



Betonirakenteiden lävistysmitoitus

- Taustaa ja uusi malli lävistystarkasteluun

Eurokoodiseminaari 2022
18.10.2022 prof. TkT Anssi Laaksonen



1

Sisältö

- 1) Historiaa
- 2) Leikkaus vai lävistys?
- 3) Lävistysmitoitus
- 4) Critical Shear Crack Theory (CSCT)
- 5) Leikkausraudoitettu
- 6) Johtopäätökset

Photo: ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv
Salginatobelbrücke 1930.

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

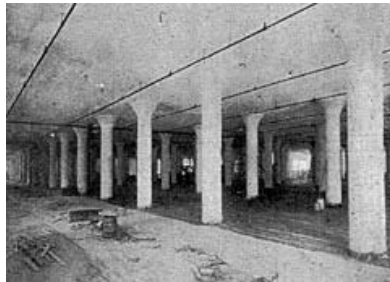
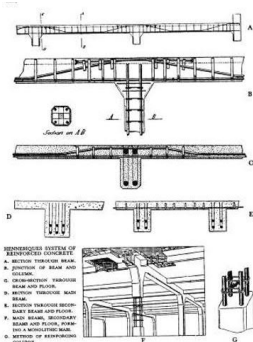
2

Historiaa

3

 **Beamless construction?**

- 1900-luvun alkupuolella käytettiin François Hennebique:n patentin mukaista rakennejärjestelmää. Tässä järjestelmässä oli kehärakenne ja välipohjat oli tehty primääri ja sekundäärikannattajista muodostuvana arinarakenteena.
- 1905 Claude Allen Porter Turner testasi nk. sienivahvistuksia pilarien yläpäässä jolloin välttää palkistorakenteet, tätä kokeiltiin 1906 Marshall rakennuksessa Milwaukee:ssa.
- 1907 Artur Ferdinandovitch Loleit käytti sienivahvisteista laattaa Bogorodsk Glukhovskoy tekstiilitehtaassa



Kuva: Kaukaan lankarullatehdas 1900, Kaukaan tehtaasta arkisto



10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

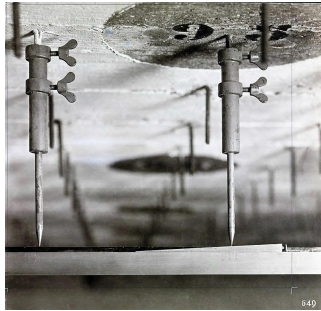
4

Tampereen yliopisto Beamless construction?

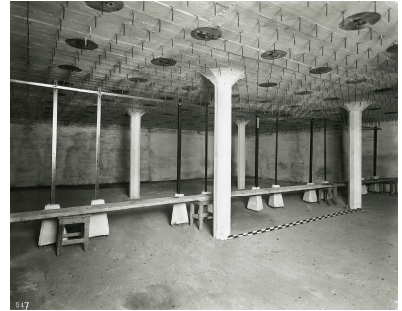
- 1905 Robert Maillart kehitti aluksi välipohjarakennetta missä ei ollut sekundääripalkkeja. Seuraava kehitysvaihe oli ilman koko palkistoa.
- 1908 Maillart alkoi testata rakennetta yrityksen Maillart & Cie varikkoalueella Zürich:ssä täyden mittakaavan kokeilla
- 1909 Maillartin patentti palkittomaan laatastoon liittyen
- Hän käytti rakennetta laajasti tämän jälkeen Euroopassa



Photo: ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv, Slab and beam tests, Joistless ceilings (mushroom ceilings), 1908



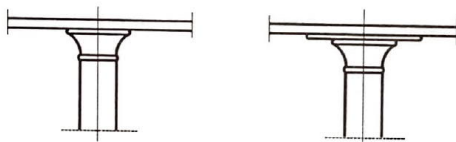
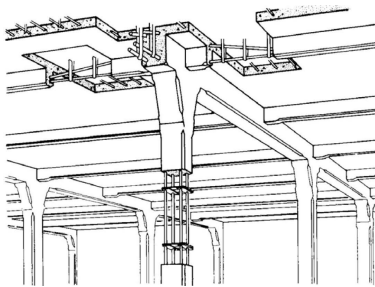
Photos: ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv, Slab and beam tests, Joistless ceilings (mushroom ceilings), 1909



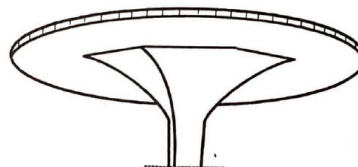
10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

5

Tampereen yliopisto Beamless construction?



a) early solutions in the USA around 1900



b) Maillart 1910

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

6

Lävistysmitoituksen kehitys 2nd gen Eurocodes

7

CEN TC 250/SC2/WG1/TG4

- Leikkaus-, lävistys- ja vääntömitoituksen asiantuntijaryhmä TG4 perustettiin betonieurokoodin kehitystä varten
- Ensimmäinen kokous oli 09/2012. Viimeinen, tähän asti, oli 04/2022.
- Tehtävänä oli aluksi:
 - Lävistyskokeiden datapankin tarkistus ja täydennys
 - Pikaisen korjaustarpeen tunnistaminen EN 1992 leikkaus-, lävistys- ja vääntömitoitusta koskevissa osissa turvallisuussyistä
 - **EN 1992 Amendment lävistysmitoitukseen**
- Pidemmällä aikavälillä tehtävinä oli lävistyksen osalta:
 - Nykyisen Eurokoodin mallin ja menetelmien analysointi ja selvitys mahdollisesta uuden mallin tarpeesta
 - Oli kolme versiota, joista yhteen päädyttiin
 - Nykyisen ja uuden mallin laajapohjainen vertailu koetuloksiin
 - Erittäin laaja datapankki
 - Aiemmat tutkimukset ja uusi tutkimustyö
 - **Menetelmän laatiminen standardimuotoon toisen sukupolven Eurokoodiin**

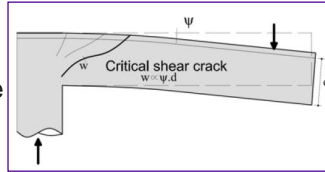
8

Lävistys – Mekaniikkaan pohjautuvia malleja

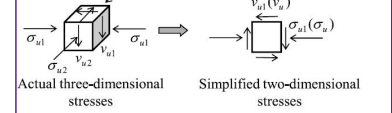
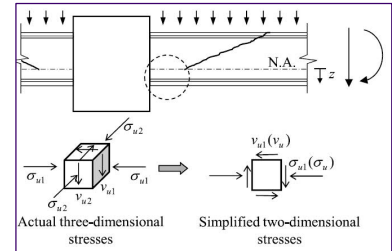
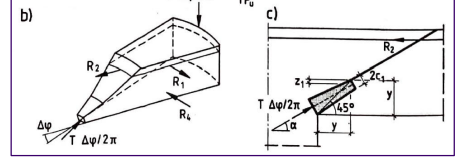
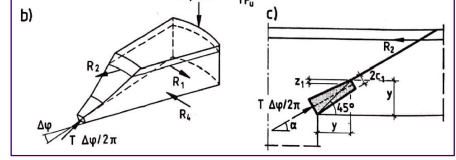
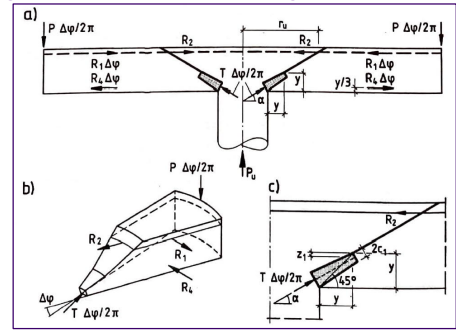
- Malleja jotka perustuvat fysikaaliseen malliin
=> sääntöjä jotka voidaan selittää, ymmärtää ja
perustella fysiikan periaatteiden mukaan

1) Kinnunen & Nylander, KTH Tukholma, 1960

2) Critical Shear Crack Theory
(CSCT), Viimeisin kehitysvaihe
2000 luvulla,
Muttoni & Fernandez



3) Park-Choi, Strain-based model, 2011



10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

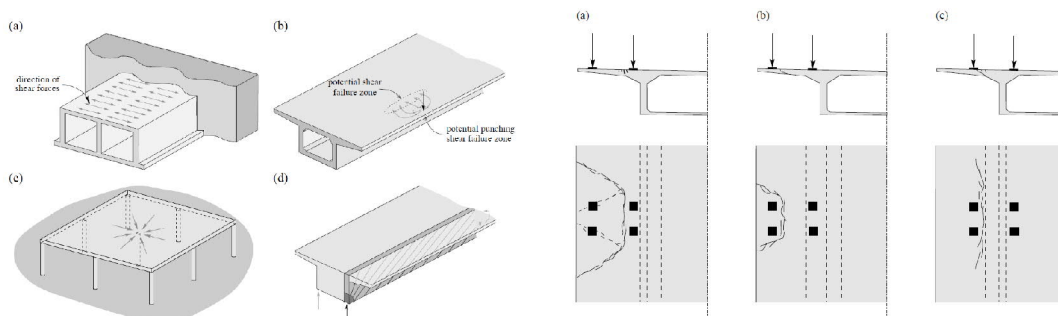
9

Leikkaus vai lävistys?

10

Rakenteet yleensä

- Rakenteita on hyvin monenlaisia, mitoitusmallien tulisi kyetä vastaamaan niistä vähintään 80%:iin
- Rakenteet eivät käytä kimmoteoreettisten halkeamattomien otaksumien mukaisesti, vaikka niin monesti suunnittelussa toimitaankin
- Keskeiset murtomoodit tulisi kussakin tilanteessa tunnistaa
- Tästä lähtökohdasta on tavoiteltavaa pyrkiä muodostamaan sellaisia malleja, joka perustuu tunnettuihin ”insinöörisuureisiin” voima, jännitys, muodonmuutos, etc.



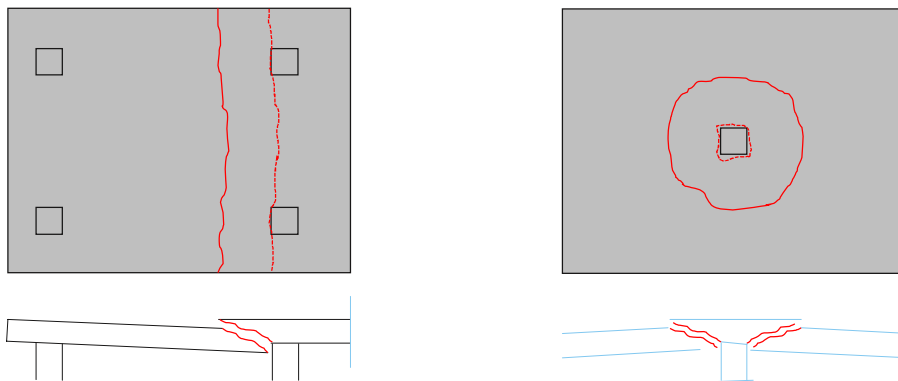
Figures: Muttoni, A. & Fernandez, R.

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

11

Leikkaus vai lävistys?

- Leikkaus ja lävistys ovat eri murtomoodeja
- Se kumpi on mitoittavampi, riippuu rakenteesta ja kuormituksesta
- Lävistystilanteeseen liittyy yleisesti ottaen voimakas useampiakselinen jännitystilanne, kun taas leikkaus on enemmän kaksiakselinen tilanne



10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

12

Leikkaus vai lävistys?

- Leikkausraudoitetun palkin, mallin otaksumana on uuman tasojännitystilän nk. smeared cracking. Tämä koskee myös leikkausraudoittamattomana mitoitettua palkkia (jossa vähimmäisleikkausraudoitus).
- Lävistystilanteessa puolestaan muodostuu voimakkaasti sekä tangentialiaisia että radiaalisia halkeamia. Tässä tilanteessa leikkausjännityskenttä kiertää lävistävää piiriä vastaan \sim kohtisuorassa suunnassa.
- Lävistystilanteessa leikkausjännitys laskee voimakkaasti siirryttäessä etäämmälle lävistyvistä rakenteesta, kun taas leikkaustilanteessa leikkausjännitys voi olla vaikkapa vakio

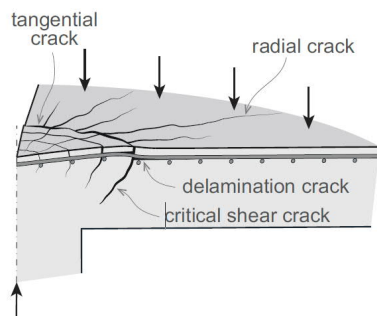
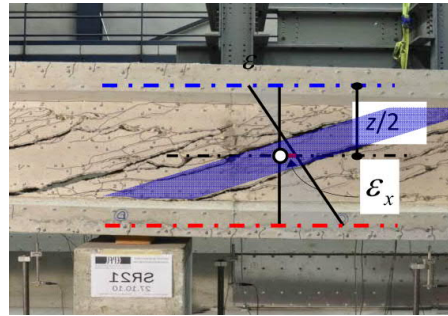


Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021

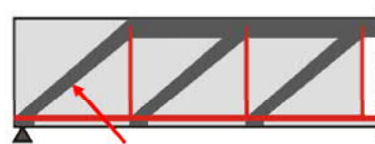
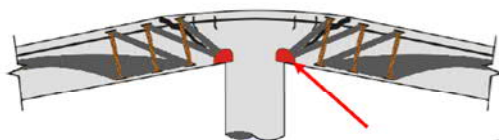


10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

13

Leikkaus vai lävistys?

- Lävistysmurron kehittyessä syntyy ensin lävistävän rakenteen ympärille voimakas puristuskehä, jonka jälkeen itse murtuminen tapahtuu radiaalisessa suunnassa. Radiaalisessa suunnassa mahdollisesti useampi puristusdiagonaali saavuttaa tuen riippuen leikkausraudoituksesta.
- Puolestaan leikkaustilanteessa maksimileikkauskapasiteetin yhteydessä tapahtuu pituusakselin mukaisessa (radiaalisessa) suunnassa

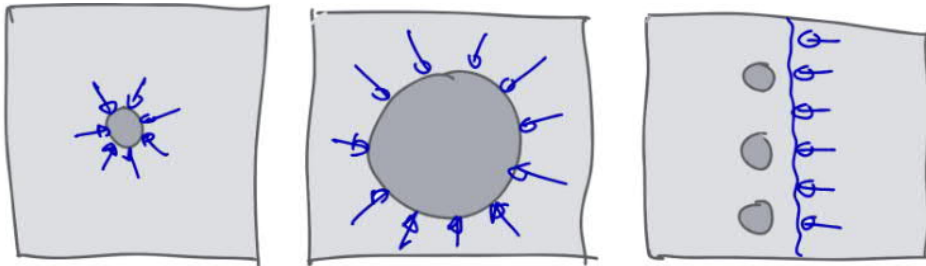


10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

14

Leikkaus vai lävistys?

- Oheisessa kuvassa on kolme tapausta missä laatalla on sama rakennekorkeus
- Nuolilla on esitetty leikkausvoimien kulkua pilarille
 - Mitä kaarevampi (suhteessa rakennekorkeuteen) lävistävä piiri on, sitä enemmän tilanne on lävistyksen kaltainen, vrt. myös edelliset kalvot
 - Suorassa murtopinnassa kyse on leikkautumisesta
 - Tilanne on näiden kahden välistä, kun lävistävä pilari on suuri suhteessa rakennekorkeuteen




10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

15

Lävistysmitoitus

16

 Tampereen yliopisto **Lävistysmitoitus**

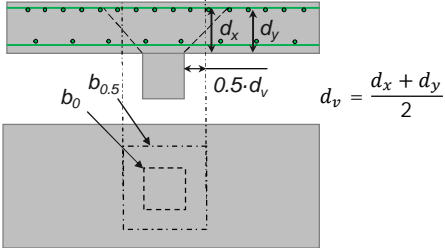
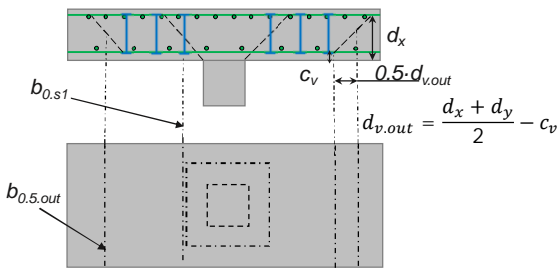
Lävistysmitoituksessa on kestävyys tarkistetaan seuraavien vaiheiden mukaisesti

- Lävistyskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa yksityiskohtaisemmin, jos piirillä $b_{0.5}$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.c.min}$$
- Leikkaus(lävistys)raudoitusta ei tarvita, jos ehto täytyy piirillä $b_{0.5}$

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.c}$$
- Leikkausraudoitetun rakenteen lävistyskapasiteetin tulee täyttää piireillä $b_{0.5}$ ehto
$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.cs}$$
- Leikkausraudoitetussa tilanteessa piirillä $b_{0.5}$ tulee seuraavan ehdon täyttyä,
$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.max}$$
- Leikkausraudoitetun alueen ulkopuolella tulee seuraavan ehdon täyttyä piirillä $b_{0.5.out}$


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

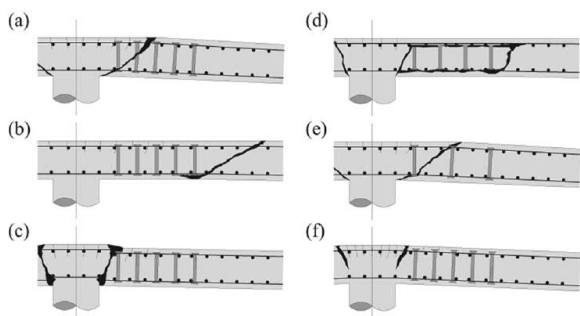


$$b_{0.5.out} \approx b_{0.5} \cdot \left(\frac{d_v}{d_{v.out}} \cdot \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd.c}} \right)^2$$

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

17

 Tampereen yliopisto **Murtomekanismeja**

- Lävistyminen leikkausraudoitetulta alueelta
=> $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.cs}$
- Lävistyminen leikkausraudoitetun alueen ulkopuolelta => tarkastelualue $b_{0.5.out}$
- Betonin puristusmurto => $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.max}$
- Betonipintojen lohkeaminen => $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd.max}$ leikkausraudoituksen ankkurointi ja
- Lävistyminen raudoitteen väliseltä alueelta
=> maksimi leikkausraudoitejako
- Taivutusmurto => M_{Rd}

Mallin tulisi kattaa nämä mekanismit erilaisilla reunaehdoilla

Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

18

Critical Shear Crack Theory (CSCT) lävistystarkasteluun

19

Critical Shear Crack Theory (CSCT)

- Lävistystarkastelun ja CSCT osalta käytetään seuraavia lähtökohtia ja otaksumia
- Lävistyvälle alueelle muodostuu lokalisoitunut halkeama, jonka avautuminen vaikuttaa
 - puristusdiagonaalin kestävyYTEEN
 - karhean halkeaman välityksellä siirtyviin jännityksiin (aggregate interlock)
- Mitä suuremmaksi halkeama avautuu, niin sitä suuremmiksi käyvät sen vaikutukset, huomaa ψ ja δ
- Muodonmuutokset ovat suhteessa etenkin laatan taivutukseen ja siitä muodostuvaan kiertymään ψ
- Syntyvien muodonmuutosten avulla voidaan määrittää materiaalimallien mukaisia jännityksiä josta päästään edelleen lävistävän kuormituksen voimaresultantteihin

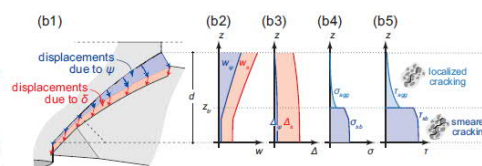
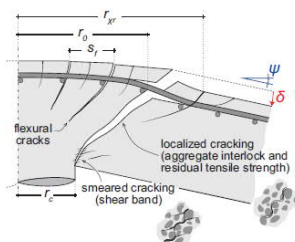
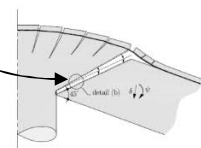
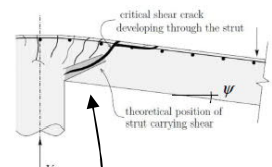
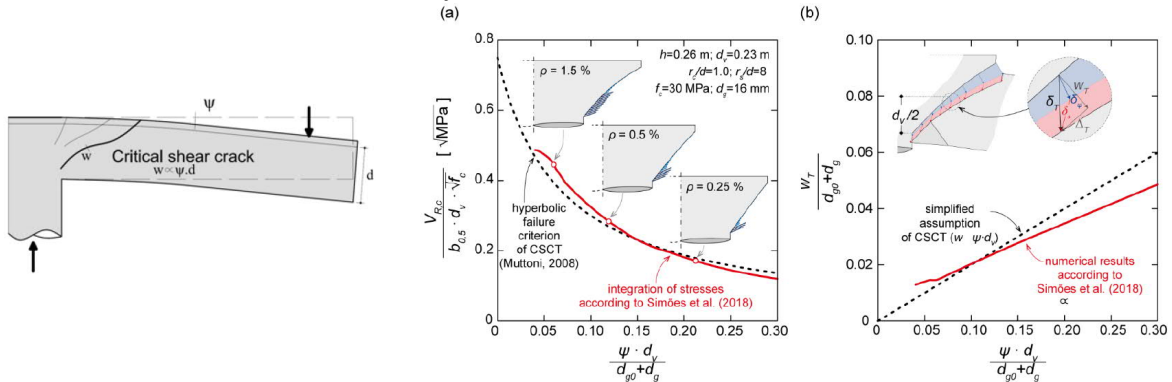


Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021 10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

20

Failure criterion – $\tau_{Rd,c}$

- Kuten edellä, kestävyys riippuu syntyvistä muodonmuutoksista lävistävän alueen yläpuolella
- Yksinkertaisuuden vuoksi tämä murtokriteeri on rinnastettu kiertymään ψ ja siitä seuranneeseen kriittisen halkeaman avautumiseen w .
- Rakennekorkeus d_v vaikuttaa halkeaman avautumisen suuruuteen
- Tästä saadaan että $w \propto \psi \cdot d_v$, eli halkeama on verrannollinen kiertymän ja rakennekorkeuden tuloon, vrt. kuvaajan x-akseli



Figures: Background document for prEN 1992-1-1:2021

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

21

Failure criterion – $\tau_{Rd,c}$

- Alkuperäinen murtoehto on hyperbelinen, mutta sen johtaminen suljettuun muotoon rakenteen kapasiteetin määrittämiseksi ilman iterointia ei ole käytännössä mahdollista
- Tämä seurauksen on murtokriteeri päivitetty toiseen yhtälöön jotta lopulta lävistyskapasiteetin suljettu muoto on ollut mahdollista kehittää

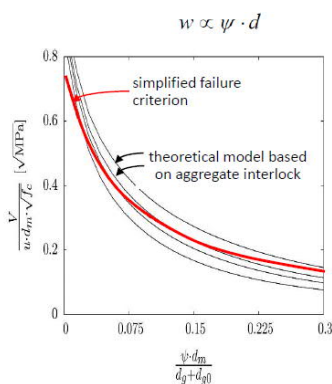


Figure: Muttoni & Fernandez

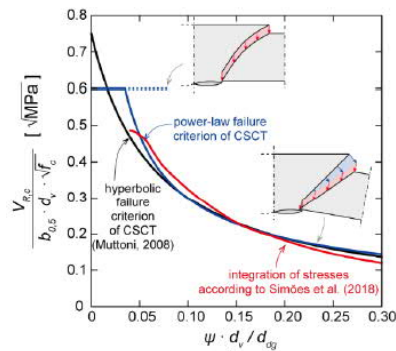


Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

22

Tampereen yliopisto Load-rotation curve

- Kun murtoehto on muodostettu, seuraavana tarvitaan rakenteen lävistyvän kuormituksen V ja kiertymän ψ välinen yhteys "load-rotation curve"
- Kuormasta kehittyvän kiertymän ja murtoehdon leikkauspiste on rakenteen lävistyskapasiteetti
- Näin tarkastelussa rakenteen taivutuksen muodonmuutokset kytketään rakenteen lävistyskestävyyteen
- Kiertymän ja lävistyvän kuorman suhde riippuu etenkin rakennesysteemistä, rakenteiden hoikkeudesta ja taivutusraudoituksesta => tämä mahdollistaa menetelmän edelleen kehittämisen eri sovelluksiin

Figure: Muttoni & Fernandez

Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021
10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

23

Tampereen yliopisto Lävistyskapasiteetti – $\tau_{Rd,c}$

- Jotta ratkaisu on voitu saada suunnittelustandardiin soveltuvaan muotoon, niin mallia on kehitetty useissa eri vaiheissa sekä murtoehdon että kuormituksen ja kiertymän välisen yhteyden osalta
- Kapasiteetti ilmaistaan lopulta lujuutena $\tau_{Rd,c}$ mikä kohdistetaan lävistyvälle piirille $b_{0.5}$ ja teholliselle korkeudelle d_v . Piirin pituusyksikköä kohden kapasiteetti olisi $V_{Rd,c} = \tau_{Rd,c} \cdot d_v$
- Lujuutena ilmaistu lopputulos antaa paremmin käsityksen suuruusluokasta, esim. 0.5...1.5 MPa

$V_{R,c} = k_{\psi} \cdot b_{0.5} \cdot d_v \cdot \sqrt{f_{ck}}$

$k_{\psi} = \frac{1}{1.5 + 0.9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d_v} \leq 0.6$

$\psi = 1.2 \cdot \frac{\sqrt{7.5 \cdot d \cdot r_s}}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R}\right)^{\frac{2}{3}}$

$V_{R,c,0} = 0.6 \cdot b_{0.5} \cdot d_v \cdot \sqrt{f_{ck}}$

$V_{R,c} = V_{R,c,0} \cdot \left(\frac{0.038 \cdot 0.032 \cdot \eta_{dg}}{\psi \cdot d_v}\right)^{\frac{2}{3}}$

$m_s = \frac{V_{R,c}}{C_4}$

$\tau_{Rd,c} = \frac{0.6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}\right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0.5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}}$

Background document for prEN 1992-1-1:2021
10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

24

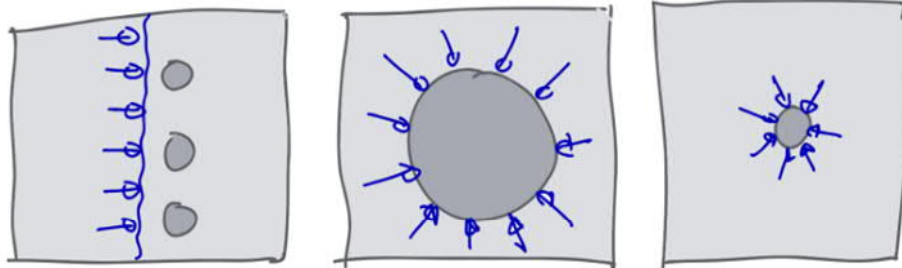
Shear gradient enhancement

- Lävistyvän piirin kaarevuus suhteessa rakennekorkeuteen (eli siirtymä lävistymisen ja yhdensuuntaisen leikkautumisen murtomoodin välillä) otetaan huomioon muuttujalla k_{pb} :

$$\tau_{Rd.c} = \frac{0.6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{\sqrt{\frac{a_p}{8} \cdot d_v}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0.5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

- Vaikutus piirin pituusyksikköä olevaan kapasiteettiin on hyvin merkittävä, 1...2.5

$$1 \leq k_{pb} = 3.6 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0.5}}} \leq 2.5$$



10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

25

Hoikkuus

- Jos rakenteen (leikkaus)hoikkuus laskee, kiertymä ψ laskee suhteessa lävistyvään kuormaan, mikä parantaa rakenteen lävistyskestävyyttä

$$\psi = 1.2 \cdot \left(\frac{d_{dg} \cdot r_s \cdot f_y}{d^2 \cdot E_s} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{V_{R.c.0}}{V_{Flex}} \right)^{3/4}$$

- Tämä on otettu mallissa huomioon siten, että jos momentin nollakohdan välinen etäisyys a_p on alle $8 \cdot d_v$, niin kestävyuden kaavassa d_v voidaan korvata seuraavalla tavalla

$$\tau_{Rd.c} = \frac{0.6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0.5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

$$\tau_{Rd.c} = \frac{0.6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{\sqrt{\frac{a_p}{8} \cdot d_v}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0.5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

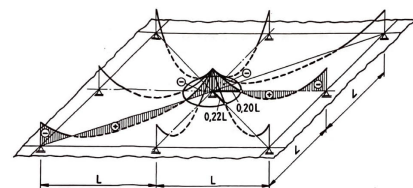
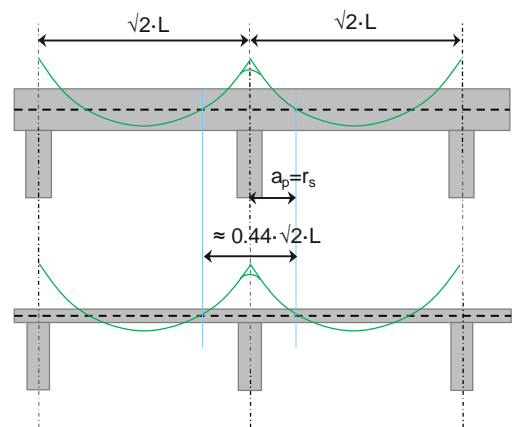


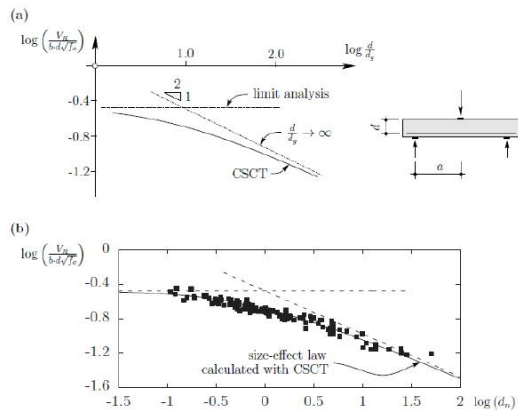
Figure: fib Bulletin 12

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

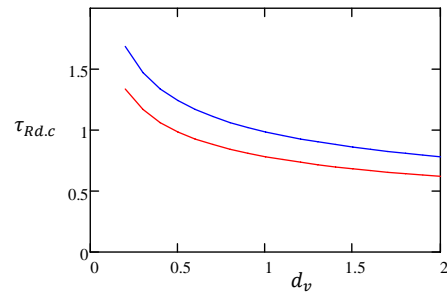
26

Kokovaikutus

- Hoikkuuden ja kokovaikutuksen huomioon ottaminen verrattuna nykyiseen Eurokoodiin oli keskeisimmistä päivitystarpeista lävistysmitoituksen osalta
- CSCT mallin hyperbelisessä murtoehdossa kokovaikutus on suoraan sisällytettyinä
- Murtoehdon muutoksen jälkeen vaikutus on yhdistetty hoikkuuden vaikutuksen kanssa samaan tekijään



$$\tau_{Rd.c} = \frac{0.6}{\gamma_v} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_t \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{\sqrt{\frac{a_p}{8} \cdot d_v}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0.5}{\gamma_v} \cdot \sqrt{f_{ck}}$$



10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

27

Leikkausraudoitettu tilanne

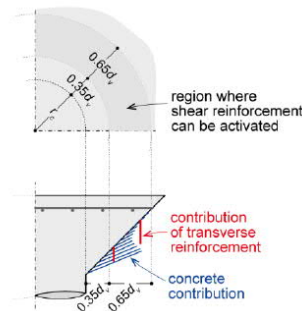
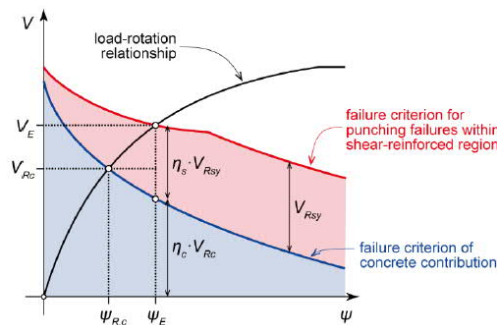
28

Leikkausraudoitetun kestävyys – $\tau_{Rd.cs}$

- Leikkausraudoituksen aktivoituminen riippuu myös muodonmuutoksista
- Mallissa betonin ja leikkausraudoituksen osuus lasketaan osittain yhteen
- Ensimmäisten leikkausraudoitteiden piiriin sijoittelu on tärkeää, lisäksi leikkajännitys laskee siirryttäessä etäämmälle pilarista => leikkausraudoituksen sijoitteluohjeet
- Hakaraudoitteen koosta riippuu kuinka paljon sen jännityksestä kehittyi suhteessa mittaan d_v

$$\tau_{Rd.cs} = \eta_c \cdot \tau_{Rd.c} + \eta_s \cdot \rho_w \cdot f_{ywd} \geq \rho_w \cdot f_{ywd}$$

$$\eta_s = \frac{d_v}{150 \cdot \phi_w} + \left(15 \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\eta_c \cdot k_{pb}}\right)^{3/2} \leq 0.8$$



$$\eta_c = \frac{\tau_{Rd.c}}{\tau_{Ed}}$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw.i}}{s_r \cdot s_t}$$

Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

29

Leikkausraudoitetun kestävyys – $\tau_{Rd.max}$

- Rakenteen maksimilävistyskapasiteetti lasketaan monikertana betonin lävistyskapasiteetista
- Leikkausraudoitteet ankkuroituvat eri tavoin, ja näin muodostavat myös jännityksiä eri suhteissa
- Mallissa tyssätyille vaarnoille on annettu korkeammat arvot maksimikapasiteetin laskentaan kuin tavanomaiselle hakaraudoitteelle, etenkin niiden heti päässä tapahtuvan paremman tartunnan johdosta
- Tulee huomata, että tässä η_{sys} ei ole sama asia kuin aiemmin käytetty k_{sys}

$$\tau_{Rd.max} = \eta_{sys} \cdot \tau_{Rd.c}$$



$$\eta_{sys} = 0.70 + 0.63 \cdot \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{1/4} \geq 1.0 \quad \text{Tyssätyille vaarnoille, jos } b_0 = 4 \cdot d_v, \text{ niin } \eta_{sys} = 1,58$$



$$\eta_{sys} = 0.50 + 0.63 \cdot \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{1/4} \geq 1.0 \quad \text{Hakaraudoille, jos } b_0 = 4 \cdot d_v, \text{ niin } \eta_{sys} = 1,38$$

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

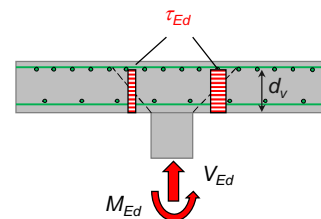
30

Kuormitus

31

Kuormitus – τ_{Ed}

- Kuormitus V_{Ed} jaetaan lävistyvälle piirille jännitykseksi τ_{Ed} (tai rasitukseksi $v_{Ed} = \tau_{Ed} \cdot d_v$)
- Kuormitus ei jakaudu tasan lävistyvälle piirille, tämä otetaan huomioon kertoimella β_e
- Lävistyvän piirin jännitys voidaan lukea myös rakennemallista, esim. FE-mallista



$$\tau_{Ed} = \beta_e \cdot \frac{V_{Ed}}{b_{0.5} \cdot d_v} = \frac{v_{Ed,max}}{d_v}$$

$$\beta_e = 1 + 1.1 \cdot \frac{e_b}{b_b} \geq 1.05$$

$$e_b = \frac{V_d}{M_d} = \sqrt{e_{b,x}^2 + e_{b,y}^2}$$

$$b_b = \sqrt{b_{b,min} + b_{b,max}}$$

$\beta_e \geq 1.05$

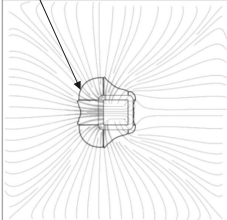


Table 8.3 — Coefficients β_e accounting for concentrations of the shear forces

Support	Approximated	Refined ^a	
internal columns	$\beta_e = 1.15$	$\beta_e = 1 + 1.1 \frac{e_b}{b_b}$ ≥ 1.05	
edge columns	$\beta_e = 1.4$		where $e_b = \sqrt{e_{b,x}^2 + e_{b,y}^2}$
corner columns	$\beta_e = 1.5$		where $e_b = 0.5(e_{b,x} + e_{b,y})$
ends of walls		$\beta_e = 1.4$	
corners of walls		$\beta_e = 1.2$	

Table: FprEN 1992-1-1:2022

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

32

Tampereen yliopisto

Johtopäätökset

33

Tampereen yliopisto

Johtopäätökset

- Lävistystarkasteluun on voitu kehittää uusi varsin havainnollinen malli
- Malli perustuu ”insinöörisuureisiin”
- Mallin kalibrointia ei tässä esitetty, mutta sen pohjalta malli oli selvästi toimivin
- Mekaniikkaan perustuva malli jossa taivutuksen perusteella arvioidut muodonmuutokset on kytketty lävistyskestävyyteen voi itsessään johtaa iteratiiviseen mitoitusprosessiin
- Mallin osalta tarvitaan kansalliset valinnat ja soveltamisohjeet eri tilanteisiin, jotta itse suunnittelutyö ei muodostu liian monisyiseksi ja viriheherkäksi
- Viriheherkkyttä laskee mahdollisuus saada käsitys tuloksen suuruusluokasta 0.5...1.5 MPa?

10/18/2022 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

34

Kiitos, kysymyksiä?