

# Uusi tehokas rakenneratkaisu pihakansirakentamiseen

## Ulla Kytölä, DI

Laatupäällikkö, A-Insinöörit suunnittelu Oy  
Väitöskirjatutkija, Tampereen Yliopisto  
ulla.kytola@ains.fi

Kaupunkien tiivistymisen myötä, tarve rakentaa maanalaisia tiloja puistojen, pihojen ja torien alle kasvaa jatkuvasti niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Tällaisten maanalaisten tilojen yläpohjana toimivat pihakansirakenteet ovat yleensä betonirakenteisia, vaativia suunnitella ja rakentaa sekä kalliita toteuttaa. Väitöskirjassaan DI Ulla Kytölä tutkii vaihtoehtoisia rakenneratkaisua pihakansirakenteiden toteutukselle. Työn idea on soveltaa kansainvälisesti silloissa paljon käytettyä elementtirakentamiseen perustuvaa rakenneratkaisua kotimaisissa pihakansirakenteissa.

Suomalaisten kaupunkien infrastruktuuri on muuttumassa. Toiminnot keskittyvät yhä enemmän kaupunkeihin, mikä edellyttää jatkuvasti tehokkaampaa maan käyttöä. Tonttien arvon noustessa maanalainen rakentaminen on yleistynyt voimakkaasti. Keskusta-alueilla toimintoja, kuten pysäköintiä, piilotetaan usein puistojen ja teiden alle. Pihakansirakenteet on yleensä maisemoitu niin hyvin, etteivät ihmiset edes huomaa, että kävelevät tai ajavat autoaan rakennuksen päällä.

Nykyaikaiset pihakansirakenteet ovat raskaasti kuormitettuja (kuva 2). Niiden kuormat muodostuvat paksuista maakerroksista, pintarakenteista sekä liikenne- ja lumikuormista – toisinaan kannen päällä voi olla jopa toinen rakennus. Pihakansien alapuolinen tila on usein varattu pysäköinnille. Kantta tukevien pilareiden sijoittelua ja lukumäärää joudutaan tällöin rajoittamaan, jotta pysäköintihalli säilyy käytettävyydeltään hyvänä. Tämän takia kansirakenteiden pääkannattimilta vaaditaan usein myös pitkiä jännevälejä.

Raskaasti kuormitetut pitkän jänneväliset rakenteet toteutetaan Suomessa tyypillisesti paikalla rakentaen elementtirakentamisen sijaan. Syy tähän on käytännössä se, että nosturien ja kujetuskaluston rajoitteet tulevat

vastaan, kun betonielementin paino ja mitasuhteet saavuttavat tietyn pisteen. Samalla menetetään kuitenkin yleisesti tunnistetut elementtirakentamisen hyödyt: nopeus, laatu ja ympäristöystävällisyys.

## Tavoitteena kasvattaa esijännitettyjen betonielementtirakenteiden kapasiteettia

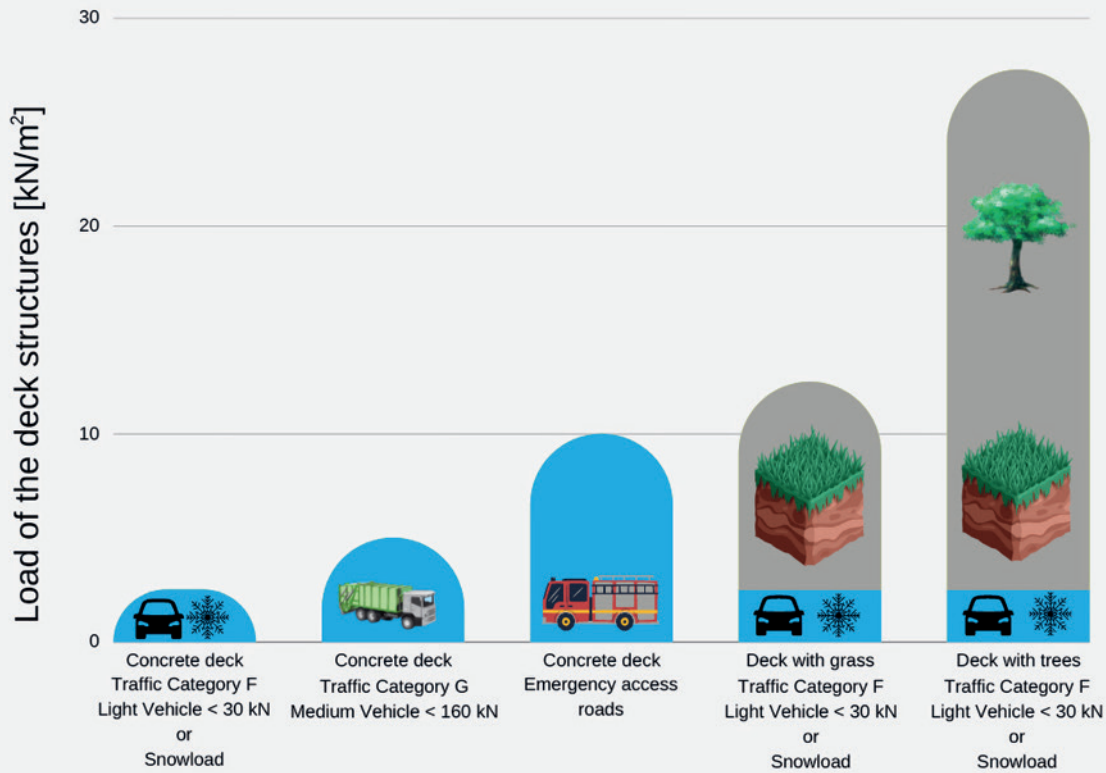
Väitöstutkimuksen tavoite oli kehittää keino, jonka avulla esijännitettyjen betoniliittopalkkien käyttöaluetta pihakansirakenteissa voitaisiin kasvattaa ja täten mahdollistaa elementtirakentamisen hyödyntäminen useammin myös pitkän jännevälisen raskaasti kuormitetuissa pihakansirakenteissa.

Yksiaukkoiset esijännitettyt betoniliittopalkit ovat erityisesti suomalaisessa pysäköintirakentamisessa yleisesti käytetty tuote. Betoniliittopalkki muodostuu eri aikaan valettujen betonien välisestä liittorakenteesta: esijännitetystä elementtipalkista ja siihen tukeutuvasta osittain tai kokonaan paikalla valetusta laatasta. Esijännitetyn elementtipalkin ja paikalla valetun laatan liitos toisiinsa varmistetaan elementtipalkin yläpinnan karhennuksella sekä ansaraudoituksella. Liittolaatta ja poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen elementtipalkki muodostavat liittovalun

**1** Kuvituskuva. Kohde ei liity tutkimushankkeeseen. Omenapiha on Espoon Olarissa sijaitseva poikkeuksellisen suuri asuinkorttelipiha. Joka puoleltaan katualueiden rajaaman korttelin muodostavat neljä asuinrakennusta. Omenapiha on lähes kokonaan rakennettu taloyhtiöiden maanpäällisen pysäköintihallin katolle. Autohallin kattona toimivan laataston päällä pihakannella on suojabetonilaatta. Vesieristys on toteutettu perinteisellä kumibitumikermillä.



2 Erilaisten pihakansirakenteiden kuormia [1].



Artikkelin kuvat: Ulla Kyrölä

kovettua yhtenäisen T-poikkileikkauksen. Liittovaikutuksen ansiosta esijännitetyille elementtipalkille saadaan siis lisää tehollista korkeutta ja lisäksi liittolaatan laipat toimivat poikkileikkauksessa tehokkaana puristus-pintana. Esijännitetyissä betonielementeissä käytetään valmistusteknisistä syistä suoraa punoskulkua ja tästä syystä rakenne on yksiaukkoinen.

Eri puolilla maailmaa, erityisesti Pohjois-Amerikassa, on tyypillistä kasvattaa esijännitettyjen yksiaukkoisten betoniliittopalkkisiltojen kapasiteettia jatkuvuuden avulla. Väitöstutkimuksen yhteydessä toteutetussa kirjallisuuskatsauksessa kävi ilmi, että elementtipalkkien välistä jatkuvuutta on tutkittu jo 1960-luvulta lähtien ja kansainvälisissä siltarakenteissa on käytössä useita erilaisia menetelmiä toteuttaa jatkuvuus esijännitettyjen betonielementtien välille.

Väitöskirjassa keskitytään näistä menetelmistä yhteen: kansainvälisesti tutkituimpaan ja eniten käytettyyn. Menetelmässä jatkuvuus elementtisiltapalkkien välille saadaan aikaan lisäämällä välituella sijaitsevan jatkoksen

yläpintaan pituus- ja poikittaisuuntaista harjateräsraudoitusta. Rakenteen ideologia on vastaava kuin Suomessa paljon käytetyllä kuorilaatalla. Palkkien välille rakennettava jatkos on teräsbetonien ja sen taivutuskapasiteetti muodostuu palkkien päälle valettavan liittolaatan pituussuuntaisen raudoituksen vetokapasiteetista sekä elementtipalkkien väliin valettavan poikittaispalkin puristus-kapasiteetista. Rakenne toimii yksiaukkoisena rakenteena omalle painolleen sekä laatan valun painosta aiheutuville kuormille. Liittolaatan ja jatkoksen kovettua rakenne toimii muille päälle tuleville kuormilleen jatkuvana betoni-betoni liittorakenteena.

Jatkuvuus tarjoaa rakenteellisia hyötyjä verrattuna yksiaukkoiseen rakenteeseen. Jatkuva rakenne toimii keinulaudan tavoin. Kun toisessa kentässä on kuormaa ja rakenne taipuu, niin samainen taipuma helpottaa viereisen kentän taipumaa ja niin edelleen. Jatkuvan rakenteen taipumat ja taivutusmomentit ovat täten huomattavasti pienempiä verrattuna yksiaukkoiseen. Jatkuvuudella voidaan saavuttaa taloudellisempia rakenteita ja mate-

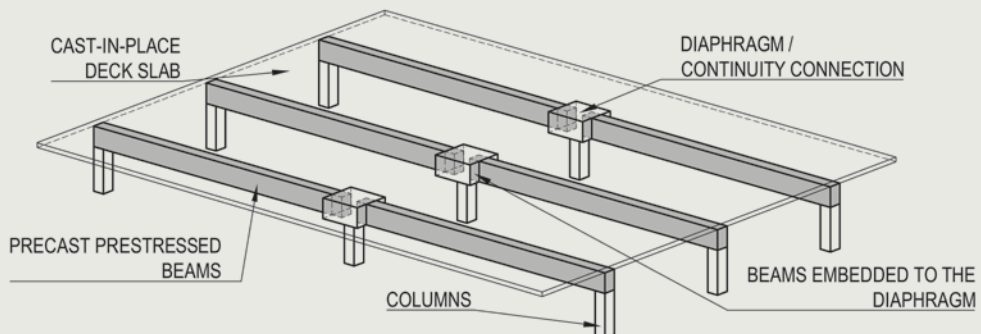
riaalisäästöjä. Tämän lisäksi jatkuvat rakenteet mahdollistavat momentin uudelleenjakaantumisen murtorajatilassa, mikä tekee rakenteen murtotavasta sitkeämmän ja kasvattaa myös rakenteen murtokapasiteettia.

Tämä kansainvälisesti paljon tutkittu ja käytetty menetelmä *Esijännitettyjen elementtien kytkeminen jatkuvaksi rakenteeksi työmaalla* on herättänyt kiinnostusta myös Suomessa, mutta menetelmä ei ole yleisesti käytössä.

Kansainvälisesti laajasti käytetyt ja tutkitut, jatkuvaksi kytketyt betonielementtisillat poikkeavat sekä kuormiltaan että dimensioiltaan suomalaisista pihakansirakenteista. Paikallisten rakennesuunnittelijoiden keskuudessa on ollut epävarmuutta, soveltuuko tämä kansallisesti vielä melko tuntematon rakenneratkaisu ylipäätään pihakansirakentamiseen.

Väitöskirjan motiivi on selvittää rakenteen käyttömahdollisuuksia pihakansirakentamisessa. Tavoitteena on tutkia rakennetta (kuva 3), jossa saavutetaan esijännittämisen, jatkuvuuden ja elementtirakentamisen hyödyt samassa paketissa.

3 Rakennemalli pihakansirakenteesta,  
joka on toteutettu työmaalla jatkuvaksi  
kytketyistä elementtipalkeista [1].



1) Betonin viruma- ja kutistumaominaisuuksien pitkäaikaisseuranta (2018)



2) Jatkoksen kapasiteetin ja sitkeyden kokeellinen testaus (2019)

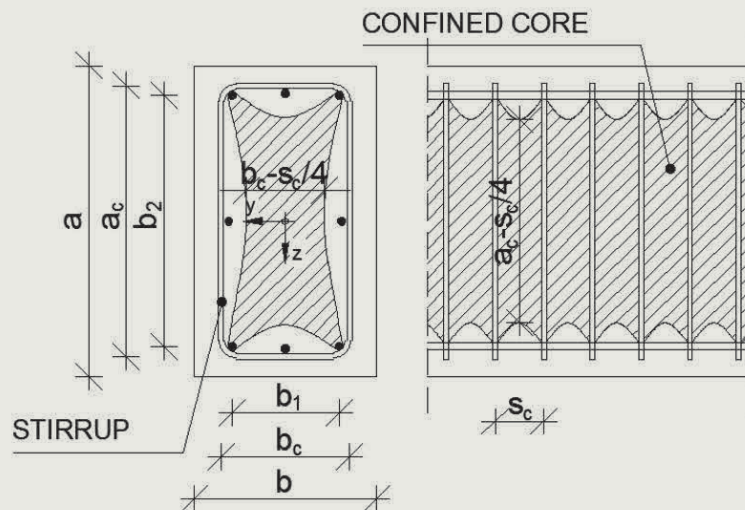
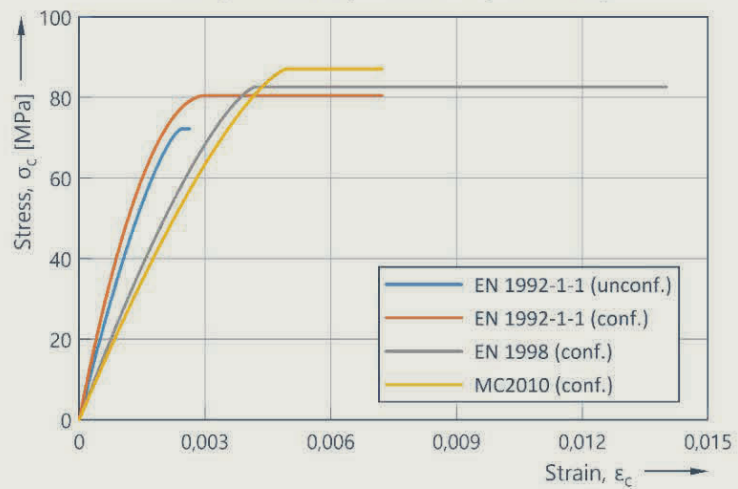


3) Jatkuvan rakenteen suuren mittakaavan koestus (2021)

4 Tampereen Yliopiston rakennustekniikan laboratoriossa toteutetun kokeellisen tutkimuksen vaiheet (muokattu lähteestä [1]).

5 Confinement-raudoituksen (= laajene-  
mista estävä raudoitus) vaikutus betonin  
materiaaliominaisuuksiin koepalkin tiheän  
haoituksen sisällä (muokattu lähteestä [2]).

Concrete ( $f_{cm}=72\text{MPa}$ ) stress-strain relation options for lateral  
compression  $\sigma_c=1.66\text{MPa}$  (Tests 6-8)



### Lupaavia tuloksia Hervannassa tehdystä kuormituskokeista

Tampereen yliopistossa toteutettiin vuosina 2018–2021 kokeellinen kolmivaiheinen tutkimus, joka keskittyi jatkuvaksi kytkettyjen elementtipalkkien jatkosalueen toimintaan (kuva 4). Koetuksessa valitut dimensiot ja materiaalit vastasivat suomalaisen pihakansirakentamiseen soveltuvia rakenteita. Tampereen Hervannassa sijaitsevassa koekuormituslaboratoriossa toteutetut kokeet sisälsivät mittavien, jopa 20 metriä pitkien, jatkuvaksi kytkettyjen betonielementtipalkkien koekuormituksia.

Kokeellisen tutkimuksen tulokset olivat positiivisempia kuin etukäteen osasimme odottaa. Koetulosten perusteella yksiaukkoisen esijännitetyn elementtipalkin kapasiteet-

tia ja vaurionsietokykyä voidaan kasvattaa jatkoksen avulla merkittävästi. Koetuksissa, jatkosalueen korkealla raudoitusasteella, saavutettiin jatkuvalla rakenteella jopa 55% lisää murtokapasiteettia verrattuna yksiaukkoiseen vaihtoehtoon.

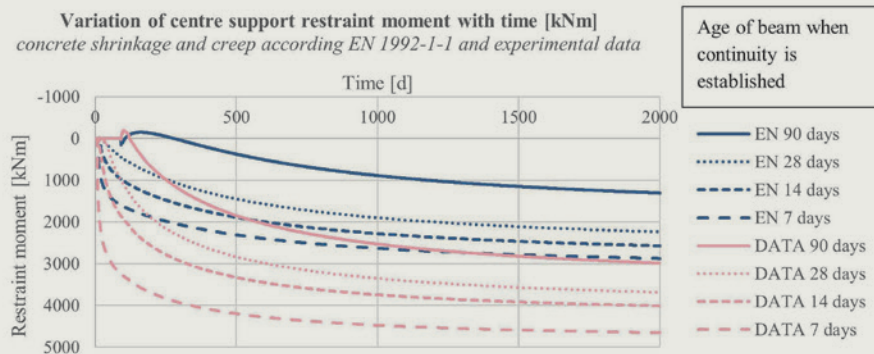
### Sitkeä murtotapa ja lisää kapasiteettia

Jo väitöskirjan aloitusvaiheessa oli tiedossa, että suomalaisten rakennesuunnittelijoiden keskuudessa tutkittu rakenne on herättänyt kiinnostusta. Jatkoksen toiminta murtorajatilassa on kuitenkin ollut osa-alue, joka on herättänyt epäilyä. Esijännitettyllä rakenteella punokset sijaitsevat palkin alareunassa ja aiheuttavat rakenteen alapintaan korkean puristusjännityksen. Kun tällainen rakenne kytketään jatkuvaksi, muodostuu välituen

läheisyyteen rakenteen alapintaan suuria puristusjännityksiä. Tutkimuksen yksi tavoitteista oli selvittää, Miten korkea puristusjännitys palkin alareunassa vaikuttaa rakenteen murtotapaan ja taivutuskapasiteettiin.

Lopulta koetuksissa huomattiin, että esijännitetyn elementtipalkin päädyn tiheä haoitus jatkosalueella mahdollistaa rakenteelle hyvinkin sitkeän toiminnan. Hakaraudoitus toimii ns. confinemet raudoituksena ja parantaa haoituksen sisällä olevan betonin lujuutta ja muodonmuutosominaisuuksia merkittävästi (kuva 5). Elementtipalkin korkea jännitysaste ei vaikuttanut jatkoksen murtokapasiteettiin heikentävästi, mutta sillä oli vaikutusta rakenteen halkeilukäyttäytymiseen. Jatkoksen muodonmuutokset olivat merkittäviä ennen lopullista murtoa.

6 Laskennalliset pakkomomentit Eurokoodin materiaalimalleilla (EN) ja testatuilla materiaaliominaisuuksilla (DATA) esimerkki pihakansirakenteelle [3].



### Pakkomomentit ja momentin uudelleen jakaantuminen tulee huomioida käyttörajatilamitoituksessa

Korkean kuormituskapasiteetin ja sitkeyden lisäksi tutkimuksessa nousivat esiin tutkitun rakenteen erityispiirteet käyttörajatilan kuormatasailla. Esijännitysvoima sijaitsee elementtipalkin alareunassa ja aiheuttaa rakenteeseen taipumaa ylöspäin. Betonin viruman vaikutuksesta taipumat kasvavat ajan kuluessa kuormituksen pysyessä vakiona. Esijännitysvoimasta aiheutuvat taipuma ylöspäin siis lisääntyvät ajan kuluessa. Yksiaukkoisella rakenteella tällä on vaikutusta ainoastaan rakenteen taipumiin, mutta tilanne on toinen, kun rakenne on kytketty jälkikäteen jatkuvaksi. Jatkos estää muodonmuutokset ja kiertymät välituella. Tästä syntyy rakenteeseen pakkovoimia, jotka vaikuttavat rakenteen taivutusrasitukseen käyttörajatilassa.

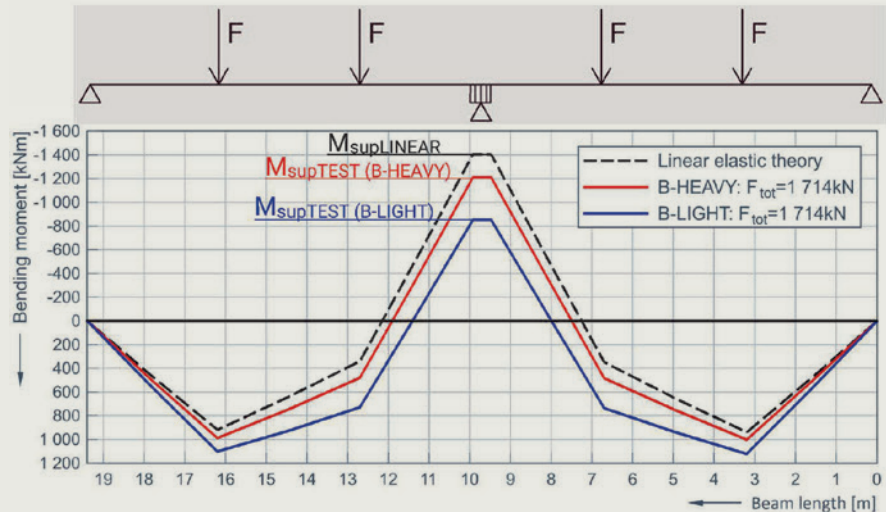
Viruman lisäksi betonille on tyypillistä kutistuminen. Kovettuessaan betoni kutistuu ympäristöolosuhteista, dimensioista ja betonista riippuen 0–1 promillea. Betonin kutistumalle on tyypillistä, että siitä suurin osa tapahtuu ensimmäisten kuukausien aikana ja tämän jälkeen kutistuminen hidastuu. Kun liittolaatta ja betonielementti liitetään yhteen, rakenne muodostuu sekä ”vanhasta” betonielementistä että ”nuoresta” liittovalusta. Tästä seuraa se, että eri aikaan valettujen betonien välillä on kutistuma ero, jota kutsutaan differentiaaliseksi kutistumaksi. Tästä aiheutuu rakenteeseen pakkovoimaa, joka pyrkii puolestaan

taivuttamaan rakennetta yleisen oletuksen mukaan alaspäin.

Viruman ja differentiaalisen kutituman aiheuttamat pakkomomentit vaikuttavat oleellisesti tutkitun rakenteen taivutusrasitukseen käyttörajatilassa. Pakkovoimat ovat tutkimusten perusteella pihakansirakenteiden mittasuhteilla todellisia, mutta yhtä aikaa vaikeasti ennustettavia (kuva 6). Pakkovoimien suuruuteen vaikuttaa merkittävästi betonin materiaaliominaisuudet, kytkettävien elementtien ikä kytkemishetkellä, jännevoiman päästöhetki sekä rakenteen mittasuhteet. Olemassa olevilla, uudessa eurokoodissakin esitellyillä, menetelmillä pakkovoimien vaihteluväli rakenteen käyttöaikana on laskennallisesti määriteltävissä. Vaikka pakkovoiman määrittämiseen liittyy epävarmuustekijöitä, on oleellista, että suunnittelija ymmärtää miten eri valinnat suunnittelussa ja rakentamisessa vaikuttavat pakkovoimien suuntaan ja suuruuteen.

Pakkovoimien lisäksi rakenteen käyttörajatila mitoituksessa tulee huomioida myös toinen erityispiirre. Jatkuvaksi kytketty elementtipalkki ei ole tasajäykkärakenne. Rakenne on kentästään esijännitetty, mutta jatkosalue on teräsbetoninen. Tästä seuraa se, että rakenne halkeilee kuormituksessa välituella huomattavasti aikaisemmin kuin kentästä. Tällöin välituen jäykkyys tippuu muuhun rakenteeseen verrattuna verrattain aikaisin. Halkeilun jälkeen rakenne ei ole enää täysin jatkuva. Tästä seuraa se, että tutkitulla rakenteella momentti uudelleen jakaantuu poikkeuksellisen voimak-

6 Suuren mittakaavan koestuksen tuloksia momentin uudelleen jakaantumisesta. Koepalkkien nimet B-HEAVY ja B-LIGHT kuvaavat jatkoksen rauditusmäärää [4].



kaasti jo käyttörajatilan kuormatasoilla. Väitöskirjassa on kehitetty käytännön suunnitteluun soveltuva yksinkertaistettu malli (kuva 8), jonka avulla tutkitun rakenteen käyttörajatilan momentin uudelleen jakaantumista voidaan arvioida, ilman epälineaarista analyysia.

Tutkimuksen vaikuttavuutta kuvaa se, että tutkitun rakenteen käyttörajatilan momentin uudelleen jakaantumiseen liittyvistä havainnoista syntyneet päätelmät on jo nyt sisällytetty uuteen tällä tietoa vuonna 2025 julkaistavaan Euroopan yhteiseen suunnittelunormiin eurokoodiin.

#### Kansallinen suunnitteluohje valmisteilla

Lopulta voidaan todeta, että esijännitettyjen elementtien kytkeminen jatkuvaksi rakenteeksi on tehokas menetelmä kasvattaa yksiaukkoisen esijännitetyn betonielementtipalkin kapasiteettia ja vaurionsietokykyä. Tutkimustulosten perusteella luottamus rakenteen sitkeään toimintaan on kasvanut, mutta samalla tietoisuus rakenteen erityispiirteistä käyttörajatilassa on tullut tietoon. Rakenteessa on potentiaalia ja se tuo kansallisille markkinoille uudenlaisen tehokkaan tavan toteuttaa pihakansirakenteita. Laajamittaisemman käyttöönoton mahdollistamiseksi, rakenteelle ollaan laatimassa erillinen kansallinen suunnitteluohje.

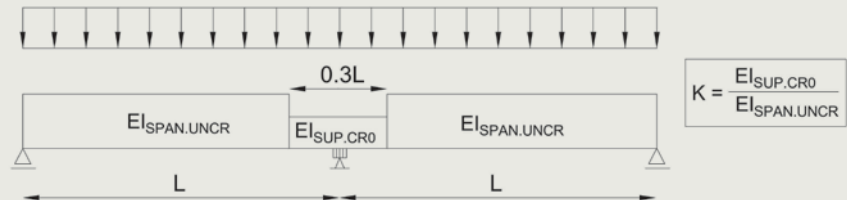
Tutustu väitöskirjaan verkossa:

<https://trepo.tuni.fi/handle/10024/152195>

Okko Sorina

**Ulla Kytölä** on valmistunut rakennustekniikan diplomi-insinööriksi Tampereen yliopistosta vuonna 2008. Tällä hetkellä Kytölä työskentelee Tampereella A-Insinöörit Suunnittelu Oy:ssä laatu-pääällikkönä. Diplomi-Insinööri Ulla Kytölän rakennustekniikan alaan kuuluva väitöskirja *Precast Prestressed Concrete Beams Made Continuous as a Deck Structure* tarkastettiin julkisesti Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnassa perjantaina 24.11.2023. Vastaväittäjänä toimi professori *Johan Silfwerbrand* Kunliga Tekniska Högskolanista Tukholmasta. Kustoksena toimi professori *Anssi Laaksonen* Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnasta.

8 Yksinkertaistettu rakennemalli jatkuvaksi kytetystä rakenteesta KRT rasiutusten laskentaan, kun välituen taivutusrasitus ylittää jatkoksen halkeilukapasiteetin [4].



#### Lähteet:

1. Kytölä, U. 2023. Precast Prestressed Concrete Beams Made Continuous as a Deck Structure. Tampereen Yliopisto. Väitöskirja. TUT Publ. 900. 182p.
  2. Kytölä, U., Asp, O. ja Laaksonen, A. 2021. Negative bending tests on precast prestressed concrete beams made continuous. *Structural Concrete* (2021) 22, 4 : 2223–2242p. <https://doi.org/10.1002/suco.202100043>
  3. Kytölä, U. ja Laaksonen, A. 2018. Prediction of Restraint Moments in Precast Prestressed Structures Made Continuous. *Nordic Concrete Research* 2: 73–93p.
  4. Kytölä, U., Tulonen, J., Asp, O., Nakari, T. ja Laaksonen, A. 2023. Experimental study of moment redistribution before yielding in precast prestressed concrete beams made continuous. *Structural Concrete* (2023): 1–20p. <https://doi.org/10.1002/suco.202201212>
- Tutustu väitöskirjaan verkossa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/152195>

#### Precast Prestressed Concrete Beams Made Continuous as a Deck Structure

A deck structure may be defined as the roof of an underground functional space. The surface of the deck structure is part of the yard area, and the space underneath the deck structure is commonly utilised for car parking. Deck structures are often heavily loaded, with their construction and design being a demanding process. Thus, they are also expensive to build. Prestressed precast concrete is a typical structural solution when constructing Finnish parking garages, but in heavily loaded deck structures their use is less common due to limited experience and information. Making simple-span girders continuous by using a cast-in-place connection between girders over supports is a widely used solution to increase the range of use of precast prestressed concrete bridge girders. Compared to simple-span girders, continuous beams have reduced bending moments, advanced robustness and the ability of moment redistribution. Although the benefits of the structure are clear there are also challenges, including time-dependent moment distribution, which is hard to predict, and limited information about the ductility of the continuity connection.

Scientific dialogue about the precast prestressed beams made continuous has existed mostly among bridge researchers. This thesis focuses on studying the possibility of using the structural system as a deck structure. The aim of this thesis is to obtain a better understanding of the behaviour of the whole structural system

that consists of precast prestressed beams made continuous. A three-stage experimental programme was undertaken in 2018-2021. The scope of the experimental studies encompassed the investigation of time-dependent restraint forces, behaviour of the continuity connection near failure and moment redistribution of the continuous beam.

This thesis points out that capacity of simple-span prestressed precast beams may be significantly increased by making them continuous on site. The moment distribution of the studied structure is affected by two factors: restraint forces and non-uniform bending stiffness along the beam length. The restraint forces may be considerable, from which their development should be affected in the design phase. Cracking of the non-prestressed deck slab part of the continuity connection leads to a loss of continuity that needs to be considered in the determination of moment distribution. The experimental studies confirmed that it is possible to use high deck slab reinforcement levels at the continuity connection and simultaneously reach ductile failure mode, if the stirrups of the precast beams and transverse reinforcement of the deck slab are adequate.

More information: The permanent address of the publication is

- <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-3148-1>