



Teräsbetonirakenteen halkeamaleveyden määrittäminen ja vähimmäisraudoitusvaatimukset

Eurokoodiseminaari 2024

10.10.2024 prof. TkT Anssi Laaksonen

1



Sisältö

- 1) EN 1992-1-1:2023, yleinen rakenne
- 2) Halkeamat yleisesti
- 3) EN 1992-1-1:2023, SLS ja vähimmäisraudoitus yleisesti
- 4) Vetopaartteen yleinen tarkastelu
- 5) Vähimmäisraudoitus myötäämisen välttämiseksi
- 6) Estetyistä muodonmuutoksista
- 7) EN 1992-1-1:2023, sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet
- 8) EN 1992-1-1:2023, menetelmät kokonaisuutena

2

EN 1992-1-1:2023 yleinen rakenne

3

prEN 1992-1-1 rakenne - Pääteksti

	Titel	Pages
0-3	Foreword, Scope; Normative references; Terms, definitions and symbols	61
4	Basis of design	5
5	Materials	12
6	Durability and concrete cover	11
7	Structural analysis	19
8	Ultimate Limit States (ULS)	52
9	Serviceability Limit States (SLS)	17
10	Fatigue	4
11	Detailing of reinforcement and post-tensioning tendons	24
12	Detailing of members and particular rules	22
13	Additional rules for precast concrete elements and structures	12
14	Plain and lightly reinforced concrete structures	6

Perusteksti 245 pp

- Perustekstin sisältö ja aihealueet ovat laajentuneet
- Rakenteiden mitoituksen osalta on hyvin paljon uusia malleja otettu käyttöön
- Luku 3, Aiempaan verrattuna termit, määritelmät, symbolit ja lyhenteet ovat yksiselitteisempiä
- Luku 6, Käyttöikä, kokonaan uusi käyttöiän arviointimenetelmä ja nykyinen on esitetty Annex P:ssä
- Luku 8, Murtorajatila, on laajin kokonaisuus perustekstistä sisältäen paljon uutta asiaa, **uusittu kenties noin 80%:sesti**
- Luvut 11-14, myös detaljit ja yksittäiset suunnittelusäännöt ovat muuttuneet paljon

4

prEN 1992-1-1 rakenne - Liitteet

	Titel	Pages
A	Adjustment of partial factors for materials	8
B	Time dependent behaviour of materials: Creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel	11
C	Requirements to materials (interface to product standards)	9
D	Evaluation of early-age and long-term cracking due to restraint	5
E	Additional rules for fatigue verification	5
F	Safety formats for non-linear analysis	5
G	Design of membrane, shell and slab elements	6
H	Guidance on design of concrete structures for water tightness	4
I	Assessment of Existing Structures	19
J	Strengthening of existing concrete structures with FRP	20
K	Bridges	16
L	Steel Fibre Reinforced Concrete Structures (SFRC)	14
M	Lightweight aggregate concrete structures (LWAC)	3
N	Recycled aggregate concrete structures	3
O	Simplified approaches for second order effects	8
P	Alternative cover approach for durability	3
Q	Stainless reinforcing steel	3
R	Embedded FRP Reinforcement	12
S	Minimum reinforcement for crack control and simplified control of cracking	4

- Liitteistä, 158 sivua, osa on **normatiivisia** ja loput informatiivisia
- Monet kokonaisuudet ovat **uusia** tai niitä on päivitetty merkittävästi, 122 sivua => **80% uutta asiaa**
- Nykyiseen eurokoodiin verrattuna **uusia materiaaleja**:
 - Annex J/R Vahventaminen kuituvahvistetut polymeerit
 - Annex L Teräskuitubetonirakenne
 - Annex M Kevytsementti
 - Annex N Kierrätetty runkoaine betonirakenteessa
 - Annex Q Ruostumaton raudote
- Liitteissä on esitetty **uusia tai uudistettuja osa-alueita**:
 - Annex A Materiaalien osavarmuuslukujen kalibrointi
 - Annex C Vaatimukset materiaaleille
 - Annex F Epälineaarisen analyysin varmuustasot
 - Annex G Kalvo-, laatta- ja tasoelementit
 - Annex I Kantavuuden arviointi
 - Annex K Sillat
 - Annex S Vähimmäisraudoitus halkeilulle ja yksinkertaistettu halkeaminen arviointi

Total: 158 pp

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

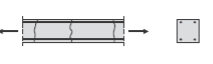
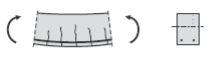
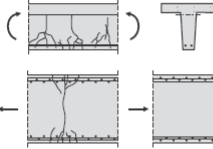
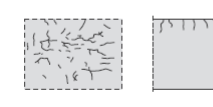
5

Halkeamat yleisesti

6

Yleistä

- Betonimateriaali kestää paljon paremmin puristusta kuin vetoa. Rakenteeseen sijoitetaan raudoite vastaanottamaan muodostuvia vetorasituksia (ja puristusrasituksia)
- Vetojännityksiä syntyy rakenteeseen kohdistuvista ulkoisista kuormista ja sisäisistä rasituksista nk. Pakkovoimista
- Teräsbetonirakenteessa betonin vetolujuutta ei lueta poikkileikkaustasapainossa sinänsä hyödyksi
- Mutta betonin vetolujuus on monissa kohdin merkittävä, jo rakenteen koossapysymisenkin takia, ja se on keskeisenä reunaehtona useissa vähimmäisraudoituksiin ja halkeamaleveyksiin liittyvissä kysymyksissä
- Halkeamien muodostuminen on varsin moninaista, ulkoiset kuormat, sisäiset rasitustilat, materiaalin toiminta valutyön työn jälkeen etc.
- Rakenteen käyttöiän on todettu olevan parempi kun halkeamaleveyttä pienennetään, vaikka halkeamaleveyden ja käyttöiän varsinainen yhteys tunnetaan varsin heikosti

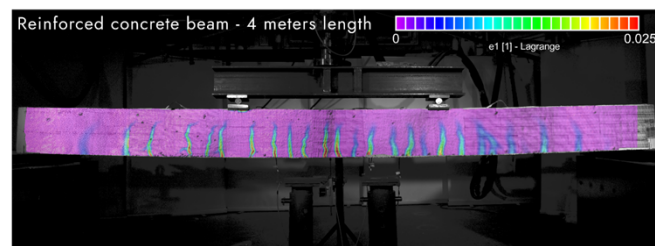
①		Trennrisse
②		Biegerisse
③		Sammelrisse (Biege- oder Trennrisse)
④		Spaltrisse
⑤		Oberflächenrisse
⑥		Längsrisse, Verbundrisse

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

7

Halkeamien muodostuminen ulkoisista kuormista

- Rakenteeseen kohdistuvista ulkoisista kuormista muodostunut halkeilu sinänsä on luonnollinen ilmiö
- Vedettyyn pintaan muodostuu halkeamia vetolujuuden ylittyessä
- Halkeamaväli ei useinkaan ole vakio. Monesti esim. hakojen sijainti ohjaa halkeamia niiden kohdille
- Uudet mittausmenetelmät ovat antaneet uusia mahdollisuuksia halkeamien muodostumisen selvittämiseen tutkimuksissa

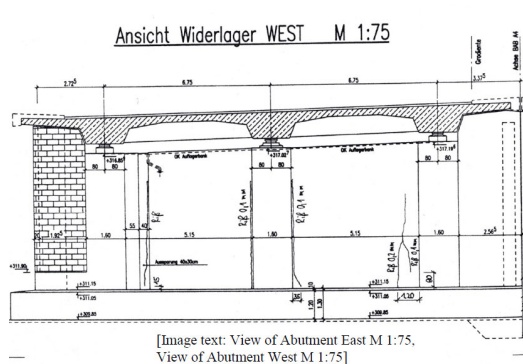
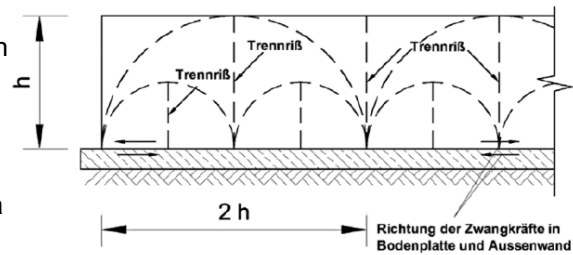


10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

8

Halkeamien muodostuminen sisäisistä kuormista

- Rakenteen sisäiset rasitukset, kuten kutistuma, lämpötilaero tai tukipainumaero, aiheuttavat betoniin jännityksiä jotka voivat betonin halkeilun kautta vapautua
- Rakenteeseen voi muodostua voimakastakin halkeilua ja sen seurauksena esim. vesivuotoja => ilmiö on erityisen haitallinen vesitiiviissä rakenteissa



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

9

EN 1992-1-1:2023
SLS ja vähimmäisraudoitus yleisesti

10

Vähimmäisraudoitukset

- Vähimmäisraudoituksia yleensä ottaen on eri käyttötarkoitusta varten, eikä pelkästään käyttörajatilassa
 - a) Rakenteen vaurionsietokyvyn edellyttämät raudoitteet
 - b) Raudoitteen myöntämisen estäminen käyttörajatilassa
 - c) Riittävän pienien halkeamaleveyksien edellyttämät vähimmäisraudoitteet
 - d) Mitoitusmallien ja -menetelmien vaatimat vähimmäisraudoitteet
 - e) Eksplisiittisesti suunnittele mattomien rasitusten vastaanottaminen
 - f) Raudoituksen toteuttamisen edellyttämät vähimmäisraudoitteet
 - g) Riittävän esteettisen lopputuloksen aikaansaamiseen liittyvät raudoitteet
 - h) Hyväksi kokemuksen perusteella todetut vähimmäismäärät (osa edellisistäkin)
 - i) etc.
- Voi olla että juuri tarkemmalla vähimmäisraudoitusten tarkastelulla olisi mahdollisuus tarkastella yksityiskohtaisemmin raudoitusmäärää ja raudoituksen tarvetta
- Vähimmäisraudoitus on hyvin laajalti eri osissa rakenteita, kun monasti mitoittavat raudoitusmäärän tarpeet eivät kata koko rakennetta

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

11

Käyttöikään ja käyttörajatilaan liittyviä kohtia

- Materiaalien pitkäaikaiskestävyyttä ja betonipeitettä käsitellään luvussa 6, Durability and concrete cover
- Käyttörajatilaa ja halkeilua käsitellään luvussa 9, Serviceability Limit States (SLS)
- Materiaalien elastisia ja ajasta riippuvia ominaisuuksia käsitellään liitteessä B, Time dependent behaviour of materials: strength, creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel
- Estettyjen muodonmuutosten aiheutta laajennetaan normatiivisessa liitteessä D, Evaluation of early-age and long-term cracking due to restraint
- Vesitiiviiden rakenteiden aihepiiriä käsitellään informatiivisessa liitteessä H, Guidance on design of concrete structures for water-tightness
- Vähimmäisraudoituksia halkeamamitoituksen kannalta ja yksinkertaistettuja halkeamaleveyden varmentamismenetelmiä on esitetty informatiivisessa liitteessä S, Minimum reinforcement for crack control and simplified control of cracking

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

12

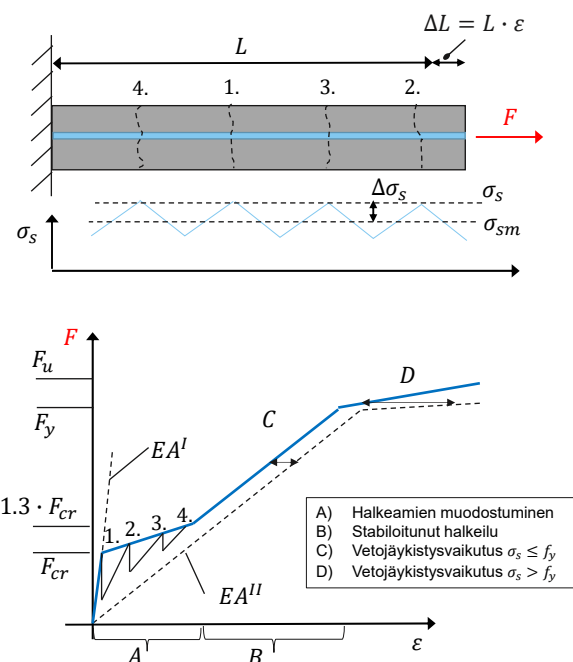
Vetopaarten yleinen tarkastelu

13

Vetopaarre

- Tarkasteltaessa vedettyä teräsbetonista sauvaa, niin jossain kohdassa sauvaan muodostuu johonkin kohtaan halkeama betonin vetolujuuden ylittyessä
- Edelleen kuormitusta kasvatettaessa toiseen sijaintiin syntyy halkeama ja niin edelleen seuraavia halkeamia
- Edelliset vaiheet ovat halkeamien muodostumisen nk. ei stabiloituneessa vaiheessa, vaihe A
- Lopulta rasitusten kasvaessa lisää halkeamia ei enää synny, ja siirrytään stabiloituneeseen vaiheeseen B
- Sauvan aksiaalijäykkyys on pelkkää raudoitetankoa korkeampi, koska raudoitteen tartunta siirtää rasituksia betonin vetojännityksiksi, eli muodostuu nk. vetojäykistysvaikutus
- Prosessin tuloksena muodostuu halkeillut teräsbetoninen sauva $\cong 1.3 \cdot F_{cr}$
- Halkeamaleveys muodostuu karkeasti betonin ja raudoitteen keskimääräisen venymäeron ja halkeamavälin tulona, käsinlaskentana voi vaikka otaksua että vain raudoite venyy

$$w_{k,cal} = k_w \cdot k_{1/r} \cdot s_{r,m,cal} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

14

Vetopaarre

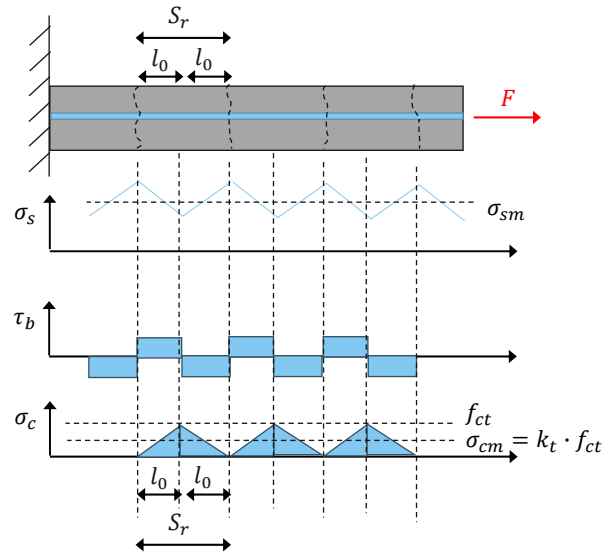
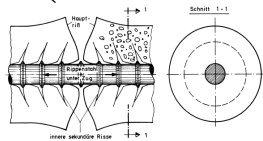
- Vedetyssä sauvassa raudoitteen tartunta kykenee välittämään betonisauvan vetolujuutta vastaavan voiman matkalla l_0
- Halkeamaväliksi S_r muodostuu näin ollen $2 \cdot l_0$

$$\tau_b \cdot u_s \cdot l_0 = A_c \cdot f_{ct}$$

$$l_0 = A_c \cdot \frac{f_{ct}}{\tau_b \cdot u_s}$$

$$S_r = 2 \cdot l_0 = 2 \cdot A_c \cdot \frac{f_{ct}}{\tau_b \cdot u_s} \cong \frac{A_c \cdot 2 \cdot f_{ct}}{2 \cdot f_{ct} \cdot \phi_s \cdot \pi} = \frac{\phi_s}{\rho_{eff} \cdot 4}$$

$$s_{r,m,cal} = 1,5 \cdot c + k_{\phi} \cdot k_b \cdot \frac{\phi}{7,2 \cdot \rho_{p,eff}} \leq \frac{1,3}{k_w} (h - x)$$



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

15

Vetopaarre

- Keskimääräiseksi betonin venymäksi saadaan oheisen kuvan avulla

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_{cm}}{E_c} = \frac{k_t \cdot f_{ct}}{E_c}$$

- Joka raudoitteen keskimääräisenä venymän muutoksena vastaisi (vetojäykkyysien suhteessa korjattuna):

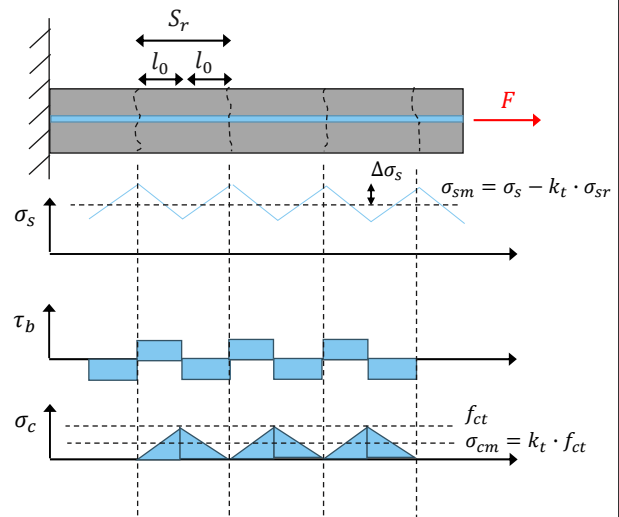
$$\Delta \varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{cm} \cdot A_{ct}}{E_s \cdot A_s} = \frac{k_t}{E_s} \cdot f_{ct} \cdot \frac{A_{ct}}{A_s} = \frac{k_t}{E_s} \cdot \sigma_{sr}$$

- Keskimääräiseksi venymäeroksi saadaan:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \sigma_{sr}}{E_s}$$

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq (1 - k_t) \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\sigma_s \geq \sigma_{sr}$$

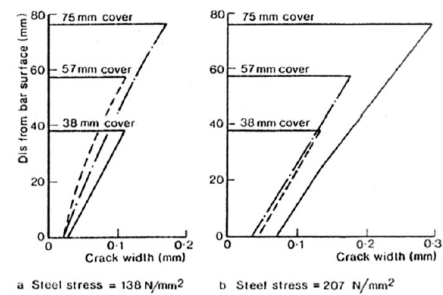


10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

16

Muita tekijöitä

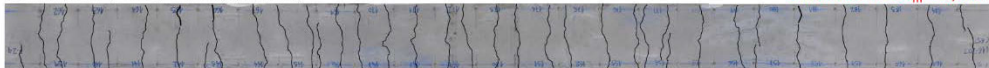
- Edellisten lisäksi halkeilun muodostumiseen vaikuttaa monia tekijöitä
- Tilastollisesti on määritetty halkeamaleveydelle kerroin k_w 1.7 jolla saadaan käyttörajatilaa varten edustava halkeamaleveyden arvo suhteessa keskimääräiseen arvoon
- Betonipeitteen paksuus vaikuttaa halkeamaleveyteen Act välityksellä, mutta betonipeitteen kasvatus on muutoinkin merkittävä tekijä
- Myös nk. huonot vs. hyvät tartuntaolosuhteet vaikuttavat halkeamien muodostumiseen



Top face ('Poor' Casting position)

23 cracks -> $s_m = 20$ cm

Bottom face ('Good' Casting position)

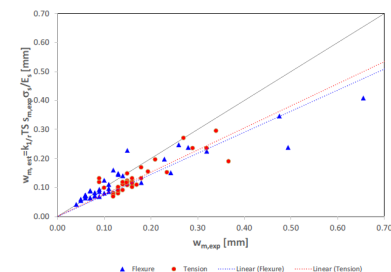
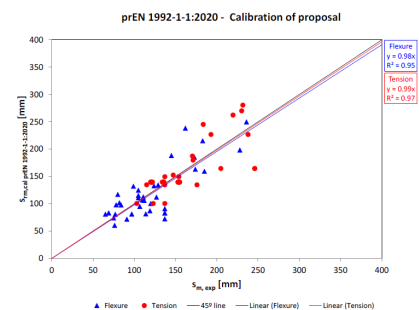
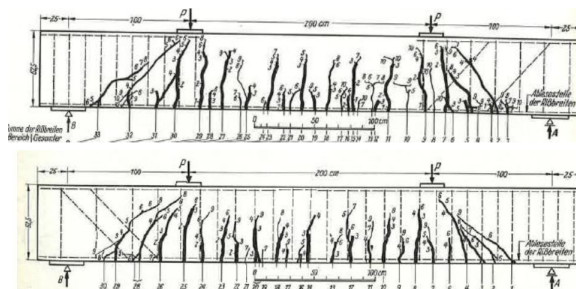
35 cracks -> $s_m = 14.1$ cm

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

17

Mallien validoinnista

- Eurokoodin valmistelussa halkeamaväliin ja -leveyksiin liittyviä malleja on validoitu reilun sadan koekappaleen rajatulla tietokannalla
- Betonin vetolujuus ominaisuutena sisältää paljon hajontaa, samoin rakenteen valmistamiseen liittyvät yksityiskohdat
- Mallit sopivat varsin hyvin halkeamavälien ja -leveyksien osalta



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

18

Vähimmäisraudoitus myötäämisen välttämiseksi

19

Vähimmäisraudoitus myötäämisen estämiseksi

- Yksi olennaisimmista vaatimuksista halkeamien muodostumisessa on, että raudoitteen tulee säilyä myötäämättä uusien halkeamien muodostumisen aikana
- Jos raudoite myötäisi aiemmin, niin muodonmuutokset keskittyisivät ensin muodostuneen halkeaman kohdalle ja halkeama avautuisi paljon ja seuraavia ei muodostuisi
- Kriittinen vaihe on halkeaman avauduttua, jolloin seuraava halkeama pyritään muodostamaa
- Tätäkin asiaa voidaan kuvata vedetyn sauvan avulla, jonka pinta-ala on A_c :

$$N_{cr} = A_c \cdot f_{ct} < A_s \cdot f_y$$

$$A_s > A_c \cdot \frac{f_{ct}}{f_y}$$

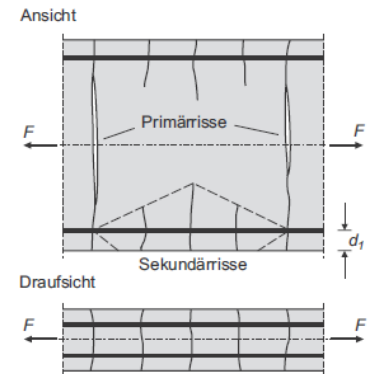
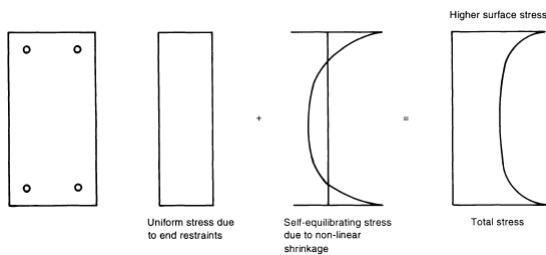
- Tämä muodostaa vähimmäisraudoituksen, mikä varmistaa halkeilun muodostumisen kontrolloituna
- Tilanteissa joissa halkeilua muodostuu ulkoisista kuormista muuten on ehto tarpeeton
- Puolestaan tilanteissa joissa on odotettavissa että halkeilua kehittyy estettyjen muodonmuutosten seurauksena, on vähimmäisraudoitus mitoittavampi tilanne
- On kuitenkin harvoja tilanteita, joissa voidaan sanoa varmasti ettei halkeilua muodostu

20

Vähimmäisraudoitus myötäämisen estämiseksi

- Rakenteeseen kohdistuvista rasituksista seuraa muodonmuutoksia. Samanaikaisen taivutuksen ja normaalivoiman (puristusta tai vetoa) vaikutus otetaan huomioon kertoimella k_c
- Jännitysten epälineaarista jakaumaan poikkileikkauksessa otetaan huomioon kertoimella k , kutistuman tai lämpötilaeron muodostaa korkeampia jännityksiä ja raudoituksen toiminta uuden halkeaman avautumiseen => selvä kokovaikutus
- Lisäksi tulee ottaa huomioon tilannetta vastaava betonin vetolujuus
- Lopulta saadaan:

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s \geq k_c \cdot k \cdot A_{ct} \cdot f_{ct,eff}$$



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

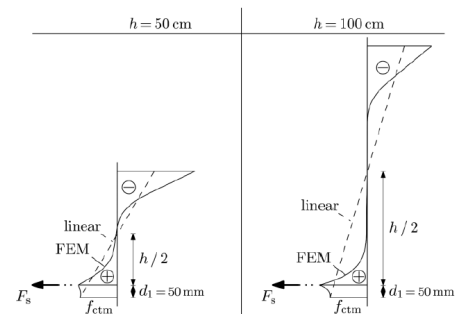
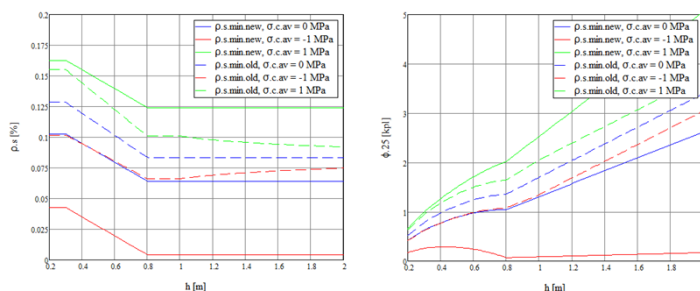
21

Vähimmäisraudoitus myötäämisen estämiseksi

- Uudessa eurokoodissa asiaa on päivitetty, mutta aiemmat periaatteet ja taustat ovat samat
- Menetelmää on yksinkertaistettu, esim. normaalivoiman vaikutus on purettu kertoimesta k_c omaksi tekijäkseen itse yhtälöön
- Lisäksi kerroin k_h korvaa aiempaa kerrointa k
- Lopputulos on monessa tilanteessa sama.
- Selvää eroa aiempaan muodostuu silloin, kun normaalivoima on puristava => tarvitsee lisähuomiota

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s \geq k_c \cdot k \cdot A_{ct} \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\sigma_s}$$

$$A_{s,min,w1} \geq 0,2 \cdot k_h \cdot A_{ct} \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{yk}} + 0,3 \cdot \frac{N_{EK}}{f_{yk}}$$



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

22

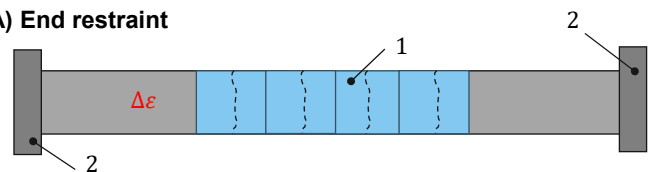
Estetyistä muodonmuutoksista

23

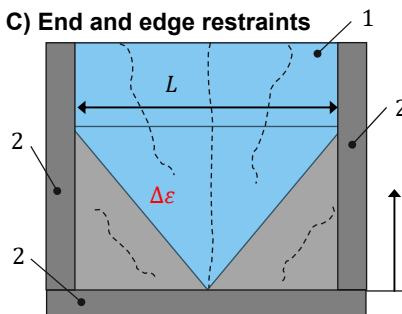
Restraint

- Tasomaiset rakenneosat joihin kohdistuu estettyjä aksiaalisia pakkomuodonmuutoksia voivat reunaltaan olla muodonmuutoksiltaan (osittain) estettyjä
 - Päistään
 - Reunaltaan
 - molemmista
- Rakenneosissa jotka ovat päistään estettyjä, halkeilu muuttaa koko rakenneosan jännityksiä. Halkeamaleveys riippuu betonin vetolujuudesta mutta ei niinkään rakenneosaan kohdistuvan pakkovenymän suuruudesta.
- Rakenneosissa jotka ovat reunaltaan estettyjä, halkeilu muuttaa jännityksiä paikallisesti. Halkeamaleveys riippuu rakenneosaan kohdistuvan (pakko)venymän suuruudesta
- Nämä tapaukset otetaan huomioon betonin ja raudoitteen keskimääräisen venymäeron $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ määrittämisen yhteydessä

A) End restraint



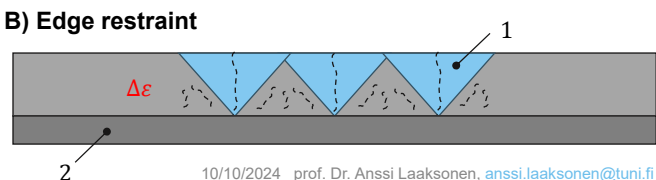
C) End and edge restraints



- 1) Alue jonka jännitykset vaikuttavat halkeaman kehittymiseen
- 2) Tuenta joka estää muodonmuutoksia

Jos $z \leq L/2$, niin tilanne voidaan katsoa reunaltaan estetyksi ja $z > L/2$ päistään estetyksi tilanteeksi

B) Edge restraint

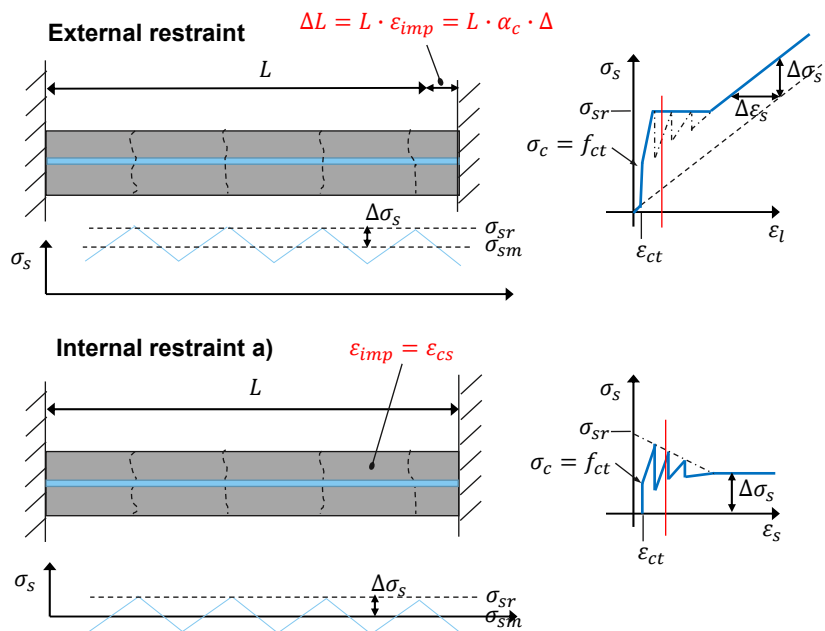


10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

24

Restraint

- Pakkomuodonmuutoksista voidaan erottaa kaksi erilaista tapausta riippuen siitä millaisesta ilmiöstä on kyse.
- Ensimmäisessä tapauksessa sekä betonin että teräkseen kohdistuu pakkomuodonmuutos, esimerkiksi lämpötilan laskusta (molemmat teräs ja betoni venyvät)
- Normaalisti ilmiö on alueella jossa halkeilu ei ole stabiloitunut => betonin vetolujuus vaikuttaa halkeamien suuruuteen, eikä niinkään kohdistuvan muodonmuutoksen suuruus
- Toisessa tapauksessa vain betoniin kohdistuu muodonmuutos, esimerkiksi kutistumasta
- Halkeamaleveys on toisessa miltei sama, halkeamien avautumisen kohdalla, kuin ensimmäisessä tapauksessa



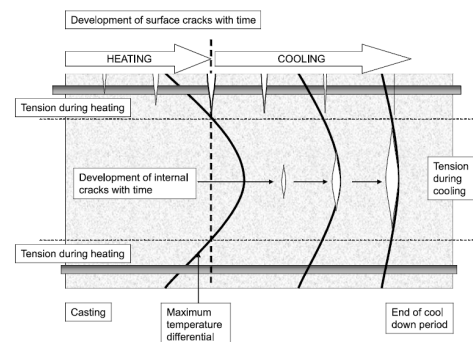
10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

25

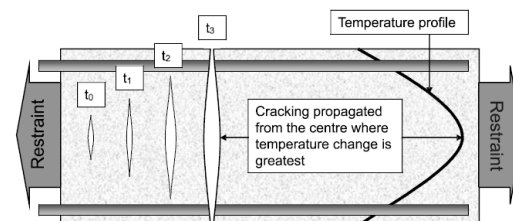
Restraint

- Poikkileikkauksen yli vaikuttaa myös estettyjä muodonmuutoksia
- Monissa kohdin aihepiiri sisältää kokemuseräistä tietoa miten toimiva ratkaisu saadaan aikaan
- Suomessaakin ollut kohteita, joissa rakentamisen jälkeen tehdyissä vesipainekokeissa reilun puoli metriä paksu seinärakenne on voinut vuotaa metrin välein kymmenistä/sadoista kohdin
- Betonin ja sideaineen valinta
- Betonin lämmönhallinta
- Jälkihoito
- Etc.

Internal restraint (b)



External and internal restraint



10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

26

Restraint

- Rakenneosissa tai niiden alueissa jotka ovat estetyille muodonmuutoksille päästään estettyjä (end restraint), käytetään samaa keskimääräisen venymäeron määrittämistapaa kuin ulkoisille kuormille
- Tilanteille jotka ovat reunaltaan estettyjä (edge restraint), riippuu halkeamien muodostuminen muodonmuutosta estävien tuentojen jäykkyydestä.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} - k_t \frac{f_{ct,eff}}{E_{cm}} = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} - k_t \cdot \varepsilon_{cm} \geq 0$$

- Mikäli tuennat olisivat hyvin löysiä ($R_{ax} = 0$), niin estettyjä muodonmuutoksia muodostuu ainoastaan poikkileikkauksen pinta- ja sisäosien välille (internal restraint)
- Mikäli tuennat ovat jäykkiä, niin estettyjä muodonmuutoksia muodostuu (external restraint) ja betonin halkeilu vapauttaa rasituksia, otaksumana betonin vetolujuudelle on Tavanomaisessa tapauksessa 'seinä anturan päällä' on annettu yksinkertaistus että $R_{ax} = 0.5$ ja on määritetty:

- Kuinka paljon venymää ε_{imp} kehittyy muodonmuutoksia estävän tuennan jälkeen

$$\varepsilon_{free} \cdot R_{ax} = \varepsilon_{free} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{restr}}{\varepsilon_{imp}}\right)$$

- Kuinka paljon rakenne venyy ε_{imp} seurauksena
- Rakenteen kohdistettava (pakko)venymä

- Betonin vetolujuuden halkeamatarkasteluissa käytettävä arvo on olennainen, otaksumana pitkäaikaisvaikutusten vuoksi käytetään: $f_{ct,eff} = 0.8 \cdot f_{ctm}(t)$
- Ylittyykö vetolujuus yleensä ottaen tarkastellaan EN 1992-1-1, Annex D mukaisesti

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

27

EN 1992-1-1:2023 Sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet

28

Sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet

- Sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet ovat laajalti kansallisesti määritettäviä NDP arvoja, joihin liittyy myös paljon aihepiirejä joissa ei ole saavutettu konsensusta eurokoodin valmistelussa
- EN 1992-1-1:2023 ottaa kantaa aiempaa selvemmin sallittuihin jännityksiin ja missä tarkasteluissa niitä on tarkoitus käyttää
- Raudoitteen myötäämiseen liittyvät jännitysrajat ja rakenteen ulkonäköön liittyvät halkeamaleveyden rajat on koottu yhteen taulukkoon

Table 9.1 (NDP) — Verifications, stress and crack width limits for appearance

Verification	Calculation of minimum reinforcement according to 9.2.2	Verification of crack width according to 9.2.3	Verification of reinforcement stresses to avoid yielding at SLS
Combination of actions for calculating σ_s	Cracking forces according to 9.2.2	Quasi-permanent combination of actions	Characteristic combination of actions
Limiting value of crack width $w_{lim,cal}$ or stress σ_s	$\sigma_s \leq f_{yk}$	$w_{lim,cal} = 0.4 \text{ mm}$ $\sigma_s \leq f_{yk}$	$\sigma_s \leq 0.8f_{yk}$ $\sigma_p \leq 0.8f_{pk}$
NOTE Crack widths are verified at the member surface unless the National Annex gives a different location.			

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

29

Sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet

- Rakenteen käyttöikään liittyvät sallitut halkeamaleveydet ja jännitykset on koottu yhteen taulukkoon, monella maalla hyvin erilaiset taulukot
- Ehdot on esitetty NDP taulukossa
 - Vasen sarakke:
 - Teräsbetonirakenteelle
 - Ankkurijännerakenteelle tartunnattomin jäntein
 - Ankkurijännerakenteelle tartunnallisin jäntein suojaustasoilla 2 tai 3
 - Oikea sarakke:
 - Ankkurijännerakenteelle tartunnallisin jäntein suojaustasolla 1
- Huom. Halkeamaleveyden raja-arvot taulukossa suuntaa antavina arvoina. Tiedetään että halkeamaleveyden todellista vaikutus käyttöikään tunnetaan huonosti.

Table 9.2 (NDP) — Verifications, stress and crack width limits for durability

Exposure Class	Reinforced members and prestressed members without bonded tendons and with bonded tendons with Protection Levels 2 or 3 according to 5.4.1(4)		Prestressed members with bonded tendons with Protection Level 1 according to 5.4.1(4) and pretensioned members.		
	combination of actions		combination of actions		
	quasi-permanent	characteristic	quasi-permanent	frequent	characteristic
X0, XC1	–	–	–	$w_{lim,cal} = 0.2 \text{ mm} \cdot k_{surf}$	–
XC2, XC3, XC4	$w_{lim,cal} = 0.3 \text{ mm} \cdot k_{surf}$	–	Decompression ^b	$w_{lim,cal} = 0.2 \text{ mm} \cdot k_{surf}$	–
XD1, XD2, XD3 XS1, XS2, XS3		$\sigma_c \leq 0.6f_{ck, AC}$	–	Decompression ^b	$\sigma_c \leq 0.6f_{ck, AC}$
XF1, XF3 XF2, XF4	–	–	–	–	–

NOTE 1 Crack widths are verified at the member surface unless the National Annex gives a different location.

NOTE 2 The factor k_{surf} considers the difference between an increased crack width at the member surface and the required mean crack width according to durability performance of the minimum cover: $1.0 \leq k_{surf} = c_{act}/(10 \text{ mm} + c_{min,dur}) \leq 1.5$.

c_{act} is a specified actual cover $\geq c_{nom}$ due to detailing or execution reasons.

^a This limitation in serviceability conditions is not necessary for stresses under bearings, partially loaded areas and plates of headed bars.

^b The decompression limit requires that all parts of the bonded tendons or duct lie at least 25 mm within concrete in compression. The decompression check is only relevant in the direction of the prestressed reinforcement.

^c The compressive stress σ_c may be increased to $0.66f_{ck}$ if the cover is increased by 10 mm or confinement by transverse reinforcement is provided.

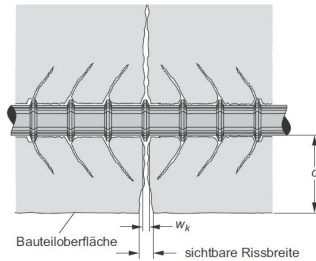
10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

30

Sallitut jännitykset ja halkeamaleveydet

- Käyttöiän vaatimaa paksumman betonipeitteen käytölle on esitetty sallitun halkeamaleveyden korotus

$$1.0 \leq k_{\text{surf}} = \frac{c_{\text{act}}}{10 \text{ mm} + c_{\text{min.dur}}} \leq 1.5$$



- Betonin puristusjännityksen rajaehto

$$\sigma_c \leq 0.6 \cdot f_{ck}$$

Table 9.2 (NDP) — Verifications, stress and crack width limits for durability

Exposure Class	Reinforced members and prestressed members without bonded tendons and with bonded tendons with Protection Levels 2 or 3 according to 5.4.1(4)		Prestressed members with bonded tendons with Protection Level 1 according to 5.4.1(4) and pretensioned members.		
	combination of actions		combination of actions		
	quasi-permanent	characteristic	quasi-permanent	frequent	characteristic
X0, XC1	—	—	—	$W_{\text{lim,cal}} = 0.2 \text{ mm} \cdot k_{\text{surf}}$	—
XC2, XC3, XC4	$W_{\text{lim,cal}} = 0.3 \text{ mm} \cdot k_{\text{surf}}$	—	Decompression ^b	$W_{\text{lim,cal}} = 0.2 \text{ mm} \cdot k_{\text{surf}}$	—
XD1, XD2, XD3 XS1, XS2, XS3			—	—	
XF1, XF3 XF2, XF4	—	$\sigma_c \leq 0.6 f_{ck} \text{ a,c}$	—	Decompression ^b	$\sigma_c \leq 0.6 f_{ck} \text{ a,c}$

NOTE 1 Crack widths are verified at the member surface unless the National Annex gives a different location.

NOTE 2 The factor k_{surf} considers the difference between an increased crack width at the member surface and the required mean crack width according to durability performance of the minimum cover: $1.0 \leq k_{\text{surf}} = c_{\text{act}} / (10 \text{ mm} + c_{\text{min.dur}}) \leq 1.5$.

c_{act} is a specified actual cover $\geq c_{\text{nom}}$ due to detailing or execution reasons.

^a This limitation in serviceability conditions is not necessary for stresses under bearings, partially loaded areas and plates of headed bars.

^b The decompression limit requires that all parts of the bonded tendons or duct lie at least 25 mm within concrete in compression. The decompression check is only relevant in the direction of the prestressed reinforcement.

^c The compressive stress σ_c may be increased to $0.66 f_{ck}$ if the cover is increased by 10 mm or confinement by transverse reinforcement is provided.

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakentee/>

31

EN 1992-1-1:2023 menetelmät kokonaisuutena

32

Tampereen yliopisto
Tampere University

Kokonaisuus

9.2.2 Minimum reinforcement areas to avoid yielding

- Varmistetaan halkeilun kehittyminen ilman raudoitteen myötäämistä, tai haluttua alemman jännitysrajan ylittymistä

Annex S, S.3 Minimum reinforcement areas for crack width control

- Tarkastellaan halkeamaleveys halkeaman avautuessa joka tapauksessa
- Esimerkiksi saadaan perusraudoitus käyttörajatilan kannalta

9.2.3 Refined control of cracking

- Varsinainen halkeamaleveyksien määrittäminen ulkoisille tai sisäisille kuormille
- Esim. perusraudoitus käyttörajatilan kannalta

Annex S, S.4 Simplified control of cracking

- Yksinkertaistettu raudoitettangon halkaisijaan tai tankojakoon perustuva menetelmä
- Pohjautuu kohdan 9.2.3 menetelmiin

Annex S, S.5 Surface reinforcement for large diameter bars

- Empiirisesti hyväksi todettu nk. pintaraudoite halkeamaleveyksien hallintaan tapauksissa joissa tankokoko on suuri > 32 mm

$$0,2 \cdot k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c + 0,3 \cdot N_{Ed} \leq f_{yk} \cdot A_{s,min,w1} \leq 0,5 \cdot k_h \cdot f_{ct,eff} \cdot A_c$$

$$A_{s,min,w1} = \frac{0,8 \cdot \frac{h - h_{c,eff}}{h} \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{c,eff}}{\sigma_{s,lim}}$$

$$\sigma_{s,lim} \leq k_{\sigma 1} \cdot f_{ct,eff} \cdot \left(\frac{1}{\phi} \right) \cdot \left(-c + \sqrt{c^2 + k_{\sigma 2} \cdot \frac{E_s \cdot w_{lim,cal} \cdot \phi}{k_w \cdot k_{1/r,simpl} \cdot k_{1/r,simpl} \cdot f_{ct,eff}}} \right)$$

$$w_{k,cal} = k_w \cdot k_{1/r} \cdot s_{r,m,cal} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq (1 - k_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = R_{ax} \cdot \epsilon_{free} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_{cm}} \geq 0 \quad R_{ax} = 1 - \frac{\epsilon_{restr}}{\epsilon_{imp}}$$

$$s_{r,m,cal} = 1,5 \cdot c + \frac{k_{fl} \cdot k_b}{7,2} \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \leq \frac{1,3}{k_w} (h - x)$$

$$\phi \leq \frac{2,1 \cdot \rho_p}{a \cdot k_{fl,simpl} \cdot k_{b,simpl}} \cdot \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w \cdot k_{1/r,simpl} \cdot 0,9 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5 \cdot c \right)$$

$$s_1 \leq \frac{3,45 \cdot \rho_p}{a^2 \cdot k_{fl,simpl}^2 \cdot k_{b,simpl}^2} \cdot \left(\frac{w_{lim,cal}}{k_w \cdot k_{1/r,simpl} \cdot 0,9 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}} - 1,5 \cdot c \right)^2$$

$$A_{s,surf} \geq 0,01 \cdot A_{ct,ext}$$

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

33

Tampereen yliopisto
Tampere University

Kokonaisuus

9.2.2 Minimum reinforcement areas to avoid yielding

$M_E = M_{Cr}$

$N_E = N_{Ek}$

$\sigma_s = f_{yk}$

$A_{ct} = 0,2 \dots 0,5 \cdot k_h \cdot h$

S.3 Minimum reinforcement areas for crack width control

$N_E = N_{Ek}$

$w_{k,cal} = w_{lim,cal}$

$\sigma_s = \sigma_{s,lim}(w_{lim,cal}) \leq f_{yk}$

$A_{ct} = A_{c,eff}$

9.2.3 Refined control of cracking

$M_E = M_{Ek}$

$N_E = N_{Ek}$

$w_{k,cal} \leq w_{lim,cal}$

$A_{ct} = A_{c,eff}$

S.4 Simplified control of cracking

$w_{k,cal} = w_{lim,cal}$

$\sigma_s = \sigma_{s,lim}(w_{lim,cal})$

$M_E = M_{Ek}$

$N_E = N_{Ek}$

σ_s

- Saadaan rakenteen perusraudoitus käyttörajatilan kannalta.
- Ulkoisista kuormista mukana on N_{Ek}
- Jännitysraja $\sigma_{s,lim}$ on sellaisessa tilanteessa kun halkeamat ovat joka tapauksessa avautuneet momentin M_{Cr} vallitessa. Ehto on muodostettu siten, että sen ratkaisu ei riipu kuormien aiheuttamasta taivutusrasituksesta M_{Ek} . Eli voimasuureissa N_{Ek} ja M_{Ek} ei ole tarve ottaa pakkorasituksia huomioon.
- Halkeamaleveyden varsinainen laskenta
- Menetelmät ulkoisten tai sisäisten kuormien tilanteille
- Sisäisissä muodonmuutokset on estetty rakenneosan reunoista tai päistä, tai osittain molemmista
- Halkeamaleveyden mitoitus yksinkertaisemmin (konservatiivisempi), kaksi vaihtoehtoa jännitykselle

10/10/2024 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

34

Kiitokset mielenkiinnosta, kysymyksiä?