

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Čimbenik koji **najviše** utječe na to hoće li se i u kolikoj mjeri **ponašanje** PB nosača razlikovati pod rastućim opterećenjem od ponašanja **neprednapetih** nosača jest **prijanjanje** između nategā i betona.

Naime od prijanjanja zavisi u najvećoj mjeri hoće li presjeci i pri **višim razinama opterećenja** ostati **ravni** (*Bernoullijeva* pretpostavka).

Tako se **predhodno** napeti nosač (u kojega je prijanjanje **izravno**, bez posredovanja morta za injektiranje) ponaša **gotovo jednako kao armirani**.

Ponašanje pak **naknadno** napetoga nosača, s **posrednim** prijanjanjem, **zamjetno** je (iako ne i nužno izrazito) **drukčije**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Na kraju, nosači napeti **slobodnim** (unutarnjim ili vanjskim) nategama ponašaju se **izrazito drukčije**.

Jedini **pouzdan** način utvrđivanja zakonitosti ponašanja PB nosača pod rastućim opt. u zavisnosti od **stvarne mjere prijanjanja** jest provedba **pokusā** na dostatno velikim uzorcima, a u novije se doba, budući da su pokusi dugotrajni i skupi, sve više poseže za **računalnim praćenjem** ponašanja (kompjutorska simulacija).

U prvim godinama **mnoštvene** (masovne) primjene PB u **mostogradnji** (koja je bila potaknuta nestašicom čelika) izvodili su se **pokusi** na doista **velikim** uzorcima.

Tako su u povodu izvedbe prvoga **željezničkog** mosta od PB u Njemačkoj (kod Heilbronna) izvedeni pokusi na dvama **sandučastim** nosačima **raspona 20,0 m**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Vanjske izmjere sandukā bile su 1,8 1,0 m, a debljine stijenkā: donja ploča 0,15 m; hrptovi 0,3 m i gornja ploča 0,2 m.

(Za usporedbu valja reći da su izmjere PG nosača za mostove što ih izgrađuje **Viadukt** iz Zagreba slične: vanjske 2,1 1,1 m; stijenke, redom: 0,1; 0,15; 0,15 m. Dakle ispitivani su nosači ne laboratorijskih nego “pravih” izmjera.)

Oba su nosača bila prednapeta po dvjema nategama s početnom silom 2 350 kN, s tim što su u jednoga bile natege **s prijanjanjem** (nosač A), a u drugoga (nosač B) **slobodne** (u otvorenim utorima).

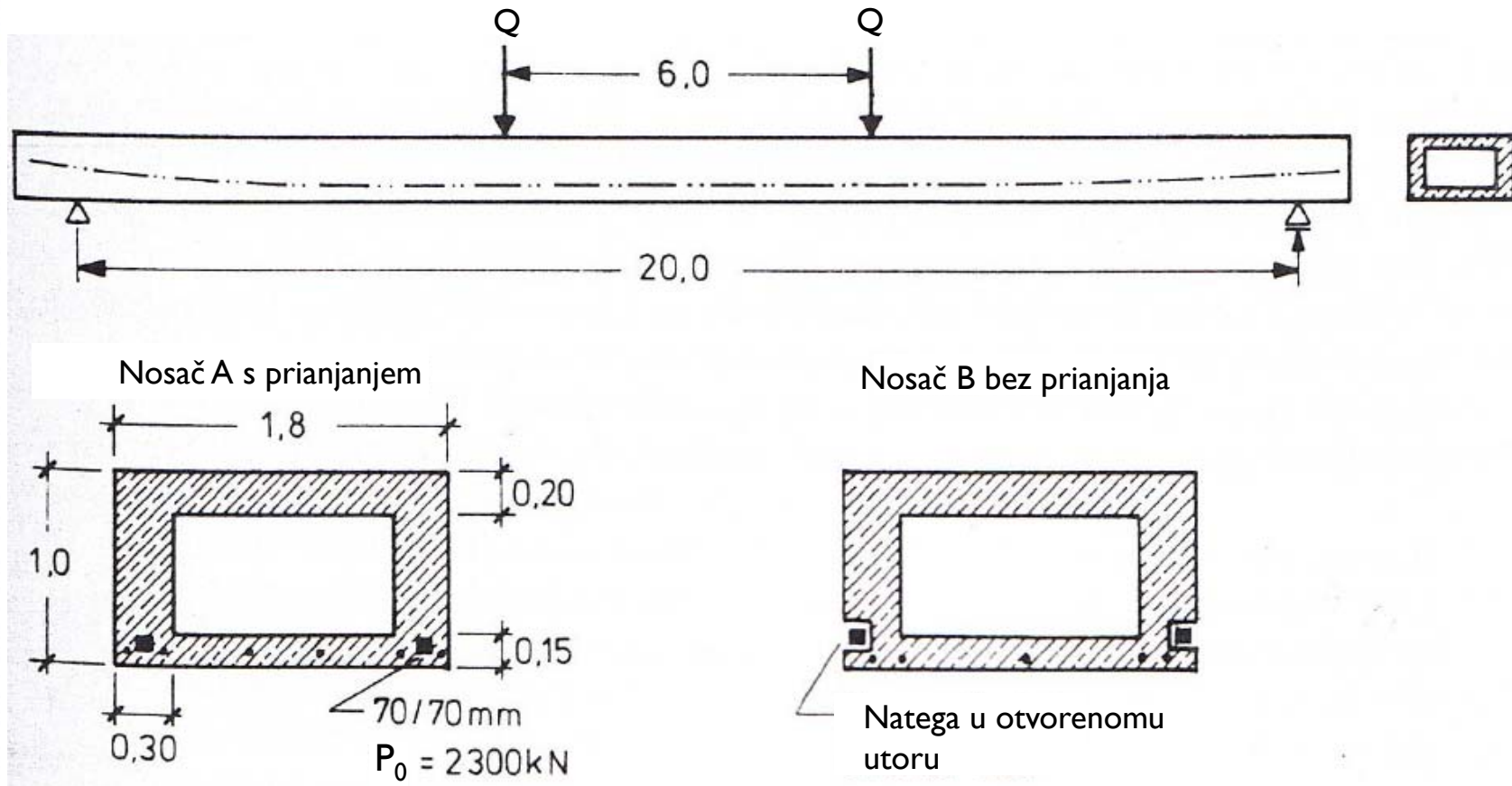
Čvrstoća betona na dan ispitivanja (starost 58 dana) bila je 65 N/mm².

Nosač je bio opterećivan dvjema simetričnim pojedinačnim silama na razmaku 6,0 m (slika 4.1).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prianjanja



Slika 4.1: Pokusna greda za prvi PB željeznički most u Njemačkoj

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

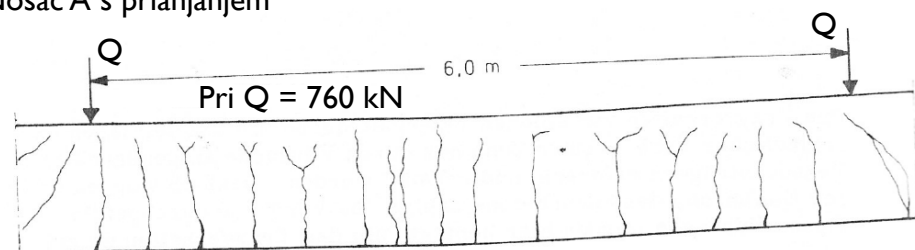
4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

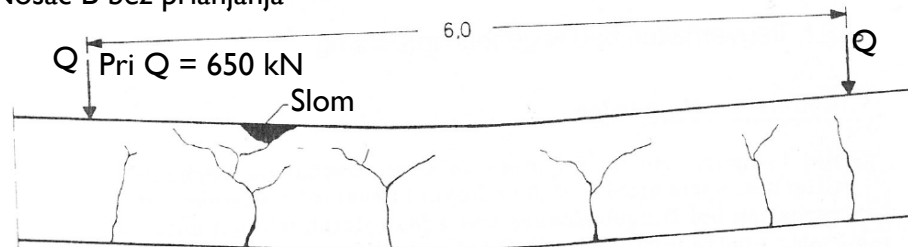
Razlike u ponašanju očituju se već nakon početka raspucavanja: u nosača A pojavilo se je na potezu između pojedinačnih sila (gdje djeluje gotovo čisto savijanje) 16 pukotina na prosječnu razmaku nešto većem od trećine visine nosača, dok su se na istom potezu u nosača B pojavile svega četiri pukotine, pri čemu im je razmak bio veći od visine nosača za 20 60 % (slika 4.2).

Priraštaj progiba pod rastućim opterećenjem predložen je na slici 4.3.

Nosač A s prijanjanjem



Nosač B bez prijanjanja

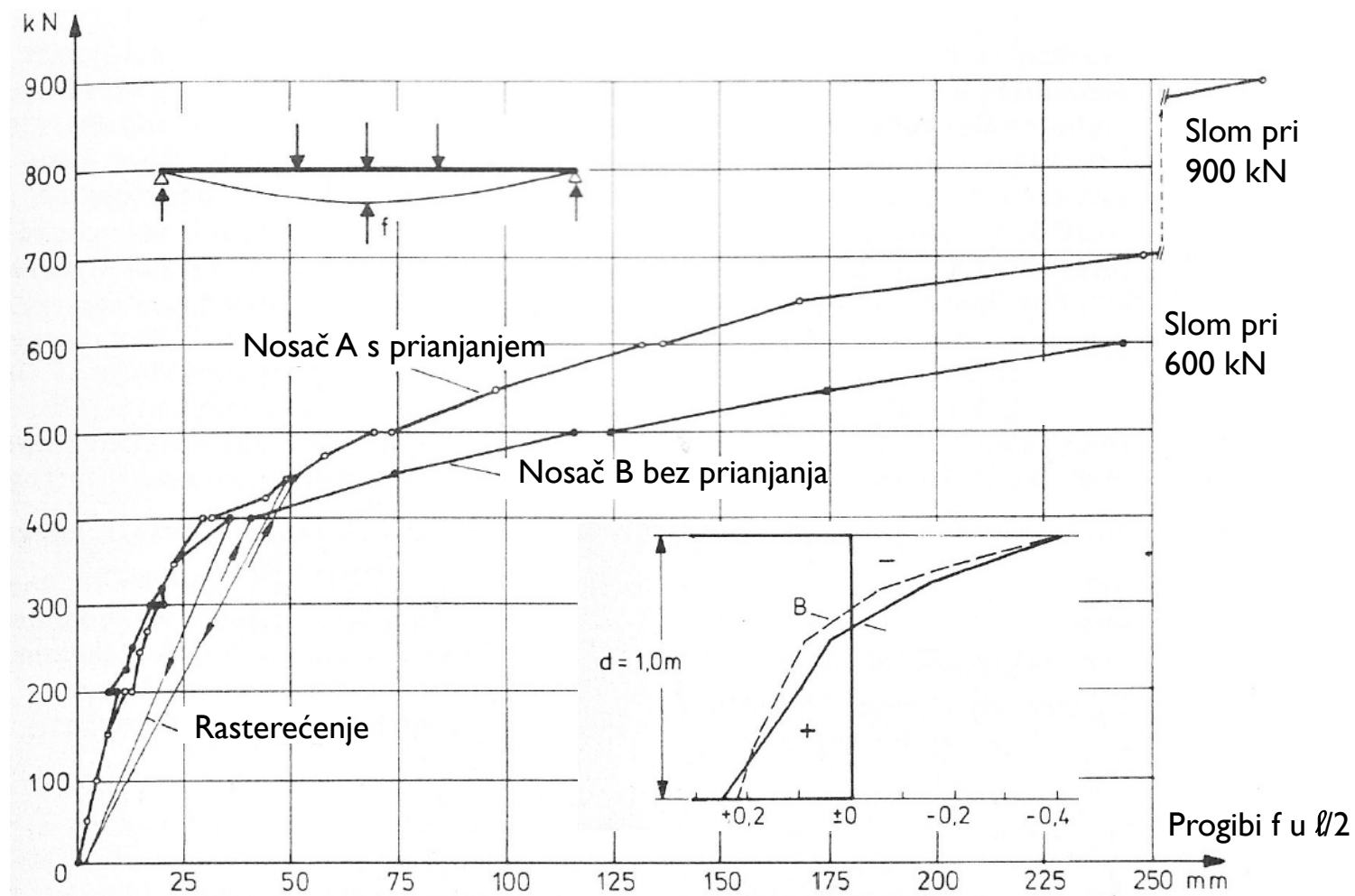


Slika 4.2: Slika pukotina pri dosegnuću graničnog opterećenja na potezu među dvjema silama

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja



Slika 4.3: Zavisnost progiba od vanjskog opterećenja u nosača A i B

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Dok je **prije raspucavanja** ponašanje **gotovo jednako**, nakon toga ono se **upadljivo razlikuje**, a pogotovo je znatna razlika u **slomnom** opterećenju.

Nosač A dosegnuo je **iscrpljenje nosivosti** tek pri sili **900 kN**, dok se je nosač B **slomio** već pri sili **600 kN** (dakle pri **2/3 nosivosti** nosača A).

Razlika u pripadnim **progibima** nesrazmjerno je **veća**: nosač A progno se je oko **četiri puta jače**, iako je progib nosača B pri slomu bio veći za gotovo 85 % od progiba nosača A pri **istoj razini opterećenja**.

Ovo jasno pokazuje da je u nosača B **slom** nastupio **drobljenjem betona prije dosegnuća granice popuštanja čelika**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Krivulja što prikazuje **zavisnost progiba od vanjskog opterećenja** usmjerena je izrazito **uzlazno** (vidi sliku!).

Međutim, u nosača A **drobljenje** je **betona** nastupilo dobrano **nakon dosegnuća granice popuštanja čelika**.

Ovo je **poželjan oblik ponašanja** i konstruktor treba nastojati da tako dimenzionira nosač (predvidi potrebnu količinu čelika) kako bi bio moguć samo ovakav oblik sloma.

Iz činjenice da se nosač prednapet nategom **s prijanjanjem** ponaša pod opterećenjem **bolje** nego onaj **bez prijanjanja** još **ne slijedi** da se on ponaša **dostatno dobro**.

To se najbolje vidi promatranjem **dijagrama skraćenjā/produljenjā** (σ/ε) **po visini presjeka** (predočena u donjem desnom kutu slike 4.3).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Naime, pri opterećenju **većem od uporabnog za oko 40 %** vidi se da ni u nosača A on **nije pravocrtan** (iako ima malo blaži prijegib u blizini neutralne osi nego u nosača B).

Ovaj **odklon od pravocrtnosti** očit je znak da **prijanjanje nije potpuno**.

U okviru istih pokusa izvedenih za potrebe Njemačkih željeznica ispitan je i nosač (s oznakom C) presjeka T (a jednaka obrisa kao i nosači A i B), ali prednapet s pomoću 16 natega $\varnothing 26$ mm (sustav Dywidag), slika 4.4.

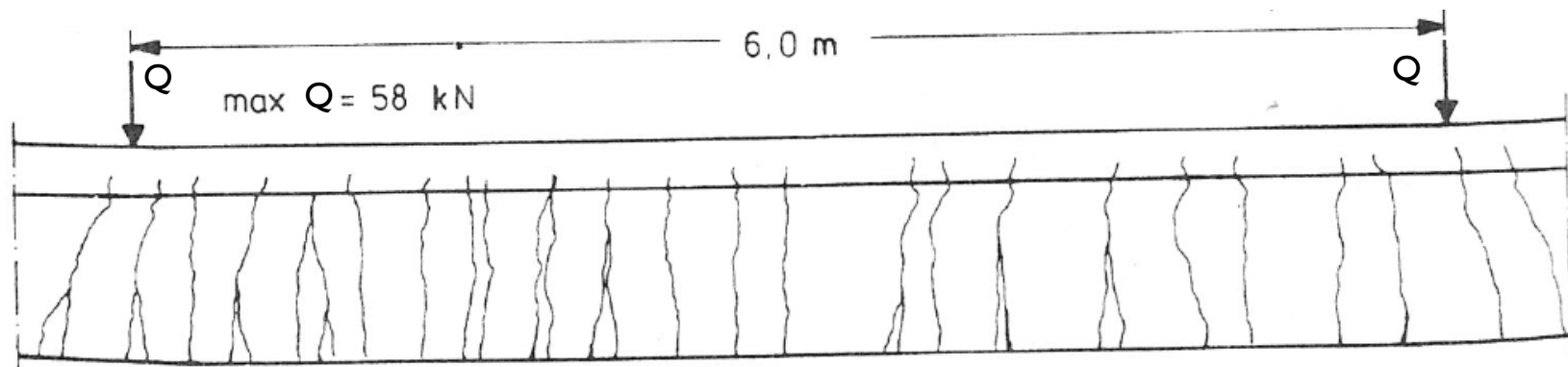
U njega je spomenuti **dijagram σ/ε bio gotovo pravocrtan i pri opterećenju jednaku oko 85 % slomnoga**.

Na osnovi toga zaključeno je da je **prijanjanje bolje** ako se sila prednapinjanja ostvaruje **većim brojem manjih natega**. 9

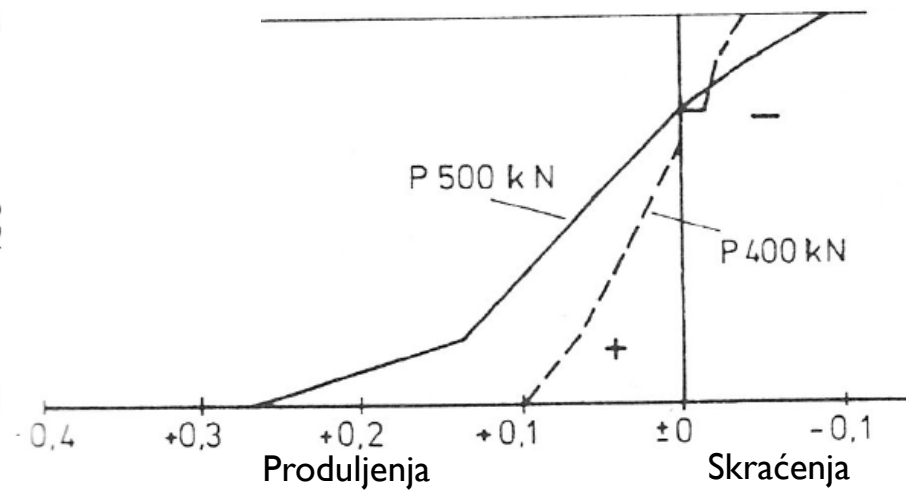
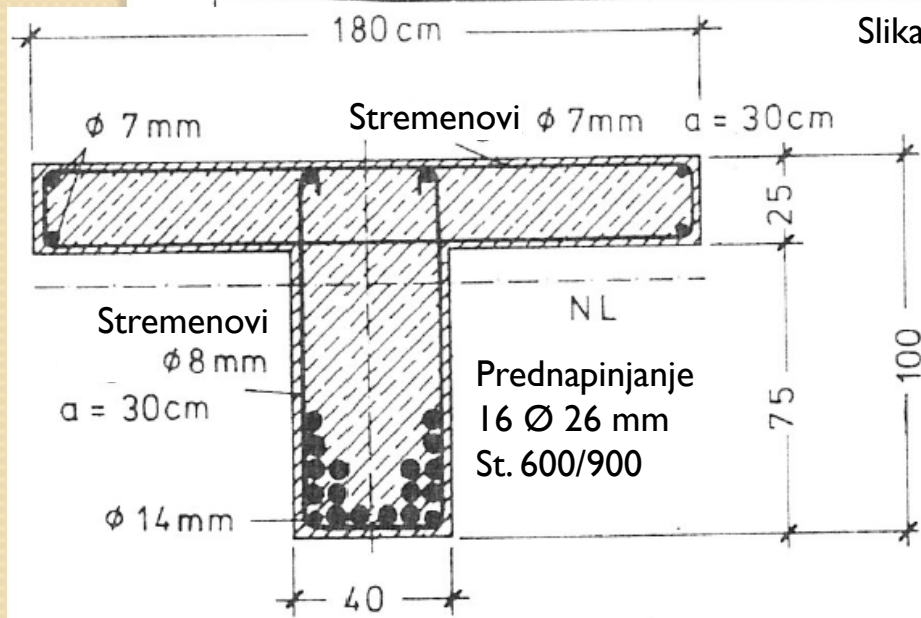
4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja



Slika pukotina pod graničnim opterećenjem



Slika 4.4: Pokusni nosač C

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Ovo ujedno znači da je i **ponašanje** takvih nosača **pod rastućim opterećenjem bolje**.

Tako je nađeno da je **omjer ukupnog opsega presjeka svih natega i sile u njima** (izražen u mm/kN) **dobar pokazatelj kakvoće prijanjanja**.

U doba provedbe ovih pokusa još se nije znalo kakvu ulogu ima **nenapeta armatura** u poboljšanju ponašanja PB nosača pri rastućem opterećenju.

Na to su upozorila **oštećenja** uočena na PB sklopovima (u prvom redu **cestovnih** mostova).

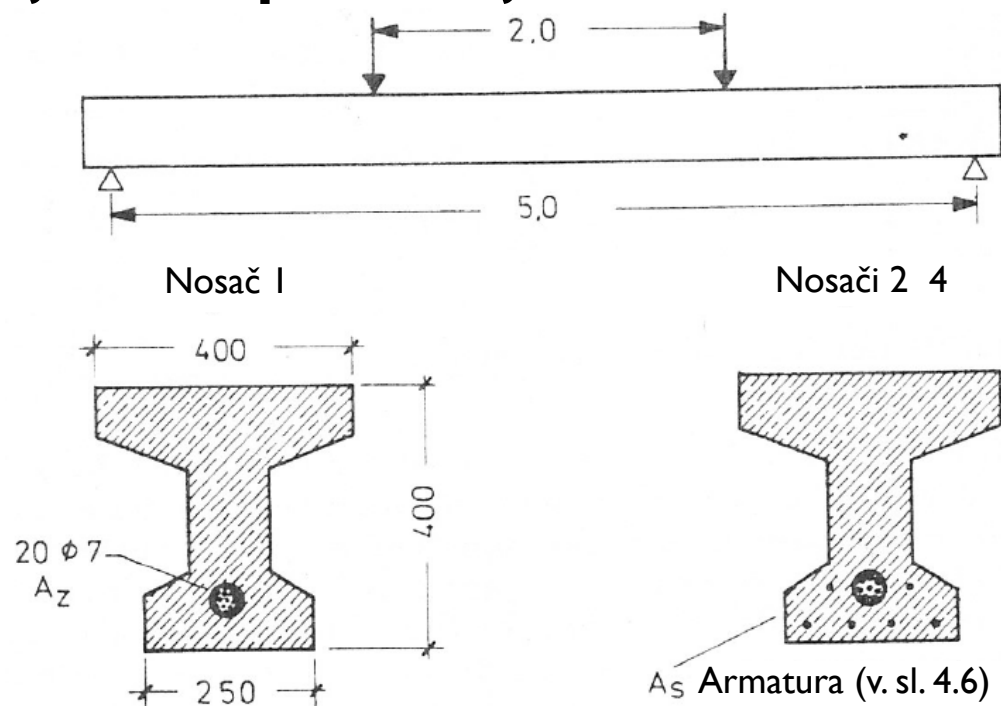
U svezi s tim provedena su mnoga **pokusna istraživanja**, ali se pokusi što ih je izveo *A. Brenneisen* na Sveučilištu u Liégeu izdvajaju po **sustavnu pristupu** ovom pitanju.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Uzorci su mu bili razmjerno **mali**: raspon 5,0 m, sile na razmaku 2,0 m, presjek upisan u četvorinu 0,4 0,4 m (slika 4.5), ali ipak **dostatno veliki** da bi se vidjela **zakonomjernost ponašanja**.



Slika 4.5: Pokusni nosači A. Brenneisena (Liège)

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prianjanja

On je **varirao omjer ploštine presjeka čelika za prednapinjanje i nenapete armature**, ali je **proračunska nosivost ostajala nepromijenjena**.

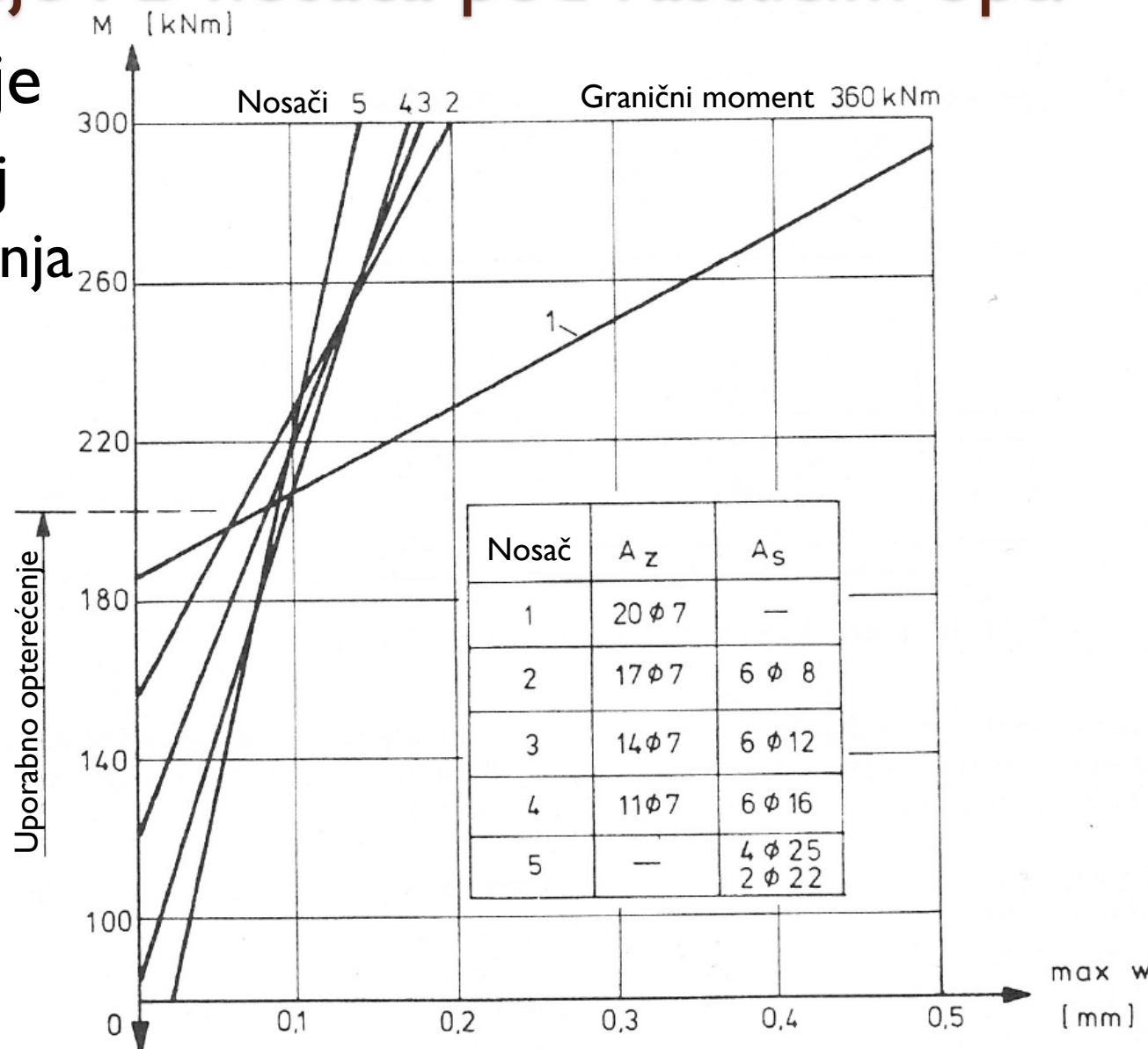
Mjerio je **najveće širine pukotina** na potezu između dviju pojedinačnih sila **u zavisnosti od rastućeg opterećenja i načina armiranja** (slika 4.6).

Vidi se da nosač **bez nenapete armature** ima nesrazmjerno **najveće širine pukotina** pri opterećenju **većem od uporabnoga**, ali i da se na razini **uporabnog opterećenja najbolje ponaša nosač s najmanjom količinom nenapete armature**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja



Slika 4.6: Najveće širine pukotina u zavisnosti od momenta savijanja pri različitim stupnjevima prednapinjanja

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.1 Utjecaj prijanjanja

Dapače, ni pri **visokim razinama opterećenja** ne ponaša se **bitno lošije** nego **neprednapeti** nosač.

Iz svega ovoga slijedi da je za **prihvatljivo ponašanje** PB nosača pod rastućim opterećenjem, a **pogotovo radi preuzimanja nepredvidivih vlačnih naprezanja** od sila što ih izazivaju spriječeni pomaci, temperaturne promjene i sl. **nužna** stanovita količina **nenapete armature**.

O tomu će biti više govora u posebnom poglavlju.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta vanjskog opterećenja (Q) na promjenu rubnih naprezanja u betonu ($\Delta\sigma_c$) i naprezanja u čeliku (σ_s)

4.1.2.1 Rubna naprezanja u betonu

Na početku djelovanja sile prednapinjanja, prije nanošenja vanjskog opterećenja (i prije nego se očituje dugotrajno djelovanje skupljanja i puzanja betona, te opuštanja čelika), **na donjem rubu betonskoga presjeka djeluje najveće naprezanje kojem će betonski presjek biti podvrgnut u cijelom svom vijeku trajanja.**

Vanjsko opterećenje izaziva moment savijanja koji daje **vlačna** naprezanja na **donjem** rubu, pa dakle **vanjsko opterećenje rastlačuje donji rub.**

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 *Rubna naprezanja u betonu*

Budući da se radi o naprezanjima koja su **na samom početku** (prije nanošenja vanjskog opterećenja) u području **pravocrtne** (linearne) zavisnosti σ/ε , zavisnost između **priraštaja vanjskog opterećenja** i **smanjenja tlačnoga naprezanja** na donjem rubu betonskoga presjeka ostaje **pravocrtna** i **nakon rubnoga rastlačenja presjeka** (iščeznuća tlačnog naprezanja na donjem rubu), a zapravo sve do dosegnuća **vlačne čvrstoće betona** (slika 4.7).

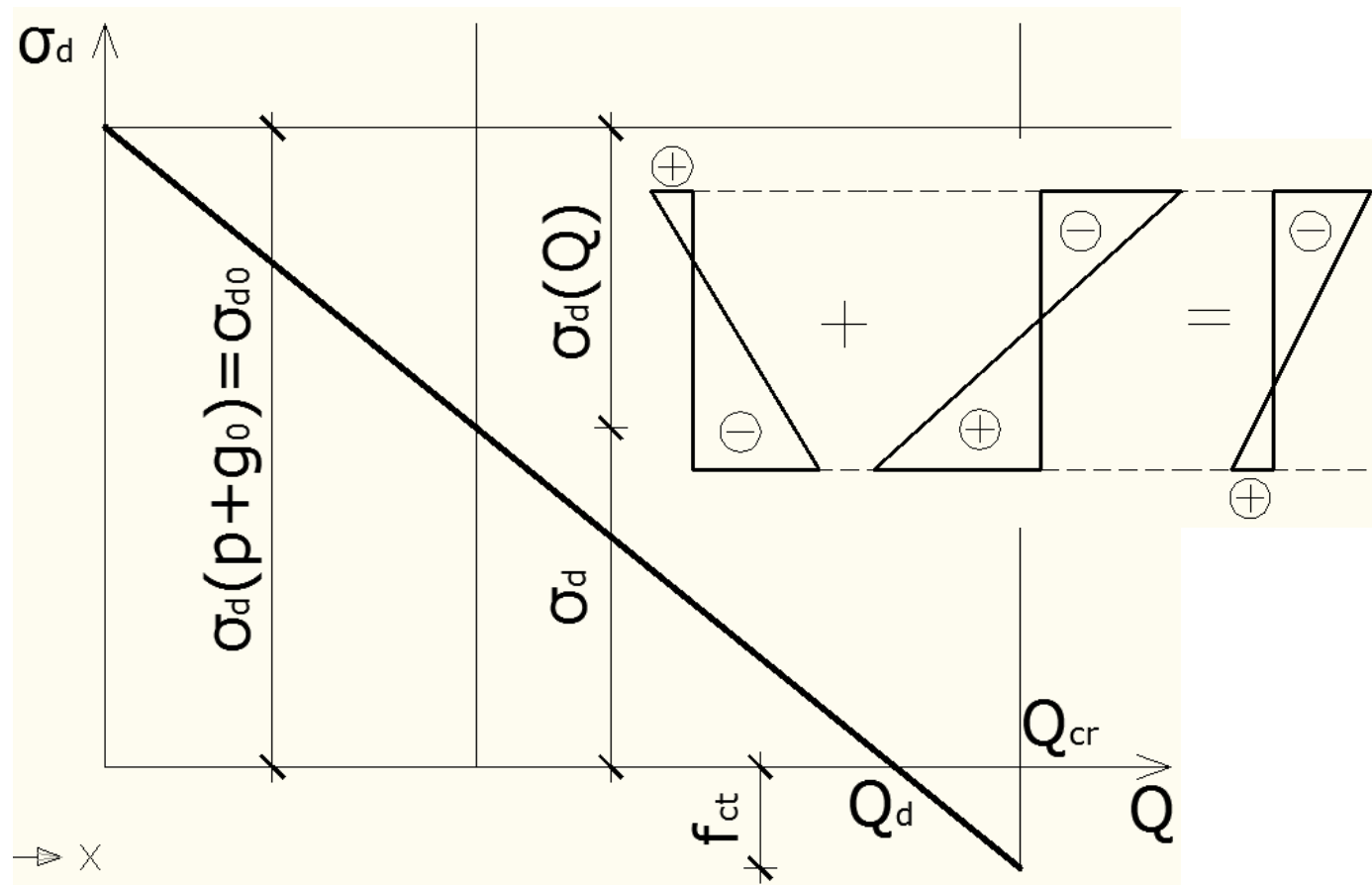
Valja istaknuti da je **zavisnost između vanjskog opterećenja i naprezanja** (i u betonu i u čeliku) nacrtana u **svedenim iznosima**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 Rubna naprežanja u betonu



Slika 4.7: Naprežanja u betonu na donjem rubu

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 *Rubna naprezanja u betonu*

Naime, **nezavisna je promjenjivica omjer rastućeg momenta savijanja i momenta pri dosegnuću nosivosti (slomu)**, dok je **zavisna promjenjivica naprezanje u betonu podijeljeno s računskom čvrstoćom, dotično naprezanje u čeliku podijeljeno s granicom popuštanja.**

Dosegnuće **vlačne čvrstoće** betona izaziva **pucanje donjeg dijela betonskoga presjeka**, a nakon toga **vlačnu silu** što ju je prenosio donji dio betonskoga presjeka prenosi **čelik** (i nenapeti, tzv. betonski čelik i čelik za prednapinjanje).

Istodobno, na **gornjem rubu** bet. presjeka odvija se **obrnut proces.**

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 *Rubna naprezanja u betonu*

Prije nastupa **vanjskog opterećenja** gornji je **rub presjeka** najčešće pod djelovanjem **vlačnog naprezanja** približno jednaka **polovini vlačne čvrstoće betona pri savijanju**.

Vanjsko opterećenje izaziva moment savijanja što daje **tlačna naprezanja na gornjem rubu**, pa dakle vanjsko opterećenje najprije **poništava vlak** pri gornjem rubu.

Daljim priraštajem vanjskog opterećenja raste i tlačno naprezanje uz gornji rub i to i opet po **pravocrtnu** zakonu.

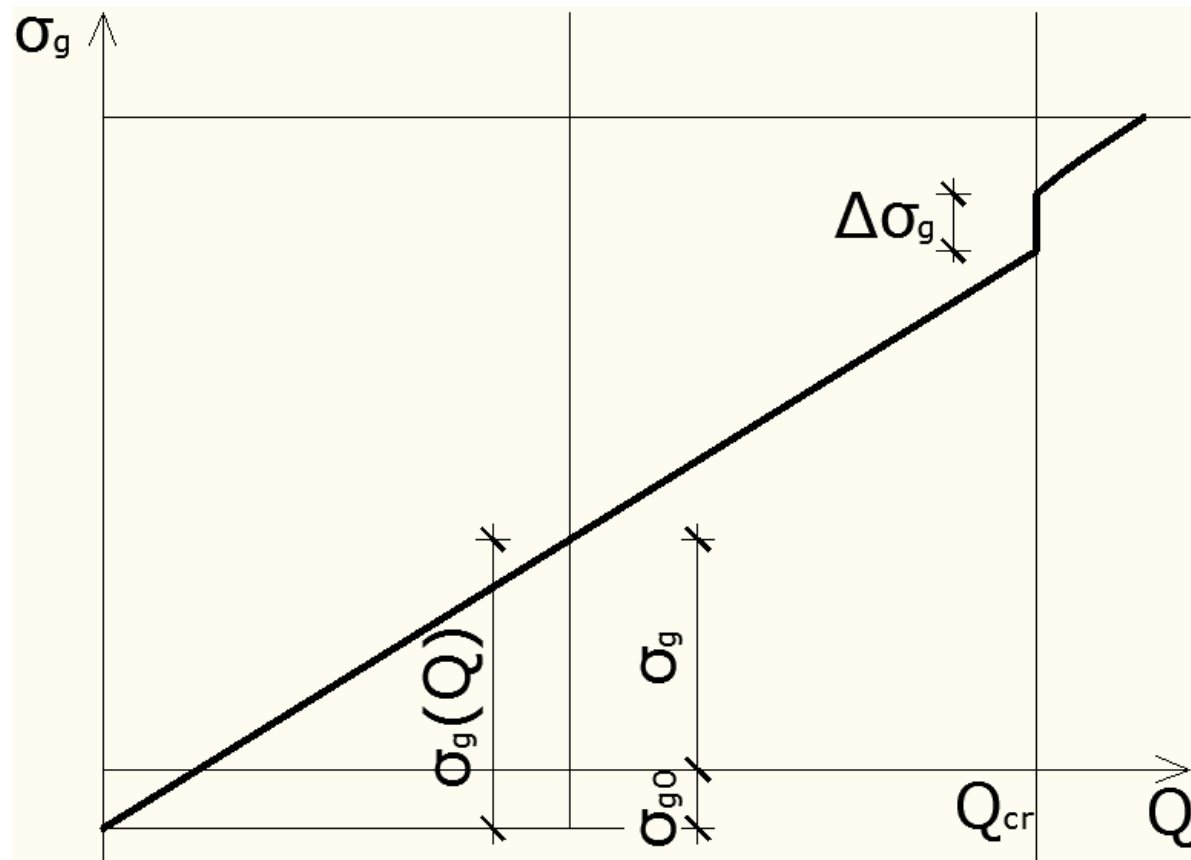
To se odvija tako sve do trenutka **pojave pukotina** na **donjem rubu presjeka** kada nastupa **nagla promjena** (slika 4.8).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 Rubna naprezanja u betonu



Slika 4.8: Naprezanje u betonu na gornjem rubu

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.1 Rubna naprezanja u betonu

Naime, zbog **pucanja** betonskoga presjeka **smanjuje se njegov djelotvorni dio**, pa tako i **tlačni pojas**, a zbog uvjeta održanja **ravnoteže** mora porasti **tlačno** naprezanje.

To se događa **naglo, skokovito**.

Nakon toga priraštaju vanjskog opterećenja odgovara priraštaj naprezanja uz gornji rub betona, koji je opet jedno vrijeme **pravocrtan** (ali je taj pravac **jače nagnut**) sve dok se naprezanja u čeliku (uz donji rub) ne počnu primicati **granici popuštanja**.

Tada naime, zbog sve jačega produljivanja **čelika** (nesrazmjerna s priraštajem naprezanja) naprezanja u **betonu** rastu jedno vrijeme sporije da bi, nakon dosegnuća granice popuštanja, opet rasla **naglo** do sloma.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.2 *Naprezanja u čeliku*

Prije nanošenja **vanjskog opterećenja**, u čeliku za **prednapinjanje** djeluje **početno naprezanje** (naprezanje na mjestu napinjanja umanjeno za gubitke od trenja i elastičnoga skraćanja betona).

Budući da je ovaj čelik **spregnut** s okolnim betonom, promjenu naprezanja u **betonu** prati promjena naprezanja u **čeliku**.

Vidjeli smo da se u **betonu** uz donji rub (gdje se nalazi čelik za prednapinjanje) pod djelovanjem **vanjskog opterećenja** **smanjuje početno visoko tlačno naprezanje**.

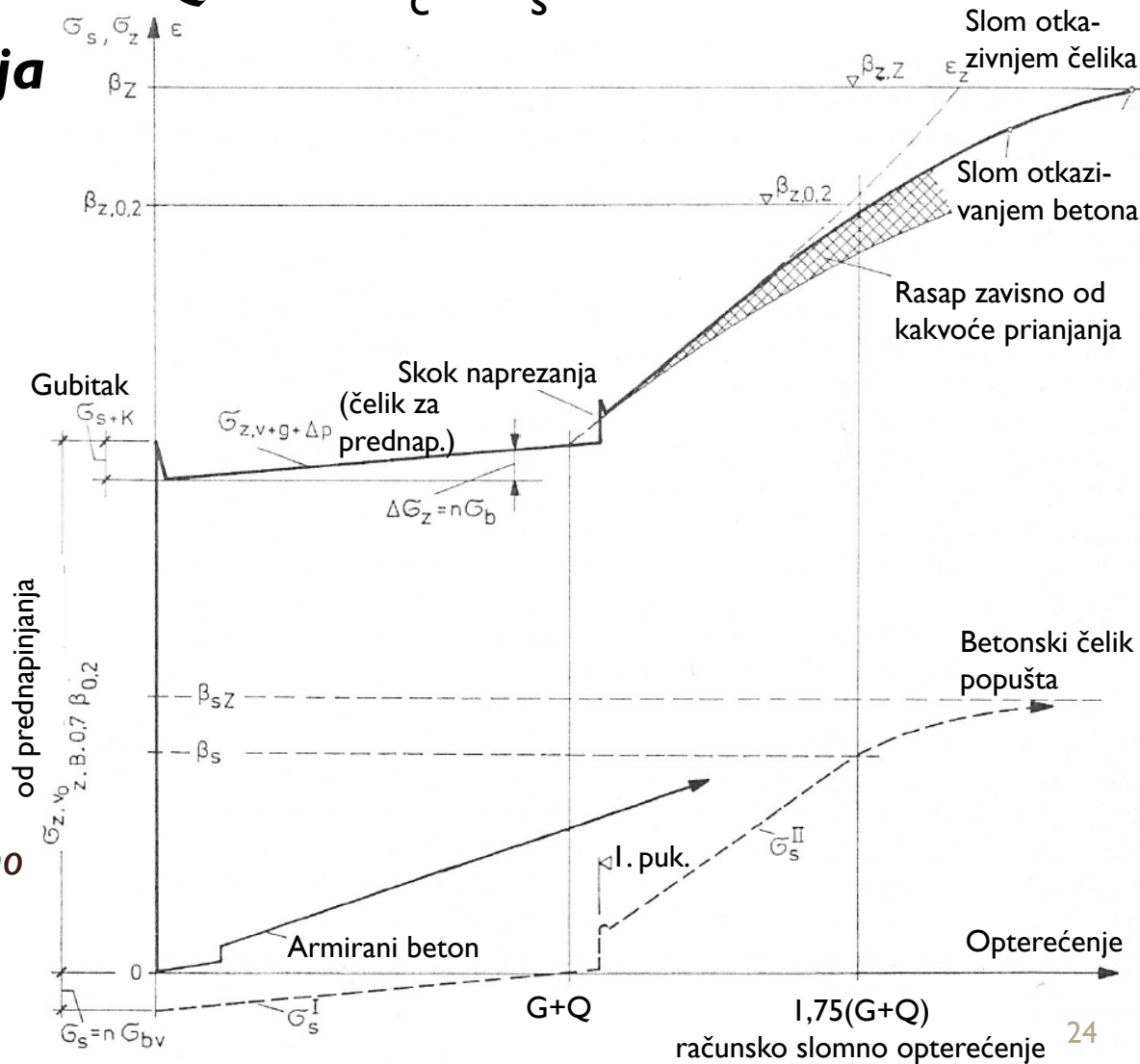
To se očituje kao **razvlačenje** zbog čega u čeliku nastaju **vlačna** naprezanja, koja se **pribrajaju** početnima (slika 4.9).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.2 Naprezanja u čeliku



Slika 4.9: Naprezanja u čeliku za prednapinjanje i betonskom čeliku u potpuno prednapetoga nosača pri porastu opterećenja do sloma pri savijanju

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.2 *Naprezanja u čeliku*

Iznos ovoga priraštaja naprezanja u čeliku srazmjeran je promjeni naprezanja u betonu na razini osi natege, tj. jednak je promjeni naprezanja u betonu pomnoženoj s omjerom modulā elastičnosti čelika i betona, α :

$$\Delta\sigma_p = \alpha \cdot \Delta\sigma_c$$

pri čemu je:

$$\Delta\sigma_c = M_Q \cdot e / I_{id},$$

gdje je I_{id} tzv. **idealni moment tromosti presjeka.**

I ovdje je **promjena naprezanja pravocrtna** sve do trenutka **raspucavanja betona**, nakon čega i čelik za **prednapinjanje** preuzima dio vlačne sile kao i betonski čelik.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.2 *Naprezanja u čeliku*

Ponašanje **nakon raspucavanja** slično je onomu uz gornji rub betona: u početku **pravocrtno**, a zatim, kako se primiče **granica popuštanja**, naprezanja **u čeliku** rastu sve **sporije** s priraštajem **vanjskog opterećenja**.

Betonski je čelik, sve do **rastlačenja donjega ruba betona**, pod djelovanjem **tlaka**.

Dapače, i **u trenutku rastlačenja donjega ruba beton** je na razini betonskog čelika **pod tlakom**, pa je zato i **čelik pod tlakom**.

Opet je **promjena naprezanja pravocrtna** sve do trenutka **raspucavanja**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.2 Utjecaj porasta Q na $\Delta\sigma_c$ i σ_s

4.1.2.2 Naprezanja u čeliku

Nakon toga ponašanje je betonskoga čelika vrlo slično onomu čelika za prednapinjanje – razlika je samo u razini naprezanja (slika 4.9).

Promjena naprezanja u betonskom čeliku računa se potpuno jednako kao i ona u čeliku za prednapinjanje.

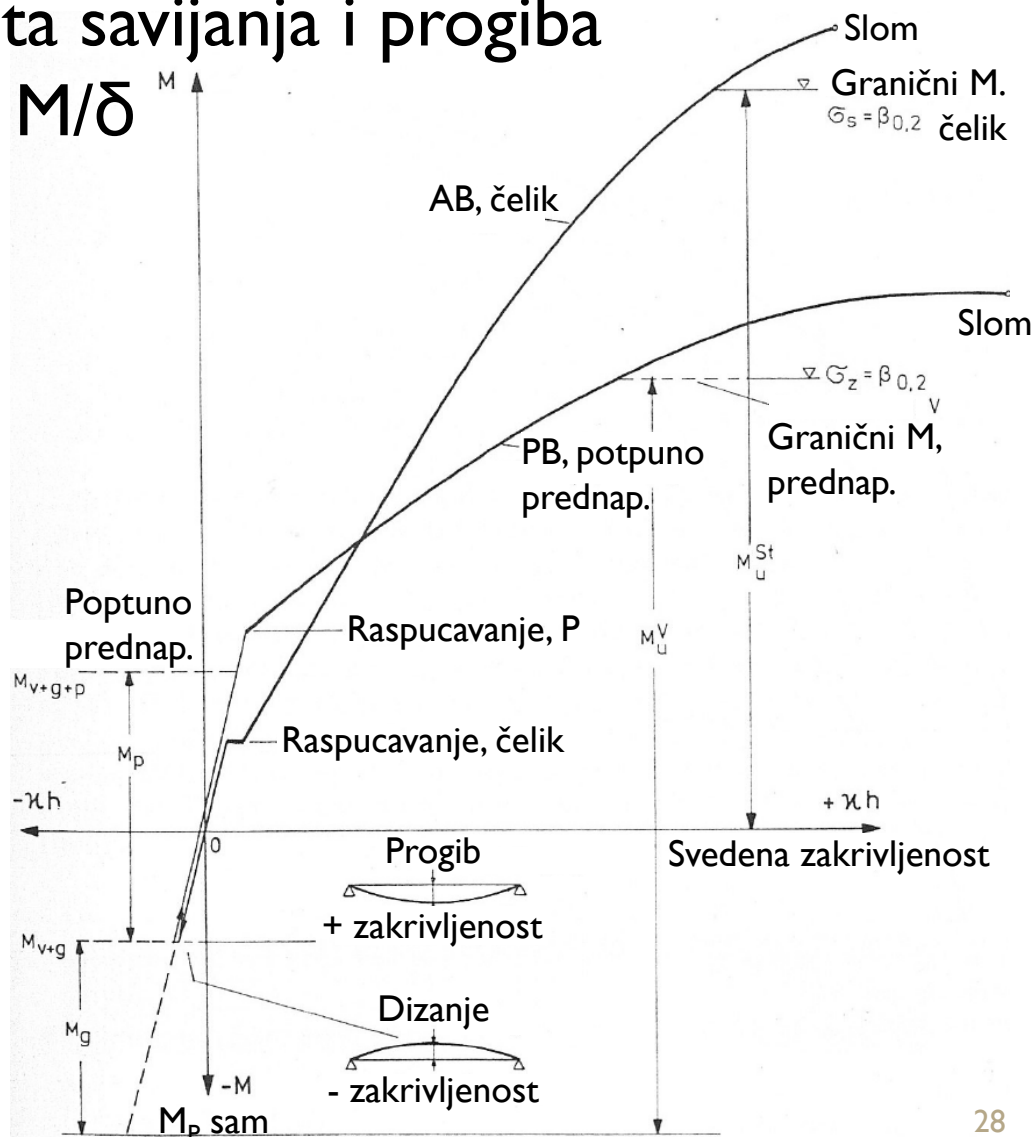
4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos momenta savijanja i progiba (zakrivljenosti); M/δ

Ponašanje savijanoga PB nosača pod rastućim opterećenjem može se pratiti i promatranjem odnosa progiba grede δ (zakrivljenosti κ) i momenta savijanja od vanjskog opterećenja (slika 4.10).

Slika 4.10: Zavisnost svedene zakr. PB nosača od vanjskog opterećenja



4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

U trenutku **napinjanja** nosač se **progiba prema gore**, jer se djelovanjem sile prednapinjanja **skraćuje donji pojas** nosača (ili, općenito, onaj u kojem je natega).

Nanošenje **dodatnoga stalnog opterećenja smanjit** će taj **progib**, a kada se na nosač nanese **puno proračunsko uporabno opterećenje**, nosač će imati **progib prema dolje**.

Istina, u slučaju razmjerno **malog udjela dodatnoga stalnog opterećenja u ukupnom opterećenju** može se dogoditi da zbog **puzanja** betona toliko poraste progib prema gore da ga progib od promjenjivog opterećenja **ne može nadmašiti**.

U ovom razmatranju raščlanit ćemo **proračunsko uporabno opterećenje** na sljedeći način.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

Uzet ćemo stanoviti omjer **stalnog** (i unutar njega vlastite težine i dodatnoga stalnog tereta) i **promjenjivoga**, pa ćemo govoriti o djelovanju **uporabnog** opterećenja, tj. opterećenja čija najveća (granična) vrijednost odgovara **graničnom stanju uporabivosti**.

U području unutar kojega seže **uporabno** opterećenje postoje **tri** znakovite **razine**.

Prva odgovara stanju kada su **sva naprezanja po visini presjeka jednaka**, pa **nema progiba** nosača, nego se nosač samo **skraćuje**.

Zato se ovo stanje naziva **uravnoteženim stanjem opterećenja**.

Zapravo, ovo se može dogoditi samo **u jednom trenutku**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

To je tada kada je rasprostrto **skretno opterećenje** od sile prednapinjanja **točno jednako stalnom opterećenju** (i možda dijelu promjenjivoga), ali budući da se zbog učinka **skupljanja i puzanja betona sila prednapinjanja smanjuje**, prevladava **stalno opterećenje**, pa zbog toga i mali **progib prema dolje**.

S vremenom ova prevaga biva **sve izraženija**.

Druga znakovita razina uporabnog opterećenja jest stanje **rubnoga rastlačenja** – kada iščezava naprezanje na donjem rubu nosača.

Bez obzira na to doseže li se ovo stanje pod djelovanjem samo stalnog ili uz udio promjenjivog opterećenja, vrijedi slično razmatranje o trajanju toga stanja kao i u slučaju jednoliko raspodijeljenoga tlaka po presjeku.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

Na kraju, **trećoj** znakovitoj razini odgovara **pojava pukotina** (raspucavanje) uz rub presjeka uz koji je natega, jer ukupno opterećenje izaziva **vlačna naprezanja** što **nadmašuju vlačnu čvrstoću betona**.

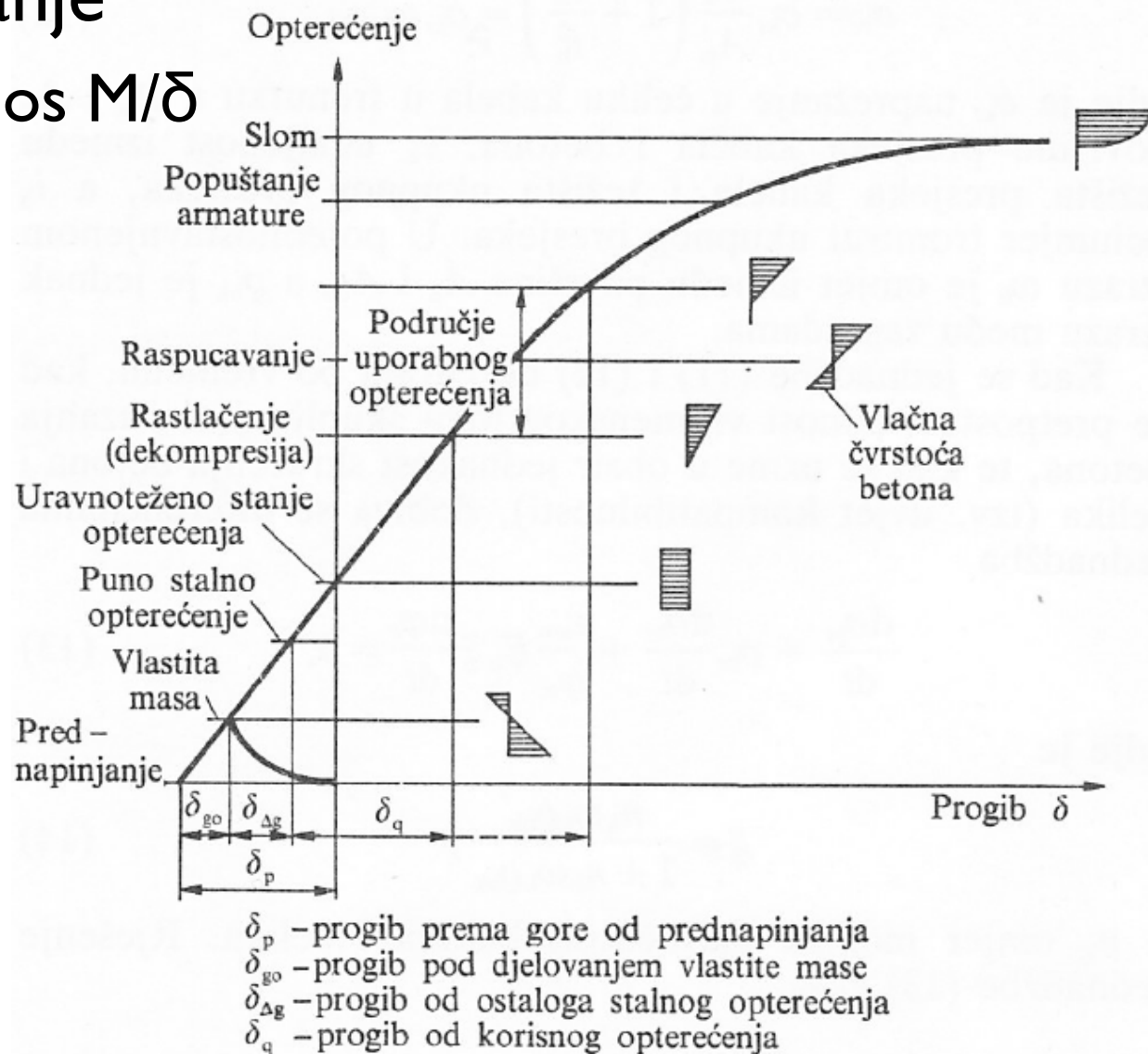
Poželjno je da stalno opterećenje bude **što bliže razini** što odgovara **prvom** znakovitom stanju, jer se tako **izbjegava prekomjerni progib** (svejedno u kojemu smjeru), pojačan **puzanjem betona**.

Na slici 4.11 označeno je područje **graničnih uporabnih opterećenja**, a seže od **rubnog rastlačenja** do **raspucalosti presjeka** – međuslučaj je kada se na rubu upravo doseže **vlačna čvrstoća betona**, ali on još **ne puca**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ



Slika 4.11: Zavisnost progiba grede od vanjskog opterećenja

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

U svezi s ovim trima slučajevima određuju se tzv. **stupnjevi prednapinjanja** (o čemu će biti govora u posebnom poglavlju).

Ako pod **ukupnim** opterećenjem nastupi rubno **rastlačenje**, pri **konačnoj sili prednapinjanja** (kada se od početne vrijednosti odbiju gubitci zbog skupljanja i puzanja betona te opuštanja čelika za prednapinjanje) govorimo o **potpunom** prednapinjanju.

U slučaju druge skrajnosti (**raspucavanje** presjeka pod ukupnim opterećenjem) prednapinjanje je **djelomično**.

U međuslučaju, što je drukčiji utoliko što se na rubu ne doseže vlačna čvrstoća betona nego najviše **dopustivo vlačno naprezanje**, govorimo o **ograničenom** prednapinjanju.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.1 Savijanje

4.1.3 Odnos M/δ

Do sada smo bili u području uglavnom **pravocrtna** odnosa momenta savijanja i progiba.

I **nakon raspucavanja** odnos je još uvijek zapravo **pravocrtan**, iako je crta **položitija**.

Međutim, kako se **naprezanje u čeliku** primiče **granici popuštanja, progibi rastu** osjetno **brže** s porastom opterećenja, a to je pogotovo tako **nakon doseguća granice popuštanja**.

Kada bi **tlačni pojas** bio **preslab**, **slom** bi nastupio već negdje na uzlaznom potezu krivulje M/δ , **prije iscrpljenja nosivosti čelika**.

Inače se to događa kada krivulji, slikovito rečeno, “ponestane snage za uspon”.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Prisjetimo da se **prevlađujući učinak prednapinjanja** očituje u unošenju velike **uzdužne sile** u nosač, a i djelovanje **skretnog opterećenja** također je znatno.

Uzdužna sila utječe na veličinu i smjer **glavnih naprezanja**, a skretno opterećenje znatno **smanjuje ukupnu poprečnu silu**.

U AB greda **glavna su naprezanja** u razini neutralne osi upravo **jednaka posmičnima**, a nagnuta su za kut 45° u odnosu na os grede.

Ova je činjenica navela njemačkog učenjaka **E. Mörscha** (a na sličnu je zamisao došao i Švicarac **M. Ritter**) da promatra AB nosač kao **rešetku s tlačnim** (betonskim) **kosnicima** nagnutima za 45° prema osi nosača, te **vlačnim** (čeličnim) **okomicama**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Pojasi rešetke međusobno su **usporedni** osim u neposrednoj blizini potpore.

Pukotine od djelovanja **poprečne sile** pružaju se pod kutom 45° .

Ovaj pristup poznat je pod imenom ***Ritter-Mörschove analogije rešetke***.

O tomu je bilo više govora u predmetnom kolegiju.

Zbog djelovanja **uzdužne sile** (sile prednapinjanja) **pukotine** što se javljaju nakon prekoračenja vlačne čvrstoće betona pružaju se **položitiije** (obično pod kutom 25° 35°), a to znači da se pod tim kutom pružaju i betonski tlačni članci (kosnici rešetke).

Samo u blizini velikih **pojedinačnih sila** (poput pridržajnih sila potporā) javljaju se **zrakaste** (mahaljaste) **pukotine**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Budući da je problem djelovanja **poprečne sile** na AB (a i na PB) nosač **nesrazmjerno složeniji** od problema **savijanja**, **jedini način** da se stekne **dublji uvid** u to djelovanje jest **provedba pokusa**.

Znameniti su pokusi što su izvedeni na veliku broju uzoraka pristojnih izmjera na sveučilištima u Delftu (Nizozemska), Göteborgu (Švedska), Stuttgartu i Zürichu.

Ovdje ćemo navesti neke nalaze ovih dvojih posljednjih.

Svi oni nedvojbeno pokazuju kako **prednapinjanje** pridonosi **smanjenju vlačnih sila u hrptu** što potječu od **poprečne sile** i što izazivaju (koso) **raspucavanje** hrpta nosača.

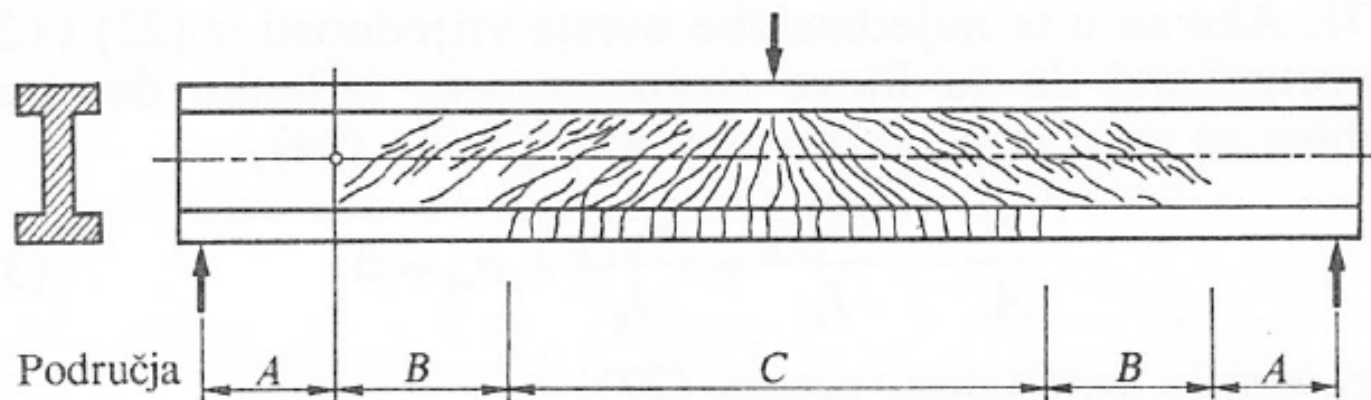
Zahvaljujući tomu potrebna je **količina poprečne armature** (stremenova) **manja** u PB nego u AB nosača.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Osim toga, pokazali su kako se u PB nosača mogu jasno razlikovati **tri područja** s obzirom na mjeru i vrst **raspucavanja** pod djelovanjem **poprečne sile** (slika 4.12).



Slika 4.12: Pukotine na PB nosaču neposredno prije dosezanja granične nosivosti

U prvom, u blizini potpore, uopće nema pukotina.

U drugom su pukotine samo u hrptu (jer u prednapetom pojasu naprezanja od momenta savijanja još nisu tolika da bi ga rastlačila).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

U **trećemu pukotine iz pojasa** (izazvane savijanjem) postupno prelaze u **nagnute pukotine** u hrptu (dakle one nastaju od **zajedničkoga** djelovanja savijanja i poprečne sile).

Na kraju, uočen je **izrazit utjecaj stupnja prednapinjanja** na ponašanje nosača pod djelovanjem **poprečne sile**.

U Stuttgartu su, između ostaloga, ispitane tri grede presjeka I što su bile potpuno jednake u svemu osim u stupnju prednapinjanja po dviju natega od 12 Ø 12,2 mm.

Natege prve grede bile su napete do **punog** iznosa dopustive sile prednapinjanja, druge do pola tog iznosa, a treće do svega 10 %.

Poprečna je armatura bila dimenzionirana po tadanjim njemačkim propisima.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Ipak, u lijevoj je polovici grede bila ugrađena **sva armatura potrebna po proračunu**, a u desnoj samo **52 % te količine**.

Zanimljivo je da je **u svih triju greda uzorak pukotina** u područjima neposredno **oko pojedinačnih sila** pri **graničnom** opterećenju bio **potpuno jednak**.

Međutim, **izvan tih područja** nagib je pukotina bio **izrazito zavisn od stupnja prednapinjanja**: što je on bio **viši** to su i pukotine bile **položitiije**.

Utjecaj **stupnja prednapinjanja** izrazito se je očitovao na **izmjerenim naprezanjima u stremenovima** (poprečnoj armaturi).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Tako je **samo u stremenova dimenzioniranih na 52 % proračunske poprečne sile**, u grede prednapete s **10 % sile**, dosegnuta **granica popuštanja** pri razini opterećenja što odgovara **uporabnom opterećenju pri savijanju**.

Kada je **opterećenje poraslo za oko 40 % granica je popuštanja** dosegnuta i u stremenovima grede napete s **50 % sile**, dok je u **potpuno prednapete** grede dosegnuta tek pri gotovo **dvostrukom uporabnom opterećenju** (slika 4.13).

Valja obratiti pozornost na to da su krivulje zavisnosti naprezanja od vanjskog opterećenja **strmije od teorijskoga Mörschova pravca**, što se može pripisati **nedostatnoj vlačnoj krutosti donjega pojasa**.

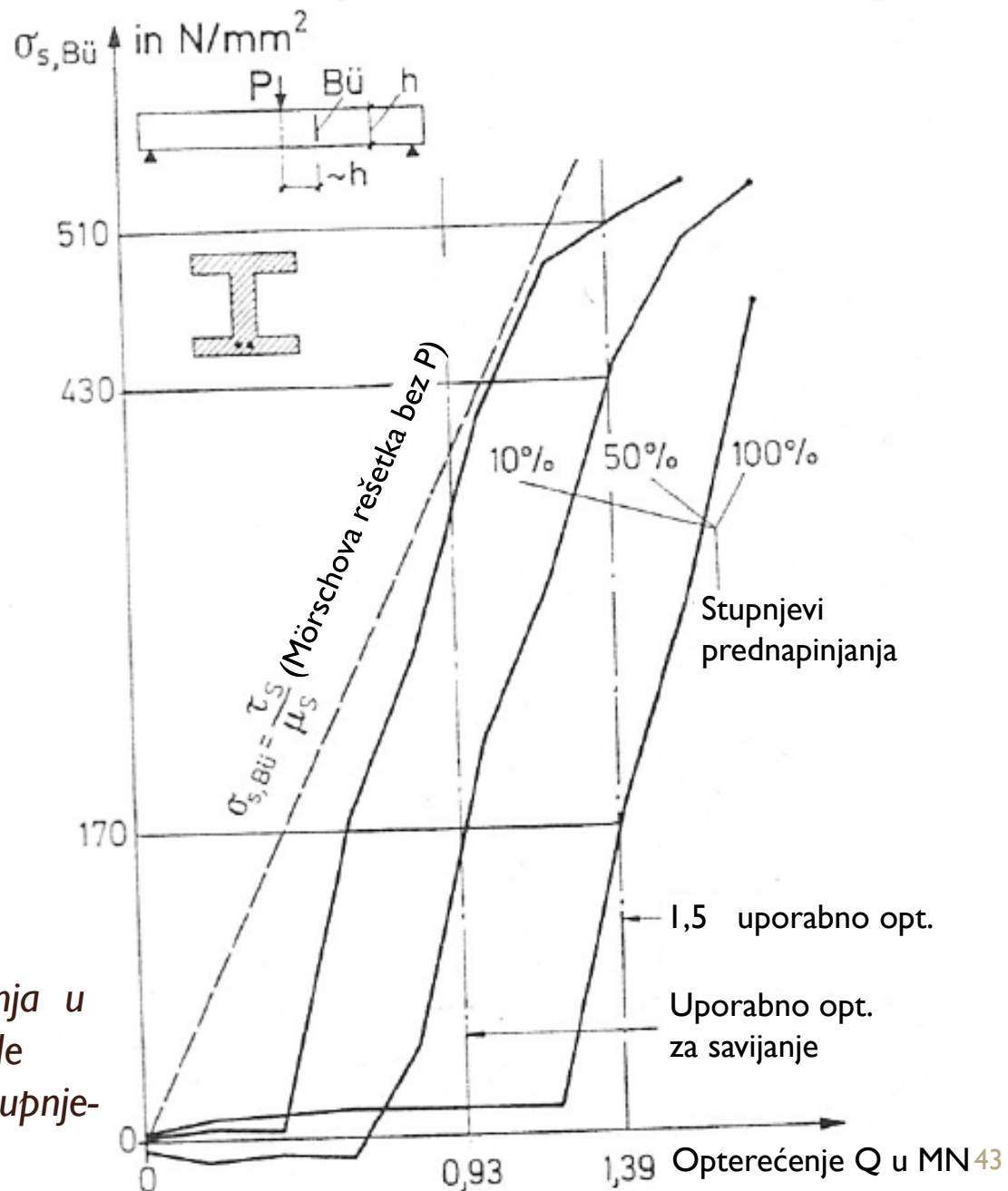
4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje

poprečne sile

4.2.1 Utjecaj

prednapinjanja



Slika 4.13: Najveća naprezanja u stremenovima u polovici grede armiranoj s 52% pri trima stupnjevima prednapinjanja

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Pod **vlačnom krutosti** razumijemo **umnožak ploštine presjeka i modula elastičnosti čelika**.

Kako je **ploština presjeka čelika za prednapinjanje** općenito **mala**, to je i **vlačna krutost donjeg pojasa mala**.

* * * * *

Glavna je svrha pokusa u Zürichu bila utvrditi **utjecaj stupnja prednapinjanja na ponašanje** greda pod djelovanjem i **savijanja i poprečne sile**.

Zato su vlačni pojasi pet greda bili tako armirani da je **ukupna nosivost** betonskoga čelika i nategā (sila pri granici popuštanja obaju čelika) bila **jednaka**, a variran je stupanj prednapinjanja od 0 (nenapeta greda) do I (potpuno prednapeta) s korakom 0,25.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

I **poprečna je armatura** (tj. njezin postotak) bila **različita**: u **samo armirane grede** $\mu_{sw} = 0,90 \%$, a u **potpuno prednapete** $0,38 \%$ (dakle odgovarajući je korak bio $0,13 \%$).

Ovdje ćemo se ograničiti na prikaz ponašanja pod djelovanjem **poprečne sile**.

Na slici 4.14 predočena je **zavisnost vlačne sile u stremenovima od vanjskog opterećenja** u ovih pet greda.

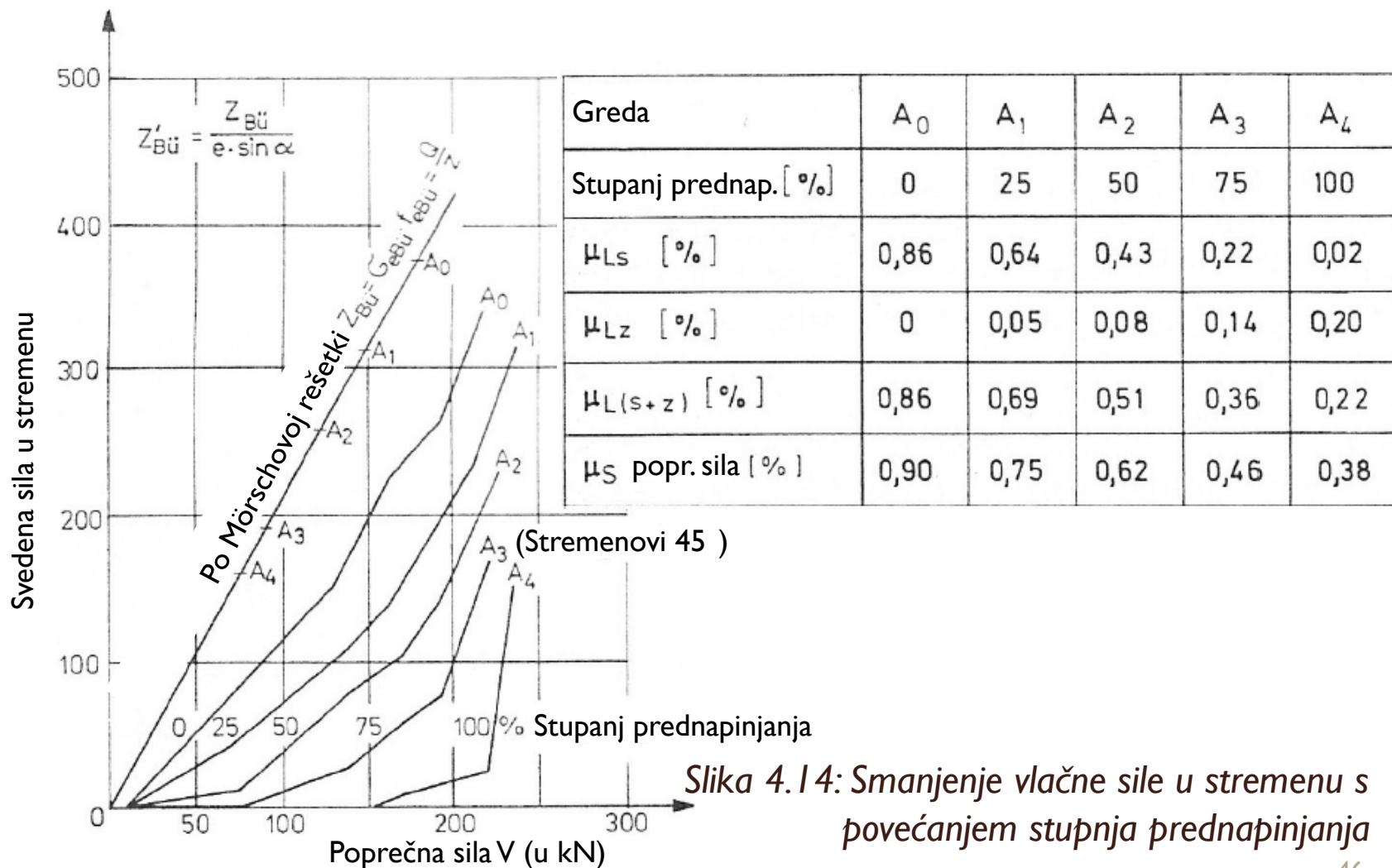
Ovdje se **još izrazitije** nego u štutgartskim pokusima vidi kako se **vlačne sile u stremenovima smanjuju s porastom stupnja prednapinjanja** i to **usprkos znatnu smanjenju količine poprečne armature**.

To se tumači ovako.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja



Slika 4.14: Smanjenje vlačne sile u stremenu s povećanjem stupnja prednapinjanja

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Naime, u **svih** ovih greda **vlačna sila u stremenovima** pri dosegnuću **granične nosivosti** dotične grede **zaostaje** za silom što odgovara **dosegnuću granice popuštanja u stremenovima**.

Ove su sile za pojedine grede označene na Mörschovu pravcu na slici 4.14.

Uočimo da ovdje **krivulje zavisnosti** vlačnih sila u stremenovima od vanjskog opterećenja teku **približno usporedno** s Mörschovim pravcem u dviju greda od kojih je jedna **nena-peta**, a druga ima vrlo **nizak stupanj prednapinjanja** i da bivaju **sve strmije s porastom stupnja prednapinjanja**.

To potvrđuje naprijed izrečenu tvrdnju o utjecaju vlačne krutosti pojasa na tu zavisnost.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Odmak spomenutih krivulja od Mörschova pravca može se shvatiti kao dio **poprečne sile što se prenosi drugim mehanizmima**, tj. djelovanjem drugih čimbenika (a ne po analogiji rešetke, čiji su tlačni članci – kosnici – nagnuti za 45° prema osi nosača).

○ tim je čimbenicima bilo više govora u predmetnom kolegiju, a nas ovdje zanima samo **utjecaj prednapinjanja**.

Prednapinjanjem se, pojednostavnjeno rečeno, **povećava udio betona u prenošenju poprečne sile** (o čemu će se više reći u posebnom poglavlju), ali i **smanjuje nagib pukotina** u području malih momenata savijanja, zahvaljujući čemu na 1 m nosača otpada **manji dio poprečne sile** (i o tomu više u spomenutom poglavlju).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

U području pak gdje su **istodobno veliki i momenti savijanja i poprečne sile** (uz potpore protežnih nosača) velik se dio poprečne sile prenese preko **tlačnih pojasa**, pa se zahvaljujući tomu znatno **smanjuje dio što otpada na hrbat** (tj. na poprečnu armaturu).

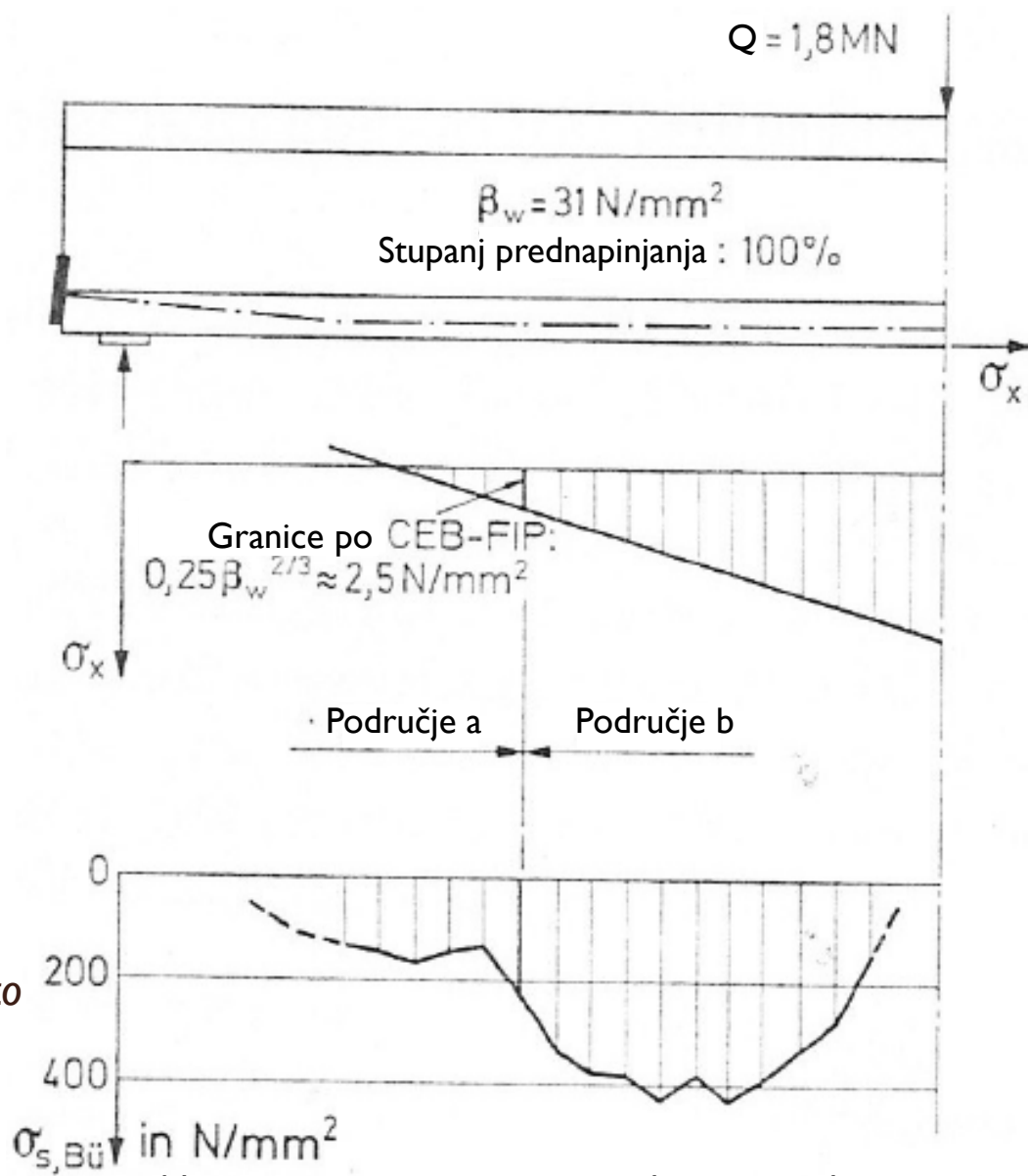
U spomenutim štutgartskim pokusima jedna od greda imala je **jednoliku poprečnu armaturu** po cijeloj duljini i u njoj su mjerena naprezanja sve do pred sam slom.

Ne samo da se **jasno izdvaja područje u kojem su se pojavile pukotine samo u hrptu**, nego su u tom području **naprezanja u stremenovima manja od polovine onih na granici popuštanja** (slika 4.15).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja



Slika 4.15: Naprezanja u stremenovima u području a izrazito su manja nego u području b

Naprezanja u stremenovima u polovici visine hrpta (srednje vrijednosti blizu slomnog opterećenja)

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Istodobno, u području **mješovitih** pukotina, tj. u području u kojem **okomite pukotine u pojasu prelaze u kose** (zrakaste) **pukotine u hrptu**, naprezanja u stremenovima **dosežu granicu popuštanja**.

Valja pripomenuti da su područja nosača u kojih je **istodobno** i velik moment savijanja i velika poprečna sila **vrlo rijetka** – obično se hrbat uz potpore podebljava, pa se tako znatno umanjuje utjecaj poprečne sile.

Najčešći su slučajevi gdje se može očitovati **povoljan utjecaj prednapinjanja**.

Treba još reći kako je **otklon od Bernoullijeve pretpostavke o ravnosti presjeka** na potezu gdje **prevladava djelovanje poprečne sile** još **jači** nego tamo gdje prevladava savijanje.

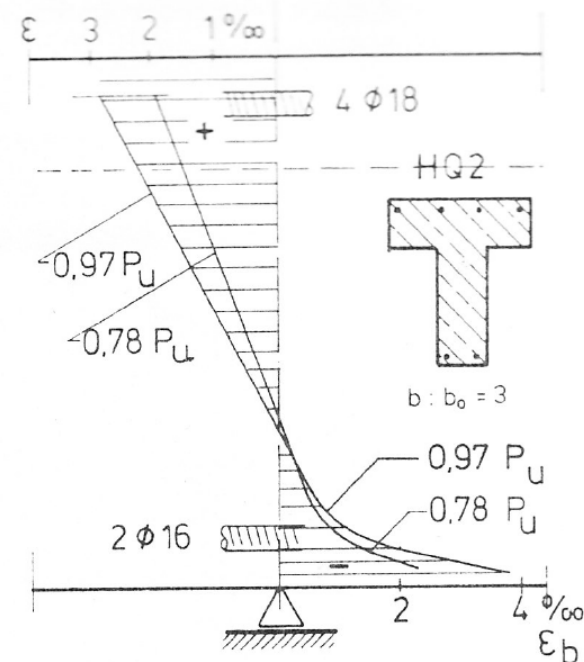
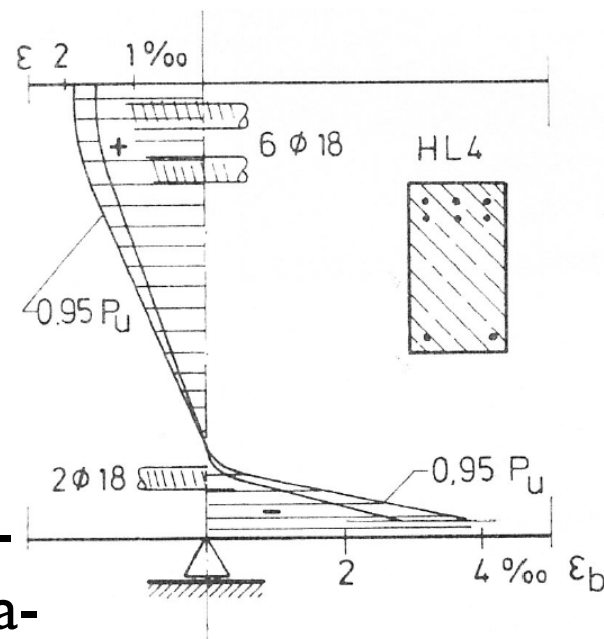
4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.1 Utjecaj prednapinjanja

Ovo se područje uočava po izrazitijemu prijegibu dijagrama σ/ε po visini grede.

To se događa i u greda u kojih je prijanjanje između čelika i betona sasvim dobro, a osim toga neutralna je os znatno ispod polovišta visine presjeka (slika 4.16).



Slika 4.16: Dijagrami skraćanja / produljenja u presjeku nad potporom protežnog nosača malo prije doseguća graničnog opterećenja.

Prijevoj zbog poprečne sile u području velikog M 52

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.2 Utjecaj oblika osi natega i krutosti donjeg pojasa

Prvotno se je općenito smatralo kako je **zakrivljeni oblik osi natege** (a navlastito parabolasti) **najpovoljniji** sa stajališta **učinkovitosti**, jer on pruža dostatnu **mimoosnost** u području **velikih momenata savijanja** i dostatan **nagib** u području **velikih poprečnih sila**.

Međutim, **pokusi** su pokazali nešto što **u prvi mah iznenađuje**:

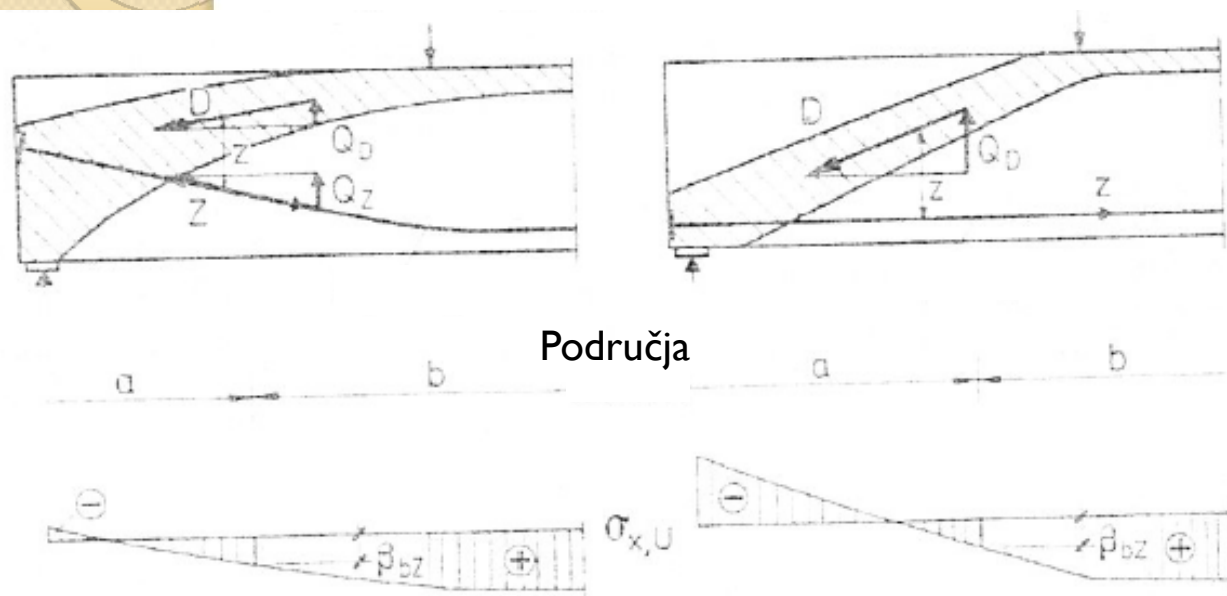
- Područje **bez kosih pukotina kraće** je u nosača sa **zakrivljenom osi natege** nego u odgovarajućeg nosača s pravom osi natege (slika 4.17).
- **Naprezanja u poprečnoj armaturi veća** su u nosača sa **zakrivljenom osi natege** nego u onoga s pravocrtnom (slika 4.18).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

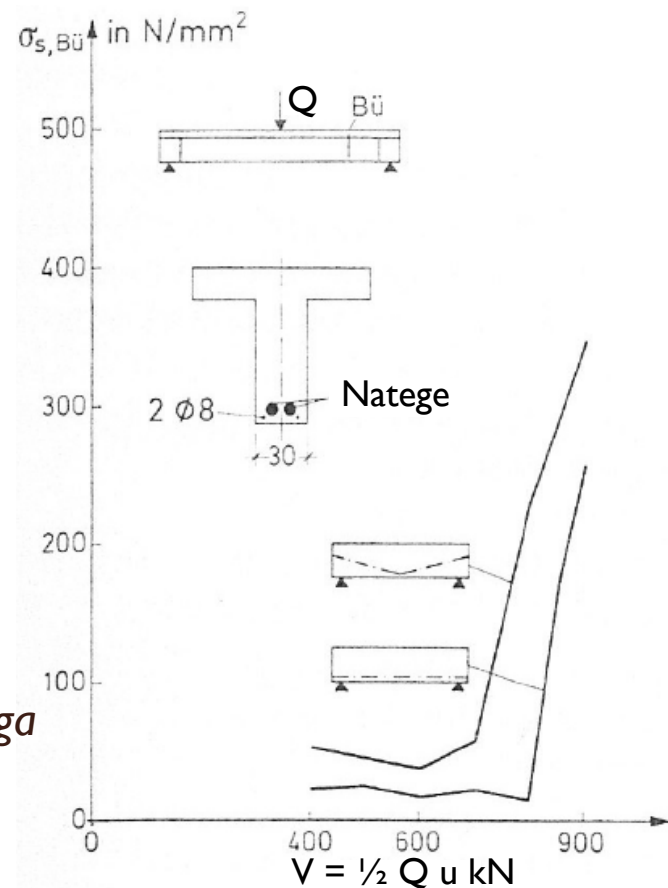
4.2.2 Utjecaj oblika osi natega i krutosti donjeg pojasa

Utjecaj nagiba natege



Naprezanje od savijanja na donjem rubu

Slika 4.17: Utjecaj nagiba natege na mogući nagib rezultante tlačnoga pojasa i na granicu između područja a i b



Slika 4.18: Pri slaboj armaturi pojasa sile u stremenovima nosača s nagnutom nategom veće su nego u onoga s pravom nategom

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.2 Utjecaj oblika osi natega i krutosti donjeg pojasa

Pretpostavka i za jedno i za drugo jest **mala vlačna krutost donjeg pojasa**, zbog čega se **nagnuti tlačni pojas** u blizini potpore **ne može usidriti** u vlačnom pojasu nego kod sidra natege.

Iz tih se razloga u nosača sa **zakrivljenom osi** natege dobiva **znatno manji nagib tlačnog pojasa** i u svezi s tim i **znatno manji udio smanjenja poprečne sile što otpada na hrbat** (tzn. poprečnu armaturu) nego u nosača s **pràvom nategom**.

Međutim, ako je **vlačna krutost donjeg pojasa dostatna**, ponašanje je nosača i u ovom pogledu **u skladu s očekivanjima**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.2 Utjecaj oblika osi natega i krutosti donjeg pojasa

Švicarac **H. Bachmann** istraživao je ovo pobliže i našao kako se **krutost donjeg pojasa** (ili, općenito, pojasa što je pod djelovanjem vanjskog opterećenja izvrnut vlačnim naprezanjima) može smatrati **dostatnom** ako je **ploština presjeka betonskog čelika** tolika da **može prenijeti poprečnu silu** u tom presjeku.

Ovo se tumači činjenicom da se **pridržajna sila** (reakcija), a i općenito **poprečna sila**, prenosi u nosač **posredno**, rastavljanjem u **trokut sila**, pri čemu **vodoravnu** sastavnicu (jednaku pridržajnoj sili) preuzima **betonski čelik**, a **kosu** (nagnutu za 45°) **beton** (slika 4.19).

Zahtjev na **dostatnu krutost vlačnoga pojasa** vrijedi ne samo za područje **uz kraj slobodno poduprtog nosača**, nego i za potez **uz potporu protežnoga** (nosača preko više polja).

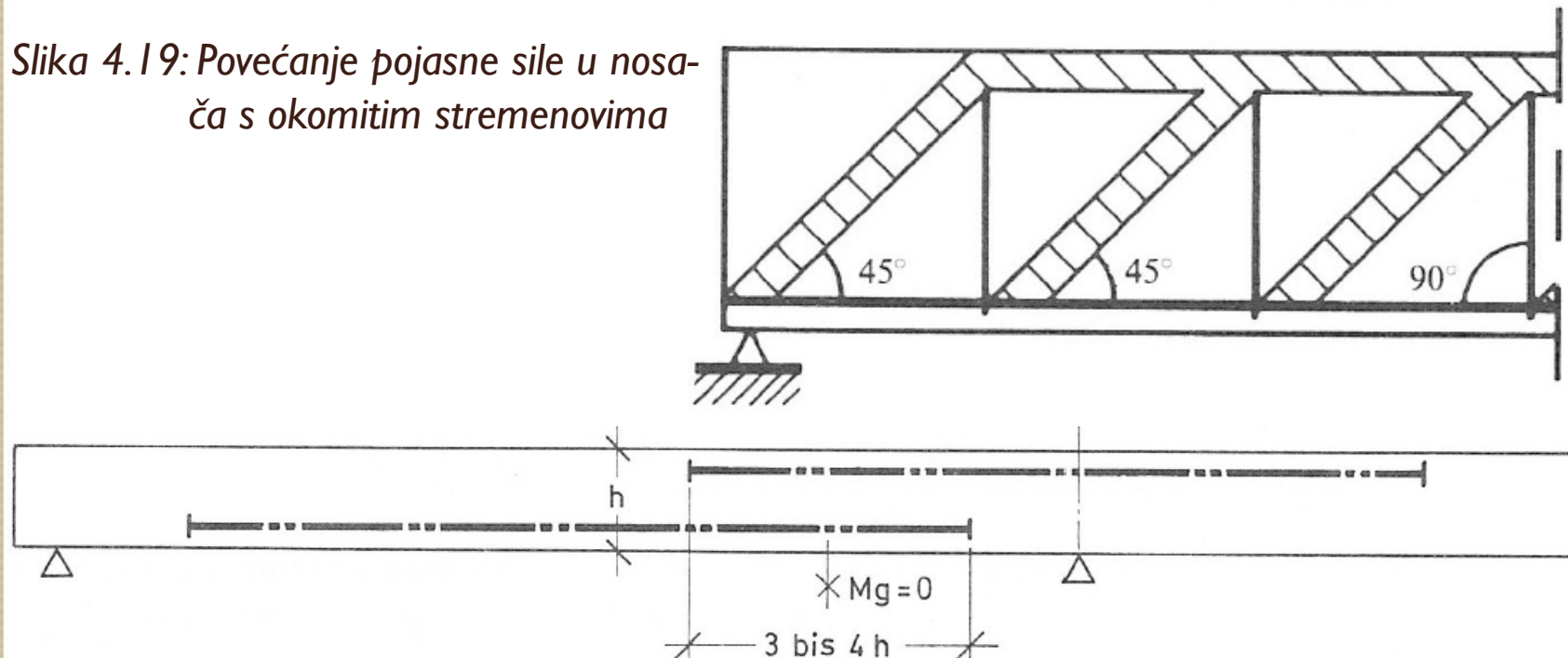
4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.2 Djelovanje poprečne sile

4.2.2 Utjecaj oblika osi natega i krutosti donjeg pojasa

U svezi s tim je i nužnost da **natege protežnog nosača** moraju biti **dostatno preklopljene** u područjima **ništišta** (“nul-točaka”) **momenata savijanja** (slika 4.20).

Slika 4.19: Povećanje pojasne sile u nosača s okomitim stremenovima



Slika 4.20: Preklapanje pojasnih natega u okolišu ništišta momenta savijanja

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Vidjeli smo kako se **bez provedbe pokusa**, i to onih na uzorcima **pristojne** veličine, **ne može steći dublji uvid u ponašanje PB nosača** pod djelovanjem **poprečne sile**.

To **pogotovo** vrijedi za djelovanje **torzije**, jer je tu riječ o pojavi **prostornog** domašaja.

Uočimo kako **stupanj složenosti skokovito raste** od **savijanja** (što izaziva **jednoosno** stanje naprezanja), preko djelovanja **poprečne sile** (**ravninska**, dvodimenzijska, zadaća) do **torzije** (koja je **prostorna**, trodimenzijska, zadaća).

Prvi torzijski pokus na PB nosaču izveden je u Stuttgartu.

Sandučasti nosač bio je **naravne** veličine, ali, na žalost, samo **jedan**, tako da su dobiveni nalazi **ograničene općenitosti**.

Slijedili su pokusi u Zürichu, gdje su ispitivana ne samo **pojedinačna** djelovanja.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Dakle ispitivano je ne samo **savijanje** (s **poprečnom silom** ili bez nje), te **torzija**, nego i **međudjelovanje** ovih triju očitovanja djelovanja **vanjskog opterećenja**.

Ograničit ćemo se na promatranje djelovanja **torzije**.

Ti su pokusi pokazali kako se djelovanje **torzije** može u stanovitoj mjeri shvatiti kao **poprečno djelovanje poprečne sile**, tj. kako se **prizmasti štap** pod djelovanjem **torzije** može **raščlaniti u pobočke prizme** od kojih je svaka izvrgnuta djelovanju **poprečne sile**.

Zato je i **proračunski predložak** (model) **prostorna rešetka**, čiji **tlačni članci** (kosnici) opisuju **izlomljenu betonsku zavojnicu**, dok su **uzdužni i poprečni štapovi vlačni** i kao takvi mogu biti samo **čelični**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Slično onomu što smo vidjeli u slučaju djelovanja **poprečne sile**, uzdužno **prednapinjanje smanjuje kosa glavna vlačna naprezanja i smanjuje njihov nagib prema uzdužnoj osi nosača.**

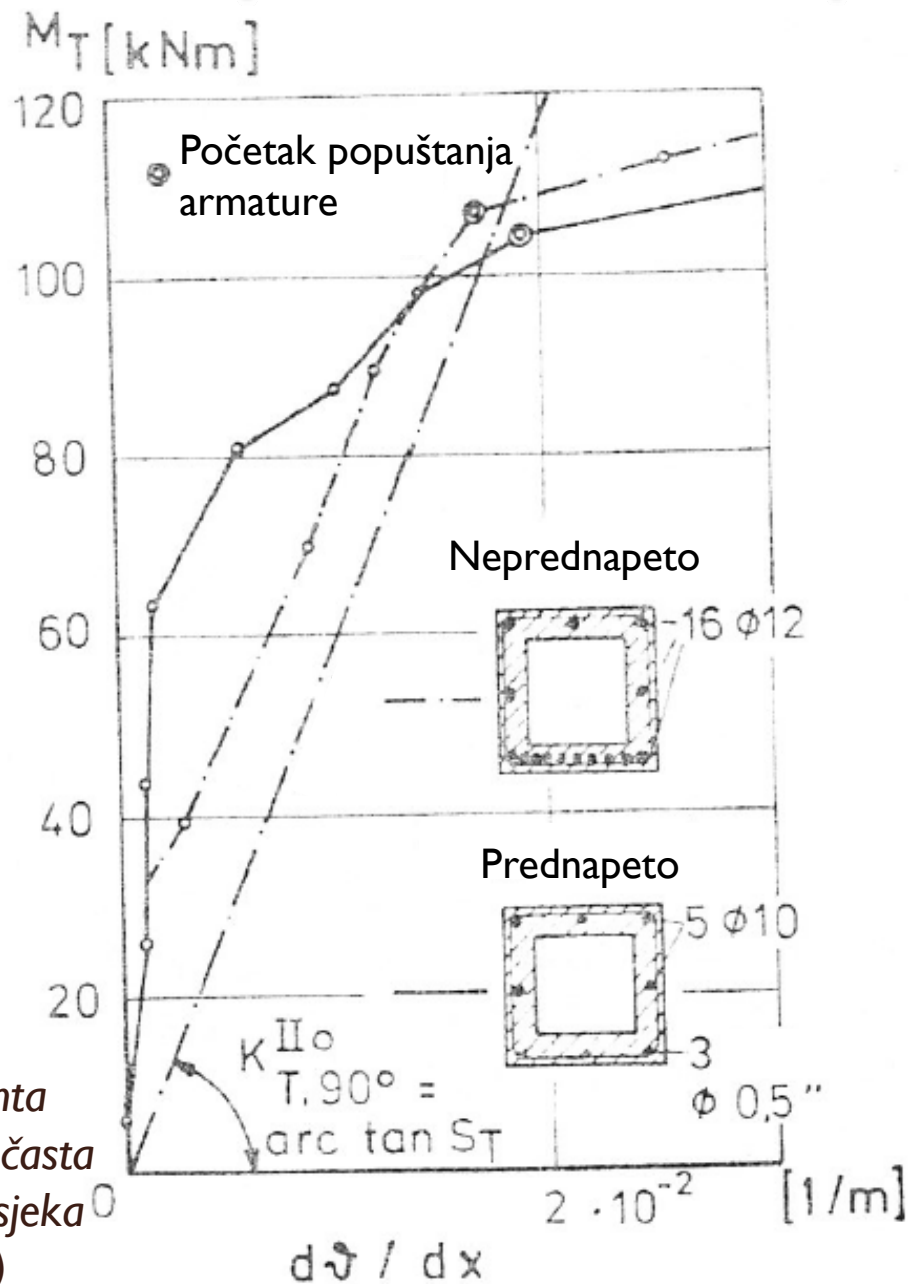
Zbog toga su pri **raspucavanju** (što se događa pri **znatno višoj razini opterećenja**) **pukotine položiti** nego u neprednapetog nosača.

U slučaju **savijanja** promatrali smo zavisnost **progiba** (ili kuta zaokreta) od rastućeg **opterećenja** (tj. momenta savijanja što ga ono izaziva).

Ovdje ćemo, **analogno**, predočiti zavisnost **kuta uvrtnja** od **torzijskog momenta** i to ćemo usporediti **prednapeti i neprednapeti** nosač (slika 4.21).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije



Slika 4.21: Usporedba odnosa momenta torzije i uvrtnja prednapetoga sandučasta nosača s neprednapetim jednaka presjeka uzdužne armature (Zürich-ški pokusi)

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Na ovim je nosačima ispitivano **istodobno djelovanje (međudjelovanje) savijanja i torzije**, pa je **glavnina uzdužne armature (i sve natege) smještena uz jednu pobočku.**

Mjesto Mörschova pravca ovdje ćemo nanijeti pravac što se dobije po predlošku **prostorne rešetke** i promatrati **krivulje** što odražavaju **ponašanje** dvaju nosača (prednapetog i neprednapetog) **u odnosu na nj.**

Treba reći kako su **oba** nosača imala **jednaku vlačnu armaturu**, tj. kako je **silu pri granici popuštanja** čelika uz **vlačnu pobočku** bila **jednaka.**

I ovdje se uočava **znakoviti odmak** od proračunskoga pravca, iako je u **prednapetog** nosača **manje pravilan** nego u neprednapetoga.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Naime, **nakon raspucavanja** pravac što odražava **zavisnost kuta uvrtanja od torzijskog momenta** prvotno je **usporedan** s proračunskim, ali pri opterećenju što je približno na pola puta između onoga pri početku raspucavanja i onoga pri kojem popušta čelik, nastupa osjetno **smanjenje krutosti**.

U neprednapetog nosača to se događa tek **nakon popuštanja čelika**.

I ovdje bi se to dalo objasniti **analogijom s nedostatnom vlačnom krutosti** (vidi predhodno poglavlje), ali tu znatnu ulogu igra i **smanjena krutost betonskih tlačnih članaka**, znakovita za **torziju**.

Pokusi u Zürichu pokazali su osim toga kako **natege nadomještaju** u stanovitoj mjeri **uzdužnu armaturu** potrebnu za prenošenje **torzijskog momenta**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Što je još **važnije** i **zanimljivije**, **svejedno je kako su te natege raspoređene po poprečnomu presjeku.**

Valja, međutim, voditi računa o tomu da **natege** postavljene uz **pobočku** u kojoj pod djelovanjem **savijanja** od vanjskog opterećenja nastaju **vlačna** naprezanja, trpe **dodatna vlačna naprezanja od torzije.**

Vratimo se još na trenutak na stuttgartski torzijski pokus.

Tamo je naime uzorak bio **najprije** izvrgnut **čistom savijanju**, a zatim **međudjelovanju** savijanja, torzije i poprečne sile.

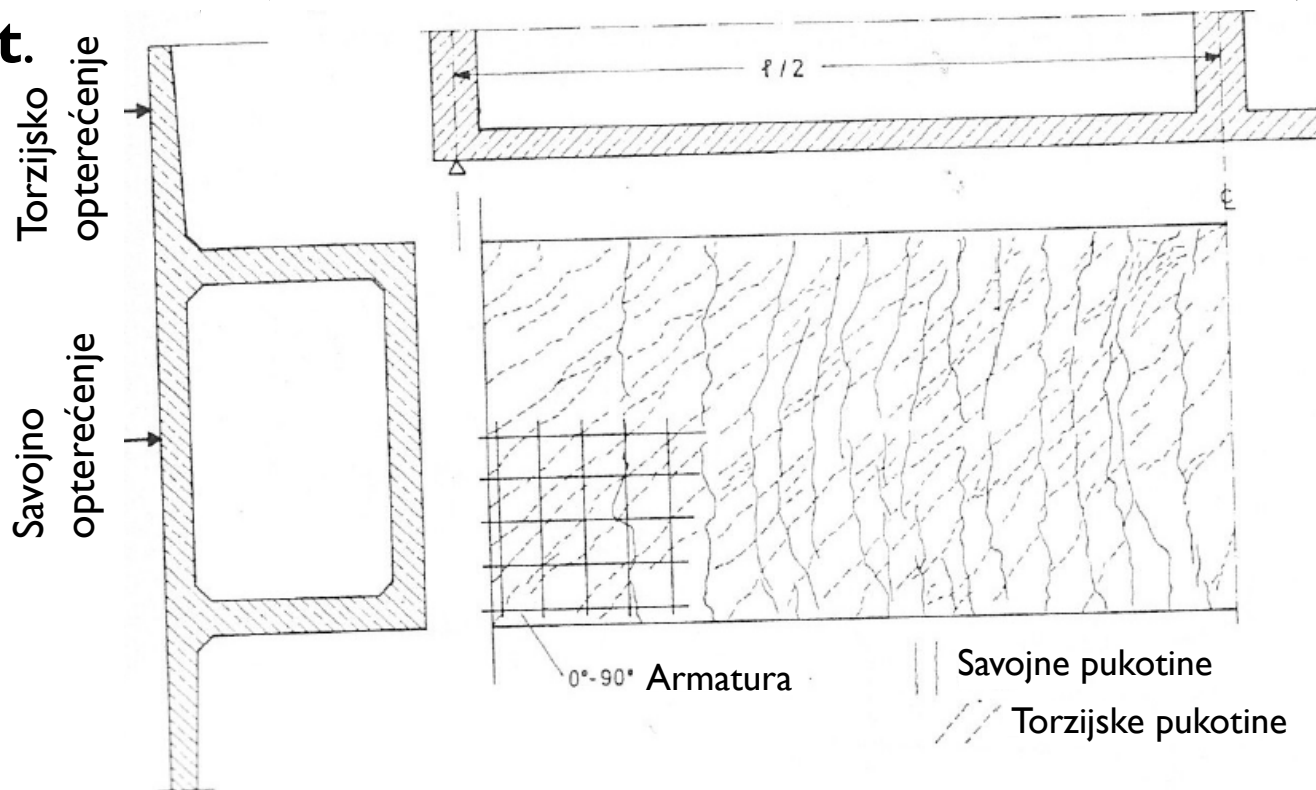
Međutim, zanimljivo je da se **pukotine** pri **istodobnom** djelovanju **savijanja i torzije** nisu pružale pod nekim **“rezultirajućim”** kutom, nego su se **međusobno križale nezavisne pukotine od savijanja s onima od torzije** (slika 4.22).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje torzije

Kada **ne bi bilo armature**, moglo bi se dogoditi da **komadi betona** između pukotina jednostavno **poispadaju**.

Zanimljivo je, povrh svega, kako **usprkos znatnoj raspuca-losti**, i to u dva smjera, **betonski tlačni članci zadržavaju nosivost**.



Slika 4.22: Pukotine u donjoj ploči sanduka od savijanja i torzije 65

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Prvo, valja reći kako ima sklopova s **čistim vlačnim člancima** (bez savijanja pod glavnim opterećenjem) – to su prednapete **vješaljke** što mogu biti dijelovima nosivih sklopova mostova, ali i zgrada.

Općenito vrijedi pravilo da **ima smisla** praviti vlačne članke od PB samo onda kada se može zajamčiti da će njihova **produ-
ljenja** pod vanjskim opterećenjem biti **razmjerno mala**.

Zatege **lukova** najčešće su napregnute i znatnim **savijanjem**.

Ovdje ćemo promatrati ponašanje PB **vješaljke**, kao **jednostavniji** slučaj.

Pretpostavimo da je ploština poprečnoga presjeka vješaljke A_{cn} (oblik presjeka ne utječe na ponašanje) i da je prednapeta silom što odgovara **dopustivom početnom naprezanju** u čeliku za prednapinjanje, f_{p0} .

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

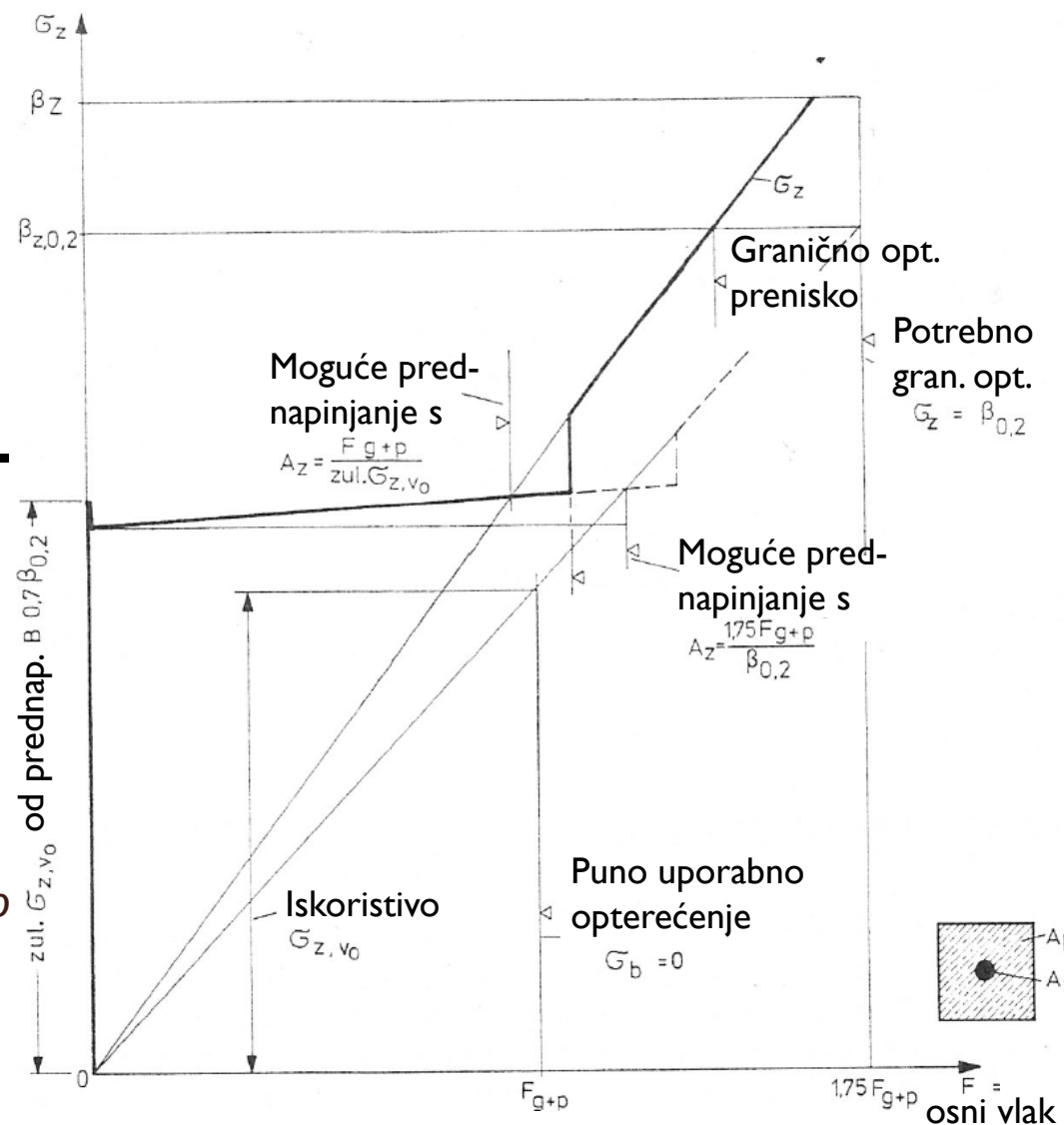
4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Uzmimo, za sada, da u njoj **nema betonskog čelika.**

Promatrajmo zavisnost **naprezanja u čeliku za prednapinjanje od vanjske vlačne sile** (slika 4.23).

Slika 4.23: Prednapete zatege od PB ne smiju se dimenzionirati na punu silu prednapinjanja jer se onda ne može dosegnuti potrebno granično opterećenje. Ispravno je

$$A_p = \frac{1,75F_{g+p}}{F_y} \text{ ili } = (A_p + A_s)$$



4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Na samom **početku, prije nanošenja vanjskog opterećenja**, u čeliku djeluje **početno (dopustivo) naprezanje**, f_{p0} .

(Neki pisci udžbenikā odmah odbijaju gubitke od skupljanja i puzanja betona, te opuštanja čelika za prednapinjanje.)

Istodobno u betonu djeluje najveće osno tlačno naprezanje, σ_c .

Ako sada pretpostavimo da **vanjsko opterećenje**, Q , postupno **raste**, ono će izazvati **promjenu naprezanja** i u **betonu** i u **čeliku** – u **betonu** će postupno **splašnjavati tlak**, a u **čeliku** će **rasti vlačno naprezanje**.

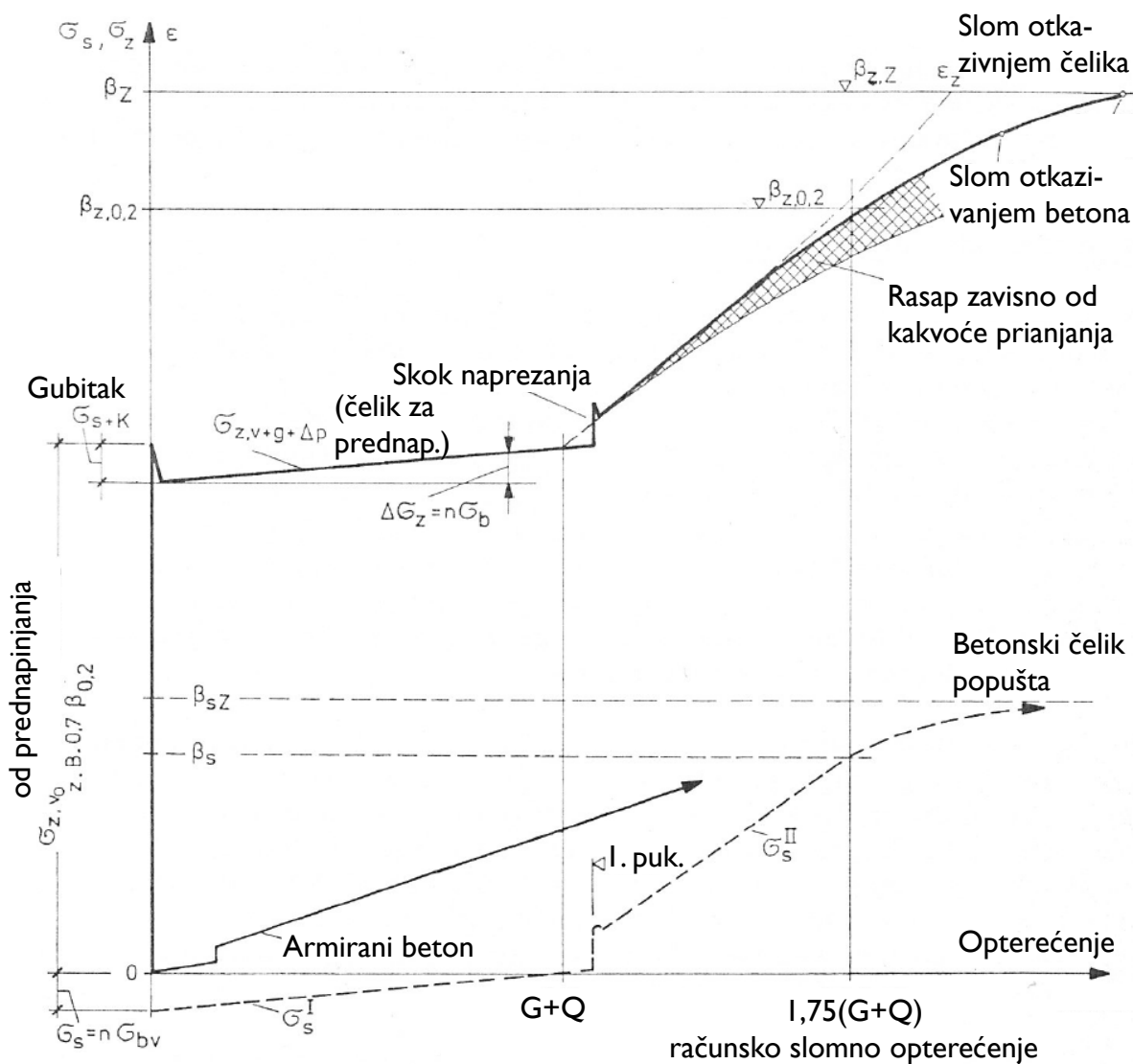
Splašnjavanje tlaka u betonu zapravo je “prebijanje” početnoga tlaka vlakom izazvanim vanjskom vlačnom silom.

Priraštaj naprezanja u čeliku obrnuto je srazmjeran udjelu čelika u ploštini poprečnoga presjeka vješaljke.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Zavisnost ovoga priraštaja od priraštaja vanjskog opterećenja potpuno je pravocrtna i u tom pogledu nema razlike u ponašanju vješaljke od ponašanja savijane grede (slika 4.9).



Slika 4.9: Naprežanja u čeliku za prednapinjanje i betonskom čeliku 69

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Na putu **priraštaja vanjskog opterećenja** postoje **dvije znakovite vrijednosti**.

Prva je vrijednost **sila** pri kojoj potpuno **iščezavaju tlačna naprezanja** i zove se **silom rastlačenja presjeka**.

Uočimo kako je ovdje riječ o rastlačenju **cijeloga presjeka**, a ne samo o rubnom rastlačenju, kao u slučaju savijanja.

Raste li vanjsko opterećenje i dalje, i u betonu će se pojaviti **vlačna** naprezanja.

Ona će rasti sve dok ne dosegnu **vlačnu čvrstoću betona**, čime se doseže **druga** znakovita vrijednost – **sila raspucavanja**.

Za razliku od onih pri savijanju, ovdje se **pukotine** prostiru po **cijelomu presjeku** (Nijemci ih zato zovu **Trennrise** – **pukotine razdvajanja**).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Između ovih dviju znakovitih vrijednosti **naprezanja u čeliku za prednapinjanje** zavisit će o tomu je li uspostavljen **spoj između čelika i okolnog betona** (postoji li **prianjanje**).

Ako **nema prianjanja**, naprezanja će u čeliku već počev od **rastlačenja presjeka** rasti po novom zakonu – po **pravcu** što prolazi kroz **ishodište**, a u odnosu na dosadani pravac ima samo stanovit **priraštaj nagiba**.

Ako je pak uspostavljen **spoj između čelika i betona**, vrijedit će zavisnost po **prvotnomu pravcu** sve do **raspucavanja betona**, kada nastupa **skok naprezanja u čeliku**.

Ovaj skok zavisi od **ploštine presjeka betona** i njegove **vlačne čvrstoće**, te **ploštine presjeka čelika** i može biti razmjerno **velik**.

Tek **nakon skoka** vrijedi zavisnost po **ishodišnomu pravcu**.

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Sada dolazimo do jedne **važne vlastitosti** PB vlačnih članaka.

Naime, budući da je **početno** naprezanje u čeliku jednako visoku postotku njegove **granice popuštanja**, čelik u vlačnom članku dosegnuo bi granicu popuštanja znatno **prije dosegnuća graničnog opterećenja** (slika 4.23).

U zavisnosti od **omjera** stalnog i promjenjivog opterećenja, te od propisa po kojima se računa, granično je opterećenje veće od uporabnog za oko **70÷75 %**, dok je granica popuštanja veća od početnog naprezanja najviše za oko **50 %**.

Zato se **ploština poprečnoga presjeka čelika za prednapinjanje** mora izračunati iz vlačne sile pri **graničnom opterećenju** podijeljene s naprezanjem u čeliku na granici popuštanja.

U tom slučaju **zavisnost naprezanja u čeliku od vanjskog opterećenja** ima **sličan**, ali **mirniji** tijek (slika 4.23).

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

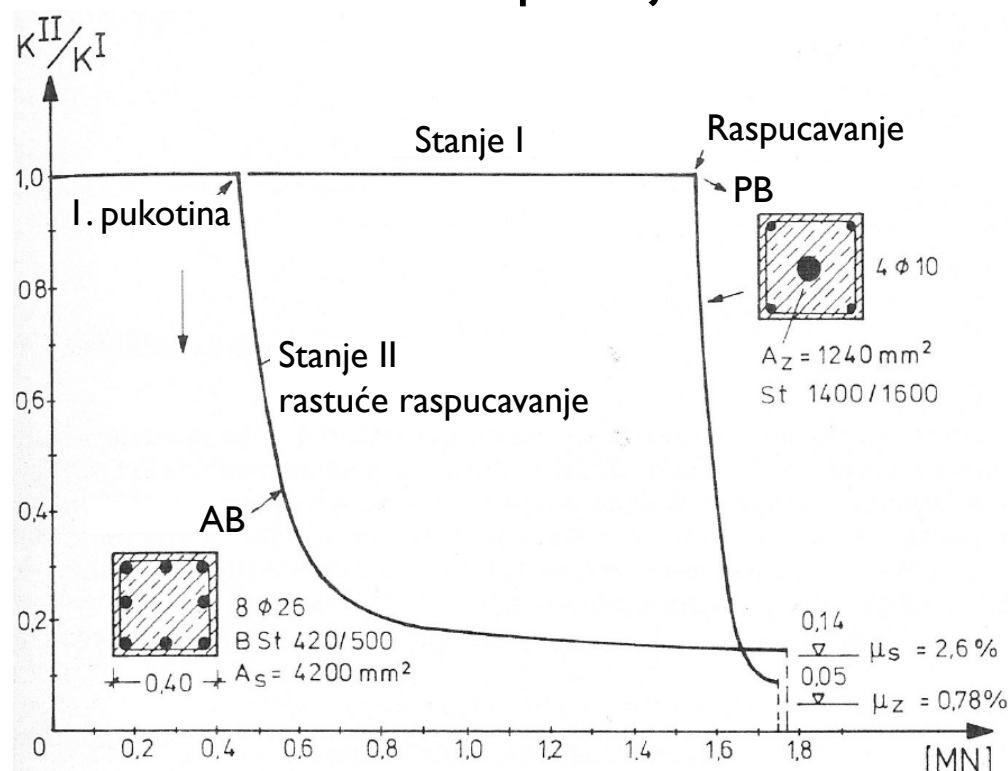
4.3 Djelovanje osne vlačne sile

Raspucavanje izaziva ne samo skok naprezanja u čeliku, nego i **skokovit pad vlačne krutosti članka** (slika 4.24).

Za usporedbu, na istoj je slici predočena i zavisnost krutosti AB vlačnoga članka, armirana tako da može prenijeti istu vlačnu silu, od vanjskog opterećenja.

Vidimo da je u PB članka pad krutosti znatno **nagliji** i **ukupno veći** nego u armiranoga.

To se događa zato što se pri prekoračenju vlačne čvrstoće betona



Slika 4.24: Usporedba krutosti PB i AB zatege pri vlačnoj sili od 1 MN

4 Ponašanje PB nosača pod rastućim opt.

4.3 Djelovanje osne vlačne sile

u PB vlačnih članaka **bez nenapete armature** javlja **mali broj jako rastvorenih pukotina**.

Zato se **redovito**, a pogotovo ako pad krutosti može imati **nepovoljan utjecaj na opće ponašanje i uporabivost sklopa** kao cjeline, mora predvidjeti stanovita količina **uzdužnih šipaka od betonskog čelika obujmljenih stremenovima**, kako bi se pukotine **raspodijelile u veći broj manjih** i kako bi se **ublažio pad vlačne krutosti**.