



Betonirakenteiden uusien mitoitusmallien mahdollisuudet

Rakennetekniikan päivä 2026
25.3.2026 prof. TkT Anssi Laaksonen



1

Sisältö

- 1) Tutkimusryhmä
- 2) Mitoitusmallien lähtökohtia
- 3) Tutkimusryhmä mallien kehityksessä
- 4) Laatan lävistystarkastelut
- 5) Hoikat pilarit ja paalut
- 6) Kaari- ja holvirakenteet
- 7) Yhteenveto

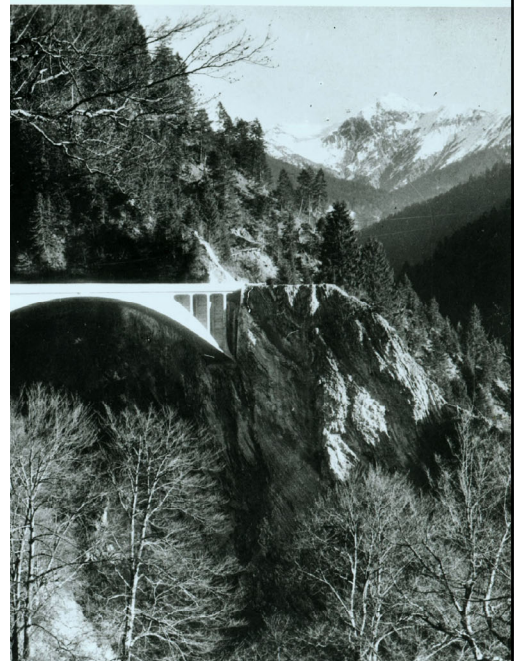


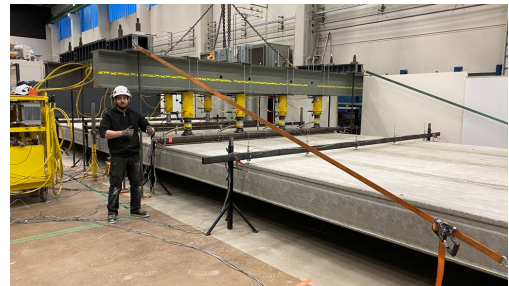
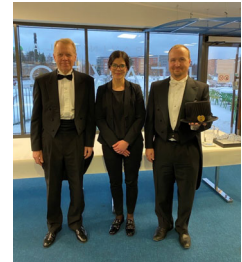
Photo: ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv,
Salginatobelbrücke 1930

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

2

- Betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmä on noin 10 htv kokoinen
- Keskeiset tutkimusalueet ovat
 - Betonirakenteet ja rakennejärjestelmät
 - Betonirakenteiden suunnittelu- ja mitoitusmenetelmät
 - Siltojen rakenteellinen toiminta
 - Perustusten ja betonipaalujen rakenteellinen toiminta
 - Rakenteiden sortumien selvittäminen
- Kokeelliset tutkimusmenetelmät ovat merkittävässä roolissa ryhmän tutkimustyössä
- Ryhmä on ohjannut perustamisestaan 2014 lukien noin 120 diplomityötä. Ryhmästä on valmistunut 5. tekniikan tohtoria (4. ja 5. 2026 aikana)
- Ryhmä huolehtii laajasti betoni- ja siltarakenteiden opetuksesta
- Vaikuttaminen kansainvälisissä ryhmissä on aktiivista, kuten *fib*, IABSE ja CEN

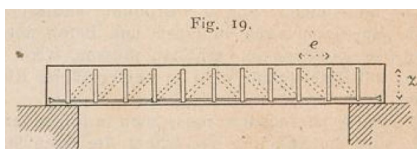
<https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>



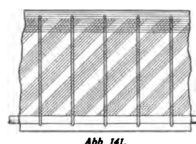
3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

3

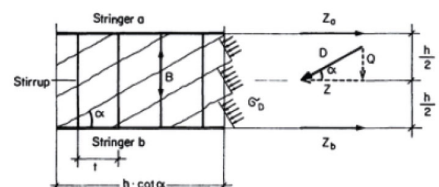
- Esityksessä tuodaan esiin joitain suunnittelukäyttöön liittyviä kantavien rakenteiden arviointiin liittyviä mitoitusmalleja.
- Rajallisen ajan vuoksi syvemmälle meneviä tutkimuskäytössä olevia malleja sivutaan
- Vaikka erilaisia mitoitusmalleja on lukuisa joukko samaankin asiaan, päättyy niistä vain osa varsinaiseen suunnittelukäyttöön
- Joidenkin mallien osalta niiden alkuperäiset versiot on kehitetty jo pitkän aikaa sitten, mutta niiden kehityksessä on päästy eteenpäin, joka mahdollistaa enemmän niiden käyttöä.
- Mitoitusmallit ovat hyvin olennaisia, rakenteet mitat määräytyvät niiden antamien tulosten perusteella



Ritter, W. 1899 "Die Bauweise Hennebique"



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



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

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

4

Lähtökohtia

5

Mitoitusmenetelmien tavoiteltavia lähtökohtia

- Perustuu läpinäkyviin fysikaalisiin malleihin, mekaniikan mukaisiin malleihin
 - Säännöt jotka voidaan selittää, ymmärtää ja perustella fysiikan periaatteiden mukaan
 - Voivat sisältää kokeellisia parametreja
 - On validoitu kattavasti koekuormitusten avulla
 - Voidaan yhdistää epälineaariin analyysiin haastavammissa rakenteissa
- Sisältää potentiaalia jatkokehitystä varten
- Tarjoaa yhtenäisen perustan eri mitoitusilanteille, esim. lävistysmitoitus ilman leikkausraudoitusta tai sen kanssa
- Mitoitusmenetelmän 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/työläämpi
 - Uudisrakenteet – Kantavuuden arviointi

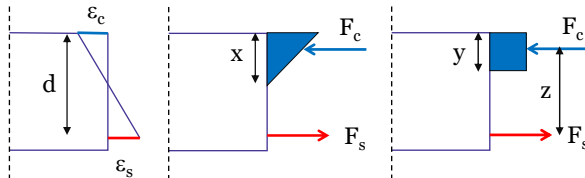
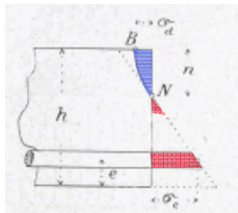


6

Mekaniikkaan pohjautuva vai empiirinen malli?

- On insinöörityössä omaksuttavissa mekaniikan avulla
- Voi muodostua käsitys rakenteen toiminnasta
- Mahdollistaa rakenteiden kehittämisen ja soveltamisen

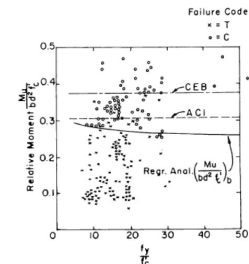
Ritter, W. 1899



$$F_c = 0.8 \cdot b \cdot x \cdot f_c = F_s$$

$$M_R = F_s \cdot z$$

Zsutty, T.C. 1963



$$M_u = 0.431 \cdot b \cdot d^2 \cdot \rho^{0.75} \cdot f_y^{0.9} \cdot f_c^{0.1} \text{ (psi, in)}$$

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

7

Tutkimusta vai suunnittelua?

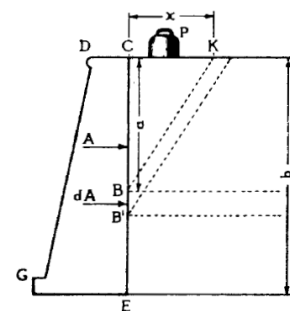
COULOMB AND EARTH PRESSURE - Géotechnique 1948 / 06 Vol. 1; Iss. 1
by H. Q. GOLDER

There are two approaches to a natural problem. They are the approach of the pure scientist and that of the engineer.

The pure scientist is interested only in the truth. For him there is only one answer-the right one-no matter how long it takes to get it.

For the engineer, on the other hand, there are many possible answers, all of which are compromises between truth and time, for the engineer must have an answer now; his answer must be sufficient for a given purpose, even if not true. **For this reason, an engineer must make assumptions - assumptions which in some cases he knows to be not strictly correct - but which will enable him to arrive at an answer which is sufficiently true for the immediate purpose.**

Mistakes are not made when an engineer makes his assumptions. Mistakes are made when other engineers forget the assumptions which have been made, and the assumptions on which a theory is based are only too easily forgotten. How many engineers, for instance, could write down the assumptions on which the Theory of bending is based, and how many would apply the theory to a short, deep beam without realizing that this would be an error?



3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

8

Tutkimusryhmä mallien kehityksessä

9

Tutkimusryhmä mallien kehityksessä

- Kevytsojarahakkoseinän leikkauskestävyys
- Palkin lovipään kestävyys
- Taivutuksen ja väännön yhteisvaikutus
- Laattapalkin laipan irtileikkaantuminen
- Teräsbetonipalkin toiminta taivutuksessa lujuudenkehityksen aikana
- Ontelolaataston vääntörasitusten ja –kestävyyden arviointi
- Laattasillan leikkaus- ja lävistysmitoitus
- Betonin säilyvyysluokat (ERC luokitus)
- Siltojen yläpuolisten kaarien optimaalinen geometria

Nyt käynnissä

-
- Tartunnattomien jänteiden lisävenymät
 - EN - Jännitetyn rakenteen vaurionsietokyky
 - EN - Leikkausraudoittamattoman palkin leikkauskestävyys
 - EN - Raudoituksen limijatkoksen kestävyys
 - EN - Jatkuvasti kytketyt elementtipalkit
 - Betonipaalun rakenteellinen kestävyys
 - fib MC - Sementti-injektoidun jännepunosnipun tartunta
 - Jännitetyn betonipilarin mitoitus
 - EN - Liikuntasaumattoman sillan rakenteellinen toiminta

Viimeaikaisia

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

10

Betonilaatan lävistystarkastelu

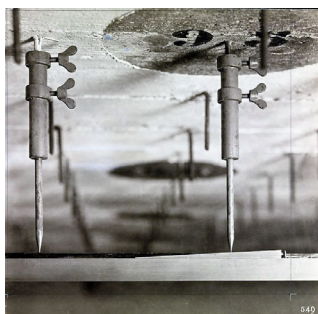
11

Beamless construction?

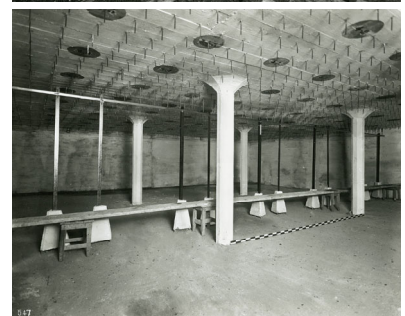
- 1905 Robert Maillart kehitti aluksi välipohjarakennetta missä ei ollut sekundääripalkkeja. Seuraava kehitysvaihe oli ilman koko palkistoa.
- 1908 Maillart alkoi testata rakennetta yrityksen Maillart & Cie varikkoalueella Zürich:ssä täyden mittakaavan kokeilla
- 1909 Maillartin patentti palkittomaan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

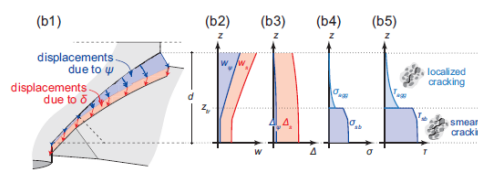
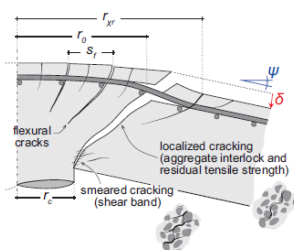


3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

12

Critical Shear Crack Theory (CSCT)

- Lävistystarkastelun ja CSCT osalta käytetään seuraavia lähtökohtia ja otaksimia
- Lävistyvälle alueelle muodostuu lokalisoitunut halkeama, jonka avautuminen vaikuttaa
 - puristusdiagonaalin kestävyys
 - 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



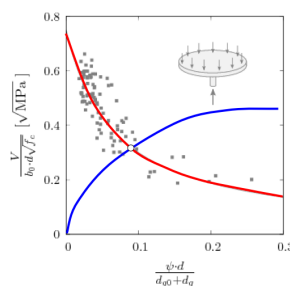
Figures: Background document for prEN 1992-1-1:2021

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

13

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 hoikkuudesta ja taivutusraudoituksesta => tämä mahdollistaa menetelmän edelleen kehittämisen eri sovelluksiin



Figures: Muttoni & Fernandez

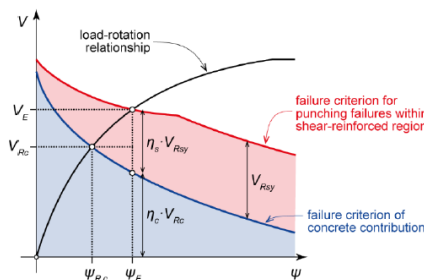
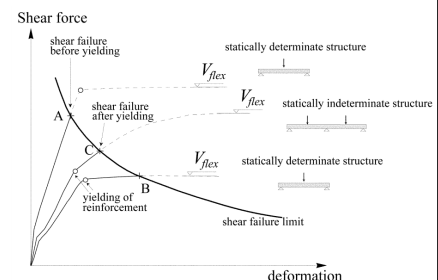


Figure: Background document for prEN 1992-1-1:2021

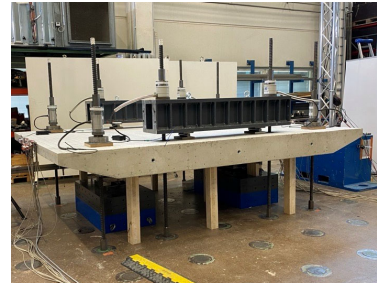


3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

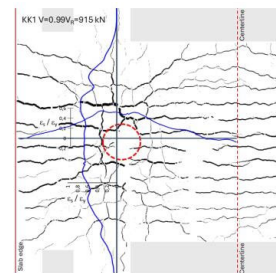
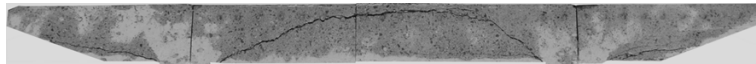
14

Laattasillan leikkaus- ja lävistysmitoitus

- Tutkimus aloitettiin syksyllä 2022, valmistuminen 2027
- Osana Väyläviraston ja Tampereen yliopiston NOSERA ja TUTOR –hankkeita
- Tavoitteena kehittää leikkaus- ja lävistysmitoituksen laskentamalleja uusien rakenteiden suunnittelua ja nykyisten rakenteiden kantavuuden arvioimista varten
- Kokeellinen osuus 2025 sisälsi viiden teräsbetonilaatan koekuormitukset. Laatat 1/3 skaalan koekappaleita laattasillan välituesta, jotka murtuivat lävistymällä pilareiden kohdalta



Koekuormituksista järjestettiin yleisötilaisuus 22.5.2025 aiheesta kiinnostuneille alan ammattilaisille, tallenne koekuormituksesta löytyy tutkimusryhmän verkkosivuilta: <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/uutinen/laattasillan-lavistysmitoitus-tutkimusprojektin-koekuormituksien-yleisotilaisuus-22-5-2025/>



3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

15

Mahdollistaa

- Rakenteen toimintaa paremman ymmärtämisen
- Rakenteen lävistyskestävyyden määrittämisen ”koekappaleen sijasta”
- Suljettuun muotoon johdettavat suunnittelukaavat
- Jännitetyn rakenteen kestävyys arvioinnin, etenkin leikkauskestävyydessä
- Antaa työkaluja määrittää kantavuuden arvioinnissa kestävyys tarkemmin
- Voidaan arvioida myös vahvennettua rakennetta
- Rakenteen optimoinnin
- Mallien jatkokehittämisen uusiin tapauksiin tutkimuksen keinoin

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

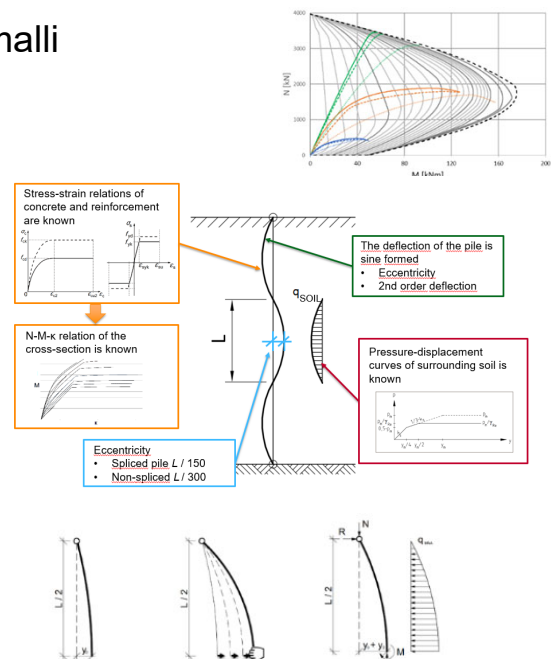
16

Hoikat pilarit ja paalut

17

Teräsbetonipaalun mitoitusmalli

- Tutkimusta TB-paalujen rakenteellisesta toiminnasta on tehty TAU:ssa/TTY:ssä nykyisellään v:sta 2014
- Keskeisin osio tutkimuksessa on ollut mitoitusmallin kehittäminen tb-paalulle, vastaavaa valmista mallia ole alalla käytössä
- Tutkimuksessa on luotu viitekehys teräsbetonipaalun kantokyvyn mekaaniselle toimintamallille, joka on helposti omaksuttavissa käytännön insinööriyössä
 - Malli mahdollistaa kantokykyyn vaikuttavien epälineaaristen ilmiöiden huomioon ottamisen ilman liiallista yksinkertaistusta (halkeilu, betonin jännitys-venymä –yhteys, maan sivupaine-siirtymä –yhteys, pitkäaikaisvaikutukset)
 - Nykyiset Betoniteollisuuden RT-paalujen tuotelehdessä esitetyt rakenteelliset kapasiteetit on laskettu tutkimuksessa laaditun mallin avulla
- Uuden eurokoodin käyttöönoton avuksi tutkimusta on tavoitteena jatkaa seuraavin alustavin vaihein:
 - Mallin validointi koekuormituksin
 - Paalujatkoksen vaikutus paalun jäykkyyteen ja kapasiteettiin
 - Yksinkertaistetun mitoitusmenetelmän laatiminen

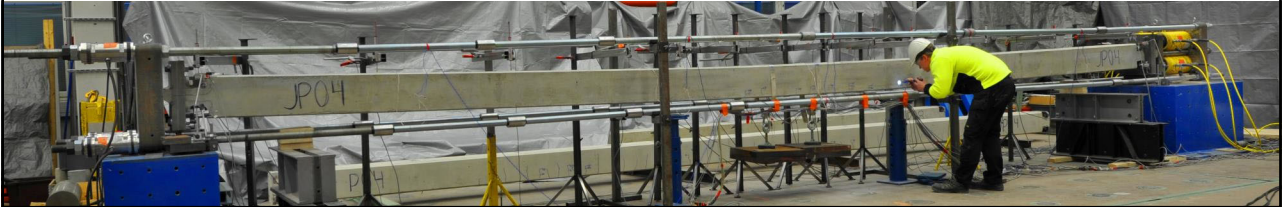
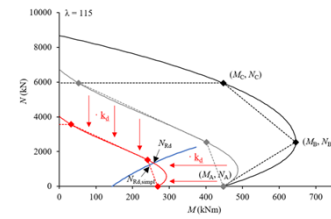


3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

18

Jännebetonipilarin mitoitusmalli

- Jännebetonipilarin etuna on esijännityksen aikaansaama suurempi halkeilumomentti, joka vaikuttaa merkittävästi pilarin jäykkyyteen ja tämän myötä hoikan pilarin kapasiteettiin sekä kuljetuksen ja asennuksen aikaiseen käsittelyyn
- Esijännityksen huomioon ottamiselle pilareissa ei Eurokoodissa ole annettu teräsbetonipilarien kaltaista suunnittelukäyttöön soveltuvaa mitoitusastapaa
- Rakennetyypin yleistymisen edistämiseksi TAU:ssa käynnistettiin Betoniteollisuuden rahoittama tutkimushanke
- Teräsbetonipaaluille laadittua mekaanista toimintamallia jatkojalostamalla laadittiin jännebetonipilareille siirtymäperusteinen malli
- Siirtymäperusteisen mallin, tehtyjen koekuormitusten ja varmuustarkastelujen perusteella JB-pilarille laadittiin suunnittelukäyttöön soveltuva mitoitusmalli, joka on julkaistu by:n Betoninormikortissa 2024



19

Mahdollistaa

- Rakenteen toimintaa paremman ymmärtämisen
- Paalun kantokykyyn vaikuttavien eri tekijöiden kattavan huomioon ottamisen
- Poikkileikkausmurron ja stabiiliteettimurron tarkastelun samalla mallilla
- Paalun ja pilarin rakenteen kehittämisen
- Jännitetyn pilarin arvioinnin
- Suljettuun muotoon kehitettävät suunnittelukaavat
- Rakenteen optimoinnin
- Mallien jatkokehittämisen uusiin tapauksiin tutkimuksen keinoin

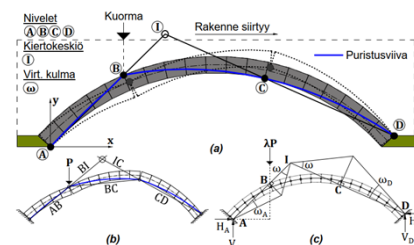
20

Kaari- ja holvirakenteet

21

Kaarirakenteet

- Kaarirakenteet ovat esteettisesti hyvin toimivia ratkaisuja
- Aiemmin holvikaaria tehtiin pääasiassa kivistä
- Aiheeseen sopivia malleja on ollut olemassa pitkään
- Viimeisten vuosikymmenten aikana tieto menetelmistä Suomessa on hiipunut
- Esimerkiksi UK:ssa muurattuihin holvisiltoihin on ollut Euroopassa varsin paljon aiheen tutkimusta
- Suomessa kattavan selvityksen muurattujen ja kiviholvisiltojen osalta teki diplomityössään Tuomas Nieminen
- Menetelmät mahdollistavat olemassa olevien siltojen kantavuuden arvioinnin, vaikkakin tutkimustarpeita edelleen jäi runsaasti



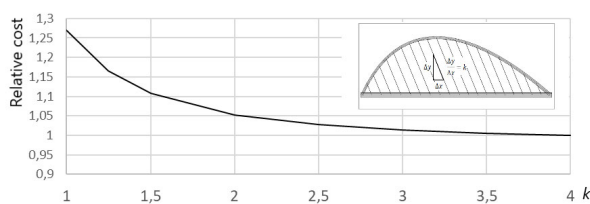
Kuva 5.13. Rakenteen idealisoitu malli: käytettävä koordinaatisto ja merkinnät (a); rakenteen oletettu sortumismekanismi (b); diskreetointi jäykkiin elementteihin saumavälien mukaan ja virtuaaliset kulmat (c).

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

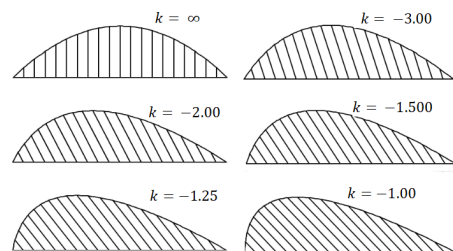
22

Tampereen yliopisto Kaarirakenteet

- Modernien kaarien geometrian tutkimuksessa aktiivisessa roolissa on ollut TkT Esko Järvenpää
- Kustannusten ja päästöjen minimoinnin vuoksi on ollut tarve kehittää kaarirakenteita
- Vektori-iteraatioon perustuvaa rakenteen geometrian määrittämistä on parannettu ja sovellettu eri rakenteisiin
- Rakenteen geometrian määrittämiseen on saatu kehitettyä keskeisiä suunnittelumenetelmiä



Figures: Järvenpää, E., Laaksonen, A., Asymmetric constant-stress arch shape in tied-arch bridges, Rakenteiden mekaniikka 3/2025



3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

23

Tampereen yliopisto Mahdollistaa

- Rakenteen toimintaa paremman ymmärtämisen
- Kustannustehokkaiden ja päästöiltään minimoitujen rakenteiden kehittämisen
- Suunnittelutyön tehostamisen
- Rakenteen optimoinnin
- Mallien jatkokehittämisen uusiin tapauksiin tutkimuksen keinoin

3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

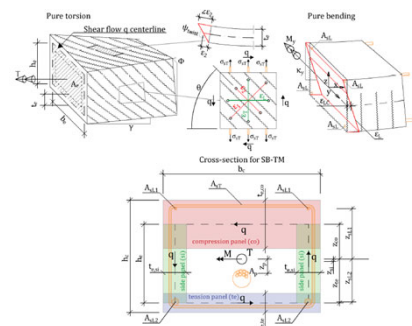
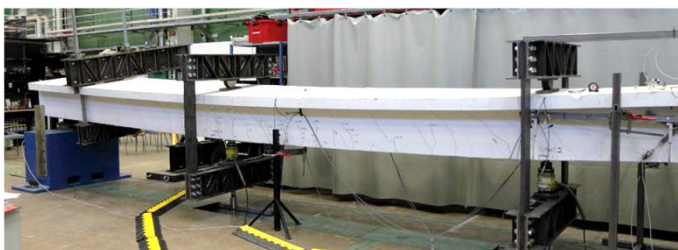
24

Yhteenveto

25

Yhteenveto

- Betonirakenteiden mitoitusmallit ovat edenneet varsin paljon lähivuosina
- Aiemmin paljolti kokemuseräisistä malleista on päästy mekaniikkaan pohjautuviin malleihin
- Malleista voidaan saada paljon hyötyä eri käyttötilanteissa
- Mallit tarjoavat myös hyvän viitekehyksen niiden edelleen kehittämiseksi tutkimuksen keinoin



3/25/2026 prof. Dr. Anssi Laaksonen, anssi.laaksonen@tuni.fi
Concrete and Bridge Structures, <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/>

26

Kiitos, kysymyksiä?