

Jännitetyn betonipalkin leikkausmitoitus

- Taustaa, mitoitusmallin tekijöitä ja ominaispiirteitä

Eurokoodiseminaari 2023

28.9.2023 prof. TkT Anssi Laaksonen



1

Sisältö

- 1) Esityksen lähtökohtia
- 2) Leikkausmitoituksen mallien kehitysvaiheita
- 3) Leikkausmitoituksen tilat
- 4) Leikkausraudoittamaton palkki
-
- Leikkausraudoitettu palkki

2

Tampereen yliopisto
Tampere University

Lähtökohtia

3

Tampereen yliopisto
Tampere University

Johdanto ja rajaus

- Tämä esitys rajautuu esijännitettyjen palkkien käsittelyyn leikkauskestävyyden osalta
- Esitysaika on lyhyt, niin aiheesta tulee enemmänkin pintaraapaisun kaltainen
- Esityksessä käydään taustoja leikkausraudoittamattomasta ja leikkausraudoitetusta tilanteesta, mutta eurokoodin osalta pääpaino on leikkausraudoittamattomassa tilanteessa, koska leikkausraudoitetun palkin mitoitus on melko samanlainen niin teräsbetonipalkilla kuin jännitetyllä palkilla
- Esityksessä vain sivutaan päävetojännitykseen perustuvaa tarkastelua, mikä koskee lähinnä ontelolaattoja
- Aluksi käydään ilmiöitä ja aiheeseen liittyvää taustaa ja sen jälkeen käydään olennaisia mitoitusmallien ominaisuuksia
- Aina kun mallinormeja, standardeja ja ohjeita on päivitetty, on niihin sisältynyt muutos leikkaus- tai lävistysmitoitukseen
- Nyt leikkausmitoituksen osalta päivityksiä on etenkin leikkausraudoittamattoman rakenteen tarkasteluissa, ja leikkausraudoitetun mitoituksen suhteessa nykyiseen on enemmänkin täsmennetty sisältöä
- Lävistys- ja leikkausmitoituksen osalta on viime vuosina

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

4

CEN TC250/SC2/WG1/TG4

- Mandaatti Eurokoodin päivittämiselle M/515
- Leikkaus-, lävistys- ja vääntömitoituksen asiantuntijaryhmä TG4 perustettiin betonieurokoodin kehitystä varten
- Ensimmäinen kokous oli 09/2012. Viimeinen (tähän asti) 20. kokous, oli 04/2022.
- Standardin päivitys on ollut lävistys- ja leikkausmitoituksen päivityksen osalta poikkeuksellinen:
 - Normaalisti päivitystyö tehdään sillä päivityksen alussa olevan tutkimuksen ja tiedon pohjalta
 - Kuitenkin nyt päivitystyön aluksi oli valmistunut Model Code 2010
 - Tilanne oli otollinen, koska MC2010 sisälsi merkittäviä päivityksiä, päivitystyöhön osallistuneet olivat Eurokoodin ensimmäisessä työryhmässä (SC2.PT1)
 - Päivitystyötä varten oli koottu kommentteja, jotka eivät olleet luonnollisesti mukana MC2010 päivityksessä
 - Useissa yliopistoissa oli valmistumaisillaan useita tutkimuksia lävistys- ja leikkauskestävyyteen liittyen, samoin kuin fib:in aiheita käsittelevät työryhmät olivat aktiivisia => joint meetings fib & TG4
 - Tämän pohjalta varsin poikkeuksellisesti tutkimustyö ja PT1 työ niveltyi yhteen, ja työn aikana valmistui huomattava määrä tutkimustuloksia jotka voitiin ottaa standardin päivitystyössä huomioon

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

5


Lähtökohtia

- Päivitystarpeita ja lähtökohtia leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyyteen liittyen:
 - leikkauskestävyys kun siihen kohdistuu vetävää tai puristavaa normaalivoimaa "±N"
 - kokovaikutus (size effect) "d"
 - Leikkausjänteen vaikutus (shear slenderness) "a"
- Perustuu läpinäkyviin fysikaalisiin malleihin (Mekaniikan mukaisiin malleihin)
 - Säännöt jotka voidaan selittää, ymmärtää ja perustella fysiikan periaatteiden mukaan
 - Voivat sisältää kokeellisia parametreja
 - On verifioitu kattavasti kokeellisen tulosten avulla
 - Voidaan yhdistää epälineaarisiin analyyseihin haastavammissa rakenteissa
- Mitoitusmenettelyn toiminta-alue tunnetaan paremmin
 - Lisäksi mekaaninen malli mahdollistaa menetelmän soveltamisen muihinkin tapauksiin, kuin mihin menetelmä on kalibroitu
- Yksi menetelmä, joka voi sisältää useita eri tasoja
 - Yksinkertainen/konservatiivinen – Kattava/tarkempi/työlämpi
 - Uudisrakenteet – Kantavuuden arviointi



9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

6

 Tampereen yliopisto **Mitä standardissa tulisi esittää?**

Standardien tulisi olla mm.:

- Mahdollisimman tiivis
- Helposti ymmärrettävissä
- Helposti sovellettavissa jokapäiväisessä suunnittelussa

Standardien tulisi ottaa huomioon mm.:

- Viimeisin tieteellinen tutkimus
- Kaikki rakenneratkaisut
- Kattavasti mitoitus- ja laskentamenetelmät
- Kokemus aiemmista suunnittelukäytännöistä

Mitä standardeilta ja ohjeilta odotetaan?


- Suunnittelun käsikirja täydellisine esimerkkeineen
- Tarkka ohje aloitteleville suunnittelijoille
- Yksi standardi kaikille rakenteille

- Ei käytettävissä ilman "Engineering Judgement" ratkaisuja
- Omat standardit erilaisille rakenteille huomioiden erityisnäkökohdat

Laskenta-esimerkki	Käsikirja 1	RakMK B4	prEN 1992-1-1	NCCI	Käsikirja 2	Model Code 2020	"Theory manual"	Tutkimusjulkaisut
			EN 1992-1-1					

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

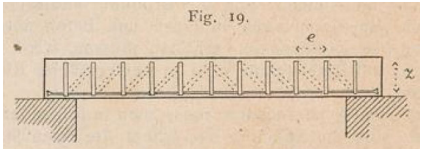
7

 Tampereen yliopisto

Leikkausmitoituksen mallien kehitysvaiheita

8

Tampereen yliopisto Leikkausraudoitettu kehitysvaiheita



Ritter, W. 1899 "Die Bauweise Hennebique"

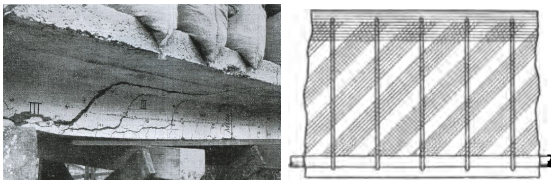
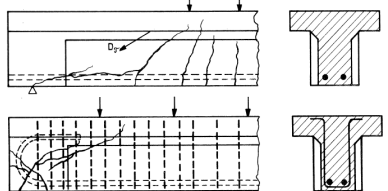
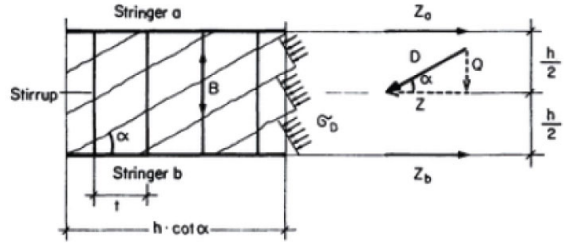


Abb. 141.



Mörsch, E. 1908 "Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung"



Stringer a, Stringer b, Stirrup, Z_0 , Z_b , $h/2$, $h/2$, α , B , G_b , t , $h \cdot \cot \alpha$

$$Q = B \cdot \frac{h}{t} \cdot \cot \alpha$$

$$\sigma_D = \frac{D}{d \cdot h \cdot \cos \alpha} = \frac{Q}{d \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}$$

$$Z_a = -\frac{M}{h} + \frac{N}{2} + \frac{Q}{2} \cot \alpha \quad Z_b = \frac{M}{h} + \frac{N}{2} + \frac{Q}{2} \cot \alpha$$

$$\theta_{\min} = 26.6^\circ \quad V_1 = 0.6$$

Kupfer, H. Extension of truss model by Mörsch by using the principle of minimal work of deformations, Schear-Colloquium Stuttgart, Manuscript, 1962

Nielsen M. P., On the Strength of Reinforced Concrete Discs, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series No. 70, Copenhagen, Denmark, 261 p. 1971

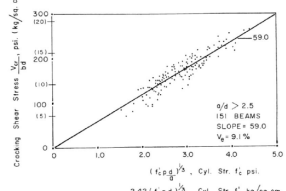
Grob, J., Thürlimann, B., Ultimate strength and design of reinforced concrete beams under bending and shear, IABSE publications, 1976

Thürlimann B., Shear Strength of Reinforced and Prestressed Concrete-CEB Approach, ACI, Special publication, Volume 59, pp. 93-116, 1979

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

9

Tampereen yliopisto Leikkausraudoittamaton kehitysvaiheita

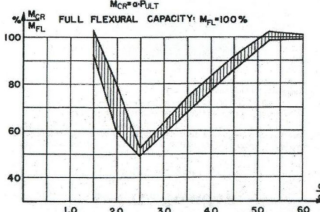


Cracking Shear Stress V_{cr} , psi, kg/cm²

$V_{cr} = k (f_c')^{1/3} (p)^{1/3} (d/a)^{1/3}$

Regression analysis of $\frac{V_{cr}}{bd} = k (f_c' p \frac{d}{a})^{1/3}$

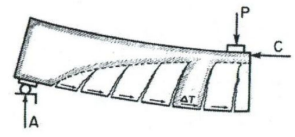
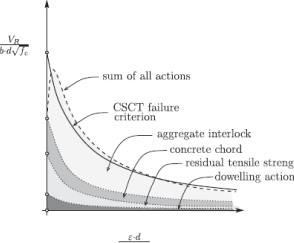
Zsutty, T. C., 1968, Beam shear strength prediction by analysis of existing data, ACI Journal, November Vol. 65, No. 11, pp. 943-951, 1968



$M_{cr} = P \cdot L \cdot T$

FULL FLEXURAL CAPACITY: $M_{FL} = 100\%$

Kani, G. N. J., The Riddle of Shear Failure and Its Solution, ACI Journal, pp. 441-465, April 1964

sum of all actions
CSCT failure criterion
aggregate interlock
concrete chord
residual tensile strength
doweling action

(e) relative displacement

Fernandez et al., Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. Engineering Structures, 2015

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

10

Leikkausraudoittamaton vs. leikkausraudoitettu

- Murtomoodeihin ja niihin liittyvillä malleilla on tietyt ominaisuudet. Leikkausmitoituksessa on kaksi selvästi toiminnaltaan erilaista rakennetta, leikkausraudoittamaton ja leikkausraudoitettu.
- Leikkausraudoittamattomalla palkilla tarkoitetaan palkkia jossa on vähimmäisleikkausraudoitus. Lisäksi matalia poikkileikkauksia, kuten ontelolaattoja voidaan tarkastella päävetojännityksen avulla

A₁) Leikkausraudoittamaton palkki tai laatta

- Halkeamat lokalisoituvat (vrt. lävistys)
- Murtotapa on hauras (vrt. lävistys)
- Laatalta on rasiusten uudelleenjakamiskykyä
- => Critical Shear Crack Theory (CSCT)

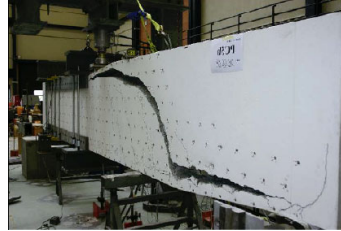
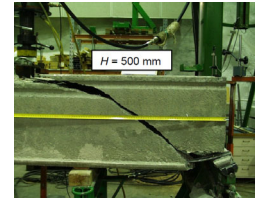


Figure: Pajari et al



A₂) Leikkausraudoittamaton (ontelolaatta)

- Päävetojännitykseen perustuva tarkastelu
- Hauras murtotapa (progressiivisempi koon kasvaessa)
- Tuotannossa leikkauskestävyyden säännöllinen seuranta koekuormituksin



B) Leikkausraudoitettu palkki (tai laatta)

- Tasan jakautunut halkeilu (smearred cracking)
- Plastisuusteoriaan perustuva malli on mahdollinen
- => Compression Field Model (CFM)

Figures: Muttoni & Fernandez

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

11

Leikkausmitoituksen tilat FprEN 1992-1-1

12

Tampereen yliopisto Leikkausmitoitus EN 1992-1-1

Leikkausmitoituksessa on kestävyys tarkistetaan seuraavien vaiheiden mukaisesti. Leikkauskestävyys esitetään voimana tai jännityksenä riippuen standardista, myös leikkausraudoitetulle tilanteelle. FprEN 1992-1-1 esittää kestävyudet jännityksinä momenttivarren korkeudelle

$$V_{Rd} = \tau_{Rd} \cdot b_w \cdot z$$

$$z = 0.9 \cdot d$$

Leikkauskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa yksityiskohtaisemmin, jos:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.c.min}$$

Vähimmäisleikkausraudoitus riittää, jos seurrava ehto täytyy:

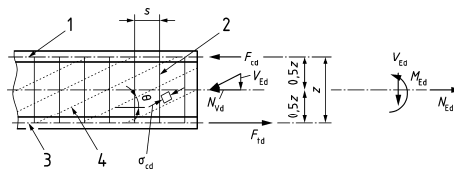
$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.c}$$

Leikkausraudoitetun rakenteen kapasiteetin tulee täyttää ehdot

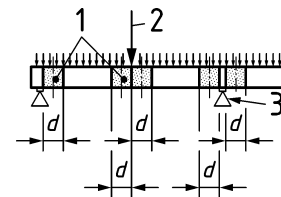
$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.sy} \leq \tau_{Rd.max}$$

Key

- 1 axis of compression chord
- 2 shear reinforcement
- 3 axis of tension chord
- 4 struts (compression field)



- 1 regions where shear strength verification may be omitted
- 2 concentrated load
- 3 support




9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

13

Tampereen yliopisto

Leikkausraudoittamaton palkki

14

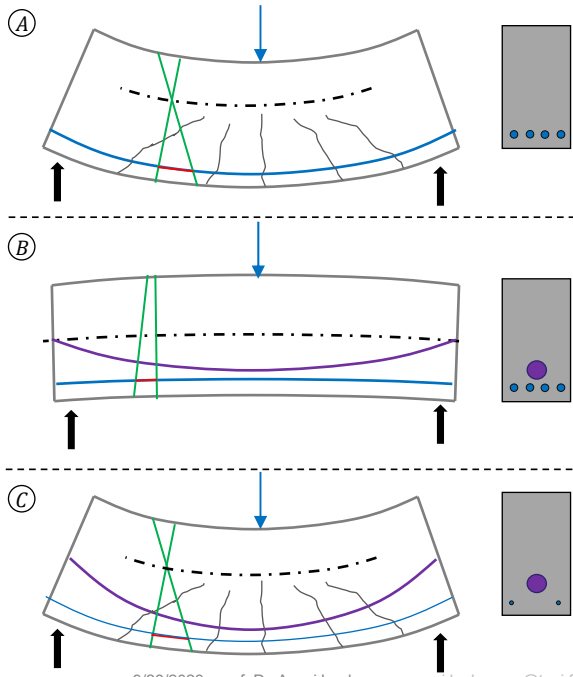
 **TB vs. JB**

- Onko leikkauskestävyys sama esijännitetyillä betonirakenteilla kuin muillakin betonirakenteilla? Tarkastellaan oheisia rakenteita:

- Rakenne A (TB) on suunniteltu siten että sillä on riittävä taivutus- ja leikkauskestävyys kuormia vastaan
- Rakenne B (TB+JB) on kuten A, mutta siihen on lisätty jänneraudoite. Tällöin taivutuskestävyyttä on ylimäärin ja myös leikkauskestävyys on korkea, koska halkeamat ovat kiinni.
- Rakenne C (JB) on tehty vain esijännitetynä siten, että taivutus- ja leikkauskestävyys kuormia vastaan on juuri riittävä. On selvää, että rakenteessa B on korkeampi leikkauskestävyys kuin rakenteessa A ja C.

Kuitenkin rakenne C on lähempänä käytännössä mitoitettavaa rakennetta, jolloin jännitetyn rakenteen etu näkyy esimerkiksi kaarevan jännekulun leikkausvoimaa keventävänä vaikutuksena, edullisempänä leikkausjänteenä

- Toki käyttörajatila yhdessä sallittujen jännitysten kanssa mitoittaa rakenteen. Tällöin jännitetyillä muodostuisi korkeampi leikkauskestävyys kuin teräsbetonirakenteella.



9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

15


 **Leikkausraudoittamattoman palkki**

Figure: Muttoni & al

- Leikkausraudoittamattoman palkin leikkauskestävyys perustuu CSCT teoriaan

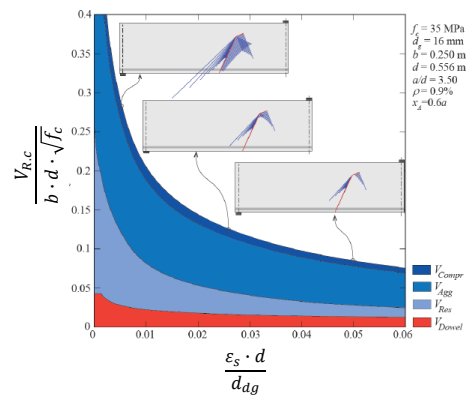
- Kestävyys riippuu muodonmuutoksista leikkautuvalla alueella

- Kuten teräsbetonirakenteessakin, leikkauskestävyys muodostuu seuraavista komponenteista:

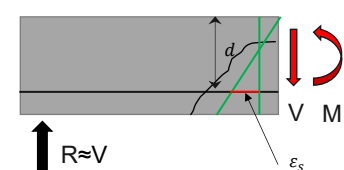
- Puristuspuunnan kautta välittyvä leikkausvoima
- Karhean halkeaman välityksellä välittyvä leikkausjäntitys (aggregate-interlock)
- Halkeaman kärjissä vaikuttava betonin residuaali vetolujuus (residual tensile strength)
- Vetorausoituksen vaarnavaikutus (dowel action)

- Oheisessa kuvassa nämä komponentit on esitetty osana koko CSCT **murtokriteeriä**

- Yksinkertaisuuden vuoksi **murtokriteeri** on rinnastettu taivutusraudoituksen venymään ε ja siitä seuranneeseen kriittisen halkeaman avautumiseen w .



$f_c = 35 \text{ MPa}$
 $d_f = 16 \text{ mm}$
 $b = 0.250 \text{ m}$
 $d = 0.556 \text{ m}$
 $a/d = 3.50$
 $\rho = 0.9\%$
 $\alpha_s = 0.60$

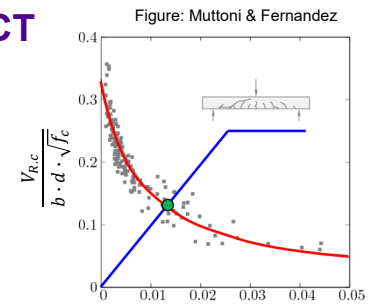


9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

16

Leikkausraudoittamaton palkki - CSCT

- Yksinkertaisuuden vuoksi **murtokriteeri** on rinnastettu taivutusraudoituksen venymään ε ja siitä seuranneeseen kriittisen halkeaman avautumiseen w .
- Rakennekorkeus d_v vaikuttaa halkeaman avautumisen suuruuteen
- Tästä saadaan että $w \propto \varepsilon \cdot d$, eli halkeama on verrannollinen kiertymän ja rakennekorkeuden tuloon, vrt. kuvaajan x-akseli
- Itse **murtokriteeri** on skaalattu ja validoitu koetulosten avulla
- Kun **murtoehto** on muodostettu, seuraavaksi tarvitaan leikkausvoiman V ja rakenteen kiertymän ψ välinen yhteys "load-rotation curve"
- Kuormasta kehittyvän **kiertymän** ja **murtoehdon** leikkauspiste on rakenteen **leikkauskestävyys**
- Näin mallissa rakenteen muodonmuutokset on kytketty rakenteen **leikkauskestävyyteen**
- Kiertymän ja leikkausvoiman riippuu etenkin rakennesysteemistä, rakenteiden hoikkuudesta ja taivutusraudoituksesta => tämä mahdollistaa menetelmän edelleen kehittämisen eri sovelluksiin



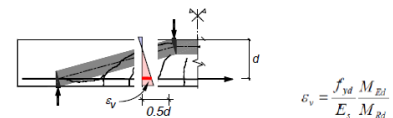
Size effect

$$V_{Rd,c} = \frac{0.3}{1 + 48 \cdot \varepsilon_v \cdot \frac{d}{d_{dg}}} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot d$$

Strain effect

Concrete type

$$d_{dg} = d_g + 16 \text{ mm}$$

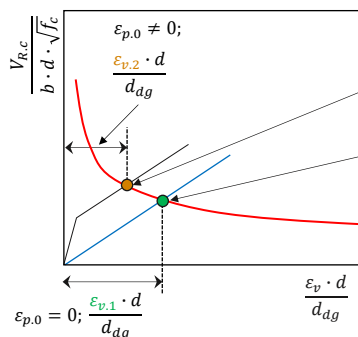


9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

17

Leikkausraudoittamattoman palkki

- Jännitetillä betonirakenteella leikkausraudoittamattoman palkin **leikkauskestävyys** kehitty samojen periaatteiden ja mallien mukaan kuin teräsbetonirakenteellakin
- Jännitettyssä rakenteessa vetopaarteen (jännittämättömän raudoitteen) venymä ε_v suhteessa kuormitukseen kehittyä järempää **kuorma-siirtymäkäyrää** pitkin kuin teräsbetonirakenteella
- Edellisen seurauksena esijännitetillä betonirakenteella on korkeampi **leikkauskestävyys**
- Jännittämisen vaikutus voitaisiin formuloida vastaavaan muotoon kuten teräsbetonirakenteellakin, mutta vaikutuksen erottelemiseksi, myös pelkästään ulkoisen normaalivoiman vaikutuksesta, on se eritelty mitoitusmalleissa omaksi tekijäkseen



$$\tau_{Rd,c} > \tau_{Rd,c}$$


$$\tau_{Rd,c} \cong \frac{0.66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{1/3}$$

$$V_{Rd,c} = \tau_{Rd,c} \cdot b_w \cdot z$$

$$V_{Rd,c} = \frac{0.3}{1 + 48 \cdot \varepsilon_v \cdot \frac{d}{d_{dg}}} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot d$$

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

18

 Tampereen yliopisto **Leikkausraudoittamattoman palkki**

FprEN 1992-1-1 $V_{Rd,c} = \tau_{Rd,c} \cdot b_w \cdot z$

8.27 $\tau_{Rd,c} = \frac{0.66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d}\right)^{1/3}$ "d"

8.29 $d \rightarrow a_v = \sqrt{\frac{a_{cs}}{4} \cdot d \cdot k_{vp}} \leq d$ "a"

8.30 $a_{cs} = \left| \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \right| \geq d$ "e_p"

8.31 $k_{vp} = 1 + \frac{N_{Ed}}{|V_{Ed}|} \cdot \frac{d}{3 \cdot a_{cs}} \geq 0.1$ "±N"

8.32 $\tau_{Rd,c} = \tau_{Rd,c,0} - k_1 \cdot \sigma_{cp} \leq \tau_{Rd,c,max}$ $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$ "-N"

8.33 $\tau_{Rd,c,0} = \frac{0.66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d}\right)^{1/3}$ "d"

8.34 $k_1 = \frac{0.5}{a_{cs,0}} \cdot \left(e_p + \frac{d}{3}\right) \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z} \leq 0.18 \cdot \frac{A_c}{b_w \cdot z}$ "e_p" "a"

8.30 $a_{cs,0} = \left| \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \right| \geq d$ $\tau_{Rd,c,max} = 2.15 \cdot \tau_{Rd,c,0} \cdot \left(\frac{a_{cs,0}}{d}\right)^{1/6} \leq 2.7 \cdot \tau_{Rd,c,0}$

Nykyinen EN 1992-1-1 $V_{Rd,c} = \tau_{Rd,c} \cdot b_w \cdot d$

$\tau_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}$ "a, e_p" ?!


$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$ $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$ $k_1 = 0.15$ "-N"

$k = 1 + \sqrt{\frac{200 [mm]}{d [mm]}} \leq 2.0$ "d"

- FprEN 1992-1-1 sisältää mekaanin malleihin perustuvan mitoitusmallin
- Vaikka tämä malli sisältävää useita tekijöitä, on se selvän pohjamallin takia
- Toisena vaihtoehtoisena mallina annetaan nykyisen kaltainen malli, jonka toimintaa on parannettu aiemmin esitettyjen kehitystarpeiden osalta

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

19

 Tampereen yliopisto

Leikkausraudoitettu palkki

20

Tampereen yliopisto Tampere University **Leikkausraudoituksen mitoitus**

- Leikkausraudoituksen mitoitus perustuu puristusjännityskenttien eli tasojännitystilojen tarkasteluun
- Tasojännitystilan yksinkertaistettu muoto on nk. ristikkoanalogia ja sen palkille sovellettu malli
- Toisaalta mallissa tarkastetaan että betonin kestävyys ja toisaalta leikkausraudoituksen kestävyys

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z_s \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

$$1 \leq \cot(\theta) \leq 2.5 \dots 3.0$$

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z_s \cdot \frac{v \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

$$\sigma_{cd} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z_s} \cdot (\cot \theta + \tan \theta) \leq v \cdot f_{cd}$$

$$A_{sw,min} = s \cdot b_w \cdot \frac{0.08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

28/09/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

21

Tampereen yliopisto v ja theta

- Tasojännitystilassa tarkasteltavan betonin puristuskestävyys riippuu pääjännitystä vastaan kohtisuorassa olevasta venymästä ϵ_1

- Huom., puristusjännityskentän kulma θ vaikuttaa venymään ϵ_1 , ja näin reduktiokertoimeen v

$$v \approx \frac{1}{1.2 + 80 \cdot \epsilon_1}$$

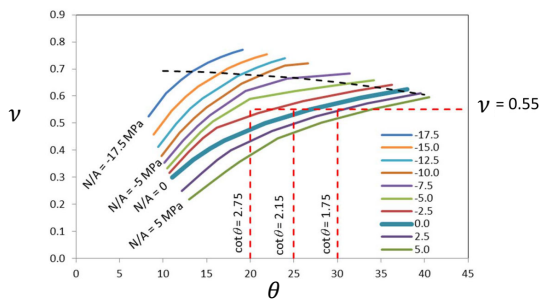
$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + (\epsilon_x + 0.001) \cdot \cot^2 \theta}{1}$$

$$v = \frac{1}{1.2 + 80 \cdot (\epsilon_x + (\epsilon_x + 0.001) \cdot \cot^2 \theta)}$$

...ssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

22

- Ohessa on esitetty venymien perusteella määritetyn reduktiokertoimen ν ja kulman θ suhde, teräsbetonirakenteella, jännitetyllä rakenteella ja vedetyllä betoni rakenteella
 - Loivan kulman $\cot \theta > 1.5$ hyödyntämisestä seuraa merkittävä lisävetovoiman ΔF_t ankkurointitarve
 - Loivan kulman valitsemisesta myös uuman halkeilu käyttörajatilassa voi muodostua määrääväksi
- => Kulma θ tulee valita varovaisesti



(4) The inclination of the compression field in the web carrying shear may be selected within the following range:

$$1 \leq \cot \theta \leq \cot \theta_{\min} \quad (8.41)$$

where the cotangent of the minimal inclination of the compression field θ_{\min} should be for shear reinforcement of ductility class B or C:

- $\cot \theta_{\min} = 2,5$ for ordinary reinforced members without axial force;
 - $\cot \theta_{\min} = 3,0$ for members subjected to significant axial compressive force (average axial compressive stress ≥ 3 MPa) and provided that the depth of the compression chord x determined from a sectional analysis according to 8.1.1 and 8.1.2 is less than $0,25d$. Interpolated values between 2,5 and 3,0 may be adopted for intermediate cases. For very high compressive forces ($x > 0,25d$), (11) can apply;
 - $\cot \theta_{\min} = 2,5 - 0,1 \cdot N_{Ed}/|V_{Ed}| \geq 1,0$ for members subjected to axial tension.
- For shear reinforcement of ductility class A, $\cot \theta_{\min}$ shall be reduced by 20 %.

9/28/2023 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

23

Kiitos kysymyksiä?

24