



Markus Rantanen

# Raudoituksen vaikutus rakenteen nurkassa sijaitsevan tyssäkantaisen harjateräsankkurin sivukartiomurtoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

14.4.2022

## Tiivistelmä

Tekijä:	Markus Rantanen
Otsikko:	Raudoituksen vaikutus rakenteen nurkassa sijaitsevan tyssäkantaisen harjateräsankkurin sivukartiomurtoon
Sivumäärä:	53 sivua + 1 liite
Aika:	8.4.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Rakennesuunnittelu
Ohjaajat:	Vanhempi Konsultti Kimmo Ylinen Lehtori Anne Aalto

---

Betonikappaleen sisään valettavia kiinnikkeitä käytetään rakenneosien liittämiseksi toisiinsa. Standardin EN 1992-4:2018 mukaan kiinnikkeellä on kuusi eri murtotapaa. Tässä tutkimuksessa tutkittiin betonin sivukartiomurtoa, joka tapahtuu, kun kiinnikkeen ankkurikappaleesta tulevat voimat halkaisevat betonin sivusta. Tutkimuksessa kiinnikkeinä käytettiin Anstarin ALP45-LC pultteja. Standardi ottaa kantaa vain pultin sijoitteluun, eikä salli raudoitusta estämään sivukartiomurtoa. Standardin mukaan suunniteltaessa betonikappaleen koko saattaa kasvaa niin suureksi, ettei sen toteuttaminen ole järkevää. Tutkimuksen tavoite oli selvittää, vaikuttaako pultin ympärille laitettu raudoitus pultin sivukartiomurtokapasiteettiin.

Tutkimusta varten valettiin seitsemän betonikappaletta, joissa oli yhteensä 13 pulttia. Pulttien ympärille laitettavaa sivukartiomurron estävää raudoitusta oli neljää tyyppiä. Pulttien kuormittamiseen käytettiin hydraulista reikätkunkkia. Kaikki pultit vedettiin murtoon tai vetokoealaitteiston maksimikapasiteettiin. Vetokokeissa ilman sivukartiomurron estävää raudoitusta olevan pultin sivukartiomurtokapasiteetiksi saatiin 84 % suurempi kuin standardin EN 1992-4:2018 mukaan laskettu kapasiteetti. Murtokartio syntyi lähes aina kohtisuoraan pultin harjateräsosien väliseltä keskilinjalta.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset osoittavat, että pultin ympärillä olevalla raudoituksella on positiivinen vaikutus pultin sivukartiomurtokapasiteettiin ja murtumisen sitkeyteen. Sivukartiomurtokapasiteetin laskeminen pienelle raudoitusmäärälle osoittautui haastavaksi. Tehtyjen vetokokeiden perusteella suositellaan raudoitusta sivukartiomurron estämiseksi. Raudoituksen ankkuroituminen murtokartioon tulee varmistaa. Suositellaan lisätutkimuksia erityisesti raudoitusmäärän vaikutuksesta sivukartiomurtokapasiteettiin, jotta voitaisiin laskelmilla luotettavasti arvioida tarvittava raudoitusmäärä.

Avainsanat: ankkuri, betonin sivukartiomurto, pultti, sivukartiomurto

## Abstract

Author: Markus Rantanen  
Title: Effect of Reinforcements on Blowout Failure of Anchorage Bolt  
Number of Pages: 53 pages + 1 appendice  
Date: 8 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Engineering  
Supervisors: Kimmo Ylinen, Senior Consultant  
Anne Aalto, Senior Lecturer

---

Fasteners are used to connect structural elements. According to the standard EN 1992-4:2018 the fastener has six different types of failures. This research was made to examine concrete's blowout failure, which happens when forces coming from the anchorage block break the concrete from the side. Fasteners used in the research were Anstar ALP45-LC bolts. The standard gives instructions only for placement of the fastener and it does not approve use of reinforcement preventing the blowout failure. Designing after the standard can lead to unreasonable large concrete structures. The primary objective was to determine if reinforcement around the bolt affects its blowout failure capacity.

In this research, seven concrete foundations were cast which had 13 bolts in total. There were four types of reinforcement made to prevent the blowout failure. A hydraulic equipment were used to apply pulling force to the bolt. All the bolts were pulled to the failure or to the hydraulic equipment's maximum capacity. In the pulling tests without any reinforcement preventing the blowout failure, the capacity was 84 % more than in calculations done according to EN 1992-4:2018. Failure cone almost always formed perpendicular from the middle line of bars in the bolt.

The results indicated that reinforcement around the bolt increases the bolt's blowout failure capacity and failures ductility. Calculating blowout failure capacity is difficult for a small amount of reinforcement. On the basis of the results, use of reinforcement to prevent blow out failure is recommended. Reinforcement should be anchored to the failure cone. Further research about how the amount of reinforcement affects to the blow out capacity is suggested so that it would be possible to reliably calculate needed amount of reinforcement.

Keywords: anchor, blowout failure, bolt, concrete blowout failure

## **Esipuhe**

Opinnäytetyö oli kiinnostava ja opettavainen tutkimus. Tutkimuksen sisältämät konkreettiset vetokokeet tekivät työstä entistäkin mielenkiintoisemman. Opinnäytetyön tilaajina toimivat Afry Finland Oy ja Anstar Oy.

Suuri kiitos Kimmo Yliselle (Afry Finland Oy) ohjauksesta ja avusta tutkimuksen aikana. Haluan myös kiittää Anne Aaltoa ohjauksesta ja työn tarkastamisesta.

Tutkimus ei olisi onnistunut ilman Anstar Oy:n tukea. Suuri kiitos Tero Viljakaiselle, Hannu Lumiaholle ja Esko Mäkiselle taloudellisesta tuesta ja asiantunteuksesta. Tutkimuksen vetokokeiden toteutus Metropolian tiloissa ei olisi onnistunut ilman apua. Kiitos Veijo Pulkkanen, Ihab Zaki Ahmed, Laura Ajanki ja Manar Belhout.

Vantaalla 14.4.2022

Markus Rantanen

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	9
1.1	Tutkimuksen taustat	9
1.2	Ongelma	11
1.3	Tavoite	11
1.4	Rajaukset	12
2	Aikaisemman tiedon kuvaus	12
2.1	Betonin sisällä tapahtuvat muodonmuutokset	12
2.2	Pultin ominaisuudet	15
2.3	Raudoitteiden vaikutus	16
2.4	Aikaisemmat tutkimukset	17
2.5	EN 1992-4:2018 Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 4: Betonirakeissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu	20
3	Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	23
3.1	Koekappaleet	23
3.1.1	Betoni	25
3.1.2	Pultit	26
3.1.3	Muotti	30
3.1.4	Raudoittamattoman pultin sivukartiomurtokapasiteetti	31
3.1.5	Raudoitus	32
3.2	Laitteisto	35
3.3	Koejärjestely ja toteutus	37
4	Tutkimustulokset	38
4.1	Yhteenveto tuloksista	38
4.2	Pultin jäykkyyden muutos eri kuormitustilanteissa	38
4.3	Raudoituksen määrän vaikutus sivukartiomurtokapasiteettiin	40
4.4	Tulosten yhdenmukaisuus aikaisempien tutkimusten kanssa	45
4.5	Tutkimukseen vaikuttavien muuttujien ja olettamusten analysointi	46
5	Johtopäätökset	47
5.1	Murtokartion suunta	47

5.2	Sivukartiomurto ilman raudoitusta	47
5.3	Raudoituksen vaikutus sivukartiomurtoon	48
5.4	Jäykkyyden muutos eri kuormitustilanteissa	50
6	Suositukset	51
7	Yhteenveto	51
	Lähteet	53
	Liitteet	
	Liite 1: Pulttien voima-siirtymäkuvaajat ja kuvat murtumista	

## Merkinnät ja lyhenteet

$A$	Pinta-ala
$A^0_{c,Nb}$	Yksittäisen ankkurin referenssiprojektioala reunaetäisyydellä $c_1$
$A_{c,Nb}$	Todellinen projektioala, jota rajoittavat vierekkäisten ankkureiden ( $s \leq 4 c_1$ ) limittyvät murtokartiot ja betonirakenneseosan reunojen läheisyys ( $c_2 \leq 2 c_1$ ) tai betonirakenneseosan paksuus
$A_h$	Tyssäkantaisen kiinnikkeen tyssäkannan kuormia kantava pinta-ala
$A_s$	Raudoituksen poikkileikkausala
$c_1$	Ankkurin reunaetäisyys suunnassa 1
$c_2$	Ankkurin reunaetäisyys suunnassa 2
$d_a$	Ankkurin halkaisija
$d_h$	Tyssäkantaisen kiinnikkeen tyssäkannan halkaisija
$F$	Voima
$F_b$	Tyssästä sivulle suuntautuva voima
$F_{c,R}$	Betonin sivukartiomurtokapasiteetti
$F_{s,R}$	Teräksen sivukartiomurtokapasiteetti
$f_{bd}$	Harjatangon tartuntalujuus
$f_{ck}$	Betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä
$f_{cm}$	Betonin lieriölujuuden keskiarvo
$f_{ctd}$	Betonin vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{ctm}$	Betonin keskimääräinen vetolujuus
$f_{u,s}$	Harjateräksen murtolujuus

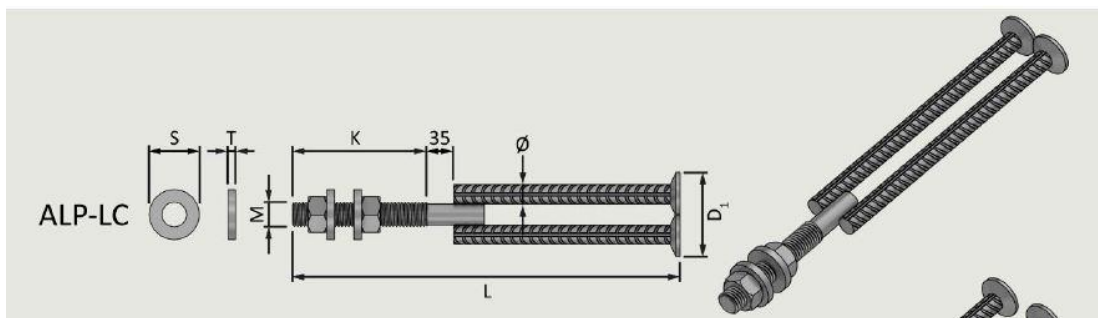
$f_u$	Materiaalin murtolujuus
$f_y$	Materiaalin myötölujuus
$f_{y,s}$	Harjateräksen myötölujuus
$l_b$	Ankkurointipituus
$l_{b,rqd}$	Ankkurointipituuden perusarvo
$N$	Voima
$N^0_{u,bc}$	Betonin sivukartiomurtokapasiteetti
$N^0_{Rk,cb}$	Yksittäisen kiinnikkeen ominaiskestävyys, johon viereiset kiinnikkeet tai muut reunat eivät vaikuta
$N_{Rk,cb}$	Betonin sivukartiomurtokestävyyden ominaisarvo vetokuormituksessa
$N_{Rk,k}$	Raudoituksen ankkurointikapasiteetti irtoavaan kartioon
$s_2$	Kiinnikeryhmän kiinnikkeiden kiinnikeväli
$\emptyset$	Tangon halkaisija
$\rho$	Paine
$\sigma_{sd}$	Tangon mitoitusjännitys kohdassa, josta ankkurointipituus mitataan
$\psi_{s,Nb}$	Kerroin, jolla otetaan huomioon betonirakenneseosan reunan läheisyyden aiheuttamat häiriöt betonin jännitysjakumaan betonin sivukartiomurrossa
$\psi_{g,Nb}$	Kerroin, jolla otetaan huomioon ryhmävaikutus betonin sivukartiomurrossa, kun useita kiinnikkeitä on rivissä yhdensuuntaisesti reunan kanssa
$\psi_{ec,Nb}$	Kerroin, jolla otetaan huomioon ryhmävaikutus, kun erisuuruiset vetokuormat vaikuttavat kiinnikeryhmän yksittäisiin kiinnikkeisiin betonin sivukartiomurrossa



# 1 Johdanto

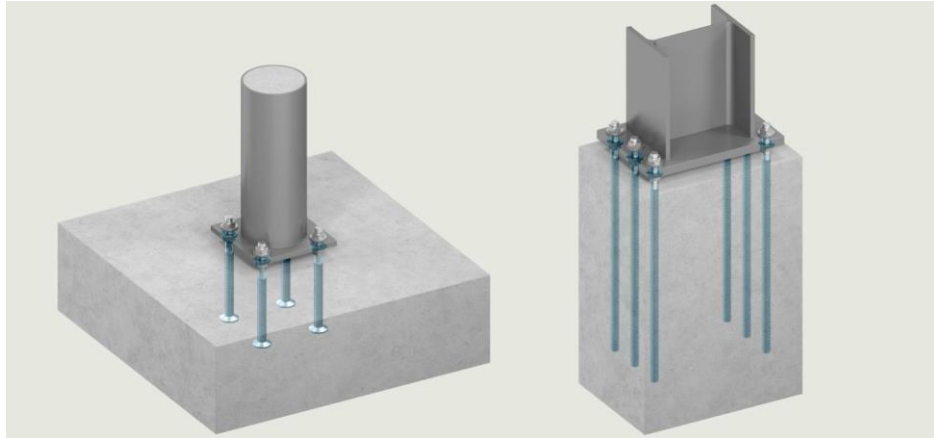
## 1.1 Tutkimuksen taustat

Pultteja käytetään rakentamisessa laajasti. Pulteilla voidaan liittää toisiinsa niin betoni-, puu- kuin teräsrakenteitakin. Yleisimmät pultit nykyaikana ovat M-kierrejärjestelmän pultteja, joissa M-kirjaimen jälkeen merkitään pultin halkaisija. Pultit on valmistettu teräksestä, mutta niitä voidaan valmistaa eri lujuuksilla.



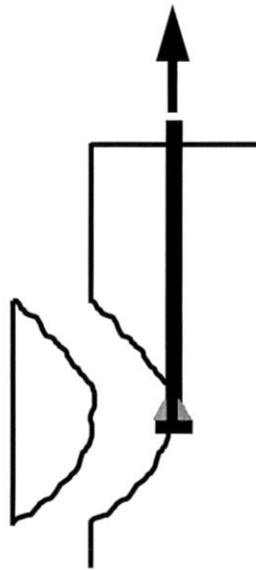
Kuva 1. Esimerkki teollisuusrakentamisessa käytetystä pulttikiinnikkeestä. [6, s. 7]

Teollisuusrakentamisessa käytetään ankkuripultteja (Kuva 1). Nämä kiinnittyvät betonin sisään ankkurikappaleella tai tartunnalla. Pulttiin voidaan kiinnittää esimerkiksi pilari tai palkki. Kuvassa 2 on esitetty kaksi esimerkkiä pilarin ja betoniperustuksen pulttiitoksesta. Vasemmassa kappaleessa pulteissa on tyssä, joka ankkuroi pultin betoniin. Toisessa kappaleessa pultin harjateräkset ankkuroivat pultin betoniin.



Kuva 2. Pilarin kiinnitys betonikappaleeseen pulteilla. [8]

Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon pulttien aiheuttamat muutokset rakentamiseen. Pulttiin tulevat vetovoimat aiheuttavat jännityksiä betoniin, jotka voivat rikkoa betonikappaleen. Yksi murtotapa on sivukartiomurto, jossa betonikappale murtuu sivusta pultin ankkurikappaleen kohdalta (Kuva 3).



Kuva 3. Havainnekuva betonin sivukartiomurrosta. [3, s. 13]

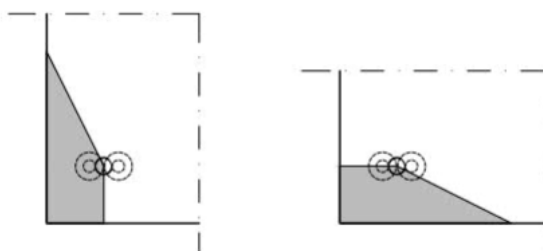
Standardissa EN 1992-4:2018 annetaan ohjeita pultin sijoitteluun betonikappaleessa, mutta ei ohjeisteta raudoituksen suunnittelua [4, s. 58]. Aikaisempia tutkimuksia aiheesta on hyvin vähän ja sen takia myöskään standardissa ei anneta ohjeita raudoituksen suunnitteluun. On kuitenkin tahoja, jotka antavat suunnitteluohjeita. Esimerkiksi Anstar Peruspultit käyttöohjeessaan ohjeistaa käyttämään raudoitteita betonin hauraan murron estämiseksi [6, s. 36].

## 1.2 Ongelma

Kun sivukartiomurtoa yritetään estää nykyisen standardin ohjeiden mukaan, betonikappaleen kokoa joudutaan kasvattamaan. Kun pilareita on tiheässä, betonikappaleen koon kasvattaminen pienentää rakennuksen käyttötilaa. Esimerkiksi pilarin alle tuleva betoniperustus voi olla lattiapinnan yläpuolella, jolloin perustuksen koko vaikuttaa suoraan rakennuksen käytettävään lattiapinta-alaan. Perustusten ollessa maan alla, ne vievät tilaa muilta perustoilta, kanaaleilta ja putkilta. Vastaavasti palkin liittyessä pilariin, pilarin kokoa voidaan joutua suurentamaan. Suunnittelemalla standardin EN 1992-4:2018 ohjeiden mukaan, peruspilarin koosta saattaa tulla niin suuri, ettei sitä ole järkevää toteuttaa.

## 1.3 Tavoite

Tämän tutkimuksen päätavoite on selvittää, voidaanko Anstarin ALP45-LC pulttikiinnikkeen sivukartiomurto estää raudoituksen avulla. Lisäksi pyritään arvioimaan, kumpi kahdesta pultin sijoitustavasta on vaarallisempi sivukartiomurron kannalta (Kuva 4).



Kuva 4. ALP pultin sivukartiomurtuman kaksi eri murtosuuntaa.

## 1.4 Rajaukset

Tässä tutkimuksessa tutkitaan sivukartiomurtoa, joka tapahtuu, kun betonikappaleeseen kiinnitettyjä pultteja vedetään ja pultin ankkurikappale on lähellä betonikappaleen kulmaa. Tutkimuksessa käytettiin normaalia betonin lujuutta ja tavallisia B500B raudotteita. Tutkimuksella halutaan selvittää, voiko raudoituksella lisätä kiinnikkeen sivukartiomurtokapasiteettia.

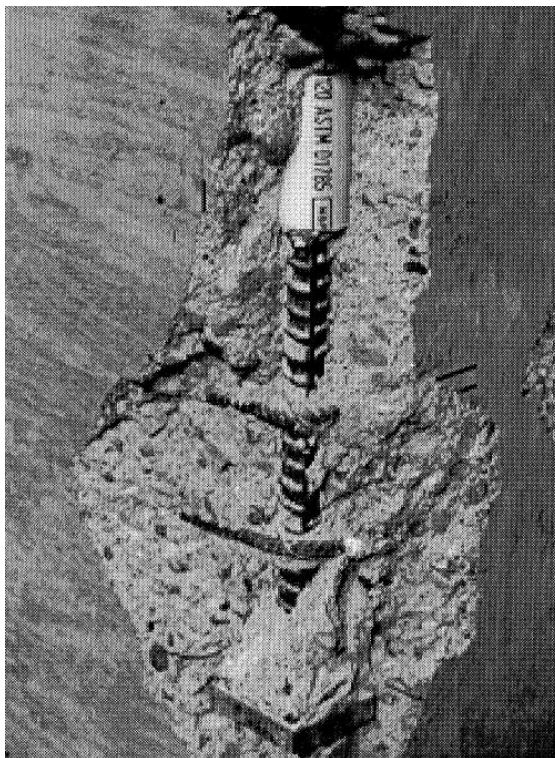
Tutkimuksessa on käytetty vain Anstarin ALP45-LC pultteja [6, s. 7]. Pulttien harjateräsoisuuden tartunnan vaikutusta sivukartiomurtokapasiteettiin ei tutkita.

Tutkimusta varten valmistetut betonikappaleet valmistettiin Metropolian tiloissa. Rahoittajina toimivat Afry Finland Oy ja Anstar Oy.

## 2 Aikaisemman tiedon kuvaus

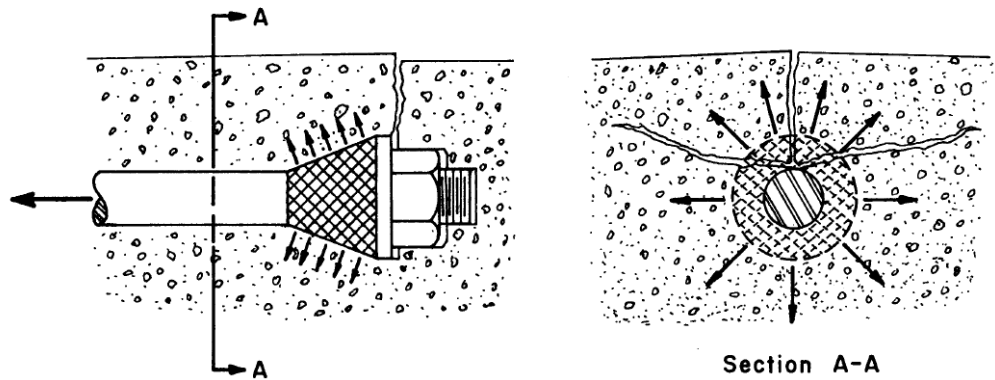
### 2.1 Betonin sisällä tapahtuvat muodonmuutokset

Rakenteessa, jossa pilari tai palkki on kiinnitetty betonikappaleeseen pulteilla, pulttiin kohdistuva veto aiheuttaa pultin ankkurikappaleesta lähtevän vaakasuuntaisen voiman, joka halkaisee betonikappaleen sivusta (Kuva 5).

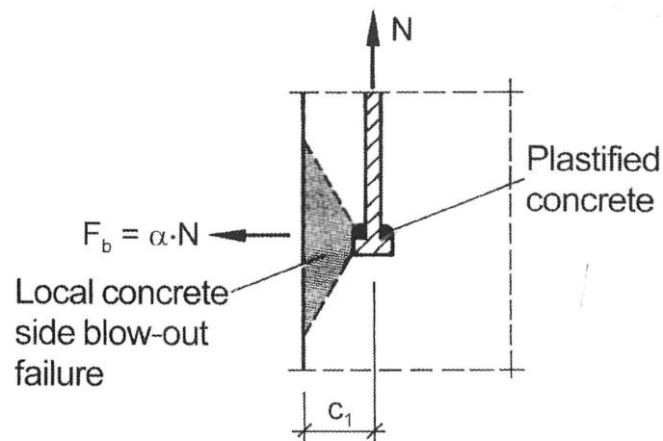


Kuva 5. Betonin sivukartiomurto. [3, s. 165]

Kun pulttia vedetään ylöspäin, tyssän aiheuttamat jännitykset aiheuttavat kartion muotoisen murtuman, joka muodostuu tyssästä sivulle. Kuvassa 6 näkyy tyssän yläpuolelle muodostunut kartio murskaantunutta betonia. Kuvassa näkyy myös tyssästä sivulle syntyvät voimat. [1, s. 54.]



Kuva 6. Tyssän yläpuolelle muodostunut kartio murskautunutta betonia. [1, s. 54]



Kuva 7. Tyssästä sivulle suuntautuva voima. [2, s. 93]

Tyssästä sivulle päin tulevaa voimaa voidaan arvioida alla olevilla kaavoilla. Kuvas-  
vassa 7 esitetään tyssästä sivulle suuntautuva voima  $F_b$ . [2, s. 93]

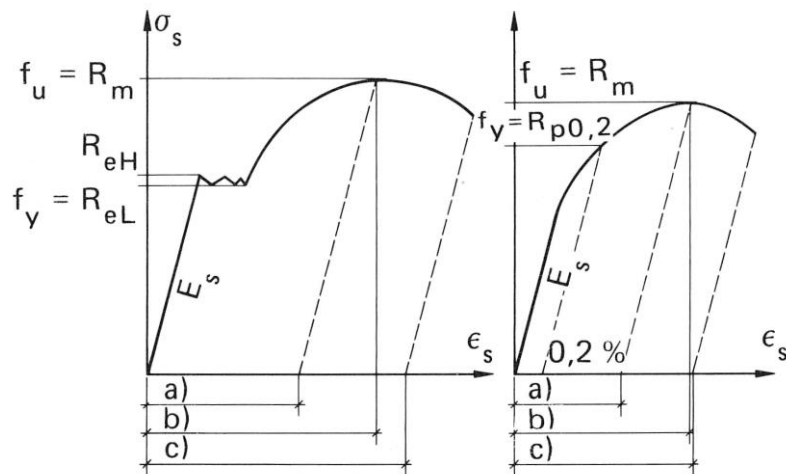
$$F_b = \alpha N \quad (1)$$

, missä  $\alpha = 0,11 \left( \frac{\rho}{f_{cc,200}} \right)^{0,5} \quad (2)$

, missä  $N$  on pulttia vetävä voima  
 $f_{cc,200}$  on 200 mm betonikuution puristuslujuus  
 $\rho$  on tyssäkannan päälle muodostuva paine.

## 2.2 Pultin ominaisuudet

Kun pulttiin kohdistuu vetovoimaa, se venyy. Pultin venyminen voi olla elastista, jolloin tapahtuu vain palautuvia muodonmuutoksia, tai plastista jolloin tapahtuu pysyviä muodonmuutoksia. Kuvassa 8 on esitetty betoniteräksen jännitys-venymäkäyrä. Kuvaajassa  $f_y$  on myötöraja, jossa alkaa syntyä pysyviä muodonmuutoksia. Kun voimaa lisätään teräs myötölujittuu kunnes se saavuttaa murtolujuuden  $f_u$ .



Kuva 8. Betoniteräksen jännitys-venymäkuva. [9, s. 22]

Pultin myötölujuus  $N_y$  ja murtolujuus  $N_u$  lasketaan alla olevilla kaavoilla.

$$N_y = f_y A \quad (3)$$

$$N_u = f_u A \quad (4)$$

, missä  $N_y$  on pultin myötölujuus  
 $N_u$  on pultin murtolujuus  
 $f_y$  on teräksen myötölujuus  
 $f_u$  on teräksen murtolujuus  
 $A$  on pultin poikkileikkauksen pinta-ala

### 2.3 Raudoitteiden vaikutus

Raudoitus betonissa kasvattaa rakenteen vetokestävyyttä, koska teräksen vetokestävyys on parempi kuin betonin. Teräs ankkuroituu betoniin harjateräksen harjojen välityksellä.

Raudoituksen vaikutusta sivukartiomurtokapasiteettiin voidaan arvioida laske-  
 malla kuinka paljon raudoitus voi ottaa voimaa vastaan tartunnan pettämättä tai  
 teräksen myötäämättä. Harjatankojen tartuntalujuus  $f_{bd}$  lasketaan EN 1992-1-1  
 mukaan alla olevalla kaavalla [5, s. 132]. Kaavoissa on käytetty karakteristisia  
 arvoja.

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (5)$$

, missä  $\eta_1$  on kerroin, joka liittyy tartuntaolosuhteiden laatuun ja tangon si-  
 jaintiin betonoinnin aikana

$\eta_1 = 1,0$  kun 'hyvät' olosuhteet saavutetaan

$\eta_1 = 0,7$  kaikissa muissa tapauksissa ja liukuvaletuissa rakenne-  
 osissa oleville tangoille, ellei voida osoittaa, että 'hyvät' tartuntaolo-  
 suhteet vallitsevat

$\eta_2$  riippuu tangon halkaisijasta

$\eta_2 = 1,0$  kun  $\varnothing \leq 32$  mm



$$\eta_2 = (132 - \varnothing)/100 \text{ kun } \varnothing > 32 \text{ mm}$$

$f_{ctd}$  on betonin vetolujuuden mitoitusarvo

Ankkurointipituuden perusarvo teräksen myötölujuudelle lasketaan alla olevalla kaavalla [5, s. 133]. Kaavaan ollaan sijoitettu tangon mitoitusjännityksen  $\sigma_{sd}$  paikalle tangon myötölujuus  $f_y$  eli tangon maksimijännitys.

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\varnothing}{4}\right) \left(\frac{f_y}{f_{bd}}\right) \quad (6)$$

, missä  $\varnothing$  on tangon halkaisija

$f_y$  on tangon maksimijännitys

Raudoituksen ankkurointikapasiteettia myötölujuutta pienemmillä jännityksillä  $N_{Rk,k}$  voidaan arvioida alla olevalla kaavalla:

$$N_{Rk,k} = f_y \frac{l_b}{l_{b,rqd}} A_s \quad (7)$$

, missä  $f_y$  on tangon maksimijännitys

$l_b$  on ankkurointipituus

$l_{b,rqd}$  on ankkurointipituuden perusarvo

$A_s$  on tangon poikkileikkauksen pinta-ala

## 2.4 Aikaisemmat tutkimukset

Aiheesta on tehty tutkimuksia, mutta melko niukasti. Sivukartiomurtumaa on tutkittu monessa tutkimuksessa, mutta raudoituksen vaikutuksesta löytyy hyvin vähän tietoa.

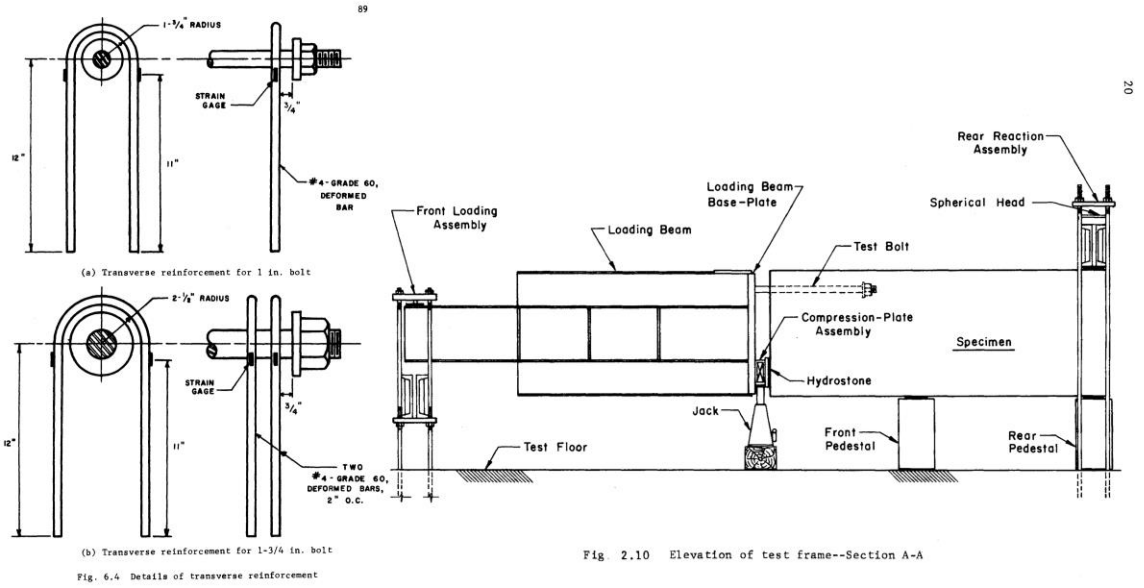
Kirjassa *“Anchorage in Concrete Construction”* [2] Rolf Eligehausen toteaa, että aiheen vähäisistä tutkimuksista johtuen, siitä ei voida antaa suunnitteluohjeita:

*“Limited studies have shown that the failure load associated with a local concrete side blow-out failure can be increased by confining the concrete with closely spaced stirrups or spiral reinforcement (Hasselwander, G; Jirza J.; Breen J (1987), Eligehausen, Varga (1995), De Vries (1996)) Again, there are insufficient test results to support the development of reliable predictive equation for this condition.”* [2, s. 97.]

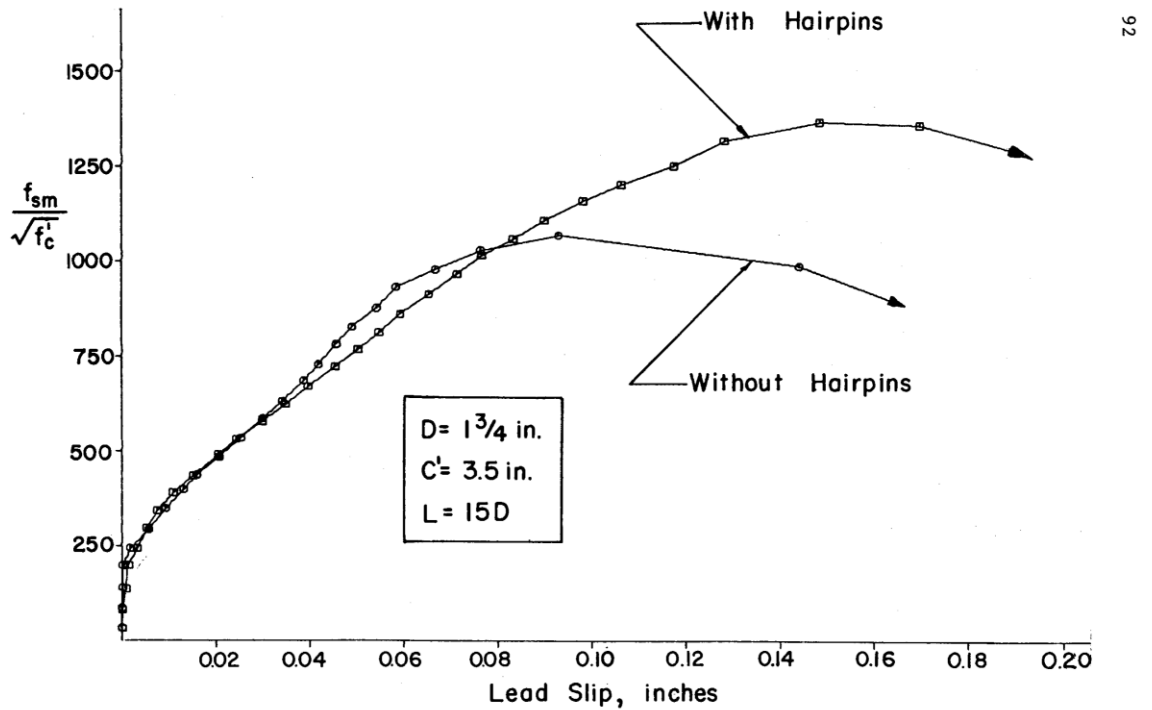
DeVries, R. A tutki väitöskirjassaan *“Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete”* [3] sivukartiomurron estämistä raudoituksella. Tutkimuksessa pultin ympärillä olevat teräkset oli sijoitettu kiinni pulttiin (Kuva 5). Hän havaitsi raudoituksen kasvattavan ankkurin sitkeyttä, mutta ei murtokapasiteettia:

*“Based on results from these tests, transverse reinforcement did not contribute to the ultimate capacity of the anchorage. The ductility (maintaining load after failure through large deflections) of the anchorage was increased by placing a large amount of transverse reinforcement ( $A_{tr}$  approximately 50 % of the bar area) near the head.”* [3, s. 122.]

Hasselwander, G ym. tutkivat kirjassaan *“Strength and behavior of anchor bolts embedded near edges of concrete piers”* sivukartiomurtoa ja myös hieman raudoituksen vaikutusta. Kokeissa pultin ympäri lisättiin haat estämään sivukartiomurtoa (Kuva 9). Hakojen lisääminen kasvatti ankkurin maksimikapasiteettia ja sitkeyttä (Kuva 10).



Kuva 9. Tutkimuksessa käytetty rauditus ja koejärjestely. [1, s. 89, s. 20]



Kuva 10. Raudittamattoman (Without Hairpins) ja rauditetun (With Hairpins) pultin kuvaajat. [1, s. 92]

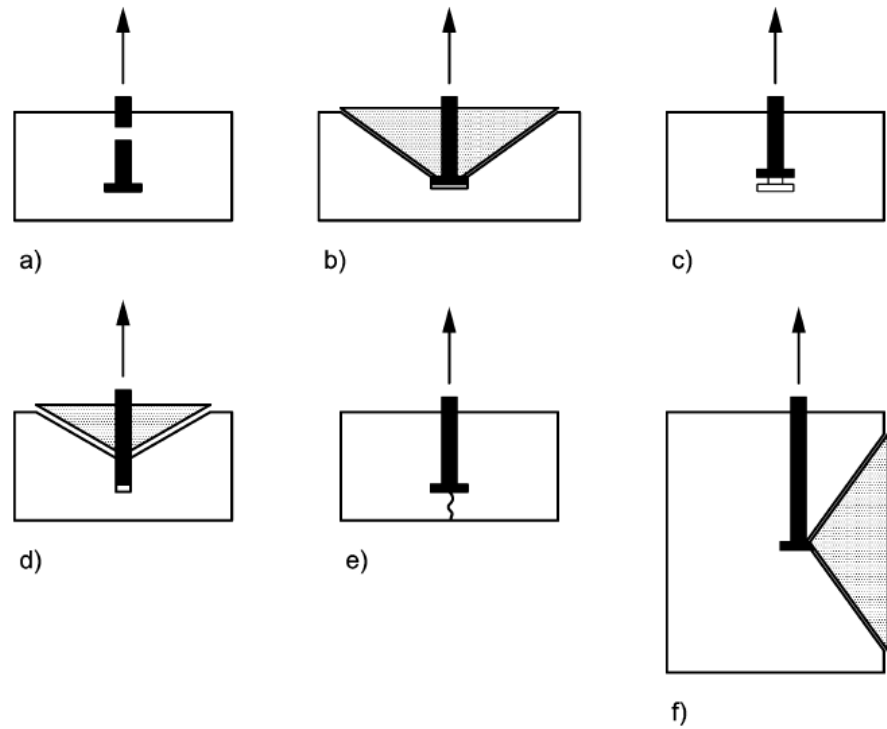
Johtopäätöksissä todetaan, että raudoituksella voidaan saada huomattavasti korkeampi sivukartiomurtokapasiteetti, mutta lisätutkimuksia tarvitaan ennen kuin tarkkoja suosituksia voidaan antaa:

*”It can be concluded that the presence of transverse reinforcement can result in a significantly higher ultimate strength and ductility than would otherwise be available with a relatively shallow clear cover. It can be seen that once clear cover splits away from the core the hairpins can be very effective in transmitting the large forces normal to the surface which are developed as the anchor bolt fails.*

*Obviously, additional research is required before definite recommendations can be made concerning the manner in which transverse reinforcement should be designed, but it seems reasonable to assume that sufficient amounts of transverse reinforcement can adequately compensate for shallow clear cover.” [1, s. 96.]*

## 2.5 EN 1992-4:2018 Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 4: Betonirakeissa käytettävien kiinnikkeiden suunnittelu

Standardi EN 1992-4:2018 ohjeistaa suunnittelun kuutta eri kiinnikkeen murtotapaa varten. Nämä ovat a) teräsmurto, b) betonin kartiomurto, c) ulosvetomurto, d) kemiallisten ankkureiden yhdistetty ulosvetomurto ja betonimurto, e) betonin halkaisumurto ja f) betonin sivukartiomurto (Kuva 11). Tässä tutkimuksessa tutkitaan sivukartiomurtoa. [4, s. 46.]



Kuva 11. Vetokuorman aiheuttamat murtotavat standardissa EN 1992-4:2018. [4, s. 46]

Standardin EN 1992-4 luvussa 7.4.1.7 käsitellään betonin sivukartiomurtoa. Betonin sivukartiomurto voi tapahtua, kun kiinnikkeen ankkurikappale on lähellä betonin reunaa ja kiinnike on suhteellisen pitkä. Standardin ohjeistus sivukartiomurron estämiseksi liittyy ainoastaan kiinnikkeen sijoitteluun [4, s. 58]. Standardissa EN 1992-4:2018 ei ohjeisteta raudoituksen suunnittelua. Standardissa esitetty kaava ottaa huomioon ainoastaan ankkurin sijainnin eikä käsittele raudoitusta lainkaan. Ankkurit, joiden reuna-etäisyys on  $c > 0,5 h_{ef}$ , voidaan jättää pois sivukartiomurtotarkastelusta [4, s. 82]. Alla on esitetty kuinka betonin sivukartiomurtokestävyyden ominaisarvo  $N_{Rk,cb}$  lasketaan standardin mukaan.

$$N_{Rk,cb} = N^0_{Rk,cb} \frac{A_{c,Nb}}{A^0_{c,Nb}} \psi_{s,Nb} \psi_{g,Nb} \psi_{ec,Nb} \quad (8)$$

, missä 
$$N^0_{Rk,cb} = k_5 c_1 \sqrt{A_h} \sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

$$A^0_{c,Nb} = (4c_1)^2 \quad (10)$$

$$A_{c,Nb} = 4c_1(c_2 + s_2 + 2c_1) \quad (11)$$

$$\psi_{s,Nb} = 0,7 + 0,3 \frac{c_2}{2c_1} \leq 1 \quad (12)$$

$$\psi_{g,Nb} = \sqrt{n} + (1 - \sqrt{n}) \frac{s_2}{4c_1} \geq 1 \quad (13)$$

$$\psi_{ec,Nb} = \frac{1}{1 + 2e_N / (4c_1)} \quad (14)$$

, missä  $N^0_{Rk,cb}$  on yksittäisen kiinnikkeen ominaiskestävyys, johon viereiset kiinnikkeet tai muut reunat eivät vaikuta.

$k_5 = 8,7$  halkeilleelle betonille  
 $= 12,2$  halkeilemattomalle betonille

$c_1$  on reunaetäisyys suunnassa 1

$f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

$A_h$  on tyssäkannan kuormia kantava pinta-ala (Kaava 4)

$A^0_{c,Nb}$  on yksittäisen ankkurin referenssiprojektioala reunaetäisyydellä  $c_1$

$A_{c,Nb}$  on todellinen projektioala, jota rajoittavat vierekkäisten ankkureiden ( $s \leq 4c_1$ ) limittyvät murtokartiot ja betonirakenneseosan reunojen läheisyys ( $c_2 \leq 2c_1$ ) tai betonirakenneseosan paksuus

$s_2$  on ankkurien välinen keskiöetäisyys,  $s_2 \leq 4c_1$

$\psi_{s,Nb}$  on betonirakenneseosan nurkan läheisyyden aiheuttamat häiriöt betonin jännitys jakaumaan

$c_2$  on reunaetäisyys suunnassa 2,  $c_2 \leq 2c_1$

$\psi_{g,Nb}$  on ryhmävaikutus, kun  $n$  kpl kiinnikkeitä on rivissä yhden-suuntaisesti reunan kanssa

$n$  on yhdessä rivissä olevien kiinnikkeiden määrä

$\psi_{ec,Nb}$  on ryhmävaikutus, kun ankkuriryhmän yksittäisiin ankkureihin vaikuttaa erisuuruinen voima

$e_N$  on kiinnikkeiden vetovoiman resultantin epäkeskisyys vedettyjen kiinnikkeiden painopisteeseen nähden

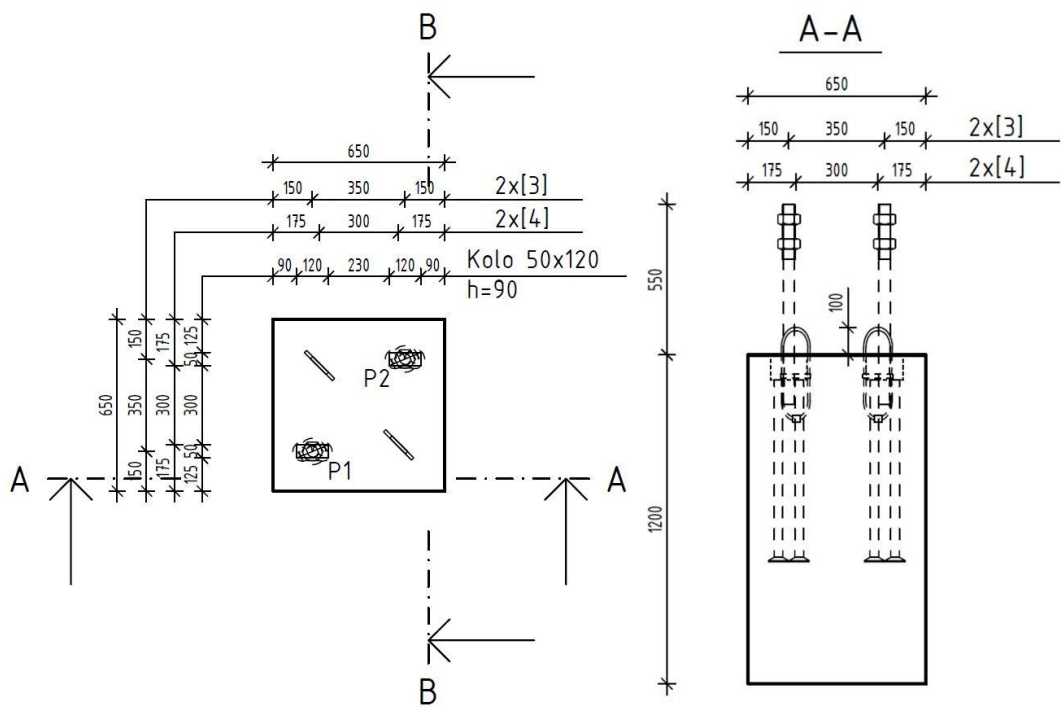
### 3 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

#### 3.1 Koekappaleet

Tutkimusta varten valettiin teräsbetonikappaleita, joihin upotettiin peruspultteja. Koekappaleita tehtiin 7 kappaletta, joissa oli yhteensä 13 pulttia (Kuva 12). Koekappaleiden jälkeen kappaleet toimitettiin kierrätettäväksi.



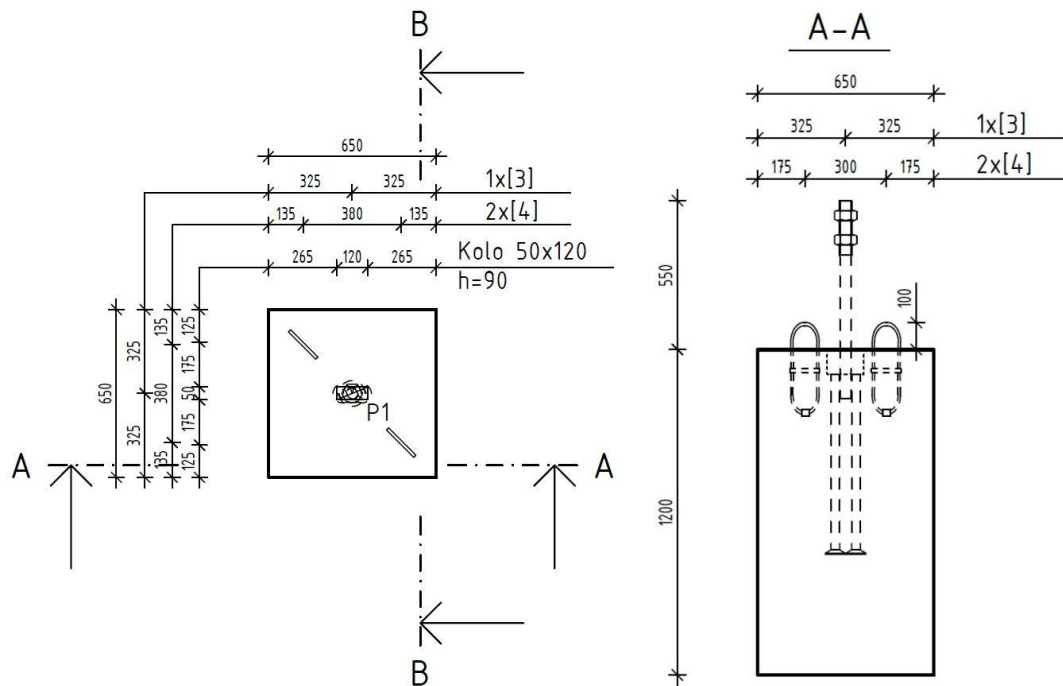
Kuva 12. Tutkimusta varten valetut seitsemän koekappaletta.



Kuva 13. Kuuteen betonikappaleeseen upotetut pulkit ja niiden sijoittelu.



Kuuteen koekappaleeseen upotettiin 2 pulttia vastakkaisiin nurkkiin (Kuva 13). Seitsemänteen kappaleeseen upotettiin vain yksi pultti, koska tällä haluttiin testata, miten pultti käyttäytyy ilman reunan vaikutusta (Kuva 14). Tässä kappaleessa ei ollut raudoitusta sivukartiomurron estämiseen. Tällä pultilla testattiin myös pultin jäykkyyden muutosta, kun pultti vedetään myötään useasti.



Kuva 14. Seitsemänteen kappaleeseen upotettu pultti.

### 3.1.1 Betoni

Tutkimuksessa käytettiin valmisbetonia, jonka notkeusluokka oli S3 ja maksimi raekoko 16 mm. Betoni valettiin muotteihin noin 40 cm kerroksissa. Betonin puristuslujuus testattiin 80 päivää valun jälkeen ja kuutiopuristuslujuuden keskiarvoksi saatiin 27,1 MPa (Taulukko 1). Puristuskokeet tehtiin Vahanan Oy:n laboratoriossa.

Taulukko 1. Betonin puristuslujuuskokeet.

tunnus	lujuus- luokka	valupäivä	ikä / d	koestus- päivä	mitat (k) / mm	mitat (l) / mm	mitat (h) / mm	tiheys / kg/m <sup>3</sup>	voima / kN	kuutiolujuus / Mpa
MR1	C20/25	21.12.2021	80	11.3.2022	149	149	152	2240	598,8	27,0
MR2	C20/25	21.12.2021	80	11.3.2022	149	149	149	2260	608,0	27,4
MR3	C20/25	21.12.2021	80	11.3.2022	149	149	152	2230	596,3	26,9

Betonin keskimääräinen vetolujuus  $f_{ctm}$  betoneille  $\leq C50/60$  lasketaan standardin EN 1992-1-1 mukaan alla olevalla kaavalla [5, s. 30].

$$f_{ctm} = 0,30f_{ck}^{2/3} \quad (15)$$

, missä  $f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

Lieriölujuuden ominaisarvo lasketaan alla olevalla kaavalla [5, s. 30].

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (16)$$

Puristuslujuuskokeissa testattavat betonikuutiot olivat sivumitoiltaan 150 mm.

Puristuslujuuden muutos muotoon  $f_{cc,200}$  lasketaan alla olevalla kaavalla [11, s. 32].

$$f_{cc,200} = \frac{f_{cc,150}}{0,95} \quad (17)$$

### 3.1.2 Pultit

Tutkimuksessa käytettiin Anstarin ALP45-LC tuotteeseen perustuvia pultteja [6, s. 7]. Pulttien ylempi osa oli pidempi kuin normaalisti, jotta pulttien vetäminen reikätkunilla onnistuisi (Kuva 16). Pultti koostuu kahdesta osasta, jossa ylempi osa on kierretanko ja alempi osa koostuu kahdesta harjateräksestä. Harjateräksset on hitsattu kiinni kierreosaan sen molemmille puolille. Harjaterästen päät on tyssäty, jotta pultti ankkuroituu betonin sisään. Pultin mitat on esitetty kuvassa

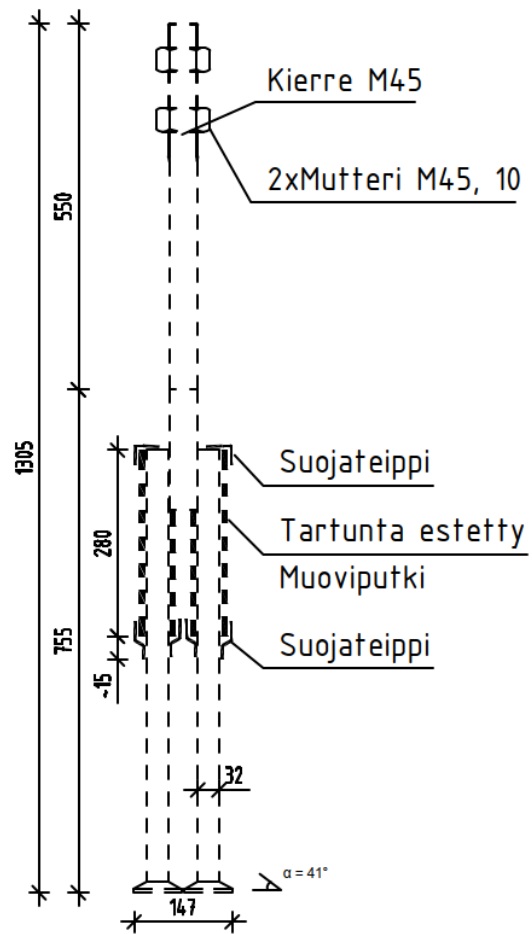
15. Pultin yläosa on valmistettu ImacroM -teräksestä ja alaosa on harjaterästä B500B. Teräslaadun ImacroM myötölujuus  $f_y$  on 700 MPa ja murtolujuus  $f_u$  on 800 MPa [12]. B500B teräksen myötölujuus  $f_{y,s}$  on 500 MPa ja murtolujuus  $f_{u,s}$  on 540 MPa [10, s. 12]. Pultin tyssäkkannan kuormia kantava pinta-ala  $A_h = 6088 \text{ mm}^2$ , harjateräksen poikkileikkausala  $A_{s,B500B} = 1608 \text{ mm}^2$  ja kierteen jännityspinta-ala  $A_{s,ImacroM} = 1306 \text{ mm}^2$  [6]. Alla on laskettu pultin kierreosan lujuudet  $F_i$  ja harjateräsosan lujuudet  $F_{i,s}$ .

$$F_y = 700 \text{ N/mm}^2 \times 1306 \text{ mm}^2 = 914,2 \text{ kN} \quad (18)$$

$$F_u = 800 \text{ N/mm}^2 \times 1306 \text{ mm}^2 = 1044,8 \text{ kN} \quad (19)$$

$$F_{y,s} = 500 \text{ N/mm}^2 \times 1608 \text{ mm}^2 = 804,2 \text{ kN} \quad (20)$$

$$F_{u,s} = 540 \text{ N/mm}^2 \times 1608 \text{ mm}^2 = 868,3 \text{ kN} \quad (21)$$



Kuva 15. Pultin mitat.



Kuva 16. Tutkimukseen toimitetut pultit.

Ennen valua pulttien harjateräsosien yläpuolelle kiinnitettiin noin harjateräksen paksuinen eristepala, joka ylettyi betonipintaan saakka (Kuva 17). Eristepalojen annettiin olla paikallaan siihen asti, että betoni oli kovettunut, jonka jälkeen ne poistettiin. Tällä pyrittiin mahdollistamaan pultin vapaa nouseminen betonikapaleesta vetokokeen aikana, sillä todellisessa rakenteessa ei ole vetokoelaitteistoa perustuksen päällä. Vetokoelaitteisto tukeutuu pultin päälle, jolloin harjaterästen päällä oleva betoni vastustaisi pultin nousemista kokeen aikana.



Kuva 17. Valun ajaksi harjaterästen yläpuolelle kiinnitetyt eristepalat.

### 3.1.3 Muotti

Betonivaluun käytetyt muotit tehtiin paikan päällä. Muotti toteutettiin tekemällä yksi pitkä muotti, johon tehtiin välilevyt erottamaan betonikappaleet toisistaan (Kuva 18). Materiaaleina käytettiin filmi- ja havuvaneria, lautaa ja muottisiteitä. Pultit ripustettiin oikeaan kohtaan lautojen avulla. Vanerit öljyttiin muottiöljyllä noin 12 tuntia ennen valua.



Kuva 18. Muotti.

### 3.1.4 Raudoittamattoman pultin sivukartiomurtokapasiteetti

Standardin EN 1992-4 mukaan laskemalla raudoittamattoman pultin sivukartiomurtokapasiteetiksi  $N_{Rk,cb}$  saadaan 368,2 kN. Kun kapasiteetti lasketaan siten, että ankkuri huomioidaan yhtenä isona ankkurina, sivukartiomurtokapasiteetiksi saadaan 428,0 kN (Taulukko 2).



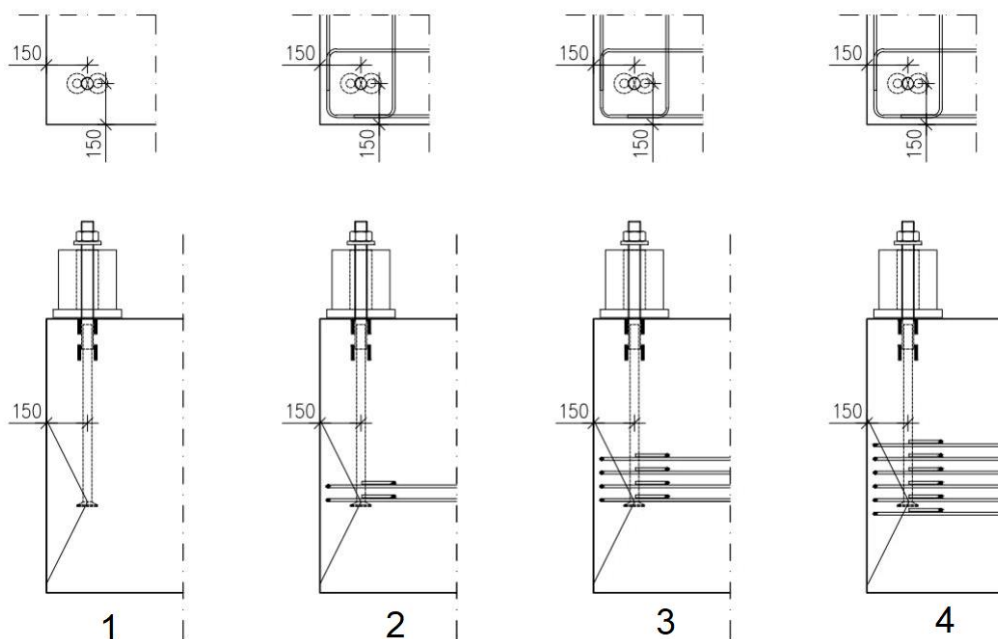
Taulukko 2. Standardin EN 1992-4:2018 sivukartiomurtokaavoihin syötetyt arvot [4, s. 58].

$N_{Rk,cb}^0$	474,7	kN	671,3
$k_5$	12,2		12,2
$c_1$	150	mm	150,0
$f_{ck}$	22,1		22,1
$A_h$	3044,2	mm	6088,4
$d_h$	70	mm	70,0
$d_a$	32	mm	32,0
$A_{c,Nb}$	328500	mm <sup>2</sup>	270000
$s_2$	97,5	mm	0,0
$c_2$	150	mm	150,0
$A_{c,Nb}^0$	360000	mm <sup>2</sup>	360000,0
$\psi_{s,Nb}$	0,85		0,85
$\psi_{g,Nb}$	1,0		1,0
$\psi_{ec,Nb}$	1,0		1,0
$N_{Rk,cb}$	368,2	kN	428,0

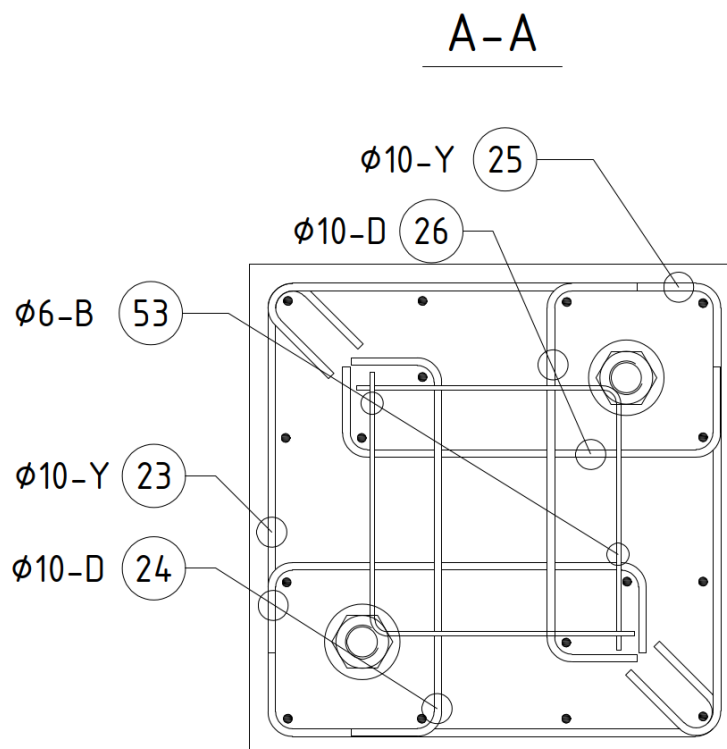
### 3.1.5 Raudoitus

Tutkimuksen teräkset tilattiin valmiiksi taivutettuina, mutta raudoitteiden kasaus suoritettiin paikan päällä. Tutkimuksessa käytetyt teräkset olivat lujuusluokkaa B500B, jonka myötölujuus  $f_y = 500$  MPa ja murtolujuus  $f_u = 540$  MPa, standardin SFS 1300 mukaan [10, s. 12]. Tutkimuksessa käytetyt teräkset olivat halkaisijaltaan 8 mm ja 10 mm.





Kuva 19. Pulttien eri raudoitustyypit.



Kuva 20. Raudoitukset sivukartiomurron estämiseen. Teräkset tunnuksilla 23-26 ovat estämässä sivukartiomurtoa ja teräkset tunnuksella 53 ovat työteräksiä.

Koekappaleiden raudoitus suunniteltiin niin, että sivukartiomurtokapasiteetti tulisi rajoittavaksi. Kaikki kappaleet raudoitettiin samalla tavalla lukuun ottamatta sivukartiomurron estävää raudoitusta. Sivukartiomurtoa vastaan suunniteltiin raudoitus, joka kiertää pultin ympäri tyssän kohdalla tai sen yläpuolella (Kuva 19, Kuva 20). Raudoitustyyppinä oli neljä erilaista ja jokaista raudoitustyyppiä kohti kolme pulttia (Taulukko 3).

Taulukko 3. Raudoitustyyppit betonikappaleissa.

Tunnus	Raudoitustyyppi	Teräs 23, 25 / kpl	Teräs 24, 26 / kpl	$A_s / \text{mm}^2$
E34P1, E35P1, E36P1	1	0	0	0
E31P1, E32P1, E33P1	2	2	4	471
E32P2, E32P2, E33P2	3	4	8	942
E34P2, E35P2, E36P2	4	6	12	1413
E37	-	-	-	-

Ratkaisemalla  $N$  kaavoista 1-5, 8-10 ja 18-19, voidaan arvioida kuinka paljon sivukartiomurtokapasiteetti kasvaa raudoitusta lisättäessä. Jotta vastaukseksi saataisiin sivukartiomurtokapasiteetti, laskuissa tyssästä sivulle päin tulevan voiman  $F_b$  tilalla on käytetty raudoituksen ankkurointikapasiteettia  $N_{Rk,k}$  (Kaava 7). Pultin tyssäkannan päälle muodostuva paine  $\rho$  voidaan laskea alla olevalla kaavalla. Kaava perustuu standardin EN 1992-4 kaavaan 7.11.

$$\rho = k_2 f_{ck} \quad (22)$$

, missä  $\rho$  on tyssäkannan päälle muodostuva paine

$k_2$  on 10,5 halkeilemattomassa betonissa oleville kiinnikkeille

$f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

Taulukossa 4 on näytetty laskuissa käytetyt arvot ja taulukossa 5 on näytetty eri raudoitustyypeille lasketut sivukartiomurtokapasiteetit.

Taulukko 4. Raudoitustyyppien sivukartiomurtokapasiteetin laskemiseen käytetyt arvot.

$f_{cm} =$	22,1	MPa
$f_{ck} =$	14,1	MPa
$f_{ctm} =$	1,75	MPa
$f_{cc,200} =$	28,5	MPa
$n_1 = n_2 =$	1	
$f_{bd} =$	3,938	
$k_2 =$	10,5	
$A_{s,2} =$	314,2	mm <sup>2</sup>
$A_{s,3} =$	628,3	mm <sup>2</sup>
$A_{s,4} =$	942,5	mm <sup>2</sup>
$\varnothing =$	10	mm
$f_y =$	500	MPa
$l_{b,rqd} =$	222,2	mm
$l_b =$	125	mm
$\rho =$	148,05	
$\alpha =$	0,2507	
$l_b / l_{b,rqd} =$	0,563	

Taulukko 5. Raudoitustyyppien lasketut sivukartiomurtokapasiteetit.

Raudoitus	1	2	3	4
$F_b / \text{kN} =$	0	88,4	176,9	265,3
$N / \text{kN} =$	0	352,6	705,6	1058,2

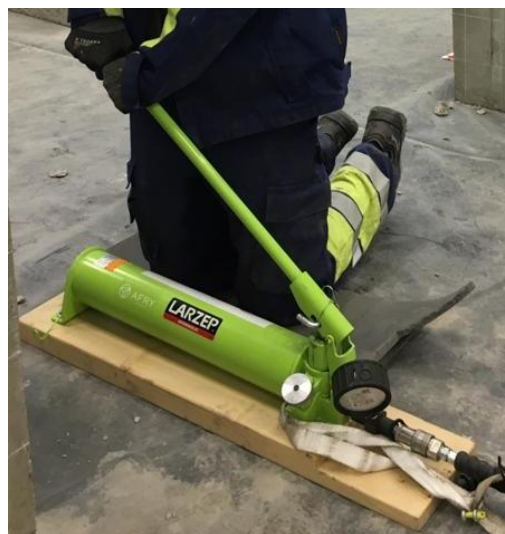
### 3.2 Laitteisto

Vetokokeiden tekemiseen käytettiin manuaalisesti toimivaa hydraulijärjestelmää (Kuva 21).



1. Siirtymäanturi, mittausalue 0...75 mm (BURSTER 8709-5075)
2. Kiinnitysmutterit
3. Varmistinlevy, 180 mm x 100 mm,  $t=5$  mm, reiän halkaisija 48 mm, S355
4. Kuormanjakolevy, halkaisija 180mm,  $t=40$ , reiän halkaisija 60mm, S355
5. Voima-anturi, mittausalue 0...1,0 MN (VETEK AR100ton)
6. Reikätkunkki, isku 50 mm (LARZEP SAH10005)
7. Kuormanjakolevy, 250x250,  $t=25$  mm, reiän halkaisija 60 mm, S355
8. CR-Kumi (Neopreeni), Shore A 60, 250 mm x 250 mm,  $t=3$  mm, reikä 130x60

Kuva 21. Vetokoelaitteisto.



Kuva 22. Vetokokeissa käytetty hydraulitunkki.

Reikätkunkiin tuotiin voima manuaalisesti hydraulitunkilla, joka pystyi tuottamaan 1018 kN vedon pulttiin (Kuva 22). Siirtymä- ja voima-antureiden tuottama informaatio vietiin dataloggeriin (Kuva 23), ja dataloggerin informaatio luettiin Bursterin DigiControl tietokonesovelluksella.



Kuva 23. Burster Digiforce 9311. [7]

### 3.3 Koejärjestely ja toteutus

Vetokoe aloitettiin asettamalla vetokoelaitteisto pultin ulos tulevan osan ympärille. Reikätkunki oli kaksiosainen ja sen sisempi osa siirtyi ylöspäin paineen kasvaessa. Tunkin voima siirrettiin pulttiin mutterin avulla. Varmistuslevy piti vetokoelaitteistoa kiinni betonikappaleessa, jos pultti olisi katkennut kokeen aikana. Varmistuslevy oli sidottu betonikappaleeseen kuormaliinoilla.

Vetävä voima luotiin hydraulitunkilla, josta voima siirtyi letkua pitkin reikätkunkiin. Voima  $N$  kasvatettiin ensin noin 420 kN:iin, jonka jälkeen voimaa kasvatettiin hitaammin. Voimaa kasvatettiin niin pitkään, että tapahtui murtuma tai saavutettiin vetokoelaitteiston maksimikapasiteetti.

Kokeen aikana mitattiin pultin yläpään siirtymää ja pulttia vetävää voimaa. Siirtymää mitattiin pultin yläpäässä olevalla siirtymäanturilla ja voimaa voima-anturilla. Siirtymä- ja voima-antureilta tuleva data kirjattiin dataloggeriin, joka muo-

dosti voima-siirtymäkuvaajan saatujen tietojen perusteella. Dataloggeri oli yhdistetty tietokoneeseen, josta informaatio saatiin Excel-tiedostoon. Tämä prosessi suoritettiin erikseen jokaisen pultin kohdalle. Kaikki kokeet videoitiin.

## 4 Tutkimustulokset

### 4.1 Yhteenveto tuloksista

Alla olevassa taulukossa on esitetty kaikkien pulttien maksimivoimat. Raudoitustyyppin 4 pulteilla ei tapahtunut sivukartiomurtoa.

Taulukko 6. Koekappaleiden raudoitukset, murtokuormat ja murtosuunta.

Tunnus	Raudoitus	$N / \text{kN}$	Murtosuunta
E34P1	1	674,8	2
E35P1	1	687,2	2
E36P1	1	670,1	2
E31P1	2	728,4	2
E32P1	2	755,3	1
E33P1	2	762,1	2
E31P2	3	872,3	2
E32P2	3	816,8	2
E33P2	3	877,6	2
E34P2	4	974,9	ei murtoa
E35P2	4	913,1	ei murtoa
E36P2	4	891,8	ei murtoa
E37	-	-	ei murtoa

### 4.2 Pultin jäykkyyden muutos eri kuormitustilanteissa

Pultilla E37 testattiin pultin jäykkyyden muutosta, kun pulttia kuormitetaan useasti. Kaaviosta nähdään, että pultti vedettiin aina myötöön asti. Taulukossa 7 on verrattu pultin E37 plastista venymää  $\epsilon_{pl}$ , kulmakerrointa ja jäykkyyden muutosta  $\Delta k$ .

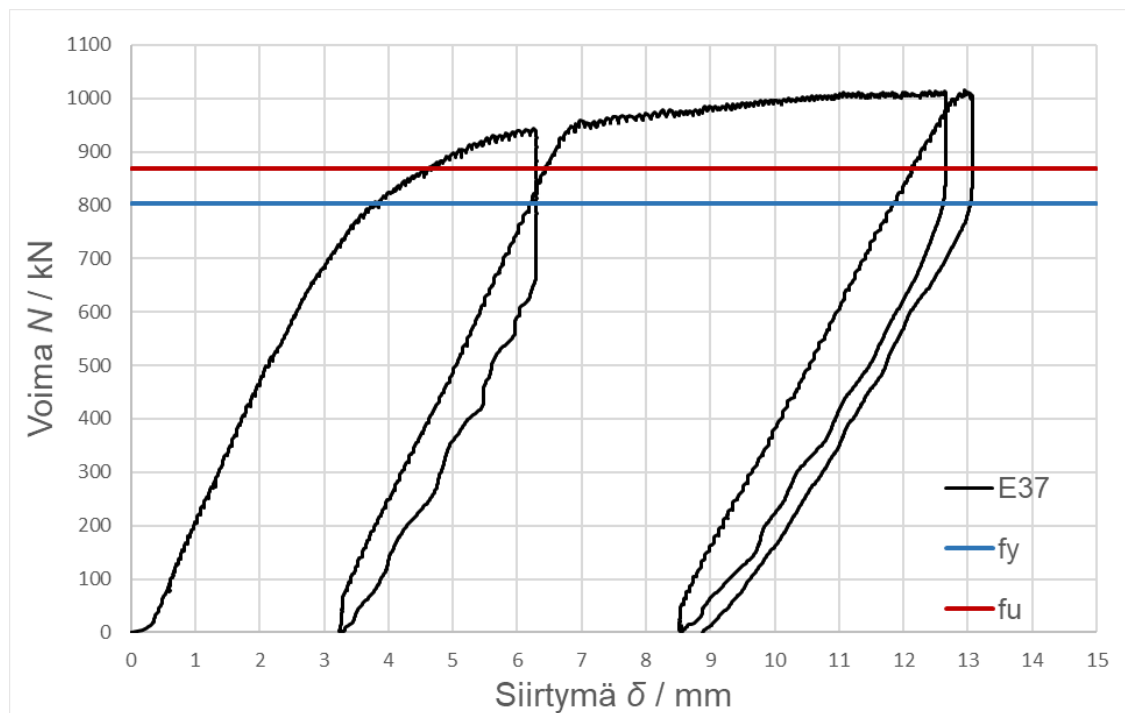
Taulukko 7. Kuvasta 24 otetut arvot.

	$\varepsilon_{i,pl} / \text{mm}$	kulmakerroin $k_i / \text{kN/mm}$	$\Delta k_i / \%$
1.	0	259,2	-
2.	3,24	244,8	-5,6
3.	8,50	223,0	-14,8

Taulukon 7 jäykkyyden muutos  $\Delta k$  on laskettu kaavalla:

$$\Delta k_i = (k_i - k_1) / k_1 \quad (23)$$

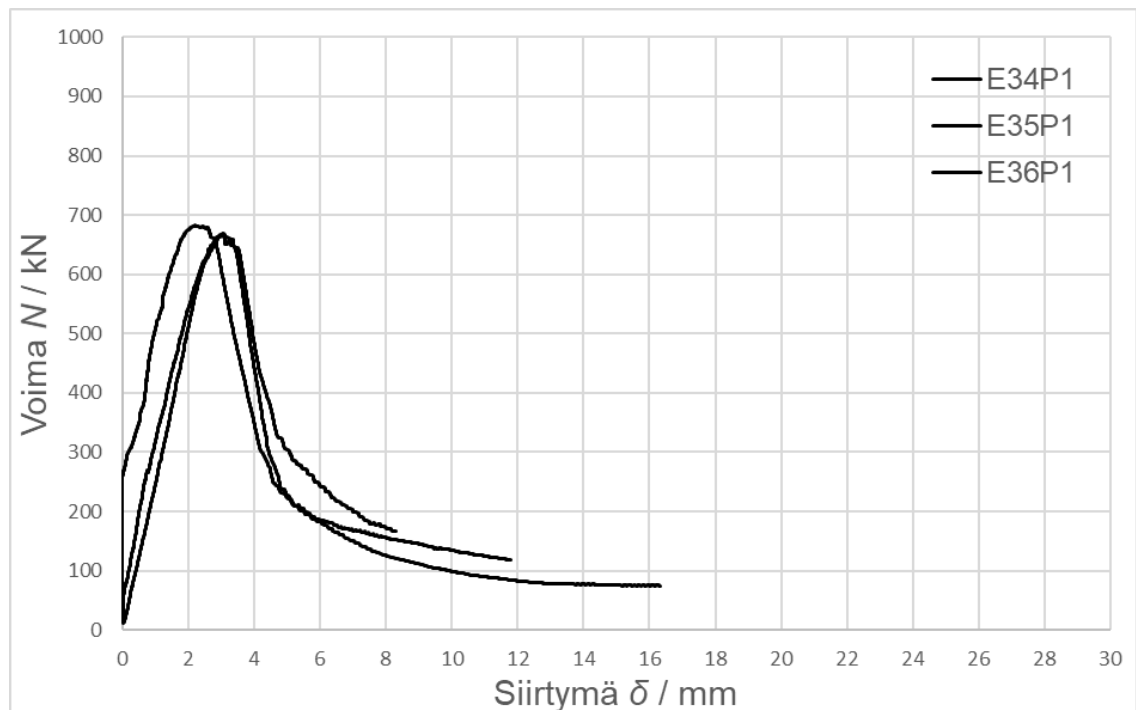
Kuvaajasta nähdään, että pultti kesti huomattavasti enemmän kuin laskelmissa ja että käyrän kulmakerroin on alkanut pienentymään jo ennen myötörajaa ensimmäisessä kuormituksessa (Kuva 24). Kokeet jouduttiin lopettamaan, koska saavutettiin vetokoelaitteiston maksimikapasiteetti.



Kuva 24. Pultin E37 voima-siirtymäkuvaaja.

### 4.3 Raudoituksen määrän vaikutus sivukartiomurtokapasiteettiin

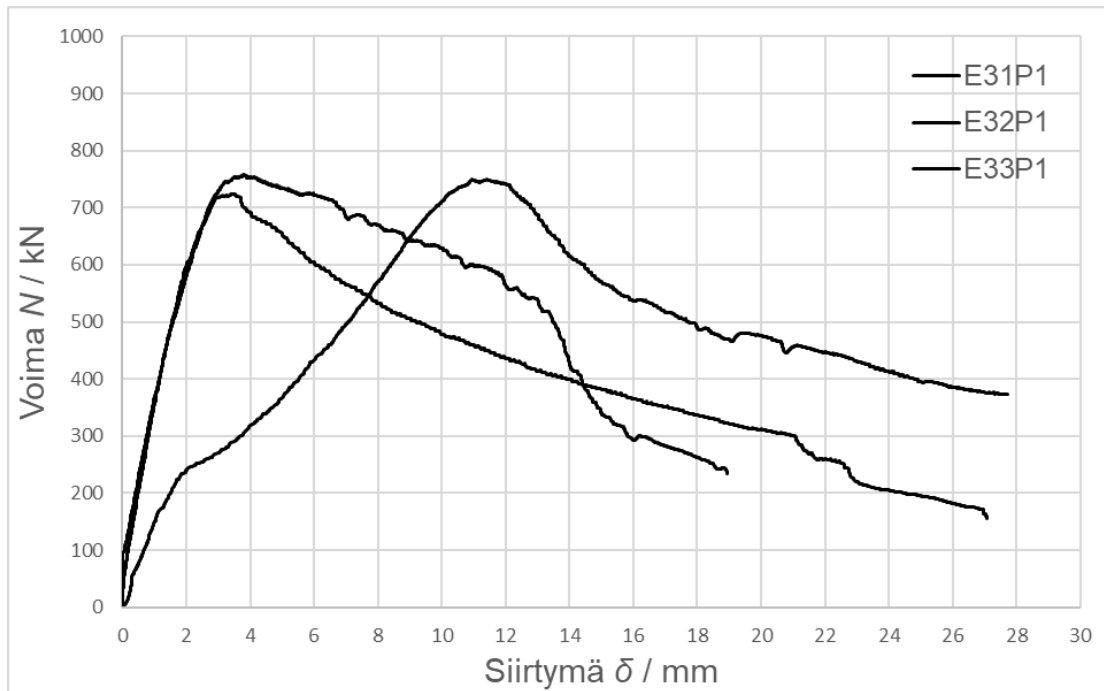
Raudoitustyyppin 1 pulttien voima-siirtymäkuvaaja näkyvät kuvassa 21. Yhden kappaleen kohdalla siirtymäanturi aloitti mittaamisen vasta noin 250 kN kohdalla. Tämän huomioon ottaen kaaviosta voi tulkita, että kaikki koekappaleet käyttäytyivät hyvin samalla tavalla ja murtovoimat olivat lähellä toisiaan. Kappaleiden sivukartiomurtolujuuden keskiarvo oli 677,6 kN. Voidaan myös todeta, että murtumat olivat hauraita.



Kuva 25. Raudoitustyyppin 1 pulttien voima-siirtymäkuvaajat.

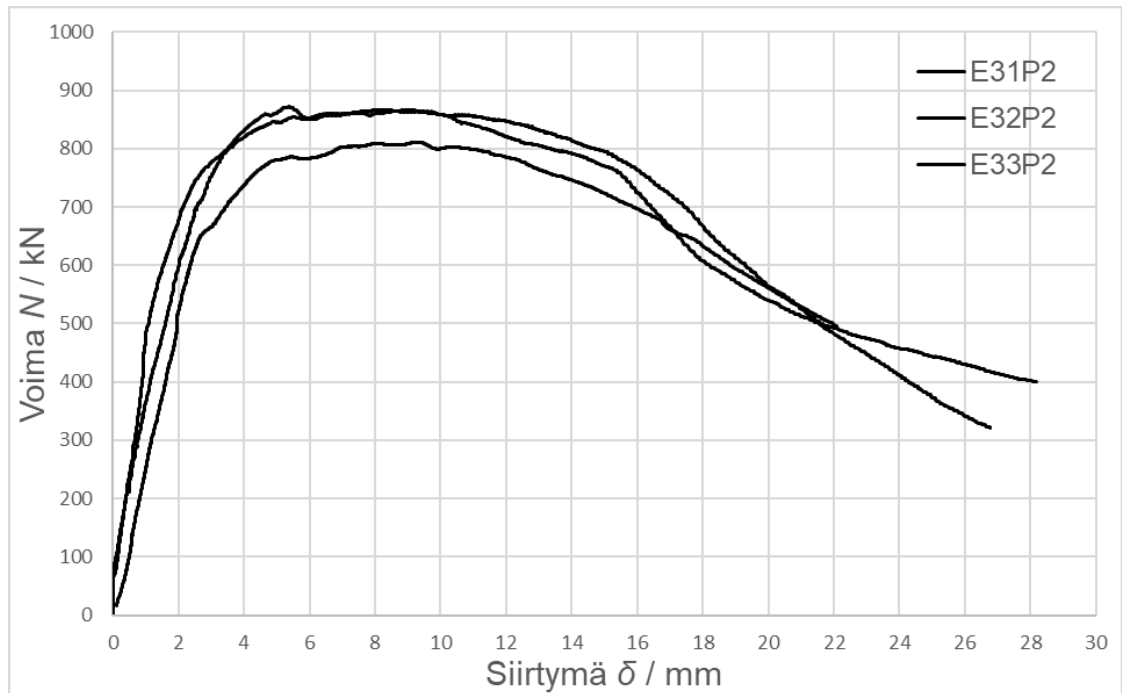
Käytettäessä raudoitustyyppiä 2, kolmen kappaleen keskimääräiseksi kapasiteetiksi saatiin 748,6 kN. Kuvaajasta nähdään, että murtumisen jälkeen kapasiteetti pienenee hitaammin kuin ilman raudoitusta (Kuva 26). Yhden kappaleen käyrä on vääristynyt, koska siirtymäanturi pääsi liikkumaan vetokokeen aikana.





Kuva 26. Voima-siirtymäkuvaajat kappaleista, joissa kaksi hakaa.

Käytettäessä raudoitustyyppiä 3 saavutettiin huomattavan paljon suurempia sivukartiomurtokapasiteetteja (Kuva 27). Kolmen pultin kapasiteettien keskiarvoksi saatiin 855,6 kN. Kapasiteetin lasku voiman maksimiarvon jälkeen on hitaampaa kuin pienemmällä rauditusmäärällä.



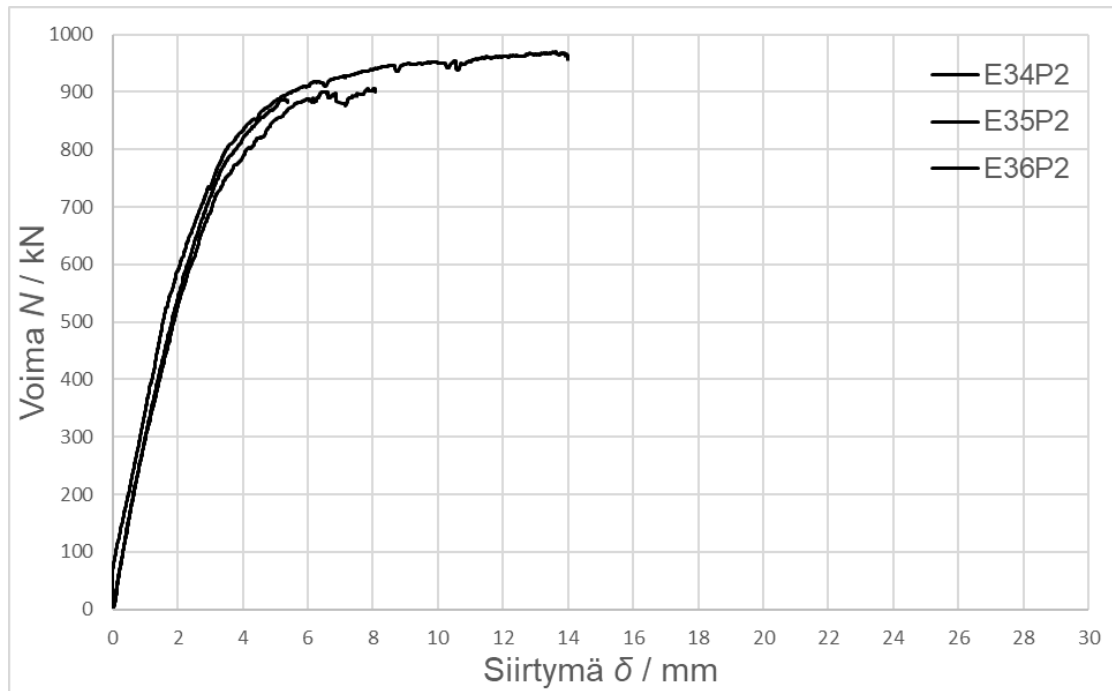
Kuva 27. Voima-siirtymäkuvaajat pulteista, joissa oli käytetty raudoitustyyppiä 3.

Kaikkien kappaleiden kohdalla, joissa käytettiin raudoitustyyppiä 4, vetokokeet jouduttiin keskeyttämään ennen maksimikapasiteetin saavuttamista tukipinnan murtumisen takia (Kuva 28).



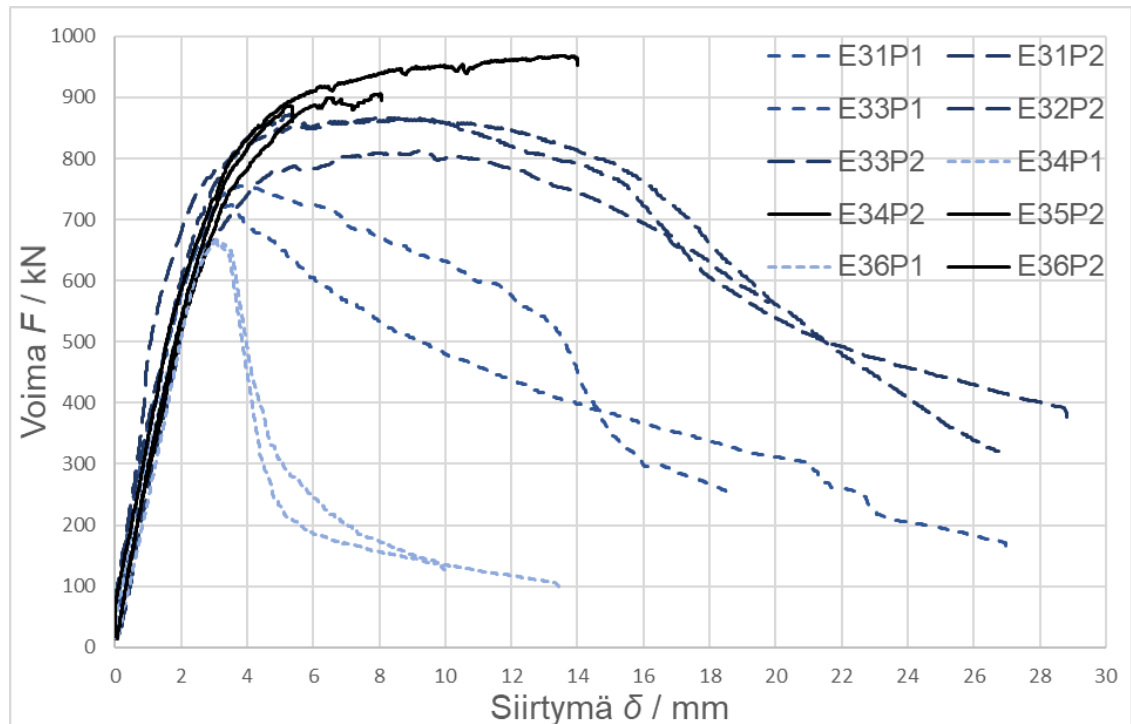
Kuva 28. Tukipinnan murtuma.

Voidaan olettaa, että sivukartiomurtolujuus on suurempi kuin kuvaajan maksimi-voima (Kuva 29). Voimien maksimin keskiarvoksi saatiin 926,6 kN.



Kuva 29. Voima-siirtymäkuvaajat kappaleista, joissa käytettiin raudoitustyyppiä 4.

Kun vertaillaan kaikkien pulttien voima-siirtymäkäyriä samassa kuvaajassa (Kuva 30), nähdään selvästi, että sivukartiomurtokapasiteetti kasvaa raudoitusta lisättäessä. Käyrien muodosta nähdään, että käyrät loivenevat maksimivoiman jälkeen, kun raudoitusta lisätään. Tästä voidaan päätellä, että murtuminen tapahtuu sitkeämmin.



Kuva 30. Kaikkien kappaleiden voima-siirtymäkuvaajat.

Vertailemalla kaikkien kappaleiden murtolujuuksia, nähdään että kaikkien pulttien kohdalla murtolujuus on kasvanut, kun raudoitusta ollaan lisätty (Taulukko 6). Murtosuunnasta voidaan todeta, että sivukartiomurto tapahtuu todennäköisemmin suuntaan 2, eli poikittaissuuntaan pultin harjateräsosien keskilinjalta. E33P2 ja E36P2 välinen ero on vain 14,2 kN, mutta tässä tulee ottaa huomioon, että E36P2 murtotapa oli tukipinnan murtuminen, jonka takia murtolujuus ei vastaa sivukartiomurtolujuutta. Kuvaajasta on poistettu niiden kahden vetokokeen käyrät, joissa siirtymäanturin tulokset olivat virheellisiä.

#### 4.4 Tulosten yhdenmukaisuus aikaisempien tutkimusten kanssa

Tuloksista nähdään, että ankkurien sitkeys on kasvanut kuten DeVries, R. A kirjoittaa väitöskirjassaan [3, s. 122]. Kyseisessä tutkimuksessa sivukartiomurtokapasiteetti ei kasvanut kuten tämän tutkimuksen vetokokeissa. Tulee kuitenkin huomioida, että kokeissa, jotka DeVries teki, teräkset olivat kiinni pultissa.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat hyvin samanlaisia kuin tulokset, joita Hasselwander, G ym. saivat tutkimuksissaan [1]. Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan, että raudoituksella saatiin korkeampi sivukartiomurtokapasiteetti ja sitkeämpi murtotapa.



Kuva 31. Tyssän päälle muodostunut kartio murtunutta betonia. a) E34P1, b) E36P1.

Yllä olevan kuvan perusteella, että vetokokeen aikana tyssän päälle muodostuu kartio murskaantunutta betonia, kuten Hasselwander, G tutkimusraportissaan kertoo (Kuva 31). [1, s. 54]

#### 4.5 Tutkimukseen vaikuttavien muuttujien ja olettamusten analysointi

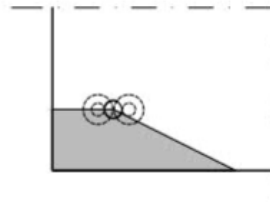
Koetta varten pultin kierteytetyn osapituutta jouduttiin lisäämään, jotta vetokokeet onnistuisivat. Pultin pituuden lisäys vaikuttaa pultin siirtymään vetokokeen aikana, mutta kaikki testattavat pultit olivat identtisiä, joten testitulosten vertailu

keskenään on mahdollista. Pultin tartuntaa jouduttiin myös muokkaamaan ja es-  
tämään betonin pääsy vetokoelaitteiston ja pultin harjaterästen väliin. Pultin  
poistettu tartunta harjaterästen yläpäässä saattaa vaikuttaa sivukartiomurtoka-  
pasiteettiin, mutta koska tässä tutkimuksessa vertaillaan eri raudoitustyyppisiä ja  
kaikki tutkimuksen pultit olivat samanlaisia, sitä ei tarvitse ottaa huomioon tulos-  
ten analysoinnissa. Harjaterästen yläpuolelta puuttuva betoni ei ole alueella joi-  
hin syntyy halkeamia sivukartiomurrossa, joten se ei vaikuta tuloksiin.

## 5 Johtopäätökset

### 5.1 Murtokartion suunta

Tehtyjen vetokokeiden perusteella voidaan sanoa, että sivukartiomurtuma suun-  
tautuu lähes aina kohtisuorasti pultin harjateräsosien keskilinjalta (Kuva 32).



Kuva 32. Sivukartion todennäköinen murtumissuunta.

### 5.2 Sivukartiomurto ilman raudoitusta

Standardin EN 1992-4:2018 kaavalla (7.25) laskettuna tutkimuksen pultit rau-  
doitustyyppillä 1 kestäisivät 368,2 kN vetovoiman (Taulukko 2). Vetokokeissa  
keskiarvoksi saatiin 677,6 kN, joka on 84 % suurempi kuin standardin mukaan  
laskettu  $N_{Rk,cb}$ . Tehtyjen vetokokeiden perusteella voidaan sanoa, että standar-  
din kaava laskee sivukartiomurtokapasiteetin paljon pienemmäksi kuin vetoko-  
keissa saatiin kapasiteetiksi.

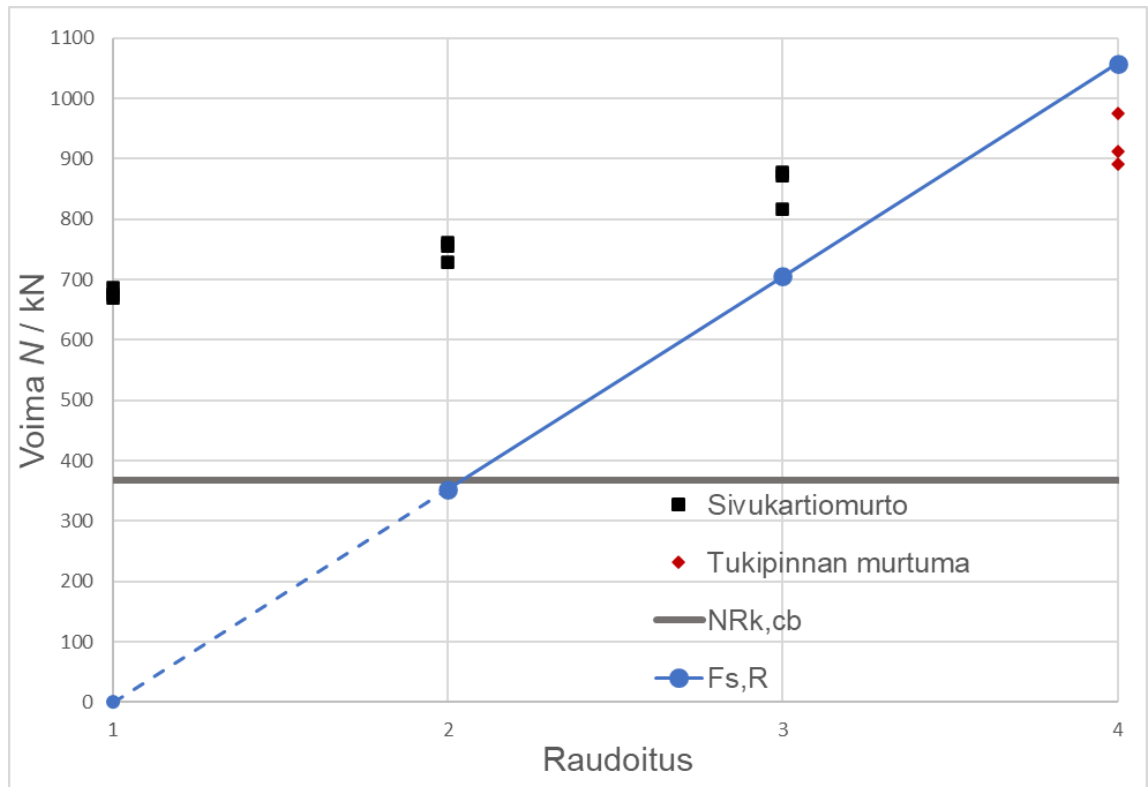
Standardin tulos on saatu laskemalla pultin harjateräkset kahtena eri ankkurina. Jos sivukartiomurtokapasiteetti lasketaan siten, että pultin kaksi harjateräsosaa lasketaan yhtenä isona pulttina, jonka tyssien pinta-alat lasketaan yhteen, saadaan tulokseksi 428,0 kN. Vaikka tulos on edelleen huomattavasti pienempi kuin vetokokeiden tulos, se on silti lähempänä kuin kaava laskettuna kahdella ankkurilla. Voidaan todeta, että pultin käsittely yhtenä pulttina on lähempänä koikeista saatua tulosta.

Kuvasta 31 nähdään, miten ankkureiden välissä on murskaantunutta betonia. Jos ankkureiden oletettaisiin käyttäytyvän kuten yksittäiset ankkurit, betoni olisi oletettavasti murskaantunut kartion muotoisesti pultin ympärille (Kuva 6), eikä myös pulttien väliin. Tämän perusteella voisi olettaa, että lähekkäin olevat ankkurit toimivat eri tavalla sivukartiomurrossa kuin kauempana toisistaan olevat.

### 5.3 Raudoituksen vaikutus sivukartiomurtoon

Tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että ilman raudoituksia olleet pultit murtuivat hauraasti ja ne menettivät kapasiteettinsa nopeasti murtumisen jälkeen. Raudoituksia lisäämällä saatiin lisää sivukartiomurtokapasiteettia ja sitkeämpi murtotapa.





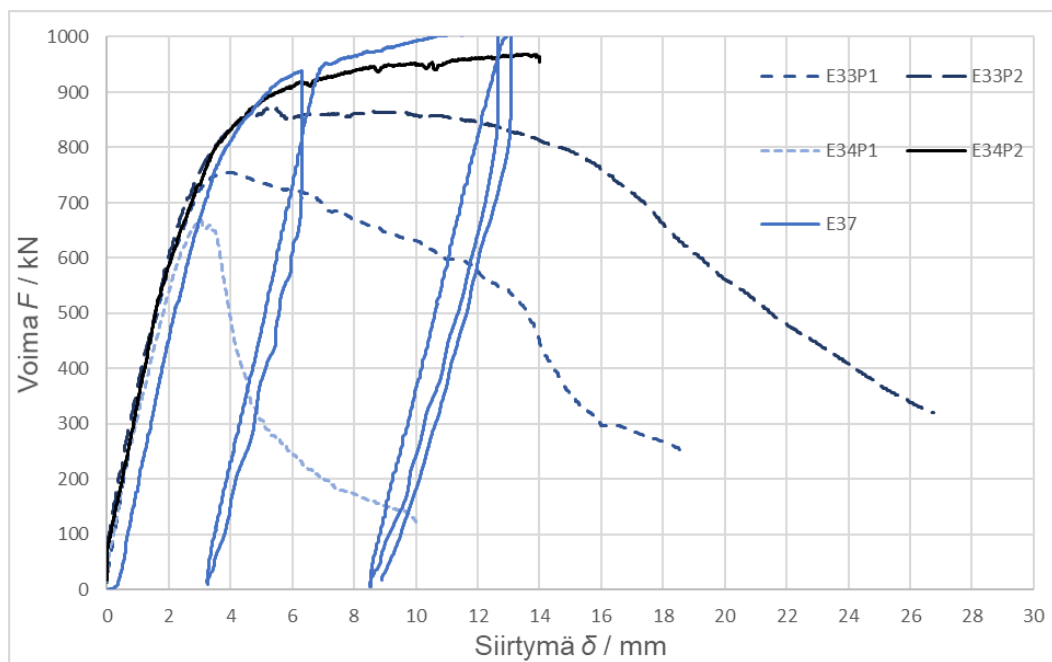
Kuva 33. Vetokokeiden tulokset verrattuna laskelmien tuloksiin.

Yllä on verrattu vetokokeiden tuloksia ja laskelmien tuloksia samassa kuvassa. Tyypin 2 raudoituksen laskettu kapasiteetti on pienempi kuin  $N_{Rk,cb}$ . Tämä johtuu siitä, että kaava, jolla on laskettu raudoitustyyppien 2 - 4 kapasiteetit, ei ota huomioon betonin kapasiteettia. Tästä johtuen myös tyypin 3 laskettu kapasiteetti on pienempi kuin vetokokeiden tulos. Todennäköisesti kokonaiskapasiteetti  $F_R = \alpha F_{c,R} + F_{s,R}$ , jossa  $\alpha$  pienenee halkeilun edetessä ja  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Kun raudoitusmäärä kasvaa, nähdään että lasketut arvot lähenevät testituloksia, sillä betonin kapasiteetin vaikutus vähenee. Raudoitustyyppi 4:n kohdalla vetokapasiteetin laskettu arvo on suurempi kuin vetokokeiden tulokset. Tämä johtuu siitä, että raudoitustyyppi 4:n kohdalla sivukartiomurtokapasiteetti on todellisuudessa suurempi kuin murtovoima.

#### 5.4 Jäykkyyden muutos eri kuormitustilanteissa

Pultin E37 voima-siirtymäkäyrän kulmakerroin alkaa laskea jo ennen myötörajan saavuttamista (Kuva 34). Tämä saattaa tapahtua, kun pulttia kuormitettaessa se venyy elastisesti ja harjateräksen harjojen välissä oleva betoni murskaantuu. Tämä johtaa tartunnan häviämiseen alueelta, jossa betoni on murtunut. Tartunnan häviäminen antaa pultille lisää vapaata pituutta, jolloin jäykkyys laskee. Tulokset osoittavat, että pultin jäykkyys pienentyisi pysyvästi, kun tapahtuu plastisia muodonmuutoksia.

Kuvassa 34 on verrattu kaukana reunasta sijaitsevaa pulttia E37 muihin pultteihin, jotka sijaitsevat rakenteen nurkassa. Reunan läheisyyden ei havaittu vaikuttavan pultin jäykkyyteen.



Kuva 34. Keskellä olevan pultin voima-siirtymäkuvaaja verrattuna reunalla oleviin.

## 6 Suositukset

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset osoittavat, että ankkurikappaleen ympärillä olevalla raudoituksella on positiivinen vaikutus pultin sivukartiomurtokapasiteettiin. Tehtyjen vetokokeiden perusteella voidaan suositella raudoituksen käyttämistä sivukartiomurron estämiseksi. Raudoitus tulisi sijoittaa siten, että se ankkuroituu murtokartioon. Ankkuroimaton teräs ei kasvata kapasiteettia.

Vaadittavan raudoitusmäärän laskeminen pienelle raudoitusmäärälle todettiin hankalaksi. Suositellaan lisätutkimuksia raudoitusmäärän vaikutuksesta sivukartiomurtokapasiteettiin, jotta voitaisiin laskelmilla luotettavasti arvioida tarvittava raudoitusmäärä.

## 7 Yhteenveto

Betonikappaleen sisään valettavat kiinnikkeet ovat yleisiä teollisuusrakentamisessa. Kiinnikkeillä liitetään kaksi rakennetta toisiinsa, esimerkiksi pilari ja perustus. Standardin EN 1992-4:2018 mukaan kiinnikkeellä on kuusi eri murtotapaa, joista tässä tutkimuksessa käsitellään sivukartiomurtoa. Standardi ottaa kantaa vain kiinnikkeen sijoitteluun, eikä anna ohjeita raudoituksen suunnitteluun. Standardin mukaan suunniteltaessa betonikappaleiden koot saattavat kasvaa niin suuriksi, ettei niitä ole järkevää toteuttaa ja vaikka toteutus olisi mahdollista, betonikappaleen suurempi koko voi tuottaa rakenteellisia haasteita ja pienentää rakennuksen käyttötilaa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vaikuttaako raudoitus Anstar ALP45-LC pultin sivukartiomurtokapasiteettiin.

Raudoituksen vaikutusta tutkittiin tekemällä neljä erilaista raudoitustyyppiä ja testaamalla niiden sivukartiomurtokapasiteettia vetokokeilla. Tutkimusta varten valettiin seitsemän betonikappaletta, joissa oli yhteensä 13 pulttia. Vetokokeiden toteuttamiseen käytettiin hydraulista vetokoelaitteistoa, jolla tuotettiin vetovoima pulttiin. Vetokokeen aikana mitattiin pulttia vetävää voimaa ja pultin siirtymää. Pultteja vedettiin niin pitkään, että syntyi murtuma tai saavutettiin vetolaitteiston maksimikapasiteetti.

Tulokset osoittivat, että pulttien sivukartiomurtokapasiteetti ja murtumisen sitkeys kasvoivat aina lisättäessä raudoitusta. Raudoituksen antaman lisäkapasiteetin laskeminen harjateräksen ankkurointikapasiteettiin perustuen todettiin vaikeaksi, jos rauditusmäärä oli pieni. Ilman sivukartiomurron estävää raudoitusta olevan pultin sivukartiomurtokapasiteetti oli 84 % suurempi kuin standardin EN 1992-4:2018 mukaan laskettu kapasiteetti. Laskettu kapasiteetti oli lähempänä vetokokeen tuloksia, kun pulttia käsiteltiin laskelmissa yhtenä isona pulttina, eikä kahtena erillisenä. Murtokartio syntyi lähes aina poikittaissuuntaan pultin harjateräsosien väliseltä keskilinjalta.

Tutkimustulosten perusteella suositellaan raudoitusta käytettäväksi sivukartiomurtokapasiteetin kasvattamisessa. Raudoitus tulisi sijoittaa siten, että se ankkuroituu murtokartioon. Ankkuroimaton teräs ei kasvata kapasiteettia. Suositellaan lisätutkimuksia erityisesti rauditusmäärän vaikutuksesta sivukartiomurtokapasiteettiin, jotta voitaisiin laskelmilla luotettavasti arvioida tarvittava rauditusmäärä.

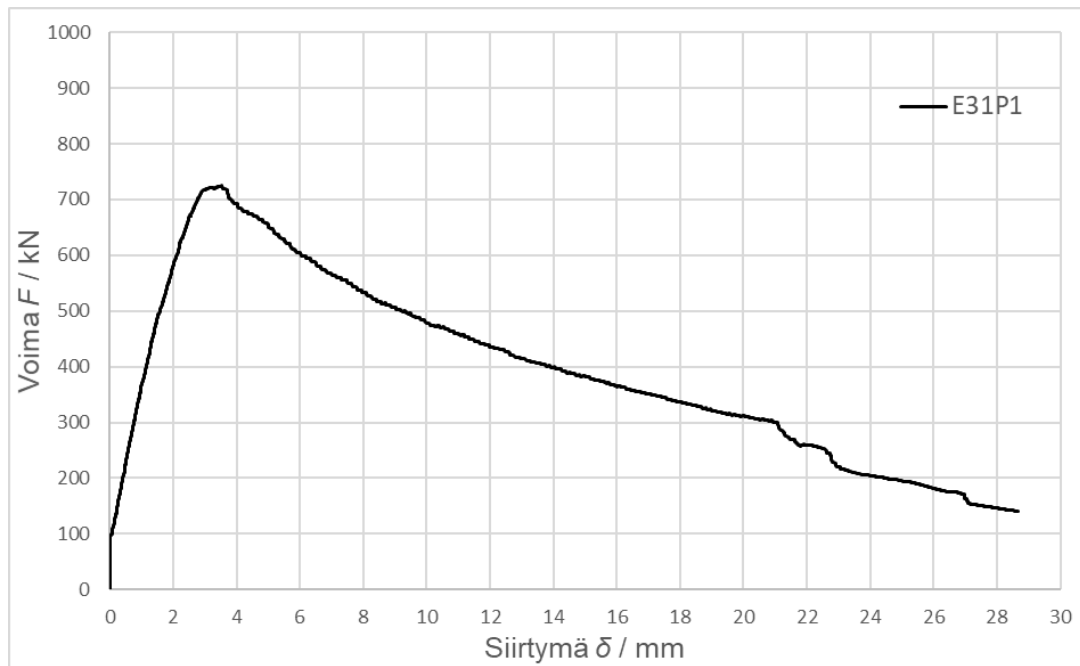
## Lähteet

- [1] Hasselwander, G ym. Strength and behavior of anchor bolts embedded near edges of concrete piers. 1977. Center for Highway Research the University of Texas. Austin.
- [2] Eligehausen, Rolf. Mallee, Rainer. Silva, John F. Anchorage in Concrete Construction. 2006. Ernst & Sohn Veriag. Berliini.
- [3] DeVries, R. A.. Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete, PhD dissertation. 1996. The University of Texas at Austin. Austin.
- [4] European Committee for Standardization (CEN). EN 1992-4:2018; Design of concrete structures, - Part 4: Design of fastenings for use in concrete. 2018. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [5] European Committee for Standardization (CEN). EN 1992-1-1:2004; Design of concrete structures, - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [6] Anstar. Peruspultit käyttöohje. 2020. [www.anstar.fi/tuotteet/pultit-ja-kengat](http://www.anstar.fi/tuotteet/pultit-ja-kengat). Luettu 7.4.2022
- [7] Burster verkkosivut, [www.burster.com](http://www.burster.com), Luettu 21.3.2022.
- [8] Anstar. Harjateräspultit käyttöohje. 2020. [www.anstar.fi/tuotteet/pultit-ja-kengat](http://www.anstar.fi/tuotteet/pultit-ja-kengat). Luettu 7.4.2022
- [9] Suomen Betoniyhdistys r.y. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja osa 1. 1982.

- [10] Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS 1300:2020. Betoniteräkset. Hitsattavien betoniterästen ja betoniteräsverkkojen vähimmäisvaatimukset. 2020.
- [11] Haavisto, Jukka. Laaksonen, Anssi. Betonin puristuslujuus Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista. 2018. Liikennevirasto. Helsinki.
- [12] Ovako nettisivut. <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/4crmn16-4/>. Luettu 14.4.2022

## **Pulttien voima-siirtymäkuvaajat ja kuvat murtumista**

Liitteessä on kaikkien pulttien voima-siirtymäkuvaajat ja kuva murtumasta.

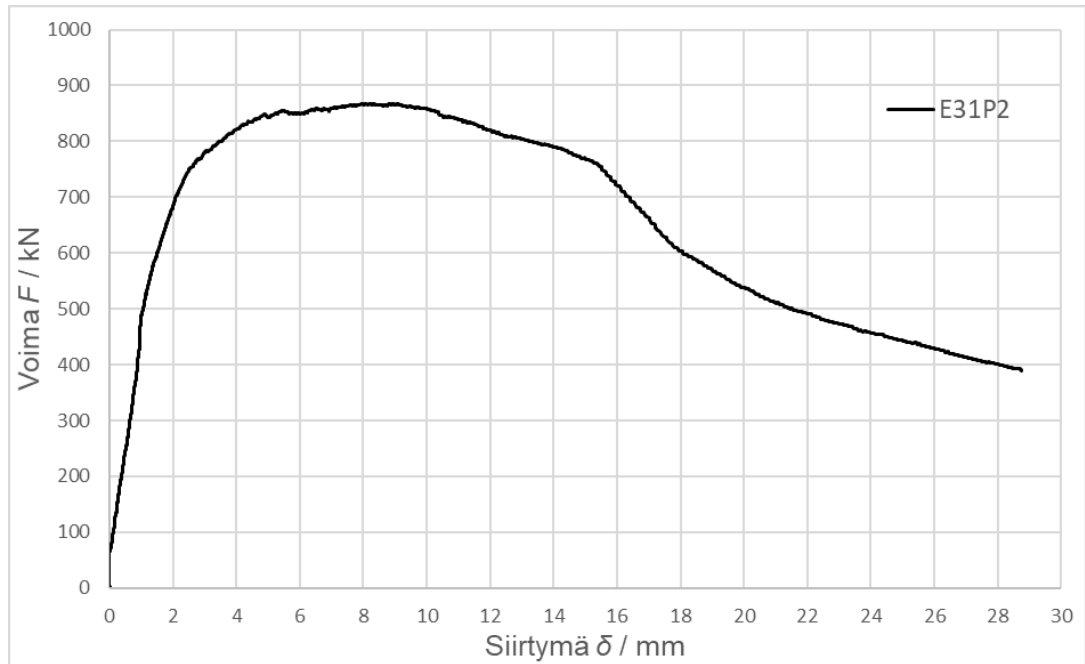


Kuva 1. E31P1 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 2. E31P1 murtuma.

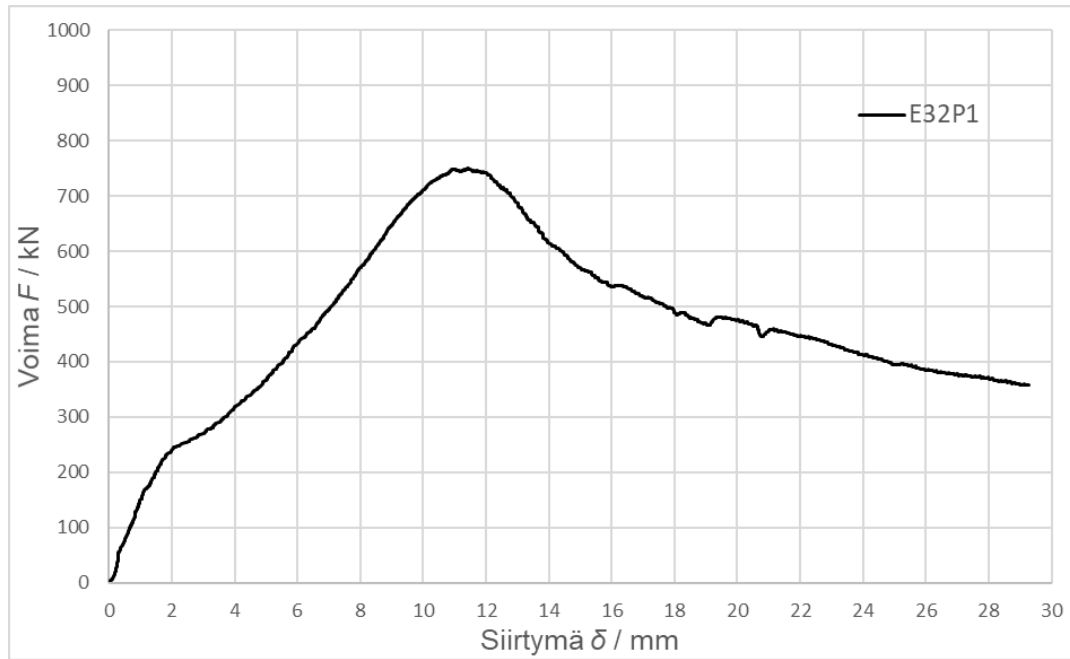




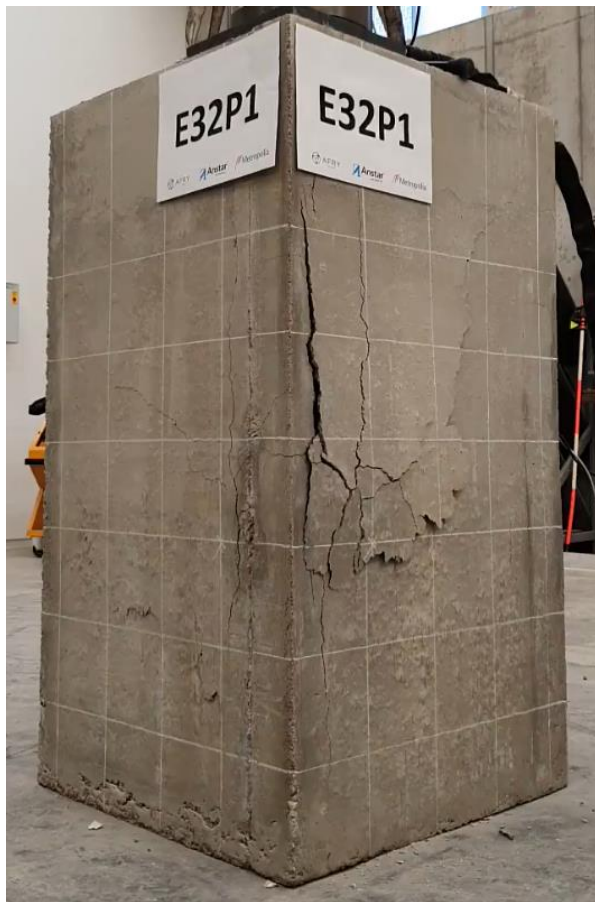
Kuva 3. E31P2 voima-siirtymäkuvaaja.



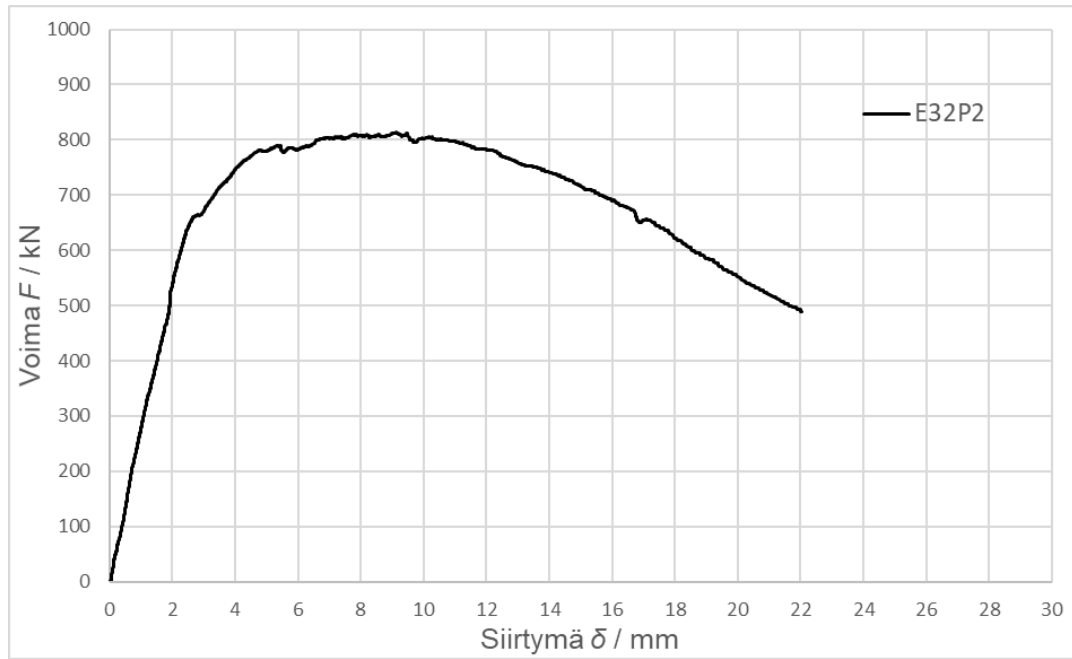
Kuva 4. E31P2 murtuma.



Kuva 5. E32P1 voima-siirtymäkuvaaja.



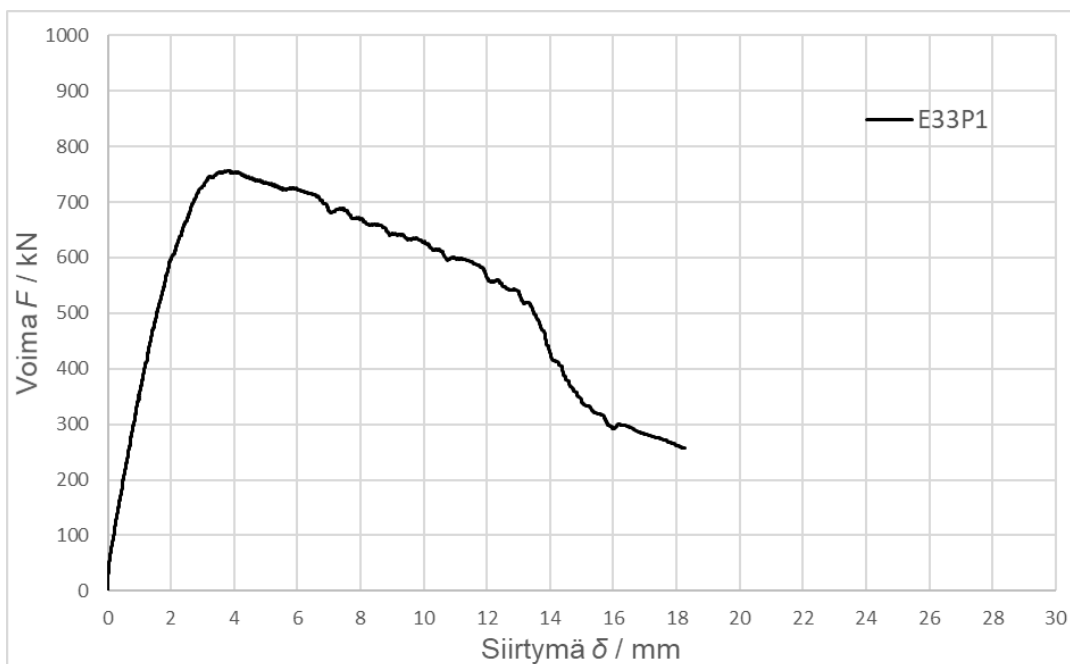
Kuva 6. E32P1 murtuma.



Kuva 7. E32P2 voima-siirtymäkuvaaja.



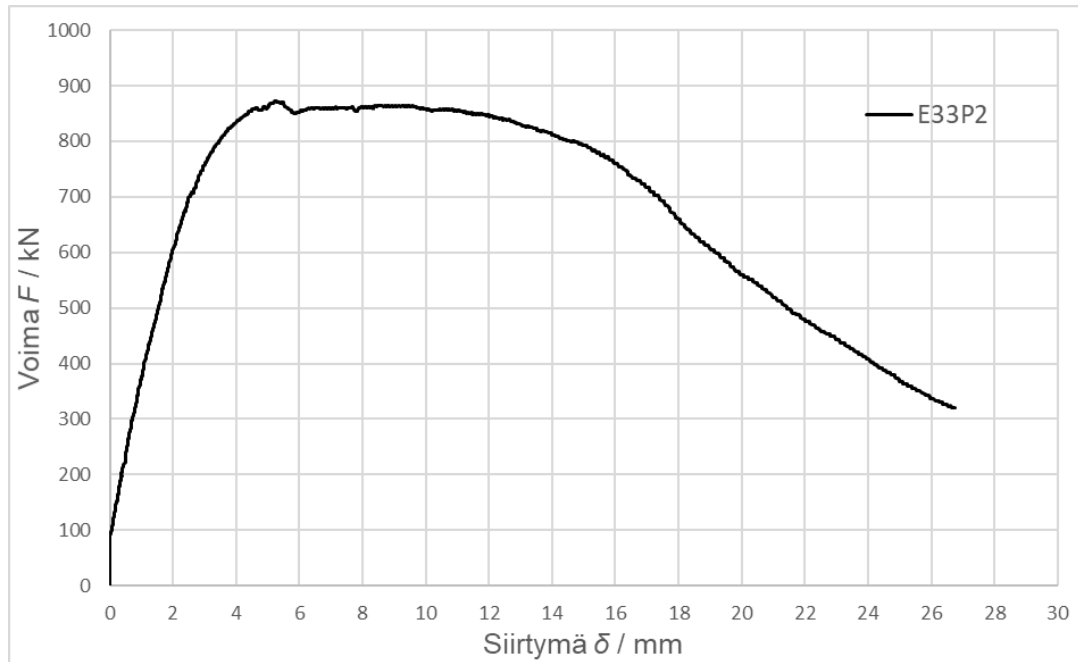
Kuva 8. E32P2 murtuma.



Kuva 9. E33P1 voima-siirtymäkuvaaja.



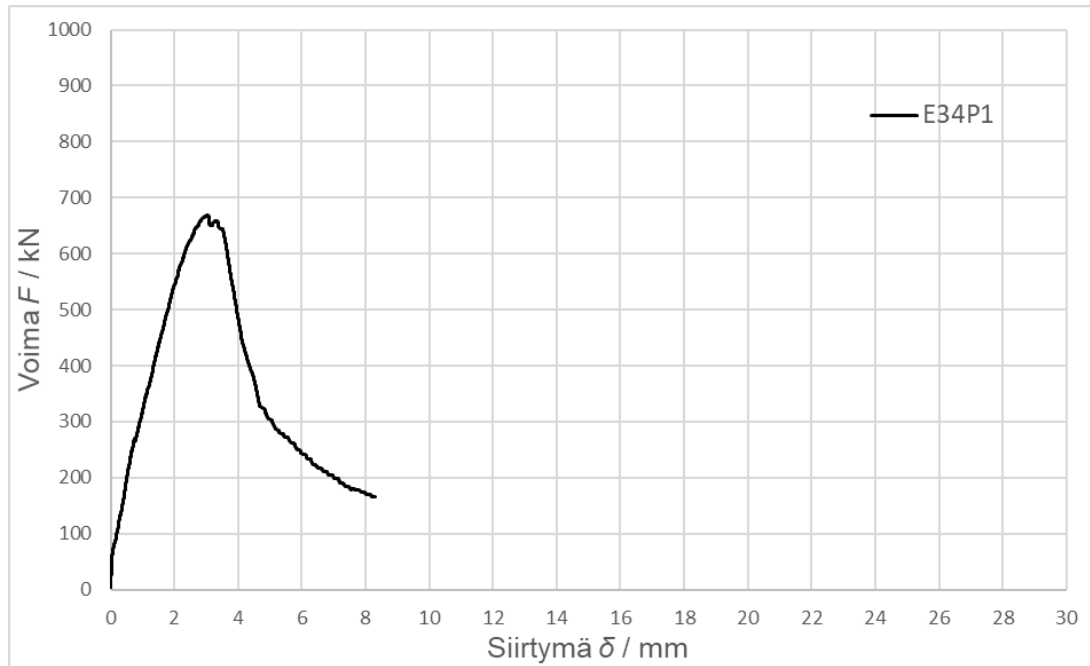
Kuva 10. E33P1 murtuma.



Kuva 11. E33P2 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 12. E33P2 murtuma.

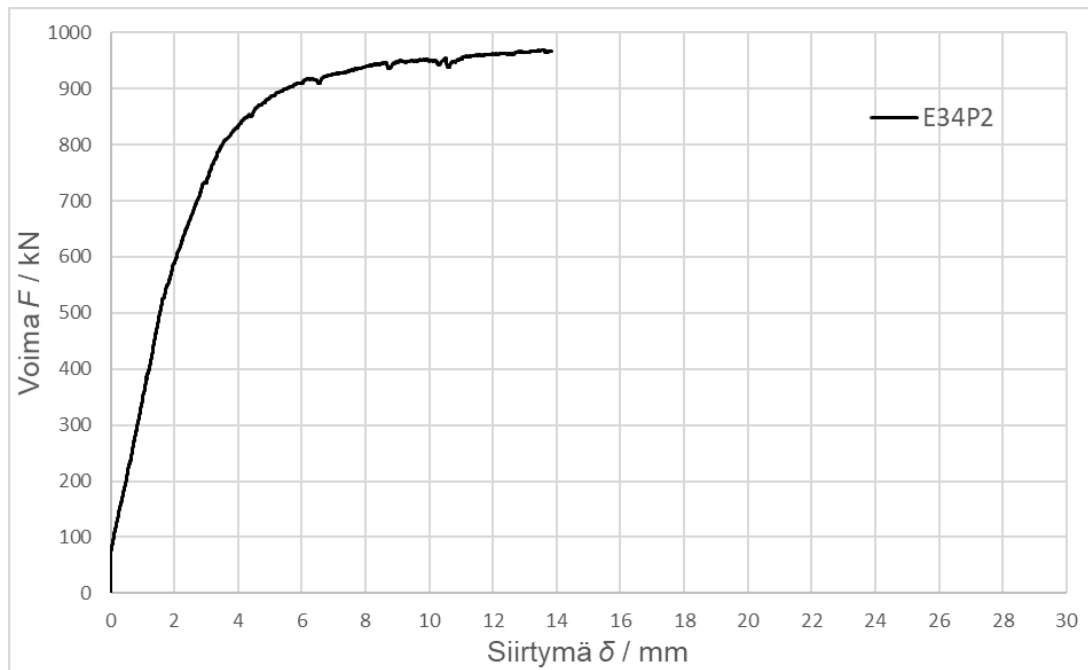


Kuva 13. E34P1 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 14. E34P1 murtuma.

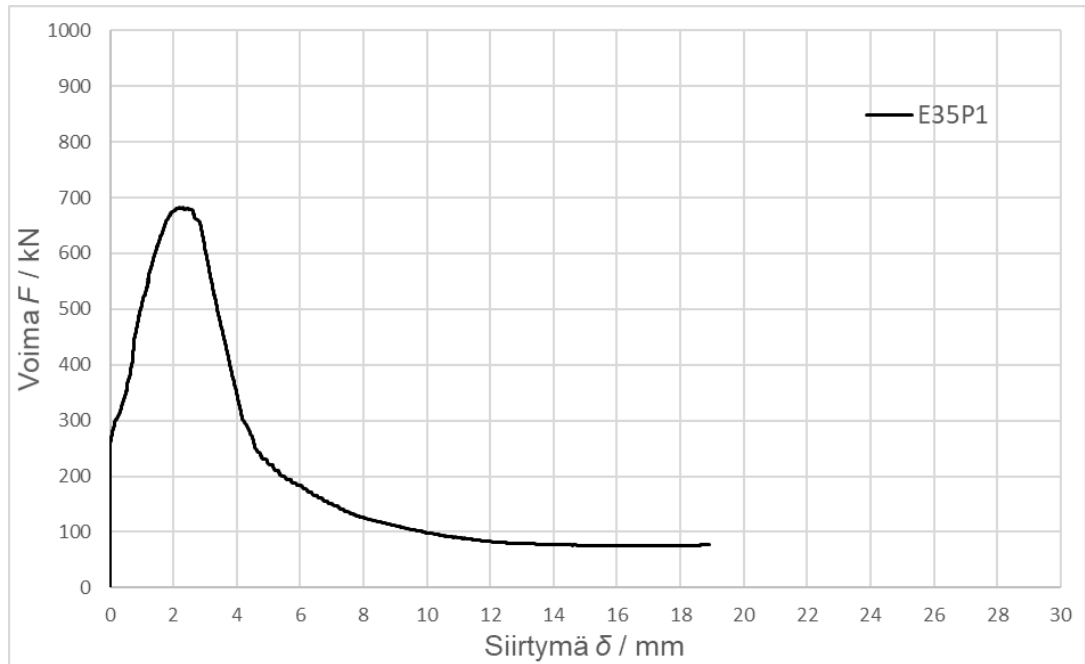




Kuva 15. E34P2 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 16. E34P2 murtuma.

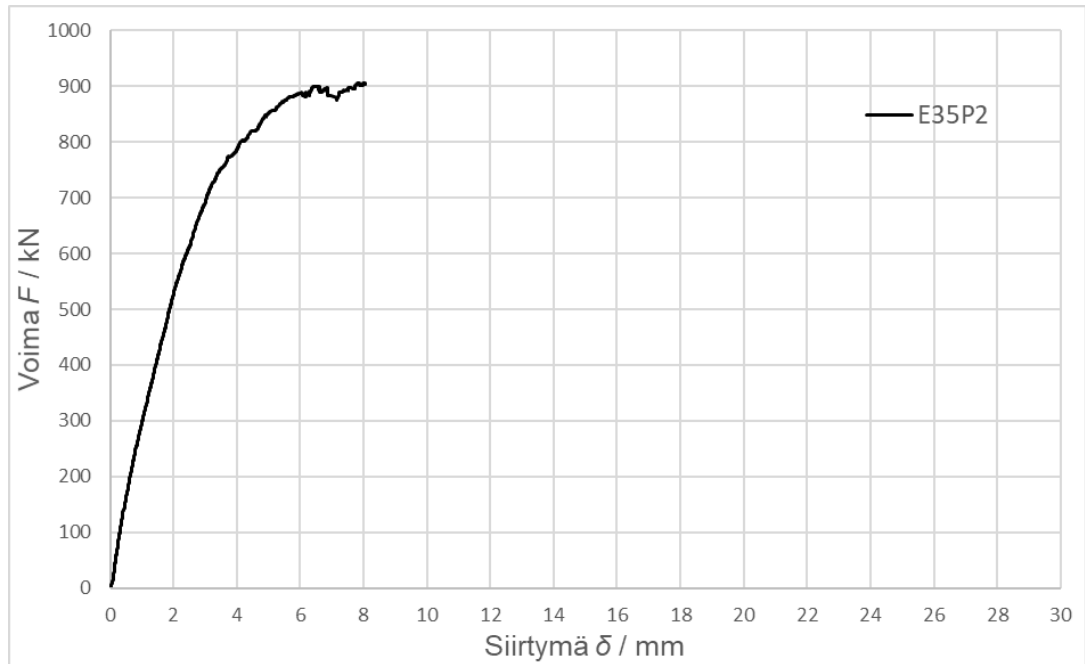


Kuva 17. E35P1 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 18. E35P1 murtuma.

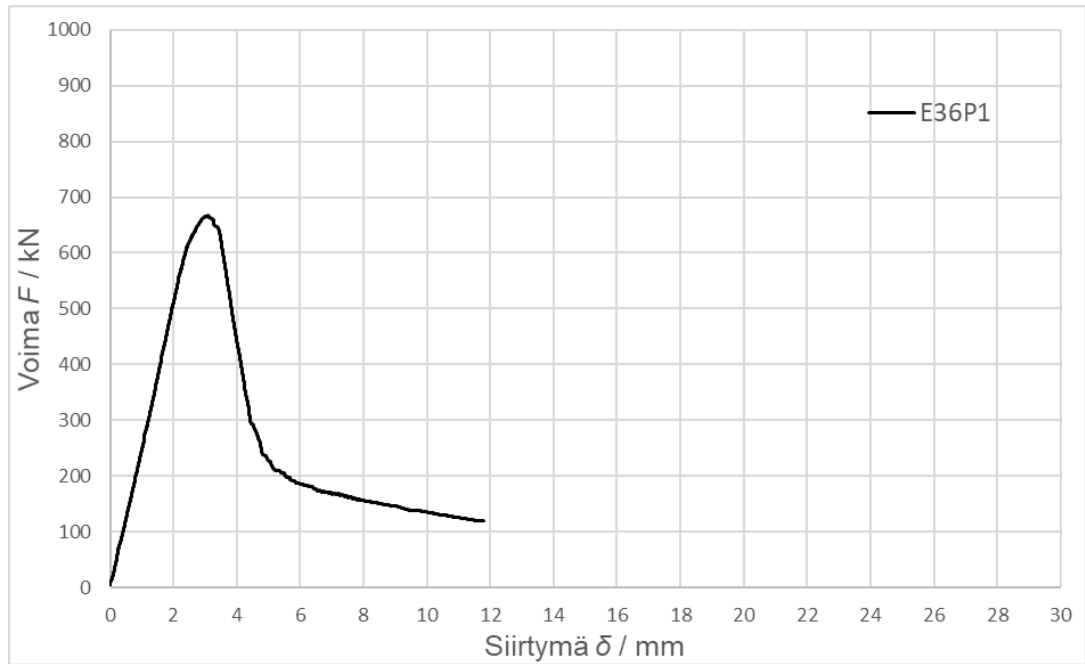




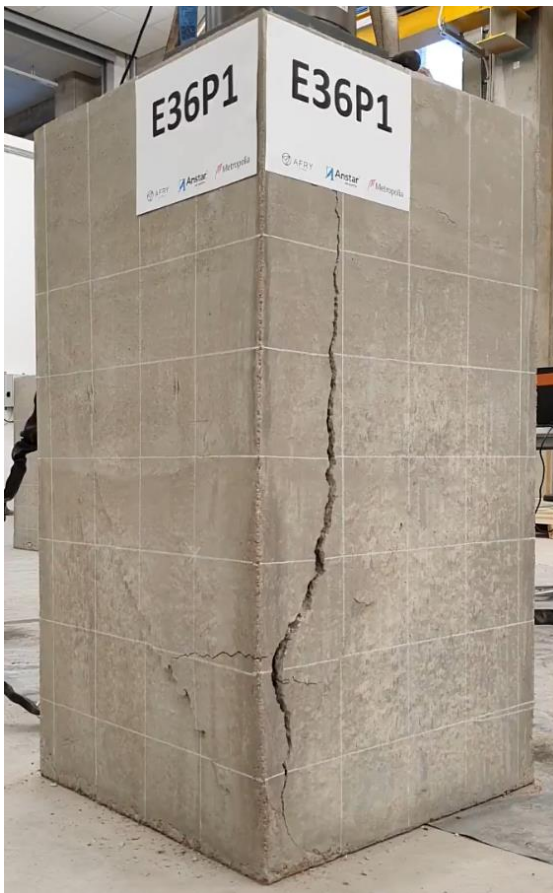
Kuva 19. E35P2 voima-siirtymäkuvaaja.



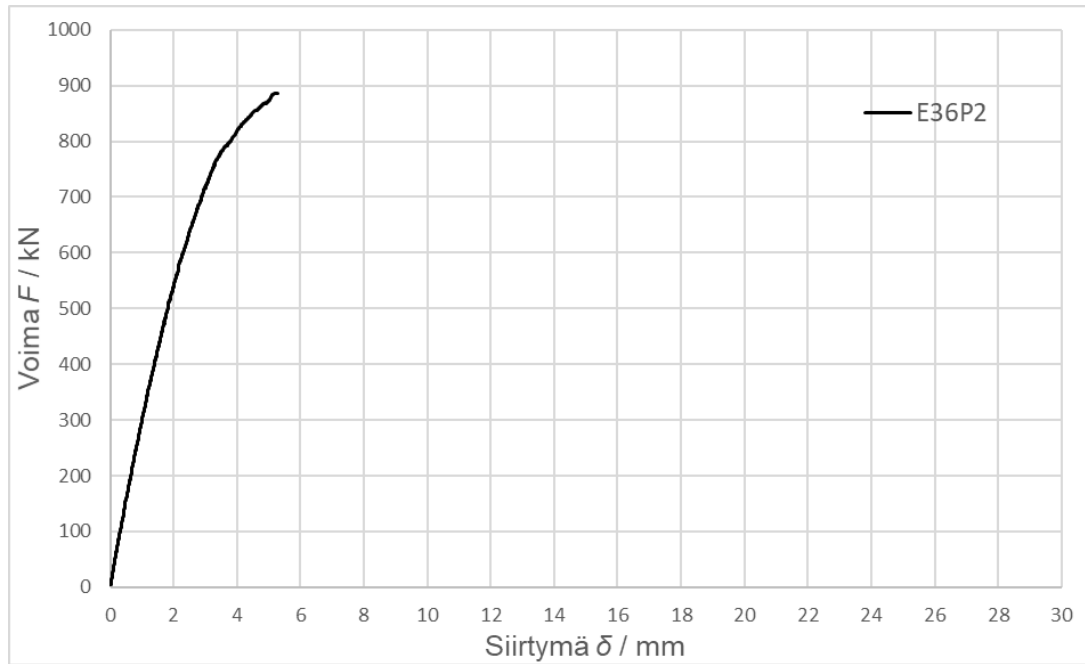
Kuva 20. E35P2 murtuma.



Kuva 21. E36P1 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 22. E36P1 murtuma.



Kuva 23. E36P2 voima-siirtymäkuvaaja.



Kuva 24. E36P2 murtuma.