



Kaleab Selassie

# Vesitiiviit betonirakenteet ja halkeamien hallinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinöörityö

Maaliskuu 2025

# Tiivistelmä

Tekijä: Kaleab Selassie  
Otsikko: Vesitiiviit betonirakenteet ja halkeamien hallinta  
Sivumäärä: 41 sivua  
Aika: 29.4.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Rakennetekniikka  
Ammatillinen pääaine: Rakennesuunnittelu  
Ohjaajat: Lehtori Jenni Pellinen

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin Insinööritoimisto Sulin Oy:lle. Yritys on innovatiivinen teknisten ratkaisujen tarjoaja betoni-, julkisivurakenteisiin ja kosteudenhallinta & sisäilmaongelmiin.

Tämä opinnäytetyö käsittelee vesitiiviiden betonirakenteiden suunnittelua ja toteutusta, painottuen erityisesti halkeamien hallintaan. Vesitiiveys on olennainen ominaisuus rakenteissa, jotka joutuvat kosketuksiin pohjaveden tai paineistetun veden kanssa, kuten tunneleissa, altaissa ja kellaritiloissa.

Halkeamat heikentävät rakenteen vedenpitävyyttä ja kestävyyttä, minkä vuoksi niiden ehkäisy ja hallinta on keskeisessä roolissa. Työssä tarkastellaan betonin materiaalitekniisiä ominaisuuksia, kuten puristus- ja vetolujuutta, kutistumaa sekä veden vaikutuksia lujuuskehitykseen. Lisäksi esitellään rakenneratkaisuja, kuten vedeneristysmatot ja kiteyttävät lisäaineet, jotka parantavat rakenteen tiiviyyttä. Suunnittelussa huomioidaan halkeamaleveysrajat, tiiviysluokat ja kuormitukset, ja toteutuksessa korostuvat valutekniikka, jälkihoito ja laadunvalvonta. Työtä havainnollistetaan esimerkkikohteella, Laakson sairaalan maanalaisella tunnelilla, jossa sovellettiin useita vedeneristystekniikoita. Opinnäytetyö yhdistää teorian ja käytännön, tarjoten kattavan näemyksen vesitiiviiden betonirakenteiden suunnittelusta ja toteutuksesta.

## Abstract

Author: Kaleab Selassie  
Title: Waterproof Concrete Structures and Crack Control  
Number of Pages: 41 pages  
Date: 29.4.2025

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Civil Engineering  
Professional Major: Structural Design  
Supervisors: Senior Lecturer Jenni Pellinen

---

This engineering thesis was commissioned by Insinööritoimisto Sulin Oy, a company known for its innovative technical solutions in concrete and façade structures, as well as moisture control and indoor air quality issues.

The thesis explores the design and implementation of waterproof concrete structures, with a particular focus on crack control. Watertightness is a crucial property for structures exposed to groundwater or pressurized water, such as tunnels, tanks, and basement spaces. Cracks compromise both the water resistance and durability of concrete structures, making their prevention and management essential.

The study examines the material properties of concrete—such as compressive and tensile strength, shrinkage, and the effects of water on strength development. It also presents structural solutions including waterproofing membranes and crystalline admixtures that enhance impermeability. Design considerations include crack width limitations, water tightness classifications, and load conditions, while the construction phase emphasizes casting techniques, curing, and quality control.

The thesis is illustrated through a case study of the underground tunnel at Laakso Hospital, where various waterproofing methods were applied. This study integrates theory and practice to provide a comprehensive perspective on the design and realization of waterproof concrete structures.

# Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tausta ja tavoitteet	1
1.2	Rajaukset ja tutkimusmenetelmät	2
2	Betonin materiaaliominaisuudet	3
2.1	Betonin lujuus	3
2.1.1	Betonin Puristuslujuus	3
2.1.2	Betonin vetolujuus	4
2.1.3	Betonin kimmokerroin	4
2.1.4	Betonin venyvyys ja puristuskapasiteetti	5
2.2	Betonin lujuuskehitys ja kehittymisen aikainen käyttäytyminen	5
2.2.1	Betonin puristus- ja vetolujuuden kehittyminen	5
2.2.2	Lämpötilan vaikutus betonin lujuusominaisuuksiin	7
2.2.3	Sementin kovettuminen	7
2.2.4	Hydrataatio ja Hydrataatiolämpö	9
3	Vedenpitävä betoni	10
3.1	Vesitiivis betonirakenne	10
3.2	Vedenpitävän betonirakenteen vaatimukset.	12
3.3	Betonin halkeilu ja halkeilutyypit.	14
3.4	Vedenpitävyyttä edistäviä rakennratkaisuja ja tekniikoita	15
3.4.1	Vedeneristysmatot	15
3.4.2	Kidepohjaiset tiivistysaineet	18
4	Vedenpitävien Betonirakenteiden Suunnittelu	20
4.1	Rakennesuunnitelmien sisältö	20
4.2	Rakenteen dimensioiden valinta	22
4.3	Rasitusluokan määrittäminen	22
4.4	Betonin koostumuksen määrittäminen ja kutistuman sekä paisumisen hallinta	23
4.4.1	Kutistuman hallinta	23
4.4.2	Paisuman hallinta	24
4.5	Suurimman sallitun halkeamaleveyden määrittäminen	24
4.6	Rakenteen kuormitukset käyttörajatilassa	25
4.7	Vaaditun raudoituksen määrittäminen	26

4.8	Murtorajatiljan tarkastelu vedenpitävissä betonirakenteissa	27
4.9	Seinien nurkkaliitokset	27
5	Työ- ja liikuntasauvojen suunnittelu	28
5.1	Työsaumat	28
5.2	Liikuntasauvat	31
6	VEDENPITÄVIEN BETONIRAKENTEIDEN TOTEUTUS	33
6.1	Betonityönjohto ja sen tehtävät	33
6.2	Betonityösuunnitelma	33
6.3	Betonityösuunnitelma	34
6.3.1	Valunopeus	34
6.3.2	Jälkihoito	34
6.3.3	Betonin lämpökäsittely ja lämpötilan hallinta	36
6.4	Laadunvalvonta	36
7	Esimerkki kohde	37
8	Yhteenveto	41
	Lähteet	42

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee betonin vesitiiveyttä betonirakenteen halkeilun hallinnan kautta sekä suunnittelu- että toteutusvaiheessa. Halkeilujen rajoittamisella saadaan betonirakenteelle pidempää elinkaarta ja estetään rakenteellisten vaurioiden syntymistä.

Esimerkkikohteena tässä työssä käytetään Laakson yhteissairaala (LYS) hankkeen maanalaista tunnelia, joka koostuu massiivi betonirakenteista. Tämän työn tekijä on ollut mukana suunnittelemassa ja valvomassa toteutusta yhtenä osapuolena yhdessä suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden kanssa. Työssä nostetaan esille myös muita projekteja, jossa opinnäytetyön tekijä on toiminut betonirakenteiden toteutuksesta vastaavana toimihenkilönä.

### 1.1 Tausta ja tavoitteet

Maanalaisten tilojen rakentaminen on yleistynyt viime vuosina erityisesti kaupunkialueilla, joissa pyritään tehokkaampaan tilankäyttöön, ympäristöystävällisyyteen ja ilmastonmuutoksen vaikutusten hallintaan. Tämä korostaa vedenpitävän betonirakenteen tarvetta Suomessa, koska maamme geologiset ja hydrologiset ominaisuudet ovat pohjavesirikkaita, joiden pinta on paikoin suhteellisen korkealla.

Opinnäytetyön tilaajana toimii Insinööritoimisto Sulin Oy. Yritys toimii asiantuntevana osapuolena, jalostaen suunnitelmien optimointia ja varmemman toteutettavuuden mahdollistavilla innovatiivisilla materiaalikokonaisuuksilla. Yritys tarjoaa asiantuntevat palvelut kolmelta rakentamisen osa-alueelta: Betonirakenteet (erityisesti vedenpitävät betonirakenteet), julkisivut ja kosteudenhallinta & sisäilma ongelmat. Tämän opinnäytetyön tekijä toimii vedenpitävien betonirakenteita käsittelevän osaston johtajana.

Yrityksen betonirakenteisen osasto käsittelee

vedenpitävien betonirakenteiden toteutusta yhteistyössä suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden kanssa. Yleisimpien projektien luonteena ovat mm. vesilaitokset, maanalaiset betonirakenteet ja teollisuusrakentaminen. Asiantuntijat keskustele rakennetta suunnittelevan rakennesuunnittelijan kanssa rakenneratkaisujen haasteista ja vaihtoehtoisista teknisistä ratkaisuista. Toteutusvaiheessa yrityksen toimihenkilöt toimii työmaan apuna ja valvoo kaikkien osapuolten tavoitteiden toteuttaminen.

Työn tavoitteena on käydä vesitiiviin betonirakenteen toteuttamiseen liittyvät vaiheet suunnittelupöydästä toteutukseen asti. Jotta päästään suunnitteluun liittyvien ohjeisiin käsiksi työssä käsitellään alussa betonirakenteen ominaisuutta, muodonmuutosta aiheuttavien ilmiöiden hallintaa ja halkeamien hallintaa sekä mitoittaessa suoritettavissa laskentatavoissa että hyväksi havaituissa toimintatavoissa.

## 1.2 Rajaukset ja tutkimusmenetelmät

Työssä keskitytään uudisrakentamiseen ja maanvastasiin betonirakenteisiin, jotka suunnitellaan ja toteutetaan vedenpitäväksi paineellista vettä vastaan. Pääpainona on toimitila- ja teollisuusrakentamisen betonirakenteet, mutta työssä sivutaan myös esimerkiksi vesihuolto- ja vesilaitosrakenteisiin.

Opinnäytetyöhön sisältyy sekä kirjallisuus- ja säädökset että toteutuksessa läsnäololla havaittuja tekijöitä ja seurauksia. Kirjallisuustutkimuksessa perehdytään olemassa olevaan kirjallisuuteen ja vedenpitävien suunnittelun ja toteutuksen osalta. Sen avulla työssä pyritään pääsemään säädöksiin ja normeihin, jotka ovat asetettu vedenpitävän betonirakentamisen suunnitteluun ja toteutukseen. Näiden lisäksi työssä käytetään opinnäytetyön tekijän työelämässä saataviin koulutuksiin ja asiakirjoihin, joiden avulla työssä syvennyttään betonin materiaaliominaisuuksiin ja rakennemateriaalien kemiallisiin ominaisuuksiin.

Projekteissa vaikuttamien ja läsnäolo tuo taas eriosapuolten näkemyksiä ja korostaa - heidän eri tehtävien tärkeyttä tavoiteltujen lopputulosten saavuttamiseksi.

## 2 Betonin materiaaliominaisuudet

Betoni on rakennusmateriaalina tunnettu erityisesti korkeasta puristuslujuudestaan, mikä on sen tärkein tekninen ominaisuus. Betonin suunnittelussa tulee ottaa huomioon paitsi lopullinen lujuus myös sen kehittyminen ajan myötä ja siihen liittyvät ilmiöt, kuten kutistuma ja halkeilu.

### 2.1 Betonin lujuus

Sekä suunnittelijoiden että toteuttajien tietoisuus betonin materiaaliominaisuudesta korostuu vesitiiviin betonirakenteen suunnittelussa ja toteutuksessa. Suunnittelijan on huomioitava betonin lopullisen lujuuden lisäksi myös lujuuden kehittyminen ja tähän liittyvät ilmiöt.

#### 2.1.1 Betonin Puristuslujuus

Betonin tärkein ominaisuus on sen korkea puristuslujuus. Betonit luokitellaan lujuusluokkiin sen perusteella, millainen on 28 vuorokauden ikäisen betonin puristuslujuus. Lujuus mitataan kahdella eri tavalla: lieriölujuus ( $f_{ck}$ ) ja kuutiolujuus ( $f_{ck,cube}$ ), joista käytetään lujuusluokan merkinnässä muotoa Cxx/yy. Esimerkiksi C30/37 tarkoittaa, että lieriölujuus on 30 MPa ja kuutiolujuus 37 MPa. Keskimääräinen puristuslujuus ( $f_{cm}$ ) voidaan arvioida kaavalla:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}. \quad 2.1$$

Puristuslujuuden määrittäminen tapahtuu standardin EN 12390-3 mukaisilla kokeilla, joissa koekappaleiden valmistus ja testausmenetelmät on tarkkaan määritetty. (lähde 1 s. 28-30)

### 2.1.2 Betonin vetolujuus

Vaikka betonin puristuslujuus on korkea, sen vetolujuus on huomattavasti heikompi ja sillä on suuri merkitys esimerkiksi halkeilun kannalta. Vetolujuus ilmoitetaan  $f_{ct}$ -muuttujilla, ja keskimääräinen vetolujuus ( $f_{ctm}$ ) voidaan laskea puristuslujuuden avulla. EN 1992-1-1 -standardin mukaan käytettävä kaava riippuu siitä, onko betonin lujuusluokka alle vai yli C50/60. Alle C50/60-luokan betoneille vetolujuus lasketaan kaavalla:

$$f_{ctm}(t) = 0,3f_{ck} \left(\frac{2}{3}\right)^2, \text{ kun lujuusluokka} \leq \text{C50/60. 2.2}$$

$$f_{ctm}(t) = 2,12 \ln \left( 1 + \left( \frac{f_{cm}}{10} \right) \right), \text{ kun lujuusluokka} > \text{C50/60 2.3}$$

### 2.1.3 Betonin kimmokerroin

Betonin kimmokerroin ( $E_{cm}$ ) kuvaa sen jäykkyyttä eli vastusta muodonmuutokselle. Se riippuu muun muassa kiviaineksen tyypistä ja puristuslujuudesta. Alle 40 %:n puristusjännitystasolla betoni käyttäytyy lineaarisesti, joten kimmokerroin voidaan laskea kuvaajan kulmakertoimena. Yleisesti käytetty laskukaava on:

$$E_{cm} = 22 * \left[ \frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad 2.4$$

Jos betonissa käytetään muuta kuin kvartsiittipohjaista kiviainesta (kuten graniittia), korjataan tulosta materiaaliikohtaisella kertoimella, joka haetaan taulukosta

Taulukko 2.1. Kimmokertoimen kivilajista riippuva korjauskerroin

Käytettävä kivilaji	Korjauskerroin
Basaltti	1,20
Kalkkikivi	0,90
Hiekkakivi	0,70

#### 2.1.4 Betonin venyvyys ja puristuskapasiteetti

Betonin venymäominaisuudet ovat erityisen tärkeitä vedenpitävyyttä vaativissa rakenteissa. Venymäkapasiteetti tarkoittaa suurinta venymää, jonka betoni kestää halkeamatta. Murtovenymä ( $\epsilon_{ctu}$ ) voidaan arvioida vetolujuuden ja kimmokertoimen avulla käyttäen plastisuuskerrointa ( $v_{pl}$ ), jonka arvoksi oletetaan usein 0,5. Vastaavasti puristumakapasiteetti (murtopuristuma  $\epsilon_{em}$ ) kuvaa betonin käyttäytymistä ennen murtumista puristettuna. Betoniluokkiin C50/60 asti käytetään vakiomurtopuristuman arvoa 3,5 ‰.

$$\epsilon_{ctu} = f_{ctm} / (v_{pl} E_{cm})' \quad 2.5$$

## 2.2 Betonin lujuuskehitys ja kehittymisen aikainen käyttäytyminen

### 2.2.1 Betonin puristus- ja vetolujuuden kehittyminen

Betonin puristuslujuuden kehitys riippuu useista tekijöistä, kuten betonin iästä, sementin tyypistä, jälkihoidosta ja lämpötilasta. Standardin EN 12390

mukaisesti, betonin puristuslujuus voidaan arvioida kaavalla, jossa puristuslujuuden  $f_{cm}$  kehittyminen betonin iän mukaan:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad 2.6$$

joissa  $f_{cm}(28)$  on betonin keskimääräinen puristuslujuus 28 vuorokauden iässä,  $t$  on betonin ikä vuorokausina ja  $\beta_{cc}(t)$  on iästä ja sementistä riippuva kerroin. Sementin tyypistä riippuva kerroin  $\beta_{cc}(t)$  määräytyy taulukon 2.2 perusteella.

Taulukko 2.2. Sementin tyypistä riippuva kerroin

Sementtityyppi	Kerroin s
CEM 42,5 R, CEM 52,5 N ja CEM 52,5 R sementit (tyyppi R)	0,2
CEM 32,5 R, CEM 42,5 N sementit (tyyppi N)	0,25
CEM 32,5 N sementit (tyyppi S)	0,38

Betonipuristuslujuuden ominaisarvon  $f_{ck}(t)$  kehittyminen ajan suhteessa voidaan laskea kaavoilla:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} \quad , \text{ kun } 3 < t < 20 \text{ vuorokautta} \quad 2,7$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad , \text{ kun } t \geq 28 \text{ vuorokautta} \quad 2,8$$

Betonin vetolujuuden kehittyminen riippuu erityisesti jälkihoito- ja kuivumisolosuhteista sekä rakenneosien mitoista. Vetolujuuden kehitys lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$f_{ctm}(t) = f_{ctm,28} * \beta_{cc}(t) \quad , \text{ kun } t < 28 \text{ vuorokautta} \quad 2,9$$

$$f_{ctm}(t) = f_{ctm,28} * \beta_{cc}(t) * (t/28)^{0,5} \quad , \text{ kun } t > 28 \text{ vuorokautta} \quad 2.10$$

joissa  $f_{ctm,28}$  on betonin keskimääräinen vetolujuus 28 päivän iässä ja  $\beta_{cc}(t)$  on betonin iästä riippuva kerroin.

Koko lujuuden kehittymisen ennustaminen perustuu siis betonin iän, sementin tyyppin ja jälkihoidon olosuhteisiin, ja näitä voidaan tarkentaa taulukoiden ja kaavojen avulla.

### 2.2.2 Lämpötilan vaikutus betonin lujuusominaisuuksiin

Betonin lämpötila kovettumisen aikana on merkittävä tekijä sen lujuuskehityksessä. Lämpötilan vaikutus jaetaan yleensä kolmeen päävaikutukseen: Lujuuskehityksen nopeus, loppulujuus ja vaurioitumisriskit

Alle +20 °C lämpötila hidastaa kovettumista ja lujuuden kehitystä. Yli +20 °C lämpötila nopeuttaa lujuuskehitystä, mutta koreilla lämpötiloilla on myös haittavaikutuksia. Alhaisessa lämpötilassa kovettunut betoni voi saavuttaa korkeamman loppulujuuden, vaikka kehitys on hitaampaa. Lämpötilan vaikutus vähenee betonin iän kasvaessa. (2 s. 41)

Betonin lämpötilan ei tulisi laskea alle +5 °C, ja erityisesti ei saa jäätymä ennen jäätymislajuuden (5 MPa) saavuttamista. Jäätymisen voi aiheuttaa veden laajenemisen vuoksi pysyviä vaurioita, mikä ilmenee valelujuutena eli näennäisenä lujuutena (10-20 MPa), joka häviää myöhemmin. Yli +70 °C kovettumislämpötilat kasvattavat taas ettringiittireaktioiden muodostumiselle ja merkittäväälle lujuuskadolle. (18 s. 494-497)

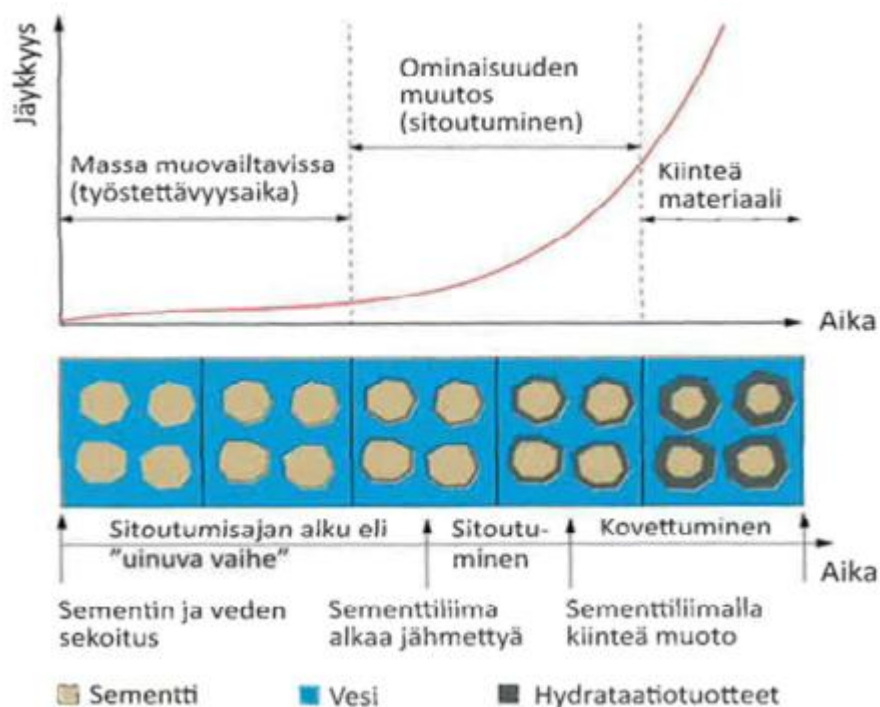
### 2.2.3 Sementin kovettuminen

Sementtipastan kovettuminen sementtikiveksi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: sitoutumisajan alkuun, sitoutumisvaiheeseen ja kovettumisvaiheeseen. Sitoutumisajan alku viittaa aikaan, joka kuuluu sementin ja veden sekoituksesta siihen hetkeen, kun pasta ei ole enää työstettävissä. Tätä seuraa

sitoutumisvaihe, jonka aikana pastan hyytelömäinen rakenne vähitellen kiinteytyy. Kun sementtipasta saavuttaa kiinteän muodon, alkaa varsinainen kovettumisvaihe.

Kovettumisvaiheen aikana sementtikiven lujuusominaisuudet kehittyvät hydrataatioreaktioiden vaikutuksesta. Kovettuminen jatkuu niin kauan kuin sementtikivessä on jäljellä hydratoitumatonta sementtiä ja vettä, joka voi osallistua reaktioon.

Sitoutumisajan alun vähimmäiskesto määräytyy sementin lujuusluokan mukaan standardin SFS-EN 197-1 mukaisesti. Yleisesti sitoutuminen alkaa noin 2-4 tunnin kuluttua veden ja sementin sekoituksesta, kun lämpötila on +20 °C. Mikäli betonimassan lämpötila laskee, sitoutumisaika voi pidentyä useilla tunneilla, kun taas lämpötilan nousu lyhentää sitä merkittävästi. Sitoutumisaikaan vaikuttavat sementtityyppi, vesi-sementtisuhte ja mahdolliset lisäaineet, joilla voidaan joko kiihdyttää tai hidastaa sitoutumisprosessit. [18 s. 35-37]



Kuva 1. Sementtipastan sitoutuminen ja kovettuminen [18 s. 36]

## 2.2.4 Hydrataatio ja Hydrataatiolämpö

Sementin ja veden välinen hydrataatioreaktio käynnistyy, kun silikaatit ja alumiinatit reagoivat veden kanssa muodostaen erilaisia hydrataatiotuotteita. Reaktio alkaa sementtahiukkasten pinnoilta, joihin alkaa kehittyä sementtigeeliä, joka koostuu sauva- ja levymäisistä kiteistä. Hydrataation edetessä sementtigeelin määrä kasvaa ja sen tilavuus voi yli kaksinkertaistua alkuperäiseen sementin tilavuuteen verrattuna. Syntyneet kiteet muodostavat verkkomaisen rakenteen, joka antaa sementtikivelle sen mekaaniset ominaisuudet. Vaikka hydrataatiossa tapahtuu laajenemista, kiteiden väliin jää edelleen huokoisuutta, joka heikentää geelin lujuutta. Alkuvaiheessa sementtigeeli on notkeaa, mutta ajan myötä se kovettuu kiinteäksi sementtikiveksi. [3 s. 42-43]

Hydrataatioreaktion yhteydessä vapautuu myös huomattava määrä lämpöä, jota kutsutaan hydrataatiolämmöksi. Tämä lämmöntuotto liittyy betonin lujuuden kehittymiseen, ja sitä voidaan käyttää erityisesti kovettumisen alkuvaiheessa betonin lujuuden arviointiin. Hydrataatiolämmön määrään vaikuttavat yleisimmät tekijät ovat vesi-sementtisuhde, sementtityyppi ja sen kemiallinen koostumus ja sementin hienojakoisuus.

Lämmöntuotto kovettumisen alkuvaiheessa on seurausta erityisesti sementtiklinkkerin reaktiosta. Klinkkerin määrää voidaan vähentää käyttämällä seossementtejä tai lisäaineita, kuten lentotuhkaa tai masuunikuonaa, sekä nostamalla vesi-sementtisuhdetta. Näillä keinoilla voidaan hallita lämmönkehitystä erityisesti massiivivaluissa, joissa ylikuumenemisen riski on suuri [3 s. 47] [2 s.43].

### 3 Vedenpitävä betoni

Vedenpitävä betonirakenne muodostuu vesitiiviistä betonista sekä huolellisesti toteutetuista liitoksista ja yksityiskohdista. Betonissa huokosrakenteen tulee olla epäyhtenäinen, jotta vesi ei pääse tunkeutumaan. Ihannetapauksessa rakenteet ovat halkeilemattomia, mutta SFS-EN 206-1 -standardin mukaan sallittu halkeamaleveys määräytyy rakenteen tiiviysluokan mukaan. Tällaiset rakenteet vaativat aina erityisosaamista [SFS-EN 206-1 s. 10].

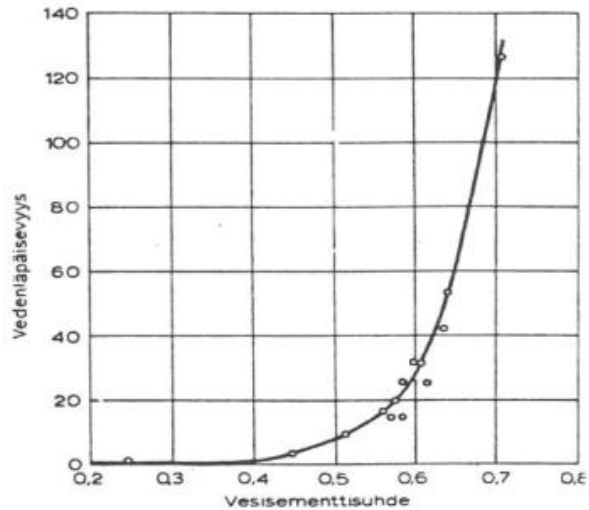
#### 3.1 Vesitiivis betonirakenne

Vesitiivis betoni ei läpäise vettä, mutta pieniä määriä kosteutta voi kulkeutua diffuusion ja kapillaarisuuden kautta [14 s. 10]. Tämän vaikutukset on otettava huomioon pinnoitevalinnoissa. Betonirakenteen vesitiiviyys varmistetaan kokeellisesti ja seurannalla [9 s. 97].

Vesitiiviin betonin vaatimuksia:

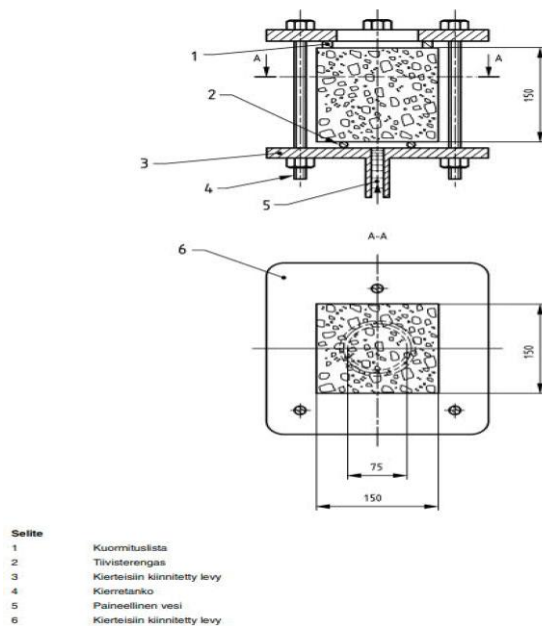
- Lujuusluokka vähintään C25/30
- Vesisementtisuhte < 0,6
- Riittävä notkeus ja koossapysyvyys
- Tarpeeksi hienoa kiviainesta
- Huolellinen jälkihoito: betoni pidettävä kosteana 1–2 viikkoa
- Sementtimäärä > 350 kg/m<sup>3</sup> tekee betonista tiiviin
- Valunopeus ja pudotuskorkeus pidettävä matalana.

Vesisementtisuhteen ylittäessä 0,7 muodostuu yhtenäinen kapillaarihuokosverkosto, joka heikentää tiiveyttä [3 s. 135-136].



Kuva 2. Vesimenttisuhteen vaikutus betonin vedenpitävyyteen [ 3 s. 136]

Eurokoodien mukainen betonin vesitiiveys koe (SFS-EN 12390-8) altistaa 28 vrk ikäisen,  $\geq 150$  mm paksun koekappaleen 500 kPa vedenpaineelle 72 tunniksi. Jos veden tunkeutumissyvyys jää alle 100 mm, betoni on vesitiivistä [7 s. 4-6). Veden tunkeumasyvyyden määrittämiseen käytettävä laitteisto on esitetty kuvassa 4.



Kuva 3. Betonin tunkeumasyvyyden testilaitteisto. [7 s. 4-6]

### 3.2 Vedenpitävän betonirakenteen vaatimukset.

Vedenpitävissä betonirakenteissa, kuten nestesäiliöissä, halkeilun hallinta on keskeinen osa rakenteen tiiviysvaatimuksia. Tiiviysvaatimusten määrittämistä varten käytetään standardia EN 1992-3:2006, joka jakaa rakenteet tiiviysluokkiin (0–3) käyttötarkoituksen ja tilavuuden perusteella [5 s. 10].

Taulukko 3.1. Säiliörakenteiden tiiviysluokitukset [5 s. 10]

Tiiviysluokka (wk)	Vuotoa koskevat vaatimukset
0	Tietty vuodon määrä hyväksyttävä tai nesteiden vuodolla ei ole merkitystä
1	Vuoto rajoitettava pieneen määrään. Tietty pinnan tahriutumisen tai kosteat laikut hyväksyttäviä
2	Vuoto minimaalista. Tahriutuminen ei saa heikentää ulkonäköä.
4	Vuotoa ei sallita ollenkaan.

Rakenteiden halkeamaleveys tulee rajoittaa tiiviysluokan vaatimusten mukaisesti. Esimerkiksi tiiviysluokassa 1 halkeamaleveyden raja-arvo (wk1) määräytyy hydrostaattisen korkeuden ja rakenteen paksuuden suhteella. Mikäli rakenteen muodonmuutokset ovat pieniä ja rakenteeseen ei kohdistu merkittäviä jännitysvaihteluita, halkeamien voidaan olettaa tiivistyvän itsestään.

Tiiviysluokissa 2 ja 3 halkeilua voidaan ehkäistä mitoittamalla puristusvyöhykkeen korkeus vähintään arvoon

$$x_{min} = \min(50mm, 0,2 h), \quad 3.2$$

jossa h on tarkasteltavan rakenneosan paksuus.

Mikäli rakenteeseen kohdistuu voimia vastakkaisiin suuntiin, oletetaan halkeamien läpäisevän poikkileikkauksen, ellei kimmoteoreettisella laskennalla toisin osoiteta. (SFS-EN 1992-3 s. 10)

RIL 201-3-2013 -julkaisussa annetaan halkeamaleveyksien raja-arvot vesirakenteille eri rasitusluokissa. Rasitusluokat kuten XD1 ja XS1 sisältävät raja-arvot, jotka tiukkenevat käyttöiän ja kuormitusyhdistelmän mukaan. Rasitusluokat XF eivät aseta vaatimuksia halkeamaleveyksille. [13 s. 13-15]

Taulukko 3.2. Säiliörakenteiden tiiviysluokitukset

Tiiviysluokka	Vuotoa koskevat vaatimukset
0	Tietty vuodon määrä hyväksyttävä tai nesteiden vuodolla ei ole merkitystä
1	Vuoto rajoitettava pieneen määrään. Tietty pinnan tahriutuminen tai kosteudet laikut hyväksyttäviä
2	Vuoto minimaalista. Tahriutuminen ei saa heikentää ulkonäköä.
3	Vuotoa ei sallita ollenkaan.

Taulukko 3.3. Betonin halkeamaleveysrajat  $w_{max}$  vesirakenteissa [15 s. 14-15].

Rasitusluokka	Raudoitettut, 50v	Raudoitettut, 100v	Raudoitettut pitkäaik., 50v	Raudoitettut pitkäaik., 100v	Tartunnalliset, 50v	Tartunnalliset, 100v	Tartunnalliset pitkäaik., 50v	Tartunnalliset pitkäaik., 100v
XD1, XC2, XC3, XC4, XS1	0,3	0,2	0,2	0,15	0,1	0,07	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2, XS3	0,25	0,15	0,15	0,1	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila

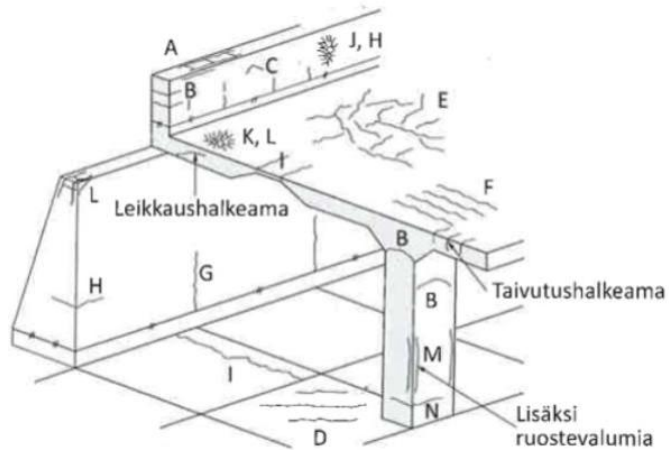
### 3.3 Betonin halkeilu ja halkeilutyypit.

Betonin halkeilu on betonille ominainen ilmiö, joka johtuu sen heikosta vetolujuudesta. Halkeamat voivat syntyä ulkoisen kuormituksen, pakkovoimien tai plastisen vaiheen muodonmuutosten seurauksena, kun vetojännitys ylittää betonin murtovenymän. Vaikka halkeilua ei voida täysin estää, huolellisella suunnittelulla ja toteutuksella voidaan varmistaa, että halkeamien leveydet ja etäisyydet pysyvät vaatimusten rajoissa.

Vedenpitävissä rakenteissa halkeilun hallinta on erityisen tärkeää. Kaikki halkeamat eivät ole haitallisia, ja niiden sallitut rajat määräytyvät rasitus- ja tiiviyaluokan sekä käyttötarkoituksen mukaan. Standardin EN 1992-3 mukaan poikkeileikkauksen läpäisevät halkeamat, jotka eivät tiivisty itsestään, voivat aiheuttaa vuotoa. Vedenpitävyyttä voidaan parantaa esimerkiksi esijännityksellä, jolloin rakenne pysyy puristettuna kaikilla kuormitustilanteilla.

Halkeamat jaetaan mikro- ja makrohalkeamiin. Makrohalkeamat ovat näkyviä ja johtuvat kuormituksesta, muodonmuutoksista tai pakkovoimista. Mikrohalkeamat ovat alle 0,05 mm leveitä ja syntyvät lähinnä betonin tilavuuden muutoksista, kuten lämpölaajenemisen eroista ja sisäisestä kuivumisesta, usein betonin varhaisvaiheessa ennen vetolujuuden kehittymistä [EN 1992-3].

Betoniin syntyvät halkeamat voidaan luokitella niiden syntysyiden mukaan. Halkeaman sijainti, syntyajankohta ja muoto antavat usein viitteitä sen taustalla olevasta syystä [18 s. 103]. Kuvassa 4.1 on esitetty esimerkkejä eri halkeamatyypeistä sekä niiden tyypillisistä sijainneista betonirakenteessa.



Kuva 4. Betonirakenteen tyypillisiä halkeamia. [18 s. 103]

### 3.4 Vedenpitävyyttä edistäviä rakenneratkaisuja ja tekniikoita

#### 3.4.1 Vedeneristysmatot

Betonirakenteiden vedenpitävyyttä voidaan parantaa asentamalla vedeneristysmattomateriaaleja rakenteen ulko- tai sisäpuolelle. Tunnettuja vaihtoehtoja ovat bitumikermi ja nykyaikaiset membraanit, kuten Zemseal, joka muodostaa tiiviin vedeneristyksen valuvaiheessa [25]. Zemseal-vedeneristemembraanin vedeneristys kyky johtuu kalvon kyvystä sitoutua sementtiliimaan rakenteen kovettumisen ja sideaineiden sitoutumisen aikana [19][25]. Tuote on insinööritoimisto Sulin Oy:n edustama vedeneristysratkaisu, jota on käytetty mm. Laakson sairaalan maan-alaisissa tunnelirakenteissa ja kansallismuseon maan-alaisesti laajentamiseen rakennetuissa betonirakenteissa [Luku 7]



Kuva 5. Zemseal tuotepiheellä vedeneristetty maanalainen tunneli. [luku 7][25]

Vedeneristeiden käyttö korostuu usein seuraavissa rakenteissa:

- Kellarit
- Tunnelit
- Vesi- ja jätevesirakenteet
- Maanalaiset rakenteet

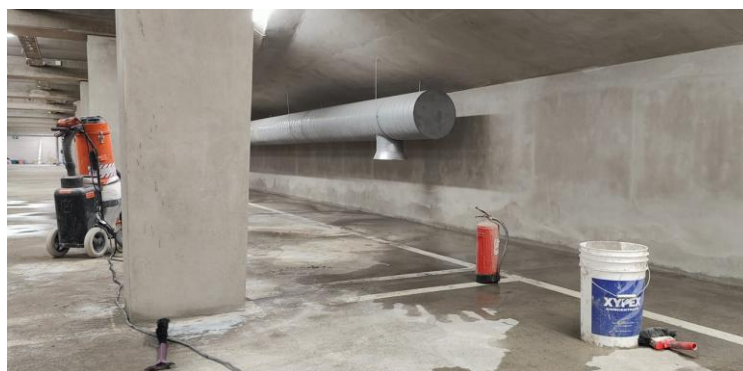
Erilaisten kankaiden ja bitumi kermien lisäksi käytetään myös erilaisia pinnoitteita ja liuoksia. Esimerkiksi polyurea-pinnoitteita käytetään laitosrakenteisiin vedestä ja haitta-aineista suojaavaksi kerrokseksi allasrakenteiden sisäpintaan. Polyurea (PU) pohjainen pinnoite on kaksikomponenttinen ruiskutettava pinnoite, joka muodostaa saumattoman ja kemiallisesti kestävänsä vedeneristystyksen. Pinnoite soveltuu ulkokäyttöön ja kovettuu nopeasti, mutta ei ole M1-luokiteltu, joten sen käyttö sisätiloissa vaatii tarkkaa harkintaa. Alustan esikäsitteily on

välttämätöntä hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Tämän työn tilaajan edustama tuote MC DUR Power 240 on PU-tuotteista hyvä esimerkki [25][23].

#### Käyttökohteita

- Tunnelit
- Altaat
- Säiliöt
- Jäteveden käsittelylaitokset

Näiden lisäksi vedeneristämiseen käytetään myös kidepohjaisia tiivistysaineita, joilla on mahdollista tiivistää vanhoja ja hyväkuntoisia betonirakenteita vesitiiviiksi. Esimerkiksi Xypex Concentrate on kiteyttävä vedeneristys- ja betonin suojausaine, joka on CE hyväksytty vedenpainetta vastaan käytettäväksi [23]. Se levitetään betonipinnoille, missä se reagoi kosteuden ja betonin mineraalien kanssa muodostaen liukenemattomia kiteitä. Tuotteessa olevalla reagoivalla aineella on kyky tunkeutua rakenteen pinnasta 300-400 mm syvyyteen ja reagoida [20][21][23]. Näin se tiivistää betonin ja estää veden sekä kemikaalien tunkeutumisen rakenteeseen. Tuote soveltuu myös kapillaarisesti nousevan kosteuden katkaisemiseen.



Kuva 6. Xypex Concentrate tuotekäsittely parkkihallin pystyrakenteisiin. [23]

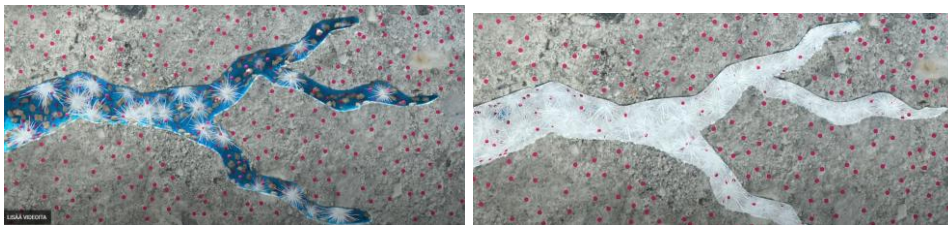
## Käyttökohteita

- Kellarit
- Vesialtaat altaat
- Perustukset

### 3.4.2 Kidepohjaiset tiivistysaineet

Nämä sementtipohjaiset aineet muodostavat mikrokiteitä betonin huokostiloihin ja halkeamiin, mikä tekee betonista vedenpitävän sisältä käsin. Hyvänä esimerkki tuotteena on Xypex Admix C-1000 NF, joka on CE hyväksytty käytettäväksi jopa 5 bar vedenpainetta vastaan [20][21]. Kidepohjaiset tiivistysaineet voi lisätä massaan valmisbetoni asemalla betonimassan työstö vaiheessa.

Xypex Admix- lisäaine koostuu Portland sementistä, hiekasta ja patentoidusta kemikaalista [20][21]. Tuotteessa oleva kemikaali reagoi veden ja sementissä olevien mineraalien kanssa, josta syntyy verkkomainen kiderakenne. Kidemaiset sideaineet hakeutuvat mikrohalkeamiin ja huokosiin, jotka ei tiivisty normaalin sementtikovettumisen aikana [20][21][22]. Näin lisäaineen avulla saadaan varmistettua betonirakenteen tiiveyttä. Työstö- ja kutistumisvaiheessa tapahtuvien erilaisten reaktioiden aiheuttamat tiiveyttä heikentävät tekijät eli syntyvien huokosten ja halkeamien määrät saadaan vähennettyä tai jopa tukittua kokonaan [22].



Kuva 7. Xypex lisäaineen kemiallinen reaktio veden, sementin ja patentoidun kemikaalin (punaiset pisteet) kesken, josta syntyy mikrohalkeamia tukkiva kiderakenne. [21][22][23]

Kiteet suojaavat myös raudoitusta kemiallisilta haitoilta [21]. Käyttökohteita:

- Tunnelit ja sillat
- Uima-altaat
- Jäte- ja puhtaan veden käsittelylaitokset
- Vedenpaineelle alttiit rakenteet

Paisuttavat lisäaineet, kuten kalsiumsulfoalumiinaattipohjaiset tuotteet, aiheuttavat betonin tilavuuden kasvua, jolloin kutistumiskutistumaa kompensoidaan.

Tämä voi vähentää halkeilua, mikäli annostus ja lämpötilaolosuhteet ovat optimaaliset. Käyttökohteita:

- Betonirakenteet, joissa halutaan rajoittaa kutistumahalkeilua

Sisäisessä jälkihoidossa käytetään lisäaineita, jotka vapauttavat vettä betonin sitoutumisen aikana. Tämä vähentää kuivumiskutistumaa ja parantaa tiiviyyttä, mutta voi hidastaa lujuuden kehitystä.

Kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA). Glykolipohjaiset SRA-aineet alentavat kapillaaripainetta ja hidastavat veden poistumista betonista, mikä pienentää kuivumiskutistumaa etenkin alhaisessa ilmankosteudessa. Niitä käytetään yleisesti annostuksella 1,5–2 % sementin painosta [16 s. 36].

## 4 Vedenpitävien Betonirakenteiden Suunnittelu

Tässä kappaleessa käsitellään vedenpitävien betonirakenteiden suunnittelussa huomioitavia toimenpiteitä ja asioita, jotka liittyvät mitoituksen eri vaiheisiin.

### 4.1 Rakennesuunnitelmien sisältö

Rakennesuunnitelmissa on esitettävä kaikki oleellinen tieto, joka mahdollistaa laadukkaan toteutuksen ja tarkkojen kustannusarvioiden tekemisen. Betonirakenteiden osalta suunnitelmissa tulee esittää vähintään seuraavat tiedot [28 s.216-217]:

- Seuraamus- ja rasitusluokka
- Suunniteltu käyttöikä
- Raudoituksen betonipeitteen nimellisarvo ja sallitut mittapoikkeamat
- Raudoitteiden tunnistetiedot sekä niiden mitat, taivutukset, limitykset ja jatkokset
- Rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja mitoituksessa käytetyt ohjeet
- Rakenneulottuvuudet (dimensiot)
- Kiinnikkeiden ja varausten sijainnit
- Palonkestoluokka
- Toteutus-, toleranssi- ja jälkihoitoluokat
- Työsaumat ja niiden sijainnit (erityisesti toteutusluokka 3:ssa)
- Raudoitusten tuenta ja työraudoitteet (luokka 3:ssa)

Vedenpitävyyden kannalta rakennesuunnitelmissa on kiinnitettävä erityistä huomiota yksityiskohtien esittämiseen. Näitä ovat mm. läpivientien toteutus ja tiivisyys, työ- ja liikuntasaumot sekä raudoituksen toteutus rakenneosien epäjatkuvuuskohdissa [28 s.216-217]:

Betonin koostumukseen liittyvät vaatimukset:

Vähimmäistietoina rakennesuunnitelmissa tulee esittää:

- Lujuusluokka
- Laadunarvosteluikä (jos poikkeaa normaalista 28 vuorokaudesta)
- Sideaineeseen liittyvät erityisvaatimukset
- Poikkeamat tyypillisestä koostumuksesta
- Kiviaineksen maksimiräekoko [28 s. 216]

Lisäksi voidaan esittää tarkempia erityisvaatimuksia, kuten:

- Sementin erityistyytit (esim. matala alkalisuus)
- Epätavalliset kivilaatutyypit
- Betonimassan lämpötilavaatimukset
- Lujuuden kehitys ja hydrataatiolämmön hallinta
- Hidastettu kovettuminen
- Vedenpitävyys
- Kulutuskestävyys
- Valumenetelmät
- Pintojen laatuluokka ja tyypit [28 s. 217]
- Pakkasekestävyys
- Sulfaattikestävyys

Näillä tiedoilla varmistetaan, että vedenpitävät betonirakenteet suunnitellaan ja toteutetaan teknisesti toimiviksi ja pitkäikäisiksi.

## 4.2 Rakenteen dimensioiden valinta

Vedenpitävien betonirakenteiden suunnittelu- ja toteutuskustannuksiin voidaan vaikuttaa huomattavasti valitsemalla yksinkertainen rakenne. Monimutkaiset yksityiskohdat, kuten nurkkaliitokset ja liikuntasaumot, lisäävät sekä suunnittelu- että toteutustyön määrää, mikä kasvattaa kustannuksia.

Jos rakennesuunnittelija voi vaikuttaa rakenteen muotoon, betonialtaiden suositellaan olevan pyöreitä. Pyöreä muoto vähentää nurkkaliitosten tarvetta ja pienentää seinärakenteisiin kohdistuvia jännityksiä.

Ennen mitoitusta suunnittelijan tulee myös arvioida rakenteiden paksuudet. Betonialtaiden vedenpitävyyden varmistamiseksi pohjalaatan paksuuden on oltava riittävä. Vähimmäispaksuutena pidetään 300 mm hyvin valmistetulle ja halkeilemattomalle laatalle.

Seinien paksuudessa pyritään tasapainoon: niiden on oltava tarpeeksi ohuita, jotta vältetään kovettumisen aikaiset jännitykset, mutta samalla riittävän paksuja valun ja tiivistyksen onnistumiseksi. Yleisesti vedenpitävien betoniseinien suositeltu vähimmäispaksuus on 250–300 mm. Seinät valetaan yleensä yhtenä valuna vedenpitävyyden varmistamiseksi. [6 s. 4 & s.27]

## 4.3 Rasitusluokan määrittäminen

Rasitusluokka valitaan tapaus- ja rakenneosakohtaisesti, esimerkiksi Betoniyhdistyksen julkaisun BY 68 ohjeiden perusteella. Vesialtaissa ja säiliöissä käytetään yleensä yhdistettyä rasitusluokkaa XC3,4;XF3, joka kattaa karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion sekä jäätymis-sulamisrasitukset.

Jos vesi sisältää betonille haitallisia kemikaaleja, kuten jätevesialtaissa, tulee kemiallinen rasitus ottaa huomioon rasitusluokan määrittelyssä. Tällöin nesteen vaikutus arvioidaan näytteiden perusteella [2 s.74-77].

Mikäli veden kemiallisesta koostumuksesta ei ole tarkkaa tietoa, suositellaan oletusarvoisesti vähintään rasitusluokkaa XA2. Rakennettaessa

sulfaattipitoiselle maalle maaperä ja pohjavesi on tutkittava rasisluokan oikeaa valintaa varten [2 s. 23-26].

Jätevesisäiliöiden suunnittelussa on tärkeää varmistaa riittävä tuuletus. Altaiden pohjalle muodostuva lietekerros voi sisältää bakteeritoiminnan seurauksena syntyvää rikkivetyä. Rikkivety vapautuu säiliön ilmatilaan ja tiivistyy märille pinnoille. Jos ilmanvaihto ja kosteuden hallinta ovat puutteellisia, säiliön pinnoilla elävät bakteerit voivat hapettaa rikkivedyn rikkihapoksi. Rikkihapo ja sulfaatit syövyttävät betonia aiheuttaen niin kutsuttua biologista rasisusta [2 s. 27-28]. Tämä tulee erityisesti huomioida pitkien viemäriinjojen suunnittelussa, joissa ilmanvaihto on heikkoa.

#### 4.4 Betonin koostumuksen määrittäminen ja kutistuman sekä paisumisen hallinta

Rakennesuunnittelija määrittää kovettuneelta betonilta vaadittavat ominaisuudet, joiden perusteella betoni valmistetaan yleensä valmisbetonina. Vedenpitävissä rakenteissa betoni voidaan määrittää myös koostumuksen mukaan yhteistyössä suunnittelijan, työmaan ja betonin valmistajan kesken, jolloin huomioidaan mm. tiivistettävyyden ja valettavuus.

##### 4.4.1 Kutistuman hallinta

Halkeilun ehkäisemiseksi betonin koostumuksessa tulee huomioida:

- sementtityyppi (esim. nopeasti kovettuva sementti varhaisvaiheen lujouden nostamiseksi),
- karkean kiviaineksen suuri osuus (väh. 15 %, suositus yli 35 %),
- riittävän suuri maksimiraekoko (esim.  $\leq 20$  mm ohutrakenteissa,  $\leq 40$  mm massiivirakenteissa),
- pieni vesimäärä,
- kutistumaa vähentävät lisäaineet (SRA-aineet).

Betonimassan suunnittelussa tulee varmistaa valettavuus ja tiivistettävyyys. Rae-koon tulee olla vähintään 3 mm pienempi kuin betonipeite, ja yli 32 mm rakeilla peitteen vähimmäispaksuus on 8 mm suurempi kuin raekoko. Lisäaineet voivat parantaa vedenpitävyyttä ja pienentää kutistumista, mutta Suomessa pitkäaikaisia käyttökokemuksia on vähän.

#### 4.4.2 Paisuman hallinta

Ettringiittilaajenemisen aiheuttaman halkeilun ehkäisemiseksi sementin sulfaattipitoisuus rajoitetaan alle 3,5 %. Sulfaattirasituksessa (XA2, XA3) tulee käyttää sulfaatinkestävää sementtiä tai masuunikuonaa sisältävää sideainetta (väh. 70 %). XA1-luokassa riittää vesisementtisuhteen hallinta. Liiallinen kipsi sementissä voi lisätä paisuntaa ja heikentää lujuuden kehitystä.

Suunnittelussa kannattaa hyödyntää betonitoimittajien asiantuntemusta, ennakkokokeita ja laskentaohjelmistoja.

#### 4.5 Suurimman sallitun halkeamaleveyden määrittäminen

Suurimman sallitun halkeamaleveyden määrittäminen perustuu rakenteen rasi- ja tiiviysluokkiin, joista käytetään tiukempia vaatimuksia. Halkeilurajoitteet voivat vaihdella sallitusta halkeamaleveydestä aina täysin vetojännityksettömään tilaan, joka edellyttää jännitetyistä rakenteista. Tiiviysluokka vaikuttaa suoraan siihen, vaaditaanko rakenteelta vetojännityksetön tila tai sallitaanko halkeamia.

Tiiviysluokassa 2 halkeamien tulee olla estetty kokonaan. Tämä vaatii, että osa rakenteen poikkileikkauksesta on jatkuvasti puristuksen alainen kaikissa kuormitustapauksissa. Puristusvyöhykkeen korkeuden tulee olla vähintään 20 % poikkileikkauksen korkeudesta ja vähintään 50 mm. Tiiviysluokissa 0 ja 1 sallitaan halkeamat, mutta niiden leveys tulee rajoittaa standardien mukaisiin raja-arvoihin, joita voidaan arvioida joko Betoninormien tai Eurokoodien mukaan.

Näiden laskentatapojen raja-arvot eroavat hieman, joten tuloksia tulee verrata käytetyn normin arvoihin.

Vetojännityksettömän tilan saavuttaminen tiiviysluokassa 3 vaatii jännitetyistä rakenteista, joiden tarkastelu rajataan tämän työn ulkopuolelle. Mikäli rakenne ei halkeile (esim. vetojännitys ei ylitä betonin murtovenymää), ei haljenneen tilan tarkastelua tarvitse tehdä. Pitkäaikaiskuormituksissa tulee huomioida betonin viruman vaikutus kimmokertoimeen.

Lisäksi rakenteeseen kohdistuvan veden koostumus voidaan ottaa huomioon: jos vesi sisältää paljon hienoainesta, joka voi tukkia halkeamia, voidaan suurinta sallittua halkeamaleveyttä perustellusti kasvattaa. Tällöin suunnittelijan tulee arvioida myös vedenpaineen vaikutukset rakenteeseen.

#### 4.6 Rakenteen kuormitukset käyttörajatilassa

Käyttörajatilassa rakenteen mitoituksessa on huomioitava pitkä- ja lyhytaikaiset kuormat sekä betonin muodonmuutoksista (kutistuma ja lämpöliikkeet) aiheutuvat pakkovoimat. Ulkoisten kuormien, kuten veden ja maanpaineen, aiheuttamat rasitukset voidaan määrittää FEM-ohjelmilla tai taulukkoarvoin.

Pakkovoimien arviointi edellyttää muodonmuutosten ja niitä rajoittavien tekijöiden tuntemista. Pienissä kohteissa voidaan oletuksena käyttää täysin estettyjä muodonmuutoksia yksinkertaistamisen vuoksi, mikä kasvattaa rauditusmäärää mutta voi pienentää suunnittelukustannuksia. Tarkempaa analyysiä varten voidaan laskea pakkovoimakertoimia.

Betonin kutistumaa arvioidaan yksinkertaistetuilla menetelmillä, joista Eurokoodien ja ACI 209R-92 -standardien mukaiset tavat ovat suositeltavimpia. Eurokoodien mukainen menetelmä antaa varovaisempia, pitkäaikaisjännityksiä paremmin huomioivia tuloksia, kun taas ACI:n menetelmä soveltuu paremmin kutistuman alkuvaiheen tarkasteluun. Betoninormien mukainen menetelmä ei ole suositeltava sen yksinkertaisuuden ja rajallisen sovellettavuuden vuoksi.

Kutistumasta aiheutuvat pakkovoimat tulee huomioida erityisesti altaiden tyhjenyksissä, sillä kuivuminen voi aiheuttaa uusia halkeamia. Rakenteen pinnoittaminen ennen käyttöönottoa vähentää halkeiluriskiä.

#### 4.7 Vaaditun raudoituksen määrittäminen

Eurokoodien mukainen halkeamaleveyden laskenta perustuu teräksen ja betonin venymäeron sekä halkeamavälin arviointiin. Laskennassa oletetaan betonin vedetty osa haljenneeksi eikä sen vetolujuutta huomioida. Halkeamaleveyden laskentaesimerkit on esitetty työn liitteessä.

Halkeilua voidaan myös rajoittaa ilman tarkkaa laskentaa käyttämällä standardin SFS-EN 1992-3 taulukkomitoitusta. Taulukkomitoituksessa valitaan suurin sallittu tankokoko tai -väli vallitsevan teräsjännityksen ja halkeamaleveyden perusteella. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ohjearvoja, joissa ulkonäköhaittojen ehkäisyyn riittää, että teräsjännitys ei ylitä  $0,6 \cdot f_{yk}$  kuormayhdistelmillä tai  $0,8 \cdot f_{yk}$  pakkovoimilla.

Standardi BS8007:1987 antaa suosituksia sallituille teräsjännityksille suunnittelun halkeamaleveyden mukaan: esim. 100 MPa 0,1 mm ja 130 MPa 0,2 mm halkeamaleveyksillä. Myös Australian standardi AS 3600-2009 esittää rajoja ja taulukoita, joiden avulla voidaan valita tankokoko tai -väli halkeamien hallintaan – suurin sallittu jännitys tällöin on 80 %  $f_{yk}$ .

Käytännön kokemusten mukaan halkeamaleveyden rajoittaminen 0,1–0,2 mm voidaan saavuttaa rajoittamalla teräsjännitys arvoon 120 MPa. Pyöreiden altaiden vaakaraudoitusta voidaan arvioida liitteen taulukoiden avulla rengasvoimien ja sallittujen halkeamaleveyksien perusteella.

Riippumatta valitusta mitoitusmenetelmästä, rakenteessa tulee olla vähintään minimirauditus.

#### 4.8 Murtorajatilán tarkastelu vedenpitävissä betonirakenteissa

Vedenpitävissä betonirakenteissa käyttörajatilan vaatimukset, erityisesti halkeilun hallinta, määräävät usein raudoitusmäärät, jolloin murtorajatilan mukainen mitoitus jää toissijaiseksi. Murtorajatilan tarkastelu voi kuitenkin olla tarpeen esimerkiksi kustannusoptimoinnissa tai tapauksissa, joissa kantavuus on ainoa vaatimustekijä ja käyttörajatilan vaatimukset täytetään muilla keinoin, kuten pinnoitteilla.

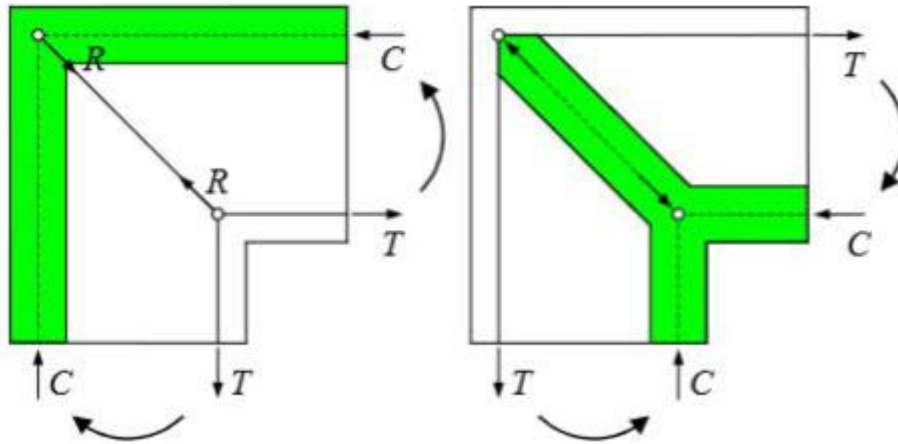
Säiliöiden ja altaiden kuormat määräytyvät geometrian, sisällön, pintojen kitkan sekä täyttö- ja tyhjennystapojen mukaan. Täyden säiliön tilanne tulee huomioida onnettomuustilanteena, jos käyttötilanne poikkeaa siitä. Vedenpaine käsitellään kiinteänä muuttuvana kuormana, ja sen osavarmuuskerroin on pääsääntöisesti 1,5, mutta voidaan pienentää tietyin edellytyksin. Edullinen ulkopuolinen paine saa kertoimen 0,8, mikäli sen pysyvyys varmistetaan.

Täyttö- ja tyhjennysprosessien aiheuttamat kuormat sekä mahdolliset imupaineet tulee huomioida mitoituksessa. Betoniseinät kannattaa mitoittaa siten, että leikkausvoima ei vaadi leikkausraudoitusta, jolloin leikkaus- ja taivutusvoimien yhteisvaikutusta ei tarvitse huomioida vetoraudoituksessa. Yleisesti ottaen käyttörajatilamitoituksen vaatima raudoitus ylittää murtorajatilavaatimukset, jolloin lisäkapasiteettia ei yleensä tarvita.

Aksiaaliset voimat tulee huomioida, mutta niiden vaikutus raudoitukseen voidaan monesti sivuuttaa vedenpitävissä rakenteissa, koska käyttörajatilavaatimukset ovat tiukemmat. Jännitetyt rakenteita ei käsitellä tässä työssä.

#### 4.9 Seinien nurkkaliitokset

Betonirakenteiden nurkkaliitoksissa esiintyvä halkeilu voidaan estää huolellisella raudoitussuunnittelulla. Nurkkiin voi kohdistua sekä avaavia että sulkevia taivutusrasituksia riippuen rakenteen käyttötarkoituksesta: sisäinen paine (kuten altaissa) aiheuttaa avaavan momentin, kun taas ulkoinen paine (kuten maanalaisissa rakenteissa) sulkevan momentin.



Kuva 8. Ristikkomallit avaavalle ja sulkevalle momentille [10 s. 3]

Nurkkaan tarvittavaa raudoitusta voidaan arvioida ristikkomenetelmällä, jota hyödynnetään yleisesti murtorajatilan tarkastelussa, mutta myös käyttörajatilassa, mikäli menetelmän vaatimukset täyttyvät. Optimitilanteessa nurkan taivutuskestävyys vastaa siihen liittyvien osien kestoja, ja tätä kuvataan nurkan tehokkuudella.

Nurkkaraudoitusten toimivuutta on tutkittu kuormituskokeilla, joissa tehokkuuden arviointiin käytetään mekaanista raudoitussuhdetta ( $\omega_s$ ), joka ottaa huomioon sekä betonin että teräksen ominaisuudet toisin kuin pelkkä geometrinen raudoitussuhde. Mekaaninen raudoitussuhde voidaan laskea kaavalla:

$$\omega_s = \rho(f_{yk}/f_{ck}) = A_s f_{yd} / b d f_{cd}$$

jossa  $\rho$  on geometrinen raudoitussuhde [10 s. 26]

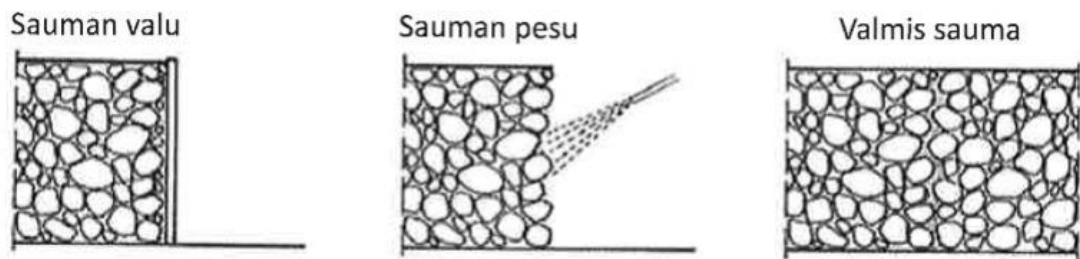
## 5 Työ- ja liikuntasauojen suunnittelu

### 5.1 Työsaumat

Vedenpitävissä betonirakenteissa työsaumojen sijainti ja toteutustapa tulee esittää suunnitelmissa rakenteiden korkean vaatimustason vuoksi. Työsaumat

sijoitetaan kohtiin, joissa betonointi keskeytyy pitkäksi aikaa, ja niiden kohdalla on otettava huomioon heikommat lujuusominaisuudet verrattuna yhtenäiseen poikkileikkaukseen. Tartunnan varmistamiseksi raudoituksen tulee ulottua riittävästi sauman yli. Työsaumojen määrää voidaan vähentää liukuvalutekniikalla.

Lujuudeltaan ja kestävyydeltään paras vaihtoehto on pesty työsauma, jossa laasti poistetaan pinnasta 2–5 mm. Se voi saavuttaa jopa 70 % betonin vetolujuudesta, ja sen leikkauskestävyys vastaa homogeenista betonia. Pestyn työsauman onnistunut toteutus vaatii oikean ajoituksen ja sopivat muotit, kuten esimerkiksi levyä tai työsaumaverkkoa.



Kuva 9. Pestyn työsauman toteutus [28 s. 259]

Työsaumat voidaan tiivistää paisuvilla saumanauhoilla, jotka turpoavat vedessä ja tiivistävät sauman, tai vedenpitävillä muovi- tai kumiliuskoilla. Nauhojen sijoittamisessa on noudatettava valmistajan ohjeita ja varmistettava riittävät betoni- peitteet. Esimerkiksi pohjalaatan ja seinän liitoksessa voidaan käyttää 100–150 mm koroketta rakenteen kestävyuden parantamiseksi.



Kuva 10. Paisuvan saumanauha sijoittaminen työsaumaan [11]

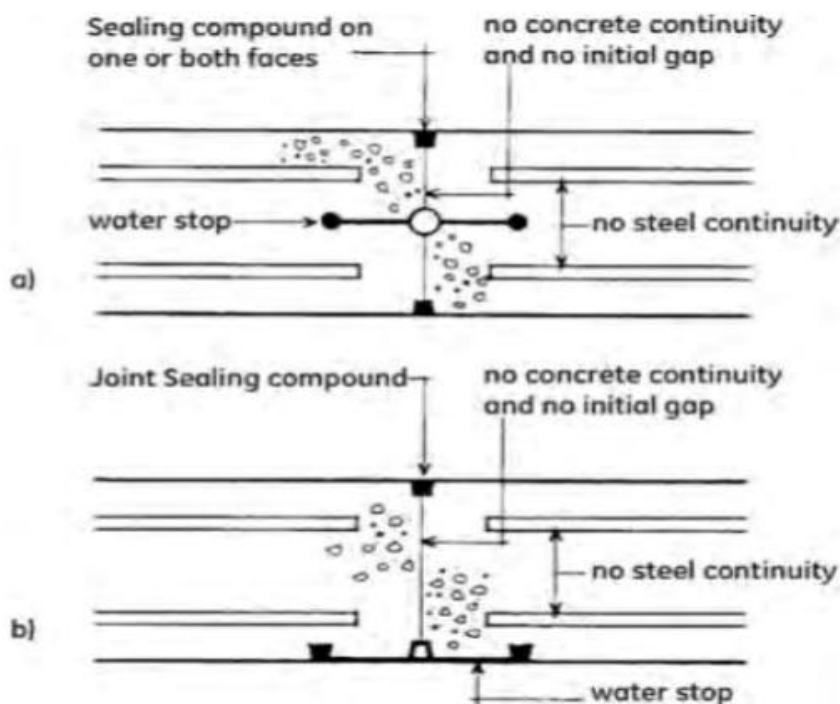
Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää injektointiletkuja, joihin pumpataan injektiomassaa betonin kovetuttua, jolloin sauman mahdolliset vuodot voidaan paikantaa ja tiivistää jälkikäteen.



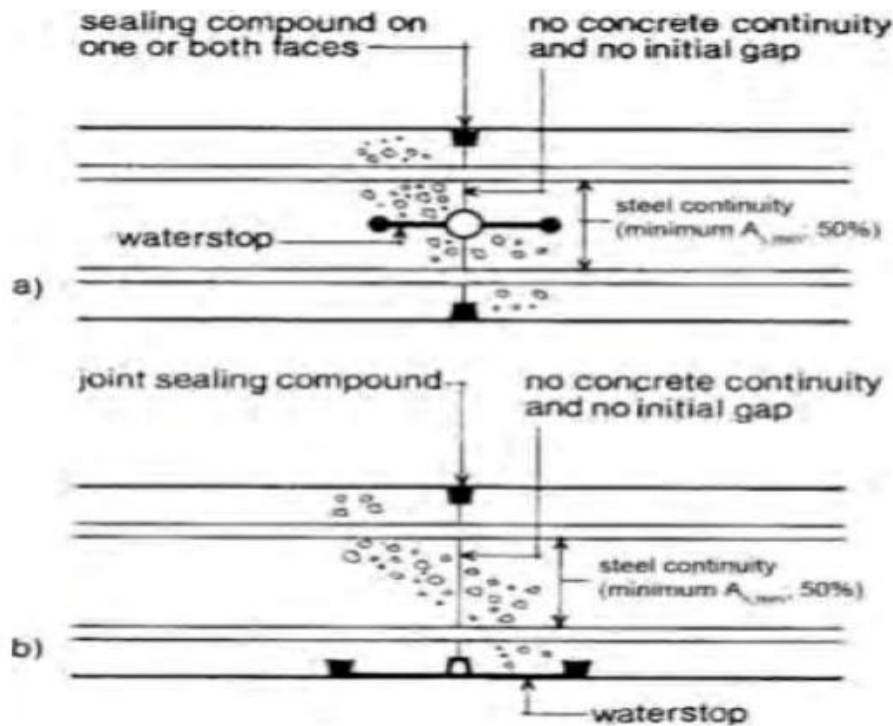
Kuva 11. Injektointiletkun käyttö [12]

## 5.2 Liikuntasaumamat

Jos rakenteen halkeilua ei voida tehokkaasti ja taloudellisesti hallita, voidaan vedenpitävät betonirakenteet toteuttaa liikuntasaumoin. Suunnittelussa on tärkeää huomioida käyttöolosuhteet ja tiiviysvaatimukset. Sauman muoto vaikuttaa sekä tiivyyteen että huollettavuuteen, koska saumatiivisteiden käyttöikä on usein lyhyempi kuin itse rakenteen. Liikuntasaumanauhat, jotka sisältävät keskellä olevan ontelon, mahdollistavat sauman liikkumisen ja tiivistämisen joustavasti. Nauhojen tyypit ja leveydet valitaan ympäristötekijöiden ja vedenpaineen mukaan. Sauman pinnat tiivistetään esimerkiksi tiivistysmassalla tai tiivistenaullahalla.



Kuva 12. Täysin vapaan kutistumissauman toteutus (a = seinä, b = lattia) [6 s.110]



Kuva 13. Osittain vapaan kutistumissauman toteutus (a = seinä, b = lattia) [6 s. 111



Kuva 14. Esimerkki projektin rakenteiden liikuntasaumadetaljit [Luku 7]

Liikuntasaumojen suositeltu väli on 1,5 kertaa seinän korkeus tai vähintään 5 metriä. Saumojen avulla hallitaan myös eri aikaan valettujen osien välisiä pakkoimia. Liikuntasaumat jaetaan kutistumisen, laajenemisen ja liukumisen salliviin saumoihin. Kutistumissaumojen on kahta tyyppiä: täysin vapaita (ei raudoitusta sauman yli) ja osittain vapaita (osa raudoituksesta jatkuu). Raudoituksen enimmäismäärä vaihtelee, mutta sen tulee olla kohtuullinen.

Laajenemissaumoissa rakenteiden väliin jätetään rako, joka täytetään joustavalla materiaalilla ja tiivistetään, jotta kiinteä aines ei pääse saumaan. Yleensä rauditus katkeaa näissä saumoissa, mutta poikittaissuuntaisia kuormia varten voidaan käyttää liukuvia saumateräksiä, jotka mahdollistavat rakenteen liikkeen.

Liukumisen sallivat saumat soveltuvat esimerkiksi säiliöiden kansien ja seinien tai pohjalaatan ja seinän välisiin liitoksiin. Ne toteutetaan matalakitkaisilla liukulevyillä ja liikuntasauমানauhoilla, ja sauman sisäpinta tiivistetään elastisella massalla.

## **6 VEDENPITÄVIEN BETONIRAKENTEIDEN TOTEUTUS**

### **6.1 Betonityönjohto ja sen tehtävät**

Betonointityömaalla betonityön suorituksesta vastaa betonityönjohtaja, jolla on oltava kohteen rakenneluokan edellyttämät pätevyudet. Hänen on oltava joko itse tai edustajansa kautta läsnä koko betonoinnin ajan. Betonityönjohtajan tehtäviin kuuluu betonityösuunnitelman laatiminen, työn eri vaiheiden tarkastaminen sekä laadunvarmistussuunnitelman mukaisten tarkastusasiakirjojen valmistelu ja täyttäminen kaikista tarkastusta vaativista työvaiheista. [18 s. 220].

### **6.2 Betonityösuunnitelma**

Ennen betonitöiden aloitusta betonityönjohtaja laatii betonityösuunnitelman yhteistyössä rakennesuunnittelijan, betonin toimittajan, muotti- ja tukitoimittajan sekä muiden työnjohtajien kanssa. Suunnitelmassa käsitellään kaikki rakennuskohteen betonityöt sekä niihin liittyvät erityistoimenpiteet, ja sen laajuus määräytyy kohteen vaativuuden mukaan.

Koska betonin kutistumiseen ja halkeiluun vaikuttavat monet tekijät, suunnitelmassa pyritään huomioimaan nämä ja ohjeistetaan niiden hallintaan liittyvät toimet. Työn onnistumiseksi betonityönjohdon tulee varmistaa, että kaikki työn

toteuttajat ymmärtävät tehtävänsä ja riskit, ja että toimenpiteet suunnitellaan ja käydään läpi etukäteen.

Vedenpitävissä betonirakenteissa erityistä huomiota tulee kiinnittää muun muassa muotteihin, raudoitukseen, betonointiosien jakoon, saumojen toteutukseen, betonin ominaisuuksiin ja betonoinnin suorittamiseen. Lisäksi on huomioitava resurssit, valun jälkeiset toimenpiteet, erityismenettelyt, työturvallisuus, tarkastukset sekä laadunvarmistus. Betonityösuunnitelmaa täydennetään projektin aikana, ja lisäksi laaditaan erilliset betonointisuunnitelmat yksittäisille betonirakenteille. [18 s. 221].

## 6.3 Betonityösuunnitelma

### 6.3.1 Valunopeus

Betonointityössä on tärkeää hallita valunopeus, sillä liian nopea valaminen voi aiheuttaa betonimassan erottumista, jolloin vesi jää suurten kiviainesten ja vaakasuuntaisten raudoitteiden alle. Tämä voi kuivumisen myötä johtaa huokosiin tai onkaloihin rakenteessa. Vedenpitävissä betonirakenteissa valunopeus tulisi rajoittaa enintään 0,25 metriin tunnissa. Lisäksi mahdollisten onkaloiden ja halkeamien sulkeutumiseksi rakenteet tulee jälkitäryttää. [18 s. 340].

### 6.3.2 Jälkihoito

Betonin jälkihoito käsittää toimenpiteet, joilla varmistetaan rakenteen suunnittelujen ominaisuuksien saavuttaminen. Erityisesti vedenpitävissä betonirakenteissa jälkihoito on kriittistä, sillä sen avulla voidaan ehkäistä pintojen kuivumisesta aiheutuvia halkeamia ja varmistaa betonin lujuuskehitys. Jälkihoito jaetaan kahteen vaiheeseen: varhaisjälkihoitoon ja varsinaiseen jälkihoitoon.

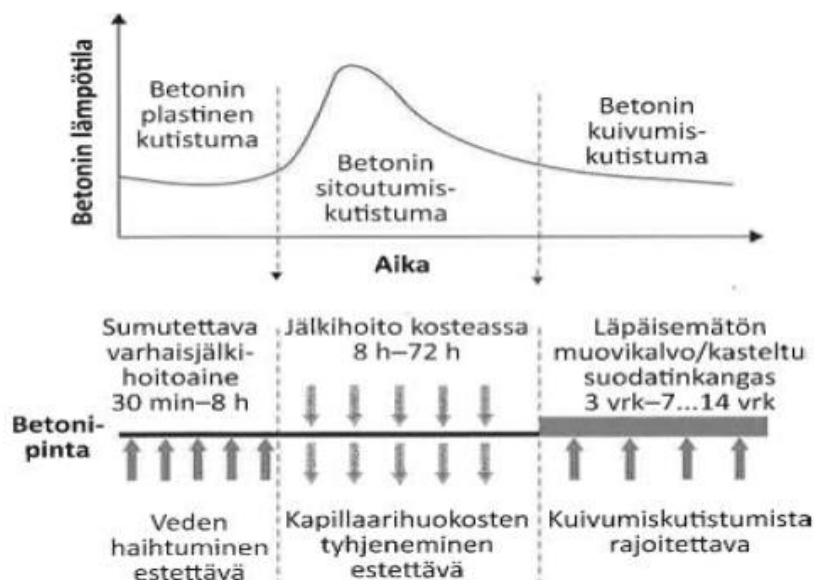
Varhaisjälkihoito aloitetaan heti pintojen tasaamisen jälkeen, erityisesti silloin, kun haihtumisnopeus ylittää  $1,0 \text{ kg/m}^2$ . Plastisen vaiheen aikana käytetään

sumutettavia aineita tai ilmankosteuden säätelyä, koska betoni ei vielä kestä kastelua tai peittämistä.

Varsinainen jälkihoito alkaa viimeisen hiertämisen jälkeen, joskus jo sen aikana, ja sen tavoitteena on estää kosteuden poistuminen betonista. Pintaan levitetään jälkihoitoaine ja pinta suojataan muovikalvolla. Kylmissä olosuhteissa on huolehdittava myös pakkassuojauksesta.

Betoninormien mukaan jälkihoidon kesto määräytyy rasitusluokan mukaan: esimerkiksi rasitusluokissa XC0 ja XC1 jälkihoito voidaan lopettaa, kun betoni on saavuttanut 50 % nimellislujuudestaan, ja luokissa XF2 ja XF4 vasta 80 % lujuuden kohdalla.

Betonin lujuudenkehitystä voidaan arvioida mittaamalla lämpötila ja käyttämällä Sandgroven menetelmää, jossa lasketaan betonin kypsyysikä lämpötilan ja ajan perusteella. Erityistä huomiota tulee kiinnittää korkealujuusbetoneihin ja betoneihin, joissa on käytetty silikajauhetta tai masuunikuonaa, sillä niiden jälkihoito vaatii pidemmän keston ja huolellisemman kosteudenhallinnan erityisesti kylmässä.



Kuva 15. Jälkihoidon toteutuksen periaate [16 s. 49].

### 6.3.3 Betonin lämpökäsittely ja lämpötilan hallinta

Betonin lämpökäsittely tarkoittaa betonin lämpötilan nousua valmistuksen eri vaiheissa, joko tarkoituksellisesti tai tahattomasti. Betonia pidetään lämpökäsittelyynä, jos jokin seuraavista ehdoista täyttyy: betonimassan lämpötila ylittää +40 °C betonoinnin aikana, kovettumisvaiheen aikana lämpötila nousee yli 25 °C, tai kokonaislämpötila kohoaa yli +50 °C.

Lämpökäsittelyä käytetään erityisesti muottikierron nopeuttamiseksi ja kylmissä olosuhteissa betonoinnin mahdollistamiseksi. Ennen lämpökäsittelyn aloittamista tulee laatia lämpökäsittelysuunnitelma, jossa arvioidaan vaikutukset betonin ominaisuuksiin esimerkiksi ennakkokokeiden avulla.

Lämpökäsittelyssä on tärkeää hallita kosteustasapaino ja lämpötilan nousu, sekä ajoittaa käsittely oikein. Liian aikainen tai nopea lämpökäsittely voi haitata sementin hydrataatioreaktiota ja heikentää lopullista lujuutta. Vedenpitävissä rakenteissa lämpökäsittelyä suositellaan vältettäväksi riskien vuoksi, mutta jos se on tarpeen, tulee lämpötila rajoittaa enintään +60 °C ettringiittireaktioiden estämiseksi. Lisäksi tulee varmistaa, että eri rakenteen osien välinen lämpötilaero ei ylitä 20 °C halkeilun ehkäisemiseksi.

### 6.4 Laadunvalvonta

Betonimassan vaatimustenmukaisuus on betonivalmistajan vastuulla, ja sitä valvotaan jatkuvasti SFS-EN 206 -standardin mukaisesti. Vesitiiviiden betonilaa- tujen kelpoisuus varmistetaan ennakkokokeilla ennen käyttöönottoa. Ennakkokokeissa testataan vesitiiviydeltään heikoimmat koostumukset SFS-EN 12390-8 -standardin mukaisesti, ja jos veden tunkeutumissyvyys ylittää 100 mm, betonin koostumusta on muutettava ja testattava uudelleen. Vuosittaisilla laadunvalvontakokeilla valvotaan edelleen betonin vesitiiviyttä.

Kovettuneen betonin puristuslujuutta arvioidaan rakenteesta poratuilla koekappaleilla, erityisesti jos on syytä epäillä betonin laatua. Testausten määrä riippuu siitä, onko kyseessä normaali valvonta vai epäily vaatimustenvastaisuudesta.

Ennakkokokeet ovat välttämättömiä esimerkiksi pakkasenkestävyyttä edellyttävälle betonille, itsetiivistyvälle betonille ja lämpökäsittelyä käytettäessä. Vedenpitävyyden varmistamiseksi voidaan lisäksi testata halkeiluun vaikuttavia ominaisuuksia, kuten kutistuvuutta ja lämmöntuottoa.

Työmaalla laadunvarmistus kattaa kaikki betonirakenteen valmistusvaiheet, ja niistä pidetään kirjaa. Aloituskokous on suositeltavaa järjestää ennen vedenpitävien rakenteiden rakentamista, ja siitä laaditaan pöytäkirja. Laadunvalvonnan vaatimukset määräytyvät toteutusluokan mukaan: vedenpitävät rakenteet kuuluvat usein luokkaan 2 tai 3. Tällöin laaditaan erillinen laatusuunnitelma, joka on pidettävä työmaalla.

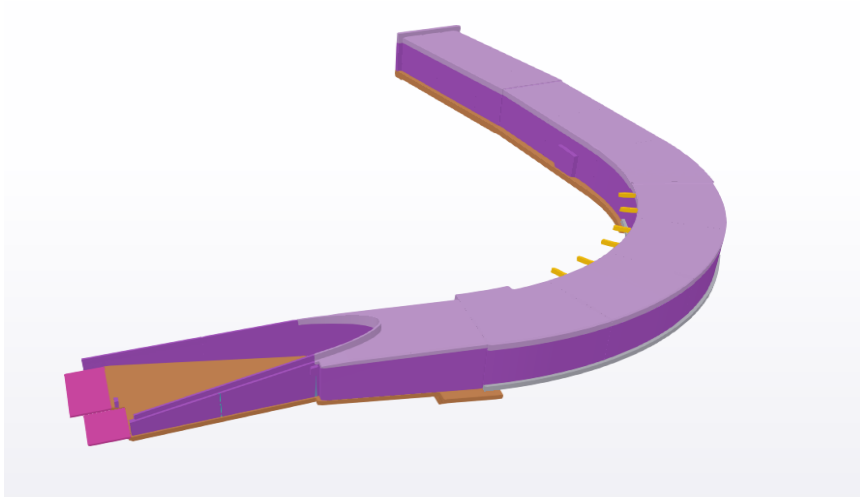
Valvontaan kuuluvat muun muassa muotti- ja raudoitustyöt, betonointi, tiivistäminen, jälkihoito ja mahdollinen lämpökäsittely. Toteutusluokassa 2 tarkastukset ovat pääosin silmä määräisiä, mutta keskeisissä kohdissa tehdään säännöllisiä mittauksia. Toteutusluokassa 3 tarkastetaan kaikki merkittävät rakenteet yksityiskohtaisesti.

Kaikista työvaiheista ja olosuhteista kerätään yksityiskohtaiset tiedot, jotka dokumentoidaan esimerkiksi betonointipöytäkirjaan. Näitä asiakirjoja säilytetään vähintään viranomaisten ja suunnittelun edellyttämän ajan.

## **7 Esimerkki kohde**

Tämän opinnäytetyön esimerkki projektina on Laakson sairaalan T1-maanalainen tunneli. Rakenteen toteutuksen syynä on lisätä liittymä Nordenskiöldinkadulta Meilahden alueella olevaan tunneliverkostoon.

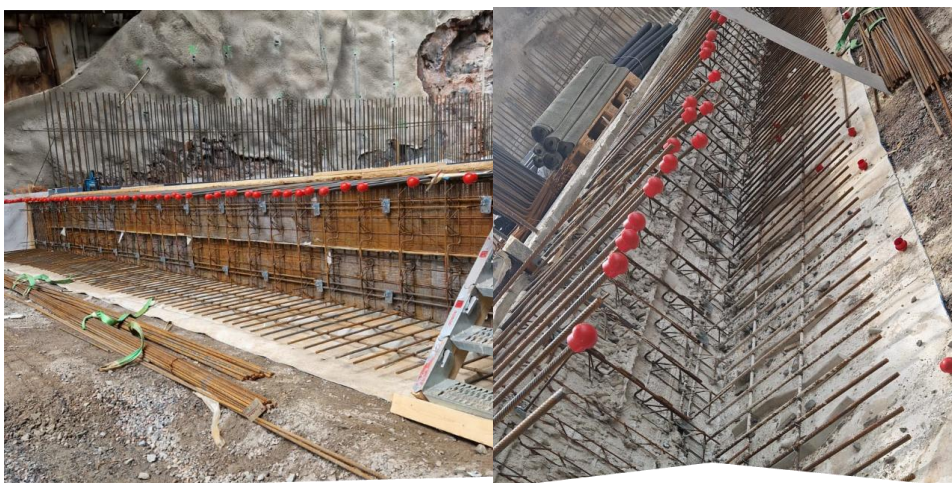
Tunnelin kokonaispituus on noin 200 metriä ja kokonaisuus on jaettu toteutuksessa 11 eri lohkon työ- ja liikuntasaumalla



Kuva 16. T1-tunnelin rakennemalli

Lohkot 1-2 ja 7-11 ovat maanvaraisen laatan päällä ja 3-6 ovat anturaperusteisia lohkoja. Lohkojen välillä on joko liikunta- tai työsaumoja noin 18 metrin välein.

Työsaumojen ja liikuntasaumojen vedeneristys- ja materiaaliksi käytettiin tämän työn tilaajan edustamaa Stremaform järjestelmää. Stremaform on valmis muot- tielementti, jossa saumoihin tyypitettävät komponentit ovat osa valmista ele- menttiä[29]. Laatan-, holvin- ja seinien työsaumoihin käytettiin stremaform val- mis elementin kanssa insinööritoimisto Sulin Oy:n edustamat tiivistystuotteet. Tiivistystuotteena käytettiin Fradiflex- työsaumapelti, Intec-injektointi ja Cresco- paisuvaanauhaa[30].



Kuva 17. T1-tunnelin maanvaraisen laatan työsauma



Kuva 18. T1-tunnelin seinän työsaumat

Liikuntasaumoissa rakenteen kaikkien rakenneosien saumojen kohdalla 2 ker-  
tainen liikuntasaumakumi, joka oli osa Stremaform liikuntasauma elementtiä  
[29].



Kuva 19. T1-tunnelin seinän liikuntasaumat.

Tunnelin vedentiiveyttä varmistettiin saumatiivistysten lisäksi myös ulkopuolisella vedeneristysjärjestelmällä Zemseal tuoteperheellä [25]. Tunnelin vedeneriste kiertää tunnelia kaikkia maanvastaisia pintoja pitkin. Lohko 1 suuaukoa lukuun ottamatta tunnelin kaikki muut lohkot jäävät maanalle kokonaan.



Kuva 20 T1-tunnelin seinän ulkopuolinen vedeneristys.

## 8 Yhteenveto

Opinnäytetyö käsittelee vesitiiviiden betonirakenteiden suunnittelua ja toteutusta sekä erityisesti halkeamien hallintaa. Työssä tarkastellaan, kuinka betonin materiaalitekniset ominaisuudet, kuten puristus- ja vetolujuus, kimmokerroin, venyvyys ja kutistumiskäyttäytyminen vaikuttavat rakenteen tiiveyteen ja kestävyteen. Halkeilun hallinta on keskeistä vesitiiviissä rakentamisessa, sillä halkeamat muodostavat riskin veden läpäisylle ja rakenteen käyttöiän lyhenemiselle.

Työssä korostetaan suunnittelu- ja toteutusvaiheen yhteistyön merkitystä: oikea betonikoostumus, huolellinen raudoitus, saumaratkaisut ja jälkihoito ovat avainasemassa. Erityistä huomiota kiinnitetään vedenpitävyyttä parantaviin lisäaineisiin, kuten kidepohjaisiin tiivistysaineisiin (esim. Xypex), jotka muodostavat mikrokiteitä betonin huokosiin ja halkeamiin, estäen veden tunkeutumisen. Työssä käsitellään myös normipohjaista halkeamaleveyden rajoittamista sekä eri tiiviysluokkien vaatimuksia.

Toteutusvaiheen esimerkkinä toimii Laakson sairaalan maanalainen tunneli, jossa työ- ja liikuntasaumoihin sovellettiin useita vedeneristysratkaisuja. Kokonaisuudessaan työ yhdistää teoreettisen tietopohjan ja käytännön kokemuksen, ja tarjoaa kattavan näkemyksen vedenpitävien betonirakenteiden suunnittelun ja toteutuksen parhaista käytännöistä.

## Lähteet

- [1] SFS-EN 1992-1-1+A1+AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2015
- [2] BY 68: Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016, Suomen Betoniyhdistys ry, 2017
- [3] P. Iso-Mustajärvi, RTEK-3140 Betonitekniikka, Tampereen teknillinen yliopisto, 2013
- [4] M.V. Leskelä, BY 210: Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, Suomen Betoniyhdistys ry, 2008
- [5] EN 1992-3:2006. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 3: Nestesäiliöt ja siilot + kansallinen liite, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006
- [6] J. P. Forth, A.J. Martin, Design of Liquid Retaining Concrete Structures, Whittles Publishing, 2014
- [7] SFS-EN 12390-8 Kovettuneen Betonin Testaus: Osa 8: Paineellisen veden tunkeutumasyvyys, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2009
- [8] Köster TPO Aqua 1.5 –Tekninen tuotekortti, Alimex Oy, 2017
- [9] BY 65: Betoninormit 2016, Suomen Betoniyhdistys ry, 2017
- [10] M. Johansson, Structural Behaviour in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelters, Chalmers University of Technology, 2000
- [11] Semtu Oy, PC Bentostrip -paisuva työsaumanauha tuote-esite, 2016

- [12] Köster Vedeneristysjärjestelmät, Rakennesaumojen injektointi injektointilet-kulla,[https://www.koster.fi/fi\\_fi/foa-141-130rakennesaumojen+injektointi+injektointi-letkulla.html](https://www.koster.fi/fi_fi/foa-141-130rakennesaumojen+injektointi+injektointi-letkulla.html), luettu 15.5.2019
- [13] RIL 201-3-2013 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat – Vesirakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2013
- [14] Rakennustieto Oy, RT 83-11032 Vedenpaineeneristys, Rakennustietosäätiö RTS, 2011
- [15] SFS-EN 1990-A1+AC Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006
- [16] BY 67: Betonin kutistuman ja halkeilun hallinta, Suomen Betoniyhdistys ry, 2016
- [17] BY 211: Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013, Suomen Betoniyhdistys ry, 2013
- [18] BY 201: Betonitekniikan Oppikirja 2018, Suomen Betoniyhdistys ry, 2018
- [19] Vesitiiviin betonirakenteen koulutuksia ulkomaalaisilta yhteistyökumppaneilta, Max Frank AB, 2024
- [20] Vesitiiviin betonirakenteen koulutus materiaalit ulkomaalaisilta yhteistyökumppaneilta, Xypex Chemical Corporation, 2024
- [21] Vesitiiviin betonirakenteen koulutus materiaalit ulkomaalaisilta yhteistyökumppaneilta, Xypex Chemical Corporation, 2024
- [22] Xypex Admix C-1000 NF –Tekninen tuotekortti ja suoritustasoilmoitus, Insinööritoimisto Sulin Oy Oy, 2024

- [23] Xypex Concentrate – Tekninen tuotekortti ja suoritustasoilmoitus, Insinööritoimisto Sulin Oy Oy, 2024
- [24] MC- DUR PowerCoat –Tekninen tuotekortti, Insinööritoimisto Sulin Oy, 2024
- [25] Zemseal- Esiasennettu, täysin liimautuva vedeneristyskalvo –Tekninen tuotekortti, Insinööritoimisto Sulin Oy, 2024
- [26] Insinööritoimisto Sulin Oy:n arkisto kansiossa löytyviä dokumentteja ja tutkimuksia. Sulin Oy, 1990-2024
- [27] Insinööritoimisto Sulin Oy:n tarjoamien ratkaisujen ja tuotteiden referenssi-kohteet.
- [28] BY 201: Betonitekniikan Oppikirja 2018, Suomen Betoniyhdistys ry, 2018
- [29] Stremaform Työ- ja liikuntasaumaelementit –Tekninen tuotekortti, Insinööritoimisto Sulin Oy ,2024
- [30] Tiivistys-teknologiat ,vedeneristysjärjestelmiä –Tekninen tuotekortti, Insinööritoimisto Sulin Oy , 2024
- [31] Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2006. SFS-EN 1991-4+AC Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Siilot ja säiliöt.
- [32] Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2015. SFS-EN 1992-1-1+A1+AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu.
- [33] Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. BY 201: Betonitekniikan Oppikirja 2018. Helsinki: BY-Koulutus.
- [34] Suomen Betoniyhdistys ry. 2013. BY 211: Betonirakenteiden Suunnittelun Oppikirja - Osa 1. Helsinki: BY-Koulutus.

[35] Ympäristöministeriö. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteidensuunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.