

13 SIDRENO PODRUČJE NOSAČA

13.1 Uvod

U ovom ćemo poglavlju razmotriti ova pitanja:

- **tijek unutarnjih sila** u sidrenom području nosača,
- **sile cijepanja** i
- **raspored pravih natega** u poprečnomu presjeku sukladno **tijeku tlačnih naprezanja**.

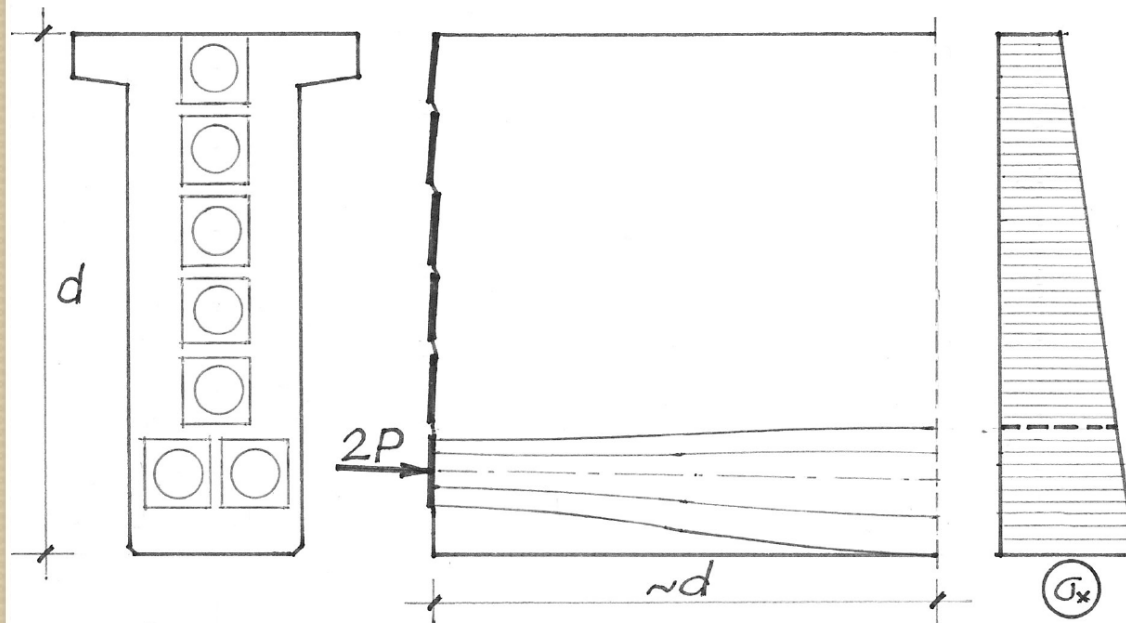
Sidra natega raspoređuju se **na čelu nosača** tako da ih što više bude u **srednjoj ravnini**, a **udvojena sidra** mogu biti samo **na dnu** i to u najviše **dva sloja**.

Preko **sidara** prenose se **goleme pojedinačne sile**, od 300 kN, pa sve do **3,0 MN**.

Te se sile prenose na razmjerno **malu plohu sidrene ploče** izmjera 10 10 cm do 30 30 cm, što je još **oslabljena sidrenim tuljcem** (lijevkom).

13.1 Uvod

Po **Navierovu** načelu u nosaču opterećenu **velikim pojedinačnim silama** na čelu nastaje u području **duljine** približno jednake **visini nosača složeno stanje naprezanja**, a već počev od presjeka na **kraju** toga područja stanje se znatno **pojednostavnjuje** i vrijede jednostavni zakoni **otpornosti gradiva** (slika 13.1).



Slika 13.1: Sidreno područje PB nosača i tijek uzdužnih naprezanja na njegovu rubu

Natege su uz krajeve nosača obično **nagnute** s obzirom na uzdužnu os.

Taj je kut redovito **malen** (do oko 10°) pa **ne utječe znatno** na **stanje naprezanja** u području uvođenja sile.

Zato se taj utjecaj redovito **zanemaruje**.

13.1 Uvod

Pogleda li se **čelo** nosača, vidi se da su **sidra** uglavnom raspoređena **u srednjoj ravnini**.

Očito je da **sidrene sile** u ravnini **neposredno ispod sidrenih ploča** djeluju na njihovoj **maloj širini**.

S druge strane, **na udaljenost približno jednakoj visini nosača, d** , naprezanja su **jednoliko raspodijeljena** po cijeloj širini nosača, **b** .

U obama skrajnjim presjecima **naprezanja** su **okomita** na njih.

Naime, ako bismo pretpostavili da su **silnice** (trajektorije) **naprezanja** što spajaju ova dva presjeka PRAVCI, ti bi pravci morali biti KOSI s obzirom na **obje glavne ravnine** (vodoravnu i okomitu).

Iz toga bi onda slijedilo da **u skrajnjim ravninama** djeluju sastavnice naprezanja POPRIJEKO na **uzdužnu os** i to i u **vodoravnoj** i u **okomitoj** ravnini.

Njih, međutim, **nema što uravnotežiti**, iz čega slijedi da **ona ne postoje**.

13.1 Uvod

Ova nas spoznaja navodi na vrlo važan zaključak:

- **Silnice naprezanja** moraju biti **DVOSTRUKO ZAKRIVLJENE**.

Iz ove pak činjenice slijedi da moraju postojati **POPREČNA NAPREZANJA**, što **prisiljavaju** silnice naprezanja da budu **zakrivljene**.

Osim toga, naprezanja **bliže sidrenoj ploči** moraju biti **TLAČNA**, a ona **udaljenija VLAČNA**.

Tlačna su uglavnom **uravnotežena** **TRENJEM** pod sidrenim pločama, dok **vlačna** izazivaju tzv. **SILE CIJEPANJA** u betonu, pa se moraju preuzeti **armaturom**.

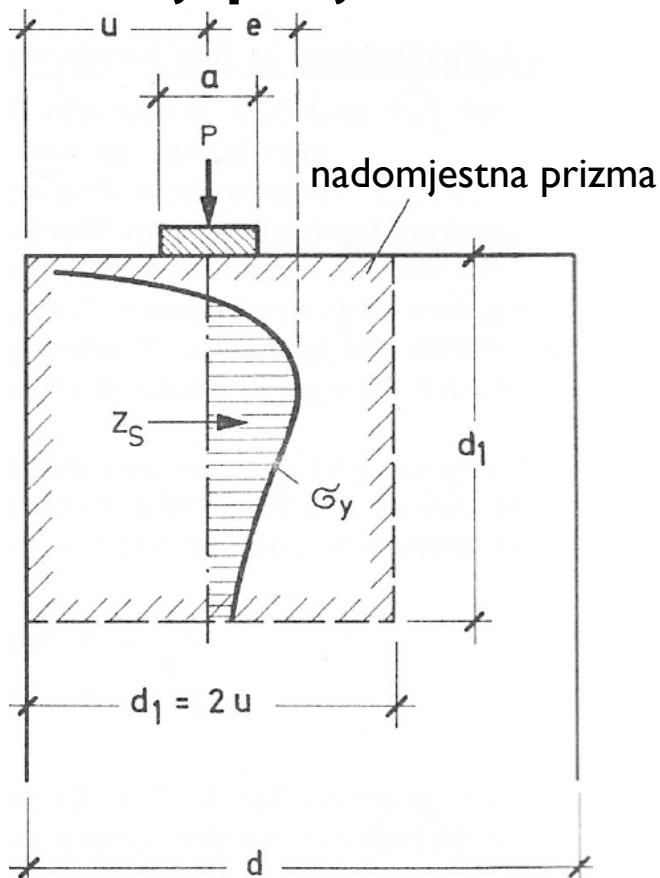
Osim sila cijepanja što djeluju u dvama poprečnim smjerovima, po visini i po širini nosača, u području uvođenja sile prednapinjanja djeluju i **vlačne sile** što proizlaze iz **uvjeta ravnoteže momenata unutarnjih i vanjskih sila**, kako ćemo pokazati kasnije.

13.1 Uvod

Do sada smo razmatrali raspored sidara što je manje-više **simetričan**.

U slučaju izrazito **nesimetrična** položaja sidra natege na čelu nosača javljaju se **dvije razine** problema:

- **sile cijepanja** unutar tzv. **nadomjestne prizme** (slika 13.2)



- **opća (globalna) ravnoteža** unutar **dijela nosača duljine d** (slika 13.3).

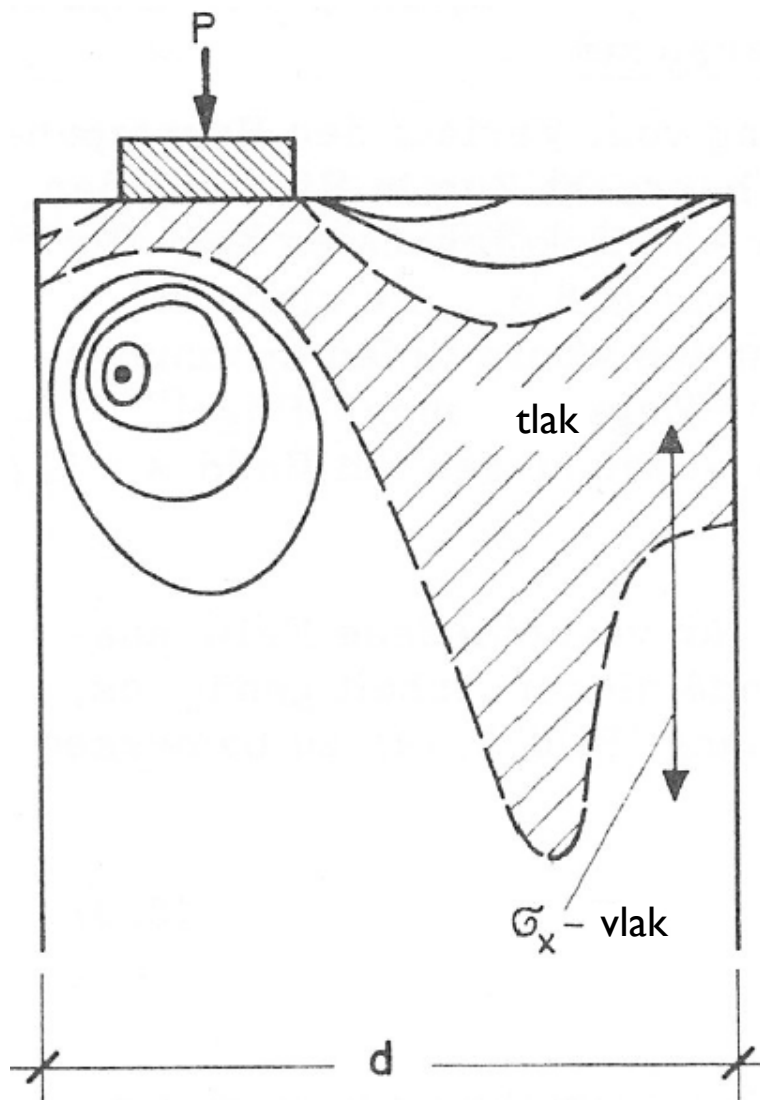
Dobru **predočbu** o stanju naprežanja u promatranom dijelu nosača možemo dobiti na osnovi **IZOBARA poprečnih naprežanja** (slika 13.3).

Izobare se mogu odrediti **fotoelastičnim postupkom** ili s pomoću **metode konačnih elemenata**.

Slika 13.2: Nadomjestna prizma unutar sidrenoga područja

13.1 Uvod

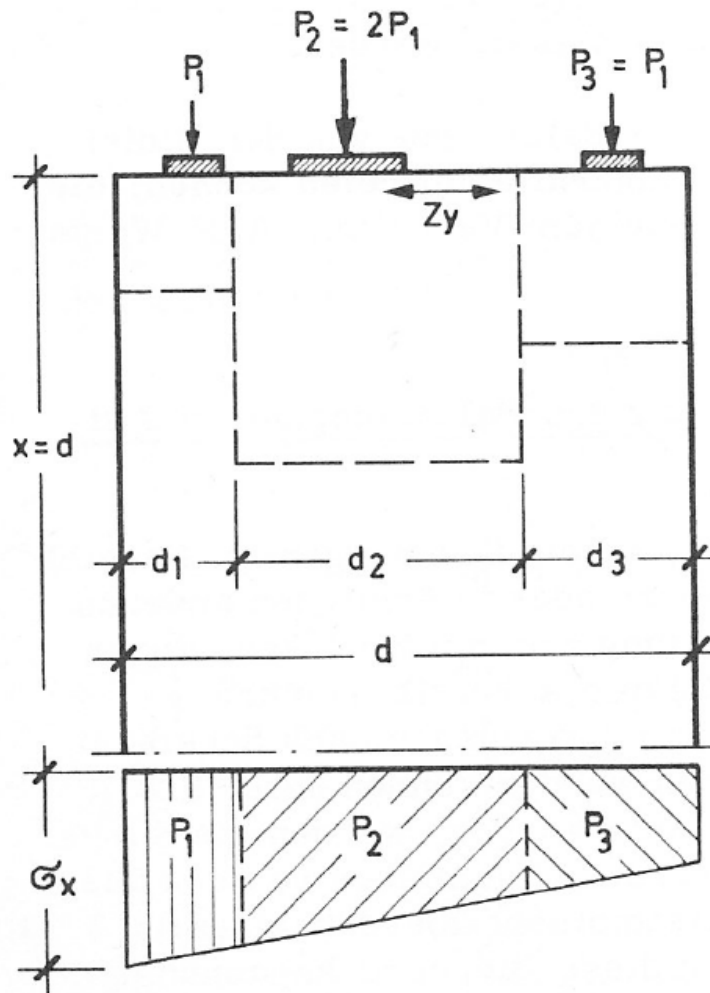
U slučaju **većega broja sidara** nepravilno raspoređenih na čelu nosača **svakom sidru** pripada odgovarajuća **nadomjestna prizma** (slika 13.4).



Svakoj od tih prizama pripada odgovarajući dio “tijela” tlačnih naprezanja s kojim stoji u **ravnoteži**. To se postiže tako da **ploštine** plohe tijela naprezanja budu **jednake** odgovarajućim **silama**.

Slika 13.3: Izobare naprezanja pri mimoosnoj sili

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača



Slika 13.5: Raspored nadomjestnih prizama pri čelu nosača

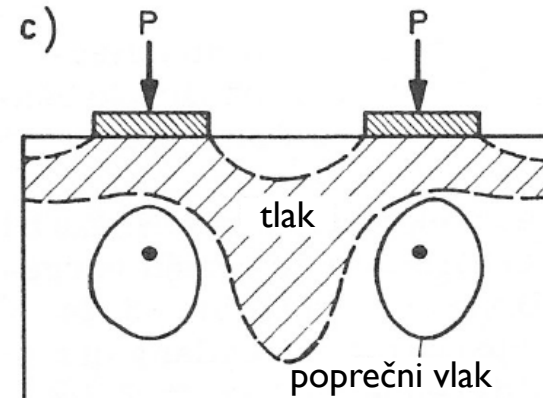
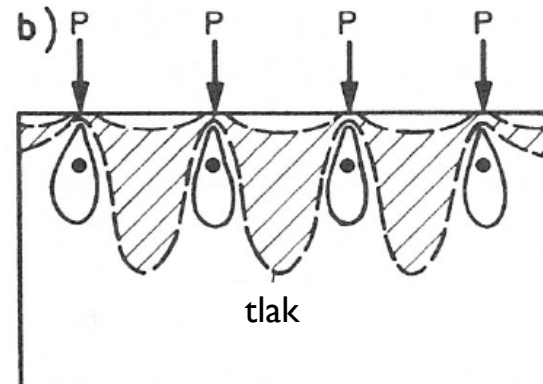
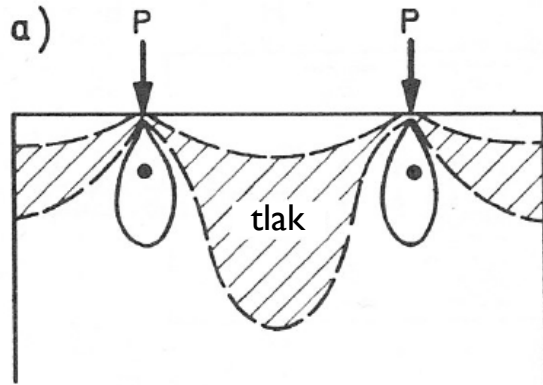
Složenost stanja napre-
zanja opet se najzornije
vidi promatranjem vlačnih
IZOBARA, kao i u slučaju
jedne pojedinačne sile.

Zanimljivo je da su **vlačna**
naprezanja (i sile) usm-
jerena **poprijeko** na smjer
djelovanja pojedinačnih sila
to **veća** što je veći **raz-**
mak među sidrima.

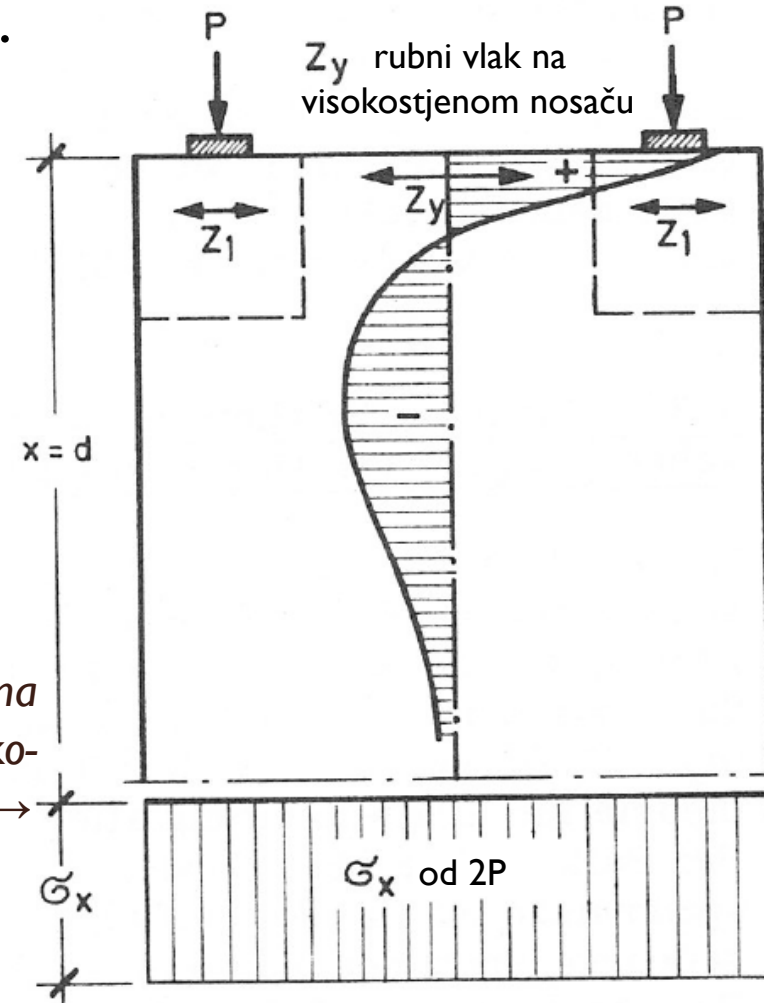
Ona se određuju po ana-
logiji s **visokostjenim nosačem**.

Na slici 13.5 predočen je utjecaj **broja pojedinačnih sila** na
stanje naprezanja u dijelu nosača uz opterećeni rub.

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača



Uočimo kako se sa slike 13.5c jasno vidi kolik je utjecaj **plohe rasprostiranja sile**.



Slika 13.6: Rubne vlačne sile među pojedinačnim silama po analogiji s visokostjenim nosačem

Slika 13.5: Izobare naprezanja pri različitim rasporedima sila na čelu nosača

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Naime, očito je kako je **tijek naprezanja** “**mirniji**”, a hvatište je **sile cijepanja** dalje od sidrene ploče.

Odgovarajući predložak **visokostjenoga nosača** predočen je na slici 13.6.

Naravno, armaturu treba ugraditi u razini rezultirajuće **vlačne** sile (tj. tako da se težište presjeka armature poklapa s težištem lika ispod krivulje vlačnih naprezanja).

Njemački učenjak **W. Schlee** proučavao je probleme poput **visokostjenih** nosača **mjestimice** opterećenih pojedinačnim silama, a to ima mnogo zajedničkoga sa **sidrenim rubom** PB nosača.

Naime, možemo **sidreno područje nosača** zamisliti kao **visokostjeni nosač poduprt na mjestima sidara natega**.

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Bitno je da **visina** nosača bude najmanje jednaka **dvostrukom** razmaku potpora (ili sidara na PB nosaču).

Našao je kako je **rubna vlačna sila** (u smjeru čela nosača, između dvaju sidara) funkcija **kvadrata omjera** širine sidrene ploče, ***a***, i visine nosača, ***d***:

$$C_y \approx 0,09 \left[1 - 0,9 \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right] \cdot P \quad (13.1)$$

Valja naglasiti da se **vlačna naprezanja** pojavljuju ne samo **između dvaju sidara**, nego i **između sidra i ruba nosača**.

Ta naprezanja znaju biti tolika da mogu izazvati **odlamanje betona** na tom mjestu.

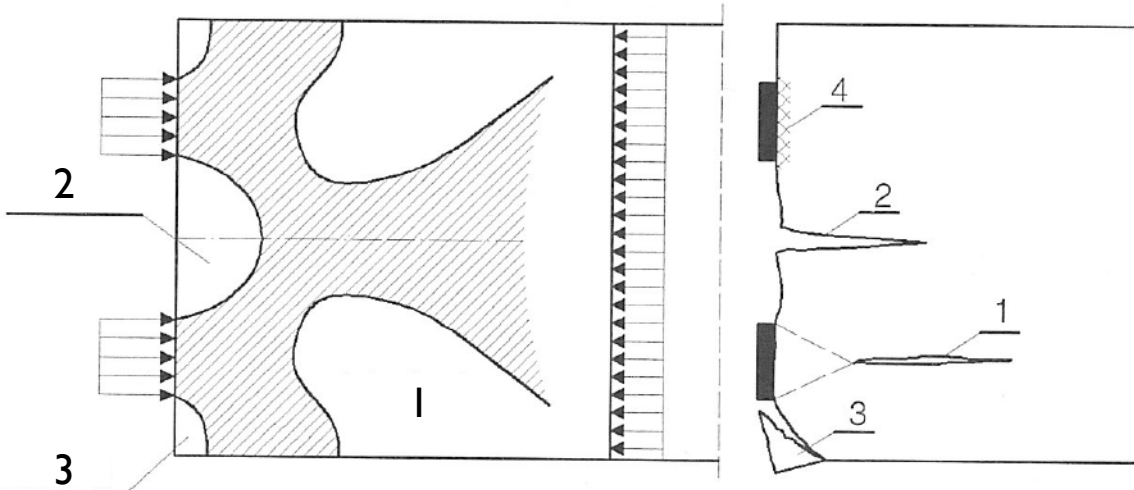
Na slici 13.7 predočena su (preuveličano) **tipična oštećenja**.

Odlamanja komadā betona uz rub nosača mogu biti opasna po sigurnost korisnikā (mosta ili hale).

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

a)

b)



Zato ih treba svakako **onemogućiti** prikladnim armiranjem.

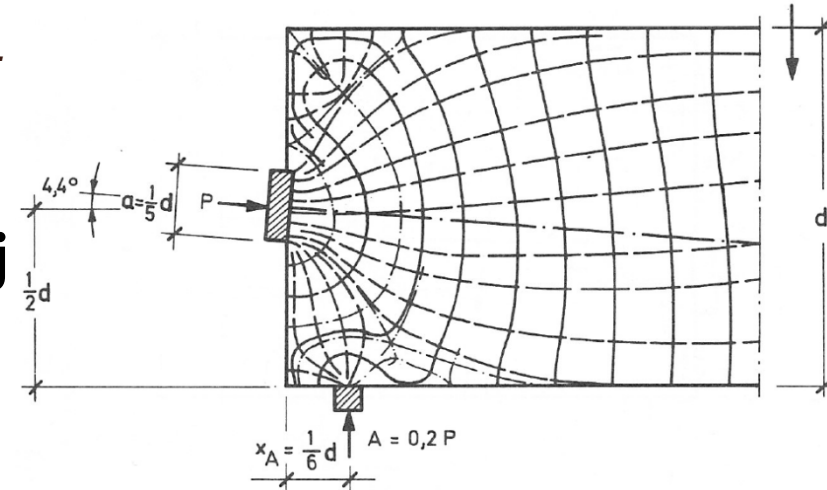
U gornjim smo razmatranjima smetnuli s uma kako nosač **ne lebdi u zraku**, nego je **doložen na ležai**.

Slika 13.7: Sidreno područje; a) raspodjelba naprezanja σ_y ; b) tipična oštećenja; 1) cijepanje; 2) kalanje; 3) odlamanje; 4) drobljenje

Pridržajna sila unosi **poremećaj** u stanje naprezanja.

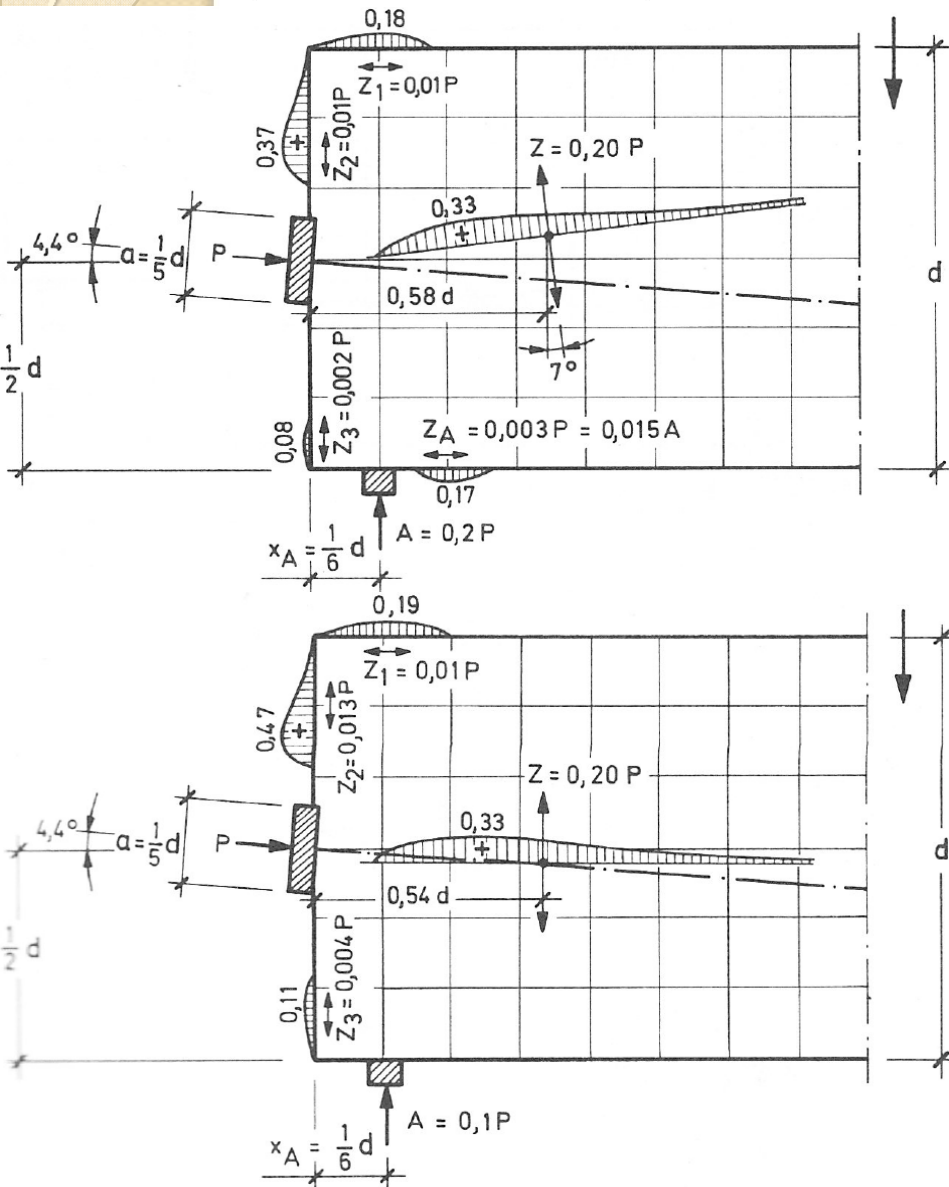
Prvo se to očituje na **silnicama** glavnih naprezanja (slika 13.8).

Činjenica da je natega **kosa**, kako smo već vidjeli, **nema bitna utjecaja**.



Slika 13.8: Silnice glavnih naprezanja pri čelu nosača s jednom nategom i s pridržajnom silom

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača



Na sljedećim dvjema slikama pokazat ćemo zavisnost **vlačnih sila** (među kojima i **sila cijepanja**) od jačine **pridržajne sile** (reakcije).

Radi se o istom slučaju sidrenja **jedne** natege, za koji smo na slici 13.8 prikazali silnice glavnih naprezanja (slika 13.9).

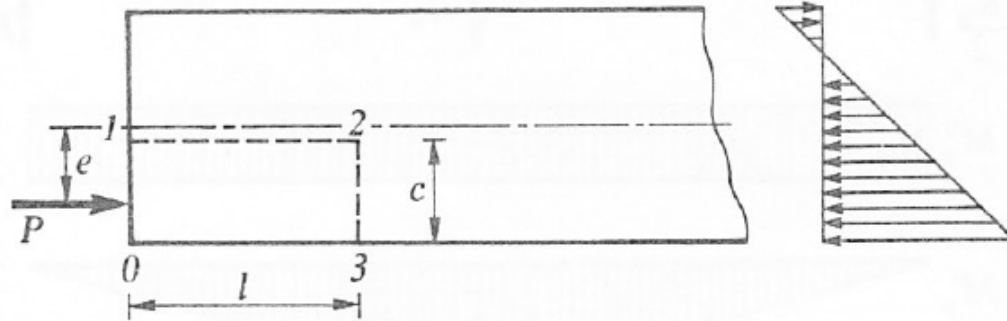
Uočavamo ove **zanimljivosti**:

- * Dok je **sila cijepanja jednaka**, **hvatište** joj je **bliže potpori** pri **manjoj** pridržajnoj sili.
- * **Rubne vlačne sile** (uz čelo nosača) **veće** su pri **manjoj** pridržajnoj sili.

Slika 13.9: Područja sila cijepanja i rubnih vlačnih sila na nosaču kao na slici 13.8

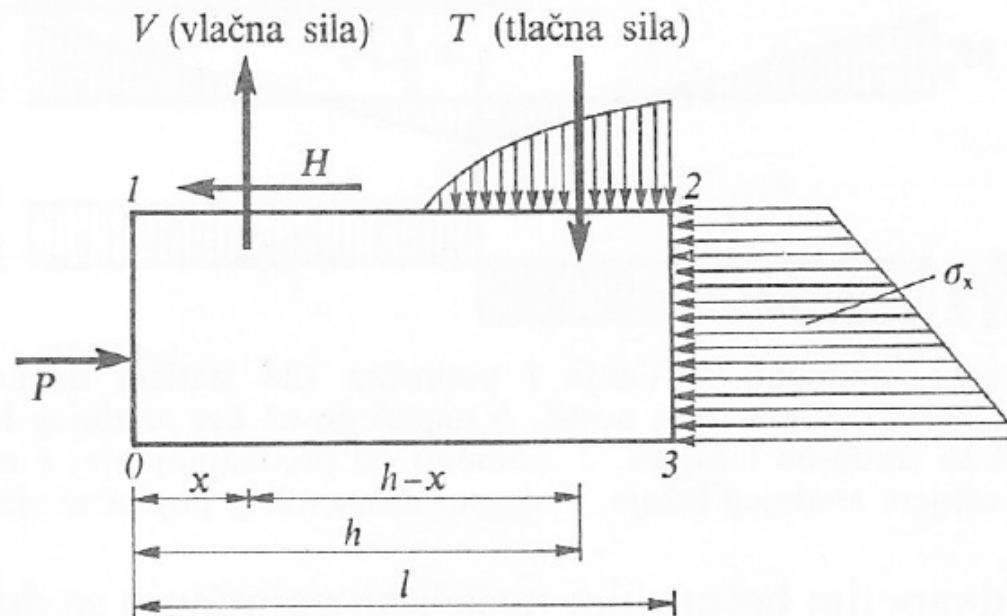
13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Ravnotežu unutarnjih sila u sidrenom području nosača najzornije možemo promatrati ako zamislimo da smo **izrezali dio nosača** u



okolišu nanošenja sile prednapinjanja (slika 13.10).

Na lijevom rubu toga dijela nosača djeluje sama **sila prednapinjanja**, a na desnom odgovarajući odsječak “**tijela**” naprezanja.



Budući da rezultanta tijela naprezanja očito **nije u ravnoteži** sa silom prednapinjanja, ravnotežu moraju uspostaviti odgovarajuće **rezne sile** duž gornjega ruba (vidi sliku).

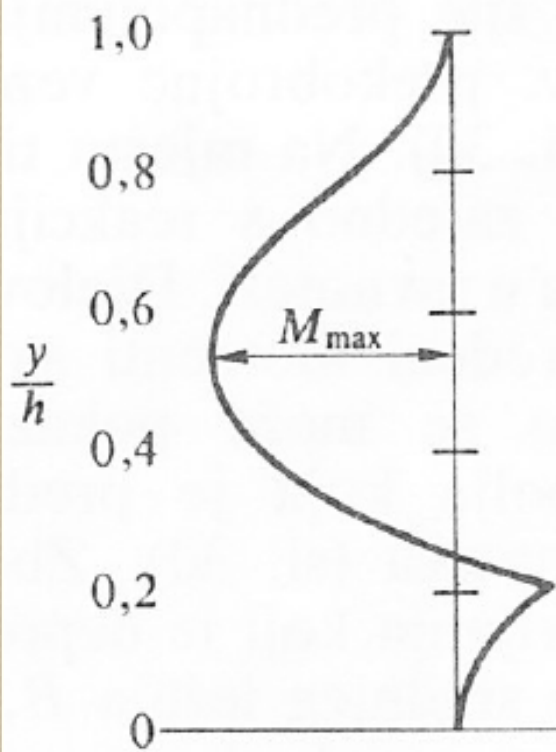
Slika 13.10: Naprezanja na kraju PB nosača; a) položaj nadomjestne prizme; b) sile što djeluju na prizmu

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Uočavamo kako je **izrezani dio** nosača svojevrsna **nadomjestna prizma**.

Nadalje je zanimljivo da je **hvatište tlačne sile** na udaljenosti jednakoj **visini** nosača.

A sada zamislimo da **duljinu izrezanoga dijela** nosača držimo **nepromjenjivom**, a **mijenjamo visinu**.



Za svaku tu **visinu** dobili bismo odgovarajući **par unutarnjih sila**, dakle **moment savijanja**.

Zavisnost toga **momenta** od **visine** izrezanoga dijela nosača predočena je na slici 13.11.

Uočavamo kako je **najveća vrijednost** toga momenta oko **polovice visine** nosača.

Slika 13.11: Tijek momenata savijanja u presjeku 1-2

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Također uočavamo kako je moment pri dnu nosača **suprotna predznaka** od onoga na glavnini visine.

Međutim, on se očito može **zanemariti** – pouzdavamo se u **vlačnu čvrstoću** betona.

Najveću **vlačnu silu** (sastavnicu para unutarnjih sila) moramo preuzeti **armaturom** postavljenom na udaljenosti od čela nosača približno jednakoj **petini do četvrtini visine nosača**.

Naravno, ovo se odnosi na **rezultantu** sile u poprečnoj armaturi, što se sastoji iz **više slojeva**.

Za **dimenzioniranje** poprečne armature mjerodavna je **najveća** vlačna sila.

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Inače je ta vlačna sila jednaka **najvećemu momentu** podijeljenu s **krakom unutarnjih sila, $h - x$** .

Za vrijednost x već smo rekli kako je približno jednaka **petini do četvrtini visine nosača**.

Potrebna **ploština presjeka armature** dobije se dijeljenjem ove **vlačne sile s dopustivim naprezanjem** u betonskom čeliku.

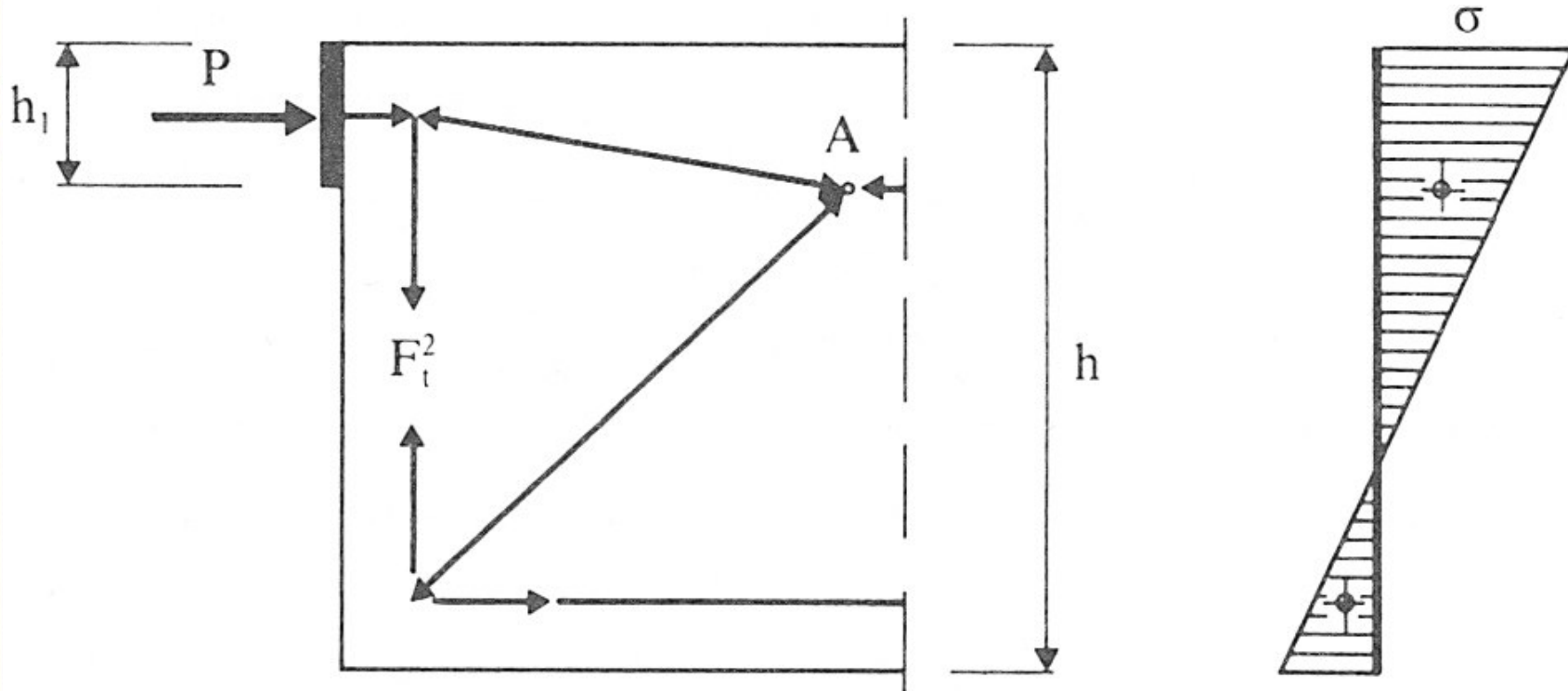
Preporučuje se da šipke budu $\varnothing 8$ – 12 mm, radi bolje **ugradivosti betona**.

Zornu predočbu **stanja ravnoteže unutarnjih sila** u sidrenom području nosača pruža i **tlačno-vlačna raščlamba** (engl. *strut-and-tie model*).

Predočuju se samo unutarnje sile kao **REZULTANTE** naprezanja (slika 13.12).

13.2 Tijek unutarnjih sila u sidrenom području nosača

Pojedine **nepoznate sile** dobiju se jednostavno **iz ravnoteže trokuta sila** (analitički ili grafički).



Slika 13.12: Shema unutarnjih sila u sidrenom području pod mimoosnom silom prednapinjanja i tijek uzdužnih naprezanja na njegovu rubu (desno)

13.3 Sile cijepanja

Prvi se je ovim problemom bavio njemački učenjak **E. Mörsch**, ali ne u svezi sa **sidrenjem velikih natega** za prednapinjanje, nego općenito s **prijenosom velikih usredotočenih** (koncentriranih) **sila** na **malu plohu**.

Navedimo nekoliko **primjera** velikih usredotočenih sila:

- pritisci **kotača** na kolniku mosta,
- pritisak **stupa** na temeljnu stopu,
- pritisak **ležaja** na ležajnu klupu i dalje na ležajnu gredu,
- **SIDRENE SILE** na čelima PB nosača itd.

Ova se opterećenja **rasprostiru** unutar tijela podloge i izazivaju **troosno stanje naprezanja**.

Pri tomu općenito **u smjeru djelovanja opterećenja** (s blagim otklonima) djeluju **tlačna**, a **poprijeko na njih vlačna naprezanja**.

13.3 Sile cijepanja

Takvo stanje vlada u prostoru što seže do tzv. **duljine uvođenja** u smjeru djelovanja opterećenja.

Počev od te udaljenosti nastaje područje u kojem je **tijelo naprezanja** omeđeno **ravninom**.

Ako sila djeluje **u osi** podložnoga tijela, ravnina je **pravokutna** na smjer djelovanja sile (jednolika raspodjelba naprezanja), a ako djeluje **mimoosno**, ravnina je **kosa**.

Ovo **područje uvođenja sile**, u kojemu **ne vrijedi tehnička teorija savijanja**, naziva se **St. Venantovim poremećajnim područjem**.

13.3 Sile cijepanja

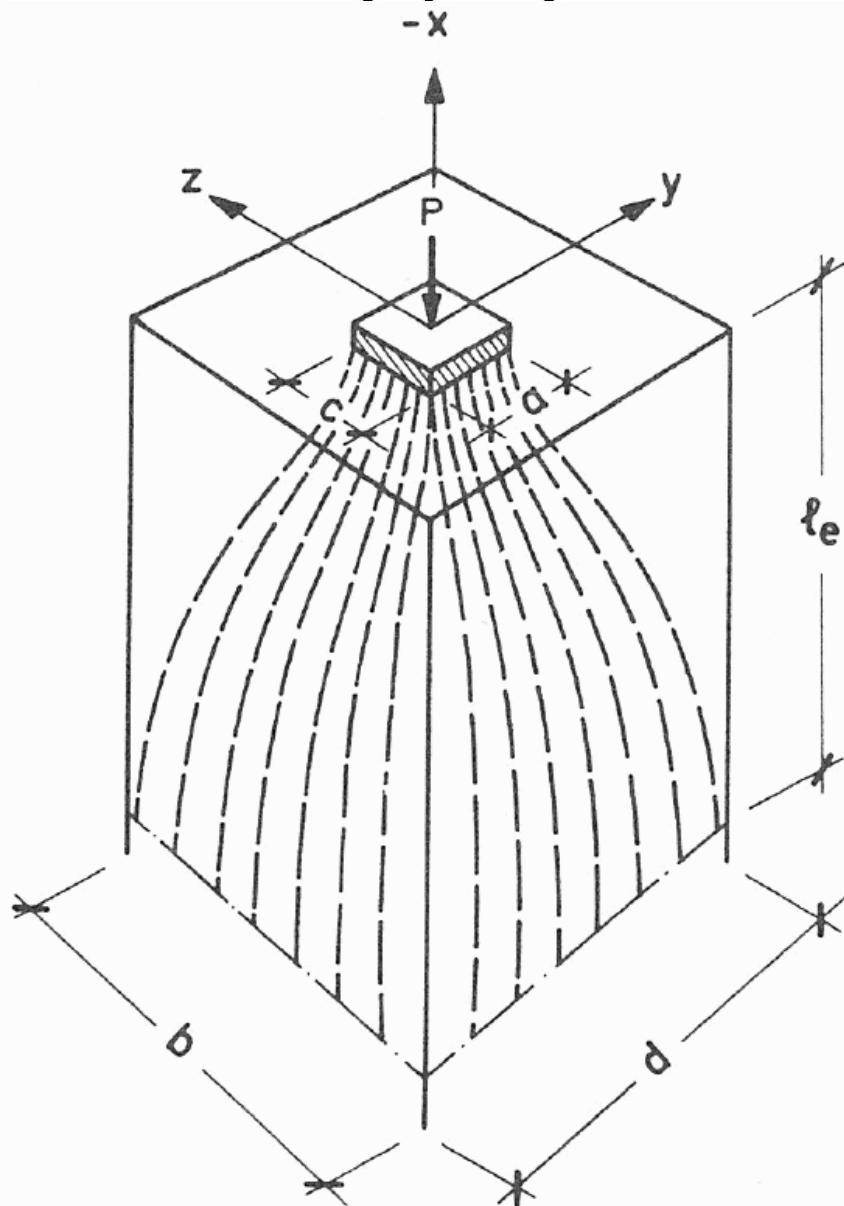
Valja spomenuti da su inženjeri prije nego što je **armirani beton** osvojio i ovo područje primjene rješavali pitanje tzv. **LEŽAJNIH KVADERA** (podloga za čelične ležajeve) ugradbom **velikih prizama od eruptivnoga kamena** (bazalta, granita, dijabaza i sl.).

U zadnjih 50-ak godina **armirani je beton** potpuno **prevladao** u uporabi.

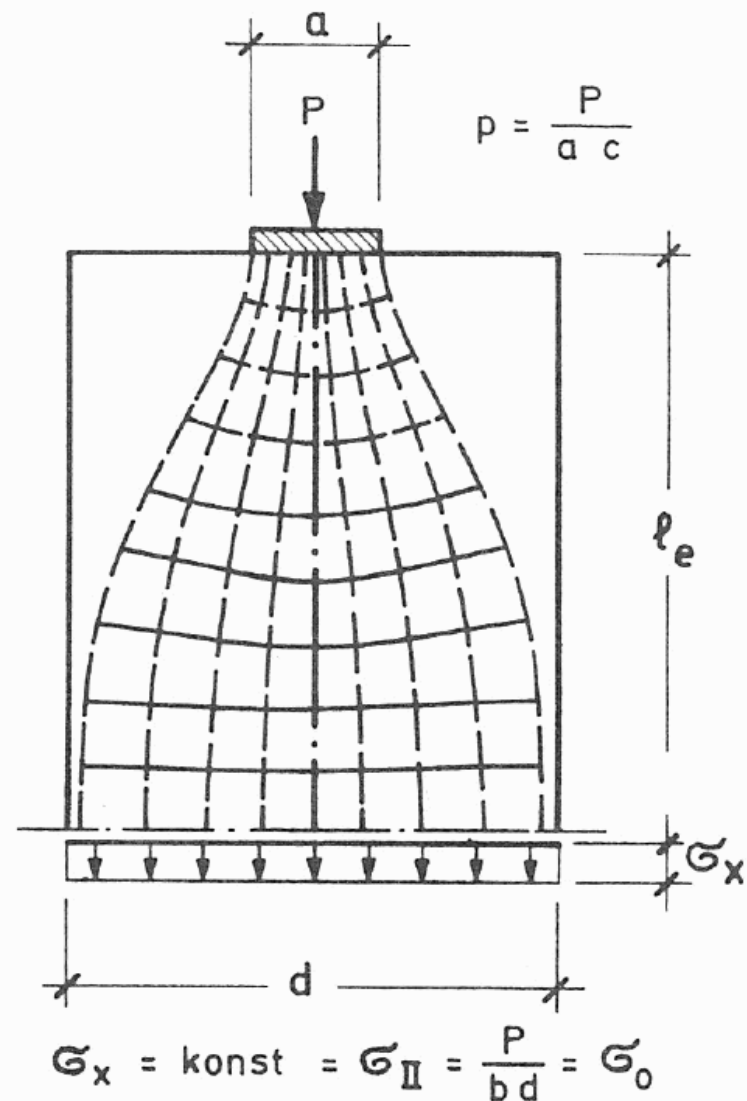
Tijek naprezanja najzornije se predočuje s pomoću **GLAVNIH NAPREZANJA**, pri čemu je najzgodnije promatrati ta naprezanja u **dvjema glavnim ravninama** (ravninama simetrije).

Ipak ćemo za početak prikazati tijek naprezanja i u **prostornoj predočbi** (slika 13.13).

13.3 Sile cijepanja



presjek u ravnini x-y



———— vlak - - - - - tlak

Slika 13.13: Opći tijek glavnih naprezanja pri čelu AB nosača pod usredotočenom silom 21

13.3 Sile cijepanja

U AB podložnim tijelima moramo osobitu pozornost posvetiti **vlačnim** naprezanjima što djeluju **poprijeko** na smjer pružanja **tlačnih** (što se pružaju uglavnom u smjeru djelovanja sile, s manjim otklonima).

Ova se naprezanja nazivaju **naprezanjima cijepanja** (engl. *bursting stresses*, njem. *Spaltzugspannungen*).

Rezultante tih naprezanja nazivaju se **SILAMA CIJEPANJA**.

Budući da **vlačna naprezanja** znaju **premašiti vlačnu čvrstoću**, beton **puca** – CIJEPA SE, pa odatle takav naziv.

Tri su glavna načina **protudjelovanja** ovoj pojavi:

- preuzimanje vlačne sile **armaturom**,
- izazivanje **poprečnoga tlaka** i
- **prednapinjanje**.

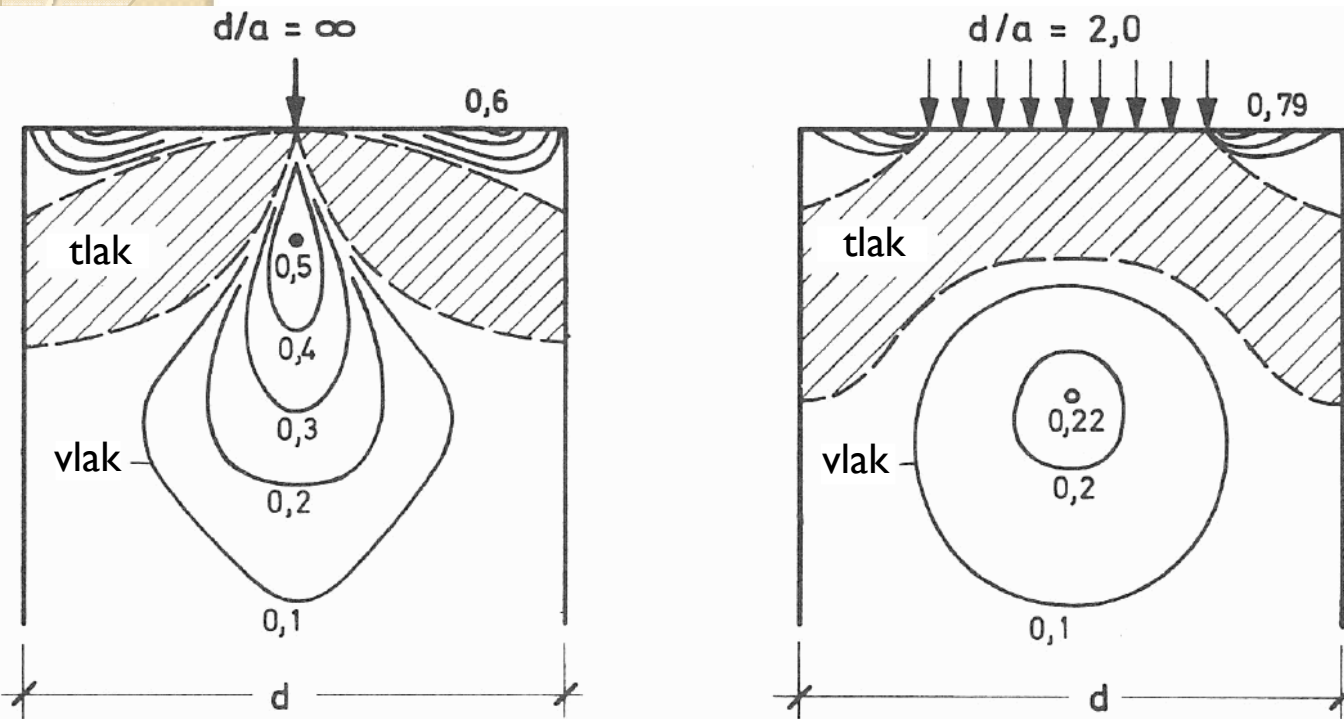
13.3 Sile cijepanja

U **PB nosača** primjenjuje se gotovo isključivo **prvi** način, dok se druga dva primjenjuju samo u slučaju iznimno velikih sila cijepanja, kakve se javljaju, primjerice, u **nuklearnoj** tehnologiji.

Čimbenik od kojega najviše zavisi veličina vlačnih naprezanja (naprezanja cijepanja) jest **omjer plohe nalijeganja usredotočene sile i ploštine presjeka podložnoga tijela.**

Na slici 13.14 predočena su dva **izrazito različita** takva omjera.

13.3 Sile cijepanja



Slika 13.14: Izobare naprezanja σ_y pod silom usredotočenom u točki (lijevo) i rasprostrtoj na plohi (desno)

Lijevo je **ekstrem**an slučaj (djelovanje sjekire) kakav zapravo **ne može nastupiti** u praksi. Međutim, ipak može nastupiti slučaj **blizak** njemu, pa je korisno imati predočbu o **veličini** vlačnih naprezanja.

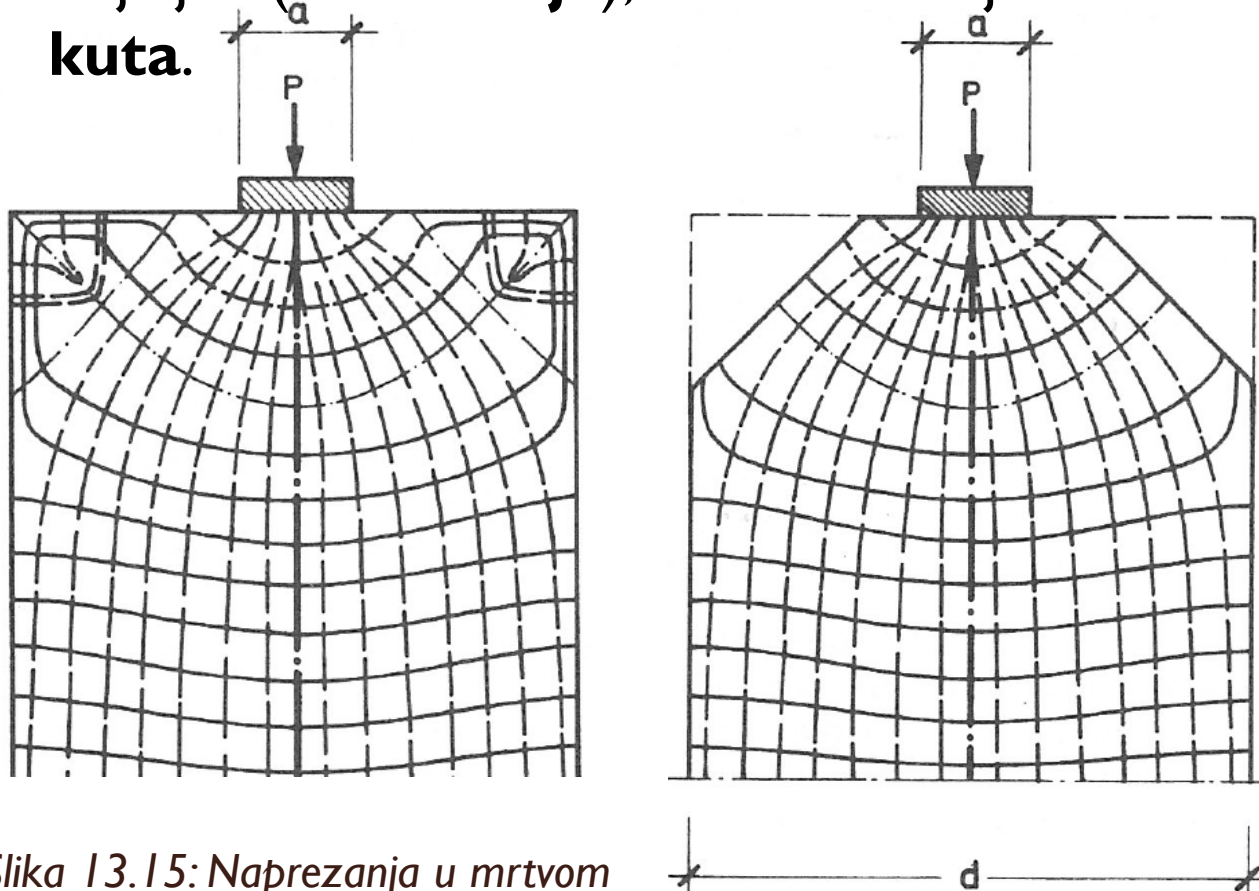
Naime, izobare predstavljaju **okrugle** vrijednosti omjera σ_y/σ_0 , gdje je:

$$\sigma_y = P/bd \quad (13.2)$$

13.3 Sile cijepanja

Uočavamo kako se s **povećavanjem plohe nalijeganja sile smanjuju vlačna naprezanja, a udaljuje se hvatište rezultante vlaka od te plohe.**

Na slici se vidi i učinak o kojem smo govorili u predhodnom odjeljku (**odlamanje**), ali se naslućuje i tzv učinak **mrtvoga kuta**.



Slika 13.15: Naprezanja u mrtvom kutu (lijevo) i s odrezanim mrtvim kutovima (desno)

Naime, u **kutovima** nastaju vrlo **složena stanja naprezanja**, ali postoji postupak kojim se ona **pojednostavnjuju**. 25

13.3 Sile cijepanja

Treba naime jednostavno **odrezati kutove** (slika 3.15).

Na žalost, takvo rješenje ne dolazi u obzir u **PB nosača**, jer uza skrajnje **sidro natege** često dolazi **ležaj nosača**.

* * * * *

Ima više postupaka **određivanja** ovih **vlačnih** naprezanja:

Teorijsko rješenje, zasnovano na **teoriji elastičnosti**, dao je indijski učenjak **Sundara Raja Jyengar**.

Najtočnije **približno rješenje** pruža **metoda konačnih** (prostornih) **elemenata**.

Dostatno dobre rezultate daje i **fotoelastični postupak**.

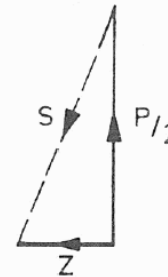
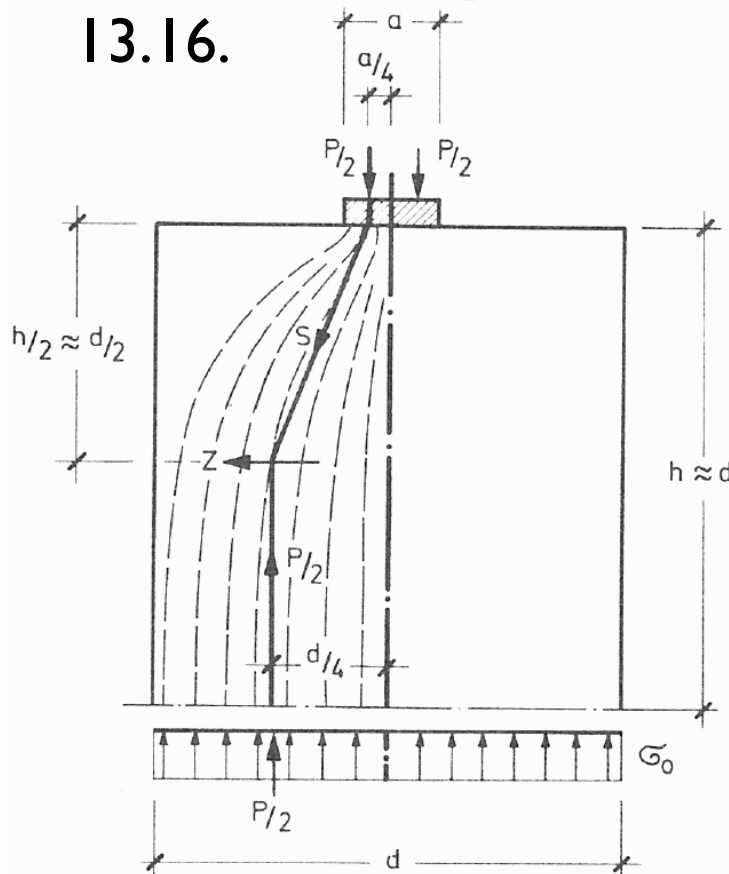
Slijede dva **pokusna** (eksperimentalna) postupka, temeljena na mjerenju produljenja/skraćenja:

- na predlošcima (modelima) i
- na uzorcima naravne veličine.

13.3 Sile cijepanja

Na kraju dolazi **približni postupak** već spomenutoga **E. Mörscha**.

On je **pojednostavnio tijek tlačnih silnica** tako što ih je **nadomjestio pravocrtnim rezultatama tlaka** po slici 13.16.



Iz slike slijedi da je:

$$C: \frac{P}{2} = \left(\frac{d}{4} - \frac{a}{4} \right) : \frac{d}{2} \quad (13.3)$$

odakle se izravno dobije:

$$C = 0,25P \cdot \left(1 - \frac{a}{d} \right) \quad (13.4)$$

Ovo je rješenje na strani **nesigurnosti** samo u slučaju **vrlo uskih** naljeznih ploha.

Slika 13.16: Mörschovo pojednostavnjenje tijeka unutarnjih sila pri čelu nosača

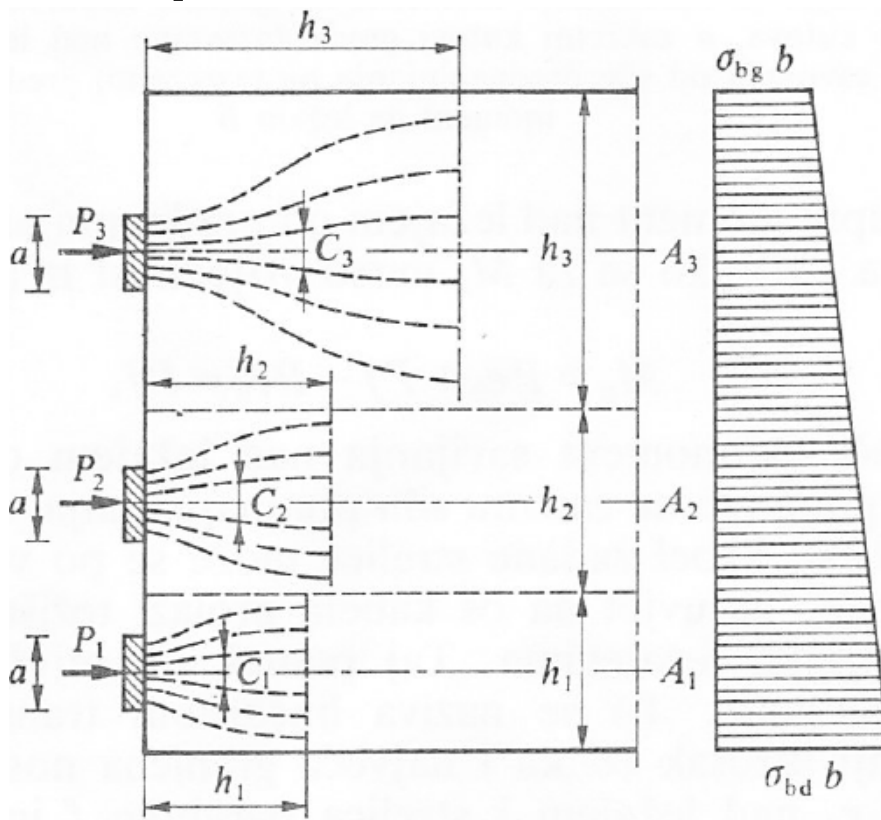
13.3 Sile cijepanja

To znači da mora vrijediti:

$$a : d < 1 : 5 \quad (13.5)$$

To je upravo slučaj kakav se **redovito** susreće u **PB** nosača.

Zato se u praksi najčešće rabi ovaj jednostavni **Mörschov** izraz, ali s **povećanim faktorom**:



$$C = 0,3P \cdot \left(1 - \frac{a}{d}\right) \quad (13.6)$$

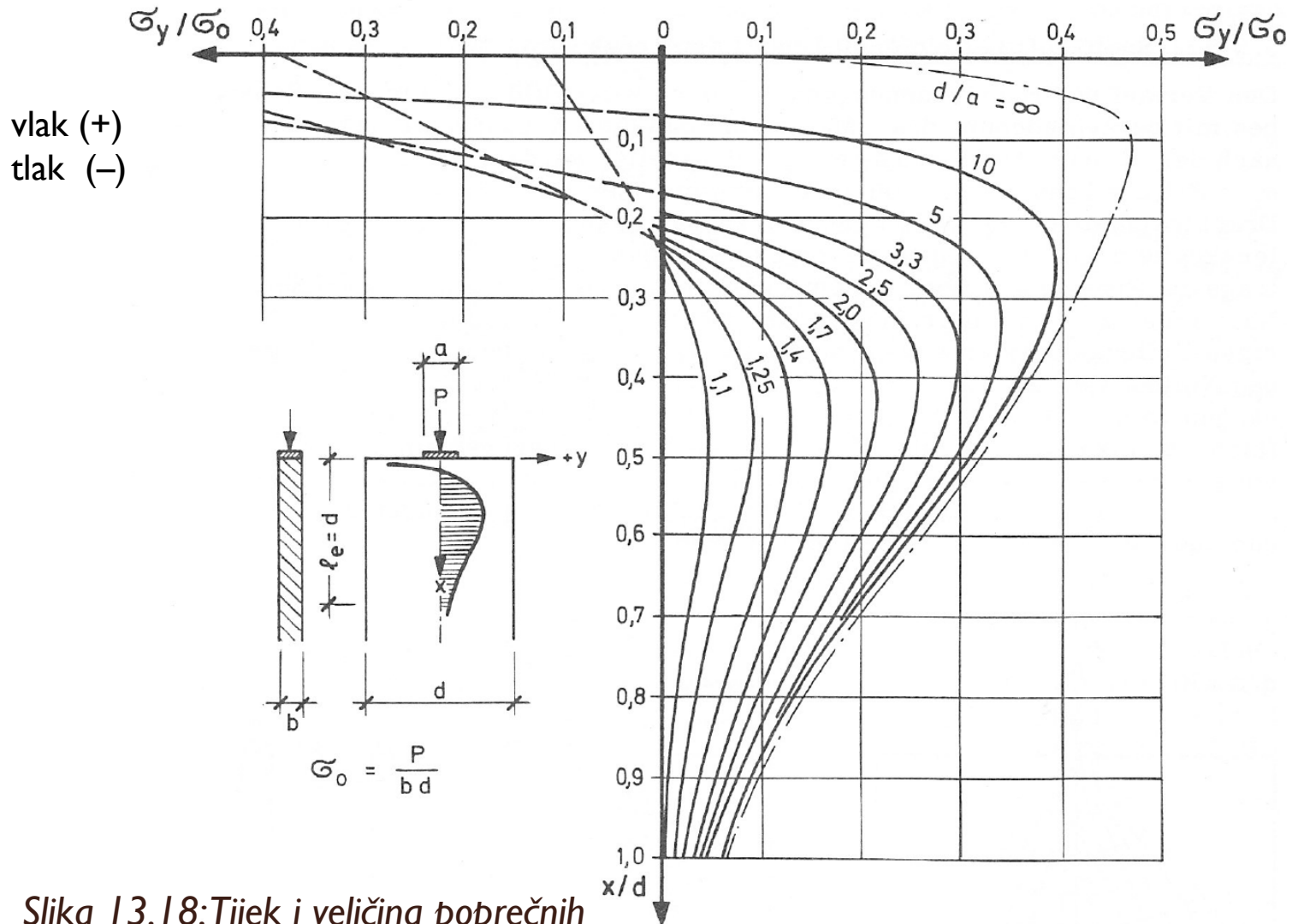
U slučaju **većega broja različitih natega**, s nadomjestnim prizmama sukladnima **tijeku naprezanja** (slika 13.17), **sile se cijepanja** računaju iz izraza:

$$C_i = 0,3P_i \cdot \left(1 - \frac{a_i}{h_i}\right) \quad (13.7)$$

Slika 13.17: Raspored nadomjestnih prizama za računanje sila cijepanja

13.3 Sile cijepanja

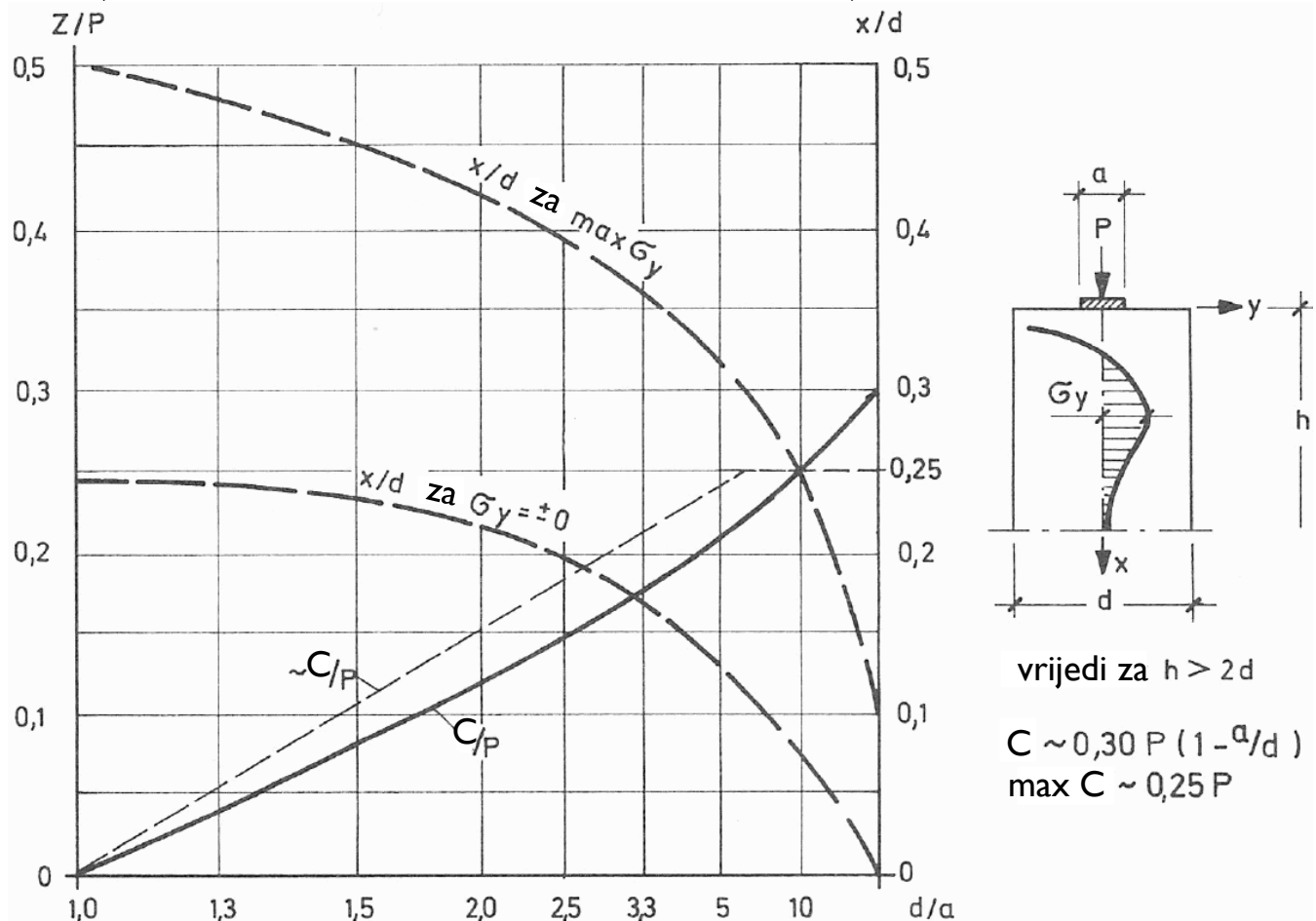
Postoje već **gotovi dijagrami** omjera **vlačnih i osnovnih napreznja (σ_y/σ_0)** za različite omjere **d/a** (slika 13.18).



Slika 13.18: Tijek i veličina poprečnih napreznja σ_y svedenih na $\sigma_0 = P/bd$ duž osi x u zavisnosti od omjera d/a

13.3 Sile cijepanja

Na slici 13.19 predočen je dijagram omjera sile **cijepanja** i sile **prednapinjanja, C/P** , zatim položaj presjeka s najvećim **vlačnim** naprezanjem, σ_y , te položaj presjeka u kojem to naprezanje iščezava u zavisnosti od omjera **d/a** .

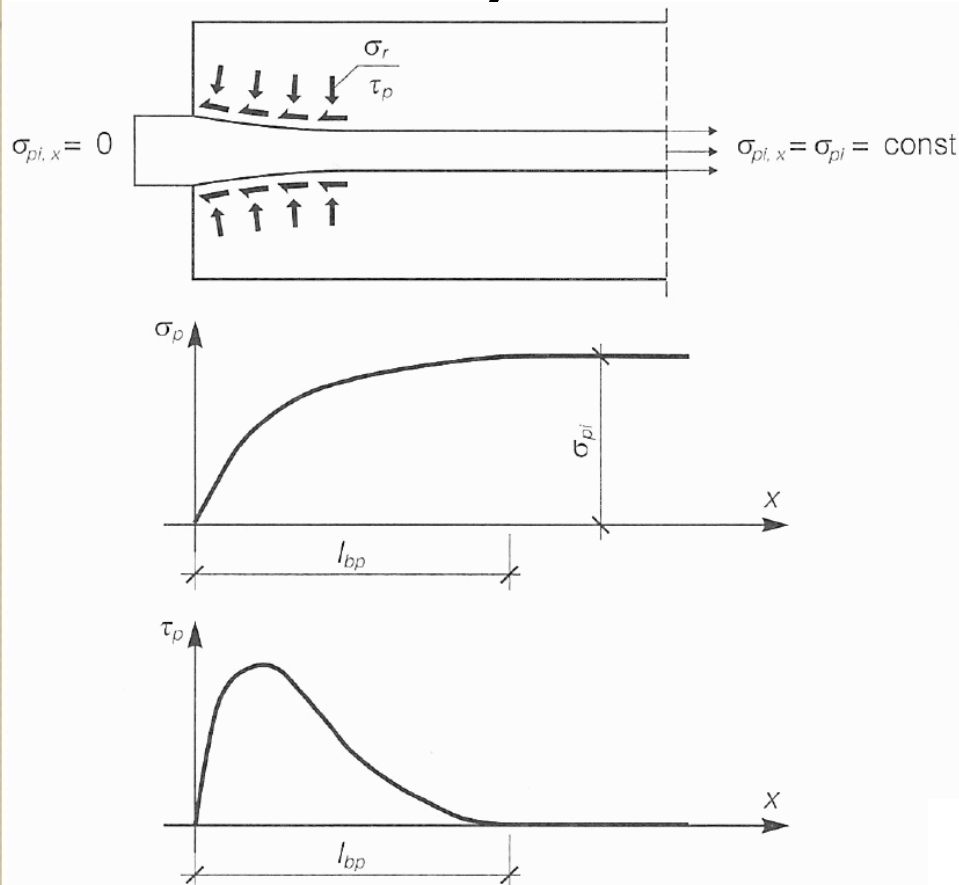


Slika 13.19: Veličina sile cijepanja C svedene na silu P ; udaljenost $\max \sigma_y$ i točke sa $\sigma_y = 0$ 30

13.4 Raspored pravih natega

Prije nego što prijedemo na izlaganje ovoga gradiva, prisjetimo se kako se **prave natege** (žice, strune, užeta) **sidre** (slika 13.20).

Radi se o tzv. **Hoyerovu** učinku.



Slika 13.20: Hoyerov učinak i mehanizam usidrenja pritanjanjem

(To je onaj isti **Ewald Hoyer**, koji je izumio postupak **predhodnog napinjanja**).

Dakle pošto se vlačni članak **prereže** nakon napinjanja, on nastoji poprimiti **prvotnu duljinu** (skraćuje se).

Istodobno se slobodni dio **širi bočno** (**Poissonov** učinak).

13.4 Raspored pravih natega

Naravno da prijelaz između **slobodnog** i potpuno **napetog** dijela vlačnoga članka mora biti **postupan**, **KLINAST**, prijelaz.

Upravo je tomu **klinastom** dijelu **Hoyer** pripisivao **učinak sidrenja**.

Međutim, pokazalo se je da je **nakon dvije do tri godine** taj učinak postupno **IŠČEZAVAO**, očito zbog **PUZANJA** okolnog betona.

Dapače, u nekim je slučajevima dolazilo i do **PUCANJA** betona, pa je sidrenje **propadalo** još i **ranije**.

Zbog toga je očito kako se **ne možemo pouzdati u obično sidrenje prijanjanjem**, nego je nužno ostvariti **odrežno sidrenje**.

To se postiže na dva načina:

- **orebravanjem** vlačnih članaka i
- **prepletanjem** (spletovi struna, užeta).

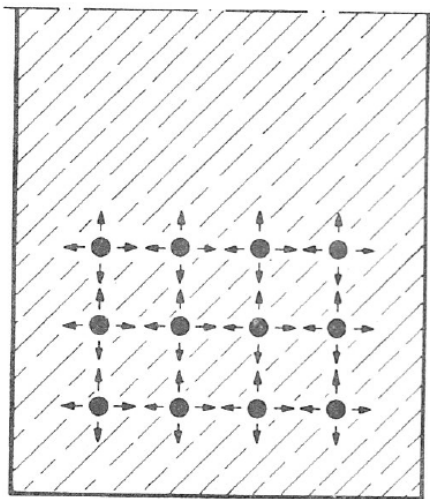
13.4 Raspored pravih natega

Još o jednom učinku valja voditi računa.

Naime, **prianjanje** se ostvaruje tako što **po oplošju vlačnoga članka djeluju obodna tlačna naprezanja**.

Međutim, s obzirom na djelovanje na **okolni beton** ona se ostvaruju kao **vlačna naprezanja**.

Promatramo li **skupinu vlačnih članaka** raspoređenih u poprečnomu presjeku u **retke i stupce** (slika 13.21), vidjet ćemo da se **unutar skupine vlačnih članaka** ova vlačna naprezanja **međusobno poništavaju**.



To znači da ova vlačna naprezanja djeluju samo **po obodu** skupine.

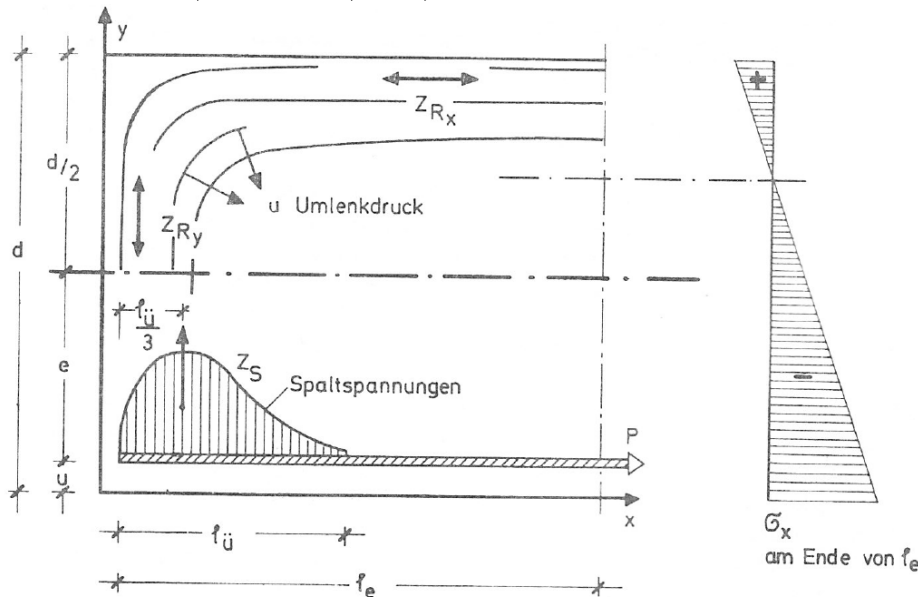
Zato se mora **duž cijele prijenosne duljine** predvidjeti **armatura** što **obujmljuje cijelu skupinu vlačnih članaka**.

Slika 13.21: Djelomično međusobno poništavanje sila cijepanja među užetima

13.4 Raspored pravih natega

Pogledajmo još stanje analogno onomu što je predočeno na slici 13.2.

Radi se o rubnim vlačnim silama što se javljaju na čelu nosača, te o skretanju vlačnih naprezanja što proizlaze iz tehničke teorije savijanja.



Slika 13.22: Unutarnje sile pri kraju predhodno napetog nosača

Na slici 13.22 predočen je slučaj **predhodno napeta nosača** pravokutna presjeka.

Predočen je i **tijek uzdužnih naprezanja** na kraju područja uvođenja sile prednapinjanja.

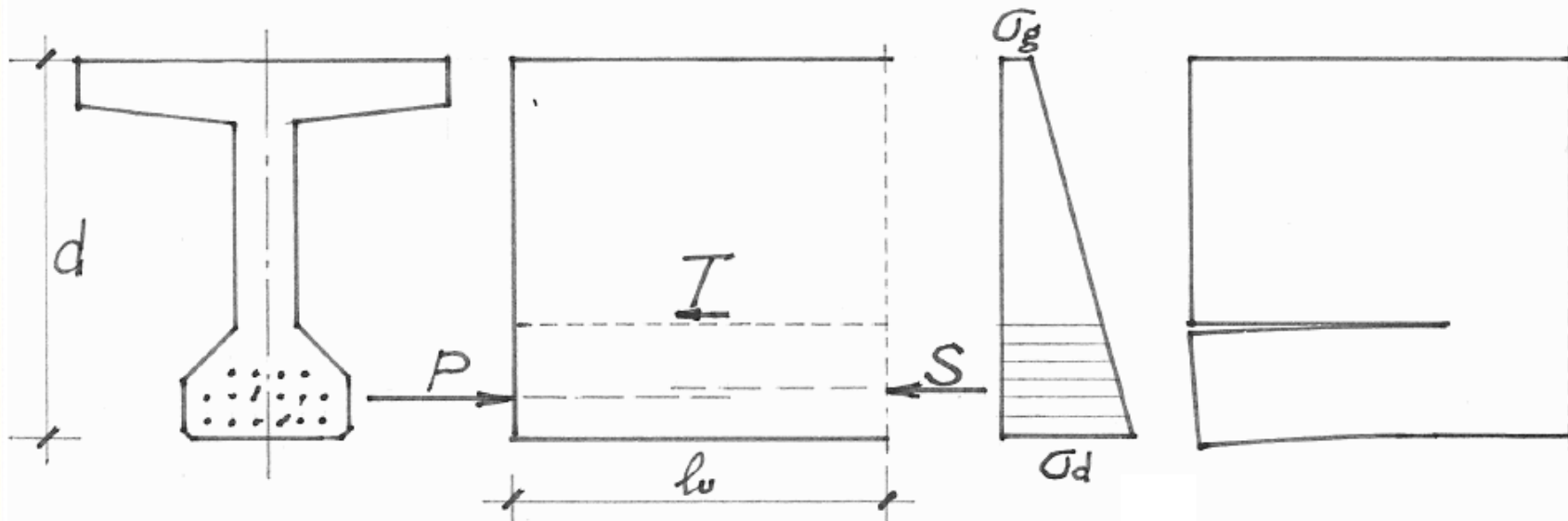
I u **predhodno napetih nosača** javlja se problem **poprečnih momenata savijanja** kakav je predočen na slici 13.10.

13.4 Raspored pravih natega

Promatramo li donju pojasnicu nosača, vidjet ćemo kako na **lijevom rubu** djeluje **sila prednapinjanja, P** (u težištu presjeka svih užeta), a na **desnom rubu rezultanta** **pripadnih tlačnih naprezanja** (slika 13.23).

One očito **nisu u ravnoteži** (P je znatno veća).

Za **ravnotežu** je nužna **posmična sila, T** , što djeluje duž gornjeg ruba donje pojasnice, ali i **poprečni moment** poput onoga na slici 13.10.



Slika 13.23: Stanje u sidrenom području predhodno napetog nosača

13.4 Raspored pravih natega

Taj moment izaziva **poprečna vlačna naprezanja**, što mogu i **premašiti vlačnu čvrstoću betona**, pa duž gornjeg ruba donje pojasnice nastaje PUKOTINA (desni dio slike 13.23).

Kako se to **ne bi dogodilo**, užeta se raspoređuju u presjeku tako da su **sile** na obama krajevima sidrenoga područja uvijek **uravnotežene**.

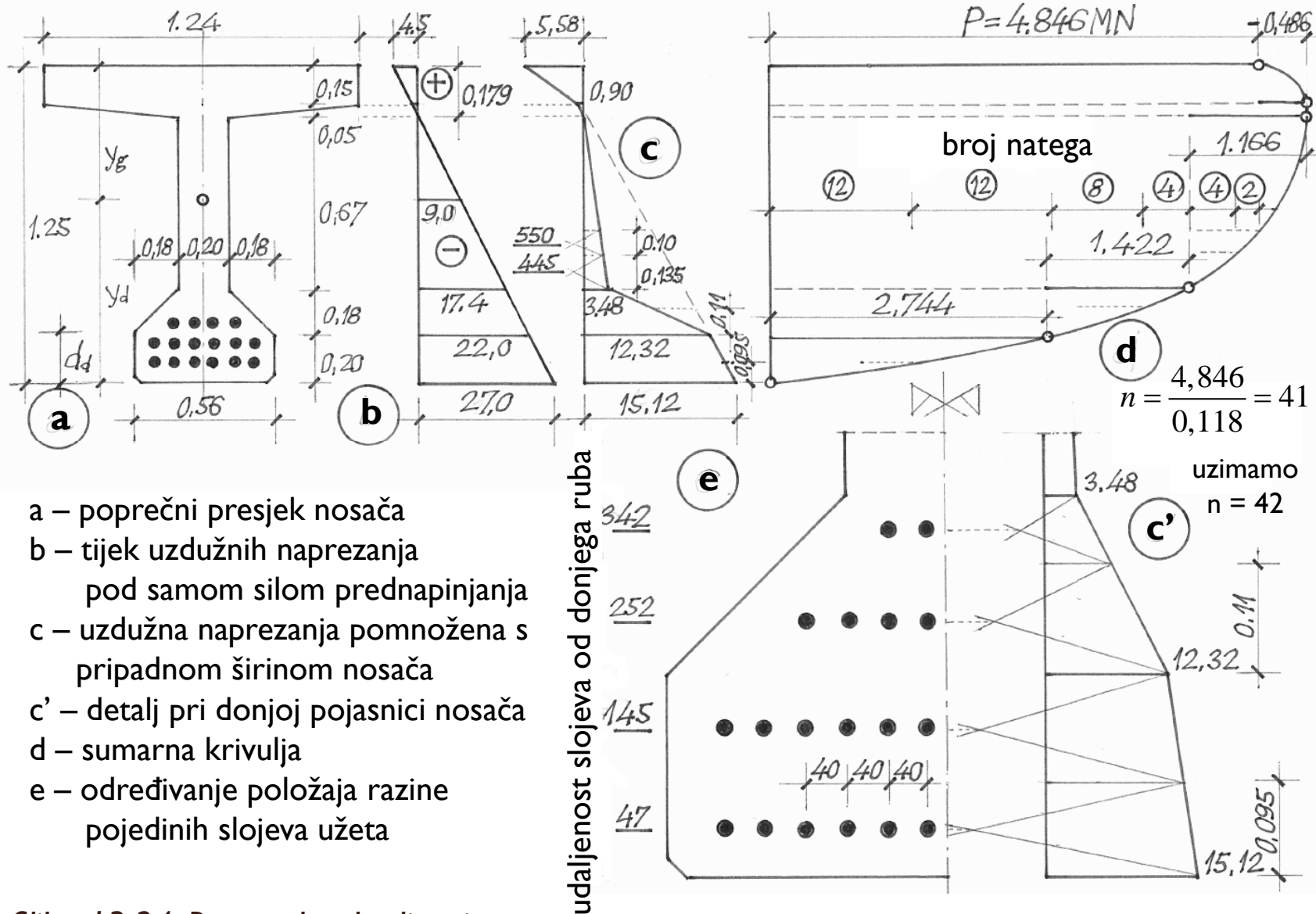
Postupak je predočen na slici 13.24.

* * * * *

Valja naglasiti da se ovaj postupak više **ne primjenjuje u praksi**, ali je ipak izložen zbog toga što je poučan.

Naime, on bi bio **primjenjiv** kada bi se na **sidrištu staze za prednapinjanje razine slojeva užetā** mogle namještati **po volji**, ali to **nije slučaj**.

13.4 Raspored pravih natega



Slika 13.24: Postupak određivanja položaja razine pojedinih slojeva užeta u sidrenom području predhodno napetog nosača 37

13.4 Raspored pravih natega

Na dijelu slike označenu sa **b** predodčen je **tijek uzdužnih naprezanja od same sile prednapinjanja** (bez djelovanja vlastite težine).

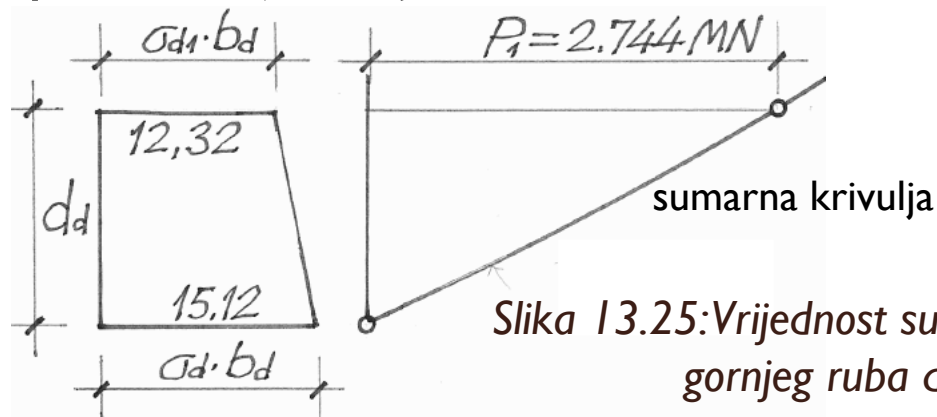
Na slici **c** nanosena su ta **naprezanja pomnožena s pripadnim širinama presjeka nosača**.

Slijedi **SUMARNA KRIVULJA** (slika **d**) što predodčuje porast **OBUJMA TIJELA NAPREZANJA** od dna presjeka do vrha.

Vrijednost krivulje **na razini vrha donje pojasnice** (nepromjenjive širine) dobije se iz izraza (slika 13.25):

$$P_d = 0,5(\sigma_d \cdot b_d + \sigma_{dI} \cdot b_d) d_d \quad (13.8)$$

Ta veličina predstavlja **vrijednost sumarne krivulje na toj razini**.



Slika 13.25: Vrijednost sumarne krivulje na razini gornjeg ruba donje pojasnice

13.4 Raspored pravih natega

Vrijednost krivulje **na samomu vrhu** jednaka je **sili prednapinjanja**.

Slijedi **raspodjelba** te sile na **pojedinačne slojeve užétā**.

Sila u **jednom** užetu $\varnothing 12,7 \text{ mm}$ (1/2") pri početnom naprezanju jednaku $0,7f_{tk}$ iznosi **118 kN**.

Naime, **ploština** je presjeka **jednog** užeta **99 mm²** (podatak iz prospekta proizvođača), a **prekidna je čvrstoća 1700 N/mm²**, pa je **sila u jednom užetu**:

$$P = 0,7 \cdot 1700 \cdot 99 \times 10^{-3} = 118 \text{ kN}$$

Podijeli li se sila prednapinjanja s tom vrijednosti, dobije se **broj užétā** (što mora biti tâk /paran/).

U ovom je slučaju sila prednapinjanja **$P = 4,846 \text{ MN}$** , a broj užétā **42**.

U **najniži sloj** može ih stati **12**.

13.4 Raspored pravih natega

Odsječak sile prednapinjanja jednak ukupnoj sili **pomnoženoj s omjerom 12/42** spustimo na **sumarnu krivulju**, pa presjecište **projiciramo** na dijagram **c**.

Tako smo dobili **visinu** do koje seže utjecaj najnižega sloja užétā.

Položaj samoga **sloja** određen je na slikama **e** i **c'** (u većemu mjerilu).

Primijenjeno je **pravilo** za određivanje **položaja težišta trapeza**.

Postupak je **ponovljen** za sljedeći sloj od 12 užétā. što se također nalazi u **donjoj pojasnici** (u dijelu nepromjenjive širine).

Slijedi **obrnut** postupak: razinu **vrha skošenog dijela donje pojasnice projiciramo na sumarnu krivulju**.

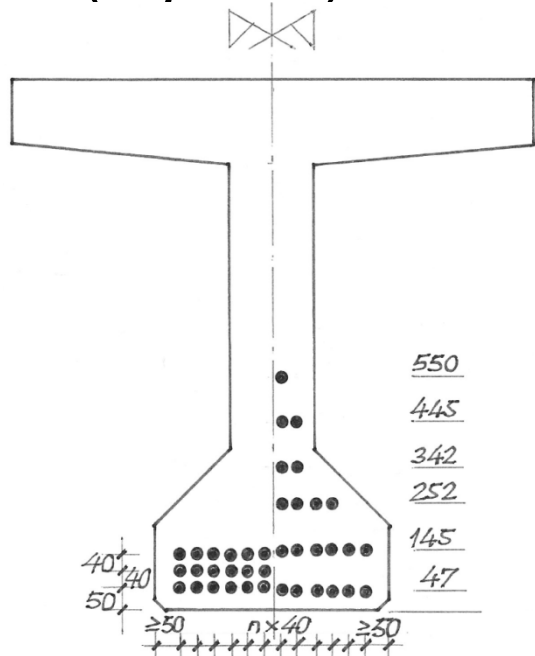
Vidimo da to **približno** odgovara broju od **12 užétā**.

13.4 Raspored pravih natega

Međutim, **ne može svih 12 stati u jedan sloj, nego u jedan 8, a u drugi 4.**

Položaje tih slojeva odredimo na jednak način.

Tako nastavimo do kraja: u predzadnjem su sloju 4, a u zadnjem (najvišem) 2 užeta.



Slika 13.26: Raspored užeta u
PN nosaču

Na slici 13.26 predočen je ovako dobiveni **razmještaj užeta** u presjeku (desna polovica), dok je na lijevoj polovici predočen **uvriježeni raspored**.

Uočimo kako je **broj potrebnih užeta**, što daju približno **jednako rubno naprezanje osjetno manji**.

Užeta su raspoređena **po čvorovima mreže oknašca 40 mm**, s tim što udaljenost od ruba presjeka mora biti ≥ 50 mm.

Vlačna sila od poprečnog momenta preuzima se **armaturom**.⁴¹

13.4 Raspored pravih natega

Armatura mora biti od gusto raspoređenih što tanjih šipaka.

* * * * *

Predhodno napeti nosači imaju još jednu osobitost.

Naime, broj se užetā određuje na osnovi momenta savijanja u najjače napregnutu presjeku.

Međutim, kako su užeta prava, sila prednapinjanja proizvodi jednak moment savijanja duž cijeloga nosača.

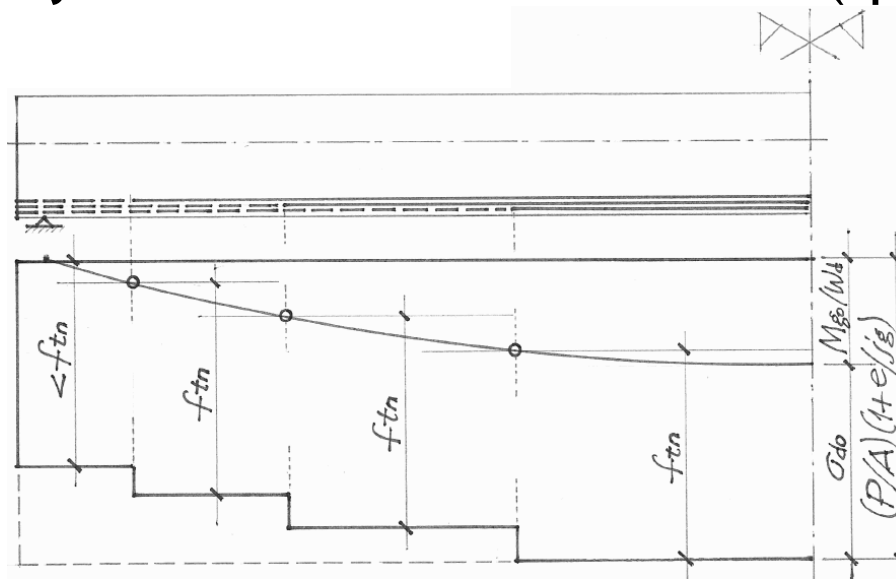
To onda znači da bi, kada se ne bi ništa poduzelo, dopustiva naprezanja pri prednapinjanju bila premašena na većem dijelu duljine nosača.

Zbog toga se sprječava prijanjanje između užeta i okolnog betona na potezu počev od presjeka u kojem bi dopustiva naprezanja bila dosegnuta **uvlačenjem užeta u plastičnu cijev.**

13.4 Raspored pravih natega

Postupak određivanja tih poteza predočen je na slici 13.27.

- Prvo se nanese pravokutnik visine $(P/A) \cdot (1 + e/j_g)$.
- Zatim se od njega odbije **odozgor** parabola visine M_{g0}/W_d .
- Slijedi povlačenje **vodoravnoga pravca** na visini f_{tn} (dopustivo tlačno naprezanje pri prednapinjanju) od **donjega** ruba.
- Počev od **presjecišta toga pravca s parabolom** treba **odvojiti** nekoliko užetā od betona (spriječiti prianjanje).



Postupak se ponavlja onoliko puta koliko je potrebno. Užeta se odvajaju **napreskokce** i u vodoravnom i u okomitom smjeru.

Slika 13.27: Postupak određivanja poteza duž kojih treba odvojiti užeta od betona

13.4 Raspored pravih natega

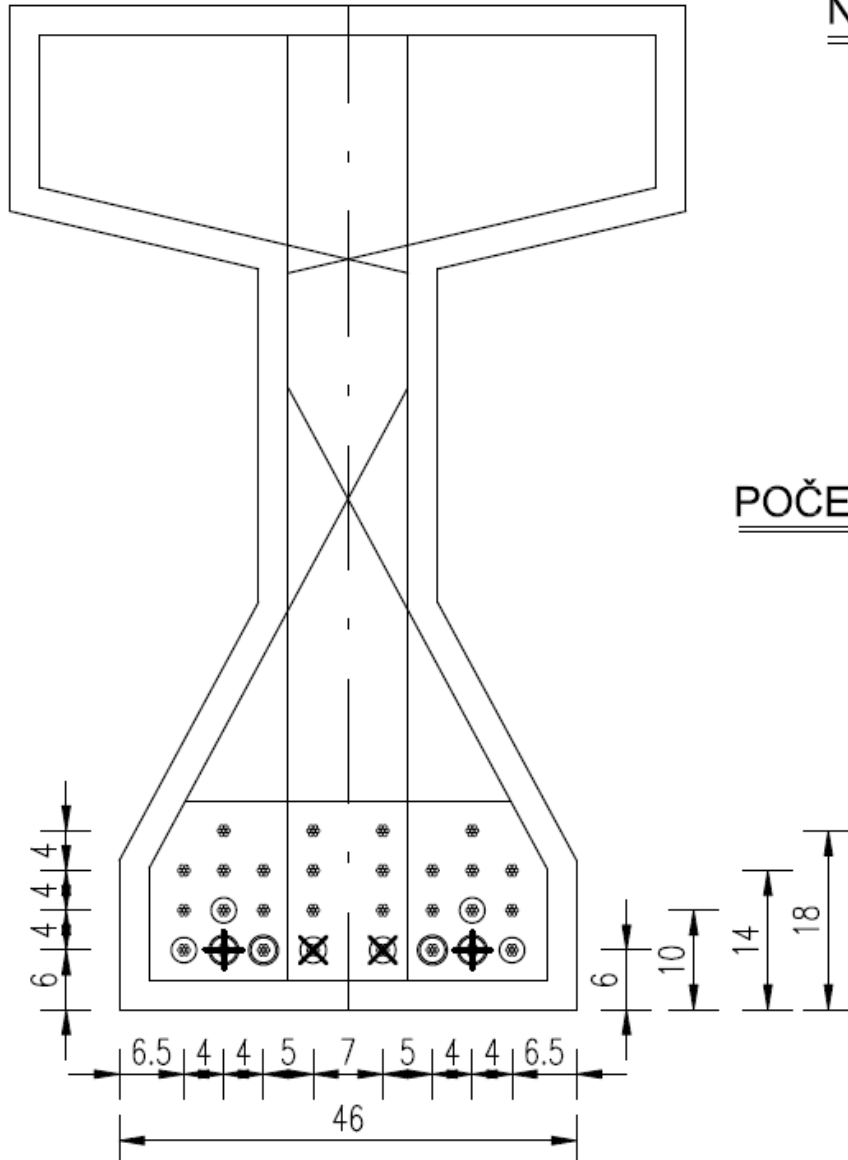
Na slici 13.28 predočen je **primjer** odvajanja užetā.

NEUTRALIZACIJA (MJERENO OD ČELA):

- ⊕L=400 cm Kom=2
- ⊗L=300 cm Kom=2
- ⊙L=200 cm Kom=2
- ⊖L= 90 cm Kom=4

POČETNA SILA PO JEDNOM UŽETU NA PREŠI:

$$P=126.0 \times 0.93 = 117.20 \text{ kN}$$



Slika 13.28: Raspored odvajanja užeta s duljinama duž kojih se to čini