

Jukka Haavisto
Anssi Laaksonen

Betonin puristuslujuus

Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista



Jukka Haavisto, Anssi Laaksonen

Betonin puristuslujuus

Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2018

Liikennevirasto

Helsinki 2018

Kannen kuvat: Jukka Haavisto

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-555-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Jukka Haavisto ja Anssi Laaksonen: Betonin puristuslujuus – Esiselvitys: Tausta ja määrittäminen koetuloksista. Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2018. 71 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-555-6.

Avainsanat: betoni, lujuus, puristuslujuus, ominaislujuus, mitoituslujuus, rakenne, rakennekoekappale, normikoe-kappale

Tiivistelmä

Tässä esiselvityksessä tavoitteena oli selvittää kirjallisuustutkimuksen keinoin taustoja siihen, miten rakennekoekappaleiden lujuustuloksista päädytään betonin mitoituslujuuteen, sekä tunnistaa betonin lujuustestaukseen liittyvät oleelliset tekijät. Esiselvityksen lähdemateriaalina on käytetty koti- ja ulkomaisia standardeja sekä kirjallisuudesta löytyviä tutkimustuloksia.

Raportin alussa on esitetty yleisesti betonin lujuuteen ja lujuuden määrittämiseen liittyviä tekijöitä, sekä esitelty muutamia aiheesta julkaistuja tutkimuksia. Kansalliset ohjeet ja käytännöt rakennekoekappaleiden lujuudenmäärittämisestä on esitetty Suomen, Ruotsin, Saksan, Iso-Britannian ja Yhdysvaltain osalta. Suomen osalta raportissa on esitetty myös betonin vaatimuksenmukaisuuden osoitusmenettely normikoe-kappaleita käyttäen sekä laskuesimerkki betonin mitoituslujuuden määrittämisestä rakennekoekappaleiden lujuustuloksista. Raportin lopussa on esitetty esiselvitysvaiheen johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella tunnistettiin neljä rakennekoekappaleista määritettävän betonin puristuslujuuden mitoitusarvoon vaikuttavaa osa-aluetta, jotka ovat

- Rakenne- ja normikoe-kappaleiden erot huomioivien korjauskertoimien käyttö
- Rakenteessa olevan betonin ominaislujuuden määrittämiseen käytettävät tilastolliset menetelmät
- Normikoe-kappaleen betonin ja rakenteessa olevan betonin lujuuksien eron huomiointi
- Betonin mitoituslujuuden määrittämisessä käytettävä materiaalin osavarmuusluku

Esiselvityksessä havaittiin, että rakennekoekappaleista saatavaan lujuustulokseen vaikuttaa suuri joukko tekijöitä, esimerkkeinä näytteen koko ja kosteusolosuhde. Lujuuteen vaikuttavien tekijöiden vaikutusten huomioidussa on eroja eri maiden välillä ja myös aihetta käsittelevissä tutkimuksissa havaittiin toisistaan poikkeavia johtopäätöksiä. Rakennekoekappaleista määritettävän lujuuden epävarmuutta on mahdollista vähentää vakioimalla mahdollisimman moni lujuuden määrittämiseen liittyvistä tekijöistä ja asettamalla ne mahdollisimman lähelle normikoe-kappaleita vastaavia arvoja. Mikäli perusmenettelystä poikkeavaa menettelyä käytetään, tulisi tällöin tuntea sen vaikutus näytteestä saatavaan lujuuteen mahdollisimman tarkasti.

Jukka Haavisto och Anssi Laaksonen: Betongens tryckhållfasthet – en förstudie: bakgrund samt att bestämma tryckhållfastheten utifrån provresultat. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 32/2018. 71 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-555-6.

Sammandrag

Syftet med denna studie var att genom litteraturstudier utreda bakgrunden till hur man utifrån hållfasthetsresultat för konstruktionsprovkroppar kommer fram till betongens dimensionerande hållfasthet samt att identifiera väsentliga faktorer i anslutning till hållfasthetstester av betong. Källmaterialet i förstudien bestod av inhemska och utländska standarder samt forskningsresultat i litteraturen.

I början av rapporten ges en allmän presentation av faktorer som anknyter till hållfastheten hos betong och till hur hållfastheten bestäms samt presenteras några publicerade undersökningar om detta. Nationella anvisningar om och praxis för hur hållfastheten hos konstruktionsprovkroppar bestäms presenteras för Finland, Sverige, Tyskland, Storbritannien och USA. För Finlands del presenterar rapporten också ett förfarande för påvisande av överensstämmelse med kraven med hjälp av normprovkroppar samt ett beräkningsexempel för hur betongens dimensionerande hållfasthet bestäms utifrån hållfasthetsresultat för konstruktionsprovkroppar. I slutet av rapporten presenteras slutsatser av förstudiefasen samt behovet av fortsatta studier.

Utifrån litteraturstudien identifierades fyra delområden som påverkar det dimensionerande värdet för betongens tryckhållfasthet, som bestäms utifrån konstruktionsprovkroppar, och dessa är

- användningen av korrigeringskoefficienter som beaktar skillnaderna mellan konstruktionsprovkroppar och normprovkroppar
- statistiska metoder som används för att bestämma den karakteristiska hållfastheten hos betongen i en konstruktion
- beaktande av skillnaden mellan hållfastheten hos betongen i en normprovkropp och hållfastheten hos betongen i en konstruktion
- partialsäkerhetskoefficienten för materialet som används för att bestämma betongens dimensionerande hållfasthet

I förstudien observerade man att konstruktionsprovkropparnas hållfasthetsresultat påverkas av ett stort antal faktorer, t.ex. provets storlek samt fuktförhållandet. Länderna förhåller sig olika till hur faktorer som påverkar hållfastheten beaktas, och man kunde också observera skillnader i slutsatserna i studier som behandlar detta. Genom att standardisera så många faktorer som möjligt som anknyter till bestämmandet av hållfastheten och genom att ställa in dessa så nära motsvarande värden för normprovkroppar som möjligt är det möjligt att minska osäkerheten i den hållfasthet som bestäms utifrån konstruktionsprovkroppar. Om man använder ett förfarande som avviker från det vanliga bör man så exakt som möjligt känna till dess effekt på den hållfasthet som erhålls från ett prov.

Jukka Haavisto and Anssi Laaksonen: Compressive strength of concrete – Preliminary survey: Background and estimation from test results. Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 32/2018. 71 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-555-6.

Abstract

The aim of this preliminary survey is to provide a literature review in order to investigate the connection between compressive strength measured in core samples and the design strength of concrete, and to identify the central factors involved in testing the strength of concrete. Source material for the preliminary survey includes Finnish and international standards and previous research results.

The first section of the report summarises factors related to concrete strength and its measurement, and reviews a selection of previous studies on the matter. The report describes national guidelines and practices on measuring the strength of core samples from Finland, Sweden, Germany, the UK and the US. In the case of Finland, the report also describes the procedure for demonstrating conformance using standard-cured test samples, and an example calculation on determining the design strength of concrete on the basis of test results from core samples. The final section of the report presents the conclusions of the preliminary survey and further research needs.

Based on the literature review, four areas were identified that affect the design value of concrete calculated from core sample tests:

- Use of correction factors to account for differences in core and standard-cured test samples
- Statistical methods used to determine the characteristic strength of concrete in core samples
- Accounting for the differences in strength in standard-cured test samples and core samples
- The material-specific partial safety factor used to determine the design strength of concrete

The preliminary survey found that the measured strength of core samples is affected by a large number of factors, such as the size and moisture condition of the sample. There are differences between countries in accounting for the various factors, and studies on the topic reached differing conclusions. The uncertainty of strength measurements from core samples can be reduced by standardising as many of the related factors as possible, and by correcting them as close to the corresponding values of standard-cured samples as possible. If non-standard procedures are used, their effects on the measured strength of samples should be understood as accurately as possible.

Esipuhe

Tässä julkaisussa raportoidaan Liikenneviraston tilaaman esiselvitysvaiheen tulokset aiheesta ”Betonin puristuslujuuden mitoitusarvon johtaminen rakennekoekappaleiden testatuista lujuustuloksista”.

Esiselvitys on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Vaativien rakenteiden tutkimusryhmässä. Tutkijana ja julkaisun kirjoittajana on toiminut diplomi-insinööri Jukka Haavisto. Työtä on yliopistossa ohjannut professori Anssi Laaksonen. Liikennevirastosta ohjauksessa ovat olleet mukana Minna Torkkeli, Heikki Lilja, Jani Meriläinen ja Heini Raunio.

Helsingissä toukokuussa 2018

Liikennevirasto
Tekniikka- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

1	BETONIN LUJUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	9
1.1	Yleistä betonin lujuudesta	9
1.2	Näytteen koko	12
1.3	Näytteen pituuden suhde halkaisijaan	13
1.4	Näytteen muoto	15
1.5	Näytteen kosteuspitoisuus	18
1.6	Näytteen porauskohdan sijainti ja suunta	18
1.7	Normikoe-kappaleen ja rakennekoekappaleen ero lujuudessa	19
1.8	Muita lujuuteen vaikuttavia tekijöitä	20
2	NORMIKOEKAPPALEILLA MÄÄRITETTY BETONIN LUJUUS	22
2.1	Yleistä	22
2.2	Valmistus ja säilytysolosuhteet	22
2.3	Puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuus	23
2.3.1	Yleistä	23
2.3.2	Betoniperheet	23
2.3.3	Alkutestaus	24
2.3.4	Näytteiden lukumäärä	25
2.3.5	Puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuuden ehdot	25
3	RAKENNEKOEKAPPALEIDEN LIERIÖ- JA KUUTIOLUJUUDEN MÄÄRITYS	28
3.1	Yleistä	28
3.2	Käytäntö Suomessa	28
3.2.1	Kokovaikutus	28
3.2.2	Pituus-halkaisija -suhteen vaikutus	29
3.2.3	Kosteuspitoisuuden vaikutus	29
3.2.4	Poraamisen vaikutus	30
3.2.5	Raudoitteiden vaikutus	30
3.2.6	Kypsyiden ja iän vaikutus	30
3.2.7	Kertoimien yhteisvaikutus	30
3.3	Käytäntö Ruotsissa	31
3.3.1	Kokovaikutus	32
3.3.2	Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus	32
3.3.3	Kosteuspitoisuuden vaikutus	33
3.3.4	Kypsyiden ja iän vaikutus	34
3.3.5	Muut vaikutukset	36
3.3.6	Yhteisvaikutus	37
3.4	Käytäntö Saksassa	37
3.4.1	Kokovaikutus	38
3.4.2	Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus	38
3.4.3	Kosteuspitoisuuden vaikutus	38
3.4.4	Muut vaikutukset	38
3.4.5	Yhteisvaikutus	38
3.5	Käytäntö Iso-Britanniassa	39
3.5.1	Pituus-halkaisija -suhteen vaikutus	39
3.5.2	Raudoitteiden vaikutus	39
3.5.3	Kypsyiden ja iän vaikutus	40
3.5.4	Muut vaikutukset	40
3.5.5	Yhteisvaikutus	41
3.6	Käytäntö Yhdysvalloissa	42
3.6.1	Kokovaikutus	42
3.6.2	Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus	42

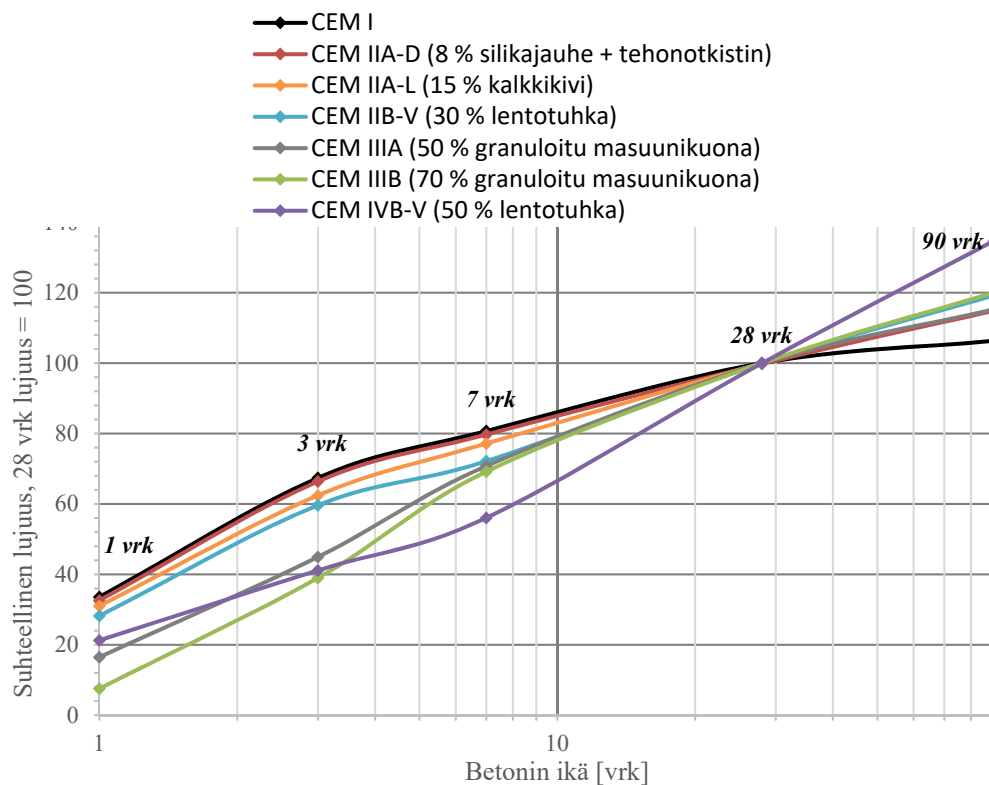
3.6.3	Kosteuspitoisuuden vaikutus	44
3.6.4	Poraamisen vaikutus	44
3.6.5	Raudoitteiden vaikutus	44
3.6.6	Kypsyys ja iän vaikutus	45
3.6.7	Yhteisvaikutus	45
4	OMINAISLUJUUDEN MÄÄRITYS RAKENNEKOEKAPPALEISTA	46
4.1	Yleistä	46
4.2	Koekappaleiden lukumäärä	46
4.2.1	Käytäntö Suomessa ja Ruotsissa	46
4.2.2	Käytäntö Saksassa	46
4.2.3	Käytäntö Iso-Britanniassa	47
4.2.4	Käytäntö Yhdysvalloissa	47
4.3	Poikkeavat tulokset	48
4.3.1	Käytäntö Iso-Britanniassa	48
4.3.2	Käytäntö Yhdysvalloissa	49
4.4	Ominaisarvon määrittäminen	50
4.4.1	Käytäntö Suomessa ja Ruotsissa	50
4.4.2	Käytäntö Saksassa	52
4.4.3	Käytäntö Iso-Britanniassa	53
4.4.4	Käytäntö Yhdysvalloissa	54
4.4.5	Ominaisarvo EN 1990:ssä esitetyn kokeellisen mitoituksen mukaan	56
4.5	Arvosteluerän hyväksyminen Suomessa	58
5	BETONIN MITOITUSLUJUUS	59
5.1	Betonimateriaalin osavarmuusluku	59
5.2	Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo	60
6	RAKENNEKOEKAPPALEISTA MITOITUSLUJUUTEEN	61
6.1	Yhteenveto	61
6.2	Laskentaesimerkki	62
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	66
	LÄHDELUETTELO	69

1 Betonin lujuuteen vaikuttavat tekijät

1.1 Yleistä betonin lujuudesta

Betoni on tekokiveä, joka muodostuu sideaineen – yleensä sementin, ja veden reagoitessa kemiallisesti keskenään. Reaktion seurauksena sementtigeeli kovettuu sementtikiveksi, joka sitoo betonin runkoaineen lujaksi kokonaisuudeksi. Betonin kovettumisen alkuvaiheessa reaktioita tapahtuu eniten, jolloin myös lujuudenkehitys on nopeaa. Ensimmäisten vuorokausien jälkeen lujuudenkehitys hidastuu jatkuen kuitenkin niin kauan kuin betonissa on jäljellä hydratoitumatonta sementtiä ja hydratoitumisreaktion mahdollistamiseksi on saatavilla myös vettä. [1] Betonin lopullisen lujuuden saavuttamiseen voi kulua siten useita vuosia – jopa vuosikymmeniä. Hydratoitumisaste vaihtelee käytännössä suuresti riippuen vallitsevista olosuhteista ja betonissa käytetyistä osa-aineista. Todellista hydratoitumisastetta on mahdollista arvioida ohuthienäytteiden avulla.

Betonin osa-aineista lujuuteen ja lujuudenkehitykseen vaikuttavat etenkin käytettävän sideaineen ominaisuudet. [1] Sementin valmistusvaiheessa portlandsementin eri päämineraalien keskinäisillä suhteilla voidaan vaikuttaa sementin lujuudenkehitykseen ja loppulujuuteen. Sementin hienompi jauhatus edesauttaa hydratoitumisreaktioiden tapahtumista nopeuttaen siten betonin lujuudenkehitystä. [2] Esimerkki eri sementtilaaduista valmistetun betonin suhteellista lujuudenkehityksestä on esitetty kuvassa 1.1.



Kuva 1.1 Esimerkkikaavio eri sementtityyppien vaikutuksesta betonin suhteelliseen lujuudenkehitykseen, mukailen lähdeä [3].

Betonin tilavuudesta noin 65–80 % on runkoainetta, joten on selvää, että myös runkoaineen ominaisuuksilla on oleellinen vaikutus betonin ominaisuuksiin. [1] Runkoaineen lujuus on tyypillisesti betonia selvästi korkeampi, eikä sitä näin ollen normaalisti tarvitse ottaa erikseen huomioon. Poikkeuksen tähän muodostavat erittäin korkean lujuuden omaavat betonit, joissa myös kiviaineksen lujuuteen saattaa olla tarpeen kiinnittää huomiota. [4] Kivilajien lujuuden lisäksi myös kiviaineksen rakeisuus, puhtaus ja raemuoto vaikuttavat betonin lujuusominaisuuksiin [1]. Polat et al. havaitsi tutkimuksessaan [5] pyöreällä kiviaineksella valmistetulla betonilla korkeampia lujuuksia kuin sauvamaisilla tai levymaisilla kiviaineksilla valmistetuilla betoneilla. Useissa tutkimuksissa murskatulla runkoaineksella valmistetulla betonilla on havaittu saavutettavan luonnonkivestä valmistettua betonia korkeampia lujuuksia, mutta myös vastakkaisia havaintoja on tehty. [6], [7]

Lämpötilan ja iän yhteisvaikutusta betonilla kutsutaan kypsyudeksi. Betonin lujuuden kehittymistä on mahdollista arvioida erilaisten kypsyyslaskelmien ja käyrästöjen avulla, joista erityisesti Sadgroven menetelmä on paljon käytetty. Menetelmässä määritetään tunnetuissa lämpötilaoloissa lujittuneelle betonille kypsyysikä, joka vastaa +20 °C säilytetyn betonin lujuudenkehitystä. Kypsyysikä perusteella määritetään betonin arvioitu lujuus tarkasteluhetkellä kirjallisuudesta löytyvien käyrästöjen avulla. Betonin kypsyysikä Sadgroven menetelmällä määritetään kaavan 1.1 mukaisesti. [1]

$$t_{20} = \left(\frac{T(t) + 16^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C}} \right)^2 \cdot t \quad (1.1)$$

missä

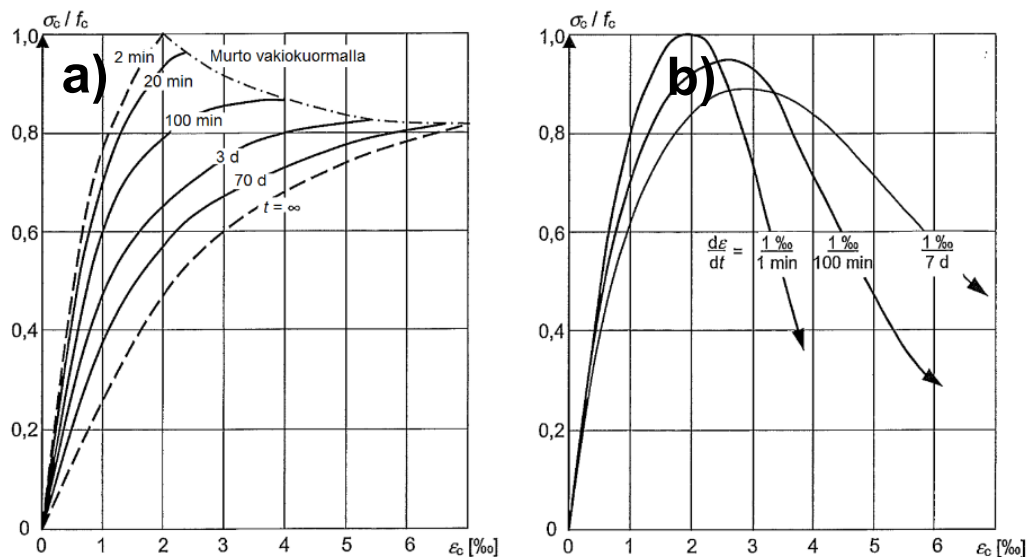
- t on betonin lujittumisaika;
- $T(t)$ on betonin lämpötila ajanjaksona t .

Puristuslujuutta pidetään betonin tärkeimpänä ominaisuutena ja se antaa hyvän yleiskuvan myös betonin laadusta. Puristuslujuuden funktiona voidaan suunnittelussa määrittää myös muita betonin mekaanisia ominaisuuksia. Näitä ovat muun muassa betonin vetolujuus ja kimmokerroin. Puristuslujuudella on oma vaikutuksensa myös betonin säilyvyysominaisuuksiin. [1] Betonin vetolujuus on puristuslujuuteen nähden hyvin matala, tyypillisesti vain noin 5–8 % puristuslujuudesta. [8] Tässä raportissa rajoitaudutaan pelkästään betonin puristuslujuuden määrittämiseen.

Betonin puristuslujuuteen vaikuttavat kovettumisolosuhteiden ja käytettyjen raaka-aineiden ohella merkittävästi myös betonissa käytetty vesi-sementti-suhde ja betonin tiivistysaste. Korkea vesi-sementti-suhde ja matala betonin tiivistysaste lisäävät betonin vesi- tai ilmatäytteisten huokosten määrää, jonka seurauksena betonin lujuus laskee. [2] Standardin EN 13791 [9] opastavan liitteen A mukaan yhden prosenttiyksikön lisäys betonin ilmapitoisuudessa heikentää betonin lujuutta noin 5–8 prosenttia.

Betonin kuormitusajalla ja kuormitusnopeudella on selkeä vaikutus betonin lujuuteen ja jäykkyyteen. Betonin lujuus määritetään lyhytkestoisen puristuskokeen perusteella. Kuitenkin todellisessa rakenteessa kuormitus on tyypillisesti pitkäaikaista, jolloin myös betonin lujuus on matalampi. Tämän vuoksi rakenteiden suunnittelussa betonin lujuutta alennetaan Suomessa kertoimella $\alpha_{cc} = 0,85$. [8] Standardin EN-1992-1-1 (Eurokoodi 2) suositusarvo vastaavalle kertoimelle on $\alpha_{cc} = 1,00$, jota perustellaan betonin lujuuden kehittymisellä lujuuden arvosteluiän eli 28 vuorokauden jälkeen, jolloin lujuuden

kehittyminen ajan myötä osaltaan kompensoisi puristuskoetestausta pidempi-kestoista kuormitusta. [10] Tämän raportin aihepiiriin liittyen tulee kuitenkin huomioida, että mikäli betonin ominaislujuus määritetään rakennekoekappaleiden avulla, on mahdollista, että testaushetkellä betonin lujuuspotentiaali on jo käytetty, eikä betonin lujuuden lisäkehittymistä voida enää pitää kompensoivana tekijänä. Kuormitusajan ja -nopeuden vaikutusta betonin lujuuteen ja jäykkyyteen on havainnollistettu kuvassa 1.2.



Kuva 1.2 a) Kuormitusajan ja b) kuormitusnopeuden vaikutus betonin lujuuteen, mukailten lähdettä [11].

Betoninäytettä puristettaessa se pyrkii laajenemaan poikittaissuunnassa. Materiaalille ominaista poikittais- ja pitkittäissuuntaisten venymien suhdetta kuvataan Poissonin luvulla, joka on betonilla luokkaa $\nu = 0,10-0,20$ ja teräksellä luokkaa $\nu = 0,27-0,30$. [12] Betonin puristuskokeessa kuormituslevyn ja näytteen väliseen kosketuspintaan muodostuva kitka rajoittaa näytteen päässä tapahtuvia muodonmuutoksia, jonka seurauksena näytteeseen muodostuu kompleksinen jännitystila. Kitka on seurausta teräksen ja betonin keskenään erisuuruista kimmokertoimista ja Poissonin luvuista. [2]

Betonin yksiakselisessa puristusrasituksessa sementtikiveen muodostuu jännityksen pääsuunnan suuntaisia halkeamia, jotka kuormituksen kasvaessa yhdistyvät toisiinsa aiheuttaen lopulta kappaleen murron. [8] Moniakselisessa puristusrasituksessa betonin on mahdollista saavuttaa huomattavasti suurempia lujuuksia kuin yksiakselisessa. Betonin murtotapa muuttuu tällöin hyvin hauraaksi. [2]

EN-standardeissa betonin lujuusluokka ilmoitetaan lieriö- ja kuutiolujuuden suhteena. [13], [14] Esimerkiksi C30/37-lujuusluokan betonin lieriölujuus on 30 MPa ja kuutiolujuus, eli vanha K-lujuus, 37 MPa. Nämä karakteristiset lujuusarvot ajatellaan olevan 28 vuorokauden ikäisillä normikoekappaleilla testatun betonin 5 % alafraktiiliarvoja. [8] Eurokoodin mukaisessa rakenteiden mitoituksessa käytetään lieriölujuuksia. [15]

Betonin lujuuteen vaikuttavien erilaisten muuttujien määrä on hyvin suuri. Siksi betonin valmistajilla on oltava testauksessa standardisoidut olosuhteet ja menettelyt, jotta eri betonien lujuustestauksen tuloksia olisi mahdollista verrata keskenään. Nämä laboratoriotestit suoritetaan niin sanotuilla normikoe-kappaleilla. Normikoe-kappaleet ovat muotteihin valettavia betoninäytteitä, jotka tiivistetään huolellisesti ja joita säilytetään muotista purkamisen jälkeen aina testaukseen saakka vesiupotuksessa tai korkeassa suhteellisessa kosteudessa. [16] Normikoe-kappaleiden avulla saadaan tarkasteltavasta betonista selville sen potentiaalinen lujuus. [2] Normikoe-kappaleiden puristustestausta ja lujuuden määrittystä on käsitelty tarkemmin tämän raportin luvussa 2.

Betonin puristuslujuutta voidaan testata myös valmiista rakenteesta porattavista rakennekoekappaleista. Tarve rakenteesta määritettävään betonin lujuuteen voi muodostua esimerkiksi, kun: [17], [18]

- normikoe-kappaleilla määritetty betonin lujuus ei ole ollut vaatimuksenmukaista
- halutaan arvio betonin lujuudesta, jossa mukana on myös betonin kuljetuksen, valu- ja tiivistystyön sekä jälkihoidon vaikutus
- tarkasteltavan rakenteen betonin lujuudesta ei ole ennakkotietoa, esimerkiksi rakenteiden korjaus- ja muutostöissä
- epäillään, että tarkasteltavan rakenteen lujuus on heikentynyt, esimerkiksi tulipalon tai ylikuormituksen seurauksena

1.2 Näytteen koko

Rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutusta näytteestä saatavaan puristuslujuuteen on tutkittu paljon, mutta tutkimusten johtopäätökset eroavat osin toisistaan. Osassa tutkimuksista ei näytteen halkaisijalla ole havaittu olevan suurta vaikutusta näytteestä saatavaan puristuslujuuteen [19] ja [20], mutta osassa tutkimuksista [21] ja [22] pienellä lieriökoolla on saatu selkeästi matalampia lujuuksia kuin suurella. Valulieriöille tehdyissä kuormituksissa on yleisesti havaittu vastakkainen vaikutus, eli suuremmilla valulieriöillä on tyypillisesti saatu pieniä lieriöitä matalampia lujuustuloksia. Kokovaikutusta on tutkittu pääosin näytteillä, joiden pituus-halkaisija-suhde (L/D-suhde) on 2,0. [20] Yhtenäinen havainto kokovaikutuksesta on, että pienempään lieriökokoon siirryttäessä lujuustulosten hajonta kasvaa. [23]

Bartlett ja MacGregor ovat tutkimuksessaan [24] koonneet yhteen aiheesta aikaisemmin julkaistuja tutkimuksia ja tehneet näistä johtopäätöksiä. He ovat löytäneet kirjallisuudesta neljä mahdollista selitystä näytteen halkaisijasta riippuviin lujuuseroihin, jotka ovat:

1. Näytteen poraus saattaa vaurioittaa rakennekoekappaleiden pintoja, jolloin pintoihin voi muodostua mikrohalkeilua. Porauksessa lävistetään myös runkoainespattikkelit, jotka voivat näin ollen lohjeta näytteestä kuormituksen aikana, mikäli partikkelin tartunta sementtikiveen on porauksen seurauksena heikentynyt. Koska pienillä lieriöillä näytteen pinta-alan suhde tilavuuteen on suurempi, on vaurioituneella pinnalla tällöin suurempi vaikutus näytteen lujuuteen kuin suurilla näytteillä.

2. Mikäli kuormituslaitteen kuormituslevyjen jäykkyys ei ole riittävä, voi levyjen taivutusmuodonmuutoksesta aiheutua kuorman keskittyminen näytteen keskiosiin tasaisen jakautumisen sijaan. Tämä ilmiö voi suurella näytekoolla aiheuttaa näytteeseen halkaisuvoimia, jotka rikkovat näytteen tasaista kuormaa aiemmin ja näytteen lujuus jää tällöin matalammaksi.
3. Rakenteessa olevat luontaiset lujuuserot vaikuttavat pienten rakennekoekappaleiden lujuustuloksiin oletettavasti voimakkaammin. Esimerkiksi laattarakenteessa yläpinnan betoni on yleensä alapinnan betonia heikompaa. Näin ollen pienten rakennelieriöiden osalta lujuustulosten hajonta on oletettavasti suuria lieriöitä isompi.
4. Näytteen kokovaikutukselle on esitetty kaksi erilaista teoreettista mallia: heikoimman lenkin teoria ja lujuuden summausteoria. Hauraille materiaaleille esitetyssä heikoimman lenkin teoriassa otaksutaan lujuuden määräytyvän näytteessä olevan heikoimman osuuden mukaisesti. On luonnollista ajatella, että suurempiin näytteisiin mahtuu myös suurempi hajonta heterogeenisen betonin eri lujuuden omaavia elementtejä, jolloin todennäköisyys heikoimman aineksen osumisesta näytteeseen on suurempi. Näin ollen suurempien näytteiden lujuuden keskimääräinen arvo jäisi pienempiä näytteitä matalammaksi. Toinen esitetty teoria on lujuuden summausteoria, jonka mukaisesti näytteen lujuus määräytyisi näytteissä olevien eri lujuuden omaavien elementtien summana.

1.3 Näytteen pituuden suhde halkaisijaan

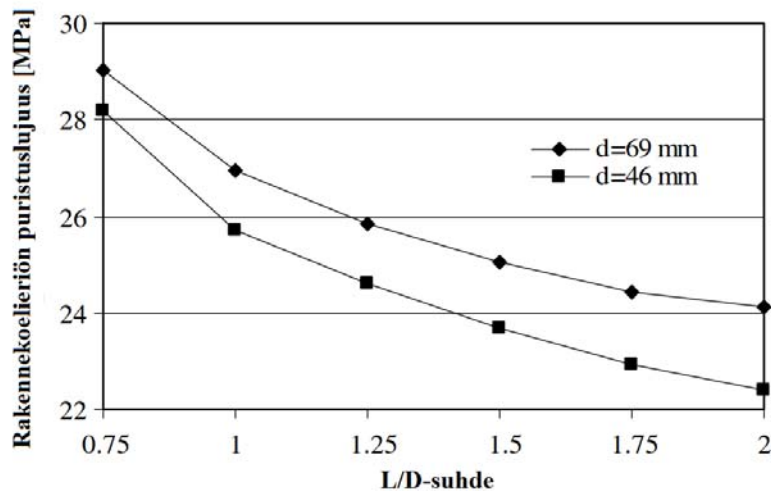
Näytteen pituuden suhteen halkaisijaan (L/D-suhde) tiedetään vaikuttavan merkittävästi näytteestä saatavaan puristuslujuuteen näytteessä vallitsevan erilaisen jännitys jakauman seurauksena. Puristuslaitteen kuormituslevyjen ja näytteen välinen kitka vähentää näytteen puristuskokeen aikaisia vaakasuuntaisia muodonmuutoksia. Tämä vaikutus on sitä suurempi, mitä lyhemmästä näytteestä on kysymys. L/D-suhteen kasvaessa näytteestä saadaan siten heikompia lujuusarvoja. [17] L/D-suhteeltaan 2,0 olevilla näytelieriöillä kuormituslevyjen ja näytteen välisen kitkan vaikutus lujuustulokseen ajatellaan olevan jo merkityksetön. [23]

Chen et al. [25] tutki rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten hajontaa kuudella erilaisella L/D-suhteella. Tutkimuksessa koelieriöiden halkaisija oli 74 mm, lieriöiden L/D-suhde vaihteli 0,5–4,0 välillä ja jokaisesta L/D-suhteesta testattiin 50 koelieriötä. Chen et al. totesi tulostensa perusteella rakennekoekappaleiden L/D-suhteella olevan merkittävä vaikutus näytteistä saataviin lujuuksiin. Tämä korostui etenkin hyvin matalilla lieriöillä. Tutkimuksessa näytteiden keskihajonta kasvoi L/D-suhteen kasvaessa. Tutkimuksen tuloksia on esitetty taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1 Puristuslujuuden tutkimustuloksia eri L/D-suhteen omaavista rakennekoekappaleista, joiden halkaisija on 74 mm [25].

L/D-suhde	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Puristuslujuuden keskiarvo, f_m [MPa]	71,1	53,5	46,6	43,1	41,2	39,2
Puristuslujuuden suhde lieriöön, jonka L/D = 2,0	165 %	124 %	108 %	100 %	96 %	91 %
Keskihajonta, s [MPa]	6,8	9,0	8,2	9,5	10,5	10,0
Variaatiokerroin, V_x	0,10	0,17	0,18	0,22	0,25	0,25

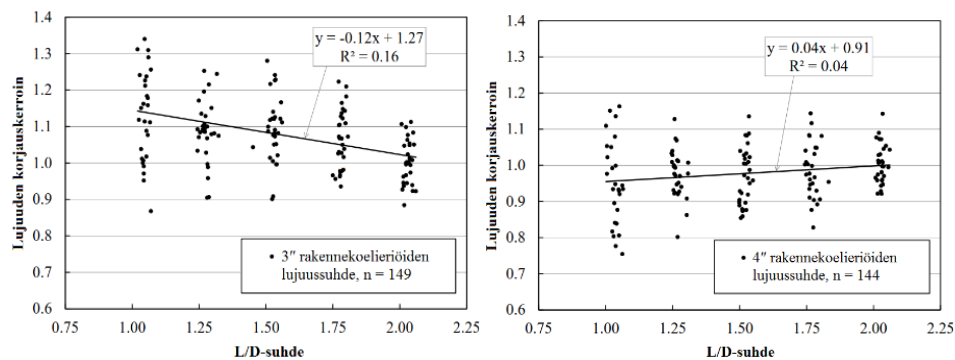
Tuncan et al. [26] tutki L/D-suhteen vaikutusta lujuustuloksiin halkaisijaltaan 46 ja 69 mm olevilla rakennekoelieriöillä. Puristuslujuus määritettiin tutkimuksessa yhteensä lähes 3 000 rakennekoelieriöstä, joissa muuttujina oli halkaisijan ja L/D-suhteen lisäksi runkoaineen ominaisuudet. Kuvassa 1.3 on esitetty koonti tutkimuksen kaikkien koetulosten keskiarvoista rakennekoelieriön L/D-suhteen ja halkaisijan mukaan jaoteltuina. Tuncan et al. havaitsi, että L/D-suhteen pienentyessä 69 mm näytteistä saatavat lujuudet kasvavat. Havainto oli pienemmillä 46 mm rakennekoelieriöillä vielä selkeämpi.



Kuva 1.3 Tuncan et al. tutkimuksen koetulokset L/D-suhteen merkityksestä rakennekoekappaleesta saatavaan lujuuteen, mukaillen lähdeä [26].

Carroll et al. [27] tutki rakennekoekappaleen halkaisijan, betonin tavoitelujuuden ja betonin runkoaineen vaikutusta näytteen L/D-suhteen merkittävyyteen näytteen lujuudessa. Tutkimus suoritettiin kahdelle lieriön halkaisijalle: 3" (~75 mm) ja 4" (~100 mm), kolmelle betonin tavoitelujuudelle: 6 000, 8 000 ja 10 000 psi (~40 MPa, ~55 MPa ja ~70 MPa), kahdelle betonin runkoaineelle (max. raekoko ~19 mm ja ~25 mm) sekä viidelle L/D-suhteelle: 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 ja 2,00.

Tutkimuksessa näytteen halkaisijan havaittiin vaikuttavan L/D-suhteen merkitykseen betonin korjatussa lujuudessa. Halkaisijaltaan 100 mm olevilla näyteliiriöillä lujuuden korjauskertoimen $L/D = 2,0$ lieriötä vastaavaksi oli keskimäärin hyvin lähellä kirjallisuudesta löytyviä kertoimia, mutta 75 mm näyteliiriöiden osalta lujuustulosten ero yleisesti käytössä oleviin korjauskertoimiin oli merkittävä. Tutkimuksen johtopäätöksenä suositeltiin, että halkaisijaltaan pienempiä kuin 3,75" (~95 mm) rakennekoelieriöitä tulisi käyttää lujuuden määrittämisessä vain, mikäli L/D-suhte on 2,0. Carroll et al. [27] tutkimuksen tuloksia on esitetty kuvassa 1.4, jota tulkittaessa tulee huomioida, että tulokset on esitetty lujuuden korjauskertoimina, toisin sanoen jokaisen yksittäisen näytteen lujuustulos on jaettu $L/D = 2,0$ lieriöiden tulosten keskiarvolla. Kuvista voidaan päätellä, että tulosten hajonta tutkimuksessa on ollut suurta, jota kuvastaa myös erittäin matalat korrelaatiokerroimet L/D-yhteyksien välillä. Mielenkiintoinen yksityiskohta on myös se, että tutkimuksessa näytteiden keskihajonta pieneni L/D-suhteen kasvaessa, joka on vastakkainen havainto Chen et al. [25] tutkimukselle.



Kuva 1.4 Carroll et al. tutkimuksen koetulokset lieriön halkaisijan mukaan jaoteltuina. Vasemmassa kaaviossa on halkaisijaltaan 75 mm ja oikean puoleisessa kaaviossa halkaisijaltaan 100 mm koelieriöiden tulokset. Kuvassa on esitetty yksittäisille lujuustuloksille korjauskertoimet, joilla kertomalla lujuustulos saataisiin $L/D = 2,0$ lieriöiden lujuustulosten keskiarvoa vastaavaksi, mukailen lähde [27].

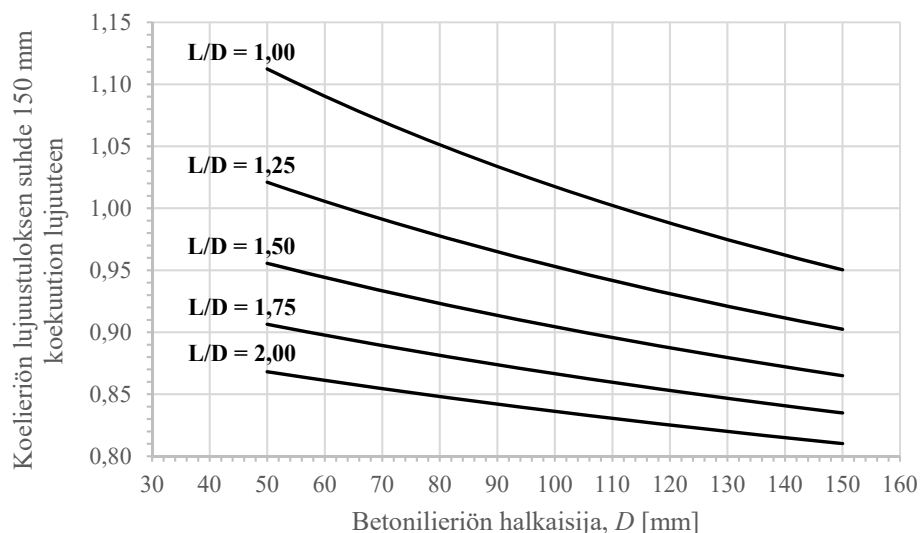
1.4 Näytteen muoto

Kuutio- ja lieriölujuuksien keskinäinen suhde ei ole suunnitteluohjeissa vakio. Neville [2] on suureen koemäärään perustuen esittänyt yhteyden näytteen lujuuden ja koekappaleen koon ja muodon suhteelle. Kaavalla 1.2 voidaan verrata tietyn kokoisen ja muotoisen valulieriön lujuutta sivumitaltaan 150 mm olevaan kuutiolujuuteen. Kuvassa 1.5 on esitetty kaavan 1.2 mukaan määritetyt suhteet eri kokoisten lieriöiden ja 150 mm kuution välillä.

$$\frac{f_i}{f_{cube;150}} = 0,56 + 0,697 / \left(\frac{V}{150 [mm] \cdot L \cdot D} + \frac{L}{D} \right) \quad (1.2)$$

missä

- V on betoninäytteen tilavuus;
- L on betoninäytteen pituus;
- D on betoninäytteen pienin sivumitta tai halkaisija.



Kuva 1.5 Nevillen [2] esittämän yhteyden (kaava 1.2) mukaan määritetyt betoni-lieriöiden lujuuksien suhteet 150 mm koekuution verrattuna.

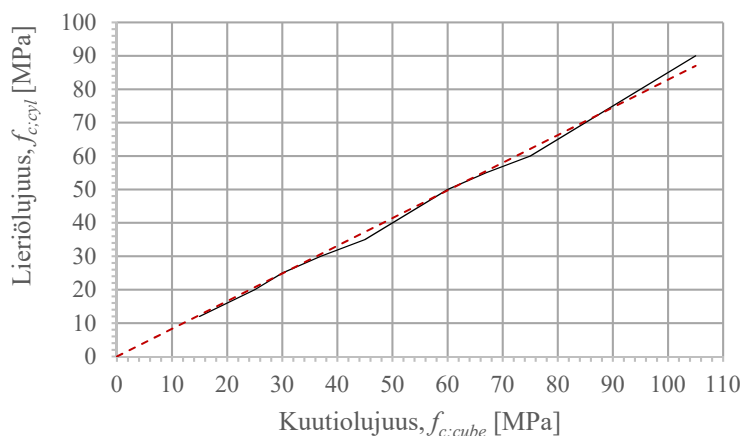
Standardin EN 1992-1-1 [14] mukaiset suunnittelussa käytettävät lieriö- ja kuutiolujuuksien suhteet on esitetty kaavamuotoon sovitettuina taulukoissa 1.2 ja 1.3. Samat suhteet on esitetty graafiseen muotoon sovitettuina kuvassa 1.6, josta havaitaan, että lieriö- ja kuutiolujuuksien suhde on lujuusluokasta riippumatta hyvin lähellä vakiota. Kuvaajaan on lisätty suhteiden välille myös trendiviiva, jonka perusteella standardin EN 1992-1-1 [14] mukainen lineaariseen muotoon sovitettu yleinen lieriö- ja kuutiolujuuksien välinen suhde olisi 0,828.

Taulukko 1.2 Muunnoskaavat lieriölujuuksista kuutiolujuuksiin EN 1992-1-1 [14] perusteella.

Lieriölujuus $f_{c,cyl}$ välillä	Muunnoskaava kuutiolujuudeksi $f_{c,cube}$
12...20 MPa	$f_{c,cube} = 15[MPa] + (f_{c,cyl} - 12[MPa]) \cdot 1,25$
20...25 MPa	$f_{c,cube} = 25[MPa] + (f_{c,cyl} - 20[MPa])$
25...30 MPa	$f_{c,cube} = 30[MPa] + (f_{c,cyl} - 25[MPa]) \cdot 1,4$
30...35 MPa	$f_{c,cube} = 37[MPa] + (f_{c,cyl} - 30[MPa]) \cdot 1,6$
35...50 MPa	$f_{c,cube} = 45[MPa] + (f_{c,cyl} - 35[MPa])$
50...55 MPa	$f_{c,cube} = 60[MPa] + (f_{c,cyl} - 50[MPa]) \cdot 1,4$
55...60 MPa	$f_{c,cube} = 67[MPa] + (f_{c,cyl} - 55[MPa]) \cdot 1,6$
60...90 MPa	$f_{c,cube} = 75[MPa] + (f_{c,cyl} - 60[MPa])$

Taulukko 1.3 Muunnoskaavat kuutioluuksista lieriölujuuksiin EN 1992-1-1 [14] perusteella.

Kuutioluuksien $f_{c,cube}$ välillä	Muunnoskaava lieriölujuudeksi $f_{c,cyl}$
15...25 MPa	$f_{c,cyl} = 12[MPa] + \frac{f_{c,cube} - 15[MPa]}{1,25}$
25...30 MPa	$f_{c,cyl} = 20[MPa] + f_{c,cube} - 25[MPa]$
30...37 MPa	$f_{c,cyl} = 25[MPa] + \frac{f_{c,cube} - 30[MPa]}{1,4}$
37...45 MPa	$f_{c,cyl} = 30[MPa] + \frac{f_{c,cube} - 37[MPa]}{1,6}$
45...60 MPa	$f_{c,cyl} = 35[MPa] + f_{c,cube} - 45[MPa]$
60...67 MPa	$f_{c,cyl} = 50[MPa] + \frac{f_{c,cube} - 60[MPa]}{1,4}$
67...75 MPa	$f_{c,cyl} = 55[MPa] + \frac{f_{c,cube} - 67[MPa]}{1,6}$
75...105 MPa	$f_{c,cyl} = 60[MPa] + f_{c,cube} - 75[MPa]$



Kuva 1.6 Kuutio- ja lieriölujuuksien suhteet graafisessa muodossa standardin EN 1992-1-1 [14] lujuusluokkien perusteella. Katkoviivalla on esitetty lineaarinen trendiviiva näiden suhteiden välille. Tämän kulmakerroin on 0,828.

Dillon ja Rankin [28] vertailivat kokeellisessa tutkimuksessaan D100 mm x 200 mm normikoelieriöiden ja sivumitaltaan 150 mm olevien normikoekuutioiden lujuuksia ja saivat näiden lujuuksien suhteeksi 0,86. Betoninäytteitä kuormitettiin tutkimuksessa viitenä eri ajankohtana 7...84 vuorokauden ikäisinä. Yhteensä tutkimuksessa kuormitettiin 15 normikoekuutioita ja 15 normikoe-lieriötä. Tutkimuksessa käytetyn betonin kuutioluuksien oli 28 vuorokauden ikäisenä 29 MPa.

1.5 Näytteen kosteuspitoisuus

Näytteen sisältämä kosteuspitoisuus on yksi lujuuteen oleellisesti vaikuttavista tekijöistä. Puristettaessa betonia sen huokosiin absorboitunut vesi pyrkii paineen vaikutuksesta poistumaan ja aiheuttaa näytteeseen siten ylimääräisen ulkoisen paineen, jonka vuoksi näytteen jännitykset kasvavat ja lujuus jää kuivaa näytettä matalammaksi. [29]

Bartlett ja MacGregor [29] havaitsivat kokoamistaan tutkimuksista, että rakennekoekappaleet, joita oli säilytetty ennen testausta seitsemän vuorokauden ajan normaalissa huoneilmassa (10-21 °C, RH 40-60 %) olivat lujuudeltaan keskimäärin 14 % korkeampia kuin näytteet, joita oli säilytetty ennen testausta vähintään 40 tuntia vesiupotuksessa. Koelieriöt, joissa oli mukana vesikäyttöisestä porauksesta aiheutunut vähäinen kosteuslisä, olivat lujuudeltaan keskimäärin 9 % korkeampia kuin vesiupotuksessa olleet lieriöt.

Cambell ja Tobin [21] vertailivat tutkimuksessaan uunikuivattujen D150 mm x 300 mm rakennekoelieriöiden lujuustuloksia vesiupotuksessa olleisiin saman kokoiisiin rakennekoelieriöihin ja havaitsivat vesiupotuksessa olleiden lieriöiden lujuustulosten olleen noin 20 % matalampia uunikuivauksessa olleisiin lieriöihin nähden, kun betoni oli valmistettu normaalista luonnonkiviaineksesta. Kevyestä runkoaineksesta valmistetussa betonissa ero oli sen sijaan pienempi. Vesiupotuksessa olleiden näytteiden lujuustulokset olivat tällöin vain noin 7 % matalampia uunikuivattuihin näytteisiin nähden.

Standardin EN 13791 [9] opastavassa liitteessä A on mainittu vesiupotuksessa olleiden rakennekoekappaleiden lujuuksien olevan 10–15 % matalampia kuin vastaavien ilmasäilytyksessä olleiden näytteiden, joissa kosteuspitoisuus on tyypillisesti 8–12 %. Standardi EN 13791 [9] velvoittaa näytteitä säilytettävän laboratorion olosuhteissa vähintään kolmen vuorokauden ajan ennen testausta, ellei käytännön syyt pakota tästä poikkeamaan.

1.6 Näytteen porauskohdan sijainti ja suunta

Porauskohdan valinta rakenteessa vaikuttaa näytteestä saatavaan lujuuteen. Erityisesti näytteenottokohdan korkeusaseman on havaittu vaikuttavan siten, että rakenteen yläosista määritetyt lujuudet ovat usein rakenteen alaosia matalampia. Tähän syynä ovat muun muassa betonin plastisen painuman aiheuttama veden nousu pintaa kohti sekä erot betonin tiivistyvyydessä. [2]

Rakennekoekappaleet porataan tyypillisesti joko kohtisuoraan tai yhden-suuntaisesti betonin valusuuntaan nähden. Useissa aiheesta laadituissa tutkimuksissa on havaittu valusuuntaan porattujen lieriöiden lujuustulosten olleen suuruusluokaltaan noin 10 % korkeampia kuin valusuuntaan nähden kohtisuoraan poratuilla lieriöillä. Tosin kirjallisuudesta löytyy myös tutkimuksia, joissa poraussuunnalla ei ole havaittu vaikutusta näytteen lujuuteen. [27] Lujuuseroon on esitetty syyksi tuoreessa betonissa tapahtuvaa vedennousua pintaa kohti, jolloin karkeapintaisten runkoainesrakeiden alapuolelle on mahdollisuus jäädä vesitaskuja, joiden seurauksena runkoainesrakeen ja sementtikiven tartunta jää tältä osin heikommaksi. Valusuuntaan nähden kohtisuoraan poratuissa näytteissä runkoainesrakeiden alapuolelle jääneet heikommät vyöhykkeet tulevat puristuskokeessa jännityksen pääsuunnan suuntaisiksi, jolloin puristuslujuus jää matalammaksi. [30]

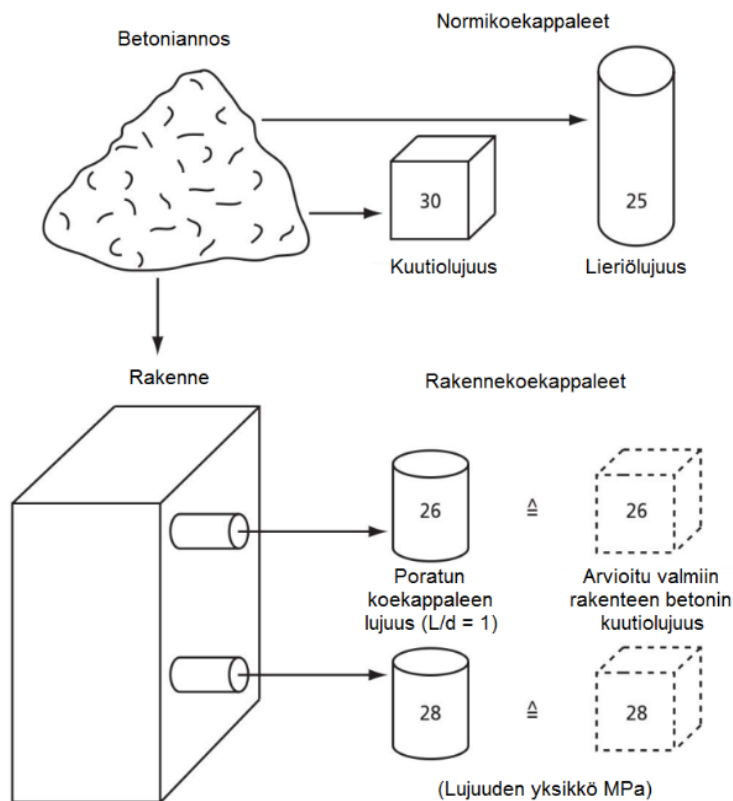
Poraussuunnan vaikutus lujuuteen otettiin aikaisemmin huomioon myös Iso-Britannian testausstandardeissa. Poraussuunta oli yhtenä muuttujana rakennekoekappaleiden lujuustulosten muunnoskertoimissa, jolloin valusuuntaan porattujen lieriöiden lujuustulokset tuli kertoa luvulla 0,92. Valusuuntaa vasten kohtisuoraan poratuilla lieriöillä kerroin oli vastaavasti 1,00. [31] Nykyisissä Iso-Britannian standardeissa ei poraussuunnan vaikutusta enää oteta huomioon. [32]

Myös näytteenottoisyvyys voi vaikuttaa näytteestä saatavaan lujuuteen. Meiningen [20] havaitsi n. 40 cm paksun seinän keskimmaisesta kolmanneksesta porattujen näytteiden olleen lujuudeltaan noin 10 % matalampia kuin seinän paksuuden uloimmista kolmanneksista poratut näytteet.

Kuormitetuista rakenteista otetuista näytteistä tulee huomioida, että betonin vetorasitetusta osuudesta poratun rakennekoekappaleen lujuus voi olla muita osia matalampi siinä esiintyvien halkeamien johdosta. [2]

1.7 Normikoe-kappaleen ja rakennekoekappaleen ero lujuudessa

Normikoe-kappaleiden lujuus eroaa valmiin rakenteen lujuudesta muun muassa betonin tiiviyssasteen ja kovettumisolosuhteiden eroista johtuen. Tyypillistä lujuuden eroa on havainnollistettu kuvassa 1.7. Standardissa EN 13791 [9] valmiin rakenteen ja normikoe-kappaleiden puristuslujuuksien suhde ajatellaan olevan 0,85.



Kuva 1.7 *Esimerkki saman betoniannoksen odotettavissa olevista puristuslujuuksista eri tavoin määritettyinä, mukailten lähdeä [33], jossa viitattu lähteeseen [34].*

Meininger [20] vertasi rakennekoekappaleiden lujuustuloksia saman betonierän normikoekappaleiden tuloksiin. Meiningerin tutkimuksessa rakennekoekappaleista määritettiin lujuus 93 vuorokauden ikäisenä, joka oli keskimäärin vain 67 % saman ikäisten normikoelieriöiden lujuudesta ja 77 % 28 vuorokauden ikäisten normikoekappaleiden lujuudesta. Ero oli siis merkittävä, vaikka testirakenteita oli jälkihoidettu erityisen hyvin ja rakennekoekappaleita oli säilytetty porauksen jälkeen vesiupotuksessa. Meininger on artikkelissaan viitannut myös muihin vastaaviin havaintoihin eri tutkimuksissa. Näissä rakennekoekappaleiden lujuustulokset olivat tutkimuksesta riippuen 67–94 % normikoekappaleilla määritetyistä lujuustuloksista. Artikkelissa ei analysoitu tähän ilmiöön mahdollisesti vaikuttaneita syitä.

Watkins et al. [35] vertasi todellisissa työmaaolosuhteissa valetuista rakenteista porattujen lieriöiden lujuustuloksia saman betonin normikoekuutioiden tuloksiin. Seinärakenteista porattujen rakennekoekappaleiden lujuus oli 28 vuorokauden ikäisenä keskimäärin 88 % ja laatasta porattujen kappaleiden lujuus vastaavasti 78 % normikoekuutioiden lujuudesta, kun rakennekoekappaleiden lujuuksille oli suoritettu standardien edellyttämät korjaukset lieriön pituuden ja poraus-suunnan suhteen.

Petersons havaitsi tutkimuksessaan [36], että rakennekoekappaleiden lujuus on matalampi kuin saman ikäisen betonin normikoelieriöiden lujuus. Lisäksi hän havaitsi, että ero kasvaa, mitä lujemmasta betonista on kysymys. Tutkimuksen perusteella lujuussuhde on suuruusluokkaa 0,70–0,60 MPa betonilla ja 0,95, kun betonin kuutiolujuus on 25 MPa.

Dillon ja Rankin [28] vertasivat rakennekoekappaleiden lujuustuloksia samasta betonierästä valettuihin normikoekuutioihin. Tutkimuksessa porattiin D100 mm x 100 mm rakennekoekappaleet sivumitaltaan 150 mm olevista kuutioista, joita oli säilytetty normikoekappaleiden tapaan vesiupotuksessa, sekä 300 mm x 300 mm x 150 mm betonilaatoista, joista osa oli säilytetty laboratorion huoneilmassa ja osa ulko-olosuhteissa. Vesiupotuksessa olleista kuutiosta poratut näytteet olivat lujuudeltaan keskimäärin 12 % korkeampia normikoekuutioihin nähden. Laboratorio-olosuhteissa säilytetyistä laatoista poratut näytteet olivat lujuudeltaan keskimäärin 8 % matalampia ja ulkoilmassa säilytetyistä laatoista poratut näytteet 9 % matalampia normikoekappaleisiin nähden. Tutkimuksessa lujuus määritettiin betonista useana eri ajankohtana. Tuloksista on havaittavissa, että laatoista porattujen rakennekoekappaleiden ja normikoekuutioiden välinen lujuusero kasvaa ajan myötä suuremmaksi. Tutkimuksen viimeisissä kokeissa betonin ollessa 84 vuorokauden ikäistä rakennekoekappaleet olivat lujuudeltaan jo noin 20 % normikoekuutioita matalampia. Normikoekuutioista poratuissa näytteissä ei vastaavaa lujuussuhteen muutosta normikoekappaleisiin nähden ollut havaittavissa.

1.8 Muita lujuuteen vaikuttavia tekijöitä

Yksittäisen rakennekoekappaleen lujuuteen voivat edellisissä luvuissa käsiteltyjen seikkojen lisäksi vaikuttaa näytteen porauksesta ja käsittelystä mahdollisesti aiheutuneet vauriot ja lieriöön osuneet raudoitteet. Kuormituspintojen vinous, epätasaisuus, tasoitusmenettely ja tasoitukseen käytettävä materiaali voivat myös vaikuttaa näytteen lujuuteen. Lisäksi tulokseen voivat vaikuttaa erot kuormituslaitteiden välillä. Tämä vaikutus on tosin pyritty minimoimaan laitestandardeilla ja säännöllisillä kalibroinneilla. [2]

Näytteen kuormituspintojen tasaamisen merkitystä tulokseen havainnollistaa hyvin Bugai et al. tutkimus [37], jossa testattujen betonilieriöiden kuormituspinnat tasoitettiin laastilla, jonka pinta pyrittiin saamaan mahdollisimman tasaiseksi teräksisen tasoituslastan avulla. Tällä tavoin tasoitetuista näytteistä saadut lujuudet olivat yli 40 % matalampia rikkiseoksella tasoitettuihin näytteisiin nähden. Kun seuraavassa testisarjassa laastin tasoitus suoritettiin huolellisesti etelä-afrikkalaisten standardien mukaisilla menetelmillä, ei lujuustuloksissa enää havaittu merkittävää eroa laasti- ja rikkitasoituksen välillä.

Poraukohdassa rakenteen paksuus voi olla toisinaan niin suuri, ettei läpiporausta voida suorittaa. Tällöin näyte joudutaan katkaisemaan taivuttamalla, jolloin näytteeseen voidaan olettaa muodostuvan merkittäviä vetojännityksiä. Meiningen [20] tutki katkaisun vaikutusta näytteiden lujuuksiin ja totesi, ettei katkaisulla ole merkittävää vaikutusta näytteiden lujuuteen. Katkaistuilla näytteillä lujuus oli keskimäärin 2 % matalampi kuin referenssinäytteillä, jotka porattiin rakenteen läpi. Tutkimuksessa näytemäärä oli tosin hyvin suppea, vain kuusi katkaistua ja kuusi rakenteen läpi porattua näytettä.

2 Normikoeleikappaleilla määritetty betonin lujuus

2.1 Yleistä

Eurokoodin mukaiset betonin lujuusluokat perustuvat joko normikoeleierioihin (D150 mm x 300 mm) tai normikoeleikuutioihin (150 mm). Tässä luvussa esitetään EN-standardien määräykset normikoeleikappaleiden valmistukseen ja säilytykseen liittyen sekä Suomen käytännön mukainen betonin vaatimustenmukaisuuden osoittaminen normikoeleikappaleiden puristuslujuustulosten perusteella.

2.2 Valmistus ja säilytysolosuhteet

Normikoeleikappaleen nimellismittan tulee olla standardin EN 12390-1 [38] mukaan vähintään 3,5-kertainen betonin runkoaineen maksimiraekokoon nähden. Tyypillisesti betonin maksimiraekoko on korkeintaan 32 mm, jolloin raekoon puolesta testauksessa on mahdollista käyttää yleisimpiä normikoeleikappalekokoja, eli D150 mm x 300 mm betonileierioitä tai sivumitaltaan 150 mm olevia betonikuutioita.

Koeleikappaleet valetaan kalibroituihin muotteihin tai muussa tapauksessa muottien vaatimustenmukaisuus tulee osoittaa erikseen. Standardin EN 12390-1 [38] mukaan betonimuottien nimellismitta voi olla kuution sivumittan tai leierion halkaisijan osalta joko 100, 150, 200, 250 tai 300 mm. Edellä mainittujen mittojen lisäksi leierion nimellismitta voi olla 113 mm, joka vastaa 10 000 mm² kuormituspinta-alaa. Koeleikappalemuoteille on standardissa EN 12390-1 [38] annettu vaatimuksia muun muassa tasomaisuudelle, suorakulmaisuudelle ja mittatarkkuudelle.

Tuoreesta betonista suoritettavaan näytteenottoon on annettu ohjeistus standardissa EN 12350-1 [39] ja koeleikappaleiden valmistukseen sekä säilytykseen standardissa EN 12390-2 [16]. Näiden standardien mukaan näytteet tulee tiivistää huolellisesti, mutta tiivistämisen seurauksena ei huokostusilman tule poistua näytteestä. Näytteitä tulee säilyttää muoteissaan iskuilta, tärinäältä ja kuivumiselta suojattuna 20 ± 5 °C lämpötilassa vähintään 16 tuntia, mutta maksimissaan 3 vuorokautta, jonka jälkeen koeleikappaleet siirretään 20 ± 2 °C vesiuupotukseen tai olosuhdehuoneeseen, jossa vallitsee vähintään 95 % suhteellinen kosteus. Näissä olosuhteissa koeleikappaleita säilytetään aina testaukseen saakka. Normikoeleikappaleet testataan siten vedellä kyllästetyssä tilassa. Koeleikappaleen pinnoista pyyhitään ylimääräinen kosteus pois ennen näytteen asettamista testauslaitteeseen. Standardi sallii myös yllä mainituista säilytysolosuhteista poikkeamisen, jossa tapauksessa tuloksia voidaan verrata laskennallisesti standardin mukaisiin olosuhteisiin. Mahdollisissa kiistatilanteissa vedessä säilytystä pidetään kuitenkin vertailumenetelmänä. [40]

2.3 Puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuus

2.3.1 Yleistä

Valmisbetonista ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia, jonka vuoksi betonin kelpoisuus osoitetaan Suomessa kansallisella varmennustodistusmenettelyllä. Varmennustodistuksen vaatimukset on esitetty muun muassa Betoninormeissa 2016 [41], jonka puristuslujuutta käsittelevään osioon tämä raportin luku pitkälti perustuu. Vaatimuksenmukaisuuden arviointi suoritetaan joko yksittäiselle betonikoostumukselle tai betoniperheelle. Betoniperheitä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.3.2.

Vaatimuksenmukaisuuden toteaminen perustuu Suomessa aina kuutiolujuuteen. Mikäli puristuslujuustestaukset suoritetaan sivumitaltaan 100 mm olevien kuutioiden avulla, muunnetaan lujuustulokset vastaamaan 150 mm kuutiolujuuksia jakamalla tulokset luvulla 1,03. D150 mm x 300 mm lieriötä käytettäessä muunnos suoritetaan taulukon 1.2 mukaisesti. [41]

Vaatimuksenmukaisuuden toteamisessa erotetaan eri tapauksiksi valmistuksen alkuvaihe ja jatkuva valmistus. Testaussuunnitelmat ja vaatimuksenmukaisuuden ehdot ovat erilaisia alkuvaiheen ja jatkuvan valmistuksen välillä. Ennen varsinaista valmistusta betoneille suoritetaan alkutestaus, jonka keskeisenä tarkoituksena on määrittää valmistettavalle betonille tavoitelujuus tulosten hajonnan perusteella. [41]

Varsinaisessa valmistuksessa betonin puristuslujuuden tulee ylittää sille määritetty nimellislujuus riittävällä marginaalilla siten, että kaavojen 2.1-2.3 mukaiset vaatimukset tulevat täytettyä. Suositus on, että marginaali olisi noin kaksinkertainen oletettuun standardipoikkeamaan nähden, eli valmistusolosuhteista, osa-aineista ja tulosten hajontaa koskevista taustatiedoista riippuen vähintään 6–12 MPa. Puristuslujuus määritellään yleensä 28 vuorokauden ikäisenä, ellei tapauskohtaisesti ole muuta määritelty. [41]

2.3.2 Betoniperheet

Betonin valmistuksen laadunvalvontaa on tehostettu standardin EN 206 käyttöä myötä betoniperheajattelulla, jossa valmistettavan betonin kelpoisuus voidaan osoittaa yksittäisen betonilaadun sijaan myös useista ominaisuuksiltaan lähellä olevista betonilaaduista. Menetelmä perustuu siihen, että kaikkien betoniperheeseen kuuluvien jäsenten (betonireseptien) lujuustulokset muunnetaan vastaamaan betoniperheestä valitun vertailubetonin lujuustasoa. Vertailubetoniksi valitaan betoni, joka edustaa betoniperhettä parhaiten. Tämä voi olla joko eniten valmistettu tai betoniperheen keskiarvoa parhaiten kuvaava betoni. Vastaavuus vertailubetoniin on todettava jokaisen perheenjäsenen osalta. [41], [42]

Yksittäiseen betoniperheeseen kuuluu tavallisesti kaikki samantyyppiset betonikoostumukset. Betoniperheen jäsenten tulee olla sementin, kiviainesten ja seosaineen osalta samankaltaiset tai samat. Lisäksi lujuusluokat eivät saa poiketa liiaksi toisistaan, eikä lisäaineet saa vaikuttaa liiaksi betonin lujuuteen. Myös betonin arvosteluikä tulee olla sama. Betoniperheeseen kuuluvilla betoneilla laatu muutokset tulisi olla riippuvaisia mahdollisimman harvoista tekijöistä, jolloin betoniperheen sisäinen hajonta minimoituu ja mahdolliset betonin laatu poikkeamiin johtaneet syyt voidaan löytää paremmin. [13], [41]

Betoniperheestä poimittuja yksittäisen betonilaadun lujuustuloksia ei voida käyttää betonilaadun kelpoisuuden arviointiin erillisinä, vaan arviointi tulee tehdä aina kaikista betoniperheen lujuustuloksista, mikäli laadunvalvonta on betonitehtaassa sovittu näin suoritettavan. Tällöin yksittäisestä betonilaadusta ei ole mahdollista lähettää työmaalle myöskään betonilaatukohtaista laaturaporttia. Työmaa saa betonin laadusta tiedon betonitehtaalta ainoastaan siinä tapauksessa, mikäli toimitettu betoni on todettu laadultaan poikkeavaksi. [42]

Betonilaatujen lujuustulokset voidaan muuntaa vastaamaan vertailubetonia ottamalla muunnoksessa huomioon joko absoluuttinen tai suhteellinen poikkeama kyseisen betonin tavoitelujuudesta. [41] Esimerkki lujuustulosten muunnoksesta on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1 Esimerkki vertailubetonista poikkeavan betonin puristuslujuustuloksen muuntamisesta vertailubetonia vastaavaksi betoniperheessä.

	Esimerkki A	Esimerkki B
Vertailubetoni C25/30, tavoitelujuus 36 MPa		
Tutkittava betoni C40/50, tavoitelujuus 60 MPa		
• Puristuslujuustulos:	62,4 MPa	59,4 MPa
• Poikkeama tavoitelujuudesta:	62,4 MPa – 60 MPa = 2,4 MPa	59,4 MPa – 60 MPa = –0,6 MPa
• Muunnettu lujuus absoluuttisen poikkeaman menetelmällä:	36 MPa + 2,4 MPa = 38,4 MPa	36 MPa – 0,6 MPa = 35,4 MPa
• Puristuslujuustulos suhteessa tavoitelujuuteen:	$\frac{62,4 \text{ MPa}}{60 \text{ MPa}} = 1,04$	$\frac{59,4 \text{ MPa}}{60 \text{ MPa}} = 0,99$
• Muunnettu lujuus suhteellisella menetelmällä:	$1,04 \cdot 36 \text{ MPa} = 37,4 \text{ MPa}$	$0,99 \cdot 36 \text{ MPa} = 35,6 \text{ MPa}$

2.3.3 Alkutesta

Alkutesta on suoritettava käytettäessä uutta betonikoostumusta. Jos valmistajalla on kuitenkin pitkäaikainen kokemus vastaavasta betonista tai betoniperheestä, ei alkutestausta ole tällöin välttämätöntä suorittaa (pl. itsetiivistyvät betonit). Alkutestausten tavoitteena on määrittää betonin koostumuksen tavoitelujuus sekä osoittaa samalla, että betoni täyttää kaikki sen määrittelyssä betonimassalle ja kovettuneelle betonille esitetyt vaatimukset. Yksittäisen betonin alkutestausta tulee tehdä vähintään kolmesta eri betoniannoksesta ja jokaisesta näistä vähintään kolmelle koekappaleelle. Betoniperheissä alkutestausta tulee tehdä jokaiselle eri betonikoostumukselle vähintään kolmella koekappaleella. Alkutestausten jälkeen näytteille määritetään tuotantomääristä tai ajasta riippuvat vähimmäismäärät. [41] Alkutestausta ei tule sekoittaa terminä valmistuksen alkuvaiheeseen, jota käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

2.3.4 Näytteiden lukumäärä

Vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa valmistuksen ensimmäisestä 50 m³:sta otetaan yhteensä kolme näytettä, jonka jälkeen betoninäytteiden vähimmäismäärä riippuu kyseisen betoniperheen valmistusmäärästä. Valmistus jaetaan alkuvaiheeseen ja jatkuvaan valmistukseen. Alkuvaiheessa on jatkuvaa valmistusta tiheämpi näytteenottoaajuus ja myös vaatimuksenmukaisuuden ehdot eroavat osin jatkuvasta valmistuksesta. Jatkuvan valmistuksen voidaan katsoa alkaneen, kun käytettävissä on vähintään 35 testaustulosta enintään yhden vuoden ajalta. [41]

Yhdestä näytteestä voidaan valmistaa myös useampia koekappaleita, jolloin vaatimuksenmukaisuudessa huomioon otettava yksittäinen testaustulos on näiden koekappaleiden keskiarvo. Jos kuitenkin koekappaleista yksi tai useampi poikkeaa näytteen keskiarvosta enemmän kuin 15 %, jätetään näyte huomioimatta tuloksissa, ellei yksittäisten koekappaleiden hylkäämiseen ole perusteltua syytä. [41]

Alkuvaiheessa valmistetun ensimmäisen 50 m³:n jälkeen näytteitä tulee ottaa vähintään

- yksi näyte / 200 m³ tai
- yksi näyte / 3 tuotantopäivää.

Näistä valitaan se vaihtoehto, jolla saadaan suurempi näytteiden kokonaismäärä. Näytteiden määrän ei tarvitse kuitenkaan olla suurempi kuin yksi näyte / 25 m³. [41]

Jatkuvan valmistuksen aikana näytteitä tulee ottaa vähintään

- yksi näyte / 400 m³ tai
- yksi näyte / 5 tuotantopäivää tai
- yksi näyte / kalenterikuukausi

Näistä valitaan se vaihtoehto, jolla saadaan suurin näytteiden kokonaismäärä. Näytteiden määrän ei tarvitse kuitenkaan olla suurempi kuin yksi näyte / 25 m³. [41]

2.3.5 Puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuuden ehdot

Yksittäisen lujuustuloksen osalta vaatimuksenmukaisuuden ehtona on kaavan 2.1 mukainen vaatimus. Tämä vaatimus koskee yhtä lailla valmistuksen alkuvaihetta ja jatkuvaa valmistusta. [41]

$$f_{ci} \geq f_{ck;cube} - 4 \text{ MPa} \quad (2.1)$$

missä

f_{ci} on yksittäinen lujuustulos;
 $f_{ck;cube}$ on kyseisen betonin (perheenjäsenen) nimellislujus, K-lujus.

Keskiarvon osalta vaatimuksenmukaisuuden ehtona on valmistuksen alkuvaiheessa kaavan 2.2, ja jatkuvan valmistuksen aikana kaavan 2.3 mukainen vaatimus. Jatkuvan valmistuksen aikana vaatimuksenmukaisuuden toteaminen perustuu arviointijakson testaustuloksiin. Arviointijakson pituus valitaan siten, että jaksoon sisältyy 15–35 näytettä korkeintaan kuuden kuukauden ajalta. [41]

$$f_{cm} \geq f_{ck;cube} + 4 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

missä

f_{cm} on kolmen peräkkäisen muunnetun puristuslujuustuloksen keskiarvo (ei-liukuva);

$f_{ck;cube}$ on vertailubetonin nimellislujuus, K-lujuus.

$$f_{cm} \geq f_{ck;cube} + 1,48 \cdot \sigma \quad (2.3)$$

missä

f_{cm} on arviointijakson aikana saatujen muunnettujen tulosten keskiarvo;

$f_{ck;cube}$ on vertailubetonin nimellislujuus, K-lujuus;

σ on keskihajonta, jonka määrittämisestä tarkemmin alla.

Jatkuvan valmistuksen ensimmäisessä arviointijaksossa joukon keskihajontana (σ) käytetään valmistuksen alkuvaiheen vähintään 35 peräkkäistä testaus-tulosta, joiden testausajankohdat ulottuvat kolmea kuukautta pidemmälle jaksolle. Jokaisen arviointijakson jälkeen kyseisen jakson keskihajontaa (s_n) verrataan taulukon 2.2 mukaisiin raja-arvoihin. Mikäli hajonta ei ole muuttunut merkittävästi, ts. hajonta pysyy raja-arvojen sisällä, käytetään seuraavassa arvioinnissa joukon keskihajontana (σ) samaa arvoa kuin edellä. Mikäli taulukon raja-arvot ylittyvät, lasketaan seuraavaa arviointijaksoa varten uusi joukon keskihajonta (σ) uusimmista 35 peräkkäisestä tuloksesta. [41]

Taulukko 2.2 Arviointijakson keskihajonnan vertailu edellisessä vertailussa käytettyyn keskihajontaan.

Arviointijakson testaustulosten lukumäärä	s_n :n raja-arvot
15...19	$0,63 \cdot \sigma \leq s_n \leq 1,37 \cdot \sigma$
20...24	$0,68 \cdot \sigma \leq s_n \leq 1,31 \cdot \sigma$
25...29	$0,72 \cdot \sigma \leq s_n \leq 1,28 \cdot \sigma$
30...34	$0,74 \cdot \sigma \leq s_n \leq 1,26 \cdot \sigma$
35	$0,76 \cdot \sigma \leq s_n \leq 1,24 \cdot \sigma$

Myös yksittäisen perheenjäsenen lujuuksien keskiarvolle on asetettu näyttemäärästä riippuva vaatimus (taulukko 2.3), jolla varmistetaan betonin kuuluminen betoniperheeseen. Mikäli vaatimus ei täyty, poistetaan kyseinen betoniperheestä, jonka jälkeen betonilaadun vaatimuksenmukaisuus tulee osoittaa erillisenä käyttäen valmistuksen alkuvaiheen ehtoja. [41]

Taulukko 2.3 Puristuslujuuden ehto yksittäiselle perheenjäsenelle. Vertailu tehdään kuutiolujuuksilla (K-lujuus). Keskihajontana s_n käytetään yksittäisen perheenjäsenen otoskeskihajontaa.

Yksittäisen perheenjäsenen testaustulosten lukumäärä	Yksittäisen perheenjäsenen muuntamattomien testaustulosten keskiarvovaatimus
1	$\geq f_{ck;cube} - 4,0 \text{ MPa}$
2	$\geq f_{ck;cube} - 1,0 \text{ MPa}$
3	$\geq f_{ck;cube} + 1,0 \text{ MPa}$
4	$\geq f_{ck;cube} + 2,0 \text{ MPa}$
5	$\geq f_{ck;cube} + 2,5 \text{ MPa}$
6	$\geq f_{ck;cube} + 3,0 \text{ MPa}$
7...9	$\geq f_{ck;cube} + 3,5 \text{ MPa}$
10...12	$\geq f_{ck;cube} + 4,0 \text{ MPa}$
13...14	$\geq f_{ck;cube} + 4,5 \text{ MPa}$
≥ 15	$\geq f_{ck;cube} + 1,48 \cdot s_n$

Jatkuvan tuotannon vaatimuksenmukaisuuden osoittamiselle on olemassa myös vaihtoehtoinen tapa, eli ns. CUSUM-menetelmä, jossa seurataan kumulatiivisesti lujuustulosten poikkeamaa tavoitelujuudesta. Tällöin laadussa ilmeneviin poikkeamiin kyetään reagoimaan aikaisemmassa vaiheessa. [41]

CUSUM-menetelmä eroaa edellä esitetystä menetelmästä siten, että vaatimuksenmukaisuuden osoittamisessa ei seurata kaavan 2.3 toteutumista, eikä yksittäisten perheenjäsenten osalta seurata taulukon 2.3 mukaisia vaatimuksia. Kaavan 2.1 vaatimusta yksittäisen puristuslujuustuloksen osalta kuitenkin noudatetaan. Vaatimuksenmukaisuuden arvioinnissa ei CUSUM-menetelmässä käytetä arviointijaksoja, sillä vaatimuksenmukaisuuden täyttymistä seurataan reaaliaikaisesti jokaisen kirjauksen yhteydessä. [41] CUSUM-menetelmää ei läpikäydä tässä raportissa tarkemmin.

3 Rakennekoekappaleiden lieriö- ja kuutiolujuuden määrittäminen

3.1 Yleistä

Luvuissa 3.2–3.6 on esitetty Suomessa, Ruotsissa, Saksassa, Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa käytössä olevien ohjeiden ja standardien mukainen menettely rakennekoekappaleen lujuustuloksen muuntamisesta lieriö- tai kuutiolujuutta vastaavaksi. Huomioon on otettu kaikki standardeissa ja ohjeissa esitetyt rakennekoekappaleiden lujuuteen vaikuttavat asiat, joita ovat:

- Kokovaikutus
- Pituus-halkaisija -suhteen vaikutus
- Kosteuspitoisuuden vaikutus
- Poraamisen vaikutus
- Raudoitteiden vaikutus
- Kypsyys ja iän vaikutus

3.2 Käytäntö Suomessa

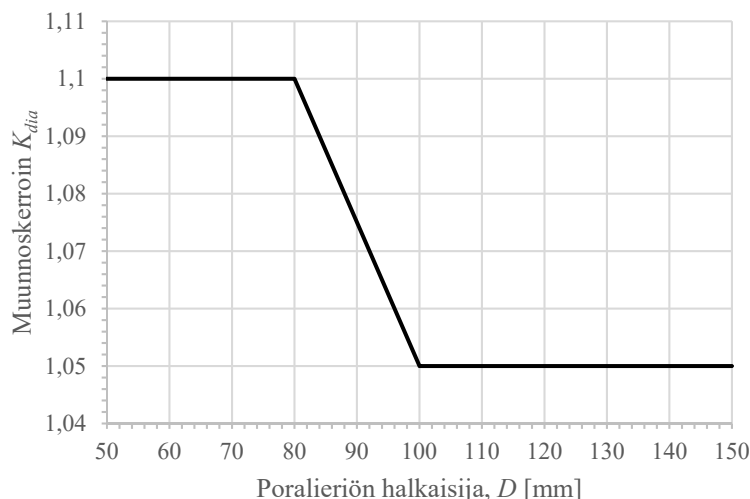
Suomen ohjeistuksessa lujuuden korjauskertoimet annetaan muunnettaessa rakennekoekappaleiden lujuustuloksia kuutiolujuustuloksia vastaaviksi. Tässä raportissa esitetyt Suomen käytännöt pohjautuvat standardeihin SFS 7022 [43], EN 12504-1 [44] ja EN 13791 [9] sekä Betoninormeihin 2016 [41].

3.2.1 Kokovaikutus

Kansallinen soveltamisstandardi SFS 7022 [43] standardille EN 206:2014 [13] ohjeistaa muunnoskertoimet eri kokoisille lieriöille. Samat kertoimet on ollut käytössä kansallisessa rakennusmääräyskokoelmassa ja betoninormeissa jo vuodesta 1981 lähtien. [45], [46] Betoninormeissa 2016 [41] mainitaan rakennekoekappaleina käytettävän tyypillisesti 100 mm halkaisijan omaavia poralieriöitä, mutta tarvittaessa käytettävän myös muun kokoisia lieriöitä.

Puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuuden täyttymistä seurataan standardin SFS 7022 [43] mukaisesti oletusarvoisesti normikoeakuutioista. Standardi sallii lujuudenmäärittäminen myös muunlaisesta koekappaleesta, mutta lujuustulokset on muutettava sivumitaltaan 150 mm olevan koekuution lujuustuloksia vastaaviksi.

Halkaisijaltaan 50...150 mm olevien poralieriöiden yksittäiset lujuustulokset voidaan muuttaa sivumitaltaan 150 mm koekuution lujuustuloksia vastaaviksi kuvassa 3.1 esitetyllä standardin SFS 7022 [43] mukaisella muunnoskertoimella. Kerroin on 1,1 halkaisijaltaan 50...80 mm olevilla rakennekoekappaleilla ja 1,05 halkaisijaltaan 100...150 mm olevilla rakennekoekappaleilla, Halkaisijaltaan 80...100 mm rakennekoekappaleiden muunnoskerroin määritetään lineaarisesti interpoloiden edellä esitettyjä raja-arvojen muunnoskertoimia.



Kuva 3.1 Standardissa SFS 7022 [43] esitetyt muunnoskerroimet rakennekoekappaleiden lujuustulosten muuntamisesta 150 mm kuutiota vastaavaksi, kun lieriöiden halkaisija-korkeus -suhde on 1,0.

Standardissa EN 13791 [9] mainitaan L/D-suhteeltaan 1,0 olevien 100 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten vastaavan sivumitaltaan 150 mm kuutioiden tuloksia, kun säilytys- ja valmistusolosuhteet ovat samat. Vastaavasti L/D-suhteeltaan 2,0 olevien 100...150 mm rakennekoekappaleiden puristuslujuustulosten mainitaan vastaavan samoissa olosuhteissa olleiden D150 mm x 300 mm lieriöiden tuloksia. Halkaisijaltaan 50–150 mm ja edellä mainituista poikkeavien L/D-suhteen omaavien rakennekoekappaleiden lujuuden muunnos tulee standardin mukaan suorittaa soveltuviksi osoitetuilla muunnoskerroimilla. Halkaisijaltaan 50 mm pienempiä rakennekoekappaleita ei standardissa EN 13791 [9] käsitellä.

Standardissa EN 12504-1 [44] mainitaan betonin maksimiraekoon ja rakennekoekappaleen halkaisijan suhteella olevan merkittävä vaikutus määritettävään lujuuteen, kun suhde lähestyy suurempia kuin noin 1:3 olevia arvoja. Standardin opastavassa liitteessä on esitetty tutkimustuloksia eri maksimiraekoon ja eri lieriöhalkaisijan vaikutuksesta näyteliiriön lujuuteen.

3.2.2 Pituus-halkaisija -suhteen vaikutus

Betonin puristuslujuuden määrittämiseen on standardissa SFS 7022 [43] annettu edellisessä luvussa esitetyt yksittäisten lujuustulosten muunnoskerroimet sivumitaltaan 150 mm kuutiota vastaaviksi ainoastaan tapauksessa, jossa lujuus on määritetty L/D-suhteeltaan 1,0 olevista rakennekoekappaleista. Muunlaisille L/D-suhteille ei Suomen standardeissa ole muunnoskerroimia annettu.

3.2.3 Kosteuspitoisuuden vaikutus

Muunnoskerroimia ei rakennekoekappaleen kosteuspitoisuuden vaikutukselle näytteen lujuuteen ole suomalaisessa ohjeistuksessa annettu. Standardin EN 13791 [9] opastavassa liitteessä A on kuitenkin mainittu rakennekoekappaleen kosteuspitoisuuden vaikuttavan tästä saatavaan lujuustulokseen. Vedellä kyllästetyn rakennekoekappaleen lujuuden mainitaan olevan noin 10–15 % matalampi vastaavaan ilma-kuivaan rakennekoekappaleeseen nähden. Ilma-kuivassa tapauksessa lieriön kosteuspitoisuuden mainitaan olevan tavallisesti 8–12 % välillä.

Standardi EN 13791 [9] velvoittaa säilyttämään rakennekoekappaleita laboratorion olosuhteissa vähintään kolme vuorokautta ennen testausta, mikäli tästä ei käytännön syistä johtuen jouduta poikkeamaan. Käytännön syistä aiheutunut poikkeama standardin mukaisesta menettelystä tulee raportoida ja arvioida tämän vaikutus testaustulokseen.

Standardin EN 13791 [9] opastavan liitteen D mukaan rakenteen kosteusolosuhteet tulisi ottaa huomioon arvioitaessa rakenteessa olevaa lujuutta. Tapauksissa, joissa rakenne tai betonielementti on kosteissa olosuhteissa, tulisi rakennekoekappaleet testata vedellä kyllästetyssä tilassa. Vastaavasti rakenteen tai betonielementin ollessa kuivissa olosuhteissa, tulisi myös rakennekoekappaleet testata kuivana. Rakennekoekappaleet testataan oletusarvoisesti kuivana, mikäli asiaa ei erikseen spesifioida.

3.2.4 Poraamisen vaikutus

Standardin EN 13791 [9] opastavassa liitteessä A mainitaan poraamisen mahdollisesti aiheuttavan vaurioita luontaisesti heikosta tai matalan kypsyysasteen omaavasta betonista otettavaan rakennekoekappaleeseen, mutta korjauskertoimia ei tämän ilmiön huomioon ottamiseksi ole suomalaisessa ohjeistuksessa annettu. Standardissa poralieriöiden mainitaan lisäksi olevan lujuudeltaan luontaisesti heikompia kuin normikoelieriöt, koska porauksen vuoksi rakennekoekappaleen pinnassa on halkaistuja runkoainerakeita, jotka saattavat pysyä näytteen pinnassa pelkän adheesion avulla, eivätkä siten vaikuta suuresti rakennekoekappaleista saatavaan lujuuteen.

3.2.5 Raudoitteiden vaikutus

Standardeissa EN 13791 [9] ja EN 12504-1 [44] todetaan, että raudoitteiden sisällyttämistä puristuslujuusnäytteisiin tulee välttää. Lieriöitä, joiden pitkittäisakselin läheisyydessä on raudoiteteräksiä, ei voida lainkaan käyttää lujuusmäärityksessä. Mikäli raudoitteen olemassaoloa rakennekoekappaleissa ei voida välttää, tulee standardin EN 13791 [9] opastavan liitteen A mukaan ottaa huomioon, että poikittainen raudoite voi vaikuttaa rakennekoekappaleen lujuustulokseen.

3.2.6 Kypsyyden ja iän vaikutus

Standardin EN 13791 [9] opastavan liitteen D mukaan betonin lujuus voidaan määrittää minkä ikäisenä tahansa. Testattavan betonin ikä tulee kuitenkin raportoida ja ottaa tarpeen mukaan huomioon.

3.2.7 Kertoimien yhteisvaikutus

Suomen ohjeissa ja standardeissa ainoastaan rakennekoekappaleen halkaisijan vaikutus otetaan huomioon määritettäessä rakenteen puristuslujuutta. Yksittäisen rakennekoekappaleen kuutiolujuus saadaan laskettua kaavalla 3.1.

$$f_{is;cube} = K_{dia} \cdot f_{core} \quad (3.1)$$

missä

K_{dia} on kuvan 3.1 mukainen muunnoskerroin halkaisijan vaikutukselle;

f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos.

Halkaisijan vaikutuksen lisäksi Betoninormeissa 2016 [41] on esitetty kerroin 1,05 käytettäväksi rakennekoekappaleille, jotka on liimattu kahdesta osasta.

3.3 Käytäntö Ruotsissa

Tässä luvussa esitetyt Ruotsin käytännöt pohjautuvat standardiin SS 137207:2005 [47]. Lisäksi tulee huomioida, että Suomen käytäntöjä käsittelevässä luvussa 3.2 viittaukset standardeihin EN 12504-1 [44] ja EN 13791 [9] pätevät myös Ruotsissa.

Ruotsalainen standardi SS 137207:2005 [47] käsittelee betonin puristuslujuus-testauksen korjauslukuja, joita käytetään testituloksen jakajina muunnettaessa lujuuksia referenssinäytteitä vastaaviksi. Standardissa annetaan puristuslujuuden korjausluvut normikoe-kappaleille, joiden mitat, ikä tai kovettumislämpötila eroavat standardin EN 12390-3 [40] mukaisista D150 mm x 300 mm lieriöistä tai sivumitaltaan 150 mm olevista kuutioista sekä rakennekoekappaleista, joiden korkeus tai halkaisija eroaa 100 mm:stä. Standardia voidaan käyttää pelkästään normikoe-kappaleille, jotka on valmistettu, säilytetty ja testattu standardien SS-EN 12390-2 T1 [48] ja EN 12390-3 [40] mukaisesti ja rakennekoekappaleille, jotka on porattu ja testattu standardin EN 12504-1 [44] mukaisesti ja säilytetty vähintään 3 vuorokautta ennen testausta olosuhteissa, joissa on 20 ± 2 °C lämpötila ja 60 ± 20 % suhteellinen kosteus. Korjauslukujen käyttöön liittyen standardissa huomautetaan, että laskennallisen lujuuden tarkkuus heikkenee useita korjauslukuja käytettäessä.

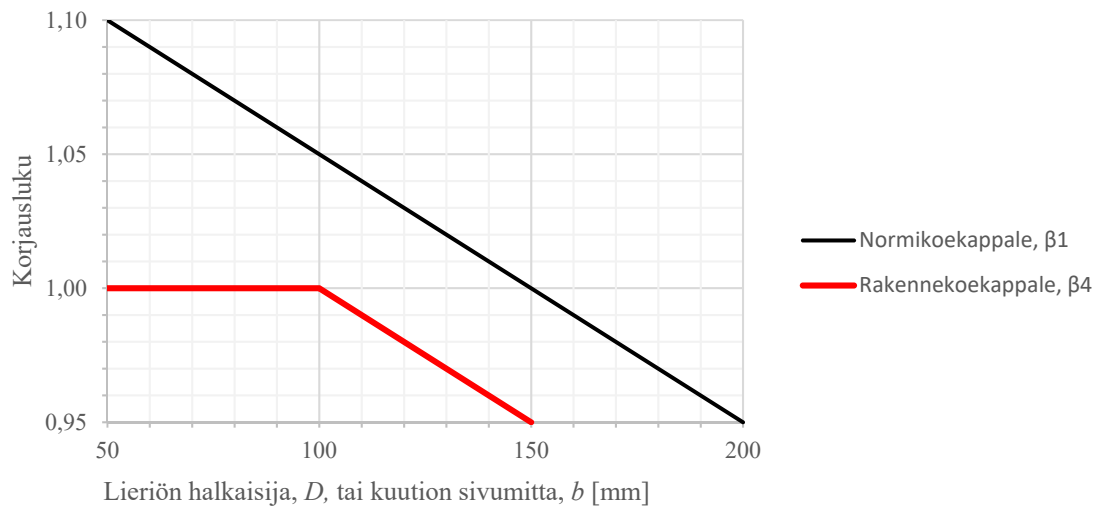
Oleellista on huomata, että standardissa SS 137207:2005 [47] muunnokset kuutiolujuuksiksi tehdään kuivassa säilytettyjä normikoe-kuutioita¹ vastaaviksi. Muunnettaessa tuloksia lieriölujuuksiksi referenssitapauksena on vesiupotuksessa tai erittäin kosteassa ilmassa säilytetty lieriö. Poikkeavaan normikoe-kuutioon on syynä Ruotsin kansallisen liitteen SS-EN 12390-2 T1 [48] tarjoama vaihtoehtoinen tapa kuutioiden kovettumisolosuhteille. Vaihtoehtoisessa tavassa koekappaleita säilytetään muoteissaan betonipinta kasteltuna noin vuorokauden ajan, jonka jälkeen muotit puretaan. Tämän jälkeen kappaleita säilytetään seuraavan 4 vuorokauden ajan vesiupotuksessa tai olosuhdehuoneessa, jossa suhteellinen kosteus on yli 95 %. Jäljelle jäävä aika ennen testausta kappaleita pidetään ilmasäilytyksessä, jossa suhteellinen kosteus on 40–80 % välillä. Kaikissa näissä vaiheissa säilytyslämpötilan tulee olla 20 ± 2 °C. Vaihtoehtoisen menetelmän olosuhteet eroavat siten merkittävästi standardin EN 12390-2 [16] mukaisesta menetelmästä, jossa koekappaleet ovat testihetkellä kosteita. Standardin EN 12390-2 [16] määrittämät olosuhteet on esitetty aiemmin tämän raportin luvussa 2.2.

Tässä raportin Ruotsin menetelmiä koskevassa luvussa on esitetty muunnosmenettelyt poikkeuksellisesti rakennekoekappaleiden lisäksi myös erikokoisille valukappaleille, sillä nämä tarjoavat mielenkiintoisen vertailukohtan rakennekoekappaleisiin nähden. Muiden raportissa käsiteltyjen maiden standardeista tai ohjeista ei normikoe-kappaleiden korjauslukuja löytynyt vastaavalla laajuudella. Ruotsalaisissa standardeissa ei ole annettu ohjeita rakennekoekappaleiden lujuuden muunnoksesta normikoe-kappaleiden lujuutta vastaaviksi. Standardissa SS 137207:2005 [47] kuitenkin mainitaan, että 3 vuorokautta kuivassa ilmassa säilytetyistä 100 mm rakennekoekappaleista mitattu lujuus vastaa riittävällä tarkkuudella kuivan 150 mm normikoe-kuution lujuutta.

¹ Myöhemmin raportissa tähän viitataan termillä ”kuiva normikoe-kuutio”.

3.3.1 Kokovaikutus

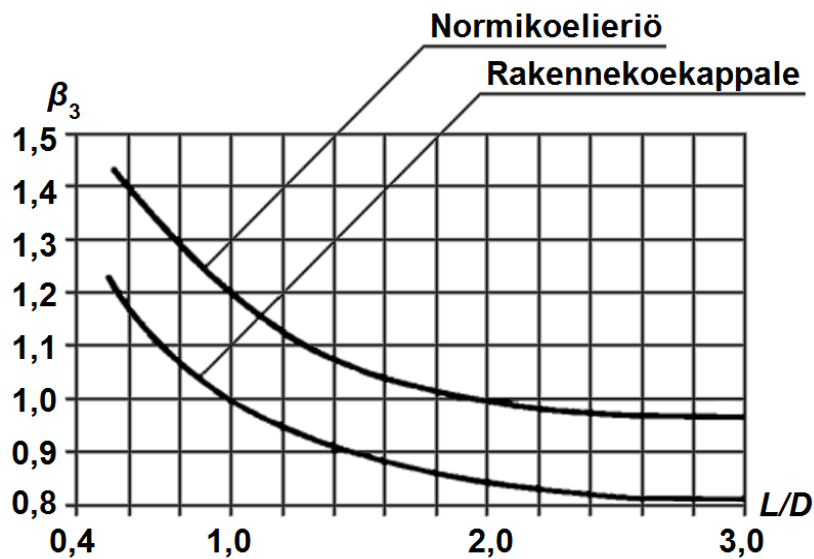
Koekappaleen koko otetaan standardin SS 137207:2005 [47] mukaan huomioon kuvan 3.2 mukaisella korjausluvulla β_1 tai β_4 , joilla jaetaan puristuslujuustestauksessa saatu tulos mikäli testikappaleen halkaisija eroaa referenssikappaleesta (referenssikappaleen halkaisija tai sivumitta on normikoekappaleen tuloksia muutettaessa 150 mm ja rakennekoekappaleen tuloksia muutettaessa 100 mm). Kuvan korjauslukuja voidaan käyttää normikoelieriöille tai rakennekoekappaleille, joiden halkaisija on välillä 50...150 mm ja pituus-halkaisija-suhte välillä 1...2 sekä kuiville normikoekuutioille, joiden sivumitta on välillä 50...200 mm. Lieriön pituus-halkaisija-suhteen vaikutus lujuuteen otetaan erikseen huomioon luvussa 3.3.2 esitetyllä menettelyllä.



Kuva 3.2 Standardissa SS 137207:2005 [47] esitetyt korjausluvut normikoekappaleiden (β_1) ja rakennekoekappaleiden (β_4) lujuuden kokovaikutukselle. Korjauslukuja käytetään jakajana puristuslujuustuloksia muunnettaessa.

3.3.2 Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus

Normikoelieriöiden ja rakennekoekappaleiden pituus-halkaisija-suhteen vaikutus näytteen lujuuteen otetaan standardin SS 137207:2005 [47] mukaan huomioon kuvan 3.3 mukaisella korjausluvulla β_3 , jolla jaetaan puristuslujuustestauksessa saatu tulos mikäli testikappaleen pituus-halkaisija-suhte eroaa referenssikappaleesta (referenssikappaleen pituus-halkaisija-suhte on normikoelieriön tuloksia muutettaessa 2,0 ja rakennekoekappaleen tuloksia muutettaessa 1,0).



Kuva 3.3 Ruotsissa käytetyt korjausluvut normikoekappaleiden ja rakennekoekappaleiden pituus-halkaisija-suhteen vaikutukselle, mukailen lähdettä [47].

3.3.3 Kosteuspitoisuuden vaikutus

Standardi SS 137207:2005 [47] soveltuu rakennekoekappaleille, joita on ennen puristuslujuuden määrittämistä säilytetty vähintään kolme vuorokautta olosuhteissa, joissa suhteellinen kosteus on $60 \pm 20 \%$ ja lämpötila $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Rakennekoekappaleen poikkeavista mitoista aiheutuvien korjauslukujen käsittelyn yhteydessä on standardissa kuitenkin mainittu, että niitä voidaan käyttää yhtä hyvin määrässä kuin kuivassakin säilytettyjen näytteiden välillä.

Kansallinen soveltamisstandardi SS 137003:2015 [49] standardille EN 206:2014 [13] ohjeistaa pienentämään kuivasta normikoekuutiosta saatavaa lujuustulosta 8 %:lla muunnettaessa sen tulosta vastaamaan standardin EN 206:2014 [13] mukaista kuutiolujuutta. Muunnos normikoelieriön ja kuivan normikoekuution lujuuksien välillä voidaan tehdä standardin SS 137207:2005 [47] mukaisella kaavalla 3.2, kun lieriölujuus on välillä 8...50 MPa.

$$f_1 = 1,35f_2 \quad (3.2)$$

missä

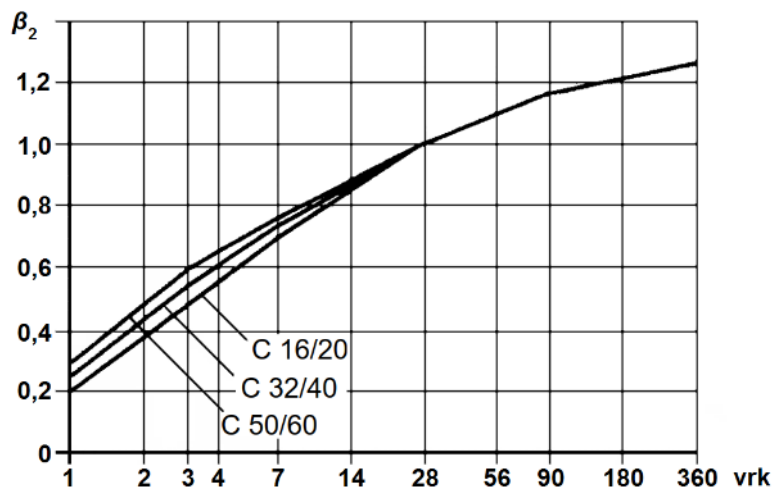
- f_1 on standardin EN 12390-3 [40] mukaan määritetty lieriölujuus;
- f_2 on kuutiolujuus kuivalla normikoekuutiolla määritettynä.

Lieriö- ja kuutiolujuuksien väliseksi suhteeksi saadaan näin ollen 0,805, jos otetaan huomioon sekä kaavan 3.2 vaikutus että standardin SS 137003:2015 [49] mukainen 8 % vähennys kuivaa normikoekuutiota käytettäessä.

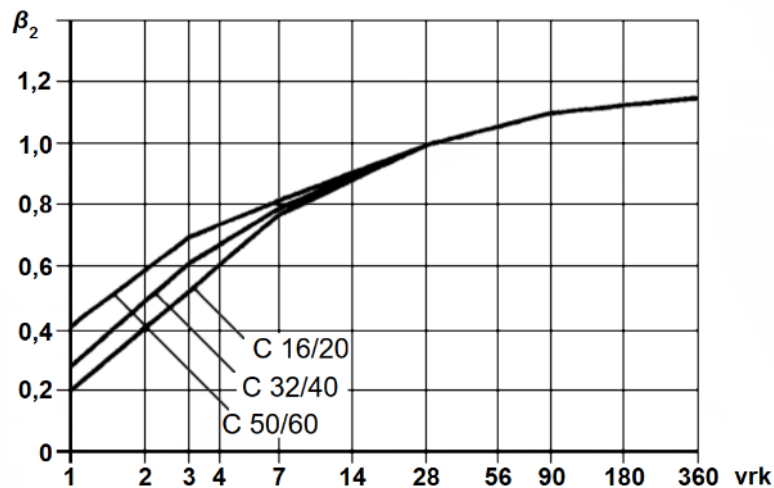
3.3.4 Kypsyyden ja iän vaikutus

Standardissa SS 137207:2005 [47] ei ole esitetty korjauskertoimia rakennekoekappaleille betonin kypsyyden ja iän huomioon ottamiseksi näytteen lujuudessa.

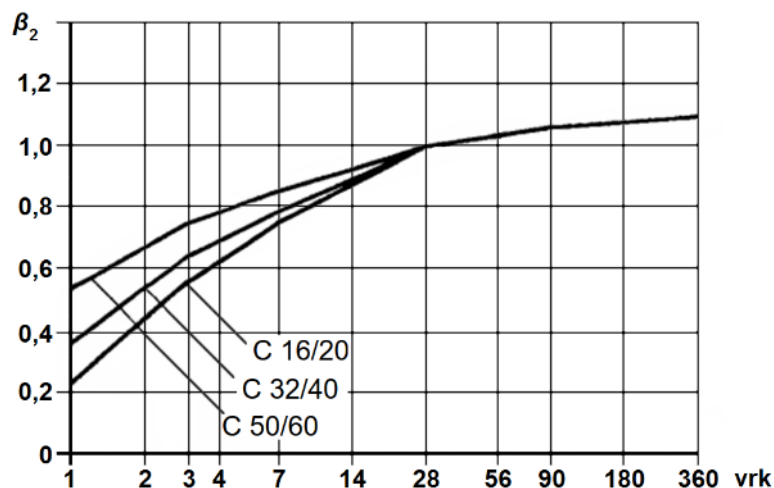
Betonin iän vaikutus normikoekappaleiden lujuuteen otetaan standardin SS 137207:2005 [47] mukaisesti huomioon kuvien 3.4–3.6 avulla, joissa korjausluvut riippuvat käytetystä sementistä ja betonin lujuusluokasta. Näiden kaavioiden tulokset pätevät vain Ruotsin tavanomaista portlandsementtiä tai portlandseossementtiä käytettäessä. Muita sementtejä käytettäessä korjausluvut tulee muodostaa erikseen. Samoin käytettäessä suuria määriä seosaineita, kuten silikaa, lentotuhkaa tai masuunikuonaa. Kuvien 3.4–3.6 mukaisia korjauslukuja käytetään jakajana muunnettaessa lujuustulosta vastaamaan 28 vuorokauden ikäistä betonia.



Kuva 3.4 Ruotsissa käytetyt korjausluvut normikoekappaleiden lujuuden ikävaikutukselle betonille, jossa sementin lujuus yhden vuorokauden ikäisenä on 8...12 MPa (vastaa Anläggningsementtiä), mukailten lähde [47].



Kuva 3.5 Ruotsissa käytetyt korjausluvut normikoekappaleiden lujuuden ikävaikutukselle betonille, jossa sementin lujuus yhden vuorokauden ikäisenä on 16...20 MPa (vastaa Standardsementtiä), mukailien lähde [47].



Kuva 3.6 Ruotsissa käytetyt korjausluvut normikoekappaleiden lujuuden ikävaikutukselle betonille, jossa sementin lujuus yhden vuorokauden ikäisenä on 26...30 MPa (vastaa Pikasementtiä), mukailien lähde [47].

Betonikoekappaleiden säilytyslämpötilan vaikutus normikoekappaleiden lujuuteen otetaan standardin SS 137207:2005 [47] mukaisesti huomioon laskemalla kappaleille 20 °C säilytyslämpötilaa vastaava muunnettu kovettumisaika j_{20} kaavan 3.3 avulla. Ikävaikutusta laskettaessa kuvien 3.4–3.6 yhteydessä käytetään betonin ikänä tällä kaavalla saatavaa muunnettua kovettumisaikaa.

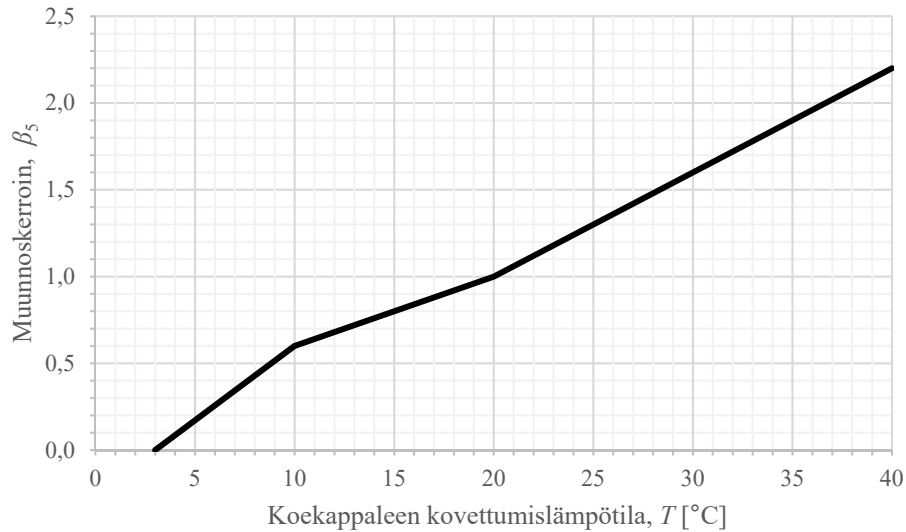
$$j_{20} = \sum (\beta_5 \cdot j_T) \quad (3.3)$$

missä

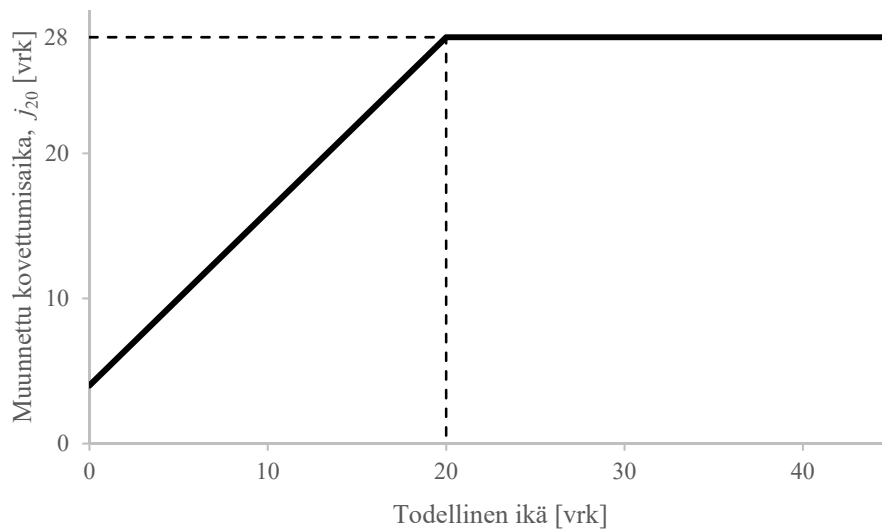
β_5 on kuvan 3.7 mukainen korjauskerroin betonin kovettumislämpötilan vaikutukselle;

j_T on aika vuorokausissa kovettumislämpötilan T vaikuttaessa.

Kaava 3.3 soveltuu olosuhteille, joissa betonin lämpötila on pysynyt koko ajan välillä 5...40 °C. Suurempia j_{20} -arvoja, kuin kuvassa 3.8 on esitetty, ei tule kuitenkaan käyttää.



Kuva 3.7 Standardissa SS 137207:2005 [47] esitetyt muunnoskerroimet normikoekappaleiden kovettumislämpötilan vaikutukselle.



Kuva 3.8 Standardissa SS 137207:2005 [47] esitetyt maksimiarvot muunnellulle kovettumisajalle j_{20} .

3.3.5 Muut vaikutukset

Standardissa SS 137207:2005 [47] ei ole esitetty korjauskertoimia poraamisen ja näytteessä sisältämien raudoitteiden vaikutuksen huomioon ottamisesta rakennekoekappaleen lujuuteen.

3.3.6 Yhteisvaikutus

Kaavaa 3.4 käytetään muunnettaessa standardin SS 137207:2005 [47] mukaisesti rakennekoekappaleen lujuutta halkaisijaltaan ja korkeudeltaan 100 mm kokoista rakennekoekappaletta vastaavaksi.

$$f_{is} = \frac{f_{core}}{\beta_3 \cdot \beta_4} \quad (3.4)$$

missä

- f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos;
- β_3 on kuvan 3.3 mukainen korjausluku L/D-suhteen vaikutukselle;
- β_4 on kuvan 3.2 mukainen korjausluku lieriön halkaisijan vaikutukselle.

Kaavaa 3.5 käytetään muunnettaessa kuivan normikoekuution lujuutta standardin SS 137207:2005 [47] mukaisesti 28 vuorokauden ikäisen ja sivumitaltaan 150 mm olevan kuivan normikoekuution lujuutta vastaavaksi.

$$f_{c;cube;dry} = \frac{f_{test}}{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad (3.5)$$

missä

- f_{test} on kuivan normikoekuution puristuslujuustulos;
- β_1 on kuvan 3.2 mukainen korjausluku kuution sivumitan vaikutukselle;
- β_2 on kuvien 3.4–3.6 mukainen korjausluku betonin iän vaikutukselle.

Kaavaa 3.6 käytetään muunnettaessa normikoelierion lujuutta standardin SS 137207:2005 [47] mukaisesti halkaisijaltaan 150 mm ja korkeudeltaan 300 mm kokoisen sekä 28 vuorokauden ikäisen normikoelierion lujuutta vastaavaksi.

$$f_{c;cyl} = \frac{f_{test}}{\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3} \quad (3.6)$$

missä

- f_{test} on normikoelierion puristuslujuustulos;
- β_1 on kuvan 3.2 mukainen korjausluku lieriön halkaisijan vaikutukselle;
- β_2 on kuvien 3.4–3.6 mukainen korjausluku betonin iän vaikutukselle;
- β_3 on kuvan 3.3 mukainen korjausluku L/D-suhteen vaikutukselle.

3.4 Käytäntö Saksassa

Tässä luvussa esitetyt Saksan käytännöt pohjautuvat Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansalliseen liitteeseen [50]. Lisäksi tulee huomioida, että Suomen käytäntöjä käsittelevässä luvussa 3.2 viittaukset standardeihin EN 12504-1 [44] ja EN 13791 [9] pätevät myös Saksassa.

3.4.1 Kokovaikutus

Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisen liitteen [50] mukaan rakennekoekappaleen halkaisija tulisi olla 100 tai 150 mm. Erikoistapauksissa rakennekoekappale voi olla halkaisijaltaan 50 mm, mutta ei tätä pienempi. Standardin mukaan nimellishalkaisijaltaan 50, 100 tai 150 mm olevasta kuivassa säilytetystä rakennekoelieriöstä saadaan sivumitaltaan 150 mm vedessä säilytetyn normikoeukuution lujuutta vastaava tulos.

Vuonna 2017 julkaistussa standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisessa liitteessä [50] ei ole enää esitetty korjauskertoimia rakennekoekappaleen kokovaikutukselle. Tätä edeltävässä DIN 1048-2 [51] standardissa sen sijaan halkaisijaltaan 50 mm olevien rakennekoekappaleiden lujuustulokset tuli kertoa luvulla 0,9.

3.4.2 Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus

Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisen liitteen [50] mukaan rakennekoekappaleen korkeuden tulee olla yhtä suuri kuin näytteen halkaisija. Sallittu toleranssi tässä on $\pm 10\%$.

3.4.3 Kosteuspitoisuuden vaikutus

Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisen liitteen [50] mukaan rakennekoekappaleet testataan ilmakeivana. Hyvin kuivista rakenteista porattuja koekappaleita tulee säilyttää porauksen, katkaisun ja hionnan jälkeen vähintään 12 tuntia laboratorioilmassa ennen testaamista.

3.4.4 Muut vaikutukset

Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisessa liitteessä [50] ei ole annettu erillistä ohjeistusta rakennekoekappaleen

- sisältämien raudoitusterästen vaikutukselle,
- poraamisen vaikutukselle tai
- kypsytyksen ja iän vaikutukselle lujuuteen.

3.4.5 Yhteisvaikutus

Saksalaisissa menetelmissä ei ole annettu muunnoskertoimia rakennekoekappaleiden erilaisten ominaisuuksien vaikutukselle. Ominaisuuksien vaikutus on huomioitu määrittelemällä rakennekoekappaleiden pituus-halkaisija-suhteet ja säilytysolosuhteet mahdollisimman tarkasti. Ainoastaan rakennekoekappaleiden halkaisijalla voi olla vaihtelua (50 mm, 100 mm tai 150 mm), mutta standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisen liitteen [50] mukaan tätäkään vaikutusta ei tarvitse nykyisin enää korjata lujuustuloksiin.

3.5 Käytäntö Iso-Britanniassa

Iso-Britannian ohjeistuksessa annetaan lujuuden korjauskertoimet muunnettaessa rakennekoekappaleiden lujuustuloksia joko lieriö- tai kuutiolujuuksituloksia vastaaviksi. Tässä luvussa esitetyt Iso-Britannian käytännöt pohjautuvat standardiin BS 6089:2010 [18] ja standardin BS-EN 12504-1:2009 kansalliseen liitteeseen [32]. Lisäksi tulee huomioida, että Suomen käytäntöjä käsittelevässä luvussa 3.2 viittaukset standardeihin EN 12504-1 [44] ja EN 13791 [9] pätevät myös Iso-Britanniassa.

3.5.1 Pituus-halkaisija -suhteen vaikutus

Standardin BS-EN 12504-1:2009 kansallisessa liitteessä [32] on esitetty muunnoskaavat erilaisille L/D-suhteille. Muunnoskertoimet on esitetty erikseen tapaukselle, jossa tarkoituksena on päätyä betonin lieriölujuuteen (kaava 3.7). Tällöin rakennekoekappaleiden L/D-suhteen tulee olla arvojen 1,6 ja 2,4 välillä. Muunnoskertoimet on annettu lisäksi tapaukselle, jossa tarkoituksena on päätyä betonin kuutiolujuuuteen (kaava 3.8). Tällöin rakennekoekappaleiden L/D-suhteen tulee olla arvojen 1,0 ja 1,2 välillä.

$$K_{L/D;cyl} = \frac{2,0}{1,5 + \frac{D}{L}} \quad (3.7)$$

missä

D on rakennekoekappaleen halkaisija;
 L on rakennekoekappaleen pituus.

$$K_{L/D;cube} = \frac{2,5}{1,5 + \frac{D}{L}} \quad (3.8)$$

missä

D on rakennekoekappaleen halkaisija;
 L on rakennekoekappaleen pituus.

Kaavoja 3.7 ja 3.8 vertailtaessa voidaan havaita, että näissä lieriö- ja kuutiolujuuksien suhde on vakio ($f_{c;cyl} = 0,8 \cdot f_{c;cube}$).

3.5.2 Raudoitteiden vaikutus

Standardin BS-EN 12504-1:2009 kansallisessa liitteessä [32] on esitetty muunnoskaavat rakennekoekappaleille, jotka sisältävät poikittaisia raudoiteteräksiä. Yksittäisen raudoiteteräksen tapauksessa käytetään kaavaa 3.9 ja useampien raudoiteterästen tapauksessa kaavaa 3.10. Kahden raudoiteteräksen tapauksessa, jossa tankojen keskinäinen etäisyys on pienempi kuin suuremman raudoiteteräksen halkaisija, tulee korjauskertoimessa ottaa huomioon pelkästään raudoiteteräs, jonka halkaisija kerrottuna raudoiteteräksen etäisyydellä rakennekoekappaleen päästä on suurempi.

$$K_s = 1,0 + 1,5 \left(\frac{\varphi_r \cdot h}{\varphi_c \cdot L} \right) \quad (3.9)$$

$$K_s = 1,0 + 1,5 \left(\frac{\sum(\varphi_r \cdot h)}{\varphi_c \cdot L} \right) \quad (3.10)$$

joissa

- φ_r on raudoiteteteräksen halkaisija;
- φ_c on rakennekoekappaleen halkaisija;
- h on raudoiteteteräksen akselin etäisyys lähimmästä rakennekoekappaleen päästä;
- L on rakennekoekappaleen pituus.

3.5.3 Kypsyyden ja iän vaikutus

Standardi BS 6089:2010 [18] ohjeistaa, että betonin kypsyttä ei tarvitse ottaa huomioon, kun testataan rakennetta, jossa betonin kypsyys on suurempi kuin 28 vuorokautta 20 °C olosuhteissa.

3.5.4 Muut vaikutukset

Standardin BS-EN 12504-1:2009 kansallisessa liitteessä [32] tai standardissa BS 6089:2010 [18] ei ole annettu erillistä ohjeistusta rakennekoekappaleen

- halkaisijan vaikutukselle,
- kosteusvaikutukselle tai
- poraamisen vaikutukselle lujuuteen.

Jos rakennekoekappaleiden avulla halutaan selvittää betonin potentiaalista lujuutta, käytetään standardin BS 6089:2010 [18] mukaan edellä mainittujen kertoimien lisäksi ylimääräisen ilmapitoisuuden vaikutuksen huomioon ottavaa muunnoskerrointa. Tämän kertoimen tarkoitus on korjata normikoekappaleiden ja rakenteeseen valetun betonin eroja betonin tiivistyvyydessä. Rakennekoekappaleissa olevien ylimääräisten huokosten osuutta voidaan arvioida betonin tiheyden tai standardin BS-EN 12504-1:2009 kansallisessa liitteessä [32] esitettyjen esimerkkivalokuvien perusteella. Standardiin on valokuvattu viisi erilaista ylimääräisen ilmapitoisuuden omaavaa betonia väliltä 0...13 %.

Standardin BS 6089:2010 [18] mukaiset korjauskertoimet betonin ylimääräiselle ilmapitoisuudelle on esitetty taulukossa 3.1. Standardin mukaan rakenteessa oleva ylimääräinen ilmapitoisuus on normaalisti välillä 0,5...2,5 %. Mikäli betonin ylimääräinen ilmapitoisuus todetaan näitä arvoja suuremmaksi, on se merkki betonin tiivistystyön epäonnistumisesta. Tällöin myös taulukossa esitettyjä ilmapitoisuuden korjauskertoimia tulee käyttää harkiten.

Taulukko 3.1 Standardin BS 6089:2010 [18] mukaiset korjauskertoimet rakenteen betonin ylimääräisen ilmapitoisuuden huomioon ottamiseksi.

Arvioitu betonin ylimääräinen ilmapitoisuus [%]	Korjauskerroin K_v betonin potentiaalisen lujuuden laskennassa
0,0	1,00
0,5	1,03
1,0	1,06
1,5	1,09
2,0	1,12
2,5	1,15
3,0	1,18
3,5	1,21
4,0	1,24
4,5	1,27
5,0	1,30

3.5.5 Yhteisvaikutus

Standardin BS-EN 12504-1:2009 kansallisen liitteen [32] mukaisesti yksittäisen rakennekoekappaleen lieriölujuus saadaan laskettua kaavalla 3.11 ja kuutio-
lujuus kaavalla 3.12. Mikäli rakennekoekappaleista on tavoitteena määrittää betonin potentiaalinen lujuus, otetaan lujuudessa huomioon myös taulukon 3.1 mukaiset kertoimet. Tällöin huomiota tulee kiinnittää myös betonin jälkihoidon ja kypsyymisen vaikutuksiin betonin lujuuteen. [18]

$$f_{is;cyl} = K_{L/D;cyl} \cdot K_s \cdot f_{core} \quad (3.11)$$

missä

$K_{L/D;cyl}$ on kaavan 3.7 mukainen muunnoskerroin L/D-suhteen vaikutukselle;

K_s on kaavojen 3.9 ja 3.10 mukainen muunnoskerroin raudoitteiden vaikutukselle;

f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos.

$$f_{is;cube} = K_{L/D;cube} \cdot K_s \cdot f_{core} \quad (3.12)$$

missä

$K_{L/D;cube}$ on kaavan 3.8 mukainen muunnoskerroin L/D-suhteen vaikutukselle;

K_s on kaavojen 3.9 ja 3.10 mukainen muunnoskerroin raudoitteiden vaikutukselle;

f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos.

3.6 Käytäntö Yhdysvalloissa

Yhdysvaltain ohjeistuksessa annetaan lujuuden korjauskertoimet muunnettaessa rakennekoekappaleiden lujuustuloksia lieriölujuustuloksia vastaaviksi. Tässä luvussa esitetyt Yhdysvaltain käytännöt pohjautuvat rakennekoekappaleiden testausstandardiin ASTM C42 / C42M-16 [52] ja American Concrete Institutun julkaisemaan raporttiin ACI 214.4R-10 [23], jossa ohjeistetaan betonin lujuuden määrittäminen rakennekoekappaleista.

3.6.1 Kokovaikutus

ASTM C42 / C42M-16 standardin [52] mukaan puristuslujuusmäärittämiseen käytettävän rakennekoekappaleen halkaisijan tulee olla vähintään 94 mm ja lisäksi vähintään kaksinkertainen betonin nimelliseen maksimiraekokoon nähden. Poikkeuksen muodostavat rakenteet, joista halkaisijaltaan 94 mm ja L/D-suhteeltaan vähintään 1,0 olevaa lieriötä ei ole mahdollista porata rakenteen tai terästen väliin jäävän betoniosuuden pienestä koosta johtuen. Tässä tapauksessa on tulosten yhteydessä raportoitava syy standardin edellyttämää betonilieriötä pienempään halkaisijaan. Standardissa ASTM C42 / C42M-16 [52] ei ole esitetty muunnoskertoimia eri halkaisijan omaavien lieriöiden lujuustulosten välille.

ACI 214.4R-10 raportissa [23] on halkaisijan vaikutukselle esitetty taulukon 3.2 mukaiset muunnoskertoimet ja muunnoskertoimien hajonnat, jotka perustuvat Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53].

Taulukko 3.2 ACI 214.4R-10 raportin [23] mukaiset muunnoskertoimet ja näiden hajonnat eri halkaisijan omaaville rakennekoekappaleille.

Näytteen halkaisija	Kertoimen K_{dia} keskiarvo	Kertoimen K_{dia} hajonta, V_{dia} [%]
2" (50 mm)	1,06	11,8
4" (100 mm)	1,00	0,0
6" (150 mm)	0,98	1,8

3.6.2 Pituus-halkaisija-suhteen vaikutus

ASTM C42 / C42M-16 standardissa [52] on annettu muunnoskertoimet erilaisille L/D-suhteille, kun rakennekoekappaleista on tarkoituksena päätyä betonin lieriölujuuteen. Rakennekoekappaleille, joiden L/D-suhde on välillä 1,75...2,00 ei muunnosta tarvitse tehdä. Tätä matalampien rakennekoekappaleiden standardin mukaiset muunnoskertoimet on esitetty taulukossa 3.3.

Taulukko 3.3 Standardin ASTM C42 / C42M-16 [52] mukaiset korjauskertoimet eri L/D-suhteen omaavien rakennekoekappaleiden lujuustuloksille. Taulukossa esitettyjen L/D-suhteiden väliarvot voidaan laskea lineaarisesti interpoloiden.

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

ACI 214.4R-10 raportissa [23] on L/D-suhteelle annettu kaavan 3.13 mukainen muunnoskerroin, jossa muuttujana on myös näytteen säilytysolosuhteet ennen puristuskoetta. Muunnoskerroimen hajonta on kaavan 3.14 mukainen. Kaavat perustuvat Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53].

$$K_{L/D} = 1 - (\beta - \alpha \cdot f_{core}) \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right)^2 \quad (3.13)$$

missä

- β on rakennekoekappaleen säilytysolosuhteista riippuva kerroin (Taulukko 3.4);
- α on vakio $4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1/\text{MPa}$;
- f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos;
- L on rakennekoekappaleen pituus;
- D on rakennekoekappaleen halkaisija.

$$V_{L/D} = 2,5 \cdot \left(2 - \frac{L}{D}\right)^2 \quad (3.14)$$

missä

- L on rakennekoekappaleen pituus;
- D on rakennekoekappaleen halkaisija.

Taulukko 3.4 Kaavassa 3.13 käytetty rakennekoekappaleen säilytysolosuhteista riippuva kerroin.

Rakennekoekappaleen säilytysolosuhde	Kerroin β
Standardin ASTM C42/C42M mukainen	0,130
48 tunnin vesiupotus	0,117
7 vrk säilytys 16-21 °C lämpötilassa ja alle 60 % suhteellisessa kosteudessa	0,144

3.6.3 Kosteuspitoisuuden vaikutus

ASTM C42 / C42M-16 standardissa [52] esitetään suositus rakennekoekappaleiden säilytysolosuhteille ennen puristustestausta. Suosituksen mukaan puristuslujuusnäytteitä tulee säilyttää näytteiden valmistelun aiheuttaman kastumisen jälkeen suljetussa muovipussissa tai tätä vastaavassa suljetussa astiassa vähintään 5 vuorokautta ennen puristuskoetta. Lisäksi standardissa ohjeistetaan näytteiden säilytysolosuhteet porauksen ja päiden tasaamisen välillä.

ACI 214.4R-10 raportissa [23] on esitetty Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53] perustuvat muunnoskerroimet eri kosteusolosuhteissa ennen puristuskokeita säilytetyille koekappaleille. Muunnoskerroin on annettu kahden vuorokauden vesiupotuksessa olleelle lieriölle sekä lieriölle, jota on säilytetty 16-21°C lämpötilassa ja alle 60 % suhteellisessa kosteudessa 7 vuorokautta. Referenssitapauksena on edellä esitetty ASTM C42 / C42M-16 standardin [52] mukainen menettely. Olosuhteiden muunnoskerroimet on esitetty taulukossa 3.5. Muunnoskerroimen hajonta on molemmissa taulukon standardimenettelystä poikkeavissa tapauksissa $V_{mc} = 2,5 \%$. Rakennekoekappaleiden säilytysolosuhteet vaikuttavat myös raportissa esitettyyn lieriöiden L/D-suhteen muunnoskerroimeen, kuten kappaleessa 3.6.2 aiemmin todettiin.

Taulukko 3.5 ACI 214.4R-10 raportin [23] mukaiset muunnoskerroimet eri olosuhteissa säilytetyille rakennekoekappaleille.

Rakennekoekappaleen säilytysolosuhde	Kertoimen K_{mc} keskiarvo
Standardin ASTM C42/C42M mukainen	1,00
48 tunnin vesiupotus	1,09
7 vrk säilytys 16-21 °C lämpötilassa ja alle 60 % suhteellisessa kosteudessa	0,96

3.6.4 Poraamisen vaikutus

ACI 214.4R-10 raportissa [23] on esitetty Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53] perustuva muunnoskerroin poraamisen lieriöön aiheuttaman vaurioitumisen huomioon ottamiseksi tuloksissa. Kerroin ottaa huomioon pintaan muodostuneet mikrohalkeamat, porauspinnan epätasaisuuden sekä pinnassa olevat halkaistut runkoainerakeet. Poraamisen vaikutuksen kerroin on raportissa $K_{drill} = 1,06$ ja muunnoskerroimen hajonta $V_{drill} = 2,5 \%$.

3.6.5 Raudoitteiden vaikutus

Standardin ASTM C42 / C42M-16 [52] mukaan rakennekoekappaleet tulee pyrkiä poraamaan siten, etteivät näytteet sisällä raudoiteteräksiä. Mikäli tämä ei ole mahdollista, tulee raudoitteiden koko, muoto ja sijainti raportoida. Standardissa on mainittu näytteessä olevilla teräksillä olevan mahdollisesti vaikutusta näytteen lujuuteen, mutta tämän huomioon ottavia luotettavia korjauskertoimia ei ole saatavilla. Standardin mukaan lieriöitä, joiden pitkittäisakselin läheisyydessä on raudoiteteräksiä, ei voida käyttää lainkaan lujuusmäärityksessä.

3.6.6 Kypsyiden ja iän vaikutus

Standardissa ASTM C42 / C42M-16 [52] tai raportissa ACI 214.4R-10 [23] ei ole annettu erillistä ohjeistusta betonin kypsyiden huomioon ottamisesta rakennekoekappaleissa.

3.6.7 Yhteisvaikutus

Standardin ASTM C42 / C42M-16 [52] mukaan yksittäisen rakennekoekappaleen lieriölujuus saadaan laskettua kaavalla 3.15.

$$f_{is;cyl} = K_{L/D} \cdot f_{core} \quad (3.15)$$

missä

- $K_{L/D}$ on taulukon 3.3 mukainen muunnoskerroin L/D-suhteen vaikutukselle;
- f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos.

Raportissa ACI 214.4R-10 [23] esitetyn käytännön mukaisesti rakennekoekappaleen lieriölujuus saadaan laskettua kaavalla 3.16.

$$f_{is;cyl} = K_{dia} \cdot K_{L/D} \cdot K_{mc} \cdot K_{drill} \cdot f_{core} \quad (3.16)$$

missä

- K_{dia} on taulukon 3.2 mukainen muunnoskerroin halkaisijan vaikutukselle;
- $K_{L/D}$ on kaavan 3.13 mukainen muunnoskerroin L/D-suhteen vaikutukselle;
- K_{mc} on taulukon 3.5 mukainen muunnoskerroin säilytysolosuhteiden vaikutukselle;
- K_{drill} on muunnoskerroin poraamisen vaikutukselle (kappale 3.6.4);
- f_{core} on rakennekoekappaleen puristuslujuustulos.

4 Ominaislujuuden määrittäminen rakennekoekappaleista

4.1 Yleistä

Luvuissa 4.2–4.4 on esitetty Suomessa, Ruotsissa, Saksassa, Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa käytössä olevien ohjeiden ja standardien mukainen menettely ominaislujuuden määrittämiseksi rakennekoekappaleen muunnetuista lujuustuloksista. Luvussa 4.4 on esitetty vertailuna myös standardin EN 1990 [54] liite D:n mukainen kokeellisen mitoituksen määrittäminen. Luvussa 4.5 on esitetty Suomessa voimassa oleva käytäntö betonin arviointierän vaatimuksen mukaisuuden toteutukseksi rakennekoekappaleiden avulla.

4.2 Koekappaleiden lukumäärä

4.2.1 Käytäntö Suomessa ja Ruotsissa

Standardi EN 13791 [9] ohjeistaa testattavien koelieriöiden lukumäärän valittavan rakenteen koon ja testien tarkoituksen perusteella. Standardi määrittää, että rakenteen betonin puristuslujuuden arviointi yksittäisen arvosteluerän osalta tulee perustua vähintään kolmen puristuskoelieriön lujuustuloksiin, kun rakennekoekappaleiden halkaisija on suurempi tai yhtä suuri kuin 100 mm. Pienillä lieriökoolla tapahtuvan hajonnan kasvun vuoksi 50 mm lieriöitä käytettäessä olisi standardin mukaan tarkoituksenmukaista käyttää kolminkertaista näytemäärää verrattuna lujuustesteihin, jotka on suoritettu 100 mm lieriöillä. Lieriöillä, joiden halkaisija on edellä mainittujen näytehalkaisijoiden välillä, koekappaleiden minimimäärä voidaan interpoloida suoraviivaisesti.

Näin ollen Liikenneviraston erikoistarkastusohjeen vaatimuksena olevia 80 mm koelieriöitä käytettäessä näytemäärä tulisi olla standardin EN 13791 [9] suosituksen mukaan minimissään 5,4 – eli ylöspäin pyöristettynä vähintään 6 kpl.

Standardin EN 13791 [9] mukaan rakennekoekappaleiden lujuustuloksia tulee olla käytettävissä vähintään 15 kappaletta, mikäli arvioidaan rakenteessa olevan betonin lujuuden vaatimuksen mukaisuutta. Vaihtoehtoisesti, eri osapuolten näin sopiessa, voidaan käyttää epäsuorien menetelmien, kuten kimmo-vasaralla määritettyjen lujuustulosten, ja rakennekoekappaleiden yhdistelmää. Tässä tapauksessa epäsuorien menetelmien mittaustuloksia tulee olla vähintään 15 ja porattuja rakennekoekappaleita vähintään kaksi kappaletta kohdasta, jossa betonin lujuuden epäillään olevan laadultaan riittämätöntä.

4.2.2 Käytäntö Saksassa

Standardissa DIN 1045-3 [55] on esitetty rakennekoekappaleiden näyteenoton minimimäärät tapauksessa, jossa rakennekoekappaleiden halkaisija on vähintään 100 mm. Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisen liitteen [50] mukaan halkaisijaltaan alle 100 mm rakennekoelieriöiden osalta standardin DIN 1045-3 [55] vähimmäismäärä tulee olla 1,5-kertainen, jos betonin maksimiraekoko on korkeintaan 16 mm ja kaksinkertainen, jos betonin maksimiraekoko on suurempi kuin 16 mm.

4.2.3 Käytäntö Iso-Britanniassa

BS 6089:2010 standardin [18] mukaan rakennekoekappaleilla, joiden päät on viimeistely hiomalla, on 95 % todennäköisyys, että tarkasteltavan rakenteen betonin lujuuden todellinen keskiarvo eroaa rakennekoekappaleiden avulla määritetystä lujuuden keskiarvosta korkeintaan $\pm 14\% / \sqrt{n}$, jossa n on näytteiden lukumäärä. Tämän vuoksi standardissa lujuus suositellaan määritettävän vähintään neljän rakennekoekappaleen tuloksen perusteella. Standardissa painotetaan lisäksi porauskohtien hajonnan tärkeyttä edustavan otoksen aikaansaamiseksi. Standardin mukaan pitkästä poranäytteestä mahdollisesti saatavien kahden erillisen rakennekoekappaleiden tuloksia ei pitäisi lujuutta määriteltäessä käsitellä yksittäisinä, vaan näistä saatavaa keskiarvoa tulisi pitää yhtenä koetuloksena.

Standardi BS 6089:2010 [18] suosittelee, että pienestä koekappalemäärästä aiheutuvan epävarmuuden vuoksi tulisi rakennekoekappaleiden rinnalla tehdä rakenteista epäsuoria lujuusmääryksiä, kuten kimmoasaramittauksia, mikäli rakennekoekappaleiden lukumäärä on pienempi kuin 15.

Lisäksi Iso-Britanniassa on voimassa jo edellä Suomen käytäntöjen kohdalla käsitellyt standardin EN 13791 [9] näytekokoon liittyvät kohdat.

4.2.4 Käytäntö Yhdysvalloissa

Standardi ASTM E122 [56] suosittelee koekappalemääräksi kaavalla 4.1 saatavaa arvoa, jonka avulla saavutetaan 95 % todennäköisyys, että koekappaleiden keskiarvo eroaa koko populaation keskiarvosta maksimissaan ennalta määritetyn virheen verran.

$$n = \left(\frac{2V}{e} \right)^2 \quad (4.1)$$

missä

- n on suositeltu koekappalemäärä;
- e on ennalta määritetty maksimivirhe (% populaation keskiarvosta);
- V on arvioitu populaation hajonta.

ACI 214.4R-10 raportti [23] ohjeistaa kaavassa 4.1 käytettävän populaation hajontana esimerkiksi Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53] perustuvaa arviota betonin hajonnasta, joka on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Betonin lujuuden hajonta rakenteessa [53].

Rakennekokonaisuus		Yksittäinen rakenne	Useita rakenteita
Yksittäinen betonin valuerä		6,7 %	8,4 %
Useita betonin valueriä	Paikallavalu	12,0 %	13,0 %
	Elementti	9,0 %	10,3 %

Jos rakenteessa olevan betonin lujuuden hajonta arvioidaan olevan esimerkiksi $V = 13 \%$ ja halutaan, että koenäytteiden keskiarvo eroaa maksimissaan 5% koko populaation keskiarvosta 95% todennäköisyydellä, saadaan kaavan 4.1 mukaan näytemääräksi 7 kappaletta.

Kun rakenteen betonin epäillään olevan laadultaan riittämätöntä, määritetään Yhdysvaltain betonirakenteiden suunnittelustandardin ACI 318-14 [57] mukaan puristuslujuus kolmesta rakennekoekappaleesta, jotka on porattu siitä kohtaa rakenteesta, jossa heikkoa betonia epäillään olevan. Mikäli näistä määritettyjen lujuuksien keskiarvo on vähintään 85% määritellystä lujuudesta f'_c , eikä yksittäinen lujuustulos ole matalampi kuin 75% määritellystä lujuudesta f'_c , katsotaan betonin lujuuden olevan rakenteellisesti riittävä.

4.3 Poikkeavat tulokset

4.3.1 Käytäntö Iso-Britanniassa

Rakenteesta porattavat näytteet eivät aina ole tilastokelpoisia niissä olevien mahdollisten virheiden, kuten näytteen vaurioitumisen tai näytteenottokohdan heikon tiivistämisen vuoksi. [18] Koska betonin ominaisarvo voi keskiarvon sijaan määrytyä standardin EN 13791 [9] mukaan myös heikoimman yksittäisen puristuslujuuden perusteella, tulee poikkeavat havainnot kyetä tunnistamaan näytejoukosta. Standardissa BS 6089:2010 [18] on esitetty yksinkertainen tapa tilastollisesti poikkeavien tulosten tunnistamiseen. Menetelmässä kaavan 4.2 mukaista suhdetta verrataan yksittäisen koetuloksen osalta taulukon 4.2 arvoihin. Mikäli suhde ylittää näytteiden kokonaismäärästä riippuvan kriittisen arvon, pidetään tätä tulosta tilastollisesti poikkeavana. Kun poikkeava tulos havaitaan, tulee tähän johtanut syy arvioida. Mikäli syy matalaan tulokseen on esimerkiksi näytteen vaurioituminen, tulee kyseinen näyte poistaa otoksesta. Mikäli todetaan, että poikkeava tulos osoittaa paikallisesti heikon betonikohdan rakenteessa, tulisi ryhtyä toimenpiteisiin, esimerkiksi heikon kohdan poistamiseen ja uusimiseen. Alkuperäinen tulos jätetään korjaustoimenpiteiden jälkeen luonnollisesti huomioimatta ominaisarvoa määritettäessä. Jos mitään luonnollista syytä ei näytteen heikkoon lujuuteen ole osoitettavissa, tai paikallisesti heikon betonin tapauksessa asiaan ei ole reagoitu, tulisi poikkeava tulos sisällyttää otokseen. Standardissa BS 6089:2010 [18] on esitetty raja-arvot myös koetuloksille, joita pidetään poikkeavuutensa vuoksi epäilyttävinä. Näitä raja-arvoja ei ole esitetty tässä tutkimusselostuksessa.

$$R_t = \frac{f_{m-i} - f_i}{f_{m-i}} \quad (4.2)$$

missä

- f_{m-i} on koetulosten keskiarvo, jossa poikkeavaa lujuustulosta ei ole otettu huomioon;
- f_i on poikkeava koetulos.

Taulukko 4.2 Standardin BS 6089:2010 [18] mukaiset kriittiset arvot kaavalla 4.2 määritettävälle suhteelle. Arvot perustuvat 6 % oletettuun keskihajontaan sekä Studentin t-jakauman vapausastelukuun $n-2$.

Näytteiden lukumäärä	$R_{t;max}$	Näytteiden lukumäärä	$R_{t;max}$	Näytteiden lukumäärä	$R_{t;max}$
4	0,298	12	0,140	20	0,129
5	0,213	13	0,137	21	0,129
6	0,182	14	0,136	22	0,128
7	0,167	15	0,134	23	0,128
8	0,157	16	0,133	24	0,127
9	0,150	17	0,132	25	0,127
10	0,146	18	0,131	> 25	0,118
11	0,142	19	0,130		

4.3.2 Käytäntö Yhdysvalloissa

Raportin ACI 214.4R-10 [23] mukaan poikkeava tulos voidaan havaita jo ennen puristustestausta esimerkiksi näytteen tiheydestä, jolloin keskiarvoa selvästi matalampi tulos voi indikoida näytteen heikkoa tiivistysastetta, tai testauksen jälkeen puristuskokeen poikkeavasta voima-siirtymä-kuvaajasta, jolloin esimerkiksi näytteeseen mahdollisesti muodostuva ennenaikainen halkeama voi näkyä kuvaajassa ylimääräisenä hyppäyksenä.

Poikkeava tulos voidaan havaita myös standardin ASTM E178-16a [58] mukaisella menettelyllä, jossa testisuure lasketaan kaavan 4.3 avulla ja näin saatavaa arvoa verrataan taulukon 4.3 kriittisiin arvoihin, jotka vastaavat 1 % merkitsevyystasoa. Kyseistä merkitsevyystasoa on käytetty myös raportin ACI 214.4R-10 [23] laskentaesimerkissä, jossa on havainnollistettu poikkeavien koetulosten määrittäminen rakennekoekappaleiden lujuustuloksista. Mikäli testisuure on suurempi kuin näyttemäärää vastaava kriittinen arvo, voidaan kyseistä tulosta pitää tilastollisesti poikkeavana. Jos poikkeava tulos arvioidaan aiheutuneen virheestä koekappaleen valmistelussa tai testauksessa, tulee tulos jättää huomioimatta. Jos selvää syytä poikkeavaan tulokseen ei voida määrittää, tulee epäillyt arvot raportoida ja tulosten yhteydessä mainita onko niitä käytetty myöhemmissä analyyseissä. [23]

$$T_1 = \frac{f_m - f_1}{s_n} \quad (4.3)$$

missä

- f_m on kaikkien koetulosten keskiarvo;
- f_1 on poikkeava koetulos;
- s_n on kaikkien koetulosten keskihajonta.

Taulukko 4.3 Kriittiset arvot kaavalla 4.3 määritettävälle testisuurelle. Arvot perustuvat 1 % merkitsevyystasoon.

Näytteiden lukumäärä	T_{cr}	Näytteiden lukumäärä	T_{cr}	Näytteiden lukumäärä	T_{cr}
3	1,1546	14	2,659	25	3,009
4	1,4925	15	2,705	26	3,029
5	1,749	16	2,747	27	3,049
6	1,944	17	2,785	28	3,068
7	2,097	18	2,821	29	3,085
8	2,221	19	2,854	30	3,103
9	2,323	20	2,884	35	3,178
10	2,410	21	2,912	40	3,240
11	2,485	22	2,939	45	3,292
12	2,550	23	2,963	50	3,336
13	2,607	24	2,987		

4.4 Ominaisarvon määrittäminen

4.4.1 Käytäntö Suomessa ja Ruotsissa

Standardissa EN 13791 [9] on esitetty kaksi menettelytapaa ominaislujuuden määrittämiseksi rakennekoekappaleiden lujuustuloksista. Vastaavat kaavat on esitetty myös Betoninormeissa 2016 [41], joissa tosin käytetään ominaislujuuden sijaan termiä vertailulujuus. Menettelytapaa A käytetään, kun käytettävissä on vähintään 15 koelieriötä ja menettelytapaa B, kun käytettävissä on 3–14 koelieriötä. Molemmat menettelytavat on esitetty alla. Standardin mukaan menettelytapojen soveltuvuus betonin lujuuden arvioimiseksi rakenteista, joista ei ole mitään aiempaa tietoa, tulee arvioida tapauskohtaisesti.

Menettelytapa A:

Kun käytettävissä on vähintään 15 puristuslujuustulosta, arvio rakenteessa olevan betonin puristuslujuuden ominaisarvosta yksittäisen arvosteluerän osalta voidaan muodostaa kaavan 4.4 avulla.

$$f_{ck,is} = \min \left(f_{m(n);is} - 1,48 \cdot s \right) \quad (4.4)$$

$$f_{is,min} + 4[MPa]$$

missä

$f_{m(n);is}$ on koetulosten keskiarvo;

s on koetulosten keskihajonta, kuitenkin vähintään 2 MPa;

$f_{is,min}$ on matalin puristuslujuustulos koetuloksista.

Betonin lujuusluokka saadaan taulukosta 4.4 käyttäen betonin ominaislujuutena kaavalla 4.4 saatavaa arvoa. Taulukon arvoissa on otettu huomioon koetuloksille sallittu 15 % alitus normikoekappaleilla määritettyyn lujuuteen nähden.

Taulukko 4.4 Rakenteesta määritetyn puristuslujuuden ominaisarvon alarajat eri betonin lujuusluokille standardin EN 13791 [9] mukaisesti.

EN 206+A1 mukainen lujuusluokka	Rakenteesta määritetyn puristuslujuuden ominaisarvon minimiarvo	
	$f_{ck;is;cyl}$	$f_{ck;is;cube}$
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

Menettelytapa B:

Kun käytettävissä on 3–14 puristuslujuustulosta, arvio rakenteessa olevan betonin puristuslujuuden ominaisarvosta yksittäisen arvosteluerän osalta voidaan muodostaa kaavan 4.5 avulla.

$$f_{ck;is} = \min \left(\begin{array}{l} f_{m(n);is} - k \\ f_{is;min} + 4[MPa] \end{array} \right) \quad (4.5)$$

missä

- $f_{m(n);is}$ on koetulosten keskiarvo;
- k on koetulosten lukumäärästä riippuva marginaali (Taulukko 4.5);
- $f_{is;min}$ on matalin puristuslujuustulos koetuloksista.

Taulukko 4.5 Kaavassa 4.5 käytettävän k -marginaalin määrittäminen.

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

Betonin lujuusluokan määrittävän taulukon 4.4 voidaan olettaa pätevän myös menettelytavan B mukaiselle ominaislujuudelle, vaikka tähän ei erikseen standardin EN 13791 [9] menettelytapaa B käsittelevässä kohdassa viitata. Standardin mukaan menettelytapaa B käytettäessä on kuitenkin huomattava, että alhaisesta koekappalemäärästä ja tästä aiheutuvasta matalammasta luotettavuustasosta johtuen näin saatava ominaisarvo on useimmiten matalampi kuin suuremmalla koekappalemäärällä saatu. Tästä syystä menettelytapaa B ei suositella käytettävän sellaisissa tilanteissa, joissa betonin vaatimuksenmukaisuutta epäillään. Mikäli menettelytavalla B saatu ominaisarvo todetaan liian konservatiiviseksi, on standardin mukaan suositeltavaa ottaa useampia testinäytteitä tai käyttää puristuslujuuden arviointiin erilaisten määrittystapojen (mm. kimmovasara) yhdistelyä.

4.4.2 Käytäntö Saksassa

Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallisessa liitteessä [50] on esitetty ominaislujuuden määrittäminen rakenteessa olevasta betonista. Määrittäminen eroaa edellä kuvatussa Suomessa ja Ruotsissa käytössä olevasta menettelytapasta. Saksassa menettelytapaa B päädytään ainoastaan sellaisissa tapauksissa, kun käytettävissä on 3–8 rakennekoekappaleesta saatua lujuustulosta, joiden variaatiokerroin on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,20. Muussa tapauksessa rakenteessa olevan betonin ominaislujuus arvioidaan menettelytavan A perusteella. Myös nämä kaksi käytettävissä olevaa menettelytapaa, A ja B, eroavat osin Suomen ja Ruotsin käytännöstä.

Menettelytapa A:

Menettelytapaa A käytettäessä rakenteessa olevan betonin puristuslujuuden ominaisarvo yksittäisen arvosteluerän osalta voidaan arvioida kaavan 4.6 avulla. Menettelytapa A vastaa siten standardin EN 1990 [54] liitteessä D esitettyä yksittäisen ominaisuuden 5 % fraktiilin ominaisarvon määrittäystä tapauksessa, jossa ominaisuuden oletetaan noudattavan normaalijakaumaa. Standardin DIN EN 13791/A20:2017-02 kansallinen liite [50] sallii menettelytavan A yhteydessä käytettävän myös standardin EN 1990 [54] liitteen D mukaista lognormaalista jakaumaa.

$$f_{ck;is} = f_{m(n);is} \cdot (1 - k_n \cdot v) \quad (4.6)$$

missä

$f_{m(n);is}$ on koetulosten keskiarvo;

k_n on taulukon 4.6 mukainen kerroin;

v on koetuloksista laskettu variaatiokerroin ($v_{min} = 0,08$).

Taulukko 4.6 Kaavassa 4.6 käytettävän k_n -kertoimen arvot (5 % fraktiili 75 % luotettavuustasolla). Näytteiden lukumäärien väliarvot voidaan laskea lineaarisella interpolaatiolla

Näytteiden lukumäärä	k_n	Näytteiden lukumäärä	k_n	Näytteiden lukumäärä	k_n
3	3,37	7	2,08	15	1,82
4	2,63	8	2,00	20	1,76
5	2,33	9	1,96	30	1,73
6	2,18	10	1,92	> 30	1,64

Menettelytapa B:

Menettelytapaa B käytettäessä rakenteessa olevan betonin puristuslujuuden ominaisarvo yksittäisen arvosteluerän osalta voidaan arvioida kaavan 4.7 avulla.

$$f_{ck;is} = \min \left(\begin{matrix} f_{m(n);is} \cdot k \\ f_{is;min} + 4[MPa] \end{matrix} \right) \quad (4.7)$$

missä

- $f_{m(n);is}$ on koetulosten keskiarvo;
- k on koetulosten lukumäärästä riippuva kerroin (Taulukko 4.7);
- $f_{is;min}$ on matalin puristuslujuustulos koetuloksista.

Taulukko 4.7 Kaavassa 4.7 käytettävän kertoimen määrittäminen.

Näytteiden lukumäärä	Kerroin k
3	0,70
4 tai 5	0,75
6...8	0,80

4.4.3 Käytäntö Iso-Britanniassa

Standardi EN 13791 [9] sallii ominaislujuuden määrittämisessä myös kansallisten kertoimien käytön, jonka vuoksi Iso-Britannian menettely ominaislujuuden määrittämiseksi eroaa yleiseurooppalaisesta käytännöstä. Standardissa BS 6089:2010 [18] on esitetty Iso-Britanniassa käytössä oleva menettely rakennekoekappaleista määritettävän ominaislujuuden laskemiseksi (kaava 4.8).

$$f_{ck;is} = f_{m(n);is} - t_{n-1}^{0,05} \cdot s \quad (4.8)$$

missä

- $f_{m(n);is}$ on koetulosten keskiarvo;
- $t_{0,05}$ on koetulosten lukumäärästä riippuva kerroin (Taulukko 4.8);
- s on koetulosten keskihajonta.

Taulukko 4.8 Kaavassa 4.8 käytettävän $t_{0,05}$ -marginaalin arvot. Arvot perustuvat Studentin t -jakauman 95 % kertymäfunktioon.

Näytteiden lukumäärä	$t_{0,05}$	Näytteiden lukumäärä	$t_{0,05}$	Näytteiden lukumäärä	$t_{0,05}$
3	2,92	10	1,83	26	1,71
4	2,35	11	1,81	31	1,70
5	2,13	13	1,78	61	1,67
6	2,02	15	1,76	121	1,66
7	1,94	17	1,75	> 121	1,64
8	1,89	19	1,73		
9	1,86	21	1,72		

Standardin BS 6089:2010 [18] mukaan näin saadun ominaisarvon käyttöä rakenteellisessa arvioinnissa tulee harkita tapauskohtaisesti. Mikäli ominaisarvo perustuu suureen määrään koetuloksia ja se on korkeintaan 4 MPa matalinta yksittäistä koetulosta suurempi, voidaan tätä pitää asianmukaisena arvona rakenteellisissa tarkasteluissa. Mikäli kaavan 4.8 mukaan laskettu arvo on enemmän kuin 4 MPa matalinta yksittäistä koetulosta suurempi, tulee ominaisarvo määrittää kaavan 4.9 perusteella.

$$f_{ck;is} = f_{is;min} + 4[MPa] \quad (4.9)$$

missä

$f_{is;min}$ on matalin puristuslujuustulos koetuloksista.

Mikäli näytemäärä on hyvin pieni, kasvaa riski siihen, että rakenteessa on lujuudeltaan heikompia alueita, joita ei näytteenoton yhteydessä ole tutkittu ja havaittu. Tässä tapauksessa ominaisarvon määrittäminen olisi standardin BS 6089:2010 [18] mukaan suositeltavaa suorittaa konservatiivisemmin ja käyttää rakenteiden arvioinnissa matalampaa lujuutta.

4.4.4 Käytäntö Yhdysvalloissa

ACI 214.4R-10 raportissa [23] on esitetty kaksi erilaista menetelmää betonin lujuuden ominaisarvon määrittämiseen. Yhdysvaltojen käytäntöjen kohdalla tulee huomioida, että Yhdysvalloissa betonin ominaislujuus vastaa suunnilleen 10 % alafraktiilia, kun eurokoodien mukaisessa suunnittelussa käytetään ominaislujuudelle 5 % alafraktiilia. ACI 214.4R-10 raportissa [23] esitetyissä menetelmissä on mahdollisuus käyttää erilaisia luotettavuustasoja. ACI 228.1R-03 raportin [59] mukaan 75 % luotettavuustaso on yleisesti laajalti käytössä.

Toleranssikerroinmenetelmä:

Raportissa ACI 214.4R-10 [23] esitetyssä toleranssikerroinmenetelmässä ominaislujuus määritetään kaavan 4.10 avulla. Menetelmässä on otettu huomioon myös luvussa 3 esitettyjen lujuuden korjauskertoimien käytöstä aiheutuva epätarkkuus.

$$f'_{c;eq} = f_m - \sqrt{(K \cdot s_c)^2 + (Z \cdot s_a)^2} \quad (4.10)$$

missä

- f_m on koetulosten keskiarvo;
 K on luotettavuustasosta ja koetulosten lukumäärästä riippuva kerroin (Taulukko 4.9);
 s_c on koetulosten keskihajonta
 Z on luotettavuustasosta riippuva kerroin (Taulukko 4.10);
 s_a on lujuuden korjauskertoimien käytöstä aiheutuva hajonta (kaava 4.11).

Taulukko 4.9 Kaavassa 4.10 käytettävän K-kertoimen arvot.

Luotettavuus- taso	K-kerroin eri näytteiden lukumäärille														
	3	4	5	6	8	10	12	15	18	21	24	27	30	35	40
75 %	2,50	2,13	1,96	1,86	1,74	1,67	1,62	1,58	1,54	1,52	1,50	1,49	1,48	1,46	1,44
90 %	4,26	3,19	2,74	2,49	2,22	2,06	1,97	1,87	1,80	1,75	1,71	1,68	1,66	1,62	1,60
95 %	6,16	4,16	3,41	3,01	2,58	2,36	2,21	2,07	1,97	1,90	1,85	1,81	1,78	1,73	1,70

Taulukko 4.10 Kaavassa 4.10 käytettävän Z-kertoimen arvot.

Luotettavuustaso	Z
75 %	0,67
90 %	1,28
95 %	1,64

$$s_a = f_m \cdot \sqrt{V_{dia}^2 + V_{L/D}^2 + V_{mc}^2 + V_{drill}^2} \quad (4.11)$$

missä

- f_m on koetulosten keskiarvo;
 V_{dia} on näytteen halkaisijan korjauskertoimen hajonta (Taulukko 3.2);
 $V_{L/D}$ on näytteen L/D-suhteen korjauskertoimen hajonta (Kaava 3.14);
 V_{mc} on näytteen kosteusolosuhteiden korjauskertoimen hajonta (Kappale 3.6.3);
 V_{drill} on porauksen vaikutuksen korjauskertoimen hajonta, $V_{drill} = 2,5 \%$.

Vaihtoehtoinen menettely:

ACI 214.4R-10 raportissa [23] esitetty vaihtoehtoinen menettely perustuu Bartlettin ja MacGregorin tutkimukseen [53], jossa he esittivät edellä kuvatun toleranssikerroinmenetelmän olevan liian konservatiivinen, koska rakennekoe-kappaleilla suoritettavat kokeet liioittelisivat rakenteessa olevan betonin lujuuden todellisen hajonnan. Tämän korvaavaksi menettelyksi he ehdottivat kaavalla 4.12 laskettavaa ominaislujuutta, jonka määrittämisessä käytetään Studentin t-jakauman kertoimia.

$$f'_{c;eq} = (1 - 1,28 \cdot V_{WS}) \cdot \left(f_m - \sqrt{\frac{(T \cdot s_c)^2}{n} + (Z \cdot s_a)^2} \right) \quad (4.12)$$

missä

- V_{WS} on betonin lujuuden oletettu hajonta rakenteessa (Taulukko 4.1);
 f_m on koetulosten keskiarvo;
 T on luotettavuustasosta ja koetulosten määrästä riippuva kerroin (Taulukko 4.11);
 s_c on koetulosten keskihajonta;
 Z on luotettavuustasosta riippuva kerroin (Taulukko 4.10)
 s_a on lujuuden korjauskertoimien käytöstä aiheutuva hajonta (kaava 4.11).

Taulukko 4.11 Kaavassa 4.12 käytettävän T-kertoimen arvot.

Luotettavuus- taso	T-kerroin eri näytteiden lukumäärille											
	3	4	5	6	8	10	12	15	18	21	24	30
75 %	0,82	0,76	0,74	0,73	0,71	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
90 %	1,89	1,64	1,53	1,48	1,41	1,38	1,36	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32
95 %	2,92	2,35	2,13	2,02	1,90	1,83	1,80	1,76	1,74	1,72	1,71	1,70

4.4.5 Ominaisarvo EN 1990:ssä esitetyn kokeellisen mitoituksen mukaan

Standardin EN 1990 [54] liitteessä D on esitetty yksittäisen ominaisuuden 5 % fraktiilin ominaisarvon määrittäminen tapauksissa, joissa ominaisuuden oletetaan noudattavan joko normaali- tai lognormaalijakaumaa. Betonin voidaan Mirza et al. [60] kokoamien tutkimusten mukaan olettaa käyttäytyvän normaalijakauman mukaisesti, kun betonin laatu vaihtelu on vähäistä. Vastaavasti keskimääräistä suuremman laadunvaihtelun tapauksessa (variaatiokerroin suurempi kuin 15 % - 20 %) betonin lujuuden vaihtelua kuvaa parhaiten lognormaalijakauma.

Standardin EN 1990 [54] mukaan yksittäisen ominaisuuden 5 % fraktiilin ominaisarvo voidaan määrittää kaavan 4.13 mukaan silloin, kun joukon oletetaan noudattavan normaalijakaumaa. Standardi suosittelee määrittämisessä mieluummin käytettävän variaatiokerroin varmallalla puolella olevaa yläkiarvoa kuin laskentamenetelmää, jossa variaatiokerrointa ei tunneta. Mikäli variaatiokerrointa ei entuudestaan tunneta, määritetään sille näytteestä estimoitava arvo kaavan 4.14 mukaisesti.

$$X_{k(n)} = m_x - k_n \cdot V_x \quad (4.13)$$

missä

- $X_{k(n)}$ on tietyn ominaisuuden ominaisarvo;
 m_x on koetulosten keskiarvo;
 k_n on koetulosten lukumäärästä riippuva kerroin (Taulukot 4.12 ja 4.13);
 V_x on variaatiokerroin tai sen realistinen yläkiarvo.

Taulukko 4.12 Kaavassa 4.13 käytettävän k_n -kertoimen arvot, kun V_x on tunnettu [54].

Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*	Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*	Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*
1	2,31	5	1,80	20	1,68
2	2,01	6	1,77	30	1,67
3	1,89	8	1,74	∞	1,64
4	1,83	10	1,72		

$$* k_n = 1,64 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + 1}$$

Taulukko 4.13 Kaavassa 4.13 käytettävän k_n -kertoimen arvot, kun V_x on tuntematon [54].

Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*	Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*	Näytteiden lukumäärä (n)	k_n^*
3	3,37	6	2,18	20	1,76
4	2,63	8	2,00	30	1,73
5	2,33	10	1,92	∞	1,64

$$* k_n = t_{n-1}^{0,05} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + 1},$$

jossa $t_{n-1}^{0,05}$ -arvot taulukon 4.8 mukaan

$$V_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - m_x)^2}}{m_x} \quad (4.14)$$

missä

- n on koetulosten lukumäärä;
- x_i on yksittäinen koetulos;
- m_x on koetulosten keskiarvo.

Jos joukon oletetaan noudattavan lognormaalijakaumaa, määritetään ominaisarvo standardin EN 1990 [54] mukaan vastaavasti kaavojen 4.15–4.18 avulla.

$$X_{k(n)} = e^{m_y - k_n \cdot s_y} \quad (4.15)$$

missä

- $X_{k(n)}$ on tietyn ominaisuuden ominaisarvo;
- m_y määritetään kaavan 4.16 mukaan;
- k_n on koetulosten lukumäärästä riippuva kerroin (Taulukot 4.12 ja 4.13);
- s_y määritetään kaavan 4.17 mukaan, jos variaatiokerroin on tunnettu ja kaavan 4.18 mukaan, jos variaatiokertoimen arvoa ei tunneta.

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i) \quad (4.16)$$

missä

n on koetulosten lukumäärä;
 x_i on yksittäinen koetulos.

$$s_y = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \quad (4.17)$$

missä

V_x on variaatiokerroin tai sen realistinen yläkiarvo.

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln(x_i) - m_y)^2} \quad (4.18)$$

missä

n on koetulosten lukumäärä;
 x_i on yksittäinen koetulos;
 m_y määritetään kaavan 4.16 mukaan.

4.5 Arvosteluerän hyväksyminen Suomessa

Kun rakennekoekappaleiden lujuustuloksia käytetään arvosteluerän hyväksymiseen, tulee vertailulujuuden olla Betoninormien 2016 [41] ja standardin EN 13791 [9] mukaan vähintään 85 % betonin nimellislujuudesta. Tämä ero normikoekappaleiden ja rakennekoekappaleiden välillä on otettu huomioon standardin EN 1992-1-1 [14] mukaisessa betonin puristuslujuuden osavarmuusluvussa $\gamma_c = 1,5$. Eron huomioon ottaminen osavarmuusluvussa on tarkemmin käsitelty kappaleessa 5.1.

Ohjeistus arvosteluerän hyväksymisestä on muuttunut Betoninormien 2016 [41] yhteydessä. Edellisissä betoninormeissa [61] arvosteluerä on katsottu hyväksyttäväksi, mikäli vertailulujuus on ollut 1-luokan rakenteissa vähintään 85 % ja 2-luokan rakenteissa vähintään 80 % nimellislujuudesta. Lisäksi on vaadittu variaatiokertoimen, eli keskihajonnan ja keskiarvon suhteen, olevan korkeintaan 0,15. Mikäli variaatiokerroin on ollut suurempi tai yhtä suuri kuin 0,25, on vertailulujuuden tullut täyttää nimellislujuus täysimääräisenä. Vaadittavat lujuudet näiden variaatiokertoimien väliarvoille on voitu interpoloida suoraan viivaisesti. Betoninormeissa 2016 [41] ei variaatiokertoimelle ole asetettu enää vaatimuksia. Toisaalta Betoninormeihin 2012 [61] verraten ominaisarvon määrittämisessä käytettävä k -marginaali on noussut yhdellä megapascalilla.

5 Betonin mitoituslujuus

5.1 Betonimateriaalin osavarmuusluku

Eurokoodin mukainen suunnittelu betonirakenteissa perustuu rajatilamenetelmään ja osavarmuuslukumenettelyyn. Murtorajatilatarkasteluissa betonin lujuutta pienennetään betonimateriaalin osavarmuusluvulla, joka on normaalitilanteessa tyypillisesti $\gamma_c = 1,5$. Käyttörajatilassa, onnettomuusrajatilassa ja palomitoituksessa käytetään murtorajatilasta eroavia materiaalin osavarmuuslukuja. [14] Näitä ei kuitenkaan käsitellä tarkemmin tässä raportissa.

Lujuuden ero normikoe-kappaleiden ja rakenteessa olevan betonin välillä on otettu huomioon standardin EN 1992-1-1 [14] mukaisessa betonin puristuslujuuden osavarmuusluvussa $\gamma_c = 1,5$. Tämä on betonieurokoodin taustadokumentin mukaan [10], [62] määritetty alla esitetyn kaavan 5.1 avulla.

$$\gamma_c = K \cdot e^{3,04 \cdot \sqrt{V_m^2 + V_G^2 + V_f^2} - 1,64 \cdot V_f} \quad (5.1)$$

missä

- V_m on rakennemallin epävarmuudesta aiheutuva hajonta ($V_m = 5$ %, kun $\gamma_c = 1,5$);
- V_G on geometriasta aiheutuva hajonta ($V_G = 5$ %, kun $\gamma_c = 1,5$);
- V_f on materiaalilujuuden hajonta ($V_f = 15$ %, kun $\gamma_c = 1,5$);
- K on lisäkerroin, joka ottaa huomioon olosuhde-erot normikoe-kappaleiden ja todellisen rakenteen välillä ($K = 1,15$, kun $\gamma_c = 1,5$).

Edellä esitetyn kaavan ja siinä esitettyjen perusarvojen mukaisesti oletetaan normikoe-kappaleilla määritetyn lujuuden ja todellisen rakenteen välisen lujuuden keskinäisen suhteen olevan 1,15, kun betonin materiaali-osavarmuuslukuna käytetään $\gamma_c = 1,5$. Tämän suhteen käänteislukuna saadaan 0,87, joka on samaa suuruusluokkaa kuin muun muassa standardissa EN 13791 [9] esitetty rakennekoekappaleiden ja normikoe-kappaleiden lujuuden välinen suhde 0,85.

EN 1992-1-1:n [14] mukaan betonin osavarmuuslukua voidaan pienentää, mikäli suoritetaan toimenpiteitä, jotka vähentävät laskennallisen kestävyuden epävarmuutta. Käytettäessä betonin lujuuden osavarmuuslukua $\gamma_c = 1,35$, tulee standardin SFS-EN 1992-1-1 kansallisen liitteen [63] mukaan betonin lujuuden keskihajonnan osoittaa olevan alle 10 %. Lisäksi poikkileikkauksen mitta-poikkeamien tulee olla pienempiä.

Jos kaavan 5.1 mukaisessa osavarmuusluvun määrittämisessä rakennemallin epävarmuudesta aiheutuva hajonta pidetään vakiona (5 %), materiaalilujuuden hajonta asetetaan 10 %:iin ja geometriasta aiheutuva hajonta oletetaan olevan osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,5$ mukaisesta tapauksesta puolet – eli 2,5 %, tulee rakennekoekappaleiden ja normikoe-kappaleiden lujuuden välisen suhteen olla noin 0,90, jotta voidaan päätyä osavarmuuslukuun $\gamma_c = 1,35$.

5.2 Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo määritetään EN 1992-1-1:n [14] mukaan kaavalla 5.2.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_C} \quad (5.2)$$

missä

- α_{cc} on pitkäaikaisen kuormituksen lujuutta heikentävän vaikutuksen huomioon ottava kerroin, Suomessa $\alpha_{cc} = 0,85$ [63];
- f_{ck} on betonin puristuslujuuden ominaisarvo (lieriölujuus);
- γ_C on betonimateriaalin osavarmuusluku.

6 Rakennekoekappaleista mitoituslujuuteen

6.1 Yhteenveto

Suomen ohjeiden mukaisesti mitoituslujuuden määrittämisessä rakennekoekappaleiden avulla noudatetaan seuraavaa menettelyä:

- Rakennelieriöiden halkaisijan vaikutuksen huomioon ottaminen
 - ⇒ Lujuustulosten muuntaminen kuutiolujuuksia vastaaviksi standardin SFS 7022 [43] mukaisella menettelyllä (tässä raportissa kuva 3.1)
- Rakenteessa olevan betonin ominaislujuuden määrittäminen
 - ⇒ Rakenteessa olevan betonin ominaislujuus määritetään standardin EN 13791 [9] mukaisella menettelytavalla A, jos lujuuksia on käytettävissä vähintään 15 kappaletta – ja menettelytavalla B, jos lujuuksia on 3-14 kappaletta
- Normikoe-kappaleisiin verrattavan ominaislujuuden määrittäminen
 - ⇒ Normikoe-kappaleiden ja todellisen rakenteessa olevan betonin välillä oleva luontainen ero lujudessa otetaan huomioon jakamalla rakennekoekappaleista saatava ominaislujuus standardissa EN 13791 [9] esitetyllä suhteella 0,85, joka on otettu huomioon betonin osavarmuusluvussa $\gamma_c = 1,5$. Matalampaa $\gamma_c = 1,35$ osavarmuuslukua käytettäessä tulee tämän raportin selvityksen perusteella normikoe-kappaleiden ja todellisen rakenteessa olevan betonin lujuden suhteena käyttää suurempaa arvoa, jotta osavarmuusluvun peruste olisi kaavan 5.1 mukainen. Tässä raportissa kyseiseksi suhteeksi on otaksuttu 0,90.
- Kuutiolujuuksien muuttaminen lieriölujuudeksi
 - ⇒ Kuutiolujuuksien muuttaminen lieriölujuudeksi standardin EN 1992-1-1 [14] mukaisia suhteita käyttäen (tässä raportissa taulukko 1.3), tai standardin EN 206-1 [13] mukaisia betonin lujuusluokkia käytettäessä suoraan lujuusluokan merkinnässä käytetyn suhteen perusteella.
- Mitoituslujuuden määrittäminen
 - ⇒ Betonin mitoituslujuus lasketaan standardin EN 1992-1-1 [14] ja tämän kansallisen liitteen [63] mukaista osavarmuuslukua ja pitkäaikaistekijöitä huomioon ottavaa kerrointa käyttäen (tässä raportissa kaava 5.2)

6.2 Laskentaesimerkki

Suoritetaan laskentaesimerkissä betonin lujuuden mitoitusarvon määrittämisen kuuden rakennekoekappaleen puristuslujuustuloksen perusteella Suomen ohjeistusten mukaisesti. Tässä laskentaesimerkissä on otaksuttu, että suunnittelussa käytettävä ominaislujuus voidaan määrittää suoraan kokeellisen mitoituksen mukaisesti tilastollisia menetelmiä käyttäen, jolloin ominaislujuudessa ei ole rajoittauduttu pelkästään standardin EN 206-1 [13] mukaisiin lujuusluokkiin. Tällöin voidaan paremmin vertailla myös eri menettelytapojen vaikutusta tuloksiin.

Puristuslujuustulokset on valittu satunnaisesti, mutta siten että tulosten variaatiokertoimeksi tulee $V_x = 0,050$. Betoninäytteiden lujuusluokka on C30/37. Puristuslujuus on määritetty nimellimitoiltaan $D = L = 80$ mm olevista betonilieriöstä. Esimerkkitapauksessa näytteiden poraus on suoritettu kahdella eri poralla, joiden halkaisija poikkesi hieman toisistaan. Tällöin huomiota tulee kiinnittää myös muunnoskerroimiin, joilla lujuustulokset muunnetaan sivumitaltaan 150 mm kuutiota vastaaviksi. Esimerkin puristuslujuustulokset on esitetty taulukossa 6.1. Taulukossa on suoritettu myös puristuslujuustulosten muunnos kuutiolujuuksia vastaaviksi standardin SFS 7022 [43] muunnoskerroimien (kuva 3.1) mukaisesti.

Taulukko 6.1 Puristuslujuustulokset laskentaesimerkissä.

Näyte nro	f_c [MPa]	D [mm]	k_s	$f_{c;cube}$ [MPa]
1	34,2	81,8	1,0955	37,47
2	36,4	81,8	1,0955	39,88
3	35,5	82,0	1,0950	38,87
4	37,0	79,7	1,1000	40,70
5	34,8	79,6	1,1000	38,28
6	32,1	79,7	1,1000	35,31
Keskiarvo, $f_{m(n);is}$ [MPa]				38,4
Keskihajonta, s [MPa]				1,90

Taulukon 6.1 merkinnöissä:

- f_c on yksittäisen näytteen puristuslujuustulos, $f_c = F_u / A_c$, jossa
 - F_u on puristusnäytteen murtokuorma;
 - A_c on puristusnäytteen poikkipinta-ala.
- D on puristusnäytteen halkaisija;
- k_s on puristuslujuustuloksen muunnoskerroin 150 mm kuution lujuutta vastaavaksi;
- $f_{c;cube}$ on 150 mm kuutiolujuutta vastaava näytteen puristuslujuustulos, $f_{c;cube} = k_s \cdot f_c$.

Koska betoninäytteitä on esimerkissä kuusi kappaletta, tulee ominaislujuuden määrittämisessä käyttää standardin EN 13791 [9] mukaista menettelytapaa B, jossa lujuustulosten keskiarvosta vähennetään kuuden koenäytteen tapauksessa 7 MPa. Taulukon 6.1 testituloksista saadaan vertailulujuudeksi siten $f_{ck;is;cube} = 38,4 \text{ MPa} - 7 \text{ MPa} = 31,4 \text{ MPa}$. Tarkistetaan lisäksi, että matalimman puristuslujuustuloksen kautta määräytyvä vertailulujuus $f_{ck;is;cube} = 35,3 \text{ MPa} + 4 \text{ MPa} = 39,3 \text{ MPa}$ on edellistä arvoa suurempi, jolloin keskiarvon kautta määritetty arvo jää määrääväksi ($f_{ck;is;cube} = 31,4 \text{ MPa}$).

Seuraavassa vaiheessa muutetaan edellä saatu vertailulujuus normikoe-kappaleita vastaavaksi ominaislujuudeksi, jolloin otetaan huomioon normikoe-kappaleiden ja todellisen rakenteessa olevan betonin välillä oleva luontainen ero lujuudessa. Käytettäessä lujuuden osavarmuuslukua $\gamma_c = 1,5$ ajatellaan todellisen rakenteessa olevan betonin ja normikoe-kappaleiden lujuuden suhteen olevan 0,85. Mikäli betonin lujuuden keskihajonnan ja geometriasta aiheutuvan hajonnan puolesta on mahdollista käyttää pienennettyä lujuuden osavarmuuslukua $\gamma_c = 1,35$, tulee myös todellisen rakenteessa olevan betonin ja normikoe-kappaleiden lujuuden suhteen olla edellä mainittua suurempi, kuten kappaleessa 5.1 todettiin. Tässä esimerkissä käytetään pienemmän osavarmuusluvun tapauksessa todellisen rakenteessa olevan betonin ja normikoe-kappaleiden lujuuden suhteen 0,90.

a) Lujuuden osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,50$ tapauksessa:

- Suunnittelussa käytettävä betonin ominaislujuus on $f_{ck;cube} = 31,4 \text{ MPa} / 0,85 = 36,9 \text{ MPa}$
- Betonin ominaislujuus lieriölujuudeksi muutettuna on taulukon 1.3 mukaan

$$f_{ck;cyl} = 25 \text{ MPa} + \frac{36,9 \text{ MPa} - 30 \text{ MPa}}{1,4} = 29,9 \text{ MPa}$$

$$\text{(tai yksinkertaistettuna kuvan 1.6 mukaisesti } f_{ck;cyl} = 36,9 \text{ MPa} \cdot 0,828 = 30,6 \text{ MPa)}$$

- Betonin mitoituslujuus on kaavan 5.2 mukaan $f_{cd} = 0,85 \cdot 29,9 \text{ MPa} / 1,5 = 16,9 \text{ MPa}$

b) Lujuuden osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,35$ tapauksessa:

- Suunnittelussa käytettävä betonin ominaislujuus on $f_{ck;cube} = 31,4 \text{ MPa} / 0,90 = 34,9 \text{ MPa}$
- Betonin ominaislujuus lieriölujuudeksi muutettuna on taulukon 1.3 mukaan

$$f_{ck;cyl} = 25 \text{ MPa} + \frac{34,9 \text{ MPa} - 30 \text{ MPa}}{1,4} = 28,5 \text{ MPa}$$

$$\text{(tai yksinkertaistettuna kuvan 1.6 mukaisesti } f_{ck;cyl} = 34,9 \text{ MPa} \cdot 0,828 = 28,9 \text{ MPa)}$$

- Betonin mitoituslujuus on kaavan 5.2 mukaan $f_{cd} = 0,85 \cdot 28,5 \text{ MPa} / 1,35 = 17,9 \text{ MPa}$

Määritetään vertailuksi betonin mitoituslujuus teoreettisessa tapauksessa, jossa jokaista taulukon 6.1 mukaista lujuustulosta olisi ollut testausjoukossa kolmin-kertainen määrä. Tällöin näytteiden keskiarvo ja keskihajonta pysyvät vakioina edellä esitettyyn laskentaan nähden. Lujuustulosten kokonaismäärä olisi tässä tapauksessa siis 18 kappaletta, jolloin ominaislujuuden määrittämisessä tulisi käyttää standardin EN 13791 [9] menettelytapaa A.

Tulosten keskihajonta on $s = 1,90 \text{ MPa}$, jolloin kaavassa tulee käyttää hajonnan minimiarvoa $s_{min} = 2,0 \text{ MPa}$. Vertailulujuudeksi saadaan tällöin $f_{ck;is;cube} = 38,4 \text{ MPa} - 1,48 \cdot 2,0 \text{ MPa} = 35,5 \text{ MPa}$. Otoksessa ei ole mukana niin pientä yksittäistä tulosta, että arvosteluerän vertailulujuus määräytyisi pienimmän tuloksen perusteella.

Määritetään betonin mitoituslujuus kahdella eri betonin lujuuden osavarmuusluvulla kuten edellä.

a) Lujuuden osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,50$ tapauksessa:

- Suunnittelussa käytettävä betonin ominaislujuus on $f_{ck;cube} = 35,5 \text{ MPa} / 0,85 = 41,8 \text{ MPa}$
- Betonin ominaislujuus lieriölujuudeksi muutettuna on taulukon 1.3 mukaan

$$f_{ck;cyl} = 30 \text{ MPa} + \frac{41,8 \text{ MPa} - 37 \text{ MPa}}{1,6} = 33,0 \text{ MPa}$$

(tai yksinkertaistettuna kuvan 1.6 mukaisesti $f_{ck;cyl} = 41,8 \text{ MPa} \cdot 0,828 = 34,6 \text{ MPa}$)

- Betonin mitoituslujuus on kaavan 5.2 mukaan $f_{cd} = 0,85 \cdot 33,0 \text{ MPa} / 1,5 = 18,7 \text{ MPa}$

b) Lujuuden osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,35$ tapauksessa:

- Suunnittelussa käytettävä betonin ominaislujuus on $f_{ck;cube} = 35,5 \text{ MPa} / 0,90 = 39,4 \text{ MPa}$
- Betonin ominaislujuus lieriölujuudeksi muutettuna on taulukon 1.3 mukaan

$$f_{ck;cyl} = 30 \text{ MPa} + \frac{39,4 \text{ MPa} - 37 \text{ MPa}}{1,6} = 31,5 \text{ MPa}$$

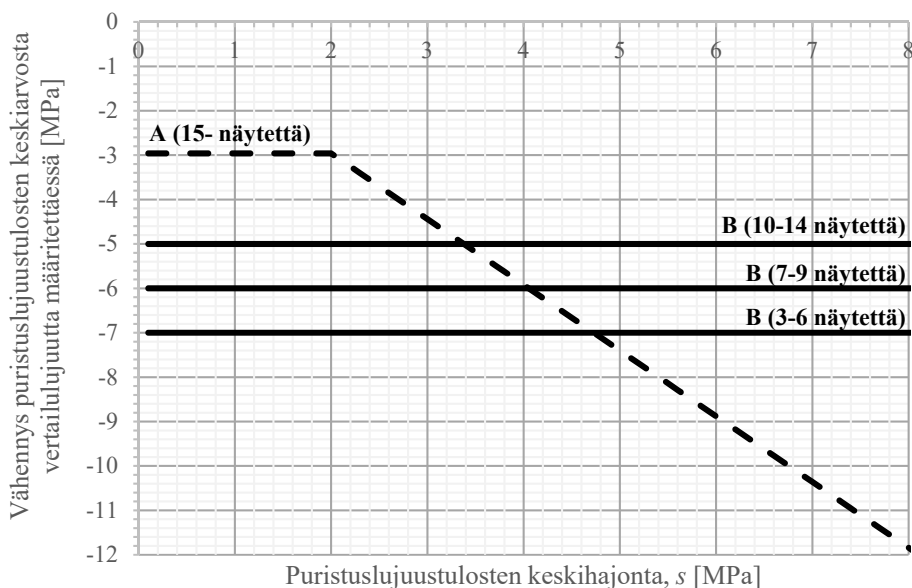
(tai yksinkertaistettuna kuvan 1.6 mukaisesti $f_{ck;cyl} = 39,4 \text{ MPa} \cdot 0,828 = 32,7 \text{ MPa}$)

- Betonin mitoituslujuus on kaavan 5.2 mukaan $f_{cd} = 0,85 \cdot 31,5 \text{ MPa} / 1,35 = 19,8 \text{ MPa}$

Kun esimerkin vertailulujuuksia verrataan taulukon 4.4 arvoihin havaitaan, että molemmilla menettelytavoilla rakenteesta määritetyn betonin vertailulujuus täytti lujuusluokan C30/37 vaatimukset.

Tämän esimerkin tapauksessa menettelytavalla A saatiin noin 2 MPa korkeammat mitoituslujuuden arvot kuin menettelytapaa B käytettäessä. Eroon vaikuttaa puristuslujuustulosten keskihajonta, joka tässä esimerkissä oli hyvin matala.

Keskihajonnan merkitystä tuloksista määritettävään vertailulujuuteen on havainnollistettu kuvassa 6.1. Kuvasta havaitaan, että tulosten keskihajonnan ollessa vähemmän kuin $s = 3,4$ MPa, saadaan kaikissa tapauksissa menettelytavalla A korkeampi vertailulujuuden arvo, kun tulosten keskiarvo ja keskihajonta otaksutaan saman suuruisiksi menettelytapojen A ja B kesken. Vastavasti puristuslujuustulosten keskihajonnan ollessa suurempi kuin $s = 4,7$ MPa saadaan menettelytavalla B aina suurempi vertailulujuus, kun vertailulujuus määrittyy puristuslujuustulosten keskiarvon perusteella.



Kuva 6.1 Puristuslujuustulosten keskihajonnan vaikutus EN 13791 [9] mukaan määritettävässä betonin vertailulujuudessa eri menettelytavoilla (A tai B) ja näytemäärillä. Kuvaajassa otaksutaan, että vertailulujuus määrittyy puristuslujuustulosten keskiarvon perusteella.

7 Johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset

Rakenteista porataan rakennekoekappaleita lujuuden määrittämistä varten kahteen eri käyttötarkoitukseen: betonin vaatimuksenmukaisuuden arviointiin ja betonin ominaislujuuden määrittämiseen olemassa olevasta rakenteesta. Rakennekoekappaleiden perusteella suoritettavassa betonin puristuslujuuden mitoitusarvon määrittämisessä on tunnistettavissa neljä erityyppistä lopulliseen lujuustulokseen vaikuttavaa osa-aluetta:

1. Rakenne- ja normikoe-kappaleiden keskinäiset erot huomioon ottavien korjauskertoimien käyttö muun muassa halkaisijan, pituuden ja säilytysolosuhteiden suhteen
2. Rakenteessa olevan betonin ominaislujuuden määrittämiseen käytettävät tilastolliset menetelmät
3. Normikoe-kappaleiden ja rakenteessa olevan betonin lujuuksien keskinäisen suhteen huomioon ottaminen suunnittelussa käytettävässä ominaislujuudessa
4. Betonin mitoituslujuuden määrittämisessä käytettävä materiaalin osavarmuusluku, jossa huomioidaan myös edellisessä kohdassa esitetyn osa-alueen vaikutus

Tutkimuksen esiselvitysvaiheessa havaittiin, että rakennekoekappaleista saatavaan lujuustulokseen vaikuttaa suuri joukko erilaisia muuttujia ja että käytännöt muuttujien huomioon ottamisessa poikkeavat toisistaan eri maiden välillä. Myös muuttujien vaikutuksia betonin lujuuteen selvittävässä tutkimuksessa havaittiin toisistaan poikkeavia johtopäätöksiä. Betonin valmistuksessa ja betonirakenteiden suunnittelussa käytettävät betonin lujuudet perustuvat standardoitujen normikoe-kappaleiden puristuslujuustestausten tuloksiin. Myös rakennekoekappaleiden perusteella määritetyssä lujuudessa on lopulta päädyttävä normikoe-kappaleita vastaaviin lujuuksiin. Tämän vuoksi rakennekoekappaleiden avulla määritetty ominaislujuuteen sisältyy normikoe-kappaleisiin nähden ylimääräinen epävarmuustekijä lujuudelle suoritettavien muunnosten vuoksi. Tätä tosin kompensoi se, että rakennekoekappaleiden tuloksiin sisältyy myös betonin kuljetuksen, valun ja jälkihoidon todellinen vaikutus lujuuteen, jota normikoe-kappaleiden tapauksessa ei voida todentaa.

Rakennekoekappaleista määritettävään lujuuteen liittyvää epävarmuutta on mahdollista vähentää siten, että mahdollisimman moni lujuuden määrittämiseen liittyvästä muuttujasta, kuten rakennekoekappaleiden koko ja säilytysolosuhteet ennen testausta, olisivat vakioituja ja mahdollisimman lähellä normikoe-kappaleiden arvoja. Käytännön työssä tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista. Muunnoskertoimien käytön aiheuttamaa lisäepävarmuutta ei oteta Suomessa huomioon betonin ominaislujuuden määrittämisessä, mutta esimerkiksi Yhdysvaltain sovellusohjeissa on esitetty menettely asian huomioon ottamiseksi betonin ominaislujuudessa. Mikäli vakiomenettelystä poikkeavaa menettelyä joudutaan käyttämään, tulisi tällöin tuntea poikkeavan menettelyn vaikutus näytteestä saatavaan lujuuteen mahdollisimman tarkasti.

Rakenteessa olevan betonin lujuuden määrittämisen perustana on Suomessa standardi EN 13791 [9]. Standardin perusteella voidaan määrittää rakenteessa olevan betonin ominaislujuus, $f_{ck, is}$, ja verrata tätä standardin EN 206-1 [13] mukaisten betonin lujuusluokkien ominaislujuuksiin, f_{ck} , otaksumalla, että rakenteessa oleva lujuus on 85 % normikoe-kappaleiden mukaan määritetystä

lujuudesta. Epäselväksi jää, tuleeko rakennekoekappaleiden perusteella määritettävässä suunnittelun ominaislujuudessa käyttää näiden lujuusluokkien mukaisia ominaislujuuksia. Tämän raportin yhteydessä on otaksuttu, että rakennekoekappaleista suoritettava lujuuden määrittäminen vastaisi kokeellista mitoitusta, jolloin betoninäytteiden lujuustuloksista voitaisiin johtaa suunnittelussa käytettävä betonin ominaislujuus suoraan tilastollisten menetelmien mukaisesti, ilman jaottelua standardin EN 206-1 [13] mukaisiin betonin lujuusluokkiin.

Määrittäessä rakennekoekappaleiden perusteella suunnittelussa käytettävää betonin puristuslujuuden ominaisarvoa on Suomen standardien mukaan rakennekoekappaleiden lujuustulokset muutettava määrityksen alussa normikoekuution lujuuksia vastaaviksi. Eurokoodien mukainen suunnittelu perustuu betonin lieriölujuuksiin, joten lujuusmuunnos on suoritettava tämän jälkeen vielä kuutiolujuudesta lieriölujuudeksi. Muunnos kuutiolujuuteen on sinänsä tarpeellista ja muodostaa ylimääräisen virhelähteen. Perusteltua olisi siirtyä käyttämään suoraan lieriölujuuksia ja jättää muunnos kuutiolujuuksiin väli-vaiheena pois. Betonin vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen perustuu Suomessa kuutiolujuustuloksiin ja tässä tapauksessa muunnos kuutiolujuuteen on nykyisin välttämätöntä. Perusteltua olisi siirtyä käyttämään myös vaatimuksenmukaisuuden osoittamisessa lieriölujuuksia, jolloin lujuuden peruste olisi yhtenäinen suunnittelun kanssa.

Standardin EN 206-1 [13] mukaisen betonin ominaislujuuden, eli lujuuden 5 % alafraktiilin, kriteeri on äärettömän suuresta näytejoukosta tulosten keskiarvo vähennettynä tulosten 1,48-kertaisella keskihajonnalla. Vastaavasti standardin EN 1990 [54] mukaisessa kokeellisessa mitoituksessa tulosten 5 % alafraktiili vastaa arvoa, joka on äärettömän suuresta näytejoukosta tulosten keskiarvo vähennettynä tulosten 1,64-kertaisella keskihajonnalla. Näiden kahden määrittäytävän keskinäiseen eroon johtavien syiden selvittäminen jäi tämän esiselvityksen rajauksen ulkopuolelle.

Esiselvityksessä havaittiin, että menettely, jolla rakennekoekappaleista voidaan päätyä ominaislujuuteen, on olemassa, mutta tähän liittyvien muuttujien tarkempi selvittäminen olisi hyvin tärkeää. Raportissa esitetyt tutkimustulokset rakennekoekappaleiden eri ominaisuuksien vaikutuksesta näytteen lujuuteen perustuvat ulkomaisiin, osittain erittäin vanhoihin tutkimuksiin, jolloin on mahdollista, että nämä tulokset eivät täysinmääräisesti päde Suomessa nykyisin käytettävien betonilaatujen, raaka-aineiden ja vallitsevien olosuhteiden osalta.

Tärkeimpänä jatkotutkimusehdotuksena esiin nousee kokeellinen tutkimus, jossa Liikenneviraston erikoistarkastusohjeen mukaisten rakennekoekappaleiden lujuustuloksia verrattaisiin normikoelieriön mittoja vastaavien rakennekoekappaleiden, normikoelieriöiden ja normikoekuutioiden lujuustuloksiin. Tutkimuksessa valmistettaisiin riittävän suuret koerakenteet, joista valmistettaisiin erikoistarkastusohjeen mukaisia D80 mm x 80 mm ja normikoekappaleen D150 mm x 300 mm kokoa vastaavia rakennekoekappaleita. Lisäksi samasta betonista valmistettaisiin referensseinä toimivia normikoekuutioita ja -lieriöitä. Koekappaleille suoritettavien puristuslujuusmäärittäytysten avulla saataisiin lisätietoa rakenne- ja normikoekappaleiden välisistä lujuuseroista sekä näytteen koon ja säilytysolosuhteiden vaikutuksesta näytteestä saatavaan lujuuteen.

Esiselvitysvaiheessa havaittiin, että eurokoodien mukaisessa suunnittelussa käytettävä betonin materiaaliosavarmuusluku ottaa huomioon lujuuden keskijajonnan, joka on otaksuttu olevan osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,50$ tapauksessa 15 % ja osavarmuusluvun $\gamma_c = 1,35$ tapauksessa 10 %. Rakennekoekappaleista määritettävän mitoituslujuuden perustaksi olisi arvokasta selvittää mikä on rakenteessa olevan betonin toteutuva lujuuden hajonta tyyppillisesti ja miten se vastaa edellä mainittuja otaksunia.

Esiselvityksessä havaittiin lisäksi, että rakenteessa olevan betonin ja normikokappaleiden luontainen ero lujuuksissa on otettu huomioon betonin materiaaliosavarmuusluvussa $\gamma_c = 1,50$. Tällöin lujuuksien suhteeksi otaksutaan 0,85. Betonin alennetun materiaaliosavarmuusluvun $\gamma_c = 1,35$ tapauksessa havaittiin, että normikokappaleiden ja todellisen rakenteessa olevan betonin lujuuden suhteena tulee käyttää edellistä suurempaa arvoa, jotta osavarmuusluvun peruste olisi vastaava kuin materiaaliosavarmuusluvun $\gamma_c = 1,50$ tapauksessa. Tässä raportissa on suhteeksi otaksuttu 0,90, ks. kappale 5.1.

Tämän tutkimuksen esiselvitysvaiheen sisältöön ei kuulunut selvittää miten otaksuttua alhaisempi betonin lujuus vaikuttaa rakenteen kantavuuteen. Tämän selvittäminen olisi raportin aihepiiriin liittyen kuitenkin tarpeellista. Lisäksi tarpeen olisi selvittää rakennekoekappaleiden näytteenottoehtien merkitystä siten, että näytteistä saatava tulos betonin lujuudelle olisi mahdollisimman edustava. Selvitys olisi tarpeen myös rakennekoekappaletestauksia tukevista menettelyistä, joilla on mahdollista saada lisätietoa rakenteessa olevan betonin lujuudesta.

Lähdeluettelo

- [1] *BY 201. Betonitekniikan oppikirja. 2004.* Jyväskylä: Suomen Betoniyhdistys.
- [2] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed. Essex, England: Longman Group Limited, 1995.
- [3] C. A. Clear, "Cement Type / Early Age Properties," *Concrete Today*, pp. 12–14, 2011.
- [4] *SFS-EN 12620 + A1. Betonikiviainekset.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2008.
- [5] R. Polat, M. M. Yadollahi, A. E. Sagsoz, and S. Arasan, "The Correlation between Aggregate Shape and Compressive Strength of Concrete," *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 62–80, 2013.
- [6] C. H. Aginam, C. A. Chidolue, and C. Nwakire, "Investigating the Effects of Coarse Aggregate Types on The Compressive Strength Of Concrete," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 1140–1144, 2013.
- [7] Z. A. Chat, U. Salam, and S. Bashir, "Compressive Strength of Concrete Using Natural Aggregates (Gravel) and Crushed Rock Aggregates - a Comparative Case Study," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 21–26, 2015.
- [8] *BY 211. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1. 2013*, 2nd ed. Tampere: Suomen Betoniyhdistys.
- [9] *SFS-EN 13791. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2007.
- [10] *Eurocode 2 Commentary.* European Concrete Platform ASBL, 2008.
- [11] F. Fingerloos, J. Hegger, and K. Zilch, *Eurocode 2 für Deutschland.* Ernst & Sohn, 2012.
- [12] H. Outinen and T. Salmi, *Lujuusopin perusteet.* Tampere: Pressus Oy, 2004.
- [13] *SFS-EN 206+A1. Concrete. Specification, performance, production and conformity.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2016.
- [14] *SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2010.
- [15] P. Bamforth, D. Chisholm, J. Gibbs, and T. Harrison, "Properties of Concrete for use in Eurocode 2," Camberley, England, 2008.
- [16] *SFS-EN 12390-2. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- [17] S. Khoury, A. A.-H. Aliabdo, and A. Ghazy, "Reliability of core test – Critical assessment and proposed new approach," *Alexandria Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 169–184, 2014.
- [18] *BS 6089:2010. Assessment of In-situ Compressive Strength – Complementary Guidance to that given in BS EN 13791.* British Standard Institution, 2010.
- [19] W. K. Yip and C. T. Tam, "Concrete strength evaluation through the use of small diameter cores," *Mag. Concr. Res.*, vol. 40, no. 143, pp. 99–105, 1988.
- [20] R. C. Meininger, "Effect of Core Diameter on Measured Concrete Strength," *J. Mater.*, vol. 3, no. 2, pp. 320–336, 1968.
- [21] B. R. H. Campbell and R. E. Tobin, "Core and Cylinder Strengths of Natural and Lightweight Concrete," *ACI J. Proc.*, vol. 64, no. 4, pp. 190–195, 1967.
- [22] O. Ario, K. Ramyar, M. Tuncan, A. Tuncan, and I. Cil, "Some factors influencing effect of core diameter on measured concrete compressive strength," *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. 3, pp. 291–296, 2007.
- [23] *ACI 214.4R-10. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results.* Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2010.
- [24] F. M. Bartlett and J. G. MacGregor, "Effect of Core Diameter on Concrete Core Strengths," *ACI Mater. J.*, vol. 91, no. 5, pp. 460–470, 1994.
- [25] X. Chen, S. Wu, and J. Zhou, "Compressive Strength of Concrete Cores with Different Lengths," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 7, p. 7, 2014.
- [26] M. Tuncan, O. Ario, K. Ramyar, and B. Karasu, "Assessing concrete strength by means of small diameter cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 981–988, 2008.

- [27] A. C. Carroll, A. R. Grubbs, A. K. Schindler, and R. W. Barnes, "Effect of Core Geometry and Size on Concrete Compressive Strength," Auburn, Alabama, USA, 2016.
- [28] R. Dillon and G. I. B. Rankin, "Cube, cylinder, core and pull-off strength relationships," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Struct. Build.*, vol. 166, no. 10, pp. 521–536, 2013.
- [29] F. M. Bartlett and J. G. MacGregor, "Assessment of Concrete Strength in Existing Structures," Alberta, Edmonton, Canada, 1994.
- [30] B. A. Suprenant, "Core strength variation of in-place concrete," *Aberdeen Gr.*, p. 3, 1995.
- [31] *BS 1881 Part 120:1983. Testing Concrete. Part 120. Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores.* London, England: British Standard Institution, 1983.
- [32] "BS EN 12504-1:2009. Testing Concrete in Structures, Part 1: Cored Specimens – Taking, Examining and Testing in Compression." British Standard Institution, p. 16, 2009.
- [33] U. Wöhl, "Bewertung der Bauwerksdruckfestigkeit nach DIN EN 13791," *Beton*, vol. 59, no. 4, pp. 130–137, 2009.
- [34] *prEN 13791, draft.* 2001.
- [35] R. A. M. Watkins, H. W. Pang, and 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.
- [36] N. Petersons, "Should Standard Cube Test Specimens Be Replaced by Test Specimens Taken from Structures?," *Mater. Struct.*, vol. 1, no. 5, pp. 425–435, 1968.
- [37] T. Bugai, D. Kruger, and R. Rankine, "The importance of plane end-bearing surfaces when measuring the strengths of concrete core specimens," *J. South African Inst. Civ. Eng.*, vol. 54, no. 2, pp. 126–127, 2012.
- [38] *SFS-EN 12390-1. Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2012.
- [39] *SFS-EN 12350-1. Tuoreen betonin testaus. Osa 1: Näytteenotto.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- [40] *SFS-EN 12390-3. Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- [41] *BY 65. Betoninormit 2016.* Vaasa: Suomen Betoniyhdistys.
- [42] V. Anttila, "Betonin valinta," in *Rakentajan Kalenteri*, 2009, pp. 407–416.
- [43] *SFS 7022. Betoni. Standardin SFS-EN 206:2014 käyttö Suomessa.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2014.
- [44] *SFS-EN 12504-1. Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet, näytteenotto, tutkiminen ja puristuslujuuden testaus.* Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- [45] *RakMK B4. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Betonirakenteet.* Helsinki: Sisäasiainministeriö, 1981.
- [46] *RIL 131-1981. Betoninormit 1981.* Vammala: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto.
- [47] *SS 137207. Betongprovning - Hårdnad betong - Tryckhållfasthet - Omräkningsfaktorer.* Stockholm, Sweden: SIS Förlag AB, 2005.
- [48] *SS-EN 12390-2 T1. Provning av hårdnad betong – Del 2: Tillverkning och lagring av provkroppar för hållfasthetsbestämning – Bilaga NA (informativ) Härdning av kuber före hållfasthetsprovning (alternativ metod).* Stockholm, Sweden: SIS Förlag AB, 2002.
- [49] *SS 137003. Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige.* Stockholm, Sweden: SIS Förlag AB, 2015.
- [50] *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.
- [51] *DIN 1048-2. Testing concrete. Testing hardened concrete (specimens taken in situ).* Berlin, Germany: Deutsches Institut für Normung e. V., 1991.
- [52] *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.

- [53] F. M. Bartlett and J. G. MacGregor, "Equivalent Specified Concrete Strength from Core Test Data," *Concr. Int.*, vol. 17, no. 3, pp. 52–58, 1995.
- [54] *SFS-EN 1990 + A1 + AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- [55] *DIN 1045-3. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 3: Bauausführung, Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*. Berlin, Germany: Deutsches Institut für Normung e. V., 2012.
- [56] *ASTM E122-09. Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process*. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2011.
- [57] *ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*, vol. 11. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2014.
- [58] *ASTM E178-16a. Standard Practise for Dealing with Outlying Observations*, vol. 11. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2016.
- [59] *ACI 228.1R-03. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*. USA: American Concrete Institute, 2003.
- [60] S. A. Mirza, M. Hatzinikolas, and J. G. MacGregor, "Statistical Descriptions of Strength of Concrete," *J. Struct. Div.*, vol. 105, no. 6, pp. 1021–1037, 1979.
- [61] *BY 50. Betoninormit 2012*. Lahti: Suomen Betoniyhdistys.
- [62] J. Schneider, *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. Zürich, Switzerland: IABSE, 1997.
- [63] *SFS-EN 1992-1-1 NA. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Helsinki: Suomen Ympäristöministeriö, 2009.

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-555-6
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

