

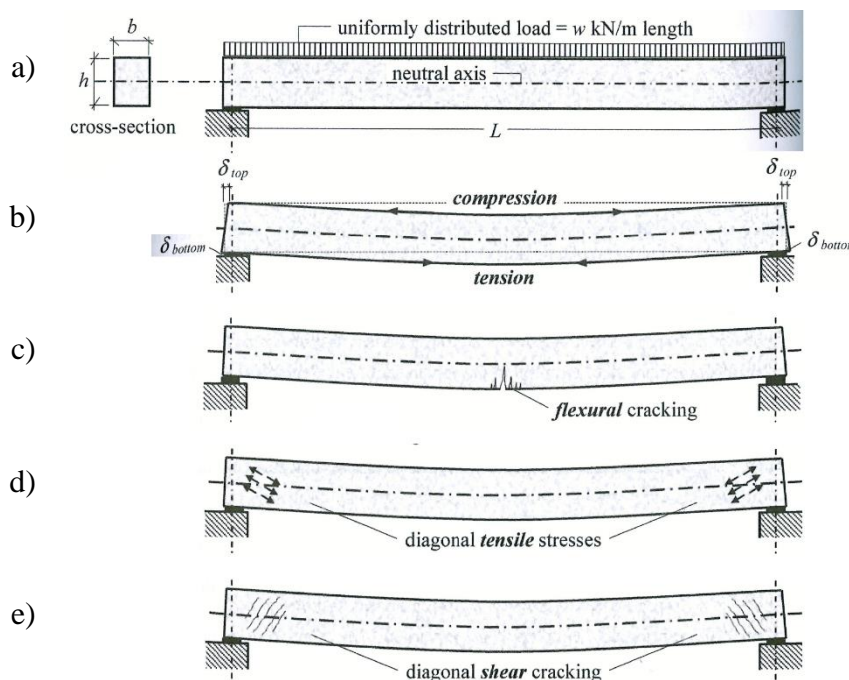
4. BETOONKONSTRUKTSIOONI TÖÖTAMISE PÕHIMÕTTED

4.1. Raudbetooni olemus

Raudbetoon on liitmaterjal, kus koos töötavad kaks väga erinevate omadustega materjali – teras ja betoon. Neist betoon on suhteliselt odav kohalik materjal, mis töötab hästi survele, kuid üsna halvasti tõmbel (betooni tõmbetugevus on 10...15 korda väiksem survetugevusest). Teras seevastu töötab ühteviisi hästi nii survele kui ka tõmbel, kuid tema hind on küllalt kõrge. Osutub, et survejõu vastuvõtmine betooniga on mitmeid kordi odavam kui terasega, tõmbejõu vastuvõtmine on samavõrra odavam aga terasega. Siit tulenebki raudbetooni majanduslik olemus: **võtta ühes ja samas konstruktsioonis esinevad survesisejõud vastu betooniga, tõmbesisejõud aga terasega.**

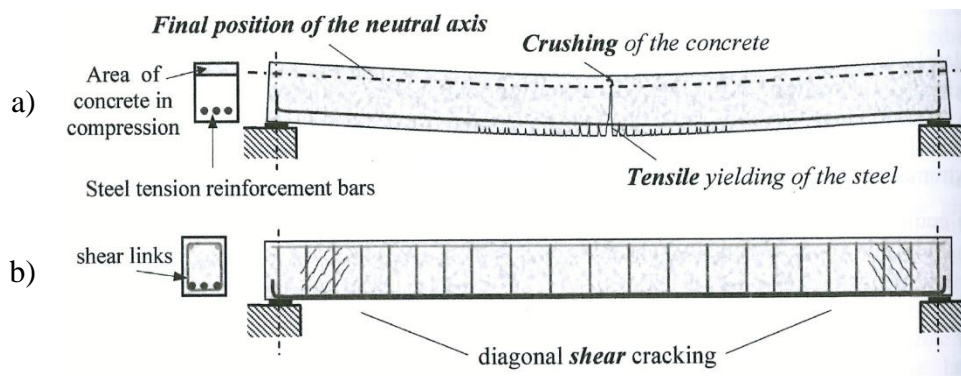
Ülaltoodu seisukohalt on iseloomulikuks raudbetoonkonstruktsiooniks painutatud raudbetoelement (tala), kus väliskoormus kutsub alati esile nii surve- kui ka tõmbepinged. Vaatleme betoonist ja raudbetoonist lihttala. Olgu talade mõõtmed, koormamisviis ja betooni omadused mõlemal juhul sarnased, raudbetootala on aga oodatavate tõmbepingete piirkonnas (ja suunas) tugevdatud terasest sarrusega.

Betoontala koormamisel tekivad nulljoonega teineteisest eraldatud surve- ja tõmbetsoon. Suurimad normaalpinged on mõlemas tsoonis enam-vähem võrdsed. Kui väliskoormuse suurenedes tõmbepinged suurima paindemomendiga ristlõikes (**kriitilises lõikes**) saavutavad betooni tõmbetugevuse, siis tekib selles lõikes pragu, betooni tõmbetsoon langeb tööst välja ja konstruktsioon variseb. **Seega on betootala kandevõime määratud betooni tõmbetugevusega**, kusjuures betooni suur survetugevus jääb põhiliselt kasutamata. Analoogne nähtus esineb ka tugevde lähedal, kuna lihttalal esineb lisaks paindemomendile ka pöikjõud – diagonaalsed praod tekivad risti nihkepingetega.



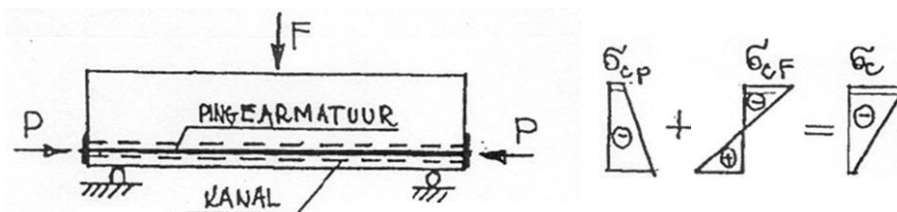
Joonis 16. Sarrustamata betootala töötamise põhimõtte: a) tala vahetult enne koormuse rakendamist; b) tõmbe- ja survepingete tekkimine paindemomendist; c) tala purunemine paindemomendist tekkivate tõmbepingete tõttu; d) suurimad nihkepinged pöikjõust; e) tala purunemine pöikjõust tekkivate nihkepingete tõttu.

Raudbetootala töötab kuni esimese praio tekkimiseni analoogiliselt betoontalaga. Prao tekkimine kriitilises lõikes ei põhjusta aga tala purunemist, vaid viib normaalpingete ümberjaotumisele praoga ristlõikes: kogu tõmbetsooni sisejõud, mis seni võeti vastu betooniga kantakse nüüd üle tõmbetsoonis olevale **pikitõmbesarrusele**. Edasisel koormamisel tekivad praod ka teistes ristlõigetel vastavalt paindemomendi suurenemisele neis. Õigesti projekteeritud raudbetootala puruneb siis, kui kriitilises lõikes üheaegselt ammendub tala surve- ja tõmbetsooni vastupanu, s.o. kui tõmbesarruse pinge saavutab terase voolavustugevuse, betooni pinget survetsoonis aga betooni survetugevuse. Sõltuvalt eeskätt sarruse hulgast võib raudbetootala kandevõime kümneid kordi ületada vastava betoontala kandevõimet. Mõõdukalt avanenud (kuni 0,1...0,3 mm) pragude esinemine on raudbetoonkonstruktsiooni kasutusseisundis täiesti normaalne nähtus ega pruugi viidata konstruktsiooni ebapiisavale kandevõimele. Siiski on teatud juhtudel praod kasutusseisundis ebasoovitavad (näiteks korrosiooni soodustava keskkonna korral). Toelähedases piirkonnas tekkivad suurimad nihkepinged põikjõust võetakse vastu **põikisarrus**.



Joonis 17. Sarrustatud betoontala töötamise põhimõte: a) paindemomendist tekkivate tõmbepingete vastuvõtmine pikisarrusega; b) põikjõust tingitud nihkepingete vastuvõtmine põikisarrusega

Pingebetoon on raudbetooni eriliik, milles valmistamise ajal betoonis tekitatud survepinged vähendavad konstruktsiooni kasutusseisundis tekkivaid betooni tõmbepingeid või väldivad neid. Betooni eelpingestamiseks kasutatakse konstruktsiooni paigaldatavat kõrgtugevat pingesarrust.

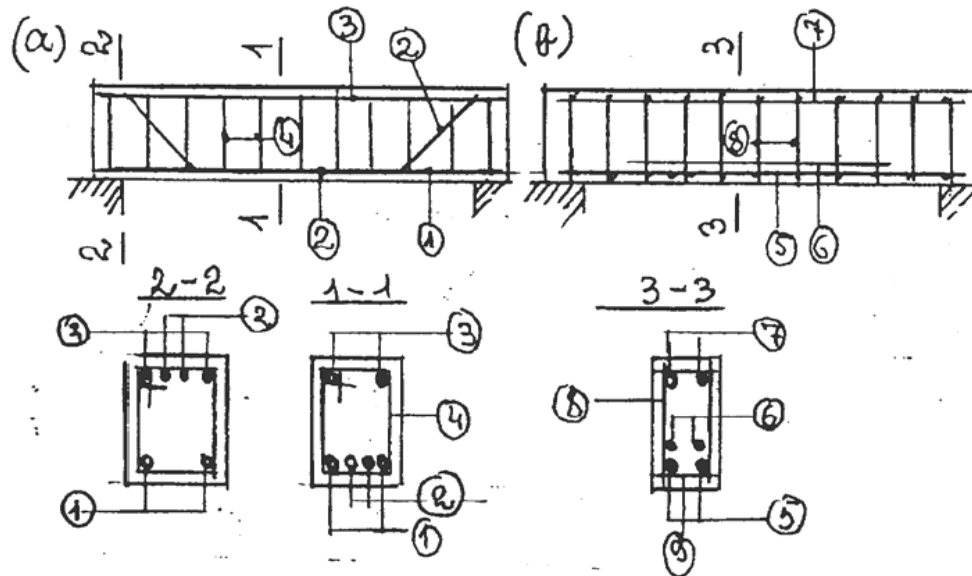


Joonis 18. Pingebetooni tööpõhimõte

Betooni ja sarrusterase **koostöö eelduseks** on nende materjalide mõningate füüsikalismehaaniliste omaduste sobivus:

- kivistumisel betoon nakkub sarrusega, mistõttu konstruktsioonis on mõlema materjali suhtelised deformatsioonid võrdsed;
- terase ja betooni soojuspaisumise tegurid on ligikaudu võrdsed, mistõttu keskkonna temperatuuri muutumine ei kutsu konstruktsioonis esile olulisi temperatuuripingeid;
- hästitihendatud betoon kaitseb selles paiknevat sarrust korrosiooni eest.

4.2. Sarruse funktsionaalne liigitus



Joonis 19. Sarruse liigitus: a) seotud karkassiga, b) keevitatud karkassiga

Vaatleme kahte raudbetootala, neist üks on sarrustatud seotud (a), teine keevitatud karkassiga (b). Joonisel toodud sarruse võiks liigitada järgnevalt.

1) otstarbe järgi:

- töötav (arvutuslik) sarrus, vajalik elementis toimivate sisejõudude vastuvõtmiseks, määratakse arvutusega,
- mittetöötav (konstruktiivne) sarrus, vajalik töötava sarruse fikseerimiseks (karkassi moodustamiseks), kohalikuks tugevdamiseks, pragude arenemise piiramiseks või vältimiseks jne;

2) suuna järgi:

- pikisarrus: pos. 1, 2 (horisontaalne osa), 3, 5, 6, 7,
- põikisarrus: pos. 4 (rangid), 8 ja 9 (põikivardad, laiemas tähenduses samuti rangid),
- kaldsarrus: pos. 2 (kaldosa);

3) sarruse töötamise järgi:

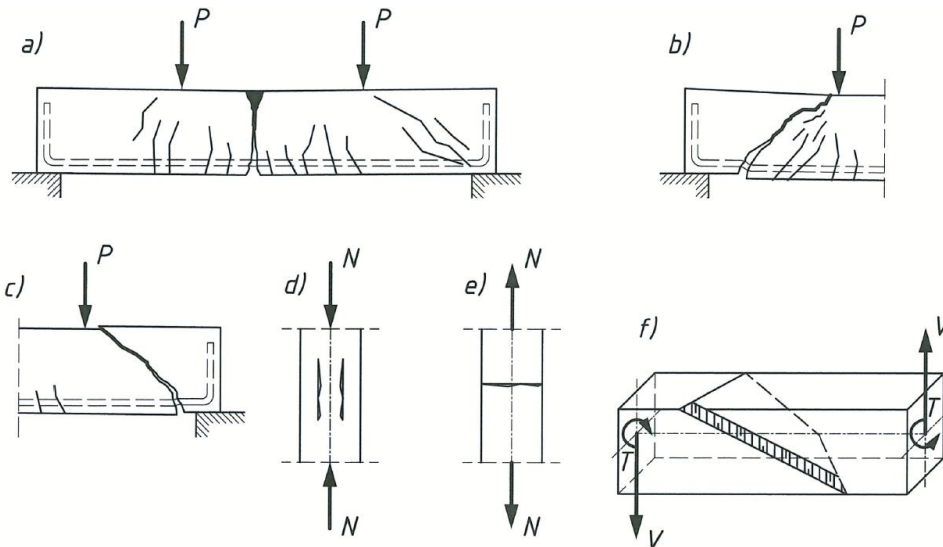
- tõmbesarrus, sarrus painde või normaaljõu põhjustatud tõmbe vastuvõtmiseks, pos. 1, 2 (horisontaalne osa), 5, 6,
- survesarrus, sarrus painde või normaaljõu põhjustatud surve vastuvõtmiseks, pos. 3 ja 7 (kui nad arvutuse järgi on vajalikud),
- põikisarrus, sarrus põikjõu vastuvõtmiseks, pos. 2 (ülespööre), 4 ja 8 (kui nad arvutuse järgi on vajalikud).

4.3. Deformatsiooni ja purunemise tüübid

Sõltuvalt domineerivast sisejõust võib raudbetoonelemente liigitada järgnevalt: 1) painutatud element, 2) surutud element, 3) tõmmatud element ja 4) väänatud element.

Tabel 25. Raudbetoonelementide tüüpilised purunemise põhjused (vt ka joonist)

Elemendi kirjeldus	Sisejõudude kirjeldus	Purunemise põhjus (koos viitega allolevale joonisele)
Painutatud element	Domineerib paindemoment M , tavaliselt esineb samaaegselt ka põikjõud V .	Kandevõime kaotuse põhjustab kas normaallõikes toimuv paindemomendi põhjustatud paindepurunemine (a), kaldlõikes toimuv põikjõu põhjustatud põikjõu-paindepurunemine (b) või põikjõu-tõmbepurunemine (c).
Surutud element	Domineerib normaaljõud N , ekstsentriliselt surutud elemendis esineb ka paindemoment M . Küllalt sageli võib esineda ka põikjõud V , mille mõju harilikult ei ole eriti oluline.	Tsentriliselt surutud element puruneb normaallõikes, kusjuures sellega kaasnevad pikipraad (d). Suhteliselt suure ekstsentrilisusega surutud või tõmmatud element, mille ristlõikes esinevad nii tõmbe- kui ka survedeformatsioonid, puruneb normaallõikes analoogselt paindepurunemisega.
Tõmmatud element	Domineerib normaaljõud N , ekstsentriliselt tõmmatud elemendis esineb ka paindemoment M .	Üleni tõmmatud ristlõikega element puruneb normaallõikes (e).
Väänatud element	Enamasti esineb puhas väändmoment T , kuid küllalt sageli ka väändmoment T koos paindemomendi M ja põikjõuga V .	Väänatud element puruneb mingis ruumilises lõikes (f) ning see toimub väändmomendi, põikjõu ja paindemomendi koostoimel.



Joonis 20. a) paindepurunemine normaallõikes; b) põikjõu-paindepurunemine; c) põikjõu-tõmbepurunemine; d) purunemine tsentrilisel survele; e) purunemine tsentrilisel tõmbel; f) purunemine väändmomendi ja põikjõu koostoimel

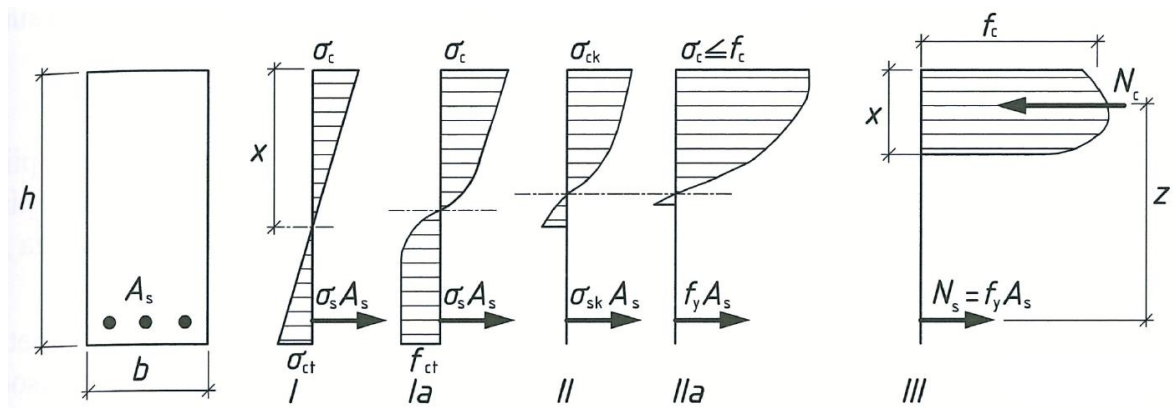
Raudbetoonelemendi purunemisele eelneb pragude tekkimine. Eristatakse **normal-, piki- ja kaldpragusid**. Konstruktsiooni lähenemisel purunemisolukorrale hakkab tavaliselt üks pragudest (või praod) mingis piirkonnas märgatavalt arenema ja määravad **purunemislõike**. Mõnel juhul võib pragu tekkida samaaegselt elemendi purunemisega.

4.4. Painutatud elemendi pingestaadiumid

Vaatleme painutatud ristkülikristlõikega tala. Suurima paindemomendiga ristlõige läbib koormamise algusest kuni purunemiseni rea iseloomulikke pingestaadiume, mida on kirjeldatud allolevas tabelis ja joonisel.

Tabel 26. Painutatud ristkülikristlõikega tala pingestaadiumid (vt ka joonist)

Pingestaadium		Staadiumi lühikirjeldus
Olek	Nr	
Ilma praota	I	Väikese koormuse korral tala töötab elastse kahest materjalist liitkonstruktsioonina. Pingejaotus betoonis on lineaarne. Koormuse suurenedes kasvavad nii betooni pinged σ_c kui ka sarrusterase pinged σ_s , seejuures hakkavad betooni tõmbetsoonis ilmneka ka plastised deformatsioonid ja tõmbepingete jaotus muutub mittelineaarseks. Staadium I vastab pragunemata elemendi kasutusseisundile.
	Ia	Vahetult enne praotekkimist on pinged betooni plastsete deformatsioonide tõttu peaaegu kogu tõmbetsoonis ulatuses ühtlustunud ja saanud võrdseks betooni tõmbetugevusega f_{ct} . Staadium Ia on aluseks normaalpraotekke arvutusele. Edasine koormuse (paindemomendi) suurenemine tekitab ristlõikes normaalpraot. Praotekkimisel kasvab hüppeliselt sarruse pinged, sest varem betooni tõmbetsooniga vastu võetud tõmbejõud kandub nüüd üle sarrusele. Ristlõige läheb üle II pingestaadiumi.
Praoga	II	Pärast praotekkimist betooni kaasatõttamist tõmbetsoonis enam arvesse ei võeta. Kuigi ka survetsoonis hakkavad arenema plastised deformatsioonid, võib pinged jaotuse lugeda seal praktiliselt lineaarseks. Staadium II vastab pragunenud konstruktsiooni normaalsele kasutusseisundile. Selle staadiumi deformatsiooni- ja pinged jaotusel põhinevad kasutuspiiriseisundi arvutused.
	IIa	Koormuse suurenemisel betooni ja sarruse pinged kasvavad, kuni sarruse pinged saavutab voolavuspiiri f_y . Pärast seda sarruse sisejõud N_s ja survetsooni resultantjõud N_c enam suureneda ei saa ($N_s = N_c$). Koormuse edasisel suurenemisel sarrus voolab, praot areneb edasi, survetsooni kõrgus väheneb ja betooni pinged seal suureneb. Paindekandevõime $M = N_s \times z = N_c \times z$ suureneb mõnevõrra sisejõude õla suurenemise arvel.
Purunemine	III	III staadium on purunemistaadium. Survetsooni pinna vähenemise tõttu on betooni pinged praktiliselt kogu survetsooni ulatuses saanud võrdseks survetugevusega f_c ja betooni pikideformatsioon piirsurveformatsiooniga ϵ_{cu} . Betooni survetsoon puruneb ja konstruktsioon variseb.



Joonis 21. Tala normaallõike pingestaadiumid (tähisted: b – ristkülikulise ristlõike laius, h – ristlõike kõrgus, x – survetsooni kõrgus, A_s – tõmbesarruse ristlõikepind, z – sisejõudude õlg)

Taolise skeemi järgi purunevat ristlõiget nimetatakse **normaalsarrustatud (-armeeritud) ristlõikeks**. Normaalsarrustatud ristlõike purunemine algab tõmbetsoonis sarruse voolamisega ja lõpeb survetsoonis betooni purunemisega. Purunemisele eelneb purunemislõikes oleva prao suur avanemine ja tavaliselt ka elemendi suur läbipaine.

Väga tugeva tõmbesarrusega ristlõikes võib survetsooni betoon puruneda enne, kui sarruse pinge saavutab voolavuspiiri. Sellist ristlõiget nimetatakse **ülesarrustatud (-armeeritud) ristlõikeks** ja purunemist hapraks purunemiseks. Sellisele purunemisele ei eelne märgatavat pragude arenemist. Ülesarrustatud ristlõike kasutamine ei ole soovitatav üleliigse sarruse kulu tõttu.

Nõrgalt sarrustatud ristlõige võib puruneda juba prao tekkimisel (s.o. üleminekul II pingestaadiumi), kui sarrus ei suuda vastu võtta betooni tõmbetsoonist temale ülekanduvat tõmbejõudu. Sellist ristlõiget nimetatakse **alasarustatud (-armeeritud) ristlõikeks** ja seda tuleb arvutamise ja töötamise seisukohalt käsitleda sarrustamata betoonristlõikenä.

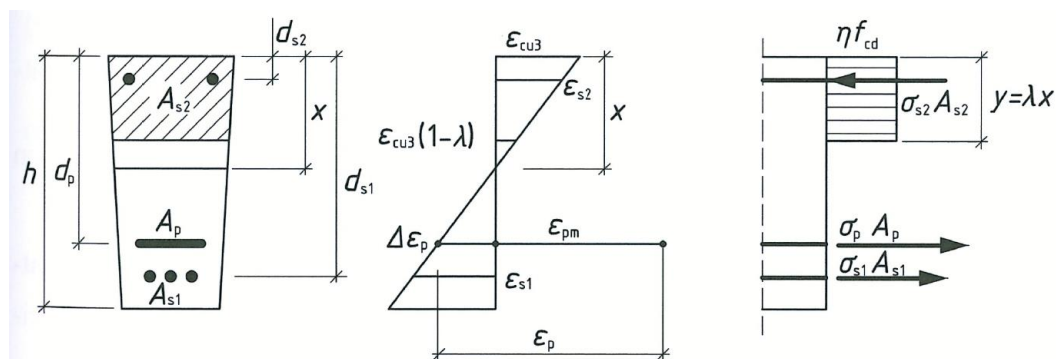
Suhteliselt suure ekstsentrilisusega surutud või tõmmatud elemendi töötamise skeem on sarnane painutatud elemendiga juhul, kui vaadeldav ristlõige ei ole kogu ulatuses surutud või tõmmatud.

4.5. Arvustes kasutatav deformatsiooni- ja pingeaotus

Varasemalt on käsitletud, et **ristlõike projekteerimisel** võib lähtuda lihtsustatud pinge-deformatsiooni diagrammidest (parabool-lineaarne, bilineaarne või riskülikuline).

Neist praktikas on kõige lihtsamini kasutatavaks riskülikulise kujuga pinge-deformatsiooni diagramm, **mille korral lähtutakse järgmistest eeldustest**:

- betooni survetsooni kõrgus x asendatakse tingliku arvutuskõrgusega $y = \lambda \times x$;
- betooni efektiivseks survetugevuseks võetakse $\eta \times f_{cd}$;
- survetsooni arvutuskõrguse tegur:
$$\begin{cases} \lambda = 0,8, & \text{kui } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \lambda = 0,8 - (f_{ck} - 50)/400, & \text{kui } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases};$$
- survetugevuse efektiivsuse tegur:
$$\begin{cases} \eta = 1,0, & \text{kui } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ \eta = 1,0 - (f_{ck} - 50)/200, & \text{kui } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases};$$
- kui survetsooni laius väheneb betooni enamsurutud kihi suunas, siis tuleks $\eta \times f_{cd}$ väärtust vähendada 10% võrra.



Joonis 22. Ristlõike lihtsustatud deformatsiooni- ja pingeaotus