_w = 753 700 cm^6

ARMATURA

- promjer šipki	d = 12 mm
- površina armature	A_s = 4,52 cm^2

BETON

- širina betonskog presjeka	b_c = 40,0 cm
- visina betonskog presjeka	h_c = 40,0 cm
- zaštitni sloj betona	$c_y = c_z$ = 7,0 cm

1.3. Materijali

Konstrukcijski čelik

- Kvaliteta

  S 355

- Mehanička svojstva

  t_{max} = 17,5 mm < 40 mm
  - f_y = 355 N/mm^2
  - f_u = 510 N/mm^2

  E = 210 000 MPa

Beton

- Razred čvrstoće

  C25/30

- Cement

  klasa N (normalan prirast ranih čvrstoća)

- Mehanička svojstva

  f_{ck} = 25 MPa

  $f_{cm} = f_{ck} + 8\ (\text{MPa}) = 25 + 8 = 33$ MPa

  $E_{cm} = 22 \times \left[(f_{ck} + 8) / 10 \right]^{0.3}$

  $E_{cm} = 22 \times \left[(25 + 8) / 10 \right]^{0.3} = 31.476$ GPa

Armaturni čelik

- Kvaliteta

  S 500

- Mehanička svojstva

  f_{sk} = 500 MPa

  $E_s = E_a$ = 210000 MPa

1.4. Djelovanja

Stalno djelovanje

- koncentrirana sila $N_{G,k}$ = 880 kN

Promjenjivo djelovanje

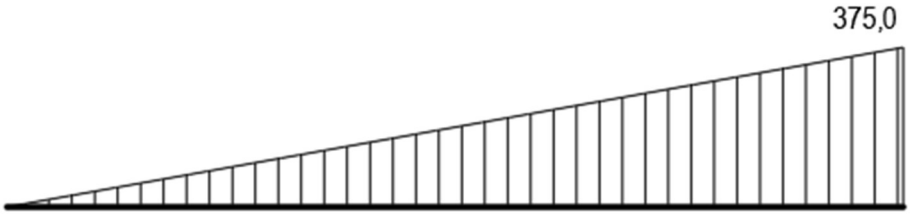
- koncentrirana sila $N_{Q,k}$ = 400 kN
- koncentrirani moment $M_{Q,k}$ = 250 kNm

Proračunsko djelovanje

$$N_{Ed} = \gamma_G \times N_{G,k} + \gamma_Q \times N_{Q,k} = 1,35 \times 880 + 1,5 \times 400 = 1788 \text{ kN}; \quad M_{y,Ed} = \gamma_Q \times M_{Q,k} = 1,5 \times 250 = 375 \text{ kN}$$

Proračunske rezne sile i momenti savijanja

Dijagram momenata savijanja, $\mathbf{M_{y,Ed}}$ [kNm]



Dijagram poprečnih sila, $\mathbf{V_{z,Ed}}$ [kN]



Dijagram uzdužnih sila, $\mathbf{N_{Ed}}$ [kN]



2. Provjera općih uvjeta za primjenu pravila proračuna u EN 1994-1-1

- Površina uzdužne armature ne smije biti manja od 0,3 % površine betona

$$A_s \geq 0{,}003 \cdot A_c \rightarrow 4{,}52\ cm^2 > 0{,}003 \cdot 1477{,}1 = 4{,}43\ cm^2$$

$$A_s = 4{,}52\ cm^2$$

$$A_c = b_c \cdot h_c - A_a - A_s = 40{,}0 \cdot 40{,}0 - 118{,}4 - 4{,}52 = 1477{,}1\ cm^2$$

  - uvjet ispunjen

- Udio čelika u nosivosti spregnutog poprečnog presjeka treba biti unutar propisanih granica

$$0{,}2 \leq \delta \leq 0{,}9 \rightarrow 0{,}2 < 0{,}65 < 0{,}9$$

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \rightarrow \delta = \frac{118{,}40 \cdot 35{,}5}{6492{,}25} = 0{,}65$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_{yk} \cdot A_a}{\gamma_a} + \frac{0{,}85 \cdot f_{ck} \cdot A_c}{\gamma_c} + \frac{f_{sk} \cdot A_s}{\gamma_s} = \frac{35{,}5 \cdot 118{,}40}{1{,}0} + \frac{0{,}85 \cdot 2{,}5 \cdot 1477{,}08}{1{,}5} + \frac{50 \cdot 4{,}52}{1{,}15} = 6492{,}25\ \text{kN}$$

  - uvjet ispunjen

3. Provjera uvjeta za pojednostavnjenu metodu proračuna

- Poprečni presjek mora biti jednolik čitavom duljinom te simetričan oko obje osi

- uvjet ispunjen

- Debljina zaštitnog sloja betona oko čeličnog profila treba biti manja od

$$\begin{matrix} c_{z,\max} = 0,3 \cdot h = 0,3 \cdot 40,0 = 12,0\ cm \\ c_{y,\max} = 0,4 \cdot b = 0,4 \cdot 40,0 = 16,0\ cm \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} c_z = 7,0\ cm < c_{z,\max} = 12,0\ cm \\ c_y = 7,0\ cm < c_{y,\max} = 16,0\ cm \end{matrix}$$

- uvjet ispunjen

- Površina uzdužne armature koja se može usvojiti za proračun otpornosti spregnutog stupa ne smije biti veća od 6 % površine betona

$$A_s \le 0,06 \cdot A_c \rightarrow 4,52\ cm^2 < 0,06 \cdot 1477,1 = 88,62\ cm^2$$

$$A_s = 4,52\ cm^2$$
$$A_c = b_c \cdot h_c - A_a - A_s = 40,0 \cdot 40,0 - 118,4 - 4,52 = 1477,1\ cm^2$$

- uvjet ispunjen

- Omjer visine i širine poprečnog presjeka

$$0,2 \le \frac{h_c}{b_c} \le 5,0 \rightarrow 0,2 < 1,0 < 5,0$$

$$\frac{h_c}{b_c} = \frac{40}{40} = 1,0$$

- uvjet ispunjen

- Bezdimenzijska vitkost treba biti manja od 2,0

- uvjet će biti provjeren prilikom provjere izvijanja.

4. Razredba poprečnog presjeka (izbočivanje)

- Kod betonom potpuno obloženih čeličnih profila može se zanemariti mogućnost izbočivanja ako je zaštitni sloj čelične pojasnice veći od 40 mm i 1/6 širine čelične pojasnice

$$\begin{matrix} c_z = c_y \ge 40\ mm \\ c_z = c_y \ge \frac{b_a}{6} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} 70\ mm > 40\ mm \\ 70\ mm > \frac{260}{6} = 43,33\ mm \end{matrix}$$

- uvjet ispunjen.

5. Otpornost poprečnog presjeka na tlak

- Proračunska plastična otpornost spregnutog poprečnog presjeka

  $N_{pl,Rd}$=6492,25 kN

- Uvjet nosivosti

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \le 1,0 \; ; \quad \frac{1788,0}{6492,25} = 0,28 < 1,0$$

6. Otpornost poprečnog presjeka na poprečnu silu

- Proračunska plastična otpornost na poprečnu silu

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \rightarrow V_{pl,Rd} = \frac{37,59 \cdot 35,5}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 770,44\ kN$$

  – posmična površina (valjani profil, I i H, opterećenje paralelno s hrptom)

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + \left(t_w + 2 \cdot r\right) \cdot t_f \ge \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_V = 118,4 - 2 \cdot 26 \cdot 1,75 + (1,0 + 2 \cdot 2,4) \cdot 1,75 = 37,59\ cm^2 > 1,20 \cdot \left(26 - 2 \cdot 1,75\right) \cdot 1,0 = 27,0\,cm^2$$

$$A_V = 37,59\,cm^2$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \le 1,0$$

$\frac{53,57}{770,44} = 0,07 < 1,0 \rightarrow$ nema potrebe za provjerom zajedničkog djelovanja M-V jer je 0,07 < 0,5

7. Otpornost elementa izloženog osnom tlaku

7.1. Proračunski modul elastičnosti betona

- Ako je opterećenje stupa dugotrajno, uzima se u obzir skupljanje i puzanje betona za određivanje proračunske elastične krutosti na savijanje, što znači da modul elastičnosti betona E_{cm} treba smanjiti na vrijednost $E_{c,eff}$ prema sljedećem izrazu:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \cdot \varphi_t}$$

- Proračunska uzdužna sila zbog stalnog opterećenja

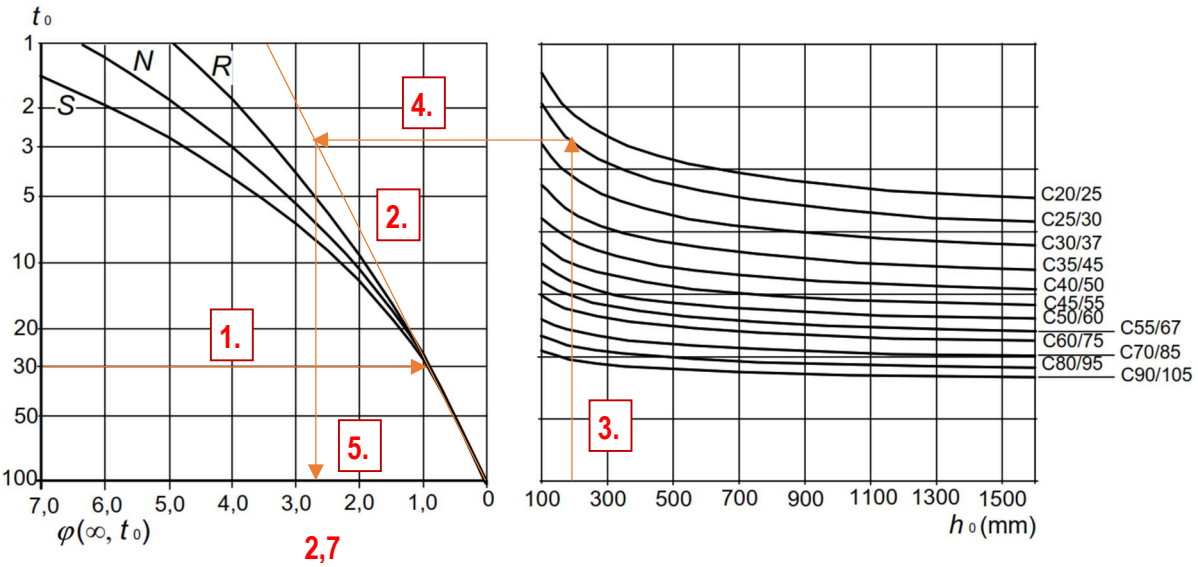
$$N_{G,Ed} = \gamma_G \cdot N_{G,k} = 1{,}35 \cdot 880 = 1188 \ kN$$

- Koeficijent puzanja

$\varphi(t, t_0) \rightarrow$ očitanje vrijednosti koeficijenta pomoću nomograma

- relativna vlažnost zraka 50 % (beton unutar građevine)
- t_0 = 30 dana
- srednji polumjer presjeka $\rightarrow h_0 = \frac{2 \times A_c}{u}$; $h_0 = \frac{2 \times A_c}{2 \times (b_c + h_c)} = \frac{2 \times 147710}{2 \times (400 + 400)} = 184{,}6$ mm
- beton C 25/30
- vrsta cementa N, klase čvrstoće 32,5R i 42,5N

Napomena: unutar dijagrama, S se odnosi na cemente klase čvrstoće 32,5N, N se odnosi na cemente klase čvrstoće 32,5R i 42,5N, a R na 42,5R, 52,5N i 52,5R.



$$\rightarrow \varphi(t,t_0) = 2,7$$

$$\rightarrow E_{c,eff} = \frac{3147,6}{1+\frac{1188}{1788}\cdot 2,7} = 1126,6\ kN/cm^2$$

7.2. Otpornost na izvijanje

- Bezdimenzijska vitkost

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$$

– karakteristična plastična otpornost spregnutog poprečnog presjeka na tlak

$$N_{pl,Rk} = f_{yk}\cdot A_a + 0,85\cdot f_{ck}\cdot A_c + f_{sk}\cdot A_s = 35,5\cdot 118,40 + 0,85\cdot 2,5\cdot 1477,08 + 50\cdot 4,52 = 7568\ kN$$

– Eulerova elastična kritična sila izvijanja

$$N_{cr} = \frac{\pi^2\cdot(E\cdot I)_{eff}}{L_{cr}^2} \rightarrow \begin{matrix} N_{cr,y} = \frac{\pi^2\cdot 472158144}{700^2} = 9510\ kN \\ N_{cr,z} = \frac{\pi^2\cdot 273587413}{700^2} = 5510\ kN \end{matrix}$$

o duljine izvijanja

$L_{cr,y} = 700\ cm$; $L_{cr,z} = 700\ cm$

o proračunska krutost na savijanje spregnutog stupa

$$(EI)_{eff,y} = E_a\cdot I_{y,a} + + E_s\cdot I_{y,s} + K_e\cdot E_{c,eff}\cdot I_{y,c}$$
$$(EI)_{eff,z} = E_a\cdot I_{z,a} + + E_s\cdot I_{z,s} + K_e\cdot E_{c,eff}\cdot I_{z,c}$$

$$\rightarrow \begin{matrix} (EI)_{eff,y} = 21000\cdot 14920 + 21000\cdot 1231 + 0,6\cdot 1126,6\cdot 197182 = 472\,158\,144\ kNcm^2 \\ (EI)_{eff,z} = 21000\cdot 5135 + 21000\cdot 1231 + 0,6\cdot 1126,6\cdot 206967 = 273\,587\,413\ kNcm^2 \end{matrix}$$

o moment tromosti

$$I_{y,s} = I_{z,s} = 4\cdot A^1{}_s\cdot\left(\frac{h_c}{2} - c_{nom}\right)^2 = 4\cdot 1,13\cdot\left(\frac{40}{2} - 3,5\right)^2 = 1231\,cm^4$$

$$I_{y,c} = \frac{b_c \cdot h_c^3}{12} - I_{y,a} - I_{y,s} = \frac{40 \cdot 40^3}{12} - 14920 - 1231 = 197182\ cm^4$$

$$I_{z,c} = \frac{h_c \cdot b_c^3}{12} - I_{z,a} - I_{z,s} = \frac{40 \cdot 40^3}{12} - 5135 - 1231 = 206967\ cm^4$$

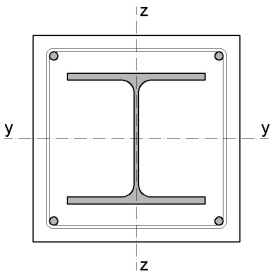
- faktor korekcije $K_e = 0,6$, kojim se uzima u obzir ispucanost betona

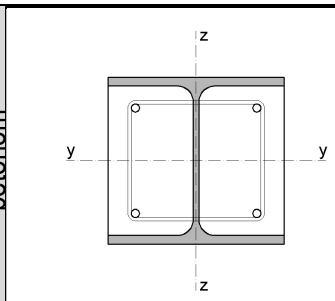
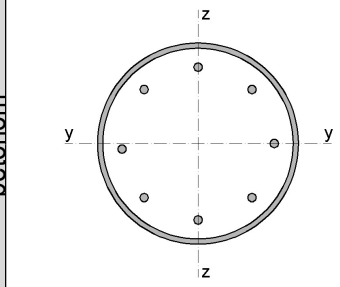
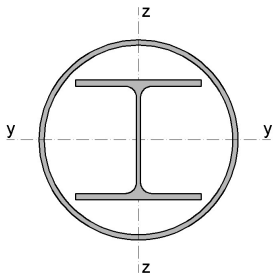
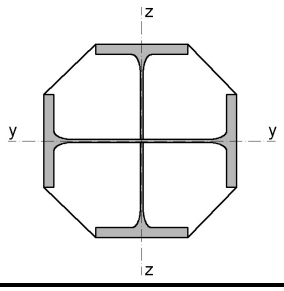
– bezdimenzijska vitkost

$$\overline{\lambda}_y = \sqrt{\frac{7568}{9510}} = 0,892 < 2,0 \rightarrow \text{uvjet za pojednostavnjenu metodu ispunjen}$$

$$\overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{7568}{5510}} = 1,172 < 2,0 \rightarrow \text{uvjet za pojednostavnjenu metodu ispunjen}$$

– odabir mjerodavne krivulje izvijanja

Poprečni presjek		Os izvijanja	Linija izvijanja	Ekvivalentna geometrijska nesavršenost e_0
Potpuno ubetonirani čelični profil		y - y	b	$\frac{L}{200}$
		z - z	c	$\frac{L}{150}$

Čelični profil djelomično obložen betonom		y - y		b	$L/200$
		z - z		c	$L/150$
Okrugli i pravokutni cijevni profili ispunjeni betonom		bilo koja	$\rho_s \leq 3\%$	a	$L/300$
			$3\% < \rho_s \leq 6\%$	b	$L/200$
Okrugli cijevni profili s ubetoniranim I-profilom		bilo koja		b	$L/200$
Križni I profil djelomično obložen betonom		bilo koja		b	$L/200$

- potpuno ubetoniran čelični profil

→ izvijanje oko osi *y-y*: krivulja *b* → $\alpha_y = 0{,}34$

→ izvijanje oko osi *z-z*: krivulja *c* → $\alpha_z = 0{,}49$

– pomoćna veličina

$$\Phi_y = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_y \cdot \left(\overline{\lambda_y} - 0{,}2\right) + \overline{\lambda}_y^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}34 \cdot (0{,}892 - 0{,}2) + 0{,}892^2\right] = 1{,}015$$

$$\Phi_z = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot \left(\overline{\lambda_z} - 0{,}2\right) + \overline{\lambda}_z^2\right] = 0{,}5 \cdot \left[1 + 0{,}49 \cdot (1{,}172 - 0{,}2) + 1{,}172^2\right] = 1{,}425$$

- Faktor smanjenja

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1{,}015 + \sqrt{1{,}015^2 - 0{,}892^2}} = 0{,}667 < 1{,}0$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1{,}425 + \sqrt{1{,}425^2 - 1{,}172^2}} = 0{,}447 < 1{,}0$$

- Mjerodavni faktor smanjenja

$$\chi = MIN\left(\chi_y ; \chi_z\right) = MIN\left(0{,}667; 0{,}447\right) = 0{,}447$$

- Proračunska otpornost elementa na izvijanje

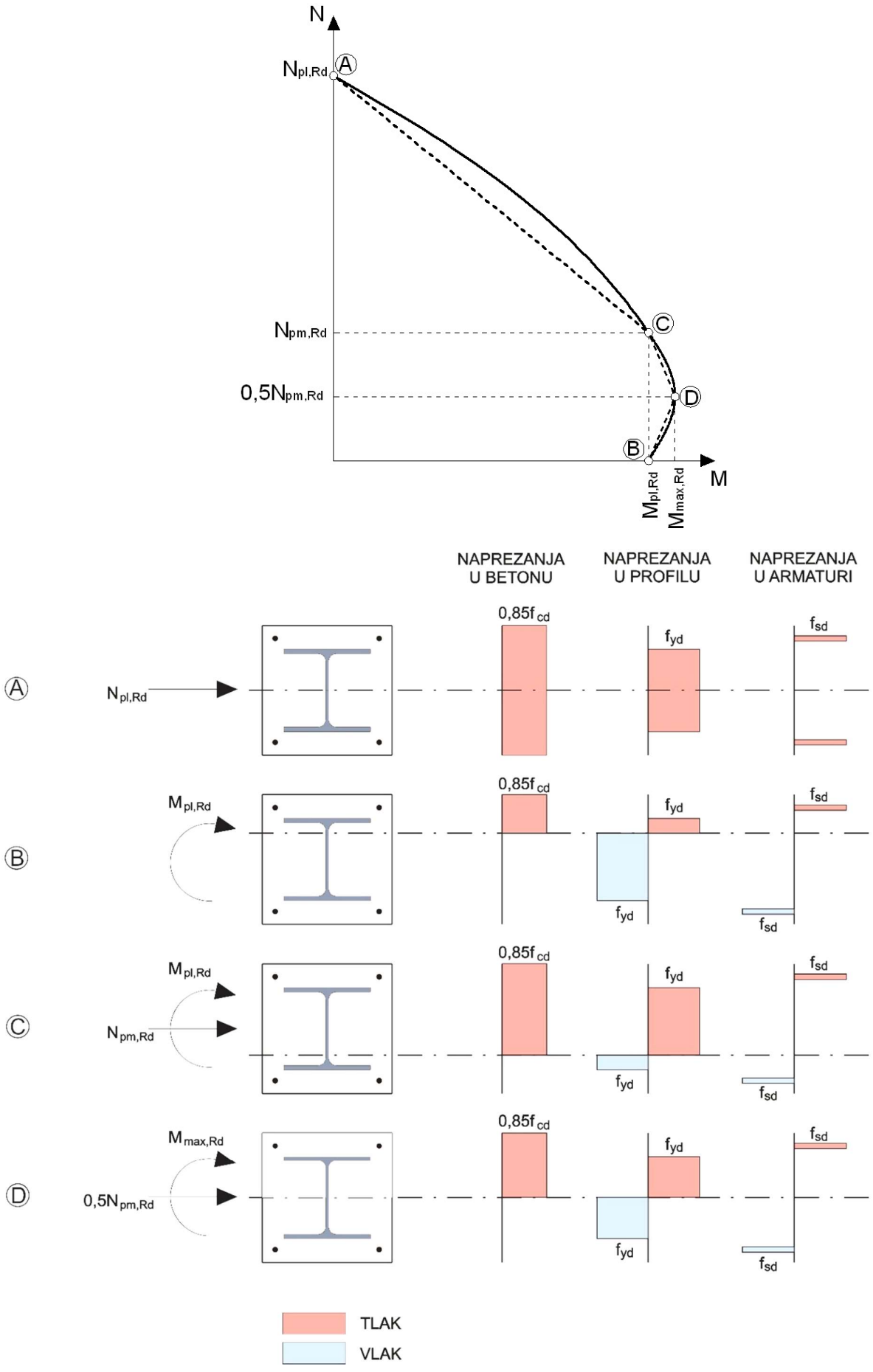
$$N_{b,Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd} = 0{,}447 \cdot 6492{,}25 = 2904\ kN$$

- Uvjet nosivosti

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1{,}0\ ; \quad \frac{1788}{2904} = 0{,}62 < 1{,}0$$

8. Otpornost elementa izloženog tlaku i jednoosnom savijanju

- Otpornost spregnutog poprečnog presjeka na zajedničko djelovanje tlaka i jednoosnog savijanja određuje se pomoću interakcije krivulje, odnosno interakcijskog poligona ACDB, u skladu s HRN EN 1994-1-1.
- Kako bi se odredile vrijednosti u točkama A, C, D i E, potrebno je odrediti otpornosti poprečnog presjeka u pripadnom stanju naprezanja.


N
$N_{pl,Rd}$
A
$N_{pm,Rd}$
$0,5N_{pm,Rd}$
C
D
B
M
$M_{pl,Rd}$
$M_{max,Rd}$
NAPREZANJA U BETONU
NAPREZANJA U PROFILU
NAPREZANJA U ARMATURI
A
$N_{pl,Rd}$
B
$M_{pl,Rd}$
C
$M_{pl,Rd}$
$N_{pm,Rd}$
D
$M_{max,Rd}$
$0,5N_{pm,Rd}$
$0,85f_{cd}$
f_{yd}
f_{sd}
TLAK
VLAK

8.1. Točka A

- Proračunska otpornost odgovara sumi pojedinačnih doprinosa sastavnica poprečnog presjeka:

$$N_{pl,Rd}=\frac{f_{yk}\cdot A_a}{\gamma_a}+\frac{0,85\cdot f_{ck}\cdot A_c}{\gamma_c}+\frac{f_{sk}\cdot A_s}{\gamma_s}=\frac{35,5\cdot 118,40}{1,0}+\frac{0,85\cdot 2,5\cdot 1477,08}{1,5}+\frac{50\cdot 4,52}{1,15}=6492,25\ \text{kN}$$

8.2. Točka D

- Proračunska plastična otpornost na najveći moment savijanja odgovara raspodjeli naprezanja:

$$M_{\max,y,Rd}=M_{pl,y,a,Rd}+M_{pl,y,c,Rd}+M_{pl,y,s,Rd}\rightarrow M_{\max,y,Rd}=W_{pl,y,a}\cdot f_{yd}+0,5\cdot W_{pl,y,c}\cdot 0,85\cdot f_{cd}+W_{pl,y,s}\cdot f_{sd}$$

  - plastični moment otpora

$$W_{pl,y,s}=\sum_i A_{s,i}\cdot z_i=4\cdot 1,13\cdot 16,5=74,58\ cm^3$$

$$W_{pl,y,c}=\frac{b_c\cdot h_c^2}{4}-W_{pl,y,a}-W_{pl,y,s}=\frac{40\cdot 40^2}{4}-1283-74,58=14642\ cm^3$$

$$\rightarrow M_{\max,y,Rd}=1283\cdot 35,5+0,5\cdot 14642\cdot 0,85\cdot 1,67+74,58\cdot 43,48=59181\ kNcm=592\ kNm$$

- Proračunska plastična otpornost betona na tlak:

$$N_{pm,Rd}=\frac{0,85\cdot f_{ck}\cdot A_c}{\gamma_c}=\frac{0,85\cdot 2,5\cdot 1477,08}{1,5}=2092,53\ \text{kN}$$

- Uzdužna sila u točki pri najvećem momentu savijanja:

$$0,5\cdot N_{pm,Rd}=0,5\cdot 2092,53=1046,26\ \text{kN}$$

8.3. Točka C

- Proračunska plastična otpornost na moment savijanja odgovara raspodjeli naprezanja prema položaju plastične neutralne osi:

  - položaj plastične neutralne osi (pretpostavlja se da je plastična neutralna os u hrptu čeličnog profila, bez uzdužne sile)

$$h_n=\frac{N_{pm,Rd}-A_{s,n}\cdot(2\cdot f_{sd}-0,85\cdot f_{cd})}{2\cdot b_c\cdot 0,85\cdot f_{cd}+2\cdot t_w\cdot(2\cdot f_{yd}-0,85\cdot f_{cd})}\rightarrow$$

$$h_n=\frac{2092,53}{2\cdot 40\cdot 0,85\cdot 1,67+2\cdot 1,0\cdot(2\cdot 35,5-0,85\cdot 1,67)}=8,28\ cm=82,8\ mm$$

– površina armature unutar h_n

$$A_{s,n} = 0\ cm^2$$

– provjera pretpostavki

$$h_n \le \frac{h_a}{2} - t_f \rightarrow 82{,}8 < \frac{260}{2} - 17{,}5 = 112{,}5$$

$\rightarrow$ plastična neutralna os unutar hrpta i površina armature unutar središnjeg dijela presjeka $2h_n$ jednaka je 0 cm^2.

– plastični moment otpora unutar područja $2h_n$

$$W_{pl,y,a,n} = t_w \cdot h_n^2 = 1{,}0 \cdot 8{,}28^2 = 68{,}56\ cm^3$$
$$W_{pl,y,s,n} = 0\ cm^3$$
$$W_{pl,y,c,n} = b_c \cdot h_n^2 - W_{pl,y,a,n} - W_{pl,y,s,n} = 40 \cdot 8{,}28^2 - 68{,}56 - 0 = 2674\ cm^3$$

- Plastična otpornost na savijanje

$$M_{pl,y,Rd} = M_{\max,y,Rd} - M_{n,y,Rd} \rightarrow M_{pl,y,Rd} = M_{\max,y,Rd} - \left(W_{pl,y,a,n} \cdot f_{yd} + W_{pl,y,s,n} \cdot f_{sd} + \frac{W_{pl,y,c,n} \cdot f_{cd}}{2} \right)$$

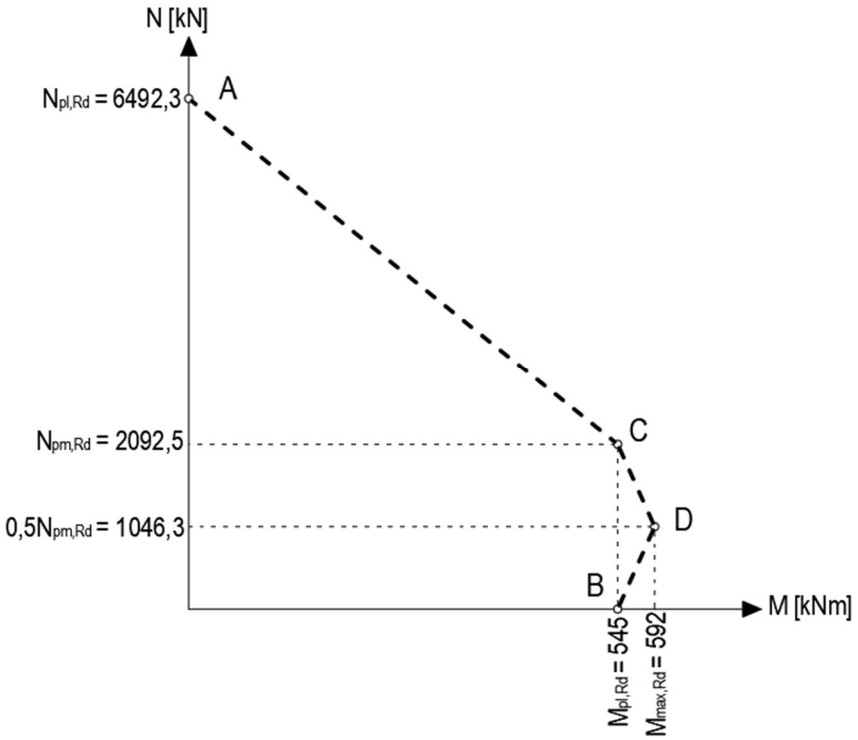
$$M_{pl,y,Rd} = 59181 - \left(68{,}56 \cdot 35{,}5 + \frac{2674 \cdot 1{,}67}{2} \right) = 54515\ kNcm = 545\ kNm$$

8.4. Točka B

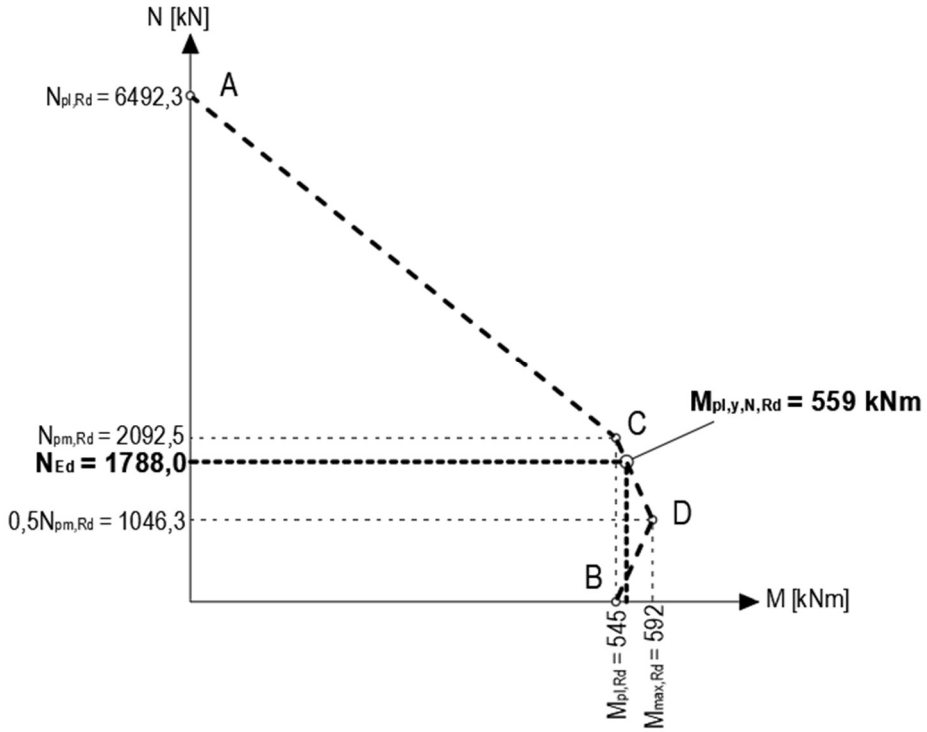
- Vrijednost otpornosti na savijanje odgovara vrijednosti otpornosti na savijanje u točki C

$$M_{pl,y,Rd} = 545\ kNm$$

8.5. Interakcijski poligon



- Na poligon se nanosi vrijednost uzdužne sile u stupu kako bi se očitala pripadna vrijednost otpornosti na savijanje:



- Vrijednost otpornosti na savijanje može se odrediti uz pomoć poznatih točaka na poligonu:

$$M_{pl,y,N,Rd} = M_{pl,y,Rd} + 2 \cdot M_{n,y,Rd} \cdot \left(\frac{N_{pm,Rd} - N_{Ed}}{N_{pm,Rd}} \right)$$

$$M_{pl,y,N,Rd} = 545 + 2 \cdot 46{,}66 \cdot \left(\frac{2092{,}5 - 1788}{2092{,}5} \right) = 559 \; kNm$$

- Odnos između otpornosti na savijanje pri djelovanju uzdužne sile i plastične otpornosti na savijanje:

$$\mu_{d,y} = \frac{M_{pl,y,N,Rd}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{559}{545} = 1{,}03 > 1{,}0$$

Napomena: vrijednost je veća od 1,0, što podrazumijeva provjeru članka 6.7.3.6(2) iz EN 1994-1-1, gdje se navodi kako se vrijednost faktora smije usvojiti kao veća od 1,0 samo u slučaju kada moment savijanja M_{Ed} ovisi izravno o djelovanju uzdužne sile N_{Ed}. Primjerice, kada je M_{Ed} posljedica ekscentriciteta uzdužne sile N_{Ed}. Ako su M_{Ed} i N_{Ed} posljedica neovisnih djelovanja, potrebno je napraviti dodatnu provjeru u skladu s člankom 6.7.1(7) iz EN 1994-1-1. Prema navedenom članku, potrebno je parcijalni koeficijent γ_F za djelovanje koje vodi do povećanja otpornosti smanjiti za 20 %. U konkretnom slučaju, vrijednost otpornosti pri djelovanju uzdužne sile nalazi se u području CD, što znači da bi se smanjenjem uzdužne sile otpornost na savijanje povećala, odnosno nije važno radi li se o neovisnim djelovanjima ili ne. Ako bi točka ležala u području DB, treba primijeniti članak 6.7.1(7) jer bi smanjenje uzdužne sile smanjilo otpornost na savijanje.

8.6. Proračun učinaka djelovanja oko osi y-y

- Provjera potrebe uzimanja u obzir teorije drugog reda

$$\alpha_{cr} = \frac{N_{cr,y,eff}}{N_{Ed}} \leq 10 \rightarrow \; \alpha_{cr} = \frac{8162}{1788} = 4{,}56 < 10 \; \rightarrow \text{učinke 2. reda treba uzeti u obzir}$$

- Elastična kritična sila

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (E \cdot I)_{eff,y,II}}{L_{cr}^2} \; \rightarrow N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 405219259}{700^2} = 8162 \; kN$$

- Proračunska krutost na savijanje

$$(EI)_{eff,y,II} = K_0 \cdot \left(E_a \cdot I_{y,a} + E_s \cdot I_{y,s} + K_{e,II} \cdot E_{c,eff} \cdot I_{y,c} \right)$$

$$(EI)_{eff,y,II} = 0{,}9 \cdot \left(21000 \cdot 14920 + 21000 \cdot 1231 + 0{,}5 \cdot 1126{,}6 \cdot 197182 \right) = 405\,219\,259 \; kNcm^2$$

- Savijanje oko osi y-y

  Napomena: učinke 2. reda, prema članku 6.7.3.4(5), HRN EN 1994-1-1, moguće je odrediti uvećavajući najveći moment savijanja prema teoriji 1. reda, pomoću faktora *k*:

$$M_{y,Ed,II} = M_{y,Ed,I} \cdot k \qquad k = \frac{\beta}{1 - N_{Ed}/N_{cr,y,eff}} \geq 1{,}0$$

  - istovrijedna nesavršenost elementa (krivulja *b*, *y-y*):

$$e_{0,z} = \frac{L}{200} = \frac{700}{200} = 3{,}5\ cm$$

  - proračunski moment savijanja na vrhu stupa

$$M_{y,Ed} = 375\ kNm$$

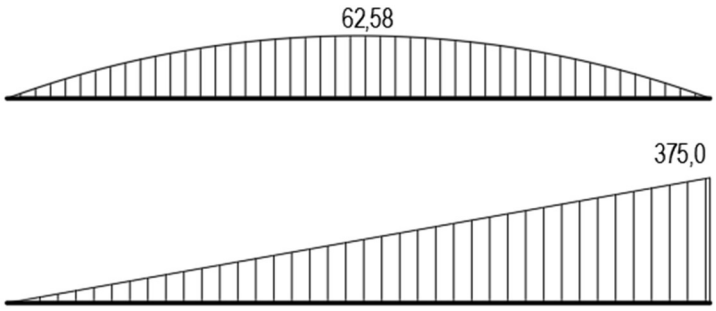
  - proračunski moment savijanja na dnu stupa

$$M_{y,Ed} = 0\ kNm$$

  - proračunski moment savijanja zbog nesavršenosti

$$M_{y,Ed,imp} = N_{Ed} \cdot e_{0,z} = 1788 \cdot 0{,}035 = 62{,}58\ kNm$$

  - dijagrami momenata savijanja prema teoriji 1. reda, $\boldsymbol{M_{y,Ed}}$ [kNm]



  - faktor β uzima u obzir oblik dijagrama momenata savijanja

    - $\beta = 1{,}0$ - kada savijanje uzrokuje bočno opterećenje na stupu
    - $\beta = 0{,}66 + 0{,}44 \cdot r \geq 0{,}44$ - kada savijanje uzrokuju momenti na krajevima stupa

  - *r* je omjer momenta savijanja na rubovima stupa, s time da vrijedi $-1 \leq r \leq 1$

  - faktor k_1 koji uzima u obzir savijanje na krajevima stupa

$$r = \frac{0}{M_{y,Ed}} = \frac{0}{375} = 0,0\ ;\ \beta = 0,66 + 0,44 \cdot 0 = 0,66 > 0,44$$

$$k_1 = \frac{0,66}{1 - 1788/8162} = 0,845 < 1,0$$

$$k_1 = 1,0$$

– faktor k_2 koji uzima u obzir nesavršenost elementa

$$\beta = 1,0$$

$$k_2 = \frac{1,00}{1 - 1788/8162} = 1,281 < 1,0$$

– moment savijanja u sredini visine stupa, uzimajući u obzir učinke 2. reda

$$M_{y,Ed,II} = M_{y,Ed} \cdot k_1 + M_{y,Ed,imp} \cdot k_2 = 375 \cdot 1,0 + 62,58 \cdot 1,281 = 455\ kNm$$

8.7. Provjera uvjeta nosivosti

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{M_{y,Ed}}{\alpha_{M,y} \cdot \mu_{d,y} \cdot M_{pl,y,Rd}} \le 1,0 \rightarrow \frac{455}{0,9 \cdot 1,03 \cdot 545} = 0,90 < 1,0$$

- Faktor ovisan o kvaliteti čelika

$\alpha_{M,y} = 0,9$ za čelike kvalitete od S235 do S355

$\alpha_{M,y} = 0,8$ za čelike kvalitete od S420 do S460

22 Primjer - proračun spregnute ploče prema HRN EN 1994-1-1

1. Osnovni podatci

1.1. Materijali

- Konstrukcijski čelik S355-K2

$f_y = 355\,N / mm^2$

$E = 210000\,N / mm^2$

- Armatura S500B

$f_{sk} = 500\,N / mm^2$

$E = 210000\,N / mm^2$

- Trapezni lim TRP 200 S350 GD+Z

$f_y = 355\,N / mm^2$

$A_{K,Rk} = 11,80\,kN \rightarrow t_s$=1,25 mm

$E = 210000\,N / mm^2$

- Beton C35/45

$f_{ck} = 35\,N / mm^2$

$f_{cd} = 23,3\,N / mm^2$

- Vijci HILTI ENP 2-21 L15

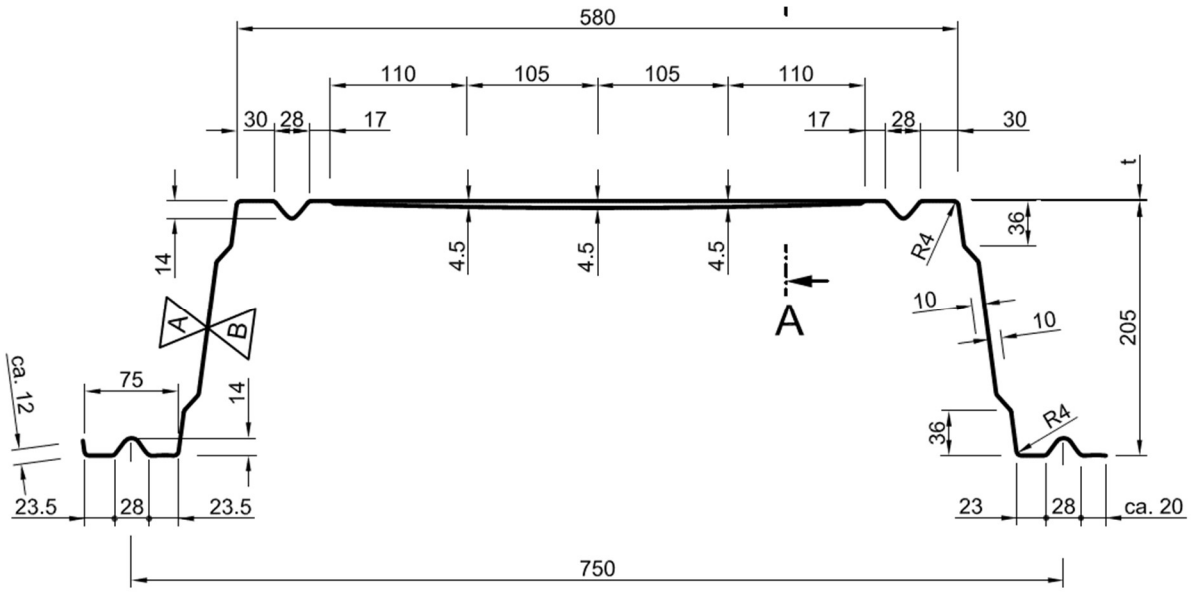
$V_{Rk} = 4,0\,kN$

$E = 210000\,N / mm^2$

1.2. Poprečni presjek (*Hoesch additiv* sustav)

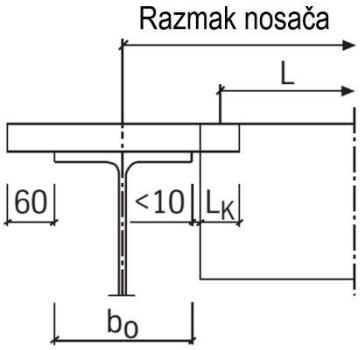
- Usvojen lim TRP 200. Za debljinu betonske ploče iznad lima, h_c, usvojena je najmanja preporučena vrijednost koja je jednaka 80 mm.

Oznaka	*Veličina*	*Mjerna jedinica*	*Opis*
t_s	1,25	mm	debljina stijenke
h_p	205	mm	visina čeličnog lima
b_b	75	mm	širina rebra (pri dnu)
b_r	580	mm	širina rebra (pri vrhu)
b_s	750	mm	razmak između osi rebara
n	1,33	1/m	broj rebara po dužnom metru
$M_{el,Rd}$	22,1	kNm/m	elastična otpornost lima na savijanje po metru širine



1.3. Proračunski raspon

- Raspon ploče proteže se od polovice klina na koji je oslonjen do polovice klina koji se nalazi na susjednom nosaču.



- Razmak nosača

L_{Raster} = 4 m

- Duljina oslanjanja trapeznog lima

L_K = 60 mm

- Širina pojasnica nosača (IPE 600)

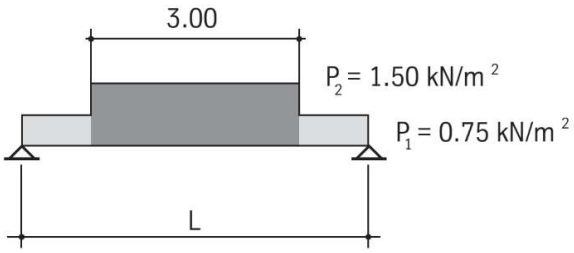
b_0 = 220 mm

- Proračunski raspon

$L = L_{Raster} - b_0 - L_K = 4,0 - 0,22 - 0,06 = 3,72$ m

2. Analiza opterećenja u fazi izvedbe

- Karakteristična opterećenja u fazi izvedbe:
  - vlastita težina trapeznog lima $g_{p,k} = 0,16\,kN/m^2 \rightarrow t_s$=1,25 mm
  - vlastita težina vlažnog betona $g_{c,k} = 0,87 + 0,26 \times h_c = 0,87 + 0,26 \times 8 = 2,95\,kN/m^2$
  - opterećenje izvan radne površine $q_{1,k} = 0,75\,kN/m^2$
  - opterećenje unutar radne površine $q_{2,k} = 1,50\,kN/m^2$



- Proračunska opterećenja u fazi izvedbe:
  - vlastite težine $g_d = \left(g_{p,k} + g_{c,k}\right) \times \gamma_G = \left(0,16 + 2,95\right) \times 1,35 = 4,20\,kN/m^2$
  - promjenjivo unutar radne površine $q_{1,d} = q_{1,k} \times \gamma_Q = 0,75 \times 1,5 = 1,13\,kN/m^2$
  - promjenjivo izvan radne površine $q_{2,d} = q_{2,k} \times \gamma_Q = 1,5 \times 1,5 = 2,25\,kN/m^2$
- Proračunske rezne sile:
  - moment savijanja

$$M_{Ed} = \frac{\left(g_d + q_{1,d}\right) \times L^2}{8} + \left(q_{2,d} - q_{1,d}\right) \times 3,0 \times \frac{2 \times L - 3,0}{8}$$

$$M_{Ed} = \frac{\left(4,20 + 1,13\right) \times 3,72^2}{8} + \left(2,25 - 1,13\right) \times 3,0 \times \frac{2 \times 3,72 - 3,0}{8} = 11,08\,kNm/m$$

  - poprečna sila

$$V_{Ed} = \frac{\left(g_d + q_{1,d}\right) \times L}{2} + \left(q_{2,d} - q_{1,d}\right) \times 3,0 \times \frac{L - 3,0}{2 \times L}$$

$$V_{Ed} = \frac{\left(4,20 + 1,13\right) \times 3,72}{2} + \left(2,25 - 1,13\right) \times 3,0 \times \frac{3,72 - 3,0}{2 \times 3,72} = 10,24\,kN/m$$

  - poprečna sila na klinu koji povezuje lim s nosačem

$$A_{K,Ed} = 0,75 \times \frac{V_{Ed}}{2} = 0,75 \times \frac{10,24}{2} = 3,84\,kN$$

  - poprečna sila na vijku

$$V_{Ed} = 0,25 \times V_{K,Ed} = 0,25 \times 3,84 = 0,96\,kN$$

3. Granično stanje nosivosti u fazi izvedbe

- Provjera poprečnog presjeka trapeznog lima na savijanje:
  - proračunska otpornost na savijanje

$$M_{PT,Rd} = \frac{M_{PT,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{22,1}{1,0} = 22,1\,kNm/m$$

  - uvjet nosivosti

$$\frac{M_{Ed}}{M_{PT,Rd}} = \frac{11,08}{22,1} = 0,50 < 1,0 \rightarrow$$ iskorištenost trapeznog lima izloženog savijanju 50 %

- Provjera poprečnog presjeka trapeznog lima na poprečnu silu:
  - proračunska otpornost na poprečnu silu

$$A_{K,Rd} = \frac{A_{K,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{11,80}{1,0} = 11,80\,kN$$

  - uvjet nosivosti

$$\frac{A_{K,Ed}}{A_{K,Rd}} = \frac{3,84}{11,80} = 0,33 < 1,0 \rightarrow$$ iskorištenost trapeznog lima na poprečnu silu 33 %

- Provjera poprečnog presjeka vijka na odrez:
  - proračunska otpornost vijka na odrez

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{M2}} = \frac{4,0}{1,25} = 3,2\,kN$$

  - uvjet nosivosti

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{0,96}{3,2} = 0,30 < 1,0 \rightarrow$$ iskorištenost vijka na odrez 30 %

4. Analiza opterećenja u fazi uporabe

- Karakteristična opterećenja u fazi uporabe:
  - vlastita težina trapeznog lima $g_{p,k} = 0,16\,kN/m^2 \rightarrow t_s$=1,25 mm
  - vlastita težina betona $g_{c,k} = 0,83 + 0,25 \times h_c = 0,83 + 0,25 \times 8 = 2,83\,kN/m^2$
  - vlastita težina slojeva poda $g_{pod,k} = 1,5\,kN/m^2$
  - vlastita težina pregradbenih zidova slojeva poda $g_{zidovi,k} = 0,5\,kN/m^2$
  - uporabno opterećenje za odmor i rekreaciju → kategorija C4 → $q_{C4,k} = 5,0\,kN/m^2$

- Proračunska opterećenja u fazi uporabe:
  - vlastite težine

    $$g_d = \left(g_{p,k} + g_{c,k} + g_{pod,k} + g_{zidovi,k}\right) \times \gamma_G = \left(0,16 + 2,83 + 1,5 + 0,5\right) \times 1,35 = 6,74\,kN/m^2$$

  - uporabno opterećenje $q_{C4,d} = q_{C4,k} \times \gamma_Q = 5,0 \times 1,5 = 7,5\,kN/m^2$

- Proračunske rezne sile:
  - moment savijanja

    $$M_{Ed} = \frac{\left(g_d + q_{C4,d}\right) \times L^2}{8} = \frac{\left(6,74 + 7,5\right) \times 3,72^2}{8} = 24,63\,kNm/m$$

  - poprečna sila

    $$V_{Ed} = \frac{\left(g_d + q_{C4,d}\right) \times L}{2} = \frac{\left(6,74 + 7,5\right) \times 3,72}{2} = 26,48\,kN/m$$

  - poprečna sila na klinu koji povezuje lim s nosačem

    $$A_{K,Ed} = 0,75 \times \frac{V_{Ed}}{2} = 0,75 \times \frac{26,48}{2} = 9,93\,kN$$

  - poprečna sila na vijku

    $$V_{Ed} = 0,25 \times V_{K,Ed} = 0,25 \times 9,93 = 2,48\,kN$$

5. Granično stanje nosivosti u fazi uporabe

- Provjera spregnutog poprečnog presjeka na savijanje:
  - proračunska otpornost na savijanje

$$M_{Rd} = M_{PT,Rd} + M_{c,Rd}$$

- proračunska otpornost trapeznog lima na savijanje

$$M_{PT,Rd} = 22,1\,kNm/m$$

- potrebna proračunska otpornost betona na savijanje

$$M_{c,Rd} = M_{Ed} - M_{PT,Rd} = 24,63 - 22,1 = 2,63\,kNm/m$$

- razmak armature u donjem pojasu od donjeg ruba trapeznog lima

$$u = c_{nom} + \frac{d_s}{2}$$

- promjer armaturne šipke

$$d_s = 8\,mm$$

- nominalna debljina zaštitnog sloja betona

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- najmanja debljina zaštitnog sloja

$$c_{min} = \max\left(c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\,mm\right)$$

- najmanja debljina zaštitnog sloja u skladu sa zahtjevima prionjivosti armature

$$c_{min,b} = d_s = 8\,mm$$

- dodatna vrijednost koja pokriva nesavršenosti zaštitnog sloja (u skladu s preporukom u [6])

$$\Delta c_{dev} = 10\,mm$$

- najmanja debljina zaštitnog sloja u skladu s uvjetima okoline (ploča zaštićena od vanjskih utjecaja – klasa X0)

$$c_{min,dur} = 10\,mm$$

- dodatni sigurnosni zaštitni sloj (u skladu s preporukom u [6])

$$\Delta c_{dur,\gamma} = 10\,mm$$

- redukcija minimalnog zaštitnog sloja kod uporabe nehrđajućeg čelika (u skladu s preporukom u [6])

$$\Delta c_{dur,st} = 0\,mm$$

- redukcija minimalnog zaštitnog sloja kod uporabe dodatne zaštite (u skladu s preporukom u [6])

$$\Delta c_{dur,add} = 0\,mm$$

- najmanja debljina zaštitnog sloja

$$c_{min} = \max\left(8\,mm;10\,mm+10\,mm-0\,mm-0\,mm;10\,mm\right) = 20\,mm$$

- nominalna debljina zaštitnog sloja betona

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 20 + 10 = 30\,mm$$

- razmak armature u donjem pojasu od donjeg ruba trapeznog lima

$$u = c_{nom} + \frac{d_s}{2} = 30 + \frac{8}{2} = 34\,mm < 35\,mm\,(\text{preporuka proizvođača})$$

- proračunska čvrstoća armature

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{50}{1,15} = 43,5\,kN/cm^2$$

- proračunska čvrstoća betona

$$f_{cd} = \alpha \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \times \frac{3,5}{1,5} = 1,98\,kN/cm^2$$

- statička visina

$$d = h_p + h_c - u = 205 + 80 - 35 = 250\,mm$$

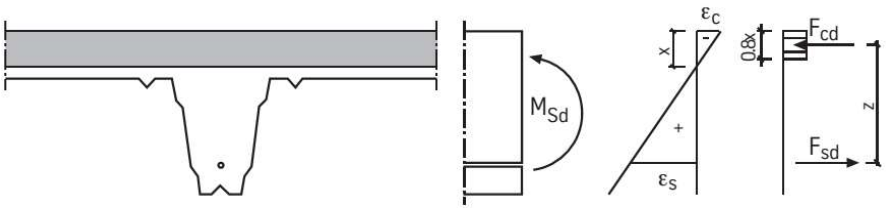
- proračunska širina

$$b = 100\,cm$$

- raspodjela deformacija (u skladu s preporukama proizvođača)

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = \frac{-0{,}197\ ‰}{25\ ‰} \rightarrow \text{položaj neutralne osi}$$

$$x = d \times \frac{|\varepsilon_c|}{|\varepsilon_c| + \varepsilon_s} = 250 \times \frac{|-0{,}197|}{|-0{,}197| + 25} = 1{,}95\ \text{mm} \rightarrow \text{n.o. iznad trapeznog lima}$$



- sila u tlačnom dijelu presjeka

$$F_{cd} = b \times x \times 0{,}8 \times f_{cd} = 100 \times 0{,}196 \times 0{,}8 \times 1{,}98 = 31{,}05\ \text{kN}$$

- krak sila

$$z = d - 0{,}5 \times x = 250 - 0{,}5 \times 1{,}98 = 249{,}01\ \text{mm}$$

- proračunska otpornost betona na savijanje

$$M_{c,Rd} = F_{cd} \times z = 31{,}05 \times 0{,}249 = 7{,}73\ \text{kNm/m}$$

→ Proračunska otpornost betona na savijanje veća je od potrebne, 2,63 kNm/m, što ukazuje da presjek ima dostatnu otpornost na savijanje, odnosno da je pretpostavljeno stanje deformacija točno.

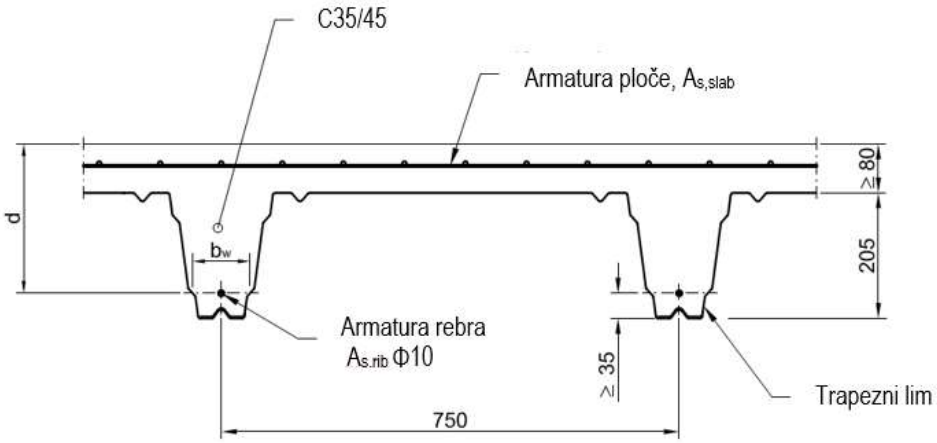
- potrebna površina armature

$$A_{s,required} = \frac{F_{sd}}{f_{sd}} = \frac{31{,}05}{43{,}5} = 0{,}714\ \text{cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{ukupna potrebna armatura u vlačnom području}$$

$$A_{s,rib,required} = 0{,}75 \times \frac{F_{sd}}{f_{sd}} = 0{,}75 \times \frac{31{,}05}{43{,}5} = 0{,}535\ \text{cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{armatura potrebna u jednom rebru}$$

usvojeno 1Φ10 u rebru → $A_{s,rib} = 0{,}785\ \text{cm}^2/\text{m}$

$$A_s = 1{,}333 \times 0{,}503 = 1{,}047\ \text{cm}^2/\text{m}$$



- stvarna proračunska otpornost betona na savijanje

$$M_{c,Rd} = A_s \times f_{sd} \times \left(d - \frac{x}{2} \right) = 1,047 \times 43,5 \times \left(25 - \frac{0,198}{2} \right) = 1134 \text{ kNcm/m} = 11,34 \text{ kNcm/m}$$

- proračunska otpornost na savijanje

$$M_{Rd} = M_{PT,Rd} + M_{c,Rd} = 22,1 + 11,34 = 33,44 \text{ kNm/m}$$

- uvjet nosivosti

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{24,63}{33,44} = 0,74 < 1,0 \rightarrow \text{iskorištenost trapeznog lima izloženog savijanju 74 \%}$$

- Provjera poprečnog presjeka trapeznog lima na poprečnu silu:
  - proračunska otpornost na poprečnu silu

$$A_{K,Rd} = \frac{A_{K,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{11,80}{1,0} = 11,80 \text{ kN}$$

  - uvjet nosivosti

$$\frac{A_{K,Ed}}{A_{K,Rd}} = \frac{9,93}{11,80} = 0,84 < 1,0 \rightarrow \text{iskorištenost trapeznog lima na poprečnu silu 84 \%}$$

- Provjera poprečnog presjeka vijka na odrez:
  - proračunska otpornost vijka na odrez

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{M2}} = \frac{4,0}{1,25} = 3,2 \text{ kN}$$

  - uvjet nosivosti

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{2,48}{3,2} = 0,78 < 1,0 \rightarrow \text{iskorištenost vijka na odrez 78 \%}$$

- Provjera betonskog poprečnog presjeka na poprečnu silu:
  - proračunska poprečna sila koja djeluje na betonski presjek

$$V_{c,Ed,max} = \frac{q_{c,Ed} \times L_c}{2}$$

- proračunsko djelovanje na betonski presjek

$$q_{c,Ed} = g_d + q_{c4,d} - g_{p,d} = 6,74 + 7,5 - 0,16 \times 1,35 = 14,02\,kN/m^2$$

- širina na kojoj u prijenosu opterećenja sudjeluje betonska ploča (u skladu s preporukama proizvođača)

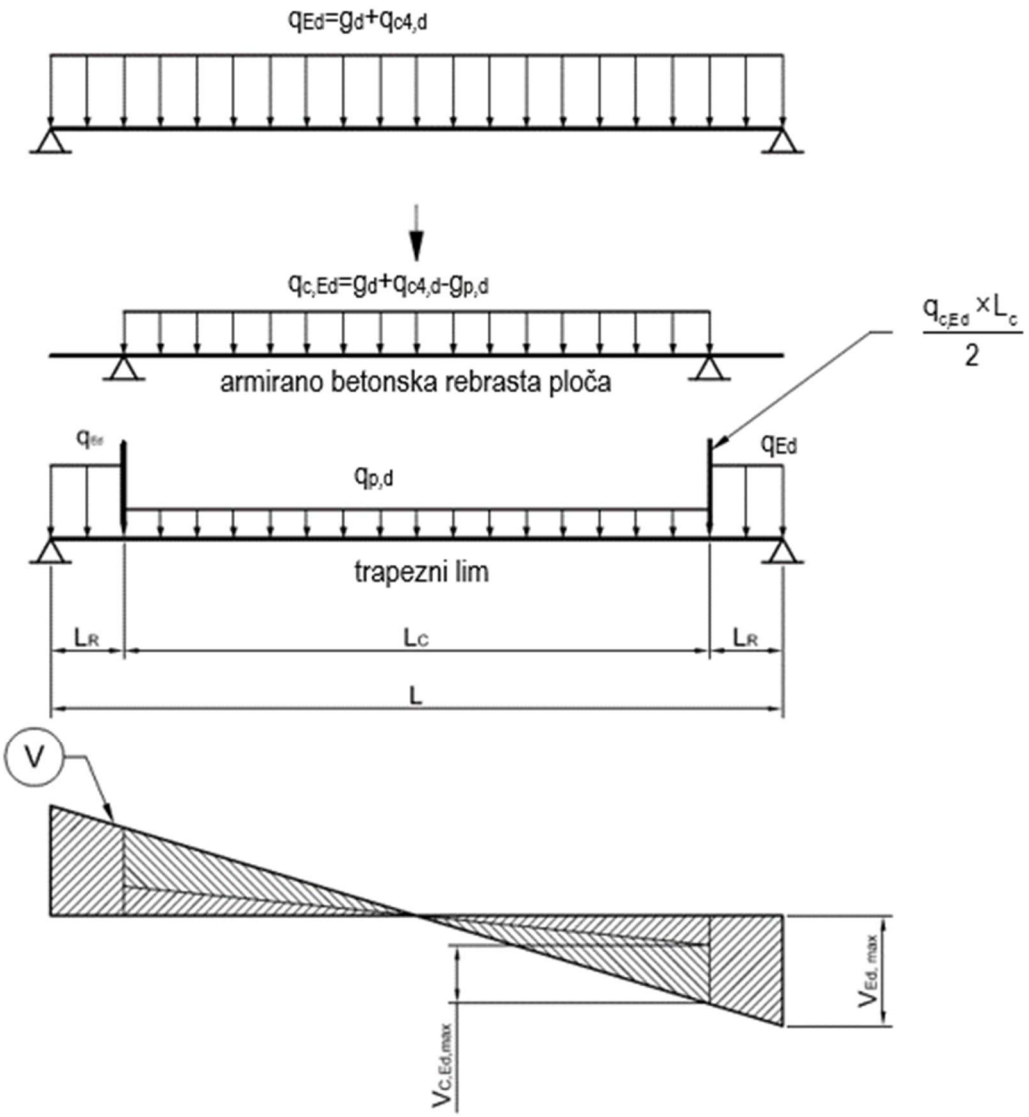
$$L_c = L - 2 \times L_R = 3,72 - 2 \times 1,26 = 1,20\,m$$

$$\rightarrow \left(\frac{L_R}{L}\right)^2 - \frac{L_R}{L} + \left(2 \times \frac{M_{PT,Rd}}{L^2} - \frac{g_{p,d}}{4}\right) \Big/ q_{c,Ed} = 0$$

$$\rightarrow \left(\frac{L_R}{L}\right)^2 - \frac{L_R}{L} + \left(2 \times \frac{22,1}{3,72^2} - \frac{0,16 \times 1,35}{4}\right) \Big/ 14,02 = 0$$

$$\rightarrow L_R^{\,2} - 3,72 \times L_R + 3,10 = 0$$

$$\rightarrow L_R = \frac{3,72 - \sqrt{(-3,72)^2 - 4 \times 3,10}}{2} = 1,26\,m$$



- proračunska poprečna sila koja djeluje na betonski presjek

$$V_{c,Ed,max} = \frac{14,02 \times 1,20}{2} = 8,41\,kN/m$$

- proračunska otpornost betonskog presjeka na poprečnu silu

$$V_{c,Rd} = C_{Rd,c} \times k \times \sqrt[3]{100 \times \rho_1 \times f_{ck}} \times b_w \times d$$

  - korekcijski koeficijenti

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{250}} = 1,89 < 2,0$$

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

- širina betona u rebru pri razini armature (u skladu s preporukama proizvođača)

$$b_w\left(c_{nom}=31\,mm\right)=80\,mm$$

- koeficijent armiranja

$$\rho_1=\frac{A_{sl}}{b_w\times d}=\frac{0,785\times 100}{80\times 250}=0,00393<0,02$$

- proračunska otpornost betonskog presjeka na poprečnu silu

$$V_{c,Rd}=0,12\times 1,89\times\sqrt[3]{100\times 0,00393\times 35}\times 80\times 250=10868,26\,N/rebro$$

$$V_{c,Rd}=10,87\,kN/0,75\,m=14,49\,kN/m$$

- uvjet nosivosti

$$\frac{V_{c,Ed}}{V_{c,Rd}}=\frac{8,41}{14,49}=0,58<1,0\rightarrow$$ iskorištenost betonskog presjeka na poprečnu silu 58 %

- Provjera dostatne duljine sidrenja armature u rebru

$$L_R\geq l_{b,eq}+d$$

- osnovna duljina sidrenja

$$l_b=\frac{d_s}{4}\times\frac{f_{sd}}{f_{bd}}$$

- čvrstoća veze između armature i betona

$$f_{bd}=2,25\times\pi_1\times\pi_2\times f_{ctd}\rightarrow f_{bd}=2,25\times 1,0\times 1,0\times 1,47=3,31\,N/mm^2$$

- proračunska vlačna čvrstoća betona

$$f_{ctd}=\frac{\alpha_{ct}\times f_{ctk,0,05}}{\gamma_c}=\frac{1,0\times 2,2}{1,5}=1,47\,N/mm^2$$

- koeficijent ravnomjernosti stanja povezanosti (povoljni uvjeti)

$$\pi_1=1,0$$

- koeficijent ovisan o promjeru armature (Φ=10 mm)

$$\pi_2=1,0$$

- osnovna duljina sidrenja

$$l_b = \frac{10}{4} \times \frac{435}{3,31} = 328,8 \text{ mm}$$

- potrebna duljina sidrenja

$$l_{b,eq} = \alpha_a \times l_b \times \frac{A_{s,rib,required}}{A_{s,rib}} \geq l_{b,min}$$

- korekcijski koeficijent (ravne šipke izložene vlaku)

$$\alpha_a = 1,0$$

- omjer potrebne i ugrađene armature u rebru

$$\frac{A_{s,rib,required}}{A_{s,rib}} = \frac{0,535}{0,785} = 0,68$$

- najmanja duljina sidrenja

$$l_{b,min} = \max\left(0,3 \times l_b; 10 \times d_s\right) = \max\left(0,3 \times 328,8; 10 \times 10\right) = 100 \text{ mm}$$

- potrebna duljina sidrenja

$$l_{b,eq} = 1,0 \times 328,8 \times 0,68 = 223,58 \text{ m} > 100 \text{ mm}$$

- uvjet

$1,26 \text{ m} > 0,224 + 0,25 = 0,474 \text{ m} \rightarrow$ duljina sidrenja je dostatna.

6. Granično stanje uporabivosti

- Provjera pukotina u betonu zbog spriječenog savijanja (promjenjivo opterećenje)

S obzirom na to da su spregnute ploče dimenzionirane kao jednostavno oslonjene, ne može doći do pojave pukotina zbog savijanja koje uzrokuje nejednoliki raspored promjenjivih opterećenja.

- Provjera pukotina u betonu zbog spriječenog skraćenja (temperature, skupljanje):
  - spriječeno skraćenje

$$N_R = k \times f_{ct,eff} \times h_c = 0,8 \times 3,2 \times 80 = 204\ N/mm = 204\ kN/m$$

- srednja vlačna čvrstoća pri pojavi pukotina

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} = 3,2\ N/mm^2$$

- koeficijent koji uzima u obzir učinke naprezanja koji smanjuju sile zbog spriječenih pomaka

$$k = 0,8$$

- Najmanja površina armature

$$A_{s,min} = \frac{N_R}{\sigma_s}$$

$$\rightarrow A_{s,min} = \frac{204}{36} = 5,67\ cm^2/m$$

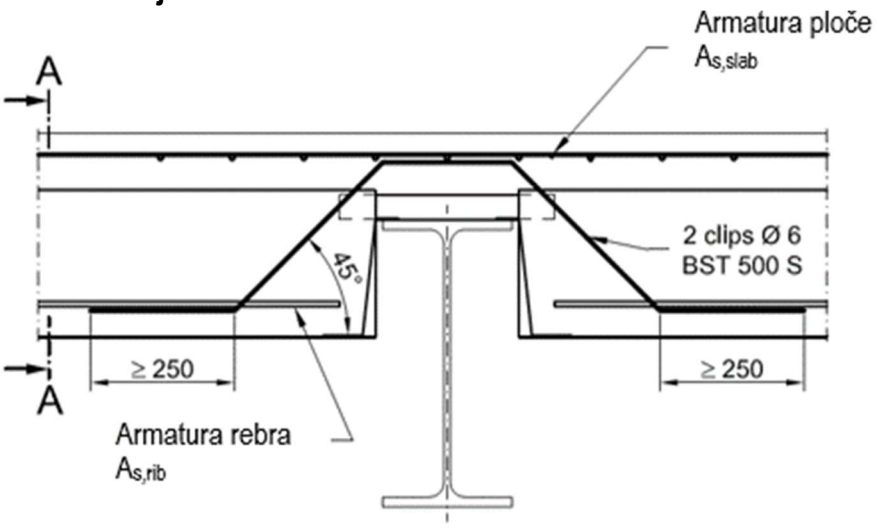
- Naprezanje u armaturi (d_s=8 mm; w_k=0,3 mm)

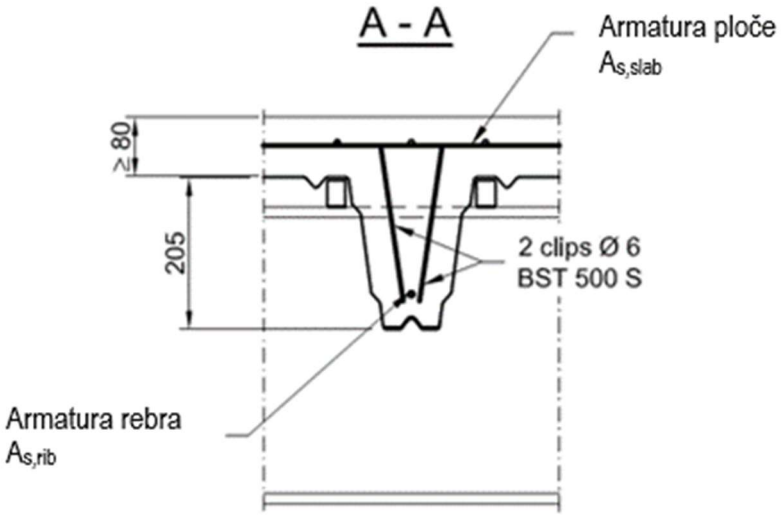
$$\sigma_s = \sigma_{s,table} = 360\ N/mm^2$$

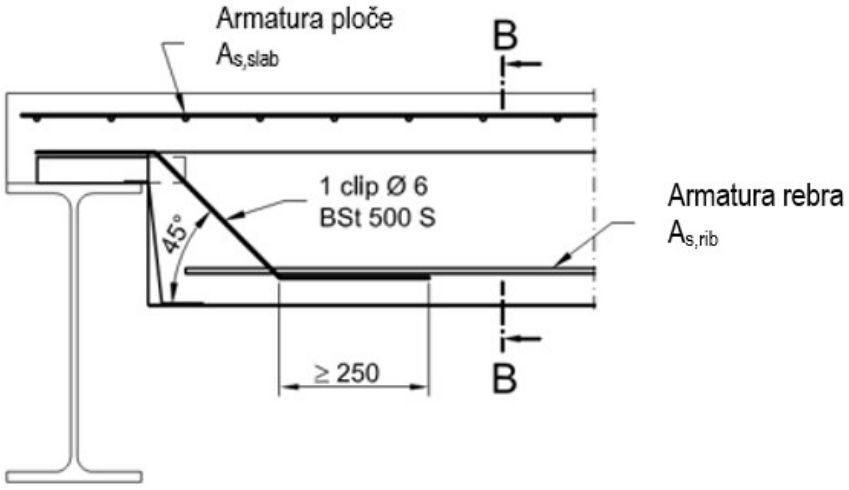
- Provjera progiba

Proizvođač jamči ostvarenje uvjeta za granično stanje uporabivosti u slučaju da su ostvareni svi uvjeti prema graničnom stanju nosivosti.

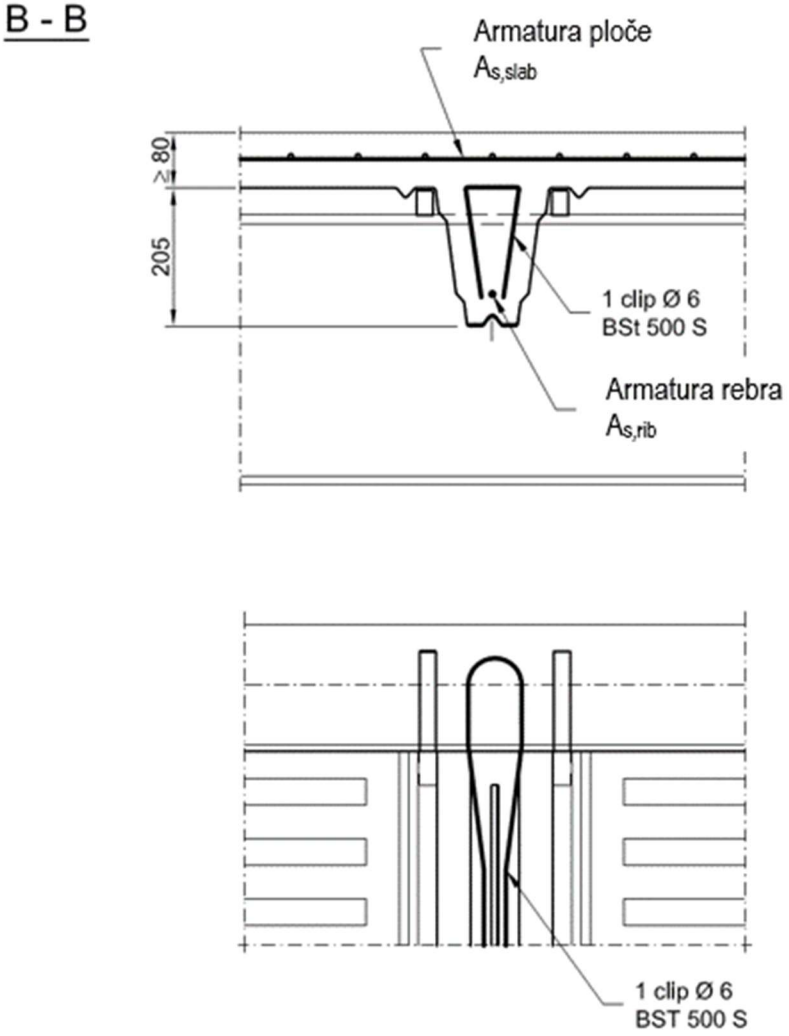
7. Raspored konstrukcijske armature







B - B


Armatura ploče
$A_{s,slab}$
≥ 80
205
1 clip Ø 6
BSt 500 S
Armatura rebra
$A_{s,rib}$
1 clip Ø 6
BST 500 S

Literatura

1. European Committee for Standardization (CEN). EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2005.
2. Markulak, Damir. 2018. *Me(n)talne konstrukcije*. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet. Osijek.
3. Horvatić, Drago. 2003. *Spregnute konstrukcije čelik-beton*. MASMEDIA. Zagreb.
4. Androić, B.; Dujmović, D.; Lukačević, I. 2012. *Projektiranje spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4*. I. A. Projektiranje. Zagreb.
5. European Committee for Standardization (CEN). EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2004.
6. European Committee for Standardization (CEN). EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2004.
7. Džeba, Ivica. 2010. Spregnute konstrukcije. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.
8. European Committee for Standardization (CEN). EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements. CEN, Brussels, Belgium, 2006.
9. Mustapić, I.; Samardžić, I.; Klarić, Š. 2004. Cost effective application of arc stud welding process in bridge construction industry. *Tehnički vjesnik* 11(1-2). 21-31.
10. Dujmović, D.; Androić, B.; Lukačević, I. 2014. *Primjeri proračuna spregnutih konstrukcija prema Eurocode 4*. IA Projektiranje. Zagreb.
11. Dujmović, D.; Androić, B.; Tonis, D.; Lukačević, I. 2017. Spregnuti stupovi s poprečnim presjekom od šuplje cijevi ispunjene betonom i s umetnutom čeličnom jezgrom. *Gradevinar* 69(04). 295-306.
12. European Committee for Standardization (CEN), EN 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2002.
13. European Committee for Standardization (CEN), EN 1993-1-3, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules — Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, Brussels, Belgium, 2006.