

7 STUPNJEVI PREDNAPINJANJA

7.1 Uvod

- Prigodom razmatranja **ponašanja PB nosača pod rastućim opterećenjem** spomenuli smo **pojam stupnja prednapinjanja** i u svezi s tim **tri** uvriježena **stupnja**.

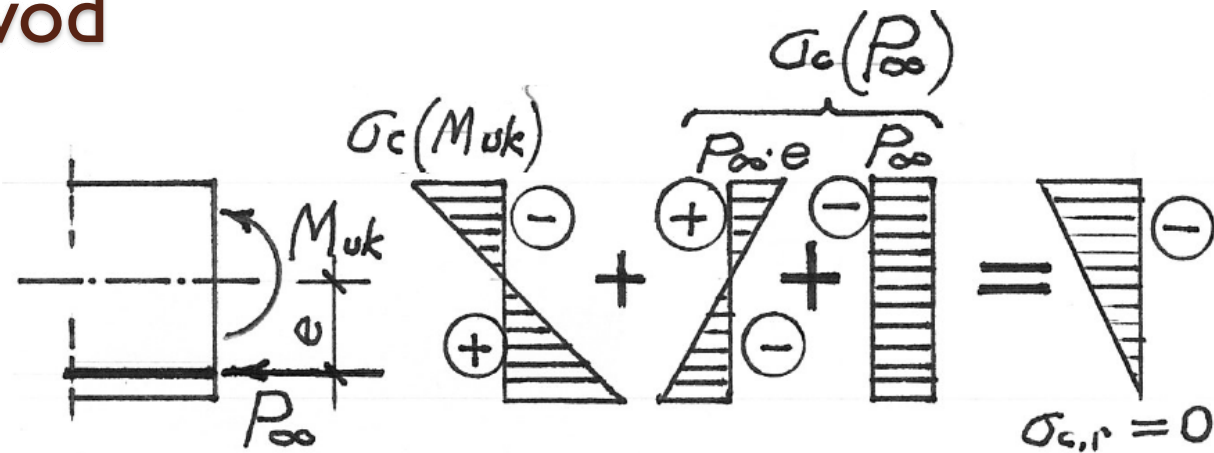
Ponovimo to.

- **Potpuno** je **prednapinjanje** onaj stupanj prednapinjanja pri kojem pod djelovanjem **ukupnog opterećenja** i nakon dovršetka **skupljanja** i **puzanja betona**, te **opuštanja čelika za prednapinjanje** cio presjek ostaje pod tlakom.

U skrajnjem slučaju rub presjeka bliži nategama ostaje rastlačen, tj. **rubno tlačno naprezanje iščezava** (jednako je **ništici**, slika 7.1).

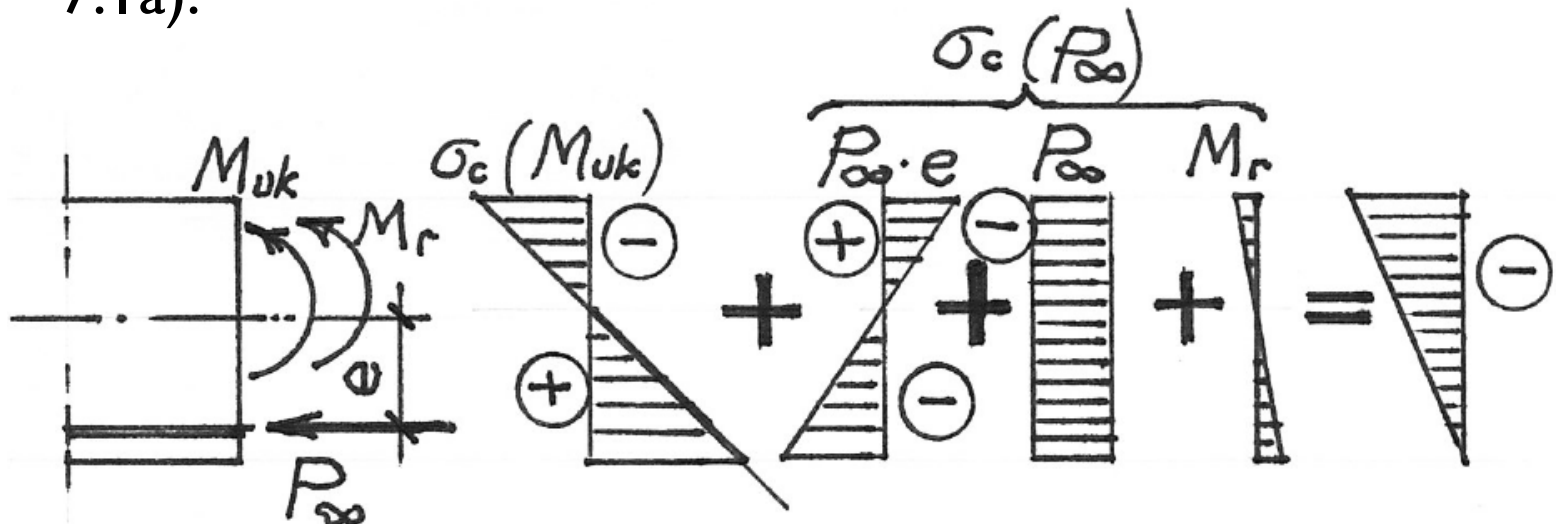
Ovaj stupanj prednapinjanja primjenjuje se na **željezničkim** mostovima i drugim **dinamički** opterećenim sklopovima.

7.1 Uvod



Slika 7.1: Rubno rastlačenje presjeka pri potpunom prednapinjanju (statički određeni nosač)

U slučaju statički neodređenih sustava mora se pribrojiti (algebarski) i prekobrojni (hiperstatički) moment savijanja (slika 7.1a).

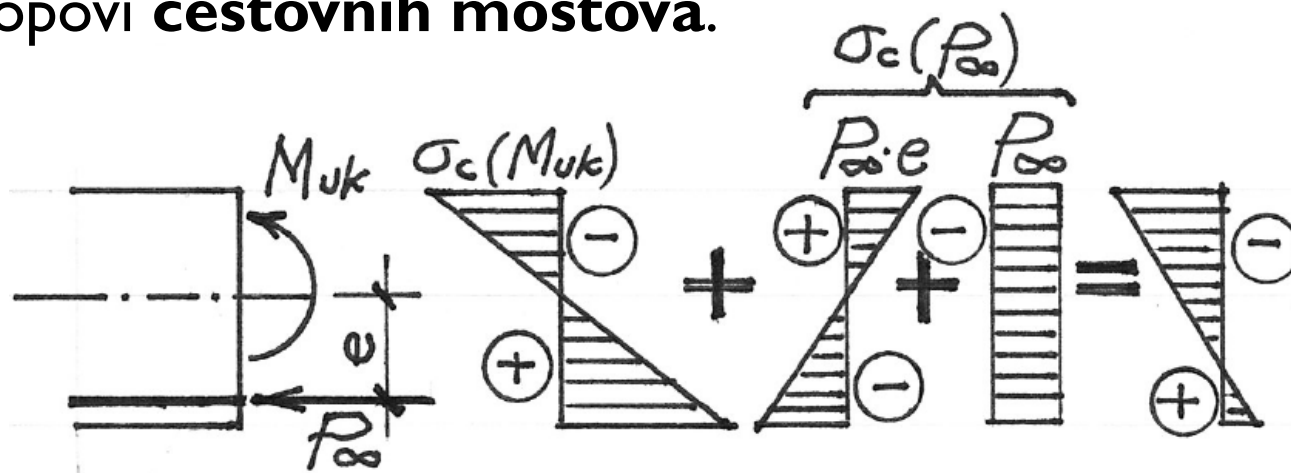


Slika 7.1a: Rubno rastlačenje presjeka pri potpunom prednapinjanju (stat. neodređeni nosač)

7.1 Uvod

- **Ograničeno je prednapinjanje** stupanj prednapinjanja pri kojem pod djelovanjem **ukupnog opterećenja** i nakon dovršetka **skupljanja** i **puzanja betona**, te **opuštanja čelika za prednapinjanje rubna naprezanja** (uz oba ruba!) **ne premašuju dopustiva** (slika 7.2).

Ovaj je stupanj prikladan za PB nosače s **malim udjelom promjenjivog opterećenja**, poput **krovnih nosača** tvorničkih hala, a ranije su se tako prednapinjali i rasponski sklopovi **cestovnih mostova**.



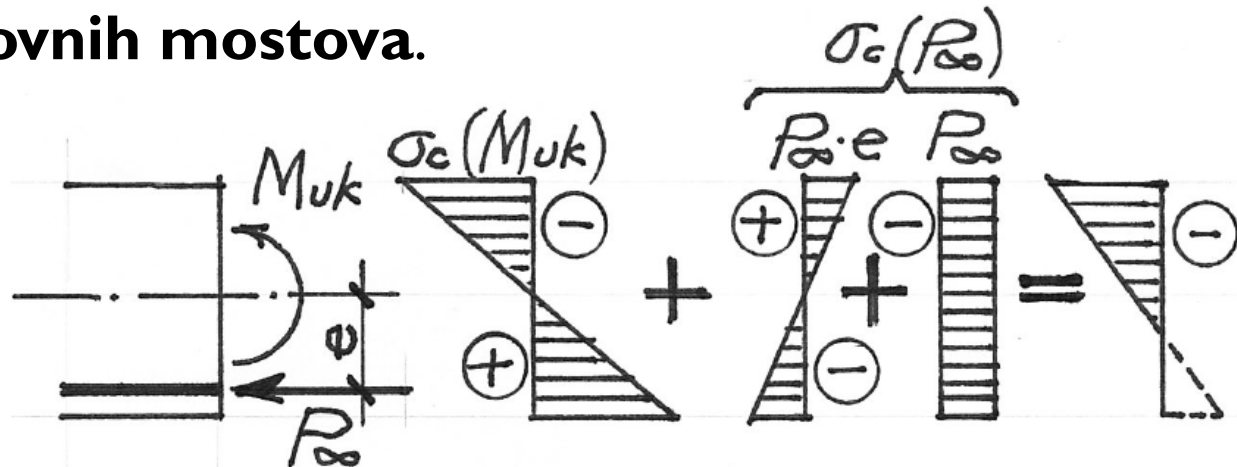
Slika 7.2: Naprezanja po presjeku pri ograničenom prednapinjanju

Prekobrojni moment savijanja od statičke neodređenosti uzeo bi se u obzir na jednak način kao na slici 7.1a.

7.1 Uvod

- **Djelomično je prednapinjanje** stupanj prednapinjanja pri kojem pod djelovanjem **ukupnog opterećenja** i nakon dovršetka **skupljanja** i **puzanja betona**, te **opuštanja čelika za prednapinjanje** rubna vlačna naprezanja **premašuju dopustiva**, dapače, presjek **raspucava** (slika 7.3).

Ovaj je stupanj prikladan za PB nosače s **velikim udjelom promjenjivog opterećenja**, poput rasponskih sklopova cestovnih mostova.



Slika 7.3: Naprezanja po presjeku pri djelomičnom prednapinjanju

Prekobrojni moment savijanja od statičke neodređenosti uzeo bi se u obzir na jednak način kao na slici 7.1a.

7.1 Uvod

Pri svemu ovomu valja imati na umu dvije granične vrijednosti sile prednapinjanja:

- **početna** sila, P_0 , tj. sila što djeluje na zadani presjek u **trenutku napinjanja natega** i
- **konačna** sila, P_∞ , tj. sila što djeluje na zadani presjek nakon dovršetka **skupljanja** i **puzanja betona**, te **opuštanja čelika za prednapinjanje**.

Očito je dakle kako je **konačna** sila prednapinjanja jednaka **početnoj** umanjenoj za **gubitke** od spomenutih uzroka.

U svezi sa stupnjem prednapinjanja važan je i pojam **momenta rubnog rastlačenja presjeka** (momenta dekompresije), M_D .

To je moment savijanja što **na rubu presjeka bližem nategama** upravo **poništava tlak** izazvan **konačnom silom prednapinjanja**.

7.1 Uvod

Predhodno se može izreći i ovako:

Konačnu silu prednapinjanja, P_{∞} , treba odabrati tako da bude najmanje tolika da pod mjerodavnom kombinacijom vanjskih opterećenja naprezanje na rubu presjeka bližem nategama budu u graničnom slučaju jednaka ničtici, dotično da ne premaše dopustivu vrijednost rubnoga vlačnog naprezanja.

Mjerodavna kombinacija opterećenja (ili, općenito, djelovanja) **svakako** mora obuhvatiti **vlastitu težinu sklopa**, te **dodatni stalni teret** (ili njegov pretežni dio) i stanoviti udio **promjenjivog dijela uporabnog opterećenja** (u slučaju mostova to je **prometno opterećenje**) zavisno od **stupnja prednapinjanja**.

Prirodno je stupanj prednapinjanja definirati tako da pri potpunom prednapinjanju mjerodavni pokazatelj bude jednak jedinici.

7.2 Definicija stupnja prednapinjanja

Postoje dvije **osnovne** definicije što se najčešće rabe:

- **Bachmannova**, zasnovana na **momentu rubnog rastlačenja presjeka** i
- **Thürlimannova**, zasnovana na **sili popuštanja čelične armature** (nenapete i/ili prednapete).

Zanimljivo je da su obojica autora definicija **Švicarci**.

Hugo Bachmann definira stupanj prednapinjanja kao **omjer momenta rubnog rastlačenja i momenta od ukupnog opterećenja**:

$$\text{Stupanj prednapinjanja } \kappa = \frac{\text{moment rastlačenja od } g + \Delta q + P_{\infty}}{\text{moment od punog uporabnog opt.}} = \frac{M_D}{\max M_{g+q}}$$

S druge strane, Bruno Thürlimann polazi od **omjera sile popuštanja u prednapetoj armaturi** (nategama) i **sile popuštanja u ukupnoj armaturi**, prednapetoj i nenapetoj:

$$\text{Stupanj prednapinjanja } \lambda = \frac{A_p \cdot f_{py}}{A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy}}$$

7.2 Definicija stupnja prednapinjanja

Pri tomu valja reći da je **sila popuštanja** jednaka **umnošku ploštine presjeka** dotične armature i **naprezanja na granici popuštanja** dotičnog čelika.

Primjerice, za čelik za prednapinjanje ta je sila:

$$P_y = A_p \cdot f_{py}$$

Za nenapetu armaturu (betonski čelik) vrijedi slično.

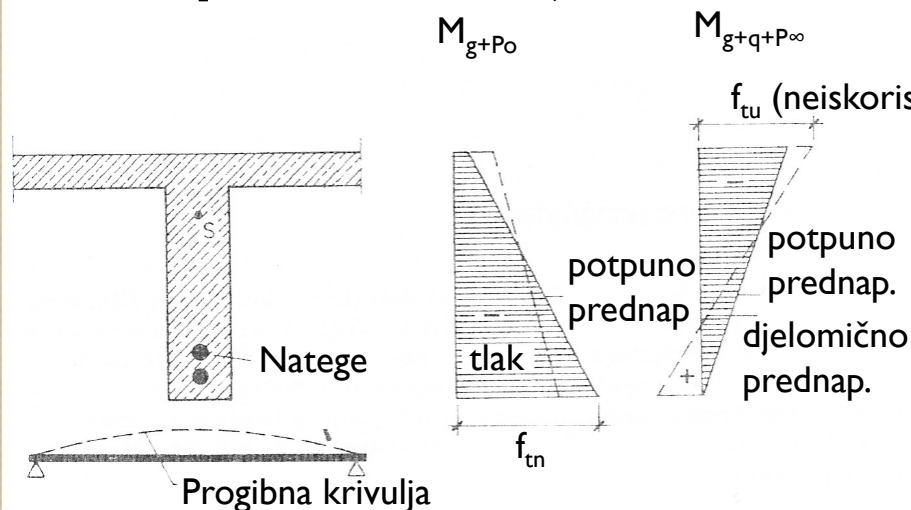
Treba reći kako je Bachmannova definicija **razvidnija** u slučaju sklopovnih dijelova napregnutih **pretežito savijanjem**, dok je Thürlimannova **općenitija**, pa se može primijeniti i na sklopovne dijelove pretežito napregnute **čistim vlakom**, poput vješaljaka i sl.

Međutim, ne treba se **kruto** držati **nijedne** od ovih definicija nego **stupanj prednapinjanja** odabirati tako da se pod **stalnim djelovanjima** dobiju **umjereno velika naprezanja**.

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Budući da je sklonost betona **raspucavanju** njegov **najkrupniji nedostatak**, a on se prevladava **prednapinjanjem**, izgledalo bi u prvi mah kako je **potpuno prednapinjanje najbolje rješenje**, dotično kako vrijedi: **što viši stupanj prednapinjanja, to bolje**.

Međutim, ne samo da **nije tako**, nego kadšto može vrijedjeti i **suprotna tvrdnja**.



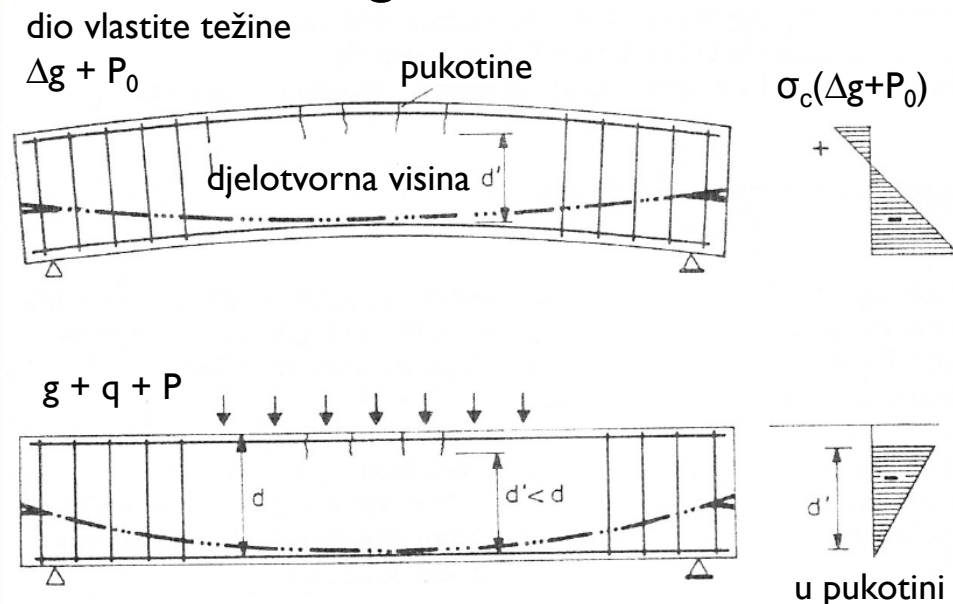
Slika 7.4: Nepovoljni učinci potpunog prednapinjanja

Primjerice, ako je **omjer** promjenjivog opterećenja i vlastite težine nosača, q/g_0 , **velik**, a presjek je nosača oblika slova T (rebrasti nosač), u slučaju **potpuno noga prednapinjanja** dobije se visoko **tlačno**

naprezanje uz rub **bliži nategama** (slika 7.4).

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

To visoko naprezanje izaziva razmjerno velik **protuprogib** što još i **raste s vremenom** pod djelovanjem **puzanja betona**, a to znatno **smanjuje udobnost prijelaza** ako se radi o glavnom nosaču **mosta**.



Slika 7.5: Nepovoljni učinci visoka stupnja prednapinjanja

Još **nepovoljnije** stanje može nastati u slučaju nosača približno **simetričnih pojasâ** u kojih se uza **suprotni rub** (dalje od natega) dopušta **vlak** (slika 7.5) Beton je uz gornji rub općenito **slabije kakvoće**, pa ako prođe **dulje vrijeme**

(više od mjesec dana) do nanošenja **dodatnoga stalnog tereta**, mogu se pojaviti **pukotine**, što se pod djelovanjem **puzanja betona** **jače otvaraju**.

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Dapače, one se **ne zatvaraju potpuno** nakon **prestanka djelovanja opterećenja** što ih je izazvalo.

Posljedak je ovoga djelovanja: **smanjenje djelotvorne visine nosača** (slika 7.5).

Sve do razmjerno **nedavne** prošlosti **norme nisu nametale ugradbu znatnije nenapete armature u potpuno prednapetih sklopova.**

Kada bi se u **protežnih** sklopova (kontinuiranih konstrukcija) pojavile **pukotine** pod djelovanjem **promjene temperature** ili **dugotrajnih djelovanja** (skupljanja i puzanja betona, te opuštanja čelika za prednapinjanje) ili od **slijeganja ležajeva**, one bi bile **nedopustivo široko rastvorene**, jer **slabije prijanjanje natega** ne bi moglo spriječiti pojavu **rijetkih, a široko rastvorenih pukotina** (vidi poglavlje o ponašanju PB sklopova pod rastućim opterećenjem!).

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Na osnovi višegodišnjeg iskustva (osobito onoga što se temelji na oštećenjima PB sklopova) i na osnovi pokusnih istraživanja došlo se je do jednoznačna zaključka:

ZA OBIČNE NOSAČE, KAKVI SE RABE U VISOKOGRADNJI ILI MOSTOGRADNJI, OGRANIČENO ILI DJELOMIČNO PREDNAPINJANJE JAMČE ZNATNO POVOLJNIJE UPORABNO PONAŠANJE OD POTPUNOGA PREDNAPINJANJA.

Nužna je pretpostavka povoljnijeg ponašanja ugradba dostatne količine nenapete armature dimenzionirane s obzirom na dopustive širine pukotina.

Inače je **potpuno prednapinjanje nužno** samo tamo gdje se moraju izbjeći **razdvojne pukotine** (njem. *Trennrisse*), dakle za prednapinjanje **vješaljaka** ili **stijenka spremnika za tekućine**.

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Ostanemo li pri *Bachmannovoj* definiciji djelomičnoga prednapinjanja, možemo reći da se i po **momentu rubnog rastlačenja**, M_D , vidi o kojem se **stupnju prednapinjanja** radi.

Naime, ako je $M_D = 0$ – radi se o običnomu **armiranom** (neprednapetom) **betonu**.

Ako je pak $M_D = M_{q_{uk}}$, pri čemu je $q_{uk} = g_0 + \Delta g + q$ – to je **potpuno** prednapinjanje.

Između su **ograničeno** i **djelomično prednapinjanje**, pri čemu valja znati da su oba **bliža potpunomu** nego “nultomu” prednapinjanju.

Međutim, zgodno je **stupanj prednapinjanja** izražavati **omjerom momenta rubnog rastlačenja i momenta od ukupnog opterećenja**:

$$K = \frac{M_D}{M_{q_{uk}}}$$

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Naravno, ako se radi o **osno** napregnutu štapu (npr. vješaljci) omjer momenata savijanja nadomješta se **omjerom uzdužnih sila**:

$$\text{Stupanj prednapinjanja } \kappa = \frac{\text{sila rastlačenja od } g + \Delta q + P_{\infty}}{\text{sila od punog uporabnog opt.}} = \frac{N_D}{\max N_{g+q}}$$

Valja znati da κ može biti i > 1 , što znači da pri djelovanju **najvećeg opterećenja ostaje zaliha tlaka**.

To je **redovit** slučaj u **spremnikā za tekuće gorivo**.

Ovdje treba spomenuti kako je *E. Freyssinet*, tvorac prednapetog betona, smatrao **prednapeti beton osobitim gradivom**, različitim od armiranoga, te kako **nije dopuštao nikakve stupnjeve prednapinjanja različite od potpunoga**.

Naime, on je doduše bio svjestan da su **vlačna naprezanja neizbježiva** u slučaju djelovanja **poprečne sile**.

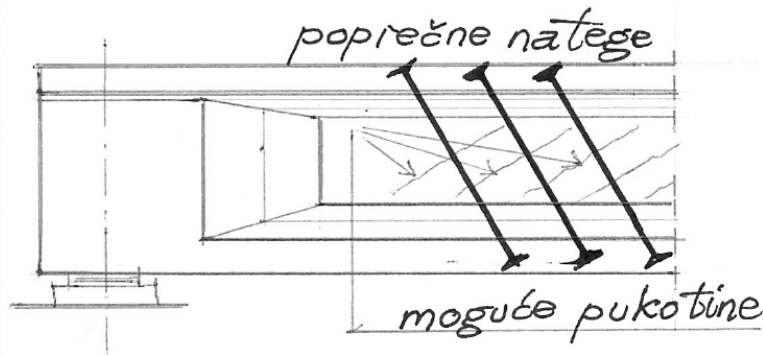
Doista, pogledajmo izraz za glavna naprezanja:

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

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

Izraz pod korijenom uvijek je $> (\sigma_x/2)$, jer je τ_{xy} uvijek $\neq 0$, pa se **vlačna naprezanja ne mogu izbjeći**.

Freyssinet i njegovi sljedbenici rješavali su taj problem poprečnim prednapinjanjem (slika 7.6).



Slika 7.6: Poprečno prednapinjanje radi preuzimanja glavnih vlačnih naprezanja od poprečne sile

Međutim, to je vrlo skupo rješenje, a povezano je i sa znatnim **sklopovnim** (konstrukcijskim) složenostima: nuždan širi hrbat radi ugradbe **poprečnih natega**; sidrenje **kratkih natega** uz rubove nosača itd.

Zbog toga se **poprečno prednapinjanje hrptova** danas primjenjuje samo **iznimno** (hrptovi okvirnih mostova velika raspona izvedenih postupnim prepuštanjem).

7.3 Koji stupanj prednapinjanja odabrati

Prva primjena djelomičnoga prednapinjanja ostvarena je **1948.** iako je **zamisao** rođena još **30.-ih godina.**

Naime, *Abeles*, *Empergerov* učenik, privolio je britanske građevne vlasti da nekoliko **nadvožnjaka nad željezničkim prugama** prednapnu **djelomice.**

Pri tomu su **sve** žice bile od čelika **visoke čvrstoće**, ali je **dio** njih **napeo**, a dio **ostavio nenapetima.**

U ono doba još su vozile **parne** lokomotive, pa su ovi nadvožnjaci pretrpjeli znatna **oštećenja** brže nego što bi se to inače dogodilo.

Tek pod sam kraj *Freyssinetova* života, početkom 60.-ih, **djelomično je prednapinjanje** postalo predmetom opsežnijih **znanstvenih istraživanja** i nakon toga je postupno nalazilo **praktičnu primjenu.**

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednapinjanja na naprezanja u čeliku

Već smo u više navrata vidjeli kako su za **pouzdana** utvrđivanje činjenica u svezi s pojedinom **pojavom** nužna **pokusna istraživanja**.

Tako je H. Bachmann određivao **najpovoljniji stupanj prednapinjanja** držeći **graničnu nosivost pri savijanju nepromjenjivom**.

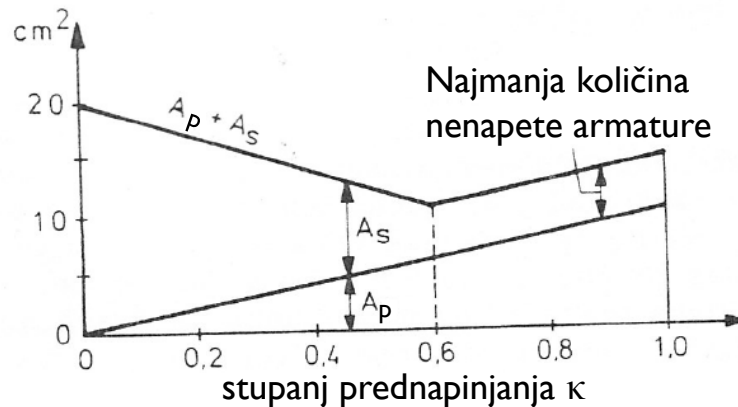
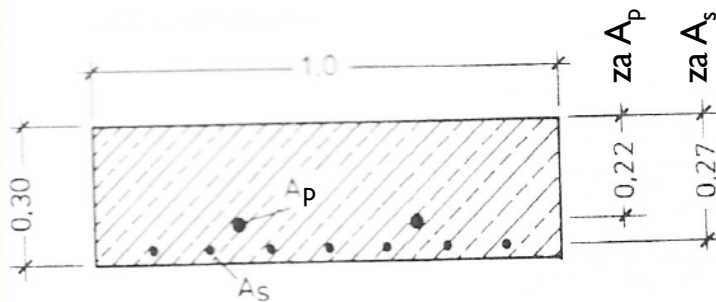
Za uzorke je uzeo jednostavne **plosnate betonske grede** presjeka $1,0 \times 0,3$ m, a količinu nenapete i napete armature varirao je tako da **granična nosivost** pri $1,8 \cdot (g + q)$ ostane **jednaka**.

Naime, po tadašnjim je švicarskim normama (70.-ih godina) vrijedio **jedinstven faktor sigurnosti** za stalna i promjenjiva opterećenja: 1,8.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednap. na naprezanja u čeliku

Valja još reći da je dopustivo **trajno** naprezanje u čeliku, $\sigma_{p\infty}$, bilo $1\,030\text{ N/mm}^2$ (čelik s $f_y = 1\,500\text{ N/mm}^2$; $\sigma_{p0} = 0,75f_{py} = 1\,125\text{ N/mm}^2$).



Slika 7.7: Potrebna ukupna količina armature $A_s + A_p$ u zavisnosti od κ

Na slici 7.7 predočena je potrebna **ukupna** količina **armature** (nenapete i napete) u zavisnosti od **stupnja prednapinjanja**.

Najmanja se količina dobije pri $\kappa = 0,6$.

Međutim, ako uzmemo u obzir da je **čelik za prednapinjanje** više-struko **skuplji** ($3\div 5$ puta), izlazi da bi κ trebao biti nešto niži od 0,5.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednap. na naprezanja u čeliku

Uočavamo kako količina **napete** armature raste **pravocrtno** (linearno) s **povećanjem** stupnja prednapinjanja, a količina **nenapete opada po istom zakonu**.

Zanimljivo je da pri $\kappa > 0,8$ (naravno, za ove geometrijske odnose) ona **nije** ni **potrebna** za **nosivost**.

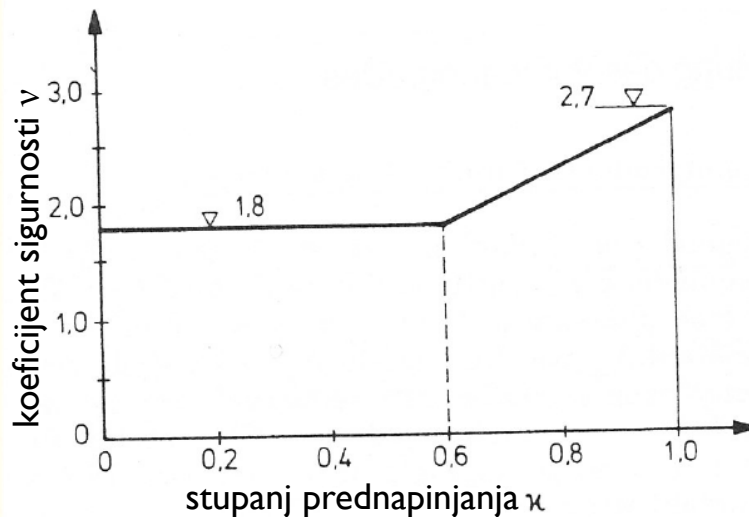
Međutim, **uvijek** je potrebna stanovita **najmanja količina nenapete armature** (tzv. **minimalna armatura**) radi sprječavanja prekomjerna **rastvaranja pukotina** pod drugotnim (sekundarnim) djelovanjima (poput spriječenih pomaka, slijeganja ležajeva i sl. u statički neodređenih sklopova).

Ova se **prekomjerna** (zalihosna) količina nenapete armature neminovno odražava na **povećanju faktora sigurnosti** pri višim vrijednostima κ (slika 7.8).

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednap. na naprezanja u čeliku

Za geometrijske i druge odnose što su vrijedili za uzorke u ovim pokusima povećanje je faktora sigurnosti pri $\kappa = 1$ iznosilo čak 50 %.



Slika 7.8: Prekomjeran stupanj sigurnosti pri visokim stupnjevima prednapinjanja

Međutim, u **uporabnom** je **stanju** od najveće važnosti **priraštaj naprezanja u napetoj armaturi** (nategama) pod **promjenjivim** dijelom **uporabnog** opterećenja.

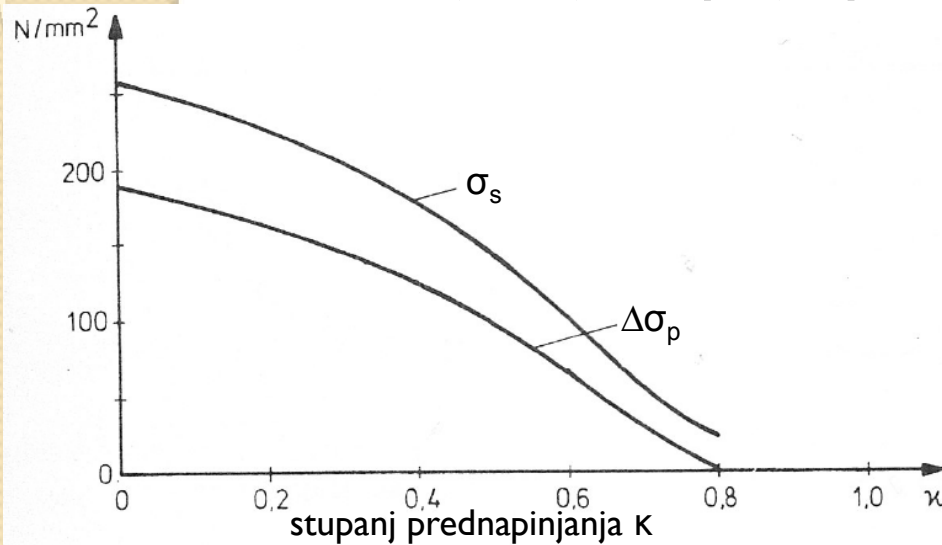
Ovi su pokusi pokazali kako je taj priraštaj počev od $\kappa = 0,4$ zapravo **vrlo malen**, tj. da ostaje **ispod**

granice raspona titranja umorne čvrstoće.

To se osobito jasno vidi na slici 7.9, na kojoj je predloženo i naprezanje u **nenapetoj** armaturi.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednap. na naprezanja u čeliku



Naravno, i **priraštaj naprezanja** u **nenapetoj** armaturi od samo **promjenjivog dijela** uporabnog opterećenja, dakle $\Delta\sigma_{s,q}$, **povrh** naprezanja $\sigma_{s,g+p}$ **zavisan** je od omjera $q : g$.

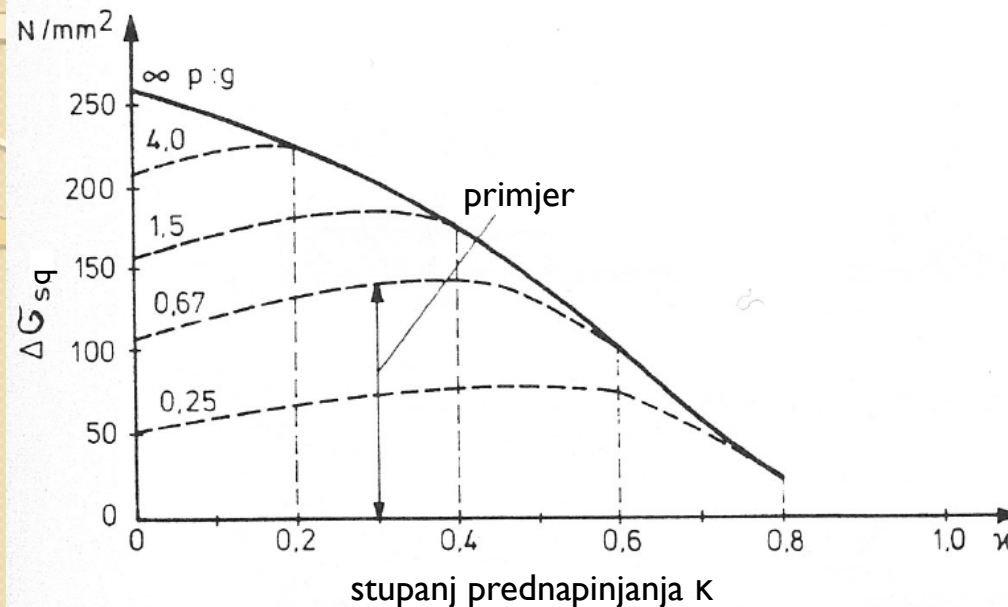
Slika 7.9: Naprezanja u armaturi od $M(q_{uk})$

približno $\kappa < 0,6$, zbog razmjerno **maloga presjeka vlačne armature** **veći nego** u neprednapetih nosača.

Međutim, on je još uvijek **dostatno malen** tako da se približno do omjera $q : g < 0,67$ **najveći mogući priraštaj naprezanja** može uz **dostatnu sigurnost** držati **ispod umorne čvrstoće** (slika 7.10).

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.1 Utjecaj stupnja prednap. na naprezanja u čeliku



Slika 7.10: Priraštaj naprezanja u armaturi od uporabnog opterećenja

oko 1,5 : 1 (dakle $q/g \approx 0,67$), pri čemu pri **porastu raspona biva sve povoljniji**.

Sasvim su drugi odnosi u npr. izrazito **dinamički opterećenih kranskih staza**, ali u njih se ionako **mora dokazati umorna čvrstoća** obiju sastavnica armature.

Valja imati na umu i odnose kakvi vrijede u praksi.

Naime, u **cestovnih je mostova** s rasponskim sklopom od PG nosača i dobetonirane kolničke ploče (rasponi 30 ÷ 40 m) omjer stalnog i promjenjivog opterećenja upravo

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj stupnja prednapinjanja (SP) na širine pukotina i progibe

Ovaj je utjecaj ispitivan u laboratoriju *Savezne visoke tehničke škole* u Lausannei pod vodstvom *R. Walthera*.

Uzorci su bili **pločaste trake** širine 1,0 m i debljine 16 cm što su se pružale **preko dvaju polja** raspona 2,65 m.

Ovdje je **variran Thürlimannov stupanj prednapinjanja** i to tako da je odabiran **cio broj protežnih natega** sastavljenih od po jednog užeta $\varnothing$ 12,7 mm (jedna, dvije i tri), što je odgovaralo stupnjevima prednapinjanja jednakima 0,3; 0,6 i 0,9.

Opterećenje su činili gusto raspoređeni **pojedinačni tereti** što su davali **dijagram momenata savijanja** blizak onom od **jednoliko rasprostrtog opterećenja**.

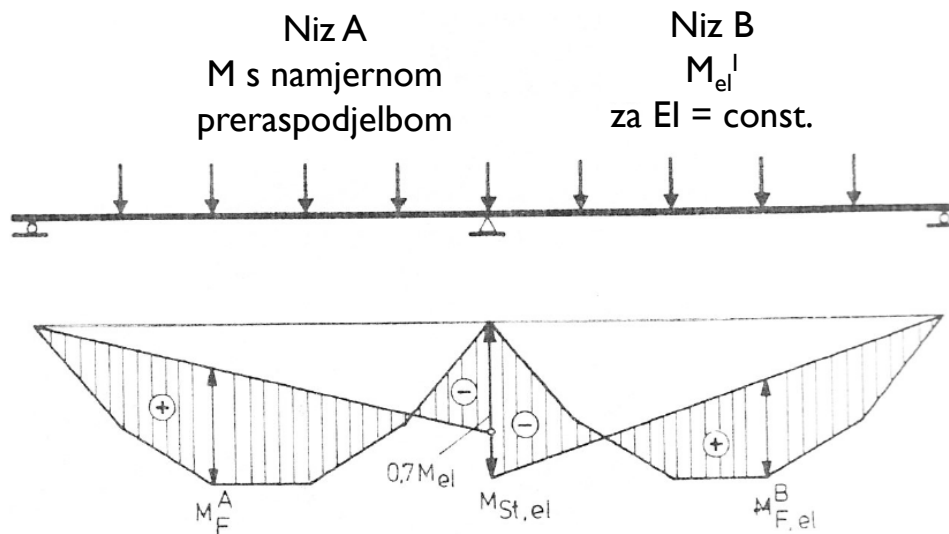
Ispitivane su **dvije inačice** ovog dijagrama: uz pretpostavku savršeno **elastična ponašanja** i uz **preraspodjelu**.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Naravno, **opterećenje**, razmješteno u **petinskim točkama raspona**, raslo je **jednoliko** na svim mjestima.

Na slici 7.11 predložen je **razmještaj opterećenja** i **dijagrami momenata savijanja**, pri čemu je na **lijevoj** polovici nacrtan **preraspodijeljeni** tijek momenata, a na **desnoj elastični**.



Slika 7.11: Tijek momenata savijanja u Waltherovim pokusima

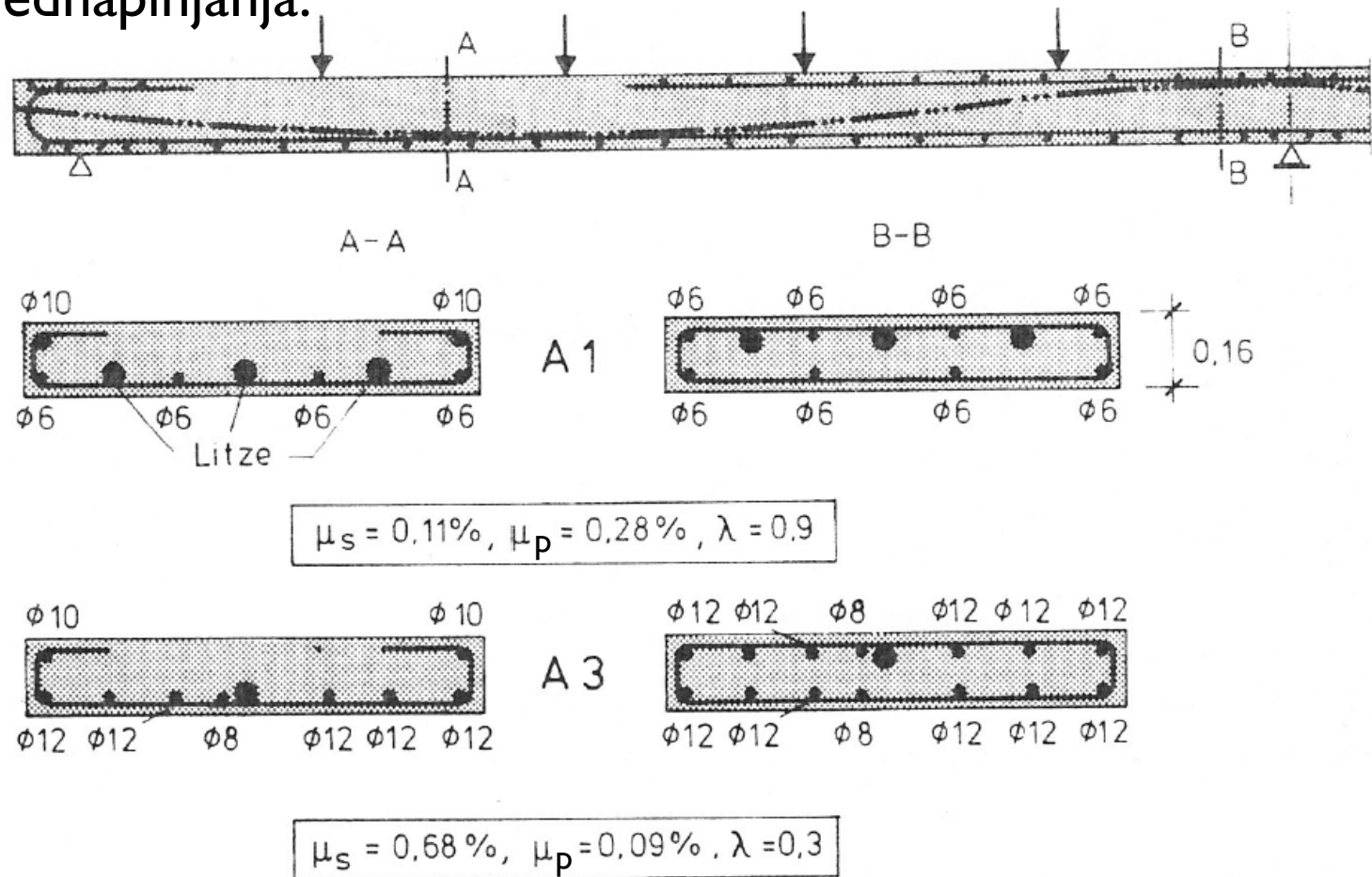
Valja naglasiti da je ova preraspodjelba momenata bila **predviđena**, tj. **dimenzionirana**, a ne spontana.

Uočimo također kako je, radi očuvanja **potpune simetrije** nepomični ležaj smješten na međupotpori.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Na slici 7.12 predložen je uzdužni i poprečni **razmještaj nategā i nenapete armature** za dva skrajnja stupnja prednapinjanja.



Slika 7.12: Armatura i natega u Waltherovim pokusima

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Uzorci s preraspodijeljenim tijekom momenata savijanja nose oznaku A, a oni s elastičnim B.

Slomna su opterećenja izračunana na dva načina:

- uz pretpostavku graničnih skraćivanja/produljenja, ε , po normama, Q_{gr} i
- uz pretpostavku prekoračenja normnih vrijednosti, $Q_{u,pr}$

Izmjerena slomna opterećenja, $Q_{u,mj}$, uspoređena su s **proračunskima** i vidi se da ih premašuju a više od 30 % (osim na dvama uzorcima, vidi tablicu 7.1).

Tlačne **čvrstoće betona**, ispitane na **kockama**, bile su između 32,6 i 49,4 N/mm².

Svi bitni pokazatelji u svezi sa **slomnim opterećenjem** predočeni su u tablici 7.1.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Uzo rak	Preraspo- djelba		Stupanj prednapi- njanja, λ		Q_{gr} kN	Slomno optereć.		$\frac{Q_{umj}}{Q_{gr}}$
	ležaj	polje				$Q_{u,pr}$	$Q_{u,mj}$	
A1	0,71	1,18	0,9		140	163	186	1,33
A2			0,6		139	164	178	1,28
A3			0,3		137	176	184	1,34
A4			—		137	180	182	1,33
B2			0,35	0,76	14	16	17	1,26
B3	1,00	1,00	0,20	0,38	13	17	18	1,38
B4			—	—	13	17	18	1,36

Tablica 7.1: Slomna opterećenja ispitanih uzoraka

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Izmjerene širine pukotina pokazuju jednu osobitu zanimljivost.

Naime, već pri stupnju prednapinjanja $\lambda = 0,3$ očituje se vrlo **povoljan učinak prednapinjanja**: pukotine pri **punom uporabnom opterećenju** približno su **upola manje** nego u **neprednapetih** nosača (nosači A4 i B4 na slici 7.13).

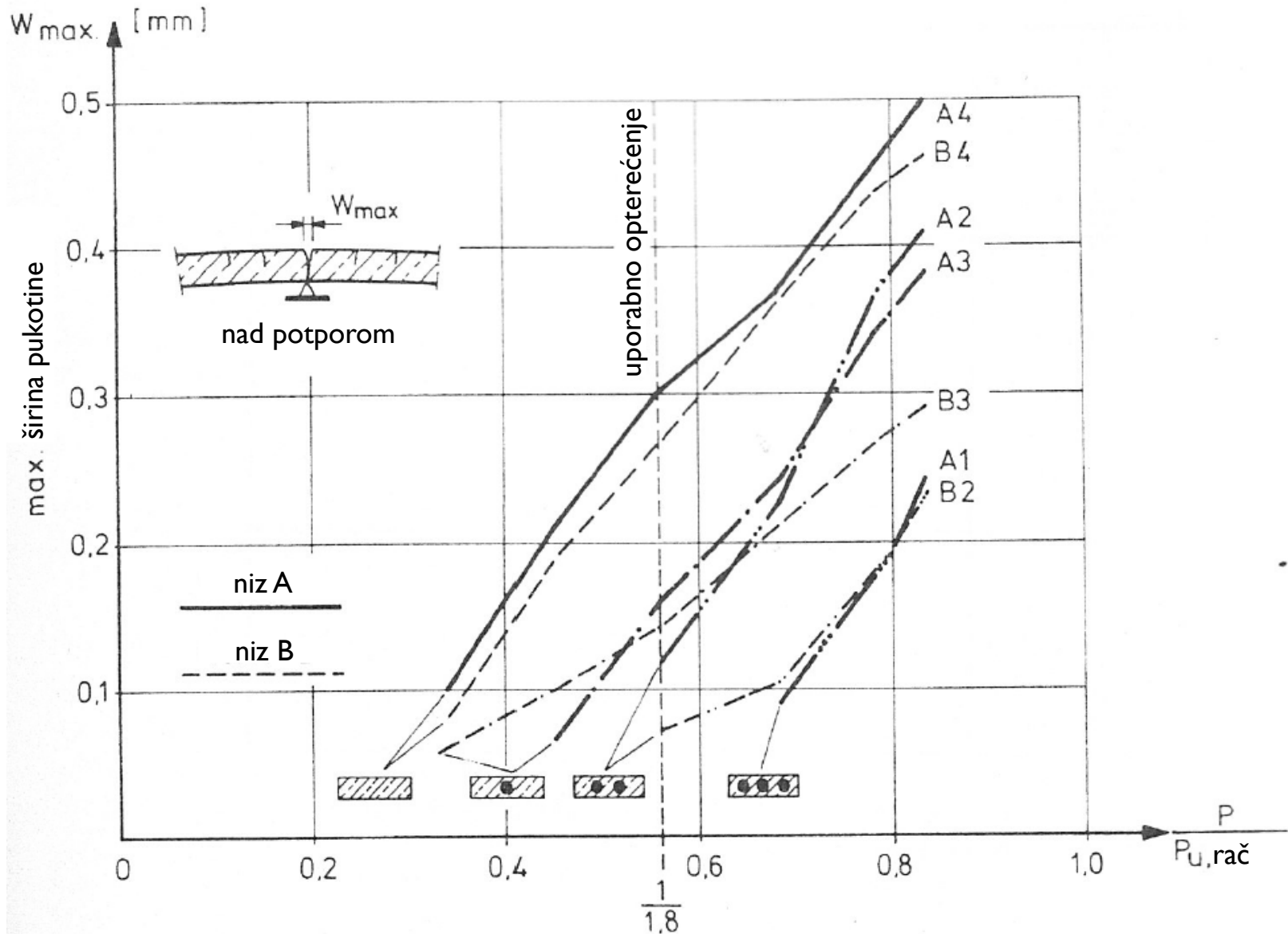
S druge strane, pri stupnju prednapinjanja $\lambda = 0,6$ pukotine pri **punom uporabnom opterećenju** ostaju **jedva uočljive** ($w_{\max} \approx 0,05 \text{ mm}$).

Inače su **proračunane širine pukotina** dobivene na osnovi **preraspodijeljenih** momenata savijanja **bliže izmjerena** od onih dobivenih iz **elastičnih** momenata.

Na slikama 7.13 i 7.14 predočene su širine pukotina **nad potporom i u polju**.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

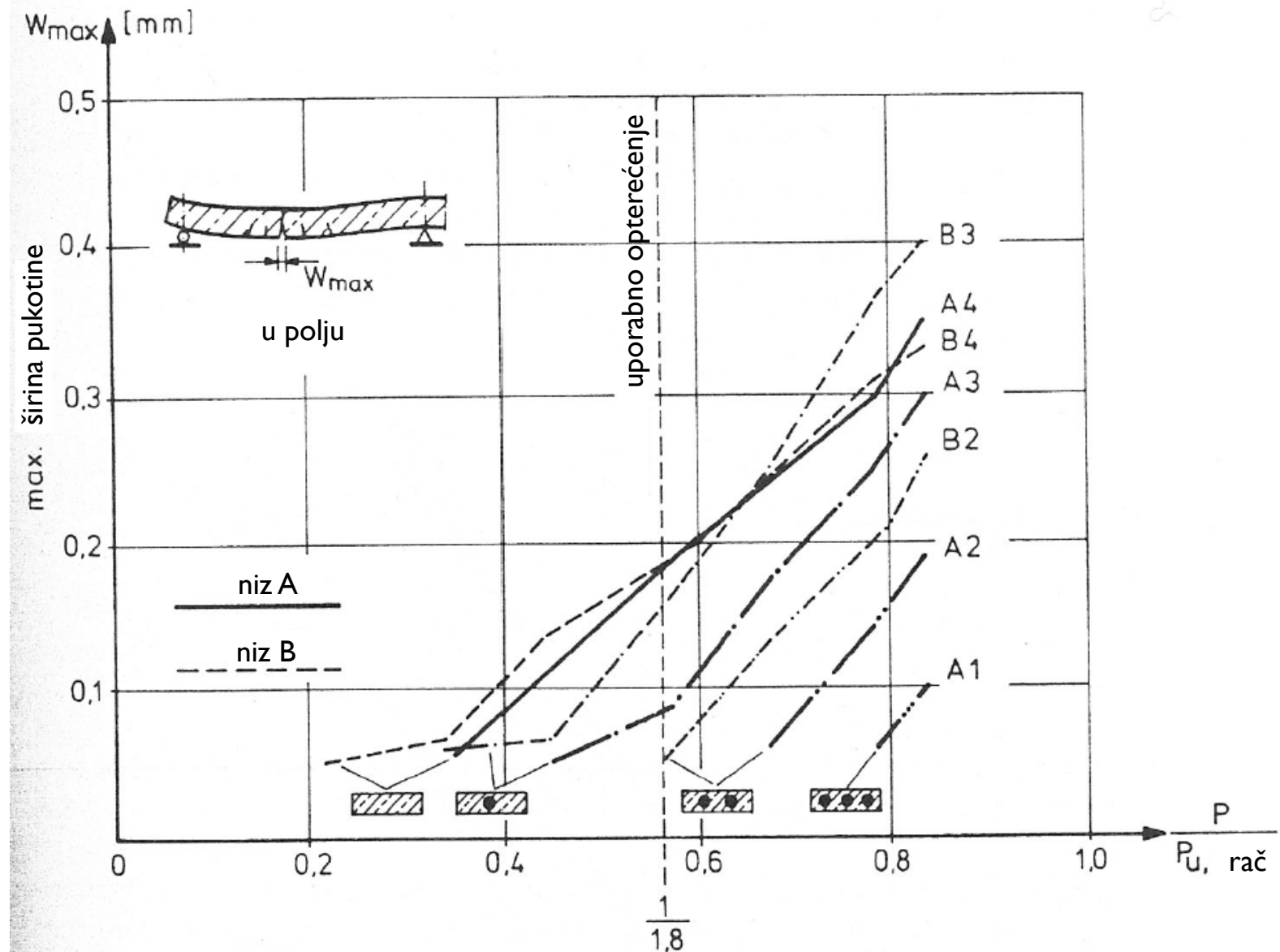
7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe



Slika 7.13: Najveće širine pukotina nad potporom pri porastu uporabnog opterećenja 29

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe



Slika 7.14: Najveće širine pukotina u polju pri porastu uporabnog opterećenja

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Iz ovih se slika može izvući **vrlo važan i dalekosežan zaključak**:

- Već se razmjerno **niskim stupnjevima prednapinjanja** ($\lambda = 0,3 \text{ } 0,6$) može postići da **pukotine u uporabnom stanju**, dapače i pri **opetovanom opterećivanju**, ostanu u području što **ne ugrožava trajnost** ($w_{\max} < 0,2 \text{ mm}$) i to pri vrlo **nepovoljnu omjeru promjenjivog dijela uporabnog opterećenja i vlastite težine nosača**.

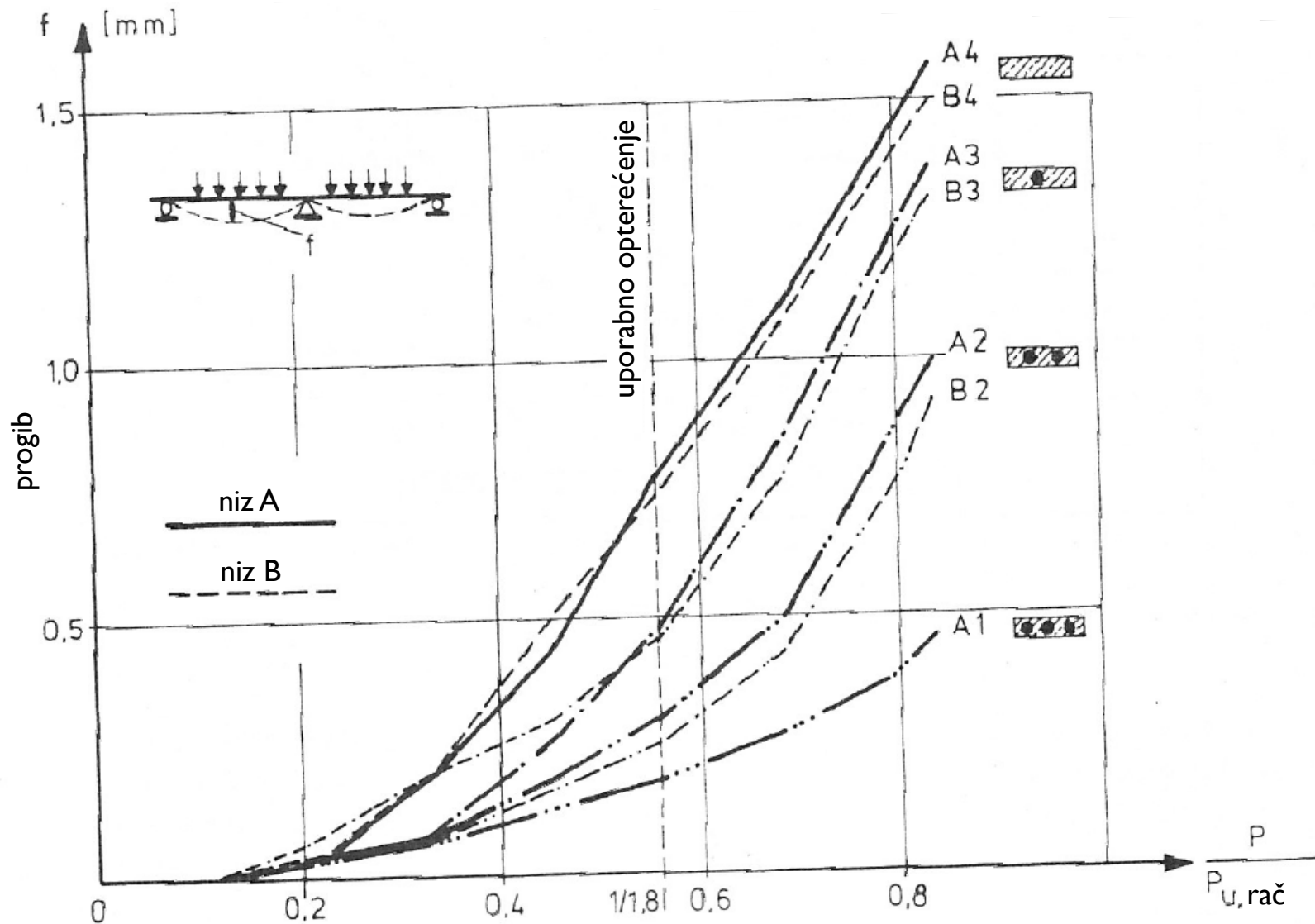
Naime, u ovim je pokusima taj omjer, **$q : g_0$** , bio pače **9 : 1**!

* * * * *

Na sljedećoj ćemo slici (slika 7.15) vidjeti kako se podjednako **povoljni učinci prednapinjanja** (pa i **djelomičnoga**) očituju i na **progibima**.

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe



Slika 7.15: Najveći progibi u polju pri porastu uporabnog opterećenja

7.4 Mjerila za odabir stupnja prednapinjanja

7.4.2 Utjecaj SP na širine pukotina i progibe

Slika 7.15 pokazuje kako je već stupanj prednapinjanja $\lambda = 0,3$ **dostatan** kako bi se **najveći progib u polju smanjio** za oko 40 %.

Štoviše, pri stupnju $\lambda = 0,6$ progibi su pod **punim uporabnim opterećenjem** samo **neznatno veći** od onih pri **potpunomu prednapinjanju**.

Međutim, zanimljivo je da **namjerna preraspodjelba momenata savijanja** nije proizvela **nikakva učinka na progibe**.

I ovoga puta vrijedi **zaključak**:

- Već su razmjerno **niski stupnjevi prednapinjanja**, $\lambda = 0,3 \div 0,6$, **dostatni** kako bi se **progib pri punom uporabnom opterećenju znatno smanjio** u odnosu na progib **neprednapetih nosača**.

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

Pri odabiru **stupnja prednapinjanja** odlučujući su zahtjevi **na uporabljivost sklopa**.

Primjerice, u **visokogradnji** može se zahtijevati da **gornja ploha stropnih nosača** kakva skladišta ili proizvodne hale bude pod stalnim opterećenjem **vodoravna**.

To onda znači da **za taj slučaj opterećenja** nosači imaju **uravnoteženo stanje naprezanja**: moment od **stalnog opterećenja** jednak je momentu od **skretnog opterećenja** što ga izaziva **sila prednapinjanja**.

Kao što smo vidjeli u predavanju o **djelovanju prednapinjanja**, **uravnoteženo stanje** vlada teorijski samo u **jednomu trenutku**.

Naime, zbog **dugotrajnih djelovanja sila se prednapinjanja postupno smanjuje s vremenom**, a s njom se smanjuje i **skretno opterećenje**.

Zato skretno opterećenje treba biti **malo veće** od stalnoga.

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

Progibi su od tog **neuravnoteženog** dijela opterećenja u pravilu **neznatni**.

Općenito je u takvim slučajevima dostatan *Bachmannov* stupanj prednapinjanja $\kappa = 0,4 \div 0,6$.

S druge strane u **cestovnih mostova** proračunsko opterećenje djeluje zapravo samo u **iznimnim okolnostima**, a ono što djeluje **najčešće** i kroz najveći dio vijeka trajanja mosta čini svega **25 ÷ 50 % proračunskoga**.

Glavni **nosači** tih mostova, osobito **predgotovljeni**, najčešće imaju presjek u obliku slova T (ili imaju proširenu donju pojasnicu), pa bi u slučaju **potpunoga** prednapinjanja dobar dio svojega vijeka trajanja bili pod snažnim djelovanjem **visokih tlačnih naprezanja**, a onda i **jačega puzanja betona**, kako je bilo pokazano na slici 7.4.

Zbog toga je razumno **momentom rubnog rastlačenja** obuhvatiti **stalno** i najviše **polovicu prometnog opterećenja**.

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

Držanje **pukotina** što nastaju pod djelovanjem **punoga proračunskog opterećenja** u **dopustivim granicama** postiže se umješnim odabirom **nenapete armature: što veći broj što tanjih šipaka** za istu potrebnu **ukupnu ploštinu** poprečnoga presjeka.

Ovdje valja spomenuti kako je **još početkom 70.-ih godina**, kada se je gradila AC Zagreb – Karlovac, primijenjeno **djelomično prednapinjanje** kolničke ploče nadvožnjaka nad kanalom Sava – Odra na prilaznoj brznoj cesti prema naplatnim kućicama u Lučkom kod Zagreba iako **tadanji propisi to nisu dopuštali**.

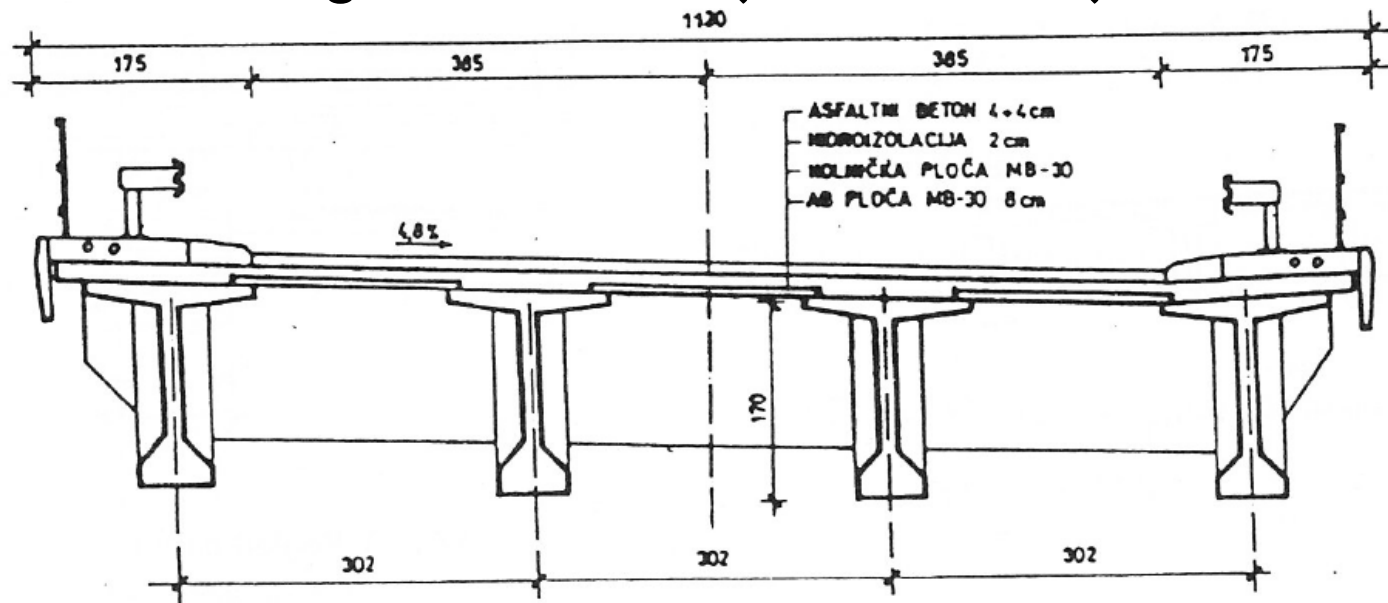
Moment rubnog rastlačenja obuhvaćao je polovicu momenta od prometnog opterećenja.

Djelomično prednapinjanje **glavnih nosača** prvi put je primijenjeno u Hrvatskoj (i uopće u bivšoj državi) na mostovima na cesti Lupoglav – Cerovlje u Istri.

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

Na njima je **momentom rubnog rastlačenja** obuhvaćeno oko **40 % momenta od prometnog opterećenja**.

Na slici 7.16 predložen je poprečni presjek jednog od šest tih mostova, a slično je rješenje primijenjeno i na brojnim mostovima izgrađenima kasnije u Hrvatskoj.



Slika 7.16: Tipični poprečni presjek djelomično prednapetoga mosta
lako norme za **željezničke** mostove **ne dopuštaju** primjenu **djelomičnoga** prednapinjanja (pa ni ograničenoga!) **nema** nikakva **razloga** da se ono ne primjenjuje i tamo.

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

Dakle **pravilo za odabir stupnja prednapinjanja** vrlo je jednostavno:

- **MOMENTOM RUBNOG RASTLAČENJA TREBA OBUHVATITI ČESTA ILI TRAJNA OPTEREĆENJA.**

Hoće li se pri **punom opterećenju** dopustiti pojava **vlačnih naprezanja** ili dapače **raspucavanje** zavisi u prvom redu od **okoliša** i od **položaja promatranog nosača** (ili općenito dijela nosivoga sklopa) u tom okolišu.

Pri tomu je najvažnije ocijeniti hoće li potez nosača na kojem je moguća **pojava pukotina** biti **izložen vlazi i agresivnim tvarima iz okoliša** (osobito kloridima).

U **osobitim slučajevima** stupanj prednapinjanja može biti određen **dopustivim progibom** pod uporabnim opterećenjem (to može biti, primjerice, slučaj PB kranske staze).

7.5 Način odabira stupnja prednapinjanja

U slučaju **vlačnih članaka** (vješaljaka, ali i zategā, u kojih osim uzdužne vlačne sile djeluje i moment savijanja) može biti **svrhovito**, pa i **nužno** odabrati stupanj prednapinjanja $\kappa > 1$, ako prijeti pogibelj nastanka **razdvojnih pukotina** što mogu **ugroziti uporabljivost**.

U **statički neodređenih sklopova**, osjetljivih na **prisilna naprezanja** što nastaju zbog **spriječenih pomaka** (osobito pri djelovanju promjene temperature okoliša – zahladnjenju) bitno je dobro **procijeniti** na kojim će se potezima nosača pojaviti **pukotine** kako bi se mogla valjano dimenzionirati **nenapeta armatura** i primjereno tomu odmjeriti **stupanj prednapinjanja**.

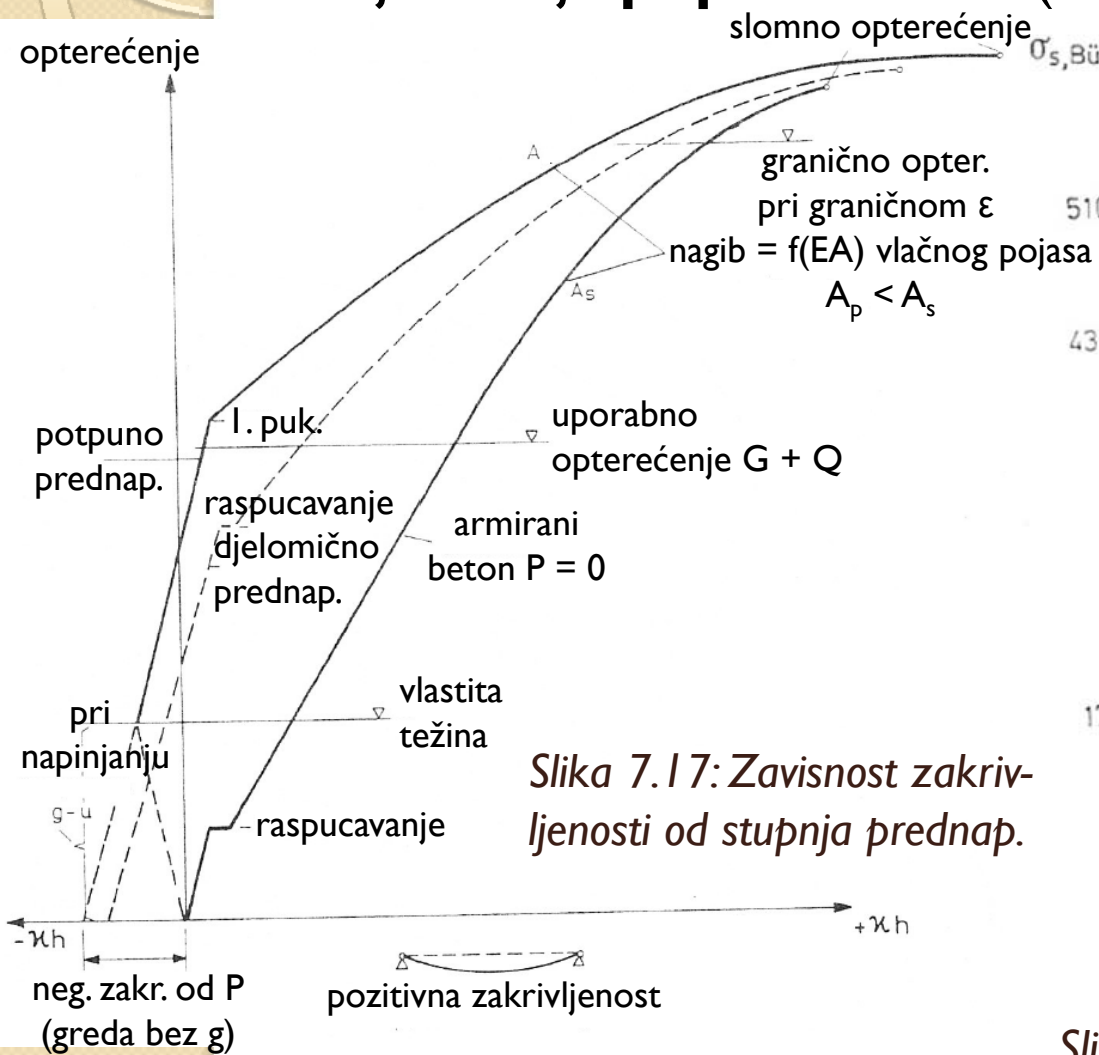
7.6 Prednosti djelomičnoga prednapinjanja

Djelomično prednapinjanje ima ove **izričite prednosti**:

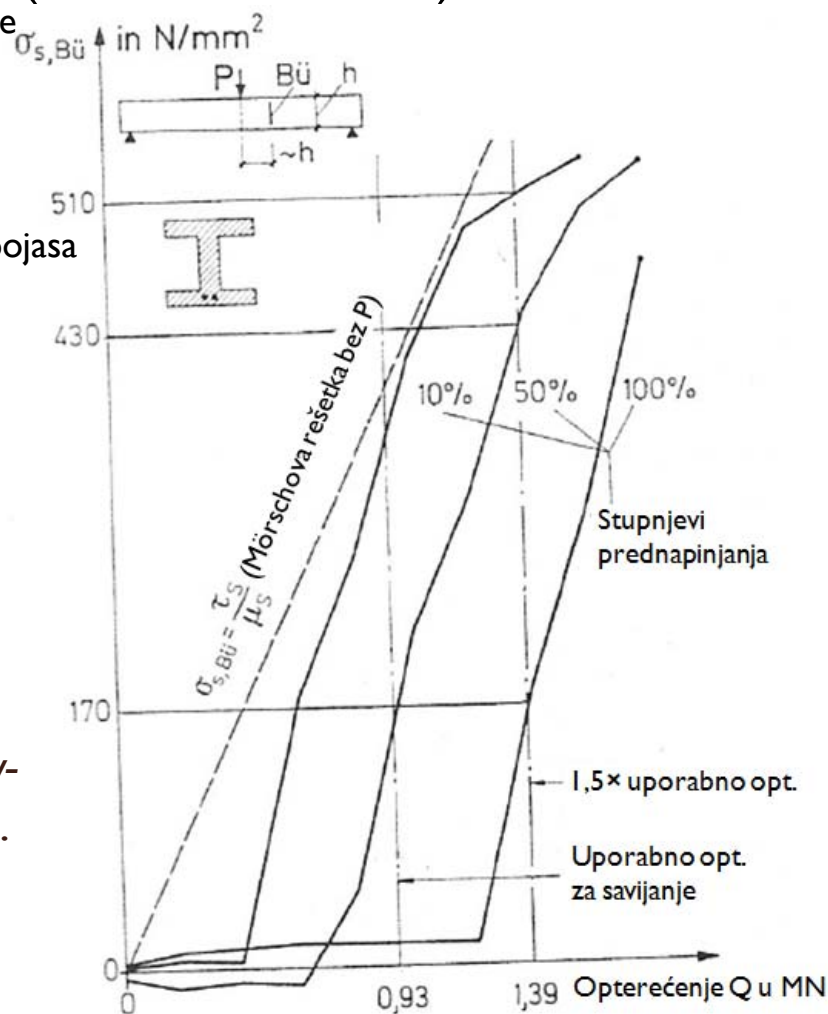
- **Smanjuje se protuprogib** (progib prema gore) pod djelovanjem **sile prednapinjanja** i osobito njegov **priraštaj zbog puzanja**.
- **Bolje iskorištenje** najmanje potrebne **nenapete armature** (što je nužna i u slučaju **potpunoga** prednapinjanja), čime se smanjuju i nepotrebno visoke **zalihe sigurnosti**.
- **Smanjenje gubitaka sile prednapinjanja**, zahvaljujući **manjem puzanju**.
- **Potpuno iskorištenje** moguće **mimoosnosti** i u slučaju visoka udjela **promjenjivog uporabnog opterećenja**.
- **Veća sloboda sklopovnog oblikovanja** zahvaljujući **manjemu broju nategā i slobodnije vođenje nategā**.

7.6 Prednosti djelomičnoga prednapinjanja

Ovim prednostima valja pridodati i **povoljnije ponašanje u graničnom stanju nosivosti** i pri savijanju i pri djelovanju **poprečne sile** (slike 7.17 i 7.18).



Slika 7.17: Zavisnost zakrivljenosti od stupnja prednap.



Slika 7.18: Povoljan učinak DP na popr. silu 41

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

Vlačna **naprezanja** u **čeliku** moraju zadovoljiti ove uvjete:

$$\sigma_{s,ex} \leq f_s; \quad \Delta\sigma_{p,ex} \leq \Delta f_p$$

pri čemu su:

- $\sigma_{s,ex}$ - naprezanje u najudaljenijem sloju armature,
- $\Delta\sigma_{p,ex}$ - naprezanje u najudaljenijem sloju natega nakon rastlačenja betona
- f_s - dopustivo naprezanje u armaturi,
- Δf_p - dopustivi priraštaj naprezanja u nategama nakon rastlačenja betona.

Ova se dopustiva naprezanja određuju zavisno od različitih utjecajnih čimbenika, poput dopustive **širine pukotina**, **razmaka** uzdužnih **šipaka** (na način kako se to i inače čini u AB sklopovima), te o **umornoj čvrstoći**.

U mnogim se normama propisuje i dopustivo **rubno tlačno naprezanje u betonu**.

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.1 Načela na kojima počiva provjera naprezanja

- Postupak je načelno **potpuno jednak** kao u AB sklopova za slučaj **savijanja s tlačnom uzdužnom silom – velika mimoosnost** (veliki ekscentricitet).
- Na **raspucalu** poprečnomu presjeku **ne mogu se zbrajati naprezanja od dvaju slučajeva opterećenja** (vanjsko opterećenje i sila prednapinjanja), jer **položaj neutralne osi zavisi od omjera M/P** .
Dakle, ne vrijedi zakon superpozicije.
- U ovim se razmatranjima ne uzima u obzir **sudjelovanje betona između pukotina** u prenošenju vlačne sile.

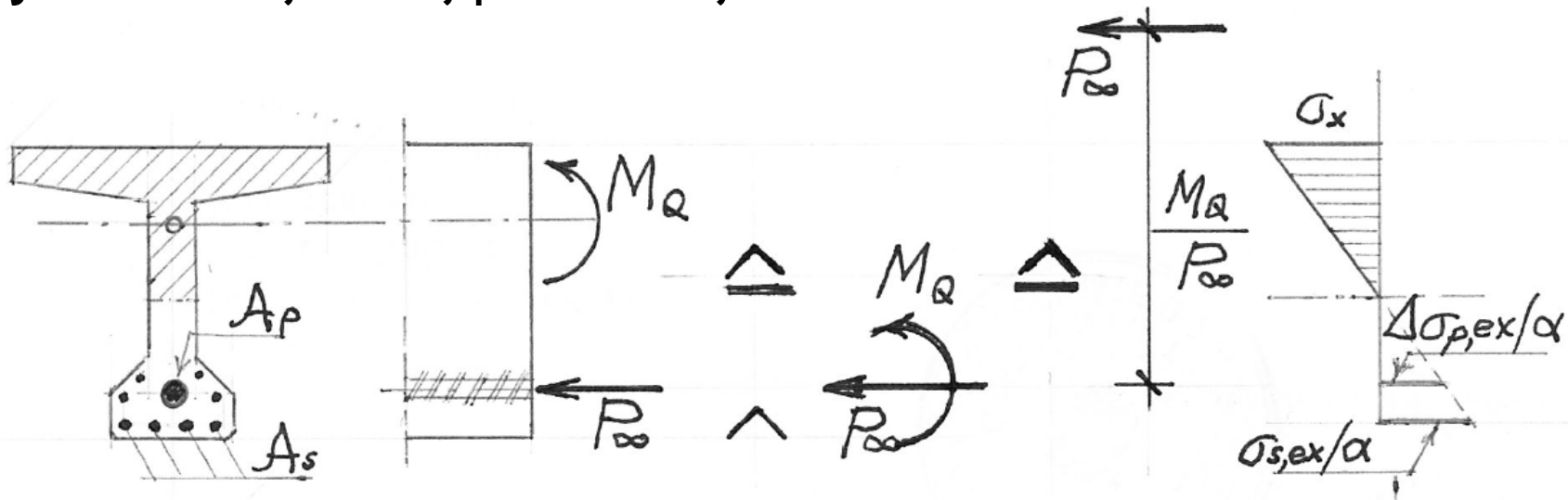
Mogu se razmatrati dva načelno različita slučaja:

- statički određeni nosač (jednostavniji slučaj) i
- statički neodređeni nosač (složeniji slučaj).

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.1 Načela na kojima počiva provjera naprezanja

Jednostavniji slučaj predložen je na slici 7.19.



Slika 7.19: Rezne sile i naprezanja pri djelomičnom prednapinjanju

Na gornjoj su slici:

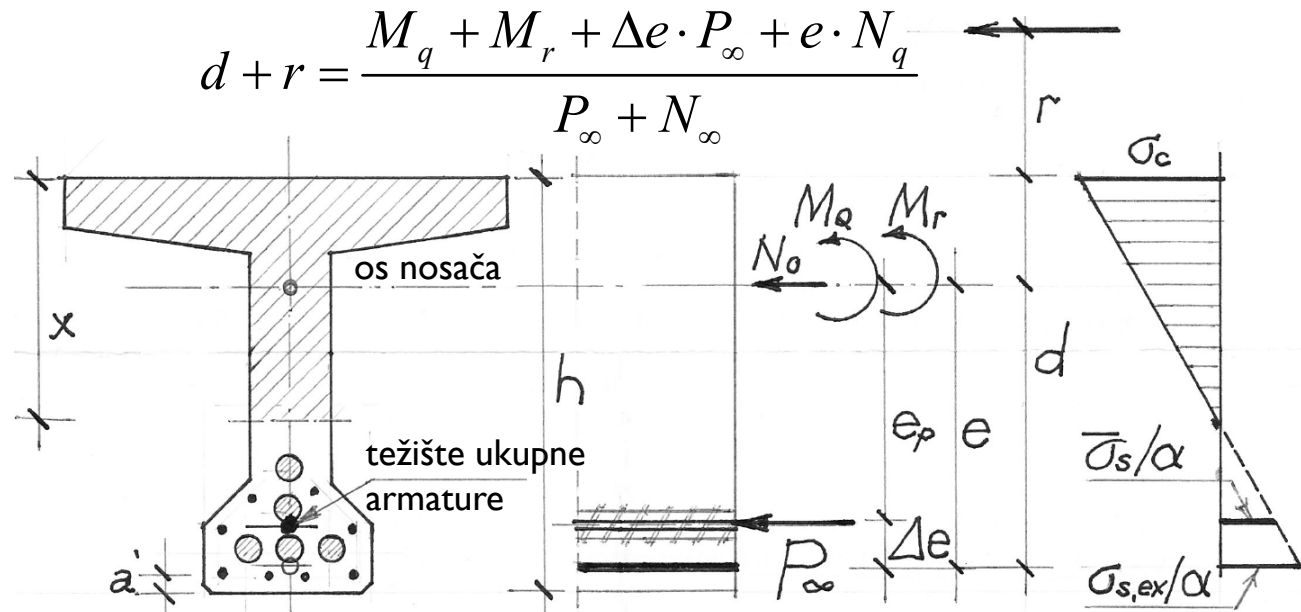
M_Q - moment savijanja od **ukupnoga** vanjskog opterećenja za koji treba provjeriti naprezanja,

P_∞ - **konačna** vrijednost sile prednapinjanja što djeluje **mimoosno** (ekscentrično).

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.I Načela na kojima počiva provjera naprezanja

Složeniji slučaj predložen je na slici 7.20.



Slika 7.20: Rezne sile i naprezanja pri djelomičnom prednapinjanju (složeniji slučaj)
Na gornjoj su slici:

M_Q - moment savijanja od **ukupnoga** vanjskog opterećenja,

M_{P_∞} - statički neodređeni moment od prednapinjanja

P_∞ - **konačna** vrijednost sile prednapinjanja,

N_Q – uzdužna sila od vanjskog opterećenja (često = 0).

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.1 Načela na kojima počiva provjera naprezanja

Provjera se izvodi:

- ručno (“pješice”),
- uz pomoć tablica i
- uz pomoć računala.

Danas je ovaj **treći** način gotovo **potpuno istisnuo iz uporabe** dva druga.

Valja pripomenuti da se računa s tzv. **idealnim vrijednostima geometrijskih pokazatelja poprečnoga presjeka**.

Pri tomu treba paziti da se u slučaju **slobodnih natega** (bez prijanjanja) **ne uračunavaju poprečni presjeci natega**.

7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.2 Opaske

- **Rubno rastlačenje**

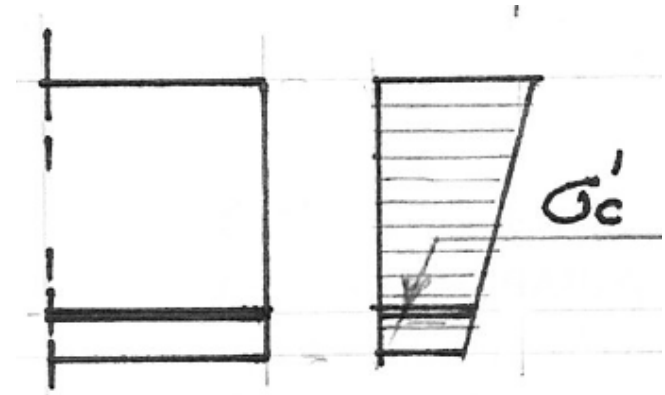
Bilo bi **točnije** pri provjeri naprezanja za **djelomično prednapinjanje** mjesto sa silom P_{∞} računati s uzdužnom silom P_{∞}' (silom **rastlačenja**) što odgovara produljenju $\Delta\varepsilon_p$ u trenutku kada se beton **rastlačuje**.

Ta je sila rastlačenja:

$$P_{\infty}' = P_{\infty} - \alpha \cdot \sigma_c' \cdot A_p \text{ (vidi skicu)}$$

Međutim, budući da je $P_{\infty} < P_{\infty}'$ (jer je σ_c' negativno!), računamo li s P_{∞} ostajemo na strani sigurnosti (**manja** uzdužna sila daje **veća** naprezanja u čeliku).

Budući da u proračunu imamo i drugih **nepouzdanosti** (primjerice procjena gubitaka od **trenja**), **ne isplati se uzimanje rastlačenja u obzir**.



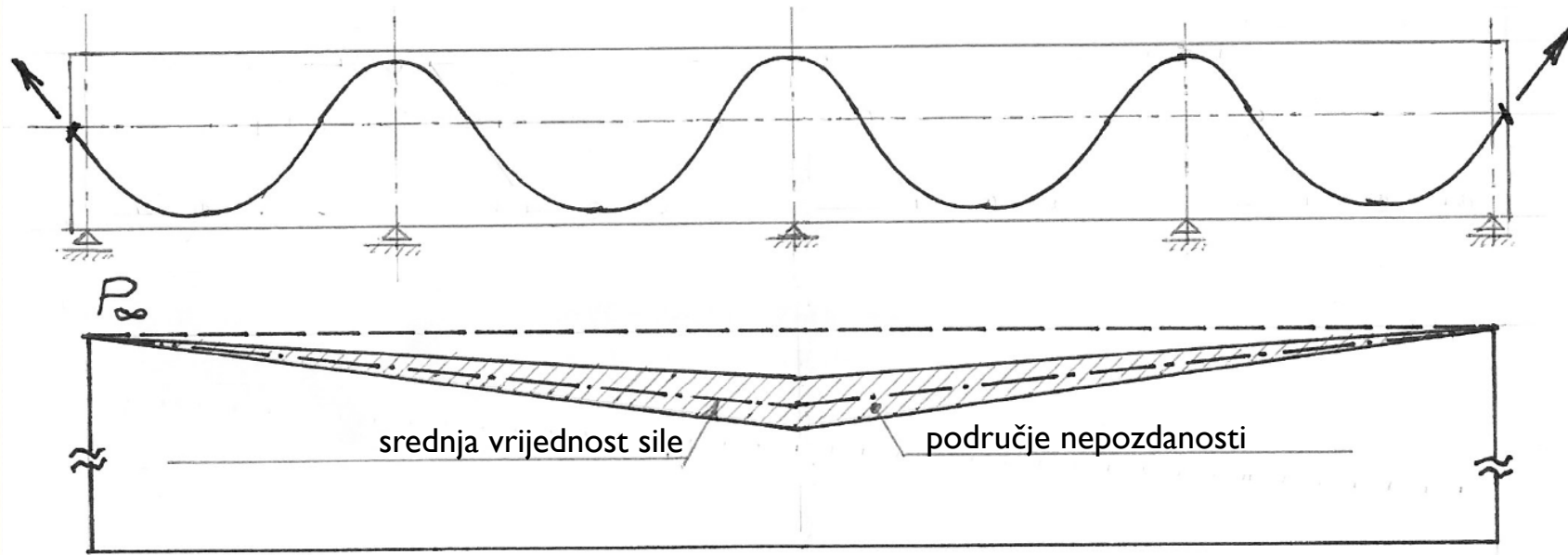
7.6 Provjera naprezanja u raspucalu presjeku

7.6.2 Opaske

- **Utjecaj krive procjene uzdužne sile**

Nepomnjlivo napinjanje natega ($P < P_{\text{potr.}}$) i/ili podcijenjeni gubitci sile od trenja i dr. mogu dovesti do prekomjernih izobličenja uz vlačni pojas.

Primjer: premala sila prednapinjanja zbog povećana trenja (slika 7.21).



Slika 7.21: Nepovoljan utjecaj trenja u statički neodređenom nosaču