

**Insinöörیتieteiden kandidaattiohjelma**

# Toleranssien hallinta rakentamisessa

05.12.2025

---

**Aarne Vuolanto**

Copyright ©2025 Aarne Vuolanto

---

**Tekijä** Aarne Vuolanto

---

**Työn nimi** Toleranssien hallinta rakentamisessa

---

**Koulutusohjelma** Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

---

**Pääaine** Rakennustekniikka

---

**Valvoja** Camilla Vornanen-Winqvist

---

**Työn ohjaaja(t)** Antti Peltokorpi

---

**Päivämäärä** 05.12.2025

**Sivumäärä** 24

**Kieli** Suomi

---

### **Tiivistelmä**

Rakentamisen toleranssit määrittävät, kuinka suuria poikkeamia rakennusosien mitoissa ja sijainneissa sallitaan suhteessa suunnitelmiin. Toleranssit vaikuttavat suoraan rakentamisen laatuun, kustannustehokkuuteen ja turvallisuuteen. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, minkä rakennusosien ja tuotteiden toleransseja on tutkittu, mitä haasteita toleranssien saavuttamiseen liittyy sekä millaisia ratkaisuja niiden hallintaan on esitetty. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, ja aineistona on käytetty rakennusalan standardeja, ohjeistuksia sekä kotimaisia, että kansainvälisiä tutkimuksia.

Tutkimusten mukaan toleranssiongelmat ilmenevät erityisesti esivalmistetuissa betoni- ja talotekniikkaelementeissä, joissa eri materiaalien tarkkuusvaatimukset poikkeavat toisistaan ja kohtaavat rajapinnoissa. Pienet mittapoikkeamat voivat kasautua eri työvaiheissa ja aiheuttaa virheitä liitospinnoissa, vinoutta ja yhteensovitusongelmia, jotka johtavat lisätöihin, viivästyksiin ja kustannusten nousuun. Toleranssien hallintaa vaikeuttavat suunnittelu-alojen välinen koordinaation puute, mittausmenetelmien vaihtelevuus ja aikapaineinen työympäristö.

Ratkaisuksi on esitetty tietomallintamisen (BIM) ja mallipohjaisen tuotemäärittelyn (MBD) hyödyntämistä, jotka mahdollistavat mittapoikkeamien hallinnan jo suunnitteluvaiheessa. Lisäksi reaaliaikainen mittausdata, laserkeilaus ja yhteiset standardit tukevat laadunvarmistusta ja vähentävät virheitä. Toleranssien hallinnan kehittäminen edellyttää kuitenkin teknologian, standardien ja organisaatiokulttuurin samanaikaista uudistamista, jotta virheet voidaan ennakoida ja varmistaa yhtenäinen rakentamisen laatu.

---

**Avainsanat** Rakentamisen toleranssit, mittatarkkuus, BIM, MBD, esimvalmistus, rakentamisen laadunhallinta

---

# Sisällysluettelo

1	Johdanto .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	1
1.3	Tutkimusmenetelmät .....	2
2	Toleranssin käsite rakentamisessa .....	3
2.1	Mitä toleranssit tarkoittavat.....	3
2.2	Rakentamisen laadun ja turvallisuuden merkitys.....	4
2.3	Toleranssiluokat ja standardit.....	5
2.3.1	Toleranssiluokat betonille.....	5
2.3.2	Toleranssiluokat puulle.....	6
2.3.3	Toleranssiluokat teräkselle .....	6
3	Toleranssien hallinta työmaalla .....	7
3.1	Mittaus- ja tarkastusmenetelmät.....	7
3.2	Laadunvalvonta ja dokumentointi .....	8
4	Toleranssiongelmat .....	10
4.1	Toleranssiongelmien tyypillinen ilmeneminen .....	10
4.2	Tyypillisimmät ongelmat .....	10
5	Toleranssiongelmien vaikutukset.....	12
5.1	Kustannukset, aikataulu ja materiaalihukka.....	12
5.2	Laatu, turvallisuus ja asiakastyytyväisyys.....	13
6	Toleranssihaasteiden ratkaisuehdotukset .....	15
6.1	Tietomallintaminen (BIM) ja mallipohjainen tuotemäärittely (MBD) .....	15
6.2	Tulevaisuuden ratkaisut.....	16
6.3	Lean ajattelu toleranssien hallinnassa .....	18
7	Pohdinta ja yhteenveto .....	20
7.1	Keskeiset tulokset.....	20
7.2	Ratkaisuehdotukset ja suositukset .....	20
7.3	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen .....	21
7.4	Jatkotutkimusaiheet .....	22
8	Lähteet.....	23

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Rakentamisessa mittatarkkuus ja osien yhteensopivuus ovat keskeisiä tekijöitä rakennuksen laadun ja käytettävyyden sekä rakentamisen kustannustehokkuuden kannalta. Rakennusosien mittoihin liittyy väistämättä poikkeamia, joita syntyy valmistuksessa, kuljetuksessa, asennuksessa ja käytön aikana. Näiden sallittujen poikkeamien määrittelyä kutsutaan toleransseiksi, ja ne on kuvattu muun muassa RT-kortissa Rakennusalan toleranssit, toleranssien määritelmät ja suositeltavat lukuarvot (RT 02-10996, 2010).

Tässä työssä toleranssiongelmana tarkoitetaan sekä tilanteita, joissa rakennusosa ylittää sille sallitun toleranssin, että tilanteita, joissa eri materiaalien tai järjestelmien toleranssivaatimukset eivät ole keskenään yhteensopivia. Jälkimmäisessä tapauksessa yksittäiset rakennusosat voivat täyttää omat toleranssivaatimuksensa, mutta niiden yhteensovittaminen aiheuttaa silti ongelmia. Tällaiset poikkeamat voivat heikentää rakennuksen toiminnallisuutta, kuten vesitiivyyttä, turvallisuutta ja rakenteellista vakautta. Lisäksi ne voivat vaikuttaa esteettisyyteen ja energiatehokkuuteen sekä synnyttää merkittäviä käytännön ongelmia työmaalla. Koska toleranssipoikkeamat näkyvät usein aikataulujen viivästymisenä, materiaalien hukkaantumisenä ja kustannusten kasvuna, niiden hallinta on keskeinen osa onnistunutta rakentamista.

Haasteet korostuvat erityisesti rakennushankkeissa, joissa hyödynnetään esivalmisteisia elementtejä ja talotekniikan osia. Esivalmistus tehostaa työtä ja parantaa laatua, mutta se vaatii tarkkaa suunnittelua ja toteutusta. Esimerkiksi Talotekniikan esivalmistussuunnittelun loppuraportissa (2020) todetaan, että millintarkkojen talotekniikkaelementtien yhteensovittaminen runkorakenteiden kanssa voi olla haastavaa, sillä betonirakenteiden sallitut toleranssit voivat olla kymmeniä millimetrejä. Spirin (2024) kertoo, että tällaiset toleranssiongelmat voivat aiheuttaa merkittäviä viivästyksiä ja lisäkustannuksia, vaikka yksittäiset rakennusosat täyttäisivätkin omat toleranssivaatimuksensa. Tämä tarkoittaa, että yhteensovitusongelma voi syntyä myös silloin, kun runko on täysin toleranssien sisällä eli ongelma ei välttämättä johdu yksittäisen rakenteen virheestä, vaan eri materiaalien ja järjestelmien erisuuruisten toleranssivaatimusten kohtaamisesta.

Toleranssien hallinnalla on merkitystä sekä rakentamisen laadun että hankkeen kokonaisvaltaisen onnistumisen kannalta. Kansainväliset tutkimukset osoittavat, että toleranssiongelmat ovat toistuvasti yksi merkittävimmistä rakennusalan virheiden lähteistä (Talebi, 2019; Forcada ym., 2016). Ne voivat vaikuttaa käyttäjäkokemukseen ja asiakastyytyvyyteen sekä synnyttää erimielisyyksiä eri osapuolten välillä.

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän työn tavoitteena on selvittää, minkä tuotteiden ja rakennusosien toleransseja on tutkittu talonrakentamisessa, mitä haasteita toleranssien saavuttamiseen ja niiden seurauksiin

liittyy sekä millaisia ratkaisuja näihin haasteisiin on esitetty. Työ rajautuu talonrakentamiseen ja tarkastelee toleranssien hallintaa rakennusosien valmistuksen, asennuksen ja käytön näkökulmasta.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Minkä tuotteiden ja rakennusosien toleransseja on rakentamisessa tutkittu?
2. Mitä haasteita on tunnistettu rakentamisen toleranssien saavuttamisessa ja niiden seurauksissa?
3. Miten näitä tunnistettuja haasteita voidaan ratkaista?

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, jossa analysoitiin aiempia tutkimuksia ja ohjeistuksia rakentamisen toleransseista. Aineistona käytettiin erityisesti alan ohjekortteja (RT- ja RATU-julkaisut), standardeja (SFS-ISO 3443 -sarja) sekä ajankohtaisia tutkimuksia ja raportteja. Tutkimustietoa kerättiin laajasti muun muassa tieteellisistä artikkeleista, opinnäytetöistä ja standardeista. Tutkimuksen aineistoa haettiin useilta hakualustoilta, kuten Google Scholarista, Scopuksesta ja Aalto-Primosta. Lisäksi tarkasteltiin aikaisempia opinnäytetöitä Aaltodoc-tietokannasta. Hakusanoina käytettiin muun muassa *construction tolerances, tolerance management, dimensional accuracy, measurement methods, construction quality ja building tolerances*. Suomenkielisissä hauissa käytettiin hakusanoja rakentamisen *toleranssit ja mittatarkkuus*. Työn teoreettisena viitekehyksenä toimivat rakennustekniikan ja rakennustuotannon näkökulmat, erityisesti mittatarkkuus ja laadunhallinta.

Tutkimuksen toisessa luvussa käsitellään rakentamisen toleranssien keskeisiä käsitteitä, standardeja ja laadunäkökulmia. Kolmannessa luvussa tarkastellaan työmaan käytäntöjä, kuten mittausten menetelmiä ja laadunvalvontaa. Neljäs ja viides luku keskittyvät toleranssiongelmiin ja niiden vaikutuksiin kustannuksiin, aikatauluun ja laatuun. Kuudennessa luvussa esitetään ratkaisuja ja kehitysehdotuksia, kuten tietomallintamisen (BIM) hyödyntäminen toleranssien hallinnassa. Viimeinen luku kokoaa tutkimuksen keskeiset havainnot ja johtopäätökset.

## 2 Toleranssin käsite rakentamisessa

Toleranssit ovat olennainen osa rakentamista, sillä niiden avulla varmistetaan, että eri rakenteet ja osat sopivat yhteen ja täyttävät laatuvaatimukset. Ne määrittävät, kuinka suuria poikkeamia rakennusosien mitoissa ja sijainneissa sallitaan suhteessa suunnitelmiin. Toleranssit mahdollistavat käytännön rakentamisen joustavuuden, mutta niiden hallinta edellyttää tarkkaa suunnittelua ja eri osapuolten välistä yhteistyötä. Rakentamisessa toleranssit vaikuttavat suoraan rakenteiden mittatarkkuuteen, turvallisuuteen, laatuun ja taloudellisuuteen.

Tässä luvussa tarkastellaan, mitä toleranssit tarkoittavat käytännössä, miksi ne ovat rakentamisessa välttämättömiä ja miten ne määritellään eri materiaalien ja rakenteiden osalta. Lisäksi luvussa käsitellään, miten toleranssien hallinta liittyy rakentamisen laatuun ja turvallisuuteen sekä miten standardit ohjaavat niiden määrittämistä.

### 2.1 Mitä toleranssit tarkoittavat

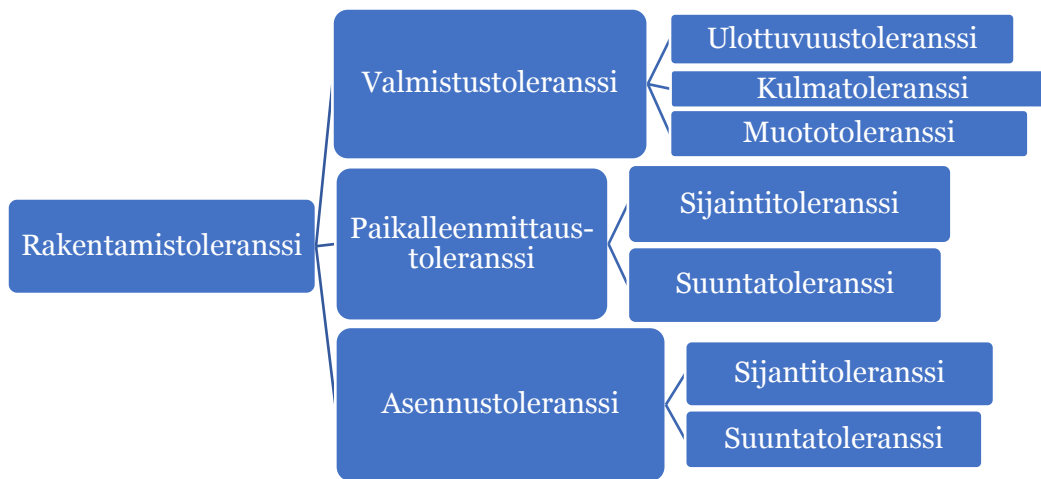
Rakentamisessa toleransseilla tarkoitetaan sallittuja poikkeamia mitasta tai sijainnista verrattuna siihen, mitä suunnitelmissa on esitetty. Niitä käytetään ilmaisemaan, kuinka tarkasti rakennus pitää tehdä, ja siksi ne pitää aina kirjata hankkeen suunnitelmiin ja sopimusasiakirjoihin. RT 02-10996 -ohjeen mukaan toleranssit antavat yleisiä suosituksia ja esimerkkilukuja eri tilanteisiin, mutta käytännössä projektin vaatimukset ratkaisevat, millaisia toleransseja lopulta käytetään (RT 02-10996, 2010, s. 1–2, 7).

Rakentamistoleranssi koostuu valmistuksen, paikalleenmittauksen ja asennuksen toleransseista, jotka edelleen jakautuvat alaluokkiin, kuten ulottuvuus-, kulma-, muoto-, sijainti- ja suuntatoleransseihin (kuva 1). Valmistustoleranssi kuvaa rakennustuotteen tai esivalmistetun elementin valmistuksessa sallittuja mittavaihteluita, kuten esimerkiksi betonielementin suurimpia sallittuja poikkeamia mitassa. Paikalleenmittaustoleranssi puolestaan tarkoittaa rakennuspaikalla mitatun pisteen tai viivan sijainnin sallittua poikkeamaa suhteessa suunniteltuun paikkaan. Asennustoleranssilla tarkoitetaan rakennustarvikkeen tai elementin asennuksen aikana sallittua poikkeamaa, esimerkiksi sitä, kuinka paljon asennetun betonielementin sijainti voi vaihdella suhteessa suunniteltuun asennuspaikkaan. (RT 02-10996, 2010, s. 2–3.)

Jaottelu auttaa hahmottamaan, että rakentamistoleranssi ei ole yksi arvo, vaan useiden eri vaiheiden yhteisvaikutus, jossa jokaisella osa-alueella on oma merkityksensä lopputuloksen tarkkuuden kannalta. Rakentamistoleranssi ilmoitetaan yleensä  $\pm$ -merkinnällä; esimerkiksi  $1200 \pm 3$  mm tarkoittaa, että mitan tulee olla 1197–1203 mm välillä. Kaikkia yksittäisten vaiheiden poikkeamia ei voi kuitenkaan vain summata yhteen, koska ne eivät aina kohdistu samaan suuntaan, jolloin lopullinen poikkeama voi olla pienempi kuin pelkkä lukujen yhteenlasku (RT 02-10996, 2010, s. 2–3).

Toleranssien hallinta on tutkimusten mukaan usein hajanaista, ja ongelmia ratkaistaan vasta silloin, kun ne ilmenevät käytännössä. Talebi ym. (2016) tuovat esiin, että rakentamisessa ei

ole vakiintunutta, yhtenäistä tapaa hallita toleransseja, vaan käytännöt jäävät helposti satunnaisiksi ja tapauskohtaisiksi. Talebi ym. (2020a) korostavat, että toleranssit eivät ole vain yksittäisiä mittalukuja, vaan ne toimivat työkaluna koko rakentamisprosessin hallinnassa. Niiden avulla voidaan hallita eroja suunnitelmien ja toteutuksen välillä sekä varmistaa, että lopputulos on laadukas ja toimii niin kuin on tarkoitus. Toleranssit eivät siis ole pelkkää teknistä tarkkuutta kuvaavia numeroita, vaan osa laajempaa laadunvarmistuksen kokonaisuutta. Näiden tutkimusten perusteella voidaan todeta, että rakentamisessa tarvitaan selkeämpi ja yhtenäisempi tapa hallita toleransseja, jotta lopputulos on laadukas, turvallinen ja tehokas.



Kuva 1. Rakentamistoleranssin muodostuminen valmistus-, paikalleenmittaus- ja asennustoleransseista (mukaillen RT 02-10996).

## 2.2 Rakentamisen laadun ja turvallisuuden merkitys

Rakentamisessa laatu ja turvallisuus kulkevat käsi kädessä. Laadulla tarkoitetaan sitä, että rakenteet toteutetaan suunnitelmien ja vaatimusten mukaisesti, mutta se liittyy myös siihen, että työ voidaan tehdä turvallisesti. Jos toleransseissa esiintyy suuria poikkeamia, ne voivat heikentää sekä rakennuksen toimivuutta että työturvallisuutta. Terwel (2014) toteaa tutkimuksessaan, että 85–90 % rakennusongelmista ei johdu materiaaleista tai tekniikasta, vaan siitä, miten suunnittelu ja toteutus on organisoitu.

Rakennushankkeessa on tärkeää, että toleranssit suunnitellaan ja sovitaan selkeästi jo etukäteen, jotta kaikki työmaan osapuolet tietävät, mitä tavoitellaan. Tämä vähentää virheitä ja

parantaa sekä lopputuloksen laatua että turvallisuutta. Huolellinen ja suunnitelmallinen toleranssien hallinta onkin keskeinen osa rakentamisen laadunvarmistusta (Talebi ym., 2020a).

## 2.3 Toleranssiluokat ja standardit

Rakentamisessa toleranssit määritellään standardien ja ohjeiden avulla. Näiden avulla varmistetaan, että rakenteet ja järjestelmät ovat yhteensopivia ja täyttävät laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Suomessa käytetään sekä kansainvälisiä eurooppalaisia standardeja, kuten Eurokoodeja, että Suomen Standardisoimisliiton (SFS) julkaisemia kansallisia standardeja ja soveltamisohjeita sekä Rakennustietosäätiön RT-kortteja. On kuitenkin hyvä huomata, että vaikka valmiita toleranssiluokkia on olemassa, lopulliset toleranssit määritellään yleensä hankekohtaisesti suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden yhteistyössä.

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan erikseen betonin, puun ja teräksen toleranssiluokat ja niihin liittyvät standardit.

### 2.3.1 Toleranssiluokat betonille

Betonirakenteiden toteutuksessa käytetään standardien määrittelemiä toleranssiluokkia, joilla varmistetaan rakenteiden turvallisuus ja yhteensopivuus. Keskeiset ohjeet löytyvät eurooppalaisesta standardista SFS-EN 13670 Betonirakenteiden toteutus ja sen suomalaisesta soveltamisohjeesta SFS 5975 (SFS-EN 13670; SFS 5975).

Rakenteellisille toleransseille on kaksi luokkaa, jotka ovat toleranssiluokka 1 ja toleranssiluokka 2. Näistä luokka 2 on vaativampi. Suomessa paikallavalettujen rakenteiden yhteydessä käytetään nimityksiä N (normaali) ja E (erikoisluokka), jotka vastaavat luokkia 1 ja 2. Näiden luokkien vaatimukset vastaavat Euroopan standardien ja Suomen kansallisen standardin varmuustasoa. Niistä voidaan poiketa lievempään suuntaan vain, jos tämä huomioidaan rakenteen mitoituksessa. Lisäksi Suomessa on annettu toleranssiluokalle 2 arvoja myös sellaisille rakenteille, joille eurooppalainen standardi ei anna tarkkoja vaatimuksia. (SFS 5975.)

Toleranssiluokan valinta kuuluu pääosin rakennesuunnittelijalle, ja vastuun keskittäminen yhdelle suunnittelualalle voi olla ongelmallista. Betonirakenteiden toleransseilla on usein merkittäviä vaikutuksia myös muihin järjestelmiin, kuten talotekniikkaan, arkkitehtuuriin ja asennustyöhön, jolloin pelkkä rakennesuunnittelijan näkökulma ei aina riitä. Toleranssien hallinta edellyttääkin eri suunnittelualojen välistä yhteistyötä ja yhteistä ymmärrystä rakennuksen kokonaisuudesta (SFS 5975). Käytännössä kuitenkin rakennesuunnittelija vastaa lopullisesti toleranssiluokan määrittämisestä. Luokka 1 eli normaali tarkkuus riittää useimmissa kohteissa, mutta luokkaa 2 eli erikoisluokkaa voidaan edellyttää esimerkiksi silloin, kun liitokset vaativat erityistä tarkkuutta, ulkonäöllä on merkitystä tai suunnittelussa käytetään pienennettyjä materiaaliolosuhteita Eurokoodin mukaisesti (Betonitieto.fi, n.d.).

### **2.3.2 Toleranssiluokat puulle**

Puurakenteiden mittapoikkeamat määritellään standardissa SFS 5978 kolmessa toleranssiluokassa. Luokka 3 koskee rakennusosia, joilta vaaditaan erityisen tarkkaa mittatarkkuutta ja korkeaa ulkonäkölaatua. Luokka 2 on yleisimmin käytetty, ja sitä sovelletaan esimerkiksi asuin-, liike- ja toimistorakennusten rakennusosiin. Luokka 1 puolestaan sallii suuremmat mittapoikkeamat, ja sitä käytetään esimerkiksi hallirakennusten osissa, joissa vaatimukset mittatarkkuudelle ja ulkonäölle eivät ole yhtä tiukat. Toteutusasiakirjoissa voidaan lisäksi edellyttää tiukempia tai väljempää toleransseja, jos se huomioidaan rakenteiden mitoituksessa. (SFS 5978).

### **2.3.3 Toleranssiluokat teräkselle**

Teräsrakenteiden toteutuksessa toleranssit määritellään standardissa SFS-EN 1090-2. Toleranssit jaetaan olennaisiin ja toiminnallisiin. Olennaiset toleranssit liittyvät rakenteen kestävyteen ja stabiilisuuteen, ja niille on annettu tarkat rajat esimerkiksi valssatuille, hitsatuille ja kylmämuovatuille profiileille. Toiminnalliset toleranssit taas koskevat rakenteen yhteensopivuutta, liitoksia ja ulkonäköä. Niitä varten voidaan käyttää kahta luokkaa, joista luokka 1 on perusvaatimustaso ja luokka 2 tarkoittaa tiukempia vaatimuksia, joita voidaan edellyttää esimerkiksi julkisivurakenteissa (SFS-EN 1090-2:2018 + A1:2024).

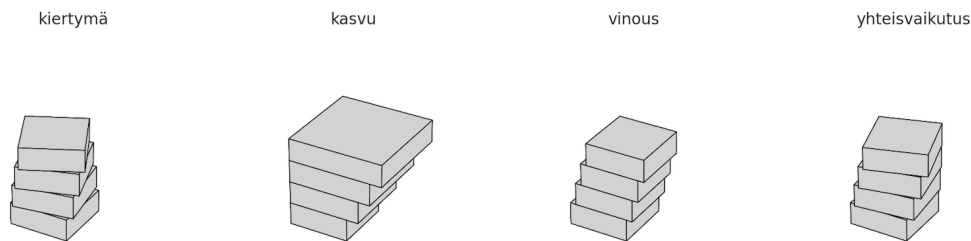
Rakennusmateriaalien toleranssivaatimukset vaihtelevat materiaalin ominaisuuksien ja valmistusmenetelmien mukaan. Teräsrakenteet edellyttävät tarkinta toteutusta, sillä pienetkin mittapoikkeamat voivat heikentää liitosten toimivuutta ja rakenteen stabiilisuutta. SFS-EN 1090-2 -standardin mukaiset sallitut poikkeamat ovat usein vain muutamia millimetrejä. Puurakenteissa tarkkuusvaatimukset ovat jonkin verran väljempää, mutta SFS 5978:n tarkimmassa luokassa mittapoikkeamat pysyvät tyypillisesti 3–5 millimetrin tasolla. Betonirakenteissa toleranssit ovat selvästi väljimmät SFS 5975:n mukaisessa normaaliluokassa poikkeamat voivat olla useita senttimetrejä (SFS-EN 1090-2:2018 + A1:2024; SFS 5978; SFS 5975).

### 3 Toleranssien hallinta työmaalla

Tässä luvussa käsitellään työmaan toleranssien hallintaa käytännön näkökulmasta. Luvussa esitellään keskeiset mittaus- ja tarkastusmenetelmät, joita käytetään rakennustoleranssien varmistamisessa, sekä tarkastellaan laadunvalvonnan ja dokumentoinnin merkitystä osana rakennusprosessia. Lisäksi tuodaan esiin, miten digitalisaatio ja uudet mittausteknologiat, kuten laserkeilaus ja fotogrammetria, ovat muuttaneet perinteisiä toimintatapoja ja mahdollistaneet entistä tarkemman laadunvarmistuksen työmaalla.

#### 3.1 Mittaus- ja tarkastusmenetelmät

Toleranssien hallinta työmaalla edellyttää selkeitä mittaus- ja tarkastusmenetelmiä, joilla voidaan varmistaa, että valmistuksen, paikalleenmittauksen ja asennuksen aikana syntyvät poikkeamat pysyvät sallituissa rajoissa. Rakennusosien mittapoikkeamat voivat käytännössä ilmetä esimerkiksi kiertymänä, kasvuna, vinoutena tai näiden yhteisvaikutuksena (Kuva 2). RT-kortin mukaan mittaus- ja tarkastusmenetelmät ovat välttämättömiä, jotta voidaan todentaa rakenteiden vastaavan suunnitelma- ja sopimusasiakirjoissa määritellyjä toleranssivaatimuksia (RT 02-10996, 2010). Lisäksi Talebi ym. (2020a) korostavat, että toleranssien hallinta tulisi ymmärtää osana koko rakentamisprosessia, ei vain yksittäisinä mittapoikkeamien tarkistuksina. Talebi ym. (2016) huomauttavat myös, että käytännön hallinta jää usein hajanaiseksi ja tapauskohtaiseksi, mikä heikentää sen vaikuttavuutta.



Kuva 2. Rakennusosien mittapoikkeamia: kiertymä, kasvu, vinous ja yhteisvaikutus (muokailtu Ekman 2010, s. 20)

Rakenteiden mittatarkkuuden varmistaminen edellyttää, että rakenteiden mittoja ja sijainteja voidaan mitata luotettavasti ja verrata suunnitelmiin. Käytännössä mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat kohteen koko, rakenteiden monimutkaisuus ja tarvittava tarkkuustaso. Perinteisiä menetelmiä, kuten mittanauhalla tai yksinkertaisilla laseretäisyysmittareilla tehtäviä mittauksia, käytetään edelleen yksittäisten mittojen tarkistamiseen. Ne eivät kuitenkaan ole riittävän tarkkoja tai tehokkaita suurissa ja monimutkaisissa kohteissa (Talebi ym., 2020a).

Viime vuosina on otettu käyttöön kehittyneempiä menetelmiä, kuten laserkeilaus ja fotogrammetria. Laserkeilaus tuottaa erittäin tarkkaa kolmiulotteista mittausdataa, jota voidaan hyödyntää suoraan suunnittelun ja laadunvarmistuksen tukena (kuva 3). Fotogrammetria puolestaan hyödyntää digitaalisia valokuvia, joista muodostetaan kolmiulotteisia pistepilviä ja malleja. Näiden menetelmien etuna on nopeus, tarkkuus ja kyky tallentaa suuri määrä mittapisteitä lyhyessä ajassa (Mihic ym., 2023).

Mittausdatan pohjalta voidaan muodostaa toteumamalli, jolla tarkoitetaan rakennuksen mallia sellaisena kuin se todellisuudessa on valmistunut. Toteumamalli eroaa suunnitelmamallista siten, että se ei kuvaa tavoitetilaa, vaan työmaalla syntyneet todelliset mitat, poikkeamat ja rakenteiden sijainnit. Toteumamalli toimii työkaluna toleranssipoikkeamien havaitsemisessa, laadunvarmistuksessa sekä myöhemmässä ylläpidossa ja korjausrakentamisessa (Talebi ym., 2020a).

Tutkimuksissa on todettu, että uusien mittaustekniikoiden käyttö rakennusalalla lisääntyy, mutta niiden laajempaa käyttöönottoa hidastavat edelleen erityisesti kustannukset, datan käsittelyn ja mallintamisen osaamisvaatimukset sekä epäyhtenäiset käytännöt (Uotila ym., 2021). Kansainvälisesti on raportoitu samansuuntaisia haasteita, kuten teknologian hyödyntämistä rajoittavat osaamisvajaus ja projektikohtainen epävarmuus (Mihic ym., 2023). Tämä osoittaa, että vaikka tekniikkaa on tarjolla ja se tarjoaa merkittäviä hyötyjä, sen vakiintuminen kestää konservatiivisella rakennusalalla.



Kuva 3. Laserkeilausmittaus. Lähde: Szulwic & Ziolkowski (2016).

### 3.2 Laadunvalvonta ja dokumentointi

Rakentamisen laadunvalvonta perustuu siihen, että suunnitellut ja toteutuneet rakenteet vastaavat toisiaan sekä mittatarkkuuden että teknisen suorituskyvyn osalta. Talebi ym. (2020a) korostavat, että mitta- ja geometriset poikkeamat ovat yksi yleisimmistä rakentamisen virhelähteistä, ja että toleranssien hallinta on keskeinen osa laadunvarmistusta. Heidän

mukaansa järjestelmällinen mittaus- ja dokumentointiprosessi mahdollistaa poikkeamien tunnistamisen, analysoinnin ja virheiden syiden jäljittämisen, mikä parantaa sekä rakenteiden laatua että turvallisuutta. Talebi ym. (2020a) myös painottavat, että tehokas laadunvalvonta edellyttää selkeää tiedonvaihtoa ja dokumentointia eri osapuolten välillä koko suunnittelu- ja toteutusprosessin ajan.

Digitalisaatio on muuttanut laadunvalvontaa merkittävästi. Uotila ym. (2021) osoittavat, että laserkeilaus tarjoaa erittäin tarkan menetelmän rakennusten todellisten mittojen mittaamiseen ja poikkeamien havaitsemiseen. Heidän mukaansa perinteiset mittausmenetelmät, kuten mittanauhat ja yksinkertaiset laseretäisyysmittarit, soveltuvat yksittäisiin tarkistuksiin, mutta eivät ole riittävän tehokkaita tai tarkkoja suurissa ja monimutkaisissa kohteissa. Laserkeilaus ja fotogrammetria tuottavat miljoonia mittapisteitä, joiden avulla voidaan muodostaa tarkka 3D-malli, joka voidaan integroida tietomalliin (BIM) laadunvalvonnan tueksi. Tämä mahdollistaa suunnitelmien ja toteutuneiden rakenteiden automaattisen vertailun ja tukee laadunvarmistuksen digitalisointia.

Mihić ym. (2023) vahvistavat, että 3D-skannausmenetelmät, kuten laserkeilaus ja fotogrammetria, tarjoavat perinteisiä laadunvalvontamenetelmiä tarkemman ja tehokkaamman tavan valvoa työn etenemistä ja rakennusten laatua. Heidän tutkimuksensa mukaan laserkeilauksen avulla voidaan havaita poikkeamat millimetrin tarkkuudella ja tuottaa korkearesoluutioisia pistepilviä, joita hyödynnetään muun muassa toteumadokumentaatiossa, laadunvalvon-  
nassa ja ylläpidossa. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että laajamittainen käyttöönotto edellyttää vielä teknologian ja osaamisen kehittämistä, sillä datan käsittely ja tulkinta ovat edelleen monimutkaisia ja aikaa vieviä prosesseja.

## 4 Toleranssiongelmat

Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin toleranssiongelmia siten kuin ne on tässä työssä määriteltä, eli sekä sallittujen raja-arvojen ylityksiä että eri materiaalien ja järjestelmien yhteensovitushaasteita. Näiden ongelmien taustalla voi olla poikkeamia valmistuksessa, mittauksessa tai asennuksessa, ja ne heijastuvat suoraan työn etenemiseen, laatuun ja kustannuksiin (Forcada ym., 2016).

Toleranssien hallinnan haasteet johtuvat usein mittapoikkeamien kasautumisesta, virheistä mittalinjoissa, suunnitelmien epätarkkuuksista sekä aikataulupaineista, jotka heikentävät laadunvarmistusta. Pieniltäkin vaikuttavat poikkeamat voivat kasaantua ja johtaa asennusongelmiin, viivästyksiin ja lisäkustannuksiin. Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan tarkemmin, miten nämä ongelmat ilmenevät käytännön työmailla.

### 4.1 Toleranssiongelmiä tyypillinen ilmeneminen

Toleranssiongelmat ilmenevät erityisesti rakenteissa ja työvaiheissa, joissa useita eri rakennusosia liitetään toisiinsa. Suurin osa mitatuista poikkeamista ja yhteensovitusongelmista havaitaan esivalmistetuissa betonielementtirakenteissa, kuten ontelolaatoissa, pilareissa, palkkirakenteissa ja sandwich-seinissä (Spirin, 2024; Talebi ym., 2020b). Samankaltaisia haasteita esiintyy myös julkisivuelementeissä, väliseinissä ja taloteknisissä järjestelmissä, joissa erilaisten materiaalien ja valmistustoleranssien yhdistäminen vaikeuttaa osien yhteensovittamista (Forcada ym., 2016; Long ym., 2023).

Näissä rajapinnoissa ilmenevät virheet voivat näkyä sekä rakenteellisina että visuaalisina ongelmina. Tyypillisiä seurauksia ovat liitospintojen epätasaisuudet, elementtien vinous ja vuotokohdat, jotka heikentävät valmiin rakenteen laatua ja toimivuutta (Rausch ym., 2020). Vaikka yksittäiset rakenneosat täyttäisivät omat toleranssivaatimuksensa, kokonaisuus ei välttämättä toimi suunnitellusti, jos suunnittelun ja mittatietojen lähtökohdat poikkeavat toisistaan (Talebi ym., 2021).

### 4.2 Tyypillisimmät ongelmat

Toleranssiongelmiä taustalla ovat yleensä useat samaan aikaan vaikuttavat suunnittelun, tuotannon ja työmaan prosesseihin liittyvät tekijät. Tutkimuksissa on korostettu erityisesti valmistus- ja asennustarkkuuksien eroja sekä mittapoikkeamien kumuloitumista projektin eri vaiheissa (Spirin, 2024; Talebi ym., 2021). Pienetkin valmistustoleranssien erot voivat kasaantua ja johtaa merkittäviin sovitusongelmiin asennusvaiheessa.

Keskeinen haaste syntyy eri rakennusosien suunnittelualojen välisestä koordinaation puutteesta. Arkkitehdit, rakennesuunnittelijat ja talotekniikkasuunnittelijat saattavat käyttää

omia toleranssikäytäntöjään ilman yhtenäistä ohjausta, mikä johtaa ristiriitaisiin mitoituksiin ja virheellisiin sijainteihin työmaalla (Talebi ym., 2016; RT 02-10996, 2010).

Myös työmaan olosuhteet ja mittausmenetelmien rajoitteet lisäävät poikkeamien riskiä. Manuaaliset mittausvälineet, kuten mittanauhut ja lasermittarit, ovat alttiita inhimillisille virheille sekä vaihtelulle esimerkiksi valaistuksen tai lämpötilan vuoksi. Kiire, aliurakoitsijoiden päällekkäiset aikataulut ja puutteellinen laadunvarmistus voivat johtaa siihen, että poikkeamat hyväksytään ilman tarkempaa arviointia (Talebi ym., 2020a; Forcada ym., 2016).

Eri materiaalien ja järjestelmien vaihtelevat tarkkuusvaatimukset lisäävät toleranssiongelmien riskiä erityisesti silloin, kun millintarkkoja esivalmisteisia osia liitetään paikan päällä toteutettuihin rakenteisiin. Paikallavalettujen betonirakenteiden sallitut poikkeamat voivat olla useita senttimetrejä, mikä voi johtaa merkittäviin sovitus- ja asennushaasteisiin, vaikka yksittäiset osat täyttäsivät omat toleranssiluokkansa (Long ym., 2023). Tällaiset erot kasvattavat lisätöiden tarvetta ja lisäävät aikataulu- ja kustannusriskien toteutumisen todennäköisyyttä (Rausch ym., 2020).

## 5 Toleranssiongelmien vaikutukset

Toleranssiongelmat vaikuttavat merkittävästi rakennushankkeiden kustannuksiin, aikatauluun, laatuun ja kokonaisarvoon. Pieniltäkin vaikuttavat poikkeamat voivat kasautua eri työvaiheissa, jolloin niiden korjaaminen vaatii lisäresursseja ja aiheuttaa aikataulun venymistä. Spirin (2024) mukaan suurin osa toleranssivirheiden kustannuksista syntyy lisätöistä, materiaalihukasta ja odotusajoista, jotka häiritsevät työmaan normaalia etenemistä. Lisäksi virheiden korjaaminen jälkikäteen vaikuttaa haitallisesti työn laatuun ja asiakkaan kokemukseen. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan tarkemmin, miten toleranssiongelmat heijastuvat kustannuksiin, aikatauluun, materiaalihokkuuteen, laatuun ja turvallisuuteen. Yleisimmät toleranssiongelmat, niiden vaikutukset ja hallintakeinot on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Yleisimmät toleranssiongelmat ja niiden vaikutukset (koonnut Arne Vuolanto; lähteitä mm. Talebi ym., 2016, 2020a; Rausch ym., 2019; RT 02-10996; Spirin 2024).

<b>Toleranssiongelma</b>	<b>Vaikutus rakentamiseen</b>	<b>Vaikutus kustannuksiin / aikatauluun</b>	<b>Vaikutus laatuun / asiakkaaseen</b>
Elementin käyryys tai vääntyminen	Sovitusongelmia liitoksissa, pintojen epäyhdenäisyys	Lisätöitä hionta- ja sovitustöissä, aikataulun viivästyksiä	Epätasainen julkisivu, heikompi esteettisyys, koettu laatu laskee
Liitospisteiden virheasento	Liitokset eivät sovi, asennus vaikeutuu	Uusintatöitä, aikataulun venyminen	Näkyviä rakoja, heikompi vesitiiveys, mahdollisia kosteusriskejä
Ontelolaatan taipuma tai epätasaisuus	Lattian epätasaisuus, ongelmia jatkorakenteissa	Tasoitustarve kasvaa, lisämateriaalia ja työaikaa	Epätasaiset lattiat, käyttömukavuus heikkenee, pintamateriaalien vaurioitumisriski
Elementin väärä sijainti asennuksessa	Rakenteet eivät kohdistu, LVIS-reiitit estyvät	Uusinta-asennuksia ja viivästyksiä	Seinät ja aukot eivät ole linjassa, näkyviä virheitä, kalusteasennusten haasteet
Toleranssien kasaantuminen	Pienet poikkeamat kasvavat kriittisiksi virheiksi	Kustannusten ja virheiden kasautuminen	Kokonaislaatu heikkenee, epäsymmetriaa, käyttöjärjestelmien toiminta voi kärsiä

### 5.1 Kustannukset, aikataulu ja materiaalihukka

Toleranssipoiikkeamien taloudelliset vaikutukset ovat merkittäviä, sillä virheiden korjaaminen lisää sekä suoria että epäsuoria kustannuksia. Spirinin (2024) tutkimuksessa tarkasteltiin esivalmistettujen betonielementtirakenteiden, erityisesti ontelolaattojen, sandwich-seinien ja sisäseinien, toleranssivirheitä ja havaitsi, että ne voivat heikentää työn tuottavuutta jopa 45 %. Korjaustyöt vaativat lisätyövoimaa, ylimääräisiä materiaaleja ja koneita, jotka nostavat kustannuksia ja häiritsevät muiden työvaiheiden etenemistä. Talebi ym. (2021) ja Forcada ym. (2016) ovat havainneet, että toleranssivirheet muodostavat huomattavan osan rakennusprojektien kokonaisvirheistä ja voivat aiheuttaa useiden prosenttien ylityksen projektin budjettiin.

Aikataulun kannalta toleranssivirheet näkyvät viivästyksinä ja työn keskeytyksinä. Spirinin (2024) mukaan pienetkin mittapoiikkeamat voivat johtaa siihen, että työvaihe joudutaan keskeyttämään, kunnes virhe on korjattu. Esimerkiksi elementtien uudelleenasetus tai seinien lisäleikkaus edellyttävät usein erikoistyökaluja tai tarkastusmittauksia, mikä aiheuttaa päivien viivästyksiä. Aikataulun venyminen puolestaan lisää resurssikustannuksia ja vaikuttaa negatiivisesti koko projektin tuottavuuteen.

Toleranssivirheiden korjaaminen johtaa myös huomattavaan materiaalihukkaan. Väärin asennetut elementit tai liian suuret mittapoiikkeamat edellyttävät usein purkamista, muokkauksia tai lisävaluja, jotka kuluttavat ylimääräistä materiaalia ja energiaa (Rausch ym., 2020; Long ym., 2023). Tämä lisää paitsi kustannuksia myös rakentamisen ympäristökuormaa ja hiilijalanjälkeä. Forcada ym. (2016) tuovat esiin, että toleranssivirheiden korjaaminen voi moninkertaistaa materiaalikulutuksen verrattuna alkuperäiseen suunniteltuun määrään. Yhteenvedon voidaan todeta, että toleranssiongelmiin ehkäisy ja varhainen havaitseminen ovat huomattavasti edullisempia kuin niiden korjaaminen työmaan toteutusvaiheessa.

## 5.2 Laatu, turvallisuus ja asiakastyytyväisyys

Toleranssivirheet eivät vaikuta ainoastaan kustannuksiin ja aikatauluun, vaan myös rakennuksen laatuun ja käyttökokemukseen. Spirin (2024) osoittaa, että toleranssiongelmat voivat heikentää rakennuksen rakenteellista ja visuaalista laatua. Liitospintojen epätasaisuudet, vinnot elementit ja poikkeavat varaukset voivat johtaa toiminnallisiin ongelmiin, kuten väärin asennettuihin talotekniikkakomponentteihin tai tiivistysongelmiin. Nämä virheet heikentävät rakennuksen käyttöikä, huonontavat käyttäjäkokemusta ja lisäävät huollon tarvetta.

Turvallisuuden näkökulmasta virheellisesti asennetut elementit voivat aiheuttaa kuormituksen epätasaisen jakautumisen, mikä lisää rakenteellisten vaurioiden riskiä. Talebi ym. (2021) ja RT 02-10996 (2010) painottavat, että erityisesti kantavien rakenteiden yhteensopimattomuudet voivat vaarantaa rakennuksen pitkäaikaisen kestävyuden ja turvallisuuden. Lisäksi työmaaturvallisuus heikkenee, kun virheitä joudutaan korjaamaan kiireessä.

Toleranssivirheillä on myös suora vaikutus asiakastyytyväisyyteen. Forcada ym. (2016) havaitsivat, että merkittävä osa rakennusprojektien luovutuksen jälkeisistä virheistä liittyy asennusten ja viimeistelyn mittapoiikkeamiin, jotka usein ilmenevät asiakkaiden tekemien reklamaatioiden yhteydessä. Tällaiset virheet heikentävät valmiin rakennuksen visuaalista

ja toiminnallista laatua sekä vaikuttavat negatiivisesti asiakkaan kokemukseen. Viivästykset, lisätyöt ja näkyvät poikkeamat puolestaan heikentävät tilaajan luottamusta ja rakennusyrityksen mainetta. Faroukin ym. (2023) mukaan digitaalinen tietomallintaminen (BIM) tarjoaa mahdollisuuden tunnistaa ja ehkäistä nämä ongelmat jo suunnitteluvaiheessa, mikä parantaa sekä lopputuotteen laatua että asiakastytyväisyyttä.

## 6 Toleranssihaasteiden ratkaisuehdotukset

Tässä luvussa käsitellään keskeisiä keinoja, joilla rakentamisen toleranssihaasteita voidaan hallita ja ehkäistä. Ratkaisuja tarkastellaan erityisesti tietomallintamisen (Building Information Modeling, BIM) näkökulmasta sekä tulevaisuuden kehityssuuntien kautta, joissa korostuvat digitalisaatio, automaatio ja standardien yhtenäistäminen.

Tutkimusten mukaan tietomallintamisen ja mallipohjaisen tuotemäärittelyn (Model-Based Definition, MBD) kehittäminen on olennaista, jotta toleranssien hallinta voidaan toteuttaa suunnittelusta tuotantoon yhtenäisenä prosessina (Talebi ym., 2020b; Farouk ym., 2023). MBD:ssä geometria, mitat ja toleranssit määritellään suoraan 3D-malliin ilman erillisiä piirustuksia, mikä mahdollistaa tiedon yhtenäisen siirtymisen suunnittelusta tuotantoon.

Tulevaisuuden kehitystyötä tukevat myös Lean-ajattelun periaatteet, joissa korostuvat jatkuva parantaminen ja hukkan poistaminen prosesseista. Lean-lähestymistapa tarjoaa keikon, jonka avulla toleranssien hallintaa voidaan tarkastella laajemmin osana koko rakennusprosessin laadunhallintaa ja yhteistyötä eri sidosryhmien välillä.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään ratkaisuja, jotka tukevat virheiden ennaltaehkäisyä, parantavat laadunhallintaa ja tehostavat suunnittelun ja toteutuksen välistä tiedonvaihtoa.

### 6.1 Tietomallintaminen (BIM) ja mallipohjainen tuotemäärittely (MBD)

Tietomallintaminen (BIM) on keskeinen väline rakennusprojektien toleranssien hallinnassa. Sen avulla eri suunnittelualojen mallit voidaan yhdistää yhdeksi koordinoituksi kokonaisuudeksi, jossa mittapoikkeamat, törmäykset ja rajapintojen epäyhteensopivuudet tunnistetaan jo ennen rakentamista. BIM mahdollistaa komponenttikohtaisen toleranssien määrittelyn ja sen, että suunnittelussa asetetut mittatarkkuudet ja asennusraja-arvot tallennetaan malliin ominaisuustietoina. Näin poikkeamat voidaan havaita aikaisessa vaiheessa ja niiden vaikutus kustannuksiin, aikatauluun ja laatuun on pienempi (Farouk ym., 2023; Talebi ym., 2020b).

BIM:n avulla voidaan myös luoda projektikohtainen toleranssipolitiikka, joka määrittää, mitä standardeja ja arvoja sovelletaan eri rakenteissa ja järjestelmissä, kuka vastaa poikkeamien hyväksynnästä sekä miten mittaustieto tallennetaan ja raportoidaan (Talebi ym., 2016). Tällainen yhtenäinen toleranssipolitiikka vähentää suunnittelualojen välistä epäselvyyttä ja tukee laadunhallintaa koko hankkeen elinkaaren ajan.

Mallipohjainen tuotemäärittely (MBD) vie tietomallintamisen askeleen pidemmälle. Siinä valmistuksessa tarvittavat mitat, toleranssit ja laatuvaatimukset siirretään suoraan tietomallista tuotantoon, esimerkiksi koneohjaukseen tai esivalmistuslinjoille. Tämä vähentää manuaalisia tulkintoja ja uudelleenkirjoituksia, jolloin virhemarginaali pienenee ja

suunnittelun, valmistuksen ja asennuksen mittatieto yhtenäistyy (Talebi ym., 2020c). Esi-valmistuksessa MBD tukee myös komponenttien jäljitettävyyttä, sillä malliin voidaan liittää valmistuksen, mittausten ja laadunvarmistusdokumenttien tiedot yhdeksi digitaaliseksi kokonaisuudeksi. Näin jokainen elementti voidaan jäljittää sen suunnittelusta aina asennukseen asti, mikä parantaa dokumentaation läpinäkyvyyttä ja vähentää virheiden toistumista.

Toleranssien hallintaa voidaan lisäksi tehostaa yhdistämällä mittaus- ja laadunvarmistusdata suoraan BIM-malliin. Esimerkiksi laserkeilaus ja 3D-skannaus mahdollistavat toteutuneiden rakenteiden vertaamisen suunniteltuun malliin, jolloin poikkeamat voidaan tunnistaa ja visualisoida automaattisesti (Puri & Turkan, 2017).

Tilastolliset menetelmät, kuten Monte Carlo -simulointi, auttavat arvioimaan poikkeamien kumuloitumista ja asettamaan realistisia raja-arvoja jo ennen tuotantoa (Rausch ym., 2019). Monte Carlo -simulointi tarkoittaa laskennallista menetelmää, jossa todennäköisyyksiä ja mittapoikkeamia mallinnetaan tuhansien satunnaisten toistojen avulla. Näin voidaan ennakoita, miten yksittäiset pienet poikkeamat eri työvaiheissa voivat yhdessä vaikuttaa lopputuloksen tarkkuuteen ja varmistaa, että suunnitellut toleranssit ovat realistisia tuotannon näkökulmasta.

Vaikka BIM-teknologia tarjoaa tehokkaita työkaluja, pelkkä tekninen ratkaisu ei yksin riitä. Toleranssien hallinta on yhä monissa projekteissa satunnaista eikä osa organisaation jatkuvaa laadunhallintaprosessia (Talebi ym., 2016). Siksi onnistunut toleranssien johtaminen edellyttää selkeää projektikohtaista strategiaa, joka määrittelee tarkastuspisteet, vastuut ja tiedonhallinnan periaatteet. Kun nämä yhdistetään mallipohjaiseen toimitusketjuun, toleranssipoikkeamien määrä ja korjauskustannukset vähenevät merkittävästi, ja rakenteiden asennettavuus paranee.

## 6.2 Tulevaisuuden ratkaisut

Rakentamisen toleranssien hallinta kehittyi nopeasti digitalisaation, automaation ja tekoälyn myötä. Tulevaisuudessa tavoitteena on siirtyä reaktiivisesta virheiden korjaamisesta ennakkoivaan laadunhallintaan, jossa mittapoikkeamat tunnistetaan ja korjataan jo ennen rakentamisen aloitusta (Talebi ym., 2020b; Rausch ym., 2019).

Yksi merkittävimmistä kehityssuunnista on reaaliaikainen toleranssiseuranta. Työmaille asennettavat sensorit, koneohjaukset ja laserkeilaus mahdollistavat jatkuvan mittaamisen, jossa tieto siirtyy automaattisesti tietomalliin. Näin poikkeamat havaitaan välittömästi, ja korjaustoimet voidaan suunnitella ennen kuin virheet ehtivät kumuloitua. Tämä muuttaa toleranssien hallinnan perinteisestä jälkikäteisestä toiminnasta jatkuvaksi ja ennakoivaksi prosessiksi (Puri & Turkan, 2017).

Toinen keskeinen kehityssuunta liittyy datan analytiikkaan ja mallipohjaiseen päätöksentekoon. Kun rakennusprojekteista kerätään suuria määriä mittaus-, toteuma- ja laatutietoa, niitä voidaan hyödyntää toistuvien virhemallien tunnistamiseen ja poikkeamien vaikutusten arviointiin tulevissa hankkeissa (Rausch ym., 2019; Talebi ym., 2020b). Näin analytiikka

tukee suunnitteluratkaisujen arviointia ja riskien ennakoitua erityisesti BIM-ympäristössä. Building 2030 -tutkimusohjelman mukaan tekoälyn hyödyntäminen tarjoaa mahdollisuuksia syventää tätä kehitystä edelleen, esimerkiksi optimoimalla rakennushankkeiden riskienhallintaa ja aikataulutusta, mutta sen soveltaminen on vielä varhaisessa vaiheessa (Peltokorpi ym., 2025).

Myös teollinen esivalmistus ja robotiikka muuttavat toleranssien hallintaa merkittävästi. Automaattiset tuotantolinjat ja koneohjatut asennusjärjestelmät vähentävät inhimillistä vaihtelua ja parantavat mittatarkkuutta (Talebi ym., 2020c). Digitaaliset laadunvarmistusjärjestelmät voivat tulevaisuudessa todentaa rakenteiden mitat ja toleranssit jo tehtaalla ennen toimitusta, jolloin virheet eivät siirry työmaalle.

Standardien ja tietomallipohjaisten ohjeiden yhtenäistäminen on kuitenkin välttämätöntä, jotta eri osapuolet voivat soveltaa samoja toleranssikäytäntöjä riippumatta ohjelmistoista tai tuotantomenetelmistä. Kansainväliset BIM-standardit, kuten ISO 19650 -sarja, tukevat tätä kehitystä korostamalla tiedon yhteentoimivuutta, vastuunjakoja ja digitaalista jäljitettävyyttä koko rakennuksen elinkaaren ajan (Talebi ym., 2016).

Tulevaisuuden toleranssien hallinta perustuu yhdistettyyn digitaaliseen ekosysteemiin, jossa tietomallit, mittausdata, automaatio ja tekoäly muodostavat kokonaisuuden. Tämä mahdollistaa rakennusprosessin, jossa virheet voidaan ennakoida, laatu varmistaa jo suunnitteluvaiheessa ja rakentamisen tuottavuus paranee merkittävästi.

Taulukossa 2 on esitetty keskeiset toleranssien hallinnan teknologiset ja menetelmälliset ratkaisut sekä niiden vaikutukset rakentamisen prosesseihin ja laadunvarmistukseen.

Taulukko 2. Toleranssien hallinnan kehityssuunnat ja niiden vaikutukset rakentamiseen (koonnut Aarne Vuolanto).

<b>Kehitysuunta</b>	<b>Kuvaus</b>	<b>Vaikutus rakentamiseen</b>	<b>Hyödyntämismahdollisuudet</b>
Tietomallipohjainen suunnittelu (BIM ja MBD)	Toleranssit, mitat ja säätövarat tallennetaan suoraan malliin, mikä mahdollistaa poikkeamien havaitsemisen jo ennen rakentamista	Vähentää yhteensovitusvirheitä ja parantaa suunnittelun tarkkuutta	Tietomallien lisäys mittaus- ja laadunvarmistusprosesseihin
Reaaliaikainen mittaus ja toteumadata	Rakentamisen aikana kerätty mittausdata yhdistetään automaattisesti tietomalliin	Nopeampi poikkeamien tunnistus ja korjaus, parempi läpinäkyvyys	Laserkeilaus, sensorit ja jatkuva mittausdatan päivitys

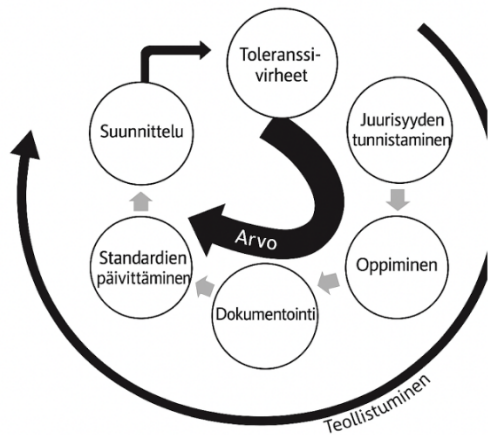
Datan analytiikka ja tekoäly	Analysoi useiden hankkeiden poikkeama- ja laadunvarmistusdataa virhemallien tunnistamiseksi	Tukee päätöksentekoa ja riskienhallintaa	Virhemallien ennakointi ja projektien vertailu
Standardointi ja yhteiset käytännöt	Kansallisten mittaus- ja dokumentointimenetelmien yhtenäistäminen	Parantaa tiedon vertailtavuutta ja laatuvarmistuksen selkeyttä	Ohjeistusten, toleranssiluokkien ja hyväksymisrajojen kehittäminen
Organisatiotason oppiminen ja jatkuva parantaminen	Kokemusten ja virheiden systemaattinen hyödyntäminen seuraavissa hankkeissa	Vähentää toistuvia virheitä ja parantaa laatua pitkällä aikavälillä	Poikkeamien juurisyyanalyysi ja käytäntöjen kehittäminen

### 6.3 Lean ajattelu toleranssien hallinnassa

Lean-ajattelu on tuotannon johtamisfilosofia, joka perustuu jatkuvaan parantamiseen ja hukkan poistamiseen. Sen keskeisenä tavoitteena on tuottaa mahdollisimman paljon arvoa asiakkaalle mahdollisimman vähällä resursseilla. Rakennusalalla Lean-ajattelun soveltaminen tarkoittaa virheiden ja hukkatyön vähentämistä, prosessien virtauksen tehostamista sekä yhteistyön ja oppimisen korostamista eri toimijoiden välillä (Ballard & Howell, 2003). Yksi Lean-johtamisen käytännöistä, jota voidaan pitää yleisenä ratkaisuna rakennusalan toleranssienhallintaan, on Lean-toleranssienhallintasykli (Spirin, 2024).

Tämä malli perustuu jatkuvaan parantamiseen ja kokemuksista oppimiseen, ja sen tarkoituksena on mahdollistaa parempi mittatoleranssien hallinta koko rakennusprosessin aikana. Mallin peruserätyksenä on tunnistaa virheiden juurisyyt, dokumentoida ne ja hyödyntää opitut asiat suunnittelun, tuotannon ja asennuksen kehittämisessä.

Kuva 5 havainnollistaa Lean-ajatteluun perustuvan toleranssienhallintasyklin, jossa jatkuvan parantamisen prosessi etenee suunnittelusta virheiden tunnistamiseen, oppimiseen ja standardien päivittämiseen. Tällainen lähestymistapa tukee rakennusalan pitkäjänteistä kehitystä ja mahdollistaa parannuksia standardeihin, tuotantokäytäntöihin sekä suunnitteluratkaisuihin.



Kuva 5. Lean-ajatteluun perustuva toleranssienhallintasykli (mukaiillen Spirin, 2024).

## 7 Pohdinta ja yhteenveto

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen keskeiset havainnot ja pohditaan niiden merkitystä rakentamisen toleranssien hallinnan kehittämisen kannalta. Luvussa tuodaan esille johtopäätöksiä siitä, miten rakennusalan käytäntöjä voitaisiin parantaa tulevaisuudessa. Tarkastelu perustuu työn kirjallisuusanalyysiin, jossa painottuivat erityisesti tietomallintamisen (BIM), laadunhallinnan ja digitalisaation roolit toleranssien hallinnan tehostamisessa.

### 7.1 Keskeiset tulokset

Tutkimukset osoittavat, että toleranssit muodostavat keskeisen osan rakentamisen laatua, turvallisuutta ja tuottavuutta. Eri materiaalien ja rakenteiden vaihtelevat tarkkuusvaatimukset tekevät kokonaisuuden hallinnasta haastavaa, erityisesti rajapinnoissa, joissa eri järjestelmät kohtaavat. Vaikka yksittäiset komponentit voivat täyttää niille asetetut toleranssit, kokonaisuus ei välttämättä toimi suunnitellusti, jos suunnittelualojen välinen yhteistyö ja tietojen yhteensopivuus puuttuvat. Tämä näkyy työmailla esimerkiksi liitospintojen epätasaisuuksina, vinoumina ja asennusvirheinä, jotka johtavat aikataulujen venymiseen, lisäkustannuksiin ja laadun heikkenemiseen.

Tietomallintaminen (BIM) ja mallipohjainen tuotemäärittely (MBD) nousivat keskeisiksi keinoiksi parantaa toleranssien hallintaa. Niiden avulla voidaan siirtyä reaktiivisesta virheiden korjaamisesta ennakoivaan laadunhallintaan, jossa poikkeamat tunnistetaan jo ennen rakentamisen aloitusta. Kun suunnittelussa asetetut mitat, toleranssit ja säätövarat tallennetaan suoraan tietomalliin, voidaan ristiriidat havaita aikaisessa vaiheessa ja estää virheiden kasautuminen. Myös mittausmenetelmien, kuten laserkeilauksen ja 3D-skannauksen, hyödyntäminen tukee tätä kehitystä tarjoamalla mahdollisuuden vertailla toteumaa ja suunnitelmaa automaattisesti.

Tutkimuksen perusteella on kuitenkin selvää, että pelkkä tekninen kehitys ei riitä. Toleranssien hallinta vaatii organisoitua ja systemaattista toimintatapaa, jossa vastuut, mittaustavat ja hyväksymisrajat määritellään yhteisesti jo projektin alussa. Yhtenäisen toleranssipolitiikan ja yhteisten standardien puute on edelleen merkittävä ongelma, joka vaikeuttaa eri osapuolten välistä tiedonvaihtoa ja laatuvarmistuksen määrittelyä.

### 7.2 Ratkaisuehdotukset ja suositukset

Jatkossa toleranssien hallinnan kehittämisen tulisi keskittyä tiedon yhtenäistämiseen, digitaalisten työkalujen tehokkaaseen hyödyntämiseen ja ennakoivien menetelmien vahvistamiseen. Tietomallipohjaisen suunnittelun ja laadunvarmistuksen tulisi muodostaa yhtenäinen prosessi, jossa mittausdata, laadunvalvonta ja toteumatieto yhdistyvät saumattomasti. Tällainen mahdollistaa virheiden havaitsemisen aikaisemmin ja vähentää sekä kustannuksia että ympäristökuormaa.

Reaaliaikaisen mittaamisen ja datan analytiikan käyttöönotto on keskeinen askel kohti jatkuvaa laadunvarmistusta. Kun mittaus- ja toteumatieto kytketään automaattisesti tietomalliin, poikkeamat voidaan tunnistaa ja korjata nopeasti ennen kuin ne ehtivät vaikuttaa muihin työvaiheisiin. Samalla projektien läpinäkyvyys ja jäljitettävyyden paranevat merkittävästi.

Tekoälyn ja koneoppimisen hyödyntäminen tarjoaa pitkällä aikavälillä uusia mahdollisuuksia toleranssien hallintaan, esimerkiksi virhemallien tunnistamiseen ja riskien ennakointiin useiden projektien datan pohjalta. On kuitenkin huomattava, että aihetta koskevaa tutkimusta on vielä vähän, eikä tekoälypohjaisia ratkaisuja ole otettu käyttöön rakennusalalla. Näin ollen painopisteen tulisi toistaiseksi olla datan laadussa, mittaamisen systematisoinnissa ja yhteisten käytäntöjen kehittämisessä, jotka luovat perustan tulevaisuuden älykkäälle laadunhallinnalle.

Yhteenvedona voidaan todeta, että toleranssien hallinnan kehittäminen edellyttää teknologian, standardoinnin ja organisaatiokulttuurin yhtäaikaista uudistamista. Kun tietomallit, mittausdata ja laadunvarmistus yhdistetään yhtenäiseksi prosessiksi, ja toleranssivaatimukset määritellään yhtenäisellä tavalla koko hankkeessa virheet voidaan ennakoida ja rakentamisen laatu varmistaa jo suunnitteluvaiheessa. Tämä muutos ei ainoastaan vähennä virheitä ja kustannuksia, vaan vahvistaa myös rakentamisen tuottavuutta, kestävyyttä ja luotettavuutta tulevaisuudessa.

### 7.3 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

1. Minkä tuotteiden ja rakennusosien toleransseja on rakentamisessa tutkittu?

Kirjallisuuskatsauksen perusteella toleransseja on tutkittu erityisesti esivalmistetuissa betonielementtirakenteissa, kuten ontelolaatoissa, pilareissa, palkkirakenteissa ja sandwich-seinissä. Lisäksi toleranssien hallintaa on tarkasteltu julkisivuissa, väliseinissä sekä taloteknisissä järjestelmissä, joissa rajapintojen ja erilaisten materiaalien yhteensovittaminen aiheuttaa virheriskejä. Myös teräs- ja puurakenteiden liittyminen betonirunkoon on tunnistettu kriittiseksi vaiheeksi, jossa mittatarkkuuden hallinta korostuu.

2. Mitä haasteita on tunnistettu rakentamisen toleranssien saavuttamisessa ja niiden seurauksissa?

Keskeisimmiksi haasteiksi nousevat suunnittelualojen välinen koordinaation puute, mittaus- ja dokumentointimenetelmien vaihtelevuus sekä aikapaineinen työympäristö. Pienet mittapoiskeamat voivat kumuloida työvaiheesta toiseen ja aiheuttaa virheitä liitospinnoissa, rakenteiden vinoutta ja asennusten yhteensopimattomuutta. Nämä johtavat lisätöihin, materiaalihukkaan ja viivästykseen, mikä heikentää projektien laatua ja kustannustehokkuutta.

3. Miten näitä tunnistettuja haasteita voidaan ratkaista?

Ratkaisuksi korostuvat tietomallintamisen (BIM) ja mallipohjaisen tuotemäärittelyn (MBD) hyödyntäminen, jotka mahdollistavat toleranssien ja mittapoikkeamien hallinnan jo suunnitteluvaiheessa. Digitaalinen mittausdata, kuten laserkeilaus ja 3D-skannaus, tukee toteuman ja suunnitelman vertailua. Lean-rakentamisen periaatteet, kuten jatkuva parantaminen ja hukan minimointi, auttavat vähentämään virheitä ja ehkäisemään toleranssipoikkeamien kasaantumista tuotannossa. Lisäksi yhteisten standardien ja yhtenäisen toleranssipolitiikan luominen parantaisi eri toimijoiden välistä tiedonvaihtoa. Pitkällä aikavälillä tekoälyn ja koneoppimisen soveltaminen tarjoaa mahdollisuuden virhemallien tunnistamiseen ja riskien ennakointiin, mutta niiden käytännön hyödyntäminen on vielä kehitysvaiheessa.

## **7.4 Jatkotutkimusaiheet**

Toleranssien hallinnan kehittäminen edellyttää jatkossa käytännönläheistä tutkimusta siitä, miten tietomallipohjaisia menetelmiä voidaan hyödyntää eri urakkamuodoissa ja projektiorganisaatioissa. Tekoälyn ja koneoppimisen soveltaminen toleranssidatan analysointiin ja virheriskien ennustamiseen tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia, mutta vaatii vielä tutkimusta ja testausta käytännön hankkeissa. Yhteisten kansallisten mittaus- ja dokumentointikäytäntöjen kehittäminen on puolestaan välttämätöntä, jotta dataa voidaan hyödyntää ja vertailla tehokkaasti eri projekteissa. Lisäksi työmaiden reaaliaikaisen mittausdatan lisääminen suoraan tietomalleihin voi tulevaisuudessa muodostaa keskeisen osan digitaalista laadunvarmistusta. Tutkimuksella voidaan siten luoda edellytykset entistä tarkemmalle, yhtenäisemmälle ja älykkäämmälle toleranssien hallinnalle rakentamisessa.

## 8 Lähteet

- Ballard, G. & Howell, G. (2003) *Lean project management*. Lean Construction Institute. [Viitattu 29.10.2025].
- Betonitieto. (n.d.) *Betonirakenteiden toteutus – toleranssit*. Saatavilla: <https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/betonirakenteiden-suunnitteluperusteet/toleranssit.html> [Viitattu 25.9.2025].
- Ekman, V. (2010) *Rakennusmittaukset – niiden laatu ja dokumentointi*. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Farouk, A.M., Nasuha, A.N., Rahman, R.A., Zakaria, Z. & Haron, A.T. (2023) ‘Design co-ordination in BIM: Decision criteria for determining tolerances’, *AIP Conference Proceedings*, 2688(1), 030005. <https://doi.org/10.1063/5.0111777>.
- Forcada, N., Macarulla, M., Gangoells, M. & Casals, M. (2016) ‘Handover defects: Comparison of construction and post-handover housing defects’, *Building Research & Information*, 44(3), 279–288. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1039284>.
- Long, H., Luo, X., Liu, J. & Dong, S. (2023) ‘The analysis and application of installation tolerances in prefabricated construction based on the dimensional chain theory’, *Buildings*, 13(7), 1799. <https://doi.org/10.3390/buildings13071799>.
- Mihić, M., Sigmund, Z., Završki, I. & Lovrenčić Butković, L. (2023) ‘An analysis of potential uses, limitations and barriers to implementation of 3D scan data for construction management-related use’, *Buildings*, 13(5), 1184. <https://doi.org/10.3390/buildings13051184>.
- Peltokorpi, A., Seppänen, O., & Nyqvist, R. (2025). *Tekoäly osana rakennushankkeen johtamista (Building 2030 -loppuraportti)*. Aalto-yliopisto. <https://building2030.fi/>
- Puri, N. & Turkan, Y. (2017) ‘Toward automated dimensional quality control of precast concrete elements using design BIM’, *WIT Transactions on the Built Environment*, 169, 203–210. <https://doi.org/10.2495/BIM170191>.
- Rakennustieto. (2010) *Rakennusalan toleranssit, toleranssien määritelmät ja suositeltavat lukuarvot* (RT 02-10996). Helsinki: Rakennustieto Oy.
- Rausch, C., Nahangi, M., Haas, C. & Liang, W. (2019) ‘Monte Carlo simulation for tolerance analysis in prefabrication and offsite construction’, *Automation in Construction*, 103, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.026>.
- Rausch, C., Edwards, C. & Haas, C. (2020) ‘Benchmarking and improving dimensional quality on modular construction projects – A case study’, *International Journal of Industrialized Construction*, 1(1), 2–21. <https://doi.org/10.29173/ijic212>.
- SFS (1992) *SFS-ISO 3443 -sarja: Rakentamisen mittatarkkuus. Osa 1–4*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS (2005) *SFS-EN 1992-1-1: Betonirakenteiden suunnittelu. Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 13670. (2009) *Betonirakenteiden toteutus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS (2018 + A1:2024) *SFS-EN 1090-2: Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteiden tekniset vaatimukset*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS (2019) *SFS 5978: Puurakenteiden toteutus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS (2019) *SFS 5975: Betonirakenteiden toteutus. Kansallinen soveltamisstandardi SFS-EN 13670:lle*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Spirin, A. (2024) *The cost and management of tolerance problems in precast concrete structures*. Master's Thesis, Aalto University, School of Engineering, Espoo.

Szulwic, J. & Ziolkowski, P. (2016). *Geodesy measurement techniques as an enrichment of archaeological research workflow*. Proceedings of ADVED 2016, 428–435.

Talebi, S. (2019) *Improvement of dimensional tolerance management in construction*. University of Huddersfield. Saatavilla: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/35070/> [Viitattu 2.10.2025].

Talebi, S. (2021) 'Causes of defects associated with tolerances in construction', *Journal of Management in Engineering*, 37(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000914](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000914).

Talebi, S., Koskela, L., Shelbourn, M. & Tzortzopoulos, P. (2016) 'Critical review of tolerance management in construction', *Proceedings of the 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-24)*, Boston, USA, 63–72. Saatavilla: <https://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/29142/> [Viitattu 3.10.2025].

Talebi, S., Koskela, L., Tzortzopoulos, P. & Kagioglou, M. (2020a) 'Tolerance management in construction: A conceptual framework', *Sustainability*, 12(3), 1039. <https://doi.org/10.3390/su12031039>.

Talebi, S., Koskela, L., Tzortzopoulos, P. & Kagioglou, M. (2020b) 'Deploying geometric dimensioning and tolerancing in construction', *Buildings*, 10(4), 62. <https://doi.org/10.3390/buildings10040062>.

Talotekniikan esivalmistussuunnittelu. (2020) *Loppuraportti*. Helsinki: Rakennusteollisuus RT ry.

Terwel, K.C. (2014) *Structural safety: Study into critical factors in the design and construction process*. PhD thesis. Delft University of Technology.

Uotila, U., Saari, A. & Junnonen, J.-M. (2021) 'Investigating the barriers to laser scanning implementation in building refurbishment', *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 26, 249–262. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.014>.