

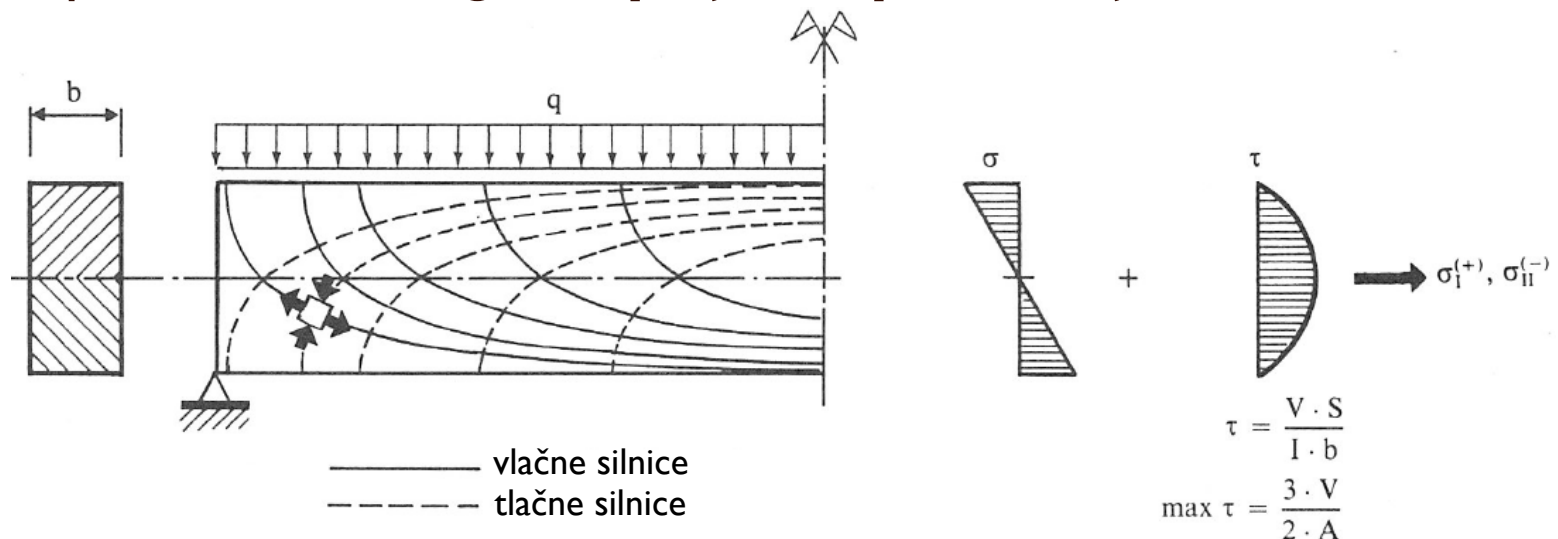
II NAPREZANJA OD POPREČNE SILE

II.1 Uvod

- U poglavlju o ponašanju PB nosača pod rastućim opterećenjem razmotrili smo i djelovanje poprečne sile.

Prisjetimo se da smo utvrdili kako pod djelovanjem **poprečne sile** nastaje **ravninsko stanje naprezanja**, za razliku od **savijanja** koje je **jednoosno**.

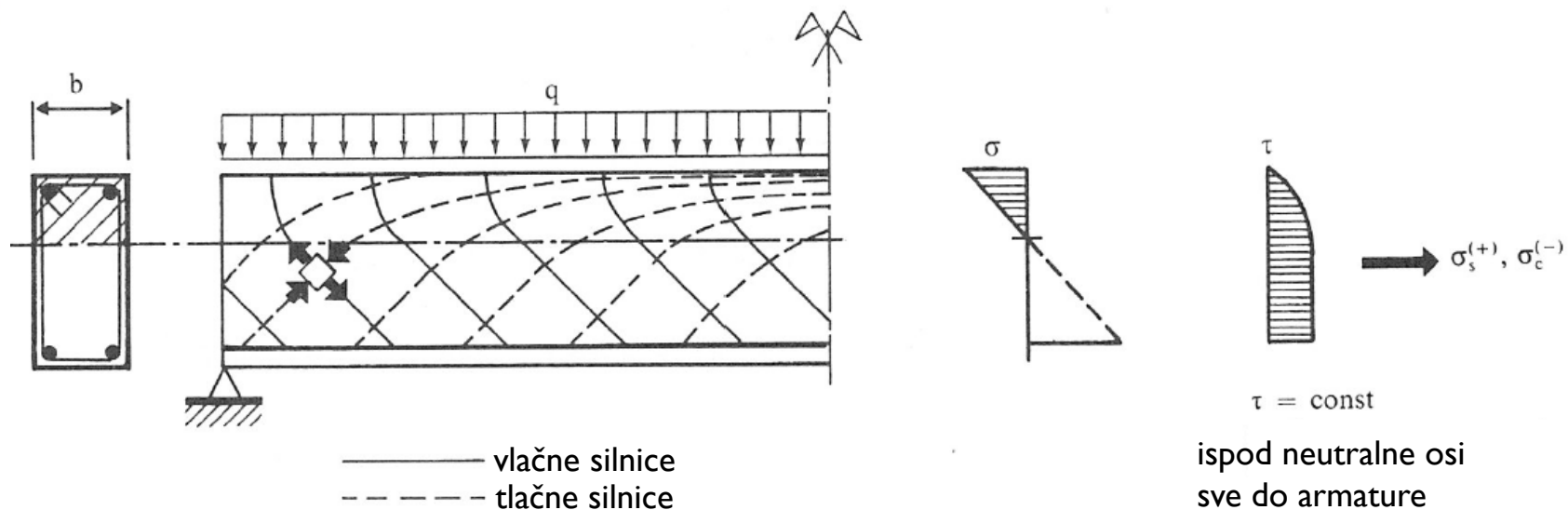
Na slici II.1 predočene su **silnice glavnih naprezanja** pravokutne AB grede **prije raspucavanja**.



Slika II.1: Silnice glavnih naprezanja pravokutne AB grede prije raspucavanja

11.1 Uvod

Kako je **vlačna čvrstoća** betona općenito **znatno manja** od tlačne (oko 10 puta), u betonu se javljaju **pukotine** u smjeru okomitu na smjer **glavnih vlačnih naprezanja** već pri razmjerno **niskoj razini opterećenja** (slika 11.2).



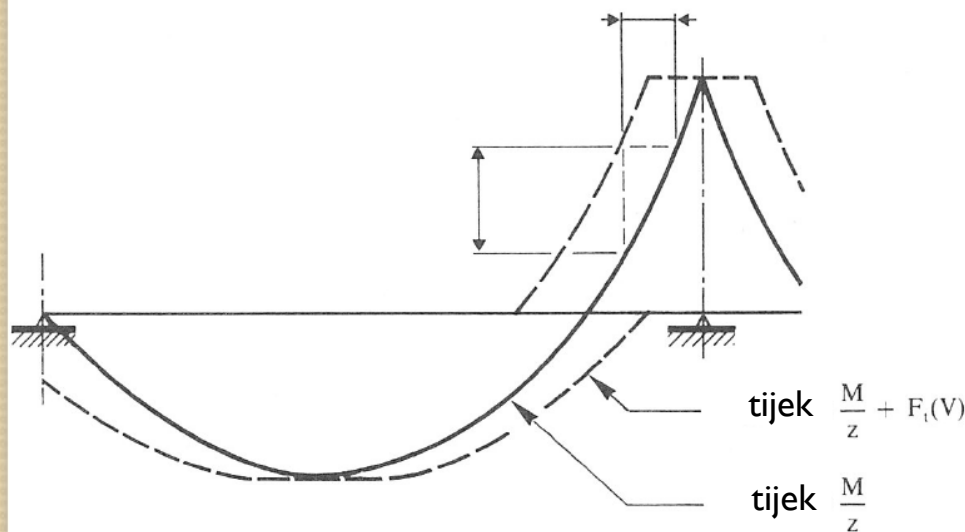
Slika 11.2: Silnice glavnih vlačnih naprezanja u stanju raspucalosti

Na ovoj slici valja uočiti kako tzv. **posmična naprezanja**, τ , ostaju **nepromijenjena po veličini ispod razine neutralne osi sve do razine armature**.

11.1 Uvod

Još je nešto važno uočiti: **ne postoji odsječak nosača konačne duljine**, na kojem bi se očitovalo djelovanje **čiste poprečne sile**: poprečna je sila uvijek **u sprezi s momentom savijanja**.

Čista poprečna sila može djelovati samo u **točki**, npr. u **ništištu** (“nul-točki”) **momenata savijanja** (slika 11.3).



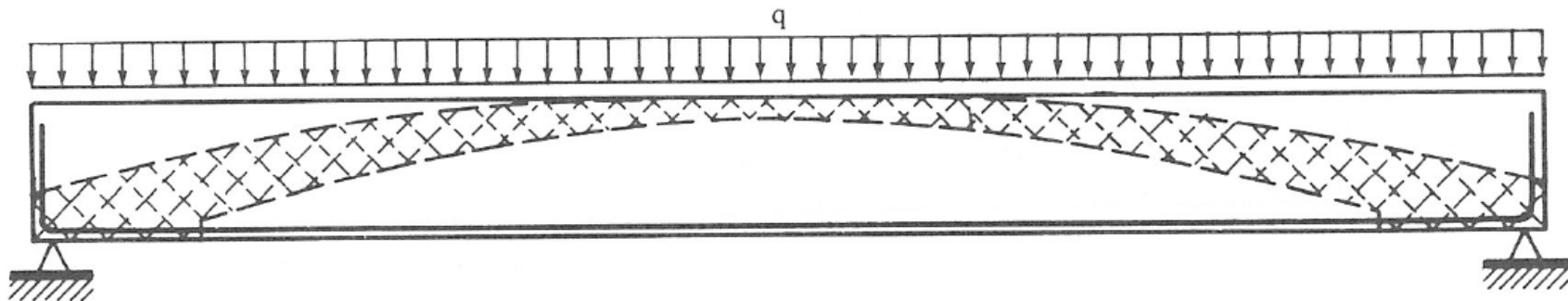
Slika 11.3: Učinak poprečne sile na uzdužnu armaturu

Na slici su predložene i granice (isprekidanim crtama) do kojih sežu **vlačne sile** od pripadnih momenata savijanja (to su tzv. **dijagrami pokrivanja** momenata savijanja).

Taj **pomak** granica vlačnih sila posljedak je djelovanja **poprečnih sila**.

11.1 Uvod

Zbog **raspucavanja AB** bi se greda **bez poprečne armature** (stremenova) pod **jednoliko rasprostrtim opterećenjem** zapravo ponašala poput **plitkoga luka sa zategom** (slika



Slika 11.4: Tlačni članci u betonu i glavna uzdužna armatura kao luk sa zategom

Ovdje se valja osvrnuti na jedan strukovni izraz: **stremen**.

Ovaj komad poprečne armature, što prenosi **poprečnu silu** (te vlačnu silu od momenta torzije) ovako se naziva u gotovo **svim jezicima**:

engl. *stirrup*;

franc. *étrier*;

njem. *Bügel*;

mađ. *kengyel*;

rus. *xomyr*;

polj. *strzemię* itd.

Zato ga i mi trebamo **tako** zvati, a ne spona ili (još gore) vilica.⁴

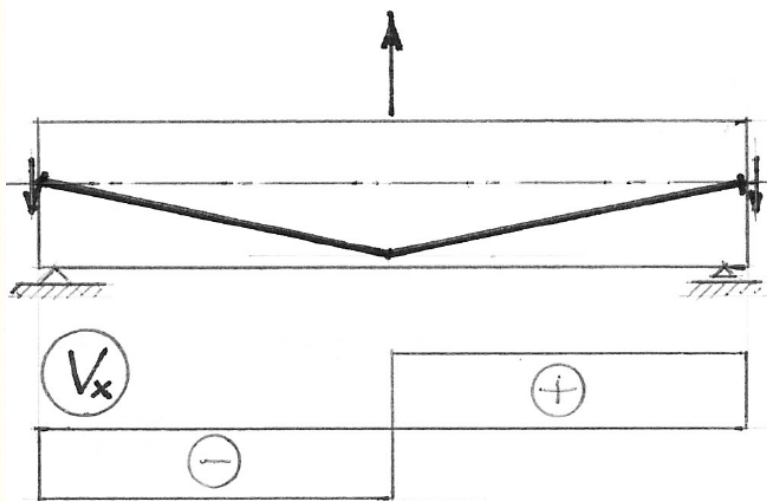
11.1 Uvod

Djelovanje **sile prednapinjanja** unosi **dvojaku promjenu** u ponašanje AB nosača:

- unošenjem **uzdužne sile** i
- unošenjem **dodatne poprečne sile**.

Kao što smo vidjeli u poglavlju o djelovanje sile prednapinjanja na AB nosač, djelovanje **natege** očituje se na **dvama** istaknutim mjestima:

- na mjestu uvođenja sile (sidrenja natege) i
- na mjestu skretanja osi natege.

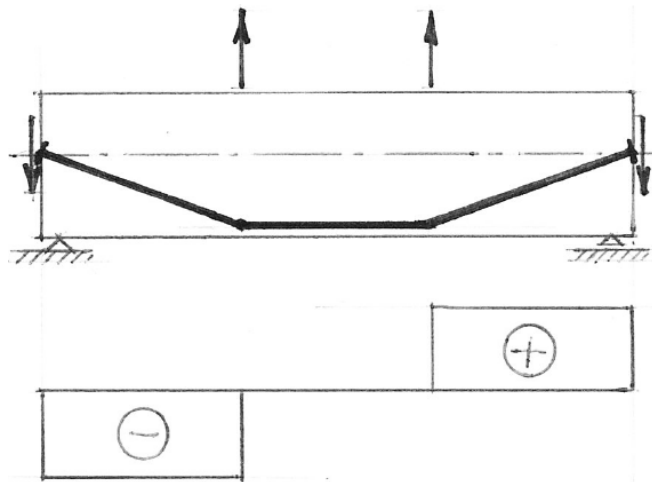


Na sljedećim ćemo trima slikama prikazati **tijek poprečnih sila** u trima tipičnim slučajevima.

Slika 11.5 predočuje slučaj kada os natege skreće u jednoj točki (protudjelovanje **jakoj pojedinačnoj sili**).

Slika 11.5: Tijek poprečne sile od natege s jednostrukim skretanjem

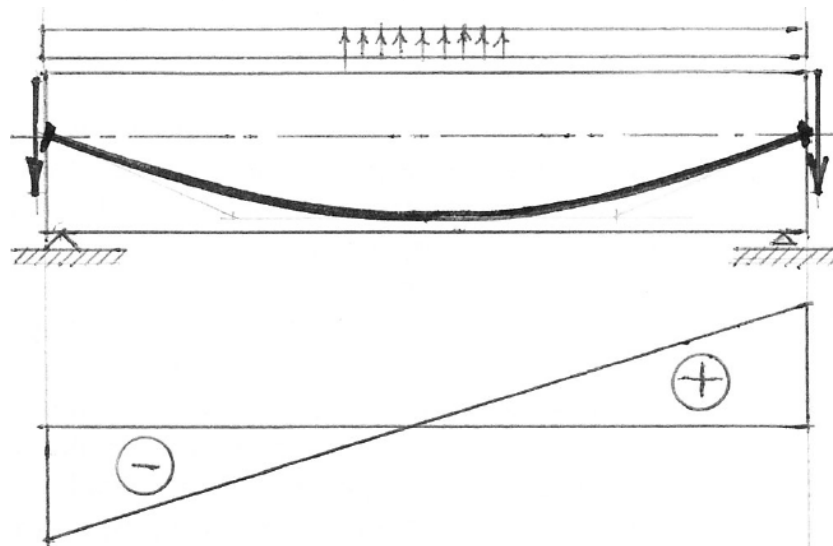
11.1 Uvod



Na slici pak 11.6 prikazano je stanje kada os natege skreće u **dvjema točkama** simetrično položenima u odnosu na polovište raspona (protudjelovanje **dvjema jakim pojedinačnim silama**).

Slika 11.6: Tijek popr. sila – dvostruko skretanje Kao i u predhodnom slučaju, te jake **pojedinačne** sile nadomještaju djelovanje kakve **poprečne grede** i sl.

Na kraju, slika 11.7 predočuje slučaj **jednoliko zakrivljene** (parabolaste) osi natege (protudjelovanje **jednoliko rasprostrtom opterećenju**).



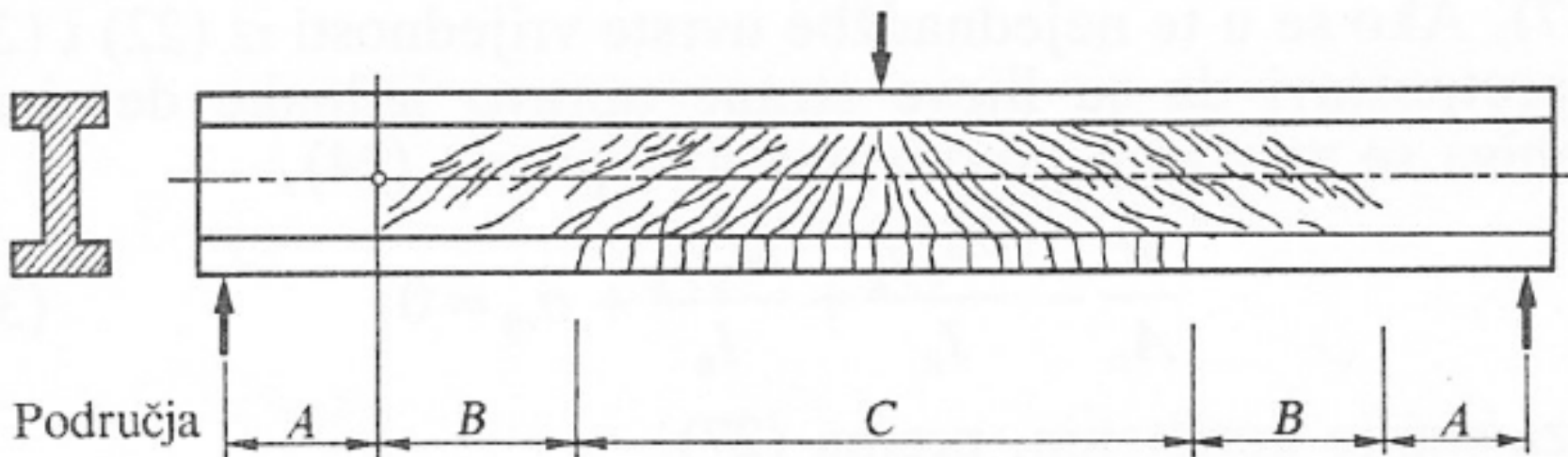
Slika 11.7: Tijek poprečnih sila od jednoliko zakrivljene zatege

11.1 Uvod

Dakle PB nosač izvrnut je djelovanju **poprečnih sila** od **vanjskog opterećenja** i onih od **skretanja osi natege**.

Postupak **proračuna** na djelovanja ovih sila **potpuno je jednak** kao u slučaju **AB nosača**.

Jedina je razlika u tomu što je u PB nosača **dulje područje A**, tj. dio nosača u kojem **nema pukotina ni pri dosegnuću granične nosivosti** (slika 11.8).



Slika 11.8: Pukotine na PB nosaču neposredno prije dosezanja granične nosivosti

11.1 Uvod

Za djelovanje **poprečne sile** treba promatrati najmanje **tri granična stanja** kroz koja nosač prolazi:

- stanje kada se napinju natege;
- uporabno stanje i
- granično stanje nosivosti.

U prvomu slučaju djeluju od opterećenja samo **vlastita težina nosača** i **sila prednapinjanja**.

Dakle ovo je **najniža razina vanjskog opterećenja** i **najviši iznos sile prednapinjanja** (nema vremenskih gubitaka).

U drugom je pak slučaju obrnuto: djeluje **najviša razina vanjskog opterećenja** i **najniži iznos sile prednapinjanja** (pun iznos vremenskih gubitaka).

Granično stanje nosivosti provjerava se na način **analogan** onomu za slučaj **savijanja**.

11.1 Uvod

U **prvom** i **drugom** stanju mogu nastupiti **dva** različita slučaja:

- nosač biva **raspucao** već pri **nižim** razinama sila kojima je podvrgnut;
- nosač biva **raspucao** tek pri **višim** razinama sila kojima je podvrgnut.

U obama slučajevima vrijede izrazi iz **Otpornosti gradiva**: računamo **glavna vlačna** i **glavna tlačna naprezanja** i uspoređujemo ih s **dopustivima**.

U pravilu **nije potrebna poprečna armatura** – dostatna je ona **najnužnija** (konstrukcijska).

Ako iznimno **glavna vlačna naprezanja premaše dopustiva**, postupa se kao u AB sklopova.

Za **treće** stanje vrijedi isti postupak kao i u **AB sklopova**, s tim što **sila prednapinjanja povećava udio betona u povećanju nosivosti na poprečnu silu**.

11.2 Stanje neraspucalosti

To je ono stanje pri kojemu **glavna vlačna naprezanja ne premašuju dopustiva**, pa se, susljedno, **ne mogu ni pojaviti pukotine**.

Sada ćemo razmotriti kako se **oblikom osi natege** može utjecati na to **kolika će ukupna poprečna sila djelovati na nosač**.

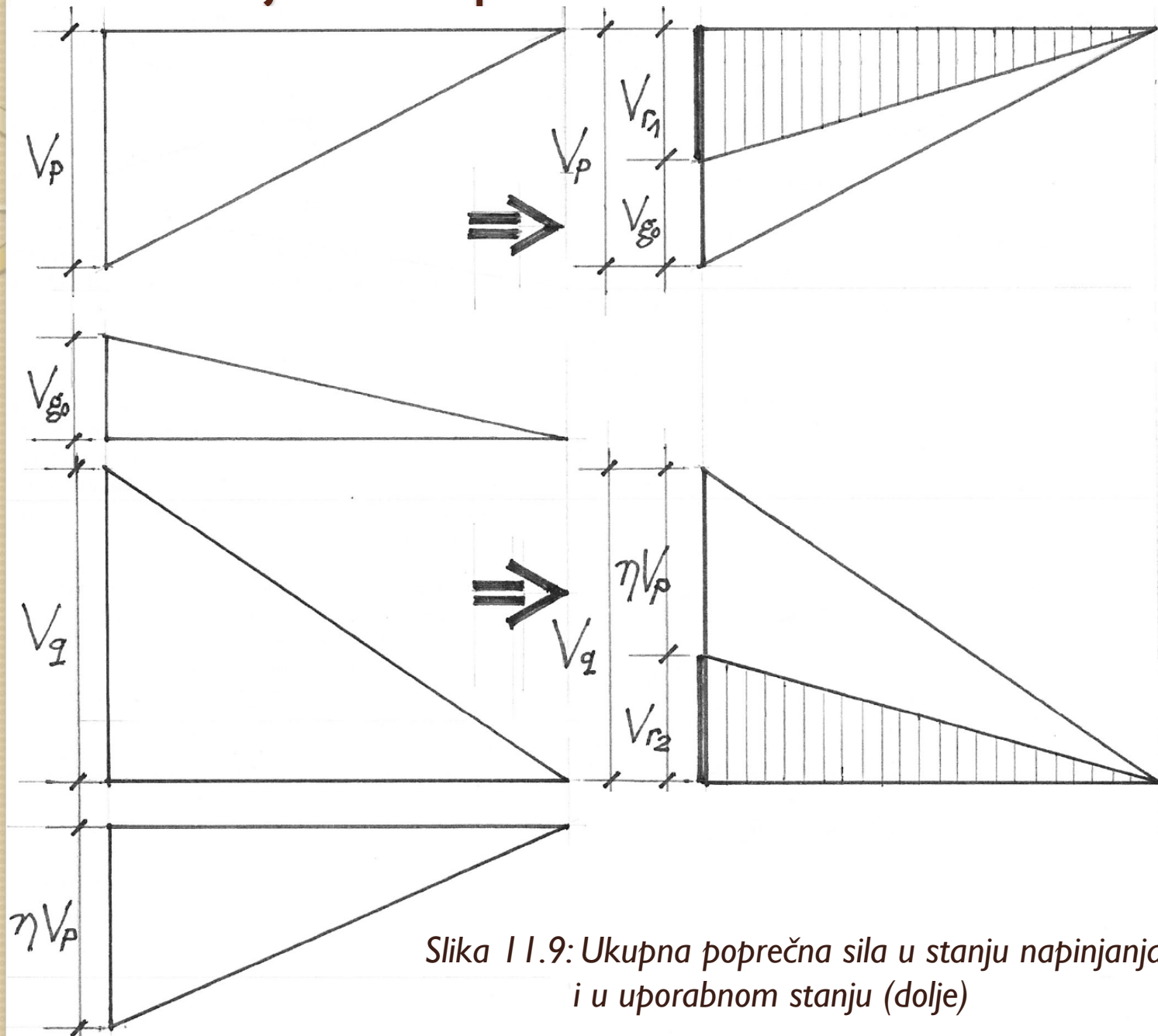
Ukupna poprečna sila sastoji se od udjela **djelujućeg opterećenja** i udjela **skretnih sila** izazvanih **silom prednapinjanja**.

Na slici 11.9 predočeni su **tijekovi poprečnih sila** duž polovice nosača od ovih pojedinačnih udjela i pripadne **ukupne poprečne sile** za **dva** spomenuta **stanja**:

- stanje pri **napinjanju natega** i
- **uporabno** stanje.

Uzet je slučaj **jednoliko zakrivljene natege**.

1.2 Stanje neraspucalosti



Slika 11.9: Ukupna poprečna sila u stanju napinjanja (gore) i u uporabnom stanju (dolje)

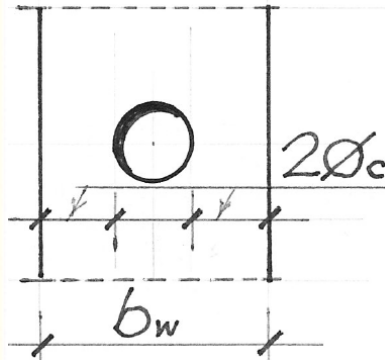
11.2 Stanje neraspucalosti

Sa slike je očito kako treba nastojati da **ukupna poprečna sila u dvama stanjima** bude približno **podjednaka**:

$$V_{R1} \approx V_{R2} \quad (11.1)$$

Do prije 20-ak godina uzimalo se je kako i **očvršli uštrcni mort** sudjeluje u prenošenju **poprečne sile**.

Naime, bjelodano je jasno kako se **u stanju napinjanja natega oslabljuje hrpat** (slika 11.10).



Slika 11.10: Djelotvorna širina hrpta

Upravo je radi **prenošenja poprečne sile** nastala potreba da **širina hrpta** bude najmanje jednaka **dvostrukomu promjeru zaštitne cijevi natega**.

Dakle u **stanju je napinjanja djelotvorna širina hrpta** neupitno:

$$b_w' = b_w - \varnothing_c \quad (11.2)$$

11.2 Stanje neraspucalosti

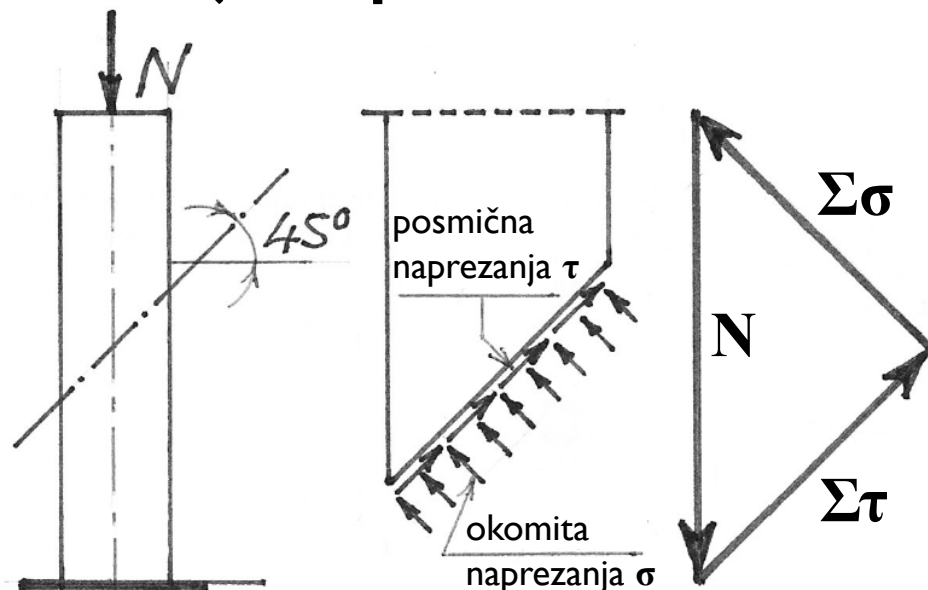
Kako je već rečeno, za uporabno je stanje do prije 20-ak godina vrijedilo:

$$b_w' = b_w - 0,5\varnothing_c \quad (11.3)$$

Međutim, i **iskustvo** i **pokusi** nedvosmisleno pokazuju kako se **ne može računati na udio očvrsloga uštrcnog morta**, pa dakle vrijedi izraz (11.2).

A sada ćemo pokazati kako su tzv. **posmična naprezanja**, τ_{xy} , samo jedna **pomoćna računaska veličina** s pomoću koje se

izračunavaju **glavna naprezanja**, a **ne nešto što stvarno djeluje u AB (ili PB) sklopu**.



Na slici 11.11 predočena je **betonska prizma** podvrgnuta djelovanju **osne sile**.

Slika 11.11: Naprezanja i rezne sile u kosom presjeku prizme

11.2 Stanje neraspucalosti

Ako zamislimo da smo prizmu **presjekli** ravninom pod kutom 45° prema osi prizme, očito je da **i gornji i donji dio prizme moraju biti u ravnoteži**.

Promatrat ćemo **gornji dio** (srednji dio slike 11.11).

Duž presječne djeline djeluju **okomita** (normalna) i **posmična** (tangencijalna) naprezanja.

Na desnom su dijelu slike predočene **rezultante** tih naprezanja.

Iz uvjeta **ravnoteže** slijedi da su one **jednake** po veličini, iz čega proizlazi kako i pripadna **naprezanja** moraju biti **jednaka**.

Okomita naprezanja od, primjerice, **10 N/mm²** nisu **ništa neobično** u betonskim sklopovima.

Međutim, **posmično** naprezanje **te veličine** nijedan **beton ne bi mogao podnijeti**.

1.2 Stanje neraspucalosti

Iz ovoga je razmatranja **očito**, kako je već rečeno, da su **posmična naprezanja** samo **pomoćna veličina** što služi za izračunavanje **glavnih naprezanja**, te da je **nužno** izračunati **glavna naprezanja**.

Za **neraspucale** nosače ona se računaju po pravilima znanosti o **otpornosti gradiva**:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{x,y}^2} \quad (11.4)$$

U daljim ćemo izrazima **izostaviti indekse** uz oznaku **posmičnog** naprezanja, pa ćemo pisati samo τ .

Oсно (normalno) naprezanje računa se iz izraza:

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} - \frac{P \cdot e \cdot y}{I} - \frac{M_q \cdot y}{I} \quad (11.5)$$

Ako drugi član u ovom izrazu pomnožimo i podijelimo s ploštinom presjeka, dobit ćemo:

11.2 Stanje neraspucalosti

$$\sigma_x = -\frac{P}{A} \left(1 + \frac{e \cdot y}{i^2} \right) - \frac{M_q \cdot y}{I} \quad (11.6)$$

S druge strane, **posmično se naprezanje** računa iz poznatog izraza iz Otpornosti gradiva (slika 11.12):

$$\tau = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (11.7)$$

U ovom su izrazu:

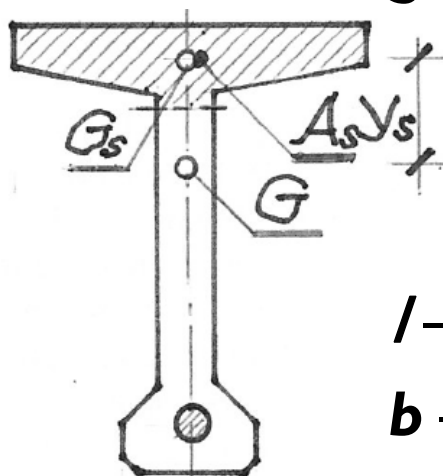
V – poprečna sila u promatranomu presjeku;

S – **statički moment** dijela ploštine presjeka **iznad** razine za koju računamo posmično naprezanje:

$$S = A_s \cdot y_s \quad (11.8)$$

I – moment tromosti presjeka;

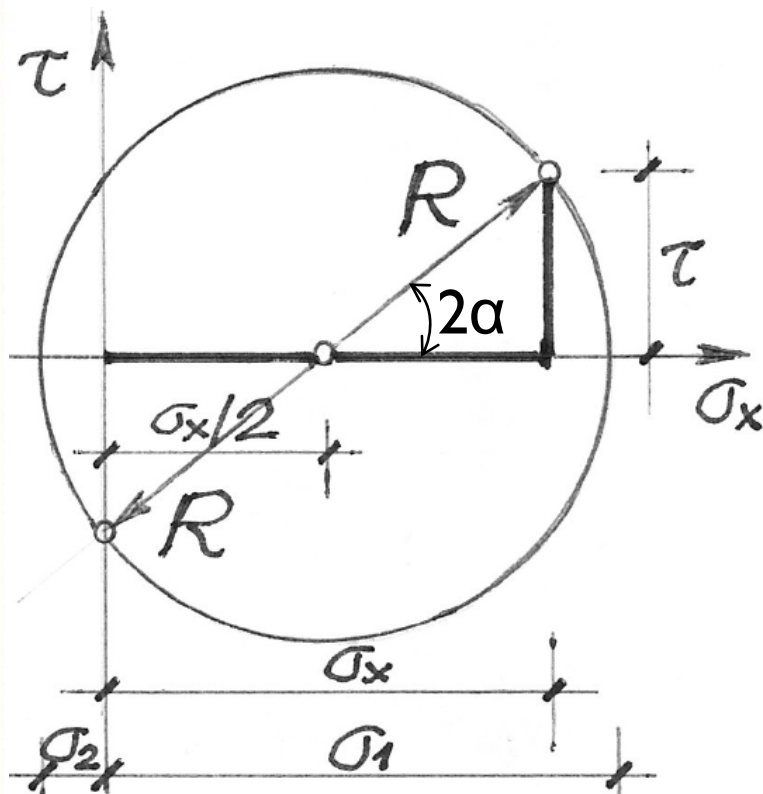
b – djelotvorna debljina hrpta.



Slika 11.12: Računanje posmičnoga naprezanja u presjeku razvedena oblika

11.2 Stanje neraspucalosti

Iz Otpornosti je gradiva također poznato kako se **ravninsko stanje naprezanja** može predočiti u obliku **Mohrove kružnice** (slika 11.13).



Slika 11.13: Mohrova kružnica za ravninsko stanje naprezanja

Ako u koordinatnom sustavu σ_x, τ naneseemo izračunana naprezanja, σ_x i τ , mogu se na osnovi geometrijskih odnosa predočeni na slici izračunati **glavna naprezanja**, σ_1 i σ_2 , te kut α pod kojim tlačno naprezanje, σ_1 , djeluje u odnosu na uzdužnu os.

Naime, iz slike se vidi kako je **polumjer kružnice**:

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (11.9)$$

11.2 Stanje neraspucalosti

S druge strane vidimo kako je **središte kružnice** na apscisi $\sigma_x/2$.

Iz ovih se odnosa lako dobiju veličine glavnih naprezanja:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (11.10)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (11.11)$$

Iz **Mohrove** se kružnice jasno vidi kako se **ne mogu izbjeći glavna vlačna naprezanja, σ_2** .

Naime, kako god **neznatno** bilo **posmično naprezanje**, vrijednost **korijena** uvijek je **veća** od vrijednosti **pred njim** ($\sigma_x/2$) u jedn. (11.11), pa su dakle **vlačna naprezanja neizbježiva**.

Zbog toga je uvijek nužno predvidjeti stanovitu **najmanju količinu poprečne armature** (tzv. **minimalnu armaturu**).

1.2 Stanje neraspucalosti

Za glavno vlačno naprezanje, σ_2 , postoje **dvije granične vrijednosti**:

- **donja i**
- **gornja.**

Ako **donja nije premašena**, nije potrebno proračunavati **poprečnu armaturu**.

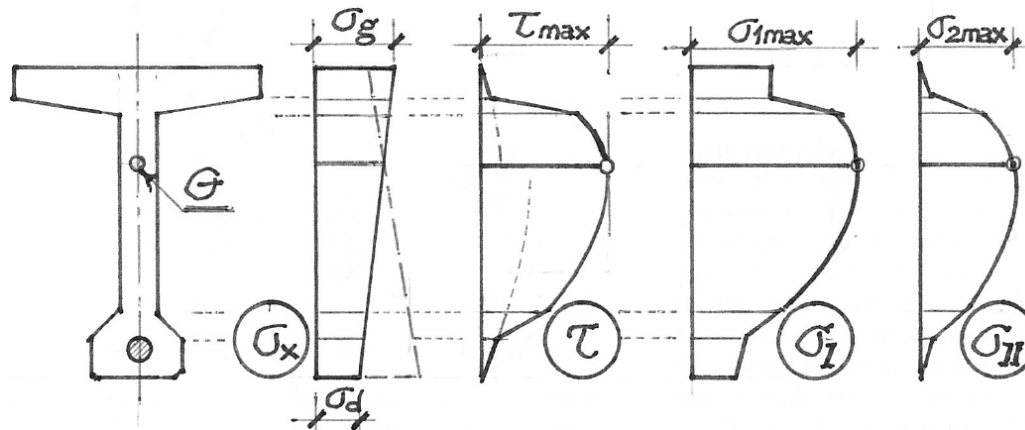
Ako je pak **gornja premašena**, nužna je i **kosa poprečna armatura**.

Međutim, iz **praktičnih se razloga** gotovo nikada **ne poseže** za ovim **drugim rješenjem**, nego se radije **podebljava hrbat**.

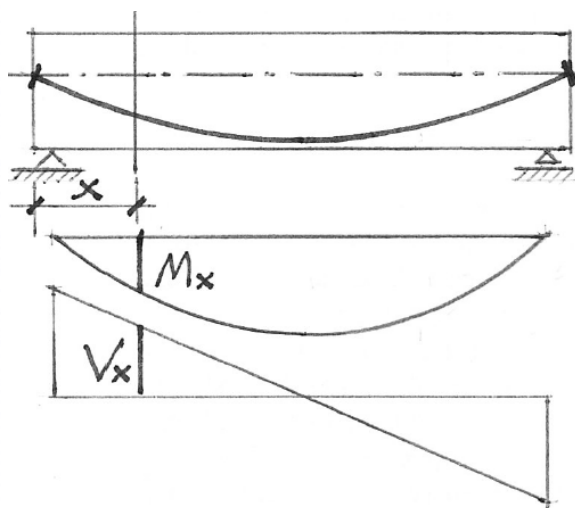
Iznimkom su **visoki sandučasti nosači mostova** u kojih ima mjesta i za **dva sloja poprečne armature**, koja nerijetko zna biti i **većega promjera** ($\varnothing 20$, pa i $\varnothing 25$ mm).

11.2 Stanje neraspucalosti

Pogledajmo sada kako izgledaju tijekovi računskih i glavnih napreznja po presjeku PB nosača (slika 11.14).



Slika 11.14: Glavna napreznja u presjeku PB nosača



Pređočeni tijekovi napreznja odnose se na presjek prikazan pojednostavnjeno na slici 11.15.

Poprečni se presjek sastoji od triju dijelova **nepromjenjive** širine i dvaju poteza s postupno **promjenjivom** širinom.

To se odražava na tijek **posmičnih napreznja**.

Slika 11.15: Presjek za koji su izračunana glavna napreznja

11.2 Stanje neraspucalosti

Naime, pogledamo li izraz za **posmično naprezanje** (11.7), vidimo da je u njemu samo **statički moment promjenjiv**, te da se mijenja po **zakonu parabole**.

Stoga je i **tijek posmičnih naprezanja takva oblika**.

Na potezima **postupne promjene širine presjeka** taj tijek slijedi **parabolu trećega reda**, ali je ona toliko **ispružena** da se može pojednostavnjeno uzeti **pravčasta** raspodjelba.

S druge strane, **uzdužna naprezanja pravčaste** (linearne) su raspodjelbe po presjeku i razmjerno **malo odstupaju** od **težišnog** naprezanja.

Na **rubovima** presjeka (gornjem i donjemu) **posmično naprezanje** uvijek **iščezava**, pa iz izrazā (11.10) i (11.11) slijedi da je na tim rubovima:

$$\sigma_1 = \sigma_x \quad (11.12) \text{ i}$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (11.13)$$

I 1.2 Stanje neraspucalosti

Između rubova glavna su **naprezanja** raspodijeljena po **krivuljama** što u dobroj mjeri **slijede krivulju raspodjelbe posmičnih naprezanja** (slika I 1.14).

U slučaju **poprečnoga prednapinjanja** izrazi se **posložnjavaju** utoliko što ulazi u igru i σ_y :

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (11.14)$$

To ima odraza i na raspodjelbu glavnih naprezanja, pa tako na rubu σ_2 biva jednako σ_y .

11.3 Stanje raspucalosti

Ako se premaši **donja** dopustiva granica **glavnoga vlačnog naprezanja**, treba predvidjeti **poprečnu armaturu**.

U tu svrhu valja prvo odrediti kut glavnih naprezanja, α .

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau}{\sigma_x} \quad (11.15)$$

Prisjetimo se kako je u **savijanih AB nosača** najveće posmično naprezanje u **razini težišta presjeka**, a kako je u toj razini $\sigma_x = 0$, ono je ujedno i **glavno naprezanje**.

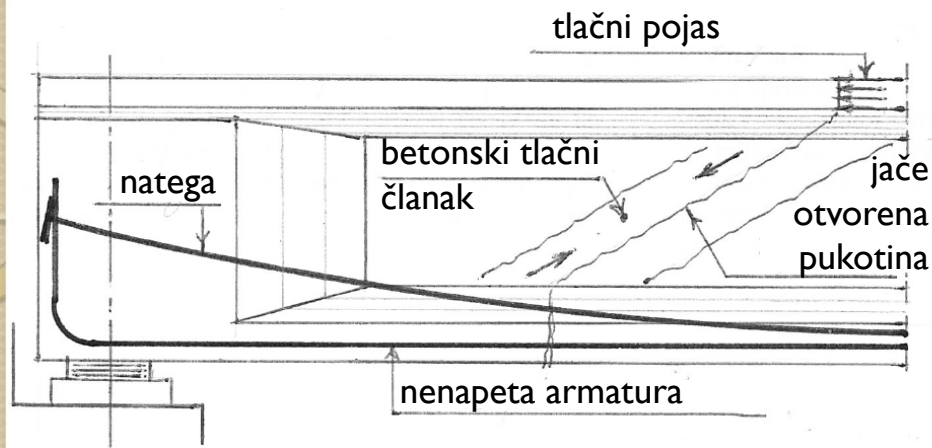
Naime, za $\sigma_x = 0$ $\tan 2\alpha = \infty$, pa je $2\alpha = 90^\circ$ ili $\alpha = 45^\circ$.

Međutim, u **PB** je **nosača uvijek** $\sigma_x \neq 0$, pa je uvijek $\alpha < 45^\circ$.

Dobro je što su tlačni članci, a onda i **pukotine, položitiji** iz dvaju razloga (slika 11.16):

- pri položitijoj pukotini veći broj stremenova preuzima istu poprečnu silu i
- mjerodavna je manja poprečna sila.

1.3 Stanje raspucalosti



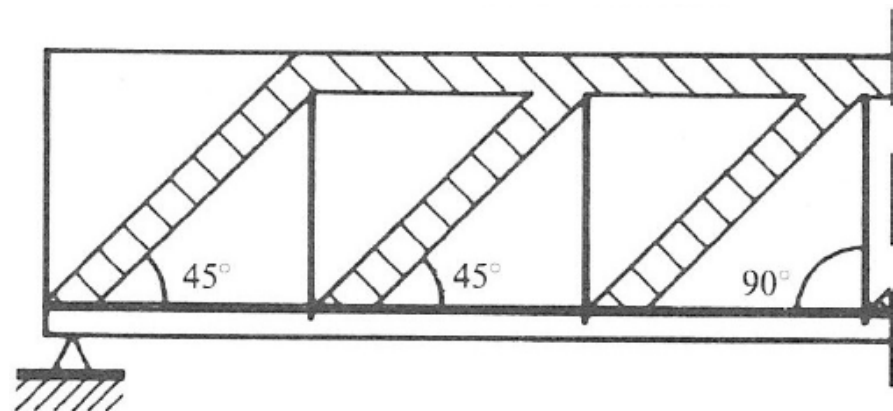
Slika 11.16: Prednosti položitih pukotina

ovoj analogiji rešetke (slika 11.17) nego AB nosači.

To je zato što su u PB nosača u pravilu **hrptovi tanji**, a upravo se je **omjer širina hrpta i gornje pojasnice** pokazao **mjerodavnim** u ocjeni valjanosti Mörschove analogije (slika 11.18).

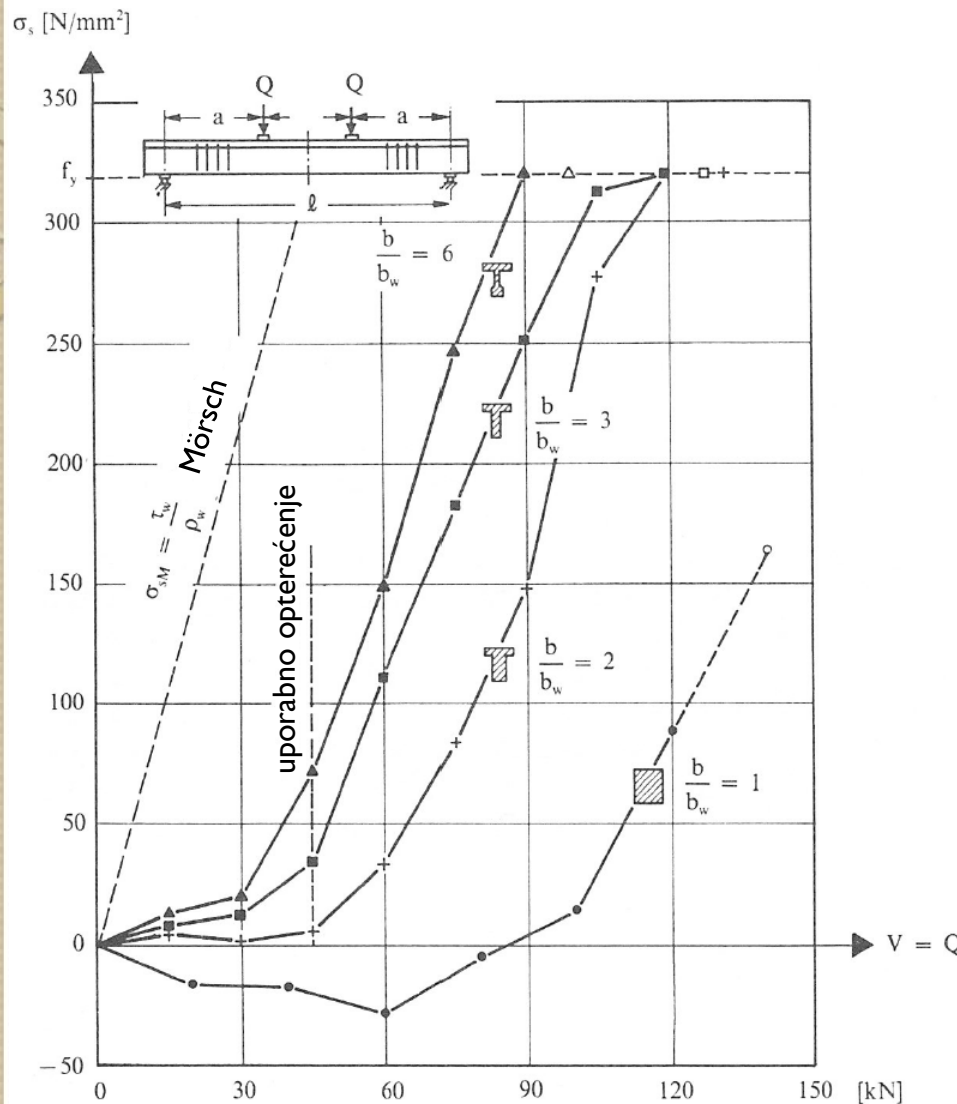
Naime, **vrh je pukotine jače odmaknut od ležaja**, pa se na nj odnosi **manja poprečna sila**.

Valja još naglasiti kako se općenito **PB nosači** ponašaju pod djelovanjem **poprečne sile bliže Mörsch-**



Slika 11.17: Povećanje pojasne sile u nosača s okomitim stremenovima

1.3 Stanje raspucalosti



Slika 11.18: Naprezanja u stremenovima u zavisnosti od debljine hrpta

Slika 11.18 predočuje glavne nalaze znamenitih **Stuttgartskih pokusā** do kojih je došlo zbog jedne **omaške**.

Naime, u jednu je AB gredu **omaškom** ugrađeno **svega 40 % potrebne poprečne armature**, a ipak **nije uočeno ništa neželjeno** u njezinu kasnijem **ponašanju**.

Slika jasno pokazuje kako je **ponašanje to bliže Mörschovu pravcu** što je **hrbat tanji**.

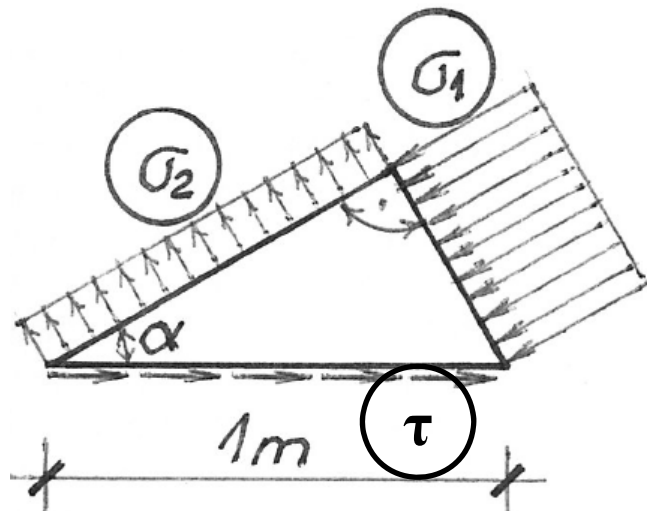
11.3 Stanje raspucalosti

Kako je već rečeno, **PB nosači** mogu se s više opravdanja računati na djelovanje **poprečne sile** po **Mörschovoj analogiji rešetke**.

Prijedimo na **proračun potrebne armature**.

Ako je $\sigma_2 > \sigma_{2dop}$, to znači da u smjeru glavnih **tlačnih** naprezanja treba očekivati **pukotine**.

Kao i inače u **AB** sklopova, **ne računa se s vlačnom čvrstoćom betona**, nego **ukupnu vlačnu silu** treba prenijeti **armatura**.



Izdvojimo **trostranu prizmu** s najduljom pobočkom **jedinične** duljine iz **hrpta nosača** (slika 11.19).

Na **položitiju** pobočku djeluju glavna **vlačna** naprezanja.

Slika 11.19: Trostrana prizma isječena iz hrpta nosača

1.3 Stanje raspucalosti

Rezultante glavnih naprezanja u ravnoteži su s rezultantom posmičnih naprezanja po oplošju najdulje pobočke.

Rezultanta je glavnih **vlačnih** naprezanja:

$$T = \sigma_2 \cdot \cos\alpha \cdot b_w' \quad (11.16)$$

Ovdje se pojavljuje b_w' zato što je i σ_2 izračunan uz pretpostavku te širine hrpta.

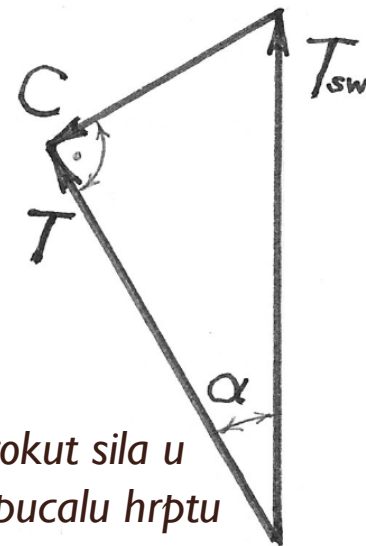
Ova se sila razlaže u **trokut sila** (slika 11.20):

- u **vlačnu** silu u smjeru **armature** i
- u **tlačnu** silu u smjeru **betonskih tlačnih članaka**.

Vlačna je sila u smjeru armature:

$$T_{sw} = \frac{T}{\cos\alpha} = \sigma_2 \cdot b_w' \quad (11.17)$$

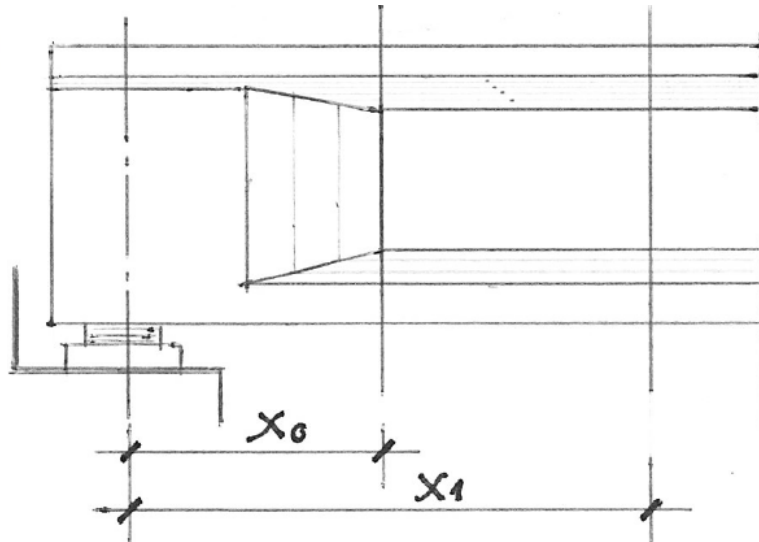
Ovo je sila po **l m duljine nosača**; ona **nije jednoliko raspodijeljena** nego sukladno tijeku **poprečne sile**.



Slika 11.20: Trokut sila u raspucalu hrptu

11.3 Stanje raspucalosti

Ovu silu treba izračunati u najmanje dvama presjecima. Prvi je presjek na početku proširenja hrpta nosača (slika 11.21).



Slika 11.21: Presjeci što se provjeravaju

Naime, **lijevo** od ovoga presjeka **hrbat** se razmjerno naglo **širi**, pa nema bojazni od premašenja dopustivog naprezanja

σ_{2dop} .

Drugi se presjek odabire nasumce.

Ploština je presjeka potrebne poprečne armature:

$$A_{sw} = \frac{T_{sw}}{f_{swy}} \quad (11.18)$$

Obično se odabire razmak šipaka, pa se odredi njihov promjer.

1.3 Stanje raspucalosti

Naravno, može se postupiti i **obrnuto**.

Zgodno je **vlačnu silu** u poprečnoj **armaturi** izraziti u **[kN]**,
a **dopustivo naprezanje u armaturi** podijeliti sa **10**.

Tako se **ploština armature** dobije u **[cm²]**:

$$A_{sw} = \frac{T_{sw}}{f_{swy}} = \frac{[kN]}{[N / mm^2 \cdot 10^{-1}]} \Rightarrow [cm^2]$$

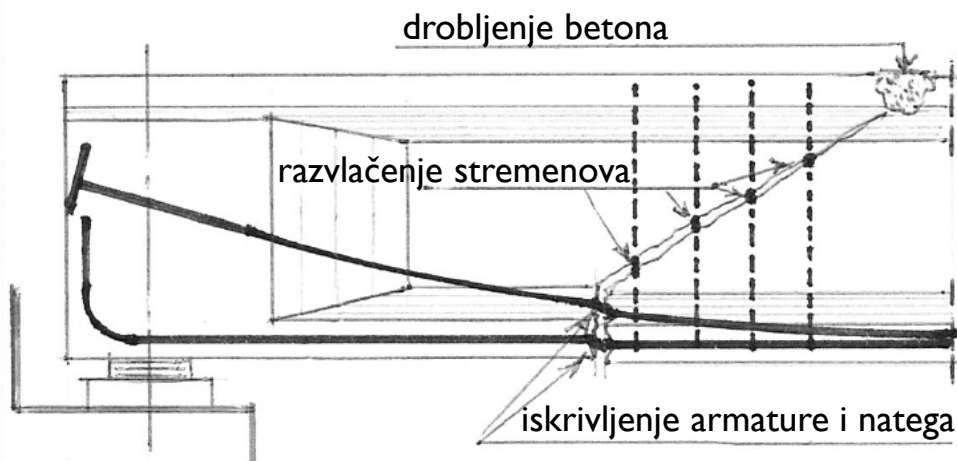
11.4 Granično stanje nosivosti

Prije nego što prijedemo na određivanje potrebne **ploštine** poprečne **armature** pogledajmo moguće **tipove sloma** PB nosača pod djelovanjem **poprečne sile**.

Općenito razlikujemo **dva glavna tipa sloma**:

- **vlačni** slom hrpta;
- **tlačni** slom hrpta.

Prvi nastaje kada je **poprečna armatura** hrpta **preslaba** (poddimensionirana), pa **kose pukotine** zadiru duboko u tlačni pojas nosača, zbog čega on trpi slom (slika 11.22)



Slika 11.22: Posmično-savojni slom nosača

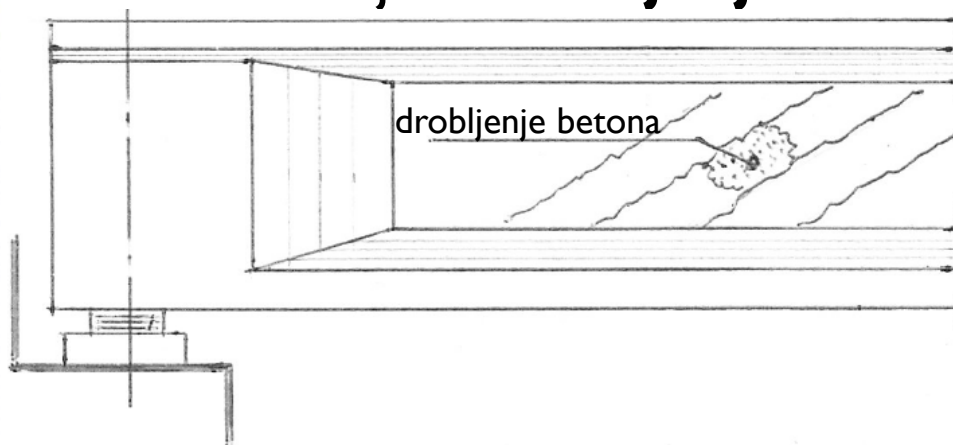
Kadšto se ovaj tip sloma naziva i **posmično-savojnim** slomom (njem. *Schubbiegebruch*).

U svakom slučaju, radi se o vrlo **opasnu** tipu sloma i treba ga svakako izbjeći. 30

11.4 Granično stanje nosivosti

Ako je pak hrpat tanak i jako armiran, može se dogoditi da betonski tlačni članci pretrpe slom pri višim razinama opterećenja.

Slom se očituje u **drobljenju betona hrpta** (slika 11.23).



Slika 11.23: Slom nosača zbog drobljenja betona u hrptu

Ovaj se slom naziva i **slomom tlačnih članaka** (*Druckstrebenbruch*).

I on je **opasan** tip sloma, a može se izbjeći **ograničavanjem glavnoga tlačnog naprezanja**, što se

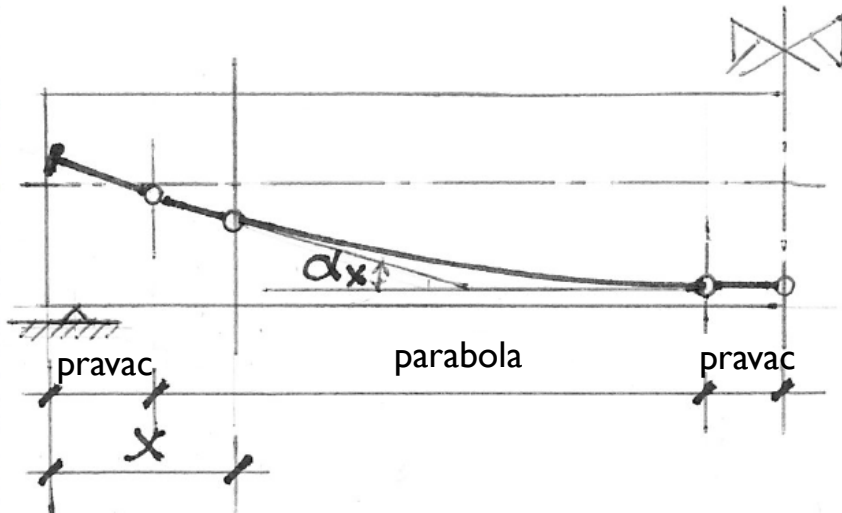
najjednostavnije postiže **podebljavanjem hrpta**.

Uz ove tipove kadšto se javljaju i tipovi sloma uzrokovani nepomnijom obradbom pojedinosti (detalja):

- zbog proklizavanja vlačne armature (premala dulj. sidrenja) i
- zbog popuštanja zazubljenja zrna puniva (preširoke pukotine).

11.4 Granično stanje nosivosti

Sada definirajmo pojam **mjerodavne poprečne sile** u **trima stanjima** (slika 11.24):



- pri napinjanju:

$$V_{mp} = V_{g0x} - P_{0x} \cdot \sin \alpha_{px} \quad (11.20)$$

- u uporabi:

$$V_{ms} = V_q - \eta P_{\infty x} \cdot \sin \alpha_{px} \quad (11.21)$$

Slika 11.24: Presjek u kojem se računa mjerodavna poprečna sila

- u graničnomu stanju nosivosti:

$$V_{mu} = \gamma_g \cdot V_g + \gamma_q \cdot V_q - \gamma_p \cdot P_u \cdot \sin \alpha_p \quad (11.22)$$

Ovdje se susrećemo s istim onim **faktorima sigurnosti** koje smo susreli pri razmatranju **graničnoga stanja nosivosti pri savijanju**.

Novost je jedino faktor γ_p , koji se uzima u obzir zavisno od toga djeluje li **sila prednapinjanja povoljno ili nepovoljno**.

11.4 Granično stanje nosivosti

Ako dakle sila prednapinjanja djeluje **povoljno**, uzima se da je $\gamma_p < 1$ (obično = **0,9**), a ako djeluje **nepovoljno**, uzima se da je $\gamma_p > 1$ (obično = **1,1**).

Međutim, ovdje je mnogo važnije utvrditi ili, točnije, **procijeniti kolika može biti sila prednapinjanja** pri doseguću **granične nosivosti** pod djelovanjem **poprečne sile**.

Naime, vidjeli smo kako pri doseguću **granične nosivosti pri savijanju** ona **potpuno iščezava**.

Ovdje pak tomu **ne mora biti tako**; dapače, gotovo nikada i **nije tako**.

Zato se općenito uzima da je:

$$P_u = A_p \cdot f_{py} \quad (11.23)$$

Ovo je računski **najveća sila** što se može pojaviti u **natezi**.

Sada pošto smo odredili V_{mu} postupamo na **potpuno jednak način** kao u slučaju **AB** sklopova.

11.4 Granično stanje nosivosti

Prvo računamo tzv. **nazivno posmično naprezanje**:

$$\tau_n = \frac{V_{mu}}{b_w \cdot z} \quad (11.24)$$

Ono se zatim uspoređuje s trima dopustivim vrijednostima:

$$\tau_r, \quad 3\tau_r \text{ i } 5\tau_r$$

Ako je $\tau_n < \tau_r$, **nije potrebna dodatna** (proračunska) **armatura** – dostatna je najnužnija (konstrukcijska).

S druge strane, **mora biti ispunjen uvjet**:

$$\tau_n \leq 5\tau_r \quad (11.25)$$

Gornja se granica, $5\tau_r$, nipošto ne smije premašiti – pokaže li račun da je premašena, **mora se podebljavati hrbat**.

Imamo dakle **dva različita područja** vrijednosti nazivnoga posmičnog naprezanja:

$$3\tau_r \geq \tau_n \geq \tau_r \quad (11.26)$$

11.4 Granično stanje nosivosti

$$3\tau_r \leq \tau_n \leq 5\tau_r \quad (11.27)$$

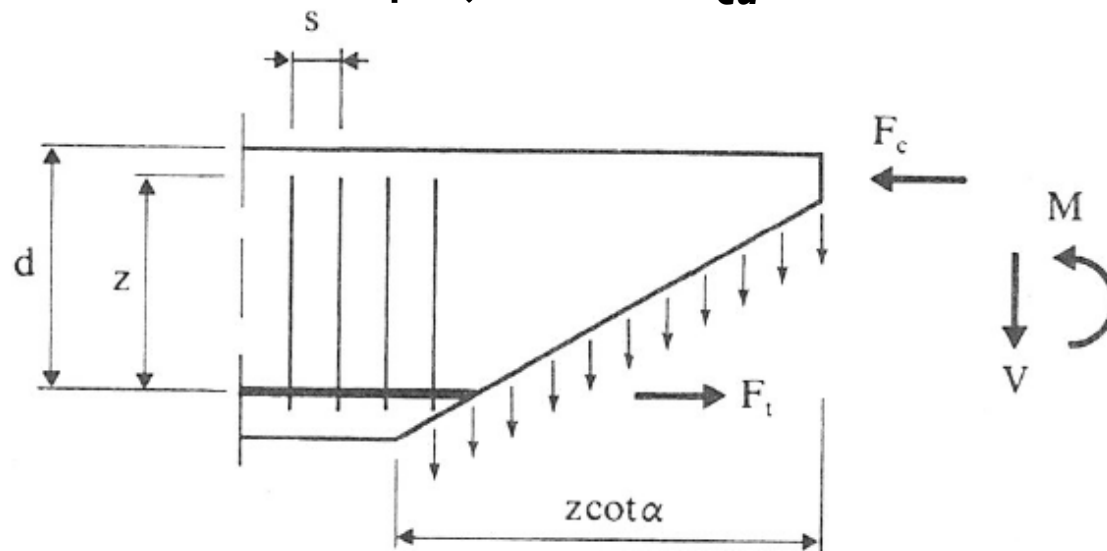
Vrijednosti τ_r propisane su **normama**.

U prvom slučaju **dio poprečne sile prenosi beton**, a na **armaturu** otpada:

$$V_{su} = V_{mu} - V_{cu} \quad (11.28)$$

pri čemu je V_{cu} dio poprečne sile što ju prenosi beton.

U drugom pak slučaju **cjelokupnu poprečnu silu** preuzima **armatura**, pa je dakle $V_{cu} = 0$.



Mehanizam prenošenja **poprečne sile armaturom** predočen je na slici 11.25.

Radni je presjek nagnut za kut $\alpha < 45^\circ$.

Slika 11.25: Proračunska shema za sile u stremenovima

11.4 Granično stanje nosivosti

Dio poprečne sile što ju prenosi beton dobije se iz izraza:

$$V_{cu} = 2,5 \cdot \tau_r \cdot b_w \cdot z \cdot \left(1 + \frac{M_{Dx}}{M_{sux}} \right) \quad (3.29)$$

Vidimo kako se on **razlikuje** od odgovarajućeg izraza što vrijedi za **AB sklopove** samo za **množitelj u zagradi**.

S pomoću njega uzima se u obzir da u PB sklopova postoji **veći dio nosača što nije raspucao**, pa dakle **nije isključen iz nosivosti**.

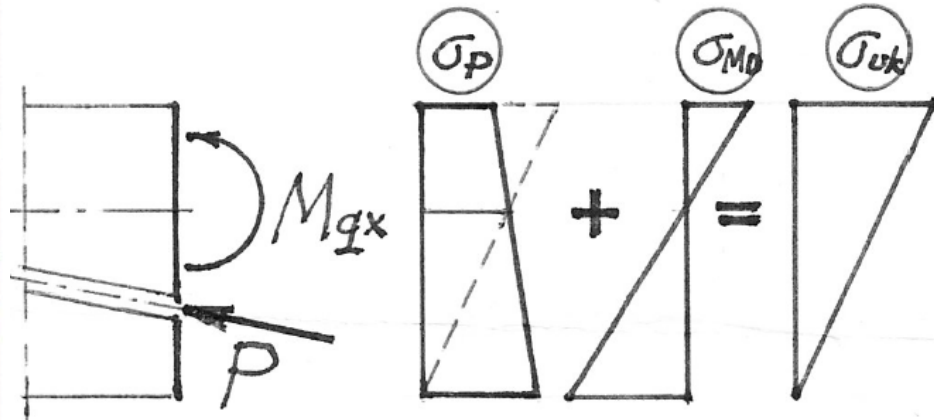
U brojniku je izraza u zagradi:

M_{Dx} – **moment rubnoga rastlačenja** u promatranomu presjeku – pojam s kojim smo se susreli u poglavlju o **stupnjevima prednapinjanja**.

U nazivniku je pak:

M_{sux} – **granični moment savijanja od vanjskih opterećenja** u istomu presjeku.

11.4 Granično stanje nosivosti



Slika 11.26: Moment rubnoga rastlačenja

Na slici 11.26 lijevo predloženo je stanje naprezanja u promatranomu presjeku pod djelovanjem sile prednapinjanja.

Moment rubnoga rastlačenja možemo izračunati izjednačivanjem rubnog naprezanja od sile prednapinjanja i od momenta savijanja:

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W_d} = -\frac{P}{A} \left(1 + \frac{e}{j_g} \right) \quad (11.30)$$

Odavde je izravno:

$$M_D = \frac{P \cdot W_D}{A} \left(1 + \frac{e}{j_g} \right) \quad (11.31)$$

U množitelju pred zagradom prepoznajemo izraz za gornji odsječak obične jezgre presjeka:

$$W_d/A = j_g \quad (11.32)$$

11.4 Granično stanje nosivosti

Uzmemo li to u obzir, dobit ćemo vrlo jednostavan izraz za M_D :

$$M_D = P(e + j_g) \quad (11.32)$$

Granični pak moment savijanja od vanjskih opterećenja u ovom presjeku dobije se na način prikazan u poglavlju o **graničnoj nosivosti pri savijanju**:

$$M_{sux} = \gamma_g \cdot M_g + \gamma_q \cdot M_q \quad (11.33)$$

Ipak, valja imati na umu kako se radi o **momentu u promatranom**, a ne u **najjače napregnutom presjeku**.

Sada znamo koji **dio poprečne sile prenosi armatura**, pa lako izračunamo njezinu **potrebnu ploštinu**:

$$A_{sw} = \frac{V_{ru}}{f_{swy}} \quad (11.34)$$

pri čemu je f_{wsy} – **granica popuštanja čelika stremenova**.

11.4 Granično stanje nosivosti

Opet postupamo kao i u slučaju **odabira armature za granično stanje uporabe**:

- za **odabrani promjer** računamo **razmak stremenova** ili
- **obrnuto**.

Preporučljivo je da **promjer šipaka stremenova** bude **što tanji**, ali **ne smije biti tanji od 8 mm**.

Najčešće se rabi:

- $\emptyset 8\div 12$ mm (u visokogradnji) i
- $\emptyset 12\div 20$ mm (u mostogradnji).