

ARI HUSSO

# BETONIN PURISTUSLUJUUS RAKEN- NEKOEKAPPALEISSA

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen  
Tarkastaja: DI Jukka Haavisto  
Joulukuu 2019

## TIIVISTELMÄ

**ARI HUSSO:** Betonin puristuslujuus rakennekoekappaleissa

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 206 sivua, 125 liitesivua

Joulukuu 2019

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen

**Avainsanat:** puristuslujuus, puristuskoe, rakennekoekappale, standardikoekappale, timanttiporaus, hionta, rikkiseos

Standardin SFS 7022 mukaisesti pituuden ja halkaisijan väliseltä suhteeltaan (L/D-suhde) 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan kuutiolujuuden arvoiksi kertomilla, jotka riippuvat rakennekoekappaleen halkaisijasta. Standardissa esitetyt korjauskertoimet esiintyvät kirjallisuudessa tietävästi ensimmäisen kerran 1980-luvulla, jonka jälkeen betonilaadut ovat kehittyneet merkittävästi. Korjauskertoimien taustatietoja ei ole enää saatavilla, minkä seurauksena ei ole tiedossa millaisilla betonilaaduilla ja olettamuksilla korjauskertoimet on muodostettu. Eurooppalaisissa standardeissa tai Suomen kansallisissa ohjeissa ei oteta kantaa kuinka paljon rakennekoekappaleiden timanttiporaus ja timanttiterän kunto sekä päiden tasoitustekniikan valinta vaikuttavat puristuslujuuteen.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan edellä kuvattuja tapauksia, jotka vaikuttavat rakennekoekappaleista määritettävään standardin EN 1992-1-1 mukaiseen kuutio- tai lieriölujuuteen. Tutkimuksessa käytettiin kolmea tyypillistä infrarakentamisessa käytettävää huokostettua betonilaatua, joiden lieriölujuus vaihteli välillä C30...C50 MPa. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin yhtä huokostamatonta betonilaatua, jonka nimellislujuus oli C35/45. Lisäksi tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin pienillä koekappalemäärillä tai vain yhdellä betonilaadulla muottimateriaalin ja rakennekoekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen. Pääosin tutkimuksessa käytettiin rakennekoekappaleita, joiden L/D-suhde oli 1,0, yhdellä betonilaadulla tutkittiin lisäksi, kuinka rakennekoekappaleen L/D-suhteen kasvattaminen vaikuttaa puristuslujuuteen. Puristuskokeiden rinnalla tehtiin vertailevaa tutkimusta ainetta rikkomattomalla kimmovasaroinnilla.

Tutkimuksen havaintojen perusteella standardin SFS 7022 mukaiset korjauskertoimet ovat liian suuria ja antavat siten ylioptimistisen kuvan rakenteen puristuslujuudesta. Lisäksi korjauskertoimien havaittiin olevan voimakkaasti riippuvaisia betonilaadusta. Rakennekoekappaleiden L/D-suhteen kasvattamisella havaittiin odotetusti olevan negatiivinen vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Tutkimuksessa havaittiin, että rakennekoekappaleiden timanttiporaamisella ja timanttiterän kunnolla on selvä negatiivinen vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Päiden tasoitustekniikoita vertailtaessa havaittiin, että rikkiseoksella tasoitetuista rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi selvästi matalampia tuloksia kuin hiomalla tasoitetuista. Tasoitustekniikan valinnan merkitys korostuu erityisesti pienemmillä rakennekoekappalekoilla. Tutkimuksessa havaittiin, että rakennekoekappaleiden kuivatusajan lyhentäminen madaltaa rakennekoekappaleiden puristuslujuutta hieman. Muottimateriaaleja vertailtaessa havaittiin, että teräksestä valmistetuilla muoteilla valetuista standardikuutioista saadaan puristuslujuudeksi hieman parempia tuloksia kuin muovisilla muoteilla valetuista.

## ABSTRACT

**ARI HUSSO:** Compressive strength of concrete core's  
Tampere University  
Master of Science Thesis, 206 pages, 125 Appendix pages  
December 2019  
Master's Degree Programme in Civil Engineering  
Major: Structural Design  
Examiner: Professor Anssi Laaksonen

**Keywords:** compressive strength, compression test, concrete core, standard test specimen, diamond drilling, grinding, Sulphur capping

The SFS 7022 standard uses cores with a length, diameter (L/D ratio) of 1.0. Cube compression strength is derived from the concrete core's compression strength using coefficients that depend on the core's diameter. From what we can tell, the correction coefficients used in the standard were first introduced in the 1980s. Cement quality has improved significantly since then. There is currently no information available on what concrete quality and which hypotheses were made to obtain these coefficients. In European or Finnish national guidelines, it is not discussed how the diamond drilling or the quality of the diamond blade and core's straightening technique impacts compression strength.

In this study, we dive into the aforementioned topics, which impact the concrete core's compression strength which is compared with cube and cylinder strength defined in the EN 1992-1-1 standard. In this study, we use 3 types of air-entrained concretes used in infrastructure building. Their cylindrical strength varies from 30 to 50 MPa. Additionally, we used one normal concrete type, which had a nominal cylindrical strength of 35 MPa. In this study we also investigated how moisture ratio of the cores and used casting mold material impact compression strength. This part of the study was made with small number of cores or with only one concrete type. The study primarily used cores with a L/D ratio of 1.0. Additionally, with one concrete type, we tested how growing the L/D ratio impacts the compression strength. In addition to the compression tests we did a comparison study with rebound hammer.

Based on the results of this study, the SFS 7022's coefficients are too big and therefore are overly optimistic about the compression strength. Moreover, we found that the coefficients are highly dependent on the concrete's quality. Growing the L/D ratio expectedly had a negatively impacted the core's compression strength. In the study, we noticed that the diamond drilling and the quality of the diamond drills have a negative impact on the core's compression strength. When we compared grinding and sulphur capping as core's straightening technique we noticed that sulphur capping give significantly lower compression strength than grinding. The importance of choosing the straightening technique is particularly emphasized with smaller core's. In the study, we noticed that shortening the concrete's drying time decreases the core's compression strength a little bit. When comparing the material of the casting mold, we noticed that cubes casted in iron molds had a little bit better compression strength than cubes casted in plastic molds.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopiston rakennustekniikan betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmässä. Diplomityö on osa tutkimusprojektia: Betonin lujuus rakenteissa ja koekappaleissa. Tutkimusta ovat rahoittaneet Väylävirasto, Betoniteollisuus ry, Rudus Oy ja Tampereen yliopisto. Työtä on ohjannut Tampereen yliopistolta professori Anssi Laaksonen ja DI Jukka Haavisto, lisäksi ohjausryhmään kuuluivat Jani Meriläinen (Väylävirasto), Ari Mantila (Betoniteollisuus ry) ja Mika Tulimaa (Rudus Oy). Projektityöryhmään kuuluivat lisäksi Minna Torkkeli (Väylävirasto), Heikki Lilja (Väylävirasto), Timo Tirkkonen (Väylävirasto) ja Jussi Mattila (Betoniteollisuus ry). Työn tarkastajina toimivat professori Anssi Laaksonen ja DI Jukka Haavisto.

Kiitän Tampereen yliopistoa ja tutkimuksen rahoittajia mahdollisuudesta perehtyä betonin puristusominaisuuksien ja lujuuskäyttäytymisen tutkimiseen nykyaikaisilla hyvin kehittyneillä betonilaaduilla. Kiitokset kuuluvat työtovereille niin Tampereen yliopiston betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmässä kuin myös A-Insinöörit Civil Oy:n Silta- ja taitorakenteiden yksikössä. Lukuisista keskusteluista on ollut valtavasti hyötyä diplomityön ja koulutaipaleen edetessä.

Erityiskiitos kuuluu perheelleni ja puolisololleni, joka on jaksanut kannustaa, tukea ja ennen kaikkea ymmärtää valitsemaani opintietä.

Tampereella, 2.12.2019

*Ari Husso*

Ari Husso

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset.....	3
2.	BETONIN PURISTUSLUJUUS .....	5
2.1	Betonin puristuslujuus eurokoodi 2 mukaisesti.....	5
2.2	Betonin puristuslujuus suunnittelussa.....	5
2.3	Betonin puristuslujuuden määrittäminen .....	9
2.4	Betonin ominaislujuuden määrittäminen rakennekoekappaleista .....	10
2.5	Standardi- ja rakennekoekappaleen ero puristuslujuuden määrittämisessä .	16
2.6	Betonimassan ominaisuuksien ja työstämisen vaikutus puristuslujuuteen..	18
2.6.1	Sementin laatu, määrä ja sementin seos- ja sideaineet .....	18
2.6.2	Vesisementtisuhde.....	20
2.6.3	Betonin pakkasenkestävyys (P-luku betonit).....	21
2.6.4	Runkoaineksen laatu, rakeisuus ja raemuoto .....	23
2.6.5	Lisäaineet .....	24
2.6.6	Veden laatu .....	25
2.6.7	Betonimassan tiivistyksen onnistuminen.....	26
2.7	Betonin lujittumisen aikaisten tekijöiden vaikutukset puristuslujuuteen ...	27
2.7.1	Lujittumislämpötila ja betonin ikä .....	27
2.7.2	Jälkihoito.....	28
2.7.3	Lujittumisen aikainen kosteus.....	29
2.8	Koekappaleen ominaisuuksien vaikutus puristuslujuuteen.....	29
2.8.1	Koekappaleen koko .....	30
2.8.2	Koekappaleen pituuden ja halkaisijan suhde .....	33
2.8.3	Koekappaleen muoto .....	38
2.8.4	Koekappaleen kosteuspitoisuus .....	40
2.8.5	Koekappaleen porauskohdan sijainti ja suunta .....	42
2.8.6	Poraus, katkaisu ja päiden tasoitus .....	43
2.9	Rakennekoekappaleessa olevan raudoituksen vaikutus puristuslujuuteen....	48
3.	NÄYTTEIDEN VALMISTAMINEN JA KOEJÄRJESTELYT .....	49
3.1	Tutkimuksessa käytetyt betonilaadut.....	49
3.2	Näytteiden valu.....	51
3.2.1	Käytetyt muotit.....	51
3.2.2	Valutapahtuma .....	57
3.3	Tuoreelle betonille tehdyt kokeet .....	60
3.3.1	Notkeusluokan testaaminen .....	61
3.3.2	Ilmamäärän mittaaminen .....	66
3.3.3	Betonimassan tiheyden määrittäminen.....	70
3.3.4	Muottien purku.....	71

3.4	Koekappaleiden nimeäminen .....	71
3.5	Koekappaleiden varastointi .....	72
3.6	Koekappaleille asetetut vaatimukset.....	73
3.7	Koekappaleiden valmistelut .....	75
3.7.1	Koekappaleiden timanttioraus.....	75
3.7.2	Koekappaleiden timanttisahaus.....	78
3.7.3	Koekappaleiden päiden tasoittaminen.....	80
3.8	Koekappaleille tehdyt mittaukset .....	83
3.8.1	Koekappaleiden tiheyden määrittäminen .....	83
3.8.2	Koekappaleiden dimensioiden määrittäminen.....	85
3.9	Puristuskokeet .....	87
3.9.1	Lujuudenseurantakokeet .....	91
3.9.2	Puristuskokeiden suorittaminen .....	92
3.10	Kimmovasarointi .....	94
4.	MITTAUSTULOKSET.....	101
4.1	Lujuudenseurantakoekappaleiden puristuslujuus.....	101
4.1.1	C35/45 P50.....	101
4.1.2	C30/37 P20.....	102
4.1.3	C50/60 P50.....	103
4.1.4	C35/45 huokostamaton .....	104
4.1.5	Lujuudenseurantakoekappaleiden lujuudenkehitys.....	105
4.2	Koekappaleiden puristuslujuus.....	106
4.2.1	Standardilieriöiden D150x300 lujuus.....	107
4.2.2	Standardikuutioiden 150x150x150 lujuus .....	109
4.2.3	Porattujen D150x300 rakennekoekappaleiden lujuus .....	110
4.2.4	Valettujen D100x100 koekappaleiden lujuus .....	111
4.2.5	Porattujen D100x100 rakennekoekappaleiden lujuus .....	112
4.2.6	Porattujen D80x80 rakennekoekappaleiden lujuus .....	114
4.2.7	Porattujen D50x50 rakennekoekappaleiden lujuus .....	116
4.2.8	Rakennekoekappaleiden lujuus eri kosteuspitoisuuksissa.....	118
4.3	Porattavien valukappaleiden ja standardilieriöiden tiheys.....	119
4.3.1	Porattavien valukappaleiden tiheystutkimuksen tulokset.....	121
4.3.2	Standardilieriöiden tiheystutkimuksen tulokset.....	122
4.4	Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus puristuslujuuteen .....	124
4.4.1	Rakennekoekappaleet D100x100, halkaisijan vaikutus .....	125
4.4.2	Rakennekoekappaleet D80x80, halkaisijan vaikutus .....	128
4.4.3	Rakennekoekappaleet D50x50, halkaisijan vaikutus .....	131
4.5	Pituuden ja halkaisijan suhteen vaikutus puristuslujuuteen.....	135
4.6	Timanttiorauksen vaikutus puristuslujuuteen.....	138
4.6.1	Rakennekoekappaleet ja valetut koekappaleet 100x100 .....	139
4.6.2	Rakennekoekappaleet ja standardikoekappaleet 150x300.....	141

4.6.3	Rakennekoekappaleet D100x100 verrattuna standardikuution ja rakennekoekappaleet D100x200 verrattuna standardilieriöön.....	142
4.7	Tutkimuksessa havaitut porattujen ja valettujen koekappaleiden puristuslujuuksien suhteet .....	145
4.8	Timanttiterän kunnan vaikutus puristuslujuuteen .....	148
4.8.1	Rakennekoekappaleet D100x100, terän kunnan vaikutus.....	148
4.8.2	Rakennekoekappaleet D80x80, terän kunnan vaikutus.....	150
4.8.3	Rakennekoekappaleet D50x50, terän kunnan vaikutus.....	151
4.8.4	Tutkimuksessa havaittu timanttiterän kunnan vaikutus puristuslujuuteen .....	153
4.9	Rakennekoekappaleiden tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen .....	155
4.9.1	Rakennekoekappaleet D100x100, tasoitustekniikan vaikutus.....	156
4.9.2	Rakennekoekappaleet D80x80, tasoitustekniikan vaikutus.....	157
4.9.3	Rakennekoekappaleet D50x50, tasoitustekniikan vaikutus.....	159
4.9.4	Tutkimuksessa havaittu tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen .....	160
4.10	Muottimateriaalin vaikutus puristuslujuuteen.....	162
4.11	Kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen .....	163
4.12	Kimmoasaralla mitatut puristuslujuudet .....	165
4.12.1	Standardilieriöiden kimmoasaratulokset.....	165
4.12.2	Standardikuutioiden kimmoasaratulokset.....	167
5.	PÄÄTULOKSET .....	170
5.1	Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen.....	172
5.2	Rakennekoekappaleen pituuden vaikutus rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen ja standardikoekappaleiden puristuslujuuksien suhde...	178
5.3	Timanttitorauksen vaikutus rakennekoekappaleen puristuslujuuteen .....	180
5.4	Timanttiterän kunnan vaikutus rakennekoekappaleen puristuslujuuteen..	183
5.5	Rakennekoekappaleiden tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen .....	185
5.6	Muottimateriaalin vaikutus puristuslujuuteen.....	186
5.7	Koekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen .....	187
5.8	Kimmoasaratutkimukset .....	188
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	192
6.1	Johtopäätökset .....	192
6.2	Jatkotoimenpiteet.....	200
	LÄHTEET.....	202

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVA	Air Void Analyzer
BS	British Standard
CEM I	portlandsementti
CEM II	portlandseossementti
CEM III	masuunikuonasementti
CEM IV	pozzolaaniseimentti
CEM V	seossementti
EN	European Standard
DIN	Deutsches Institut für Normung
L/D -suhde	lieriömäisen standardikoe-kappaleen tai rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välinen suhde
P-luku	betonin pakkasenkestävyysluku
PP	polypropeeni
PVC	polyvinyylikloridi
RH	suhteellinen kosteus
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
T1	puristuskokeissa käytetty testauskone 1
T2	puristuskokeissa käytetty testauskone 2
SFS	Suomen standardisoimisliitto
SS	Svensk Standard
$b$	kuutiomaisen standardikoe-kappaleen sivumitta [mm]
$d$	lieriömäisen tai kuutiomaisen koekappaleen nimellismitta [mm]
$d_m$	standardikoe-kappaleen tai rakennekoekappaleen keskimääräinen halkaisija [mm]
$d_1, d_2$	betonimassan leviämä notkeusluokan määrittämisessä leviämäkoeken avulla [mm]
$f_c$	standardikoe-kappaleen tai valetun koekappaleen puristuslujuuden testitulok [MPa]
$f_{cd}$	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo [MPa]
$f_{ck}$	betonin ominaispuristuslujuus, lieriömäisellä standardikoe-kappaleella määritettynä, minkä halkaisija on 150 mm ja korkeus 300 mm [MPa]
$f_{ck.cube}$	betonin ominaispuristuslujuus, kuutiomaisella standardikoe-kappaleella määritettynä, minkä sivumitat ovat 150 mm [MPa]
$f_{ck.dry}$	betonin ominaispuristuslujuus, lieriömäisellä standardikoe-kappaleella määritettynä, minkä halkaisija on 150 mm ja korkeus 300 mm ja testaus on tehty ilmakeivätilulle koekappaleelle [MPa]
$f_{ck.is}$	rakennekoekappaleista määritetty rakenteen ominaispuristuslujuus [MPa]
$f_{ck.is.cube}$	rakennekoekappaleista määritetty rakenteen ominaispuristuslujuus kuutiolujuudeksi muunnettuna [MPa]
$f_{cm}$	lieriömäisen koekappaleen keskimääräinen puristuslujuus [MPa]
$f_{cm.cube}$	kuutiomaisen koekappaleen keskimääräinen puristuslujuus [MPa]
$f_{cm;k}$	lieriömäisen, kuluneella timanttiterällä poratun rakennekoekappaleen keskimääräinen puristuslujuus [MPa]



$f_{cm.cube.m}$	kuutiomaisen koekappaleen keskimääräinen puristuslujuus, joka on muunnettu lieriömäisen standardikoekappaleen puristuslujuudesta [MPa]
$f_{cm.cube.R}$	Kimmovasaralla määritetty kuutiomaisten standardikoekappaleiden keskimääräinen puristuslujuus [MPa]
$f_{cm.R}$	Kimmovasaralla määritetty lieriömäisten standardikoekappaleiden keskimääräinen puristuslujuus [MPa]
$f_{cm;s}$	lieriömäisen rakennekoekappaleen keskimääräinen puristuslujuus [MPa], jonka päät on tasoitettu rikkiseoksella
$f_{is}$	rakennekoekappaleen puristuslujuuden testituloksesta [MPa]
$f_{is.cube}$	rakennekoekappaleen puristuslujuuden testituloksesta standardikuutiolujuutta vastaavaksi muunnettuna [MPa]
$f_{is.min}$	tutkimussarjan rakennekoekappaleiden matalin puristuslujuuden testituloksesta [MPa]
$f_{m(n).is}$	tutkimussarjan rakennekoekappaleiden puristuslujuuden testitulosten keskiarvo n:stä testituloksesta [MPa]
$h$	betonikartion painuma notkeusluokan määrittämisessä painumakokeen avulla [mm]
$h_m$	standardikoekappaleen tai rakennekoekappaleen keskimääräinen korkeus [mm]
$h_r$	raudoitteen akselin etäisyys rakennekoekappaleen lähemmästä päästä [mm]
$k$	tutkimussarjan koetulosten lukumäärästä riippuva marginaali [MPa]
$m_a$	vedellä kyllästetyn koekappaleen massa ilmaa [kg]
$m_{st}$	veteen upotetun ripustuskorin massa [kg]
$m_w$	vedellä kyllästetyn, veteen upotetun koekappaleen massa [kg]
$m_1$	tyhjän mittausastian massa tuoreen betonimassan tiheyden määrittämisessä [kg]
$m_2$	tiivistetyllä betonimassalla täytetyn mittausastian massa tuoreen betonimassan tiheyden määrittämisessä [kg]
$n$	tutkimussarjan koko
$s$	tutkimussarjan puristuslujuuden testitulosten keskihajonta [MPa]
$t$	betonin lujittumisaika
$t_{20}$	betonin kypsyysikä, joka vastaa +20 °C lämpötilassa säilytetyn betonin lujudenkehittymistä
$v/s$	veden ja sementin massojen suhde
$x_m, y_m$	standardikuution kuormituspinnan keskimääräinen pituus [mm]
$A_c$	kuormituksen alaisen koekappaleen keskimääräinen poikkileikkauspinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
$A_{c1}$	tuoreen betonimassan ilmamäärä [%]
$A_1$	tuoreen betonimassan näennäinen ilmamäärä [%]
$C$	standardikoekappaleen lieriölujuus, minkä halkaisija on 150 mm ja korkeus 300 mm
$D$	lieriömäisen koekappaleen halkaisija [mm]
$D_c$	standardikoekappaleen tai rakennekoekappaleen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$D_{c.w}$	tuoreen betonimassan tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$F$	koekappaleen murtokuorma [kN]
$G$	kiviaineksen korjaustekijä tuoreen betonin ilmamäärämittauksessa [%]

$K_{dia}$	rakennekoekappaleen halkaisijan huomioiva muunnoskerroin
$K_{is,\lambda}$	rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen huomioiva muunnoskerroin lujutta verrattaessa lieriölujuuteen
$K_{is,\lambda,cube}$	rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen huomioiva muunnoskerroin lujutta verrattaessa kuutiolujuuteen
$K_s$	rakennekoekappaleessa sijaitsevan raudoitteen huomioiva korjauskerroin
$L$	lieriömäisen koekappaleen pituus [mm]
$T(t)$	betonin lämpötila lujittumisen ajanjakson aikana [°C]
$V$	koekappaleen tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$V_{c,w}$	kalibroidun mittausastian tilavuus tuoreen betonimassan tiheyden määrittämisessä [m <sup>3</sup> ]
$V_{is,\lambda}$	muunnoskerroimen $K_{is,\lambda}$ hajonta Yhdysvalloissa
$\alpha_{cc}$	pitkäaikaisen kuormituksen huomioiva kerroin betonin suunnittelu- lujuudelle
$\epsilon_c$	betonin muodonmuutos, puristuma [‰]
$\epsilon_{c2}$	betonin muodonmuutos, puristuma normaalibetoneille ominaislujuu- den arvolla [‰]
$\epsilon_{cu}$	betonin muodonmuutos, murtopuristuma arvo normaalibetoneille [‰]
$\gamma_c$	betonin osavarmuusluku
$\lambda$	lieriömäisen koekappaleen pituuden ja halkaisijan välinen suhde
$\varphi_r$	raudoitteen halkaisija [mm]
$\rho_w$	veden tiheys 20 °C lämpötilassa [kg/m <sup>3</sup> ], oletusarvona käytetään 998 kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_c$	betonin puristusjännitys [MPa]

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Kesällä 2016 havaittiin Liikenneviraston (nykyinen Väylävirasto) rakennuttamassa sillassa ja junaradan ylittävässä kansirakenteessa betonin puristuslujuusongelmia. Rakenteista tehtyjen tutkimusten mukaan lujuuskadon aiheutti betonissa ollut liian suuri ilmamäärä. Kummassakin tapauksessa laadunvalvonnassa oli selviä puutteita. Havaittujen ongelmien jälkeen laadunvalvontaa on tehostettu. Havaittujen puristuslujuusongelmien jälkeen Liikennevirasto tutki kaiken kaikkiaan 93 vuosina 2005-2016 rakennettua siltaa varmistuakseen, että silloissa ei esiinny lujuuskatoa. Havaittujen ongelmien jälkeen siltojen erikoistarkastuksissa on alettu enemmän kiinnittää huomiota kantavien rakenteiden puristuslujuusvaatimuksen täyttymiseen, minkä myötä tehtävien puristuskokeiden määrät ovat kasvaneet merkittävästi.

Olemassa olevista rakenteista puristuslujuutta tutkitaan timanttiporaamalla rakennekoekappaleita, jotka ovat yleensä halkaisijaltaan 70...100 mm ja rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleita timanttiporataan yleensä vain ontelolaatoista. Siltojen tutkimuksissa rakennekoekappaleen halkaisijan tulee olla vähintään 80 mm. Suomessa noudatettavan standardin SFS 7022 [1] mukaisesti rakennekoekappaleista määritettävää puristuslujuutta verrataan kuutiolujuuteen siten, että rakennekoekappaleiden puristuslujuutta korotetaan rakennekoekappaleen halkaisijasta riippuvalla korjauskertoimella. Standardissa esitetyt korjauskertoimet esiintyvät kirjallisuudessa ensimmäisen kerran tietävästi 1980-luvulla, jonka jälkeen erityisesti infrarakentamisessa käytettävät pakkasenkestävät betonilaadut ovat kehittyneet merkittävästi. Standardin SFS 7022 [1] mukaisten puristuslujuuksien korjauskertoimen taustatietoja ei ole enää saatavilla, minkä seurauksena ei ole tiedossa millaisilla betonilaadulla ja olettamuksilla korjauskertoimet on muodostettu.

Rakennekoekappaleista ja standardikoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen vaikuttavat koon lisäksi monet tekijät, joiden vaikutusta ei ole tarkasti tiedossa ja tekijöiden vaikutukseen ei oteta kantaa eurooppalaisissa tai Suomen kansallisissa standardeissa ja ohjeissa. Koekappaleiden päiden tasoittaminen tehdään Suomessa yleensä koneellisesti hiomalla tai käyttämällä rikkiseosta, molemmat tekniikat ovat hyväksytyjä eurooppalaisten standardien mukaan. Tiedossa ei kuitenkaan ole, saadaanko molemmilla tasoitustekniikoilla määritettyä sama puristuslujuus. Rakennekoekappaleiden timanttiporaamisen vaikutusta rakennekoekappaleiden lujuuteen ei ole esitetty eurooppalaisissa standardeissa. Tiedossa ei myöskään ole, millainen vaikutus huomattavan kuluneen timanttiterän käytöllä on rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Eurooppalaisten

standardien mukaisesti koekappaleiden valamiseen voidaan käyttää sekä teräksestä että muovista valmistettuja muotteja. Standardeissa ei kuitenkaan esitetä, vaikuttaako muottimateriaali koekappaleiden puristuslujuuteen.

Tutkimuksen aikaan standardi EN 13791 Betonin puristuslujuuden arviointi rakenteista ja rakenneosista [2] oli uudistumassa. Nykyisin voimassa olevassa standardissa koekappaleita ohjeistetaan kuivattamaan vähintään 72 tuntia ennen puristuskokeiden suorittamista, jotta koekappaleiden työstämisestä (poraus, sahaus ja hionta) koekappaleisiin imeytynyt ylimääräinen kosteus ehtii poistumaan. Uudistuvassa standardissa uusi ohjeellinen kuivatusaika on 16...24 tuntia. Tutkimuksen yhteydessä haluttiin selvittää, vaikuttaako lyhennetty kuivatusaika rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.

Betonin puristuslujuutta voidaan arvioida myös useilla ainetta rikkomattomilla tutkimusmenetelmillä. Suomessa yleisin ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä on kimmovasarointi. Tutkimuksen yhteydessä haluttiin selvittää, kuinka paljon kimmovasaralla määritetty arvio puristuslujuudesta eroaa todellista mitatuista puristuslujuuksista.

Ennen tutkimuksen aloittamista Tampereen teknillisen yliopiston Vaativien rakenteiden tutkimusryhmä teki esiselvityksen Betonin puristuslujuus. Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista [3]. Esiselvitys tehtiin keväällä 2018 Liikenneviraston ohjauksessa. Esiselvityksessä selvitettiin kirjallisuustutkimuksen keinoin, kuinka rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksista päädytään betonin mitoituslujuuteen. Tämän diplomityön työn lisäksi tutkimuksen aiheesta tehtiin myös toinen diplomityö, jossa tutkittiin betonin toimintaa osana taivutettua rakennetta. Tällä diplomityöllä saadaan lisätietoa betonin puristuslujuuden eroista taivutustilanteessa ja rakennekoekappaleista määritettynä.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen perusteella halutaan selvittää, millainen vaikutus rakennekoekappaleiden halkaisijalla on rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen, kun rakenteissa käytetään nykyaikaisia betonilaatuja. Erityisesti tutkimuksessa painotettiin infrarakentamisessa yleisesti käytettäviä pakkasenkestäviä betonilaatuja, joiden lieriölujuus vaihteli välillä 30...50 MPa. Tutkimustulosten perusteella pyritään selvittämään, kuinka eri kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuudesta saadaan määritettyä suunnittelulujuus.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millainen vaikutus rakennekoekappaleiden timanttiporaamisella on rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Timanttiporauksen vaikutusta selvitetään vertaamalla rakennekoekappaleiden puristuslujuutta valettujen vastaavan kokoisten koekappaleiden lujuuteen. Timanttiporauksen vaikutuksen lisäksi tutkimuksessa selvitetään, millainen vaikutus hyvin kuluneen timanttiterän käytöllä on rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.

Tutkimuksessa on tavoitteena selvittää, saadaanko Suomessa pääsääntöisesti käytetyillä koekappaleiden päiden tasoitusmenetelmillä määritettyä samaa puristuslujuus. Yleensä koekappaleiden päiden tasoitus tehdään Suomessa joko koneellisesti hiomalla tai rikki-seoksella tasoittamalla. Tutkimuksen perusteella selvitetään lisäksi, millainen vaikutus rakennekoekappaleen kosteuspitoisuudella on koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Kosteuspitoisuutta tarkastelevan tutkimusosan perusteella selvitetään millainen vaikutus standardin EN 13791 [2] uudistuksella on rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Lisäksi kosteuspitoisuutta tarkastelevassa tutkimusosassa selvitetään kuinka paljon standardilieriön täysin vedellä kyllästäminen vaikuttaa koekappaleen puristuslujuuteen, kun tulosta verrataan kuivana puristetun standardikoekappaleen lujuuteen.

Eurooppalaisten standardien mukaan koekappaleiden valamiseen voidaan käyttää teräksestä tai muovista valmistettuja muotteja. Tutkimuksessa selvitetään, onko muottimateriaalilla vaikutusta koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Muottimateriaalia tutkiva tutkimusosa tehdään muista tutkimusosista poiketen käyttämällä puristuskokeissa koekappaleina standardikuutioita.

Tutkimuksen puristuskokeiden yhteydessä tehdään myös vertailevaa puristuskoetutkimusta ainetta rikkomattomalla tutkimusmenetelmällä. Tutkimusmenetelmänä käytetään kimmovasarointia. Tutkimuksessa selvitetään, kuinka paljon kimmovasaralla määritetty arvio puristuslujuudesta eroaa todellisesta mitatusta puristuslujuudesta. Lisäksi kimmovasaratutkimuksella selvitetään, vaikuttaako koekappaleiden kosteuspitoisuus tai hierretyn pinnan hiominen kimmovasaralla määritettävään puristuslujuuteen.

### **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Tutkimuksessa keskitytään tutkimaan betonin puristuslujuutta vain puristuskokeiden avulla. Puristuskokeiden rinnalla tehdään vertailevaa tutkimusta kimmovasaramittauksilla, joiden tulokset eivät kuitenkaan ole suoraan verrattavissa mitattuihin puristuslujuuksiin. Tutkimuksessa kimmovasaramittausten ja todellisten puristuslujuuksien välisiä suhteita tarkastellaan ainoastaan suuruusluokkatasolla. Tutkimuksessa käytettävät koekappaleet valmistetaan, jälkihoidetaan, valmistellaan (timanttiporaus, -sahaus ja päiden tasoittaminen) ja puristuskokeet suoritetaan velvoittavien standardien mukaisesti. Tutkimuksen puristuskokeet suoritetaan nimellisesti betonin ollessa 91 vuorokauden ikäistä. Tutkimuksen huomattavan suuren koekappalemäärän seurauksena puristuskokeiden suorittamisessa sallitaan  $\pm 7$  vuorokauden aikaikkuna.

Tutkimuksen ennakkovalmisteluissa käytettävien betonilaatujen määrä rajattiin neljään laatuun. Betonilaadut valittiin siten, että ne edustavat mahdollisimman hyvin yleisesti käytettyjä pakkasenkestäviä infrabetonilaatuja. Yhdeksi betonilaaduksi valittiin huokostamaton betonilaatu, jonka nimellislujuus on sama kuin tutkimuksen yhden huokostetun betonilaadun lujuus.

Yleensä rakennekoekappaleet timanttiporataan valetuista todellisista rakenteista. Tässä tutkimuksessa pääosa rakennekoekappaleista timanttiporataan halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm standardilieriöistä, joissa ei ole raudoitusta. Timanttiporaukset suoritetaan pienikokoisista lieriömäisistä valukappaleista, jotta kaikille tutkimuksessa keskenään verrattaville koekappaleille pystytään järjestämään mahdollisimman identtiset valmistus-, jälkihoito-, ja säilytysolosuhteet.

Tutkimuksen koejärjestelyiden suunnittelu ja valmistelu, sekä koekappaleiden valmistaminen ja puristuskokeet kuuluvat osaksi diplomityön suorittamista.

## 2. BETONIN PURISTUSLUJUUS

### 2.1 Betonin puristuslujuus eurokoodi 2 mukaisesti

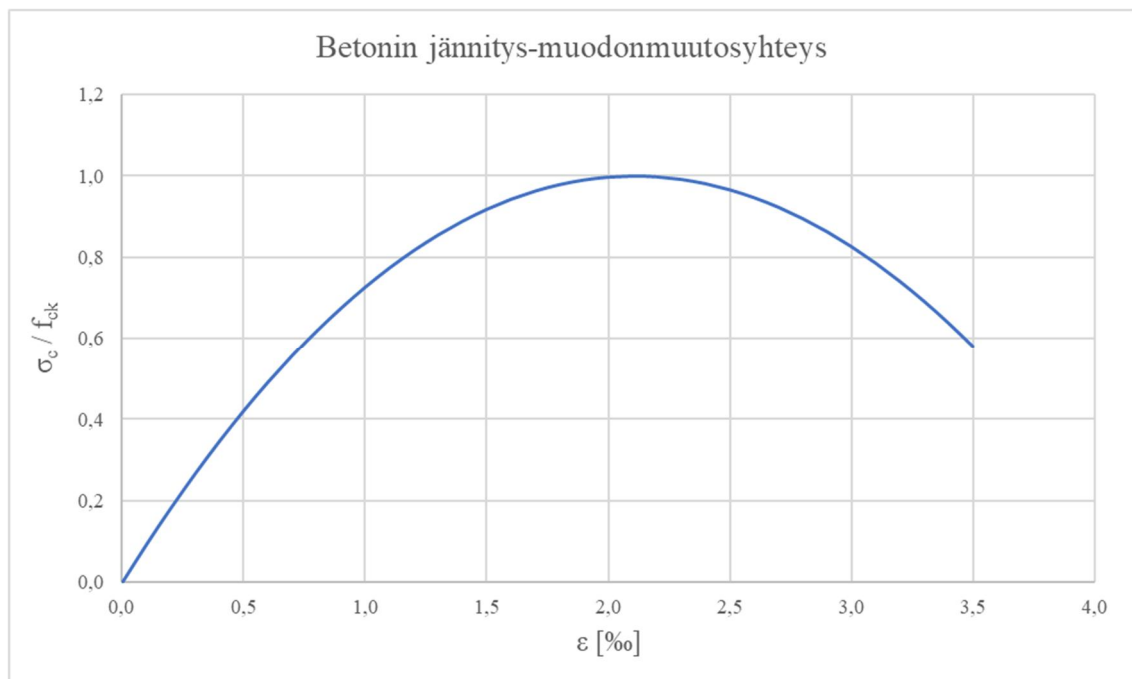
Betonit luokitellaan puristuslujuuden perusteella, joko lieriö- tai kuutiolajuuden mukaisesti. Betonin ilmoitetun lujuuden suuruus riippuu betonin lujuuden määrittämisessä käytetyn koekappaleen muodosta [4]. Eurooppalaisen standardin mukaisesti betonin lujuus ilmoitetaan standardin EN 12390-1 [5] mukaisille ja standardin EN 12390-2 [6] mukaisesti valmistetulle ja jälkihoidetuille standardikoekappaleille, jotka ovat muodoltaan lieriöitä tai kuutioita. Lieriömäisten standardikoekappaleiden tulee olla halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm, sekä kuutiomaisten sivumitoiltaan 150 mm [7]. Standardin mukaiset betonin lujuudet perustuvat 28 vuorokauden ikäisenä määritettävään lieriölujuuteen  $f_{ck}$  [MPa] tai kuutiolajuuteen  $f_{ck.cube}$  [MPa], jotka ovat 5 % alafraktiiliarvoja [8]. Standardikoekappaleiden puristuskokeissa kuutiolajuudeksi saadaan suurempi arvo kuin lieriölujuudeksi. Eurokoodi 2:ssa betonin lujuusluokat ilmoitetaan muodossa lieriölujuus / kuutiolajuus ( $f_{ck} / f_{ck.cube}$ ) siten, että lieriölujuuden eteen merkataan kirjaintunnus C, eli esimerkiksi C35/45. Eurokoodiin perustuvassa betonirakenteiden mitoituksessa käytetään puristuslujuudesta lieriölujuuden arvoa [8].

### 2.2 Betonin puristuslujuus suunnittelussa

Betonin materiaalikäyttäytymistä on esitetty kuvassa 1. Kuvassa pystyakselilla on esitetty betonissa vallitseva puristusjännitys  $\sigma_c$  ja vaaka-akselilla muodonmuutos eli puristuma  $\epsilon_c$ . Betonin jännitystilat voidaan jakaa neljään alueeseen sen mukaan, kuinka suuri puristusjännitys on suhteessa betonin puristuslujuuden ominaisarvoon  $f_{ck}$ . Tasolle  $0,45 \cdot f_{ck}$  saakka muodonmuutokset kasvavat lineaarisesti ja aluetta kutsutaan stabiiliksi mikrohalkeilualueeksi, jossa muodonmuutokset eivät ole pysyviä ja rakenne ei siten murru toistuvien kuormitussykliä seurauksena. Välillä  $0,45 \dots 0,6 \cdot f_{ck}$  muodonmuutokset siirtyvät epälineariselle alueelle ja mikrohalkeilun määrä kasvaa eli runkoaineen vieressä oleva sementtikivi halkeaa puristusvoiman suunnassa. Välillä  $0,6 \dots 0,8 \cdot f_{ck}$  betoni on epästabiilin mikrohalkeilun alueella, jolloin runkoaineen raerajoissa alkaa kehittyä halkeilua [9] ja [10]. Halkeilun muodostumista betonirakenteeseen on esitetty kuvassa 2, jossa esimerkkinä on käytetty standardilieriötä betonin puristuskokeessa, jossa puristus tapahtuu yksiakselisesti. Vasemman puoleisessa otoksessa on esitetty betonin mikrorakenne tilanteessa, jossa puristusjännitys  $\sigma_c \leq 0,8 \cdot f_{ck}$ . Kuvassa betonin runkoaineen välissä olevassa sementtikivessä esiintyy puristusvoiman aiheuttamia halkeamia ja runkoaineen raerajoihin alkaa kehittyä halkeilua. Välillä  $0,8 \dots 1,0 \cdot f_{ck}$  betoni on niin ikään epästabiilin mikrohalkeilun alueella, mutta puristusvoiman lisääntyessä sementtikiveen ja raerajoihin muodostuneet halkeamat alkavat yhdistyä ja puristusvoiman suuntaisia halkeamia syntyy useita vierekkäin [9] ja [10]. Halkeamien yhdistyminen on esitetty kuvan 2 oikeanpuoleisessa betonin

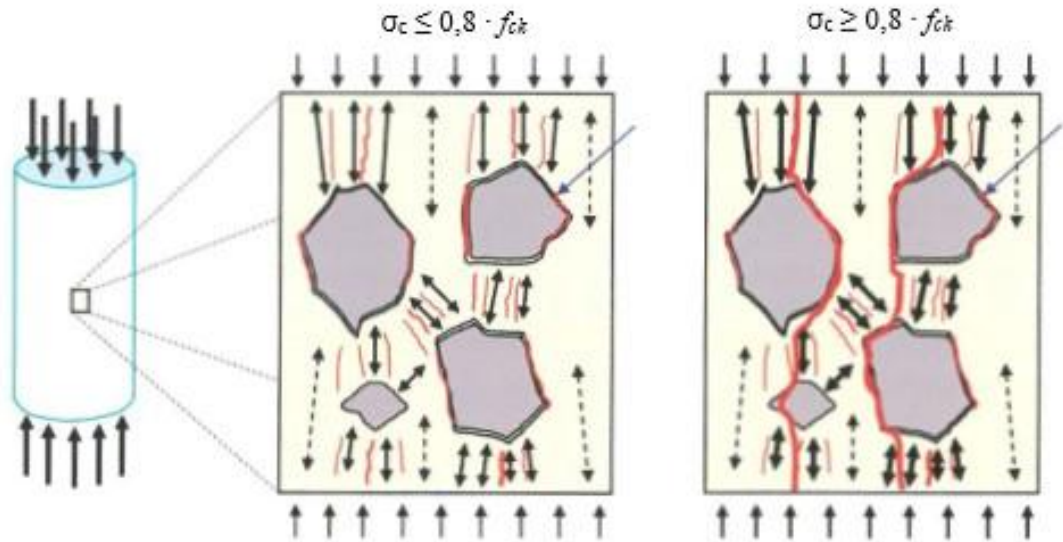
mikrorakennetta kuvaavassa otoksessa. Betonin lopullinen murtuminen saavutetaan, kun betonirakenteessa vallitseva puristusjännitys  $\sigma_c$  saavuttaa betonin puristuslujuuden ominaisarvon  $f_{ck}$  eli  $\sigma_c = f_{ck}$ . Betonin murtuessa halkeamien erottamat kapeat puristussauvat nurjahtavat eli taipuvat sivulle [10].

Betonirakenteiden suunnittelussa betonin jännitykset tulisi rajata käyttörajatilassa siten, että pitkäaikaisyhdistelmällä rasitukset voivat olla maksimissaan  $0,45 \cdot f_{ck}$ . Kyseinen jännitystaso saavutetaan rakenteen elinkaaren aikana useasti. [9] Mikäli rakenteen puristusjännitys ylittää pysyvästi arvon  $0,45 \cdot f_{ck}$ , tulee virumisen epälineaarisuus ottaa huomioon [8]. Jännitystaso  $0,6 \cdot f_{ck}$  tulee rajata siten, että se saavutetaan käyttörajatilan ominaisyhdistelmällä, mikä toistuu yleensä vain muutamia kertoja rakenteen elinkaaren aikana [9].



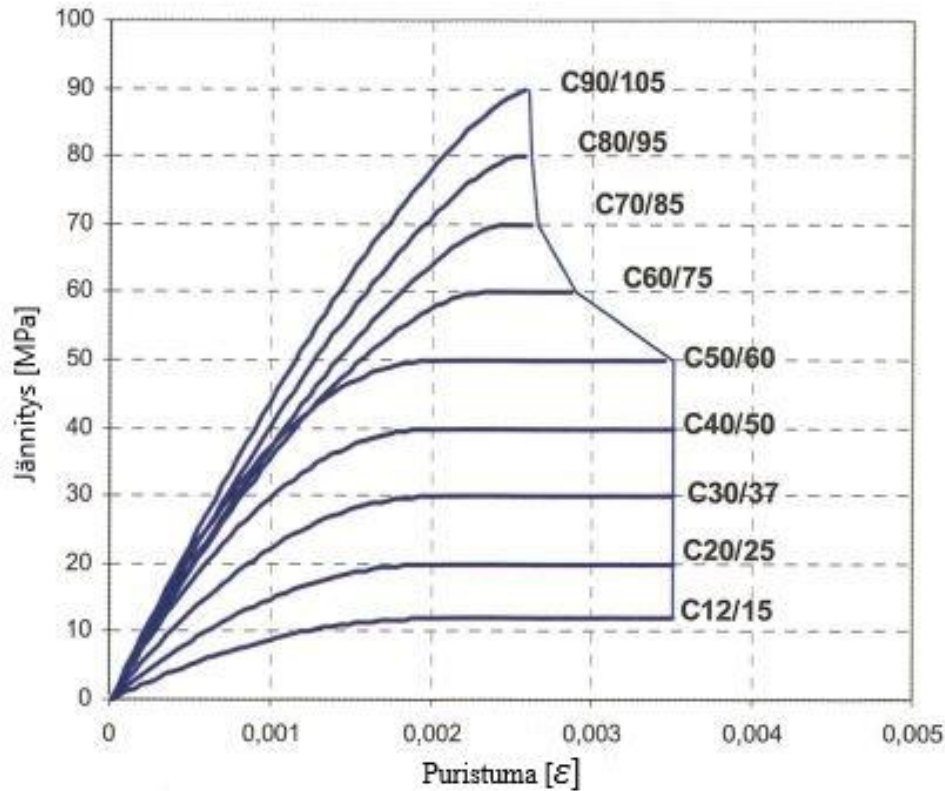
**Kuva 1.** Betonin jännitys-muodonmuutosyhteys EC2 mukaisesti betoniluokalla C35/45.





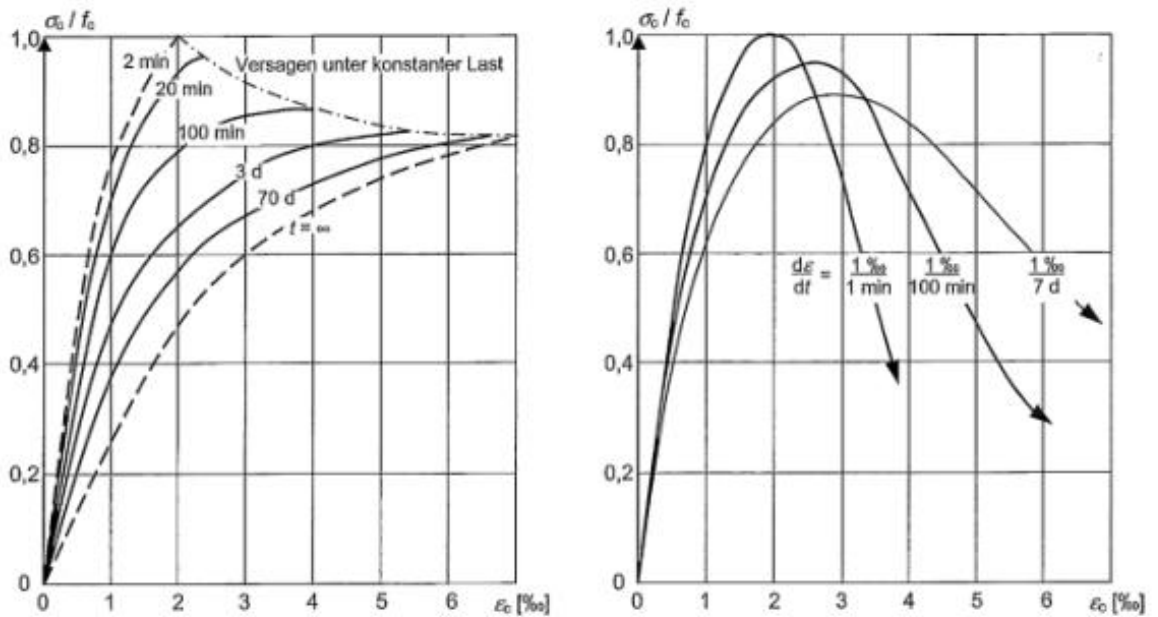
**Kuva 2.** Betonin murtumisen vaiheet, mukailten lähdettä [10]

Kuvan 1 jännitys-muodonmuutoskuvaajassa betonin ominaislujuus  $f_{ck}$  saavutetaan muodonmuutoksen (puristuma)  $\varepsilon_{c2}$  ollessa 2 ‰. Tämän jälkeen betonin muodonmuutokset kasvavat puristusjännityksen pysyessä vakiona (kuvassa 3), kunnes saavutetaan murtopuristuma  $\varepsilon_{cu2}$ , joka on 3,5 ‰. Nämä puristuman raja-arvot ovat vakioita betonilujuusluokkaan C50/60 saakka, jonka jälkeen betonin ominaislujuuden saavuttamiseen vaaditaan suurempi puristuman arvo ja murtopuristuma saavutetaan pienemmällä puristuman arvolla [8]. Kuvassa 3 on esitetty betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuus eri betonin lujuusluokille. Kuvasta on selvästi havaittavissa, että korkealujuusbetoneilla ( $f_{ck} > 50$  MPa) epälineaariset muodonmuutokset ovat vähäisempiä kuin normaalilujuusbetoneilla ( $f_{ck} \leq 50$  MPa) ja ominaislujuuden saavuttamista vastaavan puristuman ja murtopuristuman välinen ero pienenee. Betonin lujuusluokan ollessa C90/105 ovat puristuman arvot ( $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu2}$ ) samoja, betoni murtuu teoreettisesti välittömästi ominaislujuuden saavutettuaan.



**Kuva 3.** Betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuus eurokoodi 2, mallin 2 mukaan eri betonin lujuusluokille [10].

Betonin lujuuteen ja jäykkyyteen vaikuttaa olennaisesti kuormitusajan pituus ja kuormitusnopeus. Standardin EN 12390-3 mukaisessa puristuskokeessa betonin lujuus määritetään lyhytkestaisen puristuskokeen perusteella. Todellisissa rakenteissa kuormitus on kuitenkin pitkäaikaista, jolloin betonin lujuus on alhaisempi. Eurokoodi 2 mukaisessa betonirakenteiden suunnittelussa tämä otetaan huomioon alentamalla betonin lujuutta kertoimella  $\alpha_{cc}$ . Eurokoodi 2:ssa kertoimeksi suositellaan  $\alpha_{cc} = 1,0$ , Suomessa vastaavana kertoimena käytetään  $\alpha_{cc} = 0,85$ . Eurokoodissa kerrointa 1,0 perustellaan lujuuden kehittymisen jatkumisella. Betonille on ominaista, että lujuus kehittyy edelleen vertailuiän 28 vuorokautta jälkeen, jolloin lujuuden kehittymisellä ajan myötä kompensoidaan pitkäkestaisen kuormituksen vaikutuksia betonin puristuslujuuteen [10]. Kuormitusajan ja -nopeuden vaikutusta betonin puristuslujuuteen on havainnollistettu Saksan eurokoodi 2 sovellusohjeessa [11]. Kuvassa 4 on sovellusohjeessa esitetty kuvaaja, jossa on vierekkäisissä kuvaajissa eri kuormitusajoilla (vasemmalla) ja kuormitusnopeuksilla testattujen betonikappaleiden tulokset. Tulokset on esitetty todellisen jännityksen ja puristuslujuuden suhteella. Kuvaajasta havaitaan, että tutkittujen kuormitusnopeuksien ääriarvoilla ei ole niin suurta eroa kuin kuormitusajan tapauksessa



**Kuva 4.** Kuormitusajan (vasemmalla) ja kuormitusnopeuden (oikealla) vaikutus betonin puristuslujuuteen [11].

Eurokoodi 2 mukaisesti betonirakenteiden mitoituksessa betonin puristuslujuuden mitoitusarvo  $f_{cd}$  lasketaan Suomen kansallisen liitteen [12] ohjeiden mukaisesti kaavasta (1).

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

jossa  $\alpha_{cc}$  on kuormitusajan ja -nopeuden huomioiva kerroin (Suomessa 0,85),  $f_{ck}$  on betonin lieriölujuuden ominaisarvo [MPa] ja  $\gamma_c$  on betonin osavarmuusluku, joka normaaleissa tilanteissa on 1,5.

### 2.3 Betonin puristuslujuuden määrittäminen

Betonin puristuslujuus määritetään yleensä aksiaalisen puristuskokeen avulla. Puristuskokeessa koekappaleita puristetaan vakiokuormitusnopeudella murtoon saakka. Murto kuorman perusteella lasketaan puristuslujuus standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti kaavasta (2).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

jossa  $f_c$  on puristuslujuus [MPa],  $F$  on koekappaleen murtokuorma [N] ja  $A_c$  on yksittäisen koekappaleen keskimääräinen poikkileikkauspinta-ala [ $\text{mm}^2$ ]. Puristuslujuus ilmoitetaan pyöristettynä lähimmän 0,1 MPa tarkkuudella [13]. Keskimääräinen poikkileikkauspinta-ala lasketaan standardin EN 12390-3 mukaisesti kaavoista (19) ja (20).

Betonin puristuslujuus määritetään valetuista standardikoelempaleista tai valmiista rakenteista timanttitoralla otetuista rakennekoekappaleista, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Standardikoelempaleiden tulee olla standardin EN 12390-1 [5] mukaisia ja standardin EN 12390-2 [6] mukaisesti valmistettuja ja jälkihoitettuja koekappaleita, jotka ovat muodoltaan lieriöitä tai kuutioita [7]. Sallittujen jälkihoitomenetelmien seurauksena standardikoelempaleet koestetaan vedellä kyllästyneessä tilassa. Standardikoelempaleiden sivumitta tai halkaisija voi olla joko 100, 150, 200, 250 tai 300 mm. Lisäksi lieriömäisen standardikoelempaleen halkaisija voi olla 113 mm, joka vastaa sivumitaltaan 100 mm:n kuution kuormituspinta-alaa 10 000 mm<sup>2</sup>. Lieriömäisten standardikoelempaleiden pituuden ja halkaisijan suhde tulee olla 2,0 [5]. Yleensä standardikoelempaleina käytetään halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm kokoisia lieriöitä tai sivumitaltaan 150 mm kokoisia kuutioita, mitkä vastaavat eurokoodi 2:ssa ilmoitettujen betoniluokkien lieriö- ja kuutiolujuuksia. Standardin EN 206 mukaan kovettuneen betonin vaatimustenmukaisuutta osoittaessa standardikoelempaleen kokona tulee käyttää edellä mainittuja 150 mm halkaisijalla tai sivumitalalla varustettuja standardikoelempaleita. Muun kokoisia standardikoelempaleita voidaan käyttää sillä edellytyksellä, että tunnetaan, miten niillä saadut puristuslujuustulokset vastaavat 150 mm halkaisijalla tai sivumitalalla varustettujen standardikoelempaleiden puristuslujuuksia [7].

Suomessa puristuslujuuskokeiden tulokset muunnetaan sivumitaltaan 150 mm kokoisen kuution puristuslujuudeksi. Sivumitaltaan 100 mm:n kuution puristuslujuustulos muutetaan 150 mm:n kuution puristuslujuudeksi jakamalla tulokset luvulla 1,03. Mikäli puristuslujuus on määritetty käyttäen halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm standardikoelempaleita muutetaan puristuslujuus kuutiolujuudeksi taulukon 1 mukaisesti [1].

**Taulukko 1.** Lieriön D150 mm x 300 mm puristuslujuuden muuttaminen sivumitaltaan 150 mm:n kuutiolujuudeksi, mukailen lähdeä [1].

Määritetty lieriölujuus [MPa]	Vastaava kuutiolujuus saman lujuusalueen alarajalla [MPa]	Alarajan ylittävän lujuustuloksen muunnosluku
12-20	15	1,25
20-25	25	1,00
25-30	30	1,40
30-35	37	1,60
35-50	45	1,00
50-55	60	1,40
55-60	67	1,60
60-90	75	1,00

## 2.4 Betonin ominaislujuuden määrittäminen rakennekoekappaleista

Betonin puristuslujuuden arvioimiseen paikallavaletusta rakenteista tai betonielementeistä käytetään rakennekoekappaleita, jotka porataan irti rakenteista. Valmiin rakenteen

puristuslujuuden arvioinnissa on otettava huomioon sekä materiaalien, että rakenteiden valmistustapojen ja tekniikoiden vaikutukset. Betonirakenteiden valmistuksessa mm. tiivistyksellä ja jälkihoitotoimenpiteillä on merkittävä vaikutus betonin puristuslujuuteen. Lisäksi rakennekoekappaleen ominaisuuksilla, kuten halkaisijalla, pituuden ja halkaisijan suhteella (L/D-suhde) sekä päiden tasoitustekniikalla on merkittävä vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen. Rakenteen puristuslujuuden arvioinnissa tulee ottaa myös huomioon rakennekoekappaleen sijainti, erityisesti pystysuuntaisella sijainnilla on havaittu olevan merkittävä vaikutus rakenteesta mitattavaan puristuslujuuteen. Betonin puristuslujuuden arvioimiseen rakennekoekappaleista saattaa olla monia eri syitä, ainakin seuraavissa tapauksissa puristuslujuuden arviointi rakennekoekappaleiden avulla on tarpeen [2]:

- Rakennetta muutetaan tai mitoitetaan uudelleen
- Rakenteen kelpoisuuden arviointiin, kun epäillään rakenteiden puristuslujuuden madaltuneen virheellisten tai väärin suoritettujen työtekniikoiden tai vaurioitumisen seurauksena.
- Rakenteen puristuslujuuden arviointi on tarpeen rakentamisen aikana.
- Rakenteen kelpoisuuden arvioimiseen, kun standardikoekappaleiden puristuslujuustuloksissa on havaittu alituksia.
- Rakenteen puristuslujuuden arvioimiseen, kun selvitetään, onko rakenteen lujuus määritellyn tai tuotestandardin mukainen. [2]

Valmiin rakenteen ominaispuristuslujuuden arvioinnissa rakennekoekappaleiden avulla poraaminen ja valmistelut tulee tehdä standardin EN 12504-1 [14] mukaisesti ja testaaminen standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti. Rakennekoekappaleiden poraaminen, työstäminen, mittavaatimukset sekä puristuskokeiden suorittaminen käsitellään tarkemmin tämän tutkimuksen tulevissa kappaleissa. Standardeissa EN 13791 [2] ja SFS 7022 [1] sekä Betoninormissa BY 65 (2016) [15] käsitellään, kuinka Suomessa huomioidaan rakennekoekappaleiden ominaisuudet ja muutokset standardikoekappaleiden puristuslujuudeksi. Tämän tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin myös muiden maiden käytäntöjä rakennekoekappaleiden ominaisuuksien huomioimiseen ja muutoksia vertailukappaleiden lujuuksiksi. Muita tarkasteltuja maita olivat Saksa, Ruotsi, Iso-Britannia ja Yhdysvallat. Kansallisissa ohjeissa esiintyy poikkeamia mm. muutoksissa ja puristuslujuuden arvioinnissa huomioitavissa ominaisuuksissa. Suomessa sekä muissa tarkastelluissa maissa rakennekoekappaleen puristuslujuuteen vaikuttavia tekijöitä ei huomioida samalla tavalla, eroavaisuuksia on esimerkiksi muunnoksissa ja huomioon otettavissa tekijöissä. Tässä kappaleessa käsitellään rakennekoekappaleen ominaispuristuslujuuden määrittämistä Suomessa voimassa olevien standardien ja ohjeiden mukaisesti. Muiden maiden käytäntöjä on esitelty kappaleissa 2.7-2.9, mikäli ne poikkeavat Suomen käytännöistä. Kaikkien tarkasteltujen maiden ohjeet ja standardit huomioiden rakennekoekappaleesta mitatun puristuslujuuden muuntamisessa vertailtavan standardikoekappaleen lujuudeksi huomioidaan seuraavia tekijöitä:

- Kokovaikutus eli rakennekoekappaleen halkaisija
- Pituuden ja halkaisijan välinen suhde (L/D-suhde)

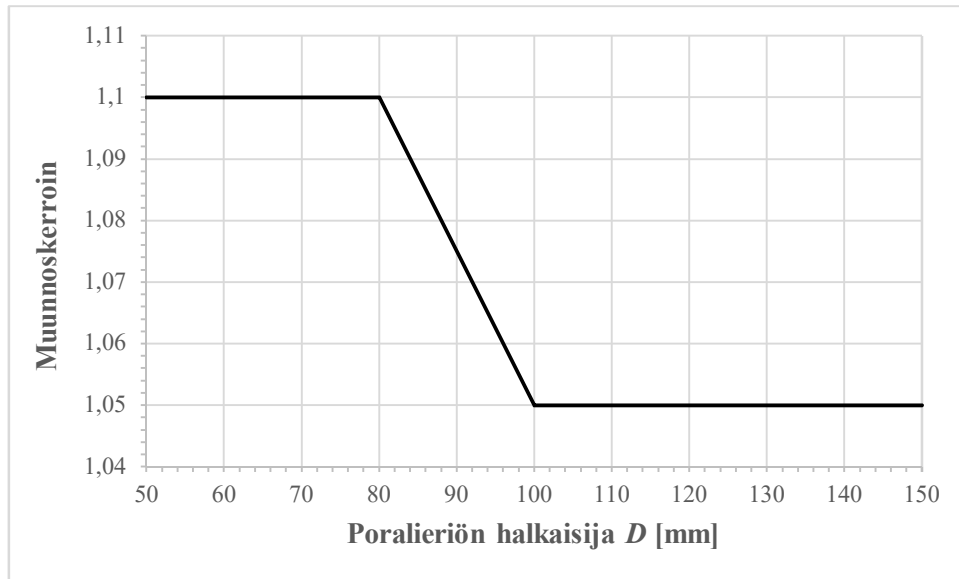
- Kosteuspitoisuuden vaikutus
- Rakennekoekappaleen poraamisen vaikutus
- Raudoituksen vaikutus rakennekoekappaleessa
- Betonin kypsyyden ja iän vaikutus.

Suomessa voimassa olevissa standardeissa [1] ja [2] sekä ohjeissa [15] edellä listatuista rakennekoekappaleen puristuslujuuteen vaikuttavista tekijöistä huomioidaan ainoastaan rakennekoekappaleen halkaisija. Edellä mainituissa standardeissa puristuslujuuteen vaikuttavat tekijät tunnistetaan, mutta Suomen ohjeissa tekijöille ei ole esitetty korjauskeinoja.

Betoninormeissa 2016 [15] kerrotaan, että rakennekoekappaleiden halkaisijana käytetään tyypillisesti 100 mm:n halkaisijan omaavia poralieriöitä, joiden pituuden ja halkaisijan suhde on  $1 \pm 0,05$ . Rakennekoekappaleiden halkaisijana voidaan käyttää myös muun kokoisia lieriöitä [15]. Yleensä käytännön syistä valmista rakenteesta porattavien rakennekoekappaleiden halkaisijana käytetään alle 100 mm. Esimerkiksi siltarakenteissa raudointi on hyvin tiheä, jonka seurauksena rakenteesta ei pystytä poraamaan teräksentöntä näytettä, jonka halkaisija on 100 mm. Liikenneviraston (nykyinen Väylävirasto) ohjeessa Taitorakenteiden erikoistarkastusten laatuvaatimukset – Sillat [16] ohjeistetaan käyttämään puristuskokeessa 80 mm tai suurempia rakennekoekappaleita.

Standardin SFS 7022 [1] mukaisesti puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuuden täyttymistä seurattaessa rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset muunnetaan sivumitaltaan 150 mm:n standardikuution puristuslujuudeksi. Jäljempänä tässä kappaleessa käytetään vain termiä standardikuutio ja sen koko esitetään, jos se poikkeaa 150 mm:stä. Rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia muunnettaessa standardikuution puristuslujuudeksi käytetään korjauskertoimia rakennekoekappaleen halkaisijan perusteella. Kuvassa 5 on esitetty standardin SFS 7022 esitetyt muutoskertoimet, jotka ovat rakennekoekappaleen halkaisijan mukaan seuraavat:

- Halkaisijaltaan 50...80 mm:n rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan luvulla 1,1.
- Halkaisijaltaan 100...150 mm:n rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan luvulla 1,05
- Halkaisijaltaan 80...100 mm:n rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksen muunnoskerroin määritetään lineaarisesti interpoloimalla. [1]



**Kuva 5.** Standardin SFS 7022 [1] muunnoskerroimet rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten muuntamiseksi standardikuution lujuutta vastaavaksi, kun  $L/D$ -suhde on 1,0

Standardissa EN 13791 [2] esitetään, että 100 mm:n halkaisijan omaavan ja  $L/D$ -suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleen puristuslujuus vastaa sivumitaltaan standardikuution lujuutta, kun säilytys- ja valmistusolosuhteet ovat samat. Mikäli  $L/D$ -suhde on 2,0 ja rakennekoekappaleen halkaisija välillä 100-150 mm kerrotaan puristuslujuuskokeen tuloksen vastaavan halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm standardilieriön lujuutta, kun säilytys- ja valmistusolosuhteet ovat samat.

Standardissa kerrotaan lisäksi, että edellä mainituista  $L/D$ -suhteista poikkeavat ja halkaisijaltaan 50...150 mm:n rakennekoekappaleiden puristuslujuudet tulee muuntaa vertailtavan standardikoekappaleen lujuudeksi soveltuvaksi osoitetuilla muunnoskerroimilla. [2]. Kyseisiä kertoimia ei ole annettu Suomessa voimassa olevissa standardeissa ja ohjeissa.

Yksittäisen rakennekoekappaleen puristuslujuus muutetaan standardikuutiota vastaavaksi puristuslujuudeksi  $f_{is.cube}$  [MPa] kaavalla (3).

$$f_{is.cube} = K_{dia} \times f_{is} \quad (3)$$

jossa  $K_{dia}$  on kuvasta 5 määritettävä muunnoskerroin rakennekoekappaleen halkaisijalle ja  $f_{is}$  on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos [MPa]. Lisäksi jos rakennekoekappale on liimattu kahdesta osasta, kerrotaan tulos kertoimella 1,05 [15].

Valmiin rakenteen puristuslujuutta arvioitaessa testattavien rakennekoekappaleiden lukumäärä valitaan testattavan rakenteen koon ja testien tarkoituksen perusteella. Valmiin rakenteen puristuslujuutta arvioitaessa tulee tilastollisista ja turvallisuussyistä ottaa niin monta porakappaletta kuin on tarkoituksenmukaista. Näyteporausten vaikutukset rakenteeseen on aina huomioitava. Mikäli valmiin rakenteen puristuslujuuden arvioimisessa

käytetään halkaisijaltaan 100 mm tai suurempia rakennekoekappaleita tulee yksittäisen arvosteluerän koostua vähintään kolmen rakennekoekappaleen puristuslujuustuloksesta. Poratuilla rakennekoekappaleilla, joiden halkaisija on alle 100 mm ja L/D-suhde 1,0, lujuuden vaihtelu on yleensä suurempaa kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla. Tästä syystä halkaisijaltaan 50 mm:n rakennekoekappaleita käytettäessä tulee tehdä kolminkertainen määrä puristuslujuuskokeita verrattuna halkaisijaltaan 100 mm:n rakennekoekappaleisiin. Edellä mainittujen rakennekoekappale kokojen väliarvot voidaan interpoloida suoraviivaisesti [2].

Standardissa EN 13791 [2] annetaan kaksi menettelytapaa ominaislujuuden määrittämiseksi rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksista. Ominaislujuuden määrittämiseen käytettävä laskentatapa valitaan rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten lukumäärän mukaan. Menettelytavassa A puristuslujuustuloksia tulee olla vähintään 15 ja menettelyssä B kolme. Arvosteluerän, joka koostuu vähintään 15 rakennekoekappaleen puristuslujuustuloksesta, ominaislujuus lasketaan kaavasta (4).

$$f_{ck.is} = \min \left( \begin{matrix} f_{m(n).is}^{-1,48 \times s} \\ f_{is.min} + 4 \text{ [MPa]} \end{matrix} \right) \quad (4)$$

jossa  $f_{m(n).is}$  on arvosteluerän koetulosten keskiarvo [MPa],  $s$  on arvosteluerän koetulosten keskihajonta [MPa], joka on vähintään 2 MPa ja  $f_{is.min}$  on arvosteluerän matalin puristuslujuustulos [MPa]. Arvosteluerän, joka koostuu 3-14 rakennekoekappaleen puristuslujuustuloksesta, ominaislujuus lasketaan kaavasta (5).

$$f_{ck.is} = \min \left( \begin{matrix} f_{m(n).is}^{-k} \\ f_{is.min} + 4 \text{ [MPa]} \end{matrix} \right) \quad (5)$$

jossa  $f_{m(n).is}$  on arvosteluerän koetulosten keskiarvo [MPa],  $k$  on koetulosten lukumäärästä riippuva marginaali taululukon 2 mukaisesti ja  $f_{is.min}$  on arvosteluerän matalin puristuslujuustulos [MPa].

**Taulukko 2.** Puristuskokeiden lukumäärän perusteella määräytyvä marginaali  $k$ , mukaille lähde [2].

Puristuskokeiden lukumäärä	Marginaali $k$ [MPa]
10...14	5
7...9	6
3...6	7

Arvosteluerän eli rakenteen laskettua ominaislujuutta vastaava, standardin EN 206 [7] mukainen betonin puristuslujuusluokka saadaan määritettyä taulukon 3 perusteella. Standardin EN 13791 [2] mukaisesti rakennekoekappaleista määritetyssä lujuudessa sallitaan 15 % alitus standardikoekappaleilla määritettyyn lujuuteen verrattuna. Standardin mukaisesti tämä huomioidaan kertomalla standardikoekappaleiden ilmoitettu lujuudet kertoi-



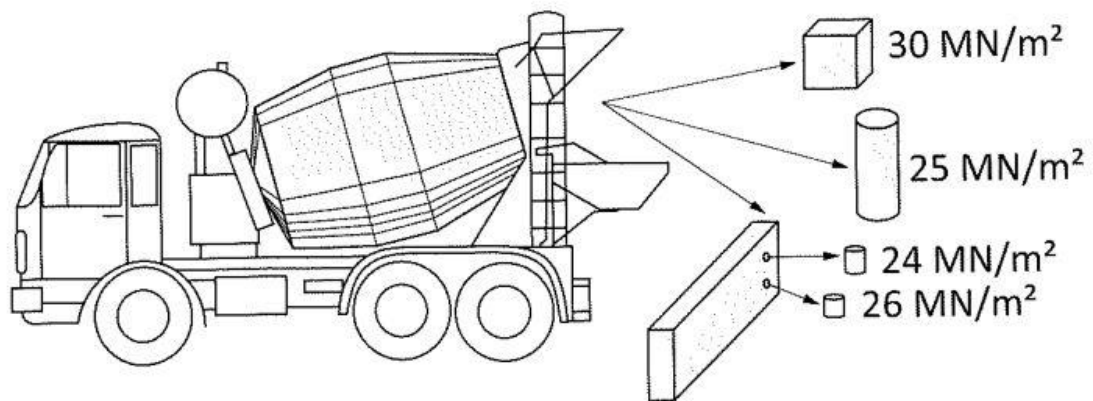
mella 0,85, mistä saadaan määritetyn ominaislujuuden raja-arvot tietyissä puristuslujuusluokissa. Taulukossa 3 kerroin on huomioitu ilmoitetuissa minimiarvoissa. Taulukon 3 puristuslujuusluokkien määrittely on standardissa EN 13791 [2] esitetty vain menettelytavalle A ( $n \geq 15$ ), mutta määrittelyn voidaan olettaa pätevän myös menettelylle B. Standardissa huomautetaan, että pieneen koekappalemäärään liittyy suurempi epävarmuus. Kun halutaan saavuttaa sama luotettavuustaso kuin suurilla koekappalemäärillä ( $n \geq 15$ ), johtaa menettelytapa B yleensä pienempiin ominaislujuuden arvoihin kuin suurilla testitulosten määrillä. Mikäli valmiista rakenteesta arvioidun betonin ominaislujuuden arvioidaan olevan liian konservatiivisella puolella, on suositeltavaa porata lisää rakennekoekappaleita tai käyttää vaihtoehtoisia puristuslujuudenarviointimenetelmiä testitulosten lukumäärän kasvattamiseksi. Menettelytavan B konservatiivisten tulosten takia menetelmää ei tule käyttää tilanteissa, joissa betonin vaatimustenmukaisuuden epäillään olevan puutteellinen.

**Taulukko 3.** Valmiista rakenteesta rakennekoekappaleiden avulla määritetyn puristuslujuuden ominaisarvon alarajat eri betonin puristuslujuusluokille, mukailten lähde [2].

Betonin puristuslujuusluokka EN 206+A1 mukaisesti	Rakenteesta määritetyn puristuslujuuden ominaisarvon minimiarvo [MPa]	
	$f_{ck, is}$	$f_{ck, is, cube}$
C8/10	7	9
C12/15	10	13
C16/20	14	17
C20/25	17	21
C25/30	21	26
C30/37	26	31
C35/45	30	38
C40/50	34	43
C45/55	38	47
C50/60	43	51
C55/67	47	57
C60/75	51	64
C70/85	60	72
C80/95	68	81
C90/105	77	89
C100/115	85	98

## 2.5 Standardi- ja rakennekoekappaleen ero puristuslujuuden määrittämisessä

Lieriön tai kuution muotoisista standardikoekappaleista määritetty betonin puristuslujuus eroaa yleensä valmiista rakenteesta porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuudesta. Valmiista rakenteesta porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on yleensä pienempi kuin samasta betoniannoksesta valmistettujen standardikoekappaleiden puristuslujuus. Yleensä valmiin rakenteen puristuslujuuteen vaikuttaa negatiivisesti betonin tiivistysaste ja jälkihoito. Myös rakennekoekappaleen porauskohdalla on merkitystä rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen [2]. Standardikoekappaleilla tarkoitetaan halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm valettuja lieriöitä tai sivumitoiltaan 150 mm kokoisia valettuja kuutioita, joita käytetään betonin lujuusluokkien määrittelyssä [7]. Standardikoekappaleita valmistettaessa tiivistysaste ja jälkihoitotoimenpiteet ovat helposti kontrolloitavissa siten, että koekappaleista saadaan mitattua optimaalinen puristuslujuus. Kuvassa 6 on havainnollistettu samasta betoniannoksesta valmistettujen standardikoekappaleiden ja rakenteesta porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien eroja. Standardissa EN 13791 [2] mukaan samasta betoniannoksesta valmistettujen standardikoekappaleiden ja rakenteesta porattujen rakennekoekappaleiden ominaispuristuslujuuksien suhde tulee olla vähintään 0,85, joka sisältyy standardin EN 1992-1-1 [8] mukaisessa betonirakenteiden mitoituksessa betonin osavarmuuslukuun  $\gamma_c$  [2].



**Kuva 6.** Samasta betoniannoksesta valmistettujen standardi- ja rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia betonille C25/30 [17].

Standardin EN 13791 [2] mukaan valmiin rakenteen betonin ominaispuristuslujuuden arvioinnissa voidaan pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm:n rakennekoekappaleen puristuslujuuden olettaa vastaavan 150 mm kuution puristuslujuutta, mikä on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa. Vastaavasti nimellishalkaisijaltaan 100-150 mm:n rakennekoekappaleen, jonka pituuden ja halkaisijan suhde on 2,0, puristuslujuuden voidaan olettaa vastaavan halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm kokoisen lieriön puristuslujuutta, mikä on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa [2].

Standardikoe-kappaleiden ja rakennekoekappaleiden lujuuksien eroja on tutkittu kansainvälisesti useissa eri tutkimuksissa [18], [19] ja [20], joista jokaisessa on tehty samankaltaisia havaintoja. Meininger viittaa lisäksi artikkelissaan [18] useisiin muihin vastaaviin havaintoihin eri tutkimuksissa, joissa rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat olleet 67-94 % standardikoe-kappaleiden puristuslujuuksista.

Meininger vertaili tutkimuksessaan [18] rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia samasta betoniannoksesta valmistettujen standardilieriöiden puristuslujuustuloksiin. Sekä rakennekoekappaleet, että standardilieriöt olivat halkaisijaltaan noin 150 mm ja korkeudeltaan noin 300 mm. Tutkimuksen rakennekoekappaleet testattiin 93 vuorokauden ikäisenä. Havaintojen mukaan rakennekoekappaleiden puristuslujuus on keskimäärin 67 % saman ikäisenä testattujen standardilieriöiden lujuudesta ja 77 % 28 vuorokauden ikäisenä testattujen standardilieriöiden puristuslujuudesta. Tutkimuksessa valettuja rakenteita oli jälkihoidettu vesisumutuksella hyvin kolmen kuukauden ajan ennen rakennekoekappaleiden timanttiorausta, jonka jälkeen koekappaleet oli asetettu vesiupotukseen ennen testausta. Tutkimuksessa havaittu rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien ero standardilieriöihin verrattuna on merkittävä ottaen huomioon, että porattavien rakenteiden jälkihoito on suoritettu todella hyvin. Meininger toteaa tutkimuksessaan [18], että rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien tulisi olettaa olevan alhaisempia kuin samasta betoniannoksesta valmistettujen standardilieriöiden puristuslujuuksien.

Dillon ja Rankin vertasivat tutkimuksessaan [19] halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm:n porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia samasta betoniannoksesta valmistettujen standardikuutioiden puristuslujuustuloksiin. Tutkimuksessa rakennekoekappaleita porattiin sivumitoiltaan 150 mm kuutioista sekä laatoista, joiden koko oli 300 mm x 300 mm x 150 mm. Tutkimuksessa kuutioita säilytettiin standardikuutioiden tapaan vesiupotuksessa. Laattoja säilytettiin ulkoilmassa sekä laboratorion huoneilmassa. Tutkimuksen havaintojen mukaan kuutioista porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus oli keskimäärin 12 % suurempi kuin vastaavissa olosuhteissa jälkihoidettujen standardikuutioiden puristuslujuus. Eri olosuhteissa säilytetyistä laatoista poratuissa rakennekoekappaleiden puristuslujuuksissa ei havaittu merkittävää eroa. Ulkoilmassa säilytettyjen laattojen rakennekoekappaleiden puristuslujuudet olivat keskimäärin 9 % ja sisäilmassa säilytettyjen laattojen rakennekoekappaleiden 8 % heikompia kuin standardikuutioiden keskimääräinen puristuslujuus. Tulokset perustuvat 7, 14, 28, 56 ja 84 vuorokauden testitulosten keskiarvoon. Tuloksista on havaittavissa, että vesisäilytyksessä olleiden kuutiosta porattujen rakennekoekappaleiden ja standardikuutioiden lujuuksien suhteessa ei tapahdu merkittävää muutosta eri testausajankohtien välillä. Laatoista porattujen rakennekoekappaleiden ja standardikuutioiden lujuuksien ero kasvaa merkittävästi ajan kuluessa. Tutkimuksen alussa 7 vuorokauden kohdalla rakennekoekappaleiden ja standardikuutioiden puristuslujuuksissa ei ole merkittävää eroa, mutta 84 vuorokauden kohdalla rakennekoekappaleiden puristuslujuus on noin 20 % heikompia kuin standardikuutioiden puristuslujuus.

Watkins et al. tekemässä tutkimuksessa [20] vertailtiin olemassa olevista rakenteista porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia samasta betoniannoksesta valmistettujen standardikuutioiden puristuslujuustuloksiin. Tutkimuksessa porattiin rakennekoekappaleita seinämäisistä ja laattamaisista rakenteista useissa eri kenttäkokeissa. Tutkimuksessa rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksille tehtiin standardien edellyttämät korjaukset lieriön pituuden ja poraussuunnan suhteen. Tutkimuksen havaintojen perusteella 28 vuorokauden ikäisenä laattamaisesta rakenteesta porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on keskimäärin 78 % standardikuutioiden puristuslujuudesta. Seinämäisistä rakenteista poratuissa rakennekoekappaleissa vastaava ero oli 88 %.

Kaikissa tarkastelluissa tutkimuksissa rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden puristuslujuuksissa on havaittu olevan merkittävä ero. Rakennekoekappaleiden ominaisuuksien vaikutuksia mitattavaan puristuslujuuteen on esitelty kappaleessa 2.8. Muiden tutkimusten tuloksia tarkasteltaessa on huomioitavaa, että tutkimuksissa betonilaatuina on käytetty yleensä huokostamattomia betoneita, kun suomalaisissa tutkimuksissa betonilaadut ovat hyvin usein huokostettuja.

## **2.6 Betonimassan ominaisuuksien ja työstämisen vaikutus puristuslujuuteen**

Tuoreen betonin ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi koekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen. Lujuuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. vesisementtisuhde, sementin laatu ja määrä sekä runkoaineen ominaisuudet. Betonin ominaisuuksia voidaan muokata betonin suhteutuksella, jossa osa-aineiden suhteita muokataan. Osa-aineiden laadulla ja niiden suhteilla on luonnollisesti siten suuri vaikutus betonin puristuslujuuteen [17].

### **2.6.1 Sementin laatu, määrä ja sementin seos- ja sideaineet**

Betonin valmistamisessa pääraaka-aineet ovat sideaine, runkoaines ja vesi. Sideaineena käytetään yleensä sementtiä. Sementin ja veden reagoidessa kemiallisesti keskenään muodostuu sementtigeeliä, joka kovettuu sementtikiveksi, joka sitoo betonin runkoaineen lujaksi kokonaisuudeksi [17]. On siis perusteltua sanoa, että sementin määrällä on suuri vaikutus betonin puristuslujuuteen.

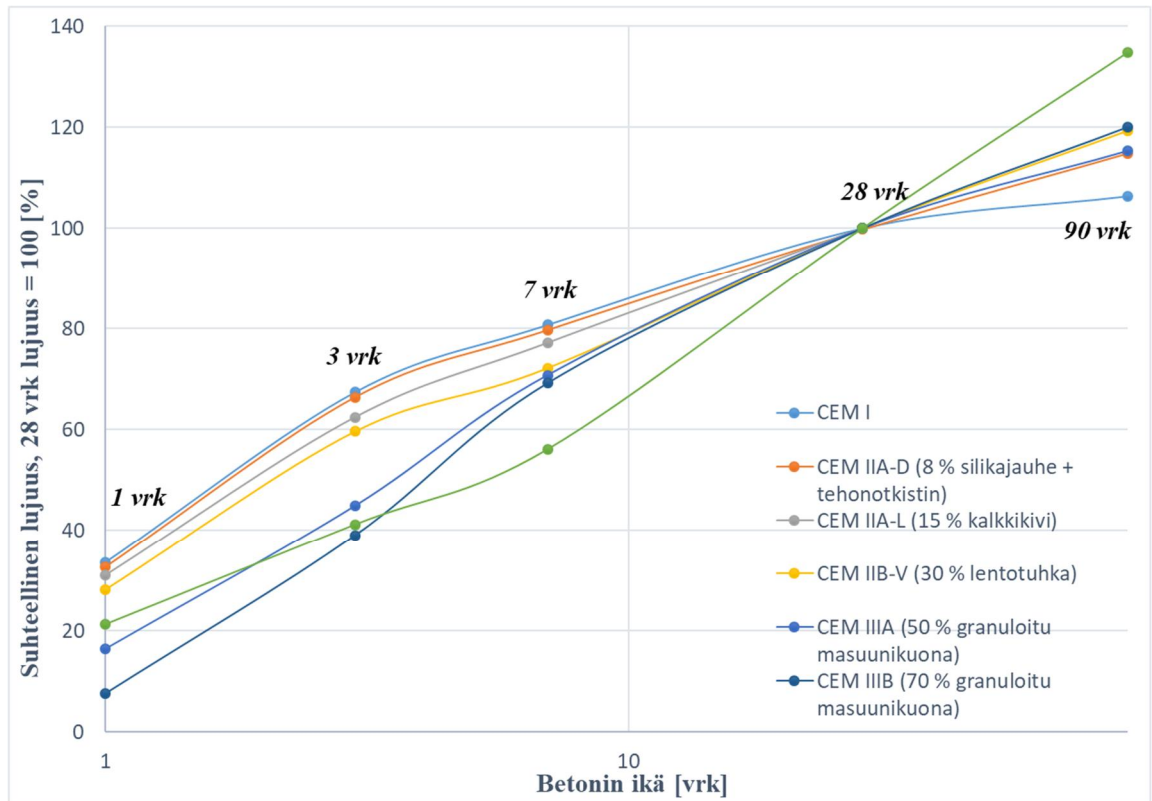
Sementin laadulla on myös suuri vaikutus betonin lujuuteen ja lujuudenkehittymiseen. Sementin valmistuksessa portlandsementin päämineraalien keskinäisillä suhteilla voidaan vaikuttaa lujuudenkehittymiseen (kehitysnopeuteen) ja loppulujuuteen. Sementin raekokoa voidaan muokata hienojakoisemmaksi jauhatuksessa. Hienojakoisella sementillä hydratoitumisreaktioiden nopeus kasvaa ja siten betonin lujuus kehittyy nopeammin [21].

Standardissa EN 197-1. Sementti Osa 1: Tavallisen sementin koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus [22] esitellään 27 erityyppistä sementtiä, joista vain osaa käytetään Suomessa. Standardin mukaisesti sementit jaetaan viiteen päälaajiin seuraavasti:

- CEM I: Portlandsementti
- CEM II: Portlandseossementti
- CEM III: Masuunikuonasementti
- CEM IV: Pozzolaanisementti
- CEM V: Seossementti [22].

Standardissa esitetyt päälajit jaetaan edelleen eri sementtilajeihin seosaineen ja seosainemäärien perusteella. Sementin seosaineena voi olla masuunikuona, kalkkikivi, silika, pozzolaani, lentotuhka ja poltettu liuske. Sementin seosaineilla on lujuutta kehittäviä ominaisuuksia, joten niiden käyttö pienentää sementintarvetta [22]. Clear käsittelee tutkimuksessaan [23] sementtityyppien vaikutusta betonin lujuuden kehittymiseen. Tutkimuksessa käytettiin seitsemää erilaista sementtityyppiä, joissa käytettiin erilaisia seosaineita. Kuvassa 7 on esitetty tutkimuksen havainnot sementtilaatujujen vaikutuksista betonin suhteelliseen lujuudenkehitykseen. Tutkimuksessa lujittumisikä 28 vuorokautta on otettu jokaisella sementtilaadulla vertailuikäksi, johon lujuudenkehittymistä on verrattu ennen ja jälkeen vertailuään. Kuvassa 7 kaikilla sementtilaaduilla valmistettujen betonien lujuudet risteävät 28 vuorokauden ikäisenä, tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että betonilaadut olisivat todelliselta lujuudeltaan yhtä lujia vertailuikäisenä. Kuvasta on selvästi havaittavissa sementin seosaineiden vaikutus lujuudenkehityksen alkuvaiheessa ja edelleen vertailuään jälkeen. Tutkimuksen sementtilaaduista CEM IV ei ole Suomessa yleisesti käytössä ilman laajoja ennakkokokeita [15]

Sementtilaaduilla on merkitystä tuoreen betonin työstettävyyden kannalta. Sementin ja veden sekoituksen jälkeen betonimassa pysyy aluksi notkeana, mutta sementin sitoutuminen alkaessa betonimassa menettää plastisuutensa. Sitoutumisen alettua betonimassaa ei saa enää häiritä. Jos betonimassaa häiritään eli työstetään sitoutumisen alkamisen jälkeen, betonimassaan muodostuvat hydrataatio tuotteet rikkoontuvat ja seurauksena saattaa olla lujuuskato [17]. Standardissa EN 197-1 annetaan sitoutumisen alkamiselle vähimmäisarvot eri sementin lujuusluokissa. Lujilla sementeillä sitoutuminen alkaa heikompi sementtilaatuja aiemmin. Sitoutumisen alkamisen vähimmäisajat vaihtelevat lujuusluokasta riippuen välillä 45-75 minuuttia [22]. Betonimassan riittävä työstettävyysaika siis vaikuttaa merkittävästi betonivalun onnistumiseen ja sitä kautta betonin puristuslujuuteen. Sementin seosaineilla ja betonimassaan lisättävillä lisäaineilla pystytään säättämään sitoutumisen alkamisaikaa sopivaksi siten, että betonimassa pysyy työstettävänä tarvittavan ajan. Lämpötila on myös merkittävä tekijä sitoutumisen alkamisen kannalta. Karkeasti arvioituna 10 °C lämpötilan nousu lyhentää sitoutumisen alkamisaikaa puolella [17].



**Kuva 7.** Kuvaaja eri sementtityyppien vaikutuksesta betonin suhteelliseen lujuudenkehitymiseen, mukaillen lähdettä [23].

## 2.6.2 Vesisementtisuhde

Vesi-sementtisuhdeella (v/s) tarkoitetaan betonimassan tehollisen eli hydratoitumiseen osallistuvan veden ja sementin massojen suhdetta [17]. Tehollisen veden määrässä tulee huomioida betonin runkoaineen seassa olevan vapaan veden määrä.

Betonin valmistuksessa sideaine, yleensä sementti, reagoi veden kanssa ja reaktiossa muodostuu sementtikiveä. Betonin varsinainen lujittuminen alkaa sitoutumisvaiheen päätyttyä ja jatkuu edelleen niin kauan kuin hydratoitumiseen käyttökelpoista vettä on käytettävissä. Sementin lujuusreaktiot ovat siis riippuvaisia betonin vesi-sementtisuhdesta, mikä vaikuttaa suoraan betonin puristuslujuuteen [17]. Toisaalta vesi-sementtisuhde ei myöskään saa olla liian korkea. Korkea vesi-sementtisuhde lisää betonimassaan jäävien kapillaarihuokosten määrää, jonka seurauksena betonin puristuslujuus laskee [21].

Betonin lujittuessa eli hydratoituessa sementti sitoo itseensä kemiallisesti vettä. Lisäksi vettä sitoutuu fysikaalisesti geelihuokosiin. Sementin sitoma veden määrä on yleensä noin 25 % ja geelihuukosten noin 20 % sementin painosta. Täydellisen hydrataation veden tarve on siten noin 40-45 % sementin painosta. Sementin hydrataatioaste on siis riippuvainen saatavilla olevan veden määrästä, mikä vaikuttaa suoraan betonin puristuslujuuteen [17].

Vesi-sementtisuhde vaikuttaa myös betonin työstettävyyteen, mitä suurempi vesi-sementtisuhde on, sitä notkeampaa ja helpommin työstettävää betonimassa on. Sementin hienojakoisuus vaikuttaa lisäksi vesi-sementtisuhteeseen, hienojakoisia sementtilaatuja käytettäessä vedentarve kasvaa, mikäli tietty betonimassa notkeus halutaan säilyttää. Betonin notkeutta voidaan parantaa ilman vesi-sementtisuhteen kasvattamista käyttämällä sementin seosaineita. Esimerkiksi lujuutta kehittävän masuunikuonan vedentarve on pienempi kuin sementin, joten sillä on betonimassaa notkistava vaikutus. Lujuutta parantavilla seosaineilla saattaa olla myös päinvastaisia vaikutuksia, esimerkiksi silika lisää betonin vedentarvetta. Vedentarvetta on kuitenkin säädeltävissä käyttämällä vedentarvetta vähentäviä lisäaineita [17].

Betonissa tavoiteltava ilmamäärä vaikuttaa myös betonin vesi-sementtisuhteeseen. Pakkaskestävissä eli P-luku betoneissa betoniin halutaan jättää ilmaa, josta huokostavaa lisäainetta käyttämällä saadaan muodostumaan suojahuokosia, jotka mahdollistavat betonin pakkaskestävyyden. Betonissa tavoiteltava ilmamäärä pienentää veden määrää suhteutuksessa ja siten myös vesi-sementtisuhde pienenee [17].

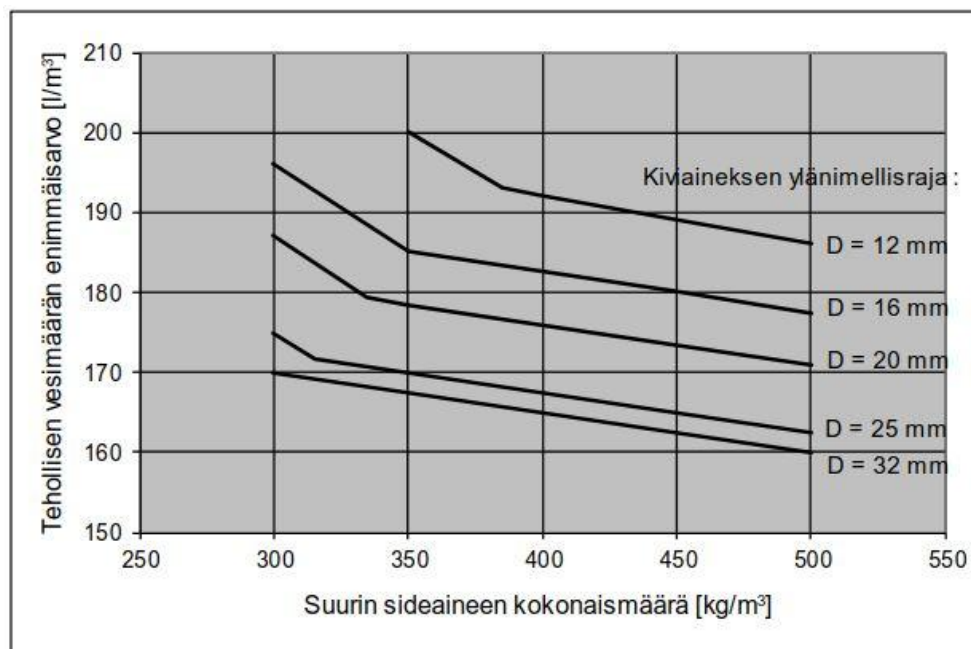
### 2.6.3 Betonin pakkaskestävyys (P-luku betonit)

Siltojen ja muiden infrarakenteiden betonilaaduilta vaaditaan pakkaskestävyyttä. Pakkaskestävien siltabetonien valmistusta, laadunvalvontaa ja kelpoisuuden osoittamista käsitellään Liikenneviraston ohjeessa 22/2016. Siltabetonien P-lukumenettely [24].

Betonin pakkaskestävyys ilmoitetaan pakkaskestävyytlukuna P. Suomessa käytettäviä pakkaskestävyytluokkia ovat P20, P30, P50 ja P70, pakkaskestävyys on sitä parempi, mitä suurempi pakkaskestävyytluku on. Siltojen eri rakenteiden pakkaskestävyytvaatimukset riippuvat hyvin paljon rakenteiden sijainnista ja siitä, millaisia ulkoisia rasituksia niihin kohdistuu. Esimerkiksi silloilla, joiden talvikunnossapidossa käytetään suolaa, vaaditaan reunapalkeilta pakkaskestävyyttä P50. Samalla sillalla vedeneristeen alla sijaitsevilta betonirakenteilta vaaditaan pakkaskestävyyttä P20 tai P30. [24]. Betonin ominaisuuksista huokosrakenne vaikuttaa eniten betonin pakkaskestävyyteen, hyvän huokosrakenteen muodostumiseen vaikuttavat betonin vesi-sideainesuhde, ilmahuokosmäärä, ilmahuokosten jakautuminen ja jälkihoito. Betonin ominaisuuksien lisäksi betonissa käytetty sideainemäärä vaikuttaa merkittävästi betonin pakkaskestävyyteen [24].

Siltojen P-lukumenettely -ohjeessa [24] on määritetty betonin eri pakkaskestävyytluokkien vähimmäisilmamäärät ja ohjeellinen enimmäisilmamäärä eri vesi-sideainesuhdeilla. Ohjeen mukaiset ilmamäärät on esitetty taulukossa 14. Ohjeessa on esitetty lisäksi vaatimuksia sementtilaadulle ja sideainemäärille eri tilanteissa sekä vaatimuksia jälkihoitotoimenpiteille. Mikäli betonille on asetettu ilmamäärävaatimus, on betonin valmistuksessa käytettävä lisäaineena huokostinta. Pakkaskestävien betonilaatujen suhteutuksessa on noudatettava ohjeen mukaisia tehollisen vesimäärän enimmäisarvoja ja suurinta

sallittua sideaineen kokonaismäärää, jotka riippuvat betonin runkoaineuksen nimellisrajasta [24]. Kuvassa 8 on esitetty ohjeen mukaisesti suhteituksessa käytettävä suurimman tehollisen vesimäärän ja sideaineen kokonaismäärän välinen riippuvuus eri kokoisilla runkoaineuksilla.



**Kuva 8.** Pakkaskestävien betonien suhteituksessa käytettävä suurimman tehollisen vesimäärän ja sideaineen kokonaismäärän välinen riippuvuus eri kokoisilla runkoaineuksilla [24].

Betonimassan vaadittu pakkaskestävyys tarkistetaan työmaaolosuhteissa mittaamalla tuoreen betonin ilmamäärä standardin EN 12350-7 [25] mukaisella painemenetelmällä. Pakkaskestävyysluku lasketaan mitatun ilmamäärän, suhteitustietojen ja jälkihoitoajan perusteella. Ilmamäärämittauksissa tulosten keskiarvon on täytettävä betonille asetettu vaatimus. Kolmesta peräkkäisestä ilmamäärämittauksesta yksi saa alittaa ilmamäärävaatimuksen enintään 20 %. Mikäli ilmamäärämittaustulos alittaa vaatimuksen yli 20 %, tulee suorittaa kaksi tarkastusmittausta, mikäli mittauksissa havaitaan edelleen yli 20 % alitus, tulee betonikuorma hylätä. Tuoreen betonin ilmamäärämittauksen keskiarvo ei myöskään saa olla liian korkea. Mikäli ilmamäärän keskiarvo ylittää ylärajavaatimuksen yli 2 %-yksikköä, tulee aina ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen tarkastaa rakenteesta porattavilla rakennekoekappaleilla [24].

Pakkaskestävien betonimassojen ominaisuudet ja käytettävien lisäaineiden yhteensopivuus sekä annostelujärjestys ja annostelutapa tulee varmistaa ennakkokokeilla. Betonimassojen ennakkokokeet on tehtävä aina, kun pakkaskestävyys määritetään suhteitustietojen ja ilmamäärämittauksen avulla tai suoran pakkassuolakokeen avulla. Ennakkokokeiden avulla tutkitaan betonin puristuslujuus, tiheys, ilmamäärä ja tekijät, joiden



avulla betonin pakkasenkestävyys lasketaan. Betonin huokostuksen laadunvarmistus voidaan tehdä määrittämällä huokosjako optisesti (ohuthietutkimus) tai pakkassuolarapautuman avulla [24].

## 2.6.4 Runkoaineen laatu, rakeisuus ja raemuoto

Betonin runkoaineen eli kiviaineen tilavuus on tyypillisesti suurin betonin osa-aineista. Betonin tilavuudesta tyypillisesti noin 65-80 % on kiviainesta. Kiviaineen ominaisuuksilla on siten merkittävä vaikutus betonirakenteen puristuslujuuteen [17]. Kiviaineen puristuslujuusominaisuudet ovat tyypillisesti paremmat kuin betonilla, joten kiviaineen lujuutta ei yleensä tarvitse huomioida. Poikkeuksena on kuitenkin betonit, joilta vaaditaan hyvin korkeaa lujuutta, jolloin kiviaineen lujuutta saattaa olla tarpeen tarkastella erikseen [26]. Lisäksi kiviaineen rakeisuus ja raemuoto sekä kiviaineen puhtaus vaikuttavat betonin lujuusominaisuuksiin [17].

Betonin valmistuksessa käytettävien kiviainesten rakeisuudelle löytyy monia määritelmiä ja ohjearvoja, mitkä ovat kuitenkin vain ohjeellisia tai lähtöarvoja. Rakeisuudelle voidaan esittää monenlaisia ihannekäyriä, mutta varsinaisesti ei voida sanoa, mikä on paras ratkaisu [17].

Kiviaineen raemuoto saattaa vaikuttaa betonin työstettävyyteen siten, että betonimassa tulee erottuvaa ja kovettuneena harvaa. Pyöreillä ja sileillä kivirakeilla betonimassan muokattavuus on helpointa ja ne vaativat vähiten sementtiliimaa. Murskatut kiviainekset ovat pääasiassa raemuodoltaan kuutiomaisia tai pahimmassa tapauksessa puikkomaisia. Betonin suhteutuksessa murskatun kiviaineen kanssa joudutaan käyttämään suurempaa vesimäärää kuin pyöreällä kiviaineksella. Korkeamman vedentarpeen seurauksena joudutaan käyttämään suurempaa sementtimäärää [17], jolloin betonimassan työstettävyys saattaa olla haasteellisempaa verrattuna pyöreällä ja sileällä kiviaineksella valmistettuun betoniin. Käytännössä betoni valmistetaan murskatusta kiviaineksesta, koska pyöreiden ja raejakaumaltaan sopivien kiviainesten hankkiminen on mahdotonta tai hyvin kustannustehotonta [17]. Polat et al. havaitsi kiviaineen muotoon liittyvässä tutkimuksessa [27], että pyöreästä kiviaineksesta valmistetulla betonilla saadaan korkeampia lujuuksia kuin sauvamaisilla tai levymaisilla kiviaineksilla valmistetuilla betoneilla. Useissa tutkimuksissa on lisäksi tutkittu murskatulla kiviaineella ja luonnonkivellä valmistettujen betonien puristuslujuuksien eroja. Chat et al. tekemän tutkimuksen [28] mukaan pyöreällä kiviaineksella saadaan parempi puristuslujuus kuin murskatulla kiviaineksella. Aginam et al. tekemässä tutkimuksessa tehtiin taas päinvastainen havainto. Tutkimuksessa murskatulla kiviaineksella saatiin parempi puristuslujuus kuin luonnonsoralla [29]. Tutkimuksissa on siis tehty ristiriitaisia havaintoja, joiden perusteella ei voida sanoa onko pyöreä kiviaines lujuuden kannalta parempi kuin murskattu kiviaines.

Aginam et al. tekemässä tutkimuksessa [29] tarkasteltiin lisäksi pestystä ja pesemättömästä luonnonsorasta valmistettujen betonien puristuslujuuksien eroja. Tutkimuksen mukaan pestyllä luonnonsoralla valmistetulla betonilla on paremmat puristuslujuusominaisuudet kuin pesemättömästä luonnonsorasta valmistetulla betonilla.

Standardin EN 12504-1 opastavassa liitteessä A [14] on esitetty, että betonin runkoaineen maksimiraekoon on myös vaikutusta mitattavaan puristuslujuuteen. Standardin mukaan maksimiraekoon ollessa 20 mm, saadaan halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleesta noin 7 % suurempia puristuslujuuksia kuin halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleista. Vastaavasti maksimiraekoon ollessa 40 mm, saadaan halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleista noin 17 % suurempia puristuslujuuksia [14]. Standardin EN 12390-1 [5] mukaisesti koekappaleen halkaisijan tulee olla vähintään 3,5 kertaa niin suuri kuin runkoaineen maksimiraekoko. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleet eivät täytä minimihalkaisijavaatimusta kummallakaan standardin esittämällä runkoaineskoolla ja 100 mm rakennekoekappaleet 40 mm runkoaineskoolla. Myöskään rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan suhdetta ei ole kerrottu.

### 2.6.5 Lisäaineet

Betonin ominaisuuksia voidaan suhteutuksen lisäksi muokata erilaisilla lisäaineilla, joilla voidaan vaikuttaa sekä tuoreen betonimassan että kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lisäainemäärät huomioidaan suhteutuksessa. Lisäaineilla on tyyppikohtaisia vaikutuksia betonin puristuslujuuteen. Erilaiset lisäaineet luokitellaan standardissa EN 934-2 [30]. Tässä työssä tarkastellaan vain lisäaineita, joilla on merkittävä vaikutus tuoreen betonin työstettävyyteen tai kovettuneen betonin puristuslujuuteen. Esiteltyjen lisäaineiden lisäksi betonissa voidaan käyttää lisäaineita, joilla saadaan parannettua mm. betonimassan jäätyneen kestoa sekä halkeilu- ja kutistumisominaisuuksia.

Notkistavia lisäaineita käytetään betonimassan työstettävyyden parantamiseen ja vedentarpeen pienentämiseen. Notkistavat lisäaineet jaetaan kahteen luokkaan, notkistimiin ja tehonotkistimiin. Notkistimilla saadaan tyyppillisesti noin 5-15 %:n ja tehonotkistimilla 12-30 %:n vedenvähennys ilman, että betonin työstettävyys huononee. Pitkävaikutteiset tehonotkistimet lisäävät betonimassa erottumisriskiä ja mahdollisesti myös halkeiluriskiä [17]. Notkistavilla lisäaineilla on siis mahdollista parantaa tuoreen betonimassan ominaisuuksia siten, että betonimassa on helpommin työstettävissä ja mm. betonimassan tiivistäminen onnistuu varmemmin, mikä edesauttaa suunnitellun puristuslujuuden saavuttamisessa.

Huokostamattomassa betonissa on normaalisti ilmaa noin 1-2 %. Ulkoilmaan suunniteltavissa betonirakenteissa, erityisesti infrarakentamisessa betonilta vaaditaan pakkasenkestävyyttä, joka saadaan aikaiseksi lisäämällä tuoreeseen betonimassaan huokostavaa lisäainetta. Huokostimella betonin ilmapitoisuus saadaan nostettua 4-8%:iin. Huokostavat lisäaineet stabiloivat sekoituksen aikana muodostuvat ilmakuplat tasaisesti betoniin.

Syntyvien suojahuokosten tehtävä on ottaa vastaan betonissa olevan veden jääytymisestä aiheutuva paine ilman, että betoni rikkoutuu, eli alkaa pakkasrapautumaan. Betoniin syntyvät huokokset parantavat lisäksi tuoreen betonin muokattavuutta, notkeutta ja koosapysyvyyttä sekä vähentävät osa-aineiden erottumisriskiä. Suojahuokosten läpimitta on tyypillisesti noin 0,01...0,5 mm [17].

Betonin huokostus alentaa kovettuneen betonin puristuslujuutta, koska betonissa on tällöin selvästi enemmän ilmaa. Karkeasti arvioiden voidaan sanoa, että 1 %:n ilmamäärän lisäys heikentää betonin puristuslujuutta noin 5 % [17]. Huokostimien aiheuttamaa puristuslujuuden alentumista joudutaan usein kompensoimaan lisäämällä sementtimäärää tai lisäämällä sementin joukkoon seosaineita. Suuren pakkasenkestävyyden ja betonin lujuuden vaatimilla rakenteilla sementtimäärää saatetaan joutua kasvattamaan huomattavasti vastaavan lujuuden omaavaan huokostamattomaan betoniin verrattuna. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytettiin betonilaatua C35/45 pakkasenkestävyys luokalla P50 ja huokostamattomana. Pakkaskestävässä betonissa jouduttiin käyttämään  $51 \text{ kg/m}^3$  (noin 13 %) enemmän sementtiä kuin vastaavan nimellislujuuden omaavassa huokostamattomassa betonissa.

Betonin sitoutumisen alkamista voidaan pidentää käyttämällä hidastavaa lisäainetta, joita kutsutaan yleisesti hidastimiksi. Hidastavia lisäaineita käytetään, mikäli betonimassa kuljetusmatkat ovat pitkiä tai tuoreen betonin työstettävyyttä halutaan pidentää siten, että esimerkiksi työsaumoja pystytään välttämään rakenteissa. Pitkissä valuissa työstettävyyden ajan pidentäminen edesauttaa betonin puristuslujuuden saavuttamista siten, että betonimassa ehditään tiivistää oikein ennen betonimassan sitoutumisen alkamista. Sitoutumisen alkamisen jälkeen häirityissä betoneissa saattaa esiintyä lujuuskatoa. Hydrataatiolämpötila vaikuttaa olennaisesti betonin lujuuden kehittymiseen. Hidastimet eivät pienennä betonin maksimihydrataatiolämpötilaa, vaan siirtävät sen ajankohtaa [17].

Betonin sitoutumisen ja kovettumisen nopeutta voidaan kasvattaa kiihdyttävällä lisäaineella. Kiihdyttimiä käytetään yleensä muotipurku- tai jääytymislajuuden saavuttamiseksi nopeammin. Kiihdyttävien lisäaineiden käyttöä on vähennetty viime vuosina ja lisäaine on korvattu helpommin hallittavilla lujuudenkehitystä kiihdyttävillä menetelmillä kuten nopealla (Rapid)sementillä, kuumalla betonilla tai alhaisella vesi-sementti-suhteella. Kiihdyttävien lisäaineiden käyttö alentaa jonkin verran betonin loppulujuutta, mikä otetaan huomioon betonin suhteutuksessa [17].

### 2.6.6 Veden laatu

Betonin valmistamiseen käytettävän veden tulee olla puhdasta. Suomalaisesta vesijohtoverkosta otettu vesi ja juomakelpoinen luonnonvesi soveltuvat yleensä betonin valmistukseen. Betoniteollisuuden prosesseista talteen otettua kierrätysvettä voidaan käyttää, jos sen soveltuvuus on ensin varmistettu. Juomakelvottomat luonnonvedet ja muiden te-

ollisuudenalojen jätevedet eivät sovellu betonin valmistukseen ilman tarkkoja tutkimuksia [17]. Standardissa EN 1008 on esitetty ohjeet betonin valmistuksessa käytettävän veden soveltuvuuden testaamiseksi.

Betonin valmistamiseen käytettävän veden laatu vaikuttaa olennaisesti sementin hydratoitumiseen. Esimerkiksi veden seassa olevat öljyt ja rasvat saattavat tarttua sementtihiukasten pinnalle estäen hydratoitumisreaktion kulun. Lisäksi öljyt ja rasvat saattavat heikentää tartuntaa runkoaineeseen tai aiheuttaa ylimääräistä ilmaa betoniin [17]. Kaikista edellä kuvatuista öljyyn ja rasvaan liittyvistä ongelmista seuraa yleensä betonin puristuslujuuden heikkeneminen.

Betonin valmistamiseen käytettävän veden kloridipitoisuus ei myöskään saa olla liian korkea. Suomalaisessa rakentamisessa kloridipitoisuuksille on annettu betonin käyttökohteesta riippuvat raja-arvot [17]. Klorideilla ei ole merkittävää suoraa vaikutusta betonirakenteen lopulliseen puristuslujuuteen, mutta betonirakenteen ja erityisesti betonissa olevien raudotteiden säilyvyyteen klorideilla on merkittävä negatiivinen vaikutus, joka heijastuu pitkällä aikavälillä myös rakenteen puristuskestävyyteen.

### **2.6.7 Betonimassan tiivistyksen onnistuminen**

Tuoreen betonimassan tiivistyksen onnistumisella on merkittävä vaikutus betonin puristuslujuuteen. Tiivistyksen tarkoituksena on saada tuore betonimassa täyttämään muotit ja ympäröimään raudoitus täydellisesti, saada betonin runkoaineen osaset hakeutumaan lähelle toisiaan ja poistaa massasta ylimääräinen ilma [17]. Tiivistyksessä on kuitenkin huomioitava, että pakkasenkestävissä betonilaaduissa massan sekaan on tarkoitus jättää ilmaa, joten suojahuokosien häviämistä tiivistettäessä tulee välttää.

Jos betonimassan seassa ei ole raudoitusta ja tiivistämiseen käytettävän laitteen teho on vakio, niin betonimassan tiivistystarve riippuu eniten betonimassan notkeudesta. Koetulosten perusteella on havaittu, että nesteytetyillä notkeusluokan S4 massoilla tiivistystarve on huomattavasti vähäisempi kuin plastisilla notkeusluokan S1 massoilla. Esimerkiksi nesteytetyillä massoilla sauvatäryttimen vaikutussäde on 20-30 % suurempi kuin plastisilla massoilla ja tiivistysaika voidaan lyhentää 50 % [17].

Tämän tutkimuksen tapauksessa tiivistyskaluston ollessa vakio on siis tärkeää määrittää oikea tiivistysaika eri muottityypeillä ja betonimassan notkeuden muuttuessa. Liian pitkän tiivistyksen seurauksena suojahuokokset alkavat hävitä betonimassan joukosta. Lisäksi betonimassan yläpinnan erottumisriski kasvaa ja betonikappaleen pohjalle saattaa painua runkoainetta huomattavasti enemmän kuin muussa massassa keskimäärin on. Pinnan erottuminen aiheuttaa erottuvaan kerrokseen lujuskatoa. Runkoaineen painumisen seurauksena betonikappaleen valusuunnassa pohjalta otettavissa rakennekoekappaleissa saattaa esiintyä ylempitä näytteitä suurempia tiheyksiä ja suurempia puristuslujuuksia.

Liian lyhyen tiivistysajan seurauksena betonimassaan jää ylimääräistä ilmaa ja kappaleiden muottipinnoilla saattaa esiintyä muotoa häiritseviä suurehkoja koloja. Kuten aiemmin tässä luvussa mainittiin niin 1 % ylimääräistä ilmaa pienentää puristuslujuutta noin 5 %. Betonimassan tiivistyksen onnistumisen kannalta on siis ensiarvoisen tärkeää määrittää oikea tiivistysaika betonimassan ja muottityypin mukaan, muiden muuttujien ollessa vakioita.

## 2.7 Betonin lujittumisen aikaisten tekijöiden vaikutukset puristuslujuuteen

Tässä kappaleessa on esitetty betonin lujittumisen aikaisten tekijöiden vaikutus koekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen. Standardikoekappaleiden lujittumisen aikaiset olosuhteet ovat tarkasti säädeltyjä, jotta niiden vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen olisi mahdollisimman pieni. Valmiiden rakenteiden betonin lujittumisolosuhteet eivät yleensä täysin vastaa standardeissa säädeltyjä olosuhteita, minkä seurauksena poratuissa rakennekoekappaleissa saattaa esiintyä vaurioita, kuten halkeilua. Betonin lujittumisen aikaisten tekijöiden vaikutus on yleensä negatiivinen mitattavan puristuslujuuden kannalta. Kappaleessa on esitetty muiden, tässä tutkimuksessa tarkasteltujen, maiden käytännöt betonin lujittumisen aikaisten tekijöiden huomioimiseksi. Vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen on esitelty, mikäli sen vaikutus huomioidaan tarkasteltujen maiden standardeissa ja ohjeissa.

### 2.7.1 Lujittumislämpötila ja betonin ikä

Betonin lujittumisen aikainen lämpötila vaikuttaa huomattavasti lujuuden kehittymisen nopeuteen. Tätä myötä myös tarkasteluhetkellä on suuri merkitys koekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen. Normaalisti betonin lujuudenkehittymistä seurataan puristuskokeilla 3, 7 ja 28 vuorokauden iässä. Betonin lujittumisen aikaisen lämpötilan ja iän yhteisvaikutusta kutsutaan kypsyudeksi. Betonin lujuuden kehittymistä voidaan arvioida kypsyyslaskelmien ja käyrästöjen avulla. Lujuuden kehittymisen arviointiin on monia erilaisia menetelmiä, joista arviolta yleisin on Sadgroven menetelmä, missä ei tarvitse tuntea betonissa käytetyn sementin lujuudenkehitysmalleja. Menetelmässä tulee tietää betonin lujittumisen aikaiset lämpötilat, joiden avulla lasketaan betonin kypsyysikä. Laskettu kypsyysikä vastaa +20 °C lämpötilassa säilytetyn betonin lujuudenkehittymistä. Sadgroven menetelmän määritetty betonin kypsyysikä lasketaan kaavan (6) mukaisesti [17].

$$t_{20} = \left( \frac{T(t) + 16 \text{ °C}}{36 \text{ °C}} \right) \times t \quad (6)$$

jossa  $t$  on betonin lujittumisaika päivinä ja  $T(t)$  on betonin lämpötila [°C] lujittumisen ajanjaksona  $t$  [17].

Betonirakenteiden mitoituksessa käytetään betonin puristuslujuutta 28 vuorokauden ikäisenä. Betoni lujittuminen jatkuu kuitenkin niin kauan kuin hydratoitumiseen käyttökel-poista vettä ja sementtiä on saatavilla [17]. Ulkobetonirakenteille, erityisesti infraraken-teille, kuten silloille ja muilla taitorakenteille on ominaista, että vanhoista rakenteista po-ratuista rakennekoekappaleista saadaan huomattavasti suurempia puristuslujuuksia kuin alkuperäinen suunnittelulujuus on ollut. Vanhojen siltojen erikoistarkastuksissa on ha-vaittu jopa kaksin- tai kolminkertaisia puristuslujuuksia alkuperäiseen suunnittelulujuu-teen nähden. Betonin lujittuminen jatkuu siis hyvin kauan riippumatta betonin lämpöti-lasta ja iästä.

Standardin EN 13791 [2] liitteessä D esitetään, että betonin puristuslujuus voidaan mitata minkä tahansa ikäisenä, mutta betonin ikä on raportoitava ja otettava tarvittaessa huomi-oon. Tarkempaa ohjeistusta betonin iän huomioimiseen ei ole esitetty.

Ruotsissa betonin iän vaikutus standardikoekappaleiden lujuuteen huomioidaan standar-din SS 137207:2005 [31] mukaisesti. Betonin iälle määritetään standardissa korjausluku, joka huomioi tarkasteluhetken, betonin lujuusluokan ja käytetyn sementtilaadun. Kor-jausluvut on määritetty vain tavanomaiselle portlandsementille ja portlandseossemen-teille. Korjauslukuja käytetään jakajana muunnettaessa puristuslujuustuloksia vastaa-maan 28 vuorokauden ikäisen betonin lujuutta. Standardissa [31] standardikoekappalei-den säilytyslämpötilan vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen otetaan huomioon laske-malla koekappaleelle 20 °C säilytyslämpötilaa vastaava muunnettu kovettumisaika. Muunnos voidaan tehdä 20 vuorokauden ikään saakka.

## 2.7.2 Jälkihoito

Betonin jälkihoidolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla varmistetaan betonin suunniteltu-jen ominaisuuksien ja lujuuksien täytyminen. Betonin jälkihoito tehdään yleensä suojaa-malla, eristämällä tai jälkihoitoaineiden avulla. Oikealla jälkihoidolla on merkittävä vai-kuutus betonin puristuslujuuden kannalta, sillä puutteellinen jälkihoito aiheuttaa betoniin yleensä vaurioita, joiden seurauksena puristuslujuus alenee [17].

Alla on listattu mahdolliset puutteellisesta jälkihoidosta betonille aiheutuvat vauriot ja jälkihoitotoimenpiteet vaurioiden ehkäisemiseksi:

- Halkeilu, joka aiheutuu veden liian nopeasta haihtumisesta betonin ollessa plasti-sessa muodossa. Ominaista betonilaaduille, joissa veden erottuminen betonimas-sasta on vähäistä. Halkeilua ehkäisevänä jälkihoitona käytetään suojaamista ve-den haihtumisen ehkäisemiseksi ja rakenteen pitämiseksi kosteana. Tarvittaessa pintaa voidaan kastella vesisumulla.
- Kutistumishalkeilu, jota syntyy betonin plastisen vaiheen jälkeen liian nopean ve-den haihtumisen seurauksena. Jälkihoitotoimenpiteitä käytetään suojaamista muovikalvoilla, pinnan kastelua ja pinnalle ruiskutettavia jälkihoitoaineita.

- Lujuuskato, joka aiheutuu veden liian nopeasta haihtumisesta. Hydrataatioreaktioiden jatkuminen vaatii vettä, joten betoni on pidettävä kosteana tavoitellun lujuuden saavuttamiseksi. Jälkihoitotoimenpiteenä on yleensä pinnan suojaaminen muovikalvoilla ja pinnan kastelu.
- Lujuuskato, joka aiheutuu betonin jääytymisestä liian varhaisessa vaiheessa tai lujuuden kehitys hidastuu merkittävästi. Jälkihoitotoimenpiteenä käytetään yleensä eristäviä mattoja ja eristettyjä muotteja.
- Lujuuskato, joka aiheutuu betonin liian korkeasta lämpötilasta lujittumisen aikana. Koskee yleensä vain massiivia valuja tai hyvin lämpimiä kesäolosuhteita. Jälkihoitotoimenpiteenä on varauduttava jäähdyttämään betonia. [17]

Sää- ja ympäristöolosuhteet saattavat lisäksi aiheuttaa edellä kuvattuja vaurioita lujittuvalle betonille. Valetut rakenteet on siksi suojattava sadetta, tuulta, auringonpaistetta ja virtaavaa vettä vastaan. Suojaamatta jättämisen seurauksena sade- tai virtaava vesi huuhtoo sementtiä kovettuvasta betonista sekä tuuli ja auringonpaiste kiihdyttävät veden haihtumista. Lisäksi jälkihoitotoimenpiteenä betonivalut on suojattava tärinää vastaan tai tärinän lähteiden vaikutus on estettävä [17].

### 2.7.3 Lujittumisen aikainen kosteus

Betonin lujittuessa sementin ja veden välinen hydrataatioreaktio jatkuu niin pitkään kuin reaktioon käyttökelpoista vettä on saatavilla. Betonin tavoitteellisen lujuuden saavuttamiseksi vettä pitää olla riittävästi saatavilla lujuudenkehittymisen ensimmäisten viikkojen aikana [17]. Riittävän lujittumisen aikaisen kosteuden varmistamiseksi on yleensä tehtävä edellisessä kappaleessa kuvattuja jälkihoitotoimenpiteitä.

Betonin lujuudenkehitystä seurataan ns. standardikoekappaleiden avulla. Standardikoekappaleiden jälkihoito tehdään pitämällä koekappaleet vesiupotuksessa tai korkeassa suhteellisessa kosteudessa niin kauan, kunnes puristuskokeet suoritetaan. Näin varmistetaan, että betonissa on riittävästi vettä hydratoitumisreaktion jatkumiseen. Tämän menetelyn avulla betonista saadaan selville sen potentiaalinen puristuslujuus [21].

## 2.8 Koekappaleen ominaisuuksien vaikutus puristuslujuuteen

Standardin EN-13791 [2], liitteessä A käsitellään koekappaleiden puristuslujuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tekijät voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään, betonin ominaisuuksiin ja muuttujiin koekappaleiden puristuslujuuskokeiden valmisteluissa. Puristuslujuuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. koekappaleen huokoisuus, kosteus testaushetkellä, koekappaleen muoto ja koko sekä koekappaleen pituuden ja halkaisijan suhde. Koekappaleiden valmisteluihin liittyviä muuttujia ovat mm. poraaminen ja koekappaleiden päiden tasoituksen onnistuminen. Valmisteluihin liittyvät muuttujat ovat usein negatiivisia mitattavan puristuslujuuden kannalta.

Kappaleessa on esitetty lisäksi muiden, tässä tutkimuksessa tarkasteltujen, maiden käytännöt koekappaleen ominaisuuksien huomioimiseksi. Vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen on esitelty, mikäli sen vaikutus huomioidaan tarkasteltujen maiden standardeissa ja ohjeissa.

### 2.8.1 Koekappaleen koko

Betonin puristuslujuus [ $\text{MPa} = \text{N}/\text{mm}^2$ ] tarkoittaa murtokuorman ja puristus-pinta-alan suhdetta. Teoriassa, kun vertaillaan saman muotoisten, mutta halkaisijaltaan erisuurien lieriömäisten koekappaleiden puristuslujuuksia ja muiden määritettävään puristuslujuuteen vaikuttavien tekijöiden oletetaan olevan merkityksettömiä, pitäisi puristuslujuudeksi tulla sama arvo. Muiden tekijöiden, kuten runkoaineen ja porauksen vaikutuksesta lujuudeksi ei kuitenkaan useimmiten saada saamaa tulosta koekappaleen halkaisijan muuttuessa. Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutusta testattavasta kappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen on tutkittu kansainvälisesti paljon. Tutkimusten johtopäätöksissä on huomattavia eroavaisuuksia. Tutkimukset on pääsääntöisesti tehty rakennekoekappaleilla joiden pituus-halkaisija -suhde ( $L/D$ ) on 2,0.

Yip et al. [32] ja Meininger [18] ovat havainneet tutkimuksissaan, että poratun rakennekoekappaleen halkaisijalla ei ole merkittävää vaikutusta mitattavaan puristuslujuuteen. Molemmissa tutkimuksissa laattamaisista valetuista kappaleista porattiin rakennekoekappaleita sekä valusuuntaan, että valusuuntaan vasten kohtisuoraan. Valusuuntaan porattujen rakennekoekappaleiden lujuuksissa havaittiin, että nimellishalkaisijaltaan 50 mm:n rakennekoekappaleet ovat lujuudeltaan noin kolme prosenttia heikompia kuin 100 mm:n rakennekoekappaleet. Meiningerin tutkimuksessa [18] havaittiin lisäksi, että nimellishalkaisijaltaan 150 mm:n rakennekoekappaleet ovat noin prosentin verran lujempia kuin 100 mm:n rakennekoekappaleet. Kummassakaan tutkimuksessa rakennekoekappaleiden lujuuseroja halkaisijan muuttuessa ei pidetty merkittävänä. Tutkimusten perusteella mitattavalla puristuslujuudella ei voida sanoa olevan eroa rakennekoekappaleen halkaisijan muuttuessa.

Campbell et al. [33] ja Arioz et al. [34] ovat havainneet tutkimuksissaan, että pienillä rakennekoekappaleiden halkaisijoilla saadaan selkeästi matalampi puristuslujuustuloksia kuin suuremmilla halkaisijoilla. Campbell et al. havaitsi tutkimuksessaan [33], että nimellishalkaisijaltaan 150 mm:n rakennekoekappaleesta saadaan noin 20 % suurempi puristuslujuus kuin nimellishalkaisijaltaan 100 mm:n rakennekoekappaleesta. Arioz et al. teki tutkimuksessaan [34] saman suuntaisen havainnon. Tutkimuksessa halkaisijaltaan 144 mm:n rakennekoekappaleista mitattiin puristuslujuudeksi noin 4-6 % suurempi lujuus kuin 94 mm:n rakennekoekappaleista. Lisäksi Arioz et al. teki tutkimuksessaan puristuskokeita pienemmillä rakennekoekappalekoilla. Tutkimuksen havaintojen mukaan halkaisijaltaan 69 mm:n rakennekoekappaleista saadaan 4-6 % ja halkaisijaltaan 46 mm:n rakennekoekappaleista 7-11 % pienempiä puristuslujuuksia kuin 94 mm:n rakennekoekappaleista. Arioz et al. teki tutkimuksia rakennekoekappaleiden pituus-halkaisija-



suhteilla ( $L/D$ ) 1,0 ja 2,0, edellä esitetyissä lujuuserojen vaihteluväleissä pienempi luku edustaa pituuden ja halkaisijan suhdetta 1,0 ja suurempi suhdetta 2,0.

Valetuille lieriöille tehdyissä puristuskokeissa on yleisesti havaittu vastakkainen vaikutus suhteessa porattuihin rakennekoekappaleisiin. Suuremmilla valulieriöillä on tyypillisesti saatu pienempiä puristuslujuuksia kuin pienemmillä koekappaleilla. Valettuja lieriöitä on tutkittu pääsääntöisesti koekappaleilla, joiden pituus-halkaisija-suhde on 2,0. Tutkimuksissa on tehty yhteinen havainto kokovaikutuksesta, pienempään koekappaleen halkaisijaan siirryttäessä kasvaa puristuslujuustulosten hajonta [35]. Sama havainto on tehty myös standardissa EN 13791. Verrattuna halkaisijaltaan 100 mm:n rakennekoekappaleisiin, kasvaa puristuslujuuden vaihtelu pienempiin rakennekoekappaleisiin siirryttäessä. Testattaessa puristuslujuutta 50 mm:n rakennekoekappaleilla on suositeltavaa tehdä kokeet kolmikertaisella lukumäärällä verrattuna halkaisijaltaan 100 mm:n rakennekoekappaleisiin [2]. Väliarvot välillä 50-100 mm voidaan standardin mukaan interpoloida lineaarisesti.

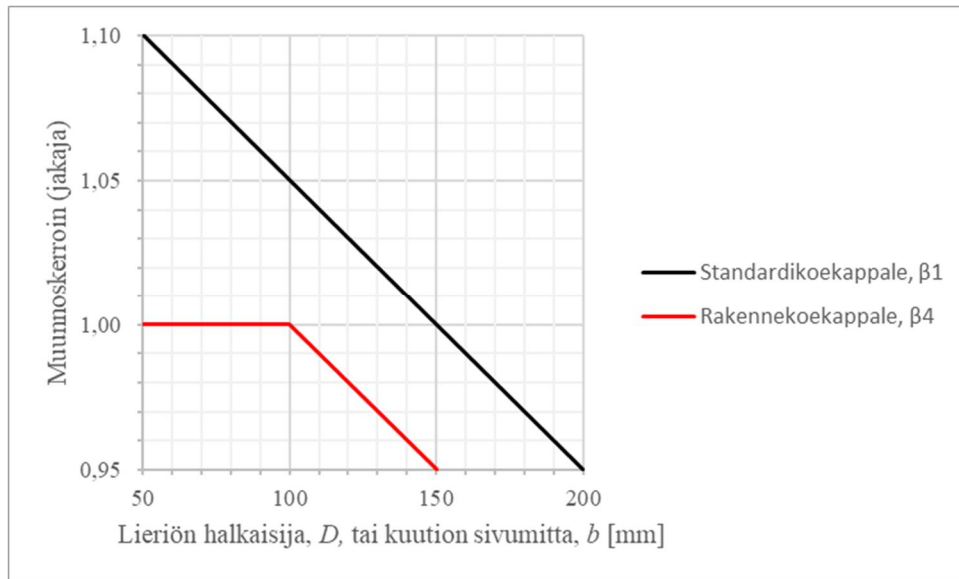
Bartlett ja MacGregor ovat tutkimuksessaan [36] koonneet yhteen aihepiiristä aikaisemmin julkaistuja tutkimuksia ja tehneet niistä johtopäätöksi liittyen lujuuseroihin koekappaleen koon muuttuessa. Tutkimus on tehty vuonna 1994. Aiemmin tässä kappaleessa viitattu Ario et al. tekemän tutkimuksen [34] tulokset on julkaistu vuonna 2007, joten tutkimuksessa ei luonnollisesti huomioida myöhemmin julkaistun tutkimuksen tuloksia. Bartlett ja MacGregorin ovat tutkimuksessaan [36] löytäneet neljä mahdollista syytä koekappaleen halkaisijasta riippuviin lujuuseroihin, mitkä ovat:

1. Timanttiporaus saattaa vaurioittaa rakennekoekappaleen pintoja siten, että porauspinnoille muodostuu mikrohalkeamia. Lisäksi timanttiporauksessa lävistetään runkoainepartikkeleita, jotka voivat lohjeta irti rakennekoekappaleesta puristuskokeen aikana, mikäli runkoainepartikkelin tartunta sementtikiveen on porauksen aikana vaurioitunut. Pienillä rakennekoekappaleilla pinta-alan suhde tilavuuteen on suurempi kuin suurilla rakennekoekappaleilla, jonka seurauksena pienien rakennekoekappaleiden vaurioituneella pinnalla on suurempi vaikutus puristuslujuuteen kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla.
2. Testauskoneen kuormituslevyjen tulee olla riittävän jäykät, mikäli jäykkyys ei ole riittävä, voi kuormituslevyjen taivutusmuodonmuutoksesta aiheutua kuorman keskittyminen testattavan koekappaleen keskiosaan tasaisen jakaantumisen sijaan. Kuormituslevyn taivutusmuodonmuutoksen seurauksena halkaisijaltaan suuriin koekappaleisiin kohdistuu halkaisuvoimia, jotka aiheuttavat koekappaleen murtumisen tasaista kuormaa pienemmällä voimalla. Tällöin koekappaleen puristuslujuus jää luonnollisesti alhaisemmaksi.
3. Betonirakenteissa esiintyy luontaisia lujuuseroja, jotka vaikuttavat pienten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksiin oletettavasti voimakkaammin. Esimerkiksi laattamaisissa rakenteissa yläpinnan betoni on yleensä heikompi kuin alapinnan betoni. Tästä seuraa oletettavasti, että pienten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksissa esiintyy enemmän hajontaa kuin suurissa.

4. Koekappaleen kokovaikutukselle on esitetty kaksi teoreettista mallia:
  - a. Heikoimman lenkin teoriassa hauraisissa materiaaleissa puristuslujuuden otaksutaan määräytyvän koekappaleen heikoimman materiaaliosuuden mukaisesti. Tämän teorian mukaisesti on luonnollista, että suurissa koekappaleissa esiintyy suurempi hajonta heterogeenisen betonin eri lujuuden omaavia elementtejä. Tällöin on myös todennäköistä, että heikompi aineksia esiintyy suurissa koekappaleissa pieniä todennäköisemmin. Tästä olettamuksesta seuraa, että suurempien koekappaleiden keskimääräinen puristuslujuus jää pieniä koekappaleita matalammaksi.
  - b. Summateoriassa koekappaleen puristuslujuus määräytyy kohdassa a esitetyn eri lujuuden omaavien elementtien summana.

Suomessa rakennekoekappaleiden halkaisijan vaikutus mitattavaan lujuuteen huomioidaan muutoskertoimilla kappaleen 2.4 mukaisesti. Ruotsissa lieriömäisen standardikoekappaleen halkaisijan tai kuutiomaisen standardikoekappaleen sivumitan sekä rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus puristuslujuuteen huomioidaan standardin SS 137207:2005 [31] mukaisesti. Standardissa määritetään puristuslujuuden muunnokselle korjausluku, jolla mitattu puristuslujuus jaetaan, mikäli testaukseen käytetyn koekappaleen halkaisija tai sivumitta poikkeaa referenssikoekappaleesta. Referenssikoekappaleina Ruotsissa käytetään standardikoekappaleille halkaisijaltaan 150 mm kokoista lieriötä ja sivumitaltaan 150 mm kokoista kuutiota. Rakennekoekappaleiden referenssikappaleena käytetään halkaisijaltaan 100 mm kokoista lieriötä. Standardin [31] mukaisten korjauslukujen määrittämiseen käytettävät käyrät on esitetty kuvassa 9. Kuvasta havaitaan, että rakennekoekappaleiden sallittu halkaisija voi olla väliltä 50...150 mm. Lisäksi havaitaan, että rakennekoekappaleen halkaisijalla välillä 50...100 mm ei oleteta olevan merkitystä mitattavan puristuslujuuden kannalta.

Huomioitavaa on, että puristuslujuuden muunnokset kuutiolujuudeksi tehdään siten, että muunnetut lujuudet vastaavat huoneilmassa säilytettyjen (kuivat olosuhteet) standardikuutioiden lujuutta. Tämä poikkeaa Suomessa voimassa olevan standardin SFS 7022 [1] ohjeistusta, jonka mukaisesti muunnokset tehdään vastaamaan vedellä kyllästetyn standardikuution puristuslujuutta.



**Kuva 9.** Koekappaleen kokovaikutuksen huomioivan korjausluvun (jakaja) määrittämisen standardin SS 137207:2005 [31] mukaisesti, mukaillen lähdettä [3].

Saksassa koekappaleen koolle ei ole määritetty korjauslukuja. Saksassa voimassa olevassa standardin EN 13791 kansallisessa liitteessä DIN EN 13791/A20:2017-02 [37] mukaan rakennekoekappaleen halkaisijan tulee olla 100 mm tai 150 mm. Poikkeustapauksissa sallitaan halkaisijaltaan 50 mm kokoiset rakennekoekappaleet. Standardin mukaan kuivissa olosuhteissa säilytettyjen, nimellishalkaisijaltaan ( $L/D$ -suhteeltaan 1,0) 50 mm, 100 mm tai 150 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuudet vastaavat vedessä säilytettyjen standardikuutioiden puristuslujuutta.

Yhdysvalloissa voimassa olevassa testausstandardissa ASTM C42/C42M-16 [38] ei esitetä korjauslukua koekappaleen halkaisijan muunnokselle. Testausstandardissa kuitenkin ohjeistetaan, että rakennekoekappaleen halkaisijan tulee olla vähintään 94 mm ja pituuden ja halkaisijan välisen suhteen tulee olla vähintään 1,0. American Concrete Institutun julkaisemassa raportissa ACI 214.4R-10 [35] rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutukselle esitetään muunnoskertoimet siten, että puristuslujuustulokset muunnetaan vastaamaan halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaletta. Raportissa on lisäksi esitetty muunnoskertoimien hajonnat. Muunnoksissa halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan luvulla 1,06 ja halkaisijaltaan 150 mm luvulla 0,98. Kerroimelle 1,06 hajonnaksi on ilmoitettu 11,8 % ja kertoimelle 0,98 1,8 %.

## 2.8.2 Koekappaleen pituuden ja halkaisijan suhde

Koekappaleen pituuden ja halkaisijan ( $L/D$ ) suhteen tiedetään vaikuttavan merkittävästi koekappaleesta määritettävään puristuslujuuteen. Pituuden ja halkaisijan välisen suhteen muuttuessa muuttuu myös koekappaleessa vallitseva jännitys jakauma. Testauslaitteen kuormituslevyjen ja koekappaleen välinen kitka madaltaa koekappaleen puristuskokeen aikaisia vaakasuuntaisia muodonmuutoksia. Kitkan aiheuttama puristuslujuuden kannalta

edullinen vaikutus on suurempi lyhyemmillä koekappaleilla kuin pitkillä koekappaleilla. Pituuden ja halkaisijan välisen suhteen kasvaessa koekappaleista mitattava puristuslujuus pienenee [39]. Yhdysvaltojen testausstandardissa ASTM C42/C42M-16 [38] on julkaistu korjauskertoimet L/D-suhteen muuttuessa, mikä ottaa kantaa kitkan vaikutuksen huomiointiin. Pituuden ja halkaisijan suhteen ollessa 2,0, katsotaan julkaisussa kitkan vaikutuksen olevan merkityksetön. Mikäli pituuden ja halkaisijan suhde on 1,0, madalletaan mitattua puristuslujuutta kertoimella 0,87 [38].

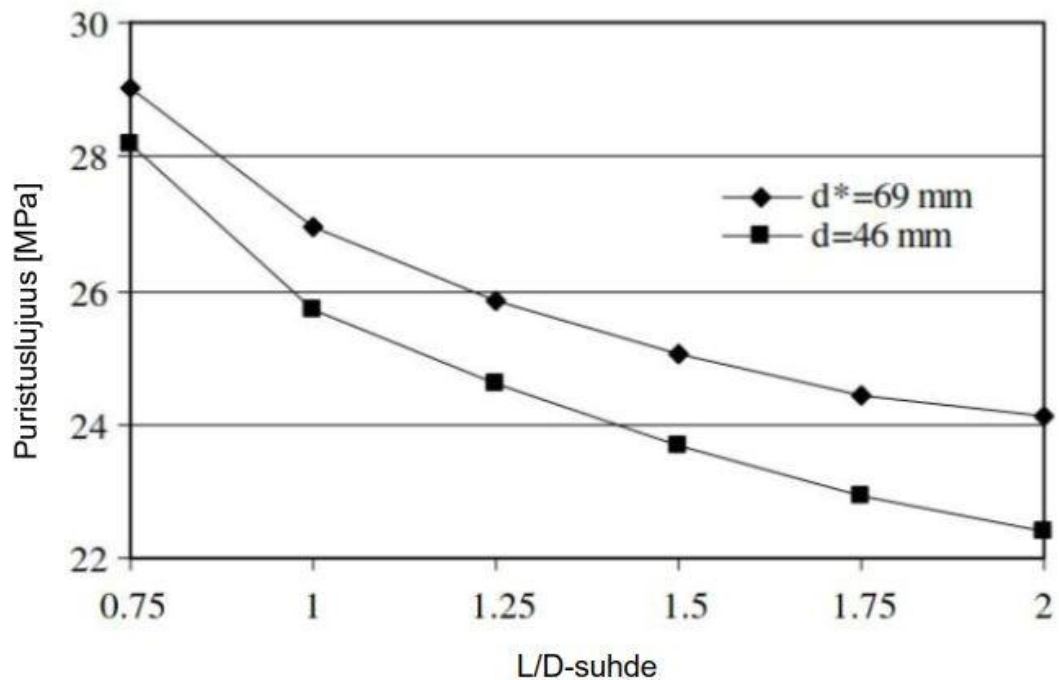
Pituuden ja halkaisijan välisen suhteen vaikutusta sivutaan useissa kansainvälisissä tutkimuksissa, joista osassa L/D-suhteen tutkiminen ei ole ollut pää tutkimusaiheena. Pääasiallisesti L/D-suhteen tutkimiseen keskittyneissä tutkimuksissa [40], [41] ja [42] havaittiin, että L/D-suhteen pienentyessä kasvaa koekappaleesta mitattava puristuslujuus. Chen et al. tekemässä tutkimuksessa [40] rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien eroja tutkittiin kuudella L/D-suhteella vaihteluvälillä 0,5-4,0. Tutkimus tehtiin halkaisijaltaan 74 mm:n rakennekoekappaleilla siten, että jokaisella L/D-suhteella tehtiin 50 puristuskoetta. Tutkimuksessa todetaan, että tulosten perusteella rakennekoekappaleiden L/D-suhteella on merkittävä vaikutus koekappaleista mitattaviin puristuslujuuksiin. Ilmiö korostuu erityisesti L/D-suhteen ollessa hyvin pieni. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että puristuslujuuksien keskihajonta kasvaa L/D-suhteen kasvaessa. Chen et al. tekemän tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4.** Chen et al. tekemien puristuslujuuskokeiden tutkimustulokset L/D suhteen muuttuessa, rakennekoekappaleiden halkaisijalla 74 mm, mukaillen lähdettä [40].

L/D-suhde	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Puristuslujuuden keskiarvo: $f_{cm}$ [MPa]	71,12	53,45	46,55	43,10	41,17	39,22
Puristuslujuuden keskihajonta: $s$ [MPa]	6,76	9,03	8,16	9,51	10,49	9,97
Variaatiokerroin: $V_x$	0,10	0,17	0,18	0,22	0,25	0,25
Puristuslujuuden suhde L/D-suhteeseen 2,0	165 %	124 %	108 %	100 %	96 %	91 %

Tuncan et al. tekemässä tutkimuksessa [41] L/D-suhteen vaikutusta rakennekoekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen tutkittiin kuudella L/D suhteella vaihteluvälillä 0,75-2,0. Tutkimus tehtiin halkaisijaltaan 46 mm:n ja 69 mm:n rakennekoekappaleilla. Tutkimuksessa halkaisijan ja L/D-suhteen lisäksi muuttujana oli runkoaineen ominaisuudet. Yhteensä tutkimuksessa tehtiin lähes 3000 puristuskoetta. Tutkimuksen kaikkien rakennekoekappaleiden tutkimustulokset on esitetty koottuna kuvassa 10. Kuvassa rakennekoekappaleiden halkaisijat on erotettu toisistaan ja eri L/D-suhteella mitatuista puristuskoetuloksista on laskettu kaikkien koetulosten keskiarvo. Tuncal et al. havaitsi, että molemmilla rakennekoekappaleen halkaisijoissa L/D-suhteen pienentyessä kasvaa rakenne-

koekappaleista mitattava puristuslujuus. Halkaisijaltaan pienemmällä rakennekoekappalekoolla lujuuden kasvu pienillä L/D-suhteilla selkeämpi kuin suuremmilla rakennekoekappalekoolla.



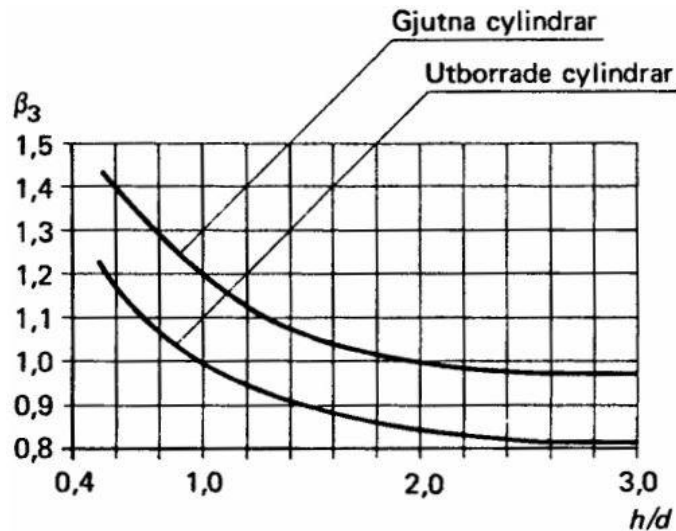
**Kuva 10.** Tuncan et al. tekemän tutkimuksen tulokset L/D-suhteen vaikutuksesta rakennekoekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen, mukailte lähdettä [41].

Carroll et al. tekemässä tutkimuksessa [42] L/D-suhteen vaikutusta rakennekoekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen tutkittiin viidellä L/D suhteella vaihteluvälillä 1,0-2,0. Tutkimus tehtiin halkaisijaltaan noin 75 mm:n ja noin 100 mm:n rakennekoekappaleilla. Tutkimuksessa tarkasteltiin rakennekoekappaleen halkaisijan, betonin tavoitelujuuden ja betonin runkoaineen vaikutusta rakennekoekappaleen L/D-suhteen korjauskertoimen määrittämiseen. Tutkimuksessa käytettiin kolmea betonin tavoitelujuutta: ~40 MPa, ~55 MPa ja ~70 MPa, sekä kahta eri maksimirakoon omaavaa runkoainesta: ~19 mm ja ~25 mm. Carroll et al. tekemässä tutkimuksessa [42] on määritetty korjauskertoimet L/D-suhteen muuttuessa siten, että tuloksia verrataan L/D suhteeseen 2,0. Tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että mitattujen puristuslujuuksien hajonta on ollut suurta, joka on nähtävissä myös tulosten sovitusorien huomattavan matalista korrelaatiokertoimista. Lisäksi tutkimuksen tuloksista nähdään, että L/D-suhteen pienentyessä tulosten hajonta kasvaa, mikä poikkeaa Chen et al. tekemästä tutkimuksesta [40] ja yleisestä käsityksestä aiheeseen liittyen. Tutkimuksen tulosten suuren hajonnan takia tuloksia ei tarkemmin käsitellä tässä työssä.

Suomessa pituuden ja halkaisijan väliselle suhteelle (L/D-suhde) ei ole esitetty korjauslukuja. Suomessa voimassa olevan ohjeistuksen mukaisesti rakennekoekappaleen L/D-

suhteen ollessa 1,0 verrataan puristuslujuustuloksia standardikuutioiden puristuslujuuteen. L/D-suhteen ollessa 2,0 tulosta verrataan standardilieriöiden puristuslujuuteen [14].

Ruotsissa pituuden ja halkaisijan välinen suhde huomioidaan standardin SS 137207:2005 [31] mukaisesti, mikäli standardilieriön tai rakennekoekappaleen L/D-suhde poikkeaa referenssikappaleen L/D-suhteesta. Standardilieriöille (gjutna cylindrar) referenssikappaleena käytetään L/D-suhdetta 2,0 ja rakennekoekappaleille (utborrade cylindrar) 1,0. Kuvassa 11 on esitetty korjausluvun määrittäminen standardin [31] mukaisesti. Mitattu puristuslujuus jaetaan kuvasta määritettävällä korjausluvulla.



**Kuva 11.** Standardilieriöiden ja rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan välisen suhteen huomioivan korjausluvun määrittäminen standardin SS 137207:2005 mukaisesti [31].

Saksassa koekappaleen L/D-suhteen muunnokselle ei ole määritetty korjauslukuja. Saksassa voimassa olevassa standardin EN 13791 kansallisessa liitteessä DIN EN 13791/A20:2017-02 [37] kuitenkin määrätään, että L/D-suhteen tulee olla 1,0, suhteessa sallitaan  $\pm 10\%$  toleranssi.

Iso-Britanniassa rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan välisen suhteen muuttuminen huomioidaan standardin BS EN 12504 [43] kansallisen liitteen mukaisesti. Liitteessä esitetään kaksi erilaista muunnoskaavaa, joita käytetään sen mukaan, halutaanko tuloksessa päätyä lieriölujuuteen (kaava 7) vai kuutiolujuuteen (kaava 8). Muunnoskaavojen käyttöä on rajoitettu siten, että lieriölujuuteen päädyttäessä tulee L/D suhteen olla välillä 1,6...2,4 ja kuutiolujuuteen päädyttäessä välillä 1,0...1,2.

$$K_{is,\lambda} = \frac{2,0}{1,5+1/\lambda} \quad (7)$$

$$K_{is,\lambda.cube} = \frac{2,5}{1,5+1/\lambda} \quad (8)$$

joissa  $\lambda$  on rakennekoekappaleen pituus  $L$  jaettuna halkaisijalla  $D$ , eli  $L/D$ -suhde. Mittayksiköllä ei ole merkitystä, kunhan se on kummassakin sama. Tarkasteltaessa kaavoja (7) ja (8) havaitaan, että ne jaettavaa lukua lukuun ottamatta samat. Jaettavia lukuja tarkasteltaessa havaitaan, että Britannian kansallisessa liitteessä lieriö- ja kuutiolujuuden välistä suhdetta pidetään vakiona ja se on 0,8.

Yhdysvalloissa voimassa olevassa testausstandardissa ASTM C42/C42M-16 [38] on esitetty puristuslujuuden korjauskertoimet tapauksille, joissa  $L/D$  suhde on pienempi kuin 2,0. Korjauskertoimen arvot on esitetty taulukossa 5, taulukossa esitettyjen korjauskertoimien väliarvot voidaan määrittää lineaarisesti interpoloimalla.

**Taulukko 5.** Rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen huomioiva korjauskerroin standardin ASTM C42/C42M-16 mukaisesti. Korjauskertoimella puristuslujuustulos muunnetaan vastaamaan  $L/D$  -suhteen 2,0 omaavaa rakennekoekappaleita, mukailten lähde [38].

Rakennekoekappaleen $L/D$ -suhde	Korjauskerroin
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

American Concrete Institutun julkaisemassa raportissa ACI 214.4R-10 [35] rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen huomioimiseksi esitetään kaava muunnoskertoimelle, jossa huomioidaan  $L/D$ -suhteen lisäksi rakennekoekappaleen säilytysolosuhteet ennen puristuskokeen suorittamista. Kaavaa (9a) käytetään standardin ASTM C42/C42M-16 [38] vaatimukset täyttävissä olosuhteissa. Kaavaa (9b) käytetään, kun rakennekoekappaleita on pidetty vesiupotuksessa 48 tuntia ennen koestamista (vedellä kyllästetty tila). Kaavaa (9c) käytetään, kun rakennekoekappaleita on kuivatettu seisemän vuorokautta huoneilmassa (16-21 °C), jonka suhteellinen kosteus on alle 60 %.

$$K_{is,\lambda} = 1 - (0.130 - \alpha \cdot f_{is}) \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right) \quad (9a)$$

$$K_{is,\lambda} = 1 - (0.117 - \alpha \cdot f_{is}) \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right) \quad (9b)$$

$$K_{is,\lambda} = 1 - (0.144 - \alpha \cdot f_{is}) \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right) \quad (9c)$$

joissa  $\alpha$  on vakiokerroin  $4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1 / \text{MPa}$ ,  $f_{is}$  on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos [MPa],  $L$  on rakennekoekappaleen pituus ja  $D$  on rakennekoekappaleen halkaisija. Pituuden ja halkaisijan mittayksiköllä ei ole merkitystä, kunhan ne ovat samat. Standardin ASTM C42/C42M-16 [38] mukaisessa kosteusolosuhteessa korjauskertoimeksi saadaan  $L/D$  suhteella 1,0 noin 0,6 % suurempi kerroin kuin standardissa [38] on esitetty. Muille taulukon 5 tapauksille kertoimet ovat noin 1,1...2,6 % pienempiä.

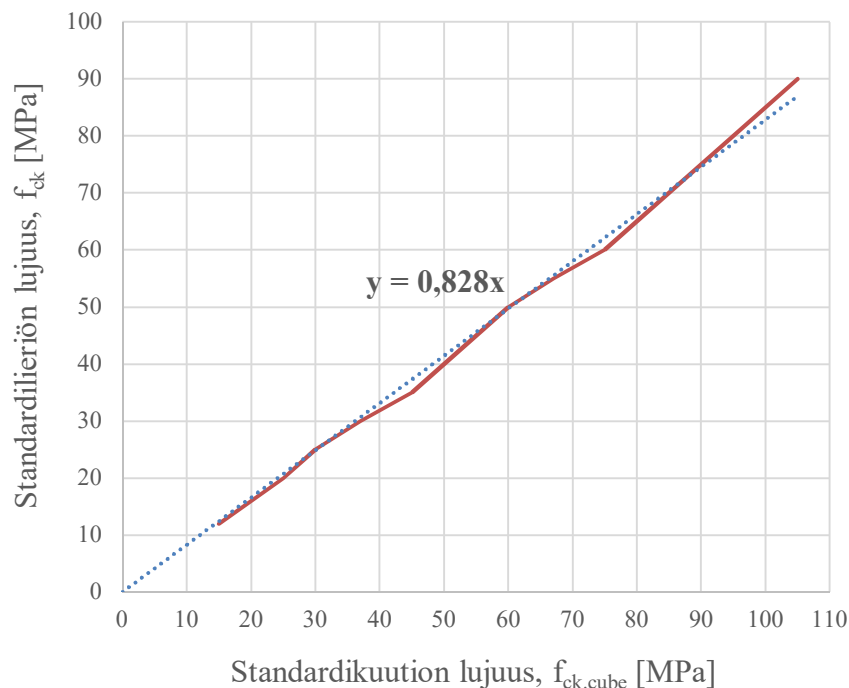
Raportissa esitetään lisäksi kaava (10) muunnoskerroimen hajonnan määrittämiseksi.

$$V_{is,\lambda} = 2,5 \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right)^2 \quad (10)$$

jossa  $L$  on rakennekoekappaleen pituus ja  $D$  on rakennekoekappaleen halkaisija. Pituuden ja halkaisijan mittayksiköllä ei ole merkitystä, kunhan ne ovat samat.

### 2.8.3 Koekappaleen muoto

Betonirakenteiden suunnittelussa betonin puristuslujuus ilmoitetaan lieriölujuuden  $f_{ck}$  [MPa] ja kuutiolujuuden  $f_{ck.cube}$  [MPa] suhteella. Lujuuksien keskinäinen suhde ei ole suunnitteluohjeissa vakio. Standardissa EN 1992-1-1 [8] on taulukoitu yleisesti käytössä oleva betonien lujuusluokat, missä lieriö- ja kuutiolujuudet on ilmoitettu. Tämän tutkimuksen esiselvityksessä [3] lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteet on esitetty kaavamuotoon sovitettuina. Kaavat perustuvat standardin SFS 7022 [1] muunnosparametreihin, jotka on esitetty taulukossa 1. Lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteet on esitetty esiselvityksessä myös graafiseen muotoon sovitettuna (kuva 12). Kuvasta havaitaan, että lieriö- ja kuutiolujuuksien suhde on betonin lujuusluokasta riippumatta lähes vakio. Kuvaan lisätyn sovitesuoran perusteella standardin EN 1992-1-1 [8] mukaisten lieriö- ja kuutiolujuuksien suhde ( $f_{ck} / f_{ck.cube}$ ) on 0,828.



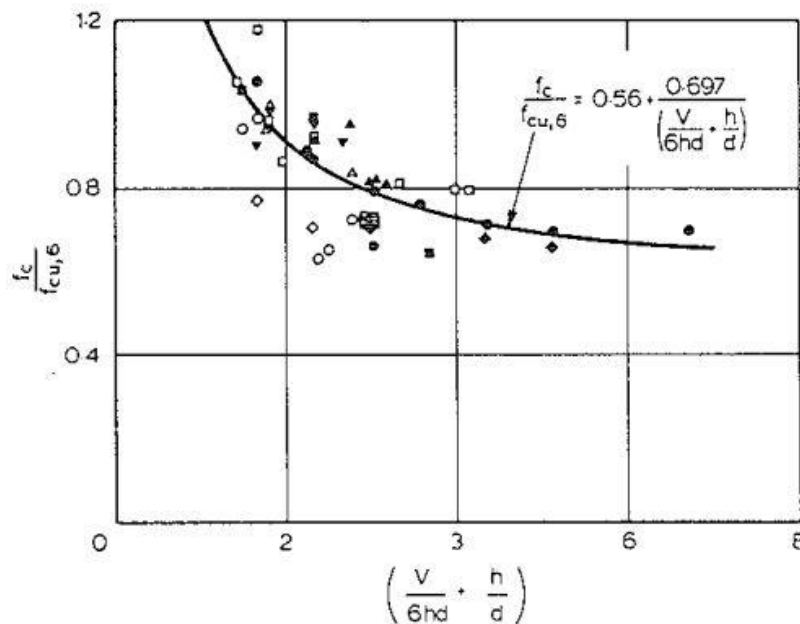
**Kuva 12.** Lieriölujuuden muuntaminen kuutiolujuudeksi standardin EN 1992-1-1 [8] lujuusluokkien perusteella, mukailte lähdettä [3].



Neville on kirjassaan [21] esittänyt yhteyden koekappaleen lujuuden sekä koon ja muodon suhteelle. Nevillen havainnot perustuvat suureen, useista tutkimuksista yhteen koottuun aineistoon, josta yhteys on havaittu. Nevillen esittämällä kaavalla (11) voidaan eri muotoisen ja kokoisen koekappaleen mitattu puristuslujuus muuntaa vastaamaan sivumitaltaan 150 mm kokoisen kuution puristuslujuutta. Nevillen esittämä kaava on muokattu siten, että pituuden yksikkönä on millimetri [mm]. Kuvassa 13 on esitetty graafisessa muodossa Nevillen tekemät havainnot ja sovitekäyrä, jonka perusteella kaava on johdettu. Kuvassa x-akselilla on kerroin, joka huomioi muunnettavan koekappaleen tilavuuden, korkeuden ja halkaisijan tai sivumitan. Y-akselilla on muunnettavan koekappaleen ja 150 mm:n sivumittaisen kuution lujuuksien suhde. Kuvan 13 mittayksikkönä on tuuma.

$$\frac{f_i}{f_{ck.cube}} = 0,56 + \frac{0,697}{\left(\frac{V}{150 [mm] \times L \times D} + \frac{L}{D}\right)} \quad (11)$$

jossa  $V$  on koekappaleen tilavuus [mm<sup>3</sup>],  $L$  on kappaleen korkeus [mm] ja  $D$  on kappaleen halkaisija tai pienin sivumitta [mm].



**Kuva 13.** Nevillen havaitsema yleinen puristuslujuuden riippuvuus koekappaleen ja 150 mm:n sivumittaisen kuution välillä [21].

Eri maissa voimassa olevista standardeista ja ohjeista voidaan päätellä, kuinka lieriö- ja kuutiolujuuden välistä suhdetta sovelletaan kansallisesti. Suomessa noudatettavasta standardista SFS 7022 [1] voidaan edellä mainitusti yleistää standardilieriön ja -kuution väliseksi suhteeksi 0,828 ( $f_{ck} = 0,828 \cdot f_{ck.cube}$ ). Ruotsin kansallisen standardin EN 206 [7] soveltamisstandardin SS 137003:2015 [31] muunnoskertoimet huomioiden standardilieriön ja -kuution väliseksi suhteeksi saadaan 0,805. Iso-Britanniassa noudatettavassa

standardin BS EN 12504-1:2009 [43] kansallisessa liitteessä on esitetty rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimen kaavat sekä standardilieriötä vastaavaksi puristuslujuudeksi (kaava 7), että standardikuutiota vastaavaksi lujuudeksi (kaava 8). Kaavojen jaettavista vakioista voidaan päätellä, että lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteen oletetaan olevan vakio 0,800. Nevillen [21] johtamalla kaavalla (11) standardilieriön ja kuution väliseksi suhteeksi saadaan 0,810.

## 2.8.4 Koekappaleen kosteuspitoisuus

Standardin EN 13791 liitteen A mukaan rakennekoekappaleen kosteuspitoisuus on otettava huomioon puristuslujuuden määrittämisessä. Vedellä kyllästetyn rakennekoekappaleen puristuslujuus on standardin mukaan 10-15 % pienempi kuin ilmassa kuivatun rakennekoekappaleen, jonka kosteuspitoisuus on tavallisesti 8-12 % [2]. Standardi velvoittaa säilyttämään koekappaleita vähintään kolme vuorokautta laboratorio-olosuhteissa ennen puristuskokeiden suorittamista [2]. Järjestelyllä pyritään varmistamaan, että koekappaleiden työstämisestä mahdollisesti aiheutunut ylimääräinen kosteus poistuu ennen puristuskokeiden suorittamista. Ohjeistukseen ollaan kuitenkin valmistelemassa muutosta standardin [2] seuraavassa päivityksessä. Uusi velvoittava ilmakeuhkaus aika tulee olemaan 16-24 tuntia.

Koekappaleen huokosissa oleva vesi, eli koekappaleen kosteuspitoisuus vaikuttaa oleellisesti koekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen. Puristuskokeessa koekappaleen huokosiin absorboitunut vesi pyrkii paineen vaikutuksesta poistumaan huokosista aiheuttaen koekappaleeseen ylimääräisen ulkoisen paineen. Koekappaleen jännitykset kasvavat paineen seurauksena ja koekappaleen puristuslujuus jää siten kuivaa näytettä alhaisemmaksi [44].

Bartlett ja MacGregon kokosivat tutkimuksessaan [44] yhteen useista tutkimuksista kerätyt puristuslujuustulokset. Tutkimuksen johtopäätökset perustuvat yli 700 puristuskoe tuloksen analyysiin, missä betonin lujuus vaihteli välillä 15-92 MPa. Tutkimuksessa vertailtiin rakennekoekappaleita, joita on kuivatettu normaalissa huoneilmassa (10-21 °C ja RH 40-60 %) seitsemän vuorokautta ennen puristuskokeiden suorittamista ja vedellä kyllästettyjä rakennekoekappaleita. Vedellä kyllästettyinä testattuja koekappaleita pidettiin vesiupotuksessa vähintään 40 tuntia ennen puristuskokeiden suorittamista. Tutkimuksen havaittiin, että kuivana testatut rakennekoekappaleet ovat puristuslujuudeltaan keskimäärin 14 % lujempia kuin vedellä kyllästettynä testatut rakennekoekappaleet. Rakennekoekappaleet, joihin timanttikorauksen vesihuuhtelun seurauksena oli vähäisesti imeytynyt vettä, olivat puristuslujuudeltaan keskimäärin 9 % lujempia kuin vedellä kyllästetyt rakennekoekappaleet.

Cambell ja Tobin vertailivat tutkimuksessaan [33] mahdollisimman pienen kosteuspitoisuuden omaavien uunikuivattujen rakennekoekappaleiden ja vedellä kyllästettyjen raken-

nekoekappaleiden eroja. Tutkimuksessa käytettiin halkaisijaltaan noin 150 mm:n ja korkeudeltaan noin 300 mm:n kokoisia rakennekoekappaleita. Tutkimuksen tulosten mukaan vedellä kyllästetyt rakennekoekappaleiden ovat puristuslujuudeltaan noin 20 % heikompia kuin uunikuivat rakennekoekappaleet.

Suomessa koekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutukselle ei ole esitetty muunnoslukuja. Ruotsin kansallisessa standardin EN 206 [7] soveltamisstandardissa SS 137003:2015 [45] ohjeistetaan pienentämään kuivassa kosteusolosuhteessa koestettujen standardikuutioiden lujuutta 8 % muunnettaessa tulosta vastaamaan standardien EN 206 [7] mukaista kuutiolujuutta (vedellä kyllästetty). Standardissa SS 137207:2005 [31] annetaan kaava (12) muunnoskertoimen määrittämiseksi, kun standardilieriön (vedellä kyllästetty) lujuus muunnetaan vastaamaan kuivan standardikuution lujuutta. Kaavaa (12) käytettäessä lieriölujuuden tulee olla välillä 8...50 MPa, eli kaavaa ei voida käyttää korkealujuusbetoneille.

$$f_{ck,dry} = 1,35 \cdot f_{ck} \quad (12)$$

jossa  $f_{ck}$  on lieriölujuus [MPa] standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti (vedellä kyllästetty, säilytetty vesiupotuksessa) ja  $f_{ck,dry}$  on kuivana koestettun kuution puristuslujuus [MPa].

Saksassa voimassa olevissa ohjeissa ja standardeissa ei ole esitetty muunnoskertoimia koekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutukselle. Standardin EN 13791 [2] Saksan kansallisessa liitteessä DIN EN 13791/A20:2017-02 [37] ohjeistetaan tekemään puristuskokeet rakennekoekappaleiden ollessa kuivia.

Yhdysvalloissa on voimassa olevassa testausstandardissa ASTM C42/C42M-16 [38] suositellaan säilyttämään rakennekoekappaleita valmistelujen (poraus, sahaaminen ja hionta) aiheuttaman kastumisen jälkeen vähintään viisi vuorokautta suljetussa muovipussissa tai suljetussa astiassa. Standardissa ohjeistetaan säilyttämään rakennekoekappaleita kaikkien valmistelutoimenpiteiden aikaan vastaavan menettelyn mukaisesti. Olosuhteet on ohjeistettu tarkasti ja varsinaista muunnoskerrointa ei ole esitetty. American Concrete Instituten julkaisemassa raportissa ACI 214.4R-10 [35] rakennekoekappaleen kosteuspitoisuudelle annetaan korjauskertoimet, joiden avulla puristuslujuustulos muunnetaan vastaamaan ASTM C42/C42M-16 [38] mukaista menettelyä. Tapaukselle, jossa rakennekoekappaleita on säilytetty vesiupotuksessa 48 tuntia, käytetään muunnoskerrointa 1,09. Rakennekoekappaleiden, joita on kuivatettu huoneilmassa (16-21 °C ja suhteellinen kosteus alle 60%) seitsemän vuorokautta, puristuslujuustulokset kerrotaan muunnoskertoimella 0,96. Kummassakin tapauksessa muunnoskertoimen hajonnaksi ilmoitetaan 2,5 %.

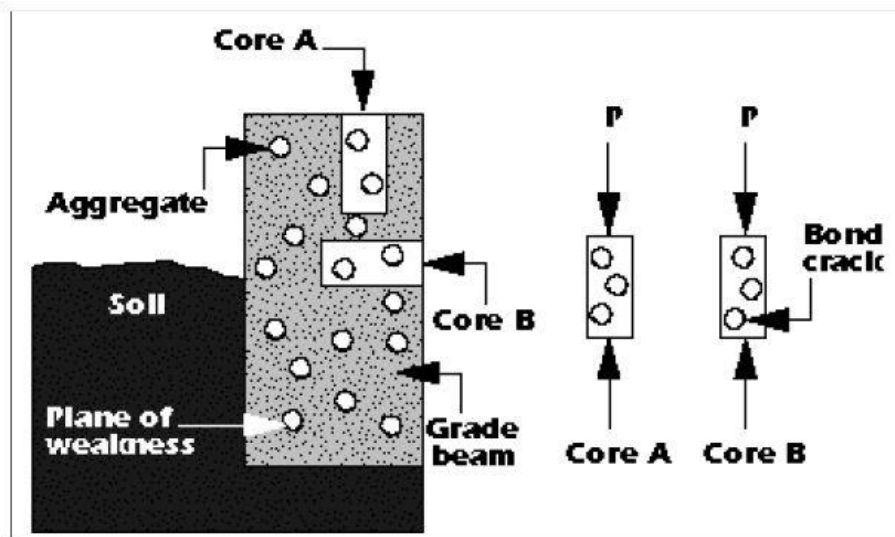
## 2.8.5 Koekappaleen porauskohdan sijainti ja suunta

Tutkimuksissa [32] ja [18] on havaittu, että rakennekoekappaleen korkeusasema ja poraussuunta valusuuntaan nähden vaikuttavat rakennekoekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen. Erityisesti porauskohdan korkeusaseman valusuunnassa on havaittu vaikuttavan puristuslujuuteen siten, että rakenteen yläosista (valusuunnassa ylempänä) poratuista rakennekoekappaleista mitatut puristuslujuudet ovat yleensä alaosasta matalampia. Lujuuden vaihtelun syitä ovat esimerkiksi betonin plastisesta painumasta seuraava vedenousu kohti valun pintaa sekä betonin tiivistyvyys erot [21]. Standardin EN 13791 liitteessä C [2] kerrotaan, että laatoista poratuissa rakennekoekappaleissa on havaittu jopa 25 % pienempiä puristuslujuuksia valun yläosassa kuin rakenteen keskiosassa. Puristuslujuudeltaan heikompaa betonia sijaitsee usein ylimmän 300 mm:n matkalla tai ylimmässä 20 %:ssa rakenteen paksuudesta [2]. Rakennekoekappaleen sijainti olemassa olevan rakenteen pystysuunnassa on siis huomioitava puristuslujuustuloksia tulkitessa ja arvioitaessa.

Meiningerin tekemässä tutkimuksessa [18] selvitettiin rakennekoekappaleiden korkeusaseman vaikutusta rakennekoekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen. Tutkimuksessa käytettiin rakennekoekappaleita, joiden halkaisija oli noin 50 mm, 100 mm ja 150 mm sekä L/D-suhde 2,0. Tutkimuksessa porattiin rakennekoekappaleita noin 400 mm paksusta laattamaisesta rakenteesta valusuunnassa. Tutkimuksen tulosten mukaan halkaisijaltaan 50 mm:n kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuus ylimmäisessä neljänneksessä on noin 22 % heikompi kuin alimmaisessa neljänneksessä. Vastaavasti 100 mm:n kokoisissa rakennekoekappaleissa havaittiin ylimmäisessä puolikkaassa noin 12 % matalampi puristuslujuuksia kuin alimmaisessa puolikkaassa. Halkaisijaltaan 150 mm:n kokoisissa rakennekoekappaleissa havaittiin laatan ylemmästä 300 mm osasta poratuista kappaleista noin 5 % matalampia lujuuksia kuin alimmasta 300 mm osasta. Halkaisijaltaan 150 mm:n rakennekoekappaleissa on kummankin pinnan koekappaleissa vaikuttavana betonina 200 mm paksu osa laatan keskeltä, tämä saattaa hieman vääristää tutkimusten tuloksia. Meiningerin tekemässä tutkimuksessa [18] porattiin vastaavan kokoisia rakennekoekappaleita (50 mm, 100 mm ja 150 mm) myös noin 400 mm paksusta seinämäisestä rakenteesta. Tutkimuksessa havaittiin, että valusuunnassa samalta tasolta, mutta rakenteesta eri syvyydeltä otettujen rakennekoekappaleiden lujuuksissa on eroja. Tutkimuksen havaintojen mukaan keskimmaisesta kolmanneksesta porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on noin 10 % matalampi kuin seinän ulommista kolmanneksista porattujen rakennekoekappaleiden lujuus.

Yip ja Tam tekemän tutkimuksen [32] mukaan useissa eri tutkimuksissa on havaittu, että valusuuntaa vasten kohtisuoraan poratuista rakennekoekappaleista saadaan 7-12 % pienempiä puristuslujuuksia kuin valusuuntaan poratuista rakennekoekappaleista. Yip ja Tam tutkivat omassa tutkimuksessaan [32] ilmiötä halkaisijaltaan 50 mm:n ja 100 mm:n rakennekoekappaleilla. Tutkimuksen mukaan valusuuntaa vasten kohtisuoraan poratut 50

mm:n rakennekoekappaleet ovat 8 % ja 100 mm:n kokoiset 4 % heikompia kuin valusuunnassa poratut rakennekoekappaleet [32]. Kirjallisuudesta tosin löytyy myös tutkimuksia, joissa rakennekoekappaleen poraussuunnalla valusuuntaan nähden ei ole havaittu olevan vaikutusta rakennekoekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen [42]. Eri poraussuunnassa otettujen rakennekoekappaleiden lujuuseron syyksi on esitetty tuoreessa betonissa tapahtuvaa veden nousua, jolloin karkeapintaisen runkoaineen alle saattaa jäädä vesitaskuja. Tämän seurauksena runkoaineen ja sementtikiven tartunnassa saattaa esiintyä paikallisia heikkouksia. Puristuskokeessa rakennekoekappaleessa olevat runkoaineen alapuoliset heikkousalueet tulevat samansuuntaisiksi kuin puristuskokeen pääsuunnan jännitys, jolloin rakennekoekappaleen puristuslujuus jää alhaisemmaksi kuin tilanteessa, jossa heikkousalueet ovat kohtisuoraan pääsuunnan jännitystä vastaan [46]. Tilannetta on selkeytetty kuvassa 14.



*Kuva 14. Vesitaskujen muodostuminen betonin runkoaineen alapuolelle, puristussuunnan vaikutus vesitaskujen suuntaan nähden [46].*

Vanhoista rakenteista kuormitukset aiheuttavat betoniin halkeamia vetorasitetuilla alueilla, minkä seurauksena vetorasitetuilta alueilta poratuista rakennekoekappaleista saadaan pienempiä puristuslujuuksia kuin puristetuilta alueilta poratuista rakennekoekappaleista [21]. Puristuslujuustuloksia tulkittaessa on siis huomioitava rakennekoekappaleen sijainti olemassa olevassa rakenteessa.

## 2.8.6 Poraus, katkaisu ja päiden tasoitus

Timanttiporauksessa rakennekoekappaleen porauspinnoille saattaa muodostua mikrohalkeamia, joiden takia rakennekoekappaleen puristuslujuus jää alhaiseksi. Lisäksi timanttiporauksessa lävistetään runkoainespartikkeleita, mikä saattaa vaurioittaa runkoainespartikkelin ja sementtikiven välistä tartuntaa. Tämän seurauksena runkoainespartikkeli saattaa irrota rakennekoekappaleesta puristuskokeen aikana ja puristuslujuus jää alhaisemmaksi. Runkoaineen irtoamista puristuskokeen aikana on havainnollistettu kuvassa 72.

Pienillä rakennekoekappaleilla poratun vaipan pinta-alan suhde tilavuuteen on suurempi kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla, jolloin poraus vaikuttaa niihin merkittävämmiin [36]. American Concrete Instituten julkaisemassa raportissa ACI 214.4R-10 [35] esitetään, että porauksen aiheuttamat vauriot tulee huomioida korjauskertoimella 1,06, mikä perustuu Bartlett ja MacGregor tekemään tutkimukseen [36]. Suomessa ja muissa eurooppalaisia standardeja soveltavissa maissa porauksen vaikutukselle ei ole esitetty korjauskerrointa verrattaessa rakennekoekappaleesta määritettyä puristuslujuutta standardikoekappaleiden puristuslujuuteen.

Rakenteen läpiporatut rakennekoekappaleet katkaistaan halutun pituisiksi yleensä timanttisahaamalla. Timanttisahaus on toimenpiteenä rinnastettavissa timanttiporaukseen. Kummassakin tapauksessa katkaistaan runkoainespartikkeleita, jolloin runkoaineen ja sementtikiven välinen tartunta saattaa vaurioitua. Lisäksi on myös todennäköistä, että sahaus aiheuttaa rakennekoekappaleen pinnalla mikrohalkeilua timanttiporauksen tapaan. Rakennekoekappaleiden katkaisun vaikutusta puristuslujuuteen ei ole suoranaisesti laajasti tutkittu. Timanttisahauksen vaikutuksen voidaan arvioida olevan pienempi kuin timanttiporauksen, mikäli toimenpiteiden aiheuttamat vauriot rakennekoekappaleeseen ovat samankaltaiset. Rakennekoekappaletta katkaistaessa mahdollisesti vaurioitettut heikotartuntaiset runkoainespartikkelit asettuvat puristuskoneen kuormituslevyjä vasten siten, että niiden ei ole mahdollista irrota puristuskokeen aikaan. Mahdollisen mikrohalkeilun vaikutusta on hankala todentaa ilman laajoja lisätutkimuksia.

Olemassa olevista rakenteista rakennekoekappaleita poratessa rakenteen paksuus on usein niin suuri, että rakenteen läpi ei voida tai ei ole kannattavaa porata. Näissä tapauksissa poraus päätetään määräsyyvyyteen ja katkaistaan taivuttamalla, jolloin rakennekoekappaleeseen oletettavasti muodostuu vetojännityksiä katkaisukohtaan läheisyydessä. Meininger tarkasteli tutkimuksessaan [18] rakennekoekappaleen taivuttamalla katkaisun vaikutusta rakennekoekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen. Tutkimuksen tulosten perustella taivuttamalla katkaistujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on keskimäärin 2 % pienempi kuin rakenteesta läpiporatujen rakennekoekappaleiden lujuus. Taivuttamalla katkaisulla ei siis ole merkittävää vaikutusta puristuslujuuteen. Meiningerin tutkimuksessa [18] katkaisun vaikutusta tutkittiin vain kuudella katkaistulla ja kuudella rakenteen läpiporatulla rakennekoekappaleella. Koekappaleiden lukumäärä on hyvin pieni, havaittu 2 % ero puristuslujuudessa saattaa olla normaalia hajontaa rakennekoekappaleiden välillä.

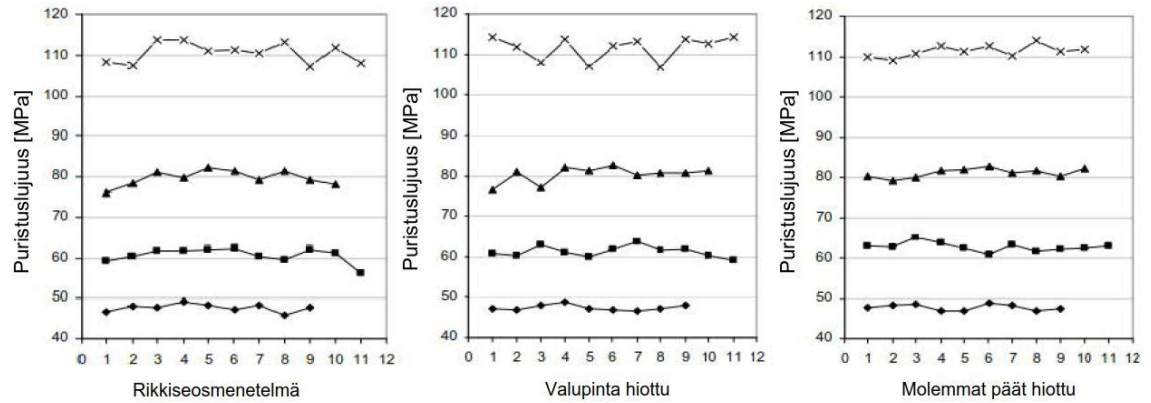
Koekappaleiden päiden tasoitus voidaan tehdä standardin EN 12390-3 liitteen A [13] mukaisesti hiomalla, pinnoittamalla tai hiekkalaatikko -menetelmällä. Pinnoituksessa voidaan käyttää kalsium-aluminaattisementtilaastia tai rikkiseosta. Pinnoitusmenetelmien käyttö on standardissa rajattu 50 MPa:iin. Standardin ohjeistuksen mukaan hiontaa tulee pitää ristiriitaisissa tilanteissa vertailumenetelmänä [13]. Tämän perusteella voidaan olettaa, että hionnalla työmenetelmänä on vähäisin negatiivinen vaikutus koekappaleesta mi-

tattavaan puristuslujuuteen. Pelkän hionnan vaikutusta koekappaleen lujuuteen ei ole tutkittu ja sen voidaan olettaa olevan hyvin vähäinen. Tässä tutkimuksessa koekappaleiden päitä tasoitettiin hiomalla ja pinnoitusmenetelmistä rikkiseosmenetelmällä, joten käsitelään tässä kappaleessa pääsääntöisesti vain näitä menetelmiä. Päiden tasoituksen virheet eli poikkeavuudet tasomaisuudessa ja suorakulmaisuuudessa vaikuttavat luonnollisesti koekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen. Bugai et al. tekemässä tutkimuksessa [47] päiden tasaisuuden vaikutusta puristuslujuuteen testattiin tasoittamalla ensimmäisessä koe-erässä koekappaleiden päät laastilla siten, että tasoitus tehtiin teräslastalla (tasaisuus ei siis ole vaatimukset täyttävä). Toisessa koe-erässä laastitasoitus tehtiin huolellisesti kansallisen standardin mukaisesti. Kummankin laastitasoituserän puristuslujuuksia verrattiin rikkiseoksella tasoitettuihin koekappaleisiin. Teräslastalla tasoitettujen koekappaleiden puristuslujuus olivat yli 40 % matalampia rikkiseoksella tasoitettuihin koekappaleisiin verrattuna. Kansallisen standardin mukaisen laastitasoituksen ja rikkiseostasoituksen välillä tutkimuksessa ei havaittu merkittävää ero puristuslujuudessa.

Jotta kahta tässä tutkimuksessa käytettyä menetelmää voidaan vertailla, täytyy tehdä oletamus, että kummallakin menetelmällä saadaan aikaiseksi standardin EN 12390-1 vaatimukset täyttävä laatu koekappaleiden tasomaisuudessa ja suorakulmaisuuudessa. Koekappaleiden päiden tasoitusmenetelmien eroja on kansainvälisesti tutkittu. Tutkimuksissa on tehty ristiriitaisia havaintoja. Tutkimuksissa on havaittu, että hionnan ja rikkiseosmenetelmän välillä ei ole merkittävää ero määritettävän puristuslujuuden kannalta [48], kun taas toisessa tutkimuksessa [49] menetelmien välillä on havaittu olevan huomattavan suuri vaikutus määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksissa [48] ja [49] on käytetty koekappaleiden tasoitusmenetelmänä puristuspinnojen ja kuormituslevyjen väliin asennettavia kumilaattoja, joiden käyttö ei ole sallittua eurooppalaisissa standardeissa.

Dumitru et al. tekemässä tutkimuksessa [48] tarkasteltiin koekappaleiden päiden tasoitustekniikoiden vaikutusta koekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen. Tasoitustekniikoina tutkimuksessa käytettiin hiontaa (yksi pää tai molemmat), rikkiseosta ja kumilevyjä. Tutkimuksessa käytettiin halkaisijaltaan 100 mm ja pituudeltaan 200 mm valulieriöitä ja neljää eri betonilaatua, joiden nimellisljuudet olivat 45 MPa, 60 MPa, 80 MPa ja 110 MPa. Kumilaattoja käytettiin ainoastaan lujuuksilla 60 MPa ja 110 MPa. Jokaisesta tapausta kohti testattiin 9-11 koekappaletta. Tutkimustulosten perusteella betonin lujuuden ollessa 45 MPa tasoitustekniikoiden välillä ei ole merkittävää eroa mitattavaan puristuslujuuteen. Betonin lujuuden ollessa 60-110 MPa saadaan hiontamenetelmillä noin 1-3 % korkeampia puristuslujuuksia kuin rikkiseosmenetelmällä. Kumilaattoja käytettäessä puristuslujuudeksi saatiin noin 2-7 % heikompi puristuslujuuksia kuin rikkiseosmenetelmällä. Dumitru et al. tekemästä tutkimuksesta [48] on havaittavissa, että betonin lujuuden kasvaessa rikkiseosmenetelmällä tasoitettujen koekappaleiden puristuslujuuksien hajonta kasvaa enemmän kuin kummatkin päät hiomalla. Mitattujen lujuuksien hajontaa on havainnollistettu kuvassa 15. Standardissa EN 12390-3 [13] rikkiseoksen käyttö rajoitetaan 50 MPa:iin. Tuloksista havaitaan myös, että matalilla lujuuksilla muottipinnan hionnalla

ei juurikaan ole merkitystä, mutta betonin lujuuden kasvaessa kasvaa myös hajonta merkittävästi, jos vain valupinta on koekappaleesta hiottu. Dumitru et al. tekemän tutkimuksen [48] havaintojen perusteella ei voi sanoa, että rikkiseosmenetelmän ja koekappaleiden päiden hionnan välillä olisi merkittävää eroa koekappalaista määritettävään puristuslujuuteen.



**Kuva 15.** Päiden tasoitusmenetelmien mitatut puristuslujuudet, joista koesarjojen hajonnat ovat pääteltävissä, mukailten lähdettä [48].

Medeiros et al. tekemässä tutkimuksessa [49] päiden tasoitusmenetelminä käytettiin hiontaa, timanttisahausta, rikkiseosmenetelmää ja neopreenista valmistettuja kumilaattoja. Tutkimuksessa käytettiin halkaisijaltaan 100 mm ja pituudeltaan 200 mm valulieriöitä ja neljää eri betonilaatua, joiden nimellisljuudet olivat 20 MPa, 40 MPa, 60 MPa ja 80 MPa. Puristuskokeita suoritettiin sekä seitsemän, että 28 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla. Jokaista tapausta kohti testattiin kolme koekappaleita, mitä voidaan pitää verrattain pienenä otantana. Taulukossa 6 on esitetty Medeiros et al. tekemän tutkimuksen [49] tulokset, ilmoitetut lujuudet ovat kolmen puristuskokeen keskiarvoja. Tutkimuksen tulosten perusteella rikkiseoksella tasoitettujen koekappaleiden puristuslujuus on 9-29 % heikompi kuin hiomalla tasoitettujen koekappaleiden. Heikoimmat tulokset rikkiseosmenetelmällä tasoitetuista koekappaleista saatiin betonin nimellisljuuden ollessa 80 MPa, joka on selvästi suurempi lujuus kuin mitä eurooppalaisessa standardissa sallitaan. Rikkiseosmenetelmällä tasoitettujen koekappaleiden lujuus suhteessa hiottuihin ei kuitenkaan laske johdonmukaisesti betonin nimellisljuuden kasvaessa, joten suoraa yhteyttä betonin lujuuden kasvun ja rikkiseosmenetelmän käytettävyyden välille ei voida tehdä. Tulosten perusteella hionnan ja rikkiseosmenetelmän välillä on merkittävä vaikutus koekappaleista mitattavaan puristuslujuuteen.



**Taulukko 6.** Päiden tasoitusmenetelmän vaikutus koekappaleesta mitattavaan puristuslujuuteen, mukailten lähdettä [49].

Päiden tasoitustekniikka	Betonin lujuus 28 vuorokauden iässä [MPa]			
	$f_{ck}=20$ MPa	$f_{ck}=40$ MPa	$f_{ck}=60$ MPa	$f_{ck}=80$ MPa
Timanttisahaus	15,05	28,16	42,14	39,32
Hionta	24,23	50,31	60,20	78,30
Rikkiseos	22,00	37,15	52,63	55,53
Neopreeni kumilaatta	19,11	31,45	51,92	60,28
Rikkiseoksen suhde hiontaan	91 %	74 %	87 %	71 %
Sahauksen suhde hiontaan	62 %	56 %	70 %	50 %
Kumilaatan suhde hiontaan	79 %	63 %	86 %	77 %

Tutkimuksessa käytettyjen timanttisahaamalla tasoitettujen koekappaleiden voidaan sanoa edustavan tilannetta, jossa koekappaleen pään tasomaisuus ja suorakulmaisuus eivät täytä standardin EN 12390-1 mukaisia vaatimuksia. Tuloksista on selvästi havaittavissa, että koekappaleen puristuspuolella ollessa heikkolaatuinen, madaltuvat koekappaleista mitattavat puristuslujuudet merkittävästi. Timanttisahaamalla tasoitettujen koekappaleiden lujuudet olivat 30-50 % heikompia kuin hiomalla tasoitettujen koekappaleiden lujuudet. Kumilevyjen avulla tasoitettujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat osittain samaa suurusluokkaa kuin rikkiseoksella tasoitettujen koekappaleiden lujuudet. Tutkimuksen perusteella betonin nimellislajuuden ollessa 80 MPa saadaan kumilevyjä käyttämällä parempia puristuslujuuksia kuin rikkiseosmenetelmää käyttämällä. Kumilevyjen avulla tasoitettujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat 14-37 % heikompia kuin hiomalla tasoitettujen koekappaleiden lujuudet, tulosten välillä on merkittävä ero.

Tutkimuksissa [48] ja [49] käytettiin molemmissa koekappaleita, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde ( $L/D$ -suhde) on 2,0. Kappaleessa 2.8.2 ”Koekappaleiden pituuden ja halkaisijan suhde” esitetysti koekappaleiden  $L/D$ -suhteella on merkittävä vaikutus kuormituslevyjen ja koekappaleen välillä vaikuttavaan kitkaan, joka vaikuttaa edullisesti mitattavaan puristuslujuuteen, kun  $L/D$ -suhde on  $< 2,0$  [39]. Koekappaleen  $L/D$ -suhteen ollessa 2,0, katsotaan kitkan vaikutuksen olevan merkityksetön [35]. Tässä tutkimuksessa käytettiin rikkiseosmenetelmällä tasoitettuja rakennekoekappaleita, joiden  $L/D$ -suhde on noin 1,0. Kitkavaikutuksen määrävänä parametrina on siis materiaaliparin välinen kitkakerroin, joita ei kummassakaan tapauksessa teräs-betoni ja teräs-rikkiseos voida varmuudella ilmoittaa. Oletettavaa kuitenkin on, että materiaaliparilla teräs-rikkiseos kitkakerroin on pienempi kuin materiaaliparilla teräs-betoni. Tämän olettamuksen perusteella tässä tutkimuksessa rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden  $L/D$ -suhteen edullinen vaikutus mitattavaan puristuslujuuteen on pienempi kuin rakennekoekappaleilla, joiden päät tasoitettiin hiomalla. Aineparien välisten kitkakerroimien eroavuus tulisi ottaa huomioon, kun vertaillaan samankokoisten, mutta eri menetelmällä tasoitettujen

rakennekoekappaleiden välisiä puristuslujuuksia,  $L/D$ -suhteen ollessa  $< 2,0$ . Kitkan aikaansaamaa edullista vaikutusta puristuslujuuteen ei kuitenkaan ole tutkittu materiaaliparien välillä, joten vaikutusta ei pystytä ottamaan huomioon.

## 2.9 Rakennekoekappaleessa olevan raudoitteen vaikutus puristuslujuuteen

Rakennekoekappaleissa sijaitsevat pääjännitysakseliin nähden poikkisuuntaiset betoni-raudoitteet saattavat vaikuttaa rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Yleensä raudoitteiden vaikutuksesta rakennekoekappaleiden puristuslujuus madaltuu. Mikäli rakennekoekappaleessa on pääjännitysakselin suuntainen raudoite, tulee rakennekoekappale hylätä [2]. Raudoitteiden vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen ei ole merkittävästi tutkittu. Suomessa voimassa olevissa ohjeissa ja standardeissa ei ole annettu korjauskerrointa raudoituksen vaikutuksen huomioimiseksi rakennekoekappaleessa.

Iso-Britanniassa rakennekoekappaleessa sijaitseva raudoite huomioidaan korjauskertoimella. Korjauskertoimien määrittämiseen käytettävät kaavat on esitetty Iso-Britannian standardin EN 12504-1 [14] kansallisessa liitteessä BS EN 12504-1:2009 [43]. Yksittäinen rakennekoekappaleen pääakseliin nähden poikkisuuntainen raudoite huomioidaan kaavan (13) mukaisella korjauskertoimella ja useampi raudoite huomioidaan kaavan (14) mukaisella korjauskertoimella. Mikäli kahden raudoitteen tapauksessa raudoitteiden välinen etäisyys on pienempi kuin halkaisijaltaan suuremman raudoitteen halkaisija, tulee korjauskerrointa määritettäessä huomioida vain raudoite, jonka halkaisijan ja päätyetäisyyden tulo on suurempi.

$$K_s = 1,0 + 1,5 \cdot \left( \frac{\varphi_r \cdot h_r}{D \cdot L} \right) \quad (13)$$

$$K_s = 1,0 + 1,5 \cdot \left( \frac{\sum(\varphi_r \cdot h_r)}{D \cdot L} \right) \quad (14)$$

joissa  $\varphi_r$  on raudoitteen halkaisija,  $D$  on rakennekoekappaleen halkaisija,  $h_r$  on raudoitteen akselin etäisyys rakennekoekappaleen lähemmästä päästä ja  $L$  on rakennekoekappaleen pituus. Käytettävällä mittayksiköllä ei ole merkitystä, kunhan se on kaikilla muuttujilla samat. Kaavoista (13) ja (14) voidaan havaita, että korjauskertoimen arvo on suurimmillaan silloin, kun raudoite sijaitsee rakennekoekappaleen pituusakselin keskellä. Esimerkkinä kertoimen suuruudesta voidaan käyttää seuraavaa: Halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm:n rakennekoekappaleessa on raudoite koekappaleen keskellä. Jos raudoitteen halkaisija on 10 mm, niin korjauskertoimeksi saadaan 1,075 ja 16 mm tapaukselle 1,120. Jos raudoitteen akselin etäisyys rakennekoekappaleen päästä on 25 mm, niin vastaavat korjauskertoimet ovat (10 mm /16 mm) 1,019 ja 1,030.

### 3. NÄYTTEIDEN VALMISTAMINEN JA KOEJÄRJESTELYT

Tässä kappaleessa esitellään tutkimuksessa käytetyt betonilaadut, työmenetelmät ja erilaiset koejärjestelyt sekä niihin liittyvät standardit ja niiden asettamat vaatimukset. Kaikkien betonilaatujen koekappaleiden valaminen, valmistelut ja testaukset suoritettiin samojen periaatteiden mukaisesti. Minimoimalla koekappaleiden valmistuksesta ja testauksesta aiheutuvat muuttujat tutkimussarjojen välillä varmistutaan siitä, että koetulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Tutkimuksessa yhden betonilaadun valutapahtuma jaettiin kahteen erään koekappaleiden valmistuksen laadun varmistamiseksi. Valut suoritettiin nimellisesti aamulla ja iltapäivällä.

Standardien noudattaminen kokeellisessa tutkimuksessa on erityisen tärkeää, jotta tuloksia voidaan pitää luotettavina ja ne ovat vertailukelpoisia muihin samasta aihepiiristä tehtyihin tutkimuksiin. Standardit määrittelevät tarkasti vaatimukset koekappaleille, testaus- ja mittauskalustolle sekä kuormituksen toteutukselle.

#### 3.1 Tutkimuksessa käytetyt betonilaadut

Tutkimuksessa käytettiin neljää (4) eri betonilaatua, jotka valittiin siten, että ne ovat pääsääntöisesti yleisesti siltojen rakentamisessa käytettyjä betonilaatuja. Betonilaadut pyrittiin valitsemaan myös siten, että ne ovat lujuutensa puolesta riittävän kaukana toisistaan. Lisäksi tutkimuksessa haluttiin selvittää saman lujuusluokan betonien puristuslujuuksien eroja, kun betonimassa on huokostettu eli betonilla on pakkasenkestävyysluokka tai betonimassa on huokostamaton. Tutkimuksessa selvitettiin myös kahden (2) samalla pakkasenkestävyysluokalla varustetun, mutta selvästi eri nimellislujuuden omaavien betonilaatujen välisiä eroja. Tutkimuksessa käytetyt betonilaadut valujärjestyksessä ovat:

1. C35/45, pakkasenkestävyysluokka P50
2. C30/37, pakkasenkestävyysluokka P20
3. C50/60, pakkasenkestävyysluokka P50
4. C35/45, huokostamaton

Betonilaatujen suhteutuksen teki betonimassan toimittaja Rudus Oy. Kaikissa betonilaaduissa käytettiin runkoaineen maksimiraekokona 16 mm ja sementtinä Finnsementin valmistamaa Plussementtiä CEM II/B-M(S-LL) 42,5N. Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty betonimassojen suhteutuksen suunnitellut ainemäärät ja toteutuneet ainemäärät. Betonilaatujen reseptit ja toteutuneiden annosten tiedot on esitetty liitteessä 1.

**Taulukko 7.** Betonilaatujen C35/45 P50 ja C35/45 huokostamaton suunnitellut ja toteutuneet ainemäärät.

Betoni	C35/45 P50			C35/45 huokostamaton		
	Suunnitellut / toteutunut			Suunniteltu / toteutunut		
Määrä	resepti	aamu	iltapäivä	resepti	aamu	iltapäivä
Tehollinen vesi-sementtisuhte	0,393	0,410	0,400	0,521	0,530	0,510
P-lukuarvo	54					
Sementti [kg/m <sup>3</sup> ]	436	435	437	385	382	392
Tehollinen vesi [l/m <sup>3</sup> ]	171	176	177	200	203	201
Filleri [kg/m <sup>3</sup> ]	119	128	124	294	304	305
Hiekka 0/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	843	850	853	480	481	489
Kivi 6/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	741	743	740	714	719	703
Kivituhka 0/8 [kg/m <sup>3</sup> ]				262	266	269
Ilma [l/m <sup>3</sup> ]	50	50	50	20	20	20
Air-Pro V5 [%]	0,03	0,03	0,03			
ViscoFlow MR-1 [%]	1,10	1,08	1,09	0,60	0,62	0,61

**Taulukko 8.** Betonilaatujen C30/37 P20 ja C50/60 P50 suunnitellut ja toteutuneet ainemäärät

Betoni	C30/37 P20			C50/60 P50		
	Suunnitellut / toteutunut			Suunnitellut / toteutunut		
Määrä	resepti	aamu	iltapäivä	resepti	aamu	iltapäivä
Tehollinen vesi-sementtisuhte	0,480	0,480	0,480	0,396	0,400	0,400
P-lukuarvo	28			59		
Sementti [kg/m <sup>3</sup> ]	375	374	374	435+15 *	436+15	437+15
Tehollinen vesi [l/m <sup>3</sup> ]	180	180	181	172	176	177
Filleri [kg/m <sup>3</sup> ]	135	145	144	86	100	93
Hiekka 0/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	861	872	868	848	856	860
Kivi 6/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	753	749	752	752	755	755
Ilma [l/m <sup>3</sup> ]	45	45	45	50	50	50
Air-Pro V5 [%]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
ViscoFlow MR-1 [%]	0,60	0,62	0,60	1,20	1,20	1,20

\*) Sideaineena käytettiin lisäksi silikajauhetta parantamaan betonin lujuutta. Silikaa käytettiin 15 kg/m<sup>3</sup>.

Lisäaineiden Air-Pro V5 ja ViscoFlow MR-1 määrä on prosentuaalinen osuus sideaineen massasta.

Kaikissa betonilaaduissa käytettiin notkistavaa lisäainetta, jonka tuotenimi on ViscoFlow MR-1. Notkistimen käytöllä betonimassoille tavoiteltiin notkeusluokkaa S3. Notkistimen käyttö parantaa betonimassan juoksevuutta ilman, että massaansa lisätään vettä. Pakkaskestävissä betonilaaduissa käytettiin huokostavaa lisäainetta, jonka tuotenimi on SikaAir-Pro V5. Molempien tuotteiden valmistaja on Sika Group. Huokostavalla lisäaineella betoniin saadaan muodostumaan suojahuokokset, jotka mahdollistavat betonin pakkaskestävyyden. Betonilaadussa C50/60 P50 käytettiin sementin lisäksi sideaineena silikajauhetta, jolla parantaa betonin lujuutta ja sitkeyttä. Huokostamattomassa betonilaadussa C35/45 käytettiin muista betonilaaduista poiketen runkoaineena myös kivituhkaa.

Taulukosta 7 havaitaan, että huokostamattomassa betonilaadussa C35/45 aamu- ja ilta-päivän toteutuneessa sementtimäärässä on  $10 \text{ kg/m}^3$  ero. Tehollisen veden määrä on molemmissa betonierissä lähes sama, joten tehollinen vesi-sementtisuhde eroaa hieman betonierien välillä. Tehollinen vesi-sementtisuhde vaikuttaa suoraan betonin puristuslujuuteen. Tutkimuksessa tehtiin betonilaaduille lujuudenseurantatutkimus, jossa betonierien 28 vrk puristuslujuudet erosivat noin 10 %. Lujuuseron voidaan arvioida aiheutuneen ainakin osittain sementin määrässä tapahtuneesta mittavirheestä.

Muiden ainemäärien osalta betonilaatujen reseptien ja toteutuneiden ainemäärien välisiä eroavaisuuksia voidaan pitää tavanomaisina. Ainemäärien eroilla ei arvioida olevan merkittävää vaikutusta betonierien välisiin puristuslujuus eroihin.

## **3.2 Näytteiden valu**

Tutkimuksen suuren koekappaleiden lukumäärän takia kaikkien betonilaatujen valutahtumat jaettiin kahteen erään, jotka suoritettiin saman työpäivän aikaan. Valut suunniteltiin tehtäväksi aamupäivällä klo 9.00 ja iltapäivällä klo 13.00 alkaen. Kummassakin valuerässä valettiin yhtä monta koekappaletta jokaista tutkimustapausta kohti. Yhden betonilaadun jakamisella kahteen valuerään pyrittiin varmistamaan koekappaleille mahdollisimman identtiset valmistusolosuhteet. Yhden valuerän kesto oli noin 2-2,5 h. Valuerän pitkittyminen olisi heikentänyt betonimassa tiivistysominaisuuksia merkittävästi, jolloin koekappaleiden lujuuksissa olisi saattanut esiintyä työtekniikan aiheuttamaa merkittävää hajontaa.

### **3.2.1 Käytetyt muotit**

Muottien tulee olla vesitiiviitä ja vettä imemättömiä. Muottien saumat voidaan vedenpitävyyden aikaansaamiseksi päällystää vahalla, öljyllä tai rasvalla. Kalibroittujen muottien tulee olla valmistettu teräksestä tai valuraudasta. Muut kuin standardin EN 12390-1 mukaan kalibroidut muotit voivat olla tehty mistä tahansa materiaalista, joka soveltuu betonikappaleiden valmistukseen [5]. Lieriön muotoisten koekappaleiden valmistuksessa käytettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisia teräksestä valmistettuja muotteja sekä muovi-

putkesta valmistettuja muotteja. Kuution muotoisten koekappaleiden valamisessa käytettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisia teräksestä valmistettuja muotteja sekä standardin mittavaatimukset täyttäviä muovista valmistettuja muotteja.

Kaikki valetun kokoisena puristetut lieriön muotoiset halkaisijaltaan D150 koekappaleet valettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräksisillä lieriömuoteilla. Muut lieriön muotoiset koekappaleet valettiin tutkimusta varten valmistetuilla muovisilla muoteilla.

Timanttiorattavia halkaisijaltaan D50, D80 ja D100 rakennekoekappaleita varten valettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisia nimellishalkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm kokoisia betonilieriöitä. Muotit valmistettiin PVC-muoviputkesta, jonka ulkohalkaisija on 160 mm ja seinämäpaksuus 4,7 mm. Betonilieriöiden halkaisijaksi tuli siten noin 151 mm. Timanttiorausta varten valettujen betonilieriöiden dimensiot valittiin siten, että kappaleiden dimensiot ovat mahdollisimman lähellä standardin mukaisia teräksisillä muoteilla valettuja koekappaleita. Dimensioiden samankaltaisuudella pyrittiin saamaan aikaseksi samat betonin lujittumisominaisuudet sekä porattaville betonilieriöille että valetuille koekappaleille. Muoviputkimuottien pohjina käytettiin putkelle tarkoitettua muovista valmistettuja työtulppia, jotka asennettiin putken ulkopintaan. Työtulppien kiinnitys varmistettiin kuudella (6) ruuvilla noin 60° välein. Muottien seinämät katkaistiin sahaamalla yhdestä kohtaa muotin pituussuunnassa muottien purkamisen helpottamiseksi. Katkaisukohtaan asennettiin pannat ruuveilla muotin kiinnipysymisen varmistamiseksi. Katkaisukohdat ja pohjien saumat tiivistettiin ilmastointiteipillä ennen betonilieriöiden valamista. Kuvassa 16 on esitetty tutkimuksessa käytetyt muoviset D150x300 lieriömuotit ennen valun aloittamista.



**Kuva 16.** Timanttiorattavien rakennekoekappaleiden valukappaleiden D150x300 muovinen lieriömuotti.

Timanttiporattavia halkaisijaltaan D150 rakennekoekappaleita varten valettiin betonilieriöitä, joiden halkaisija oli noin 235 mm ja pituus noin 340 mm. Muotit valmistettiin PVC-muoviputkesta, jonka ulkohalkaisija on 250 mm ja seinämäpaksuus 7,3 mm. Betonilieriöiden halkaisijaksi tuli siten noin 235 mm. Muotit valmistettiin vastaavalla tekniikalla kuin halkaisijaltaan 160 mm muotit valmistettiin. Muottien pohjina käytettiin kiovusta valmistettua 21 mm paksua filmivaneria. Vaneripohjat kiinnitettiin kahdeksalla (8) ruuvilla noin 45° välein. Muottien katkaisukohtat ja pohjien saumat tiivistettiin ilmastointiteipillä ennen betonilieriöiden valamista. Kuvassa 17 on esitetty tutkimuksessa käytetyt muoviset D235x340 lieriömuotit ennen valun aloittamista.



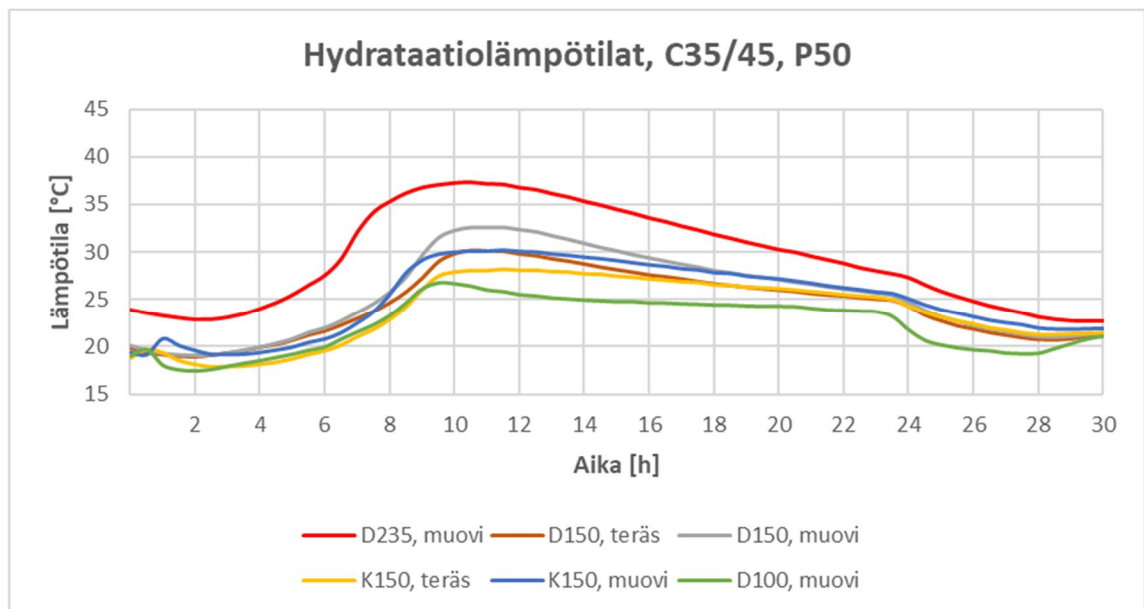
**Kuva 17.** Timanttiporattavien rakennekoekappaleiden valukappaleiden D235x340 muovinen lieriömuotti. Muotit on valmistettu ylikorkeina, jotta muottien yläreunaan on pysytty poraamaan nostoreiät muottien siirtämisen helpottamiseksi.

Valetun kokoisena testatut nimellishalkaisijaltaan D100 koekappaleita valettiin muoviputkimuoteilla. Muotit valmistettiin PP-muoviputkesta, jonka ulkohalkaisija on 110 mm ja seinämäpaksuus 3,4 mm. Koekappaleiden halkaisijaksi tuli siten noin 103 mm. Koekappaleet valettiin noin 100 mm pituisina, jolloin koekappaleet täytyy ainoastaan hioa ennen puristuskokeiden suorittamista. Muotit valmistettiin vastaavalla tekniikalla kuin halkaisijaltaan 250 mm muotit valmistettiin, pohjan kiinnitys tehtiin neljällä (4) ruuvilla noin 90° välein. Muottien katkaisukohtat ja pohjien saumat tiivistettiin ilmastointiteipillä ennen koekappaleiden valamista. Muotti on valmistustekniikaltaan samanlainen kuin kuvassa 17 esitetty muotti.

Tutkimuksessa valutapahtumien yhteydessä selvitettiin millainen vaikutus muottityypeillä ja muottien materiaaleilla on hydrataatiolämpötilaan lujoudenkehittymisen alkuvaiheessa. Kaikkien betonilaadun aamupäivän valuerästä otettiin yksi valukappale jokaista muottityyppiä kohti hydrataatiolämpötilan seurantaan. Eri muottityypit valettavien betonikappaleiden nimellismittojen mukaisesti ovat:

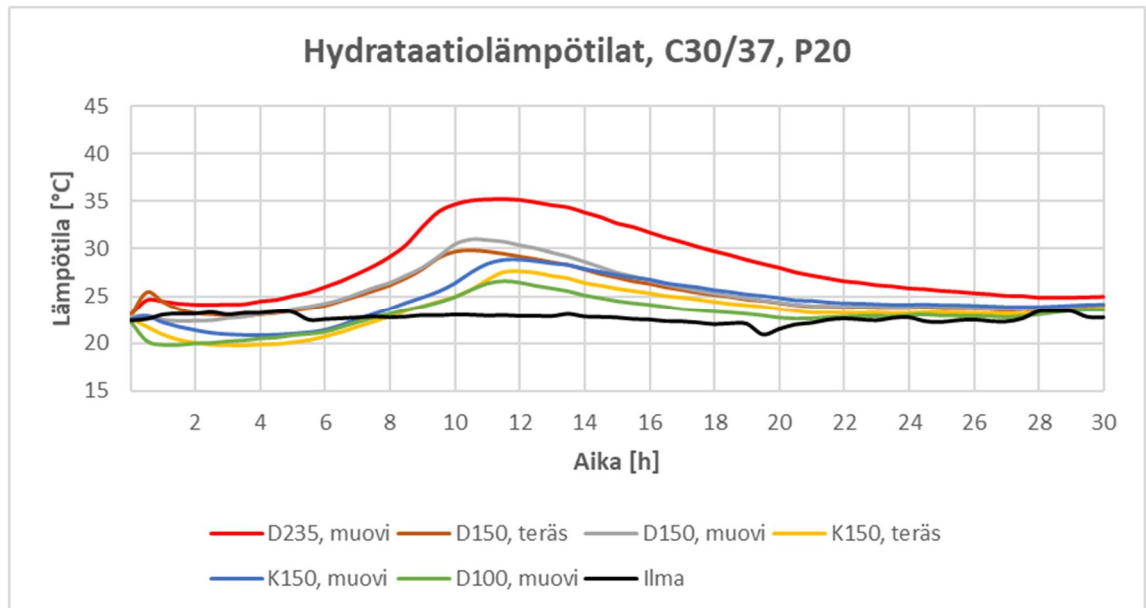
1. lieriömuotti D100x100, muovimuotti vaneripohjalla
2. lieriömuotti D150x300, teräsmuotti EN 12390-1 mukaisesti
3. lieriömuotti D150x300, muovimuotti muovipohjalla
4. lieriömuotti D235x340, muovimuotti vaneripohjalla
5. kuutiomuotti 150x150x150, teräsmuotti EN 12390-1 mukaisesti
6. kuutiomuotti 150x150x150, muovimuotti EN 12390-1 mittojen mukaisesti.

Betonilaatujen 2-4 yhteydessä seurattiin lisäksi samalla mittaustiheydellä muottien säilytyspaikan (sisätiloissa) ilmanlämpötilaa. Betonilaadun 1 aikaisesta ilmanlämpötilasta on tiedossa vain itse valutapahtuman aikaiset lämpötilamuutokset. Betonilaatujen 1 ja 2 aikaan olosuhteet olivat hyvin lähellä toisiaan, joten betonilaadun 1 hydrataatiolämpötilan seurannan aikaisen ilmanlämpötilan voidaan olettaa olleen sama kuin betonilaadun 2 aikaan, eli noin 21-23 °C. Valukappaleiden lämpötiloja seurattiin termoelementtianturilla (termolanka), joka sidottiin kiinni ohueen metallitankoon. Tangon avulla termolanka työnnettiin tiivistettyyn betonimassaan siten, että termolangan mittaava pää asettui kappaleen poikki- ja pystysuunnassa keskeisesti. Hydrataatiolämpötilan seurannan tulokset on esitetty kuvissa 18-21.

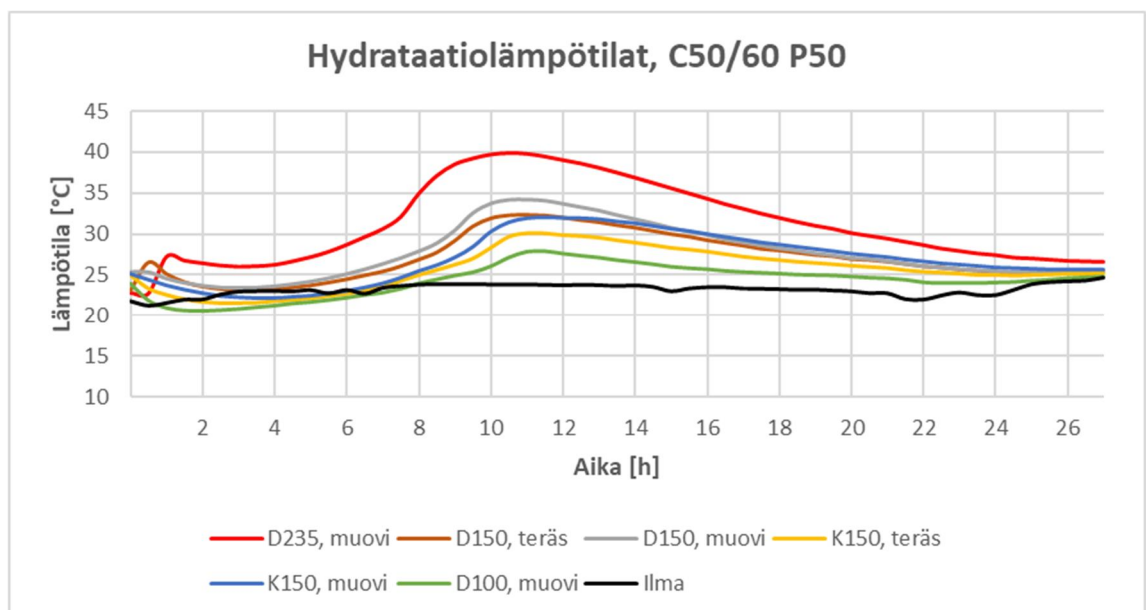


**Kuva 18.** Hydrataatiolämpötilan seuranta, betonilaatu C35/45 P50.

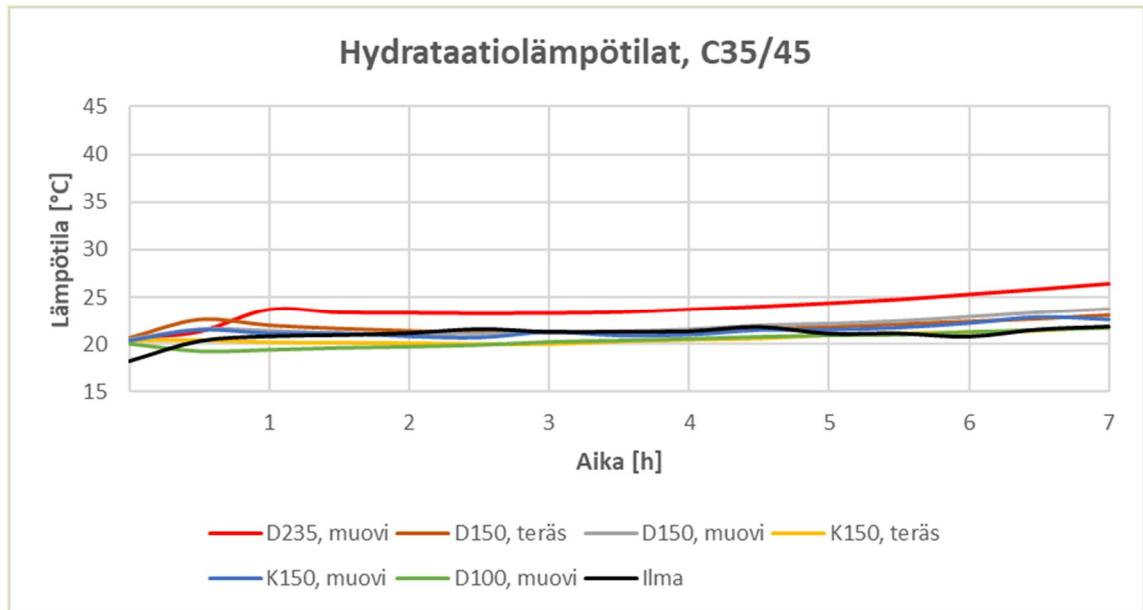




**Kuva 19.** Hydrataatiolämpötilan seuranta, betonilaatu C30/37 P20.



**Kuva 20.** Hydrataatiolämpötilan seuranta, betonilaatu C50/60 P50.



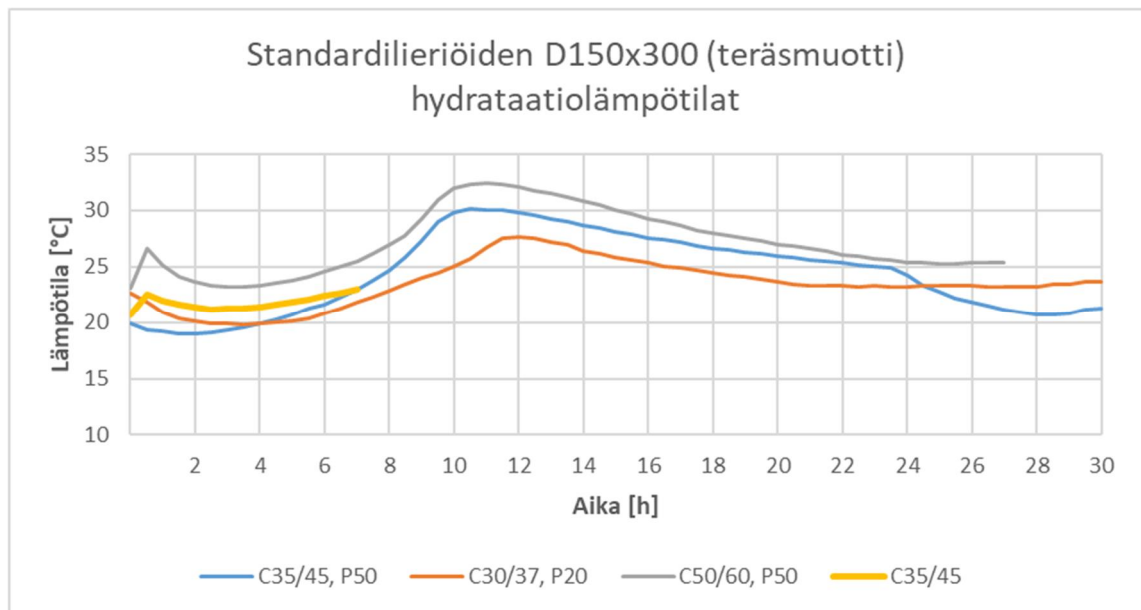
**Kuva 21.** Hydrataatiolämpötilan seuranta, betonilaatu C30/45.

Hydrataatiolämpötilan seurannassa betonilaadun C35/45 huokostamaton mittaukset päättyivät mittalaitteen häiriön seurauksena ennen tavoiteltua 30 tunnin aikaa. Mittaus päättyi noin 7 tunnin kohdalla, jolloin hydrataatiolämpötilan maksimia ei vielä oltu saavutettu. Muilla betonilaadulla hydrataatiolämpötilan maksimi saavutettiin noin 10...12 tuntia valun jälkeen. Betonilaadun C35/45 hydrataatiolämpötilojen seurantatiedoista voidaan kuitenkin sanoa, että ne ovat yhtäläiset muihin betonilaatuihin verrattuna 7 tuntiin saakka.

Kuvista 18-20 havaitaan, että hydrataatiolämpötilalla on suora yhteys valukappaleen tilavuuteen. Hydrataatiolämpötila on korkein lieriössä, jonka halkaisija on 235 mm ja matalin lieriössä, jonka halkaisija on 100 mm. Kuvaajista havaitaan myös, että tilavuudeltaan ja muodoltaan samankaltaisissa, mutta eri materiaaleista tehdyissä muoteissa on hieman eroa hydrataatiolämpötilassa. Esimerkiksi betonilaadun C35/45, P50 tapauksessa hydrataatiolämpötila on korkeimmillaan noin 10 tuntia valun aloittamisen jälkeen. Tällä kohtaa teräksisen lieriömuotin valukappaleen lämpötila on 29,8 °C ja muovisen 32,3 °C. Vastavasti teräksisen kuutiomuotin valukappaleen lämpötila on 26,7 °C ja muovisen 30,0 °C. Muottityyppien välillä on siis noin 2-3 °C lämpötilaero. Kuvissa 18-20 esitettyjen tulosten perusteella muovista valmistettujen lieriömuottien valukappaleiden maksimihydrataatiolämpötila on noin 4...9 % korkeampi kuin teräksestä valmistettujen lieriömuottien tapauksessa. Vastavaa lämpötilaero kuutiomuoteille oli 6...12 %. Teräksisten muottien tapauksessa osa hydratoitumisreaktioiden tuottamasta energiasta kuluu muottien lämpötilan ylläpitämiseen, mikä selittää havaitun lämpötilaeron.

Kuvassa 22 on esitetty kaikkien betonilaatujen teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden hydrataatiolämpötilat. Kuvasta havaitaan, että mitä korkeampi betonin nimellinen lujuusluokka on, niin sitä korkeampi on hydrataatiolämpötila. Hydratoitumisreaktioissa syntyvä energia on tulosten valossa verrattavissa betonimassoissa käytettyihin sideaine-

määriin, kun oletetaan, että reaktioon vaadittavaa vettä on saatavilla riittävästi koko seurantajakson ajan. Lämpötilojen järjestys vastaa betonimassoissa käytettyjen sideainemäärien suuruusjärjestystä. Tulosten perusteella hydrataatiolämpötila tasaantuu betonimassasta riippumatta viimeistään noin 24 tuntia kappaleiden valun päätyttyä. Betonilaadun C35/45 P50 käyrässä havaitaan selvä lasku noin 23 tunnin kohdalla. Lämpötilan alenemin on todennäköisesti aiheutunut säilytyspaikan muusta käytöstä. Työskentelyhallin suuret ovet on todennäköisesti avattu pidemmäksi aikaa, jolloin ympäristön lämpötila on laskeutunut selvästi. Vastaava ilmiö on havaittavissa myös betonilaadun muiden muottityyppien tuloksista. Säilytysruoneen lämpötilassa ei havaittu merkittäviä eroja betonilaatujen välillä.



**Kuva 22.** Standardilieriöiden D150x300 (teräsmuotti) hydrataatiolämpötilat betonilaaduille 1-4.

### 3.2.2 Valutapahtuma

Yksi valutapahtuma jaettiin esikokeiden perusteella kahteen osaan. Jako tehtiin, jotta betonimassa tiivistysominaisuudet saatiin pidettyä koko valutapahtuman ajan mahdollisimman vakiona. Valutapahtuman erien välillä betoniauto odotti toisen erän muottien täyttämiseen saakka. Tällä menettelyllä autossa odottava betonimassa pystyttiin kertaalleen sekoittamaan betoniauton myllyllä ennen muottien täyttämistä. Kaikkien valutapahtumien erien välillä betoniauto odotti toisen erän alkua noin 40-65 minuuttia, mikä on keskimäärin myös valuerien betonimassojen tiivistämisen aloittamisen väli yhden valutapahtuman aikaan. Valutapahtuman erissä valettiin ja tiivistettiin kerralla sama lukumäärä halkaisijaltaan D150 teräksisillä ja muovisilla muoteilla valettavia lieriöitä. Halkaisijaltaan D100 lieriöt ja kaikki kuutiot valettiin ja tiivistettiin ensimmäisessä erässä ja halkaisijaltaan D235 lieriöt toisessa erässä. Betonimassa tilattiin massan työstettävyyden kannalta

optimaalisessa notkeusluokassa S3, mutta valutapahtuman aikaan betonimassan notkeudessa tapahtuu muutosta, joka hankaloittaa tiivistämistä. Valuerään yksi valittiin tietoisesti muodoltaan hankalimmat tiivistettävät kappaleet.

Muottien täyttämistä ja betonin tiivistämistä käsitellään standardissa EN 12390-2. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten [6]. Betonin notkeudesta ja tiivistysmenetelmästä riippuen muotit tulee täyttää ja tiivistää kahdessa tai useammassa kerroksessa. Betonimassa tulee tiivistää välittömästi astiaan laittamisen jälkeen [6]. Tutkimuksessa käytettiin hyvin notkeita betonimassoja. Notkeusluokka valittiin ennakkokokeiden perusteella, jossa betonimassan tiivistämistä testattiin eri muottityypeillä. Testien perusteella todettiin, että muotit pystytään täyttämään yhdessä kerroksessa niin, että betonikappaleiden tiivistys on onnistunut. Lieriömäiset D150 ja D235 muotit sekä kuutiomuotit täytettiin yhdessä kerroksessa siten, että muotit täyttyivät kukkuroilleen tai määriteltyyn tasoon saakka (suuret muotit). Muottien täyttäminen suoritettiin betoninostoastialla ("jassikka"), josta betonin purku tapahtui suoraan astian alapuolelta. D100 muotit täytettiin standardin EN 12390-2 mukaisella noin 100 mm leveällä alumiinikauhalla. Kaikkien muottityyppien tapauksessa betonimassalla suoritettiin täyttämisen jälkeen esitiivistys puisella poikkileikkaukseltaan noin 50 mm x 50 mm sullontasauvalla. Tarvittaessa muotteihin lisättiin betonimassaa. Muottien täyttäminen yhdessä kerroksessa ennen varsinaista tiivistämistä poikkeaa standardin mukaisesta toimintatavasta. Työtekniikka kuitenkin todettiin ennakkokokeissa toimivaksi ja varsinaisten koekappaleiden tiivistymisessä ei havaittu merkittäviä poikkeamia. Myöskään kovettuneiden koekappaleiden tiheyksissä ei havaittu merkittäviä koesarjakohtaisia poikkeamia ja tiheydenseurantakappaleiden tiheydet vastasivat betonitehtaan rinnakkaisia koekappaleita. Betonitehtaalla betonimassan tiivistäminen tehtiin standardin EN 12390-2 mukaisesti kolmessa kerroksessa ja jokaisen kerroksen tiivistäminen suoritettiin sauvatäryttimellä.

Muottien täyttäminen yhdessä kerroksessa todettiin ennakkokokeissa välttämättömäksi työtekniikaksi tutkimuksen huomattavan suuren koekappalemäärän takia. Muottien täyttäminen useassa kerroksessa ja jokaisen kerroksen erikseen tiivistäminen olisi pidentänyt valuaikaa merkittävästi, jolloin betonin tiivistysominaisuudet olisivat heikentyneet siten, että koekappaleet eivät olisi enää olleet vertailukelpoisia keskenään. Yhden valutapahtuman jakamista kahdelle peräkkäiselle päivälle ei myöskään pystytty suorittamaan, koska tällöin betonin runkoaineen tasalaatuisuutta valuerien välillä ei pystytty takaamaan.

Muoteissa voidaan käyttää ei-reaktiivista muotinirrotusainetta [6]. Kaikissa muoteissa ja betoninostoastiassa käytettiin kovettuneiden näytteiden irrottamisen helpottamiseksi ja tuoreen betonin puhdistamisen helpottamiseksi ei-reaktiivista muottiöljyä.

Betonimassan tiivistysvälineen tulee olla jokin seuraavista:

- Sauvatärytin, jonka minimivärähtelytaajuus on noin 120 Hz (7200 kierrosta minuutissa), sauvatäryttimen halkaisija ei saa olla suurempi kuin neljäsosa muotin halkaisijasta.
- Tärypöytä, jonka minimivärähtelytaajuus on noin 40 Hz (2400 kierrosta minuutissa)
- Teräksinen pyöreäpäinen sullontasauva, jonka halkaisija on noin 16 mm ja pituus noin 600 mm.
- Teräksinen neliötanko, jonka poikkileikkaus on noin 25 mm x 25 mm ja pituus noin 380 mm [6].

Tutkimuksessa kaikkien koekappaleiden betonimassan tiivistäminen suoritettiin uudella Erka Oy:n valmistamalla yksimoottorisella tärypöydällä, jonka värähtelytaajuus on 50 Hz, eli 3000 kierrosta minuutissa. Tärypöytä täyttää standardin asettaman vaatimuksen. Tärypöydällä tiivistämisen lisäksi betonimassalle suoritettiin muottien täyttämisen yhteydessä aiemmin tässä kappaleessa esitetty esitiivistys.

Betonimassaa tiivistettäessä tärypöydällä käytetään lyhintä tärytysaikaa, joka tarvitaan betonimassan täydelliseen tiivistämiseen. Muotin tulee olla kiinnitettynä tärypöytään tai muottia tulee käsin pitää tiukasti tärypöytää vasten. Täydellinen tiivistyminen on saatu aikaiseksi mekaanisella tärytyksellä, kun betonin pinnalle ei enää ilmaannu suuria ilmakuplia, pinta muuttuu suhteellisen sileäksi ja ulkonäöltään kiiltäväksi. Liiallista erottumista tai sementtikalvon muodostumista tulee välttää [6].

Tutkimuksessa tiivistäminen suoritettiin siten, että muotteja painettiin tiukasti tärypöytää vasten koko tiivistystapahtuman ajan. Betonimassan optimaalista tiivistysaikaa testattiin ennakkokokeissa, joiden perusteella määritettiin muottityyppikohtaisesti oletustiivistysajat. Ennalta määritettyjä tiivistysaikoja jouduttiin kuitenkin säätämään jokaisen betonilaadun valutapahtuman yhteydessä. Peräkkäisten valuerien notkeusluokat erosivat toisistaan siten, että jokaisen muottityypin optimaalinen tiivistysaika jouduttiin tarkastamaan ensimmäisen kappaleen tiivistyksen yhteydessä. Kaikki valukappaleita pidettiin tärypöydällä määritetty aika, tai niin kauan, kuin betonimassasta nousi suuria ilmakuplia, ei kuitenkaan yleensä yli määritettyä aikaa. Kooltaan hyvin pienten ilmakuplien nouseminen pintaan tarkoittaa yleensä betonin suojahuokosten häviämistä. Huokostettuja betonilaatuja (1-3) tiivistettäessä pyrittiin välttämään suojahuokosten katoamista betonimassasta. Betonimassaa tiivistettäessä seurattiin myös veden erottumista betonimassasta. Tiivistys päätettiin, mikäli valukappaleen pinnalla havaittiin merkkejä erottumisesta. Yksittäisten valukappaleiden kohdalla tiivistys lopetettiin muutamia sekunteja ennen määräaikaa, koska betonimassa pinnalla arvioitiin olevan erottumaa. Betonilaatu ja muottityyppikohtaiset tiivistysajat on esitetty taulukossa 9.

**Taulukko 9.** Tiivistysajat eri muottityyppejä käytettäessä ja betonimassan määritetyt notkeusluokat betonimassan saapuessa ja tiivistystyön päätyttyä.

Betoni	Tiivistysajat muottityypeittäin nimellishalkaisijan mukaan [s]						Notkeusluokka (aloitus / lopetus)	
	Teräsmuotti		Muovimuotti				Aamu	Iltapäivä
	D150	K150	D100	D150	D235	K150		
C35/45, P50	30-35	20	10	25	35-40	20	S3 / S1	S4 / S1
C30/37, P20	25	20-25	10-12	20	35	20	S4 / S2	S4 / S2
C50/60, P50	27-33	20-25	10-12	22-25	35-40	20	S4 / S4	S4 / S3
C35/45	30-35	20-25	10-12	25	35-40	20	S4 / S3	S3 / S2

Valettujen kappaleiden muottien yläreunan yläpuolelta tulee poistaa ylimääräinen betoni käyttäen teräksistä lastaa tai hierrintä. Valukappaleiden pinta tulee tasoittaa huolellisesti [6]. Valukappaleiden annetaan olla muoteissa vähintään 16 tunnin ajan, mutta ei pidempään kuin kolme vuorokautta. Valetut kappaleet tulee suojata iskuilta, tärinältä ja kuivumiselta. Valukappaleita tulee säilyttää  $20 \pm 5$  °C lämpötilassa [6].

Valukappaleet asetettiin tiivistyksen jälkeen kuormalavoille. Kaikkien valukappaleiden yläpinnat hierrettiin noin tunti kappaleiden tiivistyksen jälkeen. Pinnat tasoitettiin muottien yläpinnan tasolle. Kuormalavojen siirtoja suoritettiin maksimissaan noin tunti tiivistyksen jälkeen, tai aikaisintaan 16 tuntia tiivistyksen päätyttyä. Kuormalavoilla olevat valukappale-erät suojattiin läpinäkyvillä muovipeitteillä, jotka teipattiin kiinni muottien sivupintoihin siten, että valukappaleista haihtuva kosteus ei pääse poistumaan. Muovikalvot poistettiin muottien purkamisen yhteydessä, valukappaleiden pinnat olivat edelleen kosteat tässä vaiheessa. Pintojen kosteudesta päätellen muovikalvojen voidaan sanoa olleen riittävä jälkihoitotapa valukappaleiden ollessa muoteissa. Ennen muottien purkamista valukappaleita säilytettiin sisätilassa, jonka lämpötila vaihteli välillä 21...23 °C.

### 3.3 Tuoreelle betonille tehdyt kokeet

Kaikkien betonilaatujen aamun ja iltapäivän valueristä tehtiin tuoreelle betonille kokeita, joilla pyrittiin selvittämään betonimassan ominaisuuksia. Tuoreelle betonille tehtiin notkeusluokan testaaminen painuma- ja leviämäkokeilla, ilmamäärän mittaus painemenetelmällä sekä betonimassan tiheyden määrittäminen. Tuoreen betonin kokeita suoritettiin kolmessa vaiheessa siten, että jokaisessa vaiheessa suoritettiin kaikki edellä mainitut kokeet. Tällä menettelyllä pystyttiin tarkkailemaan tuoreen betonimassan ominaisuuksien muutosta valun edetessä.

Jokaista valuerää kohti valmisbetoniasemalta toimitettiin noin 2 m<sup>3</sup> betonia. Valuerässä valettavat muotit oli jaettu kahteen erään betonimassan tiivistyksen onnistumisen varmistamiseksi. Ensimmäistä muottien täyttöerää varten betoniautosta laskettiin noin 0,7 m<sup>3</sup> betonia nostoastiaan, mistä ensimmäisen vaiheen tuoreen betonin kokeet tehtiin. Ensimmäisen ja toisen muottierän välissä betoniauto odotti toisen muottierän täytön aloittamista. Toista täyttöerää varten ylimääräinen betonimassa tyhjennettiin pois nostoastiasta ja betoniautosta laskettiin uusi noin 0,7 m<sup>3</sup> suuruinen betonierä nostoastiaan. Ennen betonin laskemista massaa sekoitettiin betoniauton myllyllä hieman. Toisen vaiheen kokeet tehtiin jälkimmäisen muottierän täytön alussa, eli noin valuerän puolivälissä. Kolmas koesarja tehtiin valuerän päätteeksi.

Tuoreen betonin näytteenotto tehtiin standardin EN 12350-1 [50] mukaisilla menetelmillä ja työvälineillä. Standardissa ohjeistetaan toimimaan näytteenotossa seuraavasti:

- Betonimassaa on otettava vähintään 1,5 kertainen määrä kokeissa tarvittavaan betonimäärään nähden.
- Näytteenottovälineen (kauhan) ja astioiden on oltava imemättömästä, sementin vaikutuksen kestävästä materiaalista valmistettu ja välineen on oltava sopiva betonin osanäytteiden ottamista varten. Kauhan tulee olla kärjeltään neliskulmainen ja leveydeltään noin 100 mm.
- Tuoreen betonin lämpötila tulee mitata  $\pm 1$  °C tarkkuudella
- Testattavan betonimassan tulee olla edustava tarkasteltavasta betonierästä, putoavasta massavirrasta otetaan osanäytteet siten, että ne edustavat koko virran leveyttä ja paksuutta.
- Yhdistettyä ja yksittäistä näytettä otettaessa työvälineiden tulee olla puhtaita.
- Betonin lämpötila mitataan astiassa.
- Betoninäytteen kuljetuksessa ja käsittelyn vaiheissa tuore betoni tulee suojata likaantumislta, kastumiselta tai kuivumiselta ja lämpötilan suurilta vaihteluilta. [50].

Kokeita tehtäessä betonimassaa varattiin eri kokeita varten yhteensä noin 0,1 m<sup>3</sup>, joka on vähintään viisinkertainen määrä tarvittavaan nähden. Betonimassa otettiin nostoastiaan lasketuista betonieristä. Betonimassan säilyttämiseen käytettiin teräksisiä astioita ja näytteen otto suoritettiin valurautaisella työhön tarkoitettulla kauhalla. Ennen kokeiden aloittamista kaikki välineet puhdistettiin vedellä ja kuivattiin huolellisesti.

### 3.3.1 Notkeusluokan testaaminen

Betonimassan notkeusluokka voidaan määrittää painuma- ja leviämäkokeiden perusteella. Painumakokeella määritettäessä luokkia on viisi (S1-S5) ja leviämäkokeella määritettäessä kuusi (F1-F6) [17]. Painuma- ja leviämäkokeiden luokkien raja-arvot on esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Tuoreen betonin notkeusluokat standardien EN 12350-2 [51] ja EN-12350-5 [52] mukaisesti määritettynä, mukaillen lähdettä [17].

<b>Notkeusluokka painuman perusteella (EN 12350-2)</b>						
Notkeusluokka	S1	S2	S3	S4	S5	
Painuma [mm]	10 - 40	50 - 90	100 - 150	160 - 210	≥ 220	
<b>Notkeusluokka leviämän perusteella (EN 12350-5)</b>						
Notkeusluokka	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Leviämä [mm]	≤ 340	350 - 410	420 - 480	490 - 550	560 - 620	≥ 630

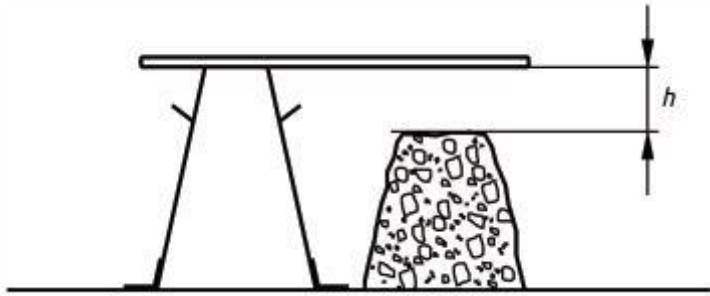
Betonimassan painumakokeet tehtiin standardin EN 12350-2 [51] mukaisesti. Painumakoe on hyvin herkkä betonin notkeuden muutoksille, jotka vastaavat 10 mm ja 210 mm välillä olevia painuma-arvoja. Näiden raja-arvojen ulkopuolella painumamittaus saattaa olla soveltumaton notkeusluokan määrittämiseen, jolloin on syytä harkita muita menetelmiä betonimassan notkeuden määrittämiseen. Painumakoe soveltuu betoneille, joiden runkoaineen maksimiraekoko on 40 mm [51].

Painumakokeessa betonimassasta tehdään leikatun kartion muotoinen kappale muotin avulla. Muotti tulee täyttää kolmessa tasakorkuisessa kerroksessa siten, että jokainen kerros tiivistetään 25:llä sullontasauvan iskulla. Keskimmäinen ja päällimmäinen kerros tulee tiivistää koko syvyydeltään siten, että iskut tunkeutuvat alempana olevaan kerrokseen saakka. Tarvittaessa kolmanteen kerrokseen lisätään betonimassaa, jos pinnan taso painuu muotin yläpintaa alemmaksi tiivistettäessä. Muotin poistaminen tulee suorittaa 2-5 sekuntia kestävällä tasaisella nopeudella suoritettavalla nostolla siten, että betonimassaan ei kohdistu sivuttaissuuntaista tai kiertävää liikettä. Muotin täyttäminen ja muotin nostaminen tulee tapahtua 150 sekunnin kuluessa. Välittömästi muotin poistamisen jälkeen mitataan valmistetun betonikartion painuma  $h$  [mm] lähimmän 10 mm:n tarkkuudella, minkä perusteella määritetään notkeusluokka. Kuvassa 23 on esitetty painumakorkeuden mittaamista havainnollistava piirros, jossa on esitetty myös oikean muotoinen painunut kartio. Muotin nostossa betonikartio ei saa leikkaantua, epäonnistunut koe tulee uusiksi. Betonikartion painuma ei myöskään saa jatkua yli 60 sekunnin ajan [51]. Standardin mukaisessa painumakokeessa käytettävien työvälineiden tulee täyttää seuraavat vaatimukset.

- Muotin tulee olla valmistettu sementin vaikutukset kestävästä materiaalista ja muotin seinämäpaksuus tulee olla vähintään 1,5 mm.
- Muotin sisäpintojen tulee olla sileät, pinnoilla ei saa olla ulkonemia kuten niittejä tai hitsisaumoja, joihin tuore betoni voi tarttua kiinni.
- Muotin tulee olla katkaistun kartion muotoinen ja sisämitoiltaan seuraava:
  - pohjan halkaisija:  $200 \pm 2$  mm
  - yläosan halkaisija:  $100 \pm 2$  mm
  - korkeus:  $300 \pm 2$  mm
- Muotin pohjan ja yläosan tulee olla keskenään yhdensuuntaisia ja kohtisuorassa keskiakselia vastaan.
- Muotin yläreunassa tulee olla kädensijat muotin nostamista varten



- Muotin alareunassa tulee olla kiinnityssalvat tai jalansijat muotin pitämiseksi vaakana täyttämisen aikana.
- Sullontasauvan tulee olla poikkileikkaukseltaan pyöreä, teräksestä valmistettu ja päistään pyörästetty. Sullontasauvan halkaisijan tulee olla  $16 \pm 1$  mm ja pituuden  $600 \pm 5$  mm.
- Pohjalevy, jonka päälle muotti asetetaan kokeen aikana, tulee olla jäykkä ja laakea levy, joka on valmistettu imemättömästä materiaalista. [51]



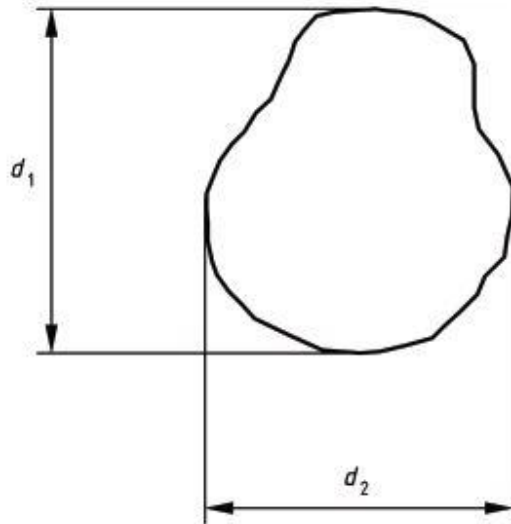
**Kuva 23.** Painuman  $h$  mittaaminen ja oikean muotoinen painumakartio [51].

Betonimassan leviämäkokeet tehtiin standardin EN 12350-5 [52] mukaisesti. Leviämäkoe on hyvin herkkä betonin notkeuden muutoksille, jotka vastaavat leviämän arvoja 340 mm ja 600 mm välillä. Näiden raja-arvojen ulkopuolella leviämämittaus saattaa olla soveltumaton notkeusluokan määrittämiseen, jolloin on syytä harkita muita menetelmiä betonimassan notkeuden määrittämiseen. Leviämäkoe ei sovellu betoneille, joiden runkoaineen maksimiraekoko on yli 63 mm. Leviämäkoe ei myöskään sovellu käytettäväksi itsetiivistävillä, vaahto- tai harvabetoneilla [52].

Leviämäkokeessa tuoreesta betonista tehdään muotin avulla kartion muotoinen kappale yhdestä reunastaan saranoidulle leviämäpöydälle, jonka tulee olla tasaisella vaakasuoralla alustalla. Muotti tulee täyttää kahdessa tasakorkeassa kerroksessa siten, että kerrokset tasoitetaan sullontasauvalla kymmenen kertaa kevyesti painaen. Tarvittaessa toiseen kerrokseen lisätään betonimassaa, jos pinnan taso painuu muotin yläpintaa alemmaksi tasoittaessa. Muotti poistetaan 30 sekuntia yläpinnan tasoituksen jälkeen, ennen muotin poistamista leviämäpöydältä tulee poistaa ylimääräinen betoni. Muotin poistaminen tulee suorittaa kohtisuoraan ylöspäin tasaisesti nostoen 1-3 sekuntia kestävällä nostolla. Kokeessa pöydän reunaa nostetaan vakiokorkeudelle ylärajoitinta vasten ja pöydän annetaan pudota vapaasti alarajoittimelle. Suorituksen aikaan leviämäpöytää pidetään paikoillaan seisomalla alareunan jalkatukien päällä. Toimenpide toistetaan 15 kertaa siten, että yksi suoritus kestää 1-3 sekuntia. Betonimassan leviämän suurimmat mitat mitataan kahdesta ( $d_1$  ja  $d_2$  [mm]) kohdasta ylälevyn sivujen kanssa yhdensuuntaisessa linjassa. Leviämäkokeen tulos on mitattujen mittojen  $d_1$  ja  $d_2$  keskiarvo, jonka perusteella määritetään notkeusluokka. Kuvassa 24 on havainnollistettu leviämämittausta. Leviämäkokeessa betoni ei saa erottua, joka johtaa kokeen hylkäämiseen. Erottumisen pystyy havaitsemaan karkean kiviaineksen ulkopuolelle muodostuvasta sementtilaastista koostuvasta renkaasta, joka on useita millimetrejä karkeaa kiviainesta ulompana. Mikäli betonimassan leviäminen ei sta-

biloidu 15 pudotuksen jälkeen odotetaan, kunnes massa stabiloituu ja suoritetaan mittaukset. Odotusaika tulee raportoida mittaustulosten yhteydessä [52]. Standardin mukaisessa leviämäkokeessa käytettävien työvälineiden tulee täyttää seuraavat vaatimukset.

- Leviämäpöytä koostuu saranoidusta ylälevystä ja jäykästä alustasta, jonka päälle ylälevy pudotetaan kokeessa.
  - Ylälevyn tulee olla sileä, sementin vaikutukset kestävä ja ruostumaton metallilevy, jonka paksuus on 2 mm. Ylälevyn tulee olla kooltaan  $700 \pm 2$  mm x  $700 \pm 2$  mm ja massaltaan  $16 \pm 0,5$  kg. Ylälevyn on lisäksi oltava rakenteeltaan sellainen, että levyn pinta ei pääse vääntymään.
  - Ylälevyn keskellä tulee olla merkattu risti, jonka sivut ovat kulkevat levyn sivujen suuntaisesti, sekä ympyrä, jonka halkaisija on  $210 \pm 1$  mm.
  - Ylälevyn nostokorkeuden tulee olla rajoitettu yhdellä tai useammalla rajoittimella siten, että nostokorkeus on  $40 \pm 1$  mm.
  - ylälevyssä tulee olla kahvat tai muu nostolaite, joilla ylälevy pystytään nostamaan nykäyksettä pudotuskorkeudelle.
  - Leviämäpöydän rungossa tulee olla jalkatuet pöydän pitämiseksi paikoiltaan kokeen aikana.
- Muotin tulee olla valmistettu sementin vaikutukset kestävästä materiaalista ja muotin seinämäpaksuus tulee olla vähintään 1,5 mm.
- Muotin sisäpintojen tulee olla sileät, pinnoilla ei saa olla ulkonemia kuten niittejä tai hitsisaumoja, joihin tuore betoni voi tarttua kiinni.
- Muotin tulee olla katkaistun kartion muotoinen ja sisämitoiltaan seuraava:
  - pohjan halkaisija:  $200 \pm 2$  mm
  - yläosan halkaisija:  $130 \pm 2$  mm
  - korkeus:  $200 \pm 2$  mm
- Muotin pohjan ja yläosan tulee olla keskenään yhdensuuntaisia ja kohtisuorassa keskiakselia vastaan.
- Muotin yläreunassa tulee olla kädensijat muotin nostamista varten
- Muotin alareunassa tulee olla kiinnityssalvat tai jalansijat muotin pitämiseksi vakaana täyttämisen aikana.
- Sullontasauvan tulee olla kovasta materiaalista valmistettu ja poikkileikkaukseltaan neliömäinen, jonka sivumitta on  $40 \pm 1$  mm. Sullontasauvan neliön muotoisen osan pituus tulee olla noin 200 mm, lisäksi sauvassa voi olla noin 120-150 mm pitkä pyöristetty kahvaosa. [52]



**Kuva 24.** Leviämän mittaaminen [52].

Sekä painuma-, että leviämäkokeissa käytettiin standardien [51] ja [52] mukaisia, menetelmien käyttämiseen tarkoitettuja työvälineitä, jotka täyttävät standardien asettamat vaatimukset. Molemmat koetyypit soveltuvat tutkimuksessa käytettyjen normaalien betoni-laatujen notkeusluokkien testaamiseen, kaikissa betonilaaduissa runkoaineen maksirae-koko oli 16 mm. Kokeissa ei jouduttu hylkäämään testaustuloksia betonikartion leikkaan-tumisen tai betonimassan erottumisen takia. Myöskään betonimassan stabiloitumisessa ei havaittu ongelmia. Taulukoissa 11 on esitetty kaikista betoniannoksista tehdyt painuma-kokeiden tulokset ja painumaa vastaavat notkeusluokat. Vastaavasti taulukossa 12 on esi-tetty samat tulokset leviämäkokeille. Jokaisesta betoniannoksesta on esitetty mittaukset M1, M2 ja M3, joissa numero edustaa kokeen ajankohtaa yhden valuerän kuluessa. Mit-tauksia suoritettiin välittömästi betoniauton saapuessa (M1), valuerän puolivälissä (M2) ja valun päätteeksi (M3). Molemmilla menetelmien tuloksista on selvästi havaittavissa, että betonin notkeus muuttuu selvästi valun edetessä, mikä vaikuttaa valukappaleiden työstettävyyteen ja tiivistämiseen. Notkeuden muutoksen seurauksena valukappaleiden tiivistysaikoja jouduttiin paikoin hieman kasvattamaan valujen edetessä.

**Taulukko 11.** Painumakokeiden tulokset.

Betoni		Aamun valuerä			Iltapäivän valuerä		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
<b>C35/45 P50</b>	Painuma [mm]	130	70	30	160	90	30
	Notkeusluokka	S3	S2	S1	S4	S2	S1
<b>C30/37 P20</b>	Painuma [mm]	180	180	80	160	120	90
	Notkeusluokka	S4	S4	S2	S4	S3	S2
<b>C50/60 P50</b>	Painuma [mm]	180	200	160	200	190	130
	Notkeusluokka	S4	S4	S4	S4	S4	S3
<b>C35/45</b>	Painuma [mm]	180	160	120	120	110	70
	Notkeusluokka	S4	S4	S3	S3	S3	S2

*Taulukko 12. Leviämäkokeiden tulokset.*

Betoni		Aamun valuerä			Iltapäivän valuerä		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
C35/45 P50	Leviämä [mm]	485	425	315	470	400	320
	Notkeusluokka	F4	F3	F1	F3	F2	F1
C30/37 P20	Leviämä [mm]	525	525	425	520	465	430
	Notkeusluokka	F4	F4	F3	F4	F3	F3
C50/60 P50	Leviämä [mm]	480	485	440	535	480	445
	Notkeusluokka	F4	F4	F3	F4	F3	F3
C35/45	Leviämä [mm]	500	505	465	455	455	400
	Notkeusluokka	F4	F4	F3	F3	F3	F2

### 3.3.2 Ilmamäärän mittaaminen

Tuoreen betonimassan ilmamäärän määrittäminen tehtiin painemenetelmällä standardin EN 12350-7 [25] mukaisesti. Ilmamäärän mittaamiseen käytettiin manuaalista painemittaria. Standardissa on vaihtoehtoiseksi menetelmäksi annettu vesipatsasmenetelmä, jossa käytetään ns. vesipatsasmittaria. Kummankin menetelmän mittauslaitteet toimivat Boylen ja Mariotten lain mukaisesti [25]. Tuoreen betonin ilmamäärä voidaan mitata myös AVA-ilmalaaumittarilla tai betonisekoittimeen asennetulla jatkuvatoimisella mittauslaitteella. Kovettuneesta betonista ilmamäärä voidaan määrittää ohuthietutkimuksen avulla, jossa tehdään huokosjakotesti. Testistä selviää myös, onko huokosjako ja -koko oikeanlainen betonin pakkasenkestävyyden takaamiseksi [17].

Painemenetelmässä mittalaitteiston tulee standardin EN 12350-7 [25] mukaisesti täyttää seuraavat vaatimukset.

- Mittalaitteen säiliön ja kannen tulee olla teräksestä tai muusta kovasta sementin vaikutukset kestävästä metallista valmistettu. Mittalaitteen sisäpintojen tulee olla sileäksi työstettyjä.
- Säiliön tilavuuden tulee olla vähintään 5 litraa ja astian halkaisijan suhde korkeuteen tulee olla vähintään 0,75 ja enintään 1,25.
- Mittalaitteen säiliön ja kannen tulee olla vesitiiviitä ja sopivia noin 0,2 MPa käyttöpaineelle.
- Kansi tulee voida kiristää säiliöön painetiiviisti siten, että kannen ja säiliön väliin ei pysty jäämään ilmaa.
- Mittalaitteen painepumpun tulee liittyä kiinteästi mittalaitteeseen.
- Painemittarin tulee olla sovitettu mittalaitteen kanteen ja kalibroitu näyttämään ilmamäärä välillä 0-8%, mieluiten 10 %:iin saakka. Mittarin jakovälien tulee olla seuraavat:
  - 0,1 % välillä 0-3 %
  - 0,2 % välillä 3-6 %
  - 0,5 % välillä 6-10 %
- Painemittarin tulee olla kalibroitu standardin liitteen D mukaisesti. [25]

Tuoreen betonin ilmamäärän mittaamisessa säiliö tulee täyttää betonimassan notkeudesta riippuen yhdessä tai useammassa kerroksessa. Tyypillisesti notkeusluokan ollessa painumamenetelmällä määritettynä S3 tai suurempi, tarvitaan vain yksi täyttökerros. Kaikki täyttökerrokset tulee tiivistää jollakin kappaleessa 3.2.2 esitetyistä tiivistysmenetelmistä. Mekaanisia tiivistysmenetelmiä (tärysauva ja tärypöytä) käytettäessä tulee välttää liiallista tärytystä, jotta pakkasenkestävissä betoneissa oleva huokostusilma ei pääse poistumaan. Betonimassan tiivistyksen jälkeen tulee betonin pinta tasoittaa säiliön yläpinnan tasolle ja sulkea säiliö kannella tiiviisti [25]. Ilmamäärän mittaus suoritetaan tämän jälkeen seuraavasti:

- Mittaus aloitetaan sulkemalla paineentasausventtiili ja avataan hanat A ja B, joista toisesta ruiskutetaan suljettuun säiliöön vettä, kunnes toisesta hanasta tulee vettä ulos.
- Koputellaan mittalaitetta kevyesti puunuijalla, kunnes mittalaitteen sisälle mahdollisesti jäänyt ilma on poistunut.
- Suljetaan painekammion ilmaventtiili ja pumpataan ilmaa kammioon, kunnes painemittarin osoitin on alkupainemerkinnän kohdalla. Odotetaan hetki paineilman jäähtymistä ympäristön lämpötilaan ja vakautetaan osoitin alkupainemerkinnän kohdalla joko pumppaamalla lisää ilmaa tai vapauttamalla ilmaa tarpeen mukaan. Koputellaan mittaria kevyesti vakauttamisen aikana.
- Suljetaan hanat A ja B ja avataan paineentasausventtiili.
- Koputellaan säiliön seinämiä terävästi ja painemittaria kevyesti.
- Luetaan painemittarista näennäinen betonin ilmamäärä  $A_I$  0,1 % tarkkuudella. [25]

Säiliössä olevan tuoreen betonimassan ilmamäärä  $A_{c1}$  [%] lasketaan kaavasta (15).

$$A_{c1} = A_I - G \quad (15)$$

jossa  $A_I$  on testatun betoninäytteen näennäinen ilmamäärä [%] ja  $G$  on kiviaineksen korjaustekijä, jonka oletetaan olevan  $G=0$ , ellei korjaustekijää ole mitattu. Useimmille normaalipainoisille kiviaineksille korjaustekijä on merkityksettömän pieni, eikä sitä tarvitse ottaa huomioon [25]. Tässä tutkimuksessa käytettiin tavanomaista kiviainestyyppiä, jonka korjaustekijän voidaan olettaa olevan  $G=0$ .

Tuoreen betonin ilmamäärän mittauksissa käytettiin standardin EN 12350-7 [25] vaatimukset täyttävää, ilmamäärämittaukseen suunniteltua manuaalista mittalaitetta, jonka painemittari oli kalibroitu edellisen kerran vuonna 2017. Mittalaitteen säiliön täyttäminen suoritettiin kahdessa tasakorkuisessa kerroksessa. Molempien täyttökerrosten tiivistys suoritettiin kappaleessa 3.2.2 esitellyllä tärypöydällä, joka täyttää standardin asettamat vaatimukset. Betonimassan tiivistyksessä tarkkailtiin betonimassan pintaa tarkasti, tiivistys lopetettiin välittömästi suurten ilmakuplien häviämisen jälkeen. Tällä menettelyllä pyrittiin välttämään huokostusilman poistuminen betonimassan seasta. Betonimassan tiivistyksen jälkeen ilmamäärän mittaus suoritettiin standardin ohjeiden mukaisesti. Taulukossa 13 on esitetty kaikista betoniannoksista tehtyjen ilmamäärämittausten tulokset. Jokaisesta betoniannoksesta on esitetty mittaukset M1, M2 ja M3, joissa numero edustaa

kokeen ajankohtaa yhden valuerän kuluessa. Mittauksia suoritettiin välittömästi betoni-auton saapuessa (M1), valuerän puolivälissä (M2) ja valun päätteeksi (M3). Ilmamääriä vertaillen betonilaatujen välillä tulee huomioida, että betonilaatu C35/45 on huokostamaton, muiden betonilaatujen ollessa huokostettuja eli pakkasenkestäviä. Huokostetuissa betonilaaduissa käytetään lisäainetta, jonka avulla betoniin saadaan muodostumaan suo-jahuokosia pakkasenkestävyyden varmistamiseksi. Tästä syystä huokostetuissa betoni-laaduissa on luonnollisesti enemmän ilmaa.

**Taulukko 13.** Ilmamäärämittausten tulokset.

Betoni	Ilmamäärä [%] / aamu			Ilmamäärä [%] / iltapäivä		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
C35/45 P50	4,1	4,2	3,5	5,6	5,2	3,5
C30/37 P20	3,9	5,3	3,2	4,4	4,9	3,4
C50/60 P50	4,0	5,6	5,2	3,8	5,6	4,8
C35/45	1,8	1,9	2,5	1,8	2,6	2,5

Huokostamattomissa betonilaaduissa ilmamäärä on normaalisti 1-2 % betonimassan painosta. Lisähuokostuksella betonin pakkasenkestävyyttä parannetaan, jolloin betonimassan ilmamäärä on yleensä 4-8 % [17]. Tässä tutkimuksessa käytetyt betoniluokat ovat pääsääntöisesti tyypillisiä sillarakennuksessa käytettäviä betoniluokkia. Liikenneviraston (nykyinen Väylävirasto) ohjeessa 22/2016: Siltabetonien P-lukumenettely [24] annetaan betonimassan ilmamäärälle minimiarvot ja ohjeellinen enimmäisarvo pakkasenkestävyyden täyttymiseksi. Taulukossa 14 on esitetty minimiarvot ja ohjeellinen maksimiarvo vaihteluvälinä. Taulukko soveltuu betonimassoille, joiden runkoaineen maksimiraekoko on 16 mm tai suurempi.

Tässä tutkimuksessa käytetyillä pakkasenkestävyysluokan P50 omaavilla betonilaaduilla vesi-sideainesuhde oli noin 0,40 ja P20 betonilla 0,48. Ilmamäärämittausten perusteella pakkasenkestävyysluokan P50 betonimassat olivat pääsääntöisesti valupaikalle saapuestaan ilmamäärältään vähimmäisarvon 4 % mukaisia. Mittausten perusteella betonimassan C35/45 P50 ilmamäärä ei täytä kolmannessa eli valuerän päättäneessä mittauksessa vähimmäisilmamäärävaatimusta. Vähimmäisrajan alittuminen on todennäköisesti seurausta betonimassan notkeuden alentumisesta. Taulukoista 11 ja 12 on havaittavissa, että betonilaadun C35/45 P50 notkeusluokka madaltui merkittävästi valuerän loppua kohti, jolloin valukappaleita jouduttiin tiivistämään pidempää tärypöydällä riittävän tiivistysasteen saavuttamiseksi. Tiivistysajan kasvattamisen seurauksena betonimassasta on todennäköisesti hävinnyt liikaa lisähuokosia. Pakkaskestävyysluokan P20 betonilaatu täytti ohjeen mukaisen vähimmäisilmamäärävaatimuksen noin 3 % jokaisessa mittauksessa. Pakkaskestävyysluokan P50 betonilaatujen ilmamäärämittauksissa ei havaittu ohjeellisen enimmäisarvon 7 % ylittäviä mittaustuloksia. Pakkaskestävyysluokan P20 betonilaadun yhdessä mittauksessa ohjeellinen enimmäisarvo noin 5 % ylittyi hieman, ilmamäärämittausten tulokseksi saatiin 5,3 %. Erotus ohjeelliseen enimmäisarvoon on kuitenkin hyvin

pieni, joten ohjeellisen ilmamääräilytyksen voidaan arvioida olevan merkityksetön betonin puristuslujuuden kannalta.

**Taulukko 14.** *Betonimassan vähimmäisilmamäärävaatimus ja ohjeellinen enimmäismäärä, kun kiviaineksen raekoko on 16 mm tai suurempi, mukaillen lähdettä [24].*

Vesi-side- ainesuhde	Ilmamäärän vähimmäisarvo ja ohjeellinen enimmäisarvo eri pakkasenkestävyysluokissa [%]			
	P20	P30	P50	P70
0,60	5-7	5-7	-	-
0,50	3-5	4-6	6-8	-
0,40	2-4	3-5	4-7	(7-9) *)
0,32	2-4	2-4	2-5	3-5
<0,32	ei vaatimusta	ei vaatimusta	ei vaatimusta	ei vaatimusta

\*) Vain interpolointia varten

Tutkimuksen yhteydessä mitattujen tuoreen betonin ilmamäärien ja betonilaatujen suhteustietojen perusteella laskettiin kaikille tutkimuksen pakkasenkestäville betonilaaduille toteutuneet pakkasenkestävyysluvut (P-luvut). Pakkasenkestävyysluvut laskettiin Liikenneviraston ohjeessa [24] esitettyjen kaavojen mukaisesti, laskennassa hyödynnettiin Liikenneviraston julkaisemaa laskentapohjaa. Kaikkien pakkasenkestävien betonilaatujen pakkasenkestävyyslukujen laskenta on esitetty liitteessä 18. Pakkasenkestävyyslukuja laskettaessa yhden betonilaadun toteutuneista ainemääristä (taulukko 7 ja 8) ja ilmamäärämittaustista (taulukko 13) laskettiin keskiarvot. Laskennallisesti toteutuneiksi pakkasenkestävyysluvuiksi saatiin:

- C35/45 P50: P-luku 52
- C30/37 P20: P-luku 33
- C50/60 P50: P-luku 64

Ilmamäärämittausten ja toteutuneiden ainemäärien keskiarvojen perusteella kaikkien pakkasenkestävien betonilaatujen pakkasenkestävyysluvut täyttyvät. Betonilaaduilla C30/37 P20 ja C50/60 P50 laskennallinen pakkasenkestävyysluku on huomattavasti tavoiteltua suurempi. Betonilaadun C35/45 P50 laskennallinen pakkasenkestävyysluku on hyvin lähellä tavoiteltua arvoa.

### 3.3.3 Betonimassan tiheyden määrittäminen

Tuoreen betonin tiheyden määrittäminen tehdään standardin EN 12350-6 [53] mukaisesti. Standardin mukaisesti tiheyden määrittämiseen käytettävän astian tulee täyttää seuraavat vaatimukset.

- Astian tulee olla valmistettu sementin vaikutukset kestävästä metallista ja riittävän jäykkä säilyttääkseen muotonsa.
- Astian tulee olla vesitiivis ja sisäpinnoiltaan sileä sekä reunoiltaan tasaiseksi työstetty.
- Astian pohjan ja reunojen tulee olla yhdensuuntaiset.
- Astian sisämitan tulee olla vähintään neljä kertaa suurempi kuin betonin runkoaineen nimellinen maksimiraekoko, kuitenkin vähintään 150 mm.
- Astian tilavuuden tulee olla vähintään 5 litraa. [53]

Tiheyden määrittämisessä käytettävän vaakan tarkkuus tulee olla 0,01 kg [53]. Vaakana käytettiin standardin vaatimukset täyttävää kalibroitua vaakaa. Astian täyttämiseksi, betonimassan tiivistämiseksi ja betonimassan pinnan tasoitukselle asetetut vaatimukset vastaavat betonimassan ilmamäärän mittauksen vaatimuksia. Lisäksi tiheyden määrittämisessä käytettävän astian sisäpintojen vaatimukset täyttyvät käytettäessä astiana ilmamäärän mittauksessa käytettyä säiliötä. Betonimassan tiheyden määrittäminen suoritettiin ilmamäärän mittauksen yhteydessä samalle betoninäytteelle, josta betonimassan ilmamäärä mitattiin. Kaikkien betonilaatujen runkoaineen maksimiraekoko on 16 mm. Ilmamäärän mittauslaitteen säiliön halkaisija on 203 mm ja kalibroitu tilavuus  $V_{c,w}$  8,01 litraa, joten tiheyden määrittämisessä käytetty astia täyttää standardin asettamat vaatimukset. Tuoreen betonimassan tiheyden määrittämisessä punnittiin puhdistettu tyhjä mittausastia ennen ilmamäärämittauksen aloittamista. Astian täyttämisen, tiivistämisen ja pinnan tasoituksen jälkeen astian ja betonimassan paino mitattiin uudestaan ennen betonin ilmamäärämittauksen aloittamista. Mitatuista suureista lasketaan tuoreen betonin tiheys  $D_{c,w}$  [kg/m<sup>3</sup>] kaavasta (16).

$$D_{c,w} = \frac{m_2 - m_1}{V_{c,w}} \quad (16)$$

jossa  $D_{c,w}$  on tuoreen betonimassan tiheys [kg/m<sup>3</sup>],  $m_1$  on tyhjän astian massa [kg],  $m_2$  on tiivistetyllä betonimassalla täytetyn astian massa [kg] ja  $V_{c,w}$  on mittausastian kalibroitu tilavuus [m<sup>3</sup>]. Tuoreen betonimassan tiheydet ilmoitetaan standardin mukaisesti pyöristettynä lähimmän 10 kg/m<sup>3</sup> tarkkuuteen [53].

Taulukossa 15 on esitetty kaikista betoniannoksista tehtyjen tiheyden määrittäysten tulokset. Jokaisesta betoniannoksesta on esitetty mittaukset M1, M2 ja M3, joissa numero edustaa kokeen ajankohtaa yhden valuerän kuluessa. Mittauksia suoritettiin välittömästi betoniauton saapuessa (M1), valuerän puolivälissä (M2) ja valun päätteeksi (M3). Kun tiheysmittaustuloksia tarkastellaan yhdessä taulukon 13 tuoreen betonin ilmamäärän mit-



taustulosten kanssa, havaitaan, että betonimassan ilmamäärän muutokset korreloivat pääsääntöisesti suoraan samassa mittausarjassa tehdyn tiheyden määrittämisen kanssa. Tarkasteltaessa saman valuerän kolmen mittauksen tuloksia havaitaan, että ilmamäärän kasvassa tiheys madaltuu ja ilmamäärän laskiessa tiheys kasvaa. Tuoreen betonimassan ilmamäärän muutokset valuerän edetessä selittävät betonimassan selvästi havaittavat tiheyden muutokset valuerien mittausten välillä.

*Taulukko 15. Tuoreen betonin tiheyden määrittämisen tulokset.*

Betoni	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ] / aamu			Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ] / iltapäivä		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
C35/45 P50	2330	2330	2360	2300	2320	2360
C30/37 P20	2330	2300	2360	2310	2310	2350
C50/60 P50	2340	2300	2310	2320	2290	2310
C35/45	2340	2350	2330	2360	2340	2340

### 3.3.4 Muottien purku

Valukappaleiden annetaan olla muoteissa vähintään 16 tunnin ajan, mutta ei pidempään kuin kolme vuorokautta [6]. Muottien purkaminen suoritettiin noin kaksi vuorokautta kappaleiden valamisen jälkeen. Valukappaleet poistettiin muoteista samassa järjestyksessä kuin kappaleet valettiin. Kappaleet olivat muoteissa siten noin 46-50 tuntia. Muotit purettiin avaamalla muottien rakenteet ruuvi ja pulttiliitoksista. Valukappaleita vahingoittavia, valukappaleeseen iskeviä purkutekniikoita ei käytetty.

Valukappaleiden muottien purkaminen tehtiin sisätiloissa. Työskentelytilan lämpötila vastaa standardin EN 12390-2 [6] mukaisessa kappaleiden säilytyslämpötilaa  $20 \pm 5$  °C.

## 3.4 Koekappaleiden nimeäminen

Muottien purkamisen yhteydessä kaikki valukappaleet nimettiin käytetyn muottimateriaalin ja valukappaleiden käyttötarkoituksen mukaan. Merkkaaminen tehtiin veteen liukenemattomalla tussilla. Valukappaleet nimettiin siten, että nimestä selviää käytetty betonilaatu, valutapahtuman ajankohta (aamu tai iltapäivä), käytetty muottityyppi ja kappaleen koko, joista selviää siten kappaleen käyttötarkoitus sekä lopussa juokseva numerointi purkujärjestyksessä. Valukappaleet nimettiin seuraavasti (kappaleen nimen kirjausjärjestyksessä esitettynä):

- Betonilaadun numero valujärjestyksessä 1, 2, 3 tai 4 sekä valutapahtuman ajankohta, A=aamu ja B=iltapäivä. Eli esimerkiksi 1A tarkoittaa betonilaadun C35/45 P50 aamulla valettua betonikappaletta.
- Valussa käytetty muottityyppi ja kappaleen koko ilmaistiin nimeämällä muottityypit 100-sarjoittain seuraavasti:
  - 100: Teräsmuoteilla valetut lieriömäiset kappaleet, koko D150 x 300.

- 200: Muovimuoteilla valetut lieriömäiset kappaleet, koko 100 x 100.
- 300: Muovimuoteilla valetut lieriömäiset kappaleet, koko D150 x 300.
- 400: Muovimuoteilla valetut lieriömäiset kappaleet, koko D235 x 340.
- 500: Teräsmuoteilla valetut kuutiomaiset kappaleet.
- 600: Muovimuoteilla valetut kuutiomaiset kappaleet.
- Muottityyppi kohtaisen satasarjan perään lisättiin juokseva numerointi muottien purkujärjestyksessä.

Esimerkiksi näytteen nimen ollessa 1A-320, on kyseessä betonilaatu C35/45 P50 ja kappale on valettu aamun valuerässä. Valamiseen on käytetty muovimuottia ja betonikappaleesta tullaan timanttiporaamaan rakennekoekappaleita, joiden nimellishalkaisija on joko 50 mm, 80 mm tai 100 mm. Kappale on kyseisellä muottityypillä valetuista kappaleista purkujärjestyksessä 20.

Muovimuoteilla valetuista D150x300 valukappaleista timanttiporattiin nimellishalkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm koekappaleita. Porattujen valukappaleiden nimetty tunnus siirrettiin porattuihin koekappaleisiin ja perään merkattiin kirjain-numerotunnus seuraavasti:

- Poratun kappaleen nimellishalkaisijan ollessa 50 mm, lisättiin nimen perään kirjain A, jonka perään lisättiin numerotunnus 1-4 sen mukaan, miltä tasolta näyte on valukappaleesta. Numero 1 tarkoittaa, että koekappale järjestyksessä lähimmäisenä valukappaleen yläpintaa (valupinta) ja 4 lähimmäisenä valukappaleen alapintaa (pohjaa)
- Poratun kappaleen nimellishalkaisijan ollessa 80 mm, lisättiin nimen perään kirjain B, jonka perään lisättiin numerotunnus 1-3 sen mukaan, miltä tasolta näyte on valukappaleesta. Numero 1 tarkoittaa, että koekappale järjestyksessä lähimmäisenä valukappaleen yläpintaa (valupinta) ja 3 lähimmäisenä valukappaleen alapintaa (pohjaa)
- Poratun kappaleen nimellishalkaisijan ollessa 100 mm, lisättiin nimen perään kirjain C, jonka perään lisättiin numerotunnus 1-2 sen mukaan, miltä tasolta näyte on valukappaleesta. Numero 1 tarkoittaa, että koekappale järjestyksessä lähimmäisenä valukappaleen yläpintaa (valupinta) ja 2 lähimmäisenä valukappaleen alapintaa (pohjaa)

Esimerkiksi näytteen nimen ollessa 1A-320-A3, on kyseessä betonilaatu C35/45 P50 ja kappale on valettu aamun valuerässä. Valamiseen on käytetty muovimuottia. Koekappale on porattu valukappaleesta ja sen nimellishalkaisija on 50 mm. Koekappale on kolmas valukappaleen yläpinnasta laskien. Porattujen rakennekoekappaleiden nimeämistä on havainnollistettu kuvassa 26.

### 3.5 Koekappaleiden varastointi

Muoteista poiston jälkeen koekappaleita tulee säilyttää testausajankohtaan saakka vedessä, jonka lämpötila  $20 \pm 2$  °C tai kosteushuoneessa vastaavassa lämpötilassa ja  $\geq 95$  % suhteellisessa kosteudessa. Vedessä säilytystä pidetään vertailumenetelmänä [6].

Kaikki valukappaleet siirrettiin vesiupotukseen kahden tunnin kuluessa muoteista purkamisen jälkeen. Vesitankkien lämpötiloja tarkkailtiin koko tutkimuksen ajan. Vesitankkien lämpötila vaihteli välillä 18,2-22,0 °C, mikä täyttää standardin asettaman vaatimuksen. Vesitankkien kaikkien mittausten keskimääräiseksi lämpötilaksi saatiin 19,8 °C. Vesitankkien maksimilämpötilat mitattiin uusien betonikappaleiden veteen asettamisen yhteydessä. Betonikappaleiden lämpötila veteen asetettaessa oli noin 22-23 °C. Veden ja betonikappaleiden lämpötilaerojen tasoittuessa tasaantui vesitankkien lämpötila takaisin noin 20 °C 3-6 päivään kuluessa. Vesitankkien lämpötilat korreloivat lisäksi suoraan vuoden ajan lämpötilaan. Tutkimuksen aikaan heinäkuussa ja elokuun alkupuolella oli poikkeuksellisen monta hellepäivää, joiden seurauksena vesitankkien lämpötilat olivat tämän jakson aikana selvästi korkeampia verrattuna keskimääräisiin lämpötiloihin.

Kaikkia muita valukappaleita paitsi lujuudenseurantatutkimukseen kohdennettuja koekappaleita säilytettiin vesiupotuksessa 28 vuorokauden ajan. Lujuudenseurantakoekappaleita säilytettiin vesiupotuksessa testaamiseen saakka. Lujuudenseurantakoekappaleet otettiin vedestä pois korkeintaan 30 minuutin ajaksi koekappaleita työstettäessä.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää samanlaisissa olosuhteissa lujittuneiden koekappaleiden puristuslujuuksien eroja, kun koekappaleen tai rakennekoekappaleen halkaisija, päiden tasoitustapa tai koekappaleen kosteuspitoisuus muuttuu. Betonirakenteiden mitoituksessa käytetään betonin ominaisarvoja 28 vuorokauden ikäisenä. Pääosaa tutkimuksen koekappaleista pidettiin vesiupotuksessa kyseinen 28 vrk, jonka aikana betoni saavuttaa ominaislujuutensa. Koekappaleet, joiden lujuuksia tutkimuksessa vertaillaan keskenään ovat siis lujittuneet identtisissä olosuhteissa. Lujuudenseurantakoekappaleita lukuun ottamatta, koekappaleita ja timanttikorattavia valukappaleita säilytettiin suljetussa huoneessa kuormalavoille varastoituna. Huoneen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta (RH) tarkkailtiin koko tutkimuksen ajan. Huoneen lämpötila vaihteli välillä 19,4-22,2 °C ja suhteellinen kosteus 41-79 %. Varastointihuoneen lämpötila täyttää standardin EN 12390-2 [6] asettaman vaatimuksen  $20 \pm 5$  °C. Varastointihuoneen lämpötilarajoina on käytetty standardin mukaisia lämpötilarajoja muoteissa säilyttämiselle. Suhteellisen kosteuden maksimiarvot osuvat päiville, jolloin valukappaleita otettiin pois vesiupotuksesta ja uusia asetettiin tilalla. Kun kyseisiä päiviä ei huomioda, saadaan keskimääräiseksi suhteelliseksi kosteudeksi noin 61 %.

### **3.6 Koekappaleille asetetut vaatimukset**

Koekappaleille asetettuja vaatimuksia käsitellään standardissa EN 12390-1 [5]. Koekappaleita ei valettu standardin EN 12390-1 mukaisesti kalibroiduilla muoteilla, joten koekappaleiden vaatimusten mukaisuus tarkastettiin em. standardissa asetettujen vaatimusten mukaisesti. Koekappaleiden vaatimusten mukaisuus on esitetty jäljempänä tässä kappaleessa.

Koekappaleiden määritellyt mitat voidaan valita standardin EN 12390-1 mukaisesti  $\pm 10$  % tarkkuudella nimellismitoista. Kuution määritellyn sivumitan sallittu mittapoikkeama muottipintojen välillä on 1 % ja teräshierretyn yläpinnan ja muottia vasten valetun pohjapinnan välillä 1,5 %. Lieriön määritellyn halkaisijan sallittu mittapoikkeama on 1 % ja korkeuden 5 %. [5] Koekappaleiden dimensiot mitattiin standardin EN-12390-3 [13] liitteen B mukaisesti. Koekappaleiden mittojen valinnassa ( $\pm 10$  % tarkkuudella nimellismitasta) käytettiin yhtä betonilaatua sarjana, jonka sisällä sallittuja mittapoikkeamia tarkasteltiin. Kaikki koekappaleet täyttivät sarjakohtaisesti standardissa EN 12390-1 asetettu mittavaatimukset.

Koekappaleiden kuormituspintojen sallittu tasomaisuuspoikkeama on 0,0006d mm. Kuution sivujen sallittu suorakulmaisuuspoikkeama suhteessa pohjatasoon valusuunnassa on 0,5 mm. Lieriön sivujen sallittu suorakulmaisuuspoikkeama suhteessa päätypintoihin on 0,007d mm. [5] Koekappaleiden tasomaisuuden ja suorakulmaisuuden mittaamista havainnollistavat kuvat on esitetty standardin EN 12390-1 liitteessä A [5]. Koekappaleiden tasomaisuus ja suorakulmaisuus tarkastettiin suorakulmaisella teräsviivaimella silmämääräisesti. Lieriön muotoisille koekappaleille tarkastus tehtiin päiden hionnan yhteydessä, jolloin koekappale voitiin hioa uudestaan, mikäli tasomaisuus- tai suorakulmaisuusvaatimus ei täytynyt. Kaikki lieriön muotoiset koekappaleet täyttivät standardin EN 12390-1 [5] tasomaisuusvaatimuksen.

Lieriön muotoisten koekappaleiden porauksia suoritettiin sekä uudella, että hyvin kuluneella timanttiterällä. Kaikki uudella timanttiterällä poratut koekappaleet täyttivät standardin EN 12390-1 [5] suorakulmaisuusvaatimuksen. Kuluneella timanttiterällä porattujen koekappaleiden sivupinnat olivat huomattavan epätasaiset, jonka seurauksena suorakulmaisuuden tarkastaminen oli haasteellista. Sivupintojen epätasaisuuden seurauksena suorakulmaisuusvaatimuksen täyttymisessä tarkasteltiin sivupintojen keskimääräisiä linjoja pitkin mittaamalla. Tämän mittauksen perusteella myös kuluneella timanttiterällä poratut koekappaleet täyttivät standardin mukaisen vaatimuksen. Kuution muotoisten koekappaleiden tasomaisuus ja suorakulmaisuus tarkastettiin ennen puristuskokeiden suorittamista. Kaikki kuutiot täyttivät standardin EN 12390-1 [5] asetetut tasomaisuus- ja suorakulmaisuusvaatimukset.

Koekappaleen nimellismitan  $d$  tulee olla vähintään kolme ja puoli (3,5) kertaa niin suuri kuin betonin kiviaineksen suurin raekoko [5]. Tutkimuksen kaikissa betonilaaduissa käytettiin kiviaineksen suurimpana raekokona 16 mm. Porattujen nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa edellä esitetty vaatimus ei täyty. Rakennekoekappaleiden halkaisijat vaihtelevat timanttiterästä riippuen 48,7-51,6 mm välillä. Vaatimuksen mukaisesti koekappaleiden minimi halkaisijan tulisi olla  $3,5 \cdot 16 \text{ mm} = 56,0 \text{ mm}$ .

## 3.7 Koekappaleiden valmistelut

Kaikille lieriömäisille koekappaleille tehtiin valmisteluita siten, että koekappaleet täyttävät standardeissa asetetut vaatimukset. Valetun kokoisena testattavien koekappaleiden molemmat päät hiottiin, vaikka muottipinta olisikin ollut silmämääräisesti suora. Kuution muotoisille koekappaleille ei tarvinnut tehdä valmisteluita ennen testausta. Lieriömäisille koe- ja rakennekoekappaleille tehtiin sarjakohtaisesti seuraavia valmisteluita:

- D150x300 koekappaleet: päiden tasoitus hiomalla
- D150x300 rakennekoekappaleet: timanttiporaus, timanttisahaus ja päiden tasoitus hiomalla.
- D100x100 koekappaleet: päiden tasoitus hiomalla.
- D100x100 rakennekoekappaleet: timanttiporaus, timanttisahaus ja päiden tasoitus hiomalla sekä yksi sarja rikkiseoksella pinnoittamalla.
- D80x80 rakennekoekappaleet: timanttiporaus, timanttisahaus ja päiden tasoitus hiomalla sekä yksi sarja rikkiseoksella pinnoittamalla.
- D50x50 rakennekoekappaleet: timanttiporaus, timanttisahaus ja päiden tasoitus hiomalla sekä yksi sarja rikkiseoksella pinnoittamalla.

### 3.7.1 Koekappaleiden timanttiporaus

Rakennekoekappaleiden timanttiporausta käsitellään standardissa EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut kappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus [14]. Näyteporan tulee olla sellainen, että sillä saadaan porattua halutun kokoisia (halkaisija ja pituus) ja sallitut mittapoikkeamat täyttäviä poranäytteitä kovettu-neesta betonista. Poraus tulee suorittaa kohtisuoraan pintaa vasten ja näytepora tulee olla tiukasti paikoilleen asetettuna koko porausnäytteen ottamisen ajan [14].

Rakennekoekappaleiden ottamiseen käytettiin timanttiporaamiseen suunniteltua porausjalustalla varustettua Hilti DD160 timanttiporausjärjestelmää. Pora on tarkoitettu halkaisijaltaan 25 mm - 202 mm kokoisten rakennekoekappaleiden timanttiporaamiseen. Rakennekoekappaleita poratessa timanttipora kiinnitettiin porausjalustastaan kiinni painavaan teräksiseen jalustaan, johon myös porattavat valukappaleet kiinnitettiin. Porattavat valukappaleet kiinnitettiin jalustaan ympyräkaaren muotoisten kiinnityslevyjen välityksellä, joita kiristettiin pultilla siten, että valukappale saatiin puristettu tiukasti kiinni teräsjalustaan. Timanttiterä keskitettiin tämän jälkeen keskeisesti porattavaan valukappaleeseen nähden. Porauskulmaa säädettiin tarpeen mukaan porausjalustan säätöruuvien avulla siten, että poraus tapahtui kohtisuorassa linjassa. Timanttiporaustekniikka täyttää standardin EN 12504-1 [14] vaatimukset näytteiden ottamiselle. Timanttipora ja porattava valukappale pystyttiin kiinnittämään tiukasti kiinni teräksiseen jalustaan siten, että porattaviin rakennekoekappaleisiin ei kohdistu ylimääräisiä rasituksia. Timanttiporausjärjestelmä on soveltuva käytettäväksi tutkimuksen rakennekoekappaleiden halkaisija-alueella. Kaikki timanttiporaukset suoritettiin märkäporauksena, eli timanttiporakruunun läpi johdettiin poratessa vettä siten, että poraustasoa huuhdeltiin koko porauksen ajan.

Timanttioraukset tehtiin koko valukappaleen korkuisena. Mikäli poralieriö katkesi timanttiorauksen aikana, hylättiin porattu kappale vaurioituneena. Valukappaleen nimetty tunnus siirrettiin poralieriöön ennen poralieriöiden uudelleen varastointia. Betonilieriöiden timanttiorauksen kulku on esitetty liitteen 3 timanttioraustapahtumaa kuvaavassa kuvasarjassa. Kuvissa 26 ja 27 on havainnollistettu betonilieriöiden timanttioraamista.

Rakennekoekappaleiden ottamisessa käytettiin sekä uusia että hyvin kuluneita timanttiteriä. Uusina terinä käytettiin timanttiorausjärjestelmän valmistajan (Hilti) SP-L timanttiorakruunuja. Uusina timanttiorakruunuina käytettiin seuraavia kokoja:

- Nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 57 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 51,2 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 87 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 79,3 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 107 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 99,3 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 150 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 162 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 154 mm.

Kuluneina terinä käytettiin siltojen ja muiden taitorakenteiden tutkimuskäytössä autenttisesti hyvin pitkälle kuluneita timanttiorakruunuja, joiden valmistaja on Kopadi Oy. Kuluneina timanttiorakruunuina käytettiin seuraavia kokoja:

- Nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 57 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 48,8 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 87 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 79,1 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleet porattiin ulkohalkaisijaltaan 107 mm kokoisella terällä, porauksesta saatavan poralieriön halkaisija on noin 98,6 mm.

Timanttiorakruunut kuuluivat tutkimuksen edetessä. Uudet timanttiorakruunut huollettiin kertaalleen. Timanttiorakruunujen huollossa timanttisegmentit uusitaan kokonaan hitsaamalla putkirungon päähän uudet timanttisegmentit. Nimellishalkaisijaltaan 100 mm ja 150 mm kokoiset timanttiorakruunut huollettiin betonilaadun 3 (C50/60 P50) porausarjojen puolivälissä. Nimellishalkaisijaltaan 50 mm ja 80 mm kokoiset timanttiorakruunut huollettiin ennen viimeisen betonilaadun 4 (C35/45) porauksien aloittamista. Mitatuissa puristuslujuuksissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia huoltamattoman ja huolletulla terällä porattujen koekappaleiden lujuuksien välillä. Uusien timanttiorakruunujen huollon tarpeen aiheutti ”timanttirakeiden” kulumisen timanttiterän siipien ulko- ja alapinnasta. Poralieriön pinnan muodostava terän sisäpinta ei olisi vielä vaatinut huoltotoi-

menpiteitä. Timanttisegmentin loppuun kuluminen havaittiin nopeasti, eikä terällä jatkettu porauksia ennen huoltoa. Timanttikorakruunun siivekkeissä ei havaittu muuta merkittävää kulumaa. Ennalta arvaamattomalla timanttikorakruunujen nopealla kulumisella ei arvioitu olevan merkittävää vaikutusta uusilla timanttiterillä porattujen rakennekoekappaleiden lujuuksiin. Porattujen kappaleiden ulkopinnoilla ei havaittu samankaltaisia porauksen aiheuttamia syviä raidanomaisia jälkiä ja pinnan aaltoilua (kuva 73) kuin kuluneella timanttikorakruunulla poratessa.

Kuluneissa timanttikorakruunuissa terän siivekkeet olivat huomattavan loppuun kuluneet ja timanttisegmenteissä oli ”timanttirakeita” vain välttävästi jäljellä. Timanttikorakruunun siivekkeet mahdollistavat huuhteluveden ja sitä myötä porauslietteen poistumisen poraustasolta. Huuhteluveden ja porauslietteen poistamiseksi poraustasolta timanttiterää jouduttiin varsinkin viimeisen betonilaadun porausten aikaan nostamaan hetkellisesti, jotta vesi pääsi poistumaan timanttiterän sisäpuolelta. Timanttikorakruunun hetkellinen nostaminen aiheutti porattujen kappaleiden ulkopinnoille raidanomaisia jälkiä. Kuluneiden timanttikorakruunujen havaittiin porauksessa hakeutuvan betonikappaleessa pehmeämmän materiaalin suuntaan eli terä pyrki hakeutumaan pois päin suurista runkoainerakeista. Tämä ilmeni porattujen kappaleiden sivupintojen epätasaisuutena ja pinnan aaltoiluna.

Kuluneista timanttikorakruunuista nimellishalkaisijaltaan 100 mm kokoisella terällä olisi ennen tutkimuksen aloittamista voinut vielä välttävästi työskennellä. Nimellishalkaisijaltaan 80 mm timanttikorakruunu alkoi olla huoltokuntoinen ja 50 mm timanttikorakruunu olisi pitänyt välittömästi huoltaa. Tutkimuksen edetessä timanttikorakruunut kuluivat edelleen ja tutkimuksen päätteeksi kaikki kuluneet terät olivat ylittäneet huoltokuntoisuuden rajan. Tutkimuksen lopussa kaikista huonokuntoisista teristä puuttui timanttikorakruunun siivekkeet. Kuvassa 25 on esitetty tutkimuksessa käytetyt, nimellishalkaisijaltaan 50 mm timanttikorakruunut ennen ensimmäisen betonilaadun timanttiorausten aloittamista (vasemmalla) ja viimeisen betonilaadun timanttiorausten päätteeksi (oikealla). Vasemman puoleisessa kuvassa kuluneen timanttikorakruunun siivekkeet ovat vielä nimellisesti havaittavissa.



**Kuva 25.** Nimellishalkaisijaltaan 50 mm timanttikorakruunut ennen tutkimuksen aloittamista (vasemmalla) ja tutkimuksen päätteeksi (oikealla).

Betonilieriöiden timanttioraukset suoritettiin valukappaleiden jälkihoidon päättymisen jälkeen, jolloin valukappaleet otettiin pois vesiupotuksesta. Timanttioraukset suoritettiin rakennekoekappaleiden valmistelutöiden edetessä, noin 5-10 viikkoa valun jälkeen.

### 3.7.2 Koekappaleiden timanttisahaus

Standardin EN 12390-3 mukaan näytteitä voidaan pienentää sahaamalla, muita vaatimuksia tai ohjeita betoninäytteiden katkaisemiselle ei standardeissa ole asetettu. Timanttioratut poralieriöt katkaistiin timanttisahaamalla. Sahaamiseen käytettiin AMD 450 timanttisahausta. Sahattavien betonilieriöiden pintoja huuhdeltiin viileällä vedellä koko timanttisahaamisen ajan. Kaikki tutkimuksessa valmistetut poralieriöt katkaistiin käyttäen samaa timanttilaikkaa, jota ei tarvinnut huoltaa tutkimuksen edetessä. Nimellishalkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm poratuista lieriöstä katkaistiin useita rakennekoekappaleita. Katkaisut suoritettiin siten, että poralieriöstä hävitettävää ylimääräistä betonia poistettiin ylä- ja alapäästä yhtä paljon. Katkaistavat rakennekoekappaleet edustavat siis valetun kappaleen betonin keskimääräisiä ominaisuuksia. Poralieriön yläpäästä on poistettu mahdollisesti hieman erottunut betonikerros ja alapäästä kerros, jossa saattaa esiintyä runkoaineen painumisen seurauksena normaalia suurempaa betonin tiheyttä. Nimellishalkaisijaltaan 150 mm poratuista lieriöstä katkaistiin yksi rakennekoekappale. Katkaisu suoritettiin siten, että poralieriön yläpäästä poistettiin ylimääräinen betoni. Tällä menettelyllä poralieriön yläpäästä poistettiin mahdollisesti hieman erottunut betonikerros. Lisäksi tällä menettelyllä rakennekoekappaleet vastaavat ominaisuuksiltaan mahdollisimman lähelle standardikoekappaleita D150x300 siten, että rakennekoekappaleiden pohjalla esiintyy standardikoekappaleiden tapaan tiheydeltään suurempi kerros, minne runkoaineen rakeita on betonimassaa tiivistettäessä painunut. Yksi katkaisu vie kappaleesta noin 4 mm betonia.

Nimellishalkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm kokoisista poralieriöistä katkaisuperiaatteet rakennekoekappaleiksi on esitetty kuvassa 26 mukaisesti. Nimellishalkaisijaltaan 150 mm kokoisien rakennekoekappaleiden katkaisuperiaate on esitetty kuvassa 27. Poralieriöiden katkaisupituuksissa huomioitiin hionnan tarve, katkaisut tehtiin seuraavasti:

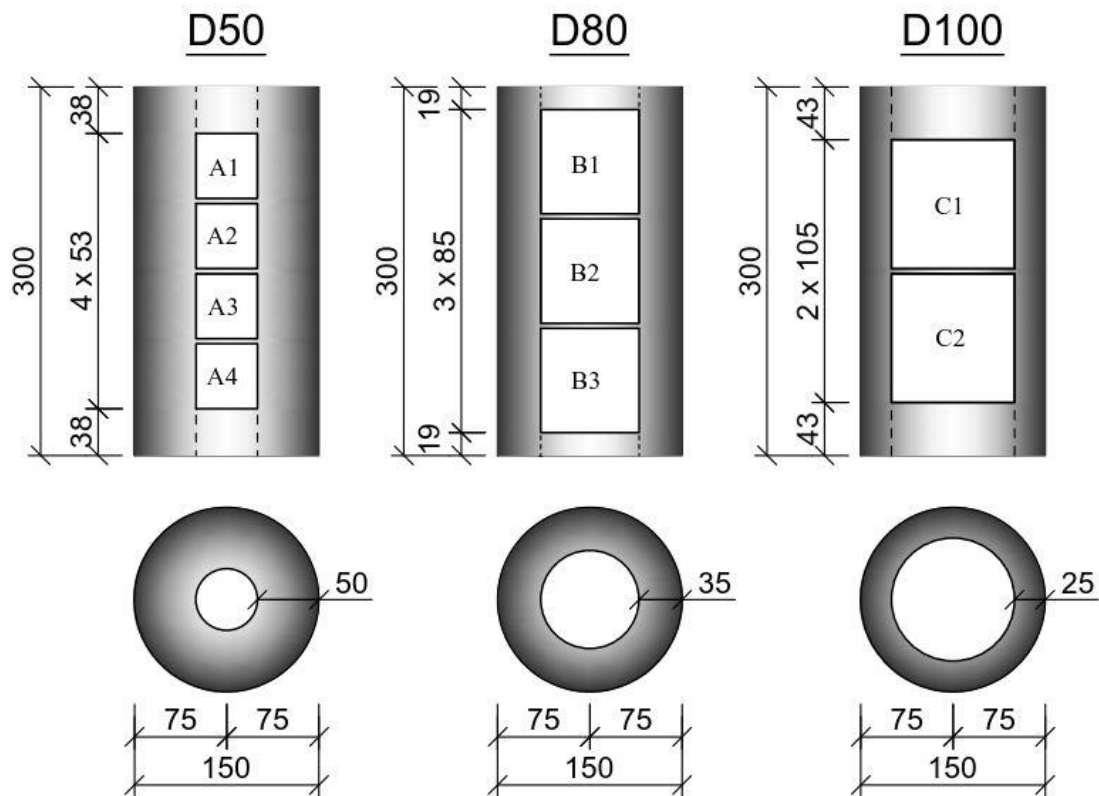
- Nimellishalkaisijaltaan 50 mm kokoisista ja 300 mm pitkistä poralieriöistä katkaistiin neljä (4) pituudeltaan noin 53 mm rakennekoekappaletta. Poralieriön kummastakin päästä poistettiin siten noin 38 mm betonia, jota ei käytetä tutkimuksen puristustesteissä. Rikkiseoksella tasoitettavat rakennekoekappaleet katkaistiin suoraan nimellishalkaisijan mukaiseen pituuteen 50 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 80 mm kokoisista ja 300 mm pitkistä poralieriöistä katkaistiin kolme (3) pituudeltaan noin 85 mm rakennekoekappaletta. Poralieriön kummastakin päästä poistettiin siten noin 19 mm betonia, jota ei käytetä tutkimuksen puristustesteissä. Rikkiseoksella tasoitettavat rakennekoekappaleet katkaistiin suoraan nimellishalkaisijan mukaiseen pituuteen 80 mm.
- Nimellishalkaisijaltaan 100 mm kokoisista ja 300 mm pitkistä poralieriöistä katkaistiin kaksi (2) pituudeltaan noin 105 mm rakennekoekappaletta. Poralieriön



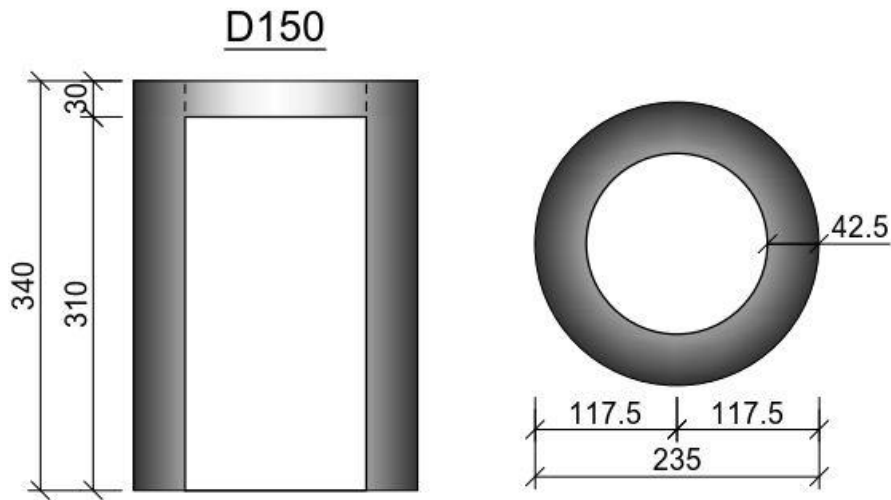
kummastakin päästä poistettiin siten noin 43 mm betonia, jota ei käytetä tutkimuksen puristustesteissä. Rikkiseoksella tasoitettavat rakennekoekappaleet katkaistiin suoraan nimellishalkaisijan mukaiseen pituuteen 100 mm.

- Nimellishalkaisijaltaan 150 mm kokoisista ja noin 340 mm pitkistä poralieriöistä katkaistiin yksi (1) pituudeltaan noin 310 mm rakennekoekappale. Poralieriön yläpäästä poistettiin siten noin 30 mm betonia, jota ei käytetä tutkimuksen puristustesteissä.

Katkaistujen rakennekoekappaleiden nimeäminen tehtiin kappaleessa 3.4 Koekappaleiden nimeäminen esitetysti. Rakennekoekappaleiden nimeäminen suoritettiin ennen betonieröiden katkaisemista kappaleiden sekoittumisen välttämiseksi. Rakennekoekappaleiden katkaisu on esitetty liitteen 4 katkaisutapahtumaa kuvaavassa kuvasarjassa. Rakennekoekappaleiden timanttisahaukset suoritettiin rakennekoekappaleiden valmistelutöiden edessä, noin 6-10 viikkoa valun jälkeen.



**Kuva 26.** Poralieriöiden timanttiporaaminen ja katkaiseminen rakennekoekappaleiksi D50-100 mm.



*Kuva 27. Poralieriöiden timanttiporaaminen ja katkaiseminen rakennekoekappaleiksi D150 mm.*

### 3.7.3 Koekappaleiden päiden tasoittaminen

Koekappaleiden päät tulee tasoittaa puristuslujuuden testausta varten standardin EN 12390-3 liitteen A mukaisesti [14]. Kuormituspinnat tulee tasoittaa hiomalla tai pinnoittamalla. Pinnoitus voidaan tehdä käyttäen kalsium-aluminaattisementtiä, rikkiseosta tai hiekkalaatikkomenetelmää. Käytettäessä kalsium-aluminaattilaastia tai rikkiseosta saa koekappaleen oletettu puristuslujuus olla maksimissaan noin 50 MPa. Hionnalle ja hiekkalaatikkomenetelmälle ei ole asetettu lujuusrajoitteita. Ristiriitaisissa tilanteissa hiontaa pidetään vertailumenetelmänä [13].

Tutkimuksessa koekappaleiden päiden tasoittamisen päämenetelmänä käytettiin hiontaa. Jokaisella betonilaadulla tehtiin lisäksi vertaileva tutkimus pinnoitusmenetelmällä, jona käytettiin päiden tasoittamista rikkiseoksella. Standardeissa ei aseteta vaatimuksia hiontalaitteille. Tutkimuksessa hionnat tehtiin automaattitoimisella Matest Treviolo C299 timanttihiontalaitteella. Koekappaleiden hiottavia päitä huuhdeltiin viileällä vedellä koko hionnan ajan. Koekappaleiden molemmat päät hiottiin, vaikka muottia vasten valettu koekappaleen alapää olisikin vaikuttanut silmämääräisesti suoralta. Hiomalaitteessa koekappaleet kiinnitettiin ruuvipuristimella tiukasti kiinni laitteen runkoon. Laitteessa kiinni oleva kiinnitysmekanismi on suorassa linjassa hiomalaitteen timanttilaikan kanssa.

Hiottavien koekappaleiden katkaisupituuksissa huomioitiin hionnan tarve lisäämällä halkaisijan mukaan 3-10 mm nimellismittaan, josta saatiin optimaalinen katkaisupituus. Optimaalista katkaisupituutta tarkasteltiin tutkimusta edeltäneissä ennakkokokeissa. Koekappaleiden päät hiottiin aluksi kauttaaltaan hiomalaitteella käsivaraisesti ja viimeistelty pinta tehtiin hiomalaitteen automatiikalla. Kaikkien hiottujen pintojen tasomaisuus ja suorakulmaisuus tarkastettiin välittömästi hionnan jälkeen ja mikäli mitatuissa parametreissa havaittiin poikkeamia, suoritettiin hionta uudelleen.

Nimellishalkaisijaltaan 80 mm, 100 mm ja 150 mm koekappaleet hiottiin yksi kerrallaan. Nimellishalkaisijaltaan 50 mm koekappaleet hiottiin siten, että yhdestä betonilieriöstä timanttiporatut ja katkaistut näytteet hiottiin samalla kertaa. Yhdestä betonilieriöstä porattujen rakennekoekappaleiden pituuksiksi tuli siten sama mitta. Koekappaleet kiinnitettiin tiukasti kiinni hionta-adapteriin, joka kiinnitettiin suurempien näytteiden tapaan kiinni hiomalaitteeseen. Hionnan kulku on esitetty liitteen 5 hiontatapahtumaa kuvaavassa kuvasarjassa.

Lujuudenseurantakoekappaleiden puristuskokeita tehtiin 3, 7, 28, 91 ja 365 vuorokautta koekappaleiden valamisen jälkeen. Normaaleilla sementtilaaduilla valetut betonit saavuttavat nimellislujuuksensa yleensä viimeistään 28 vuorokauden ikäisenä. Kolmen ja seitsemän vuorokauden ikäisenä testattavat lujuudenseurantakoekappaleet hiottiin testipäivänä, jotta betonin lujittumista häirittiin mahdollisimman vähäisesti. 28 vuorokauden ikäisenä testattavat lujuudenseurantakoekappaleet hiottiin noin vuorokausi ennen puristuskokeiden suorittamista. 91 vuorokauden ikäisenä testattavat lujuudenseurantakoekappaleet hiottiin noin 1-7 vuorokautta ennen puristuskokeiden suorittamista. Lujuudenseurantakoekappaleet otettiin vain hionnan ajaksi pois vesiupotuksesta, yhden koekappaleen hionniseen kului aikaan maksimissaan 30 minuuttia. Kaikkien muiden koekappaleiden päiden hionnat suoritettiin koekappaleiden valmistelutöiden edetessä, noin 6-12 viikkoa valun jälkeen.

Jokaisella betonilaadulla tehtiin nimellishalkaisijaltaan D50, D80 ja D100 rakennekoekappaleille vertaileva päiden tasoitus rikkiseosmenetelmällä. Standardin EN 12390-3 liitteessä A on asetettu vaatimukset rikkiseosmenetelmälle. Standardin mukaan betonin oletettu puristuslujuus saa olla maksimissaan 50 MPa käytettäessä rikkiseosmenetelmää. Tutkimuksessa käytettyjen betonilaatujen suurin nimellislujuus on 50 MPa (C50/60, P50). Ennako-olettamusten mukaan tämän betonilaadun puristustesteissä rakennekoekappaleiden lujuus ylittää asetetun vaatimuksen. Muiden betonilaatujen tapauksessa lujuuden arvioitiin jäävän asetetun lujuusvaatimuksen 50 MPa alapuolelle. Puristustesteissä havaittiin kuitenkin, että kaikkien betonilaatujen kohdalla rikkiseosmenetelmällä tasoitettujen rakennekoekappaleiden maksimipuristuslujuus oli yli 50 MPa. Puristustesteissä havaittiin yksittäisiä rakennekoekappaleita, joiden kohdalla rikkikerroksen arvioitiin selvästi murtuneen ennen rakennekoekappaleen puristumusta.

Pinnoitettavien koekappaleiden pintojen tulee olla kuivia, puhtaita ja vapaita irtonaisesta kiviaineksesta. Pinnoitekerrosten tulee olla niin ohuita kuin mahdollista. Pinnoitekerrosten paksuus saa olla maksimissaan 5 mm, pienet paikalliset poikkeamat sallitaan [13]. Kaikkien rikkiseosmenetelmällä tasoitettujen rakennekoekappaleiden päät puhdistettiin ennen päiden rikittämistä. Ennen rikittämistä rakennekoekappaleet olivat kuivaneet timanttisahauksen jälkeen vähintään kolme vuorokautta. Rikkiseoksen kerrospaksuutta tarkkailtiin päiden tasoituksen ja puristuskokeiden yhteydessä. Rikkikerrosten paksuudet vaihtelivat välillä 2-5 mm. Paikallisesti rakennekoekappaleiden pienten kolojen kohdalla

rikkiseoskerroksen paksuus oli noin 7 mm. Rikkiseoskerrosten paksuudet mitattiin puristuskokeiden jälkeen murtuneista rakennekoekappaleista. Rakennekoekappaleiden esivalmistelut ja rikkiseoskerrosten paksuudet täyttävät standardin asettamat vaatimukset.

Rikkiseos tulee kuumentaa jatkuvasti hämmentäen valmistajan suosittelemaan lämpötilaan tai lämpötilaan, jossa vaadittava notkeus saavutetaan. Päiden rikitystä suoritettaessa seosta tulee hämmentää jatkuvasti seoksen tasalaatuisuuden takaamiseksi [13]. Rikkiseos valmistettiin kaupallisesta, menetelmään tarkoitettua rikkilevystä sulattamalla. Rikkiseos sulatettiin teräsastiassa kaasupolttimen avulla. Standardi suosittelee jatkuvassa pinnoitustyössä käytettäväksi termostaattiohjattua sulatuspataa. Tutkimuksessa ei ollut käytettävissä suosituksen mukaista sulatuspataa. Sulan rikkiseoksen lämpötilaa pidettiin sulattamisen jälkeen yllä sähkölieden avulla, jossa oli portaaton lämmönsäätömahdollisuus. Rikkiseosta hämmentettiin rikkilevyä sulattaessa ja koko pinnoitustyön ajan. Rikkiseoksen lämpötilaa tarkkailtiin koko pinnoitustyön ajan siten, että lämpötila oli jatkuvasti noin 125-135 °C. Rikkiseoksen optimaalinen lämpötila testattiin ennen varsinaisia pinnoitustöitä ennakkokokeilla. Kokeissa havaittiin, että rikkiseoksen lämpötilan ollessa alle 115 °C alkaa seoksen olomuoto muuttumaan takaisin kohti kiinteää olomuotoa. Mikäli lämpötila nousi yli 145 °C alkoi sulatuspadan pohjalle kertymään kiinteänomaista sulaa toffeeta muistuttavaa massaa.

Koekappaleet tulee laskea pystysuorassa pitäen vaakasuoran levyn tai muotin päällä olevaan sulatettuun rikkiseokseen. Seoksen annetaan kovettua ennen toisen pään pinnoittamista. Pinnoittamisessa tulee käyttää pinnoitekehikkoa, jotta voidaan varmistua molempien pinnoitettavien päiden samansuuntaisuudesta. Muoteissa käytetään mineraaliöljyä irrotusaineena [13]. Rakennekoekappaleiden pinnoitukset tehtiin työhön valmistetulla pinnoituskehikolla, jonka pohjalevyyn kiinnitettiin kiinni kuppimuotit rikkiseosta varten. Jokaiselle rakennekoekappalekoolle käytettiin omaa, tarkoitukseen valmistettua kuppimuottia. Muoteissa käytettiin Neste Oyj:n valmistamaa mineraaliöljyä kappaleiden irrottamisen helpottamiseksi. Ennakkokokeissa havaittiin, että ilman irrotusainetta pinnoitettaessa pinnoitteen tartunta saattaa häiriintyä kappaletta irrotettaessa muotista. Pinnoituskehikon kohtisuoruus pohjalevyyn nähden tarkastettiin kehikkoa valmistettaessa. Lisäksi kaikkien pinnoitettujen rakennekoekappaleiden tasomaisuus ja suorakulmaisuus tarkastettiin muotista irrottamisen jälkeen. Epäonnistuneet ja päiden samansuuntaisuudesta poikkeavat pinnoituksen uusittiin. Pinnoitekerrosten tartuntaa tarkastettiin koputtelemalla pinnoitekerrosta varovasti. Koputteluäänien muutoksiin perustuen arvioitiin, onko pinnoitteen tartunta onnistunut ja onko pinnoitteessa onttoja kohtia. Koputtelemalla ei havaittu normaalista poikkeavia pinnoitekerroksia. Lisäksi pinnoitteen tartunnan onnistumista tarkkailtiin puristustestien jälkeen murtuneista rakennekoekappaleista. Murtoon asti puristettujen rakennekoekappaleiden pinnoitteiden tartunnoissa ei havaittu selviä poikkeamia.

Standardin mukaan puristustestit saa suorittaa 30 minuuttia pinnoittamisen jälkeen. Kaikkien betonilaatujen tapauksessa pinnoituksen ja rakennekoekappaleiden testaamisen välillä oli vähintään 3 vuorokautta. Rakennekoekappaleiden pinnoitus rikkiseosmenetelmällä on esitetty liitteen 6 pinnoitustapahtumaa kuvaavassa kuvasarjassa.

## 3.8 Koekappaleille tehdyt mittaukset

### 3.8.1 Koekappaleiden tiheyden määrittäminen

Lujuudenseurantakoekappaleita lukuun ottamatta kaikkien koekappaleiden tilavuudet  $V$  [ $\text{m}^3$ ], josta tiheys  $D_c$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] lasketaan, määritettiin standardin EN 12390-7 mukaisella vesipunnituksella. Lujuudenseurantakoekappaleiden tilavuudet määritettiin samaisen standardin mukaisesti mitattuihin todellisiin mittoihin perustuen. Mittoihin perustuva tilavuus lasketaan geometrian peruskaavan mukaisesti  $V = 0,25 \cdot \pi \cdot d_m^2 \cdot h_m$  [ $\text{m}^3$ ], jossa  $d_m$  on koekappaleen keskimääräinen halkaisija [mm] ja  $h_m$  koekappaleen keskimääräinen korkeus [mm].

Koekappaleiden massa, josta tiheys lasketaan, voidaan määrittää kolmessa eri kosteustilassa. Koekappaleet voidaan punnita joka vastaanottotilassa, veden kyllästävässä tilassa tai uunikuivattuna. Vaakan mittatarkkuuden tulee olla sekä ilmassa että vedessä 0,1 % mitattavan kappaleen massasta [54]. Kaikkien koekappaleiden massat määritettiin vedellä kyllästyneessä tilassa. Tutkimuksessa käytettiin ripustuskorilla varustettua vaakaa, jonka mittatarkkuus on 1 g. Vaaka täyttää standardin asettaman mittatarkkuusvaatimuksen.

Vesipunnituksessa vesialtaan tulee olla varustettuna vedenpinnan vakiokorkeudella pitävällä laitteella ja vesialtaan tulee olla riittävän iso mahdollistaakseen ripustetun koekappaleen upottamisen kokonaan vakiosyvyydelle. Mittauslaitteineen tulee olla sellainen, että mittaustilanteessa vesikoria nostetaan kohti ripustuskoria [54]. Tutkimuksessa tilavuuden määrittämiseen vesipunnituksen avulla käytettiin mittaukseen suunniteltua nostokorikehikkoa, jossa nostokorilla varustettu vaaka asennetaan telineen päälle. Mittauksessa vesiastia nostetaan, kunnes koekappale on täysin vedenpinnan alapuolella, ei kuitenkaan pohjassa kiinni. Nostokorikehikon valmistaja on Controls Group. Nostokorikehikko on esitetty kuvassa 28.



**Kuva 28.** Koekappaleiden tilavuuden määrittämisessä käytetty nostokorikehikko ja vaaka. Vaa'an alapuolisesta mittauskoukusta roikotetaan koria, jossa koekappaletta pidetään.

Tilavuuden määrittämisessä vesiupotusmenetelmällä koekappaleen tulee olla täysin veden kyllästävässä tilassa. Koekappale upotetaan  $20 \pm 2$  °C veteen, kunnes painon muutos 24 tunnin aikana on pienempi kuin 0,2 %. Betonikoekappaleiden, joita on jälkihoidettu vesisäilytyksessä vähintään 72 tuntia, voidaan olettaa olevan kyllästyneitä vakiopainoon [54]. Koekappaleita pidettiin ennen tilavuuden määrittämistä noin 72-80 tuntia vesitankkeissa, joissa valukappaleita jälkihoidettiin. Vesitankkien lämpötilat vaihtelivat tutkimuksen aikaan välillä 18,2-22,0 °C. Lisäksi tutkimusta edeltäneissä ennakkokokeissa testattiin vedenimeytymistä erikokoisilla koekappaleilla. Kokeiden perusteella nimellishalkaisijaltaan 150 mm ja 300 mm korkean koekappaleen massassa ei tapahdu muutosta 24 tuntia veteen asettamisen jälkeen. Pienemmät koekappaleet saavuttavat vedellä kyllästyneen tilan nopeammin. Kaikkien mitattujen koekappaleiden voidaan sanoa olleen vedellä kyllästyneessä tilassa tilavuutta määritettäessä vesiupotuksella.

Koekappaleen tilavuuden määrittämisessä vesiupotuksen avulla sovelletaan Arkhimedeen lakia. Tilavuuden määrittämiseksi vesiupotuksessa tehdään seuraavat mittaukset:

- Mitataan vesiupotuksessa käytettävän nostokorin näennäinen massa [kg] ilman koekappaletta siten, että nostokori on kokonaan upoksissa eikä nostokori osu vesialtaan pohjaan.
- Mitataan koekappaleen ja nostokorin näennäinen yhteismassa [kg]. Koekappale asetetaan ripustuskoriin ja nostetaan vesiallasta, kunnes koekappale on upoksissa ja veden pinta on samalla tasolla kuin ilman koekappaletta. Nostokori tai koekappale ei saa osua vesialtaaseen.
- Mitataan koekappaleen massa [kg] ilmassa. Ennen mittausta koekappaleen pinoilta pyyhitään ylimääräinen vesi pois kostealla pyyhkeellä [54].

Määritettyjen massojen perusteella lasketaan koekappaleen tilavuus standardin EN 12390-7 kaavan (17) mukaisesti:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (17)$$

jossa  $V$  on koekappaleen tilavuus [ $\text{m}^3$ ],  $m_a$  on koekappaleen massa ilmassa [kg],  $m_{st}$  on veteen upotetun ripustuskorin näennäinen massa [kg],  $m_w$  on veteen upotetun koekappaleen näennäinen massa [kg] ja  $\rho_w$  on veden tiheys 20 °C lämpötilassa, oletusarvona voidaan käyttää 998  $\text{kg}/\text{m}^3$  [54]. Koekappaleiden tilavuudet vesiupotuksessa määritettiin edellä kuvatun menetelmän mukaisesti.

Koekappaleiden tiheys lasketaan kaavan 18 mukaisesti:

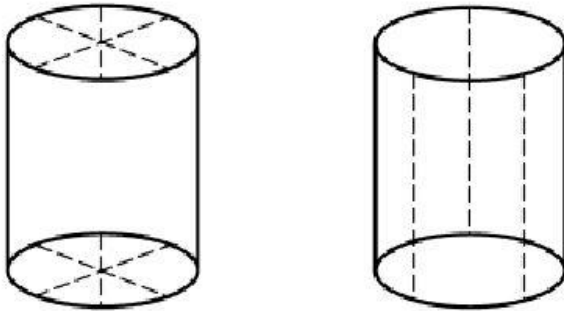
$$D_c = \frac{m_a}{V} \quad (18)$$

jossa  $D_c$  on koekappaleen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] koekappaleen kosteustilassa,  $m_a$  on kappaleen massa [kg] vedellä kyllästetyssä tilassa ja  $V$  on kappaleen tilavuus [ $\text{m}^3$ ] vesipunnitusmenetelmällä tai dimensioihin perustuen. Tiheysmäärityksen tulos ilmoitetaan pyöristettynä lähimmän 10  $\text{kg}/\text{m}^3$  tarkkuuteen [54]. Kaikkien tutkimuksessa käytettyjen koe- ja rakennekoekappaleiden tiheydet on ilmoitettu liitteissä 8-13.

### 3.8.2 Koekappaleiden dimensioiden määrittäminen

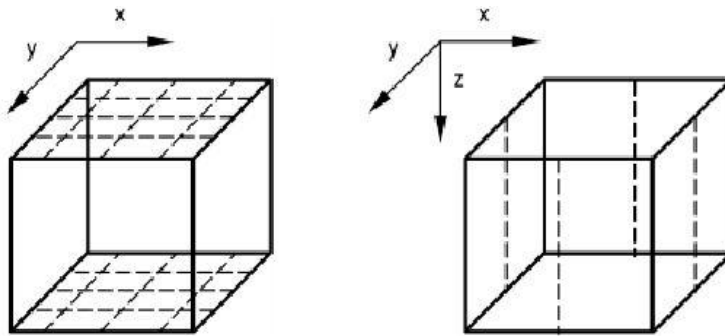
Tutkimuksessa kaikkien koekappaleiden dimensiot mitattiin standardin EN 12390-3 [13] liitteen B mukaisesti. Koekappaleiden mittojen määrittämiseen voidaan käyttää työntömittoja tai mittanauhoja, joilla voidaan mitata koekappaleen mitat 0,5 % tarkkuudella [13]. Koekappaleiden mittaukset suoritettiin digitaalisilla työntömitoilla kahden (2) desimaalin tarkkuudella ja mitat pyöristettiin tämän jälkeen yhden (1) desimaalin tarkkuuteen. Tutkimuksessa käytetyt työntömitat täyttävät standardin asettaman vaatimuksen.

Lieriön muotoisten koekappaleiden halkaisija mitataan molemmista päistä kolmesta (3) kohdasta noin  $60^\circ$  välein ja korkeus kolmesta (3) kohdasta noin  $120^\circ$  välein [13]. Kuvassa 29 on havainnollistettu lieriömäisten koekappaleiden dimensioiden mittaamista.



**Kuva 29.** Lieriömäisten koekappaleiden dimensioiden mittaaminen [13].

Kuution muotoisten koekappaleiden kuormituspintojen kohdalta sivumitat mitataan kuudesta (6) kohdasta tasavälein. Kuution muut sivut mitataan yhdestä kohdasta jokaisen sivupinnan keskeltä [13]. Kuvassa 30 on havainnollistettu kuutiomaisten koekappaleiden dimensioiden mittaamista.



**Kuva 30.** Kuutiomaisten koekappaleiden dimensioiden mittaaminen [13].

Koekappaleiden yksittäiset dimensiot tulee määrittää 0,5 % tarkkuudella [13]. Mittaukset suoritettiin digitaalisella työntömitalla 0,1 mm tarkkuudella, mikä täyttää standardin asettaman vaatimuksen. Koekappaleiden mitattujen dimensioiden perusteella tarkastettiin standardissa EN 12390-1 [5] koekappaleille asetetut mittavaatimukset. Kaikki koekappaleet täyttivät tutkimussarjakohtaisesti standardissa asetetut mittavaatimukset.

Koekappaleiden dimensioiden perusteella määritetään jokaiselle koekappaleelle keskimääräinen poikkileikkauspinta-ala  $A_c$ . Lieriön muotoisen koekappaleen keskimääräinen poikkileikkauspinta-ala  $A_c$  lasketaan standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti kaavasta (19).

$$A_c = \pi \cdot \frac{d_m^2}{4} \quad (19)$$



jossa  $d_m$  on lieriön kuormituspintojen keskimääräinen halkaisija [mm]. Lieriön muotoisen kappaleen kuormituspintojen keskimääräinen halkaisija määritetään kuuden (6) mittauksen keskiarvona, kolme (3) mittausta kummastakin kuormituspinnasta noin  $60^\circ$  välein [13]. Kuution muotoisten koekappalein keskimääräinen kuormituspinta-ala  $A_c$  lasketaan standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti kaavasta (20).

$$A_c = x_m \cdot y_m \quad (20)$$

jossa  $x_m$  ja  $y_m$  ovat kuution kuormituspintojen keskimääräiset pituudet kohtisuorassa suunnassa. Keskimääräiset kuormituspintojen pituudet määritetään kumpaankin suuntaan kuuden (6) mittauksen keskiarvona standardin mallikuvan mukaisesti [13]. Sekä lieriöiden että kuutioiden tapauksessa keskimääräiset kuormituspinta-alaan vaikuttavat mitaukset ilmoitetaan 1 mm tarkkuuteen pyöristettynä ja keskimääräinen kuormituspinta-ala  $1 \text{ mm}^2$  tarkkuudella [13].

### 3.9 Puristuskokeet

Testauskoneille asetettuja vaatimuksia käsitellään standardissa EN 12390-4 [55]. Testauskoneen tulee olla kalibroitu, jotta se on standardin EN 12390-4 mukaisesti hyväksytty. Testauskoneen oikean toiminnan tarkastuksen tulee käsittää seuraavat kalibroinnit: voiman näytön tarkkuus, voiman välitys, levyjen tasaisuus ja kuormitusnopeuden säätö. Kalibroinnit on suoritettava koneen esiasennuksen jälkeen. Uudelleenkalibroinnit tulee tehdä akkreditoidun laatujärjestelmän mukaisesti tai kerran vuodessa. Uudelleenkalibroinnit on suoritettava lisäksi koneen siirtämisen jälkeen ja sellaisen osan korjaamisen tai vaihtamisen jälkeen, jolla voidaan olettaa olevan vaikutusta em. kalibroitaviin suureisiin. [55]

Tutkimuksessa käytettiin yhtä tutkimussarjaa (C35/45 huokostamaton, rakennekoekappaleet D50x50, kulunut timanttiterä) lukuun ottamatta samaa testauskonetta. Yksi sarja puristettiin toisella testauskoneella laitevian seurauksena. Käytetään seuraavissa kappaleissa testauskoneille tunnisteita testauskone 1 (T1) ja testauskone 2 (T2), pääosa puristuskokeista tehtiin testauskoneella 1. Puristuskokeiden aikaan tutkimuskoneen 2 edellisestä kalibroinnista oli kulunut aikaa yli vuosi, mikä ylittää standardin EN 12390-4 mukaisen kalibroitivälivaatimuksen. Tutkimuskone 2 kuitenkin kalibroitiin noin kuukausi puristuskokeiden jälkeen, kalibroinnissa ei havaittu muutoksia laitteen toiminnassa edelliseen kalibrointiin verrattuna.

Testauskone 1:

- Valmistaja: Toni Technik
- Malli: 2031
- Maksimi testauskuorma: 3000 kN
- Kuormituskehikko malli 4036, maksimi testauskuorma 1000 kN
- Kalibroitu: 3.3.2018

Testauskone 2:

- Valmistaja: Ele International
- Malli: Autotest
- Maksimi testauskuorma: 250 kN
- Kalibroitu: 31.5.2016 ja 18.1.2019

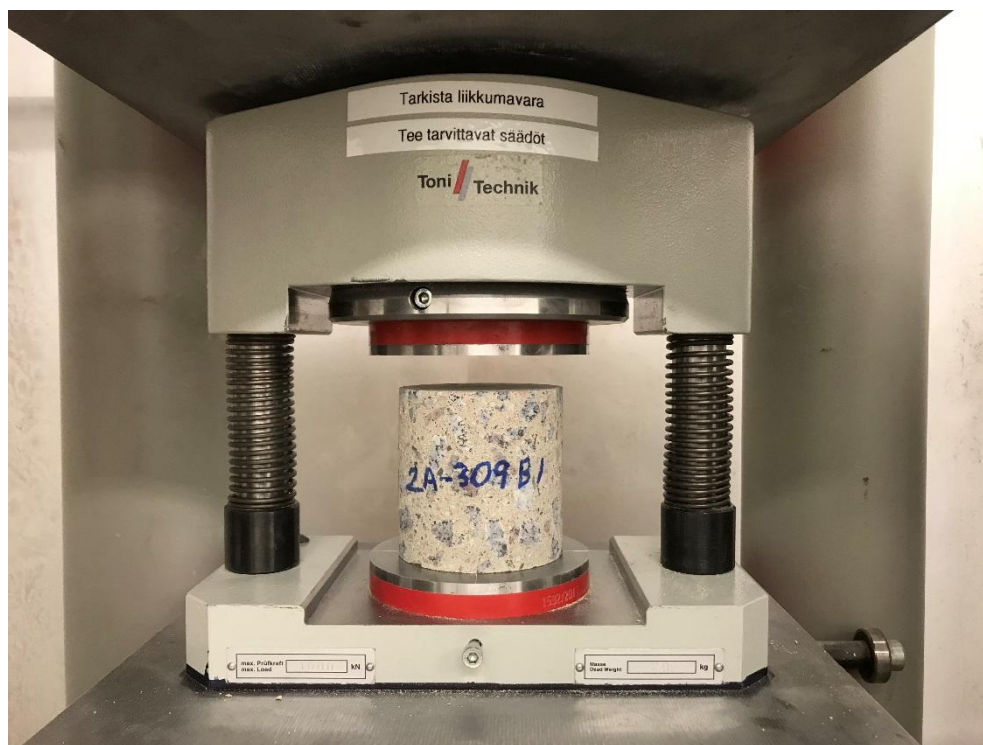
Standardissa EN 12390-4 [55] voiman näytön mittatarkkuudelle on annettu koneluokat 1-3. Kalibroitodistusten mukaan kummankin tutkimuksessa käytetyn testauskoneen koneluokka on 1. Tutkimuskoneella 1 kalibroitu kuormitusalue on 60-3000 kN ja tutkimuskoneella 2 kalibroidut alueet ovat 1-20 kN sekä 10-250 kN. Tutkimuksessa muutamien halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden murtokuorma jäi odottamattomasti alle 60 kN, kyseiset puristuskokeet suoritettiin testauskoneella 1. Muutoin kummankin testauskoneen kuormitusalueet vastaavat tutkimuksessa käytettyjä kuormitusalueita. Voiman näyttölaitteen tulee olla varustettuna osoitin- tai digitaalisella näytöllä, josta voima on luottavissa vaadittavalla tarkkuudella. Suurin voima tulee olla luettavissa testauksen jälkeen siihen asti, kunnes suoritetaan nollaus. Näytön tulee olla nähtävissä työskentelypisteestä [55]. Kaikki em. vaatimukset täyttyvät kummallakin testauskoneella.

Testauskoneen tulee olla varustettu voimanhjausjärjestelmällä, joka voi toimia joko käsi- tai automaattisesti tai automaattisesti. Jos testauskoneessa ei ole voimanhjausautomaatiikka, tulee koneeseen liittää mittari, joka näyttää nopeuden  $\pm 5$  % tarkkuudella määritellystä nopeudesta [55]. Kummankin testauskoneen on varustettu automaattisella voimanhjausjärjestelmällä. Kalibroitodistuksen mukaan tutkimuskoneen 1 kuormitusnopeuden säätö on vaatimusten mukainen. Tutkimuskoneen 2 kuormitusnopeuden säätöä ei ole tarkastettu edellisen kalibroinnin yhteydessä.

Standardissa EN 12390-4 [55] annetaan voiman välitykselle seuraavat määräykset. Ylälevyyn tulee olla liitetty pallonivel siten, että pallonivelen kiertymäkeskipiste yhtyy koneen levyn puristuspuolelman keskipisteeseen ja sallii vähintään kolmen (3) asteen kiertymän. Testin alussa ylälevyyn tulee suuntautua koekappaleen pinnan mukaisesti tai lisälevy vasten ja lukkiutua paikoilleen testin loppuosan ajaksi. Testauskone tulee olla suunniteltu siten, että voiman välityksestä pystytään testaamaan standardin mukaisilla laitteilla voiman näytön tarkkuus, koneen ylälevyn oikenevuus, koneen osien linjaus ja ylälevyn lukkiutuminen [55]. Voiman välityksen testien sallitut arvot on taulukoitu standardissa EN 12390-4 [55]. Tutkimuskoneen 1 voiman välitys on kalibroitodistuksen mukaan vaatimuksen mukainen. Tutkimuskoneelle 2 voiman välityksen tarkastusta ei ole tehty edellisen kalibroinnin yhteydessä. Tutkimuskoneessa 2 on ylälevyissä nivel, mutta ylälevy ei ole lukkiutuva.

Testauskoneen levyjen sekä lisälevyjen tasomaisuuspoikkeama saa olla korkeintaan 0,03 mm sillä alueella, joka koskettaa koekappaletta. Levyjen ja lisälevyjen karheusluku tulee olla välillä 0,4...3,2  $\mu\text{m}$ . [55] Tutkimuksessa kummassakaan testauskoneessa ei käytetty lisälevyjä. Testauskoneessa 1 käytettiin nimellishalkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm

koekappaleiden puristuskokeissa testauskoneen valmistajan toimittamaa kuormituskehikkoa, jolla pienien näytteiden puristuslujuus saatiin tarkemmin määritettyä. Kuormituskehikko on kuvan 31 mukainen. Kalibrointitodistuksen mukaan tutkimuskoneen 1 levyjen tasomaisuuspoikkeama on vaatimusten mukainen. Tutkimuskoneen 2 levyjen tasomaisuuspoikkeamaa ei ole tarkastettu edellisen kalibroinnin yhteydessä. Koekappaleiden oikean sijainnin varmistamiseksi testauskoneen kuormitusakselin suhteen, tulee alalevy olla varustettuna keskitysviivoilla, kohdistusmerkinnällä tai muilla kuvioilla koekappaleiden keskitystä varten. Keskitysviivojen maksimi leveys on 0,5 mm ja syvyys 1,0 mm. [55]. Kummankin testauskoneen ja kuormituskehikon alalevyssä oli laitteen valmistajan tekemät merkinnät koekappaleiden keskittämiseksi. Keskitysviivojen leveydet ja syvyydet täyttävät standardin asettaman vaatimuksen.



**Kuva 31.** Testauskoneen 1 kuormituskehikko halkaisijaltaan D50-D100 koekappaleille. Kuvassa kuormituskehikkoon on keskitetty D80x80 rakennekoekappale.

Tutkimuksessa käytetty testauskone 1 täyttää standardin EN 12390-4 [55] vaatimukset. Tutkimuskone 2 ei täysin vastaa standardin asettamia vaatimuksia. Tutkimuksessa tehtiin yhteensä 1180 puristuskoea, joista 98,6 % tehtiin tutkimuskoneella 1. Tutkimuskoneen 2 käytöstä on saattanut aiheutua pientä mittavirhettä yhden tutkimussarjan tuloksiin. Tutkimuslaitteesta 2 oli kuitenkin kalibroitu voiman näytön tarkkuus, jota voidaan pitää tärkeimpänä kalibroitavana tapauksena. Koekappaleisiin kohdistetut voimat siis vastaavat todellisia mitattuja voimia.

Kaikki puristuskokeet suoritettiin standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti. Puristuskokeessa kuormituksen kasvunopeus tulee olla väliltä  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s, vakiokuormitusno-

peuden tulee kuitenkin olla  $\pm 10\%$ . Alkukuormitus saa olla korkeintaan noin  $30\%$  murtokuormasta Puristuskokeessa koekappaleet kuormitetaan murtoon puristustestauskoneella. Murtokuormasta lasketaan betonin puristuslujuus [13]. Puristuskokeissa kuormituksen kasvunopeutena käytettiin noin  $0,6\text{ MPa/s}$ . Kuormituksen kasvunopeus ei ole koeksissa vakio, sillä testauskoneeseen 1 lukittu kuorman kasvunopeus ( $0,6\text{ MPa/s}$ ) määräytyi koekappaleiden nimellishalkaisijoiden mukaan. Tutkimuskoneella 2 kuormitettiin ainoastaan nimellishalkaisijaltaan D50 koekappaleita. Kuorman kasvunopeudeksi asetettiin  $1,2\text{ kN/s}$ , joka vastaa tutkimuksen muissa puristuskokeissa käytettyä kuormituksen kasvunopeutta noin  $0,6\text{ MPa/s}$ . Alkukuormituksenä käytettiin kaikille kappaleille noin  $18\text{ kN}$ , mikä saatiin valittua tutkimuskoneen asetuksista. Halkaisijaltaan  $50\text{ mm}$  lieriöiden murtokuorma oli tapauksesta riippuen noin  $68\text{--}155\text{ kN}$ , minimi murtokuormasta alkukuormitus on noin  $26\%$ . Alkukuormitus täyttää standardin enimmäisrajan.

Koekappale keskitetään testauskoneen alakuormituslevylle  $1\%$  tarkkuudella kuutiomaisen koekappaleen nimetystä mitasta tai lieriömäisen koekappaleen nimetystä halkaisijasta [13]. Tutkimuksessa käytetyissä testauskoneissa laitteiden valmistaja on tehnyt alalevyihin kohdistusmerkinnät. Halkaisijaltaan D150 lieriöt ja kuution muotoiset koekappaleet keskitettiin testauskoneen alalevyssä olevien keskitysviivojen mukaisesti. Pienten halkaisijaltaan D50, D80 ja D100 lieriöiden puristuskokeissa käytettiin apuna laitteen valmistajan toimittamaa kuormituskehikkoa, joka keskitettiin testauskoneen alalevyssä olevien keskitysviivojen avulla. Koekappaleet keskitettiin kuormituskehikon alalevyssä olevien keskitysviivojen mukaisesti. Koekappaleiden keskittämisessä käytettiin apuna rullamittaa.

Koekappaleiden kuormituksen päätteeksi murtokuorma kirjattiin ylös tutkimuskoneen voiman näytön antamalla tarkkuudella. Tutkimuskone 1 antaa murtokuorman yksikössä [kN] kahden desimaalin tarkkuudella ja tutkimuskone 2 yksikössä [kN] yhden desimaalin tarkkuudella. Puristuslujuus laskettiin murtokuormasta standardin EN 12390-3 [13] mukaisella kaavalla (2).

Puristuskokeet suoritettiin siten, että tutkimussarjojen näytemäärä jaettiin puoliksi. Puolet tutkimussarjan puristuskokeista suoritettiin koekappaleille, jotka valmistettiin aamun valuerästä ja puolet iltapäivän valuerästä. Tällä menettelyllä tutkimussarjojen tapauksia voidaan vertailla keskenään, vaikka valueräkohtaisissa betoneissa olisikin eroja mitatuissa puristuslujuuksissa.

Testauskoneen kantavat pinnat tulee pyyhkiä puhtaaksi ja mahdollinen irtonainen kiviaines tai muu vieras aine tulee puhdistaa koekappaleen kuormituslevyjä vasten tulevilta pinnoilta [13]. Puristuskokeita suoritettaessa tehtiin koekappaleille ja puristuskoneelle seuraavat toimenpiteet:

- Kuivien koekappaleiden puristuspinnoilta pyyhittiin pois mahdollinen irtonainen aines ja tarkastettiin, että pinnoilla ei ole muita epäpuhtauksia.

- Suoraan vesiupotuksesta testattavien koekappaleiden pinnoilta pyyhittiin ylimääräinen vesi pois kostealla pyyhkeellä.
- Koekappaleiden pinnat tarkastettiin silmämääräisesti ja normaalista poikkeavat suuret kolot tai huokoset kirjattiin ylös ja kuvattiin.
- Ennen koekappaleen asettamista kuormituslevyn päälle tarkistettiin, että kuormituslevyn päälle ei ole edellisestä koekappaleesta irronneita palasia tai muita epäpuhtauksia. Edellisestä näytteestä mahdollisesti kantautunut kosteus pyyhittiin pois.
- Koekappale asetettiin kuormituslevylle siten, että kuormitus kohdistuu keskeisesti koekappaleeseen nähden. Keskittämässä käytettiin apuna kuormituslevyissä olevia merkintöjä.
- Suoritettiin puristuskoe, murtokuorma, murtotapa ja mahdolliset poikkeamat puristuskokeessa kirjattiin ylös.
- Puristuskokeen päätteeksi koekappaleet kuvattiin siten, että koekappaleiden sivuja ja yläpäättä voidaan jälkikäteen tarvittaessa tarkastella.
- Rikkiseoksella tasoitettujen näytteiden rikkikerroksen tartuntaa arvioitiin murtoon asti puristetuista näytteistä. Lisäksi rikkikerroksen paksumutta tarkkailtiin puristuskokeiden edetessä.

Standardissa EN 12390-3 [13] on esitetty lieriön ja kuution muotoisten koekappaleiden hyväksytyt ja epätyytyttävät murtotavat kuvina. Murtotavat on esitetty myös liitteessä 7. Jokaisen puristuskokeen jälkeen tulee arvioida koekappaleen murtotapa. Mikäli murtotapa ei ole hyväksytty, kirjataan murtotapa muistiin tapauksen mukaan, mikä lähinnä muistuttaa testauksessa havaittua murtotapaa. Epätyytyttävä murtotapa saattaa aiheutua huolimattomuudesta testauksen suorituksessa, etenkin koekappaleen keskityksessä tai viasta testauskoneesta. Epätyytyttävä murtotapa saattaa myös aiheutua koekappaleiden päiden tasoituksen epäonnistumisen seurauksena, lieriömäisen koekappaleen tasoitekerroksen murtuminen ennen betonin murtumista on epätyytyttävä murtotapa [13]. Jokaiselle koekappaleelle tehtiin murtotavan arviointi puristuskokeen päätteeksi. Rikittämällä tasoitettujen halkaisijaltaan 50 mm koekappaleiden tapauksessa havaittiin useissa puristuskokeissa tasoitekerroksessa selvä murtuminen tai murtuminen oli pääteltävissä koekappaleesta tulosten perusteella. Näissä tapauksissa murtotavan arvioitiin olevan epätyytyttävä. Yksittäisiä poikkeamia lukuun ottamatta kaikkien muiden koekappaleiden murtotavan arvioitiin olevan hyväksytty standardin kuvien mukaisesti.

### 3.9.1 Lujuudenseurantakokeet

Lujuudenseurantakoekappaleiden puristuskokeita suoritettiin 3, 7, 28, 91 ja 365 vuorokauden ikäisille koekappaleille. Jokaista betonin tarkasteltavaa ikää kohti tehtiin kuusi (6) puristuskoe, kolme (3) kumpaakin valuerää kohti. Lujuudenseurantakoekappaleita pidettiin vesiupotuksessa puristuskokeen suorittamiseen saakka, joten koekappaleet olivat puristushetkellä vedellä kyllästyneessä tilassa.

### 3.9.2 Puristuskokeiden suorittaminen

Lujuudenseurantakoeappaleita lukuun ottamatta kaikkien muiden koekappaleiden puristuskokeet suoritettiin nimellisesti 91 vuorokauden ikäisinä. Suuren näytemäärän vuoksi puristuskokeiden suorittamiselle määritettiin aikaikkunaksi  $\pm 7$  vuorokautta. Puristuskokeet suoritettiin 91 +6 / -1 vuorokauden ikäisinä. Kaikkien samaan tutkimussarjaan kuuluvien koekappaleiden puristuskokeet suoritettiin peräjälkeen saman vuorokauden aikana. Kaikista betonilaaduista tehtiin puristuskokeiden kokonaiskoekappalemäärältään taulukon 16 mukaiset tutkimussarjat.

**Taulukko 16.** Tutkimussarjat ja sarjojen puristuskoemäärät.

Koko	Tyyppi	Määrä [kpl]	Päiden ta-soitus	Timantti-terän laatu	Olo-suhde
D150x300	Valettu lieriö, lujuudenseuranta	24	Hionta		
D100x100	Valettu lieriö	12	Hionta		A
D150x300	Valettu lieriö, kuiva	12	Hionta		A
D150x300	Valettu lieriö, kyllästetty	18	Hionta		B
K150	Valettu kuutio	12			A
D50x50	Porattu rakennekoekappale	24	Hionta	Uusi	A
D80x80	Porattu rakennekoekappale	36	Hionta	Uusi	A
D100x100	Porattu rakennekoekappale	24	Hionta	Uusi	A
D150x300	Porattu rakennekoekappale	24	Hionta	Uusi	A
D50x50	Porattu rakennekoekappale	16	Hionta	Kulunut	A
D80x80	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Kulunut	A
D100x100	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Kulunut	A
D50x50	Porattu rakennekoekappale	16	Rikkiseos	Uusi	A
D80x80	Porattu rakennekoekappale	12	Rikkiseos	Uusi	A
D100x100	Porattu rakennekoekappale	12	Rikkiseos	Uusi	A

Taulukon 16 mukaisissa tutkimussarjoissa käytettiin kahta puristuskoeolosuhdetta. Olosuhteessa A koekappaleet olivat kuivia. Koekappaleiden valmisteluissa käytettiin työmenetelmiä, joissa koekappaleita huuhdeltiin vedellä työstämisen aikaan. Koekappaleita kuivattiin valmisteluiden jälkeen vähintään kolme (3) päivää kuivassa sisäilmassa ennen puristuskokeiden suorittamista. Olosuhteessa B koekappaleet olivat vedellä kyllästettyjä, olosuhde vastaa lujuudenseurantakoeappaleiden testausolosuhdetta. Koekappaleet asetettiin vesiupotukseen vähintään 72 tuntia ennen puristuskokeiden suorittamista, millä varmistuttiin siitä, että koekappaleet ovat täysin vedellä kyllästyneitä.

Betonilaadulla C30/37, P20 tehtiin lisäksi betonin testausolosuhteita vertaileva tutkimus. Koekappaleita pidettiin vesiupotuksessa 72 tuntia, jonka jälkeen koekappaleet asetettiin kuivumaan sisäilmaan joko 16 tuntia (olosuhde C) tai 72 tuntia (olosuhde D) ennen puristuskokeiden suorittamista. Standardissa EN 13791 Betonin puristuslujuuden arviointi

rakenteista ja rakenneosista [2] ohjeistetaan pitämään koekappaleita valmisteluiden jälkeen vähintään 72 tuntia ilmasäilytyksessä ennen testausta. Standardi on kuitenkin uusiutumassa siten, että koekappaleita ohjeistetaan pitämään ilmasäilytyksessä 16-24 tuntia ennen testausta. Tutkimuksessa siis selvitettiin, millainen vaikutus tulevalla muutoksella on koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimus tehtiin poratuilla rakennekoekappaleilla, koejärjestelyt vastasivat muita tässä kappaleessa esitettyjä tutkimussarjoja. Koekappaleiden olosuhdetutkimus tehtiin kokonaiskoekappalemäärältään taulukon 17 mukaisilla tutkimussarjoilla.

**Taulukko 17.** Tutkimussarjat ja sarjojen puristuskoemäärät olosuhdetutkimuksessa.

Koko	Tyyppi	Määrä [kpl]	Päiden ta-soitus	Timantti-terän laatu	Olo-suhde
D50x50	Porattu rakennekoekappale	16	Hionta	Uusi	C
D80x80	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	C
D100x100	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	C
D50x50	Porattu rakennekoekappale	16	Hionta	Uusi	D
D80x80	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	D
D100x100	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	D

Kaikissa tutkimuksen tutkimussarjoissa koekappaleiden määrä valittiin siten, että valulieriöistä samalta tasolta otettujen rakennekoekappaleiden lukumäärä on sama. Esimerkiksi taulukon 17 mukaisesti nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleita on testattu 16 kappaletta. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleita katkaistiin yhdestä (1) poratusta lieriöstä yhteensä neljä (4) kappaletta. Siten kyseisessä halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleen tutkimussarjassa on jokaiselta katkaisutasolta neljä testattavaa koekappaletta.

Tutkimuksen aikana rakennekoekappaleiden pituuden vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen päädyttiin tutkimaan yhdellä betonilaadusta. Betonilaadulla C35/45 P50 valettiin useita ylimääräisiä varakappaleita, joita hyödynnettiin lisätutkimuksessa. Tutkimus tehtiin ainoastaan halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla. Puristuskoeket suoritettiin muista tutkimustapauksista poiketen betonin ollessa 323 vuorokauden ikäistä. Pituuden vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin taulukon 18 mukaisilla tutkimussarjoilla.

**Taulukko 18.** Tutkimussarjat ja sarjojen puristuskoemäärät pituustutkimuksessa.

Koko	Tyyppi	Määrä [kpl]	Päiden ta- soitus	Timantti- terän laatu	Olo- suhde
D100x100	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	A
D100x200	Porattu rakennekoekappale	12	Hionta	Uusi	A
D150x300	Valettu lieriö, kyllästetty	4	Hionta		B

### 3.10 Kimmovasarointi

Tutkimuksessa tehtiin koekappaleista määritettävän puristuslujuuden vertailevaa tutkimusta epäsuoralla tutkimusmenetelmällä. Epäsuorat menetelmät voivat olla ainetta rikkomattomia tai osittain rikkovia. Epäsuoria puristuslujuuden arviointiin käytettäviä menetelmiä ovat kimmovasarointi, ultraäänen etenemisnopeuden mittaaminen ja ulosvetovoimaan perustuva mittaus. Kimmovasarointi ja ultraäänen etenemisnopeuden mittaaminen ovat ainetta rikkomattomia menetelmiä. Ulosvetovoimaan perustuva mittaus on osittain ainetta rikkova menetelmä. Tutkimuksen menetelmänä käytettiin kimmovasarointia. Vertailevan tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon kimmovasaralla mitattu puristuslujuus eroaa koekappaleiden todellisesta mitatusta puristuslujuudesta.

Kimmovasarointia käsitellään standardissa EN 12504-2. Betonin testaus rakenteista. Osa 2: Rikkomaton aineenkoetus. Kimmoarvon määrittäminen kimmovasaralla [56]. Kimmovasaroinnissa jousen liikkeelle lähettämä paino osuu koekappaleen testattavaa pintaa vasten asetettuun iskuriin. Testitulokset ilmaistaan painon takaisin kimpoaman etäisyyden avulla. Kimmoarvo voidaan myös määrittää energian tai nopeuden muutoksena ennen iskuja ja iskun jälkeen [56]. Tutkimuksessa käytettiin materiaalien testauslaitteiden valmistamiseen erikoistuneen Proceq:in valmistamaa digitaalista kimmovasaraa, jonka toimintaperiaate perustuu jousen liikkeelle lähettämän painon kimpoamaan. Kimmovasaran malli oli SilverSchmidt ST/PC Type N, laitteen lähettämä iskuenergia on 2,207 Nm. Käytetty kimmovasara soveltuu lujuusalueeltaan 10-100 MPa betonilaatujen testaukseen. Tutkimuksen betonilaadut ovat nimellislujuudeltaan 30-50 MPa, joten laite soveltuu tutkimuksen käyttöön. Tutkimuksessa käytettävä standardi on koottu perustuen tutkimuksessa käytettävän laitevalmistajan N-typin jousitoimisen kimmovasaran käyttöön [56].

Kimmovasaroinnissa testattavan rakenteen tulee olla vähintään 100 mm paksu ja kiinteä osa rakennetta. Pienemmät rakenneosat tai koekappaleet voidaan testata, mikäli ne ovat tukevasti tuettuja. Karkeita ja pehmeitä pintoja tai pintoja, joilla on irrallista laastia, tulee hioa hiomakivellä ennen kimmovasarakokeita, kunnes ne ovat sileitä ja vapaita irtomateriaalista. Sileät ja hierretyt pinnat voidaan testata hiomatta. Hiomakiven tulee olla rakenteeltaan keskikarkea piikarbidikivi tai muu vastaava materiaali [56]. Kimmovasarakokeissa lieriömäiset koekappaleet asetettiin suoralle massiiviselle betonilattialle siten, että



koekappaleet olivat tukevasti paikoillaan ja koekappaleet eivät päässeet liikkumaan kimmovasarointia suoritettaessa. Kuutiomaiset kappaleet kiinnitettiin kimmovasarakoiteita suoritettaessa tiukasti kiinni ruuvipenkkiin, joka oli pulteilla kiinni raskaassa teräspöydässä. Kimmovasarakoiteita suoritettiin tapauskohtaisesti koneellisesti hiotuille pinnoille, muottipinnoille, valuvaiheessa hierretyille pinnoille ja hiomakivellä hiotuille pinnoille.

Kimmovasaroinnissa testauslaitetta pidetään tukevasti sellaisessa asennossa, että kimmovasaran iskuri pääsee iskemään kohtisuoraan testattavaan pintaan. Kimmovasaraa painetaan koekappaleta vasten siten, että iskuripainetta lisätään asteittain, kunnes paino kimpoaa koekappaleen pinnasta. Jokainen kimmovasaran mittaama kimmoarvo tulee merkata ylös. Jokaisen iskun jälkeen pintaan syntynyt jälki tarkastetaan, mikäli isku on murskannut tai rikkonut pinnan huokosen kohdalta, jätetään tulos huomioimatta [56]. Tutkimus tehtiin standardin EN 12504-2 [56] mukaisen ohjeistuksen mukaisesti. Kuutiomaisten koekappaleiden muottipinnoille tehdyissä kokeissa kimmovasaran iskusta syntyi silmämääräisesti selvästi havaittava iskujälki koekappaleen pinnalle. Näissä tapauksissa poikettiin standardi ohjeistuksesta, sillä tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää suoraan muoteista, ilman koekappaleiden valmisteluita, kimmovasaralla mitattavaa puristuslujuutta.

Standardissa EN 13791 [2] kovettuneen betonin ominaispuristuslujuuden arvioimiseen epäsuorilla menetelmillä annetaan kaksi vaihtoehtoa. Vaihtoehtoa 1 sovelletaan valmiin rakenteen betonin puristuslujuuden arviointiin epäsuorilla menetelmillä, kun testitulosten vastaavuus betonityypille on määritetty porattujen koekappaleiden testauksella. Vastaavuuden on perustuttava vähintään 18 tulospariin: 18 porattujen koekappaleiden puristuslujuustulosta ja 18 epäsuoran testimenetelmän tulosta samasta kohdasta. Testitulosten vastaavuuden määrittämisessä luodaan yhteensopivuudeltaan paras suora tai käyrä, joka määritetään regressioanalyysillä testiohjelmassa saaduista tulospareista [2]. Menetelmällä saadaan siis määritettyä tarkka yhteys epäsuoralla menetelmällä saatujen puristuslujuustulosten ja todellisten puristuslujuuksien välille.

Vaihtoehtoa 2 voidaan käyttää arvioitaessa joukko, joka koostuu samasta betonista valeduista ja samoilla työtekniikoilla valmistetuista kappaleista. Tästä joukosta valitaan testausalue ja vähintään 9 tulosparia: 9 porattujen koekappaleiden puristuslujuustulosta ja 9 epäsuoran testimenetelmän tulosta samasta kohdasta. Tulospareja käytetään määrittäessä siirtymä, jonka verran standardissa esitettyä peruskäyrää on siirrettävä epäsuorien testimenetelmien ja valmiin rakenteen betonin puristuslujuuden vastaavuuden aikaansaamiseksi [2]. Standardissa on esitetty peruskäyrät jokaiselle epäsuoralle testausmenetelmälle erikseen.

Tutkimuksessa sovellettiin vaihtoehtoa 1 puristuslujuuden vastaavuuden määrittämiseen epäsuoralla menetelmällä. Tutkimuksessa testattiin 18 valulieriötä (standardikoekappaleita), joiden nimellishalkaisija on 150 mm ja -korkeus 300 mm. Lieriömaisten kappaleiden kimmovasaroinnit suoritettiin koekappaleiden valupinnan puoleiselle päälle, jossa on

oletettavasti vähemmän betonin runkoainesrakeita lähellä koekappaleen pintaa. Lähellä koekappaleen pintaa sijaitsevat suurehkot runkoainerakeet vääristävät kimmovasaralla mitattavaa puristuslujuustulosta todellisuutta korkeammaksi. Lieriömäisten koekappaleiden kimmovasaroinnit tehtiin koekappaleiden koneellisen hionnan jälkeen, jolloin pinnassa mahdollisesti olevat runkoainesrakeet olivat helposti nähtävissä ja niiden kohtia pystyttiin välttämään kimmovasarointia suoritettaessa. Lisäksi tutkimuksessa testattiin kuutiomaisia koekappaleita pienemmällä otoskoolla, joka ei vastaa standardissa EN 13791 [2] esitettyjä otoskokoja. Kuutiomaisista koekappaleista on riittävä määrä (vähintään 18 kpl) kimmovasaromittauksia, mutta mittauksia ei ole tehty riittävästä määrästä eri koekappaleista. Kuutiomaisia koekappaleita testattiin yhteensä neljä kappaletta. Kuutiomaisista kimmovasarointiin kaikki muottipinnat. Valupinta testattiin siten, että ensin kimmovasarointiin valunaikainen hierretty valupinta, jonka jälkeen pinta hiottiin standardin mukaisella keskikarkealla piikarbidikivellä tasaiseksi ja testi suoritettiin uudestaan. Valupinnan kahdella erillisellä testillä pyrittiin selvittämään, millainen vaikutus standardin mukaisella testattavan pinnan hionnalla on kimmovasaralla mitattavaan puristuslujuuteen. Kuutiomaisten koekappaleiden muotti- ja valupinnoista ei pysty selvästi havaitsemaan pinnan läheisyydessä sijaitsevia suurehkoja kiviainesrakeita. Näissä mittauksissa saattaa esiintyä runkoaineesta aiheutuneita, todellista suurempia mitattuja puristuslujuuksia.

Kimmovasarakokeita tehtiin kaikilla tutkimuksessa käytetyillä betonilaaduilla. Kuutiomaisten koekappaleiden kimmovasarakokeet tehtiin koekappaleiden ollessa ilmasäilytyksessä. Testausolosuhde vastaa kuutiomaisten koekappaleiden puristuslujuuskokeiden aikaista kosteusolosuhdetta. Lieriömäisten koekappaleiden kimmovasarakokeita tehtiin kolmessa eri kosteusolosuhteessa, käsitellään yhtä kosteusolosuhdetta yhtenä tutkimussarjana. Kimmovasarakokeet tehtiin sisätiloissa noin 21-23 °C lämpötilassa. Tutkitut kosteusolosuhdesarjat olivat:

- Kuiva, lieriöt kimmovasarointiin koekappaleiden ollessa ilmasäilytyksessä. Koekappaleita kuivatettiin ilmasäilytyksessä vähintään seitsemän vuorokautta koekappaleiden valmisteluiden jälkeen kimmovasarakokeiden suorittamista.
- Kosteaa, lieriöiden testattavat päät kasteltiin vesisumulla 15 minuuttia ennen kimmovasarakokeiden suorittamista. Ennen testien suorittamista koekappaleiden pinnoilta pyyhittiin ylimääräinen vesi pois kostealla pyyhkeellä. Tapaus vastaa Väyläviraston ohjeistusta kimmovasarakokeiden suorittamiseksi.
- Vedellä kyllästetty, koekappaleita pidettiin vesiupotuksessa 72 tuntia ennen kimmovasarakokeiden suorittamista. Ennen testien tekemistä koekappaleiden pinnoilta pyyhittiin ylimääräinen vesi pois kostealla pyyhkeellä.

Lieriömäisten koekappaleiden kimmovasarakokeet suoritettiin samoille koekappaleille, jotka puristuslujuuskokeissa testattiin vedellä kyllästettynä. Tutkimussarjan koekappaleista puolet on valettu aamun ja puolet iltapäivän valuerässä. Kimmovasarakokeiden tuloksista vain vedellä kyllästettynä testatut tutkimussarjat ovat suoraan vertailukelpoisia todellisten puristuslujuuskokeiden tulosten kanssa. Kuutiomaisten koekappaleiden ja lie-

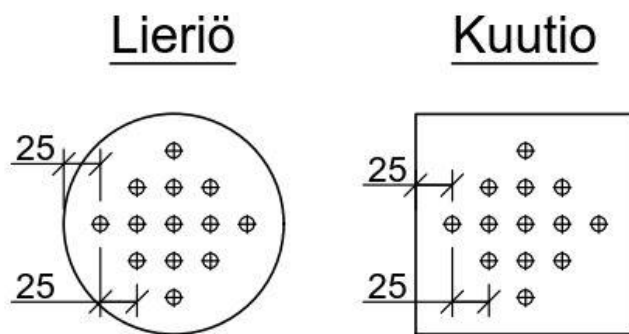
riömäisten koekappaleiden tutkimussarjojen kuiva ja kostea kimmovasarakokeet suoritettiin 87-90 vuorokautta koekappaleiden valamisen jälkeen. Lieriömäisten vedellä kylästettyjen koekappaleiden kimmovasarakokeet suoritettiin juuri ennen koekappaleiden puristuslujuuskokeiden suorittamista, 91-93 vuorokautta koekappaleiden valamisen jälkeen.

Standardin EN 12504-2 [56] mukaisissa kimmovasarakokeissa testauslaitteen toiminta tulee varmentaa ennen ja jälkeen rakenneosan testauksen. Tutkimuksessa rakenneosa rinastettiin tutkimuksessa käytettyihin tutkimussarjoihin. Kimmovasaran toiminta varmentaan suorittamalla vähintään viisi iskua teräksestä valmistetulle vertailualaisimelle, tämän jälkeen seuraavien viiden iskun lukemat kirjataan ylös. Kimmovasarakokeiden päätteeksi suoritetaan viisi iskua vertailualaisimelle ja lukemat kirjataan ylös. Jos kirjattujen viiden iskun lukemat eivät ole  $\pm 3 Q$  (kimmoarvo  $Q$ ) tarkkuudella samat kuin valmistajan ilmoittamat lukemat, kimmovasara puhdistetaan ja/tai säädetään valmistajan ohjeiden mukaisesti. Havaitun tarkkuuspoikkeaman jälkeen rakenneosan testaus tulee suorittaa uudestaan. Teräksisen vertailualaisimen tulee olla massaltaan  $16 \pm 1$  kg ja halkaisijan noin 150 mm. Iskualueen vähimmäiskovuuden tulee olla 52 HCR standardin EN ISO 6508-1 mukaisesti testattuna [56]. Tutkimuksessa käytettiin kimmovasaran valmistajan toimittamaa vertailualaisinta, joka on valmistettu tutkimuksessa käytetyn kimmovasaran toiminnan varmentamiseen. Vertailualaisin täyttää standardin EN 12504-2 [56] asettamat vaatimukset. Kimmovasaran toiminnan varmentaminen suoritettiin ennen jokaisen tutkimussarjan aloittamista ja tutkimussarjan päätteeksi. Kimmovasaran SilverSchmidt ST/PC Type N vertailuarvo vertailualaisimelle iskettäessä on 91  $Q$ , sallittu vaihteluväli toimintaa varmennettaessa on siten 88-94  $Q$ . Standardin mukaisessa toiminnan varmentamisessa mitat arvot vaihtelivat välillä 88,5-92  $Q$ . Kaikkien kimmovasarakokeiden mittaukset on siis tehty standardin vaatimukset täyttävällä kimmovasaralla.

Kimmovasarakokeissa iskukohtien välin tulee olla vähintään 25 mm ja reunaetäisyys testattavan kappaleen reunaan tulee olla vähintään 25 mm. Suositeltavaa on piirtää säännöllinen viivaverkko 25-50 mm jaolla ja valita viivojen leikkauskohdat iskukohdiksi [56]. Tutkimuksessa käytettiin testauskohtien määrittämiseen piirtokehikkoa, jolla tutkimuskohdat merkattiin vahaliidulla koekappaleen pintaan (kuvassa 32). Iskukohtien välisenä minietäisyytenä käytettiin 25 mm ja minimi reunaetäisyys oli vähintään 25 mm. Kuvassa 33 on esitetty iskukohtien väliset etäisyydet sekä iskukohtien reunaetäisyydet koekappaleiden reunoihin.



**Kuva 32.** Merkatut iskukohtat lieriömäisen (vasemmalla) ja kuutiomaisen (oikealla) koekappaleen pinnalla.



**Kuva 33.** Iskukohtien väliset etäisyydet ja reunaetäisyydet koekappaleissa.

Luotettavan kimmoarvon määrittämiseksi testattavasta rakenteesta tulee tehdä vähintään yhdeksän (9) hyväksyttyä kimmovasaramittaus. Testattavan rakenteen kimmoarvo määritetään mitattujen lukemien mediaanina. Mikäli 20 % kaikista testattavan koekappaleen lukemista eroaa mediaanista yli 30 %, on koko lukemaerä hylättävä [56]. Tutkimuksessa jokaiselle koekappaleelle tehtiin 13 kimmovasaramittaus yhtä tutkimustapausta kohti. Kimmovasarointia suoritettaessa yksittäisiä iskuja hylättiin iskujäljen perusteella, näissä tapauksissa isku suoritettiin uudestaan toisesta kohdasta. Kimmovasaramittausarvoja ei jouduttu hylkäämään liian suurien kimmoarvoerojen seurauksena. Yksittäisistä sarjoista hylättiin 1...2 iskun tulosta, koska mitatut kimmoarvot erosivat mediaanista yli 30 %, lähes poikkeuksetta hylätyt tulokset olivat liian suuria mediaaniin nähden.

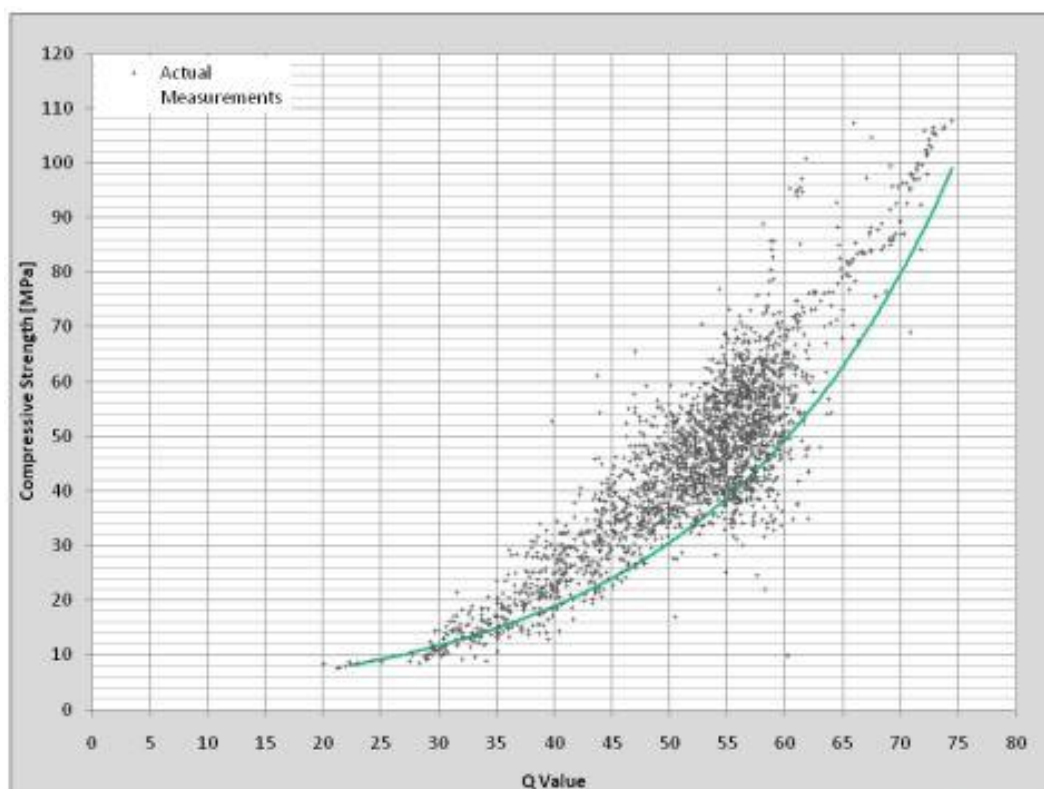
Tutkimuksen tulosten käsittelyssä poiketaan standardin EN 13791 [2] mukaisesta vaihtoehdon 1 mukaisesta valmiin rakenteen betonin ominaispuristuslujuuden arvioinnista epäsuorilla menetelmillä. Standardin mukaisessa porattujen koekappaleiden ja epäsuorien testitulosten vastaavuuden määrittämisessä luodaan yhteensopivuudeltaan paras suora tai

käyrä regressioanalyysillä saaduista tulospareista. Epäsuora testitulokset esitetään muuttujana ja poratuista koekappaleista mitattu puristuslujuus tämän muuttujan funktiona. Testimenetelmien vastaavuus määritetään puristuslujuuden 10 % alafraktilina. Puristuslujuuden arvioinnissa käytettävä testitulosten vastaavuus vastaa siis turvallisuus tasoa, jossa 90 % puristuslujuuksista oletetaan olevan suurempia kuin arvioitu puristuslujuus [2]. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon kimmovasarella mitattu puristuslujuus eroaa koekappaleiden todellisesta mitatusta puristuslujuudesta. Standardin mukaisella analyysillä saadaan määritettyä epäsuoralla tutkimusmenetelmällä mitatun puristuslujuuden ja porattujen koekappaleiden puristuslujuuden välille yhteys, jota voidaan yleistää tietyille betonityypille tietyissä olosuhteissa. Näin raskas menettely ei ole tarpeen, kun tarkoituksena on puhtaasti vertailla kimmovasarella mitattujen ja puristuskokeilla määritettyjen puristuslujuuksien eroja.

Kimmoasaran valmistajan Proceq:in tulostenkäsittelyohjelmalla Hammerlink pystytään valitsemaan tai määrittämään itse haluttu jakaantumiskäyrä. Tutkimuksessa käytettyyn kimmovasaraan voidaan jakaantumiskäyräksi asettaa standardissa EN 13791 [2] suositeltu 10 % alafraktilin jakaantumiskäyrä ilman erillistä tulosparien regressioanalyysiä. Kimmoasaran käyttämä 10 % alafraktilin jakaantumiskäyrä on määritetty yli 2300 kimmovasaramittauksen perusteella, mitkä on tehty kontrolloiduissa olosuhteissa Saksassa (Federal Institute for Materials and Testing, Berlin) ja Kiinassa (Shaanxi Province Construction Science Research Institute, China and Hunan University). Jakaantumiskäyrän määrittämisessä on käytetty suurta määrää ei betonityyppejä ja se soveltuu puristuslujuusalueelle 8...100 MPa [57]. Kuvassa 34 on esitetty kimmovasaran käyttämä yli 2300 kimmovasaratukseen perustuva 10 % alafraktilin jakaantumiskäyrä. Tuloksista määritetyllä käyrän kaavalla (21) saadaan määritettyä yksittäisten iskusarjojen kimmoarvon vastaavuus puristuslujuutena.

$$f_{ck.cube} = 2,77 \cdot e^{0,048 \cdot Q} \quad (21)$$

jossa  $f_{ck.cube}$  on kimmoarvoa vastaava kuutiopuristuslujuus [MPa] ja  $Q$  on mittaussarjan kimmoarvojen mediaani [Q].



**Kuva 34.** Kimmomasaran käyttämä 10 % alafraktilin jakaantumiskäyrä, joka on määritetty yli 2300 kimmomasaramittauksen perusteella [57].

## 4. MITTAUSTULOKSET

### 4.1 Lujuudenseurantakoekappaleiden puristuslujuus

Seuraavissa kappaleissa on esitetty lujuudenseurantakoekappaleiden kokeiden tulokset. Betonilaatujen puristuslujuuksien kehittymistä tarkkailtiin betonien ollessa 3, 7, 28, 91 ja 365 vuorokauden iässä. Kaikki lujuudenseurantakoekappaleet ovat muodoltaan lieriöitä, joiden nimellishalkaisija on 150 mm ja nimelliskorkeus 300 mm. Lujuudenseurantakoekappaleet valettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräsmuoteilla. Tiheydet  $s$  on määritetty koekappaleiden dimensioihin ja vedellä kyllästettyyn massa perustuen, tulos on pyöristetty lähimmän  $10 \text{ kg/m}^3$  tarkkuuteen standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti. Yksittäisten lujuudenseurantakoekappaleiden puristuslujuus on laskettu kaavan (2) mukaisesti. Taulukoissa on ilmoitettu valuerien (aamu = ap ja iltapäivä = ip) keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$ , valuerien yhdistetty keskimääräinen puristuslujuus  $f_{cm}$  sekä keskihajonta  $s$ , joka on laskettu kaavan (22) mukaisesti. Keskimääräiset puristuslujuuden arvot on pyöristetty standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti  $0,1 \text{ MPa}$  tarkkuuteen. Keskihajonta on pyöristetty  $0,1 \text{ MPa}$  tarkkuuteen saman periaatteen mukaisesti.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{n-1}} \quad (22)$$

jossa  $f_{ci}$  on yksittäinen koetulos [MPa],  $f_{cm}$  on koetulosten keskiarvo [MPa] ja  $n$  on koetulosten lukumäärä.

Liitteessä 8 on esitetty kaikkien lujuudenseurantakoekappaleiden tarkemmat mittaustulokset. Puristuskokeissa jokaiselle standardikoekappaleelle määritettiin murtotapa standardin EN 12390-3 [13] mallikuvien mukaisesti. Liitteessä 7 on esitetty numeroituna standardissa esitetyt murtotavat. Liitteessä esitetyistä murtotavoista tapaukset 9-12 ovat hyväksyttäviä murtotapoja lieriömäisille koekappaleille. Kaikki muut esitetyt murtotavat ovat standardin mukaisesti epätydyttäviä.

#### 4.1.1 C35/45 P50

Taulukossa 19 on esitetty betonilaadun C35/45 P50 lujuudenseurantakoekappaleiden tulokset. Valuerien betoneissa on havaittavissa selviä eroja niin puristuslujuuden kuin tiheyden osalta. Aamupäivän valuerässä betonin puristuslujuus on 28 vuorokauden iässä noin 8 % suurempi kuin iltapäivän valuerässä. Vastaavasti koekappaleista määritetyt tiheydet ovat aamupäivän valuerässä systemaattisesti suurempi kuin iltapäivän valuerässä. Suomen Betoniyhdistyksen julkaisemassa Betoniteknikan oppikirjassa BY 201 [17] on kerrottu, että 1 % ilmamäärän kasvu betonimassassa alentaa betonista mitattavaa puris-

tuslujuutta noin 5 %. Taulukossa 13 on esitetty tuoreen betonimassan ilmamäärämittausten tulokset, lujuudenseurantakoekappaleet on valettu ja tiivistetty mittauksen M1 aikaan. Taulukosta 13 havaitaan, että mittauksessa M1 iltapäivän valuerässä on ollut 1,5 % enemmän ilmaa kuin aamun valuerässä. Edellä esitetyn periaatteen mukaisesti 1,5 % ilmamäärän kasvu johtaa noin 7,5 % puristuslujuuden madaltumiseen, mikä suuruusluokaltaan vastaa valuerissä havaittua puristuslujuuksien eroa. Vastaavasti betonin ilmamäärä vaikuttaa suoraan myös koekappaleiden tiheyteen. Betoniannosten toteutuneissa ainemäärissä ei havaittu merkittäviä eroja valuerien betoniannosten välillä, mikä saattaisi selittää havaittuja lujuuseroja valuerien välillä. Betonilaadun valuerien ja valuerien yhdistetyt keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$  täyttävät betonilaadun nimellislajuuden. 28 vuorokauden iässä suoritetuissa kokeissa valuerien yhdistetyn keskimääräisen puristuslujuuden havaittiin olevan noin 38 % betonilaadun nimellislajuutta (35 MPa) suurempi.

Pääosa lujuudenseurantakoekappaleista murtui puristuskokeissa murtotapojen 10 ja 11 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto lieriön korkeuden keskialueelta tai hieman koekappaleen toisesta päästä. Ainostaan yksi lujuudenseurantakoekappaleista murtui epätyydyttävän murtotavan mukaisesti (murtotapa 2). Epätyydyttävän murtotavan ei havaittu vaikuttaneen lujuudenseurantakoekappaleen puristuslujuuteen.

**Taulukko 19.** Lujuudenseurantakoekappaleiden tulokset, C35/45 P50.

Arvosteluaika	n	3 vrk		7 vrk		28 vrk		91 vrk		356 vrk	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2360	2320	2360	2320	2370	2340	2370	2330	2370	2320
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	36,6	33,4	41,4	38,6	50,3	46,2	58,5	54,5	66,1	59,3
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	0,7	0,6	0,7	0,2	0,7	0,9	0,7	0,7	2,3	0,6
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	35,0		40,0		48,2		56,5		62,7	

#### 4.1.2 C30/37 P20

Taulukossa 20 on esitetty betonilaadun C30/37 P20 lujuudenseurantakoekappaleiden tulokset. Valuerien betoneissa on havaittavissa selviä eroja niin puristuslujuuden kuin tiheyden osalta. Iltapäivän valuerässä betonin puristuslujuus on 28 vuorokauden iässä noin 7,5 % suurempi kuin aamupäivän valuerässä. Vastaavasti koekappaleista määritetyt tiheydet ovat iltapäivän valuerässä systemaattisesti suurempia kuin aamupäivän valuerässä. Valuerien betonimassasta mitatuissa ilmamäärissä ei havaittu samanlaista yhteyttä lujuuseroon kuin betonilaadun C35/45 P50 tapauksessa. Betonilaadun C30/37 P20



ilmamäärä mittauksissa iltapäivän valuerässä oli 0,5 % enemmän ilmaa kuin aamupäivän valuerässä, minkä edellisessä kappaleessa esitetyn teorian mukaan pitäisi kasvattaa lujuuseroa noin 2,5 %. Betoniannosten toteutuneissa ainemäärissä ei havaittu merkittäviä eroja valuerien betoniannosten välillä, mikä saattaisi selittää havaittuja lujuuseroja valuerien välillä. Betonilaadun valuerien ja valuerien yhdistetyt keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$  täyttävät betonilaadun nimellislujuuden. 28 vuorokauden iässä suoritetuissa kokeissa valuerien yhdistetyn keskimääräisen puristuslujuuden havaittiin olevan noin 32 % betonilaadun nimellislujuutta (30 MPa) suurempi.

Pääosa lujuudenseurantakoe-kappaleista murtui puristuskokeissa murtotapojen 10 ja 11 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto lieriön korkeuden keskialueelta tai hieman koe-kappaleen toisesta päästä. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

**Taulukko 20.** Lujuudenseurantakoe-kappaleiden tulokset, C30/37 P20.

Arvostelu-aika	n	3 vrk		7 vrk		28 vrk		91 vrk		356 vrk	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2340	2370	2340	2370	2340	2370	2350	2380	2350	2360
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	27,0	28,7	31,3	33,8	38,1	41,2	45,9	48,1	51,8	53,4
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	1,1	0,9	1,2	0,9
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	27,9		32,5		39,6		47,0		52,6	

### 4.1.3 C50/60 P50

Taulukossa 21 on esitetty betonilaadun C50/60 P50 lujuudenseurantakoe-kappaleiden tulokset. Valuerien betoneissa ei havaittu merkittävää eroa puristuslujuuden osalta. Aamupäivän valuerässä betonin puristuslujuus on 28 vuorokauden iässä noin 1,2 % suurempi kuin iltapäivän valuerässä. Koe-kappaleista määritetyissä tiheyksissä havaittiin systemaattinen ero, mittausten mukaan iltapäivällä valetut kappaleet ovat tiheydeltään suurempia kuin aamupäivällä valetut. Erot eivät kuitenkaan ole systemaattisesti yhtä suuria kuin aiemmin valetuissa betonilaaduissa. Valuerien betonimassasta mitatuissa ilmamäärissä ei havaittu samanlaista yhteyttä lujuuseroon kuin betonilaadun C35/45 P50 tapauksessa. Betonilaadun C50/60 P50 ilmamäärä mittauksissa aamupäivän valuerässä oli 0,2 % enemmän ilmaa kuin aamupäivän valuerässä, minkä esitetyn teorian mukaan pitäisi kasvattaa lujuuseroa noin 1,0 %. Betoniannosten toteutuneissa ainemäärissä ei havaittu merkittäviä eroja valuerien betoniannosten välillä. Betonilaadun valuerien ja valuerien yhdistetyt kes-

kimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$  eivät täytä betonilaadun nimellislujuuden. 28 vuorokauden iässä suoritetuissa kokeissa valuerien yhdistetyn keskimääräisen puristuslujuuden havaittiin olevan noin 5,6 % betonilaadun nimellislujuutta (50 MPa) pienempi.

Pääosa lujuudenseurantakoeleista murtui puristuskokeissa murtotapojen 10 ja 11 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto lieriön korkeuden keskialueelta tai hieman koelele toisesta päästä. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

**Taulukko 21.** Lujuudenseurantakoeleiden tulokset, C50/60 P50.

Arvostelu-aika	n	3 vrk		7 vrk		28 vrk		91 vrk		356 vrk	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2330	2360	2360	2370	2340	2370	2350	2360	2350	2360
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	31,8	33,5	38,6	38,9	47,5	46,9	55,2	53,4	58,1	59,7
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	1,6	0,2	0,3	0,6	1,2	1,0	1,7	1,7	0,7	0,9
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	32,6		38,8		47,2		54,3		58,9	

#### 4.1.4 C35/45 huokostamaton

Taulukossa 22 on esitetty betonilaadun C35/45 huokostamaton lujuudenseurantakoeleiden tulokset. Valuerien betoneissa on havaittavissa selviä eroja puristuslujuuden osalta. Valuerien tiheyksissä ei havaittu merkittävää eroa. Iltapäivän valuerässä betonin puristuslujuus on 28 vuorokauden iässä noin 8,7 % suurempi kuin aamupäivän valuerässä. Valuerien betonimassasta mitatuissa ilmamäärissä ei havaittu samanlaista yhteyttä lujuuseroon kuin betonilaadun C35/45 P50 tapauksessa. Betonilaadun C35/45 ilmamäärä oli mittausten mukaan sama aamu- ja iltapäivän valuerissä. Betoniannosten toteutuneissa ainemäärissä havaittiin poikkeama sementtimäärän osalta, mikä vaikuttaa suoraan myös betoniannosten vesi-sementti-suhteeseen. Betoniannosraporttien mukaan iltapäivän valuerän betoniannoksessa on 10 kg/m<sup>3</sup> enemmän sementtiä kuin aamupäivän betoniannoksessa, mikä seurauksena iltapäivän betoniannoksen vesi-sementti-suhte on 0,02 pienempi kuin aamupäivän. Erot sementtimäärässä ja vesi-sementti-suhteessa saattavat osittain selittää valuerien välillä havaitun lujuuseron. Betonilaadun valuerien ja valuerien yhdistetyt keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$  täyttävät betonilaadun nimellislujuuden. 28 vuorokauden iässä suoritetuissa kokeissa valuerien yhdistetyn keskimääräisen puristuslujuuden havaittiin olevan noin 21 % betonilaadun nimellislujuutta (35 MPa) suurempi.

Pääosa lujuudenseurantakoekappaleista murtui puristuskokeissa murtotapojen 10 ja 11 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto lieriön korkeuden keskialueelta tai hieman koekappaleen toisesta päästä. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

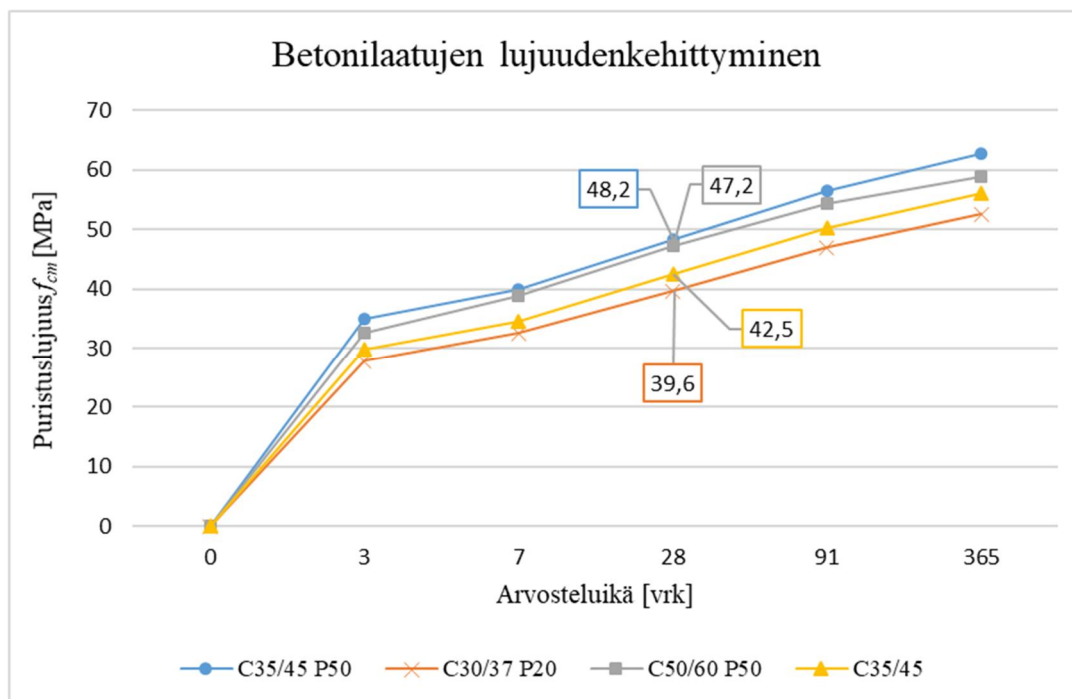
**Taulukko 22.** Lujuudenseurantakoekappaleiden tulokset, C35/45.

Arvosteluaika	n	3 vrk		7 vrk		28 vrk		91 vrk		356 vrk	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2380	2380	2380	2380	2370	2370	2380	2390	2380	2380
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	27,0	32,5	32,1	36,9	40,6	44,4	47,5	53,0	52,7	59,3
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	0,3	1,0	0,4	0,6	0,3	0,3	0,5	1,1	1,2	0,4
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	29,7		34,5		42,5		50,3		56,0	

#### 4.1.5 Lujuudenseurantakoekappaleiden lujuudenkehitys

Kuvassa 35 esitetty kaikkien betonilaatujen lujuudenseurantakoekappaleiden lujuuden kehittyminen kappaleiden valusta 365 vuorokauden ikään saakka. Kuvassa aamun ja iltapäivän valuerien puristuslujuustulokset on yhdistetty yhdeksi otokseksi. Kuvasta havaitaan, että kaikkien betonilaatujen lujuudenkehittymistä kuvaavat käyrät ovat muodoltaan samanlaisia. Kuvaajasta myös havaitaan, että merkittävin ero betonilaatujen lujuudenkehittymisessä tapahtuu aikavälillä 0-3 vuorokautta koekappaleiden valamisesta. Kolmen vuorokauden arvosteluiän jälkeen kaikkien betonilaatujen lujuudenkehitys on lähes identtistä. Lujuudenseurantatuloksissa merkittävin havainto on, että betonilaadun C35/45 P50 puristuslujuus on kaikissa arvosteluikien kohdalla suurempi kuin betonilaadulla C50/60 P50. Lisäksi muihin betonilaatuihin verrattuna, alkaa betonilaadun C50/60 P50 lujuudenkehitysnopeus hidastumaan 91 vuorokauden iän jälkeen selvemmin kuin muilla betonilaaduilla.

Betonilaatujen C35/45 P50 ja C50/60 P50 ainemääriä tarkasteltaessa (taulukot 7 ja 8) havaitaan, että sementin määrä ja vesi-sementti -suhde on betonilaaduissa lähes identtinen. Betonissa C50/60 P50 on käytetty sementin seosaineena silikajauhetta, jolla on puristuslujuutta kehittäviä ominaisuuksia. Betonilaatujen ainemäärien perusteella betonilaadun C50/60 P50 pitäisi olla puristuslujuudeltaan parempaa kuin betonilaadun C35/45 P50.



**Kuva 35.** Betonilaatujen lujuudenkehittyminen tutkimuksen kaikilla betonilaaduilla.

Varhaiseen lujuudenkehittymiseen vaikuttaa merkittävästi betonimassan lämpötila, jota seurattiin tutkimuksen valujen yhteydessä. Kuvassa 22 on esitetty lujuudenseuranta-koekappaleina käytettyjen teräsmuoteilla valettujen D150x300 standardikoekappaleiden hydrataatiolämpötilat varhaisen lujuuden kehittymisen aikaan. Kuvasta 22 havaitaan, että betonilaadun C50/60 P50 maksimihydrataatiolämpötila on noin 2 °C korkeampi kuin betonilaadulla C35/45 P50. Betonilaatujen hydrataatiolämpötilaerot eivät siis selitä betonilaatujen välillä havaittua lujuuseroa. Myöskään standardikoekappaleiden tiheyksissä ei havaittu poikkeamia, jotka selittäisivät betonilaatujen välillä havaitun epäloogisen lujuuseron. Tiheystutkimusten tuloksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.3.

## 4.2 Koekappaleiden puristuslujuus

Seuraavissa kappaleissa on esitetty nimellisesti 91 vuorokauden iässä testattujen koekappaleiden kokeiden tulokset. Esitetyt keskimääräiset puristuslujuudet ovat koekappaleista mitattuja lujuuksia, eikä niitä ole muunnettu korjauskertoimilla. Alla olevassa listassa on esitetty kaikille betonilaaduille tehdyt muodoltaan, kooltaan, valmistustekniikaltaan ja testausolosuhteitaan erilaiset tutkimussarjat:

- Valetut, nimellishalkaisijaltaan 150 mm ja nimellispituudeltaan 300 mm lieriöt, jotka valettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräsmuoteilla. Testaukset suoritettiin joko vedellä kyllästyneessä tilassa tai kuivana.
- Valetut, sivumitoiltaan 150 mm kuutiot, jotka valettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräsmuoteilla ja standardin mukaiset mitat täyttävillä muovimuoteilla.
- Valetut, nimellishalkaisijaltaan 100 mm ja nimellispituudeltaan 100 mm lieriöt, jotka valettiin muovimuoteilla.

- Poratut rakennekoekappaleet, jotka porattiin joko uudella tai kuluneella timantti-terällä sekä päät tasoitettiin joko hiomalla tai rikkiseoksella. Rakennekoekappaleiden nimellishalkaisijat (D) x nimellispituudet olivat:
  - D150 mm x 300 mm
  - D100 mm x 100 mm
  - D80 mm x 80 mm
  - D50 mm x 50 mm

Betonilaadulla C30/37 P20 tehtiin lisäksi rakennekoekappaleiden testausolosuhteita vertaileva tutkimus. Testaukset suoritettiin nimellisesti 91 vuorokauden ikäisenä. Kaikkien tutkimussarjojen koekappaleiden tiheydet määritettiin EN 12390-7 [54] mukaisella vesipunnituksella, tulos on pyöristetty lähimmän  $10 \text{ kg/m}^3$  tarkkuuteen standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti. Yksittäisten koekappaleiden puristuslujuus on laskettu kaavan (2) mukaisesti. Taulukoissa on ilmoitettu valuerien (aamu = ap ja iltapäivä = ip) keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$ , valuerien yhdistetty keskimääräinen puristuslujuus  $f_{cm}$  sekä keskihajonta  $s$ , joka on laskettu kaavan (22) mukaisesti. Keskimääräiset puristuslujuuden arvot on pyöristetty standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti 0,1 MPa tarkkuuteen. Keskihajonta on pyöristetty 0,1 MPa tarkkuuteen saman periaatteen mukaisesti.

Kaikkien betonilaatujen koekappalekohtaiset tarkemmat mittatiedot, lasketut kuormitus-pinta-alat, massat, tilavuudet, tiheydet, murtokuormat ja murtotavat on esitetty tämän tutkimuksen liitteissä 9-13. Puristuskokeissa jokaiselle koekappaleelle määritettiin murtotapa standardin EN 12390-3 [13] mallikuvien mukaisesti. Liitteessä 7 on esitetty numeroina standardissa esitetyt murtotavat. Liitteessä esitetyistä lieriömäisten koekappaleiden murtotavoista tapaukset 9-12 ovat hyväksyttäviä murtotapoja lieriömäisille koekappaleille. Kuutiomaisten koekappaleiden murtotavoista 1-3 ovat hyväksyttäviä murtotapoja. Kaikki muut (lieriöiden ja kuutioiden) esitetyt murtotavat ovat standardin mukaisesti epätyydyttäviä. Mikäli koekappaleen murtotapa on hyväksyttävä, ei murtotavan muuttumisen arvioitu vaikuttaneen puristuslujuustulokseen.

#### 4.2.1 Standardilieriöiden D150x300 lujuus

Tutkimuksessa käytettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräsmuoteilla valettuja, nimellishalkaisijaltaan (D) 150 mm ja nimellispituudeltaan 300 mm lieriöitä, käytetään koekappaleista nimitystä standardilieriö. Jokaisesta betonilaadusta testattiin standardilieriöitä kahdessa eri kosteusolosuhteessa. Kummankin tutkimussarjan koekappaleita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, minkä jälkeen standardilieriöitä varastoitiin huoneilmassa. Kummastakin valuerästä (aamu ja iltapäivä) testattiin 9 kpl standardilieriöitä siten, että ne olivat täysin vedellä kyllästyneessä tilassa. Vedellä kyllästyneenä testattujen standardilieriöiden kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 23. Lisäksi kummastakin valuerästä testattiin 6 kpl standardilieriöitä kuivana eli lieriöitä oli varastoitu huoneilmassa. Kuivana testattujen standardilieriöiden kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 24. Kummassakin koesarjassa standardilieriöiden päät tasoitettiin hiomalla.

Koetuloksista havaitaan, että vedellä kyllästettynä testattujen standardilieriöiden puristuslujuudet ovat systemaattisesti noin 4...6 % heikompia kuin kuivana testattujen standardilieriöiden puristuslujuudet. Kosteusolosuhteella ei havaittu olevan merkitystä puristuslujuuskokeiden keskihajontaan  $s$ , joka oli kaikissa tutkimussarjoissa matala.

Pääosa standardilieriöistä murtui puristuskokeissa murtotapojen 10 ja 11 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto lieriön korkeuden keskialueelta tai hieman lieriön toisesta päästä. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa. Eri kosteusolosuhteiden välillä ei havaittu murtotavoissa eroavaisuuksia.

**Taulukko 23.** Vedellä kyllästettynä testattujen D150x300 standardilieriöiden tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	9	2350	2330	2340	2340	2340	2330	2360	2370
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	9	57,5	52,9	45,1	46,0	48,5	48,2	43,8	51,1
Keskihajonta $s$ [MPa]	9	3,3	1,3	0,4	1,2	2,3	0,7	0,9	0,6
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	18	55,2		45,5		48,3		47,5	

**Taulukko 24.** Kuivana testattujen D150x300 standardilieriöiden tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2350	2320	2340	2340	2340	2340	2360	2360
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	60,2	56,4	47,1	48,2	50,9	50,6	47,2	53,5
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	1,3	1,7	0,7	1,2	0,9	0,5	0,3	1,7
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	58,3		47,7		50,8		50,4	

## 4.2.2 Standardikuutioiden 150x150x150 lujuus

Tutkimuksessa käytettiin standardin EN 12390-1 [5] mukaisilla teräsmuoteilla sekä standardin mittavaatimukset täyttävillä muovimuoteilla valettuja kuutioita, joiden nimellisivumitat olivat 150 mm. Käytetään koekappaleista nimitystä standardikuutio. Jokaisen betonilaadun standardikuutioiden testaukset suoritettiin kuivana. Kummankin tutkimusarjan koekappaleita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, minkä jälkeen standardikuutioita varastoitettiin huoneilmassa. Kummastakin valuerästä testattiin 3 kpl teräsmuoteilla ja 3 kpl muovimuoteilla valettua standardikuutiota. Standardikuutioiden kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 25.

Koetuloksista havaitaan, että muovimuoteilla valettujen standardikuutioiden puristuslujuudet ovat systemaattisesti noin 2...6 % heikompia kuin teräsmuoteilla valettujen standardikuutioiden puristuslujuudet. Eri muottimateriaalilla valmistettujen standardikuutioiden keskihajonnat  $s$  ovat hyvin saman suuntaiset yksittäisiä poikkeamia lukuun ottamatta. Tutkimussarjojen otoskoot ovat todella suppeita, joten yksittäisen standardikuution keskimääräistä matalampi tai korkeampi puristuslujuustulos vaikuttaa hyvin paljon hajontaan, niin kuin myös keskimääräiseen puristuslujuuteen  $f_{cm}$ . Tästä syystä hajonnan eroavaisuuksiin ei voida ottaa tarkemmin kantaa. Vaikka otoskoot ovatkin suppeita, niin systemaattisesti havaitun lujuuseron perusteella voidaan sanoa, että teräsmuoteilla valetuista standardikuutioista saadaan paremmat puristuslujuustulokset kuin muovimuoteilla valetuista standardikuutioista.

Kaikki standardikuutiot murtuivat puristuskokeissa murtotavan 2 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto, jossa kuutioiden seinämät ”räjähtivät” irti kuutioista. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

**Taulukko 25.** Standardikuutioiden 150x150x150 tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
<b>Teräsmuotti</b>									
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2320	2310	2350	2340	2350	2350	2370	2370
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	63,5	59,2	57,3	59,8	63,9	66,8	61,0	67,8
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	4,4	1,1	0,7	0,8	5,3	0,5	0,9	0,9
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	61,3		58,6		65,4		64,4	
<b>Muovimuotti</b>									
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	3	2310	2300	2330	2330	2350	2350	2370	2370
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	3	57,2	59,0	53,8	56,1	63,7	64,6	57,7	65,4
Keskihajonta $s$ [MPa]	3	3,3	2,4	1,5	0,4	0,8	0,9	0,4	0,2
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	58,1		55,0		64,2		61,5	

### 4.2.3 Porattujen D150x300 rakennekoekappaleiden lujuus

Taulukossa 26 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 150 mm ja nimellispituudeltaan 300 mm porattujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Rakennekoekappaleet porattiin betonikappaleista, joita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka. Tämän jälkeen porattavia betonikappaleita ja porattuja rakennekoekappaleita varastoitiin huoneilmassa. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 12 kpl rakennekoekappaleita. Poraukset suoritettiin uudella timanttiterällä ja päiden tasoittaminen tehtiin hiomalla. Puristuskokeet suoritettiin rakennekoekappaleiden ollessa kosteusolosuhteeltaan kuivia.

Kaikissa betonilaaduissa aamun ja iltapäivän valuerien välinen ero puristuslujuudessa on samaa suuruusluokkaa kuin valetuissa vastaavan kokoisissa standardilieriöissä ja lujuudenteurantakoekappaleissa. Huomion arvoista on, että porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskihajonnat  $s$  ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin standardilieriöiden. Erot eivät suuruusluokaltaan ole kuitenkaan merkittäviä. Rakennekoekappaleiden ja



standardilieriöiden tiheydet ovat samankaltaiset. Rakennekoe-kappaleiden tuloksia on tarkemmin analysoitu myöhemmissä kappaleissa.

Pääosa rakennekoe-kappaleista D150x300 murtui puristuskokeissa murtotapojen 11 ja 12 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto hieman lieriön toisesta päästä tai lieriön muodostui pitkä lieriön korkeussuuntaisia halkeamia. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

**Taulukko 26.** D150x300 rakennekoe-kappaleiden tulokset.

Betoni	n	C35/45, P50		C30/37, P20		C50/60, P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	12	2330	2320	2340	2330	2330	2330	2350	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	54,8	52,1	42,6	44,7	47,5	46,8	43,1	49,4
Keskihajonta $s$ [MPa]	12	1,2	1,0	0,5	0,7	1,0	1,0	0,5	1,2
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	24	53,4		43,7		47,1		46,2	

#### 4.2.4 Valettujen D100x100 koekappaleiden lujuus

Taulukossa 27 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 100 mm ja nimellispituudeltaan 100 mm valettujen koekappaleiden kokeiden tulokset. Koekappaleet valettiin muovista valmistetuilla muoteilla, jotka täyttävät halkaisijan osalta standardin EN 12390-1 [5] mitta-vaatimukset. Muottien sisämittana valittiin siten, että valettujen koekappaleiden pituuden ja halkaisijan suhteeksi (L/D-suhde) tuli 1,0. Koekappaleita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, minkä jälkeen koekappaleita varastoitettiin huoneilmassa. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä testattiin kuusi koekappaletta, joiden päät tasoitettiin hiomalla. Puristuskokeet suoritettiin koekappaleiden ollessa kosteusolosuhteeltaan kuivia.

Koekappaleiden kokeiden tuloksissa ei ole merkittävää eroa tiheyden ja keskihajonnan  $s$  osalta muihin valettuihin koekappaleisiin verrattuna. Puristuslujuustulosten analysointi on esitetty myöhemmissä kappaleissa. Pääosa koekappaleista D100x100 murtui puristuskokeissa murtotavan 10 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto koekappaleen keskialueelta. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

**Taulukko 27.** Valettujen D100x100 koekappaleiden tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2330	2320	2360	2360	2360	2360	2390	2390
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	72,3	67,2	64,4	66,0	71,2	74,4	67,1	73,0
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	1,6	3,4	1,3	1,6	1,5	2,2	2,4	1,8
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	69,8		65,2		72,8		70,1	

#### 4.2.5 Porattujen D100x100 rakennekoekappaleiden lujuus

Taulukoissa 28-30 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 100 mm ja nimellispituudeltaan 100 mm porattujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Rakennekoekappaleet porattiin standardilieriöiden (D150x300) kokoisista betonilieriöistä, joita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka. Tämän jälkeen porattavia betonikappaleita ja porattuja rakennekoekappaleita varastoitettiin huoneilmassa. Kaikkien tutkimussarjojen puristuskokeet suoritettiin rakennekoekappaleiden ollessa kosteusolosuhteeltaan kuivia.

Taulukossa 28 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 12 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 28.** D100x100 rakennekoekappaleiden (hionta, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	12	2290	2280	2330	2320	2340	2350	2360	2350
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	64,2	60,6	53,5	55,1	66,7	63,4	58,8	66,5
Keskihajonta $s$ [MPa]	12	2,5	3,4	2,5	2,5	1,1	2,1	1,6	1,8
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	24	62,4		54,3		65,0		62,6	

Taulukossa 29 on esitetty kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 6 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 29.** D100x100 rakennekoekappaleiden (hionta, kulunut terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2290	2300	2320	2310	2330	2340	2350	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	61,5	61,4	55,1	55,0	63,7	64,2	55,9	62,6
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	3,8	3,1	2,0	1,8	1,1	2,0	0,7	1,2
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	61,5		55,0		63,9		59,3	

Taulukossa 30 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 6 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 30.** D100x100 rakennekoekappaleiden (rikkiseos, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2290	2300	2310	2310	2330	2330	2350	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	60,3	58,7	47,4	49,4	55,0	55,4	52,1	57,7
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	3,3	3,3	2,8	3,1	2,3	1,9	1,6	1,2
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	59,5		48,4		55,2		54,9	

Tuloksista havaitaan, että porattujen, nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskihajonnat  $s$  ovat pääsääntöisesti hieman suurempia kuin standardilieriöiden. Erot eivät suuruusluokaltaan ole kuitenkaan merkittäviä. Betonilaadun C35/45 P50 rakennekoekappaleiden tiheyksissä havaittiin kohtalainen ero verrattuna saman betonilaadun standardilieriöiden tiheyksiin. Muissa betonilaaduissa rakennekoekappaleiden ja standardilieriöiden tiheydet ovat samankaltaiset. Rakennekoekappaleiden tuloksia on tarkemmin analysoitu myöhemmissä kappaleissa.

Pääosa rakennekoekappaleista D100x100 murtui puristuskokeissa murtotavan 10 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto koekappaleen keskialueelta. Poikkeuksena murtotavoissa on betonilaadun C30/37 P20 rikkiseoksella tasoitettut rakennekoekappaleet. Kyseisessä tutkimussarjassa kaikkien rakennekoekappaleiden murtotavan arvioitiin olevan murtotapa 12, jossa lieriön pinnoille muodostuu pituusakselin ja kuormituksen suuntaisia halkeamia. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

#### 4.2.6 Porattujen D80x80 rakennekoekappaleiden lujuus

Taulukoissa 31-33 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 80 mm ja nimellispituudeltaan 80 mm porattujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Rakennekoekappaleet porattiin standardilieriöiden (D150x300) kokoisista betonikappaleista, joita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka. Tämän jälkeen porattavia betonikappaleita ja porattuja rakennekoekappaleita varastoitettiin huoneilmassa. Kaikkien tutkimussarjojen puristuskokeet suoritettiin rakennekoekappaleiden ollessa kosteusolosuhteeltaan kuivia.

Taulukossa 31 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 18 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 31.** D80x80 rakennekoekappaleiden (hionta, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	18	2330	2320	2340	2330	2340	2360	2360	2360
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	18	68,2	65,9	53,8	55,5	68,0	68,2	59,3	66,4
Keskihajonta $s$ [MPa]	18	2,5	4,5	3,5	2,7	2,5	2,0	2,9	3,0
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	36	67,0		54,6		68,1		62,9	

Taulukossa 32 on esitetty kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 6 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 32.** D80x80 rakennekoekappaleiden (hionta, kulunut terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2300	2310	2330	2320	2310	2340	2350	2350
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	62,5	61,8	56,3	56,7	62,8	66,2	56,7	63,1
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	3,5	5,0	3,7	4,2	3,0	2,7	2,7	2,8
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	62,1		56,5		64,5		59,9	

Taulukossa 33 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 6 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 33.** D80x80 rakennekoekappaleiden (rikkiseos, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6	2340	2320	2340	2330	2330	2340	2360	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	61,2	60,0	51,5	50,8	56,4	55,4	53,1	58,0
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	3,4	4,8	2,8	2,6	3,3	4,7	1,1	2,6
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	60,6		51,2		55,9		55,5	

Tuloksista havaitaan, että porattujen, nimellishalkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskihajonnat  $s$  ovat pääsääntöisesti hieman suurempia kuin standardilieriöiden. Erot eivät suuruusluokaltaan ole kuitenkaan merkittäviä. Betonilaadun C35/45 P50 rakennekoekappaleiden tiheyksissä havaittiin kohtalainen ero verrattuna saman betonilaadun standardilieriöiden tiheyksiin. Tiheysero ei kuitenkaan ole niin suuri kuin D100 rakennekoekappaleiden tapauksessa. Muissa betonilaaduissa rakennekoekappaleiden ja standardilieriöiden tiheydet ovat samankaltaiset. Rakennekoekappaleiden tuloksia on tarkemmin analysoitu myöhemmissä kappaleissa.

Pääosa rakennekoekappaleista D80x80 murtui puristuskokeissa murtotavan 10 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto koekappaleen keskialueelta. Poikkeuksena murtotavoissa on betonilaadun C35/45 P50 uudella terällä poratut ja hiomalla tasoitettut rakennekoekappaleet. Kyseisessä tutkimussarjassa kaikkien rakennekoekappaleiden murtotavan arvioitiin olevan murtotapa 12, jossa lieriön pinnoille muodostuu pituusakselin ja kuormituksen suuntaisia halkeamia. Epättydyttäviä murtotapoja ei havaittu puristuskokeissa.

#### 4.2.7 Porattujen D50x50 rakennekoekappaleiden lujuus

Taulukoissa 34-36 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 50 mm ja nimellispituudeltaan 50 mm porattujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Rakennekoekappaleet porattiin standardilieriöiden (D150x300) kokoisista betonikappaleista, joita jälkihoidettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka. Tämän jälkeen porattavia betonikappaleita ja porattuja rakennekoekappaleita varastoitettiin huoneilmassa. Kaikkien tutkimussarjojen puristuskokeet suoritettiin rakennekoekappaleiden ollessa kosteusolosuhteeltaan kuivia.

Taulukossa 34 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 12 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 34.** D50x50 rakennekoekappaleiden (hionta, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	12	2330	2330	2360	2350	2360	2360	2350	2360
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	67,6	64,0	52,3	54,5	64,8	68,1	62,1	70,7
Keskihajonta $s$ [MPa]	12	5,0	7,3	4,8	3,9	9,0	6,9	4,8	2,9
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	24	65,8		53,4		66,5		66,4	

Taulukossa 35 on esitetty kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 8 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 35.** D50x50 rakennekoekappaleiden (hionta, kulunut terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8	2290	2290	2280	2280	2340	2360	2360	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	8	57,5	53,7	54,8	52,7	49,4	48,4	58,8	63,9
Keskihajonta $s$ [MPa]	8	14,2	8,4	4,8	7,9	11,9	12,2	2,6	3,8
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	16	55,6		53,8		48,9		61,3	

Taulukossa 36 on esitetty uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset. Kaikkien betonilaatujen jokaisesta valuerästä porattiin 8 kpl rakennekoekappaleita.

**Taulukko 36.** D50x50 rakennekoekappaleiden (rikkiseos, uusi terä) tulokset.

Betoni	n	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
		ap	ip	ap	ip	ap	ip	ap	ip
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8	2310	2310	2320	2330	2340	2350	2360	2340
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	8	46,6	45,3	43,2	37,3	55,5	47,2	48,3	55,5
Keskihajonta $s$ [MPa]	8	8,8	19,1	10,2	15,1	2,6	11,8	4,0	2,7
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	16	45,9		40,3		51,3		51,9	

Tuloksista havaitaan, että porattujen, nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskihajonnat  $s$  ovat huomattavasti suurempia kuin standardilieriöillä. Erot korostuvat puristuslujuuden kasvaessa. Myös tutkimussarjojen välillä havaittiin merkittäviä eroja keskihajonnoissa, varsinkin huokostettujen betonien kohdalla. Puristuskokeissa betonilaadun C50/60 P50 kuluneella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet eivät täyttäneet betonilaadun nimellislujuuutta. Uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden tiheyksissä ei havaittu vastaavia eroja kuin D80x80 ja D100x100 rakennekoekappaleiden tapauksissa. Kuitenkin betonilaatujen C35/45 P50 ja C30/37 P20 tapauksissa kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden tiheydet ovat selvästi matalampia kuin betonilaatujen standardilieriöiden tiheydet. Muissa

betonilaaduissa rakennekoekappaleiden ja standardilieriöiden tiheydet ovat samankaltaiset. Rakennekoekappaleiden tuloksia on tarkemmin analysoitu myöhemmissä kappaleissa.

Pääosa rakennekoekappaleista D50x50 murtui puristuskokeissa murtotavan 10 mukaisesti. Murtotapana oli siis kartiomurto koekappaleen keskialueelta. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuskokeissa arvioitiin yksittäisissä tapauksissa rikkikerroksen murtumisen vaikuttaneen puristuslujuustulokseen. Kyseisissä tapauksissa murtotapa oli siis epätydyttävä. Rikkikerroksen murtumisia esiintyi betonilaatujen C35/45 P50 iltapäivän, C30/37 P20 aamun ja iltapäivän sekä C50/60 P50 iltapäivän valuerien rakennekoekappaleissa. Taulukon 36 tuloksissa on mukana epätydyttävien rakennekoekappaleiden tulokset. Myöhemmin tässä työssä esitetyissä tulosten analysoinnissa epätydyttävällä murtotavalla murtuneiden rakennekoekappaleiden tuloksia ei ole huomioitu. Epätydyttäviä murtotapoja ei havaittu muissa puristuskokeissa.

#### **4.2.8 Rakennekoekappaleiden lujuus eri kosteuspiitoisuuksissa**

Taulukossa 37 on esitetty nimellishalkaisijaltaan (D) 50 mm, 80 mm ja 100 mm rakennekoekappaleiden kokeiden tulokset eri kosteusolosuhteissa. Rakennekoekappaleiden halkaisijan ja pituuden suhde on kaikissa tapauksissa 1,0. Tutkimus tehtiin ainoastaan betonilaadulle C30/37 P20. Rakennekoekappaleet porattiin betonikappaleista, joita jälkihoitettiin muottien purkamisen jälkeen vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka. Tämän jälkeen porattavia betonikappaleita ja porattuja rakennekoekappaleita varastoitiin huoneilmassa. Kummastakin valuerästä timanttikorattiin 8 kpl D50, 6 kpl D80 ja 6 kpl D100 rakennekoekappaleita, joiden päät tasoitettiin hiomalla.

Taulukon ylemmässä osassa on esitetty tulokset tutkimussarjoille, jotka on ennen puristuskokeiden suorittamista kyllästetty vedellä ja rakennekoekappaleet on otettu huoneilmaan 72 tuntia ennen puristuskokeiden suorittamista. Taulukon alemman osan tuloksissa rakennekoekappaleet on otettu vedestä pois 16 tuntia ennen puristuskokeiden suorittamista. Kaikkien tutkimussarjojen rakennekoekappaleet murtuivat puristuskokeissa murtotavan 10 mukaisesti. Tulosten analysointi on esitetty myöhemmissä kappaleissa.



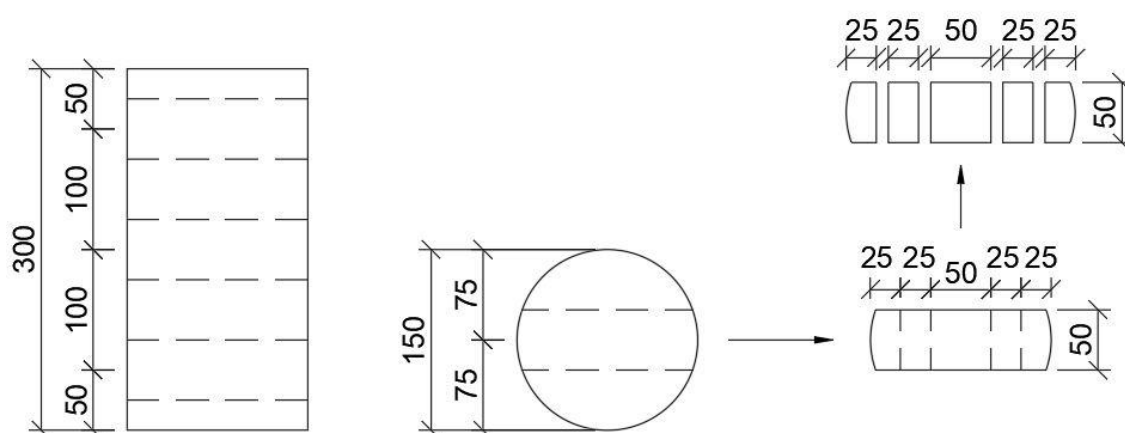
**Taulukko 37.** Eri kosteusolosuhteissa testattujen rakennekoekappaleiden tulokset.

Rakennekoekappaleen halkaisija ja pituus	n	D50x50		n	D80x80		D100x100	
		ap	ip		ap	ip	ap	ip
<b>Vedellä kyllästetty, jonka jälkeen ilmakeivattu 72 h</b>								
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8	2360	2340	6	2340	2330	2320	2320
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	8	53,1	57,8	6	52,6	55,1	49,8	51,5
Keskihajonta $s$ [MPa]	8	5,3	4,9	6	3,6	2,7	1,6	2,9
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	16	55,4		12	53,9		50,7	
<b>Vedellä kyllästetty, jonka jälkeen ilmakeivattu 16 h</b>								
Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8	2340	2330	6	2330	2340	2310	2310
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	8	50,5	55,2	6	51,1	53,6	49,9	50,5
Keskihajonta $s$ [MPa]	8	4,0	2,7	6	3,0	3,2	2,2	2,0
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	16	52,9		12	52,3		50,2	

### 4.3 Porattavien valukappaleiden ja standardilieriöiden tiheys

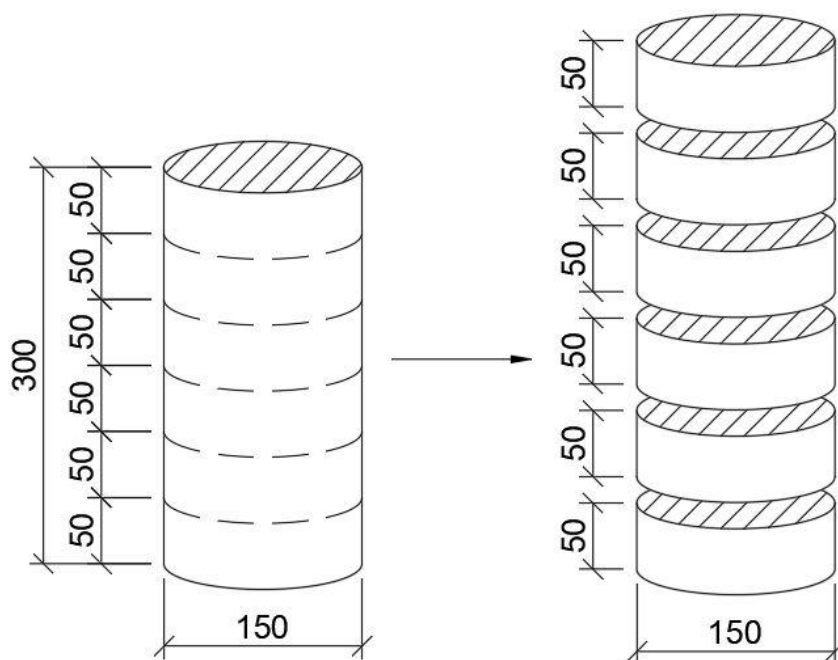
Tutkimuksen yhteydessä porattavaksi tarkoitettujen valukappaleiden ja standardilieriöiden tiheyksiä tarkasteltiin tarkemmin. Kummassakin tapauksessa tutkittavat valulieriöt olivat kooltaan D150x300. Normaalitylanteessa testattavalle koekappaleelle on määritetty tiheys, joka käsittää koko kappaleen tiheyden. Tarkemmissa tutkimuksissa muovimuoteilla valettujen porattavaksi tarkoitettujen valukappaleiden ja teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden eri pystysuuntaisista tasoista valmistettiin koekappaleita, joiden tiheydet määritettiin erikseen. Tiheydet määritettiin kappaleen 3.8.1 mukaisesti vedellä kyllästyneessä tilassa ja koekappaleiden tilavuudet määritettiin vesiupotuksen avulla. Tarkempi tiheystutkimus tehtiin, koska tutkimuksen edetessä epäiltiin, että etenkin muovimuoteilla valettujen valukappaleiden ulkopinnoilla esiintyy tiheydeltään huomattavasti heikompia alueita verrattuna valukappaleen keskialueeseen. Lisäksi tutkimuksessa ja valmisbetonitehtaalla rinnakkain tehdyissä lujudenseurantatutkimuksissa havaittiin eroava-osuuksia, joiden epäiltiin aiheutuneet tiivistystekniikasta.

Muovimuoteilla valettujen valukappaleiden tiheystutkimus tehtiin jokaisella tutkimuksen betonilaadulla siten, että jokaisesta iltapäivän valuerästä tutkittiin kaksi valulieriötä. Muovimuoteilla valetuista valukappaleista timanttikorattiin valukappaleen poikkisuunnassa näytteet kolmesta eri tasosta siten, että valukappaleen tiheys pystyttiin määrittämään tasoittain tietyltä valukappaleen sädealueelta kuvan 36 mukaisesti. Poraustasoina käytettiin 50 mm, 150 mm ja 250 mm valukappaleen yläpinnasta mitattuna. Näytteiden poraukseen käytettiin uutta timanttiterää. Valukappaleesta poikkisuuntaan läpiporatut näytteet katkaistiin timanttikorauksen jälkeen timanttisahaamalla siten, että tasolta pystyttiin määrittämään tiheydet 25 mm sädepituuden mukaiselta alueelta. Poikkisuuntaan porattujen näytteiden katkaisukohtat on esitetty kuvassa 36.



**Kuva 36.** Muovimuoteilla valettujen valukappaleiden tiheystutkimuksen poraustasot ja poikkisuuntaan porattujen näytteiden katkaisuperiaate.

Teräsmuoteilla valettujen standardikoe-kappaleiden tiheystutkimus tehtiin jokaisella tutkimuksen betonilaadulla. Betonilaadulla C35/45 P50 ja C50/60 P50 tutkimukseen käytettiin aamun valuerän standardilieriöitä ja betonilaadulla C30/37 P20 ja C35/45 iltapäivän valuerän standardilieriöitä. Tiheystutkimuksessa standardilieriöt timanttisahattiin poikkisuunnassa kiekkoiksi siten, että standardilieriön tiheys pystyttiin määrittämään tasoittain 50 mm korkuiselta alueelta. Standardilieriöiden sahausperiaate on esitetty kuvassa 37. Tiheystutkimuksen yhteydessä tutkittiin lisäksi samalla tutkimusperiaatteella valmisbetonitehtaalla valmistettujen standardilieriöiden tiheyksiä. Valmisbetonitehtaalla hankittujen standardilieriöiden betonin lujuusluokka oli C30/37 P50. Valmisbetonitehtaalla valetut standardilieriöt eroavat tutkimuksessa käytetyistä muista standardilieriöistä tiivistystekniikan osalta. Tässä tutkimuksessa kaikki valetut koe-kappaleet tiivistettiin standardin EN 12390-2 [6] mukaisesti tärypöydällä. Valmisbetonitehtaalla standardilieriöiden tiivistäminen suoritettiin kolmessa kerroksessa sauvatäryntä käyttäen.



*Kuva 37. Teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden tiheystutkimuksen katkaisuperiaate.*

#### 4.3.1 Porattavien valukappaleiden tiheystutkimuksen tulokset

Taulukossa 38 on esitetty muovimuoteilla valettujen D150x300 valukappaleiden tiheystutkimusten tulokset. Tiheystutkimuksessa ei havaittu tasoittain selviä säännönmukaisia tiheyseroja lieriöiden ulkopinnan ja keskiosan välillä. Ainut selvä säännönmukaisuus havaittiin huokostetuissa betonilaaduissa ylimmän poraustason sädealueella 0...25 mm. Kaikilla huokostetuilla betonilaaduilla ylimmän poraustason ulkoreunan tiheys oli tason näytteistä heikoin. Tarkasteltaessa koko poraustason keskiarvoa havaitaan, että lieriöiden tiheys kasvaa pääsääntöisesti lieriön yläpinnasta pohjaa kohti. Sama havainto tehtiin rakennekoekappaleiden D50x50, D80x80 ja D100x100 tutkimusten yhteydessä. Standardin EN 206 [7] mukaan tiheyden hyväksyttävä vaihteluväli  $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ , tavoitteellisesta tiheydestä. Tutkimuksessa kaikki betonilaadut ovat normaalibetoneita, joille keskimääräisenä tiheytenä voidaan pitää  $2300 \text{ kg/m}^3$ . Tutkimuksen koekappaleet täyttivät tiheysvaatimuksen.

Huokostamattoman betonilaadun C35/45 tapauksessa tutkimuksessa havaittiin selvä säännönmukaisuus poraustason sädealueilla. Kaikilla poraustasoilla lieriön keskiosan sädealue 50...75 mm on tiheydeltään heikoin. Tiheydeltään suurin jokaisella poraustasolla on sädealue 25...50 mm. Havaittu säännönmukaisuus saattaa aiheutua siitä, että betonimassaa tiivistettäessä ilmahuokokset pyrkivät ylöspäin liikuessaan siirtymään myös muottipintoja kohti. Tällöin lieriön keskellä olevan betonimassan tiivistyminen kestää ajallisesti luonnollisesti reuna-alueita kauemmin. Havaittu tiheysero on kuitenkin merki-

tyksettömän pieni, eikä sen arvioitu vaikuttavan merkittävästi tutkimuksen tutkimustuloksiin. Muovimuoteilla valettujen valulieriöiden tarkemmat mittaustulokset on esitetty tutkimuksen liitteessä 14.

**Taulukko 38.** Muovimuoteilla valettujen porattavien valukappaleiden tiheydet [ $\text{kg/m}^3$ ] eri tasoissa ja sädealueilla.

Betoni	Poraustaso [mm]	Sädealue lieriön ulkopinnasta [mm]			Keskiarvo poraustasolla
		0...25	25...50	50...75	
C35/45 P50	50	2296	2336	2308	2313
	150	2334	2320	2292	2315
	250	2354	2345	2346	2348
C30/37 P20	50	2330	2349	2350	2343
	150	2348	2336	2312	2332
	250	2332	2356	2347	2345
C50/60 P50	50	2312	2323	2319	2318
	150	2347	2338	2341	2342
	250	2367	2370	2383	2373
C35/45	50	2382	2386	2361	2376
	150	2359	2374	2346	2360
	250	2363	2386	2336	2361

### 4.3.2 Standardilieriöiden tiheystutkimuksen tulokset

Taulukossa 39 on esitetty teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden D150x300 tiheystutkimusten tulokset. Tuloksia on havainnollistettu kuvassa 38. Taulukossa ja kuvassa on esitetty sekä tässä tutkimuksessa valettujen, että valmisbetonitehtaalla valettujen standardilieriöiden tulokset. Tutkimuksen betonilaatujen tiivistys tehtiin tärypöydällä ja valmisbetonitehtaalla sauvatäryttimellä. Tuloksista havaitaan, että tämän tutkimuksen huokostetuilla betonilaaduilla tiheydet kasvavat systemaattisesti standardilieriön valupinnasta pohjaa kohti. Huokostettujen betonilaatujen standardilieriöiden valupinnan ja pohjakerroksen välillä havaittiin olevan noin 119...132  $\text{kg/m}^3$  tiheysero. Valmisbetonitehtaalla valetuissa kappaleissa on havaittavissa selviä kerrostumia, tiheys ei kasva tasaisesti valupinnasta pohjaa kohti. Valmisbetonitehtaalla valettujen standardilieriöiden valupinnan ja pohjakerroksen välillä havaittiin olevan noin 107...161  $\text{kg/m}^3$  tiheysero.

Tuloksista havaitaan myös, että tämän tutkimuksen huokostetuilla betonilaaduilla tiheys kasvaa kohtalaisen tasaisesti aina tasolle 200...250 mm saakka. Viimeisellä tarkastelutasolla tiheys kasvaa jokaisella huokostetulla betonilaadulla (tutkimus ja valmisbetonitehdas) voimakkaammin, mikä viittaa siihen, että standardilieriöiden pohjalle on odotetusti painunut hieman muita kerroksia enemmän betonin runkoainetta. Mikäli standardilieriöi-

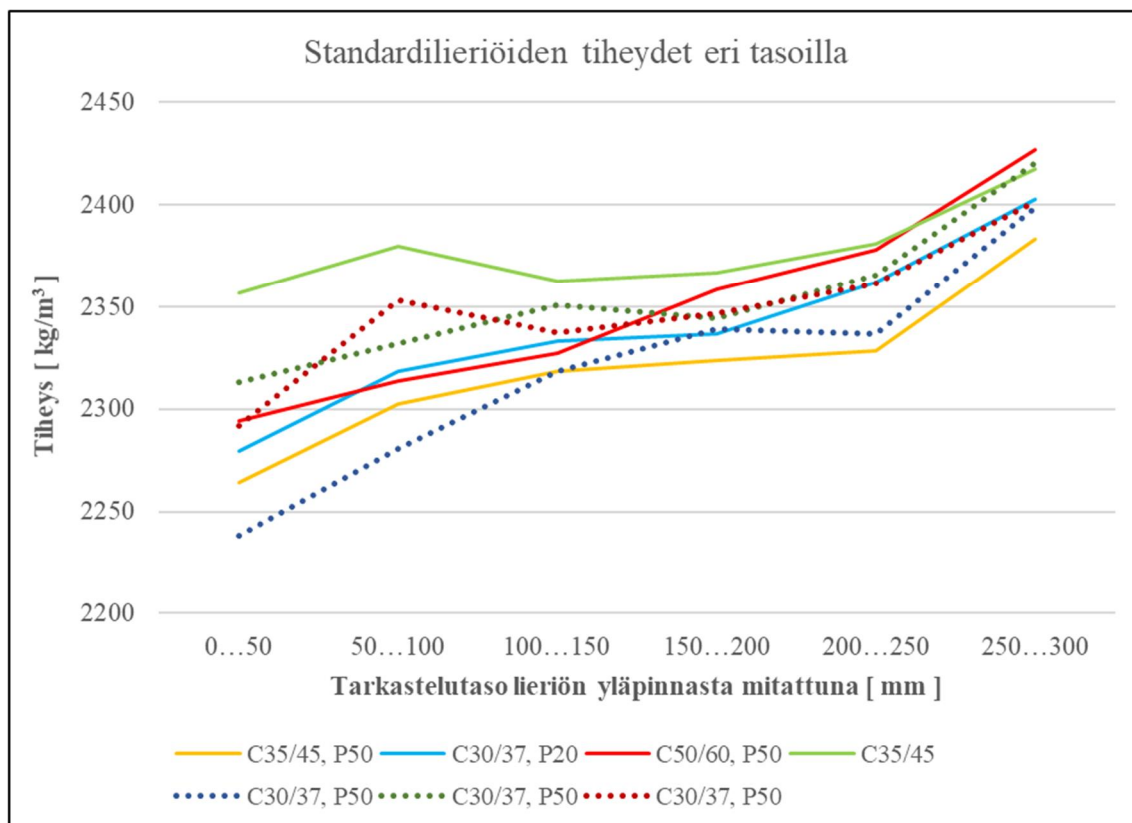
den pohjakerroksia 250...300 mm ei huomioida, on tarkastelutasojen välillä maksimissaan tutkimuksen betonilaaduilla noin 64...84 kg/m<sup>3</sup> tiheysero ja valmisbetonitehtaan betonilaadulla noin 52...99 kg/m<sup>3</sup> tiheysero.

Huokostamattomalla betonilaadulla tiheys kasvaa tarkastelutasoa 100...150 mm lukuun ottamatta systemaattisesti valupinnasta pohjaa kohti. Huokostamattoman betonilaadun kohdalla havaittiin huokostettujen betonilaatujen tapaan, että pohjatasolla 250...300 mm tiheys kasvaa hieman muita kerroksia enemmän. Kokonaisuutena tarkasteltaessa huokostamattomalla betonilaadulla tiheydet ovat jokaisella tarkasteluvälillä hyvin lähellä toisiinsa, valupinnan ja pohjakerroksen välillä havaittiin olevan noin 61 kg/m<sup>3</sup> tiheysero. Mikäli pohjakerrosta 250...300 mm ei huomioida, on tarkastelutasojen välillä maksimissaan 24 kg/m<sup>3</sup> tiheysero.

Tiheystutkimuksen perusteella tärypöydällä ja sauvatäryttimellä tiivistettyjen standardilieriöiden välillä ei ole merkittäviä eroja. Tutkimuksen havaintojen perusteella tiivistystekniikka ei vaikuta merkittävästi koekappaleen tiheyteen, eikä tiivistystekniikan voida sanoa vaikuttaneen lujuudenseurantatutkimuksen tuloksiin. Standardilieriöiden tarkemmat mittaustulokset on esitetty tutkimuksen liitteessä 15.

**Taulukko 39.** Teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden tiheydet [kg/m<sup>3</sup>] eri tasoalueilla lieriön yläpinnasta mitattuna.

Betoni	Tasoalue standardilieriön yläpinnasta mitattuna [mm]					
	0...50	50...100	100...150	150...200	200...250	250...300
<b>Tutkimuksessa valetut, tiivistys tärypöydällä</b>						
C35/45 P50	2264	2302	2319	2324	2329	2383
C30/37 P20	2279	2318	2333	2337	2362	2402
C50/60 P50	2294	2314	2327	2359	2378	2427
C35/45	2357	2380	2363	2367	2381	2418
<b>Valmisbetonitehtaalla valetut, tiivistys sauvatäryttimellä</b>						
C30/37 P50	2238	2281	2318	2339	2337	2399
C30/37 P50	2313	2332	2351	2345	2365	2421
C30/37 P50	2292	2353	2337	2346	2361	2401



**Kuva 38.** Teräsmuoteilla valettujen standardilieriöiden tiheydet eri tasoalueilla lieriön yläpinnasta mitattuna. Tutkimuksessa valettujen standardilieriöiden tiheydet on ilmoitettu ehyellä viivalla ja valmisbetonitehtaalla valettujen pistekatkoviivalla.

#### 4.4 Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus puristuslujuuteen

Nimellishalkaisijaltaan D50, D80 ja D100 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan saman ikäisenä (91 vuorokautta), vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden D150x300 puristuslujuustuloksiin, jotka vastaavat testauksen aikaisen kosteuspiitoisuuden osalta standardin EN 12390-3 [13] mukaisia standardikoekappaleita. Eurokoodi 2 [8] mukaiset betoniluokat perustuvat vedellä kyllästettyjen standardikoekappaleiden puristuslujuuksiin, joten vertailulla pystytään määrittämään rakennekoekappaleista määritetty suunnittelulujuus. Tarkasteltavien tutkimussarjojen koot on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä. Rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0, joten vertailukappaleina käytettävien D150x300 puristuslujuudet on muunnettu kuutiolujuuksiksi kuvassa 12 esitetyn lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteen avulla ( $f_{ck} = 0,828 \cdot f_{ck.cube}$ ). Määritetyt lieriölujuudet  $f_{cm}$  on siis muunnettu kuutiolujuuksiksi  $f_{cm.cube}$  kertomalla puristuslujuus korjauskertoimella  $1 / 0,828 = 1,207$ . Kappaleissa 4.4.1-4.4.3 kuutiolujuudella (standardikuutio) tarkoitetaan edellä kuvattua lieriölujuuden muunnosta. Käytetään lieriölujuuden keskiarvosta muunnellulle kuutiolujuudelle tunnusta  $f_{cm.cube.m}$  [MPa].

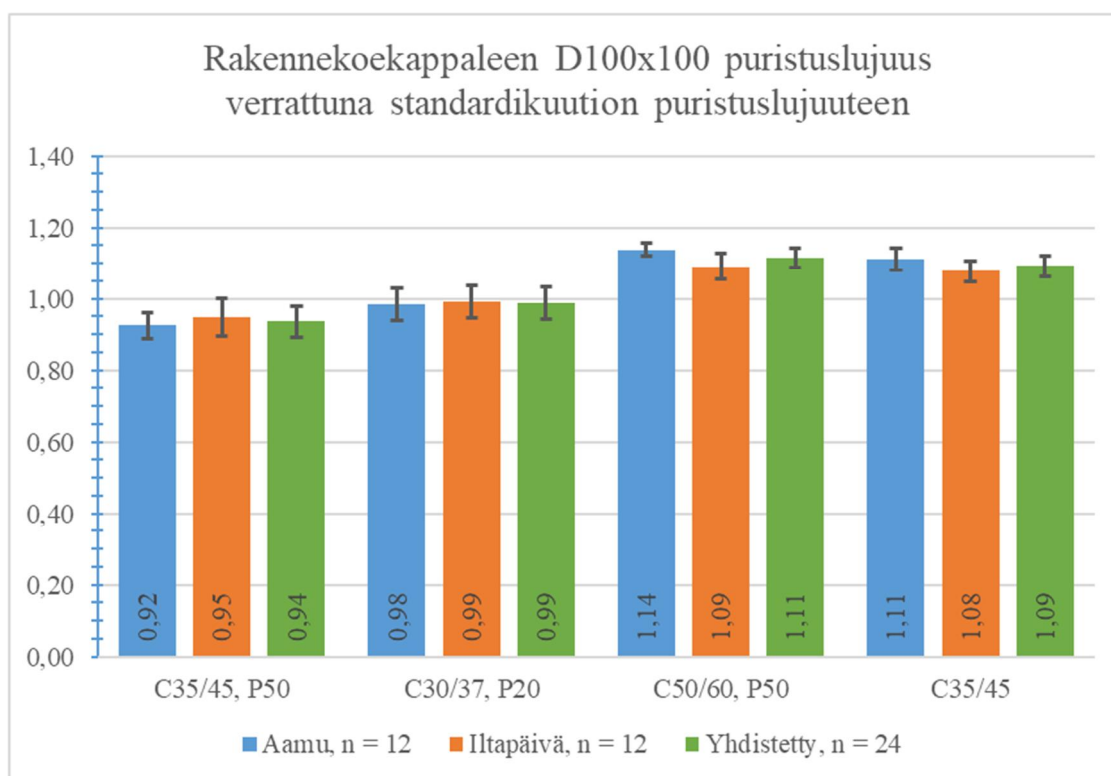
Tutkimuksen yhteydessä lieriö- ja kuutiolujuuden välistä suhdetta tarkasteltiin betonilaadulla C35/45 P50 tehdyillä lisätutkimuksilla, joissa testattiin halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleita pituuksilla 100 mm ja 200 mm. Kun L/D -suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus on verrattavissa kuutiolujuuteen ja L/D -suhteeltaan 2,0 lieriölujuuteen, saatiin lieriö- ja kuutiolujuuden suhteeksi 0,845. Määritetty suhde on hyvin lähellä tutkimuksessa käytettyä suhdelukua 0,828. Lisätutkimuksen tuloksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.5.

#### 4.4.1 Rakennekoekappaleet D100x100, halkaisijan vaikutus

Kuvassa 39 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun D100x100 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;100}$  suhde vastaavan betonilaadun kuutiolujuuden keskiarvoon  $f_{cm.cube.m}$  verrattuna ( $f_{cm;100} / f_{cm.cube.m}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo kuutiolujuuden keskiarvolla ( $s_{100} / f_{cm.cube.m}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 39 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivaa korjauskerrointa.

Kuvassa 39 esitetyistä tuloksista havaitaan, että betonilaaduilla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat 1...6 % heikompia kuin standardikuutioiden puristuslujuudet. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 havainto on päin vastainen, rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat 9...11 % suurempia kuin standardikuutioiden puristuslujuudet.

Tutkimustulosten perusteella halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla saadaan luotettava kuva rakenteen puristuslujuudesta, tutkimuksen havaintojen mukaan 100 mm rakennekoekappaleiden hajonta noin 3...4 %, kun tuloksia verrataan standardikuutioiden puristuslujuuteen. Rakennekoekappaleiden tulosten hajonta ei muutu merkittävästi betonin nimellislujuuden muuttuessa. Hajonta on samaa suuruusluokkaa halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleiden kanssa.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;100} / f_{cm.cube.m}$	$s_{100} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm;100} / f_{cm.cube.m}$	$s_{100} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm;100} / f_{cm.cube.m}$	$s_{100} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm;100} / f_{cm.cube.m}$	$s_{100} / f_{cm.cube.m}$
Aamu	0,92	0,04	0,98	0,05	1,14	0,02	1,11	0,03
Iltapäivä	0,95	0,05	0,99	0,04	1,09	0,04	1,08	0,03
Yhdistetty	0,94	0,04	0,99	0,04	1,11	0,03	1,09	0,03

**Kuva 39.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D100x100 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde keskimääräiseen kuutiolujuuteen.

Standardin EN 13791 [2] mukaisesti rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksista lasketaan ominaislujuus  $f_{ck, is; 100}$  kaavasta (4). Kuvassa 40 esitetyissä tuloksissa rakennekoekappaleille on laskettu ominaislujuus kaavaa (4) soveltaen siten, että puristuslujuuden keskiarvosta on vähennetty tutkimussarjan hajonta kerrottuna kertoimella 1,48 ( $f_{ck, is; 100} = f_{cm, 100} - 1,48 \cdot s_{100}$ ). Kaavan toista osaa, jossa ominaislujuus lasketaan lisäämällä tutkimussarjan minimilujuuteen 4 MPa ei ole huomioitu. Lisäksi kuvassa 40 esitetyissä tuloksissa ominais- ja keskimääräistä puristuslujuutta on korjattu Suomessa noudatettavan standardin SFS 7022 [1] mukaisesti. Halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm:n kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksen muunnetaan sivumitoiltaan 150 mm kuutiolujuutta vastaavaksi kertomalla puristuslujuustulokset korjauskertoimella 1,05. Kuvassa 40 on esitetty jokaiselle betonilaadulle erikseen tulokset, missä laskettua ominaislujuutta sekä halkaisijan huomioivalla kertoimella korjattua ominaislujuutta ja keskimääräistä puristuslujuutta verrataan vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden puristuslujuuteen siten, että lieriölujuus on muunnettu kuutiolujuudeksi korjauskertoimella



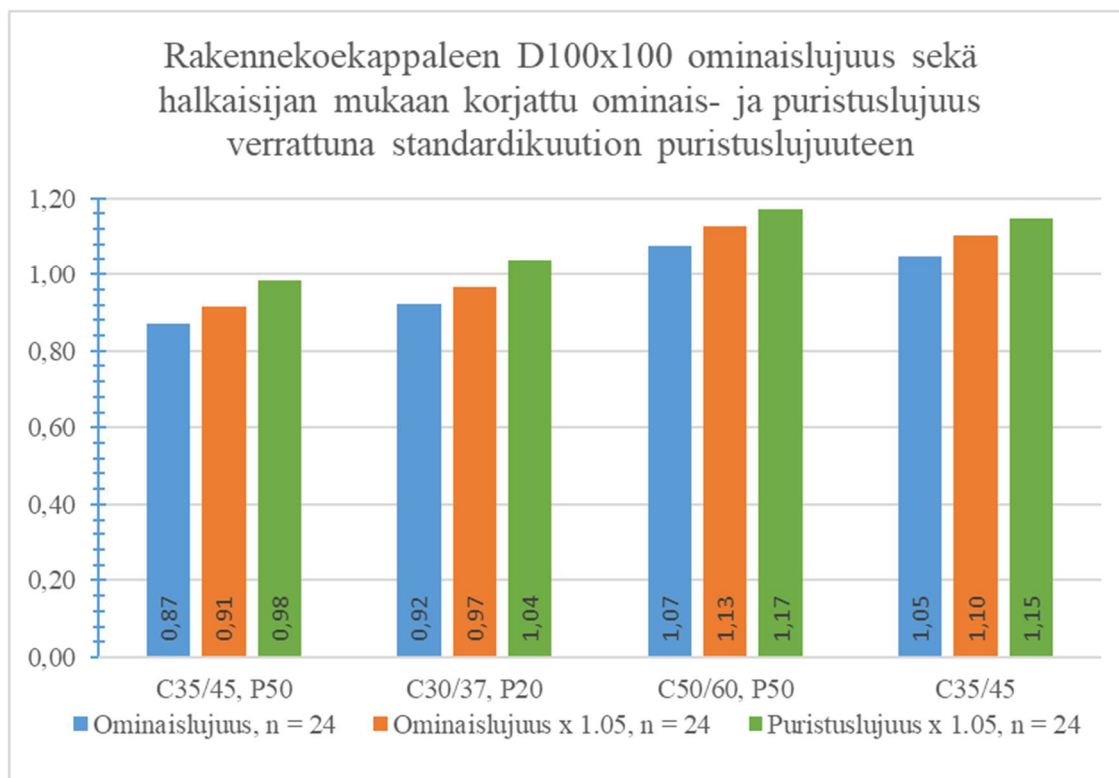
1,207. Tuloksissa aamun ja iltapäivän valuerien tuloksia on käsitelty yhdistettynä tutkimussarjana.

Mikäli tutkimussarjan puristuslujuustuloksista laskettua ominaislujuutta verrataan suoraan kuutiolujuuteen, saadaan betonilaaduilla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleista 8...13 % heikompia puristuslujuuksia verrattuna kuutiolujuuteen. Muilla betonilaaduilla laskettu ominaislujuus on 5...7 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli laskettua ominaislujuutta korotetaan edelleen rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,05), saadaan betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleista 3...9 % heikompi puristuslujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Muilla betonilaaduilla korjauskertoimella kerrottu ominaislujuus on 10...13 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,05) ilman, että tuloksissa huomioidaan tutkimussarjan hajontaa, saadaan betonilaadulla C35/45 P50 noin 2 % heikompi puristuslujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Muilla betonilaadulla korjauskertoimella kerrotut puristuslujuudet ovat noin 4...17 % suurempia kuutiolujuuteen verrattuna.

Tutkimuksen havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden ominais- ja puristuslujuuden kertominen standardin SFS 7022 [1] mukaisella korjauskertoimella vääristää rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia osittain liian suuriksi, osalla betonilaaduista tulosten vääristymä on merkittävä. Lisäksi tutkimuksen havaintojen perusteella ominaislujuutta laskettaessa hajonnan kertoimen tulisi olla suurempi. Standardiin EN 13791 [2] on kuitenkin tulossa päivitys, jossa kertoimia on kasvatettu. Havaintojen perusteella myöskään rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskiarvoa ei voida suoraan verrata kuutiolujuuden arvoihin.



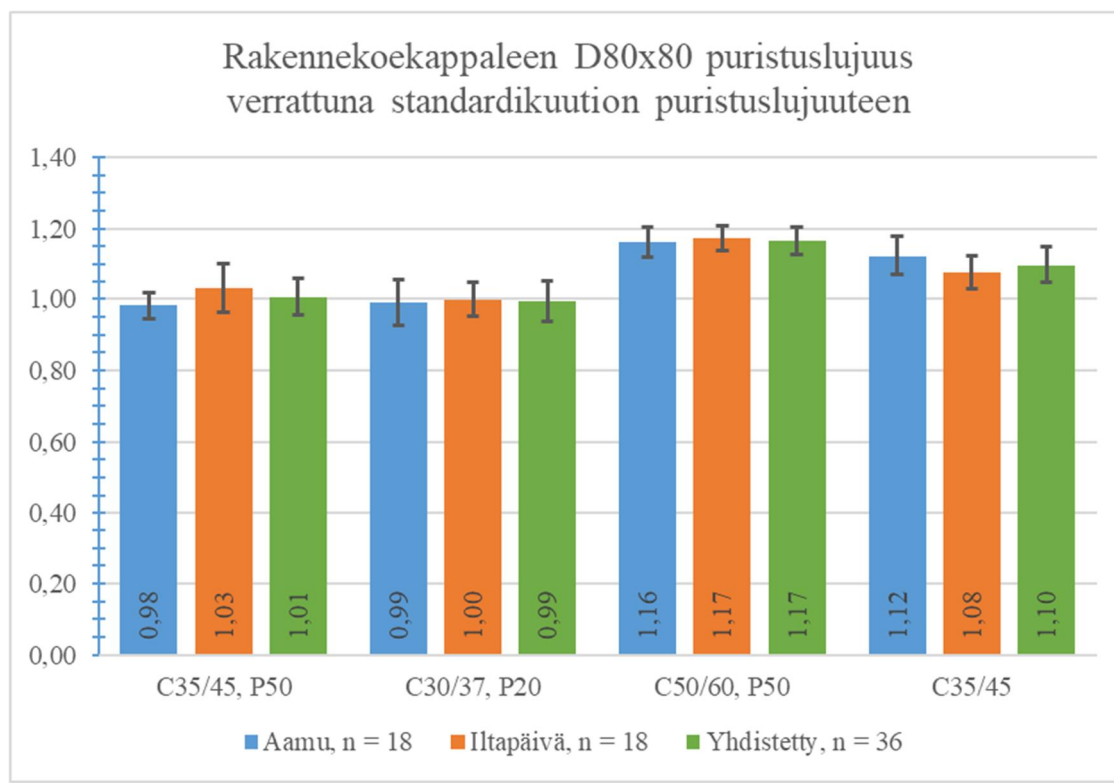
**Kuva 40.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D100x100 ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen, rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,05) huomioidun ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen ja rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,05) huomioidun puristuslujuuden suhde kuutiolujuuteen.

#### 4.4.2 Rakennekoekappaleet D80x80, halkaisijan vaikutus

Kuvassa 41 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun D80x80 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;80}$  suhde vastaavan betonilaadun kuutiolujuuden keskiarvoon  $f_{cm.cube.m}$  verrattuna ( $f_{cm;80} / f_{cm.cube.m}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo kuutiolujuuden keskiarvolla ( $s_{80} / f_{cm.cube.m}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 41 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivaa korjauskerrointa.

Kuvassa 41 esitetyistä tuloksista havaitaan, että betonilaaduilla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat käytännössä suoraan verrannollisia standardikuutioiden puristuslujuuteen. Valuerien yhdistettyjen tulosten puristuslujuus eroaa standardikuutioiden puristuslujuudesta  $\pm 1$  %. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat merkittävästi suurempia kuin standardikuutioiden puristuslujuudet, rakennekoekappaleet ovat noin 10...17 % lujempia kuin standardikuutiot.

Tutkimustulosten perusteella halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleilla saadaan luotettava kuva rakenteen puristuslujuudesta, tutkimuksen havaintojen mukaan 80 mm rakennekoekappaleiden hajonta noin 4...6 %, kun tuloksia verrataan standardikuutioiden puristuslujuuteen. Rakennekoekappaleiden tulosten hajonta ei muutu merkittävästi betonin nimellislujuuden muuttuessa. Hajonta on samaa suuruusluokkaa halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden kanssa.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm,80}/f_{cm.cube.m}$	$s_{80}/f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,80}/f_{cm.cube.m}$	$s_{80}/f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,80}/f_{cm.cube.m}$	$s_{80}/f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,80}/f_{cm.cube.m}$	$s_{80}/f_{cm.cube.m}$
Aamu	0,98	0,04	0,99	0,06	1,16	0,04	1,12	0,05
Iltapäivä	1,03	0,07	1,00	0,05	1,17	0,03	1,08	0,05
Yhdistetty	1,01	0,05	0,99	0,06	1,17	0,04	1,10	0,05

**Kuva 41.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D80x80 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde keskimääräiseen kuutiolujuuteen.

Standardin EN 13791 [2] mukaisesti rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksista lasketaan ominaislujuus  $f_{ck,is;80}$  kaavasta (4). Kuvassa 42 esitetyissä tuloksissa rakennekoekappaleille on laskettu ominaislujuus kaavaa (4) soveltaen siten, että puristuslujuuden keskiarvosta on vähennetty tutkimussarjan hajonta kerrottuna kertoimella 1,48 ( $f_{ck,is;80} = f_{cm,80} - 1,48 \cdot s_{80}$ ). Kaavan toista osaa, jossa ominaislujuus lasketaan lisäämällä tutkimussarjan minimilujuuteen 4 MPa ei ole huomioitu. Lisäksi kuvassa 42 esitetyissä tuloksissa ominais- ja keskimääräistä puristuslujuutta on korjattu Suomessa noudatettavan standar-

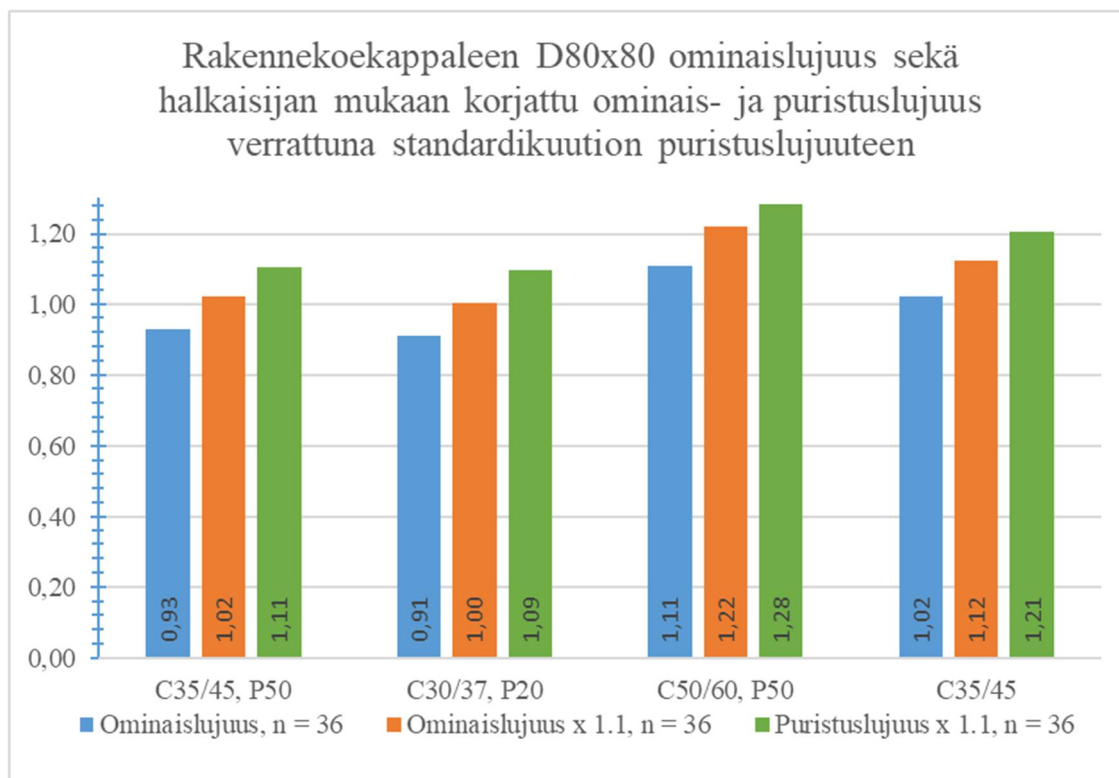
din SFS 7022 [1] mukaisesti. Halkaisijaltaan ja pituudeltaan 80 mm:n kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksen muunnetaan sivumitoiltaan 150 mm kuutiolujuutta vastaavaksi kertomalla puristuslujuustulokset korjauskertoimella 1,1. Kuvassa 42 on esitetty jokaiselle betonilaadulle erikseen tulokset, missä laskettua ominaislujuutta sekä halkaisijan huomioivalla kertoimella korjattua ominaislujuutta ja keskimääräistä puristuslujuutta verrataan vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden puristuslujuuteen siten, että lieriölujuus on muunnettu kuutiolujuudeksi korjauskertoimella 1,207. Tuloksissa aamun ja iltapäivän valuerien tuloksia on käsitelty yhdistettynä tutkimussarjana.

Mikäli tutkimussarjan puristuslujuustuloksista laskettua ominaislujuutta verrataan suoraan kuutiolujuuteen, saadaan betonilaaduilla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleista 7...9 % heikompia puristuslujuuksia verrattuna kuutiolujuuteen. Betonilaadun C35/45 ominaislujuus on lähes suoran verrattavissa kuutiolujuuteen, ominaislujuudeksi saadaan noin 2 % suurempi puristuslujuus. Betonilaadulla C50/60 P50 laskettu ominaislujuus on noin 11 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli laskettua ominaislujuutta korotetaan edelleen rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,1), saadaan betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 lähes suoraan kuutiolujuuteen verrattavissa oleva lujuus. Ominaislujuudet olivat 0...2 % suurempia kuin kuutiolujuus. Muilla betonilaaduilla korjauskertoimella kerrottu ominaislujuus on 12...22 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,1) ilman, että tuloksissa huomioidaan tutkimussarjan hajontaa, saadaan betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 9...11 % suurempi puristuslujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Muilla betonilaadulla korjauskertoimella kerrotut puristuslujuudet ovat noin 21...28 % suurempia kuutiolujuuteen verrattuna.

Tutkimuksen havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden ominais- ja puristuslujuuden kertominen standardin SFS 7022 [1] mukaisella korjauskertoimella vääristää rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia osittain liian suuriksi, osalla betonilaaduista tulosten vääristymä on huomattavan merkittävä. Tutkimuksen havaintojen perusteella ominaislujuuden laskennassa käytettävä hajonnan kerroin on oikean suuntainen, kuitenkin betonilaadulla C50/60 P50 ominaislujuudeksi saatiin merkittävästi suurempi verrattuna kuutiolujuuteen. Havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskiarvoa ei voida suoraan verrata kuutiolujuuden arvoihin.



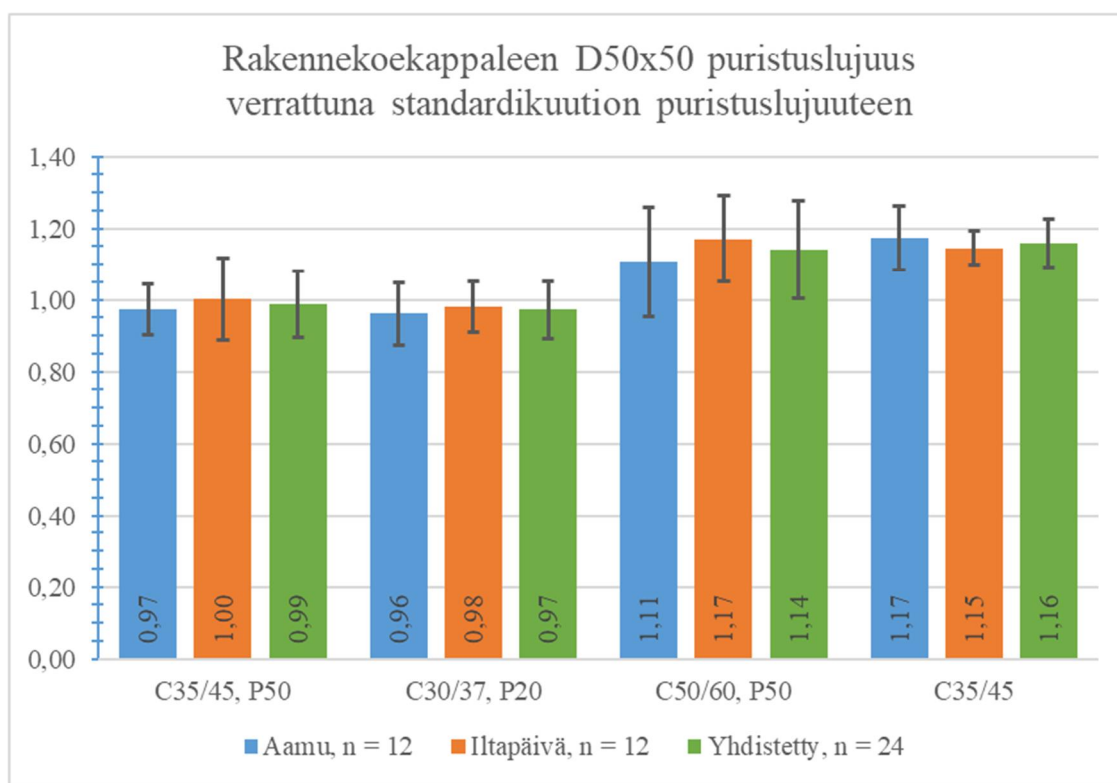
**Kuva 42.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D80x80 ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen, rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,1) huomioidun ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen ja rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,1) huomioidun puristuslujuuden suhde kuutiolujuuteen.

#### 4.4.3 Rakennekoekappaleet D50x50, halkaisijan vaikutus

Kuvassa 43 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun D50x50 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;50}$  suhde vastaavan betonilaadun kuutiolujuuden keskiarvoon  $f_{cm.cube.m}$  verrattuna ( $f_{cm;50} / f_{cm.cube.m}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo kuutiolujuuden keskiarvolla ( $s_{50} / f_{cm.cube.m}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 43 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivaa korjauskerrointa.

Kuvassa 43 esitetyistä tuloksista havaitaan, että betonilaaduilla C35/45 P50 ja C30/37 P20 rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat lähes suoraan verrannollisia standardikuutioiden puristuslujuuteen. Valuerien yhdistettyjen tulosten puristuslujuudet ovat noin 1...3 % heikompia standardikuutioiden puristuslujuuteen verrattuna. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat merkittävästi suurempia kuin standardikuutioiden puristuslujuudet, rakennekoekappaleet ovat noin 14...16 % lujempia kuin standardikuutiot.

Tutkimustulosten perusteella halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla saadaan kohdalaisen luotettava kuva rakenteen puristuslujuudesta, tutkimuksen havaintojen mukaan 50 mm rakennekoekappaleiden hajonta noin 7...14 %, kun tuloksia verrataan standardi-kuutioiden puristuslujuuteen. Tulosten perusteella halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden tulosten hajonta kasvaa betonin nimellislujuuden kasvaessa selvästi enemmän kuin halkaisijaltaan 80 mm ja 100 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa. Lisäksi halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden hajonta on paikoin 2-3 kertaa suurempi kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla. Hajonnan kasvuun vaikuttaa merkittävästi koekappaleen koko. Pienillä rakennekoekappaleilla timanttiporauksen aiheuttamat mahdolliset vauriot vaikuttavat koekappaleiden lujuuteen merkittävämmän kuin suurilla koekappaleilla, koska pienien rakennekoekappaleiden porauspinta-alan suhde tilavuuteen on suuri. Timanttiporauksen vaikutusta käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.6. Lisäksi kooltaan pienissä rakennekoekappaleissa tilavuudesta huomattavan suuri osa saattaa olla runkoainesta, jonka puristuslujuus on suurempi kuin sementtikiven. Tämän seurauksena osasta halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi korkeita arvoja ja osasta matalia, eli puristuslujuustulosten hajonta kasvaa. Pienissä rakennekoekappaleissa vaikuttava runkoaineksen määrä saattaa myös vääristää rakenteesta määritettävää puristuslujuutta liian suureksi.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm,50} / f_{cm.cube.m}$	$s_{50} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,50} / f_{cm.cube.m}$	$s_{50} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,50} / f_{cm.cube.m}$	$s_{50} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm,50} / f_{cm.cube.m}$	$s_{50} / f_{cm.cube.m}$
Aamu	0,97	0,07	0,96	0,09	1,11	0,15	1,17	0,09
Iltapäivä	1,00	0,11	0,98	0,07	1,17	0,12	1,15	0,05
Yhdistetty	0,99	0,09	0,97	0,08	1,14	0,14	1,16	0,07

**Kuva 43.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D50x50 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde keskimääräiseen kuutiolujuuteen.

Standardin EN 13791 [2] mukaisesti rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksista lasketaan ominaislujuus  $f_{ck,is;50}$  kaavasta (4). Kuvassa 44 esitetyissä tuloksissa rakennekoekappaleille on laskettu ominaislujuus kaavaa (4) soveltaen siten, että puristuslujuuden keskiarvosta on vähennetty tutkimussarjan hajonta kerrottuna kertoimella 1,48 ( $f_{ck,is;50} = f_{cm,50} - 1,48 \cdot s_{50}$ ). Kaavan toista osaa, jossa ominaislujuus lasketaan lisäämällä tutkimussarjan minimilujuuteen 4 MPa ei ole huomioitu. Lisäksi kuvassa 44 esitetyissä tuloksissa ominais- ja keskimääräistä puristuslujuutta on korjattu Suomessa noudatettavan standardin SFS 7022 [1] mukaisesti. Halkaisijaltaan ja pituudeltaan 50 mm:n kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksen muunnetaan sivumitoiltaan 150 mm kuutiolujuutta vastaavaksi kertomalla puristuslujuustulokset korjauskertoimella 1,1, joka on sama kuin rakennekoekappaleille, joiden halkaisija ja pituus on 80 mm. Kuvassa 44 on esitetty jokaiselle betonilaadulle erikseen tulokset, missä laskettua ominaislujuutta sekä halkaisijan huomioivalla kertoimella korjattua ominaislujuutta ja keskimääräistä puristuslujuutta verrataan vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden puristuslujuuteen siten,

että lieriölujuus on muunnettu kuutiolujuudeksi korjauskertoimella 1,207. Tuloksissa aamun ja iltapäivän valuerien tuloksia on käsitelty yhdistettynä tutkimussarjana.

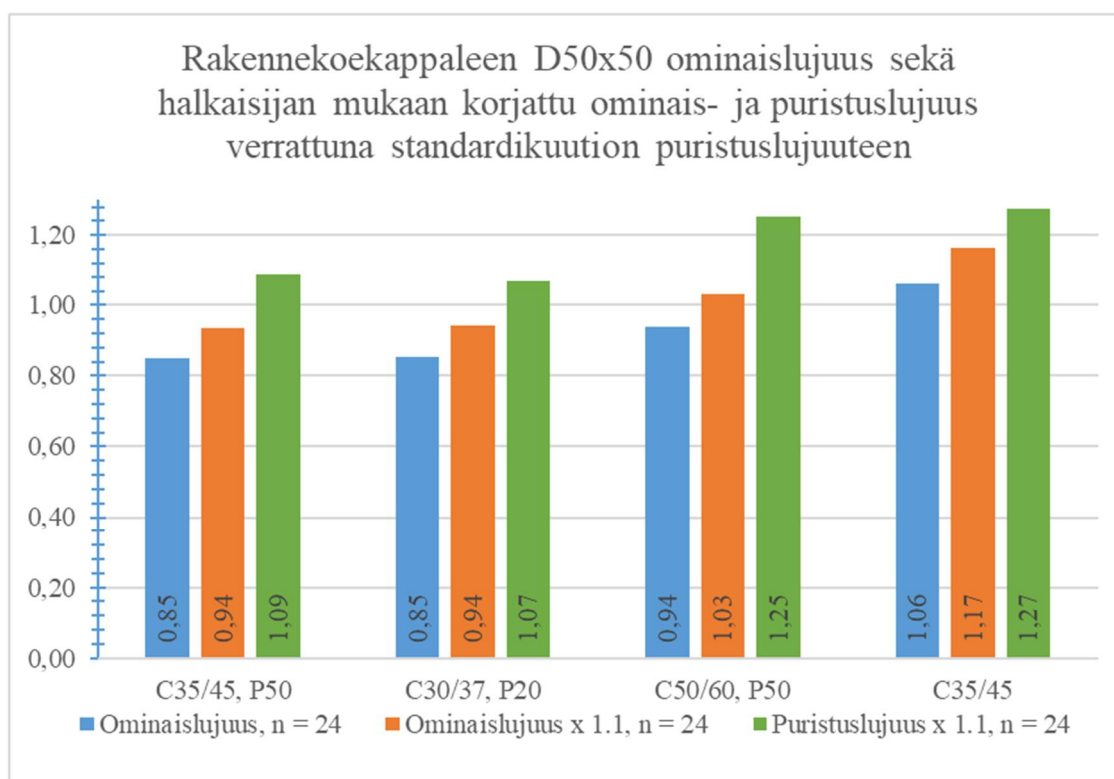
Mikäli tutkimussarjan puristuslujuustuloksista laskettua ominaislujuutta verrataan suoraan kuutiolujuuteen, saadaan betonilaaduilla C35/45 P50, C30/37 P20 ja C50/60 P50 rakennekoekappaleista 6...15 % heikompia puristuslujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Betonilaadun C35/45 ominaislujuus on 6 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli laskettua ominaislujuutta korotetaan edelleen rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,1), saadaan betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 noin 6 % heikompi lujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Betonilaadulla C50/60 P50 korjauskertoimella kerrottu ominaislujuus on noin 3 % ja betonilaadulla C35/45 noin 17 % suurempi kuin kuutiolujuus.

Mikäli rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset kerrotaan halkaisijan huomioivalla korjauskertoimella (1,1) ilman, että tuloksissa huomioidaan tutkimussarjan hajontaa, saadaan kaikilla betonilaaduilla suurempi puristuslujuus verrattuna kuutiolujuuteen. Betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 korjauskertoimella kerrottu puristuslujuus on 7...9 % suurempi verrattuna kuutiolujuuteen. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 korjauskertoimella kerrotut puristuslujuudet ovat noin 25...27 % suurempia kuutiolujuuteen verrattuna.

Tutkimuksen havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden ominais- ja puristuslujuuden kertominen standardin SFS 7022 [1] mukaisella korjauskertoimella vääristää rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia osittain liian suuriksi, osalla betonilaaduista tulosten vääristymä on huomattavan merkittävä. Tutkimuksen havaintojen perusteella ominaislujuuden laskennassa käytettävä hajonnan kerroin on oikean suuntainen, osalle betonilaaduista kerroin jopa liian pieni. Havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskiarvoa ei voida suoraan verrata kuutiolujuuden arvoihin.





**Kuva 44.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D50x50 ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen, rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,1) huomioidun ominaislujuuden suhde kuutiolujuuteen ja rakennekoekappaleen halkaisijan mukaisella korjauskertoimella (1,1) huomioidun puristuslujuuden suhde kuutiolujuuteen.

#### 4.5 Pituuden ja halkaisijan suhteen vaikutus puristuslujuuteen

Tutkimuksen yhteydessä tutkittiin pienellä tutkimussarjalla millainen vaikutus rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisellä suhteella on rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Tutkimus suoritettiin betonilaadun C35/45 P50 valun yhteydessä valetuilla ylimääräisillä valukappaleilla. Tutkimuksessa muovimuoteilla valetuista D150x300 valukappaleista timanttiporattiin halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleita, joiden pituudet olivat 100 mm ja 200 mm. Tarkasteltaviksi pituus-halkaisija -suhteiksi tuli siten 1,0 ja 2,0. Rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan teräsmuoteilla valettuihin D150x300 standardilieriöihin, jotka puristettiin vedellä kyllästetyssä tilassa. Sekä porattavia valukappaleita, että standardilieriöitä säilytettiin vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, jonka jälkeen kappaleita säilytettiin huoneilmassa.

Rakennekoekappaleiden timanttiporaukset suoritettiin siten, että halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleet timanttiporattiin ja -sahattiin kappaleessa 3.7.1-3.7.2 esitetysti. Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleet timanttiporattiin pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleita vastaavasti. Poratun kappaleen katkaisu suoritettiin siten, että yhdestä valulieriöstä valmistettiin yksi D100x200 rakennekoekappale, minkä kummastakin päästä poistettiin saman verran betonia. Timanttiporaukset suoritettiin uudella

timanttiterällä. Rakennekoekappaleiden ja standardilieriöiden päiden tasoittaminen tehtiin koneellisesti hiomalla kappaleen 3.7.3 mukaisesti.

Kaikkien tutkimussarjan koekappaleiden tiheydet määritettiin EN 12390-7 [54] mukaisella vesipunnituksella, tulos on pyöristetty lähimmän  $10 \text{ kg/m}^3$  tarkkuuteen standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti. Yksittäisten koekappaleiden puristuslujuus on laskettu kaavan (2) mukaisesti. Taulukossa 40 on ilmoitettu valuerien (aamu = ap ja iltapäivä = ip) keskimääräiset puristuslujuudet  $f_{cm}$ , valuerien yhdistetty keskimääräinen puristuslujuus  $f_{cm}$  sekä keskihajonta  $s$ , joka on laskettu kaavan (22) mukaisesti. Keskimääräiset puristuslujuuden arvot on pyöristetty standardin EN 12390-3 [13] mukaisesti  $0,1 \text{ MPa}$  tarkkuuteen. Keskihajonta on pyöristetty  $0,1 \text{ MPa}$  tarkkuuteen saman periaatteen mukaisesti.

Kaikki lisätutkimuksessa tehdyt puristuskokeet suoritettiin betonin ollessa 323 vuorokauden ikäistä. Taulukossa 40 on esitetty kaikkien lisätutkimuksessa tehtyjen puristuskokeiden tulokset ja tutkimussarjojen koot. Tarkemmat tutkimustulokset on esitetty tutkimuksen liitteessä 13

**Taulukko 40.** Betonilaadun C35/45 P50 uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden D100x100 ja D100x200 sekä vedellä kyllästettyjen standardilieriöiden D150x300 tutkimustulokset 323 vuorokauden iässä.

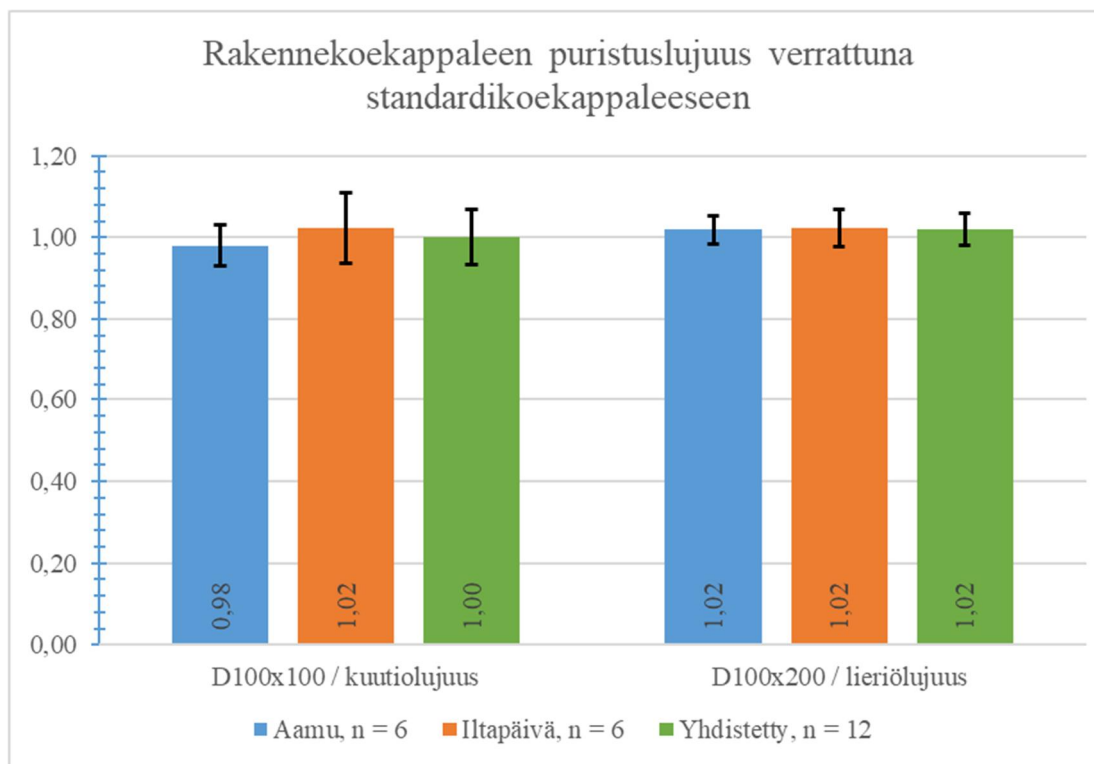
Koekappaleen halkaisija ja pituus	n	D100x100		n	D100x200		n	D150x300	
		ap	ip		ap	ip		ap	ip
Tiheys $D_c$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	6	2285	2281	6	2285	2278	2	2323	2308
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	6	62,7	60,0	6	54,1	49,7	2	53,1	48,6
Keskihajonta $s$ [MPa]	6	3,2	5,1	6	1,8	2,2	2	0,1	5,0
Puristuslujuus $f_{cm}$ [MPa]	12	61,4		12	51,9		4	50,9	

Standardin SFS 7022 [1] mukaisesti pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuutta verrataan standardikuution puristuslujuuteen. Standardissa ei oteta kantaa tilanteeseen, jossa halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen pituus on 200 mm, eli pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 2,0. Standardissa EN 13791 [2] kerrotaan, että halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen puristuslujuus vastaa standardikuution puristuslujuutta, kun pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Vastaavasti pituuden ja halkaisijan suhteen ollessa 2,0 rakennekoekappaleen puristuslujuus vastaa standardilieriön puristuslujuutta. Standardin ohjeistus pätee tilanteelle, jossa koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa. Standardissa ei oteta kantaa siihen, tuuleeko standardikoekappaleiden olla kuivana vai vedellä kyllästyneessä tilassa puristettuja. Kuvassa 45 on esitetty betonilaadun C35/45 P50 lisätutkimuksen tuloksia. Kuvassa halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan standardikoekappaleiden puristuslujuuteen, minkä puristuslujuus on määritetty vedellä kyllästyneessä kosteusolosuhteessa. Pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleiden ( $L/D=1,0$ ) keskimääräistä puristuslujuutta verrataan kuutiolujuuteen, joka on muunnettu

D150x300 standardilieriöiden (vedellä kyllästetty) keskimääräisestä puristuslujuudesta korjauskertoimella 1,207 (kappaleen 4.4 periaatteen mukaisesti). Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=2,0$ ) verrataan standardilieriöiden (vedellä kyllästetty) keskimääräiseen puristuslujuuteen. Eli sekä kuutio- että lieriölujuuden arvo perustuu samojen koekappaleiden puristuslujuustuloksiin. Tulokset on esitetty aamun ja iltapäivän va-luerille erikseen, sekä yhdistettynä tutkimussarjana.

Kuvan 45 tuloksista havaitaan, että standardin EN 13791 [2] mukainen ohjeistus soveltuu lähes täydellisesti tutkimuksen havaintoihin. Halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen  $L/D$  -suhteen ollessa 1,0 on sekä rakennekoekappaleella että kuutiolla sama keskimääräinen puristuslujuus.  $L/D$  -suhteeltaan 2,0 olevista rakennekoekappaleista taas saatiin noin 2 % suurempi puristuslujuus verrattuna lieriölujuuteen. Eri pituisten rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden puristuslujuuksien suhteiden ollessa näin lähellä toisiaan, saadaan standardin EN 13791 [2] ohjeistukseen viitaten määritettyä lieriö- ja kuutiolujuuden suhde tutkimuksessa käytetylle betonilaadulle C35/45 P50.  $L/D$  -suhteeltaan 1,0 ja 2,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteeksi saadaan:  $f_{cm:100(2.0)} / f_{cm:100(1.0)} = 0,845$ . Kappaleessa 4.4 esitetysti tutkimuksessa käytetään kaikille betonilaaduille lieriö- ja kuutiolujuuden väliselle suhteelle arvoa 0,828. Sekä puristuslujuustuloksista, että standardista määritetty puristuslujuuksien suhde on hyvin lähellä toisiaan. Tutkimuksessa käytetyn lieriölujuuden muunnoskerroimen voidaan siis olettaa olevan lisätutkimuksen havaintojen perusteella oikea.

Betonilaadun C35/45 P50 lisätutkimuksen havainnot perustuvat suppeaan otantaan, mutta tutkimuksen tuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 4...7 % kun tuloksia verrataan standardikoekappaleiden keskimääräiseen puristuslujuuteen.



Betoni	D100x100		D100x200	
	$f_{cm;100(1,0)} / f_{cm.cube.m}$	$s_{100(1,0)} / f_{cm.cube.m}$	$f_{cm;100(2,0)} / f_{cm}$	$s_{100(2,0)} / f_{cm}$
Aamu	0,98	0,05	1,02	0,03
Iltapäivä	1,02	0,09	1,02	0,05
Yhdistetty	1,00	0,07	1,02	0,04

**Kuva 45.** Uudella timanttiterällä porattujen, halkaisijaltaan D100 rakennekoekappaleiden puristuslujuus suhteessa standardikoekappaleen puristuslujuuteen. Pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=1,0$ ) verrataan kuutiolujuuteen. Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=2,0$ ) verrataan lieriölujuuteen.

#### 4.6 Timanttitorauksen vaikutus puristuslujuuteen

Rakennekoekappaleiden timanttitorauksen vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin saman kokoisten rakennekoekappaleiden ja valettujen koekappaleiden puristuslujuuksien suhteen avulla. Tutkimuksessa käytettiin nimellishalkaisijaltaan ja -pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleita ja valettuja koekappaleita ( $L/D = 1,0$ ). Toisena kokona käytettiin nimellishalkaisijaltaan 150 mm ja nimellispuutuu-deltaan 300 mm rakennekoekappaleita ja vastaavan kokoisia standardilieriöitä ( $L/D = 2,0$ ). Kaikissa tapauksissa koekappaleiden päät tasoitettiin koneellisesti hiomalla. Puristuskokeet suoritettiin nimellisesti 91 vuorokauden ikäisenä. Puristuskokeet suoritettiin kuivassa kosteusolosuhteessa, halkaisijaltaan 100 mm koekappaleita kuivattiin huoneil-massa vähintään kolme vuorokautta ja halkaisijaltaan 150 mm koekappaleita vähintään 7 vuorokautta ennen puristuskokeiden suorittamista. Tarkasteltavan tutkimussarjan koko on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä.

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin pienellä koekappalemäärällä lisätutkimus, jossa käytettiin vain betonilaatua C35/45 P50. Lisätutkimuksen koekappaleet puristettiin 323 vuorokauden ikäisenä. Tutkimuksessa muovimuoteilla valetuista D150x300 valukappaleista timanttiporattiin halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleita, joiden pituudet olivat 100 mm ja 200 mm. Tarkasteltaviksi pituus-halkaisija -suhteiksi tuli siten 1,0 ja 2,0. Standardissa EN 13791 [2] kerrotaan, että halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen puristuslujuus vastaa standardikuution puristuslujuutta, kun pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Vastaavasti pituuden ja halkaisijan suhteen ollessa 2,0 rakennekoekappaleen puristuslujuus vastaa standardilieriön puristuslujuutta. Standardin ohjeistus pätee tilanteelle, jossa koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa. Standardissa ei oteta kantaa siihen, tuuleeko standardikoekappaleiden olla kuivana vai vedellä kyllästyneessä tilassa puristettuja. Standardin EN 13791 [2] mukaisen ohjeistuksen perusteella rakennekoekappaleiden timanttiporauksen vaikutusta määrittävään puristuslujuuteen voidaan arvioida, kun huomioidaan standardin mukainen puristuslujuuksien yhteys rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden välillä. Tulosten perusteella voidaan päätellä otetaanko timanttiporaus riittävän hyvin huomioon standardin mukaisessa ohjeistuksessa.

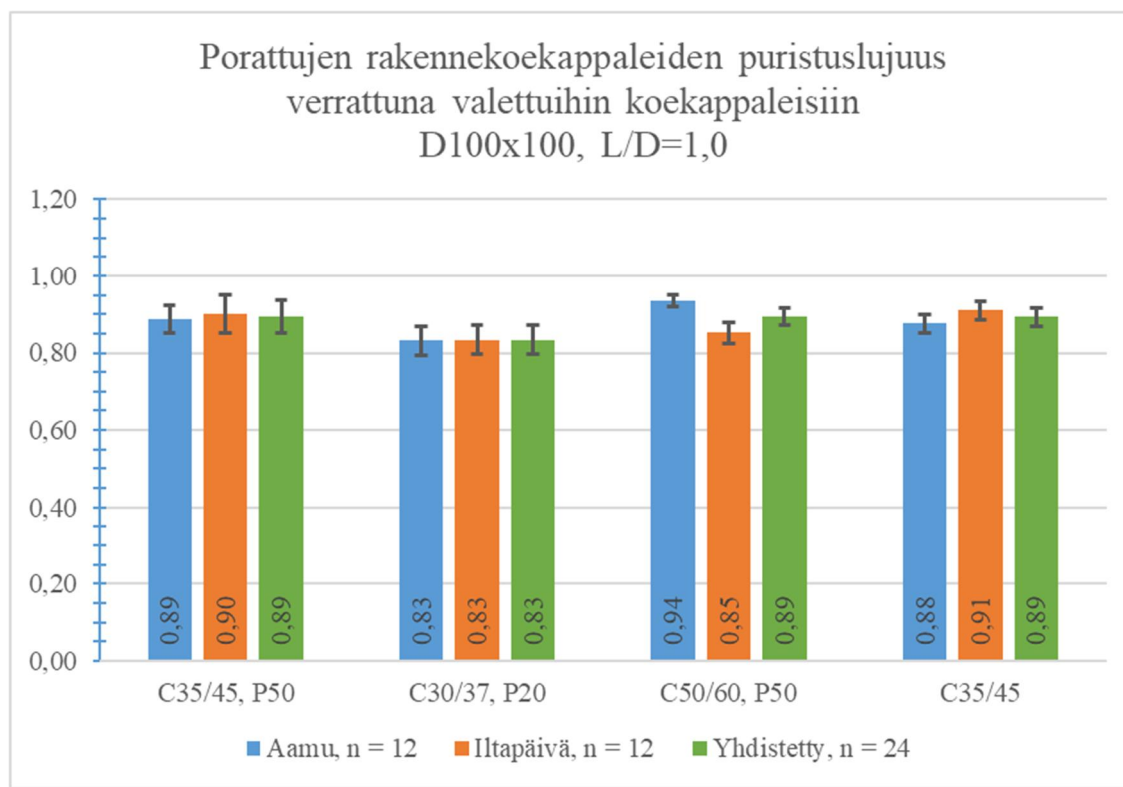
Lisätutkimusta vastaava tarkastelu tehtiin myös nimellisesti 91 vuorokauden ikäisenä puristetuille D100x100 rakennekoekappaleille ja standardikuutioille, jotka valettiin teräsmuoteilla. Nimellisesti 91 vuorokauden ikäisenä puristettujen koekappaleiden tapauksessa rakennekoekappaleiden ja standardikuutioiden vertailu tehtiin kaikilla tutkimuksen betonilaaduilla. Tarkastelussa standardikuutioiden puristuslujuus on määritetty pienestä koekappalemäärästä.

#### 4.6.1 Rakennekoekappaleet ja valetut koekappaleet 100x100

Kuvassa 46 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun timanttiporattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;100(p)}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, valetun koekappaleen keskiarvoon  $f_{cm;100(v)}$  verrattuna ( $f_{cm;100(p)} / f_{cm;100(v)}$ ). Puristuslujuuksien keskiarvoihin on lisätty tunnisteet p = porattu ja v = valettu verrattavien puristuslujuuksien tunnistamiseksi. Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta s, joka on laskettu jakamalla timanttiporattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo valettujen koekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{100(p)} / f_{cm;100(v)}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 46 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että betonilaadulla C30/37 P20 timanttiporatut rakennekoekappaleet ovat noin 17 % heikompia kuin valetut koekappaleet. Kaikilla muilla betonilaaduilla timanttiporatut rakennekoekappaleet ovat noin 11 % heikompia kuin valetut koekappaleet.

leet. Timanttikorattujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin kaikilla betonilaa-  
duilla noin 2...4 %, kun tuloksia verrataan valettujen koekappaleiden lujuuteen. Tutki-  
mustulosten perusteella rakennekoekappaleiden piteuden ja halkaisijan ollessa 100 mm  
(L/D = 1,0) vaikuttaa timanttikoraus merkittävästi määritettävään puristuslujuuteen. Tut-  
kimustulosten hajonta on pieni, joten tulosta voidaan pitää luotettavana.



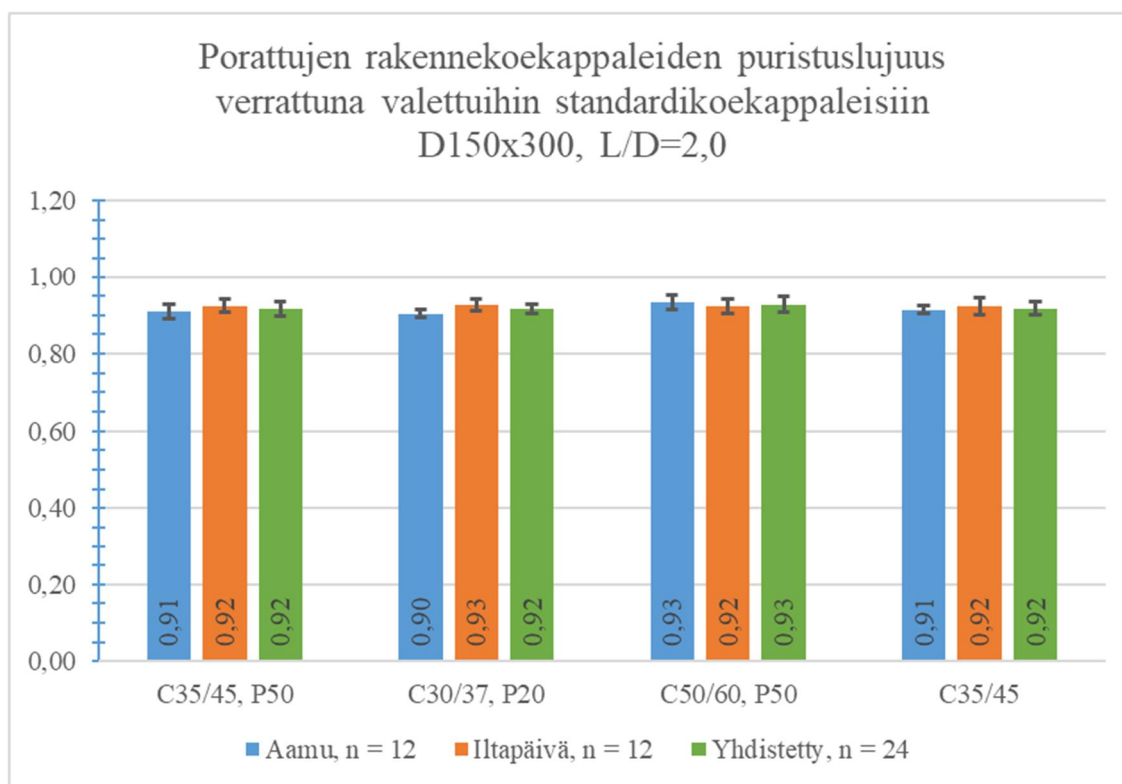
Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$s_{100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$f_{cm;100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$s_{100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$f_{cm;100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$s_{100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$f_{cm;100(p)} / f_{cm;100(v)}$	$s_{100(p)} / f_{cm;100(v)}$
Aamu	0,89	0,03	0,83	0,04	0,94	0,02	0,88	0,02
Iltapäivä	0,90	0,05	0,83	0,04	0,85	0,03	0,91	0,02
Yhdistetty	0,89	0,04	0,83	0,04	0,89	0,02	0,89	0,02

**Kuva 46.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D100x100 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde valettuihin ja hiomalla tasoitettuihin koekappaleisiin D100x100 verrattuna, piteuden ja halkaisijan suhde 1,0.

#### 4.6.2 Rakennekoekappaleet ja standardikoekappaleet 150x300

Kuvassa 47 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun timanttiorattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;150(p)}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, valetun standardikoekappaleen keskiarvoon  $f_{cm;150(v)}$  verrattuna ( $f_{cm;150(p)} / f_{cm;150(v)}$ ). Puristuslujuuksien keskiarvoihin on lisätty tunnistimet p = porattu ja v = valettu verrattavien puristuslujuuksien tunnistamiseksi. Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta s, joka on laskettu jakamalla timanttiorattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo valettujen standardikoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{150(p)} / f_{cm;150(v)}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 47 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että kaikilla betonilaaduilla timanttioratut rakennekoekappaleet ovat noin 7...8 % heikompia kuin valetut standardikoekappaleet. Timanttiorattujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin kaikilla betonilaaduilla noin 1...2 %, kun tuloksia verrataan valettujen standardikoekappaleiden lujuuteen. Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleiden pituuden ollessa 300 mm ja halkaisijan 150 mm ( $L/D = 2,0$ ) vaikuttaa timanttioraus kohtalaisen merkittävästi määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimustulosten hajonta on pieni, joten tulosta voidaan pitää luotettavana.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$s_{150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$f_{cm;150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$s_{150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$f_{cm;150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$s_{150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$f_{cm;150(p)} / f_{cm;150(v)}$	$s_{150(p)} / f_{cm;150(v)}$
Aamu	0,91	0,02	0,90	0,01	0,93	0,02	0,91	0,01
Iltapäivä	0,92	0,02	0,93	0,01	0,92	0,02	0,92	0,02
Yhdistetty	0,92	0,02	0,92	0,01	0,93	0,02	0,92	0,02

**Kuva 47.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D150x300 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde valettuihin ja hiomalla tasoitettuihin standardikoekappaleisiin D150x300 verrattuna, pituuden ja halkaisijan suhde 2,0.

#### 4.6.3 Rakennekoekappaleet D100x100 verrattuna standardikuution ja rakennekoekappaleet D100x200 verrattuna standardilieriöön.

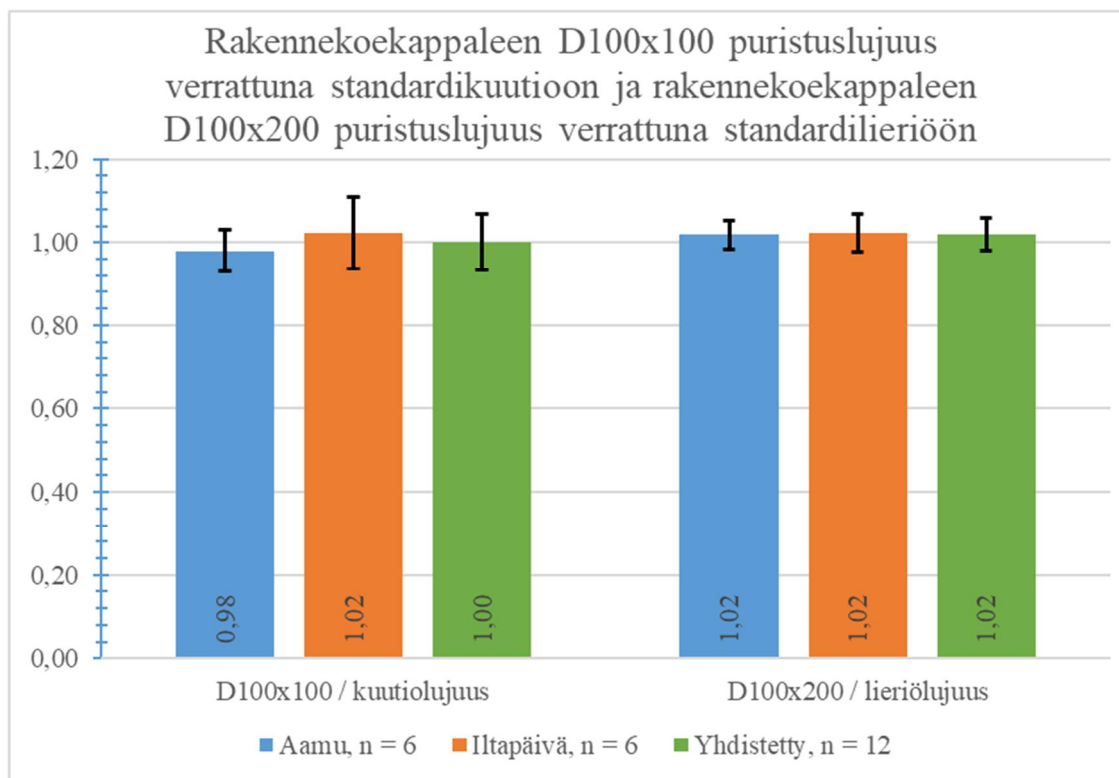
Kuvan 48 lisätutkimuksen tuloksissa rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan teräsmuoteilla valettuihin D150x300 standardilieriöihin, jotka puristettiin vedellä kyllästetyssä tilassa. Lisätutkimus tehtiin vain betonilaadulla C35/45 P50. Sekä porattavia va-lukappaleita, että standardilieriöitä säilytettiin vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, jonka jälkeen kappaleita säilytettiin huoneilmassa. Lisätutkimuksen puristusko-keiden keskimääräiset tulokset on ilmoitettu kappaleen 4.5 taulukossa 40. Pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleiden (L/D=1,0) keskimääräistä puristuslujuutta verrataan



kuutiolujuuteen, joka on muunnettu D150x300 standardilieriöiden (vedellä kyllästetty) keskimääräisestä puristuslujuudesta korjauskertoimella 1,207 (kappaleen 4.4 periaatteen mukaisesti). Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=2,0$ ) verrataan standardilieriöiden (vedellä kyllästetty) keskimääräiseen puristuslujuuteen.

Kuvassa 48 on esitetty betonilaadun C35/45 P50 lisätutkimuksen tulokset. Tulokset on esitetty aamun ja iltapäivän valuerille erikseen, sekä yhdistettynä tutkimussarjana. Kuvan 48 tuloksista havaitaan, että rakennekoekappaleiden D100x100 puristuslujuus on sama kuin standardikuution puristuslujuus. Rakennekoekappaleiden D100x200 puristuslujuus on noin 2 % suurempi kuin standardilieriön puristuslujuus. Tulosten perusteella rakennekoekappaleiden timanttiporauksella ei siis ole vaikutusta määritettävään puristuslujuuteen, kun puristuslujuuksia verrataan standardin EN 13791 [2] mukaisesti standardikoekappaleiden puristuslujuuteen. Kappaleessa 4.6.1 samalla betonilaadulla D100x100 rakennekoekappaleiden puristuslujuuden havaittiin olevan noin 11 % pienempi verrattuna vastaavan kokoiseen valettuun koekappaleeseen. Tutkimustulosten perusteella timanttiporauksen vaikutusta ei ole havaittavissa, kun rakennekoekappaleiden puristuslujuutta verrataan rakennekoekappaleen suuremman standardikoekappaleen lujuuteen.

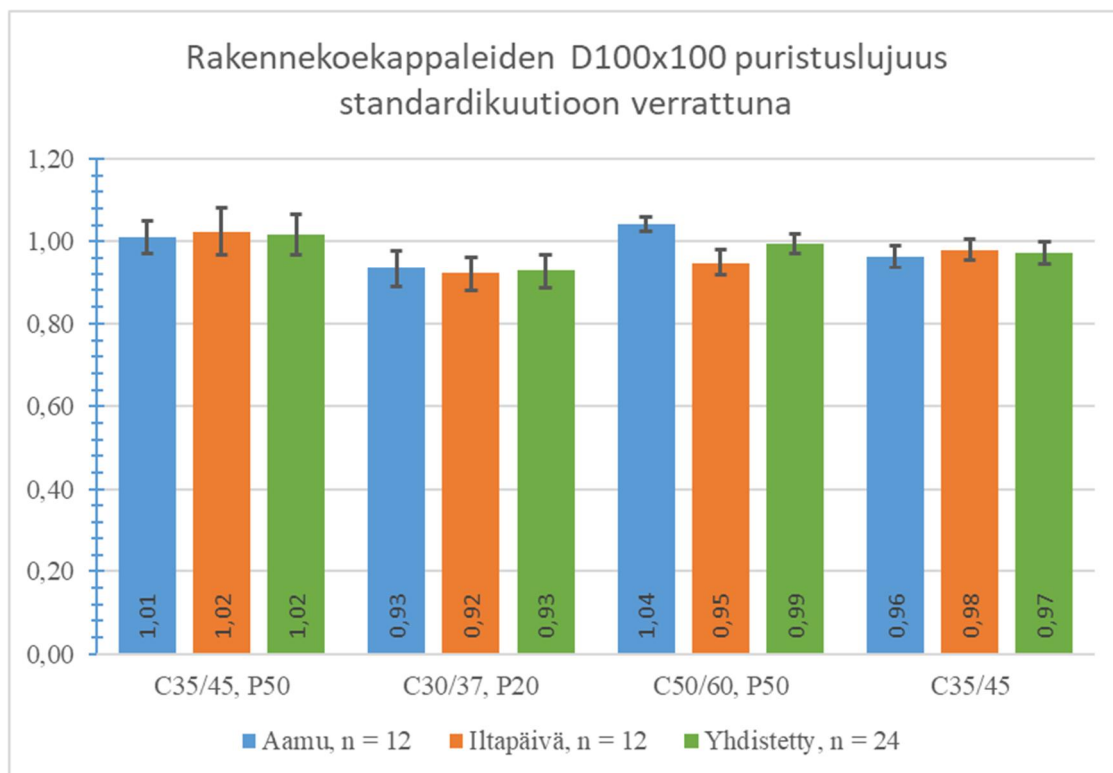
Tuloksissa on kuitenkin huomioitava, että lisätutkimuksessa rakennekoekappaleet ja standardikoekappaleet puristettiin eri kosteusolosuhteissa. Rakennekoekappaleet puristettiin kuivana ja standardilieriöt vedellä kyllästettynä. Kappaleen 4.6.1 puristuskokeissa sekä rakennekoekappaleet että valetut koekappaleet puristettiin samassa kosteusolosuhteessa, kuivina. Tutkimuksen yhteydessä koestettiin standardilieriöitä 91 vuorokauden ikäisenä sekä kuivana, että vedellä kyllästettynä. Koetuloksista havaittiin, että vedellä kyllästettyjen standardilieriöiden puristuslujuus on noin 4...6 % heikompi kuin kuivana puristettujen standardilieriöiden lujuus. Standardissa EN 13791 [2] ei ilmoiteta, missä kosteusolosuhteessa rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden välinen puristuslujuuksien välinen yhteys pätee. Mikäli tutkimuksen havaintojen perusteella vedellä kyllästettyjen standardilieriöiden puristuslujuutta kasvatetaan siten, että lujuus vastaa kuivan standardilieriön puristuslujuutta, saadaan timanttiporauksen vaikutukseksi lisätutkimuksen koekappaleilla noin 4...6 %. Tämä on kuitenkin vain noin puolet vaikutuksesta, joka havaittiin rakennekoekappaleilla, joiden puristuslujuutta verrattiin saman kokosiin valettuihin koekappaleisiin.



**Kuva 48.** Uudella timanttiterällä porattujen, halkaisijaltaan D100 rakennekoekappaleiden puristuslujuus suhteessa standardikoekappaleen puristuslujuuteen. Pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=1,0$ ) verrataan kuutiolujuuteen. Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleita ( $L/D=2,0$ ) verrataan lieriölujuuteen.

Tutkimuksen kaikilla betonilaaduilla nimellishalkaisijaltaan ja -pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleiden ja teräsmuoteilla valettujen standardikuutioiden puristuslujuuksien vertailu on esitetty kuvassa 49. Vertailu on muutoin sama kuin lisätutkimuksessa, mutta kuutiolujuus on määritetty kuivassa kosteusolosuhteessa puristetuista standardikuutioista. Lisätutkimuksessa kuutiolujuus muunnettiin vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden puristuslujuustuloksista. Koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu lisätutkimuksen koekappaleita vastaavasti, mutta puristuskokeet on suoritettu nimellisesti 91 vuorokauden ikäisenä.

Kuvan 49 tuloksista havaitaan, että betonilaadulla C35/45 P50 D100x100 rakennekoekappaleista saadaan noin 2 % parempi puristuslujuus kuin standardikuutioista. Muilla betonilaaduilla rakennekoekappaleiden puristuslujuudeksi saatiin noin 3...7 % heikompi tulos kuin standardikuutioista. Muiden kuin betonilaadun C35/45 P50 tulokset ovat samankaltaiset kuin lisätutkimuksen tutkimustulokset, kun lisätutkimuksessa huomioitiin koekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen. Kun standardin EN 13791 [2] mukaisesti pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuden tulisi olla verrannollinen standardikuution puristuslujuuteen, voidaan arvioida, että muilla kuin betonilaadulla C35/45 P50 timanttiorauksen vaikutus puristuslujuuteen on edellä em. 3...7 %.



**Kuva 49.** Uudella timanttiterällä porattujen, halkaisijaltaan ja pituudeltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuus suhteessa teräsmuoteilla valetun standardikuutioon puristuslujuuteen. Puristuskokeet suoritettu kuivassa kosteusolosuhteessa.

#### 4.7 Tutkimuksessa havaitut porattujen ja valettujen koekappaleiden puristuslujuuksien suhteet

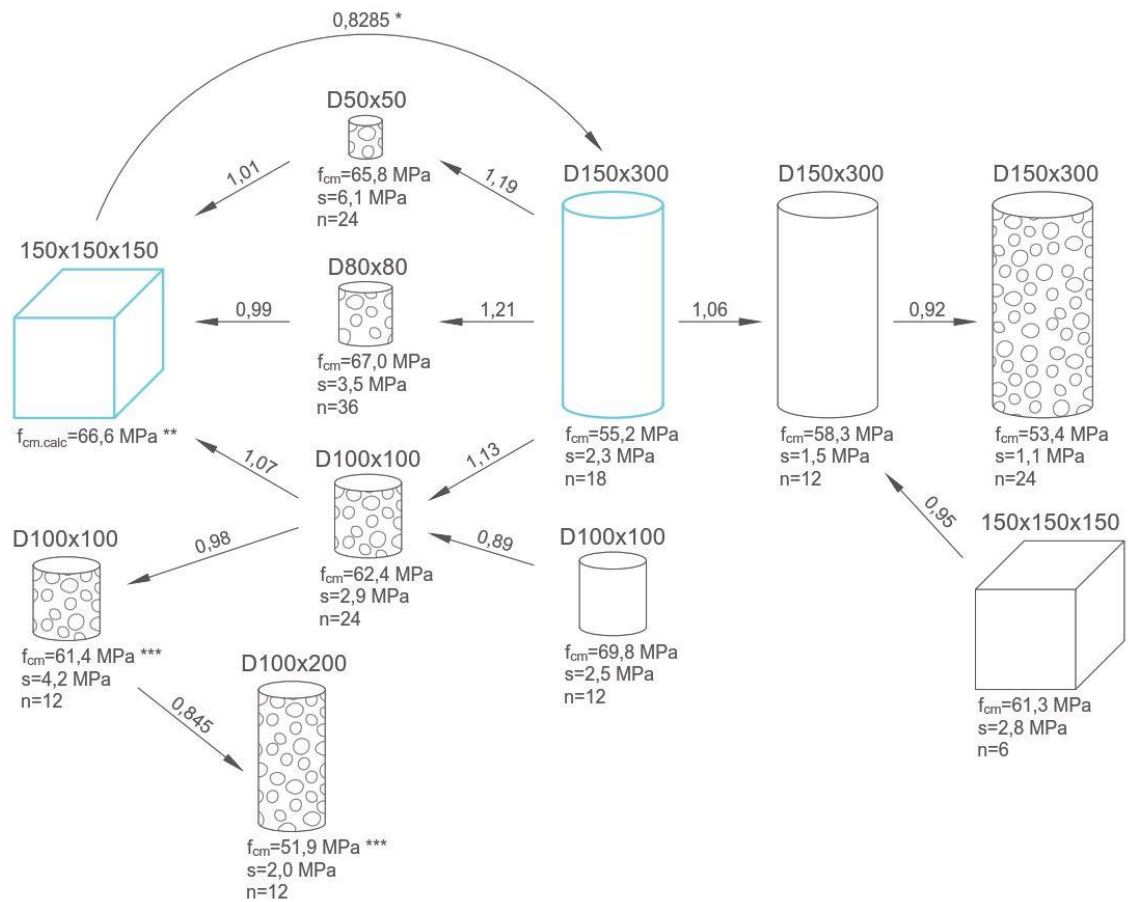
Tässä kappaleessa on esitetty koottuna tutkimuksessa havaitut erilaisten timanttiporattujen rakennekoekappaleiden ja valettujen koekappaleiden tutkimustulokset. Rakennekoekappaleiden timanttiporaukset on tehty uudella terällä ja kaikkien lieriömäisten koekappaleiden päiden tasoitus on tehty koneellisesti hiomalla. Kuvissa 50-53 on esitetty timanttiporattujen rakennekoekappaleiden ja valettujen standardikoekappaleiden väliset puristuslujuuksien suhteet. Lisäksi kuvissa on esitetty eri muotoisten ja kokoisten sekä eri kosteusolosuhteissa testattujen valettujen koekappaleiden puristuslujuuksien suhteet. Kuvissa on esitetty myös kaikkien esitettyjen koekappaleiden puristuslujuuksien ja puristuslujuustulosten hajontojen keskiarvot sekä koekappalemäärät. Kuvissa nuolen suuntaisen koekappaleen puristuslujuus saadaan kertomalla lähtökappaleen puristuslujuus nuolen mukaisella kertoimella. Kuvassa timanttiporattujen rakennekoekappaleiden pinnoilla on esitetty näkyvissä olevat runkoainesrakeet. Vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa puristetut koekappaleet on esitetty sinisellä värillä, muutoin koekappaleet on puristettu kuivassa kosteusolosuhteessa. Ilmoitetut puristuslujuuden ja hajonnat ovat nimellisesti 91 vuorokauden ikäisen betonin tuloksia, ellei kuvassa toisin ole mainittu.

Kuvissa 50-53 esitetyt tarkentavat tähtimerkinnät (\*) ovat seuraavat:

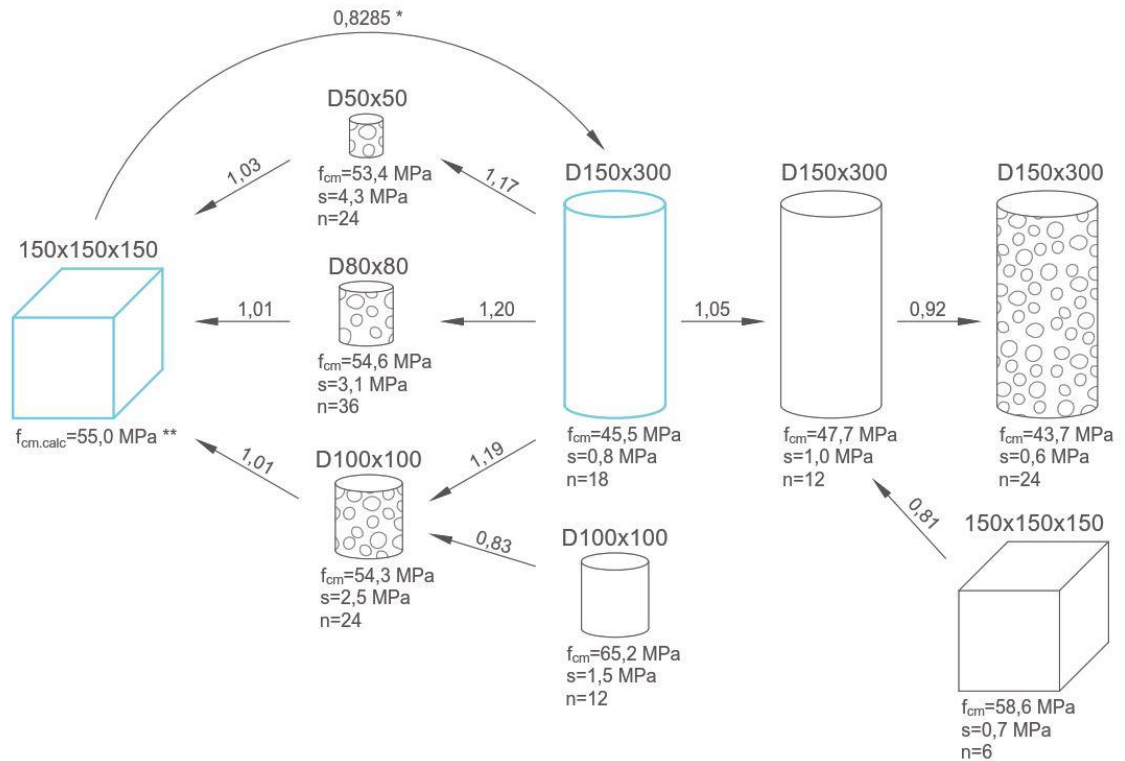
\* = Kuutio- ja lieriölujuuden välisen suhteen yleistys standardin EN 1992-1-1 betonin lujuusluokkien mukaisesti, yleistys on esitetty kuvassa 12.

\*\* = Laskennallinen kuutiolujuus, joka on laskettu vedellä kyllästetyn standardi-lieriön puristuslujuudesta muunnoskertoimella  $1/0,828=1,207$ .

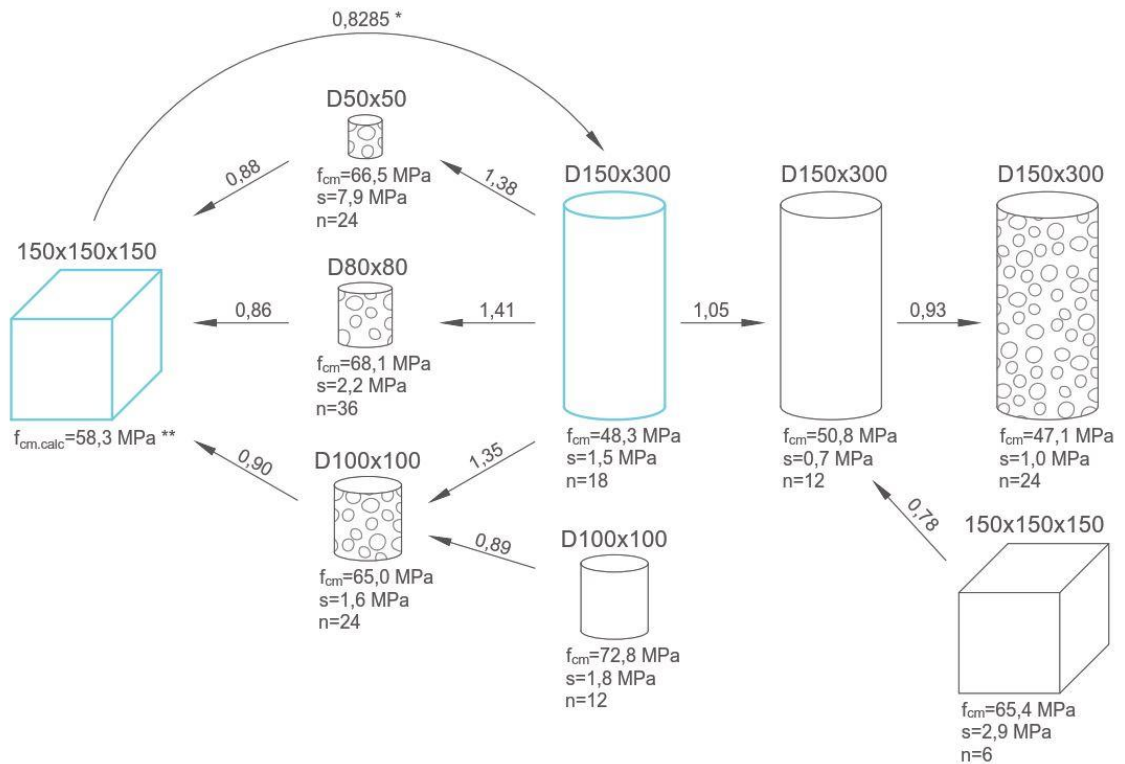
\*\*\* = Rakennekoekappaleet on puristettu 323 vuorokauden ikäisenä.



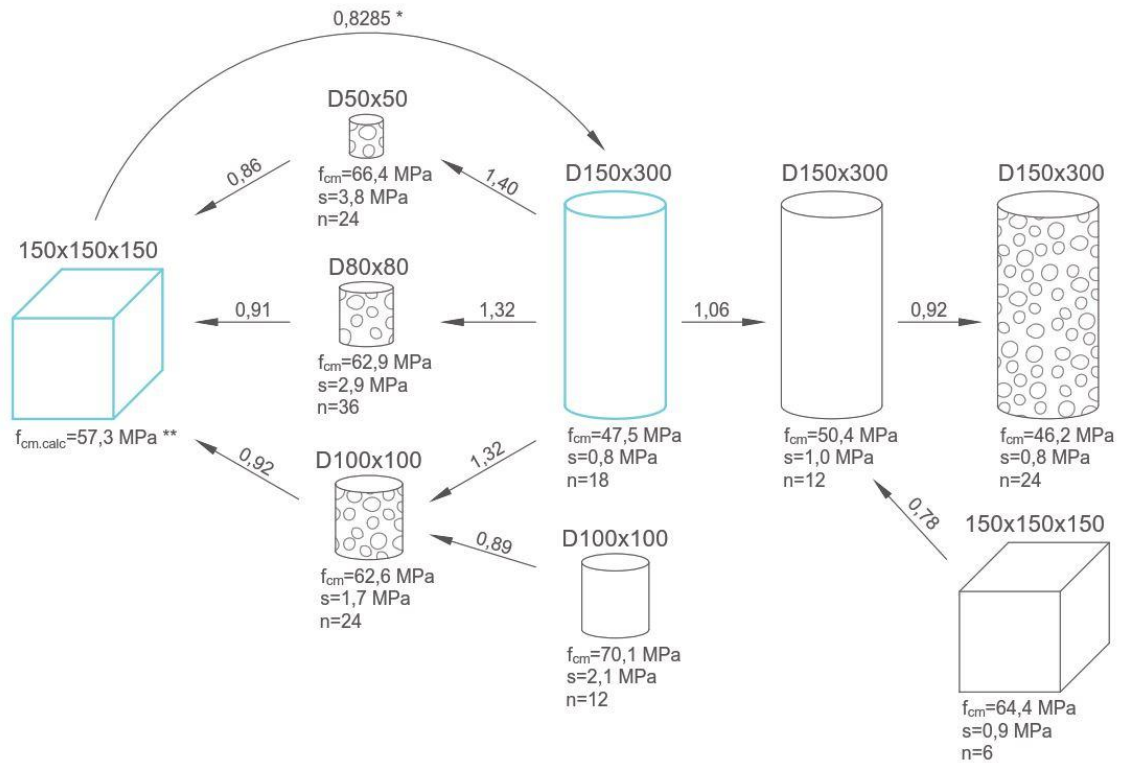
**Kuva 50.** Betonilaadun C35/45 P50 timanttiorattujen rakennekoekappaleiden ja valet-tujen standardikoekappaleiden (lieriö- ja kuutiolujuus) väliset suhteet.



**Kuva 51.** Betonilaadun C30/37 P20 timanttiorattujen rakennekoekappaleiden ja valetujen standardikoekappaleiden (lieriö- ja kuutiolujuus) väliset suhteet.



**Kuva 52.** Betonilaadun C50/60 P50 timanttiorattujen rakennekoekappaleiden ja valetujen standardikoekappaleiden (lieriö- ja kuutiolujuus) väliset suhteet.



**Kuva 53.** Betonilaadun C35/45 timanttiorattujen rakennekoekappaleiden ja valettujen standardikoekappaleiden (lieriö- ja kuutiolujuus) väliset suhteet.

## 4.8 Timanttiterän kunnan vaikutus puristuslujuuteen

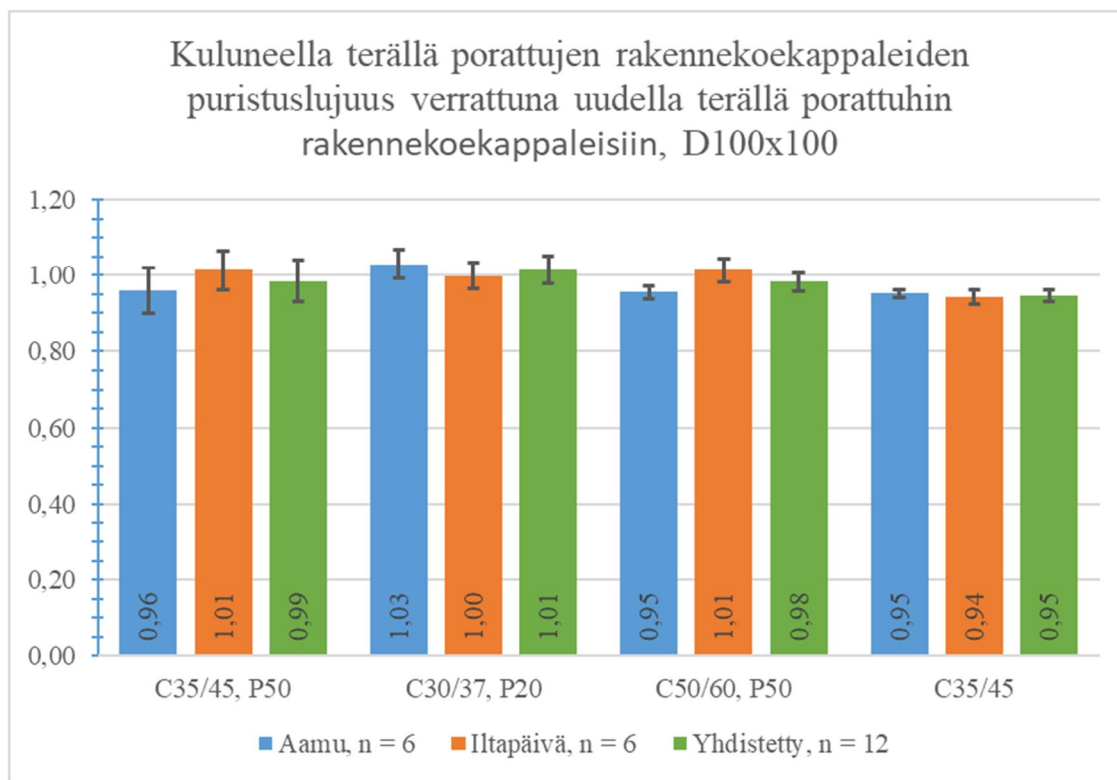
Timanttiterän kunnan vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin nimellishalkaisijaltaan D50, D80 ja D100 rakennekoekappaleilla, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan saman ikäisenä (91 vuorokautta) puristettujen, uudella timanttiterällä porattujen vastaavan kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksiin. Tarkasteltavan tutkimussarjan koko on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä. Sekä kuluneella että uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden päiden tasoitus on tehty hiomalla. Puristuskokeet suoritettiin kuivassa kosteusolosuhteessa, rakennekoekappaleita kuivattiin huoneilmassa vähintään kolme vuorokautta ennen puristuskokeiden suorittamista.

### 4.8.1 Rakennekoekappaleet D100x100, terän kunnan vaikutus

Kuvassa 54 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun kuluneella timanttiterällä porattujen D100x100 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;100,k}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;100}$  verrattuna ( $f_{cm;100,k}/f_{cm;100}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesar-

jan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla kuluneella terällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{100.k} / f_{cm;100}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 54 esitetyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjausker-toimia.

Tuloksista havaitaan, että heikoimmalla betonilaadulla C30/37 P20 timanttiterän kun-nolla ei ole vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Muilla betonilaadulla kuluneella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet olivat noin 1...5 % heikompia kuin uudella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet. Kuluneella timant-titerällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 2...6 %, kun tuloksia verrataan uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden lujuuksiin. Kuluneella ti-manttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnan maksimi on vain prosentin ver-ran suurempi kuin uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden tapauksessa. Tutki-mustulokset vahvistavat ennakko-olettamuksen, että tutkimuksessa käytetyllä kuluneella timanttiterällä olisi voinut vielä työskennellä, vaikka terä silmämääräisesti olikin huomattavan kulunut.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;100.k} / f_{cm;100}$	$s_{100.k} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.k} / f_{cm;100}$	$s_{100.k} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.k} / f_{cm;100}$	$s_{100.k} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.k} / f_{cm;100}$	$s_{100.k} / f_{cm;100}$
Aamu	0,96	0,06	1,03	0,04	0,95	0,02	0,95	0,01
Iltapäivä	1,01	0,05	1,00	0,03	1,01	0,03	0,94	0,02
Yhdistetty	0,99	0,06	1,01	0,04	0,98	0,02	0,95	0,02

**Kuva 54.** Kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D100x100 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D100x100 verrattuna.

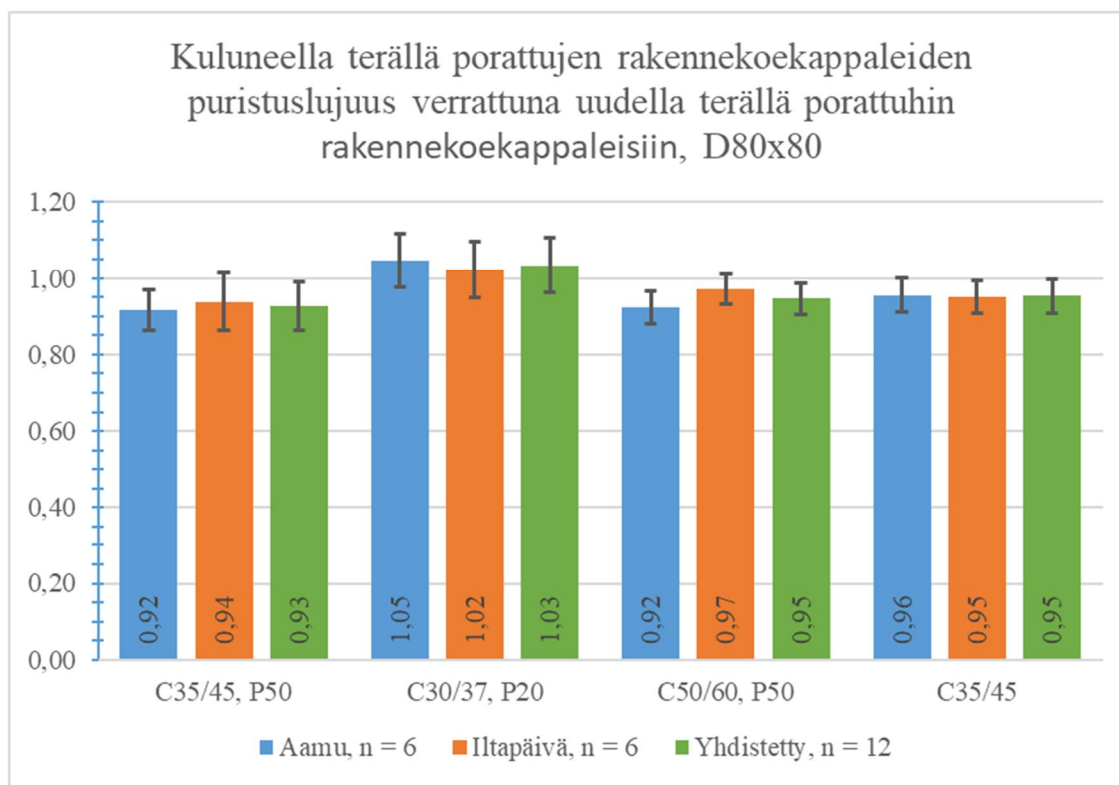
#### 4.8.2 Rakennekoekappaleet D80x80, terän kunnan vaikutus

Kuvassa 55 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun kuluneella timanttiterällä porattujen D80x80 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;80.k}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;80}$  verrattuna ( $f_{cm;80.k} / f_{cm;80}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla kuluneella terällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{80.k} / f_{cm;80}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 55 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että heikoimmalla betonilaadulla C30/37 P20 timanttiterän kunnolla ei ole vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Muilla



betonilaadulla kuluneella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet olivat noin 5...7 % heikompia kuin uudella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet. Kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 4...7 %, kun tuloksia verrataan uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden lujuuksiin. Kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnan maksimi on vain prosentin verran suurempi kuin uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden tapauksessa. Tutkimustulosten perusteella silmämääräisesti huoltokuntoisuuden rajalla olevalla timanttiterällä olisi vielä tarpeen vaatiessa voinut välttävästi työskennellä.



Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;80.k} / f_{cm;80}$	$s_{80.k} / f_{cm;80}$	$f_{cm;80.k} / f_{cm;80}$	$s_{80.k} / f_{cm;80}$	$f_{cm;80.k} / f_{cm;80}$	$s_{80.k} / f_{cm;80}$	$f_{cm;80.k} / f_{cm;80}$	$s_{80.k} / f_{cm;80}$
Aamu	0,92	0,05	1,05	0,07	0,92	0,04	0,96	0,05
Iltapäivä	0,94	0,08	1,02	0,08	0,97	0,04	0,95	0,04
Yhdistetty	0,93	0,06	1,03	0,07	0,95	0,04	0,95	0,04

**Kuva 55.** Kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D80x80 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D80x80 verrattuna.

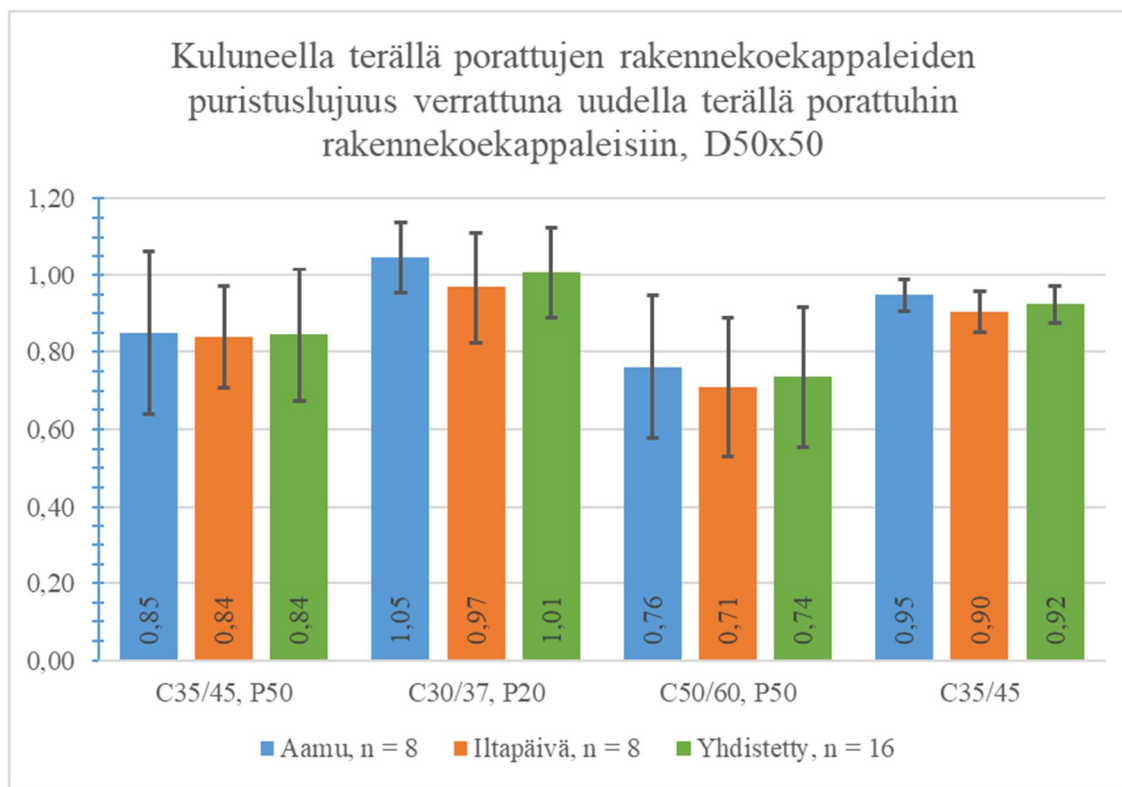
### 4.8.3 Rakennekoekappaleet D50x50, terän kunnan vaikutus

Kuvassa 56 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun kuluneella timanttiterällä porattujen D50x50 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien

keskiarvon  $f_{cm;50,k}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;50}$  verrattuna ( $f_{cm;50,k} / f_{cm;50}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla kuluneella terällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo uudella terällä porattujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{50,k} / f_{cm;50}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 56 esitetyt tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että heikoimmalla betonilaadulla C30/37 P20 timanttiterän kunnolla ei ole vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Muilla betonilaadulla kuluneella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet olivat noin 8...24 % heikompia kuin uudella timanttiterällä poratut rakennekoekappaleet. Kuluneella ja uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien välinen ero kasvaa selvästi betonin nimellislajuuden kasvaessa. Kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi betonilaadulla C35/45 saatiin noin 5 %, kun tuloksia verrataan uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden lujuuksiin. Muilla betonilaaduilla hajonnaksi saatiin noin 12...18 %. Kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonta on samaa suuruusluokkaa mutta maksimin osalta hieman suurempi verrattuna uudella timanttiterällä porattujen halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden tuloksiin. Kokonaisvaltaisesti tarkasteltuna kuluneen timanttiterän havaittiin kasvattavan halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden hajontaa selvästi.

Tutkimustulosten perusteella silmämääräisesti selvästi huoltokuntoisen timanttiterän käyttö ei merkittävästi kasvata tutkimustulosten hajontaa. Tutkimusten havainnot kuitenkin osoittavat, että halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa kuluneen terän käyttö vaikuttaa etenkin nimellislajuudeltaan lujemmilla betonilaadulla merkittävästi rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.



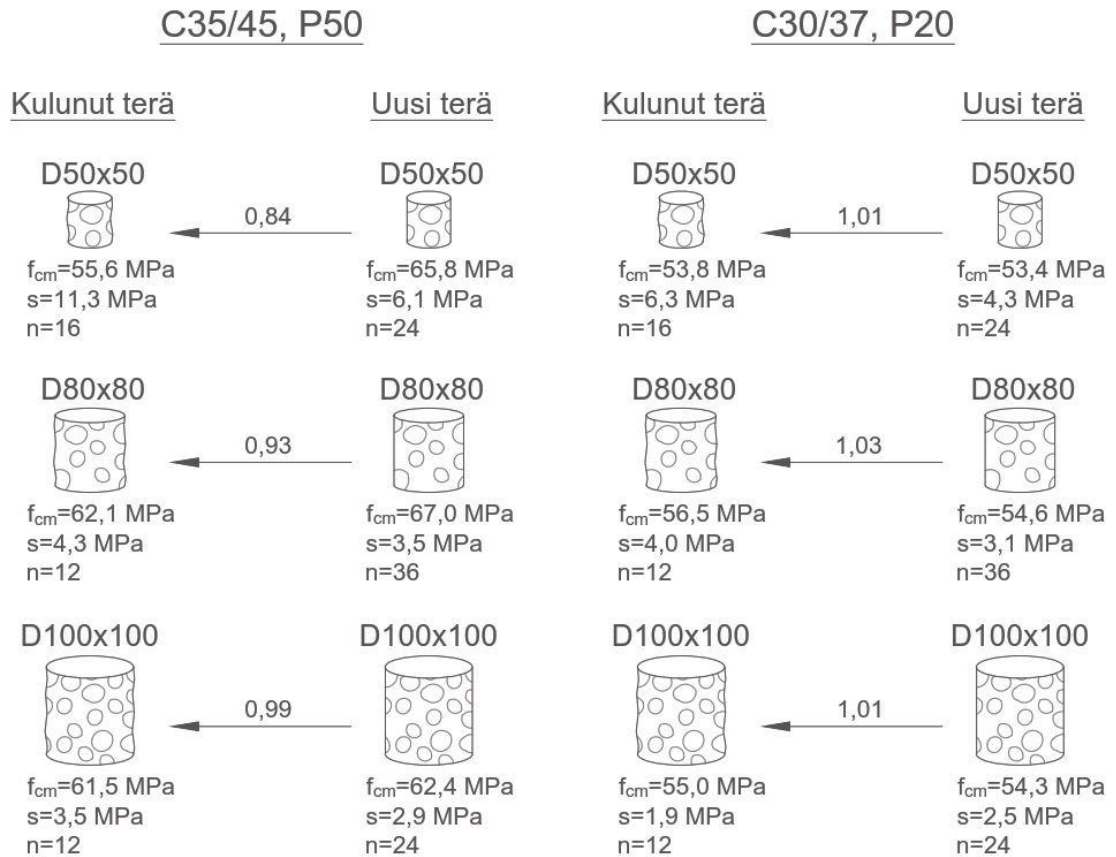
Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;50.k} / f_{cm;50}$	$s_{50.k} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.k} / f_{cm;50}$	$s_{50.k} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.k} / f_{cm;50}$	$s_{50.k} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.k} / f_{cm;50}$	$s_{50.k} / f_{cm;50}$
Aamu	0,85	0,21	1,05	0,09	0,76	0,18	0,95	0,04
Iltapäivä	0,84	0,13	0,97	0,14	0,71	0,18	0,90	0,05
Yhdistetty	0,84	0,17	1,01	0,12	0,74	0,18	0,92	0,05

**Kuva 56.** Kuluneella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden D50x50 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D50x50 verrattuna.

#### 4.8.4 Tutkimuksessa havaittu timanttiterän kunnan vaikutus puristuslujuuteen

Tässä kappaleessa on esitetty koottuna tutkimuksessa havaittu timanttiterän kunnan vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Rakennekoekappaleiden päiden tasoitus on tehty koneellisesti hiomalla. Tutkimuksessa käytetyistä kuluneista timanttiteristä nimellishalkaisijaltaan 50 mm kokoinen terä on selvästi kulunein. Kuvissa 57 ja 58 on esitetty kuluneella ja uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden väliset puristuslujuuksien suhteet. Lisäksi kuvissa on esitetty kaikkien esitettyjen koekappaleiden puristuslujuuksien ja puristuslujuustulosten hajontojen keskiarvot sekä koekappalemäärät. Kuvissa kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus saadaan, kun uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus kerrotaan nuolen mukaisella kertoimella. Kaikki rakennekoekappaleiden puristuskokeet tehtiin

nimellisesti 91 vuorokauden ikäisille betoneille ja kaikki puristuskokeet tehtiin kuivassa kosteusolosuhteessa.



**Kuva 57.** Betonilaatujen C35/45 P50 ja C30/37 P20 kuluneella ja uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien väliset suhteet, mittaustulosten keskiarvot ja koekappalemäärät.



**Kuva 58.** Betonilaatujen C50/60 P50 ja C35/45 kuluneella ja uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien väliset suhteet, mittaustulosten keskiarvot ja koekappalemäärät.

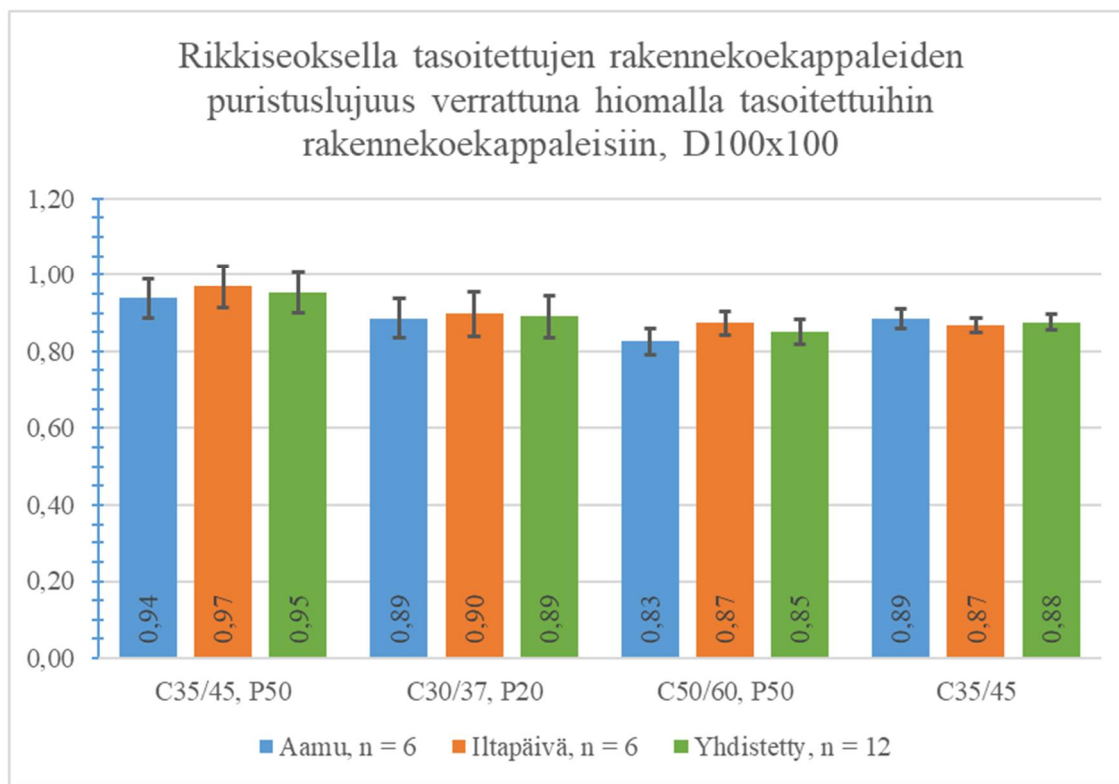
## 4.9 Rakennekoekappaleiden tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen

Rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikan vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin nimellishalkaisijaltaan D50, D80 ja D100 rakennekoekappaleilla, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Rakennekoekappaleiden vaihtoehtoisena tasoitustekniikkana käytettiin sahattujen päiden tasoittamista rikkiseoksella, kun muissa tutkimuksen osioissa päiden tasoitus tehtiin koneellisesti hiomalla. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan saman ikäisenä (91 vuorokautta) puristettujen, koneellisesti hiomalla tasoitettujen vastaavan kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksiin. Sekä rikkiseoksella, että hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden timanttiporaus suoritettiin uudella timanttiterällä. Puristuskokeet suoritettiin kuivassa kosteusolosuhteessa, rakennekoekappaleita kuivattiin huoneilmassa vähintään kolme vuorokautta ennen puristuskokeiden suorittamista. Tarkasteltavan tutkimussarjan koko on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä.

### 4.9.1 Rakennekoekappaleet D100x100, tasoitustekniikan vaikutus

Kuvassa 59 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun rikkiseoksella tasoitettujen D100x100 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;100.s}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;100}$  verrattuna ( $f_{cm;100.s} / f_{cm;100}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskiahajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskiahajonnan keskiarvo hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{100.s} / f_{cm;100}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 59 esitetyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että kaikilla betonilaaduilla rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet ovat puristuslujuudeltaan heikompia kuin hiomalla tasoitetut rakennekoekappaleet. Rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet olivat noin 5...15 % heikompia kuin hiomalla tasoitetut rakennekoekappaleet. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 2...5 %, kun tuloksia verrataan hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden lujuuteen. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta on samankaltainen kuin hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta. Tutkimustulosten perusteella rikkiseoksen käyttö ei kasvata halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleista määritettävän puristuslujuuden hajontaa. Rikkiseoksen käytöllä päiden tasoitusmenetelmänä on kuitenkin selvä vaikutus rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.



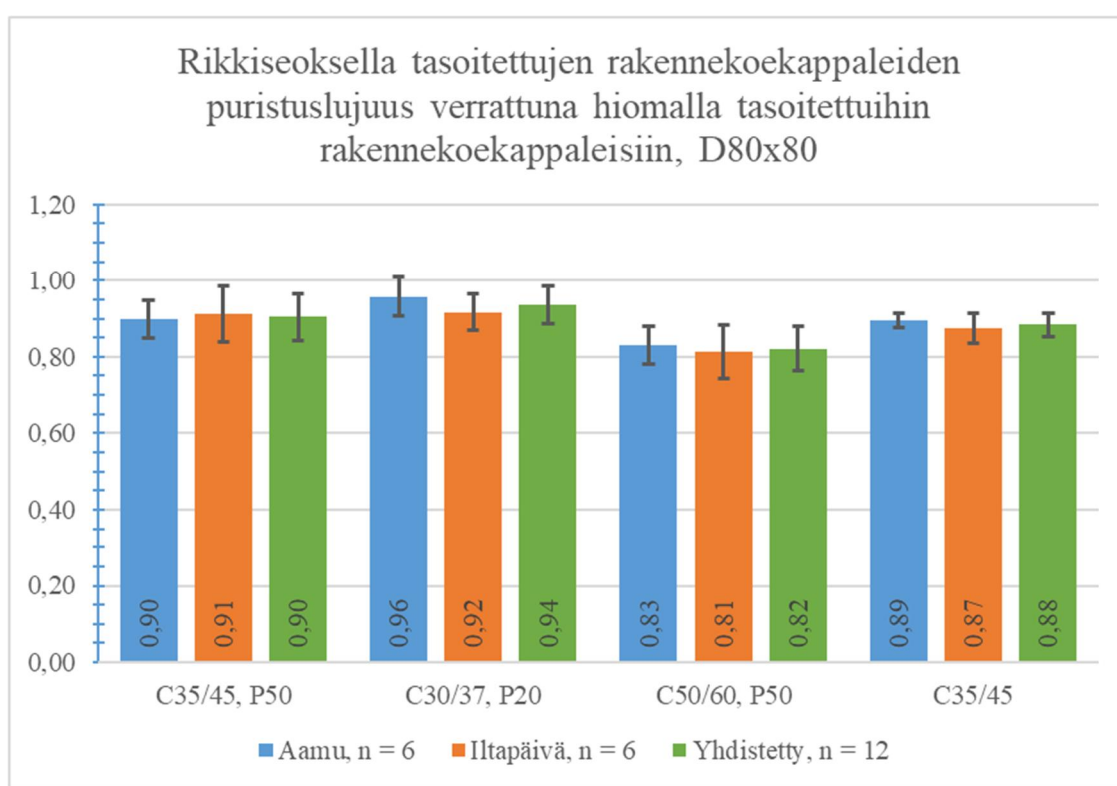
Betoni	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm;100.s} / f_{cm;100}$	$s_{100.s} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.s} / f_{cm;100}$	$s_{100.s} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.s} / f_{cm;100}$	$s_{100.s} / f_{cm;100}$	$f_{cm;100.s} / f_{cm;100}$	$s_{100.s} / f_{cm;100}$
Aamu	0,94	0,05	0,89	0,05	0,83	0,03	0,89	0,03
Iltapäivä	0,97	0,05	0,90	0,06	0,87	0,03	0,87	0,02
Yhdistetty	0,95	0,05	0,89	0,05	0,85	0,03	0,88	0,02

**Kuva 59.** Uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden D100x100 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D100x100 verrattuna.

#### 4.9.2 Rakennekoekappaleet D80x80, tasoitustekniikan vaikutus

Kuvassa 60 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun rikkiseoksella tasoitettujen D80x80 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;80.s}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;80}$  verrattuna ( $f_{cm;80.s} / f_{cm;80}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{80.s} / f_{cm;80}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 60 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Tuloksista havaitaan, että kaikilla betonilaaduilla rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat heikompia kuin hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden olivat noin 6...18 % heikompia kuin hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 3...6 %, kun tuloksia verrataan hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden lujuuteen. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta on samankaltainen kuin hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta. Tutkimustulosten perusteella rikkiseoksen käyttö ei kasvata halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleista määritettävän puristuslujuuden hajontaa. Rikkiseoksen käytöllä päiden tasoisuusmenetelmänä on kuitenkin selvä vaikutus rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen, vaikutus on hieman suurempi kuin halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa.



Betoni	C35/45, P50		C30/37, P20		C50/60, P50		C35/45	
	$f_{cm,80.s} / f_{cm,80}$	$s_{80.s} / f_{cm,80}$	$f_{cm,80.s} / f_{cm,80}$	$s_{80.s} / f_{cm,80}$	$f_{cm,80.s} / f_{cm,80}$	$s_{80.s} / f_{cm,80}$	$f_{cm,80.s} / f_{cm,80}$	$s_{80.s} / f_{cm,80}$
Aamu	0,90	0,05	0,96	0,05	0,83	0,05	0,89	0,02
Iltapäivä	0,91	0,07	0,92	0,05	0,81	0,07	0,87	0,04
Yhdistetty	0,90	0,06	0,94	0,05	0,82	0,06	0,88	0,03

**Kuva 60.** Uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden D80x80 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D80x80 verrattuna.



### 4.9.3 Rakennekoekappaleet D50x50, tasoitustekniikan vaikutus

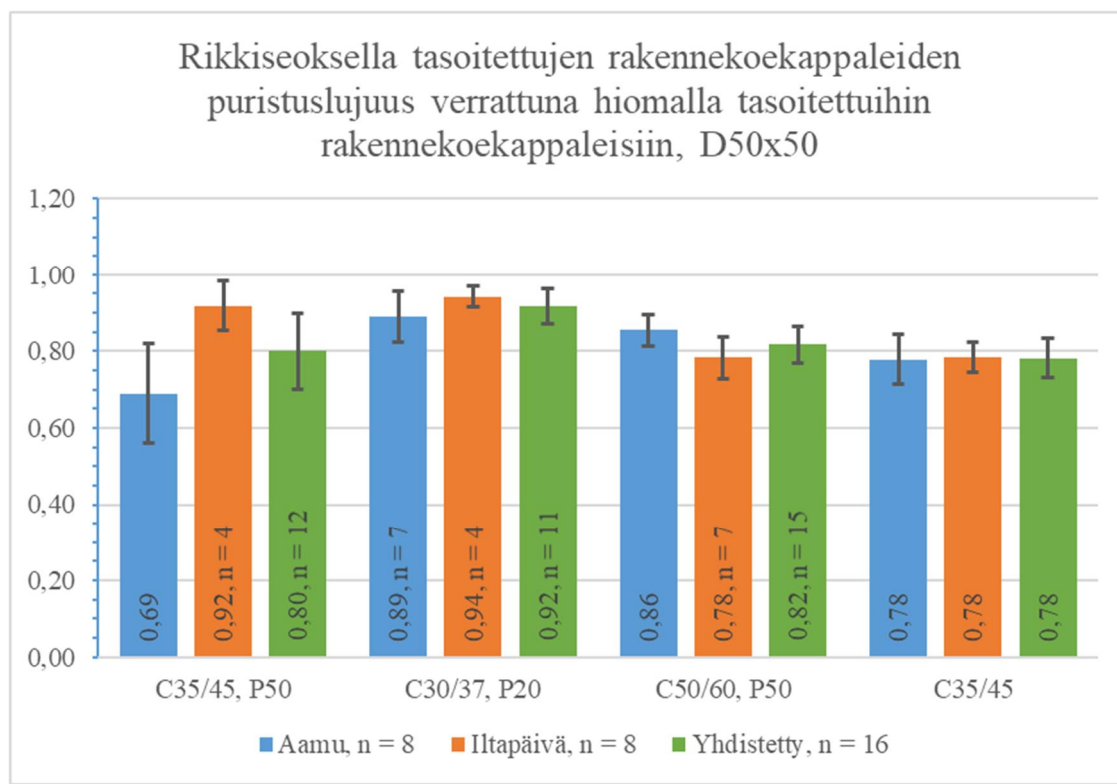
Kuvassa 61 on esitetty pylväsdiagrammeina ja taulukkomuodossa jokaisen betonilaadun rikkiseoksella tasoitettujen D50x50 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvon  $f_{cm;50,s}$  suhde vastaavan betonilaadun saman kokoiseen, hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskiarvoon  $f_{cm;50}$  verrattuna ( $f_{cm;50,s} / f_{cm;50}$ ). Pylväsdiagrammien yläpäässä on esitetty janamuodossa tarkasteltavan rakennekoekappalesarjan keskihajonta  $s$ , joka on laskettu jakamalla rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten keskihajonnan keskiarvo hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden keskimääräisellä puristuslujuudella ( $s_{50,s} / f_{cm;50}$ ). Jokaisesta betonilaadusta on esitetty erikseen aamun ja iltapäivän valuerän tulokset, sekä valuerien yhdistetty tulos. Kuvassa 61 esitettyjä tuloksia analysoitaessa ei ole käytetty korjauskertoimia.

Rikkiseoksella tasoitetuista, halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappalesarjoista jouduttiin hylkäämään koetuloksia. Suurimmassa osassa hylkäyksistä rikkikerroksessa havaittiin koestushetkellä murtuma tai rikkikerroksen arvioitiin selvästi vaikuttaneen mitattuun puristuslujuuteen. Kahden hylätyn rakennekoekappaleen tapauksessa rikkikerroksessa ei havaittu poikkeamia, mutta rakennekoekappaleen puristuslujuustulos jäi alle puoleen tutkimussarjakohtaisesta keskiarvosta, minkä arvioitiin olevan riittävä hylkäysperuste. Taulukossa 61 on esitetty kaikkien rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuskokeiden keskimääräiset tulokset ja liitteissä 9-12. on esitetty rakennekoekappalekohtaiset puristuslujuustulokset. Kuvan 61 tuloksissa hylättyjä rakennekoekappaleita ei ole otettu huomioon. Kuvan 61 värikoodien selitteissä on ilmoitettu tutkimussarjojen alkupe räiset koot, pylväisiin on kirjattu alkuperäisestä poikkeavat tutkimussarjakoot.

Tuloksista havaitaan, että kaikilla betonilaaduilla rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet ovat puristuslujuudeltaan heikompia kuin hiomalla tasoitetut rakennekoekappaleet. Rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet olivat noin 8...22 % heikompia kuin hiomalla tasoitetut rakennekoekappaleet. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonnaksi saatiin 5...10 %, kun tuloksia verrataan hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden lujuuteen. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta on samankaltainen kuin hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden hajonta. Hajontaa tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että mikäli hylätyt rakennekoekappaleet olisi huomioitu tuloksissa, olisi hajonnaksi saatu lähes jokaisella betonilaadulla noin kaksinkertainen tulos.

Tutkimustulosten perusteella rikkiseoksen käyttö ei kasvata halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleista määritettävän puristuslujuuden hajontaa. Rikkiseoksen käytöllä päiden tasoitusmenetelmänä on kuitenkin selvä vaikutus rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen, vaikutus on hieman suurempi kuin halkaisijaltaan 80 mm ja 100 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden tapauksessa tutkimuksessa havaittiin selvä rikityksen epäonnistumisriski. Kooltaan pienet

rakennekoekappaleet ovat riktystilanteessa hankalampia käsitellä kuin kooltaan suuremmat rakennekoekappaleet. Lisäksi riktyspinta-alan ollessa pieni, korostustuvat rikkikerrokseen muodostuvat pienet virheellisydet merkittävästi.



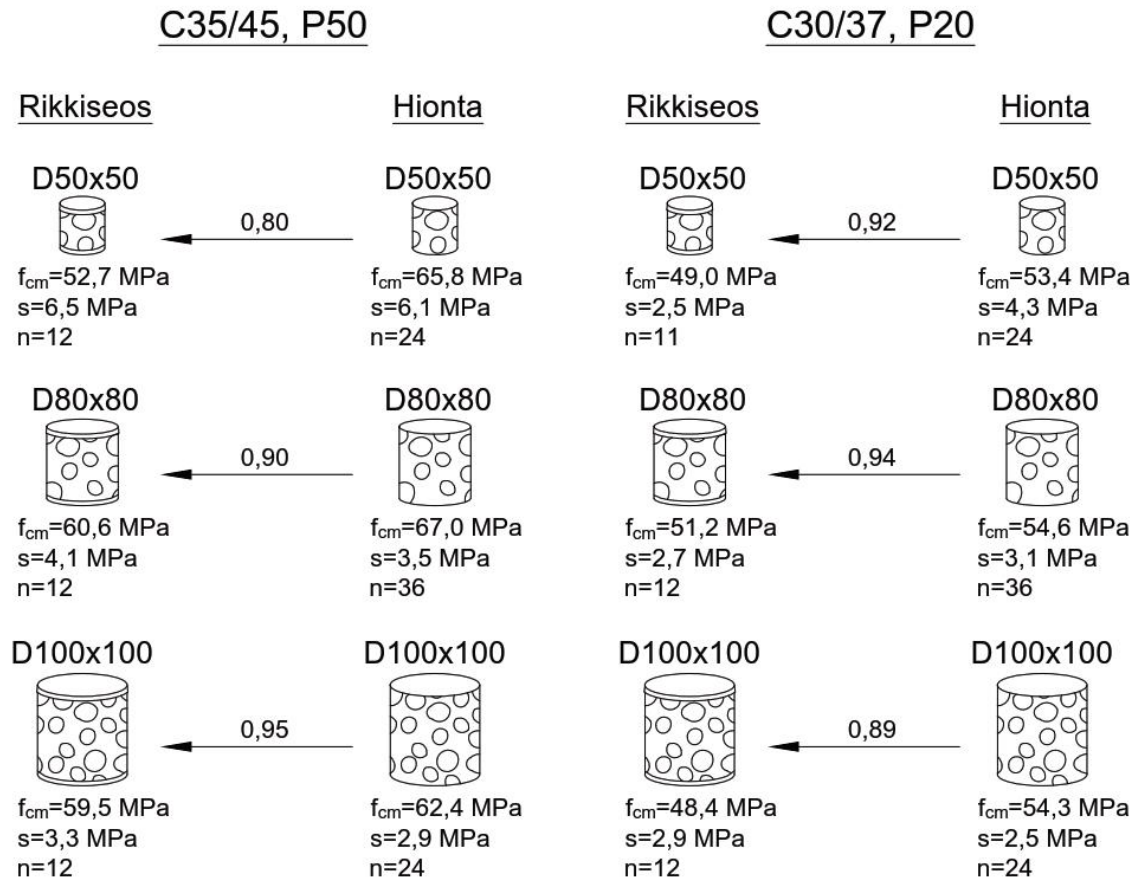
Betoni	C35/45, P50		C30/37, P20		C50/60, P50		C35/45	
	$f_{cm;50.s} / f_{cm;50}$	$s_{50.s} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.s} / f_{cm;50}$	$s_{50.s} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.s} / f_{cm;50}$	$s_{50.s} / f_{cm;50}$	$f_{cm;50.s} / f_{cm;50}$	$s_{50.s} / f_{cm;50}$
Aamu	0,69	0,13	0,89	0,07	0,86	0,04	0,78	0,06
Iltapäivä	0,92	0,07	0,94	0,03	0,78	0,05	0,78	0,04
Yhdistetty	0,80	0,10	0,92	0,05	0,82	0,05	0,78	0,05

**Kuva 61.** Uudella timanttiterällä porattujen ja rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden D50x50 keskimääräisten puristuslujuuksien suhde uudella timanttiterällä porattuihin ja hiomalla tasoitettuihin rakennekoekappaleisiin D50x50 verrattuna.

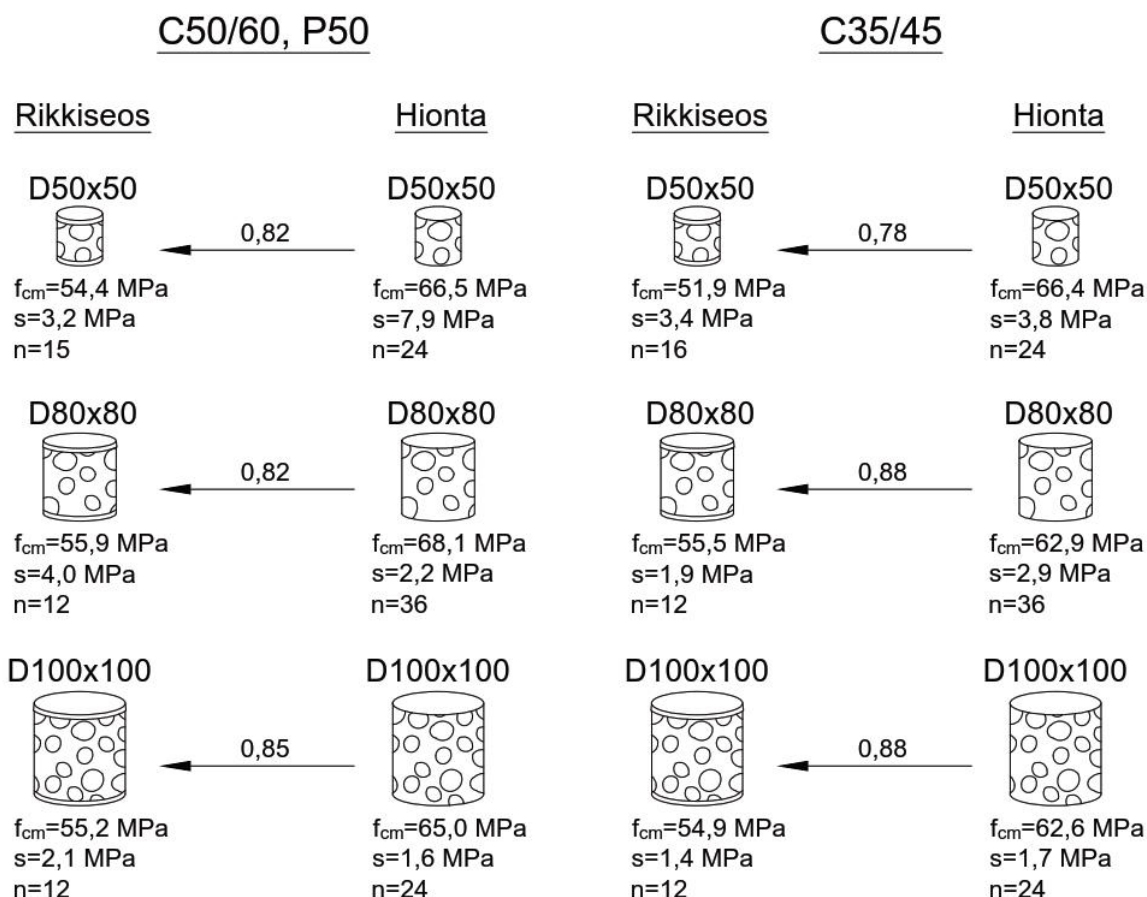
#### 4.9.4 Tutkimuksessa havaittu tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen

Tässä kappaleessa on esitetty koottuna tutkimuksessa havaittu rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikan vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Rakennekoekappaleiden timanttitoraukset on tehty uudella timanttiterällä. Kuvissa 62 ja 63 on esitetty rikkiseoksella ja koneellisesti hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden väliset puristuslujuuksien suhteet. Lisäksi kuvissa on esitetty kaikkien esitettyjen koekappaleiden puristuslujuuksien ja puristuslujuustulosten hajontojen keskiarvot sekä koekappa-

lemäärät. Kuvissa rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus saadaan, kun hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus kerrotaan nuolen mukaisella kertoimella. Kaikki rakennekoekappaleiden puristuskokeet tehtiin nimellisesti 91 vuorokauden ikäisille betoneille ja kaikki puristuskokeet tehtiin kuivassa kosteusolosuhteessa.



**Kuva 62.** Betonilaatujen C35/45 P50 ja C30/37 P20 rikkiseoksella ja koneellisesti hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien väliset suhteet, mittaustulosten keskiarvot ja koekappalemäärät.



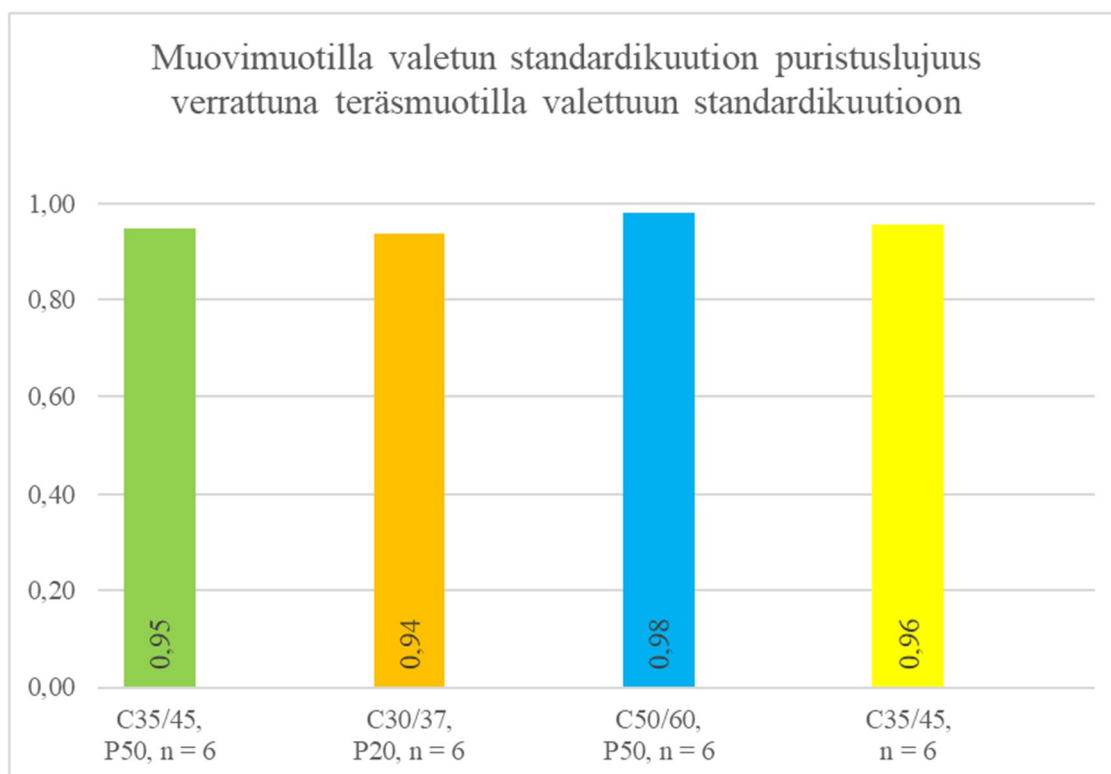
**Kuva 63.** Betonilaatujen C50/60 P50 ja C35/45 rikkiseoksella ja koneellisesti hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien väliset suhteet, mittaustulosten keskiarvot ja koekappalemäärät.

#### 4.10 Muottimateriaalin vaikutus puristuslujuuteen

Muottimateriaalin vaikutusta standardikoekappaleesta määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin standardikuutioilla. Jokaisella betonilaadulla valettiin standardikuutioita sekä teräksisillä, että muovisilla kuutiomuotteilla. Puristuskokeet tehtiin nimellisesti 91 vuorokauden iässä ja kuivassa kosteusolosuhteessa. Tarkasteltavien tutkimussarjojen koot on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä. Standardikuutioiden valupinnat hierrettiin valuvaiheessa, muottien purkamisen jälkeen kuutioita ei työstetty. Puristuskokeet suoritettiin sivupintojen muottipintoja vasten.

Kuvassa 64 on esitetty aamun ja iltapäivän valuerien yhdistetyt tulokset. Tutkimuksessa eri kuutiomuottityypeillä valettavia standardikuutioita valettiin hyvin pienet erät ( $n=3$  / erä), joten aamun ja iltapäivän valuerien tuloksia ei ole tarpeen kannattavaa vertailla erikseen. Kuvassa muovimuotteilla valettujen standardikuutioiden keskimääräistä puristuslujuutta verrataan teräsmuotteilla valettujen standardikuutioiden keskimääräiseen puristuslujuuteen. Tuloksista havaitaan, että betonilaadusta riippumatta teräsmuotteilla valetut

standardikuutiot ovat noin 2...6 % lujempia verrattuna muovimuoteilla valettuihin. Taulukossa 25 on esitetty standardikuutioiden tarkemmat mittaustulokset, josta havaitaan, että eri muottityypeillä puristuslujuuksien hajonta on saman suuntainen. Standardikuutioiden puristuslujuuksien hajonnat vaihtelevat merkittävästi aamun ja iltapäivän valuerien välillä, mutta hajonnasta ei voida tehdä suoria päätelmiä, sillä tutkimussarjojen pienen koon seurauksena yksittäisten keskiarvosta eroavien tulosten merkitys hajonnan kasvuun on merkittävä.



**Kuva 64.** Muovimuotilla valettujen standardikuutioiden keskimääräinen puristuslujuus verrattuna teräsmuoteilla valettujen standardikuutioiden keskimääräiseen puristuslujuuteen.

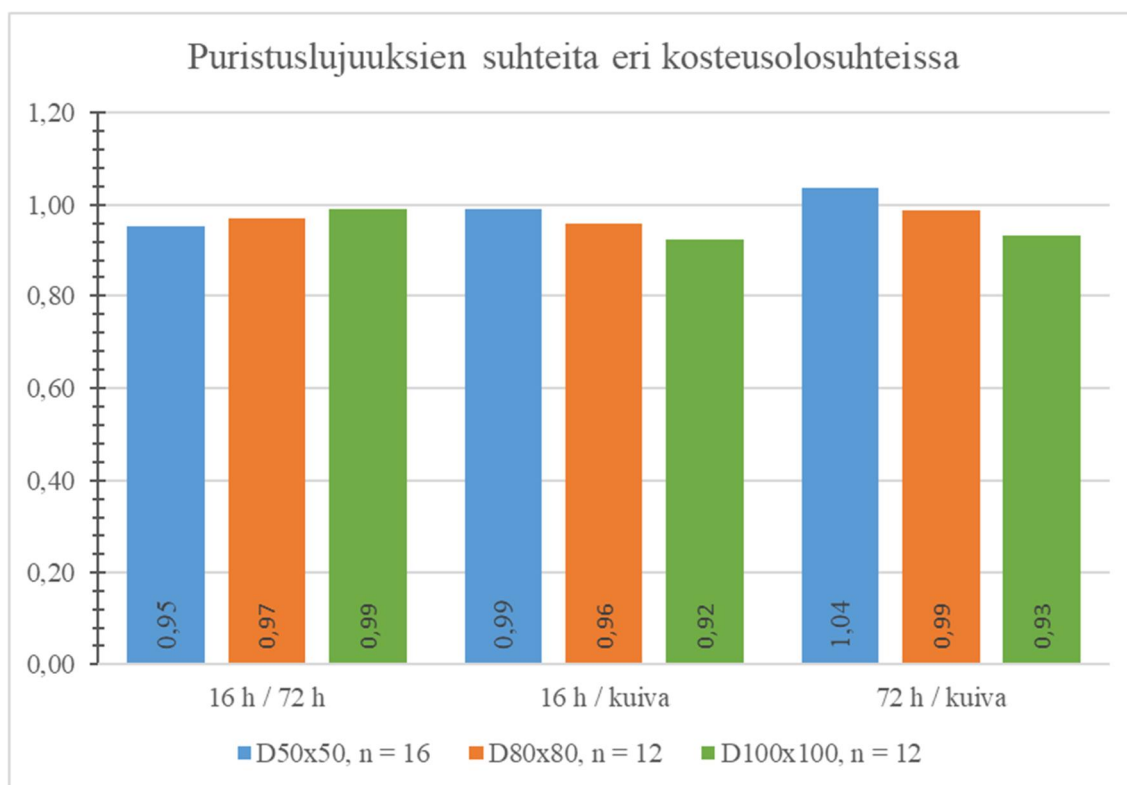
#### 4.11 Kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen

Betonilaadulla C30/37 P20 tehtiin tutkimus, missä tutkittiin rakennekoekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksessa käytettiin nimellishalkaisijaltaan ja -pituudeltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm rakennekoekappaleita, jotka puristettiin nimellisesti 91 vuorokauden iässä. Tutkimuksessa samoissa olosuhteissa valmistetut ja säilytetyt rakennekoekappalesarjat kyllästettiin vedellä ja otettiin tämän jälkeen kuivamaan huoneilmaan. Ensimmäinen rakennekoekappalesarja puristettiin 72 tuntia vedestä poisottamisen jälkeen, tilanne vastaa nykyisin voimassa olevan standardin EN 13791 [2] mukaista ohjeistusta. Toinen rakennekoekappalesarja puristettiin 16 tuntia vedestä poisottamisen jälkeen, tilanne vastaa saman standardin seuraavassa päivityksessä julkaistavaa ohjeistusta. Tarkasteltavan tutkimussarjan koko

on ilmoitettu tutkimustulosten värikoodien selitteissä. Kaikki rakennekoekappaleet on porattu uudella timanttiterällä ja päiden tasoittaminen on tehty koneellisesti hiomalla. Tutkimustulosten analysoinnissa ei ole käytetty muunnoskertoimia.

Kuvassa 65 esitetyistä tuloksista havaitaan, että rakennekoekappaleiden huomattavasti lyhyempi kuivatusaika madaltaa rakennekoekappaleista määritettävää puristuslujuutta hieman. Vaikutus on sitä suurempi, mitä pienempi rakennekoekappaleen on kooltaan. Tutkimustulosten perusteella 56 tuntia kuivatusaikaa lyhentämällä halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleista saadaan noin 5 % heikompia puristuslujuuksia. Halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleilla vastaava puristuslujuuden madaltuminen on noin 3 % ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla noin 1 %. Tutkimuksen yhteydessä halkaisijaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm standardilieriöitä puristettiin sekä kuivana, että täysin vedellä kyllästyneenä. Tutkimustulosten perusteella vedellä kyllästyneestä standardilieriöstä saadaan 4...6 % heikompia puristuslujuuksia kuin kuivasta standardilieriöstä. Standardilieriöiden tapauksessa tutkimus tehtiin kaikilla tutkimuksessa käytetyillä betonilaaduilla.

Yleisen oletuksen mukaan erikokoisista rakennekoekappaleista tilavuudeltaan pienempien rakennekoekappaleiden pitäisi yhtä pitkällä kuivatusajalla kuivaa suhteessa nopeammin kuin tilavuudeltaan suurempien.



**Kuva 65.** Uudella timanttiterällä porattujen ja hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteita eri kosteusolosuhteissa.

## 4.12 Kimmovasaralla mitatut puristuslujuudet

Lieriömäisten standardikoelempaleiden kimmovasaralla mitattuja puristuslujuuksia verrataan 91 vuorokauden iässä, vedellä kyllästettynä puristettujen standardilieriöiden D150x300 puristuslujuustuloksiin, jotka vastaavat testauksen aikaisen kosteuspitoisuuden osalta standardin EN 12390-3 [13] mukaisia standardikoelempaleita. Sekä kimmovasaramittausten tulokset, että puristuskokeiden tulokset on siis määritetty samoista standardikoelempaleista. Kimmovasaramittauksesta saadaan betonin pinnan kimmoarvoon perustuva puristuslujuus standardikuutiolujuuteen verrattavana tuloksena. Tuloksia vertailtaessa on vaihtoehtona muuntaa kimmovasaramittausten tulokset lieriölujuuden arvioiksi tai lieriömäisten standardikoelempaleiden puristuslujuustulokset kuutiolujuudeksi kappaleessa 4.4 esitetyn periaatteen mukaisesti ( $f_{ck} = 0,828$

$\cdot f_{ck.cube}$ ). Käytetään tulosten vertailussa kuutiolujuutta, kuten kappaleessa 4.4 on käytetty. Lieriölujuuden keskiarvosta muunnetulle kuutiolujuudelle käytetään tunnusta  $f_{cm.cube.m}$  [MPa]. Lieriömäisten standardikoelempaleiden kimmovasaralla määritetyille keskimääräiselle puristuslujuudelle käytetään tunnusta  $f_{cm.R}$  [MPa].

Kuutiomaisten standardikoelempaleiden kimmovasaralla mitattuja puristuslujuustuloksia verrataan 91 vuorokauden iässä, kuivassa olosuhteessa puristettujen standardikuutioiden 150 mm x 150 mm x 150 mm keskimääräiseen puristuslujuuteen  $f_{cm.cube}$  [MPa]. Kuutiomaisten standardikoelempaleiden kimmovasaratulosten ja verrattavien standardikuutioiden puristuslujuustuloksissa ei ole käytetty muunnoskertoimia. Kuutiomaisten standardikoelempaleiden kimmovasaralla määritetyille puristuslujuustuloksille käytetään tunnusta  $f_{cm.cube.R}$  [MPa].

Verrattaessa kimmovasaramittausten tuloksia mitattuihin todellisiin puristuslujuuksiin, ei tuloksia voida käsitellä muiden tutkimusosien tapaan puristuslujuuksien suhteilla. Kimmovasaramittauksella määritetään betonin puristuslujuuden 10 % alafraktiin arvo, kun taas varsinaisista puristuskokeista on määritetty keskiarvo (eli 50 % fraktiili). Standardien mukaan määritetyt arvot eivät siis ole vertailukelpoisia keskenään. Tuloksista voidaan kuitenkin tehdä suuruusluokkaan perustuva arvio siitä, kuinka hyvin kimmovasaralla määritetty puristuslujuus korreloi todellisen puristuslujuuden keskiarvon kanssa.

### 4.12.1 Standardilieriöiden kimmovasaratulokset

Taulukossa 41 on esitetty lieriömäisten standardikoelempaleiden kimmovasaramittausten tulokset eri kosteusolosuhteissa. Kimmovasaramittaukset tehtiin koneellisesti hiotuille betonipinnoille. Yksittäisten standardikoelempaleiden puristuslujuus on määritetty kimmovasaralla 12...13 iskua sisältävän sarjan mediaanin perusteella. Jokaisessa iskusarjassa tehtiin 13 iskua kimmovasaralla, mutta standardin EN 12504-2 mukaisesti yli 30 % mediaanista eroavat iskutulokset on hylätty. Kimmovasaramittausten koetulokset [Q] on

muunnettu puristuslujuuden arvoiksi [MPa] kaavan (21) mukaisesti. Laskettu keskimääräinen puristuslujuus  $f_{cm,R}$  on laskettu iskusarjakohtaisten mediaanien perusteella. Kimmovasaramittausten keskihajonta on kaikkien tutkimussarjan iskusarjojen keskihajontojen keskiarvo. Kimmovasaramittausten iskukohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 16.

**Taulukko 41.** Koestuspinnaltaan hiottujen standardilieriöiden kimmovasaramittausten tulokset eri kosteusolosuhteissa, sekä kimmovasaroitujen vedellä kyllästettyjen standardikoekappaleiden puristuslujuustulokset kuutiolujuuksiksi muunnettuna.

Betoni	Erä	n	Kimmovasaramittausten tulokset [MPa]						Puristuskokeiden tulokset [MPa]	
			kuiva		kosteaa		kyllästetty		$f_{cm,cube,m}$	s
			$f_{cm,R}$	s	$f_{cm,R}$	s	$f_{cm,R}$	s		
<b>C35/45 P50</b>	aamu	9	39,0	5,4	40,2	7,3	41,7	8,3	72,6	1,5
	iltapäivä	9	37,7	6,3	35,8	9,5	36,0	9,1	68,1	2,0
	yhdistetty	18	38,4	5,9	38,0	8,4	38,8	8,7	70,4	1,8
<b>C30/37 P20</b>	aamu	9	27,6	2,6	28,5	8,3	25,0	6,4	56,9	0,8
	iltapäivä	9	30,5	5,5	30,2	5,5	29,4	6,9	58,2	1,5
	yhdistetty	18	29,0	4,1	29,4	6,9	27,2	6,7	57,5	1,1
<b>C50/60 P50</b>	aamu	9	32,8	5,3	30,5	8,3	28,5	6,5	61,4	1,1
	iltapäivä	9	30,9	3,2	28,4	8,5	26,8	5,4	61,1	0,6
	yhdistetty	18	31,8	4,3	29,4	8,4	27,7	5,9	61,3	0,8
<b>C35/45</b>	aamu	9	28,1	3,2	27,0	5,9	26,8	4,6	57,0	0,3
	iltapäivä	9	36,4	3,4	33,8	8,6	34,7	6,3	64,6	2,1
	yhdistetty	18	32,3	3,3	30,4	7,3	30,7	5,4	60,8	1,2

Taulukon 41 kimmovasaratuloksista testausolosuhteiltaan verrannollisia puristuslujuustulosten kanssa ovat vedellä kyllästettynä kimmovasaroidut standardilieriöt. Kimmovasaroinnit suoritettiin vedellä kyllästetyille standardilieriöille juuri ennen puristuskokeiden suorittamista. Tulosten perusteella kimmovasaralla mitattu puristuslujuus on noin puolet todellisesta puristuslujuudesta, kun kimmovasaramittausten muuntamisessa puristuslujuuden arvoiksi käytetään 10 % alafraktiin sovitekäyrää, joka on esitetty kuvassa 34. 10 % alafraktiin sovitekäyrän perusteella mitattu puristuslujuus täyttää mittaustuloksen 90 % varmuudella, eli kimmovasaralla mitattu puristuslujuus on hyvin konservatiivisella puolella. Tämä on myös havaittavissa tutkimustuloksista, kimmovasaramittauksen tulokset ovat hyvin konservatiiviset todellisiin puristuslujuuksiin verrattuna.

Tutkimustulosten perusteella koekappaleen kosteuspitoisuudella on merkitystä kimmovasaralla mitattavaan puristuslujuuteen. Kimmovasaramittausten perusteella 15 minuuttia ennen kimmovasarointia suoritettu pinnan kastelu vesisumutuksella madaltaa mitattavaa puristuslujuutta 0...8 %. Täysin vedellä kyllästettyjen koekappaleiden kimmovasaralla mitatut puristuslujuudet olivat 0...15 % heikompia kuin kuivana testattujen koekappaleiden kimmovasaramittausten tulokset olivat. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että



koekappaleisiin imeytynyt kosteus kasvattaa kimmovasaramittausten hajontaa. Koekappaleiden, joiden testattavat pinnat kasteltiin vesisumutuksella 15 minuuttia ennen kimmosarointia, keskihajonta oli 43...121 % suurempi kuin kuivilla koekappaleilla. Vedellä kyllästettyjen koekappaleiden keskihajonta oli 39...66 % suurempi kuin kuivien koekappaleiden keskihajonta.

#### **4.12.2 Standardikuutioiden kimmovasaratulokset**

Taulukossa 42 esitetty on kuutiomaisten standardikoekappaleiden kimmovasaramittausten tulokset. Koekappaleet olivat kimmovasaroitaessa kuivassa kosteusolosuhteessa. Standardikuutioiden kimmovasaramittauksia suoritettiin ainoastaan aamun valuerässä valetuille koekappaleille. Kimmovasaramittauksia tehtiin käsittelemättömille muottipinnoille sekä valuvaiheessa hierretylle ja kovettuneena hiomakivellä hiotulle valupinnalle. Yksittäisten standardikoekappaleiden puristuslujuus on määritetty kimmovasaralla 11...13 iskua sisältävän sarjan mediaanin perusteella. Jokaisessa iskusarjassa tehtiin 13 iskua kimmovasaralla, mutta standardin EN 12504-2 mukaisesti yli 30 % mediaanista eroavat iskutulokset on hylätty. Kimmovasaramittausten koetulokset [Q] on muunnettu puristuslujuuden arvoiksi [MPa] kaavan (21) mukaisesti. Laskettu keskimääräinen puristuslujuus  $f_{cm.cube.R}$  on laskettu iskusarjakohtaisten mediaanien perusteella. Kimmovasaramittausten keskihajonta on kaikkien tutkimussarjan iskusarjojen keskihajontojen keskiarvo. Kimmovasaramittausten iskukohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 17.

**Taulukko 42.** Standardikuutioiden kimmovasaramittausten ja puristuskokeiden tulokset. Kimmovasaroituja pintoja ovat muottipinnan eli sivupinnat ja pohjapinta sekä valupinta, joka on valettaessa hierretty sekä kimmovasaroitaessa hiottu hiomakivellä. Sekä kimmovasara, että puristuskokeet on suoritettu kuiville standardikuutioille.

Betoni	Erä	n	Kimmovasaramittausten tulokset [MPa]				n	Puristuskokeiden tulokset [MPa]			
			teräsmuotti		muovimuotti			teräsmuotti		muovimuotti	
			$f_{cm,R}$	s	$f_{cm,R}$	s		$f_{cm,cube}$	s	$f_{cm,cube}$	s
C35/45 P50	sivu	8	29,4	4,9	28,3	3,9	3	63,5	4,4	57,2	3,3
	pohja	2	30,9	4,4	29,8	5,0					
	hierretty	2	21,6	3,9	17,6	3,6					
	hiottu	2	28,1	7,0	21,1	6,7					
C30/37 P20	sivu	8	27,0	5,2	24,1	4,2	3	57,3	0,7	53,8	1,5
	pohja	2	32,1	4,9	32,8	5,9					
	hierretty	2	15,8	3,9	17,9	5,2					
	hiottu	2	26,2	3,9	30,2	5,6					
C50/60 P50	sivu	8	30,9	4,6	26,3	3,8	3	63,9	5,3	63,7	0,8
	pohja	2	31,3	7,7	32,9	5,4					
	hierretty	2	19,6	4,6	19,8	4,1					
	hiottu	2	32,8	5,6	33,4	11,4					
C35/45	sivu	8	24,3	4,5	25,7	4,1	3	61,0	0,9	57,7	0,4
	pohja	2	31,4	6,3	30,5	4,7					
	hierretty	2	19,8	4,0	23,7	4,7					
	hiottu	2	27,4	6,0	26,2	3,7					

Tutkimustulosten perusteella ei voida sanoa, että teräs- ja muovimuoteilla valettujen standardikuutioiden lujuuksissa olisi kimmovasaramittauksissa systemaattisia eroja muottityyppien välillä. Kummankin muottityypin kimmovasaramittauksissa muottipintojen testauskohtiin jäi kimmovasaran iskusta selvästi koskettamalla havaittava jälki. Muottipinnoille muodostuu valussa ohut sementtiliimakerros, joka on muuta koekappaletta pehmeämpi. Ohut sementtiliimakerros saattaa vaimentaa kimmovasaramittausta, jonka seurauksena mittaustulokset jäävät hieman alhaisiksi. Tutkimuksessa valupinta kimmovasaroitiin sekä hierrettynä että hiottuna. Taulukossa 42 esitettyjen tulosten perusteella muottipintojen (sivu ja pohja) kimmovasaralla mitatut puristuslujuudet eivät kuitenkaan ole merkittävästi valupinnan hiottuja kimmovasaramittauksia heikompia. Havaintojen perusteella muottipinnoilla oleva ohut sementtiliimakerros ei vaikuta merkittävästi kimmovasaramittausten tuloksiin.

Tulosten perusteella teräsmuoteilla valettujen standardikuutioiden pohjapintojen kimmovasaralla mitattu puristuslujuus on noin 1...30 % suurempi kuin sivupintojen puristuslujuus. Vastaava ero muovimuoteilla valetuilla standardikuutioilla on 6...36 %. Betoni-

massaa tiivistettäessä runkoainetta painuu hieman muotin pohjalle, testattavan pinnan läheisyydessä sijaitsevat runkoainesrakeet kasvattavat kimmovasaramittauksen tulosta. Betonimassa tiivistyksessä yleisesti havaittu ilmiö selittää muottipintojen eroavat kimmovasaramittaustulokset.

Tutkimuksessa valupinnat kimmovasaroitiin kahdessa eri vaiheessa. Valuvaiheessa hierretyt valupinnat kimmovasaroitiin aluksi, jonka jälkeen pinnat hiottiin kimmovasaroitavien pintojen hiomiseen tarkoitetulla hiomakivellä. Hiomalla hierretystä pinnasta poistetaan epätasaisuudet ja mahdollisesti hieman erottunut pinta. Hionnan jälkeen valupinnat kimmovasaroitiin uudestaan. Tulosten perusteella hierretyn pinnan hiomisella kimmovasaroinnista saadaan noin 10...69 % parempi puristuslujuustulos.

Standardikuutioiden kimmovasaramittausten tuloksia verrattaessa mitattuihin puristuslujuuksiin käytetään kimmovasaroinnista sivupintojen mittaustuloksia. Tulosten perusteella molemmilla muottityypeillä kimmovasaralla mitattu puristuslujuus on noin hieman alle puolet todellisesta mitatusta puristuslujuudesta, kun kimmovasaramittausten muuntamisessa puristuslujuuden arvoiksi käytetään 10 % alafraktilin sovitekäyrää, joka on esitetty kuvassa 34. Tulokset ovat hyvin samankaltaiset verrattuna standardilieriöiden kimmovasaramittausten tuloksiin.

## 5. PÄÄTULOKSET

Tutkimuksessa tehtiin puristuskokeita kolmella tyypillisellä huokostetulla infrabetonilla, joita olivat C35/45 P50, C30/37 P20 ja C50/60 P50. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin yhtä huokostamatonta betonilaatua C35/45. Kaikilla betonilaadulla puristuskokeita tehtiin rakennekoekappaleilla, sekä standardilieriöillä ja -kuutioilla. Rakennekoekappaleet timanttitorattiin standardilieriöiden kokoisista valukappaleista, jotta rakennekoekappaleiden ja verrattavien standardikoekappaleiden lujittumisolosuhteet ja -ominaisuudet olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan. Halkaisijaltaan 150 mm rakennekoekappaleet timanttitorattiin standardilieriötä suuremmista valulieriöistä. Tutkimuksessa valulieriöistä timanttitorattuja rakennekoekappaleita käsiteltiin kuin ne olisi porattu todellisista rakenteista. Puristuskokeet suoritettiin rakennekoekappaleen pituusvaikutusta lukuun ottamatta nimellisesti 91 vuorokauden iässä. Rakennekoekappaleiden pituusvaikutuksen puristuskokeet suoritettiin betonin ollessa 323 vuorokauden ikäistä. Betonilaatujen lujuudenseurantatutkimuksessa puristuskokeita suoritettiin betonilaatujen ollessa 3, 7, 28, 91 ja 365 vuorokauden ikäistä. Lujuudenseurantatutkimuksessa koekappaleita pidettiin vesiupotuksessa aina testaushetkeen saakka. Muissa puristuskokeissa valukappaleita jälkihoidettiin vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka, minkä jälkeen betonikappaleita säilytettiin kuivassa huoneilmassa. EC2 mukainen betonien luokittelu perustuu 28 vuorokauden ikäisenä tehtäviin puristuskokeisiin. Tutkimuksen betonilaaduilla mitattiin 28 vuorokauden ikäisenä seuraavat puristuslujuudet (aamun ja iltapäivän valuerien yhdistetty tulos):

- C35/45 P50:       48,2 MPa
- C30/37 P20:       39,6 MPa
- C50/60 P50:       47,2 MPa
- C35/45:           42,5 MPa

Tutkimuksessa käytetty betonilaatu C50/60 P50 ei täyttänyt 28 vuorokauden ikäisenä nimellislujuttaan, mitattu puristuslujuus jäi nimellislujuudesta noin 6 %. Kaikilla muilla tutkimuksen betonilaadulla 28 vuorokauden puristuslujuus oli merkittävästi suurempi verrattuna betonilaatujen nimellislujuuteen. Muut betonilaadut olivat puristuslujuudeltaan 21...38 % lujempi verrattuna betonilaatujen nimellislujuuteen.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kuinka rakennekoekappaleen halkaisija vaikuttaa rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen ja kuinka rakennekoekappaleista saadaan määritettyä standardin EN 1992-1-1 [8] mukainen suunnittelulujuus. Tästä syystä kuivassa olosuhteessa testattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrattiin vedellä kyllästettynä puristettujen standardikoekappaleiden puristuslujuuksiin. Rakennekoekappaleina käytettiin nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 50 mm, 80 mm ja 100 mm rakennekoekappaleita. Rakennekoekappaleiden pituuden ja halkaisijan välisen suh-

teen ollessa 1,0, verrataan rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia kuutiolujuuteen, jotka on määritetty standardilieriöiden puristuslujuustuloksista muunnoskertoimen avulla. Lisäksi tutkimuksen edetessä päädyttiin yhdellä betonilaadulla (C35/45 P50) tarkastelemaan myös rakennekoekappaleen pituuden vaikutusta rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen (kuormitusikä 323 vuorokautta). Pituuden vaikutusta rakennekoekappaleen puristuslujuuteen tarkasteltiin ainoastaan nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla.

Rakennekoekappaleiden halkaisijan ja pituuden lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin timanttitorauksen vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä pelkän timanttitorauksen vaikutusta että kuluneen timanttiterän vaikutusta määritettävään puristuslujuuteen. Koekappaleiden päiden tasoitus tehdään Suomessa yleensä koneellisesti hiomalla tai käyttämällä rikkiseosta. Koneellista hiontaa pidetään yleisesti verrokkimenetelmänä ongelmatilanteissa [13]. Tutkimuksessa tarkasteltiin vaikuttaako rikkiseoksen käyttö rakennekoekappaleiden päiden tasoitusmenetelmänä rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.

Rakennekoekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tarkasteltiin ainoastaan betonilaadulla C30/37 P20. Standardissa EN 13791 [2] ohjeistetaan kuivattamaan rakennekoekappaleita huoneilmassa vähintään 72 tuntia rakennekoekappaleiden työstämisen jälkeen, jotta timanttitorauksessa, -sahauksessa ja hionnassa käytettävä vesi ehtii kuivua koekappaleista. Standardi on uudistuksessa, uudeksi ohjeelliseksi kuivatusajaksi on määritetty 16...24 tuntia. Tutkimuksessa tarkasteltiin, millainen vaikutus kuivatusajan lyhentämisellä on rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksessa rakennekoekappaleet kyllästettiin täysin vedellä ennen ilmakehän kuivatuksen aloittamista. Eri kuivatusaikojen lisäksi kosteuspitoisuuden vaikutusta tarkasteltiin standardilieriöillä. Tutkimuksen kaikilla betonilaadulla tehtiin puristuskokeita sekä kuivilla, että täysin vedellä kyllästetyillä standardilieriöillä. Tuloksista saadaan selville, millainen vaikutus standardilieriöiden vedellä kyllästämällä on määritettävään puristuslujuuteen.

Muottimateriaalin vaikutusta koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin standardikuutioilla. Standardikuutioita valettiin sekä teräs- että muovimuoteilla. Tutkimus tehtiin kaikilla tutkimuksen betonilaaduilla.

Tutkimuksen varsinaisten puristuskokeiden yhteydessä tarkasteltiin ainetta rikkomattomalla kimmovasaroinnilla standardilieriöiden ja -kuutioiden puristuslujuuksia. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kuinka paljon kimmovasaralla määritetty puristuslujuus eroaa todellisesta puristuslujuudesta, kun kimmovasarointituloksia tulkitaan standardin EN 13791 [2] mukaisesti 10 % alafraktiin jakaantumiskäyrää käyttäen. Jakaantumiskäyränä käytettiin laitevalmistajan luomaa käyrää, joka perustuu yli 2300 mittauksen tuloksiin. Kimmovasarointitutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi vaikuttaako testattavan koekappaleen kosteuspitoisuus kimmovasaralla mitattavaan puristuslujuuteen. Lisäksi

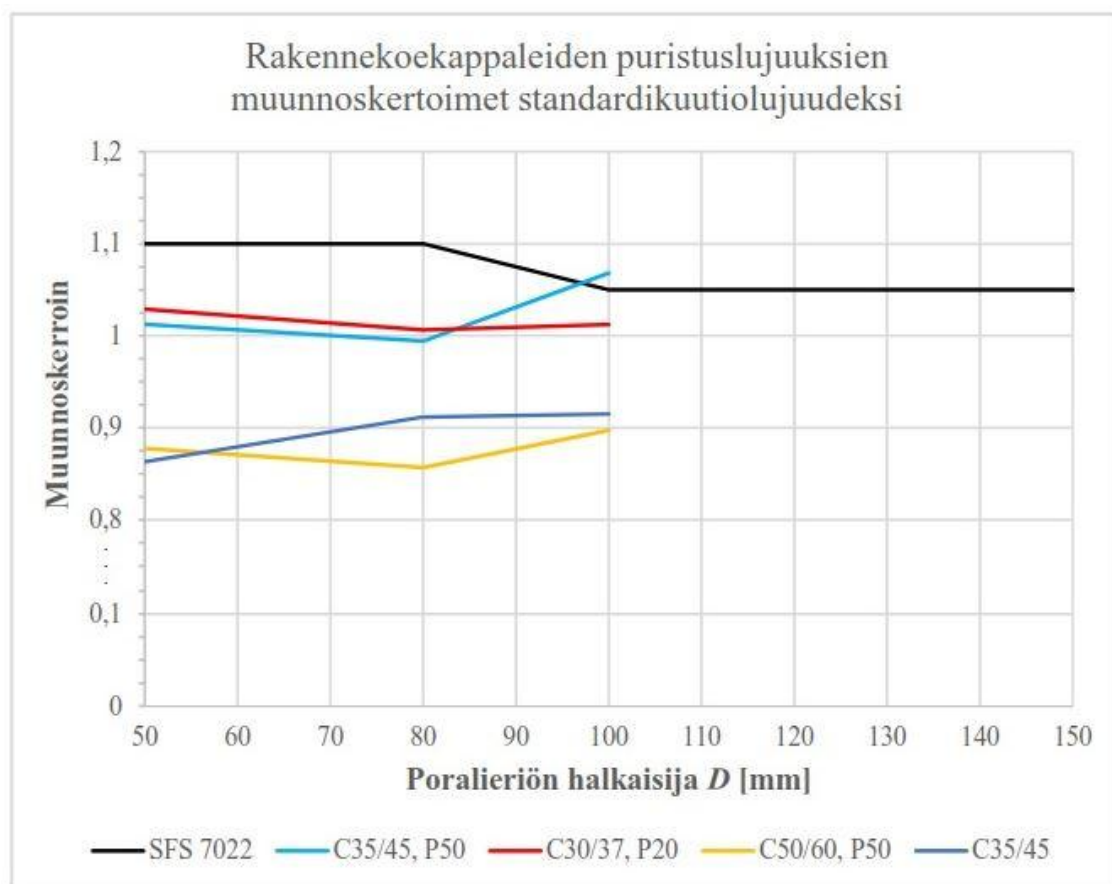
tarkasteltiin valupinnan hionnan vaikutusta kimmovasaralla mitattavaan puristuslujuuteen.

## **5.1 Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen**

Rakennekoekappaleiden halkaisijan vaikutusta puristuslujuuteen tutkittaessa rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrattiin vedellä kyllästettyjen standardikuutioiden puristuslujuuteen, joka on määritetty vedellä kyllästettyjen standardilieriöiden puristuslujuustuloksista muunnoskertoimen (1,207) avulla. Tässä kappaleessa kuutiolujuu-della tarkoitetaan edellä kuvattua lujuutta.

Tutkimustulosten perusteella betonilaadulla C35/45 P50 ja C30/37 P20 kaikkien rakennekoekappalekokojen redusoimaton puristuslujuus on joko suoraan verrannollinen tai noin 1...6 % heikompi kuutiolujuu-teen verrattuna. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 kaikkien rakennekoekappalekokojen redusoimaton puristuslujuus on selvästi kuutiolujuutta suurempi. Rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat em. betonilaaduilla noin 9...17 % suurempia kuutiolujuu-teen verrattuna. Betonilaatujen tarkemmat tutkimustulokset on esitetty kuvissa 39-44. Lisäksi betonilaatujen kaikki kokovaikutukseen liittyvät tutkimustulokset on esitetty kuvamuotoon koottuna kuvissa 50-53.

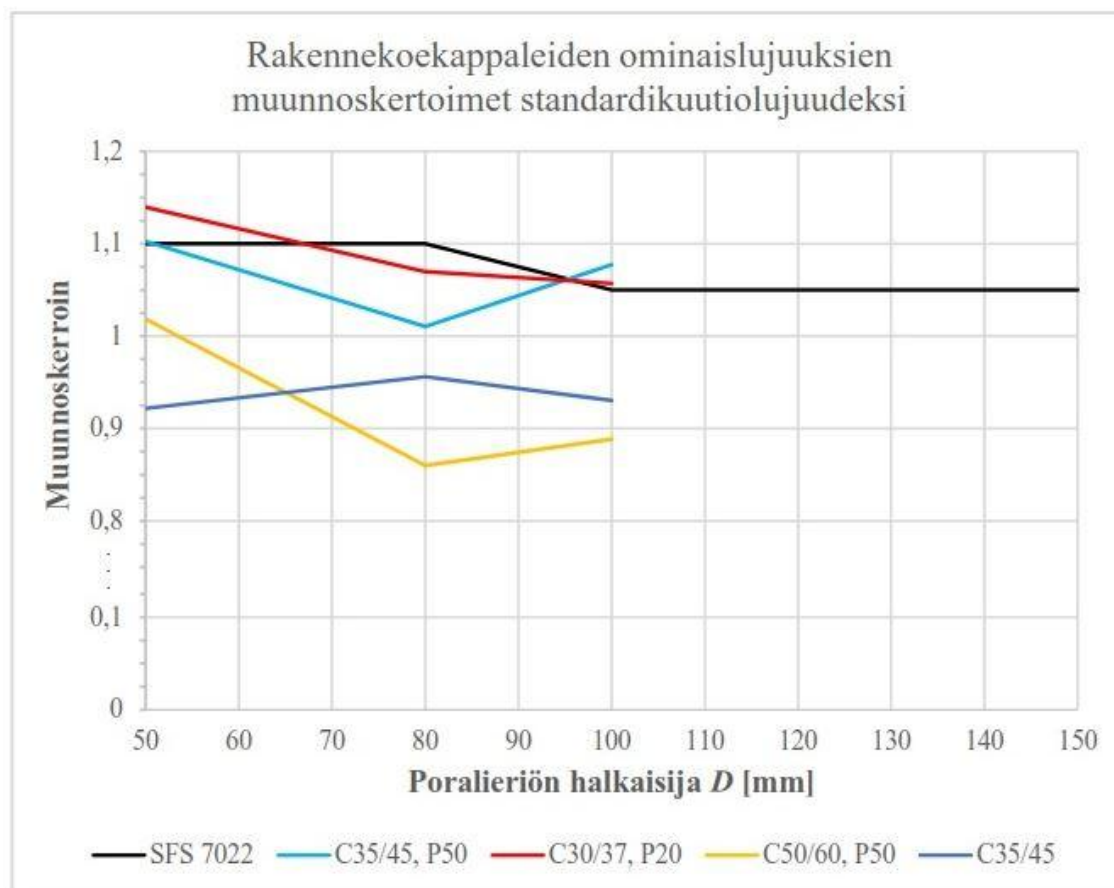
Standardissa SFS 7022 [1] on esitetty Suomessa käytettävät muunnoskertoimet tilanteisiin, joissa rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrataan kuutiolujuu-teen. Muunnoskertoimet on esitetty kuvamuodossa kuvassa 5. Kuvassa 66 muunnoskertoimien kuvaan on lisätty tutkimustulokset siten, että rakennekoekappaleiden puristuslujuuksille on määritetty korjauskertoimet, joilla puristuslujuudet voidaan muuntaa kuutiolujuu-deksi. Kuvan 66 tuloksissa ei ole huomioitu koekappaleiden puristuslujuuksien hajontaa. Kuvasta 66 nähdään selvästi, että käyttämällä standardin SFS EN 7022 mukaisia muunnoskertoimia, saataisiin lähes kaikissa tutkimuksen tapauksissa kuutiolujuu-deksi liian suuri arvo. Kuvan tuloksista on siis havaittava, että mikäli tutkimuksen betonilaatujen käyrä on kuvassa standardin SFS 7022 mukaisen käyrän (musta viiva) alapuolella, saadaan nykyisin käytettävillä muunnoskertoimilla liian suuria kuutiolujuu-den arvoja. Ainostaan betonilaadulla C35/45 P50 rakennekoekappaleen halkaisijalla 100 mm muunnoskertoimeksi saadaan suurempi kuin standardissa SFS 7022 on esitetty.



**Kuva 66.** Tutkimustulosten mukaiset rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet tutkimuksen betonilaadulle, sekä standardin SFS 7022 mukaiset muunnoskertoimet.

Betonin suunnittelulujuutta määritettäessä rakennekoekappaleiden avulla, vaikuttaa tulokseen merkittävästi koekappaleiden puristuslujuustulosten hajonta. Kuvassa 67 on esitetty rakennekoekappaleiden puristuslujuuden muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi, kun sekä rakennekoekappaleiden puristuslujuuksista, että kuutiolujuudesta on laskettu ominaislujuudet kaavalla  $f_{ck} = f_{cm} - 1,48 \cdot s$ .

Kuvasta 67 havaitaan, että kun sekä rakennekoekappaleiden puristuslujuudessa että kuutiolujuudessa huomioidaan hajonta, saadaan osassa tapauksista lähes nykyistä vastaava muunnoskerroin. Suurimmassa osassa tapauksista muunnoskertoimeksi saadaan kuitenkin kuvan 66 tapaan nykyistä käytäntöä pienempi arvo. Nykyisiä muunnoskertoimia käyttämällä rakennekoekappaleiden puristuslujuuden muunnetuksi arvoksi saadaan siis liian suuri kuutiolujuus. Rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskerrointa määritettäessä ei ole suotavaa käyttää ominaisarvoja. Ominaisarvoissa koekappaleiden puristuslujuustuloksista vähennetään hajonnan vaikutus em. kaavan mukaisesti. Rakennekoekappaleilla puristuslujuuskokeiden hajonta on suurempaa kuin standardikoekappaleilla. Tällöin muunnoskerrointa määritettäessä suhdeluku kasvaa ja rakennekoekappaleiden puristuslujuudesta muunnetuksi kuutiolujuudeksi saadaan liian optimistinen arvo.



**Kuva 67.** Tutkimustulosten mukaiset rakennekoekappaleiden ominaislujuuksien muunnoskertoimet tutkimuksen betonilaadulle, sekä standardin SFS 7022 mukaiset muunnoskertoimet.

Kuvan 67 tuloksista ainoastaan betonilaadulle C30/37 P20 määritetty muunnoskäyrä on lähellä standardin SFS 7022 [1] mukaista muunnoskäyrää. Tutkimuksen selvityksissä ei saatu selvitettyä millaisilla betonilaadulla standardin mukainen muunnoskäyrä on luotu. Tiedossa on, että muunnoskäyrä esiintyy tiettävästi ensimmäisen kerran kirjallisuudessa 1980-luvulla. Kun standardin mukaisia muunnoskertoimia peilataan tämän tutkimuksen tuloksiin, voidaan otaksua, että standardin muunnoskertoimet on laadittu tavanomaisten, puristuslujuudeltaan kohtalaisen matalien betonilaatujen puristuslujuustuloksiin perustuen. Tämän tutkimuksen betonilaaduista C30/37 P20 on lähimpänä em. kuvausta. Tutkimustulosten perusteella standardin SFS 7022 [1] mukaiset muunnoskertoimet eivät sovellu käytettäväksi nykyaikaisilla betonilaaduilla.

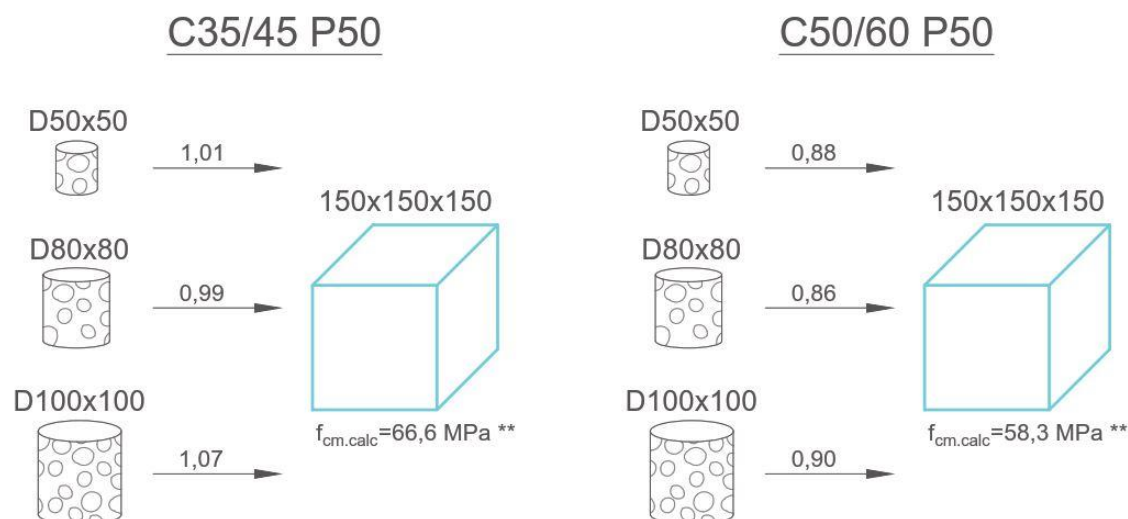
Tutkimuksessa rakennekoekappaleet timanttiporattiin betonilieriöistä, joiden valmistus-, jälkihoito- ja säilytysolosuhteet olivat tarkasti kontrolloitu. Standardin SFS 7022 [1] mukaisia muunnoskertoimia käytetään yleensä tilanteissa, joissa rakennekoekappaleet timanttiporataan todellisista rakenteista, joiden valmistuksessa olosuhteet ja inhimilliset tekijät eivät ole tarkasti kontrolloitavissa. Mahdollisesti tutkimuksessa käytetyistä rakennekoekappaleista saatiin puristuslujuudeksi hieman korkeammat lujuudet, mitä vastaavilla betonilaaduilla olisi saatu todellisista rakenteista.



Tutkimuksen betonilaaduissa on selvästi havaittavissa toisistaan eroavia tutkimustuloksia. Betonilaatujen lujuudenseurantatutkimuksessa kaikki betonilaadut lukuun ottamatta betonilaatua C50/60 P50 ylittivät nimellislujuuksensa selvästi 28 vuorokauden ikäisenä tehdyissä puristuskokeissa. Betonilaatu C50/60 P50 puristuslujuus oli 28 vuorokauden ikäisenä noin 6 % nimellislujuttaan pienempi. 91 vuorokauden kohdalla tehdyissä puristuskokeissa kaikki betonilaadut täyttivät nimellislujuuksensa.

Betonilaaduista C35/45 P50 ja C50/60 P50 ovat seosaineiltaan käytännössä muuten samanlaisia, mutta betonilaadun C50/60 P50 sideaineena on käytetty sementin lisäksi 15 kg/m<sup>3</sup> silikaa. Silika on sideaineteholtaan kaksinkertainen sementtiin verrattuna [17], eli 15 kg silikaa vastaa noin 30 kg sementtiä. Betonilaatujen lujuudenseurantatutkimuksessa betonilaatu C35/45 P50 oli eroavasta sideainemäärästä huolimatta lujempaa kuin betonilaatu C50/60 P50. Vastaava havainto betonilaatujen kohdalle tehtiin myös muiden standardilieriöitä koskevien tutkimussarjojen tapauksessa. Standardikuutioiden ja valettujen D100x100 koekappaleiden puristuskokeissa betonilaatu C50/60 P50 on lujempi kuin C35/45 P50.

Rakennekoekappaleita tarkasteltaessa betonilaadun C50/60 P50 puristuslujuus on selvästi parempi kuin betonilaadun C35/45 P50, kun rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrataan saman betonilaadun kuutiolujuuteen (standardilieriön lujuudesta laskettu). Kuvassa 68 on esitetty tutkimustulosten perusteella määritetyt betonilaatujen C35/45 P50 ja C50/60 P50 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi. Kuvasta havaitaan, että betonilaatujen muunnoskertoimet eroavat huomattavasti betonilaatujen välillä. Betonilaatujen erotessa käytännössä ainoastaan käytetyn silikan osalta, voidaan otaksua, että rakennekoekappaleita tarkasteltaessa silikalla on selvä rakennekoekappaleita sitkistävä vaikutus puristuskokeita suoritettaessa. Tutkimustulosten perusteella silikan vaikutus betonin lujuuteen on havaittavissa ainoastaan kooltaan pienemmillä koekappaleilla.

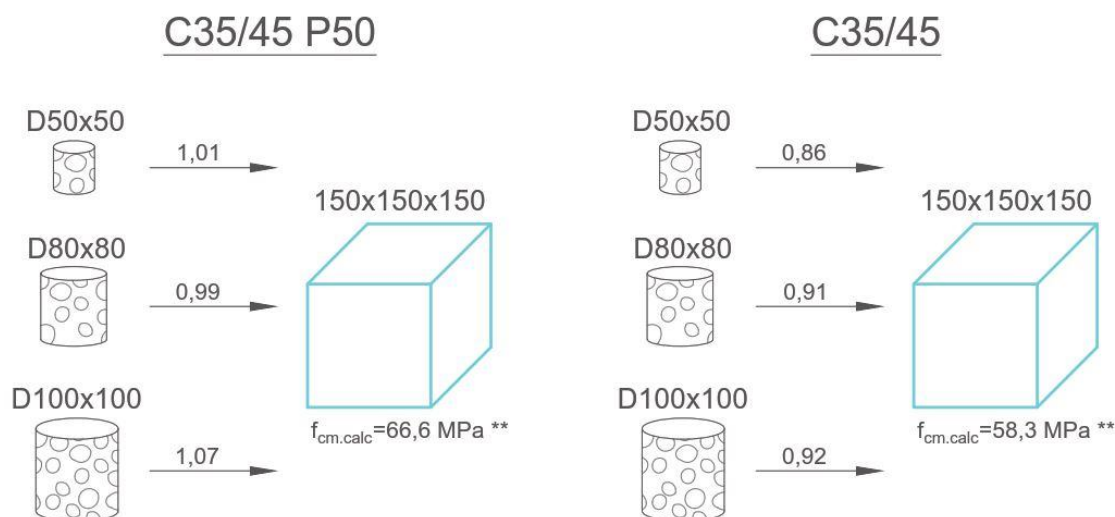


**Kuva 68.** Rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi betonilaaduille C35/45 P50 ja C50/60 P50.

Tutkimuksessa betonilaatujen C35/45 P50 ja C35/45 suhteutus tehtiin valmisbetonitehtaalla siten, että saman nimellisljuuden omaavista betonilaaduista saataisiin mahdollisimman lähelle samat puristuslujuustulokset riippumatta siitä, onko betonilaatu huokostettu vai ei. Lujudenseurantatutkimuksessa betonilaatujen puristuslujuudet erosivat kuitenkin merkittävästi toisistaan, huokostetusta betonilaadusta mitattiin noin 16 % parempi puristuslujuus kuin huokostamattomasta betonilaadusta. Ero aiheutuu huokostetun betonilaadun huomattavasti suuremmasta sementtimäärästä, jota jouduttiin käyttämään korkea pakkasenkestävyysluokan toteuttamiseksi.

Rakennekoekappaleita tarkasteltaessa huokostamattoman betonilaadun C35/45 puristuslujuus on selvästi parempi kuin huokostetun betonilaadun C35/45 P50, kun rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrataan saman betonilaadun kuutiolujuuteen (standardilieriön ljuudesta laskettu). Kuvassa 69 on esitetty tutkimustulosten perusteella määritetyt betonilaatujen C35/45 P50 ja C35/45 rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi. Kuvasta havaitaan, että betonilaatujen muunnoskertoimet eroavat huomattavasti betonilaatujen välillä. Tutkimustulosten perusteella betonilaadun standardikoekappaleista määritetyllä puristuslujuudella ja betonissa käytetyllä sementin määrällä ei ole parantavaa vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Ominaisuuksiltaan betonilaatujen rakennekoekappaleet eroavat merkittävimmin tiheyden osalta. Huokostetun betonilaadun rakennekoekappaleet olivat tiheydeltään noin 30...70 kg/m<sup>3</sup> pienempiä kuin huokostamattoman betonilaadun rakennekoekappaleet. Betonilaatujen tiheysero aiheutuu huokostetun betonilaadun ilmamäärästä. Tutkimustuloksista voidaan siis päätellä, että huokostetun betonilaadun rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen vaikuttaa betonin huokosrakenne ja huokosten määrä sekä tiheys. Tutkittavia koekappaleita valmistettaessa huokostamaton betonilaatu oli helpommin tiivistettävissä, sillä betonimassa ei ollut poistuvaa huokosilmaa. Tutkimustulosten perusteella em. ominaisuudet vaikuttavat pienissä koekappaleissa puristuslujuuteen merkittävämmän kuin

suuremmissa koekappaleissa. Päätelmä on selvästi havaittavissa rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien ja kuutiolujuuden suhdeluvuista, jotka on esitetty kuvassa 69. Huokostetulla betonilaadulla C35/45 P50 rakennekoekappaleiden puristuslujuus on selvästi pienempi suhteessa kuutiolujuuteen kuin huokostamattomalla betonilaadulla C35/45.



**Kuva 69.** Rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi betonilaaduille C35/45 P50 ja C35/45.

Tutkimuksessa havaittiin, että nimellispituudeltaan ja halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi lähes identtisiä puristuslujuuksia verrattuna suurempiin rakennekoekappaleisiin. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksissa kuitenkin esiintyy huomattavan paljon enemmän hajontaa. Kooltaan pienissä rakennekoekappaleissa saattaa esiintyä kappaleen tilavuuteen nähden huomattavan paljon runkoainesrakeita, joiden puristuslujuus on suurempi kuin sementtikiven. Eri-tyisesti runkoainesrakeita esiintyy enemmän rakennekoekappaleissa, jotka on timanttiporrattu rakenteiden alareunasta. Taulukossa 43 on esitetty pituudeltaan ja halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden keskimääräiset puristuslujuudet ja tiheydet eri poraustasoilla. Taulukosta on selvästi havaittavissa, että alimmalla poraustasolla A4 rakennekoekappaleiden tiheys on huomattavasti suurempi kuin muilla poraustasoilla. Lisäksi lähes poikkeuksetta alimman poraustason (A4) rakennekoekappaleiden puristuslujuus on selvästi edellistä poraustasoa suurempi. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleissa esiintyvät erisuuret runkoainesmäärät selittävät osittain havaittua hajonnan kasvamista. Pienissä rakennekoekappaleissa esiintyvät suuret runkoainesmäärät saattavat myös vääristää rakennekoekappaleista määritettävää puristuslujuutta liian suureksi. Merkittävästi suuremman hajonnan ja mahdollisesti runkoaineen määrästä aiheutuvan puristuslujuuden vääristymän takia pienten rakennekoekappaleiden käyttämistä tulisi välttää puristuslujuuden määrittämisessä.

**Taulukko 43.** D50x50 rakennekoekappaleiden keskimääräiset tiheydet ja puristuslujuudet eri poraustasoilla. Poraustasoista A1 on lähimpänä valukappaleen valupintaa ja A4 on lähimpänä valukappaleen pohjaa.

Poraustaso	C35/45 P50		C30/37 P20		C50/60 P50		C35/45	
	$f_{cm}$ [MPa]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{cm}$ [MPa]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{cm}$ [MPa]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{cm}$ [MPa]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
D50-A1	66,2	2328	50,0	2356	68,3	2368	63,3	2357
D50-A2	62,7	2301	52,1	2339	68,5	2358	65,9	2357
D50-A3	67,0	2333	53,4	2351	67,9	2337	66,4	2349
D50-A4	67,2	2365	58,2	2366	61,2	2370	70,0	2357

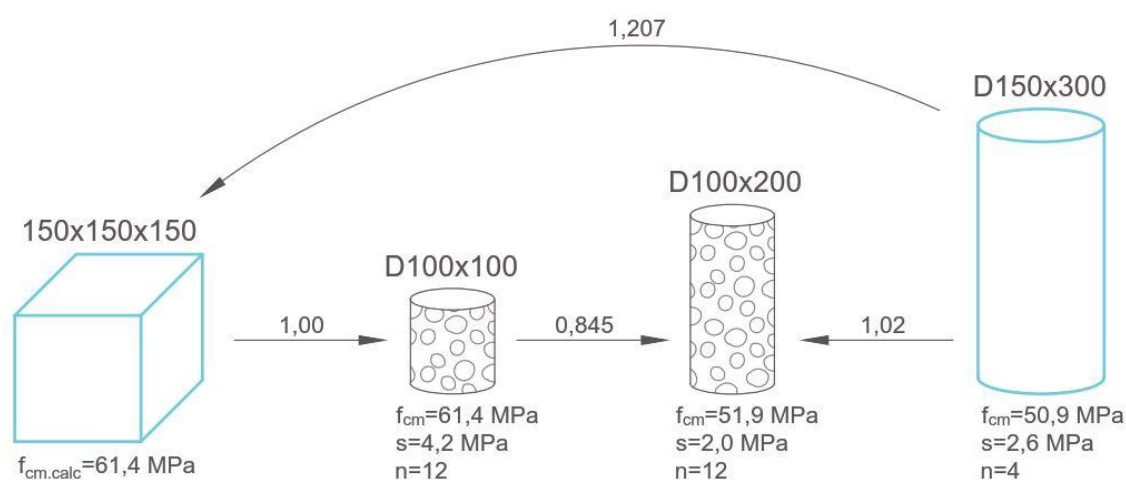
Tutkimustulosten perusteella ei pystytä määrittämään kaikille betonilaaduille yhteisiä tarkkoja korjauskertoimia tilanteeseen, jossa rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan kuutiolujuudeksi. Tutkimustulosten perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että nykyisin käytettävillä korjauskertoimilla rakennekoekappaleista määritettäväksi rakenteen kuutiolujuudeksi saadaan ylioptimistinen arvio. Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleiden halkaisijan vaikutus, rakennekoekappaleista määritettävään kuutiolujuuteen, on hyvin riippuvainen käytetystä betonilaadusta, betonin ominaisuuksista ja betonissa käytetyistä sideaineista.

## 5.2 Rakennekoekappaleen pituuden vaikutus rakenteesta määritettävään puristuslujuuteen ja standardikoekappaleiden puristuslujuuksien suhde

Tutkimuksen yhteydessä tehtiin suppealla määrällä koekappaleita tutkimus, jossa tarkasteltiin nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden pituuden vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Lisätutkimus tehtiin ainoastaan yhdellä betonilaadulla, joka oli C35/45 P50. Lisätutkimuksessa käytettiin rakennekoekappaleiden nimellispituuksina 100 mm ja 200 mm, joten tutkimuksen perusteella saatiin selville, millainen vaikutus pituuden ja halkaisijan välisen suhteen (L/D -suhde) kasvatamisella on rakennekoekappaleen puristuslujuuteen. Kansainvälisesti betonisten koekappaleiden puristuskokeissa oletetaan, että lieriömäisen koekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen ollessa 2,0 tai suurempi, ei koekappaleen ja kuormituslevyjen välinen edullinen kitkavaikutus ole merkittävä. Lisätutkimuksen perusteella voidaan siis päätellä, kuinka suuri puristuslujuuden kannalta edullinen kitkavaikutus on, kun rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0.

Tutkimustulosten perusteella nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi noin 18 % korkeampi puristuslujuus kuin pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Kuvassa 70 on esitetty tutkimuksessa havaittu rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteet L/D -suhteen muuttuessa. Lisäksi kuvassa on esitetty

rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhde vedellä kyllästettyjen standardikoekappaleiden puristuslujuuksiin verrattuna. Kuutiolujuus on laskettu kappaleen 4.4 mukaisesti standardilieriön puristuslujuudesta. Tutkimustulosten perusteella halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuuden muunnokselle  $L/D$  -suhteesta 1,0 suhteeksi 2,0 saadaan korjauskerroin 0,845. Vastaava korjauskerroin Ruotsissa on 0,85 ja Yhdysvalloissa 0,87. Tutkimuksen tuloksista määritetty korjauskerroin on siis hyvin lähellä Ruotsissa käytettävää korjauskerrointa. Lisätutkimuksen suppeasta rakennekoekappalemäärästä huolimatta määritettyä korjauskerrointa voidaan pitää kohtalaisen luotettavana testatulla betonilaadulla, sillä tutkimussarjan hajonta oli hyvin pieni. Tarkemmat tutkimustulokset on esitetty taulukossa 40.



**Kuva 70.** Rakennekoekappaleiden pituuden vaikutus puristuslujuuteen ja rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhde standardikoekappaleisiin.

Standardin EN 13791 [2] mukaan halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuustulokset ovat suoraan verrannollisia standardikoekappaleiden puristuslujuuteen, kun koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa.  $L/D$  -suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleet vastaavat puristuslujuudeltaan standardikuution puristuslujuutta ja  $L/D$  -suhteeltaan 2,0 rakennekoekappaleet standardilieriön puristuslujuutta. Kun rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan saman ikäisenä puristettujen standardilieriön ja standardilieriöistä muunnetun kuutiolujuuteen havaitaan, että pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleet ovat puristuslujuudeltaan suoraan verrattavissa standardilieriöistä muunnettuun kuutiolujuuteen. Pituudeltaan 200 mm rakennekoekappaleet olivat noin 2 % standardilieriöitä lujempia. Huomioitavaa kuitenkin on, että rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden puristuskokeet suoritettiin eri kosteusolosuhteissa. Rakennekoekappaleet puristettiin kuivassa ja standardikoekappaleet vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa. Tutkimustulosten perusteella vedellä kyllästetyistä standardilieriöistä saadaan puristuslujuudeksi noin 4...6 % heikompi tulos kuivana puristettuihin verrattuna.

Vaikka rakennekoekappaleet ja standardilieriöt, joista myös standardikuution puristuslujuus on muunnettu, on puristettu eri kosteusolosuhteissa, voidaan tutkimustuloksista päätellä, että tutkimuksessa käytetty lieriö- ja kuutiolujuuden suhde 0,828 on hyvin lähellä oikeaa. Päätelmä voidaan tehdä, sillä kuvassa 70 esitetystä rakennekoekappaleiden ja standardikoekappaleiden puristuslujuuksien välinen suhde on kummankin L/D -suhteen tapauksessa käytännössä sama. Kuvan tuloksissa standardikuution puristuslujuus on muunnettu standardilieriön puristuslujuustuloksista em. suhteen perusteella. Lisäksi standardin EN 13791 [2] ohjeistuksen perusteella halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden L/D -suhteeltaan 2,0 ja 1,0 puristuslujuuksien suhde tulee olla sama kuin lieriö- ja kuutiolujuuksien suhde. Eri pituisten rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteeksi saatiin 0,845, joka on hyvin lähelle käytettyä lieriö- ja kuutiolujuuksien muunnosuhdetta.

Tutkimustulosten perusteella standardin EN 13791 [2] mukainen ohjeistus pätee tilanteissa, jossa rakennekoekappaleet on puristettu standardin mukaisesti kuivassa kosteusolosuhteessa ja standardikoekappaleet EC2 puristuslujuutta vastaavasti vedellä kyllästyssä kosteusolosuhteessa.

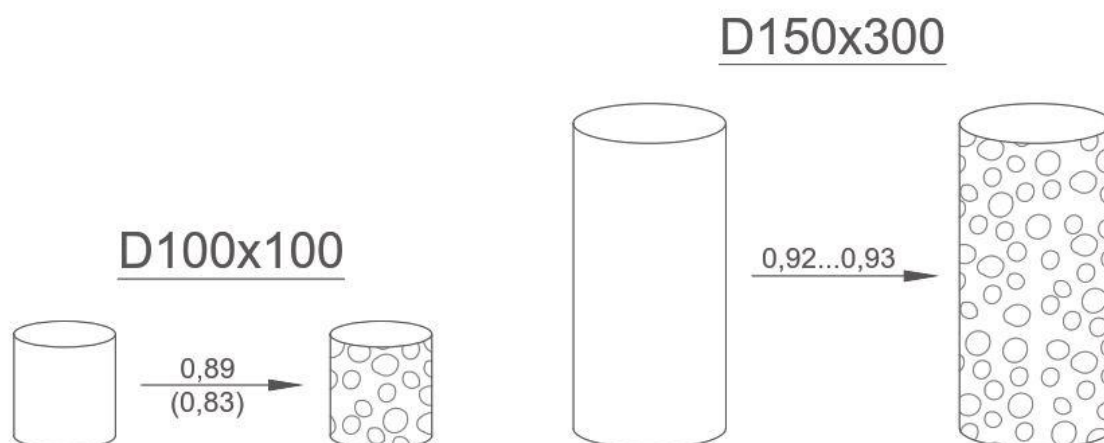
### **5.3 Timanttikorauksen vaikutus rakennekoekappaleen puristuslujuuteen**

Tutkimuksessa timanttikorauksen vaikutusta tarkasteltiin kahden eri periaatteen perusteella. Tutkimuksessa timanttikorauksen vaikutusta voidaan tarkastella joko vertaamalla rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia vastaavan kokosiin valettuihin koekappaleisiin tai vertaamalla nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuutta standardikuution puristuslujuuteen. Standardin EN 13791 [2] mukaisesti pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuus on sama kuin 150 mm standardikuution, kun koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa. Timanttiterän kunnon vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tarkasteltiin erillisessä tutkimusosassa, tämän osion päätulokset ja tulosten analysointi on esitelty kappaleessa 5.4.

Tutkimustulosten perusteella timanttikorauksen vaikutus puristuslujuuteen on selvästi havaittavissa, kun vaikutusta tarkastellaan vertailemalla saman kokoisia koekappaleita. Kaikilla betonilaaduilla lukuun ottamatta laatua C30/37 P20 nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden havaittiin olevan noin 11 % heikompia verrattuna vastaavan kokosiin valettuihin koekappaleisiin. Tutkimuksen heikoimmalla betonilaadulla C30/37 P20 D100x100 rakennekoekappaleiden havaittiin olevan noin 17 % heikompia vastaavan kokosiin valettuihin koekappaleisiin verrattuna.

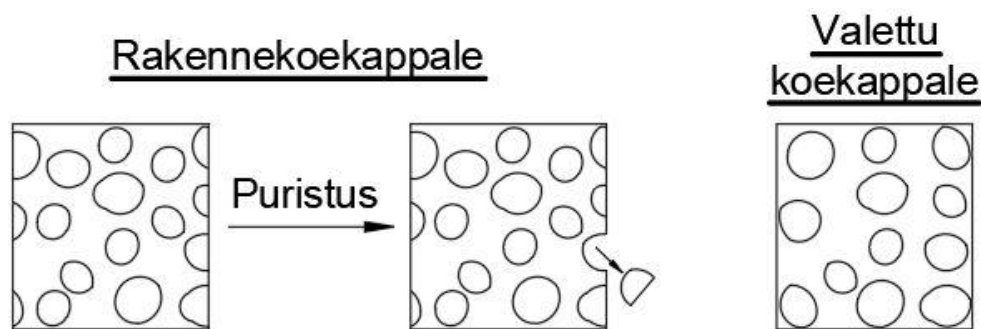
Edellä esitellyissä tuloksissa koekappaleiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde (L/D-suhde) on 1,0. Tutkimuksessa tarkasteltiin timanttikorauksen vaikutusta saman kokoisilla koekappaleilla myös L/D -suhteen ollessa 2,0. Tutkimustulosten perusteella tutkimuksen

kaikilla betonilaaduilla nimellishalkaisijaltaan 150 mm ja nimellispituudeltaan 300 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuus on noin 7...8 % heikompi vastaavan kokoiseen standardilieriöön verrattuna. Sekä koekappaleilla D100x100 että D150x300 rakennekoekappaleiden ja valettujen koekappaleiden tutkimussarjojen hajonnat eivät merkittävästi eroa toisistaan. Kuvassa 71 on esitetty sekä D100x100 että D150x300 timanttikorattujen rakennekoekappaleiden ja valettujen koekappaleiden väliset suhteet. Tutkimustulokset on esitetty tarkemmin kuvissa 46 ja 47.



**Kuva 71.** Rakennekoekappaleiden timanttikorauksen vaikutus puristuslujuuteen.

Saman kokoisten koekappaleiden puristuslujuuksia vertailtaessa rakennekoekappaleista saadaan pienempiä puristuslujuuksia, koska rakennekoekappaleiden timanttikoraukset aiheuttaa vaurioita porakappaleiden pinnoille. Timanttikorauksessa lävistetään betonin runkoaineskappaleita, mikä saattaa vaurioittaa runkoaineksen ja sementtikiven välistä tartuntaa. Lisäksi rakennekoekappaleen pinnoilta saattaa irrota lävistettyjä runkoaineskappaleita puristuskokeen aikana, kun taas valetuista koekappaleista runkoaineskappaleet ovat täysin betonin sisässä, eivätkä siten voi irrota puristuskokeesta ilman, että koko koekappale murtuu. Runkoaineskappaleiden mahdollista irtoamista on hahmotettu kuvassa 72. Puristuskokeen aikana irronneet runkoaineskappaleet vaikuttavat merkittävästi puristuskokeen lopputulokseen, sillä irronneet runkoaineskappaleet pienentävät rakennekoekappaleen poikkileikkauksen puristuspinnoita ja aksiaalinen puristuskuorma jakaantuu rakennekoekappaleessa epätasaisesti. Runkoaineskappaleiden vaurioiden lisäksi timanttikorauksessa rakennekoekappaleen porauspinnoille muodostuu mikrohalkeamia, jotka saattavat hieman vaikuttaa rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen.



**Kuva 72.** Rakennekoekappaleen ja valetun koekappaleen runkoaineskappaleiden sijainti koekappaleiden leikkauksissa. Rakennekoekappaleen porauspinnoilta saattaa puristuskokeessa irrota lävistettyjä runkoaineskappaleita.

Timanttikorauksesta aiheutuvien vaurioiden seurauksena rakennekoekappaleiden puristuslujuudeksi saadaan pienempiä arvoja kuin vastaavan kokoisista valetuista koekappaleista. Kooltaan pienemmillä rakennekoekappaleilla mahdollisten vaurioiden vaikutus korostuu, koska pienemmillä rakennekoekappaleilla vaurioituvan porauspinnan pinta-alan suhde tilavuuteen nähden on suurempi kuin kookkaammilla rakennekoekappaleilla. Bartlett ja MacGregor havaitsivat tutkimuksessaan [36] saman ilmiön, minkä perusteella American Concrete Instituten julkaisemassa raportissa [35] esitetään porauksen aiheuttamien vaurioiden huomioimiseksi rakennekoekappaleiden puristuslujuutta korottavaa korjauskerrointa 1,06. Eurooppalaisissa standardeissa ei esitetä korjauskerroin timanttikorauksen huomioimiseksi. Tutkimustulosten perusteella mahdollisen korjauskertoimen tulisi kuitenkin olla suurempi kuin Yhdysvalloissa noudatettavassa ohjeistuksessa on esitetty.

Rakennekoekappaleiden timanttikorauksen vaikutusta puristuslujuuteen voidaan arvioida myös standardin EN 13791 [2] ohjeistuksen perusteella. Standardin ohjeistuksen perusteella nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen ja standardikuution puristuslujuus ovat suoraan verrannollisia keskenään. Standardin ohjeistuksen perusteella on oletettava, että verrannollisuudessa on huomioitu rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen vaikuttava timanttikoraus. Tutkimuksen kaikilla betonilaadulla lukuun ottamatta betonilaatua C35/45 P50 rakennekoekappaleet D100x100 ovat heikompia kuin vastaavissa olosuhteissa valmistetut ja jälkihoidetut standardikuutiot. Rakennekoekappaleet ja standardikuutiot puristettiin kuivassa kosteusolosuhteessa. Betonilaadulla C30/37 P20 rakennekoekappaleet olivat noin 7 % heikompia kuin standardikuutiot. Betonilaaduilla C50/60 P50 ja C35/45 rakennekoekappaleet olivat 1...3 % heikompia. Betonilaadulla C35/45 P50 tehtiin päinvastainen havainto, rakennekoekappaleet olivat tällä betonilaadulla puristuslujuudeltaan noin 2 % standardikuutioita vahvempia. Betonilaadulla C35/45 P50 standardikuutiot olivat selvästi heikompi suhteessa standardilieriöihin kuin muilla betonilaaduilla. Betonilaadulla C35/45 P50 lieriö- ja kuutiolujuuksien välinen suhde oli 0,95, kun muilla betonilaadulla vastaava suhde oli 0,78...0,81. Standardikuutioiden tavanomaista matalampi puristuslujuus selittää betonilaadun C35/45 P50 eroavan tutkimustuloksen.



Tutkimustulosten perusteella standardin EN 13791 [2] mukainen ohjeistus ei huomioi rakennekoekappaleiden timanttiorausta riittävän hyvin, pääosalla betonilaaduissa rakennekoekappaleiden puristuslujuus oli heikompi kuin standardikuutiolla. Standardin mukaan betoni puristuslujuutta arvioitaessa on kuitenkin huomattava, että mikäli rakenteen puristuslujuutta arvioidaan D100x100 rakennekoekappaleiden perusteella ja tuloksesta määritetään suoraan betonin kuutiolujuus, saadaan rakenteen puristuslujuudeksi ns. varmalla puolella oleva lopputulos.

#### **5.4 Timanttiterän kunnan vaikutus rakennekoekappaleen puristuslujuuteen**

Timanttiterän kunnan vaikutusta tutkittaessa rakennekoekappaleet porattiin hyvin kuluneilla timanttioranterillä, joita oli käytetty siltojen erikoistarkastuksissa. Käytetyistä timanttiteristä nimellishalkaisijaltaan 50 mm kokoinen terä oli selvästi kulunein, terä olisi pitänyt huoltaa välittömästi. Nimellishalkaisijaltaan 80 mm kokoinen terä oli huoltokuntoisen rajalla ennen tutkimuksen aloittamista. Nimellishalkaisijaltaan 100 mm terällä oli ennen tutkimuksen aloittamista voinut vielä välttävästi työskennellä. Pelkän timanttiorauksen vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin erikseen. Tämän tutkimusosan päätulokset ja tulosten analysointi on käsitelty kappaleessa 5.3.

Tutkimuksessa kaikilla muilla betonilaaduilla lukuun ottamatta betonilaatua C30/37 P20 saatiin kuluneella timanttiterällä poratuista rakennekoekappaleista heikommat puristuslujuustulokset kuin uudella timanttiterällä poratuista rakennekoekappaleista. Betonilaadulla C30/37 P20 kuluneella timanttiterällä poratuista rakennekoekappaleista saatiin halkaisijasta riippumatta noin 1...3 % parempi puristuslujuus verrattuna uudella timanttiterällä porattuihin rakennekoekappaleisiin. Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, joten betonilaadulla C30/37 P20 puristuslujuuden voidaan sanoa olevan sama riippumatta timanttiterän kunnosta. Tutkimuksen heikoimmalla betonilaadulla ei siis havaittu kuluneella timanttiterällä poraamisen vaikuttavan rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen.

Tutkimuksen muilla betonilaadulla nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla kuluneella timanttiterällä poratuista rakennekoekappaleista saatiin noin 5...26 % heikompi puristuslujuus verrattuna uudella timanttiterällä porattuihin rakennekoekappaleisiin. Nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleista kuluneella timanttiterällä saatiin noin 5...7 % ja 100 mm rakennekoekappaleista noin 1...5 % heikompi puristuslujuuksia verrattuna uudella timanttiterällä porattuihin rakennekoekappaleisiin. Tutkimustulokset on esitetty tarkemmin kuvissa 54-56, sekä kuvamuotoon koottuna kuvissa 57 ja 58.

Tutkimuksessa havaittiin myös, että kuluneen timanttiterän käyttö kasvattaa rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten hajontaa. Hajonnan kasvu havaittiin ainoastaan huokostetuilla betonilaaduilla, huokostamattomalla betonilaadulla kuluneella ja uudella

timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonta on suuruudeltaan lähes identtinen. Huokostetuilla betonilaaduilla hajonta kasvaa merkittävämmiin pienemmillä rakennekoekappaleilla. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnan havaittiin olevan jopa noin 84 % suurempi kuin uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden. Vastaavasti halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleilla havaittiin hajonnan olevan maksimissaan noin 46 % suurempi. Halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden hajonnan ei havaittu olevan systemaattisesti suurempi verrattuna uudella timanttiterällä porattuihin. Tutkimuksessa käytetyistä timanttiteristä halkaisijaltaan 100 mm terä oli selvästi parhaassa kunnossa.

Tutkimuksen havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden poraukseen käytettävän timanttiterän kunnolla on merkitystä rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Oletettavasti kuluneella timanttiterällä porattaessa Bartlett ja MacGregon tekemässä tutkimuksessa [36] esitetyt mahdolliset vaurioitumekanismit tehostuvat. Huonokuntoisessa timanttiterässä betonia leikkaavat timanttisegmentit ovat kuluneita siten, että ”timanttirakeita” on vähemmän jäljellä kuin hyväkuntoisessa terässä. Tämän seurauksena betonin leikkaaminen rasittaa enemmän rakennekoekappaletta ja porauspinnoille syntyy enemmän mikrohalkeilua, sekä runkoaineskappaleiden ja sementtikiven väliset tartunnat vaurioituvat todennäköisemmin. Runkoaineskappaleiden ja sementtikiven välisen tartunnan heikentyessä rakennekoekappaleen pinnoilta saattaa irrota runkoaineskappaleita helpommin puristuskokeen aikana (kuva 72). Puristuskokeen aikana irronneet runkoaineskappaleet vaikuttavat merkittävästi puristuskokeen lopputulokseen, sillä irronneet runkoaineskappaleet pienentävät rakennekoekappaleen poikkileikkauksen puristuspinnoita-alaa ja aksiaalinen puristuskuorma jakaantuu rakennekoekappaleessa epätasaisesti.

Betonissa kiviainesrakeet ovat lujempaa materiaalia kuin sementtikivi. Tutkimuksessa havaittiin kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden porauspinnoilla merkittäviä epäsuoruuksia. Oletettavasti kulunut timanttiterä pyrkii porauksessa ”väistämään” lujuudeltaan kovempia kiviainesrakeita, mikä aiheuttaa epäsuoruuksia porauspinnoille. Timanttiterän segmenttien edelleen kuluessa pääsee terän läpi johdettava huuhteluvesi poistumaan heikommin pois porauksen ulkopintoja pitkin, minkä seurauksena timanttiterää on nostettava porauksen aikana huuhteluveden vapauttamiseksi. Tämä toimintatapa aiheuttaa rakennekoekappaleeseen uria eli porauspinnoita ei ole suora. Kuvassa 73 on esitetty vierekkäin hyväkuntoisella ja huonokuntoisella timanttiterällä poratut halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleet. Kuvasta on selvästi havaittavissa huonokuntoisen timanttiterän käytöstä aiheutuneet epäsuoruudet ja urat rakennekoekappaleen porauspinnoilla. Pienillä rakennekoekappaleilla porauspinnan pinta-alan suhde tilavuuteen on huomattavasti suurempi kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla, minkä seurauksena timanttiterän aiheuttamat vauriot korostuvat pienemmillä rakennekoekappaleilla.



*Kuva 73. Timanttioranterän kunnan vaikutus porauspinnan laatuun. Vasemmalla hyväkuntoisella ja oikealla tyypillinen huonokuntoisella timanttiterällä porattu rakennekoekappale.*

Rakennekoekappaleiden timanttioraamista käsittelevissä standardeissa ja ohjeissa ei oteta selvästi kantaa, milloin timanttiterä on huollettava tai uusittava kokonaan. Tutkimustulosten perusteella kuluneen timanttiterän käyttö vaikuttaa paikoin merkittävästi rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen, erityisesti vaikutus havaittiin kooltaan pienemmillä rakennekoekappaleilla. Tutkimuksen havaintojen perusteella ei ole suositeltavaa määrittää korjauskertoimia kuluneen timanttiterän käytölle. Rakennekoekappaleiden valmistusta käsitteleviin ohjeisiin on kuitenkin suositeltavaa määrittää esimerkiksi mallikuvien avulla, milloin timanttiterän on huollon tarpeessa.

## **5.5 Rakennekoekappaleiden tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen**

Tutkimuksen kaikilla betonilaaduilla havaittiin, että rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on heikompi kuin koneellisesti hiomalla tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus. Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleilla D50x50 rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on 8...22 % heikompi verrattuna hiottuihin rakennekoekappaleisiin. Rakennekoekappaleilla D80x80 rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet olivat 6...18 % heikompia ja D100x100 5...15 % heikompia kuin hiomalla tasoitetut rakennekoekappaleet. Tutkimustulokset on esitetty tarkemmin kuvissa 59-61, sekä kuvamuotoon koottuna kuvissa 62 ja 63.

Tutkimuksessa havaittiin, että rakennekoekappaleiden halkaisijan pienentyessä kasvaa rakennekoekappalesarjojen tulosten hajonta. Rakennekoekappaleilla D50x50 hajonta on

merkittävästi suurempaa verrattuna halkaisijaltaan suurempiin rakennekoekappaleisiin. Rakennekoekappaleilla D80x80 ja D100x100 hajonta on samankaltainen. Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että rakennekoekappaleiden D50x50 rikkiseoksen asentamiseen liittyy merkittävä epäonnistumisriski. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappalesarjoista jouduttiin hylkäämään tutkimustuloksia tapauksissa, joissa rikkikerroksen arvioitiin vaikuttaneen rakennekoekappaleesta mitattuun puristuslujuuteen.

Kappaleessa 2.8.2 esitetysti rakennekoekappaleen pituuden ja halkaisijan välisen suhteen ollessa pienempi kuin 2,0, vaikuttaa kuormituslevyjen ja rakennekoekappaleen puristus-pintojen välinen kitka edullisesti mitattavaan puristuslujuuteen. Oletettavasti materiaali-parilla teräs-betoni kitkakerroin on suurempi kuin materiaali-parilla teräs-rikkiseos. Suuremman kitkakertoimen omaavalla materiaali-parilla kitkan edullinen vaikutus puristuslujuuteen on suurempi. Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden heikommat puristuslujuudet verrattuna hiottuihin rakennekoekappaleisiin selittyvät ainakin osittain epäedullisemmalla kitkavaikutuksella.

Tulosten perusteella päiden tasointimenetelmänä on suositeltavaa käyttää koneellista hiointaa. Rikkiseosmenetelmällä rakennekoekappaleiden puristuskokeista saatiin merkittävästi pienemmät puristuslujuudet kuin hionnalla. Myös puristuslujuustulosten hajonnan havaittiin kasvavan, erityisesti pienemmällä rakennekoekappalekoilla. Lisäksi rakennekoekappaleiden rikityksessä havaittiin merkittävä epäonnistumisriski.

## 5.6 Muottimateriaalin vaikutus puristuslujuuteen

Tutkimustulosten perusteella koekappaleiden valmistamiseen käytettävien muottien materiaalilla on selvä vaikutus koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimustulosten perusteella teräksestä valmistetuilla kuutiomuoteilla valetuista standardikuutioista saadaan puristuslujuudeksi noin 2...6 % parempi puristuslujuus kuin muovista valmistetuilla muoteilla valetuista standardikuutioista. Tutkimuksessa kaikilla betonilaa-duilla saatiin yhtenevät tutkimustulokset. Tarkemmat tutkimustulokset on esitetty taulukossa 25 ja kuvassa 64.

Muottimateriaalista riippuvat puristuslujuuserot syntyvät todennäköisesti jo koekappaleita tiivistettäessä. Teräsmuoteilla valettavien koekappaleiden tiivistyminen on tasalaa-tuisempaa verrattuna muovimuoteilla valettuihin koekappaleisiin. Koekappaleita tiivistettäessä muovimuottien seinämät eivät välitä tiivistyksen tärinää yhtä tehokkaasti kuin teräsmuotit, jolloin koekappaleen keskiosa ei tiivisty yhtä tehokkaasti kuin teräsmuotteja käytettäessä. Mahdolliset koekappaleen tiiveyserot koekappaleen keskialueella vaikuttavat tutkimuksessa havaitusti koekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksessa tarkkailtiin koekappaleiden hydrataatiolämpötiloja lujuudenkehittymisen alkuvai-heessa, muovimuoteilla valettujen standardikuutioiden hydrataatiolämpötilan maksi-

miarvo oli hieman korkeampi kuin teräsmuoteilla valettujen kuutioiden. Hydrataatiolämpötilan ei arvioitu vaikuttaneen merkittävästi eri muottimateriaaleilla valettujen koekappaleiden puristuslujuuteen.

Tutkimustulosten perusteella standardikoekappaleiden valamisessa on suositeltavaa käyttää teräsmuotteja standardin EN 12390-1 [5] suosituksen mukaisesti. Tällöin koekappaleista tiivistys onnistuu varmemmin ja puristuskokeista saadaan hieman parempi tulos. Mikäli standardikoekappaleiden valamisessa käytetään muovimuotteja, on kaikki koekappaleet valettava samasta materiaalista valmistetuilla muoteilla. Jos muottimateriaaleja sotketaan saman tutkimussarjan sisällä, on todennäköistä, että puristuslujuustulosten hajonta kasvaa merkittävästi.

## **5.7 Koekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen**

Rakennekoekappaleiden kosteuspitoisuuden tutkimus tehtiin, koska uudistuvassa standardissa EN 13791 [2] rakennekoekappaleiden ohjeellinen kuivatusaika on muuttumassa. Nykyisin noudatettavassa standardissa kuivatusaika on 72 tuntia, kun uudistuvassa standardissa ohjeellinen kuivatusaika on 16...24 tuntia. Tutkimus tehtiin ainoastaan betoni- laadulla C30/37 P20.

Tutkimustulosten perusteella kuivatusajan lyhentäminen vaikuttaa hieman rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimustulosten perusteella nimellis- pituudeltaan ja -halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla 16 tuntia kuivatetuista rakennekoekappaleista saadaan noin 5 % pienempiä puristuslujuuksia 72 tuntia kuivatettuihin rakennekoekappaleisiin verrattuna. Vastaavasti nimellis- pituudeltaan ja -halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleilla ero on noin 3 % ja 100 mm rakennekoekappaleilla noin 1 %. Tarkemmat tutkimustulokset on esitetty taulukossa 37 ja kuvassa 65.

Tutkimuksen koejärjestelyissä rakennekoekappaleet kyllästettiin täysin vedellä ennen il- makuivatuksen aloittamista. Tilanne ei täysin vastaa todenmukaista tilannetta, sillä stan- dardin mukaisella kuivatusajalla pyritään poistamaan ja tasoittamaan rakennekoekappa- leista ylimääräinen kosteus, joka imeytyy rakennekoekappaleisiin timanttiporauksen, - sahaus- sen ja -hionnan aikana. Rakennekoekappaleita työstettäessä rakennekoekappaleet eivät ehdi täysin kyllästyä vedellä. Todellisessa tilanteessa rakenteista puristuslujuutta määritettäessä rakennekoekappaleet ovat siis lähempänä täysin kuivaa kosteusolosuh- detta, mitä rakennekoekappaleet tutkimuksessa olivat. Tutkimuksen koemenettelyllä saa- tiin selville kosteus- pitoisuuden ja kuivatusaikojen maksimivaikutus rakennekoekappalei- den puristuslujuuteen.

Tutkimustulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että kuivatusaikaa lyhentämällä rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi konservatiivisempia tuloksia pidem- män aikaa kuivatettuihin rakennekoekappaleisiin verrattuna. Eli rakennekoekappaleiden

täyttäessä rakenteen vaaditun puristuslujuuden lyhyemmällä kuivatusajalla, on puristuslujuus todennäköisemmin vaatimusten mukainen. Toisin sanoen lyhyemmällä kuivatusajalla määritetyssä puristuslujuudessa on rakennekoekappaleen koosta riippuen noin 1...5 % varmuutta mukana verrattuna tilanteeseen, jossa rakennekoekappaleita on kuivatettu pidemmän aikaa.

Koekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen tarkasteltiin kaikilla tutkimuksen betonilaadulla myös standardilieriöiden avulla. Standardilieriöiden puristuskokeita tehtiin täysin kuivassa, sekä täysin vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa. Tutkimustulosten perusteella täysin vedellä kyllästettyjen standardilieriöiden puristuslujuus on noin 4...6 % heikompi kuin kuivana puristettujen.

Betonisten koekappaleiden puristuskokeita suoritettaessa betonin huokosiin imeytynyt vesi aiheuttaa koekappaleisiin ylimääräistä sisäistä painetta, minkä seurauksena kosteampana puristetuista koekappaleista saadaan puristuslujuudeksi matalampia arvoja. Tutkimustulosten perusteella kooltaan pienemmillä rakennekoekappaleilla huokosveden aiheuttama sisäinen paine puristuskokeen aikana on merkittävämpi kuin kooltaan suuremmilla koekappaleilla. Olettaen, että tutkimuksen erikokoisilla rakennekoekappaleilla huokosveden aiheuttama ylimääräinen sisäinen paine on hyvin lähelle vakio riippumatta rakennekoekappaleen koosta, voidaan tutkimustuloksista tehdä johtopäätös, että rakennekoekappaleen massa ja tilavuus vaikuttaa rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteeseen, kun vertaillaan rakennekoekappaleiden kuivatusaikoja.

## 5.8 Kimmovasaratutkimukset

Tutkimuksen standardilieriöiden kimmovasaramittauksia tehtiin kolmessa eri kosteusolosuhteessa. Standardilieriöiden kimmovasaramittaukset tehtiin täysin kuivana, 15 minuuttia testattavan pinnan kastelun jälkeen ja täysin vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa. Kaikki standardilieriöiden kimmovasaramittaukset tehtiin samoille koekappaleille, jotka puristettiin täysin vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa. Standardilieriöiden kimmovasaramittauksista tutkimusolosuhteiltaan verrannollisia varsinaisten puristuskokeiden kanssa ovat ainoastaan täysin vedellä kyllästetyssä kosteusolosuhteessa suoritettut mittaukset. Kimmovasaramittauksia suoritettiin myös standardikuutioille, joiden mittausolosuhteet ovat verrannollisia varsinaisten puristuskokeiden kanssa. Standardikuutioiden kokeet suoritettiin kuivassa kosteusolosuhteessa. Standardilieriöiden ja -kuutioiden tutkimustulokset on esitetty tarkemmin taulukoissa 41 ja 42.

Verrattaessa kimmovasaramittausten tuloksia mitattuihin todellisiin puristuslujuuksiin, ei tuloksia voida käsitellä muiden tutkimusosien tapaan puristuslujuuksien suhteilla. Kimmovasaramittauksella määritetään betonin puristuslujuuden 10 % alafraktiin arvo, kun taas varsinaisista puristuskokeista on määritetty keskiarvo (eli 50 % fraktiili). Eri tutkimusmenetelmillä määritetyt puristuslujuuden arvot eivät siis ole vertailukelpoisia keskenään. Tuloksista voidaan kuitenkin tehdä suuruusluokkaan perustuva arvioi siitä, kuinka

hyvin kimmovasaralla määritetty puristuslujuus korreloi todellisen puristuslujuuden keskiarvon kanssa.

Tutkimustulosten perusteella kimmovasaramittauksella saadaan puristuslujuudeksi noin puolet todellisesta puristuslujuudesta, kun standardilieriöt ovat täysin vedellä kyllästyssä kosteusolosuhteessa. Täysin kuivilla standardikuutioilla kimmovasaramittauksella saatiin puristuslujuudeksi hieman alle puolet todellisesta puristuslujuudesta. Vedellä kylästettyjen standardilieriöiden ja kuivien standardikuutioiden puristuslujuuskokeiden ja kimmovasaramittausten tuloksia on vertailtu tarkemmin taulukoissa 41 ja 42. Kimmovasaramittausten tulokset muunnetaan puristuslujuuden arvoiksi standardin EN 13791 [2] mukaisesti käyttämällä laitevalmistajan 10 % alafraktiin sovitekäyrää (kuva 34). Sovitekäyrää käyttämällä kimmovasaroinnista määritettävä puristuslujuus täyttää rakenteen todellisen puristuslujuuden 90 % todennäköisyydellä. Sovitekäyrän käytön seurauksena kimmovasaroinnista saadaan puristuslujuuden arvioksi todella konservatiivisia tuloksia. Mikäli kimmovasaramittauksen avulla halutaan määrittää todenmukaisempi arvio rakenteen puristuslujuudesta, tulee jokaisella betonilaadulla eri kosteusolosuhteissa määrittää erillinen sovitekäyrä, joka määritetään kimmovasaramittausten ja puristuskokeiden tulosparien avulla.

Tutkimuksen kimmovasaramittausten tuloksiin saattaa vaikuttaa testattujen standardikoekappaleiden koko. Rakenteiden tutkimuksissa kimmovasaramittauksia tehdään todellisista rakenteista, joiden tilavuus ja massa ovat merkittävästi suurempia kuin testattujen standardikoekappaleiden. On mahdollista, että kimmovasaran isku vaimentuu, kun testattavana kappaleena käytetään tilavuudeltaan ja massaltaan huomattavan pieniä kappaleita. Iskun vaimenemisen seurauksena kimmovasaramittauksesta saadaan matalampia lujuuksia. Mahdollinen iskun vaimeneminen saattaa selittää kimmovasaramittauksista saadut ennakoita arvioitua alhaisemmat tutkimustulokset.

Kimmovasaramittauksissa kuivana testausta standardikappaleista saatiin suurin puristuslujuus. Tutkimustulosten perusteella koestettavan kappaleen pinnan kastelu ennen kimmovasaramittauksen suorittamista madaltaa kimmovasaralla määritettävää puristuslujuutta noin 0...8 %. Täysin vedellä kyllästetyistä koekappaleista saatiin kimmovasaramittauksella noin 0...15 % heikompia puristuslujuuksia täysin kuiviin koekappaleisiin verrattuna. Kimmovasaramittauksissa on siis havaittavissa sama ilmiö kuin koekappaleiden varsinaisissa puristuskokeissa. Kimmovasaramittauksella määritettävä puristuslujuus perustuu kimmovasaran laukaiseman painon kimpoaman eli betonipinnan kimmoarvoon. Tutkimustulosten perusteella koekappaleisiin lisätty kosteus madaltaa koekappaleen pinnan kimmoarvoa. Kimmovasaramittausten tutkimustulokset on esitetty liitteessä 16.

Tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että koekappaleisiin imeytynyt kosteus kasvattaa kimmovasaramittausten hajontaa. Koekappaleiden, joiden koestettavat pinnat kostutettiin vesisumutuksella ennen kimmovasaramittausten suorittamista, puristuslujuuksien keskiha-

jonnan havaittiin olevan noin 43...121 % suurempi kuin kuivana koestettujen koekappaleiden. Vastaavasti täysin vedellä kyllästettyinä suoritettujen kimmovasaramittausten keskihajonnan havaittiin olevan noin 39...66 % suurempi kuin kuivana koestettujen. Koekappaleiden pinnan kostuttamisen jälkeen koestettavien pintojen annetaan tasaantua (kuivua) 15 minuutin ajan. Oletettavasti odotusajan aikana eri koekappaleet kuivuvat hieman eritahtia, minkä seurauksena kostutettujen koekappaleiden kimmovasaramittausten hajonnaksi saadaan huomattavasti suurempi täysin vedellä kyllästettyinä koestettuihin verrattuna.

Väyläviraston ohjeistuksen mukaan kimmovasaramittauksia suoritettaessa koestettavat pinnat tulee kostuttaa tutkimuksessa käytetyn menetelmän mukaisesti. Tutkimuksen havaintojen perusteella koestettavan pinnan kostuttamista tulisi välttää. Kimmovasaramittauksella saadaan todella konservatiivinen arvio koestettavan pinnan puristuslujuudesta. Pinnan kostuttamisen seurauksena kimmovasaramittauksella määritettävä puristuslujuuden arvio madaltuu entisestään. Lisäksi pinnan kostuttaminen kasvattaa kimmovasaramittausten hajontaa merkittävästi. Tutkimustulosten perusteella kimmovasaramittaus ei sovellu betonin puristuslujuuden määrittämiseen. Kimmovasaramittaus on käyttökelpoinen työkalu, mikäli mittauksen avulla pyritään selvittämään rakenteen eri osien tai alueiden betonin tasalaatuisuutta.

Standardikuutioiden kimmovasaramittauksissa ei havaittu teräs- ja muovimuoteilla valetttujen standardikuutioiden lujuuksissa systemaattisia eroja muottityyppien välillä. Tutkimuksessa havaittiin, että muottipinnoille valussa muodostuvaan ohueen sementtiliimakerrokseen jää selvästi havaittavia jälkiä kimmovasaroinnista. Ohuen sementtiliimakerroksen ei kuitenkaan arvioitu vaimentaneen kimmovasaramittauksella määritettävää puristuslujuutta, sillä arvot eivät merkittävästi eronneet hiottuilta valupinnoilta tehdyistä kimmovasaramittauksista.

Kimmovasaramittausten perusteella koekappaleiden betonia tiivistettäessä osa runkoaineksesta painuu muotin pohjalle. Kimmovasaramittauksessa lähellä koestettavaa pintaa sijaitsevat runkoainesrakeet kasvattavat määritettävää puristuslujuutta merkittävästi. Tutkimuksessa havaittiin, että standardikuutioiden pohjien kimmovasaralla määritetty puristuslujuus on noin 1...36 % suurempi kuin sivupintojen. Betonimassan tiivistyksessä yleisesti havaittu ilmiö selittää muottipintojen eroavat kimmovasaramittauksien tulokset. Mikäli kimmovasaramittauksen perusteella pystyttäisiin määrittämään todellinen puristuslujuus tutkimuksessa havaittua tarkemmin, tulisi standardikuutioiden tutkimustulosten perusteella kimmovasaramittaukset suorittaa rakenteiden sivupinnoilta, jotta kimmovasaramittauksen perusteella rakenteen puristuslujuutta ei arvioida liian korkeaksi.

Tutkimuksessa havaittiin, että rosoisen valuvaiheessa hierretyn valupinnan hionnalla on merkittävä vaikutus kimmovasaralla määritettävään puristuslujuuteen. Valupinnan hionta suoritettiin hiomakivellä. Tulosten perusteella hierretyn pinnan hiomisella kimmova-



saroinnista saadaan noin 10...69 % parempi puristuslujuustulos. Hionnan avulla koestettavalta pinnalta saadaan poistettua merkittävimmät epätasaisuudet ja mahdollisesti kimmovasaroinnissa rikkoutuva pinta, mitkä madaltavat kimmovasaramittauksen tulosta. Tulosten perusteella valupinnan hiominen on tärkeää, jotta kimmovasaramittausten tuloksia voidaan vertailla rakenteen muiden pintojen tulosten kanssa. Yleensä rakenteiden kimmovasaramittaukset suoritetaan muottipinnoista. Todennäköisesti muottipintojen hionnalla ei ole yhtä suurta vaikutusta kimmovasaramittauksen tulokseen kuin, mitä valupinnan tapauksessa havaittiin, sillä muottipinnoilla harvoin esiintyy merkittäviä epätasaisuuksia. Huomioitavaa on kuitenkin, että muottipinnoille muodostuu valussa ohut sementtiliimakerros, joka saattaa vaimentaa kimmovasaramittausta. Muottipintojen testattavan alueen hionnalla pystytään helposti poistamaan mahdollisesti mittaukseen hieman vaikuttava sementtiliimakerros.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 6.1 Johtopäätökset

Tähän kappaleeseen on koottu kappaleissa 5.1-5.8 esitetyt puristuskokeiden tutkimustulosten ja kimmovasarakokeiden analysoinnin johtopäätökset. Kappaleessa on esitetty ainoastaan tutkimuksen merkittävimmät havainnot.

#### Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus puristuslujuuteen

Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat lähes suoraan verrannollisia tai parempia kuin kuutiolujuus. Tutkimustulosten perusteella ei pystytä määrittämään tarkasti kaikille tutkimuksen betonilaaduille yhteisiä halkaisijasta riippuvia korjauskertoimia tilanteeseen, jossa L/D-suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan kuutiolujuudeksi. Taulukossa 44 on esitetty koottuna kuvissa 50-53 esitetyt eri kokoisten rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteet kuutiolujuuteen verrattuna ( $f_{cm} / f_{cm.cube.calc}$ ), eli kertoimet, joilla rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan kuutiolujuudeksi. Taulukossa 44 on myös esitetty tutkimustulosten perusteella päätellyt betonilaatujen yhdistetyt muunnoskertoimet halkaisijan perusteella sekä betonilaadun perusteella (kerroin ei riippuvainen rakennekoekappaleen halkaisijasta). Taulukosta on huomattava, että erityisesti pienimmällä rakennekoekappalekokoolla (D50x50) päätelty halkaisijasta riippuva muunnoskerroin 0,80 eroaa huomattavasti osan betonilaatujen lasketusta muunnoskertoimesta. D50x50 rakennekoekappaleiden muunnoskerroimen määrittelyssä pyrittiin huomioimaan rakennekoekappaleiden mahdollinen runsaasta kiviainesmäärästä aiheutuva ylilujuus sekä suurempia rakennekoekappaleita merkittävästi suurempi puristuslujuustulosten hajonta.

**Taulukko 44.** Rakennekoekappaleiden tutkimustuloksista päätellyt puristuslujuuden muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi rakennekoekappaleiden halkaisijan ja betonilaadun perusteella.

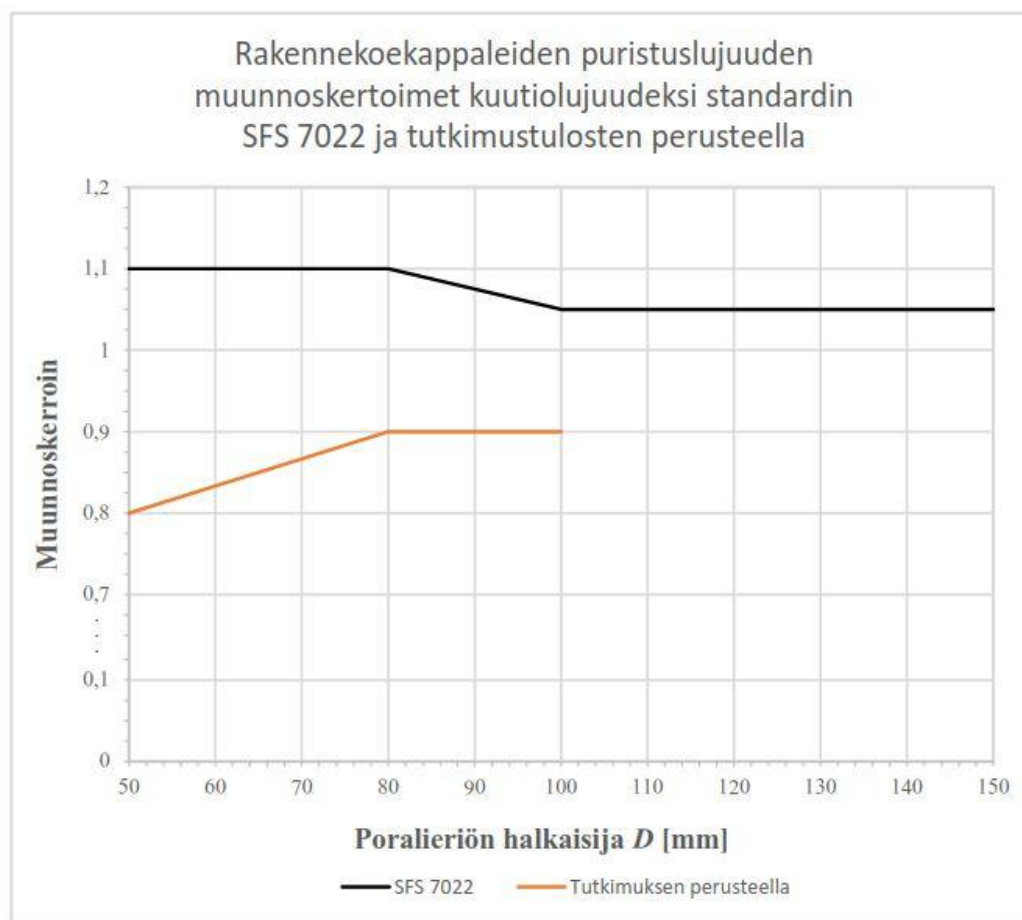
Betoni	C35/45 P50	C30/37 P20	C50/60 P50	C35/45	Muunnoskerroin halkaisijalle
D50x50	1,01	1,03	0,88	0,86	0,80
D80x80	0,99	1,01	0,86	0,91	0,90
D100x100	1,07	1,01	0,90	0,92	0,90
Muunnoskerroin betonilaadulle	1,00	1,00	0,85	0,85	

Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleiden halkaisijan vaikutus rakennekoekappaleista määritettävään kuutiolujuuteen on hyvin riippuvainen käytetystä betoni-

laadusta, betonin ominaisuuksista ja betonissa käytetyistä sideaineista. Taulukossa 44 onkin esitetty Suomessa nykyisin noudatettavasta ohjeistuksesta poikkeavat rakennekoekappaleiden puristuslujuuden muunnoskertoimet kuutiolujuudeksi. Taulukon 44 alimmalla rivillä kaikille rakennekoekappale koille on määritetty sama muunnoskerroin, joka on riippuvainen betonilaadusta. Tutkimustuloksista päätellyt betonilaatukohtaiset rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien muunnoskertoimet ovat huomattavasti tarkempia ja lähempänä todellisia laskettuja muunnoskertoimia kuin halkaisijasta riippuvat muunnoskertoimet. Tulevaisuudessa on syytä harkita, että rakennekoekappaleille muodostetaan betonilaatu- tai lujuusaluekohtaisia muunnoskertoimia, joilla rakennekoekappaleiden puristuslujuudet muunnetaan kuutiolujuuden arvoiksi.

Tutkimuksessa havaittiin, että silikan käyttö betonin sideaineena ei juurikaan vaikuta standardilieriöiden puristuslujuuteen. Pienemmillä koekappaleilla silikan taas havaittiin kasvattavan koekappaleiden puristuslujuutta standardilieriöihin verrattuna. Erityisesti lujuuden kasvua havaittiin halkaisijaltaan 50-100 mm rakennekoekappaleilla, joiden L/D-suhde oli 1,0. Mikäli olemassa olevien rakenteiden puristuslujuuden täyttymistä (laadunvarmistus) tarkastellaan rakennekoekappaleiden avulla, saatetaan havaitun ilmiön perusteella rakenteiden lujuudesta saada merkittävästi ylioptimistinen arvio.

Tutkimustulosten perusteella pituus-halkaisija suhteeltaan (L/D-suhde) 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus on nykyaikaisilla betonilaaduilla rakennekoekappaleen halkaisijasta riippumatta suurempi, mitä standardissa SFS 7022 [1] oletetaan. Tutkimustulosten perusteella kaikkien tutkimuksessa käytettyjen rakennekoekappale kokojen puristuslujuus on betonilaadusta riippumatta lähes suoraan verrannollinen tai parempi kuin betonilaatujen kuutiolujuus. Standardin SFS 7022 [1] mukaisesti L/D-suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan kuutiolujuudeksi kertomalla rakennekoekappaleiden puristuslujuudet muunnoskertoimella, joka vaihtelee rakennekoekappaleen halkaisijan mukaan välillä 1,05...1,10. Kuvassa 74 on esitetty rakennekoekappaleiden muunnoskertoimet standardin SFS 7022 mukaisesti, kuvassa on lisäksi taulukossa 44 esitetyt tutkimustulosten perusteella päätellyt muunnoskertoimet. Kuvasta 74 on selvästi havaittavissa, että tutkimustulosten perusteella päätellyt muunnoskertoimet eroavat merkittävästi nykyisin käytettävistä muunnoskertoimista. Tutkimustulosten perusteella päätellyt muunnoskertoimet ovat osalle betonilaaduista liian pieniä. Kertoimet on määritelty siten, että niillä saadaan kaikkien betonilaatujen tutkimustulokset huomioiden oikean suuntainen muunnettu kuutiolujuus, joka on osalle betonilaaduista ns. varmallalla puolella.



**Kuva 74.** Rakennekoekappaleiden puristuslujuuden muunnoskertoimet kuutiolujuuksi standardin SFS 7022 ja tutkimustulosten perusteella.

Rakennekoekappaleiden puristuslujuuden ollessa lähes suoraan verrannollinen tai parempi kuin kuutiolujuus, saadaan nykyisin käytettävillä korjauskertoimilla ylioptimistinen arvio betonin puristuslujuudesta. Erityisesti ilmiö korostuu edellä esitetysti tapauksissa, joissa esimerkiksi uuden tyyppisen sideaineen (silika) käyttäytymistä ei ole tarkasti tiedossa suhteessa vanhoihin muunnoskertoimiin. Tutkimuksen havaintojen perusteella standardissa SFS 7022 [1] esitetyt rakennekoekappaleiden halkaisijan huomioivat korjauskertoimet eivät sovellu käytettäväksi nykyaikaisilla kehittyneillä betonilaaduilla.

### Rakennekoekappaleen pituuden vaikutus puristuslujuuteen

Tutkimuksessa halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden pituuden vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin ainoastaan betonilaadulla C35/45 P50. Tutkimustulosten perusteella  $L/D$ -suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus oli noin 18 % suurempi  $L/D$ -suhteeltaan 2,0 rakennekoekappaleisiin verrattuna. Tutkimustulosten perusteella eri pituisten rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteeksi saadaan 0,845. Tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin muissa maissa käytettäviä korjauskertoimia tilanteisiin, joissa  $L/D$ -suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus muunnetaan  $L/D$ -suhteeltaan 2,0 rakennekoekappaleiden lujuuksi. Muissa maissa kor-

jauskertoimet vaihtelivat välillä 0,85...0,87. Tutkimuksessa havaittu suhde on hyvin lähellä muiden maiden ohjeistusta, joten suhdetta voidaan pitää luotettavana suppeasta koekappalemäärästä huolimatta.

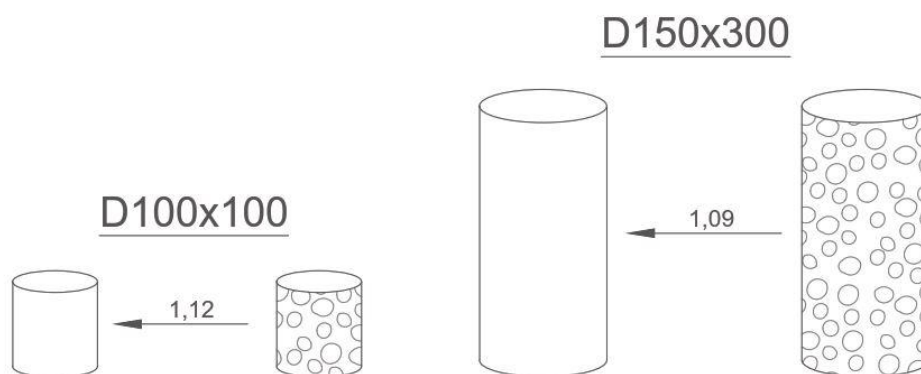
Standardin EN 13791 [2] mukaisesti halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuudet ovat suoraan verrannollisia standardikoekappaleiden kanssa. L/D-suhteeltaan 1,0 rakennekoekappaleiden puristuslujuus vastaa kuutiolujuutta (standardikuutio) ja L/D-suhteeltaan 2,0 rakennekoekappaleet lieriölujuutta (standardilieriö). Tutkimuksessa lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteena käytettiin arvoa 0,828, joka on hyvin lähelle sama kuin eri pituisten rakennekoekappaleiden lujuuksien suhde. Havainnon perusteella tutkimuksessa käytettyä lieriö- ja kuutiolujuuden suhdetta voidaan pitää oikeana.

### **Rakennekoekappaleen timanttikorauksen vaikutus puristuslujuuteen**

Timanttikorauksen vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden ja vastaavan kokoisten valettujen koekappaleiden avulla. Tutkimustulosten perusteella timanttikorauksella on selvä vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen, kun rakennekoekappaleiden puristuslujuutta verrataan vastaavan kokoiseen valettuun koekappaleeseen. Tutkimuksen havaintojen perusteella kaikilla betonilaaduilla lukuun ottamatta C30/37 P20 rakennekoekappaleiden puristuslujuus on noin 11 % heikompi kuin vastaavan kokoisten valettujen koekappaleiden. Betonilaadulla C30/37 P20 rakennekoekappaleet olivat noin 17 % heikompiä.

Lisäksi timanttikorauksen vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm rakennekoekappaleiden ja vastaavan kokoisten valettujen koekappaleiden (standardilieriö) avulla. Tutkimustulosten perusteella kaikilla tutkimuksen betonilaaduilla timanttikorauus heikentää koekappaleen puristuslujuutta noin 7...8 %.

Kuvassa 75 on esitetty tutkimustulosten perusteella määritetyt timanttikorauksen huomioivat rakennekoekappaleiden puristuslujuuden korjauskertoimet. Korjauskertoimissa ei ole huomioitu D100x100 tapauksessa betonilaadun C30/37 P20 poikkeavaa tutkimustulosta. Tutkimustulosten perusteella pituudeltaan ja halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleilla timanttikorauksen aiheuttamien vaurioiden huomioiva korjauskerroin on 1,12. Halkaisijaltaan 150 mm ja pituudeltaan 300 mm rakennekoekappaleella korjauskerroin on 1,09. Eurooppalaisissa standardeissa ei tunneta vastaavia korjauskertoimia, vaikka timanttikorauksen aiheuttamat ilmiöt tunnistetaan. Yhdysvalloissa timanttikorauksen aiheuttamien vaurioiden huomioiva korjauskerroin on 1,06. Tutkimuksen havaintojen perusteella mahdollisen määritettävän korjauskertoimen tulisi olla hieman suurempi, mitä Yhdysvalloissa käytettävissä ohjeissa esitetään.



**Kuva 75.** Rakennekoekappaleiden timanttiorauksen huomioivat puristuslujuuden korjauskertoimet tutkimustulosten perusteella.

Saman kokoisia koekappaleita tutkittaessa rakennekoekappaleista saadaan heikompi puristuslujuuksia, koska timanttioraus aiheuttaa rakennekoekappaleiden pinnoille vaurioita, jotka heikentävät rakennekoekappaleiden puristuslujuutta. Timanttiorauksessa rakennekoekappaleiden pinnoille muodostuu mikrohalkeilua, lisäksi lävistettyjen runkoaineskappaleiden ja sementtikiven välinen tartunta saattaa häiriintyä. Merkittävimmin rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen vaikuttaa timanttiorauksessa lävistettyjen runkoaineskappaleiden mahdollinen irtoaminen (kuva 72). Runkoaineskappaleiden irrotessa rakennekoekappaleen puristuspinta-ala pienenee paikallisesti ja aksiaalinen puristuskuorma jakaantuu kappaleessa epäkeskeisesti. Tutkimustulosten perusteella mahdolliset rakennekoekappaleiden vauriot ovat merkittävämpiä kooltaan pienemmissä rakennekoekappaleissa, joissa lieriön timanttioratun vaipan pinta-alan suhde kappaleen tilavuuteen on suurin. Tutkimustulosten perusteella rakennekoekappaleiden timanttiorauksen vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tulee huomioida, kun rakennekoekappaleista arvioidaan rakenteen puristuslujuutta. Mikäli timanttiorauksen vaikutusta ei huomioida, aiheutuu siitä ylimääräistä varmuutta mitattuun puristuslujuuteen.

Timanttiorauksen vaikutusta arvioitiin myös standardin EN 13791 [2] ohjeistuksen perusteella. Standardin mukaan nimellispuuteltaan ja -halkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuus on suoraan verrannollinen kuutiolujuuteen, kun kummatkin koekappaleet on valmistettu ja jälkihoidettu samoissa olosuhteissa. Tutkimustulosten perusteella standardin mukainen ohjeistus ei huomioi timanttiorauksen vaikutusta riittävästi hyvin. Tutkimuksessa havaittiin, että rakennekoekappaleiden puristuslujuus on pääsääntöisesti heikompi kuin standardikuutioiden lujuus.

### **Timanttiterän kunnan vaikutus puristuslujuuteen**

Timanttiterän kunnan vaikutusta rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen tutkittiin poraamalla rakennekoekappaleita hyvin kuluneilla timanttiterillä, minkä puristuslujuutta verrattiin uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen.

Tutkimustulosten perusteella timanttiterän kunnolla on pääsääntöisesti selvä vaikutus rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla kuluneella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden puristuslujuudeksi saatiin 5...26 % heikompi puristuslujuus uudella timanttiterällä porattuihin verrattuna. Nimellispituudeltaan ja -halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleista kuluneella timanttiterällä saatiin noin 5...7 % ja 100 mm rakennekoekappaleista noin 1...5 % heikompia puristuslujuuksia uudella timanttiterällä porattuihin rakennekoekappaleisiin verrattuna. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että kuluneen timanttiterän käyttö kasvattaa osassa tapauksista rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten hajontaa. Merkittävimmän hajonta kasvaa pienemmällä rakennekoekappaleilla.

Oletettavasti kuluneen timanttiterän käyttö tehostaa rakennekoekappaleiden porauksen aiheuttamaa vaurioitumista, mikä selittää tutkimuksen havainnot. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että kuluneen timanttiterän käytöstä aiheutuu rakennekoekappaleiden porauspinnoille huomattavia epätasaisuuksia, joiden seurauksena rakennekoekappaleiden porauspinnot eivät ole täysin suoria. Epätasaisuudet saattavat osin vaikuttaa rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Pienillä rakennekoekappaleilla porauspinta-alan suhde tilavuuteen on huomattavasti suurempi kuin suuremmilla rakennekoekappaleilla, minkä seurauksena timanttiporauksen aiheuttamat vauriot korostuvat pienemmällä rakennekoekappaleilla. Tutkimustuloksista timanttiporauksen aiheuttamien vaurioiden tehostuminen on selvimmän havaittavissa juuri pienillä rakennekoekappaleilla, joiden puristuslujuudet ja puristuslujuustulosten hajonnat eroavat merkittävimmin uudella timanttiterällä porattujen rakennekoekappaleiden tuloksista. Tutkimuksen havaintojen perusteella kuluneen timanttiterän käytölle ei voida määrittää korjauskertoimia, eri betonilaatujen välillä kuluneen timanttiterän käytöllä havaittiin olevan merkittävästi eroavia vaikutuksia. Havaintojen perusteella suositeltavampaa olisi määrittää esimerkiksi kuvien avulla kulumisrajat, milloin timanttiterä on huollettava tai uusittava.

### **Rakennekoekappaleen päiden tasoitustekniikan vaikutus puristuslujuuteen**

Rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikan vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin kahdella eri tasoitustekniikalla, joita olivat koneellinen hionta ja tasoittaminen rikkiseoksella. Timanttihiointaa pidetään yleisesti vertailumenetelmänä ongelmatilanteissa. Tutkimustulosten perusteella rikkiseoksella tasoitetuista rakennekoekappaleista saadaan puristuslujuudeksi selvästi pienempi lujuus kuin hiomalla tasoitetuista rakennekoekappaleista. Havainto tehtiin kaikilla tutkimuksen betonilaaduilla. Tutkimukset tehtiin rakennekoekappaleilla, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Tutkimustulosten perusteella rikkiseoksella tasoitetujen rakennekoekappaleiden puristuslujuus on noin 5...22 % heikompi verrattuna hiottuihin rakennekoekappaleisiin. Tutkimuksen havaintojen perusteella rikkiseoksen käyttäminen tasoitusmenetelmänä vaikuttaa merkittävämmän pienikokoisilla rakennekoekappaleilla. Pienillä rakennekoekappaleilla pienetkin virheet rikkiseostasoitteessa vaikuttavat merkittävästi puristuslujuustulokseen. Halkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleilla rikkiseoksen

asentamisessa havaittiin merkittävä epäonnistumisriski, osassa tutkimussarjoista jouduttiin hylkäämään koekappaleita tapauksissa, joissa rikkikerroksen arvioitiin vaikuttaneen rakennekoekappaleesta mitattuun puristuslujuuteen.

Rikkiseoksella tasoitettujen rakennekoekappaleiden heikommat puristuslujuudet verrattuna hiottuihin rakennekoekappaleisiin selittyvät ainakin osittain epäedullisemmalla kitkavaikutuksella rakennekoekappaleen ja kuormituslevyjen välillä. Kitkavaikutuksen oletetaan olevan merkityksetön, kun koekappaleen pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 2,0 tai suurempi. L/D-suhteeltaan pienemmillä koekappaleilla kitkavaikutus toimii edullisesti kasvattaen mitattavaa puristuslujuutta. Kitkavaikutuksessa määräävänä ominaisuutena on kitkakerroin, joka materiaaliparilla teräs - rikkiseos on oletettavasti pienempi kuin materiaaliparilla teräs - betoni. Tutkimuksen havaintojen perusteella rikkiseoksen käyttämistä rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikkana tulee välttää.

### **Muottimateriaalin vaikutus puristuslujuuteen**

Tutkimuksessa havaittiin, että koekappaleen valamiseen käytettävä muottimateriaali vaikuttaa selvästi koekappaleesta määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksessa standardikuutioita valettiin teräksestä ja muovista valmistetuilla muoteilla. Tutkimustulosten perusteella teräksestä valmistetuilla muoteilla valetuista standardikuutioista saadaan noin 2...6 % parempi puristuslujuus kuin muovista valmistetuilla muoteilla valetuista. Muottimateriaalista riippuvat puristuslujuuserot syntyvät todennäköisesti koekappaleiden tiivistysvaiheessa. Teräsmuotteja käytettäessä saadaan betonimassa tiivistettyä tasalaatuisemmin kuin muovimuotteja käytettäessä. Koekappaleita tiivistettäessä muovimuottien seinämät eivät välitä tiivistyksen tärinää yhtä tehokkaasti kuin teräsmuotit, jolloin koekappaleen keskiosan tiivistyminen saattaa jäädä vajaaksi. Tiivistyserojen seurauksena muovimuoteilla valetuista standardikuutioista saadaan puristuslujuudeksi hieman matalampia arvoja. Tutkimuksen havaintojen perusteella muottimateriaalina on suositeltavaa käyttää terästä. Havaintojen perusteella kaikki saman tutkimuserän koekappaleet on valettava samasta materiaalista valmistetuilla muoteilla. Eri materiaaleista valmistettujen muottien käyttö samassa tutkimuserässä kasvattaa puristuslujuustulosten hajontaa, jolloin tutkittavasta betonista saadaan ominaislujuudeksi todellista matalampi lujuus.

### **Rakennekoekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutus puristuslujuuteen**

Rakennekoekappaleiden kosteuspitoisuuden vaikutusta puristuslujuuteen tutkittiin kylälämällä rakennekoekappaleet täysin vedellä, jonka jälkeen rakennekoekappaleita kuivatettiin huoneilmassa joko 16 tuntia tai 72 tuntia. Tutkimus tehtiin rakennekoekappaleilla, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde on 1,0. Rakennekoekappaleiden halkaisijoina käytettiin 50 mm, 80 mm ja 100 mm. Tutkimustulosten perusteella kuivatusajan lyhentäminen vaikuttaa negatiivisesti rakennekoekappaleiden puristuslujuuteen. Tutkimustulosten perusteella kuivatusaikaa lyhennettäessä saadaan rakennekoekappaleista noin 1...5 % heikompia puristuslujuuksia. Kuivatusajan lyhentäminen vaikuttaa



merkittävämmiin kooltaan pieniin rakennekoekappaleisiin. Betonisten koekappaleiden puristuskokeita suoritettaessa betonin huokosiin imeytynyt vesi aiheuttaa koekappaleisiin ylimääräistä sisäistä painetta. Lyhyemmän aikaa kuivatetuissa koekappaleissa huokosissa jäljellä oleva veden määrä on suurempi kuin pidemmän aikaa kuivatetuissa, minkä seurauksena puristuskokeen aikainen sisäinen paine on suurempi ja koekappaleiden puristuslujuudeksi saadaan heikompia arvoja. Tutkimuksen havaintojen perusteella rakennekoekappaleiden kuivatusaikaa lyhentämällä puristuslujuuskokeista saadaan konservatiivisempia puristuslujuustuloksia eli määritetty lujuus on todellista lujuutta pienempi.

### **Kimmoasaratutkimus**

Puristuskokeille rinnakkaista tutkimusta tehtiin kimmovasaroinnilla, joka on ainetta rikkomaton tutkimusmenetelmä. Kimmovasarointia suoritettiin tutkimuksessa puristettaville standardilieriöille ja -kuutioille. Tutkimuksen havaintojen perusteella kimmovasaralla määritetty betonin puristuslujuus on suuruusluokaltaan noin puolet koekappaleen todellisesta puristuslujuudesta. Kimmovasaroinnista saatavaan puristuslujuuteen saattaa vaikuttaa tutkimuksessa käytettyjen koekappaleiden koko. Todellisissa tilanteissa kimmovasarointia tehdään rakenteille, joiden tilavuus ja massa ovat merkittävästi suurempia kuin testattujen standardikoekappaleiden. Tutkimuksessa kimmovasaroinnin iskun teho on saattanut vaimentua koekappaleiden verrattain pienen massan ja tilavuuden seurauksena.

Tutkimustulosten perusteella rakenteen valuvaiheessa hierretyn pinnan hiominen on suositeltavaa ennen kimmovasaroinnin suorittamista. Tutkimustulosten perusteella hiomakivellä hiotusta valupinnasta saadaan pinnan tasaisuudesta riippuen noin 10...69 % parempi tulos kuin hiomattomasta pinnasta. Hionnan avulla valuvaiheessa hierretystä pinnasta saadaan poistettua merkittävimmit epätasaisuudet sekä kimmovasaroinnissa mahdollisesti rikkoutuva heikko pintakerros. Kenttätutkimuksissa kimmovasarointia tehdään yleensä muottipinnoille, jotka ovat huomattavasti tasaisempia ja pinnanlaadultaan tasalaatuisempia kuin hierretyt valupinnat. Todennäköisesti muottipintojen hionnalla ei ole yhtä suurta vaikutusta kimmovasaromittaukseen, mitä valupinnassa havaittiin.

Liikenneviraston (nykyinen Väylävirasto) kimmovasarointi käsittelevässä ohjeistuksessa betonipinnat ohjeistetaan kastelemaan vesisumutuksella 15 minuuttia ennen kimmovasaroinnin suorittamista. Tutkimuksessa havaittiin, että tällä menettelyllä kimmovasaroinnista saadaan puristuslujuudeksi noin 0...8 % heikompi puristuslujuus kuin täysin kuivasta pinnasta mittaamalla. Merkittävämmiin tutkittavan pinnan kastelu vaikuttaa kimmovasaromittauksen hajontaan. Tutkimustulosten perusteella pinnan kastelu kasvattaa kimmovasaromittauksen keskihajontaa noin 43...121 % kuivana testattuihin verrattuna. Tutkimuksen havaintojen perusteella pinnan kastelua tai osittain märkien pintojen kimmovasarointia tulisi välttää.

## 6.2 Jatkotoimenpiteet

Tutkimuksessa käytettiin pääasiassa rakennekoekappaleita, joiden pituuden ja halkaisijan välinen suhde ( $L/D$ -suhde) on 1,0. Tällöin rakennekoekappaleiden puristuslujuutta tulee verrata kuutiolujuuteen. Tässä tutkimuksessa kuutiolujuus määritettiin lieriölujuudesta muunnoskertoimen avulla. Nykyaikaisessa eurokoodeihin perustuvassa mitoituksessa käytetään kuitenkin mitoituslujuutena lieriölujuutta. Mikäli rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksia verrataan lieriölujuuteen, tulee rakennekoekappaleiden  $L/D$ -suhteen olla 2,0. Todellisista rakenteista pystytään timanttiporaamaan luotettavilla rakennekoekappaleiden halkaisijoilla (80 mm ja 100 mm) rakennekoekappaleita, joiden  $L/D$ -suhde on 1,0. Useissa tapauksissa rakenteiden mitat ja raudoitus estävät pidempien rakennekoekappaleiden poraamisen. Tulevissa tutkimuksissa olisi tarpeellista tarkastella laajalla koekappalemäärällä ja useilla eri betonilaaduilla, millainen eri pituisten rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhde on. Erityisesti olisi suositeltavaa tarkastella rakennekoekappaleiden puristuslujuuksien suhteita  $L/D$ -suhteiden 1,0 ja 2,0 välillä. Tällöin  $L/D$ -suhteiden välille pystyttäisiin määrittämään tarkat korjauskertoimet ja puristuslujuutta pystyttäisiin suoraan vertaamaan lieriölujuuteen edellyttäen, että rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus puristuslujuuteen on tiedossa.

Nykyisin rakennekoekappaleiden puristuslujuustuloksen muunnetaan kuutiolujuudeksi käyttämällä standardin SFS 7022 [1] mukaisia rakennekoekappaleen halkaisijan huomioivat korjauskertoimia. Tutkimustuloksista saatiin viitteitä, että standardin mukaiset korjauskertoimet eivät sovellu käytettäväksi nykyaikaisilla betonilaaduilla. Korjauskertoimia käyttämällä rakennekoekappaleiden puristuslujuuksista saadaan ylioptimistinen arvio rakenteen kuutiolujuudesta. Tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että nykyisin käytettävät korjauskertoimet ovat liian suuria. Tutkimustulosten perusteella ei kuitenkaan pystytä tekemään varmoja johtopäätöksiä korjauskertoimien suuruudesta. Mikäli rakennekoekappaleiden puristuslujuuksia verrataan tulevaisuudessa kuutiolujuuteen, on rakennekoekappaleiden halkaisijan vaikutusta suhteessa kuutiolujuuteen tarkasteltava laajemmalla otannalla. Lisäksi laajempi tutkimus on suositeltavaa tehdä todellisesta rakenteista, jotta mahdollinen porattavien kappaleiden ylilaatu pystytään sulkemaan pois ja rakenteen toteuttamisesta muodostuvat tekijät aktivoituvat.

Tutkimuksen perusteella olisi tarpeellista valaa erilaisia rakenteita tai rakenneosia, joista timanttiporaamalla voitaisiin selvittää betonin puristuslujuuden jakautumista rakenteissa ja eri kohdissa rakenteita. Esimerkiksi rakenteina voitaisiin käyttää pilarimaisia sekä paksuja laattamaisia ja seinämaisii rakenteita.

Tutkimuksessa rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikan vaikutusta puristuslujuuteen tarkasteltiin ainoastaan rakennekoekappaleilla, joiden  $L/D$ -suhde on 1,0.  $L/D$ -suhteen ollessa pieni vaikuttaa koekappaleen ja kuormituslevyn välinen kitka edullisesti määritettävään puristuslujuuteen. Tutkimuksen perusteella jäi epäselväksi, onko rikkinäköisen käytön yleisesti heikompi tasoitustekniikka kuin rakennekoekappaleiden päiden

koneellinen hiominen. Puristuslujuuden kannalta edullisen kitkavaikutuksen määräävim-pänä ominaisuutena on materiaaliparien välinen kitkakerroin. Edullisen kitkavaikutuksen oletetaan olevan merkityksetön, kun rakennekoekappaleen L/D-suhde on 2,0 tai suu-rempi. Tulevissa tutkimuksissa olisi hyvä selvittää, onko rakennekoekappaleiden päiden tasoitustekniikoilla merkittävää eroa tilanteessa, jossa rakennekoekappaleiden L/D-suhde on 2,0. Kitkavaikutuksen eroille pystyttäisiin siten määrittämään korjauskerroin tilanteisiin, joissa kitkavaikutus on edullinen puristuslujuuden kannalta ja materiaaliparien välillä on selkeä ero kitkakertoimessa.

Tutkimuksessa timanttiterän kunnan vaikutusta rakennekoekappaleista määritettävään puristuslujuuteen tutkittiin uusilla ja hyvin kuluneilla timanttiterillä. Standardeissa ja kansallisissa ohjeissa ei oteta kantaa, milloin timanttiterä on viimeistään huolettava tai uusitava. Tulevaisuudessa olisi hyvä tarkentaa kansallisia ohjeita ja määrittää esimerkiksi kuvien avulla, missä kunnossa rakennekoekappaleiden poraamisessa käytettävä timanttiterä on vähintään oltava, jotta rakennekoekappaleiden laatu on hyväksyttävä.

## LÄHTEET

- [1] SFS 7022. Betoni. Standardin SFS-EN 206:2014 käyttö Suomessa, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015.
- [2] SFS-EN 13791. Betonin puristuslujuuden arviointi rakenteissa ja rakenneosissa, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2007.
- [3] J. Haavisto ja A. Laaksonen, Betonin puristuslujuus. Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista, Helsinki: Liikennevirasto, 2018.
- [4] M. V. Leskelä, BY 210. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys r.y., 2008.
- [5] SFS-EN 12390-1. Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013.
- [6] SFS-EN 12390-2. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [7] SFS-EN 206 + A1: Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2016.
- [8] SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015.
- [9] A. Laaksonen, RAK 33610 Betonisillat, luetomoniste, 2015.
- [10] BY 211. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 1, Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry, 2013.
- [11] F. Fingerloos, J. Hegger ja K. Zilcg, Eurocode 2 für Deutschland, Ernst & Sohn, 2012.
- [12] Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Betonirakenteet, Helsinki: Ympäristöministeriö, 2016.

- [13] SFS-EN-12390-3. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [14] SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut kappaleet. Näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [15] BY 65. Betoninormit 2016, Vaasa: Suomen Betoniyhdistys, 2016.
- [16] Taitorakenteiden erikoistarkastusten laatuvaatimukset - Sillat. Suunnittelu- ja toteuttamisvaiheen ohjaus, Helsinki: Liikennevirasto, 2018.
- [17] BY 201. Betonitekniikan oppikirja, Helsinki: Suomen Betoniyhdistys, 2018.
- [18] R. C. Meininger, "Effect of Core Diameter on Measured Concrete Strength," *J. Mater.*, vol. 3, no. 2, pp. 320-336, 1968.
- [19] R. Dillon ja G. I. B. Rankin, "Cube, cylinder, core and pull-off strength relationships," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Built.*, vol. 166, no. 10, pp. 521-536, 2013.
- [20] R. A. M. Watkins, H. W. Pang ja D. P. McNicholl, "A Comparison between Cube Strengths and In Situ Concrete Strength Development," *ICE Struct. Build.*, vol. 116, no. 2, pp. 138-153, 1996.
- [21] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed., Essex, England: Longman Group Limited, 1995.
- [22] SFS-EN 197-1. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2012.
- [23] C. A. Clear, "Cement Type / Early Age Properties," *Concrete Today*, pp. 12-14, 2011.
- [24] Liikenneviraston ohjeita 22/2016. Siltabetonien P-lukumenettely, Helsinki: Liikennevirasto, 2016.
- [25] SFS-EN 12350-7. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Painemenetelmä, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [26] SFS-EN 12620 + A1. Betonikiviainekset, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2008.

- [27] R. Polat, M. M. Yadollahi, A. E. Sagsoz ja S. Arasan, "The Correlation between Aggregate Shape and Compressive Strenght of Concrete," *Aint. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, vol. 2, No. 3, pp. 62-80, 2013.
- [28] Z. A. Chat, U. Salam ja S. Bashir, "Compressive Strenght of Concrete Using Natural Aggregates (Gravel) and Crushed Rock Aggrigates a Comparative Case Study," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 21-26, 2015.
- [29] C. H. Aginam, C. A. Chidolue ja C. Nwakire, "Investigating the Effects of Coarse Aggrigate Types on The Compressive Strenght of Concrete," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 1140-1144, 2013.
- [30] SFS-EN 934-2 + A1. Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimusten mukaisuus ja merkinnät, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013.
- [31] SS 137207. Betongprovning - Hårdnad betong - Tryckhållfasthet - Omräkningsfaktorer., Stockholm, Sweden: SIS Förlag AB, 2005.
- [32] W. K. Yip ja C. T. Tam, "Concrete strenght evaluation trough the use of small diameter cores," *Mag. Concr. Res.*, vol. 40, no. 143, pp. 99-105, 1988.
- [33] B. R. H. Campbell ja R. E. Tobin, "Core and Cylinder Strenght of Naturak and Lightweight Concrete," *ACI J. Proc.*, vol. 64, no. 4, pp. 190-195, 1967.
- [34] O. Arioz, K. Ramyar, M. Tuncan, A. Tuncan ja I. Cil, "Some factors influencing effect of core diameter on measured concrete compressive strenght," *ACI Mater., J.* vo. 104, no. 3, pp. 291-296, 2007.
- [35] ACI 214.4R-10. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strenght Results, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2010.
- [36] F. M. Bartlett ja J. G. MacGregor, "Effect of core diameter on Concrete Core Strenght," *ACI Mater. J.*, vol. 91, no. 5, pp. 460-470, 1994.
- [37] DIN EN 13791 / A20:2017-02. Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Änderung A20, Berlin, Germany: Deutsches Institut für Normung e. V., 2017.
- [38] ASTM C42 / C42M-16. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2016.

- [39] S. Khoury, A. A.-H. Aliabdo ja A. Ghazy, "Reliability of core test - Critical Assessment and proposed new approach," *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no 1, pp. 169-184, 2014.
- [40] X. Chen, S. Wu ja J. Zhou, "Compressive Strength of Concrete Cores with Different Lengths," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 7, 2014.
- [41] M. Tuncan, O. Arioz, K. Ramyar ja B. Karasu, "Assessing concrete strength by means of small diameter cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 981-988, 2008.
- [42] A. C. Carroll, A. R. Grubbs, A. K. Schindler ja R. W. Barnes, "Effect of Core Geometry and Size on Concrete Compressive Strength," *Auburn, Alabama, USA*, 2016.
- [43] BS EN 12504-1:2009. Testing Concrete in Structures, Part 1: Cored Specimens - Taking, Examining and Testing in Compression., British Standard Institution, 2009.
- [44] F. M. Bartlett ja J. G. MacGregor, "Assessment of Concrete Strength in Existing Structures," Alberta, Edmonton, Canada, 1994.
- [45] SS 137003. Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige., Stockholm, Sweden: SIS Förlag AB., 2015.
- [46] B. A. Suprenant, "Core strength variation of in-place concrete," *Aberdeen Group*, p. 3, 1995.
- [47] T. Bugai, D. Kruger ja Rankine R., "The importance of plane end-bearing surfaces when measuring the strength of concrete core specimens," *J. South African Inst. Civ. Eng.*, vol. 54, no. 2, pp. 126-127, 2012.
- [48] I. Dumitru, T. Song, V. Caprar ja V. Mukhin, "Compressive Strength of Concrete Cylinders by Sulphur, Rubber Capping and Grinding Methods," *Boral Construction Materials (NSW/ACT)*, 2011.
- [49] R. Medeiros, B. A. Pereira, G. SIPP ja T. Delfino, "Investigation of the influence of different surface regularization methods for cylindrical concrete specimens in axial compression tests," *Ibracon Structures and Materials Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 568-579, 2017.
- [50] SFS-EN 12350-1. Tuoreen betonin testaus. Osa 1: Näytteenotto, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.

- [51] SFS-EN 12350-2. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [52] SFS-EN 12350-5. Tuoreen betonin testaus. Osa 5: Leviämä, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [53] SFS-EN 12350-6. Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [54] SFS-EN-12390-7. Kovettuneen betonin testaus. Osa 7: Kovettuneen betonin tiheys, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2009.
- [55] SFS-EN 12390-4. Kovettuneen betonin testaus. Osa 4: Puristuslujuus. Vaatimukset testauskoneille, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2000.
- [56] Betonin testaus rakenteista. Osa 2: Rikkomaton aineenkoetus. Kimmoarvon määrittäminen kimmovasaralla, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2013.
- [57] Proseq, *The SilverSchmidt Reference Curve*.



- LIITE 1: Betonireseptit ja toteutuneet ainemäärät
- LIITE 2: Koekappaleiden valu, muottien purku, jälkihoito ja varastointi
- LIITE 3: Rakennekoekappaleiden timanttiporaaminen
- LIITE 4: Koekappaleiden katkaisu timanttisahaamalla
- LIITE 5: Koekappaleiden päiden oikaisu hiomalla ja rikkiseoksella tasoittamalla
- LIITE 6: Puristuskokeiden suorittaminen
- LIITE 7: Koekappaleiden murtotavat
- LIITE 8: Lujuudenseurantakoekappaleet - mittaustulokset
- LIITE 9: Betonilaatu C35/45 P50 - mittaustulokset
- LIITE 10: Betonilaatu C30/37 P20 - mittaustulokset
- LIITE 11: Betonilaatu C50/60 P50 - mittaustulokset
- LIITE 12: Betonilaatu C35/45 - mittaustulokset
- LIITE 13: Betonilaatu C35/45 P50 - lisätutkimuksen mittaustulokset
- LIITE 14: Tiheystutkimus, vaakasuuntaiset tiheydet
- LIITE 15: Tiheystutkimus, pystysuuntaiset tiheydet
- LIITE 16: Standardilieriöiden kimmovasaroinnin mittaustulokset
- LIITE 17: Standardikuutioiden kimmovasaroinnin mittaustulokset
- LIITE 18: Pakkasenkestävyyslukujen laskenta



Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas**  
**Kuormakirjanumero**  
**Annosnumero**

**Nekala**  
**35438646**  
**1**

Tavoitekuormakoko/ m<sup>3</sup>  
Tavoitenotkeus/ S-arvo  
Sekoitusaika/ s  
Mitattu betonin lämpötila/ °C

2,00  
3,00  
242  
20,2

**Lähetysaika**  
**12.6.2018 8:30:32**

RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE  
P-LUKUBETONI P50  
P50 45 16mm S3

Asiakasnimi  
Betontyyppi  
Tuotenimi  
Suhteituksen lisäominaisuudet

**Ain nimi**

**Automaatiikan ilmoittama tavoite/ m<sup>3</sup>**

**Toteutunut annostelu/ m<sup>3</sup>**

**Kosteus/ % Absorbtiio/ % Tav.ann./ %**

	Ann./ kg	Vesi/ kg	Tilavuus/ l	Ann./ kg	Vesi/ kg	Tilavuus/ l	Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
Plussem. CEM II/B-M42.5N	436,01	0,00	140,65	434,54	0,00	140,17			
Vesi	136,10	136,10	136,10	141,21	141,21	141,21			
Filleri	125,65	6,66	51,33	127,89	6,78	52,24	5,60	0,20	
Hiekka 0/8k	862,27	23,49	335,82	850,24	23,16	331,13	2,80	0,50	
Kivi 6/16 kas	745,12	6,65	279,24	743,08	6,63	278,48	0,90	0,40	
Air-Pro V5	2,27	2,15	2,27	2,26	2,14	2,26			0,026
Sika ViscoFlow MR-1	4,80	3,79	4,59	4,71	3,72	4,51			1,100
Ilma			50,00			50,00			
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 312,23</b>	<b>178,84</b>	<b>1 000,00</b>	<b>2 303,94</b>	<b>183,64</b>	<b>1 000,00</b>			

**Absorbtiiovesi**

Tehollinen vesi

Sideaineet yhteensä

Tehollinen vesi-sideainesuhde

Teh. vesi-sementtis. (XF1, XF3)

Teh. vesi-sementtis. (XF2, XF4)

Teh. vesi-sementtis. (XS, XD)

Teh. vesi-sementtis. (XA)

7,39  
171,45

436,01

0,39  
0,39  
0,39  
0,39  
0,39

434,54  
0,41  
0,41  
0,41  
0,41  
0,41

7,32  
176,31

Tiedot liittyvät kuormaun, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas**

**Kuormakirjanumero**

**35438667**

**Nekala**

**1**

**Annosnumero**

**12.6.2018 12:19:37**

**RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE**

**Lähetysaika**

**P-LUKUBETONI P50**

**P50 45 16mm S3**

**Suhteituksen lisäominaisuudet**

Tavoitekuormakoko/ m³  
Tavoitenotkeus/ S-arvo  
Sekoitusaika/ s  
Mittattu betonin lämpötila/ °C

2,00  
3,00  
215  
21,2

**Ainemeni**

Plussem. CEM II/B-M42.5N

Vesi

Filleri

Hiekka 0/8k

Kivi 6/16 kas

Air-Pro V5

Sika ViscoFlow MR-1

Ilma

YHTEENSÄ

Absorbtiovesi

Tehollinen vesi

Sideaineet yhteensä

Tehollinen vesi-sideainesuhde

Teh. vesi-sementtis. (XF1, XF3)

Teh. vesi-sementtis. (XF2, XF4)

Teh. vesi-sementtis. (XS, XD)

Teh. vesi-sementtis. (XA)

**Automaatiikan ilmoittama tavoite/ m³**

Ann./ kg Vesi/ kg Tilavuus/ l

436,01 0,00 140,65

136,10 136,10 136,10

125,65 6,66 51,33

862,27 23,49 335,82

745,12 6,65 279,24

2,27 2,15 2,27

4,80 3,79 4,59

2 312,23 178,84 1 000,00

436,01

0,39

0,39

0,39

0,39

0,39

0,39

0,39

**Toteutunut annostelu/ m³**

Ann./ kg Vesi/ kg Tilavuus/ l

437,30 0,00 141,07

141,68 141,68 141,68

124,10 6,58 50,69

853,15 23,24 332,26

740,41 6,60 277,48

2,27 2,15 2,27

4,76 3,76 4,56

2 303,67 184,01 1 000,00

437,30

0,40

0,40

0,40

0,40

0,40

0,40

0,40

Kosteus/ % Absorbtiio/ % Tav.ann./ %

5,60 0,20

2,80 0,50

0,90 0,40

0,026

1,100

**Rudus**

Rudus Oy

Tehdas:

**Nekala**

Kohde TTY betonien luj.proj

Asiakas

**Suhteutettu betonilaatu**

Tavoiteominaisuudet

Nimellislujuus / sementtimääräinen

**37**

Betonilaatu

**P20: P-LUKUBETONI P20**

Maksimiraekoko

**16mm**

Notkeusluokka

**S3**

Ilmamäärä

**30**

Pakkasenkestävä

**Kyllä**

Suolapakkasluku P-luku

**20**

Pakkasenkestävyyysluku

Suhteutustarkenne

Reseptisarjakoodi

Suhteutuslujuus

**-**

vins-suhde

0,608

Nomogrammisementti

370

Kokonaissementti

375

CEM I (sementti)

375

Sideaineet

375

v/msid

0,480

msid/ kg/m³

375

msid-sideaineker. k-Cem (XF2, XF4)

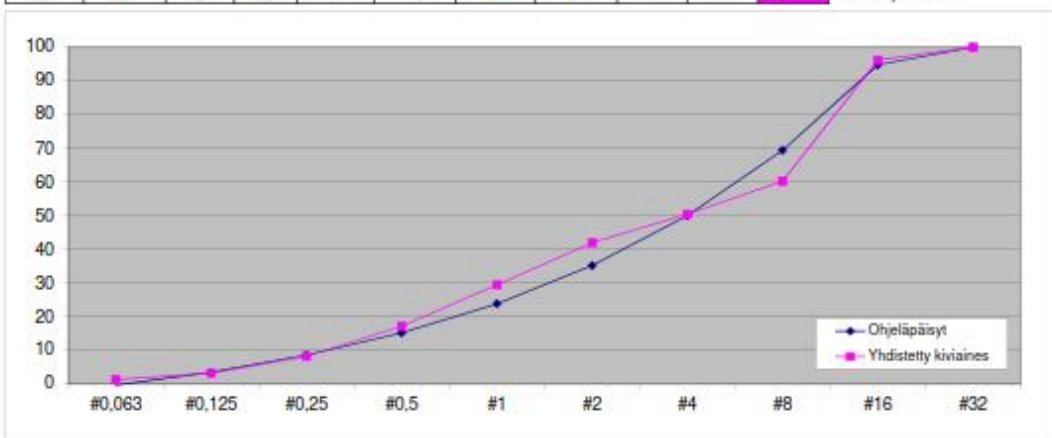
**Suhteutuksen tunnusluvut**

			kg		
Teholl vesi/nomog.sem.	<b>0,486</b>	Cem (XF1, XF3)	<b>375</b>	P-luku arvo	<b>28,0</b>
Tehollinen V/sementti	<b>0,480</b>	Cem (XF2, XF4)	<b>375</b>	Jälkihoitoaika	<b>14,0</b> d
Teholl V/Cem, XF1-XF3	<b>0,480</b>	Cem (XS, XD)	<b>375</b>	F-luku	<b>2,9</b>
Teholl V/Cem, XF2-XF4	<b>0,480</b>	Cem (XA)	<b>375</b>	Hienoainemäärä	<b>518</b> kg
Teholl V/Cem, XS-XD	<b>0,480</b>	Cem (CL)	<b>375</b>	Hienoainepasta	<b>367</b> l
Teholl V/Cem, XA	<b>0,480</b>	Kloridi %	<b>0,05</b>	Sideainepasta	<b>346</b> l
Teholl V/Cem I (kaikki)	<b>0,480</b>	Lämpötila/ °C	<b>15</b>	H-arvo	<b>507</b>
Vesi-ilma/kok.sementti	<b>0,600</b>	Sulfaatinkestävä	<b>Ei</b>	Kiviaineen tilavuus	<b>65</b> %

**Suhteutuksen annosmäärät**

Sideaineet		Kiviaineet		Lisäaineet		
	kg/m3	Yhteensä	100 %	Lisäaineen tuotemerkki	osuus	kg
Plussem. CEM II/B-M42,5	<b>375</b>	Yhteensä	<b>1749</b>	Air-Pro V5	<b>0,02 %</b>	<b>1,35</b>
		Fillerit	<b>7,7 %</b>	Sika ViscoFlow MR-1	<b>0,60 %</b>	<b>2,25</b>
		Hiekka 0/8k	<b>49,2 %</b>			
		Kivi 6/16 kas	<b>43,1 %</b>			
Tuhkaosuus sem.	<b>0 %</b>					
Teholl. vesi l/m3	<b>180</b>					

#0,063	#0,125	#0,25	#0,5	#1	#2	#4	#8	#16	#32	Ohjeläpäisy	Yhdistetty kiviaines
-0,3	3,5	8,6	15,2	24	35	50	69	95	100	sin.	Ohjeläpäisy
1,4	3,2	8,2	17,2	29	42	50	60	96	100	vio.	Yhdistetty kiviaines



Päiväys: 2.7.2018

tekijä:

Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas**  
**Kuormakirjanumero**  
**Annosnumero**  
**Lähetysaika**  
Asiakasnimi  
Betontyyppi  
Tuotenimi  
Suhteituksen lisäominaisuudet

**Nekala**  
**35439650**  
**1**  
**10.7.2018 10:23:02**  
RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE  
P-LUKUBETONI P20  
P20 37 16mm S3

Tavoitekuormakoko/ m<sup>3</sup>  
Tavoitenoikeus/ S-arvo  
Sekoitusaika/ s  
Mittattu betonin lämpötila/ °C

2,00  
3,00  
127  
25,2

Ainenimi	Automatiikan ilmoittama tavoite/ m <sup>3</sup>		Toteutunut annostelu/ m <sup>3</sup>		Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
	Ann./ kg	Vesi/ kg	Ann./ kg	Vesi/ kg			
Plussem. CEM II/B-M42.5N	374,69	0,00	374,46	0,00	120,79		
Vesi	158,60	158,60	158,69	158,69	158,69		
Filleri	141,65	7,13	145,49	7,32	59,18	5,30	0,20
Hiekka 0/8k	872,49	16,27	871,57	16,25	334,74	1,90	0,50
Kivi 6/16 kas	752,44	2,25	748,77	2,24	277,81	0,30	0,40
Air-Pro V5	1,50	1,42	1,51	1,43	1,51		0,020
Sika ViscoFlow MR-1	2,25	1,78	2,37	1,88	2,27		0,600
Ilma		45,00			45,00		
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 303,61</b>	<b>187,45</b>	<b>2 302,87</b>	<b>187,81</b>	<b>1 000,00</b>		
Absorbtiovesi		7,55		7,54			
Tehollinen vesi		179,89		180,27			
Sideaineet yhteensä	374,69		374,46				
Tehollinen vesi-sideainesuhde	0,48		0,48				
Teh. vesi-sementtis. (XF1, XF3)	0,48		0,48				
Teh. vesi-sementtis. (XF2, XF4)	0,48		0,48				
Teh. vesi-sementtis. (XS, XD)	0,48		0,48				
Teh. vesi-sementtis. (XA)	0,48		0,48				

Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas**

**Kuormakirjanumero**

**35439661**

**Nekala**

**1**

**10.7.2018 14:07:12**

**RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE**

**P-LUKUBETONI P20**

**P20 37 16mm S3**

Suhteituksen lisäominaisuudet

Tavoitekuormakoko/ m³

2,00

Tavoitenotkeus/ S-arvo

3,00

Sekoitus aika/ s

130

Mitattu betonin lämpötila/ °C

27,6

**Ainenimi**

Plussem. CEM II/B-M42.5N

Ann./ kg 374,69 Vesi/ kg 0,00 Tilavuus/ l 120,87

Ann./ kg 374,43 Vesi/ kg 0,00 Tilavuus/ l 120,78

Kosteus/ % 5,30 Absorbtiio/ % 0,20 Tav.ann./ % 0,600

Vesi

Ann./ kg 158,60 Vesi/ kg 158,60 Tilavuus/ l 158,60

Ann./ kg 159,42 Vesi/ kg 159,42 Tilavuus/ l 159,42

Filleri

Ann./ kg 141,65 Vesi/ kg 7,13 Tilavuus/ l 57,62

Ann./ kg 143,75 Vesi/ kg 7,24 Tilavuus/ l 58,48

Hiekka 0/8k

Ann./ kg 872,49 Vesi/ kg 16,27 Tilavuus/ l 335,09

Ann./ kg 868,40 Vesi/ kg 16,19 Tilavuus/ l 333,52

Kivi 6/16 kas

Ann./ kg 752,44 Vesi/ kg 2,25 Tilavuus/ l 279,17

Ann./ kg 752,08 Vesi/ kg 2,25 Tilavuus/ l 279,04

Air-Pro V5

Ann./ kg 1,50 Vesi/ kg 1,42 Tilavuus/ l 1,50

Ann./ kg 1,51 Vesi/ kg 1,43 Tilavuus/ l 1,51

Sika ViscoFlow MR-1

Ann./ kg 2,25 Vesi/ kg 1,78 Tilavuus/ l 2,15

Ann./ kg 2,36 Vesi/ kg 1,87 Tilavuus/ l 2,26

Ilma

Ann./ kg 2 303,61 Vesi/ kg 187,45 Tilavuus/ l 1 000,00

Ann./ kg 2 301,94 Vesi/ kg 188,39 Tilavuus/ l 1 000,00

Absorbtiiovesi

Ann./ kg 7,55 Vesi/ kg 7,55 Tilavuus/ l 7,53

Tehollinen vesi

Ann./ kg 179,89 Vesi/ kg 179,89 Tilavuus/ l 180,86

Sideaineet yhteensä

Ann./ kg 374,69 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

Tehollinen vesi-sideainesuhde

Ann./ kg 0,48 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

Teh. vesi-sementtis. (XF1,XF3)

Ann./ kg 0,48 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

Teh. vesi-sementtis. (XF2,XF4)

Ann./ kg 0,48 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

Teh. vesi-sementtis. (XS,XD)

Ann./ kg 0,48 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

Teh. vesi-sementtis. (XA)

Ann./ kg 0,48 Vesi/ kg 0,48 Tilavuus/ l 0,48

374,43

0,48

0,48

0,48

0,48

0,48

7,53

180,86

374,43

0,48

0,48

0,48

0,48

0,48

188,39

1 000,00

188,39

1 000,00

5,30

0,20

1,90

0,50

0,30

0,40

0,020

0,600

**Rudus**

Rudus Oy

Tehdas:

**Nekala**

Kohde TTY betonien luj.proj

Asiakas

**Suhteutettu betonilaatu**

Tavoiteominaisuudet

Nimellislujuus / sementtimääräinen  
 Betonilaatu  
 Maksimiraekoko  
 Notkeusluokka  
 Ilmamäärä  
 Pakkaskestävä  
 Suolapakkasluku P-luku  
 Pakkaskestävyyysluku  
 Suhteutustarkenne  
 Reseptisarjakoodi

**60**  
**P50: P-LUKUBETONI P50**  
**16mm**  
**S3**  
**40**  
**Kyllä**  
**50**

Suhteetuslujuus	-
vins-suhde	0,486
Nomogrammisementti	457
Kokonaissementti	435
CEM I (sementti)	450
Sideaineet	450
v/msid	0,382
msid/ kg/m³	450
msid-sideaineker.	B-sementtiosuus/ %

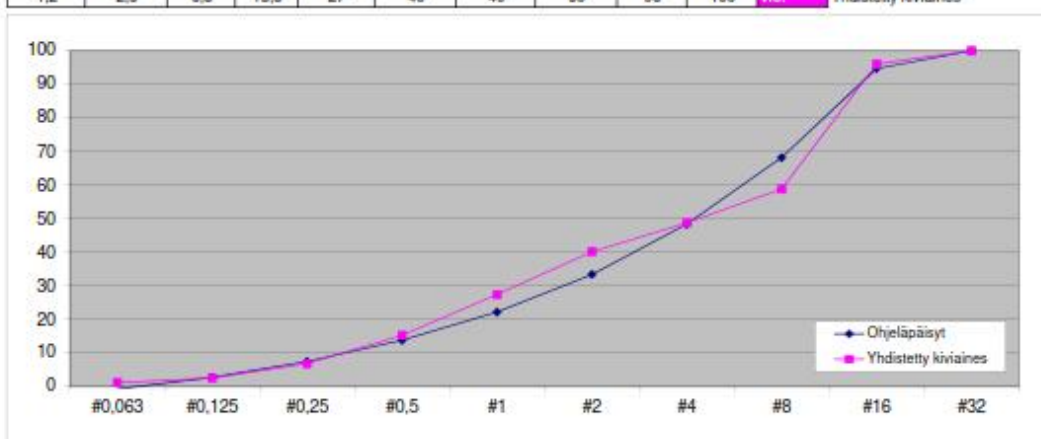
**Suhteutuksen tunnusluvut**

			kg		
Teholl vesi/nomog.sem.	<b>0,377</b>	Cem (XF1, XF3)	<b>465</b>	P-luku arvo	<b>59,0</b>
Tehollinen V/sementti	<b>0,396</b>	Cem (XF2, XF4)	<b>465</b>	Jälkihoitoaika	<b>14,0</b> d
Teholl V/Cem, XF1-XF3	<b>0,370</b>	Cem (XS, XD)	<b>465</b>	F-luku	<b>4,0</b>
Teholl V/Cem, XF2-XF4	<b>0,370</b>	Cem (XA)	<b>465</b>	Hienoainemäärä	<b>565</b> kg
Teholl V/Cem, XS-XD	<b>0,370</b>	Cem (CL)	<b>465</b>	Hienoainepasta	<b>385</b> l
Teholl V/Cem, XA	<b>0,370</b>	Kloridi %	<b>0,0467118</b>	Sideainepasta	<b>362</b> l
Teholl V/Cem I (kaikki)	<b>0,370</b>	Lämpötila/ °C	<b>15</b>	H-arvo	<b>496</b>
Vesi-ilma/kok.sementti	<b>0,511</b>	Sulfaatinkestävä	<b>Ei</b>	Kiviaineen tilavuus	<b>63</b> %

**Suhteutuksen annosmäärät**

Sideaineet		Kiviaineet		Lisäaineet		
	kg/m3	Yhteensä	100 %	Lisäaineen tuotemerkki	osuus	kg
Plussem. CEM II/B-M42,5	<b>435</b>		<b>1685</b>	Air-Pro V5	<b>0,02 %</b>	<b>1,62</b>
Silika jauhe	<b>15</b>	Filleri	<b>5,1 %</b>	Sika ViscoFlow MR-1	<b>1,20 %</b>	<b>5,40</b>
		Hiekka 0/8k	<b>50,3 %</b>			
		Kivi 8/16 kas	<b>44,6 %</b>			
Tuhkaosuus sem.	<b>0 %</b>					
Teholl. vesi l/m3	<b>172</b>					

#0,063	#0,125	#0,25	#0,5	#1	#2	#4	#8	#16	#32	
-0,7	2,8	7,5	13,8	22	33	48	68	95	100	sin.
1,2	2,5	6,8	15,3	27	40	49	59	96	100	vio.



Päiväys: 2.7.2018

tekijä:



Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas** Nekala  
**Kuormakirjanumero** 35440823  
**Annosnumero** 1  
**Lähetysaika** 7.8.2018 9:29:33  
Asiakasnimi RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE  
Betonityyppi P-LUKUBETONI P50  
Tuotenimi P50 60 16mm S3  
Suhteituksen lisäominaisuudet

Tavoitekuormakoko/ m<sup>3</sup>  
Tavoitevoiteus/ S-arvo  
Sekoitus aika/ s  
Mitattu betonin lämpötila/ °C

2,00  
3,00  
180  
25,9

Ainenimi	Automaatiikan ilmoittama tavoite/ m <sup>3</sup>		Toteutunut annostelu/ m <sup>3</sup>		Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
	Ann./ kg	Vesi/ kg	Ann./ kg	Vesi/ kg			
Plussem. CEM II/B-M42.5N	437,78	0,00	436,18	0,00			
Vesi	149,81	149,81	152,44	152,44			
Filleri	91,19	4,59	99,76	5,02	5,30	0,20	
Hiekka 0/8k	866,50	16,16	856,11	15,96	1,90	0,50	
Kivi 6/16 kas	758,89	2,27	754,54	2,26	0,30	0,20	
Air-Pro V5	2,27	2,16	2,24	2,13			0,025
Sika ViscoFlow MR-1	5,44	4,30	5,41	4,28			1,200
Ilma		50,00		50,00			
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 311,88</b>	<b>179,28</b>	<b>2 306,68</b>	<b>182,08</b>			
Absorbtiovesi		5,94		5,89			
Tehollinen vesi		173,34		176,19			
<b>Sideaineet yhteensä</b>	<b>437,78</b>		<b>436,18</b>				
Tehollinen vesi-sideainesuhde	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XF1, XF3)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XF2, XF4)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XS, XD)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XA)	0,40		0,40				

Käsiannosteltu silika: 15 kg/m<sup>3</sup>

Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

<b>Betonitehdas</b>	<b>Nekala</b>	Tavoitekuormakoko/ m <sup>3</sup>	2,00
<b>Kuormakirjanumero</b>	<b>35440858</b>	Tavoitenotkeus/ S-arvo	3,00
<b>Annosnumero</b>	<b>1</b>	Sekoitus aika/ s	180
<b>Lähetysaika</b>	<b>7.8.2018 13:51:58</b>	Mitattu betonin lämpötila/ °C	26,4
Asiakas nimi	RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE		
Betonityyppi	P-LUKUBETONI P50		
Tuotenimi	P50 60 16mm S3		
Suhteituksen lisäominaisuudet			

Ainenimi	Automatiikan ilmoittama tavoite/ m <sup>3</sup>		Toteutunut annostelu/ m <sup>3</sup>		Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
	Ann./ kg	Vesi/ kg	Ann./ kg	Vesi/ kg			
Plussem. CEM II/B-M42.5N	437,78	0,00	437,12	0,00			
Vesi	149,81	149,81	153,30	153,30			
Filleri	91,19	4,59	93,02	4,68	5,30	0,20	
Hiekka 0/8k	866,50	16,16	859,84	16,03	1,90	0,50	
Kivi 6/16 kas	758,89	2,27	754,84	2,26	0,30	0,20	
Air-Pro V5	2,27	2,16	2,29	2,18			0,025
Sika ViscoFlow MR-1	5,44	4,30	5,43	4,29			1,200
Ilma		50,00		50,00			
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 311,88</b>	<b>179,28</b>	<b>2 305,85</b>	<b>182,75</b>			
Absorbtiovesi		5,94		5,90			
Tehollinen vesi		173,34		176,85			
<b>Sideaineet yhteensä</b>	<b>437,78</b>		<b>437,12</b>				
Tehollinen vesi-sideainesuhde	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XF1,XF3)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XF2,XF4)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XS,XD)	0,40		0,40				
Teh. vesi-sementtis. (XA)	0,40		0,40				

Käsiannosteltu silika: 15 kg/m<sup>3</sup>

**Rudus**

Rudus Oy

Tehdas:

**Nekala**

Kohde: TTY betonien luj.proj

Asiakas

**Suhteutettu betonilaatu**

Tavoiteominaisuudet

Nimellislujuus / sementtimääräinen  
 Betonilaatu  
 Maksimiraekoko  
 Notkeusluokka  
 Ilmamäärä  
 Pakkaskestävä  
 Suolapakkasluku P-luku  
 Pakkaskestävyyysluku  
 Suhteutustarkenne  
 Reseptisarjakoodi

**45**  
**RAK: RAKENNEBETONI**  
**16mm**  
**S3**  
**20**  
**Ei**

Suhteellisuus  
 vins-suhte 0,561  
 Nomogramisementti 379  
 Kokonaissementti 385  
 CEM I (sementti) 385  
 Sideaineet 385  
 v/msid 0,000  
 msid/ kg/m³ 0  
 msid-sideaineker.

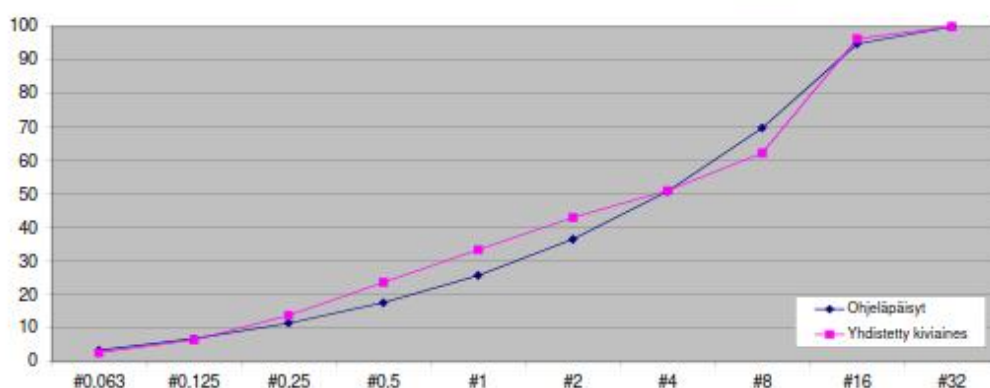
**Suhteutuksen tunnusluvut**

			kg		
Teholl vesi/nomog.sem.	0,528	Cem (XF1, XF3)	385	P-luku arvo	54,0
Tehollinen V/sementti	0,521	Cem (XF2, XF4)	385	Jälkihoitoaika	14,0 d
Teholl V/Cem, XF1-XF3	0,521	Cem (XS, XD)	385	F-luku	0,7
Teholl V/Cem, XF2-XF4	0,521	Cem (XA)	385	Hienoainemäärä	627 kg
Teholl V/Cem, XS-XD	0,521	Cem (CL)	385	Hienoainepasta	387 l
Teholl V/Cem, XA	0,521	Kloridi %	0,05	Sideainepasta	344 l
Teholl V/Cem I (kaikki)	0,521	Lämpötila/ °C	15	H-arvo	530
Vesi-ilma/kok.sementti	0,573	Sulfaatinkestävä	Ei	Kiviaineen tilavuus	66 %

**Suhteutuksen annosmäärät**

Sideaineet		Kiviaineet		Lisäaineet		
	kg/m3	Yhteensä	100 %	Lisäaineen tuotemerkki	osuus	kg
Plussem. CEM II/B-M42,5	385	Fillerit	1750	Sika ViscoFlow MR-1	0,60 %	2,31
		Hiekka 0/8k	16,8 %			
		Kivi 6/16 kas	27,4 %			
		CRF 0/8	40,8 %			
			15,0 %			
Tuhkaosuus sem.	0 %					
Teholl. vesi l/m3	200					

#0,063	#0,125	#0,25	#0,5	#1	#2	#4	#8	#16	#32	Ohjelmäpäisyt	Yhdistetty kiviaines
3,5	6,9	11,5	17,7	26	37	51	70	95	100	sin.	
2,7	6,5	13,9	23,7	33	43	51	62	96	100	vio.	



Päiväys: 3.9.2018

tekijä:

RUDUS OY  
KESKI-SUOMI

ANNOSTELURAPORTTI  
15.10.2018 14:47  
Sivu 1

Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

<b>Betonitehdas</b>	<b>Nekala</b>	Tavoitekuormakoko/ m <sup>3</sup>	2,00
<b>Kuormakirjannumero</b>	<b>35441978</b>	Tavoitenoikeus/ S-arvo	3,00
<b>Annosnumero</b>	<b>1</b>	Sekoitus aika/ s	128
<b>Lähetysaika</b>	<b>4.9.2018 8:58:45</b>	Mitattu betonin lämpötila/ °C	22,9
Asiakasnimi	RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE		
Betonityyppi	RAKENNEBETONI		
Tuotenimi	RAK 45 16mm S3		
Suhteituksen lisäominaisuudet			

Ainenimi	Automatiikan ilmoittama tavoite/ m <sup>3</sup>		Toteutunut annostelu/ m <sup>3</sup>		Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
	Ann./ kg	Vesi/ kg	Tilavuus/ l	Ann./ kg			
Plussem. CEM II/B-M42.5N	384,50	0,00	124,03	381,79	0,00	123,16	
Vesi	173,95	173,95	173,95	176,83	176,83	176,83	
Filleri	309,00	15,55	127,83	303,88	15,30	125,71	5,30
Hiekka 0/8k	487,20	10,02	187,70	480,61	9,89	185,16	2,10
Kivi 6/16 kas	712,80	0,71	263,02	718,88	0,72	265,27	0,10
CRF 0/8	265,05	3,66	101,25	266,04	3,67	101,63	1,40
Sika ViscoFlow MR-1	2,31	1,82	2,21	2,33	1,84	2,23	0,600
Ilma			20,00			20,00	
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 334,81</b>	<b>205,71</b>	<b>1 000,00</b>	<b>2 330,38</b>	<b>208,24</b>	<b>1 000,00</b>	
Absorbtiovesi		<b>5,44</b>			<b>5,42</b>		
Tehollinen vesi		<b>200,27</b>			<b>202,83</b>		
Sideaineet yhteensä	<b>384,50</b>			<b>381,79</b>			
Tehollinen vesi-sideainesuhde	<b>0,52</b>			<b>0,53</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XF1,XF3)	<b>0,52</b>			<b>0,53</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XF2,XF4)	<b>0,52</b>			<b>0,53</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XS,XD)	<b>0,52</b>			<b>0,53</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XA)	<b>0,52</b>			<b>0,53</b>			

Tiedot liittyvät kuormaan, mikäli yläosan annosnumero on tyhjä.

**Betonitehdas**  
**Kuormakirjanumero**  
**Annosnumero**  
**Lähetysaika**  
Asiakasnimi  
Betontyyppi  
Tuotenimi  
Suhteituksen lisäominaisuudet

**Nekala**  
**35442012**  
**1**  
**4.9.2018 13:23:43**  
RUDUS OY Laatu ja Kehitys VBYHTE  
RAKENNEBETONI  
RAK 45 16mm S3

Tavoitekuormakoko/ m³  
Tavoitenoikeus/ S-arvo  
Sekoitusaika/ s  
Mittattu betonin lämpötila/ °C

2,00  
3,00  
119  
23,1

Ainenimi	Automaatiikan ilmoittama tavoite/ m³		Toteutunut annostelu/ m³		Kosteus/ %	Absorbtiio/ %	Tav.ann./ %
	Ann./ kg	Vesi/ kg	Tilavuus/ l	Ann./ kg			
Plussem. CEM II/B-M42.5N	384,50	0,00	124,03	391,88	0,00	126,41	
Vesi	173,95	173,95	173,95	174,66	174,66	174,66	
Filleri	309,00	15,55	127,83	305,16	15,36	126,24	5,30
Hiekka 0/8k	487,20	10,02	187,70	488,52	10,05	188,21	2,10
Kivi 6/16 kas	712,80	0,71	263,02	703,14	0,70	259,46	0,10
CRF 0/8	265,05	3,66	101,25	269,20	3,72	102,84	1,40
Sika ViscoFlow MR-1	2,31	1,82	2,21	2,28	1,79	2,18	0,40
Ilma			20,00			20,00	
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2 334,81</b>	<b>205,71</b>	<b>1 000,00</b>	<b>2 334,83</b>	<b>206,28</b>	<b>1 000,00</b>	
Absorbtiovesi		<b>5,44</b>			<b>5,44</b>		
Tehollinen vesi		<b>200,27</b>			<b>200,84</b>		
<b>Sideaineet yhteensä</b>	<b>384,50</b>			<b>391,88</b>			
Tehollinen vesi-sideainesuhde	<b>0,52</b>			<b>0,51</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XF1,XF3)	<b>0,52</b>			<b>0,51</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XF2,XF4)	<b>0,52</b>			<b>0,51</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XS,XD)	<b>0,52</b>			<b>0,51</b>			
Teh. vesi-sementtis. (XA)	<b>0,52</b>			<b>0,51</b>			

## LIITE 2: Koekappaleiden valu, muottien purku, jälkihoito ja varastointi



**Kuva 1.** Standardikoekappaleiden ja valettujen koekappaleiden muotit juuri ennen valua.



**Kuva 2.** Rakennekoekappaleiden timanttiorausta varten valettavien kappaleiden valumuotit.



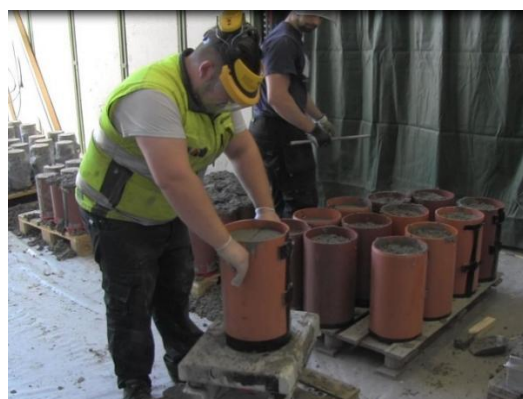
**Kuva 3.** Betonin nostoastia eli ”jassikka”, johon betoni lasketaan kuljetusautosta.



**Kuva 4.** Betoni laskettiin jassikan pohjassa olevasta annosteluletkusta suoraan muotteihin.



**Kuva 5.** Standardilieriön tiivistäminen tärypöydällä.



**Kuva 6.** Timanttiorattavan D235x340 valukappaleen tiivistäminen tärypöydällä.



**Kuva 7.** Tiivistetyt valukappaleet kuormalavoilla, päälle asennettavat suojamuovit puuttuvat.



**Kuva 8.** Leviämäkokeen suorittaminen.



**Kuva 9.** Leviämäkokeen tuloksen mittaminen.



**Kuva 10.** Painumakoe, katkaistukartio on juuri poistettu.



**Kuva 11.** Painumakokeen tuloksen mittaminen.



**Kuva 12.** Betonimassan ilmamäärän mittaminen, tiivistetty betonimassa on juuri tassattu mitta-astian yläpinnan tasoon.



**Kuva 13.** Betonimassan ilmamäärän mittaaminen, paineen tasaus.



**Kuva 14.** Hydrataatiolämpötilan mittaaminen. Valukappaleiden massakeskipisteeseen on asennettu mittauslangat.



**Kuva 15.** Valukappaleiden jälkihoito muotteissa suoritettiin tiiviisti kiinnitetyllä muovikalvolla.



**Kuva 16.** Valukappaleet muovikalvon poistamisen jälkeen, juuri ennen muottien purkamista.



**Kuva 17.** Valukappaleiden yläpinnat olivat edelleen kosteita muotteja purettaessa.



**Kuva 18.** Muottien purkaminen suoritettiin työtasoilla, muotit purettiin valujärjestyksessä.





**Kuva 19.** Kaikkia koekappaleita ja timanttiporattavia valukappaleita jälkihoidettiin vesiupotuksessa 28 vuorokauden ikään saakka.



**Kuva 20.** Lujuudenseurantakoekappaleita säilytettiin vesiupotuksessa puristuskokeiden suorittamiseen saakka.



**Kuva 21.** Vesiupotuksen jälkeen koekappaleita, timanttiporattavia valukappaleita säilytettiin huoneilmassa, kuormalavoille varastoituna.



**Kuva 22.** Timanttiporattuja rakennekoekappaleita säilytettiin puisissa tai muovisissa laatikoissa.



**Kuva 23.** Valettuja standardikuutiota ja -lieriöitä, sekä timanttiporattavia valulieriöitä.

### LIITE 3: Rakennekoe-kappaleiden timanttiporaaminen



**Kuva 1.** Halkaisijaltaan 50 mm poralierion timanttiporaus. Valulieriö on tiukasti kiinnitettynä porausjalustaan.



**Kuva 2.** Halkaisijaltaan 100 mm poralierion timanttiporaus. Valulieriö on tiukasti kiinnitettynä porausjalustaan.



**Kuva 3.** Nimellishalkaisijaltaan 50 mm timanttiterät tutkimukset päätteeksi, vasemmalla uusi ja oikealla kulunut.



**Kuva 4.** Nimellishalkaisijaltaan 80 mm timanttiterät tutkimuksen päätteeksi, vasemmalla kulunut ja oikealla uusi.



**Kuva 5.** Nimellishalkaisijaltaan 100 mm timanttiterät tutkimuksen päätteeksi, vasemmalla kulunut ja oikealla uusi.



**Kuva 6.** Nimellishalkaisijaltaan 50, 80 ja 100 kuluneet timanttiterät tutkimuksen päätteeksi.



**Kuva 7.** Nimellishalkaisijaltaan 150 mm rakennekoekappaleet ja timanttioratut valukappaleet D235x340.



**Kuva 8.** Halkaisijaltaan 150 mm rakennekoekappale ja timanttiorattu valukappale D235x340.



**Kuva 9.** Timanttioratut valukappaleet D150x300. Valukappaleista on porattu nimellishalkaisijoiltaan 50 mm ja 80 mm poralieriöitä.

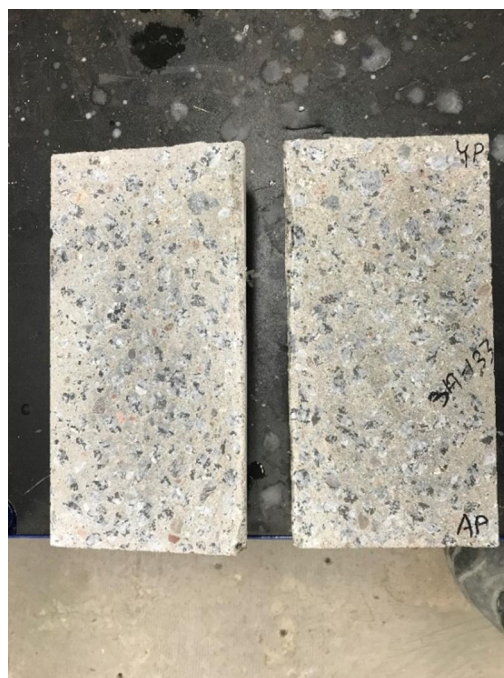


**Kuva 10.** Tiheystutkimuksessa valukappaleista timanttiorattiin koekappaleita vaakasuunnassa.

#### LIITE 4: Koekappaleiden katkaisu timanttisahaamalla



**Kuva 1.** Koekappaleet katkaistiin suunniteltuun pituuteen timanttisahaamalla, jossa sahattavaa kappaleetta huuhdeltiin kylmällä vedellä katkaisun ajan.



**Kuva 2.** Tiheystutkimuksessa standardilieriö sahattiin pituusakselin suuntaisesti kahteen osaan runkoainesjakauman tarkistamiseksi.



**Kuva 3.** Koekappaleet tuettiin timanttisahauksessa sekä pituus- että poikkisuunnassa.



**Kuva 4.** Nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleiden katkaisu. Pituudeltaan 150 mm poralieriöstä katkaistiin neljä D50x50 rakennekoekappaletta siten, että ylä- ja alapäästä poistettiin saman verran betonia.



**Kuva 5.** Nimellishalkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleiden katkaisu. Pituudeltaan 150 mm poralieriöstä katkaistiin kolme D80x80 rakennekoekappaletta siten, että ylä- ja alapäästä poistettiin saman verran betonia.



**Kuva 6.** Nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleiden katkaisu. Pituudeltaan 150 mm poralieriöstä katkaistiin kaksi D100x100 rakennekoekappaletta siten, että ylä- ja alapäästä poistettiin saman verran betonia.



**Kuva 7.** Nimellishalkaisijaltaan 150 mm rakennekoekappaleiden katkaisu. Pituudeltaan 150 mm poralieriöstä katkaistiin yksi D150x300 rakennekoekappaletta siten, että yläpäästä (valupinnasta) poistettiin betonia.



**Kuva 8.** Tiheystutkimuksessa standardilieriöitä D150x300 sahattiin 50 mm korkeiksi kiekkoiksi.

## LIITE 5: Koekappaleiden päiden oikaisu hiomalla ja rikkiseoksella tasoittamalla



**Kuva 1.** Koneellinen hionta, nimellishalkaisijaltaan 50 mm rakennekoekappaleet kiinnitettiin hionta-adaptteriin, kerralla saatiin hiottua neljä rakennekoekappaleetta



**Kuva 2.** Koneellisessa hionnassa koekappaleiden hiottavia päitä huuhdeltiin koko hionnan ajan kylmällä vedellä.



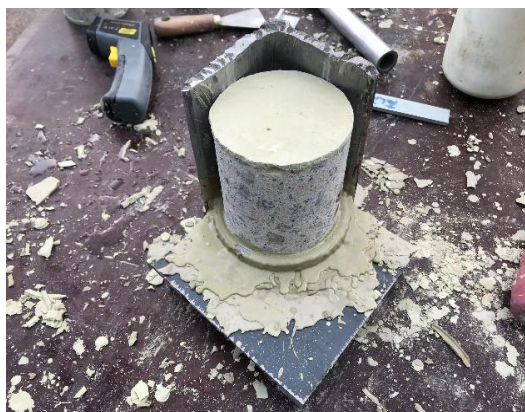
**Kuva 3.** Koneellinen hionta, standardilieriön hionta.



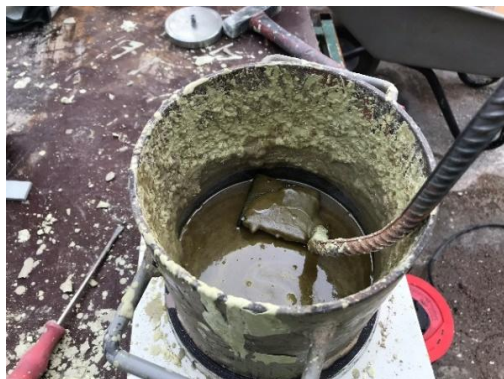
**Kuva 4.** Hiomalla tasoitettu D100x200 rakennekoekappale.



**Kuva 5.** Rikitysteline, telineessä kiinni rikityskuppi halkaisijaltaan 80 mm rakennekoekappaleille.



**Kuva 6.** Nimellishalkaisijaltaan 100 mm rakennekoekappaleen päiden tasoittaminen rikkimällä. Rakennekoekappale kiinni rikitystelineessä.



**Kuva 7.** Sula rikkiseos.



**Kuva 8.** Valmiita rikkiseoksella tasoitettuja rakennekoekappaleita.



**Kuva 9.** Nimellishalkaisijaltaan 80 mm rikkiseoksella tasoitetut rakennekoekappaleet.

## LIITE 6: Puristuskokeiden suorittaminen



**Kuva 1.** Puristuskone



**Kuva 2.** Halkaisijaltaan 50-100 mm koekappaleiden puristuskokeissa käytettiin puristusadapteria.



**Kuva 3.** Tyypillinen standardilieriön murtuminen puristuskokeessa.



**Kuva 4.** Tyypillinen standardikuution murtuminen puristuskokeessa.



**Kuva 5.** Tyypillinen valetun D100x100 koekappaleen murtuminen puristuskokeessa.

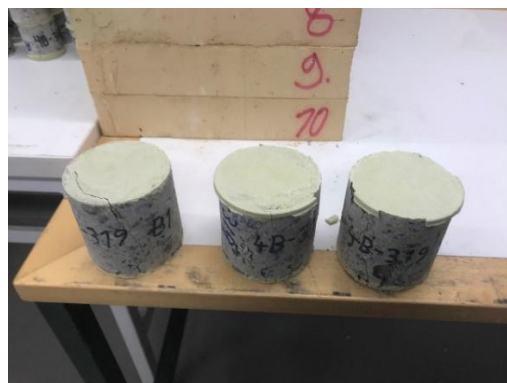


**Kuva 6.** Tyypillinen rakennekoekappaleen D80x80 murtuminen puristuskokeessa.





**Kuva 7.** Tyypillinen rakennekoekappaleen D50x50 murtuminen puristuskokeessa.



**Kuva 8.** Tyypillinen rikitetyin rakennekoekappaleen murtuminen puristuskokeessa. Rikkikerroksessa ei juurikaan ole vaurioita havaittavissa.

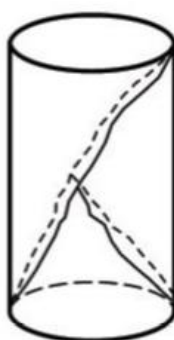


**Kuva 9.** Rikkiseoksella tasoitettujen D50x50 rakennekoekappaleiden hylättyjä koekappaleita (keskellä).

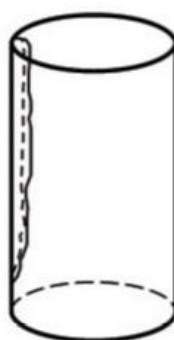
### LIITE 7: Koekappaleiden murtotavat



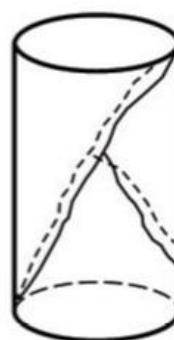
1



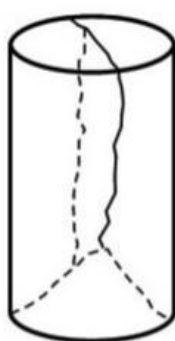
2



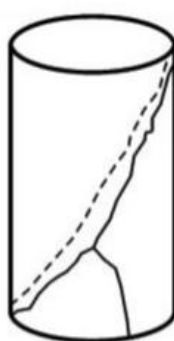
3



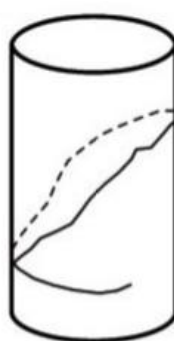
4



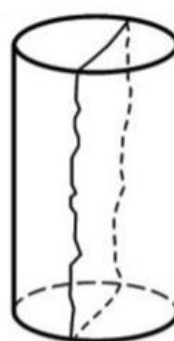
5



6



7



8



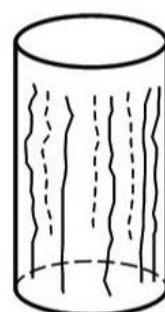
9



10



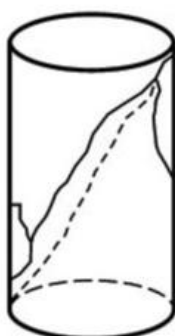
11



12



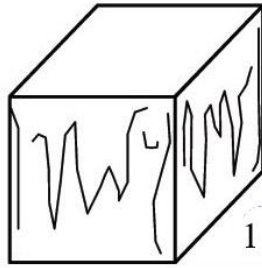
13



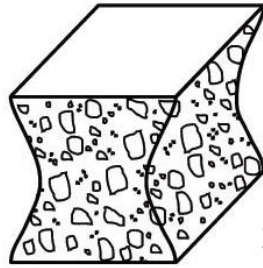
14



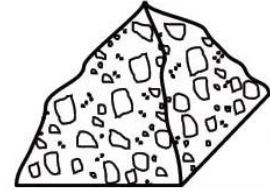
15



1

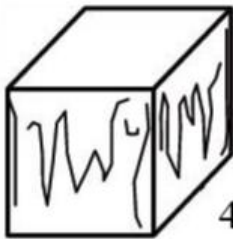


2

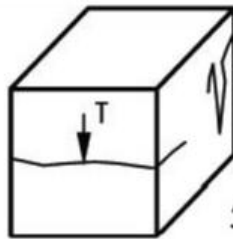


3

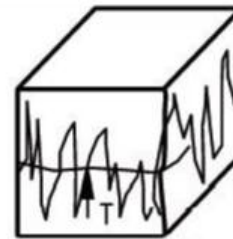
Räjätävä murtotapa



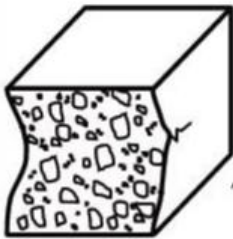
4



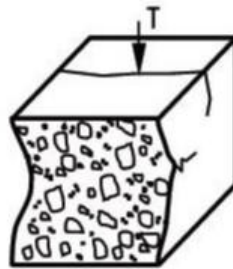
5



6



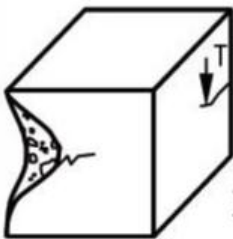
7



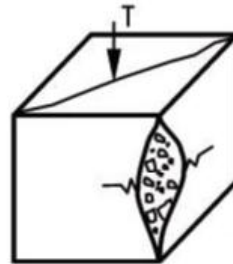
8



9



10



11



12

Näyte	Lujuudenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty											Murtotapa
	Betonilaatu C35/45, P50	Kuormitusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-101			150,3	291,5	17750	0,00517	12,226	2363	665,00	37,5	10	
1A-102			150,8	295,1	17860	0,00527	12,465	2365	644,00	36,1	2	
1A-103	3 vrk		150,3	295,6	17738	0,00524	12,323	2350	646,00	36,4	10	
1B-101			150,1	293,7	17703	0,00520	12,183	2343	605,00	34,2	10	
1B-102			150,2	294,1	17707	0,00521	12,011	2306	586,00	33,1	10	
1B-103			150,1	295,1	17703	0,00522	12,109	2318	585,00	33,0	10	
1A-104			149,7	295,1	17609	0,00520	12,336	2374	722,46	41,0	10	
1A-105			150,3	289,7	17750	0,00514	12,124	2357	748,90	42,2	10	
1A-106	7 vrk		150,0	290,7	17671	0,00514	12,064	2348	724,16	41,0	10	
1B-104			150,1	297,1	17687	0,00525	12,237	2329	679,92	38,4	10	
1B-105			150,1	296,7	17699	0,00525	12,221	2327	687,70	38,9	10	
1B-106			150,1	295,8	17703	0,00524	12,109	2312	683,08	38,6	10	
1A-107			150,2	294,5	17723	0,00522	12,333	2363	889,96	50,2	10	
1A-108			150,2	293,6	17715	0,00520	12,315	2368	904,08	51,0	9	
1A-109			150,7	293,3	17841	0,00523	12,411	2372	885,40	49,6	9	
1B-107	28 vrk		150,1	292,9	17691	0,00518	12,100	2335	831,16	47,0	11	
1B-108			150,1	290,4	17695	0,00514	11,935	2323	800,22	45,2	10	
1B-109			150,0	290,6	17675	0,00514	12,057	2348	820,26	46,4	10	
1A-110			149,5	295,9	17554	0,00519	12,279	2364	1014,99	57,8	10	
1A-111			150,2	296,1	17726	0,00525	12,472	2376	1048,53	59,2	10	
1A-112			150,4	294,2	17774	0,00523	12,338	2359	1042,45	58,7	10	
1B-110	91 vrk		150,0	293,4	17668	0,00518	12,117	2338	949,44	53,7	11	
1B-111			149,8	296,6	17628	0,00523	12,173	2328	962,53	54,6	11	
1B-112			149,9	292,9	17648	0,00517	12,077	2337	970,88	55,0	10	

Liite 8 (1/8)

Betoni-laatu C35/45, P50 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (2/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-113		150,3	293,8	17734	0,00521	12,276	2356	1130,58	63,8	10
1A-114		150,6	292,5	17817	0,00521	12,337	2368	1218,22	68,4	10
1A-115	365 vrk	150,6	291,9	17805	0,00520	12,437	2393	1179,66	66,3	10
1B-113		150,1	294,7	17703	0,00522	12,118	2323	1059,07	59,8	10
1B-114		150,2	294,4	17723	0,00522	12,142	2327	1040,48	58,7	11
1B-113		150,5	294,3	17786	0,00523	12,164	2324	1056,41	59,4	10

Betoni-laatu C30/37, P20 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (3/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-101		150,1	293,7	17695	0,00520	12,127	2333	479,52	27,1	10
2A-102		150,2	291,1	17723	0,00516	12,093	2344	485,29	27,4	11
2A-103	3 vrk	150,4	291,5	17770	0,00518	12,122	2340	471,04	26,5	10
2B-101		150,2	292,1	17723	0,00518	12,264	2369	511,51	28,9	10
2B-102		150,0	292,8	17668	0,00517	12,181	2355	499,86	28,3	11
2B-103		150,4	294,0	17770	0,00522	12,400	2373	514,54	29,0	10
2A-104		150,0	293,4	17675	0,00519	12,226	2358	562,62	31,8	10
2A-105		150,1	291,1	17687	0,00515	12,049	2340	548,34	31,0	10
2A-106		149,9	293,2	17652	0,00518	12,085	2335	547,27	31,0	10
2B-104	7 vrk	150,4	289,7	17758	0,00514	12,191	2370	600,41	33,8	10
2B-105		149,9	286,3	17656	0,00505	11,974	2369	587,99	33,3	10
2B-106		149,6	286,6	17570	0,00503	11,972	2378	601,19	34,2	11
2A-107		150,1	293,9	17703	0,00520	12,177	2340	667,22	37,7	11
2A-108		150,1	296,7	17687	0,00525	12,242	2333	671,32	38,0	10
2A-109		150,0	295,4	17668	0,00522	12,195	2337	681,40	38,6	10
2B-108	28 vrk	150,4	295,3	17774	0,00525	12,453	2373	723,07	40,7	10
2B-109		149,9	293,7	17640	0,00518	12,303	2375	721,91	40,9	10
2B-110		149,8	292,9	17624	0,00516	12,249	2373	738,45	41,9	11
2A-110		149,8	292,8	17620	0,00516	12,151	2355	787,13	44,7	11
2A-111		149,7	293,6	17593	0,00517	12,113	2345	812,95	46,2	10
2A-112		149,8	291,8	17613	0,00514	12,143	2363	823,32	46,7	10
2B-111	91 vrk	150,1	290,3	17683	0,00513	12,210	2379	854,40	48,3	10
2B-112		149,5	293,2	17554	0,00515	12,272	2385	858,73	48,9	11
2B-113		150,4	292,7	17754	0,00520	12,312	2369	837,76	47,2	11

Betoni-laatu C30/37, P20 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (4/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-113		150,1	291,9	17695	0,00516	12,190	2360	940,42	53,1	11
2A-114		150,0	294,3	17679	0,00520	12,224	2349	912,67	51,6	11
2A-115	365 vrk	150,0	292,9	17660	0,00517	12,093	2338	896,02	50,7	10
2B-114		150,3	294,3	17734	0,00522	12,330	2363	944,68	53,3	11
2B-115		151,0	292,9	17904	0,00524	12,334	2352	940,03	52,5	10
2B-116		150,7	293,4	17841	0,00524	12,391	2367	968,87	54,3	10

Betoni-laatu C50/60, P50 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (5/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-101		150,1	298,8	17691	0,00529	12,267	2321	547,73	31,0	10
3A-102		150,1	296,7	17687	0,00525	12,296	2343	594,83	33,6	11
3A-103	3 vrk	150,0	296,7	17675	0,00524	12,248	2335	542,06	30,7	10
3B-101		150,0	295,4	17671	0,00522	12,315	2359	594,54	33,6	10
3B-102		150,3	295,7	17746	0,00525	12,398	2362	594,33	33,5	11
3B-103		150,5	296,1	17778	0,00526	12,413	2358	592,52	33,3	10
3A-104		150,1	292,4	17683	0,00517	12,183	2356	688,65	38,9	11
3A-105		150,0	293,1	17664	0,00518	12,214	2359	680,44	38,5	11
3A-106		149,8	293,3	17628	0,00517	12,251	2370	677,18	38,4	11
3B-104	7 vrk	150,1	296,4	17683	0,00524	12,404	2367	694,65	39,3	11
3B-105		149,7	296,4	17597	0,00522	12,289	2356	671,78	38,2	10
3B-106		150,1	287,3	17687	0,00508	12,091	2379	695,43	39,3	11
3A-107		150,5	297,2	17778	0,00528	12,347	2337	844,35	47,5	11
3A-108		149,9	296,3	17648	0,00523	12,252	2343	817,07	46,3	10
3A-109		150,1	296,0	17691	0,00524	12,251	2340	861,37	48,7	11
3B-107	28 vrk	150,1	296,1	17687	0,00524	12,422	2372	824,35	46,6	10
3B-109		149,8	288,3	17632	0,00508	12,070	2374	846,90	48,0	11
3B-110		150,5	296,8	17782	0,00528	12,509	2370	819,76	46,1	10
3A-110		150,0	292,3	17675	0,00517	12,178	2357	970,84	54,9	11
3A-111		150,0	292,8	17668	0,00517	12,098	2339	946,41	53,6	10
3A-112		150,0	294,8	17660	0,00521	12,315	2366	1006,25	57,0	11
3B-111	91 vrk	149,9	291,3	17640	0,00514	12,187	2372	965,76	54,7	11
3B-112		149,9	290,4	17652	0,00513	12,133	2367	954,11	54,1	10
3B-113		150,6	291,4	17805	0,00519	12,208	2353	917,46	51,5	10



Betoni-laatu C50/60, P50 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (6/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-113		150,2	294,9	17726	0,00523	12,299	2352	1039,23	58,6	10
3A-114		150,4	294,4	17762	0,00523	12,279	2348	1036,93	58,4	10
3A-115	365 vrk	150,0	293,4	17671	0,00519	12,199	2353	1011,27	57,2	11
3B-114		150,2	294,1	17715	0,00521	12,265	2354	1057,26	59,7	11
3B-115		150,0	293,0	17671	0,00518	12,263	2368	1038,15	58,7	9
3B-116		150,7	292,9	17829	0,00522	12,386	2372	1081,26	60,6	11

Betoni-laatu C35/45 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (7/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-101		149,9	289,6	17656	0,00511	12,110	2369	469,84	26,6	10
4A-102		150,0	291,8	17679	0,00516	12,257	2376	478,30	27,1	11
4A-103	3 vrk	150,0	291,2	17675	0,00515	12,286	2387	480,50	27,2	10
4B-101		150,1	287,3	17695	0,00508	12,118	2384	559,52	31,6	11
4B-103		149,9	281,8	17648	0,00497	11,829	2379	591,23	33,5	10
4B-104		149,5	285,6	17562	0,00502	11,975	2388	566,98	32,3	11
4A-104		150,0	287,2	17671	0,00508	12,064	2377	561,98	31,8	10
4A-105		150,3	285,6	17746	0,00507	12,040	2376	565,91	31,9	10
4A-106		150,0	283,1	17668	0,00500	11,885	2376	575,80	32,6	10
4B-105	7 vrk	150,3	291,6	17730	0,00517	12,397	2398	659,75	37,2	11
4B-106		149,9	293,8	17652	0,00519	12,334	2378	639,38	36,2	10
4B-107		150,3	289,7	17742	0,00514	12,228	2379	659,21	37,2	10
4A-107		150,2	293,3	17723	0,00520	12,319	2370	713,01	40,2	11
4A-108		150,2	288,5	17726	0,00511	12,161	2378	720,53	40,6	10
4A-109		150,1	292,0	17691	0,00517	12,255	2373	722,43	40,8	11
4B-108	28 vrk	150,7	290,5	17829	0,00518	12,300	2375	788,64	44,2	-
4B-109		150,5	291,8	17797	0,00519	12,315	2371	787,60	44,3	9
4B-110		149,9	287,4	17652	0,00507	12,002	2366	791,51	44,8	9
4A-110		150,1	293,3	17683	0,00519	12,306	2372	828,91	46,9	10
4A-112		150,1	293,4	17687	0,00519	12,359	2381	842,99	47,7	11
4A-113		150,3	289,5	17730	0,00513	12,236	2384	848,38	47,8	10
4B-112	91 vrk	150,1	292,4	17683	0,00517	12,341	2387	951,47	53,8	11
4B-113		149,9	291,8	17640	0,00515	12,311	2392	913,22	51,8	10
4B-115		150,0	290,2	17664	0,00513	12,250	2390	945,96	53,6	10

Betoni-laatu C35/45 Lujuidenseuranta, standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty Liite 8 (8/8)

Näyte	Kuormi- tusaika	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta- ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-114		150,2	293,1	17725	0,00519	12,353	2378	955,67	53,9	10
4A-115		150,3	293,2	17735	0,00520	12,360	2377	932,52	52,6	11
4A-116	365 vrk	150,2	292,0	17727	0,00518	12,284	2373	913,74	51,5	10
4B-111		151,0	291,9	17901	0,00523	12,381	2369	1068,38	59,7	9
4B-116		150,7	291,9	17828	0,00520	12,396	2382	1058,15	59,4	11
4B-117		150,1	284,6	17701	0,00504	11,997	2381	1043,88	59,0	10

Näyte	Standardilieriö D150x300, vedellä kylästetty											Liite 9 (1/15)
	Betonilaatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
1A-117		149,1	294,2	17468	0,00526	12,360	2348	962,17	55,1	9		
1A-118		150,0	291,6	17664	0,00528	12,377	2343	1067,51	60,4	10		
1A-119		149,6	293,3	17577	0,00528	12,431	2353	1035,73	58,9	10		
1A-120		150,0	292,5	17675	0,00531	12,547	2361	1019,26	57,7	10		
1A-121		149,1	293,5	17456	0,00527	12,393	2350	1049,20	60,1	10		
1A-122		149,7	293,7	17593	0,00531	12,496	2353	1030,79	58,6	10		
1A-123		148,4	294,8	17304	0,00520	12,244	2353	862,03	49,8	9		
1A-124		148,9	293,5	17405	0,00523	12,333	2358	999,66	57,4	11		
1A-125		149,8	294,4	17620	0,00531	12,487	2350	1051,12	59,7	11		
1B-118		150,2	293,4	17707	0,00535	12,467	2332	916,91	51,8	10		
1B-119		150,1	296,1	17695	0,00538	12,443	2315	891,78	50,4	11		
1B-120		149,9	294,4	17652	0,00522	12,465	2389	944,95	53,5	11		
1B-121		149,8	294,0	17624	0,00535	12,399	2318	927,07	52,6	10		
1B-122		150,1	294,2	17683	0,00535	12,410	2321	940,44	53,2	11		
1B-123		150,1	294,6	17703	0,00535	12,419	2321	928,53	52,5	10		
1B-124		150,0	293,4	17679	0,00533	12,412	2328	960,84	54,3	11		
1B-125		150,0	293,9	17660	0,00532	12,356	2323	962,59	54,5	11		
1B-126		150,0	295,8	17679	0,00532	12,376	2326	939,78	53,2	11		

Liite 9 (2/15)

Standardilieriö D150x300, kuiva

Betoni laatu C35/45, P50

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-126	150,7	290,2	17829	0,00532	12,575	2364	1100,37	61,7	11
1A-127	150,3	292,3	17742	0,00531	12,476	2351	1057,39	59,6	11
1A-128	149,7	294,4	17593	0,00530	12,448	2349	1083,31	61,6	9
1A-129	150,6	292,9	17817	0,00532	12,522	2353	1074,09	60,3	10
1A-130	150,2	294,6	17715	0,00536	12,560	2345	1052,83	59,4	11
1A-131	150,0	293,0	17660	0,00531	12,400	2333	1032,63	58,5	9
1B-127	150,0	294,4	17671	0,00533	12,433	2332	1020,06	57,7	11
1B-128	150,0	295,5	17664	0,00531	12,403	2336	1008,96	57,1	11
1B-129	150,1	296,3	17695	0,00535	12,352	2310	959,71	54,2	11
1B-130	149,7	297,6	17601	0,00534	12,337	2312	963,31	54,7	10
1B-131	150,4	299,5	17758	0,00539	12,435	2305	997,29	56,2	11
1B-132	149,8	295,4	17617	0,00532	12,392	2329	1028,9	58,4	11

## Liite 9 (3/15)

## Rakennekoeappale D150x300

## Betoni laatu C35/45, P50

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-401	154,0	301,3	18622	0,00563	13,109	2329	1026,90	55,1	11
1A-402	154,1	302,6	18647	0,00566	13,211	2335	1028,05	55,1	10
1A-403	154,0	302,3	18635	0,00565	13,199	2335	1025,11	55,0	11
1A-404	153,9	306,2	18610	0,00572	13,364	2337	1027,73	55,2	11
1A-405	153,8	300,9	18582	0,00562	13,087	2327	1004,44	54,1	11
1A-406	153,9	299,6	18610	0,00560	13,103	2338	1019,01	54,8	11
1A-407	153,8	299,5	18578	0,00559	13,062	2335	965,87	52,0	11
1A-408	153,9	301,6	18590	0,00565	13,181	2334	997,35	53,6	11
1A-409	153,9	299,8	18598	0,00561	12,987	2317	1018,29	54,8	11
1A-410	153,8	300,0	18586	0,00560	13,058	2333	1051,12	56,6	11
1A-411	153,8	299,4	18586	0,00559	13,064	2336	1041,61	56,0	11
1A-412	153,9	301,7	18590	0,00564	13,112	2325	1018,18	54,8	11
1B-401	154,2	300,3	18683	0,00562	12,995	2314	989,94	53,0	11
1B-402	154,3	299,5	18691	0,00560	12,967	2317	997,88	53,4	11
1B-403	154,3	301,5	18707	0,00564	13,087	2319	980,12	52,4	11
1B-404	154,2	300,6	18663	0,00562	13,058	2322	976,29	52,3	11
1B-405	154,1	302,6	18647	0,00567	13,164	2324	986,12	52,9	11
1B-406	154,2	304,2	18683	0,00570	13,210	2319	993,44	53,2	11
1B-407	154,2	299,4	18675	0,00561	13,031	2324	954,97	51,1	10
1B-408	154,2	302,1	18667	0,00566	13,077	2312	958,77	51,4	10
1B-409	154,2	301,7	18683	0,00565	13,102	2320	936,51	50,1	11
1B-410	154,1	302,6	18655	0,00567	13,120	2315	970,90	52,0	11
1B-411	154,3	299,8	18691	0,00562	13,039	2322	965,78	51,7	11
1B-412	154,1	301,7	18643	0,00565	13,082	2315	964,73	51,7	11

Näyte	Valettu koekappale D100x100										Liite 9 (4/15)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-201		102,5	98,7	8254	0,000812	1,902	2343	616,07	74,6	9	
1A-202		103,0	101,8	8327	0,000842	1,956	2324	593,22	71,2	9	
1A-203		102,7	98,9	8289	0,000815	1,906	2340	599,53	72,3	11	
1A-204		102,7	100,6	8287	0,000831	1,947	2344	595,11	71,8	10	
1A-205		102,7	100,7	8278	0,000832	1,941	2334	609,59	73,6	10	
1A-206		102,7	99,3	8281	0,000818	1,895	2318	582,34	70,3	11	
1B-201		102,7	100,5	8289	0,000833	1,917	2302	539,21	65,0	10	
1B-202		102,5	101,6	8252	0,000839	1,942	2316	541,45	65,6	10	
1B-203		102,8	101,6	8305	0,000837	1,954	2335	556,93	67,1	10	
1B-204		102,6	94,1	8273	0,000778	1,821	2342	605,32	73,2	10	
1B-205		102,9	101,1	8311	0,000837	1,934	2312	529,64	63,7	10	
1B-206		102,8	99,8	8292	0,000823	1,916	2329	569,10	68,6	10	

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, uusi timanttiterä										Liite 9 (5/15)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorimituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-313-C1		99,3	100,8	7750	0,000779	1,772	2276	487,03	62,8	10	
1A-313-C2		99,3	101,8	7744	0,000786	1,808	2302	504,25	65,1	10	
1A-314-C1		99,3	104,5	7744	0,000808	1,848	2288	482,84	62,3	10	
1A-314-C2		99,3	100,4	7747	0,000777	1,795	2311	515,08	66,5	10	
1A-315-C1		99,3	101,3	7747	0,000782	1,782	2280	472,24	61,0	10	
1A-315-C2		99,3	98,4	7744	0,000760	1,749	2303	505,86	65,3	10	
1A-316-C1		99,3	103,7	7747	0,000802	1,817	2267	483,07	62,4	10	
1A-316-C2		99,3	102,3	7744	0,000790	1,791	2268	498,84	64,4	10	
1A-317-C1		99,3	101,7	7747	0,000786	1,817	2313	509,57	65,8	10	
1A-317-C2		99,3	100,0	7750	0,000774	1,794	2319	535,16	69,1	10	
1A-318-C1		99,3	100,7	7747	0,000778	1,758	2261	467,13	60,3	10	
1A-318-C2		99,3	100,5	7747	0,000777	1,771	2281	505,53	65,3	10	
1B-314-C1		99,3	101,8	7744	0,000787	1,771	2252	428,58	55,3	12	
1B-314-C2		99,3	100,9	7742	0,000781	1,780	2280	480,01	62,0	12	
1B-315-C1		99,3	100,6	7744	0,000778	1,781	2291	445,80	57,6	12	
1B-315-C2		99,3	102,7	7744	0,000795	1,809	2277	476,27	61,5	12	
1B-316-C1		99,3	101,2	7744	0,000782	1,787	2286	451,73	58,3	10	
1B-316-C2		99,3	102,1	7744	0,000790	1,819	2304	484,78	62,6	12	
1B-317-C1		99,3	102,6	7742	0,000793	1,780	2246	432,51	55,9	12	
1B-317-C2		99,3	103,3	7742	0,000799	1,811	2268	470,83	60,8	12	
1B-318-C1		99,3	101,7	7742	0,000787	1,794	2281	477,49	61,7	12	
1B-318-C2		99,3	102,5	7742	0,000792	1,836	2319	505,50	65,3	12	
1B-319-C1		99,3	102,7	7739	0,000792	1,812	2289	464,39	60,0	10	
1B-319-C2		99,3	101,9	7744	0,000788	1,817	2307	511,66	66,1	10	



Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, kulunut timantititerä										Liite 9 (6/15)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-325-C1		98,7	100,6	7646	0,000767	1,768	2306	500,17	65,4	10	
1A-325-C2		98,6	101,4	7636	0,000771	1,774	2302	498,59	65,3	10	
1A-326-C1		98,6	101,9	7636	0,000774	1,765	2282	445,94	58,4	10	
1A-326-C2		98,6	102,8	7633	0,000782	1,800	2303	478,34	62,7	10	
1A-327-C1		98,6	102,3	7633	0,000779	1,770	2273	425,71	55,8	10	
1A-327-C2		98,6	103,4	7628	0,000787	1,806	2296	468,70	61,4	10	
1B-323-C1		98,6	103,4	7638	0,000786	1,799	2290	447,75	58,6	10	
1B-323-C2		98,5	107,1	7623	0,000814	1,892	2325	491,58	64,5	10	
1B-324-C1		98,6	103,1	7630	0,000782	1,784	2283	447,13	58,6	10	
1B-324-C2		98,6	102,9	7633	0,000784	1,814	2315	498,22	65,3	10	
1B-325-C1		98,6	100,8	7633	0,000766	1,752	2289	448,47	58,8	10	
1B-325-C2		98,6	101,2	7633	0,000771	1,781	2311	479,09	62,8	10	

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, rikkiseos, uusi timantitiera										Liite 9 (7/15)
	Betoni laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-319-C1		99,2	104,5	7734	0,000780	1,776	2278	455,69	58,9	10	
1A-319-C2		99,3	105,1	7739	0,000784	1,793	2288	492,71	63,7	10	
1A-320-C1		99,2	105,4	7734	0,000776	1,772	2285	445,93	57,7	10	
1A-320-C2		99,3	104,2	7737	0,000769	1,774	2308	504,03	65,1	10	
1A-321-C1		99,2	103,7	7734	0,000769	1,760	2290	451,84	58,4	10	
1A-321-C2		99,2	104,8	7731	0,000777	1,772	2282	447,18	57,8	10	
1B-320-C1		99,2	103,8	7726	0,000770	1,758	2284	440,58	57,0	10	
1B-320-C2		99,2	105,2	7729	0,000773	1,790	2317	444,89	57,6	10	
1B-321-C1		99,1	103,6	7718	0,000767	1,751	2284	427,28	55,4	10	
1B-321-C2		99,2	103,9	7731	0,000771	1,786	2318	484,86	62,7	10	
1B-322-C1		99,2	105,7	7724	0,000772	1,761	2282	437,58	56,7	10	
1B-322-C2		99,1	105,5	7718	0,000778	1,796	2310	485,94	63,0	10	

Liite 9 (8/15)

## Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timanttiterä

Betoni laatu C35/45, P50

Näyte	Halkaisija	Korkeus	Kuormituspinta-ala	Tilavuus	Massa	Tiheys	Murtokuorma	Puristuslujuus	Murtotapa
	$d_m$ [mm]	$h_m$ [mm]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$m_a$ [kg]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]	
1A-304-B1	79,1	77,7	4918	0,000380	0,883	2325	336,70	68,5	12
1A-304-B2	79,1	80,0	4918	0,000392	0,908	2318	340,26	69,2	12
1A-304-B3	79,2	78,1	4920	0,000384	0,902	2350	353,82	71,9	12
1A-305-B1	79,2	81,9	4924	0,000401	0,930	2320	315,35	64,0	12
1A-305-B2	79,1	81,0	4916	0,000396	0,923	2332	322,16	65,5	12
1A-305-B3	79,1	80,0	4914	0,000392	0,927	2366	348,12	70,8	12
1A-306-B1	79,2	81,0	4920	0,000396	0,923	2332	324,36	65,9	12
1A-306-B2	79,2	80,1	4920	0,000392	0,910	2323	333,17	67,7	12
1A-306-B3	79,1	82,6	4918	0,000405	0,953	2354	336,68	68,5	12
1A-307-B1	79,2	82,2	4922	0,000403	0,931	2311	326,36	66,3	12
1A-307-B2	79,2	83,0	4924	0,000407	0,940	2311	316,42	64,3	12
1A-307-B3	79,2	83,2	4924	0,000408	0,960	2354	339,54	68,9	12
1A-308-B1	79,1	82,2	4918	0,000403	0,942	2339	333,14	67,7	12
1A-308-B2	79,1	83,0	4918	0,000407	0,940	2311	339,06	68,9	12
1A-308-B3	79,1	82,1	4918	0,000403	0,945	2346	360,92	73,4	12
1A-309-B1	79,3	85,1	4937	0,000419	0,975	2328	335,85	68,0	12
1A-309-B2	79,3	83,7	4939	0,000413	0,959	2323	331,18	67,1	12
1A-309-B3	79,3	81,8	4937	0,000402	0,945	2352	348,29	70,5	12
1B-304-B1	79,3	82,0	4939	0,000404	0,938	2323	313,01	63,4	12
1B-304-B2	79,3	78,8	4939	0,000389	0,897	2307	332,86	67,4	12
1B-304-B3	79,3	79,6	4937	0,000392	0,923	2356	347,18	70,3	12
1B-305-B1	79,3	79,7	4939	0,000392	0,906	2313	290,06	58,7	12
1B-305-B2	79,3	80,0	4937	0,000393	0,902	2296	309,55	62,7	12
1B-305-B3	79,3	80,2	4943	0,000397	0,937	2361	365,62	74,0	12
1B-306-B1	79,3	80,7	4941	0,000399	0,915	2294	310,83	62,9	12

Näyte	Rakennekoeokkappale D80x80, hionta, uusi timantitтері										Liite 9 (9/15)
	Betonilaatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1B-306-B2		79,3	79,9	4943	0,000395	0,918	2325	329,85	66,7	12	
1B-306-B3		79,3	76,5	4943	0,000377	0,902	2394	372,18	75,3	12	
1B-307-B1		79,3	81,4	4943	0,000403	0,926	2299	303,49	61,4	12	
1B-307-B2		79,4	82,0	4945	0,000404	0,935	2315	335,58	67,9	12	
1B-307-B3		79,3	78,5	4943	0,000388	0,914	2357	337,05	68,2	12	
1B-308-B1		79,3	81,7	4939	0,000402	0,928	2310	315,10	63,8	12	
1B-308-B2		79,3	81,1	4941	0,000400	0,918	2296	319,08	64,6	12	
1B-308-B3		79,3	84,6	4939	0,000417	0,983	2358	323,74	65,5	12	
1B-309-B1		79,3	81,5	4939	0,000400	0,923	2309	306,25	62,0	12	
1B-309-B2		79,3	82,6	4939	0,000409	0,930	2275	302,42	61,2	12	
1B-309-B3		79,3	82,6	4939	0,000408	0,958	2349	342,36	69,3	12	

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, hionta, kulunut timanttiterä											Liite 9 (10/15)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
1A-328-B1		79,1	80,8	4908	0,000395	0,907	2297	318,04	64,8	10		
1A-328-B2		79,1	79,3	4914	0,000387	0,887	2293	306,19	62,3	10		
1A-328-B3		79,1	80,7	4908	0,000394	0,913	2319	327,42	66,7	10		
1A-329-B1		79,1	83,2	4918	0,000406	0,930	2292	289,72	58,9	10		
1A-329-B2		79,1	81,0	4912	0,000395	0,903	2287	283,41	57,7	10		
1A-329-B3		79,1	80,0	4912	0,000391	0,915	2341	316,65	64,5	10		
1B-326-B1		79,1	83,7	4908	0,000409	0,936	2290	263,25	53,6	10		
1B-326-B2		79,1	81,3	4908	0,000397	0,907	2286	301,82	61,5	10		
1B-326-B3		79,1	81,3	4908	0,000396	0,924	2335	305,07	62,2	10		
1B-327-B1		79,1	78,9	4914	0,000387	0,882	2280	297,15	60,5	10		
1B-327-B2		79,1	81,3	4914	0,000397	0,911	2296	313,62	63,8	10		
1B-327-B3		79,0	80,4	4906	0,000393	0,921	2345	338,81	69,1	10		

Betonilaatu C35/45, P50 Rakennekoeokappale D80x80, rikkiseos, uusi timanttiterä Liite 9 (11/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-310-B1	79,3	84,7	4939	0,000389	0,907	2333	278,72	56,4	10
1A-310-B2	79,3	82,7	4937	0,000392	0,908	2318	317,54	64,3	10
1A-310-B3	79,3	84,3	4939	0,000393	0,920	2342	315,92	64,0	10
1A-311-B1	79,4	83,6	4949	0,000395	0,917	2323	300,47	60,7	10
1A-311-B2	79,3	85,3	4937	0,000398	0,929	2335	285,83	57,9	10
1A-311-B3	79,3	84,3	4943	0,000396	0,939	2372	314,63	63,7	10
1B-310-B1	79,4	83,8	4949	0,000399	0,927	2324	295,40	59,7	10
1B-310-B2	79,3	83,8	4939	0,000396	0,911	2302	297,42	60,2	11
1B-310-B3	79,3	85,1	4941	0,000395	0,933	2363	320,37	64,8	10
1B-311-B1	79,3	84,5	4939	0,000400	0,913	2284	255,80	51,8	10
1B-311-B2	79,3	83,2	4937	0,000393	0,905	2304	288,31	58,4	10
1B-311-B3	79,4	85,1	4954	0,000398	0,939	2361	321,52	64,9	10

Betoni-laatu C35/45, P50 Rakennekoekappale D50x50, hionta, uusi timanttiterä Liite 9 (12/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-301-A1	51,2	50,5	2060	0,000104	0,241	2313	138,22	67,1	10
1A-301-A2	51,2	50,2	2059	0,000104	0,235	2255	142,85	69,4	10
1A-301-A3	51,2	50,3	2060	0,000103	0,240	2325	148,49	72,1	10
1A-301-A4	51,2	50,5	2060	0,000103	0,245	2374	153,40	74,5	10
1A-302-A1	51,2	50,7	2056	0,000103	0,241	2335	127,35	61,9	10
1A-302-A2	51,2	50,4	2056	0,000104	0,238	2284	129,80	63,1	10
1A-302-A3	51,2	50,4	2056	0,000103	0,241	2335	142,56	69,3	10
1A-302-A4	51,2	50,1	2055	0,000102	0,242	2368	118,71	57,8	10
1A-303-A1	51,1	49,5	2054	0,000101	0,240	2371	152,16	74,1	10
1A-303-A2	51,1	49,8	2051	0,000101	0,237	2342	138,88	67,7	10
1A-303-A3	51,1	49,7	2050	0,000101	0,236	2332	134,21	65,5	10
1A-303-A4	51,1	49,5	2052	0,000100	0,234	2335	140,50	68,5	10
1B-301-A1	51,1	50,4	2051	0,000103	0,239	2316	136,15	66,4	10
1B-301-A2	51,1	50,2	2052	0,000102	0,234	2290	92,77	45,2	10
1B-301-A3	51,1	50,4	2052	0,000103	0,240	2325	118,71	57,8	10
1B-301-A4	51,1	50,4	2054	0,000102	0,241	2358	137,27	66,8	10
1B-302-A1	51,2	49,2	2055	0,000100	0,231	2305	127,09	61,8	10
1B-302-A2	51,1	49,3	2054	0,000100	0,232	2315	146,34	71,3	10
1B-302-A3	51,1	49,2	2054	0,000100	0,233	2325	134,10	65,3	10
1B-302-A4	51,2	49,0	2060	0,000100	0,237	2365	142,09	69,0	10
1B-303-A1	51,2	51,0	2055	0,000103	0,240	2325	135,90	66,1	10
1B-303-A2	51,2	51,3	2059	0,000104	0,242	2322	122,35	59,4	10
1B-303-A3	51,2	50,9	2060	0,000103	0,243	2355	148,83	72,2	10
1B-303-A4	51,2	51,2	2059	0,000104	0,249	2389	137,41	66,7	10

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 9 (13/15)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-330-A1		48,9	50,2	1878	0,000094	0,216	2293	128,08	68,2	10	
1A-330-A2		48,8	50,1	1869	0,000094	0,213	2261	76,32	40,8	9	
1A-330-A3		48,8	50,0	1868	0,000094	0,214	2272	61,62	33,0	9	
1A-330-A4		48,7	50,2	1863	0,000094	0,219	2325	123,06	66,1	10	
1A-332-A1		48,7	51,5	1864	0,000088	0,202	2291	126,26	67,7	10	
1A-332-A2		48,7	51,4	1864	0,000093	0,212	2275	94,31	50,6	10	
1A-332-A3		48,7	51,8	1859	0,000094	0,215	2283	117,64	63,3	10	
1A-332-A4		48,9	46,6	1875	0,000094	0,218	2315	131,84	70,3	10	
1B-328-A1		48,8	52,2	1870	0,000097	0,219	2253	83,12	44,4	10	
1B-328-A2		48,9	52,2	1874	0,000097	0,223	2294	101,77	54,3	10	
1B-328-A3		49,0	52,1	1882	0,000097	0,225	2315	114,86	61,0	10	
1B-328-A4		48,9	52,0	1877	0,000098	0,227	2312	85,26	45,4	10	
1B-329-A1		48,7	49,5	1865	0,000093	0,211	2264	81,33	43,6	9	
1B-329-A2		48,7	49,7	1865	0,000093	0,209	2243	107,63	57,7	10	
1B-329-A3		48,7	49,5	1864	0,000092	0,212	2300	123,38	66,2	10	
1B-329-A4		48,7	49,6	1865	0,000093	0,217	2329	105,61	56,6	10	



Betoni-laatu C35/45, P50 Rakennekoekappale D50x50, rikkipöös, uusi timanttiterä Liite 9 (14/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
1A-312-A1	51,2	55,0	2062	0,000101	0,235	2322	114,32	55,5	10
1A-312-A2	51,2	55,3	2059	0,000101	0,23	2273	114,66	55,7	10
1A-312-A3	51,2	54,2	2058	0,000101	0,232	2292	115,77	56,3	10
1A-312-A4	51,3	54,1	2066	0,000101	0,237	2342	93,98	45,5	10
1A-322-A1	51,3	53,3	2064	0,000101	0,232	2292	67,80	32,8	9
1A-322-A2	51,3	55,2	2064	0,000103	0,238	2306	80,19	38,8	10
1A-322-A3	51,2	53,3	2062	0,000099	0,23	2319	83,57	40,5	10
1A-322-A4	51,2	53,4	2059	0,000102	0,235	2299	97,82	47,5	10
1B-312-A1	51,2	53,6	2062	0,000102	0,237	2319	126,67	61,4	10
1B-312-A2	51,2	56,0	2059	0,000103	0,238	2306	52,69	25,6	9
1B-312-A3	51,3	54,3	2063	0,000104	0,245	2351	124,60	60,4	10
1B-312-A4	51,2	55,7	2059	0,000104	0,248	2380	127,05	61,7	10
1B-313-A1	51,2	56,3	2060	0,000105	0,238	2262	105,97	51,4	10
1B-313-A2	51,2	55,9	2062	0,000102	0,234	2290	37,48	18,2	9
1B-313-A3	51,2	53,5	2060	0,000102	0,228	2231	50,37	24,4	9
1B-313-A4	51,2	54,5	2060	0,000103	0,242	2345	121,95	59,2	10

Betonilaatu C35/45, P50 Standardikuutio 150x150x150 Liite 9 (15/15)

Näyte	Sivumitta $x_m$ [mm]	Sivumitta $y_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Korkeus $h_m$ [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Teräsmuoteilla valettu										
1A-501	155,0	150,2	23271	150,4	0,00347	8,040	2317	1360,87	58,5	2
1A-502	154,5	150,4	23233	150,8	0,00347	8,007	2309	1520,66	65,5	2
1A-503	151,8	150,5	22848	150,6	0,00341	7,931	2324	1520,83	66,6	2
1B-501	153,6	149,7	22989	150,7	0,00343	7,929	2309	1372,74	59,7	2
1B-502	154,4	150,0	23162	150,7	0,00345	7,986	2313	1389,41	60,0	2
1B-503	154,3	149,7	23101	150,8	0,00346	7,977	2305	1337,03	57,9	2
Muovimuoteilla valettu										
1A-601	151,8	150,1	22780	150,1	0,00340	7,866	2313	1388,17	60,9	2
1A-602	155,3	149,9	23277	150,0	0,00348	8,042	2312	1297,96	55,8	2
1A-603	153,3	149,9	22982	150,0	0,00341	7,907	2317	1259,91	54,8	2
1B-601	153,4	150,0	23002	150,0	0,00342	7,869	2299	1395,47	60,7	2
1B-602	155,4	150,0	23310	149,9	0,00347	7,995	2304	1311,94	56,3	2
1B-603	153,0	150,0	22940	150,0	0,00342	7,887	2309	1380,72	60,2	2

Näyte	Standardilieriö D150x300, vedellä kylästetty										Liite 10 (1/21)
	Betonilaatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2A-118		149,3	295,3	17499	0,00526	12,326	2341	798,72	45,6	11	
2A-119		150,3	291,4	17730	0,00526	12,364	2350	805,91	45,5	11	
2A-120		150,3	294,1	17734	0,00531	12,452	2344	804,17	45,3	10	
2A-121		149,7	295,0	17605	0,00528	12,349	2340	792,64	45,0	11	
2A-122		150,0	294,4	17671	0,00529	12,380	2339	791,61	44,8	10	
2A-123		149,7	296,9	17605	0,00530	12,401	2340	792,92	45,0	11	
2A-124		150,0	294,9	17679	0,00532	12,443	2339	799,17	45,2	10	
2A-125		150,5	293,1	17778	0,00528	12,369	2341	797,13	44,8	11	
2A-126		148,8	293,3	17394	0,00522	12,199	2339	772,73	44,4	10	
2B-118		148,9	296,9	17409	0,00524	12,144	2317	807,13	46,4	11	
2B-119		149,9	296,4	17636	0,00532	12,464	2344	820,98	46,6	10	
2B-120		150,0	295,9	17664	0,00531	12,428	2339	807,63	45,7	11	
2B-121		150,0	296,4	17660	0,00524	12,352	2357	803,32	45,5	11	
2B-122		149,9	296,9	17636	0,00532	12,241	2302	768,54	43,6	10	
2B-123		150,0	295,6	17675	0,00531	12,335	2323	799,18	45,2	11	
2B-124		149,8	292,5	17632	0,00526	12,374	2350	814,05	46,2	11	
2B-125		150,1	291,5	17703	0,00526	12,328	2346	836,38	47,2	11	
2B-126		149,5	296,6	17542	0,00531	12,473	2348	836,77	47,7	10	

Näyte	Standardilieriö D150x300, kuiva											Liite 10 (2/21)
	Betoni laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
2A-127		150,0	295,7	17675	0,00531	12,419	2339	819,11	46,3	10		
2A-128		149,7	295,5	17605	0,00531	12,423	2340	830,01	47,1	11		
2A-129		148,9	293,0	17413	0,00520	12,170	2339	821,40	47,2	11		
2A-130		149,1	293,9	17468	0,00524	12,230	2335	828,38	47,4	11		
2A-131		148,4	293,5	17304	0,00518	12,117	2340	832,55	48,1	11		
2A-132		150,0	293,8	17664	0,00528	12,263	2324	819,99	46,4	10		
2B-128		149,7	295,9	17593	0,00528	12,403	2348	844,96	48,0	10		
2B-129		149,7	293,8	17601	0,00527	12,392	2352	881,50	50,1	10		
2B-130		149,6	296,3	17585	0,00531	12,310	2317	828,38	47,1	11		
2B-131		151,0	295,1	17912	0,00538	12,606	2343	848,26	47,4	11		
2B-132		150,0	293,1	17671	0,00530	12,469	2352	873,72	49,4	11		
2B-133		149,5	291,8	17554	0,00530	12,375	2336	831,26	47,4	10		

Liite 10 (3/21)

## Rakennekoeappale D150x300

## Betoni laatu C30/37, P20

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-401	154,3	302,7	18707	0,00567	13,241	2337	801,73	42,9	12
2A-402	154,4	302,0	18711	0,00565	13,194	2334	798,95	42,7	12
2A-403	154,2	305,0	18679	0,00571	13,412	2348	805,90	43,1	12
2A-404	154,3	302,3	18703	0,00566	13,176	2329	788,96	42,2	12
2A-405	154,2	305,3	18667	0,00572	13,323	2331	787,05	42,2	12
2A-406	154,3	304,0	18687	0,00569	13,226	2325	788,21	42,2	12
2A-407	154,3	302,5	18695	0,00566	13,240	2339	791,48	42,3	12
2A-408	154,2	301,2	18679	0,00564	13,164	2335	784,26	42,0	12
2A-409	154,3	306,3	18687	0,00573	13,418	2341	801,00	42,9	12
2A-410	154,3	303,8	18699	0,00569	13,309	2338	818,76	43,8	12
2A-411	154,4	304,5	18723	0,00570	13,326	2336	789,92	42,2	12
2A-412	154,2	301,6	18675	0,00565	13,242	2344	793,24	42,5	12
2B-401	154,3	301,7	18703	0,00565	13,187	2334	835,70	44,7	12
2B-402	154,3	299,8	18695	0,00561	13,069	2329	835,55	44,7	11
2B-403	154,4	298,5	18727	0,00559	12,941	2317	833,72	44,5	12
2B-404	154,3	300,5	18691	0,00563	13,158	2338	846,41	45,3	12
2B-405	154,3	301,5	18691	0,00565	13,172	2332	842,09	45,1	11
2B-406	154,3	300,8	18687	0,00564	13,108	2326	833,50	44,6	11
2B-407	154,3	301,6	18687	0,00565	13,155	2330	865,92	46,3	12
2B-408	154,3	301,7	18687	0,00565	13,170	2332	823,23	44,1	10
2B-409	154,2	299,9	18671	0,00562	13,014	2318	839,69	45,0	11
2B-410	154,2	300,0	18679	0,00562	13,069	2327	816,67	43,7	12
2B-411	154,2	299,8	18679	0,00561	13,079	2331	841,03	45,0	12
2B-412	154,3	300,9	18699	0,00563	13,117	2329	819,46	43,8	11

Liite 10 (4/21)

Valettu koekappale D100x100

Betonilaatu C30/37, P20

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-201	102,8	98,7	8300	0,000817	1,925	2357	530,50	63,9	11
2A-202	102,8	97,0	8303	0,000805	1,895	2355	543,83	65,5	11
2A-203	102,7	98,9	8287	0,000820	1,93	2355	537,15	64,8	10
2A-204	102,6	100,0	8265	0,000829	1,944	2346	513,12	62,1	11
2A-205	102,6	99,4	8265	0,000823	1,931	2347	522,86	63,3	10
2A-206	102,6	100,5	8273	0,000832	1,973	2372	541,22	65,4	10
2A-207	102,7	100,6	8284	0,000836	1,974	2362	543,79	65,6	10
2B-201	102,7	99,2	8287	0,000822	1,939	2360	536,38	64,7	10
2B-202	102,6	101,4	8268	0,000841	1,981	2356	533,72	64,6	10
2B-203	102,6	100,5	8268	0,000831	1,979	2382	567,70	68,7	10
2B-204	102,6	100,4	8270	0,000833	1,96	2354	538,41	65,1	10
2B-205	102,6	101,5	8262	0,000840	1,983	2362	548,61	66,4	10
2B-206	102,8	100,0	8295	0,000829	1,969	2376	540,52	65,2	10
2B-207	102,6	100,2	8273	0,000831	1,958	2357	559,91	67,7	10

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, uusi timanttiterä										Liite 10 (5/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2A-321-C1		99,2	99,3	7734	0,000768	1,797	2341	415,56	53,7	10	
2A-321-C2		99,2	102,4	7729	0,000791	1,856	2348	437,15	56,6	10	
2A-322-C1		99,2	99,6	7731	0,000770	1,792	2329	387,99	50,2	10	
2A-322-C2		99,3	101,1	7739	0,000782	1,822	2331	425,92	55,0	10	
2A-323-C1		99,3	99,1	7744	0,000767	1,791	2336	401,38	51,8	10	
2A-323-C2		99,3	98,6	7742	0,000764	1,792	2347	442,76	57,2	10	
2A-324-C1		99,2	100,5	7734	0,000779	1,802	2315	394,02	50,9	10	
2A-324-C2		99,3	98,0	7742	0,000760	1,755	2311	414,57	53,5	10	
2A-325-C1		99,3	102,0	7737	0,000791	1,823	2306	390,22	50,4	10	
2A-325-C2		99,3	100,3	7744	0,000778	1,801	2316	427,64	55,2	10	
2A-326-C1		99,3	100,1	7744	0,000776	1,793	2312	402,02	51,9	11	
2A-326-C2		99,3	98,5	7742	0,000763	1,773	2325	432,85	55,9	10	
2B-321-C1		99,2	100,5	7731	0,000777	1,793	2309	415,57	53,8	10	
2B-321-C2		99,2	101,7	7734	0,000786	1,833	2333	440,91	57,0	10	
2B-322-C1		99,3	103,4	7737	0,000798	1,858	2330	414,97	53,6	10	
2B-322-C2		99,3	103,5	7737	0,000799	1,865	2335	458,27	59,2	10	
2B-323-C1		99,3	102,4	7737	0,000791	1,838	2325	413,86	53,5	10	
2B-323-C2		99,2	105,0	7731	0,000809	1,895	2344	426,18	55,1	10	
2B-324-C1		99,2	101,9	7729	0,000786	1,820	2317	424,50	54,9	10	
2B-324-C2		99,2	102,0	7729	0,000786	1,839	2341	445,88	57,7	10	
2B-325-C1		99,2	98,9	7731	0,000762	1,763	2315	396,22	51,2	10	
2B-325-C2		99,2	101,8	7734	0,000787	1,827	2323	436,08	56,4	10	
2B-326-C1		99,2	101,7	7724	0,000785	1,811	2308	397,71	51,5	10	
2B-326-C2		99,2	102,3	7731	0,000790	1,832	2320	439,90	56,9	10	

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, kulumut timanttiterä										Liite 10 (6/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2A-336-C1		98,6	100,9	7636	0,000770	1,779	2312	410,60	53,8	10	
2A-336-C2		98,6	98,4	7636	0,000749	1,738	2319	440,31	57,7	10	
2A-338-C1		98,6	98,8	7641	0,000754	1,748	2320	400,63	52,4	10	
2A-338-C2		98,6	102,0	7633	0,000778	1,811	2329	422,75	55,4	10	
2A-339-C1		98,6	100,2	7630	0,000764	1,761	2306	414,32	54,3	10	
2A-339-C2		98,5	99,2	7625	0,000756	1,747	2312	435,83	57,2	10	
2B-336-C1		98,5	100,2	7612	0,000763	1,760	2308	418,23	54,9	10	
2B-336-C2		98,5	99,7	7625	0,000760	1,756	2312	428,96	56,3	10	
2B-337-C1		98,6	100,0	7636	0,000762	1,758	2309	413,05	54,1	10	
2B-337-C2		98,5	100,0	7625	0,000761	1,761	2316	430,13	56,4	10	
2B-338-C1		98,6	100,5	7638	0,000766	1,766	2307	395,09	51,7	10	
2B-338-C2		98,6	99,4	7636	0,000758	1,758	2321	430,75	56,4	10	



Betonilaatu C30/37, P20	Rakennekoekappale D100x100, rikkiseos, uusi timantitтеріä										Liite 10 (7/21)
Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
2A-333-C1	99,2	103,9	7729	0,000764	1,760	2305	333,11	43,1	12		
2A-333-C2	99,2	103,7	7726	0,000764	1,765	2312	377,27	48,8	12		
2A-334-C1	99,1	104,4	7711	0,000766	1,758	2296	350,05	45,4	12		
2A-334-C2	99,1	103,5	7708	0,000771	1,779	2309	388,37	50,4	12		
2A-335-C1	99,2	104,1	7724	0,000763	1,762	2311	364,08	47,1	12		
2A-335-C2	99,1	99,1	7716	0,000764	1,773	2322	382,43	49,6	12		
2B-333-C1	99,1	103,6	7705	0,000764	1,760	2305	385,02	50,0	12		
2B-333-C2	99,0	105,1	7703	0,000768	1,772	2309	357,13	46,4	12		
2B-334-C1	99,1	103,5	7705	0,000771	1,777	2306	365,88	47,5	12		
2B-334-C2	99,0	104,1	7698	0,000764	1,773	2322	411,74	53,5	12		
2B-335-C1	99,0	103,9	7693	0,000767	1,766	2304	357,27	46,4	12		
2B-335-C2	99,0	105,0	7698	0,000772	1,796	2328	404,9	52,6	11		

Betoni-laatu C30/37, P20 Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timanttiterä Liite 10 (8/21)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-309-B1	79,3	79,4	4939	0,000392	0,925	2361	252,47	51,1	10
2A-309-B2	79,3	80,2	4939	0,000395	0,913	2313	253,29	51,3	10
2A-309-B3	79,3	81,2	4937	0,000402	0,944	2349	279,29	56,6	10
2A-310-B1	79,3	80,5	4943	0,000397	0,935	2356	250,22	50,6	10
2A-310-B2	79,3	79,2	4941	0,000390	0,900	2309	253,32	51,3	10
2A-310-B3	79,3	77,8	4939	0,000385	0,902	2344	290,03	58,7	10
2A-311-B1	79,3	79,1	4937	0,000391	0,913	2336	241,44	48,9	10
2A-311-B2	79,3	81,2	4939	0,000401	0,931	2323	255,04	51,6	10
2A-311-B3	79,3	79,3	4939	0,000393	0,921	2345	275,25	55,7	10
2A-312-B1	79,3	79,1	4939	0,000391	0,923	2362	263,11	53,3	10
2A-312-B2	79,3	76,9	4939	0,000379	0,882	2329	270,51	54,8	10
2A-312-B3	79,3	79,7	4943	0,000394	0,934	2372	288,73	58,4	10
2A-313-B1	79,3	79,1	4943	0,000391	0,911	2331	250,69	50,7	10
2A-313-B2	79,3	79,1	4941	0,000390	0,901	2312	256,07	51,8	10
2A-313-B3	79,4	78,6	4947	0,000388	0,913	2354	297,46	60,1	10
2A-314-B1	79,3	78,8	4939	0,000388	0,913	2354	254,09	51,4	10
2A-314-B2	79,3	80,3	4941	0,000396	0,917	2317	259,20	52,5	10
2A-314-B3	79,4	78,8	4945	0,000390	0,918	2355	292,64	59,2	10
2B-309-B1	79,3	74,5	4937	0,000368	0,860	2339	279,21	56,6	10
2B-309-B2	79,4	80,1	4947	0,000396	0,909	2297	258,74	52,3	10
2B-309-B3	79,3	79,8	4941	0,000395	0,925	2343	280,32	56,7	10
2B-310-B1	79,4	76,8	4947	0,000379	0,883	2331	260,51	52,7	10
2B-310-B2	79,4	78,8	4949	0,000389	0,900	2315	278,14	56,2	10
2B-310-B3	79,4	79,8	4947	0,000395	0,930	2356	299,10	60,5	10
2B-311-B1	79,4	74,6	4947	0,000368	0,853	2320	273,51	55,3	10

Näyte	Rakennekoeappale D80x80, hionta, uusi timantiterä										Liite 10 (9/21)
	Betoni laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2B-311-B2		79,4	79,7	4945	0,000393	0,910	2317	256,67	51,9	10	
2B-311-B3		79,3	79,6	4943	0,000394	0,921	2339	293,84	59,4	10	
2B-312-B1		79,3	77,9	4941	0,000385	0,903	2347	265,58	53,7	10	
2B-312-B2		79,3	78,7	4943	0,000388	0,895	2308	270,72	54,8	10	
2B-312-B3		79,3	80,1	4943	0,000397	0,930	2344	288,03	58,3	10	
2B-313-B1		79,3	80,2	4939	0,000395	0,925	2343	253,26	51,3	10	
2B-313-B2		79,4	77,0	4945	0,000380	0,879	2315	276,91	56,0	10	
2B-313-B3		79,4	79,7	4949	0,000394	0,919	2334	291,42	58,9	10	
2B-314-B1		79,3	80,2	4943	0,000396	0,921	2327	266,57	53,9	10	
2B-314-B2		79,4	79,1	4945	0,000391	0,904	2313	266,08	53,8	10	
2B-314-B3		79,3	79,2	4941	0,000392	0,920	2348	277,10	56,1	12	

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, hionta, kulunut timanttiterä											Liite 10 (10/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
2A-340-B1		79,1	79,7	4918	0,000389	0,902	2320	259,69	52,8	10		
2A-340-B2		79,1	78,7	4916	0,000385	0,887	2305	269,28	54,8	10		
2A-340-B3		79,1	80,3	4914	0,000393	0,924	2352	300,62	61,2	10		
2A-341-B1		79,1	79,5	4912	0,000388	0,899	2318	258,73	52,7	10		
2A-341-B2		79,1	78,4	4912	0,000383	0,885	2312	273,14	55,6	10		
2A-341-B3		79,1	79,2	4910	0,000387	0,910	2353	297,28	60,5	10		
2B-339-B1		79,0	81,4	4900	0,000397	0,919	2316	265,30	54,1	10		
2B-339-B2		79,0	80,2	4900	0,000392	0,898	2292	273,68	55,9	10		
2B-339-B3		79,1	80,7	4910	0,000395	0,925	2343	308,89	62,9	10		
2B-340-B1		79,1	79,9	4908	0,000390	0,907	2327	255,99	52,2	10		
2B-340-B2		79,0	77,7	4904	0,000380	0,868	2286	267,24	54,5	10		
2B-340-B3		79,1	80,8	4908	0,000396	0,928	2345	297,67	60,7	10		

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, rikkiseos, uusi timanttiterä											Liite 10 (11/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
2A-319-B1		79,3	82,1	4939	0,000384	0,894	2330	248,02	50,2	10		
2A-319-B2		79,3	81,9	4935	0,000387	0,895	2314	242,29	49,1	10		
2A-319-B3		79,3	82,7	4937	0,000392	0,923	2356	272,07	55,1	12		
2A-320-B1		79,3	84,1	4939	0,000393	0,922	2347	240,70	48,7	10		
2A-320-B2		79,3	84,0	4935	0,000391	0,912	2334	252,31	51,1	10		
2A-320-B3		79,3	83,5	4939	0,000393	0,928	2363	270,84	54,8	10		
2B-319-B1		79,3	82,0	4939	0,000386	0,901	2336	235,52	47,7	12		
2B-319-B2		79,3	82,8	4937	0,000389	0,897	2307	251,78	51,0	12		
2B-319-B3		79,3	83,7	4933	0,000395	0,922	2335	254,98	51,7	10		
2B-320-B1		79,3	83,2	4937	0,000389	0,914	2351	252,09	51,1	10		
2B-320-B2		79,3	83,3	4939	0,000389	0,897	2307	239,46	48,5	10		
2B-320-B3		79,3	84,1	4939	0,000393	0,923	2350	272,14	55,1	10		

Betoni-laatu C30/37, P20 Rakennekoekappale D50x50, hionta, uusi timanttiterä Liite 10 (12/21)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
2A-301-A1	51,2	48,5	2059	0,000099	0,236	2379	102,03	49,6	10
2A-301-A2	51,3	49,5	2063	0,000101	0,237	2342	108,96	52,8	10
2A-301-A3	51,3	48,8	2063	0,000100	0,234	2335	115,91	56,2	10
2A-301-A4	51,2	49,1	2060	0,000101	0,240	2371	123,05	59,7	10
2A-302-A1	51,2	49,1	2059	0,000100	0,238	2375	103,76	50,4	10
2A-302-A2	51,2	49,2	2060	0,000100	0,236	2355	106,04	51,5	10
2A-302-A3	51,2	48,4	2058	0,000098	0,231	2352	103,08	50,1	9
2A-302-A4	51,2	48,6	2062	0,000099	0,235	2369	119,92	58,2	10
2A-303-A1	51,3	48,6	2063	0,000100	0,234	2335	104,34	50,6	10
2A-303-A2	51,2	49,4	2059	0,000101	0,235	2322	102,40	49,7	10
2A-303-A3	51,3	49,1	2064	0,000098	0,233	2373	87,66	42,5	10
2A-303-A4	51,3	48,0	2063	0,000098	0,234	2383	117,43	56,9	10
2B-301-A1	51,3	49,5	2063	0,000100	0,236	2355	99,02	48,0	10
2B-301-A2	51,3	49,1	2063	0,000099	0,231	2329	105,33	51,1	10
2B-301-A3	51,3	48,7	2064	0,000099	0,234	2359	121,23	58,7	10
2B-301-A4	51,2	49,6	2059	0,000102	0,240	2348	119,34	58,0	10
2B-302-A1	51,3	49,4	2064	0,000101	0,238	2352	98,23	47,6	10
2B-302-A2	51,3	49,6	2068	0,000101	0,236	2332	110,75	53,5	10
2B-302-A3	51,3	49,9	2067	0,000102	0,240	2348	116,60	56,4	10
2B-302-A4	51,4	49,7	2071	0,000101	0,240	2371	122,20	59,0	10
2B-303-A1	51,3	48,6	2064	0,000099	0,232	2339	110,72	53,6	10
2B-303-A2	51,2	48,6	2060	0,000098	0,231	2352	111,79	54,3	10
2B-303-A3	51,3	48,8	2063	0,000099	0,232	2339	116,44	56,4	10
2B-303-A4	51,3	48,6	2067	0,000100	0,236	2355	118,69	57,4	10

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 10 (13/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2A-342-A1	48,9	51,0	1878	0,000097	0,221	2274	110,06	58,6	10		
2A-342-A2	48,9	50,7	1879	0,000096	0,218	2266	103,45	55,0	10		
2A-342-A3	48,9	50,8	1881	0,000097	0,219	2253	98,98	52,6	10		
2A-342-A4	48,8	50,9	1873	0,000096	0,222	2308	103,16	55,1	10		
2A-343-A1	49,0	47,3	1884	0,000090	0,203	2251	102,54	54,4	10		
2A-343-A2	48,8	47,5	1873	0,000090	0,203	2251	87,43	46,7	10		
2A-343-A3	48,8	47,2	1870	0,000088	0,202	2291	98,32	52,6	10		
2A-343-A4	48,9	47,4	1874	0,000090	0,209	2318	118,78	63,4	10		
2B-341-A1	48,8	48,6	1867	0,000091	0,209	2292	78,44	42,0	10		
2B-341-A2	48,8	48,9	1873	0,000092	0,209	2267	93,11	49,7	10		
2B-341-A3	48,7	49,0	1861	0,000092	0,210	2278	89,36	48,0	10		
2B-341-A4	48,7	49,0	1863	0,000093	0,213	2286	120,89	64,9	10		
2B-342-A1	48,9	48,3	1879	0,000091	0,207	2270	86,59	46,1	10		
2B-342-A2	48,9	48,1	1875	0,000090	0,206	2284	111,67	59,5	10		
2B-342-A3	48,9	48,4	1874	0,000091	0,207	2270	97,46	52,0	9		
2B-342-A4	48,8	48,2	1870	0,000092	0,212	2300	111,46	59,6	10		

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, rikkiösoo, uusi timanttiterä										Liite 10 (14/21)
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorimituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
2A-307-A1		51,1	56,5	2054	0,000104	0,247	2370	82,87	40,4	10	
2A-307-A2		51,2	55,5	2059	0,000105	0,245	2329	91,17	44,3	9	
2A-307-A3		51,2	54,7	2058	0,000121	0,244	2012	105,74	51,4	10	
2A-307-A4		51,2	55,5	2056	0,000105	0,252	2395	97,37	47,4	10	
2A-308-A1		51,2	55,6	2059	0,000104	0,248	2380	39,62	19,2	9	
2A-308-A2		51,2	55,4	2056	0,000104	0,245	2351	98,17	47,7	10	
2A-308-A3		51,2	53,7	2056	0,000102	0,238	2329	96,59	47,0	10	
2A-308-A4		51,3	52,2	2063	0,000099	0,234	2359	99,49	48,2	10	
2B-307-A1		51,2	53,6	2059	0,000101	0,237	2342	53,12	25,8	9	
2B-307-A2		51,3	52,9	2063	0,000099	0,232	2339	48,17	23,4	9	
2B-307-A3		51,2	54,1	2060	0,000100	0,233	2325	109,06	52,9	10	
2B-307-A4		51,2	54,9	2059	0,000102	0,239	2338	106,23	51,6	10	
2B-308-A1		51,2	53,7	2056	0,000102	0,236	2309	101,45	49,3	9	
2B-308-A2		51,2	56,0	2058	0,000101	0,236	2332	43,03	20,9	10	
2B-308-A3		51,3	53,3	2067	0,000101	0,235	2322	47,36	22,9	9	
2B-308-A4		51,3	53,6	2063	0,000102	0,242	2368	106,40	51,6	10	



Näyte	Rakennekoekappale D100x100, kosteuspitoisuus										Liite 10 (15/21)
	Betoni laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
Kuivatusaika 72 tuntia											
2A-327-C1	99,3	102,4	7744	0,000794	1,839	2317	371,80	48,0	10		
2A-327-C2	99,3	100,1	7744	0,000775	1,799	2323	399,03	51,5	10		
2A-328-C1	99,3	101,0	7747	0,000782	1,810	2316	370,51	47,8	10		
2A-328-C2	99,3	101,0	7750	0,000783	1,808	2310	397,39	51,3	10		
2A-329-C1	99,4	98,9	7752	0,000767	1,780	2322	388,17	50,1	10		
2A-329-C2	99,4	101,3	7757	0,000785	1,813	2311	390,46	50,3	10		
2B-327-C1	99,3	100,8	7737	0,000777	1,799	2317	377,18	48,8	10		
2B-327-C2	99,2	102,2	7729	0,000791	1,842	2330	418,24	54,1	10		
2B-328-C1	99,2	101,3	7731	0,000783	1,807	2309	399,77	51,7	10		
2B-328-C2	99,2	101,5	7731	0,000784	1,810	2310	408,34	52,8	10		
2B-329-C1	99,2	101,8	7734	0,000787	1,834	2332	366,31	47,4	10		
2B-329-C2	99,2	102,2	7729	0,000791	1,832	2317	420,70	54,4	10		

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, kosteuspitoisuus										Liite 10 (16/21)
	Betoni laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
Kuivatusaika 16 tuntia											
2A-330-C1	99,3	100,2	7750	0,000776	1,790	2308	366,65	47,3	10		
2A-330-C2	99,4	100,0	7755	0,000776	1,789	2307	400,32	51,6	10		
2A-331-C1	99,4	100,0	7757	0,000776	1,795	2314	371,61	47,9	10		
2A-331-C2	99,3	99,6	7750	0,000772	1,790	2320	394,51	50,9	10		
2A-332-C1	99,3	100,0	7747	0,000774	1,785	2308	379,72	49,0	10		
2A-332-C2	99,3	100,1	7747	0,000775	1,802	2327	408,25	52,7	10		
2B-330-C1	99,2	102,5	7724	0,000791	1,831	2316	375,00	48,6	10		
2B-330-C2	99,2	104,3	7724	0,000806	1,862	2311	385,57	49,9	10		
2B-331-C1	99,2	102,3	7729	0,000791	1,829	2313	373,04	48,3	10		
2B-331-C2	99,2	102,8	7726	0,000794	1,844	2324	411,34	53,2	10		
2B-332-C1	99,2	100,9	7726	0,000779	1,798	2309	389,53	50,4	10		
2B-332-C2	99,2	102,3	7721	0,000789	1,823	2312	405,34	52,5	10		

Betoni laatu C30/37, P20 Rakennekoe kappale D80x80, kosteuspitöisuus Liite 10 (17/21)

Näyte	Halkaisija	Korkeus	Kuormituspinta-ala	Tilavuus	Massa	Tiheys	Murtokuorma	Puristuslujuus	Murtotapa
	$d_m$ [mm]	$h_m$ [mm]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$m_a$ [kg]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]	
Kuivatusaika 72 tuntia									
2A-315-B1	79,3	80,8	4943	0,000398	0,936	2353	243,83	49,3	10
2A-315-B2	79,3	82,8	4943	0,000409	0,946	2314	250,34	50,6	10
2A-315-B3	79,4	79,4	4945	0,000392	0,924	2358	283,57	57,3	10
2A-316-B1	79,4	81,5	4945	0,000402	0,941	2342	249,63	50,5	10
2A-316-B2	79,4	80,5	4945	0,000398	0,921	2315	252,00	51,0	10
2A-316-B3	79,4	77,9	4947	0,000384	0,902	2350	282,08	57,0	10
2B-315-B1	79,4	77,0	4945	0,000380	0,889	2341	261,27	52,8	10
2B-315-B2	79,3	76,6	4943	0,000377	0,874	2320	261,07	52,8	10
2B-315-B3	79,4	76,0	4947	0,000375	0,882	2354	295,10	59,6	10
2B-316-B1	79,3	79,5	4939	0,000393	0,919	2340	268,51	54,4	10
2B-316-B2	79,4	79,5	4947	0,000392	0,906	2313	267,96	54,2	10
2B-316-B3	79,4	80,3	4945	0,000398	0,928	2333	281,54	56,9	10

Betoni-laatu C30/37, P20 Rakennekoe-kappale D80x80, kosteus-pitoisuus Liite 10 (18/21)

Näyte	Halkaisija	Korkeus	Kuormitus-pinta-ala	Tilavuus	Massa	Tiheys	Murtokuorma	Puristus-lujuus	Murtotapa
	$d_m$ [mm]	$h_m$ [mm]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$m_a$ [kg]	$D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]	
Kuivatusaika 16 tuntia									
2A-317-B1	79,3	78,0	4941	0,000385	0,902	2344	243,30	49,2	10
2A-317-B2	79,4	77,4	4947	0,000382	0,886	2321	248,47	50,2	10
2A-317-B3	79,4	78,7	4947	0,000388	0,912	2352	270,18	54,6	10
2A-318-B1	79,3	77,1	4941	0,000380	0,885	2330	241,50	48,9	10
2A-318-B2	79,3	78,2	4943	0,000385	0,887	2305	239,60	48,5	10
2A-318-B3	79,4	78,3	4947	0,000386	0,908	2354	272,42	55,1	10
2B-317-B1	79,4	78,0	4951	0,000385	0,904	2349	261,59	52,8	10
2B-317-B2	79,4	79,0	4949	0,000390	0,901	2312	263,42	53,2	10
2B-317-B3	79,4	80,0	4949	0,000395	0,933	2363	288,71	58,3	10
2B-318-B1	79,4	80,0	4947	0,000394	0,918	2331	246,30	49,8	10
2B-318-B2	79,4	76,4	4949	0,000376	0,877	2334	253,68	51,3	10
2B-318-B3	79,4	77,7	4949	0,000382	0,899	2355	278,29	56,2	10

Betoni-laatu C30/37, P20 Rakennekoekappale D50x50, kosteuspitoisuus Liite 10 (19/21)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Kuivatusaika 72 tuntia									
2A-304-A1	51,3	48,9	2063	0,000098	0,232	2363	113,05	54,8	10
2A-304-A2	51,3	48,1	2064	0,000097	0,227	2336	99,27	48,1	10
2A-304-A3	51,2	47,9	2062	0,000096	0,224	2329	102,54	49,7	10
2A-304-A4	51,3	48,9	2063	0,000100	0,236	2355	121,89	59,1	10
2A-305-A1	51,3	49,0	2063	0,000100	0,236	2355	105,19	51,0	10
2A-305-A2	51,3	47,9	2068	0,000096	0,228	2370	118,57	57,3	10
2A-305-A3	51,3	49,0	2067	0,000099	0,235	2369	122,64	59,3	10
2A-305-A4	51,3	48,9	2068	0,000100	0,239	2385	94,02	45,5	10
2B-304-A1	51,3	50,0	2070	0,000103	0,241	2335	114,61	55,4	10
2B-304-A2	51,3	50,5	2067	0,000102	0,239	2338	118,30	57,2	10
2B-304-A3	51,3	50,6	2066	0,000103	0,241	2335	111,26	53,9	10
2B-304-A4	51,3	50,2	2067	0,000103	0,244	2364	132,29	64,0	10
2B-305-A1	51,3	50,6	2070	0,000103	0,247	2393	122,23	59,1	10
2B-305-A2	51,4	50,8	2071	0,000104	0,239	2293	105,58	51,0	10
2B-305-A3	51,3	50,6	2067	0,000103	0,241	2335	116,71	56,5	10
2B-305-A4	51,4	50,5	2071	0,000104	0,246	2361	135,06	65,2	10

Betoni-laatu C30/37, P20 Rakennekoe-kappale D50x50, kosteus-pitoisuus Liite 10 (20/21)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormitus-pinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristus-lujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Kuivatusaika 16 tuntia									
2A-306-A1	51,3	48,5	2063	0,000098	0,236	2403	99,25	48,1	10
2A-306-A2	51,3	49,3	2064	0,000101	0,238	2352	111,91	54,2	10
2A-306-A3	51,3	49,0	2066	0,000100	0,231	2305	103,88	50,3	10
2A-306-A4	51,3	48,0	2067	0,000099	0,233	2349	105,28	50,9	10
2A-344-A1	51,4	48,0	2072	0,000097	0,225	2315	98,40	47,5	10
2A-344-A2	51,4	48,0	2074	0,000098	0,225	2291	91,22	44,0	10
2A-344-A3	51,5	48,4	2080	0,000099	0,231	2329	109,92	52,8	10
2A-344-A4	51,3	47,9	2068	0,000097	0,232	2387	116,53	56,3	10
2B-306-A1	51,4	50,2	2071	0,000103	0,242	2345	112,47	54,3	10
2B-306-A2	51,4	50,8	2072	0,000103	0,241	2335	117,25	56,6	10
2B-306-A3	51,4	50,1	2071	0,000103	0,238	2306	113,46	54,8	10
2B-306-A4	51,3	50,9	2068	0,000104	0,244	2341	123,56	59,7	10
2B-343-A1	51,3	47,8	2064	0,000098	0,228	2322	105,27	51,0	10
2B-343-A2	51,3	47,5	2068	0,000096	0,223	2318	110,57	53,5	10
2B-343-A3	51,3	47,8	2068	0,000098	0,227	2312	112,30	54,3	10
2B-343-A4	51,3	47,8	2066	0,000097	0,228	2346	119,17	57,7	10

Betoni laatu C30/37, P20 Standardikuutio 150x150x150 Liite 10 (21/21)

Näyte	Sivumitta $x_m$ [mm]	Sivumitta $y_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Korkeus $h_m$ [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Teräsmuoteilla valettu										
2A-501	149,7	150,1	22465	150,8	0,00336	7,897	2353	1282,14	57,1	2
2A-502	150,5	149,7	22527	150,7	0,00336	7,889	2350	1280,90	56,9	2
2A-503	149,6	149,8	22415	150,8	0,00336	7,885	2343	1302,56	58,1	2
2B-501	150,7	150,3	22638	150,6	0,00337	7,873	2334	1346,76	59,5	2
2B-502	150,7	150,3	22643	150,9	0,00339	7,927	2339	1340,40	59,2	2
2B-504	150,9	150,4	22698	150,5	0,00339	7,972	2348	1377,56	60,7	2
Muovimuoteilla valettu										
2A-601	151,3	150,0	22687	150,0	0,00339	7,974	2351	1258,17	55,5	2
2A-602	151,2	150,1	22693	150,1	0,00339	7,860	2317	1195,07	52,7	2
2A-603	150,7	150,0	22605	150,1	0,00338	7,897	2336	1205,03	53,3	2
2B-601	150,9	150,0	22632	150,0	0,00338	7,859	2327	1272,37	56,2	2
2B-602	150,8	150,0	22623	150,0	0,00338	7,869	2330	1279,04	56,5	2
2B-604	151,4	150,0	22720	150,0	0,00339	7,899	2327	1265,14	55,7	2

Näyte	Standardilieriö D150x300, vedellä kylästetty											Liite 11 (1/15)
	Betonilaatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
3A-118		149,6	295,5	17566	0,00529	12,344	2334	847,96	48,3	11		
3A-119		150,3	293,4	17734	0,00537	12,623	2349	761,08	42,9	10		
3A-120		149,6	298,4	17585	0,00533	12,412	2330	853,08	48,5	11		
3A-121		149,1	293,4	17456	0,00526	12,371	2350	879,08	50,4	11		
3A-122		150,9	293,1	17884	0,00539	12,611	2338	886,46	49,6	10		
3A-123		149,2	295,3	17476	0,00529	12,326	2331	839,31	48,0	10		
3A-124		148,9	293,7	17421	0,00525	12,222	2329	861,85	49,5	10		
3A-125		150,2	290,8	17707	0,00534	12,581	2358	886,84	50,1	11		
3A-126		148,5	290,4	17328	0,00518	12,148	2344	857,79	49,5	10		
3B-118		149,9	295,3	17648	0,00533	12,417	2328	861,90	48,8	11		
3B-119		149,9	294,8	17648	0,00531	12,341	2325	856,20	48,5	10		
3B-120		150,3	295,7	17738	0,00534	12,458	2334	849,04	47,9	11		
3B-121		150,2	295,3	17707	0,00534	12,401	2324	828,77	46,8	11		
3B-122		149,7	294,3	17593	0,00526	12,335	2343	852,79	48,5	10		
3B-123		150,0	296,3	17679	0,00533	12,434	2333	866,71	49,0	11		
3B-124		150,1	291,4	17695	0,00524	12,234	2334	854,94	48,3	10		
3B-125		149,9	295,9	17656	0,00532	12,284	2310	848,18	48,0	11		
3B-126		149,3	293,3	17495	0,00525	12,167	2319	831,09	47,5	11		



Näyte	Standardilieriö D150x300, kuiva											Liite 11 (2/15)
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
3A-127		150,2	296,2	17723	0,00534	12,449	2330	910,95	51,4	11		
3A-128		149,9	292,6	17644	0,00530	12,555	2368	907,69	51,4	11		
3A-129		149,7	293,1	17605	0,00530	12,415	2344	897,47	51,0	11		
3A-130		149,8	295,7	17613	0,00532	12,436	2336	863,86	49,0	10		
3A-131		149,1	293,7	17452	0,00525	12,284	2342	893,03	51,2	10		
3A-132		150,2	296,3	17723	0,00534	12,471	2335	908,39	51,3	10		
3B-127		149,1	292,9	17448	0,00522	12,168	2331	886,02	50,8	11		
3B-128		149,8	294,7	17624	0,00532	12,346	2322	892,92	50,7	11		
3B-129		149,8	294,2	17632	0,00531	12,483	2351	879,22	49,9	10		
3B-130		150,0	289,2	17664	0,00523	12,260	2345	893,23	50,6	10		
3B-131		150,0	295,2	17660	0,00531	12,483	2349	894,59	50,7	11		
3B-132		149,6	293,2	17573	0,00531	12,396	2335	901,85	51,3	11		

Liite 11 (3/15)

## Rakennekoeappale D150x300

## Betonilaatu C50/60, P50

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-401	154,2	297,6	18675	0,00558	12,991	2327	891,85	47,8	11
3A-402	154,1	297,0	18659	0,00556	12,981	2335	907,29	48,6	11
3A-403	154,1	295,8	18639	0,00555	12,909	2326	900,88	48,3	11
3A-404	154,2	297,0	18671	0,00557	12,954	2325	866,21	46,4	11
3A-405	154,0	297,8	18635	0,00559	13,012	2329	884,99	47,5	11
3A-406	154,1	296,4	18639	0,00557	13,011	2336	883,61	47,4	11
3A-407	153,1	305,5	18413	0,00567	13,230	2333	911,18	49,5	11
3A-408	153,2	301,9	18429	0,00560	13,035	2327	844,66	45,8	10
3A-409	153,3	296,0	18454	0,00549	12,844	2337	865,16	46,9	11
3A-410	153,2	296,2	18425	0,00550	12,804	2328	864,96	46,9	11
3A-411	153,2	296,8	18442	0,00551	12,851	2333	875,28	47,5	11
3A-412	153,3	300,7	18454	0,00558	13,031	2334	869,64	47,1	11
3B-401	153,5	302,0	18514	0,00560	13,016	2323	879,76	47,5	11
3B-402	153,6	301,9	18522	0,00560	13,108	2339	861,22	46,5	11
3B-403	153,5	298,7	18514	0,00554	12,928	2332	851,12	46,0	11
3B-404	153,7	290,1	18542	0,00538	12,581	2337	872,76	47,1	11
3B-405	153,6	301,0	18530	0,00559	13,001	2327	892,48	48,2	11
3B-406	153,5	302,3	18494	0,00561	13,098	2334	881,67	47,7	11
3B-407	153,6	294,1	18522	0,00546	12,773	2338	845,50	45,6	10
3B-408	153,4	300,3	18482	0,00558	12,982	2327	846,19	45,8	11
3B-409	153,4	302,8	18486	0,00562	13,116	2333	890,78	48,2	11
3B-410	153,5	299,5	18494	0,00556	12,959	2330	867,86	46,9	11
3B-411	153,4	291,9	18478	0,00542	12,607	2327	836,48	45,3	11
3B-412	153,4	296,4	18482	0,00550	12,870	2339	855,51	46,3	11

Liite 11 (4/15)

## Valettu koekappale D100x100

## Betonilaatu C50/60, P50

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-201	102,8	98,9	8295	0,000859	2,024	2357	579,45	69,9	10
3A-202	102,9	99,8	8311	0,000871	2,060	2366	593,79	71,4	10
3A-203	102,8	99,5	8295	0,000870	2,051	2358	572,86	69,1	10
3A-204	102,8	100,1	8300	0,000866	2,047	2364	595,32	71,7	10
3A-205	102,9	100,3	8322	0,000869	2,054	2364	601,05	72,2	10
3A-206	102,9	100,7	8308	0,000875	2,071	2368	606,55	73,0	10
3A-207	102,5	99,3	8246	0,000872	2,061	2364	587,58	71,3	10
3B-201	102,9	100,3	8322	0,000863	2,026	2348	624,17	75,0	10
3B-202	102,6	98,0	8265	0,000853	2,000	2345	593,92	71,9	10
3B-203	102,9	100,2	8311	0,000863	2,064	2392	622,83	74,9	10
3B-204	102,8	99,4	8300	0,000850	2,009	2364	594,86	71,7	10
3B-205	102,8	97,9	8297	0,000864	2,048	2371	639,35	77,1	10
3B-206	102,6	99,0	8268	0,000853	2,016	2364	626,19	75,7	10
3B-207	102,7	99,9	8284	0,000854	2,021	2367	602,73	72,8	11

Betoni-laatu C50/60, P50 Rakennekoekappale D100x100, hionta, uusi timanttiterä Liite 11 (5/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-310-C1	99,3	95,3	7739	0,000738	1,731	2344	505,17	65,3	10
3A-310-C2	99,3	96,8	7737	0,000748	1,755	2345	522,76	67,6	10
3A-311-C1	99,3	97,6	7739	0,000755	1,772	2349	503,72	65,1	10
3A-311-C2	99,2	99,3	7731	0,000768	1,792	2335	510,98	66,1	10
3A-312-C1	99,3	97,7	7739	0,000755	1,773	2350	506,85	65,5	10
3A-312-C2	99,3	95,3	7739	0,000737	1,728	2343	523,99	67,7	10
3A-313-C1	99,3	96,7	7742	0,000747	1,766	2363	510,13	65,9	10
3A-313-C2	99,2	97,3	7731	0,000753	1,758	2336	526,14	68,1	10
3A-314-C1	99,3	94,7	7742	0,000733	1,713	2335	516,73	66,7	10
3A-314-C2	99,3	95,5	7744	0,000738	1,726	2337	526,76	68,0	10
3A-315-C1	99,3	96,4	7742	0,000745	1,751	2349	519,36	67,1	10
3A-315-C2	99,3	95,4	7744	0,000737	1,726	2340	517,95	66,9	10
3B-311-C1	99,2	99,8	7726	0,000772	1,813	2350	479,38	62,0	10
3B-311-C2	99,2	98,6	7734	0,000763	1,786	2342	501,96	64,9	10
3B-312-C1	99,2	99,4	7731	0,000769	1,810	2355	498,01	64,4	10
3B-312-C2	99,2	98,6	7726	0,000763	1,789	2346	510,60	66,1	10
3B-313-C1	99,2	99,4	7731	0,000769	1,809	2354	468,92	60,7	10
3B-313-C2	99,2	99,8	7731	0,000772	1,813	2350	501,28	64,8	10
3B-314-C1	99,2	99,1	7734	0,000767	1,807	2357	501,01	64,8	10
3B-314-C2	99,2	99,4	7729	0,000769	1,806	2350	503,05	65,1	10
3B-315-C1	99,2	98,3	7729	0,000760	1,786	2351	486,70	63,0	10
3B-315-C2	99,2	100,2	7724	0,000775	1,817	2346	492,33	63,7	10
3B-316-C1	98,8	98,4	7672	0,000755	1,757	2329	454,03	59,2	10
3B-316-C2	98,9	99,4	7674	0,000764	1,788	2342	475,36	61,9	10

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, kulumut timanttiterä										Liite 11 (6/15)
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
3A-327-C1		98,6	96,3	7638	0,000734	1,716	2336	470,27	61,6	10	
3A-327-C2		98,6	100,0	7628	0,000763	1,769	2320	486,03	63,7	10	
3A-328-C1		98,7	96,4	7646	0,000734	1,717	2338	485,80	63,5	10	
3A-328-C2		98,6	97,9	7633	0,000747	1,734	2320	488,50	64,0	10	
3A-329-C1		98,7	98,4	7643	0,000753	1,753	2330	490,41	64,2	10	
3A-329-C2		98,7	99,9	7643	0,000762	1,769	2323	496,21	64,9	10	
3B-328-C1		98,6	98,8	7630	0,000756	1,759	2328	481,52	63,1	10	
3B-328-C2		98,6	99,9	7633	0,000764	1,783	2335	491,25	64,4	10	
3B-329-C1		98,6	98,8	7628	0,000755	1,772	2349	495,14	64,9	10	
3B-329-C2		98,6	98,8	7636	0,000755	1,766	2341	516,59	67,7	10	
3B-330-C1		98,6	98,6	7628	0,000754	1,765	2342	473,81	62,1	10	
3B-330-C2		98,6	98,3	7628	0,000751	1,754	2337	481,04	63,1	10	

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, rikkiseos, uusi timanttiterä										Liite 11 (7/15)
	Betoni laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
3A-320-C1		99,1	104,3	7718	0,000778	1,809	2327	440,08	57,0	10	
3A-320-C2		99,2	105,8	7726	0,000778	1,799	2314	435,16	56,3	10	
3A-321-C1		99,2	105,3	7734	0,000780	1,827	2344	416,94	53,9	10	
3A-321-C2		99,2	105,0	7721	0,000778	1,803	2319	394,43	51,1	10	
3A-322-C1		99,1	104,2	7713	0,000775	1,808	2334	422,71	54,8	10	
3A-322-C2		99,2	105,5	7726	0,000779	1,803	2316	441,47	57,1	10	
3B-321-C1		99,3	106,6	7740	0,000782	1,808	2313	415,86	53,7	10	
3B-321-C2		99,3	104,9	7742	0,000778	1,813	2332	444,84	57,5	10	
3B-322-C1		99,2	104,4	7731	0,000773	1,789	2316	409,22	52,9	10	
3B-322-C2		99,2	105,5	7724	0,000770	1,789	2325	433,95	56,2	10	
3B-323-C1		99,3	104,9	7739	0,000781	1,829	2343	422,80	54,6	10	
3B-323-C2		99,3	106,1	7737	0,000785	1,842	2348	444,58	57,5	10	

Betoni-laatu C50/60, P50 Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timanttiterä Liite 11 (8/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-304-B1	79,4	77,1	4951	0,000381	0,898	2358	346,87	70,1	10
3A-304-B2	79,5	76,6	4958	0,000378	0,886	2345	340,96	68,8	10
3A-304-B3	79,4	76,1	4951	0,000376	0,882	2347	336,22	67,9	10
3A-305-B1	79,4	76,1	4951	0,000371	0,870	2347	354,78	71,7	10
3A-305-B2	79,4	76,0	4951	0,000371	0,863	2328	334,00	67,5	10
3A-305-B3	79,4	76,0	4954	0,000373	0,876	2350	335,68	67,8	10
3A-306-B1	79,4	75,0	4951	0,000369	0,865	2346	355,44	71,8	10
3A-306-B2	79,4	76,3	4951	0,000375	0,876	2338	343,94	69,5	10
3A-306-B3	79,4	79,9	4951	0,000396	0,938	2370	320,08	64,6	10
3A-307-B1	79,4	75,5	4949	0,000373	0,858	2302	302,42	61,1	10
3A-307-B2	79,4	77,0	4951	0,000380	0,887	2336	340,24	68,7	10
3A-307-B3	79,4	75,4	4951	0,000373	0,874	2345	334,04	67,5	10
3A-308-B1	79,4	75,9	4947	0,000375	0,878	2343	340,38	68,8	10
3A-308-B2	79,4	75,9	4951	0,000375	0,877	2340	332,96	67,2	10
3A-308-B3	79,4	76,0	4949	0,000376	0,881	2345	337,63	68,2	10
3A-309-B1	79,4	78,3	4947	0,000387	0,912	2358	345,56	69,8	10
3A-309-B2	79,4	76,6	4948	0,000380	0,884	2328	330,80	66,9	10
3A-309-B3	79,4	78,3	4951	0,000387	0,913	2361	329,54	66,6	10
3B-305-B1	79,2	75,6	4931	0,000373	0,881	2364	311,49	63,2	10
3B-305-B2	79,3	73,9	4935	0,000364	0,864	2375	333,08	67,5	10
3B-305-B3	79,3	75,7	4939	0,000374	0,881	2357	336,27	68,1	10
3B-306-B1	79,3	74,1	4939	0,000366	0,864	2362	328,63	66,5	10
3B-306-B2	79,3	73,9	4939	0,000366	0,862	2357	338,27	68,5	10
3B-306-B3	79,3	78,3	4939	0,000387	0,910	2353	338,05	68,4	10
3B-307-B1	79,3	75,9	4939	0,000375	0,885	2362	323,62	65,5	10

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timantitтері											Liite 11 (9/15)
	Betoni laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
3B-307-B2		79,3	75,6	4939	0,000374	0,875	2341	331,10	67,0	10		
3B-307-B3		79,3	75,8	4939	0,000375	0,883	2356	341,84	69,2	10		
3B-308-B1		79,3	74,0	4939	0,000367	0,862	2350	337,45	68,3	10		
3B-308-B2		79,3	78,8	4935	0,000390	0,916	2350	333,17	67,5	10		
3B-308-B3		79,3	76,0	4939	0,000376	0,883	2350	347,21	70,3	10		
3B-309-B1		79,3	76,0	4937	0,000375	0,875	2335	334,82	67,8	10		
3B-309-B2		79,3	75,8	4937	0,000374	0,880	2355	348,15	70,5	10		
3B-309-B3		79,3	74,4	4939	0,000367	0,864	2356	351,86	71,2	10		
3B-310-B1		79,3	73,7	4939	0,000364	0,864	2375	338,60	68,6	10		
3B-310-B2		79,3	78,3	4935	0,000386	0,907	2351	332,67	67,4	10		
3B-310-B3		79,3	75,7	4933	0,000373	0,882	2366	352,34	71,4	10		



Näyte	Rakennekoekappale D80x80, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 11 (10/15)
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
3A-325-B1		79,1	78,3	4916	0,000385	0,893	2321	292,08	59,4	10	
3A-325-B2		79,1	78,3	4910	0,000385	0,876	2277	291,16	59,3	10	
3A-325-B3		79,0	73,8	4900	0,000361	0,831	2304	317,91	64,9	10	
3A-326-B1		79,0	76,0	4902	0,000372	0,872	2346	306,08	62,4	10	
3A-326-B2		79,1	73,3	4910	0,000359	0,830	2314	315,78	64,3	10	
3A-326-B3		79,1	75,6	4908	0,000371	0,857	2312	325,94	66,4	10	
3B-326-B1		79,1	75,6	4910	0,000371	0,871	2349	312,93	63,7	10	
3B-326-B2		79,1	75,5	4916	0,000371	0,867	2339	332,01	67,5	10	
3B-326-B3		79,1	75,8	4908	0,000373	0,871	2337	331,89	67,6	10	
3B-327-B1		79,2	78,3	4924	0,000384	0,894	2330	306,48	62,2	10	
3B-327-B2		79,1	75,9	4914	0,000372	0,871	2343	327,37	66,6	10	
3B-327-B3		79,0	73,0	4904	0,000359	0,838	2336	339,83	69,3	10	

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, rikkiseos, uusi timanttiterä											Liite 11 (11/15)
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
3A-318-B1		79,3	83,9	4939	0,000392	0,912	2328	297,06	60,1	10		
3A-318-B2		79,3	83,8	4939	0,000391	0,909	2326	285,00	57,7	10		
3A-318-B3		79,3	83,1	4941	0,000391	0,915	2341	282,33	57,1	10		
3A-319-B1		79,3	83,2	4935	0,000391	0,913	2336	281,49	57,0	10		
3A-319-B2		79,3	83,2	4939	0,000392	0,906	2313	277,44	56,2	10		
3A-319-B3		79,3	83,2	4939	0,000390	0,915	2347	247,67	50,1	10		
3B-319-B1		79,3	84,2	4939	0,000395	0,927	2348	293,17	59,4	10		
3B-319-B2		79,3	83,7	4937	0,000391	0,908	2324	290,86	58,9	10		
3B-319-B3		79,3	83,2	4937	0,000392	0,918	2343	245,83	49,8	10		
3B-320-B1		79,3	83,7	4941	0,000392	0,918	2343	295,29	59,8	10		
3B-320-B2		79,3	83,1	4939	0,000390	0,911	2337	270,42	54,8	10		
3B-320-B3		79,3	83,8	4939	0,000387	0,911	2355	246,28	49,9	10		

Betoni-laatu C50/60, P50 Rakennekoekappale D50x50, hionta, uusi timanttiterä Liite 11 (12/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
3A-330-A1	51,4	46,0	2074	0,000095	0,224	2353	133,35	64,3	10
3A-330-A2	51,4	46,3	2074	0,000096	0,224	2329	115,01	55,5	10
3A-330-A3	51,4	46,6	2075	0,000096	0,225	2339	131,88	63,6	10
3A-330-A4	51,4	46,3	2075	0,000095	0,224	2353	101,01	48,7	10
3A-302-A1	51,4	46,9	2075	0,000095	0,228	2395	142,48	68,7	10
3A-302-A2	51,3	46,7	2067	0,000095	0,228	2395	154,67	74,8	10
3A-302-A3	51,4	47,7	2072	0,000099	0,231	2329	143,27	69,1	10
3A-302-A4	51,3	48,0	2070	0,000098	0,234	2383	154,97	74,9	10
3A-303-A1	51,4	46,3	2071	0,000095	0,226	2374	152,34	73,6	10
3A-303-A2	51,3	46,3	2067	0,000095	0,224	2353	141,20	68,3	12
3A-303-A3	51,5	47,8	2079	0,000099	0,230	2319	138,26	66,5	12
3A-303-A4	51,4	47,9	2071	0,000098	0,231	2352	103,96	50,2	10
3B-302-A1	51,4	47,7	2071	0,000097	0,233	2397	134,09	64,7	10
3B-302-A2	51,3	47,9	2070	0,000098	0,231	2352	140,52	67,9	10
3B-302-A3	51,4	47,9	2074	0,000099	0,228	2298	143,21	69,1	12
3B-302-A4	51,4	48,0	2072	0,000099	0,235	2369	155,46	75,0	10
3B-303-A1	51,5	45,8	2084	0,000095	0,223	2343	151,91	72,9	10
3B-303-A2	51,5	45,5	2079	0,000093	0,221	2372	148,59	71,5	10
3B-303-A3	51,4	49,4	2075	0,000101	0,239	2362	137,40	66,2	10
3B-303-A4	51,4	49,2	2071	0,000101	0,240	2371	101,07	48,8	10
3B-304-A1	51,6	49,5	2090	0,000103	0,242	2345	137,50	65,8	10
3B-304-A2	51,5	49,3	2086	0,000102	0,240	2348	152,15	72,9	10
3B-304-A3	51,5	45,7	2083	0,000094	0,224	2378	151,84	72,9	10
3B-304-A4	51,5	45,8	2083	0,000094	0,225	2389	144,61	69,4	10

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 11 (13/15)
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
3A-323-A1		48,8	48,4	1870	0,000089	0,212	2377	97,90	52,3	10	
3A-323-A2		48,9	48,6	1874	0,000090	0,211	2340	111,62	59,6	10	
3A-323-A3		48,8	48,5	1873	0,000089	0,212	2377	124,43	66,4	10	
3A-323-A4		48,9	48,4	1875	0,000090	0,213	2362	52,75	28,1	10	
3A-324-A1		48,8	46,9	1867	0,000086	0,205	2379	75,36	40,4	10	
3A-324-A2		48,8	47,0	1869	0,000087	0,202	2317	104,02	55,7	10	
3A-324-A3		48,8	47,2	1872	0,000087	0,198	2271	87,64	46,8	10	
3A-324-A4		48,9	47,1	1877	0,000087	0,199	2283	85,87	45,8	10	
3B-324-A1		48,9	48,3	1874	0,000090	0,212	2351	90,60	48,3	10	
3B-324-A2		48,9	48,7	1877	0,000091	0,214	2347	72,30	38,5	10	
3B-324-A3		48,9	48,5	1877	0,000089	0,211	2366	107,42	57,2	10	
3B-324-A4		48,9	48,6	1875	0,000091	0,212	2325	94,49	50,4	10	
3B-325-A1		48,8	48,6	1872	0,000089	0,212	2377	108,25	57,8	10	
3B-325-A2		48,8	48,2	1872	0,000088	0,208	2359	57,97	31,0	10	
3B-325-A3		48,7	48,4	1859	0,000088	0,207	2348	123,99	66,7	10	
3B-325-A4		48,9	48,6	1877	0,000089	0,213	2388	69,19	36,9	10	

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, rikkiäis, uusi timanttiterä										Liite 11 (14/15)
	Betoni laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
3A-316-A1		51,3	53,9	2067	0,000100	0,238	2375	112,87	54,6	10	
3A-316-A2		51,3	55,4	2067	0,000102	0,239	2338	109,75	53,1	10	
3A-316-A3		51,3	55,0	2066	0,000102	0,239	2338	119,98	58,1	10	
3A-316-A4		51,3	55,1	2070	0,000102	0,235	2299	123,96	59,9	10	
3A-317-A1		51,4	54,6	2071	0,000103	0,244	2364	107,31	51,8	10	
3A-317-A2		51,3	53,6	2068	0,000101	0,237	2342	112,62	54,5	10	
3A-317-A3		51,3	54,4	2068	0,000102	0,237	2319	113,75	55,0	10	
3A-317-A4		51,3	53,8	2067	0,000101	0,235	2322	117,37	56,8	10	
3B-317-A1		51,3	54,5	2067	0,000102	0,243	2378	112,43	54,4	10	
3B-317-A2		51,3	54,1	2066	0,000101	0,237	2342	61,31	29,7	10	
3B-317-A3		51,4	55,4	2071	0,000102	0,239	2338	110,60	53,4	10	
3B-317-A4		51,4	53,9	2074	0,000100	0,236	2355	95,46	46,0	10	
3B-318-A1		51,4	55,1	2074	0,000102	0,24	2348	112,69	54,3	10	
3B-318-A2		51,4	53,6	2075	0,000101	0,238	2352	115,02	55,4	10	
3B-318-A3		51,4	54,0	2075	0,000101	0,237	2342	116,51	56,1	10	
3B-318-A4		51,4	56,3	2074	0,000101	0,238	2352	57,84	27,9	10	

Betoni laatu C50/60, P50 Standardikuutio 150x150x150 Liite 11 (15/15)

Näyte	Sivumitta $x_m$ [mm]	Sivumitta $y_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Korkeus $h_m$ [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Teräsmuoteilla valettu										
3A-501	149,9	149,8	22463	150,7	0,00336	7,861	2340	1305,19	58,1	2
3A-502	149,2	150,3	22425	150,3	0,00337	7,885	2340	1538,75	68,6	3
3A-503	149,5	150,4	22480	150,5	0,00337	7,938	2356	1462,01	65,0	2
3B-501	149,2	150,2	22402	150,1	0,00336	7,892	2350	1490,27	66,5	2
3B-502	150,0	149,9	22487	150,5	0,00337	7,909	2349	1514,83	67,4	2
3B-504	149,5	149,8	22400	150,6	0,00337	7,933	2352	1490,19	66,5	2
Muovimuoteilla valettu										
3A-601	150,4	149,9	22535	149,9	0,00339	7,991	2358	1417,40	62,9	2
3A-602	150,3	149,8	22512	149,9	0,00338	7,914	2342	1434,79	63,7	2
3A-603	149,9	149,9	22455	149,8	0,00338	7,938	2351	1448,85	64,5	2
3B-601	150,3	149,8	22512	149,9	0,00338	7,949	2351	1453,20	64,6	2
3B-602	151,2	149,8	22650	149,8	0,00340	7,958	2338	1442,19	63,7	2
3B-603	150,1	149,7	22480	149,7	0,00338	7,935	2350	1473,29	65,5	2

Näyte	Standardilieriö D150x300, vedellä kylästetty										Liite 12 (1/15)
	Betonilaatu C35/45	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
4A-118		149,9	294,7	17636	0,00530	12,573	2372	780,33	44,2	11	
4A-119		149,9	294,6	17648	0,00531	12,548	2364	791,14	44,8	11	
4A-120		149,8	294,4	17613	0,00531	12,621	2375	784,29	44,5	10	
4A-121		150,2	287,7	17723	0,00526	12,413	2359	761,54	43,0	10	
4A-122		148,9	292,6	17405	0,00524	12,327	2353	750,54	43,1	11	
4A-123		149,6	291,0	17566	0,00526	12,469	2371	797,00	45,4	11	
4A-124		149,6	294,5	17585	0,00532	12,583	2366	760,88	43,3	10	
4A-125		149,5	293,4	17554	0,00528	12,521	2370	751,41	42,8	11	
4A-126		149,9	293,4	17644	0,00532	12,509	2352	762,47	43,2	11	
4B-118		150,3	290,6	17742	0,00528	12,453	2357	893,72	50,4	11	
4B-119		149,8	295,2	17620	0,00532	12,540	2358	890,77	50,6	10	
4B-120		149,5	293,5	17546	0,00529	12,514	2364	892,40	50,9	10	
4B-121		148,3	290,1	17269	0,00516	12,175	2362	894,42	51,8	11	
4B-122		149,7	296,3	17605	0,00537	12,706	2367	906,70	51,5	10	
4B-123		149,5	295,0	17542	0,00530	12,534	2366	886,35	50,5	11	
4B-124		148,8	294,9	17390	0,00518	12,404	2395	894,21	51,4	10	
4B-125		149,2	295,5	17483	0,00529	12,474	2359	908,23	51,9	11	
4B-126		149,6	293,7	17570	0,00530	12,516	2363	898,83	51,2	10	

Näyte	Standardilieriö D150x300, kuiva											Liite 12 (2/15)
	Betonilaatu C35/45	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorimituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
4A-127		150,0	291,4	17671	0,00528	12,529	2372	840,19	47,5	10		
4A-128		150,0	291,3	17664	0,00525	12,369	2358	827,58	46,9	10		
4A-129		150,4	291,2	17754	0,00532	12,553	2360	832,41	46,9	11		
4A-130		149,9	294,7	17652	0,00532	12,586	2366	836,03	47,4	11		
4A-131		149,4	292,2	17526	0,00526	12,457	2366	829,08	47,3	10		
4A-132		148,8	292,2	17398	0,00522	12,353	2365	822,95	47,3	10		
4B-127		150,0	291,7	17675	0,00533	12,594	2362	947,47	53,6	11		
4B-128		149,5	294,7	17554	0,00532	12,552	2360	932,93	53,1	10		
4B-129		148,9	294,2	17409	0,00525	12,415	2365	921,33	52,9	11		
4B-130		149,7	296,2	17605	0,00534	12,570	2353	894,95	50,8	11		
4B-131		149,8	296,5	17617	0,00537	12,674	2359	986,37	56,0	11		
4B-132		150,7	295,3	17829	0,00542	12,792	2359	974,98	54,7	10		



Betoni-laatu C35/45

Rakennekoekappale D150x300

Liite 12 (3/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-401	153,3	301,0	18450	0,00559	13,146	2352	788,74	42,8	12
4A-402	153,3	304,5	18454	0,00565	13,277	2349	795,55	43,1	12
4A-403	153,4	298,8	18470	0,00555	13,026	2349	803,69	43,5	12
4A-404	153,3	300,8	18466	0,00559	13,103	2343	791,85	42,9	12
4A-405	153,3	302,9	18462	0,00563	13,246	2353	798,82	43,3	12
4A-406	153,3	301,8	18458	0,00561	13,195	2352	803,62	43,5	12
4A-407	153,3	300,3	18446	0,00558	13,109	2348	797,51	43,2	12
4A-408	153,3	304,1	18446	0,00565	13,270	2349	796,74	43,2	12
4A-409	153,2	299,8	18442	0,00557	13,065	2345	793,67	43,0	12
4A-410	153,3	300,3	18450	0,00558	13,136	2353	775,52	42,0	10
4A-411	153,2	300,5	18425	0,00559	13,121	2349	791,66	43,0	10
4A-412	153,2	301,1	18433	0,00560	13,165	2351	809,80	43,9	11
4B-401	153,2	301,9	18425	0,00561	13,164	2347	950,78	51,6	11
4B-402	153,1	305,3	18413	0,00567	13,277	2341	902,18	49,0	11
4B-403	153,2	304,4	18429	0,00565	13,275	2348	929,74	50,4	11
4B-404	153,1	300,0	18413	0,00557	13,042	2341	928,78	50,4	11
4B-405	153,3	304,9	18450	0,00566	13,272	2343	904,24	49,0	11
4B-406	153,1	300,9	18417	0,00559	13,112	2344	891,81	48,4	11
4B-407	153,2	303,4	18425	0,00564	13,207	2343	907,99	49,3	11
4B-408	153,1	303,9	18413	0,00565	13,262	2349	886,57	48,1	11
4B-409	153,2	301,4	18433	0,00560	13,102	2340	900,99	48,9	11
4B-410	153,1	302,2	18417	0,00561	13,183	2349	899,55	48,8	11
4B-411	153,2	304,7	18433	0,00566	13,278	2346	933,09	50,6	10
4B-412	153,2	301,2	18421	0,00560	13,133	2347	878,12	47,7	11

Betoni-laatu C35/45

Valettu koekappale D100x100

Liite 12 (4/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-201	102,6	98,6	8268	0,000859	2,047	2384	546,98	66,2	10
4A-202	102,5	99,5	8254	0,000862	2,051	2380	539,98	65,4	10
4A-203	102,8	98,2	8297	0,000853	2,037	2389	569,61	68,7	10
4A-204	102,5	99,7	8244	0,000861	2,057	2390	552,77	67,1	10
4A-205	102,6	99,1	8273	0,000857	2,056	2400	587,25	71,0	10
4A-206	102,6	101,6	8265	0,000869	2,062	2374	532,90	64,5	10
4A-207	102,6	100,2	8260	0,000860	2,067	2404	561,87	68,0	10
4B-201	102,6	99,1	8262	0,000853	2,039	2391	590,91	71,5	10
4B-202	102,5	98,2	8246	0,000854	2,041	2391	603,06	73,1	10
4B-203	102,6	97,6	8265	0,000852	2,037	2392	628,80	76,1	10
4B-204	102,5	99,7	8252	0,000859	2,043	2379	585,06	70,9	10
4B-205	102,3	99,9	8222	0,000856	2,047	2392	599,84	73,0	10
4B-206	102,6	99,0	8273	0,000863	2,061	2389	606,96	73,4	10
4B-207	102,7	98,8	8281	0,000857	2,052	2395	595,81	71,9	10

Betoni-laatu C35/45

Rakennekoekappale D100x100, hionta, uusi timanttiterä

Liite 12 (5/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorimituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-310-C1	99,1	97,9	7716	0,000757	1,788	2363	445,08	57,7	12
4A-310-C2	99,1	102,4	7705	0,000793	1,866	2354	457,93	59,4	12
4A-311-C1	99,1	98,2	7705	0,000760	1,793	2361	436,45	56,6	10
4A-311-C2	99,0	100,1	7700	0,000775	1,826	2358	461,61	59,9	10
4A-312-C1	99,1	98,5	7705	0,000762	1,798	2361	438,23	56,9	10
4A-312-C2	99,1	97,6	7713	0,000756	1,783	2360	470,35	61,0	10
4A-313-C1	99,0	97,0	7700	0,000749	1,771	2363	452,61	58,8	10
4A-313-C2	99,1	97,2	7708	0,000753	1,775	2359	472,31	61,3	10
4A-314-C1	98,9	97,9	7687	0,000757	1,786	2361	435,87	56,7	10
4A-314-C2	99,0	100,7	7700	0,000780	1,832	2350	450,63	58,5	10
4A-315-C1	99,1	97,9	7708	0,000757	1,788	2363	449,05	58,3	10
4A-315-C2	99,0	98,8	7703	0,000765	1,796	2349	463,34	60,2	10
4B-310-C1	99,1	93,7	7708	0,000723	1,705	2357	508,71	66,0	10
4B-310-C2	99,1	95,4	7716	0,000736	1,728	2346	519,05	67,3	10
4B-311-C1	99,0	96,0	7700	0,000742	1,748	2354	492,48	64,0	10
4B-311-C2	99,1	96,0	7705	0,000741	1,745	2353	529,70	68,7	10
4B-312-C1	99,1	93,7	7716	0,000725	1,707	2353	501,97	65,1	10
4B-312-C2	99,1	97,6	7716	0,000754	1,772	2352	525,44	68,1	10
4B-313-C1	99,1	95,3	7708	0,000736	1,734	2354	498,23	64,6	10
4B-313-C2	99,1	94,9	7711	0,000734	1,723	2346	520,93	67,6	10
4B-314-C1	99,0	95,6	7698	0,000740	1,742	2353	493,21	64,1	10
4B-314-C2	99,0	96,7	7700	0,000748	1,755	2345	527,72	68,5	10
4B-315-C1	99,0	95,4	7700	0,000738	1,735	2349	506,50	65,8	10
4B-315-C2	99,1	95,7	7705	0,000740	1,737	2346	523,64	68,0	10

Betoni-laatu C35/45

Rakennekoekappale D100x100, hionta, kulunut timantititerä

Liite 12 (6/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-328-C1	98,5	97,4	7620	0,000744	1,749	2349	421,26	55,3	10
4A-328-C2	98,4	98,1	7602	0,000748	1,760	2351	430,76	56,7	10
4A-329-C1	98,5	98,1	7615	0,000749	1,770	2362	422,86	55,5	10
4A-329-C2	98,5	99,9	7612	0,000763	1,791	2349	432,72	56,8	10
4A-330-C1	98,4	97,4	7610	0,000744	1,753	2355	423,10	55,6	10
4A-330-C2	98,5	99,9	7618	0,000764	1,787	2340	423,84	55,6	10
4B-329-C1	98,5	100,6	7620	0,000768	1,803	2349	478,53	62,8	10
4B-329-C2	98,5	99,7	7623	0,000762	1,778	2335	479,76	62,9	10
4B-330-C1	98,4	98,7	7602	0,000754	1,765	2342	469,39	61,7	10
4B-330-C2	98,5	99,7	7612	0,000759	1,776	2341	475,43	62,5	10
4B-331-C1	98,4	101,0	7610	0,000771	1,809	2348	464,38	61,0	10
4B-331-C2	98,4	99,5	7607	0,000759	1,772	2336	491,81	64,7	10

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, rikkiseos, uusi timanttiterä										Liite 12 (7/15)
	Betoni-laatu C35/45	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
4A-321-C1		99,2	103,7	7726	0,000776	1,818	2344	410,03	53,1	10	
4A-321-C2		99,2	105,4	7724	0,000778	1,823	2345	382,50	49,5	10	
4A-322-C1		99,2	103,6	7734	0,000774	1,814	2345	409,87	53,0	10	
4A-322-C2		99,2	104,5	7734	0,000782	1,831	2343	411,81	53,2	10	
4A-323-C1		99,2	104,0	7726	0,000772	1,816	2354	391,82	50,7	10	
4A-323-C2		99,2	105,5	7729	0,000781	1,838	2355	407,74	52,8	10	
4B-321-C1		99,3	104,9	7739	0,000778	1,822	2343	456,54	59,0	10	
4B-321-C2		99,3	104,9	7744	0,000780	1,824	2340	457,73	59,1	10	
4B-323-C1		98,8	103,5	7659	0,000771	1,794	2328	436,57	57,0	10	
4B-323-C2		98,8	104,2	7661	0,000769	1,791	2330	435,48	56,8	10	
4B-324-C1		98,8	104,2	7661	0,000771	1,806	2344	443,73	57,9	10	
4B-324-C2		98,8	105,9	7664	0,000771	1,800	2336	431,42	56,3	10	

Betoni-laatu C35/45 Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timanttiterä Liite 12 (8/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-304-B1	79,2	80,3	4929	0,000396	0,940	2375	276,08	56,0	10
4A-304-B2	79,3	80,3	4933	0,000397	0,935	2356	292,56	59,3	10
4A-304-B3	79,2	81,5	4929	0,000403	0,954	2368	320,33	65,0	10
4A-305-B1	79,2	78,8	4929	0,000389	0,920	2366	277,79	56,4	10
4A-305-B2	79,3	81,4	4937	0,000401	0,942	2350	283,55	57,4	10
4A-305-B3	79,3	80,8	4933	0,000398	0,943	2371	312,48	63,3	10
4A-306-B1	78,9	79,3	4893	0,000387	0,913	2361	285,94	58,4	10
4A-306-B2	79,1	79,5	4918	0,000392	0,921	2351	284,68	57,9	10
4A-306-B3	79,2	81,1	4920	0,000400	0,945	2364	265,48	54,0	10
4A-307-B1	79,2	80,2	4922	0,000395	0,929	2353	279,91	56,9	10
4A-307-B2	79,2	79,1	4927	0,000389	0,914	2351	293,55	59,6	10
4A-307-B3	79,2	80,1	4929	0,000395	0,934	2366	307,27	62,3	10
4A-308-B1	79,2	81,3	4929	0,000400	0,941	2354	284,17	57,7	10
4A-308-B2	79,2	79,6	4927	0,000391	0,925	2367	293,79	59,6	10
4A-308-B3	79,2	81,1	4927	0,000400	0,946	2366	307,78	62,5	10
4A-309-B1	79,2	78,5	4927	0,000388	0,907	2339	289,33	58,7	10
4A-309-B2	79,2	78,3	4929	0,000385	0,911	2368	298,39	60,5	10
4A-309-B3	79,3	80,8	4939	0,000399	0,944	2367	308,33	62,4	10
4B-304-B1	79,2	79,0	4931	0,000390	0,917	2353	309,73	62,8	10
4B-304-B2	79,2	79,7	4929	0,000393	0,923	2350	326,80	66,3	10
4B-304-B3	79,2	80,4	4927	0,000396	0,931	2352	337,42	68,5	10
4B-305-B1	79,3	80,2	4935	0,000397	0,932	2349	308,39	62,5	10
4B-305-B2	79,3	79,1	4935	0,000390	0,919	2358	332,35	67,3	10
4B-305-B3	79,3	80,1	4937	0,000395	0,929	2353	332,91	67,4	10
4B-306-B1	79,3	78,8	4933	0,000388	0,920	2373	329,97	66,9	10

Betonilaatu C35/45 Rakennekoekappale D80x80, hionta, uusi timantiterä Liite 12 (9/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4B-306-B2	79,2	79,3	4931	0,000390	0,916	2350	326,29	66,2	10
4B-306-B3	79,3	79,9	4933	0,000394	0,932	2367	339,03	68,7	10
4B-307-B1	79,2	77,9	4929	0,000384	0,903	2353	320,40	65,0	10
4B-307-B2	79,2	79,8	4927	0,000393	0,923	2350	330,69	67,1	10
4B-307-B3	79,2	79,7	4929	0,000393	0,921	2345	327,79	66,5	10
4B-308-B1	79,3	80,8	4933	0,000398	0,935	2350	311,86	63,2	10
4B-308-B2	79,3	82,4	4937	0,000407	0,957	2352	331,73	67,2	10
4B-308-B3	79,3	78,6	4937	0,000388	0,916	2362	357,98	72,5	10
4B-309-B1	79,3	81,8	4937	0,000404	0,955	2365	296,65	60,1	10
4B-309-B2	79,3	79,9	4937	0,000393	0,923	2350	324,05	65,6	10
4B-309-B3	79,3	81,9	4939	0,000404	0,954	2363	349,48	70,8	10

Näyte	Rakennekoekappale D80x80, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 12 (10/15)
	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
4A-326-B1	79,0	79,8	4902	0,000391	0,924	2364	274,81	56,1	10		
4A-326-B2	79,0	80,8	4904	0,000395	0,928	2351	274,92	56,1	10		
4A-326-B3	79,1	81,0	4914	0,000396	0,937	2367	299,73	61,0	10		
4A-327-B1	79,1	79,1	4914	0,000388	0,910	2347	262,62	53,4	10		
4A-327-B2	79,1	79,9	4910	0,000392	0,918	2343	269,52	54,9	10		
4A-327-B3	79,1	82,2	4916	0,000403	0,949	2356	288,57	58,7	10		
4B-327-B1	79,0	79,7	4906	0,000390	0,912	2340	296,97	60,5	10		
4B-327-B2	79,0	79,9	4902	0,000390	0,913	2342	309,57	63,2	10		
4B-327-B3	79,0	81,0	4902	0,000396	0,927	2342	311,38	63,5	10		
4B-328-B1	79,0	81,2	4895	0,000394	0,930	2362	295,45	60,4	10		
4B-328-B2	79,0	79,7	4902	0,000389	0,907	2333	308,69	63,0	10		
4B-328-B3	79,1	80,8	4908	0,000394	0,929	2359	334,24	68,1	10		



Betonilaatu C35/45 Rakennekoeokappale D80x80, rikkiseos, uusi timanttiterä Liite 12 (11/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-319-B1	79,3	83,7	4939	0,000392	0,922	2353	267,86	54,2	10
4A-319-B2	79,3	83,0	4939	0,000389	0,913	2348	257,45	52,1	10
4A-319-B3	79,3	81,9	4939	0,000386	0,912	2364	256,69	52,0	10
4A-320-B1	79,3	83,5	4937	0,000392	0,922	2353	262,35	53,1	10
4A-320-B2	79,3	83,1	4933	0,000391	0,924	2364	269,28	54,6	10
4A-320-B3	79,3	82,9	4937	0,000381	0,901	2366	259,09	52,5	10
4B-319-B1	79,3	83,8	4939	0,000396	0,927	2342	302,57	61,3	10
4B-319-B2	79,3	82,4	4941	0,000384	0,893	2327	282,43	57,2	10
4B-319-B3	79,3	83,5	4941	0,000386	0,913	2367	282,63	57,2	10
4B-320-B1	79,3	83,0	4937	0,000389	0,911	2343	301,06	61,0	10
4B-320-B2	79,3	84,0	4939	0,000389	0,906	2330	269,48	54,6	10
4B-320-B3	79,3	82,8	4939	0,000388	0,907	2339	279,62	56,6	10

Betoni-laatu C35/45 Rakennekoekappale D50x50, hionta, uusi timanttiterä Liite 12 (12/15)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
4A-301-A1	51,0	49,5	2044	0,000101	0,240	2371	126,81	62,0	10
4A-301-A2	51,0	49,4	2039	0,000101	0,238	2352	126,68	62,1	10
4A-301-A3	51,0	49,6	2043	0,000101	0,240	2371	135,82	66,5	10
4A-301-A4	51,0	49,4	2043	0,000101	0,238	2352	138,30	67,7	10
4A-302-A1	51,0	50,1	2044	0,000102	0,238	2329	126,27	61,8	10
4A-302-A2	51,1	50,2	2047	0,000102	0,241	2358	127,96	62,5	10
4A-302-A3	51,1	50,4	2047	0,000103	0,242	2345	130,14	63,6	10
4A-302-A4	51,0	50,1	2041	0,000102	0,241	2358	133,80	65,5	10
4A-303-A1	51,1	49,9	2051	0,000102	0,241	2358	114,54	55,9	10
4A-303-A2	51,1	49,8	2051	0,000101	0,238	2352	118,35	57,7	10
4A-303-A3	51,1	49,9	2051	0,000102	0,239	2338	106,68	52,0	10
4A-303-A4	51,1	49,9	2050	0,000102	0,242	2368	137,95	67,3	10
4B-301-A1	51,0	50,9	2044	0,000104	0,244	2341	134,67	65,9	10
4B-301-A2	51,1	50,9	2050	0,000104	0,243	2332	146,94	71,7	10
4B-301-A3	51,1	51,1	2048	0,000104	0,243	2332	150,69	73,6	10
4B-301-A4	51,1	50,9	2050	0,000104	0,245	2351	149,68	73,0	10
4B-302-A1	51,1	51,0	2047	0,000104	0,248	2380	137,98	67,4	10
4B-302-A2	51,1	51,1	2047	0,000103	0,246	2384	140,84	68,8	10
4B-302-A3	51,1	50,9	2048	0,000104	0,244	2341	149,18	72,8	10
4B-302-A4	51,1	51,2	2051	0,000104	0,245	2351	146,76	71,6	10
4B-303-A1	51,0	49,9	2043	0,000101	0,239	2362	136,71	66,9	10
4B-303-A2	51,0	50,3	2043	0,000102	0,242	2368	147,70	72,3	10
4B-303-A3	51,0	50,3	2044	0,000102	0,242	2368	142,43	69,7	10
4B-303-A4	51,1	50,0	2050	0,000101	0,239	2362	153,49	74,9	10

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, hionta, kulunut timanttiterä										Liite 12 (13/15)
	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
4A-324-A1	48,9	51,3	1874	0,000095	0,224	2353	102,10	54,5	10		
4A-324-A2	49,0	51,2	1886	0,000096	0,229	2381	109,90	58,3	10		
4A-324-A3	49,2	51,1	1897	0,000096	0,226	2349	112,60	59,3	10		
4A-324-A4	49,1	51,4	1896	0,000097	0,229	2356	112,20	59,2	10		
4A-325-A1	49,3	48,8	1908	0,000092	0,219	2376	107,20	56,2	10		
4A-325-A2	49,2	49,1	1902	0,000093	0,220	2361	112,90	59,3	10		
4A-325-A3	49,2	49,0	1900	0,000092	0,218	2365	116,10	61,1	10		
4A-325-A4	49,2	49,2	1897	0,000092	0,219	2376	118,70	62,6	10		
4B-325-A1	49,2	50,9	1901	0,000096	0,227	2360	123,00	64,7	10		
4B-325-A2	49,2	50,8	1902	0,000095	0,221	2322	117,10	61,6	10		
4B-325-A3	49,2	50,9	1904	0,000095	0,224	2353	116,80	61,4	10		
4B-325-A4	49,2	50,6	1900	0,000095	0,225	2364	129,50	68,2	10		
4B-326-A1	49,2	50,7	1900	0,000094	0,222	2357	110,20	58,0	10		
4B-326-A2	49,3	50,4	1910	0,000094	0,221	2346	121,40	63,6	10		
4B-326-A3	49,3	50,3	1908	0,000095	0,220	2311	121,90	63,9	10		
4B-326-A4	49,2	50,4	1899	0,000096	0,224	2329	132,30	69,7	10		

Näyte	Rakennekoekappale D50x50, rikkinöös, uusi timanttiterä										Liite 12 (14/15)
	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa		
4A-317-A1	51,4	53,1	2071	0,000101	0,240	2371	86,15	41,6	10		
4A-317-A2	51,4	52,9	2074	0,000100	0,236	2355	101,92	49,2	10		
4A-317-A3	51,4	53,4	2074	0,000102	0,242	2368	92,60	44,7	10		
4A-317-A4	51,3	53,7	2067	0,000102	0,241	2358	99,79	48,3	10		
4A-318-A1	51,3	56,8	2063	0,000106	0,253	2382	97,68	47,4	10		
4A-318-A2	51,2	50,3	2062	0,000093	0,221	2372	113,36	55,0	10		
4A-318-A3	51,3	51,9	2066	0,000099	0,232	2339	104,26	50,5	10		
4A-318-A4	51,3	54,6	2068	0,000099	0,234	2359	103,87	50,2	10		
4B-317-A1	51,3	54,5	2068	0,000102	0,240	2348	108,19	52,3	10		
4B-317-A2	51,3	53,2	2070	0,000105	0,240	2281	110,14	53,2	10		
4B-317-A3	51,3	53,2	2064	0,000102	0,240	2348	116,45	56,4	10		
4B-317-A4	51,3	54,8	2068	0,000102	0,239	2338	116,68	56,4	10		
4B-318-A1	51,3	53,1	2066	0,000102	0,241	2358	117,60	56,9	10		
4B-318-A2	51,3	53,4	2066	0,000102	0,238	2329	120,77	58,5	10		
4B-318-A3	51,3	54,2	2067	0,000101	0,238	2352	120,62	58,4	10		
4B-318-A4	51,3	53,0	2067	0,000102	0,244	2387	106,55	51,6	10		

Betonilaatu C35/45

Standardikuutio 150x150x150

Liite 12 (15/15)

Näyte	Sivumitta $x_m$ [mm]	Sivumitta $y_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Korkeus $h_m$ [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa
Teräsmuoteilla valettu										
4A-501	150,4	149,9	22550	150,5	0,00336	7,967	2368	1369,22	60,7	2
4A-503	150,5	150,2	22598	150,5	0,00338	8,042	2379	1361,38	60,2	2
4A-504	149,9	150,1	22510	150,8	0,00337	8,016	2376	1395,56	62,0	2
4B-501	150,3	150,3	22588	150,8	0,00339	8,051	2373	1535,66	68,0	2
4B-503	150,5	150,7	22678	150,7	0,00339	7,999	2357	1516,69	66,9	2
4B-504	150,4	150,9	22698	150,5	0,00340	8,071	2376	1557,99	68,6	2
Muovimuoteilla valettu										
4A-601	150,3	150,0	22550	150,0	0,00338	8,034	2379	1290,85	57,2	2
4A-602	150,1	150,0	22505	150,0	0,00337	7,982	2365	1308,48	58,1	2
4A-603	151,3	150,0	22698	150,0	0,00340	8,051	2365	1310,33	57,7	2
4B-601	151,3	150,0	22700	150,1	0,00340	8,042	2365	1477,80	65,1	2
4B-602	151,2	150,1	22690	150,0	0,00340	8,055	2369	1486,54	65,5	2
4B-603	151,1	150,0	22663	150,0	0,00340	8,058	2373	1485,34	65,5	2

Näyte	Standardilieriö D150x300, vedellä kyllästetty										Liite 13 (1/3)
	Betonilaatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-132		150,2	297,3	17727	0,00528	12,319	2331	939,52	53,0	10	
1A-133		150,6	296,9	17808	0,00530	12,268	2315	947,07	53,2	4	
1B-133		150,5	296,4	17780	0,00527	12,246	2322	927,04	52,1	11	
1B-134		150,0	297,4	17672	0,00527	12,092	2293	797,10	45,1	14	

Näyte	Rakennekoekappale D100x100, hionta, uusi timanttiterä										Liite 13 (2/3)
	Betoni laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuormituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-333-C1		99,3	100,9	7745	0,00078	1,782	2286	497,86	64,3	11	
1A-333-C2		99,3	102,3	7741	0,00079	1,822	2302	506,51	65,4	11	
1A-334-C1		99,3	100,8	7742	0,00078	1,770	2279	469,05	60,6	11	
1A-334-C2		99,3	100,9	7745	0,00078	1,778	2284	504,08	65,1	11	
1A-335-C1		99,3	100,4	7742	0,00078	1,761	2271	442,54	57,2	11	
1A-335-C2		99,3	99,9	7744	0,00077	1,766	2289	495,14	63,9	11	
1B-333-C1		99,3	98,8	7741	0,00076	1,709	2238	399,87	51,7	11	
1B-333-C2		99,3	98,8	7743	0,00076	1,745	2282	467,06	60,3	11	
1B-334-C1		99,3	98,9	7741	0,00077	1,745	2276	459,26	59,3	11	
1B-334-C2		99,3	101,4	7743	0,00078	1,810	2307	507,34	65,5	11	
1B-335-C1		99,3	102,7	7742	0,00079	1,808	2278	451,44	58,3	11	
1B-335-C2		99,3	101,6	7744	0,00078	1,809	2306	503,75	65,0	11	

Näyte	Rakennekoekappale D100x200, hionta, uusi timanttiterä										Liite 13 (3/3)
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus $h_m$ [mm]	Kuorituspinta-ala $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Murtokuorma $F$ [kN]	Puristuslujuus $f_c$ [MPa]	Murtotapa	
1A-336		99,3	200,7	7742	0,00155	3,557	2289	429,38	55,5	11	
1A-337		99,3	199,8	7740	0,00155	3,543	2293	420,32	54,3	11	
1A-338		99,3	200,7	7743	0,00155	3,555	2289	415,32	53,6	11	
1A-339		99,3	200,3	7742	0,00155	3,534	2280	409,68	52,9	11	
1A-340		99,3	200,8	7743	0,00155	3,527	2271	397,90	51,4	11	
1A-341		99,3	199,8	7742	0,00155	3,544	2291	438,19	56,6	11	
1B-332		99,3	200,7	7743	0,00155	3,561	2291	404,31	52,2	10	
1B-336		99,3	201,8	7742	0,00156	3,545	2269	364,98	47,1	9	
1B-337		99,3	197,8	7743	0,00153	3,494	2287	389,32	50,3	12	
1B-338		99,3	199,7	7740	0,00155	3,523	2279	393,93	50,9	10	
1B-339		99,3	200,7	7745	0,00155	3,521	2267	362,48	46,8	10	
1B-340		99,3	199,3	7743	0,00154	3,503	2273	394,70	51,0	11	



Näyte	Valulieriö D150x300, tiheystutkimus, vaakasuuntaiset tiheydet						Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Betoni-laatu C35/45, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus yläpinnasta [mm]	Säde lierion ulkopinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]		Massa $m$ [kg]
1B-330-1A		51		0...25	0,0000862	0,197	0,190	2286
1B-330-1B		51	50	25...50	0,0000892	0,206	0,201	2310
1B-330-1C		51		50...75	0,0000922	0,213	0,207	2311
1B-330-2A		51		0...25	0,0000872	0,202	0,195	2317
1B-330-2B		51	150	25...50	0,0000912	0,212	0,206	2325
1B-330-2C		51		50...75	0,0000892	0,206	0,201	2310
1B-330-3A		51		0...25	0,0000842	0,198	0,191	2352
1B-330-3B		51	250	25...50	0,0000932	0,219	0,213	2350
1B-330-3C		51		50...75	0,0000882	0,208	0,203	2359
1B-331-1A		51		0...25	0,0000872	0,201	0,194	2306
1B-331-1B		51	50	25...50	0,0000902	0,213	0,207	2362
1B-331-1C		51		50...75	0,0000872	0,201	0,196	2306
1B-331-2A		51		0...25	0,0000872	0,205	0,198	2352
1B-331-2B		51	150	25...50	0,0000912	0,211	0,204	2314
1B-331-2C		51		50...75	0,0000902	0,205	0,200	2273
1B-331-3A		51		0...25	0,0000862	0,203	0,197	2356
1B-331-3B		51	250	25...50	0,0000932	0,218	0,212	2339
1B-331-3C		51		50...75	0,0000892	0,208	0,203	2332

Liite 14 (1/4)

Näyte	Valulieriö D150x300, tiheystutkimus, vaakasuuntaiset tiheydet						Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Betoni-laatu C30/37, P20	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus yläpinnasta [mm]	Säde lierion ulkopinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]		Massa $m$ [kg]
2B-344-1A		51		0...25	0,0000882	0,201	0,192	2280
2B-344-1B		51	50	25...50	0,0000932	0,218	0,212	2339
2B-344-1C		51		50...75	0,0000892	0,208	0,201	2332
2B-344-2A		51		0...25	0,0000852	0,201	0,194	2360
2B-344-2B		51	150	25...50	0,0000892	0,209	0,202	2344
2B-344-2C		51		50...75	0,0000902	0,209	0,204	2318
2B-344-3A		51		0...25	0,0000892	0,209	0,201	2344
2B-344-3B		51	250	25...50	0,0000912	0,214	0,208	2347
2B-344-3C		51		50...75	0,0000892	0,211	0,206	2366
2B-345-1A		51		0...25	0,0000832	0,198	0,190	2381
2B-345-1B		51	50	25...50	0,0000912	0,215	0,208	2358
2B-345-1C		51		50...75	0,0000862	0,204	0,198	2367
2B-345-2A		51		0...25	0,0000852	0,199	0,192	2336
2B-345-2B		51	150	25...50	0,0000932	0,217	0,210	2329
2B-345-2C		51		50...75	0,0000872	0,201	0,194	2306
2B-345-3A		51		0...25	0,0000862	0,200	0,193	2321
2B-345-3B		51	250	25...50	0,0000892	0,211	0,205	2366
2B-345-3C		51		50...75	0,0000902	0,210	0,202	2329

Liite 14 (2/4)

Näyte	Valulieriö D150x300, tiheystutkimus, vaakasuuntaiset tiheydet						Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
	Betoni-laatu C50/60, P50	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus yläpinnasta [mm]	Säde lierion ulkopinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	
3B-331-1A		51	0...25	0,0000882	0,203	0,193	2302
3B-331-1B		51	50	0,0000932	0,217	0,210	2329
3B-331-1C		51	50...75	0,0000862	0,201	0,194	2333
3B-331-2A		51	0...25	0,0000892	0,212	0,204	2377
3B-331-2B		51	150	0,0000882	0,208	0,203	2359
3B-331-2C		51	50...75	0,0000912	0,213	0,208	2336
3B-331-3A		51	0...25	0,0000892	0,211	0,204	2366
3B-331-3B		51	250	0,0000882	0,209	0,202	2370
3B-331-3C		51	50...75	0,0000892	0,214	0,208	2400
3B-332-1A		51	0...25	0,0000862	0,200	0,192	2321
3B-332-1B		51	50	0,0000932	0,216	0,209	2318
3B-332-1C		51	50...75	0,0000842	0,194	0,187	2305
3B-332-2A		51	0...25	0,0000872	0,202	0,194	2317
3B-332-2B		51	150	0,0000902	0,209	0,201	2318
3B-332-2C		51	50...75	0,0000912	0,214	0,208	2347
3B-332-3A		51	0...25	0,0000912	0,216	0,209	2369
3B-332-3B		51	250	0,0000912	0,216	0,210	2369
3B-332-3C		51	50...75	0,0000892	0,211	0,206	2366

Liite 14 (3/4)

Betoniilaatu C35/45 Valulieriö D150x300, tiheystutkimus, vaakasuuntaiset tiheydet Liite 14 (4/4)

Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Korkeus yläpinnasta [mm]	Säde lierion ulkopinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Massa $m$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
4B-316-1A	51	0...25	0,0000882	0,210	0,202	2382	
4B-316-1B	51	50	0,0000902	0,217	0,208	2406	
4B-316-1C	51	50...75	0,0000852	0,200	0,194	2348	
4B-316-2A	51	0...25	0,0000862	0,204	0,196	2367	
4B-316-2B	51	150	0,0000922	0,219	0,212	2376	
4B-316-2C	51	50...75	0,0000862	0,204	0,199	2367	
4B-316-3A	51	0...25	0,0000882	0,209	0,202	2370	
4B-316-3B	51	250	0,0000922	0,221	0,214	2397	
4B-316-3C	51	50...75	0,0000882	0,207	0,200	2348	
4B-332-1A	51	0...25	0,0000882	0,210	0,202	2382	
4B-332-1B	51	50	0,0000922	0,218	0,210	2365	
4B-332-1C	51	50...75	0,0000822	0,195	0,189	2373	
4B-332-2A	51	0...25	0,0000872	0,205	0,197	2352	
4B-332-2B	51	150	0,0000932	0,221	0,213	2372	
4B-332-2C	51	50...75	0,0000852	0,198	0,191	2325	
4B-332-3A	51	0...25	0,0001002	0,236	0,229	2355	
4B-332-3B	51	250	0,0001032	0,245	0,238	2374	
4B-332-3C	51	50...75	0,0000641	0,149	0,144	2323	

Tutkimuksen betonilaadut	Standardierio D150x300, tiheystutkimus, pystysuuntaiset tiheydet					Liite 15 (1/2)
	Halkaisija $d_m$ [mm]	Tarkasteluväle yläpinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
Näyte	150	0...50	0,000809	1,831	2264	
	150	50...100	0,000787	1,811	2302	
	150	100...150	0,000794	1,840	2319	
	150	150...200	0,000800	1,858	2324	
	150	200...250	0,000812	1,890	2329	
	150	250...300	0,000919	2,190	2383	
2A-117	150	0...50	0,000868	1,978	2279	
	150	50...100	0,000869	2,014	2318	
	150	100...150	0,000869	2,027	2333	
	150	150...200	0,000834	1,948	2337	
	150	200...250	0,000836	1,974	2362	
	150	250...300	0,000578	1,389	2402	
3B-117	150	0...50	0,000812	1,862	2294	
	150	50...100	0,000790	1,827	2314	
	150	100...150	0,000794	1,847	2327	
	150	150...200	0,000803	1,893	2359	
	150	200...250	0,000823	1,956	2378	
	150	250...300	0,000871	2,113	2427	
4A-117	150	0...50	0,000810	1,908	2357	
	150	50...100	0,000795	1,891	2380	
	150	100...150	0,000805	1,901	2363	
	150	150...200	0,000807	1,909	2367	
	150	200...250	0,000816	1,942	2381	
	150	250...300	0,000840	2,030	2418	

Valmisbetonitehtaan betonilaadut	Standardilieriö D150x300, tiheystutkimus, pystysuuntaiset tiheydet	Liite 15 (2/2)			
Näyte	Halkaisija $d_m$ [mm]	Tarkastelualue yläpinnasta [mm]	Tilavuus $V$ [m <sup>3</sup> ]	Massa $m_a$ [kg]	Tiheys $D_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
R253-1	150	0...50	0,000831	1,859	2238
	150	50...100	0,000797	1,817	2281
	150	100...150	0,000795	1,842	2318
	150	150...200	0,000794	1,856	2339
	150	200...250	0,000863	2,016	2337
	150	250...300	0,000830	1,990	2399
R253-2	150	0...50	0,000776	1,794	2313
	150	50...100	0,000735	1,715	2332
	150	100...150	0,000773	1,816	2351
	150	150...200	0,000714	1,675	2345
	150	200...250	0,000880	2,081	2365
	150	250...300	0,000853	2,064	2421
R253-3	150	0...50	0,000733	1,681	2292
	150	50...100	0,000756	1,778	2353
	150	100...150	0,000762	1,780	2337
	150	150...200	0,000805	1,888	2346
	150	200...250	0,000703	1,661	2361
	150	250...300	0,000844	2,026	2401

Liite 16 (1/8)

Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittaustulokset

Betoni laatu C35/45, P50

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
1A-117	Kuiva	13	54,0	52,5	52,5	49,0	53,5	57,5	53,5	45,5	53,5	51,5	52,5	54,0	52,5	54,0	
	Kostea	13	64,5	55,0	61,0	63,0	59,0	58,0	59,0	52,5	58,0	60,5	53,0	57,0	58,0	44,8	
	Kyllästetty	13	56,5	57,0	56,5	58,0	60,0	59,0	56,5	59,0	57,5	55,5	60,0	51,5	57,0	42,7	
1A-118	Kuiva	13	52,0	55,5	55,5	56,5	53,5	58,0	56,5	58,5	55,5	58,0	55,5	54,5	55,5	39,8	
	Kostea	13	49,5	63,0	52,5	52,5	53,5	53,0	57,5	52,5	54,5	56,0	55,5	55,0	53,5	36,1	
	Kyllästetty	13	54,5	57,0	59,5	56,5	55,0	57,0	56,5	58,5	56,0	56,5	60,0	56,0	56,5	41,7	
1A-119	Kuiva	13	58,5	55,5	56,5	54,5	56,0	57,0	57,5	56,0	55,0	58,0	57,5	52,5	56,0	40,7	
	Kostea	13	53,0	55,0	59,5	59,5	51,0	56,0	56,5	50,0	63,0	67,5	59,0	53,0	56,5	41,7	
	Kyllästetty	13	53,0	56,0	61,5	62,0	56,0	63,5	61,0	64,0	59,5	60,0	65,0	56,0	61,0	51,8	
1A-120	Kuiva	11	51,0	53,0	52,0	53,0	51,5	59,0	58,0	55,0	51,5	57,5	56,0	71,0	53,0	35,3	
	Kostea	13	56,0	50,0	56,0	55,0	54,5	54,0	54,5	54,0	52,5	54,5	53,5	56,0	54,5	37,9	
	Kyllästetty	13	52,5	56,0	66,5	57,0	48,5	58,5	61,0	59,5	61,0	58,0	58,5	56,5	58,0	44,8	
1A-121	Kuiva	13	57,5	56,0	52,5	65,0	54,0	56,0	57,5	56,5	56,0	54,0	57,0	55,0	56,0	40,7	
	Kostea	13	55,5	54,0	51,0	54,0	54,0	53,0	54,5	53,5	52,5	53,0	66,5	54,5	54,0	37,0	
	Kyllästetty	13	52,5	55,5	61,0	61,0	50,5	57,0	56,0	60,0	57,5	71,0	55,0	59,5	57,0	42,7	
1A-122	Kuiva	13	52,0	57,5	57,5	52,5	57,0	58,0	57,5	57,5	55,5	56,5	55,0	55,0	56,5	41,7	
	Kostea	13	50,0	66,0	58,5	54,5	57,0	54,5	59,0	58,5	54,0	65,0	58,0	54,5	57,0	42,7	
	Kyllästetty	13	59,0	55,0	56,5	62,0	57,5	57,0	58,0	55,0	54,0	56,5	56,5	56,5	56,5	41,7	
1A-123	Kuiva	13	59,0	57,5	46,5	56,0	55,0	57,5	54,5	58,5	59,0	55,5	59,5	57,0	57,0	42,7	
	Kostea	13	52,0	48,5	58,5	55,0	54,0	55,0	59,5	56,0	53,0	57,0	59,0	57,5	56,0	40,7	
	Kyllästetty	13	53,0	61,5	62,0	55,0	56,5	56,0	55,0	53,5	51,5	52,5	52,0	53,0	55,0	38,8	
1A-124	Kuiva	13	54,0	54,5	56,5	52,0	59,0	58,5	55,5	57,5	54,0	55,5	57,0	56,0	56,0	40,7	
	Kostea	13	52,5	62,5	54,5	59,0	56,0	59,5	57,0	55,5	54,0	63,0	57,5	57,0	57,0	42,7	
	Kyllästetty	13	55,5	53,0	49,0	67,0	50,5	51,0	52,0	54,5	51,0	55,0	61,0	49,5	52,0	33,6	
1A-125	Kuiva	13	52,5	46,0	52,5	50,5	54,5	53,0	54,0	55,5	52,5	51,5	55,5	53,5	53,0	35,3	
	Kostea	13	54,5	56,5	55,5	53,5	54,0	52,0	54,5	56,5	54,0	52,0	55,0	57,5	54,5	37,9	
	Kyllästetty	13	54,0	53,0	52,0	54,0	54,5	52,5	58,5	57,5	55,5	56,5	53,5	64,0	54,0	37,0	

Hylätyt mittaukset ylijäivattu

## Liite 16 (2/8)

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittausluokset

## Betoni laatu C35/45, P50

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
1B-118	Kuiva	13	49,0	53,0	53,0	57,0	54,0	52,5	55,0	51,5	55,5	59,0	51,5	58,5	52,0	53,0	35,3
	Kostea	13	42,0	55,5	52,0	48,5	53,0	46,5	58,5	47,5	56,5	53,5	49,5	50,0	62,0	52,0	33,6
	Kyllästetty	13	48,5	62,5	60,5	61,0	50,0	45,5	61,0	56,0	58,0	60,0	41,5	59,0	50,0	58,0	44,8
1B-119	kuiva	13	68,0	53,0	58,0	53,0	62,0	55,5	57,5	67,0	54,5	58,5	58,5	67,5	54,5	58,0	44,8
	Kostea	13	61,5	66,5	47,0	56,0	55,0	62,5	51,5	56,0	55,0	55,5	57,5	53,0	40,7	56,0	40,7
	Kyllästetty	13	59,5	58,5	47,0	52,0	44,5	71,0	49,0	58,5	73,5	53,0	54,0	59,0	66,5	58,5	45,9
1B-120	Kuiva	13	53,0	58,5	56,5	56,0	54,0	57,0	55,5	56,0	54,5	55,5	57,0	50,0	59,0	56,0	40,7
	Kostea	13	51,5	42,0	53,5	49,0	54,0	56,5	58,0	54,0	46,0	55,5	65,0	57,0	56,0	54,0	37,0
	Kyllästetty	13	50,5	51,5	50,5	48,5	54,0	55,5	51,5	52,0	48,5	53,0	53,5	57,5	55,0	52,0	33,6
1B-121	Kuiva	13	51,5	51,0	57,0	53,0	50,5	55,5	58,0	54,0	52,5	53,5	56,0	61,0	54,0	54,0	37,0
	Kostea	13	54,5	51,0	51,5	62,5	51,5	52,5	53,0	54,0	58,0	49,0	63,0	62,0	52,5	53,0	35,3
	Kyllästetty	13	48,5	51,5	51,0	46,0	53,5	53,5	51,5	50,0	51,5	52,5	53,0	62,5	49,5	51,5	32,8
1B-122	kuiva	13	47,0	51,5	40,5	45,0	39,0	55,5	50,5	48,0	50,0	54,5	52,5	54,0	50,0	50,0	30,5
	Kostea	13	56,0	54,5	44,5	51,0	52,5	64,5	61,0	50,0	49,0	51,5	48,0	54,0	54,0	52,5	34,4
	Kyllästetty	13	49,0	45,5	48,5	50,0	47,5	51,5	47,5	52,0	58,5	46,0	50,0	51,0	52,5	50,0	30,5
1B-123	Kuiva	13	55,5	51,0	55,5	69,0	54,5	53,0	54,0	55,0	54,0	54,0	57,0	55,0	52,0	54,5	37,9
	Kostea	13	56,0	42,0	56,5	52,5	53,0	52,0	51,5	61,0	52,0	55,5	65,0	48,0	58,5	53,0	35,3
	Kyllästetty	13	48,5	47,5	61,0	49,0	56,0	51,5	50,0	56,0	55,0	53,5	54,5	46,5	51,5	51,5	32,8
1B-124	Kuiva	13	51,5	52,0	55,0	53,5	52,0	54,5	50,0	52,5	48,0	53,0	54,5	51,0	54,0	52,5	34,4
	Kostea	12	52,5	49,0	46,5	51,5	48,0	49,5	48,5	50,5	66,0	55,5	63,5	55,5	68,0	51,0	32,0
	Kyllästetty	13	47,5	59,5	52,5	49,5	52,0	50,5	46,5	43,0	49,0	51,5	44,5	51,0	50,5	50,5	31,3
1B-125	kuiva	13	52,5	52,5	57,0	56,0	55,5	53,0	55,5	55,5	55,5	51,0	55,5	54,0	55,0	55,5	39,8
	Kostea	13	51,5	60,0	52,5	51,5	54,0	57,5	54,5	53,5	52,5	55,0	55,0	51,5	57,5	54,0	37,0
	Kyllästetty	13	55,5	51,5	57,0	41,0	54,5	50,5	50,5	44,5	54,0	56,0	55,0	43,0	54,0	54,0	37,0
1B-126	Kuiva	13	54,5	55,5	57,0	51,5	53,0	55,0	57,0	51,5	55,0	57,0	54,5	56,0	57,5	55,0	38,8
	Kostea	13	56,0	54,5	55,0	56,5	54,0	52,5	57,5	52,0	53,5	51,0	50,0	64,0	51,5	54,0	37,0
	Kyllästetty	13	46,0	51,5	46,0	56,5	54,0	58,0	45,0	54,5	64,0	53,0	50,0	54,5	50,5	53,0	35,3

Hyätyt mittaukset yläviivattu



## Liite 16 (3/8)

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittaustulokset

## Betoni laatu C30/37, P20

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
2A-118	Kuiva	13	45,0	46,5	45,0	47,0	48,0	48,5	48,0	49,0	46,5	45,5	47,5	50,5	50,5	47,5	27,1
	Kostea	13	54,0	45,5	45,0	41,5	48,5	44,5	44,5	45,0	44,0	57,5	46,5	58,5	46,5	45,5	24,6
	Kyllästetty	13	42,5	45,0	44,5	52,0	45,5	46,0	48,0	46,5	42,5	47,5	43,5	43,5	43,5	45,0	24,0
2A-119	Kuiva	13	46,5	47,5	48,0	46,0	49,5	45,0	49,5	46,0	42,5	50,5	49,0	49,0	48,0	48,0	27,7
	Kostea	13	54,0	61,5	48,0	48,5	47,5	50,0	47,5	44,5	46,5	49,5	58,0	45,0	47,5	48,0	27,7
	Kyllästetty	12	47,0	55,5	46,0	55,5	51,5	43,0	61,5	44,0	38,0	49,0	45,5	43,5	43,0	45,8	24,9
2A-120	Kuiva	13	48,5	47,5	53,0	48,5	48,5	49,5	50,0	48,0	45,0	47,0	47,5	47,0	45,5	48,0	27,7
	Kostea	13	49,5	59,0	60,5	53,0	51,0	57,5	49,0	59,0	51,0	57,5	46,5	53,5	45,0	53,0	35,3
	Kyllästetty	13	44,0	49,0	49,0	42,0	47,5	51,5	46,5	46,0	57,0	45,0	44,0	43,5	45,0	46,0	25,2
2A-121	Kuiva	13	43,0	47,0	51,5	48,5	47,0	49,5	46,5	47,0	46,0	48,5	46,0	47,0	46,5	47,0	26,4
	Kostea	13	48,5	56,5	46,5	48,5	41,5	43,5	44,0	46,0	45,0	47,0	43,0	57,5	45,0	46,0	25,2
	Kyllästetty	13	40,5	47,5	43,5	40,5	42,0	52,0	49,0	44,5	43,0	49,5	44,5	48,5	44,0	44,5	23,4
2A-122	Kuiva	13	46,5	43,5	46,0	48,0	46,5	48,0	49,5	51,5	48,0	49,0	47,5	50,0	47,5	48,0	27,7
	Kostea	13	49,0	47,0	62,0	58,0	41,5	62,5	50,0	64,0	42,5	54,0	44,0	47,0	57,5	50,0	30,5
	Kyllästetty	13	45,0	43,5	50,0	44,0	44,5	41,5	49,0	45,0	41,5	44,0	42,0	43,0	42,0	44,0	22,9
2A-123	Kuiva	13	44,5	47,5	45,5	45,0	48,0	50,0	48,5	52,5	46,5	48,5	49,0	50,0	47,0	48,0	27,7
	Kostea	13	50,0	46,5	42,0	55,5	43,0	55,5	49,5	57,5	58,0	51,5	52,5	54,5	44,5	51,5	32,8
	Kyllästetty	13	41,0	42,0	41,0	43,0	40,0	49,0	48,0	45,0	43,5	47,0	48,5	47,5	41,0	43,5	22,4
2A-124	Kuiva	13	48,5	47,5	48,0	46,5	46,5	50,0	49,0	49,5	47,0	48,0	51,0	45,5	51,0	48,0	27,7
	Kostea	13	51,5	54,5	61,5	45,5	48,5	46,5	47,5	50,5	51,0	41,5	48,0	54,0	54,0	50,5	31,3
	Kyllästetty	13	60,0	55,5	46,5	50,5	42,5	56,5	44,0	46,0	46,5	59,5	50,5	41,0	45,0	46,5	25,8
2A-125	Kuiva	13	45,0	45,0	45,5	49,5	49,0	48,0	49,0	47,0	49,0	44,5	48,0	47,5	45,5	47,5	27,1
	Kostea	12	43,5	42,0	43,0	42,0	43,5	42,5	46,0	48,5	45,5	49,0	43,0	61,0	45,0	43,5	22,4
	Kyllästetty	13	41,5	61,5	43,0	56,5	60,5	58,0	51,0	46,0	57,5	41,5	41,5	45,0	61,5	51,0	32,0
2A-126	Kuiva	13	48,5	50,5	47,0	45,5	46,0	49,0	49,5	51,0	48,5	50,5	52,5	47,0	50,5	49,0	29,1
	Kostea	13	51,0	43,5	49,5	40,5	60,5	55,5	48,5	47,0	46,5	47,5	46,0	47,5	49,0	47,5	27,1
	Kyllästetty	13	41,5	41,5	46,0	46,5	44,5	43,5	46,0	45,5	45,5	48,0	45,5	50,0	58,5	45,5	24,6

Hyätyt mittaukset yläviivattu

## Liite 16 (4/8)

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittaustulokset

## Betomilaatu C30/37, P20

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]										Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]		
2B-118	Kuiva	13	51,5	46,5	49,5	47,5	44,5	51,5	48,0	49,5	49,0	50,5	50,0	48,5	49,5	29,8
	Kostea	13	45,5	46,5	45,0	48,5	47,5	48,0	48,0	47,0	52,0	50,5	46,0	43,5	47,0	26,4
	Kyllästetty	13	45,0	46,5	46,5	46,5	42,0	44,5	46,5	46,0	46,5	45,0	47,5	47,0	53,0	46,5
2B-119	kuiva	13	49,0	44,5	51,5	49,0	49,0	49,0	50,5	48,0	47,5	50,0	49,5	47,5	49,0	29,1
	Kostea	13	49,5	45,5	42,5	47,0	51,5	44,5	48,5	50,0	49,0	47,0	49,0	48,5	48,5	28,4
	Kyllästetty	13	41,5	51,0	50,0	48,0	40,5	49,5	48,0	45,0	49,0	51,5	46,0	49,5	49,0	29,1
2B-120	Kuiva	13	49,0	54,5	52,5	55,0	58,0	53,5	60,5	53,0	60,5	51,5	47,5	48,5	53,0	35,3
	Kostea	13	49,5	50,5	61,0	49,0	50,5	50,0	52,5	54,0	49,5	60,0	58,5	60,0	52,0	33,6
	Kyllästetty	13	42,5	51,0	51,5	43,0	49,0	47,5	61,5	56,0	52,5	54,0	62,5	66,0	45,0	32,8
2B-121	Kuiva	13	52,5	47,0	48,5	48,0	49,5	52,5	50,0	51,0	49,0	49,5	48,5	46,0	49,5	29,8
	Kostea	13	48,0	48,5	49,0	46,0	50,5	49,5	48,0	49,5	50,5	49,0	51,0	49,5	49,5	29,8
	Kyllästetty	13	45,5	50,5	47,0	46,0	48,0	57,0	46,5	49,5	46,0	44,0	45,5	44,5	46,5	25,8
2B-122	kuiva	13	48,0	46,5	49,0	44,0	62,0	48,0	55,0	47,5	43,5	46,5	48,0	48,5	48,0	27,7
	Kostea	13	49,0	48,5	49,0	48,0	49,0	49,5	50,0	46,5	50,0	48,5	51,0	47,0	45,5	29,1
	Kyllästetty	13	52,0	42,5	44,5	48,5	47,5	47,0	49,5	47,5	46,5	51,0	49,5	45,5	47,5	27,1
2B-123	Kuiva	12	58,5	52,5	60,0	51,5	56,5	52,5	63,0	59,5	53,5	51,5	76,5	53,5	53,5	36,1
	Kostea	12	48,0	61,5	67,5	46,0	50,0	56,0	50,0	53,5	49,5	50,5	60,0	72,0	52,0	33,6
	Kyllästetty	13	48,5	53,0	56,0	52,0	49,0	61,0	48,0	46,0	59,0	46,0	50,0	55,0	52,0	33,6
2B-124	Kuiva	13	45,0	45,5	57,0	47,0	47,0	51,5	45,0	53,5	49,5	51,0	42,0	54,0	49,5	29,8
	Kostea	13	55,5	46,0	47,5	52,0	44,0	52,0	50,0	50,0	53,0	54,5	56,5	42,0	50,0	30,5
	Kyllästetty	13	57,5	57,5	58,5	66,0	55,5	49,5	52,0	45,0	51,0	47,5	54,5	47,5	52,5	34,4
2B-125	kuiva	13	48,5	47,5	49,5	45,0	44,5	45,0	50,5	48,0	53,0	54,5	49,0	48,0	48,5	28,4
	Kostea	13	47,5	48,5	49,0	50,5	46,5	47,5	47,0	47,0	50,0	51,0	50,0	46,0	48,5	28,4
	Kyllästetty	13	45,5	45,5	47,5	43,0	48,0	47,5	49,5	45,5	48,5	51,5	45,5	51,0	47,5	27,1
2B-126	Kuiva	13	50,5	47,0	58,5	47,0	46,5	53,0	53,0	51,5	44,0	47,5	49,5	48,5	48,5	28,4
	Kostea	12	53,0	45,5	50,5	53,0	45,0	55,5	49,0	69,0	46,0	49,5	55,0	52,5	51,5	32,0
	Kyllästetty	13	48,0	48,5	48,0	48,5	44,0	50,5	57,0	48,5	46,5	50,0	63,0	48,0	48,5	28,4

Hyätyt mittaukset yläviivattu

## Liite 16 (5/8)

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittausluokset

## Betoni laatu C50/60, P50

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]	
3A-118	Kuiva	13	37,5	48,0	52,0	49,5	53,0	48,5	54,0	50,5	50,5	47,5	49,5	51,5	49,5	49,5	49,5	29,8
	Kostea	13	41,0	47,5	49,5	50,0	51,5	51,0	50,0	47,0	50,0	48,0	44,0	64,0	50,0	50,0	50,0	30,5
	Kyllästetty	13	48,5	47,5	57,0	44,5	55,5	46,5	44,0	47,5	59,5	46,0	47,5	56,5	53,0	47,5	53,0	27,1
3A-119	Kuiva	12	53,5	52,0	51,5	68,5	52,5	55,0	57,5	51,5	50,0	64,0	52,0	52,5	52,0	52,0	52,0	34,0
	Kostea	12	49,5	56,0	52,0	55,0	48,0	52,0	59,0	48,5	47,0	66,0	50,0	49,5	49,0	49,0	49,0	30,2
	Kyllästetty	12	52,0	66,5	47,0	48,5	43,5	58,0	56,0	48,0	43,0	58,5	53,0	49,0	47,5	47,5	48,8	28,8
3A-120	Kuiva	13	55,0	52,0	57,5	52,5	49,0	53,0	53,0	52,5	43,0	55,0	50,5	51,5	50,5	50,5	50,5	34,4
	Kostea	13	48,5	54,5	50,5	50,0	48,0	53,5	52,5	63,5	50,5	51,0	51,5	50,0	53,5	51,0	32,0	32,0
	Kyllästetty	13	47,5	51,5	63,5	54,0	59,0	49,0	48,5	50,0	49,0	49,0	63,5	49,0	57,0	50,0	30,5	30,5
3A-121	Kuiva	13	52,5	54,5	49,0	52,0	49,0	52,0	48,0	51,0	45,5	51,5	48,5	54,0	49,5	49,5	32,0	32,0
	Kostea	13	44,5	49,0	52,0	41,5	43,5	46,0	48,5	44,0	48,0	48,5	57,0	46,5	43,0	43,0	25,8	25,8
	Kyllästetty	13	45,5	48,5	48,0	46,5	47,5	48,0	47,0	47,0	48,0	47,5	47,0	52,0	44,0	44,0	27,1	27,1
3A-122	Kuiva	13	50,5	51,0	49,5	53,5	58,5	52,0	53,5	51,0	54,5	52,5	55,0	54,0	50,0	50,0	34,4	34,4
	Kostea	13	53,0	52,5	44,5	47,0	46,5	49,5	52,0	48,5	48,5	50,5	48,5	48,0	49,5	48,5	28,4	28,4
	Kyllästetty	13	43,0	44,5	52,0	51,5	49,0	50,5	49,5	48,5	48,5	45,5	51,0	50,5	55,0	49,5	29,8	29,8
3A-123	Kuiva	13	50,0	47,5	50,0	58,0	49,0	51,5	53,0	53,5	52,0	52,0	51,5	60,0	49,5	49,5	32,8	32,8
	Kostea	13	44,5	50,0	49,5	51,0	51,5	47,0	56,5	50,5	47,5	65,5	63,0	54,0	50,0	50,0	31,3	31,3
	Kyllästetty	12	47,5	43,5	45,5	49,0	47,0	46,0	57,0	50,0	62,0	46,5	42,5	47,5	51,5	47,3	26,8	26,8
3A-124	Kuiva	13	46,5	49,0	51,0	50,0	45,5	49,0	54,5	49,0	51,0	49,0	52,5	51,0	53,0	50,0	30,5	30,5
	Kostea	13	58,0	51,5	58,5	47,5	52,0	53,0	63,5	50,5	50,0	50,0	49,0	46,5	44,5	44,5	31,3	31,3
	Kyllästetty	13	49,0	47,0	44,0	47,0	45,0	46,0	47,5	49,0	47,0	46,0	54,5	48,0	56,0	47,0	26,4	26,4
3A-125	Kuiva	13	56,5	48,5	49,0	48,0	51,0	53,0	53,0	52,0	52,5	55,0	51,5	52,0	60,5	52,0	33,6	33,6
	Kostea	13	52,5	43,5	44,0	50,5	56,0	49,5	49,0	55,0	49,5	44,5	54,0	60,0	48,5	49,5	29,8	29,8
	Kyllästetty	13	46,5	49,5	48,5	51,0	49,0	50,0	50,5	52,0	52,5	47,5	52,5	46,5	49,0	49,5	29,8	29,8
3A-126	Kuiva	12	45,5	49,0	51,5	69,5	49,0	57,0	60,0	60,0	59,0	50,0	52,0	62,5	51,0	51,0	33,2	33,2
	Kostea	13	53,0	68,0	50,5	48,0	58,5	48,5	56,0	52,5	49,0	59,0	54,5	53,0	49,0	49,0	35,3	35,3
	Kyllästetty	13	55,5	59,0	45,0	45,0	47,0	49,5	60,5	50,0	44,5	58,5	53,0	47,5	51,0	50,0	30,5	30,5

Hylätyt mittaukset yläviivattu

## Liite 16 (6/8)

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittausluokset

## Betoni-laatu C50/60, P50

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
3B-118	Kuiva	13	45,5	45,5	52,5	50,0	46,5	47,0	49,5	49,0	52,5	48,0	51,5	49,5	47,0	49,0	29,1
	Kostea	13	47,0	60,5	52,5	47,5	48,0	48,5	42,5	63,5	55,0	55,0	63,0	49,0	43,5	49,0	29,1
	Kyllästetty	13	45,0	50,0	54,5	44,0	47,5	49,5	45,5	48,5	42,5	48,0	48,0	46,5	46,0	47,5	27,1
3B-119	kuiva	13	51,0	50,5	53,5	48,5	49,5	51,0	49,0	49,5	47,5	50,5	51,0	53,5	49,0	50,5	31,3
	Kostea	12	47,0	63,5	52,0	59,0	49,0	44,5	49,5	47,0	48,0	48,0	46,0	62,0	42,0	48,0	27,7
	Kyllästetty	13	53,0	59,5	62,5	57,5	45,0	53,5	54,0	59,5	54,5	52,0	54,0	57,5	45,5	54,0	37,0
3B-120	Kuiva	13	51,0	53,5	50,0	52,0	48,0	49,0	49,5	53,0	51,0	44,5	52,0	58,0	51,0	51,0	32,0
	Kostea	13	47,0	50,5	49,5	47,0	59,5	62,0	52,5	47,5	55,5	52,5	48,5	44,0	48,5	49,5	29,8
	Kyllästetty	13	46,0	46,5	46,5	47,0	48,5	49,0	47,5	45,0	47,0	59,0	48,0	60,5	50,0	47,5	27,1
3B-121	Kuiva	13	48,5	50,5	49,5	44,0	47,0	50,0	49,5	51,0	51,5	51,0	51,0	52,5	50,0	50,0	30,5
	Kostea	13	46,0	49,5	45,5	47,5	43,0	50,5	47,5	53,0	48,0	44,5	48,5	52,0	43,5	47,5	27,1
	Kyllästetty	13	46,5	48,0	47,5	44,0	43,5	45,5	46,0	46,5	50,5	47,5	53,0	41,5	47,5	46,5	25,8
3B-122	kuiva	13	50,5	51,5	51,0	52,0	51,5	50,0	52,5	49,0	48,0	52,5	49,0	47,0	48,0	50,5	31,3
	Kostea	13	48,0	48,5	51,0	46,5	52,0	57,5	53,5	45,0	47,0	48,0	62,0	43,0	43,0	48,0	27,7
	Kyllästetty	13	49,0	53,0	45,0	45,0	51,0	49,5	53,0	43,0	47,5	49,5	46,5	48,0	46,0	48,0	27,7
3B-123	Kuiva	13	48,0	54,0	50,5	49,0	51,0	53,5	52,5	51,0	49,0	50,5	50,0	50,5	49,0	50,5	31,3
	Kostea	13	45,0	50,0	50,0	46,5	47,0	47,5	48,0	61,0	59,0	48,0	51,5	48,0	53,5	48,0	27,7
	Kyllästetty	13	47,5	58,5	44,0	41,0	43,5	51,5	60,0	56,5	41,5	46,5	42,5	53,5	47,0	47,0	26,4
3B-124	Kuiva	13	48,5	50,0	51,0	50,5	49,0	49,0	51,0	53,0	52,0	50,5	54,0	50,5	49,5	50,5	31,3
	Kostea	13	52,5	49,5	45,5	49,5	44,0	49,5	45,0	47,5	54,5	58,5	46,0	44,5	46,5	47,5	27,1
	Kyllästetty	13	43,0	46,5	47,5	46,5	42,0	49,0	45,0	48,5	45,0	39,0	43,5	43,5	41,0	45,0	24,0
3B-125	kuiva	13	42,5	48,0	50,0	48,5	46,0	51,0	50,5	49,0	47,5	50,0	47,5	49,5	49,0	49,0	29,1
	Kostea	13	45,5	61,5	46,5	47,5	47,0	51,0	63,0	54,5	48,0	45,5	62,5	49,0	50,5	49,0	29,1
	Kyllästetty	13	42,0	45,5	47,0	43,5	42,0	41,0	48,0	44,5	43,5	41,5	46,5	45,5	43,5	43,5	22,4
3B-126	Kuiva	13	45,0	48,5	51,5	47,0	51,0	50,0	51,0	49,5	53,5	52,0	51,5	51,5	54,0	51,0	32,0
	Kostea	13	44,0	54,0	48,5	43,5	43,5	51,0	49,5	49,5	48,0	51,0	50,0	48,5	49,5	49,5	29,8
	Kyllästetty	13	41,5	42,5	43,5	48,0	46,5	47,5	46,0	44,5	43,5	44,0	45,5	48,0	39,5	44,5	23,4

Hyätyt mittaukset yläviivattu

## Betonilaatu C35/45

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittausluokset

## Liite 16 (7/8)

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
4A-118	Kuiva	13	46,5	40,0	48,0	49,0	48,0	47,5	48,0	49,0	46,5	49,5	48,5	46,0	46,5	48,0	27,7
	Kostea	13	44,0	39,0	52,5	45,5	45,5	53,0	49,0	56,5	44,5	48,0	54,0	47,0	47,0	26,4	
	Kyllästetty	13	46,0	45,0	45,0	44,0	47,0	50,0	48,0	54,5	49,0	46,0	48,0	46,5	47,0	26,4	
4A-119	Kuiva	13	46,5	46,5	47,0	48,0	51,0	49,0	50,5	44,5	47,5	52,0	46,5	47,0	51,0	47,5	27,1
	Kostea	13	45,0	45,5	53,5	47,5	55,5	47,0	48,5	48,5	50,0	58,5	46,0	50,0	48,5	28,4	
	Kyllästetty	13	48,5	50,0	52,5	52,5	50,5	50,5	48,5	52,0	49,0	46,5	47,0	45,0	49,5	49,5	29,8
4A-120	Kuiva	13	47,0	50,0	48,0	48,0	46,0	49,0	49,5	50,5	46,0	47,0	46,5	47,5	47,0	47,5	27,1
	Kostea	13	45,0	46,0	45,5	45,5	54,5	52,0	44,5	44,0	43,0	44,0	44,5	54,0	52,0	45,5	24,6
	Kyllästetty	13	46,5	47,5	48,5	47,0	44,5	44,5	49,5	42,5	47,0	46,0	51,0	51,5	48,0	47,0	26,4
4A-121	Kuiva	13	42,5	46,5	47,5	48,0	47,5	49,0	47,0	46,0	42,0	46,0	48,0	49,0	45,5	47,0	26,4
	Kostea	12	45,5	53,0	50,5	48,0	61,0	45,0	48,5	44,5	48,5	43,0	44,0	45,5	44,5	45,5	24,6
	Kyllästetty	11	43,0	62,0	47,0	57,5	46,5	51,0	43,5	46,0	61,0	47,0	45,5	47,0	46,5	46,8	26,1
4A-122	Kuiva	13	47,5	45,0	46,5	45,0	47,0	48,5	50,0	48,0	48,0	49,5	49,0	49,5	46,5	48,0	27,7
	Kostea	13	41,0	42,5	47,0	46,0	46,0	46,5	45,0	45,5	45,5	48,5	49,0	49,0	45,5	46,0	25,2
	Kyllästetty	13	43,0	47,0	48,5	46,5	44,0	50,0	42,5	45,0	48,5	47,5	45,0	47,0	45,0	46,5	25,8
4A-123	Kuiva	13	48,5	49,5	45,5	53,0	52,0	51,5	49,0	51,5	52,5	54,5	50,0	49,5	49,0	50,0	30,5
	Kostea	13	45,5	45,0	47,0	47,0	47,0	56,5	51,0	45,0	44,0	47,5	49,5	47,0	48,0	47,0	26,4
	Kyllästetty	13	46,0	53,5	47,5	59,5	41,5	47,0	50,0	51,5	47,5	48,5	54,0	47,0	46,5	47,5	27,1
4A-124	Kuiva	13	47,5	48,5	48,0	47,0	48,5	49,5	45,0	51,5	49,5	51,5	48,5	50,0	50,5	48,5	28,4
	Kostea	12	48,5	50,5	53,5	64,0	47,0	50,0	42,0	65,0	53,0	52,0	48,0	50,0	46,5	50,0	30,5
	Kyllästetty	13	49,0	48,0	42,5	50,5	43,0	50,5	48,5	45,5	48,0	48,5	52,5	54,0	28,4	48,5	28,4
4A-125	Kuiva	13	44,5	39,5	47,0	45,0	46,5	46,5	46,5	47,0	47,5	49,0	47,0	48,0	49,5	47,0	26,4
	Kostea	13	58,0	43,5	45,5	47,5	46,5	49,0	55,5	60,0	50,0	61,0	61,5	50,0	50,0	50,0	30,5
	Kyllästetty	13	44,0	49,5	57,0	47,0	54,0	47,0	45,0	46,0	48,0	44,0	46,5	47,0	47,0	47,0	26,4
4A-126	Kuiva	13	45,5	47,5	46,5	49,5	55,5	54,0	50,0	52,5	50,0	51,5	50,5	51,0	62,0	50,5	31,3
	Kostea	13	48,5	45,0	47,0	43,0	46,0	44,0	48,0	46,5	47,5	46,5	46,0	47,0	45,5	46,5	25,8
	Kyllästetty	13	45,0	47,0	45,5	48,0	44,0	47,0	45,5	45,5	47,0	45,0	45,5	42,5	46,0	45,5	24,6

Hyätyt mittaukset yläviivattu

## Betonilaatu C35/45

## Standardilieriö D150x300 kimmovasaroinnin mittausluokset

## Liite 16 (8/8)

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]		
4B-118	Kuiva	13	52,0	51,5	51,5	51,5	54,5	54,5	55,0	55,5	53,0	53,0	54,5	55,5	55,5	54,5	55,5	54,5	37,9
	Kostea	13	50,0	56,0	52,0	47,0	54,5	49,5	55,5	52,0	53,5	50,5	51,0	49,0	52,5	52,5	52,5	52,5	33,6
	Kyllästetty	13	50,5	48,0	51,0	54,5	49,5	51,0	56,5	48,5	51,0	48,5	47,5	50,0	56,5	50,5	56,5	50,5	31,3
4B-119	kuiva	13	58,5	52,5	53,0	55,0	53,0	53,5	55,0	54,0	54,5	55,5	54,0	50,5	53,0	54,0	50,5	53,0	37,0
	Kostea	13	59,5	53,0	50,5	54,5	53,0	50,0	54,5	55,0	49,0	53,5	52,0	52,5	52,5	52,0	52,5	53,0	35,3
	Kyllästetty	13	53,0	54,5	54,5	52,0	58,0	51,0	51,0	52,0	53,0	51,0	51,0	52,0	50,5	52,0	50,5	52,0	33,6
4B-120	Kuiva	13	53,0	51,0	48,0	54,0	51,5	57,0	50,0	52,0	54,5	54,5	51,0	52,5	51,5	51,0	52,5	51,5	33,6
	Kostea	13	47,5	56,0	47,5	57,0	60,0	64,5	55,0	49,0	55,5	51,5	49,0	49,5	51,0	49,5	51,0	51,5	32,8
	Kyllästetty	13	59,5	52,0	54,0	51,0	51,5	50,0	51,5	46,0	51,0	52,5	41,0	53,0	49,0	53,0	49,0	51,5	32,8
4B-121	Kuiva	13	51,0	56,0	55,0	51,0	52,0	53,5	54,0	53,5	51,5	54,0	53,0	56,0	52,0	53,0	56,0	52,0	36,1
	Kostea	12	62,5	53,5	51,0	55,5	52,5	56,5	51,0	47,0	49,5	49,0	55,5	50,5	51,0	51,0	51,0	51,0	32,0
	Kyllästetty	13	54,5	51,0	50,0	55,0	49,0	56,5	52,5	56,0	55,0	55,0	51,0	50,0	49,0	50,0	49,0	52,5	34,4
4B-122	kuiva	13	52,0	56,0	52,5	53,0	56,5	52,5	55,0	57,0	54,0	56,0	55,5	55,5	54,0	55,5	54,0	55,0	38,8
	Kostea	13	52,5	56,0	56,5	52,5	52,0	47,5	54,5	63,5	48,0	48,5	57,5	64,5	57,0	64,5	57,0	37,9	
	Kyllästetty	13	53,5	51,5	62,5	54,0	63,0	53,5	60,5	59,0	53,0	62,0	66,5	51,5	52,5	54,0	52,5	37,0	
4B-123	Kuiva	13	54,5	54,0	55,5	52,0	53,0	55,5	54,5	54,5	54,5	53,0	52,5	50,5	55,0	54,5	55,0	37,9	
	Kostea	13	60,0	49,0	50,0	49,5	51,0	62,0	54,5	53,5	61,5	48,0	48,5	47,0	50,0	48,5	50,0	30,5	
	Kyllästetty	13	57,0	49,5	52,0	53,5	50,5	50,0	61,0	53,5	59,0	60,5	55,5	47,5	54,0	54,0	53,5	36,1	
4B-124	Kuiva	13	53,0	52,0	56,5	54,0	59,5	56,0	53,5	55,5	53,0	53,5	53,0	53,5	52,0	53,0	52,0	36,1	
	Kostea	13	59,5	51,0	53,0	53,5	64,5	54,5	52,5	51,0	50,5	57,5	49,5	52,0	54,5	52,0	54,5	35,3	
	Kyllästetty	13	51,5	52,5	52,0	49,5	52,0	55,0	56,5	57,0	54,0	55,0	57,0	55,0	53,5	54,0	53,5	37,0	
4B-125	kuiva	13	49,0	53,5	52,0	52,5	55,5	53,5	53,5	56,0	53,0	52,5	52,0	52,0	52,5	52,0	52,5	34,4	
	Kostea	12	53,5	62,0	51,0	70,5	50,5	63,5	65,0	51,5	53,0	49,0	44,5	49,5	51,3	49,5	51,3	32,4	
	Kyllästetty	13	63,0	50,0	51,5	52,0	51,5	54,0	53,0	54,0	51,5	50,0	51,0	50,5	43,0	51,5	51,5	32,8	
4B-126	Kuiva	13	51,5	54,0	55,0	54,0	52,5	53,5	60,5	53,5	52,5	54,0	54,0	52,5	51,0	54,0	52,5	36,1	
	Kostea	13	53,5	58,0	51,5	52,0	49,0	62,5	54,0	53,0	50,5	52,5	47,5	46,0	59,5	52,5	52,5	34,4	
	Kyllästetty	13	50,0	51,5	54,0	60,5	54,0	53,5	54,0	53,5	57,0	50,5	55,0	54,0	54,0	54,0	54,0	37,0	

Hyätyt mittaukset yläviivattu

Betoni-laatu C35/45, P50		Standardikuutio 150x150x150 kimmovasaroinnin mittaustulokset										Liite 17 (1/4)					
Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasarain iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]										Mediaani	Mediaani			
			[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[Q]	[MPa]			
1A-501	Sivu	13	49,5	47,5	45,0	54,0	53,0	46,5	50,5	53,0	57,0	51,5	53,0	46,0	50,5	50,5	31,3
	Sivu	13	50,0	52,0	52,5	50,5	51,0	51,0	51,0	47,0	42,0	50,5	49,0	48,5	51,5	50,5	31,3
	Sivu	13	52,0	57,0	44,0	47,0	48,5	47,0	47,0	45,5	49,0	48,5	50,0	44,5	47,0	47,0	26,4
	Sivu	13	50,0	50,5	50,5	53,0	47,0	51,0	47,5	60,5	46,5	48,5	50,0	49,0	49,0	50,0	30,5
1A-503	Pohja	13	52,0	46,5	50,0	48,0	53,0	51,0	50,0	51,5	47,0	55,0	53,5	54,0	50,5	51,0	32,0
	Hierretty	13	28,0	34,5	39,0	39,5	34,5	45,5	39,5	34,0	41,5	41,5	40,0	37,0	37,5	39,0	18,0
	Hioittu	13	50,0	37,5	55,5	43,5	47,5	45,0	44,0	47,0	59,5	43,5	43,5	56,5	48,5	47,0	26,4
	Sivu	13	50,0	49,0	47,0	41,5	43,5	52,5	50,5	45,0	50,0	49,0	51,0	46,5	46,0	49,0	29,1
1A-601	Sivu	13	44,5	53,0	44,5	43,5	47,5	40,5	46,0	46,5	50,5	49,5	44,0	46,5	45,5	46,0	25,2
	Sivu	13	57,5	50,0	53,0	50,5	48,0	53,0	55,0	50,0	50,0	54,0	49,5	43,5	51,5	50,5	31,3
	Sivu	13	46,5	48,5	48,0	50,0	49,5	53,0	48,5	42,5	43,5	51,0	53,0	52,0	51,5	49,5	29,8
	Pohja	13	49,5	54,5	51,5	49,5	52,5	50,0	50,5	47,0	48,5	49,0	41,0	45,5	44,0	49,5	29,8
1A-602	Hierretty	13	38,5	49,0	48,5	46,0	41,5	51,0	45,5	46,0	41,0	43,0	46,5	45,5	49,5	46,0	25,2
	Hioittu	13	45,5	48,0	51,0	44,0	49,5	51,0	49,5	46,0	49,5	51,0	53,0	39,0	52,0	49,5	29,8
	Sivu	13	49,0	51,0	49,5	51,0	48,0	46,5	49,5	51,5	50,0	51,0	50,5	49,0	50,5	50,0	30,5
	Sivu	13	45,0	53,5	41,0	48,0	52,5	49,5	51,5	50,5	48,5	50,0	51,0	49,5	47,0	49,5	29,8
1A-601	Sivu	13	44,5	46,5	47,0	42,0	50,5	45,5	50,0	47,5	41,5	47,0	47,0	48,5	45,5	47,0	26,4
	Sivu	13	45,5	47,0	49,0	50,5	54,0	51,0	47,5	47,0	49,5	52,0	57,0	44,0	50,0	49,5	29,8
	Pohja	13	46,0	52,0	47,0	48,5	53,0	50,5	51,0	49,0	50,0	47,0	54,0	50,5	42,5	50,0	30,5
	Hierretty	12	31,0	37,0	35,5	40,5	24,5	46,5	36,0	41,5	39,0	36,5	38,0	44,5	39,5	38,5	17,6
1A-602	Hioittu	13	42,5	45,5	50,0	42,5	30,5	32,0	38,5	41,5	48,5	33,5	45,5	46,5	45,0	42,5	21,3
	Sivu	13	45,0	48,5	50,0	47,5	50,5	48,5	46,0	47,5	42,0	51,0	49,0	46,5	46,5	47,5	27,1
	Sivu	13	46,5	49,5	49,0	47,0	47,5	52,0	49,0	44,0	47,5	51,0	48,0	47,5	43,5	47,5	27,1
	Sivu	13	50,5	43,0	47,5	53,0	46,5	48,5	50,5	54,5	51,0	46,5	48,5	52,5	51,5	50,5	31,3
1A-602	Sivu	13	45,0	46,0	49,5	48,0	44,5	45,0	40,5	41,0	40,0	53,0	52,0	49,0	42,5	45,0	24,0
	Pohja	13	49,0	49,0	46,5	48,5	50,5	47,0	45,0	58,5	49,5	53,5	49,0	47,5	46,5	49,0	29,1
	Hierretty	13	36,5	43,5	36,0	32,5	38,5	38,5	46,0	41,0	38,5	40,5	36,0	40,0	31,5	38,5	17,6
	Hioittu	13	42,5	45,0	35,0	32,0	35,5	51,5	44,5	42,0	42,0	36,5	33,5	54,0	43,5	42,0	20,8

Hyätyt iskulokset yläviivattu

Liite 17 (2/4)

## Standardikkuutio 150x150x150 kimmoasaroinnin mittaustulokset

Betoni laatu C30/37, P20

Näyte	Olosuhde	n	Kimmotasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
			48,0	55,5	50,5	41,0	50,5	51,0	60,0	58,5	49,5	48,5	39,5	46,0	62,0	50,5	31,3
2A-502	Sivu	13	48,0	55,5	50,5	41,0	50,5	51,0	60,0	58,5	49,5	48,5	39,5	46,0	62,0	50,5	31,3
	Sivu	13	47,5	39,5	45,5	50,5	48,0	49,0	48,0	41,5	46,5	51,5	48,0	49,0	47,0	48,0	27,7
	Sivu	13	45,0	43,5	46,5	47,5	46,0	40,0	52,5	44,5	47,5	47,5	44,5	44,0	46,5	46,0	25,2
	Sivu	13	44,5	40,0	43,0	43,5	41,5	45,0	45,5	42,0	45,0	48,5	45,5	45,0	47,0	45,0	24,0
2A-503	Pohja	13	55,0	51,5	61,0	52,0	49,0	52,5	51,5	46,0	50,0	55,5	54,5	54,0	53,5	52,5	34,4
	Hierretty	13	43,0	36,0	32,0	42,0	43,0	35,0	29,0	34,0	39,0	36,5	28,5	36,0	30,0	36,0	15,6
	Hiottu	13	48,0	46,0	53,5	48,0	44,0	49,5	53,5	47,5	51,0	50,5	48,0	47,5	43,5	48,0	27,7
	Sivu	13	40,5	50,0	47,0	42,5	48,5	41,5	53,5	48,5	48,0	50,0	52,5	52,5	48,5	48,5	28,4
2A-601	Sivu	13	43,5	44,5	44,5	45,0	48,5	48,0	48,0	42,0	44,5	49,5	47,5	47,5	48,5	47,5	27,1
	Sivu	13	42,0	41,0	44,5	50,0	54,5	46,5	49,5	49,5	55,5	44,0	48,5	45,5	45,0	46,5	25,8
	Sivu	13	34,0	42,0	38,0	44,5	52,5	45,0	46,0	46,0	49,5	50,5	49,0	47,0	47,0	47,0	26,4
	Pohja	13	53,0	47,0	47,5	50,0	53,0	49,0	51,0	48,5	48,5	49,5	46,5	50,5	47,5	49,5	29,8
2A-603	Hierretty	13	34,0	38,0	36,5	34,5	39,5	28,5	38,0	43,5	34,5	43,5	27,0	41,5	31,0	36,5	16,0
	Hiottu	13	46,5	51,5	46,5	47,0	43,0	47,0	42,5	45,5	41,0	47,0	41,0	45,0	45,0	45,5	24,6
	Sivu	13	42,0	45,5	44,0	45,5	44,5	43,0	46,0	45,5	34,0	42,5	44,0	40,0	42,5	44,0	22,9
	Sivu	13	41,0	47,5	39,5	46,0	50,0	46,5	44,5	41,5	45,0	45,5	49,5	46,0	48,0	46,0	25,2
2A-601	Sivu	13	40,5	53,0	48,5	45,0	47,0	42,5	46,0	51,0	43,0	57,5	52,5	50,0	41,5	47,0	26,4
	Sivu	13	45,5	53,5	56,5	46,5	43,0	48,5	47,5	47,0	43,0	48,5	45,5	44,0	47,5	47,0	26,4
	Pohja	13	53,5	51,0	58,5	50,5	55,0	53,0	51,5	50,0	51,5	51,5	58,5	50,5	53,5	51,5	32,8
	Hierretty	12	38,5	50,0	35,5	39,0	35,5	26,0	35,0	37,5	45,5	42,0	41,5	50,5	47,0	40,3	19,1
2A-603	Hiottu	13	54,0	51,5	51,5	53,0	45,5	55,5	42,0	57,5	57,5	46,5	53,5	56,0	46,0	53,0	35,3
	Sivu	13	44,0	43,0	47,0	42,5	48,0	49,0	43,5	45,5	45,5	46,5	51,5	44,5	48,5	46,5	25,8
	Sivu	13	47,5	42,0	42,5	44,5	48,0	41,0	41,5	49,5	43,0	44,0	41,5	42,0	42,5	42,5	21,3
	Sivu	13	47,0	43,0	47,0	46,5	46,0	42,0	43,5	40,0	49,0	45,0	47,5	42,0	48,5	46,0	25,2
2A-603	Sivu	13	48,5	38,0	37,0	34,5	38,5	40,5	43,5	41,0	38,5	39,5	45,0	48,5	42,0	40,5	19,4
	Pohja	13	46,5	52,5	60,5	51,0	54,0	47,0	51,5	49,5	55,5	52,0	51,5	46,0	51,5	51,5	32,8
	Hierretty	13	33,5	48,0	35,5	42,0	38,5	30,5	32,5	31,5	35,5	44,0	37,5	40,0	40,5	37,5	16,8
	Hiottu	13	47,5	49,5	40,5	45,5	48,0	46,0	44,5	47,0	51,5	44,0	49,5	49,5	45,0	46,0	25,2

Hyätyt iskulokset yläviivattu



## Liite 17 (3/4)

## Standardikkuutio 150x150x150 kimmoasaroinnin mittaustulokset

## Betoni laatu C50/60, P50

Näyte	Olosuhde	n	Kimmotasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]															Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
			46,0	50,5	47,0	49,5	47,5	48,5	51,5	48,0	52,0	50,0	55,0	45,5	51,5	49,5	49,5	29,8	
3A-501	Sivu	13	46,0	50,5	47,0	49,5	47,5	48,5	51,5	48,0	52,0	50,0	55,0	45,5	51,5	49,5	49,5	29,8	
	Sivu	13	45,0	50,5	52,5	54,5	51,5	46,0	48,0	49,0	49,5	53,0	49,5	50,5	49,5	49,5	49,5	29,8	
	Sivu	13	52,5	46,5	50,5	48,5	40,0	45,5	52,5	52,0	47,5	54,5	50,5	50,0	49,0	50,0	30,5		
	Sivu	13	54,5	41,0	50,0	53,0	50,0	47,0	46,5	55,0	51,0	47,5	50,0	49,5	52,0	50,0	30,5		
3A-502	Pohja	13	49,5	61,5	50,5	57,5	46,5	45,5	47,5	58,0	46,0	46,0	52,5	56,0	49,0	49,5	29,8		
	Hierretty	13	36,5	32,5	52,5	40,5	38,0	40,5	48,0	42,5	41,5	47,0	41,5	38,5	41,0	41,0	19,8		
	Hioittu	13	53,0	52,0	50,0	46,0	49,0	48,0	51,5	51,0	54,5	52,0	47,5	52,5	51,5	51,5	32,8		
	Sivu	13	52,5	53,0	44,5	54,5	45,0	50,0	52,0	53,5	50,5	48,0	53,5	52,5	53,5	52,5	34,4		
3A-502	Sivu	13	45,0	50,0	52,5	51,0	39,0	51,5	48,5	47,0	47,5	53,0	49,0	51,5	50,5	50,0	30,5		
	Sivu	13	52,5	49,5	53,0	55,0	44,0	44,0	44,5	46,0	48,5	47,5	45,5	50,0	50,5	48,5	28,4		
	Sivu	13	52,0	48,5	53,0	42,5	53,5	51,0	52,5	52,0	50,0	53,0	51,5	51,0	50,0	51,5	32,8		
	Pohja	13	51,5	60,0	57,0	50,0	56,0	49,5	51,5	47,0	50,5	54,5	51,0	51,5	51,5	51,5	32,8		
3A-601	Hierretty	13	38,5	47,0	36,5	34,5	43,0	40,5	38,0	44,5	35,0	40,0	41,0	42,5	45,0	40,5	19,4		
	Hioittu	13	46,5	46,5	60,0	43,5	51,5	50,5	50,5	57,5	52,5	47,5	54,0	55,5	53,5	51,5	32,8		
	Sivu	13	48,5	43,5	53,0	52,0	50,0	40,5	40,5	51,0	47,5	51,5	50,0	49,5	51,5	50,0	30,5		
	Sivu	13	45,0	47,5	47,0	42,5	49,5	49,5	43,5	48,0	45,5	48,0	45,0	46,0	46,0	46,0	25,2		
3A-601	Sivu	13	53,0	43,5	54,5	51,0	45,5	47,5	47,5	44,0	48,0	49,0	45,5	53,0	46,0	47,5	27,1		
	Sivu	13	51,5	45,5	48,0	49,0	43,0	44,0	42,5	45,0	43,0	48,5	43,0	45,5	44,5	45,0	24,0		
	Pohja	13	50,5	53,0	52,0	49,0	46,5	51,5	50,0	48,5	46,0	50,0	55,5	51,5	44,0	50,0	30,5		
	Hierretty	13	38,5	37,0	36,0	42,0	44,5	41,0	43,0	44,5	32,5	38,5	47,0	45,0	32,0	41,0	19,8		
3A-603	Hioittu	13	48,5	52,5	47,5	49,5	41,5	50,5	49,5	55,5	49,0	48,0	53,5	55,5	44,0	49,5	29,8		
	Sivu	13	51,5	52,0	48,0	52,0	50,5	47,5	49,0	49,5	49,0	48,0	51,0	49,0	48,5	49,0	29,1		
	Sivu	13	46,0	46,0	56,0	47,5	55,0	48,5	40,5	47,5	46,5	46,5	51,0	45,5	47,5	47,5	27,1		
	Sivu	12	45,0	44,5	45,0	47,5	40,5	49,0	50,0	46,5	42,5	43,5	47,5	47,5	45,0	45,0	24,0		
3A-603	Sivu	13	41,5	44,0	46,0	43,5	40,0	41,5	51,0	44,5	48,5	44,0	44,0	46,5	44,5	44,5	23,4		
	Pohja	13	55,0	50,0	50,0	61,0	52,5	54,0	55,0	56,5	50,5	53,0	52,5	54,0	47,5	53,0	35,3		
	Hierretty	12	49,5	38,5	43,5	36,5	40,0	36,0	55,0	40,0	41,0	45,5	42,5	41,5	41,0	41,0	19,8		
	Hioittu	12	70,5	54,5	54,0	54,0	60,5	48,5	66,0	70,0	59,5	49,0	48,0	43,5	53,5	54,0	37,0		

Hyätyt iskulokset ylävattu

Betonilaatu C35/45

Standardikuutio D150x300 kimmovasaroinnin mittaustulokset

Liite 17 (4/4)

Näyte	Olosuhde	n	Kimmovasaran iskujen arvot, kuutiolujuus [Q]													Mediaani [Q]	Mediaani [MPa]
4A-501	Sivu	13	50,5	43,5	51,0	47,0	46,5	43,5	42,5	43,5	42,5	44,5	39,5	40,5	41,0	43,5	22,4
	Sivu	13	44,5	45,0	42,0	49,5	45,0	42,0	46,0	46,0	43,5	44,5	40,0	48,0	41,5	44,5	23,4
	Sivu	13	51,5	43,0	49,5	42,0	43,0	44,5	42,0	52,0	47,0	43,0	48,5	41,0	41,5	43,0	21,8
	Sivu	13	56,0	47,0	49,5	44,0	42,5	49,0	43,5	46,5	46,5	43,5	48,0	43,5	44,0	46,5	25,8
4A-502	Pohja	13	52,5	61,5	48,0	48,5	52,5	51,5	48,5	54,5	48,5	59,0	57,0	50,5	52,5	34,4	
	Hierretty	13	41,0	37,0	43,0	36,0	35,0	45,5	40,5	39,5	43,0	49,0	44,5	44,5	41,0	19,8	
	Hioittu	13	44,0	50,5	48,0	47,0	43,0	42,5	45,5	42,5	44,5	51,0	47,0	41,0	44,5	23,4	
	Sivu	13	55,5	49,0	56,0	49,0	46,5	51,0	50,5	50,5	47,5	51,0	49,0	44,0	46,5	49,0	29,1
4A-601	Sivu	13	49,5	47,5	41,0	40,5	46,0	44,5	52,0	48,5	44,0	39,5	40,5	44,0	44,5	23,4	
	Sivu	13	50,0	51,0	50,0	49,5	45,5	53,0	51,0	45,5	45,0	46,5	40,5	40,5	46,0	25,2	
	Sivu	13	48,0	47,5	43,0	43,0	44,5	38,5	51,0	44,0	43,0	48,0	48,0	42,0	42,0	44,0	22,9
	Pohja	13	52,5	42,0	45,5	53,0	48,5	53,0	50,5	48,5	53,0	46,5	50,0	47,5	46,0	48,5	28,4
4A-602	Hierretty	13	37,5	36,5	46,0	43,0	42,5	47,0	44,0	40,5	41,0	40,5	40,0	49,0	41,0	41,0	19,8
	Hioittu	13	44,5	47,0	54,5	42,5	56,5	48,5	55,0	52,5	42,5	58,0	51,5	50,5	44,5	50,5	31,3
	Sivu	13	54,0	49,5	50,5	43,0	41,5	47,5	47,5	43,0	41,0	44,5	44,5	45,0	46,0	45,0	24,0
	Sivu	13	52,0	51,0	46,5	45,0	43,5	48,5	56,0	49,0	44,0	54,0	51,0	45,5	49,5	49,0	29,1
4A-601	Sivu	13	52,0	47,0	50,5	43,0	41,5	47,0	48,5	46,0	48,5	50,5	43,0	45,0	46,0	47,0	26,4
	Sivu	13	48,0	48,5	45,0	43,5	43,0	48,0	44,5	46,5	41,0	50,0	45,0	48,5	43,5	45,0	24,0
	Pohja	13	50,5	51,0	54,0	52,5	50,0	55,5	52,5	53,0	41,5	50,0	49,0	48,0	44,5	50,5	31,3
	Hierretty	13	43,5	45,5	45,0	48,0	45,5	44,5	42,5	42,0	43,0	41,5	45,0	49,0	39,5	44,5	23,4
4A-602	Hioittu	13	46,5	48,0	45,0	43,0	43,5	43,5	47,5	44,0	41,0	47,5	45,0	45,5	42,0	45,0	24,0
	Sivu	13	44,0	49,0	49,0	46,5	42,5	41,5	48,0	41,0	43,5	47,0	46,0	45,5	37,0	45,5	24,6
	Sivu	13	47,5	49,5	44,5	45,5	44,0	50,5	45,0	49,0	47,5	53,0	41,0	42,5	39,0	45,5	24,6
	Sivu	13	47,0	42,5	45,0	45,0	45,0	48,5	44,0	43,5	47,5	48,0	45,5	38,5	43,5	45,0	24,0
4A-601	Sivu	13	49,0	49,0	50,5	45,5	43,0	52,0	50,5	46,0	47,5	48,5	49,5	50,5	29,1	49,0	29,1
	Pohja	13	48,5	44,5	49,5	46,5	46,0	50,5	51,5	48,5	52,0	48,5	51,5	53,0	29,8	49,5	29,8
	Hierretty	13	43,0	37,5	40,0	42,0	43,0	48,0	49,5	52,5	45,0	53,5	48,5	53,5	24,0	45,0	24,0
	Hioittu	13	46,0	50,5	48,5	40,5	53,5	48,0	50,5	48,5	48,0	48,5	44,5	40,5	51,0	48,5	28,4

Hyätyt iskulokset ylivattu

## LIITE 18: Pakkasankestävyytlukujen laskenta

<b>P-luvun laskentataulukko</b>		Liikennevirasto 30.06.2016
<b>Työkohde</b>	Betonin puristuslujuustutkimus / TTY	
<b>Rakenneosa:</b>	Betonilaatu C35/45 P50	
<b>P-luvun laskenta</b>		
<b>Sementtilaatu:</b>	Valmistaja: <b>FINNSEMENTTI</b>	<b>P-luku 52</b>
	Nimike: <b>Plussementti CEM II</b>	
	Tyyppi: <b>CEM II/B-M(S-LL) 42.5 N</b>	
<b>Sementin määrä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>435</b>	
<b>Tehollinen vesimäärä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>177</b>	
Sementin seosaineet [%]	Betonin valmistuksessa lisätyt seosaineet [kg/m <sup>3</sup> ]	
masuunikuona <b>17</b>	masuunikuona <b>0</b>	
silika <b>0</b>	silika <b>0</b>	
lentotuhka <b>0</b>	lentotuhka <b>0</b>	
kalkkifilleri <b>8</b>		
Kiviaineksen ylänimellisraja D [mm]	<b>16</b>	
Jälkihoitoaika <b>28</b> vrk	Ilma % <b>4,35</b>	
<b>Linin erillishyväksyntä k<sub>A</sub>:lle on/ei</b>	<b>on</b>	
Sementin aktiivisuuskertoimen k <sub>A</sub>	1,00	
k <sub>A</sub> x sementin määrä	435 kg/m <sup>3</sup>	
Tehollinen sideainemäärä	435 kg/m <sup>3</sup>	
Sideainemäärä	435,4 kg/m <sup>3</sup>	
Vesi-sementtisuhte	0,41	
<b>Suhteituksen raja-arvojen täytyminen:</b>		
Seosaineiden kokonaismäärät:		
- masuunikuona 74 kg/m <sup>3</sup> 17,0 %	Tehollinen vesimäärän enimmäisarvo [ l/m <sup>3</sup> ]	180,7 P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
- kalkkifilleri % 35 kg/m <sup>3</sup> 8,0 %	Ilmamäärän tarkistus	4,2 P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
- silika % 0 kg/m <sup>3</sup> 0,0 %	Vähimmäisilmamäärä %	
- lentotuhka % 0 kg/m <sup>3</sup> 0,0 %		
<b>Suunnitelmassa esitetyt vaatimukset ja niiden täytyminen:</b>		
Suunnittelulujuus:	<b>C 35 / 45</b>	
P-luku	<b>P 50</b>	
Sillan osan/Rakenneosan tunnus (Ro01...16,Ro20...23,Ro30...53)	<b>Ro 20</b>	
Rasitusluokkaryhmä (R1/R2/R3/R4)	<b>R 1</b>	
<b>InfraRYL Osa 3:n jakson 42 000 edellyttämät vähimmäisvaatimukset ja niiden täytyminen:</b>		
Lujuusluokka	<b>C 30 / 37</b>	
P-lukuvaatimus	<b>P 30</b>	vaatimus täyttyy
Vähimmäissementtimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>300</b>	vaatimus täyttyy
Vesi-sementtisuhteen enimmäisarvo	<b>0,50</b>	vaatimus täyttyy

<b>P-luvun laskentataulukko</b>		Liikennevirasto 30.06.2016	
<b>Työkohde</b>	Betonin puristuslujuustutkimus / TTY		
<b>Rakenneosa:</b>	Betonilaatu C30/37 P20		
<b>P-luvun laskenta</b>			
<b>Sementtilaatu:</b>	Valmistaja: FINNSEMENTTI	<b>P-luku 33</b>	
	Nimike: Plussementti CEM II		
	Tyyppi: CEM II/B-M(S-LL) 42.5 N		
<b>Sementin määrä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>374</b>		
<b>Tehollinen vesimäärä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>181</b>		
Sementin seosaineet [%]	Betonin valmistuksessa lisätyt seosaineet [kg/m <sup>3</sup> ]		
masuunikuona <b>17</b>	masuunikuona	<b>0</b>	
silika <b>0</b>	silika	<b>0</b>	
lentotuhka <b>0</b>	lentotuhka	<b>0</b>	
kalkkifilleri <b>8</b>			
Kiviaineksen ylänimellisraja D [mm]		<b>16</b>	
Jälkihoitoaika <b>28</b> vrk	Ilma %	<b>4,18</b>	
<b>Livin erillishyväsyntä k<sub>A</sub>:lle</b>	on/ei	<b>on</b>	
Sementin aktiivisuuskertoimen k <sub>A</sub>		1,00	
k <sub>A</sub> x sementin määrä		374 kg/m <sup>3</sup>	
Tehollinen sideainemäärä		374 kg/m <sup>3</sup>	
Sideainemäärä		374,4 kg/m <sup>3</sup>	
Vesi-sementtisuhte		0,48	
<b>Suhteituksen raja-arvojen täytyminen:</b>			
Seosaineiden kokonaismäärät:		Tehollinen vesimäärän enimmäisarvo [l/m <sup>3</sup> ]	
- masuunikuona 64 kg/m <sup>3</sup> 17,0 %		183,7	P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
- kalkkifilleri % 30 kg/m <sup>3</sup> 8,0 %			
- silika % 0 kg/m <sup>3</sup> 0,0 %			
- lentotuhka % 0 kg/m <sup>3</sup> 0,0 %			
		Ilmamäärän tarkistus	P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
		Vähimmäisilmamäärä %	2,8
<b>Suunnitelmassa esitetyt vaatimukset ja niiden täytyminen:</b>			
Suunnittelulujuus:	<b>C 30 / 37</b>		
P-luku	<b>P 20</b>		
Sillan osan/Rakenneosan tunnus (Ro01...16,Ro20...23,Ro30...53)	<b>Ro 20</b>		
Rasitusluokkaryhmä (R1/R2/R3/R4)	<b>R 1</b>		
<b>InfraRYL Osa 3:n jakson 42 000 edellyttämät vähimmäisvaatimukset ja niiden täytyminen:</b>			
Lujuusluokka	<b>C 30 / 37</b>		
P-lukuvaatimus	<b>P 30</b>	vaatimus täyttyy	
Vähimmäissementtimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>300</b>	vaatimus täyttyy	
Vesi-sementtisuhteen enimmäisarvo	<b>0,50</b>	vaatimus täyttyy	

<b>P-luvun laskentataulukko</b>		Liikennevirasto 30.06.2016
<b>Työkohte</b>	Betonin puristuslujuustutkimus / TTY	
<b>Rakenneos:</b>	Betonilaatu C50/60 P50	
<b>P-luvun laskenta</b>		
<b>Sementtilaatu:</b>	Valmistaja: <b>FINNSEMENTTI</b>	<b>P-luku 64</b>
	Nimike: <b>Plussementti CEM II</b>	
	Tyyppi: <b>CEM II/B-M(S-LL) 42.5 N</b>	
<b>Sementin määrä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>437</b>	
<b>Tehollinen vesimäärä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>177</b>	
Sementin seosaineet [%]	Betonin valmistuksessa lisätyt seosaineet [kg/m <sup>3</sup> ]	
masuunikuona <b>17</b>	masuunikuona	<b>0</b>
silika <b>0</b>	silika	<b>15</b>
lentotuhka <b>0</b>	lentotuhka	<b>0</b>
kalkkifilleri <b>8</b>		
Kiviaineksen ylänimellisraja D [mm]		<b>16</b>
Jälkihoitoaika <b>28</b> vrk	Ilma %	<b>4,83</b>
<b>Livin erillishyväksyntä k<sub>A</sub>:lle on/ei on</b>		
Sementin aktiivisuuskertoimen k <sub>A</sub>		1,00
k <sub>A</sub> x sementin määrä	437 kg/m <sup>3</sup>	
Tehollinen sideainemäärä	467 kg/m <sup>3</sup>	
Sideainemäärä	451,7 kg/m <sup>3</sup>	
Vesi-sementtisuhde	0,38	
<b>Suhteituksen raja-arvojen täytyminen:</b>		
Seosaineiden kokonaismäärät:		
- masuunikuona 74 kg/m <sup>3</sup>	16,4 %	
- kalkkifilleri % 35 kg/m <sup>3</sup>	7,7 %	
- silika % 15 kg/m <sup>3</sup>	3,3 %	
- lentotuhka % 0 kg/m <sup>3</sup>	0,0 %	
Tehollinen vesimäärän enimmäisarvo [l/m <sup>3</sup> ]	179,8	P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
Ilmamäärän tarkistus Vähimmäisilmamäärä %	3,5	P-lukuohjeen vaatimus täyttyy
<b>Suunnitelmassa esitetyt vaatimukset ja niiden täytyminen:</b>		
Suunnittelulujuus:	<b>C 50 / 60</b>	
P-luku	<b>P 50</b>	
Sillan osan/Rakenneosan tunnus (Ro01...16,Ro20...23,Ro30...53)	<b>Ro 20</b>	
Rasitusluokkaryhmä (R1/R2/R3/R4)	<b>R 1</b>	
<b>InfraRYL Osa 3:n jakson 42 000 edellyttämät vähimmäisvaatimukset ja niiden täytyminen:</b>		
Lujuusluokka	<b>C 30 / 37</b>	
P-lukuvaatimus	<b>P 30</b>	vaatimus täyttyy
Vähimmäissementtimäärä [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>300</b>	vaatimus täyttyy
Vesi-sementtisuhteen enimmäisarvo	<b>0,50</b>	vaatimus täyttyy