

### 3 BETONIRAKENTEIDEN LAATUVAATIMUKSET

#### 3.1 Ympäristöluokitus

Sillankorjaustöissä noudatetaan taulukon 8 mukaista ympäristöluokitusta. Samassa sillassa voi olla erilaisissa rasitusluokissa olevia rakenneosia.

Suolaroiskeiden alaiseksi luetaan maa- ja välitukien pinnat, jotka ovat viittä metriä lähempänä talvihoitoluokkaan 1 / 24 / kuuluvaa suolattavaa tietä. Suolasumun alaiseksi luetaan vastaavien teiden siltojen päällysrakenteiden sivu- ja alapinnat.

Silikan määrä lisätään sementin määrään vesi-sementtisuhdetta laskettaessa. Vesi-sementtisuhdevaatus kerrotaan 0,9:llä yleissementtiä käytettäessä ja 0,8:lla masuunisementtiä käytettäessä.

Sillankorjaustöissä käytettävän vakiobetonin pak-  
kaskenkestävyysluokka on likimain P20 ja silikaa käytettäessä vähintään P30.

Taulukko 8. Siltarakenteiden ympäristöluokitus ja vastaavat laatuvaatimukset

| Ympäristö-<br>luokka | Rasitus ja rakenneosa                                                                                                        | Lujuus-<br>luokka | Pakkasen-<br>kestävyys-<br>luokka | Sallittu<br>halkeama<br>mm | Betoni-<br>peite<br>mm<br>min. | Vesi-<br>sementti-<br>suhde |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Y1—1                 | Normaali suolaus<br>— reunapalkki<br>— ajotielaatta<br>Merivesiraja                                                          | K35               | P40                               | 0,2                        | 40                             | 0,45                        |
|                      |                                                                                                                              | K40               | P40                               | 0,2                        | 50                             | 0,45                        |
| Y1—2                 | Normaali suolaus<br>— suojabetoni<br>— suolaroiskeiden alaiset rakenteet<br>Virtaavan veden vaikutuksen<br>alaiset rakenteet | K35               | P30                               | 0,2                        | 35                             | 0,45                        |
|                      |                                                                                                                              | K35               | P30                               | 0,2                        | 50                             | 0,45                        |
| Y1—3                 | Normaali suolaus<br>— suolasumun alaiset pinnat<br>Suolasumu- tai ilmastorasitus<br>— jännitetty päällysrakenne              | K35               | P30                               | 0,2                        | 30                             | 0,45                        |
|                      |                                                                                                                              | K40               | P30                               | 0,1                        | 30                             | 0,45                        |
| Y2—1                 | Suolahiekoitus tai ei suolausta<br>— reunapalkki<br>— ajotielaatta<br>Vesiraja (sisävesistö)                                 | K35               | P20                               | 0,3                        | 40                             | 0,50                        |
|                      |                                                                                                                              | K35               | P20                               | 0,3                        | 50                             | 0,50                        |
| Y2—2                 | Suolahiekoitus<br>— suojabetoni<br><br>Ilmastorasitus<br>— normaalisti raudoitettu<br>päällysrakenne<br>— muut alusrakenteet | K35               | P20                               | 0,4                        | 30                             | 0,50                        |
|                      |                                                                                                                              | K35               | P20                               | 0,3                        | 30                             | 0,50                        |
| Y2—3                 | Muut rakenteet                                                                                                               | K30               | P20                               | 1,0                        | 30                             | 0,60                        |

#### 3.2 Rakenneluokka ja lujuusvaatimukset

Jos sillan rakenneosa uusitaan tai siltaan tehdään uusia rakenneosia, määräytyy rakenneluokka normaaliin tapaan betoninormien mukaan. Siltarakenteissa tulevat kysymykseen luokat 1 ja 2.

Sillan korjaustyössä ja sen suunnittelussa noudatetaan yleensä rakenneluokan 2 periaatteita. Jos korjaustyö vaikuttaa sillan kantavuuteen, määräytyy rakenneluokka uudisrakentamisen tapaan.

Betonin lujuusluokka määräytyy yleensä rakenteen alkuperäisen suunnittelulujuuden mukaan. Ellei tietoja ole saatavissa, käytetään taulukkoa 8. Lujuusluokkavaatus ei korjaustöissä aina ole ehdoton, jos muut betonin säilyvyyden kannalta tärkeämmät ominaisuudet niin vaativat. Tästä on oltava maininta suunnitelma-asiakirjoissa.

### 3.3 Pakkasenkestävyysvaatimukset

---

Siltarakenteiden pakkasenkestävyyslukujen tavoitearvot on esitetty taulukossa 8.

Betonin pakkasenkestävyysvaatimus esitetään korjaussuunnitelmassa ilmoittamalla pakkasenkestävyysluku P. Pakkasenkestävät rakenteet jaotellaan pakkasenkestävyysluokkiin P20, P30 ja P40. Betonin pakkasenkestävyys on sitä parempi mitä suurempi pakkasenkestävyysluku P on. Pakkasenkestävyys riippuu betonin lujuudesta, sideaineen laadusta, ilmamäärästä ja suojahuokossuhteesta.

Betonin valmistaja voi valita sellaisen sideaineen, lujuuden, ilmamäärän tai suojahuokossuhteen yhdistelmän, että betonin pakkasenkestävyysluku täyttää asetetun vaatimuksen. Kohdan 6.3 mukai-

set vakiobetonit täyttävät kokemusten mukaan niille asetetut vaatimukset.

Pakkasenkestävyysluvun lisäksi pakkasenkestävän betonin on täytettävä seuraavat vaatimukset:

1. Jos pakkasenkestävyys todetaan ilmamäärämittauksen perusteella, betonin ilmamäärän on oltava kaikkien työvaiheiden jälkeen vähintään 4 %, kun betonin puristuslujuustulosten keskiarvo on korkeintaan 40 MN/m<sup>2</sup> ja vähintään 3 % muussa tapauksessa.
2. Jos pakkasenkestävyys todetaan suojahuokossuhteen perusteella, betonin suojahuokossuhteen on oltava vähintään 0,20, kun betonin puristuslujuustulosten keskiarvo on korkeintaan 40 MN/m<sup>2</sup> ja vähintään 0,15 muussa tapauksessa.

---

### 3.4 Tiiviysvaatimukset

---

Tiiviysvaatimukset täytetään yleensä, jos vesi-sementtisuhde ja lujuus ovat taulukon 8 mukaiset.

Vedenpitävyys saavutetaan yleensä, jos betonin vesi-sementtisuhde on korkeintaan 0,60 ja betonin lujuusluokka vähintään K30.

Valmiissa vesitiiviiksi tarkoitetussa rakenteessa ei saa olla rakenteellisia halkeamia.

Jos työsauman päälle ei tule vedeneristystä, on sauma tiivistettävä saumanauhalla.

---

### 3.5 Ulkonäkö ja tasaisuus

---

Betonipintojen luokitusohje / 25 / perustuu seitsemään betonipinnoissa yleisimmin esiintyvään laatu-tekijään. Siltojen korjaustöissä on laatuvaatimuksena luokka 2.

Näkyvät pinnat voidaan erikoistapauksessa tehdä pesubetonista, harjata, rimoittaa tai valaa rosoista kumimattoja vasten. Tällaista pintakerrosta ei lasketa kuuluvaksi betonipeitteeseen.

Vedeneristysten alustassa ei saa olla kuutta millimetriä suurempaa epätasaisuutta kahden metrin oikolaudalla mitattuna. Pinnan tulee vastata puuhierrettyä pintaa. Pinta suihkupuhdistetaan, jos päälle tulevan materiaalin työtapa sitä vaatii.

## 4 BETONIN OMINAISUUDET

### 4.1 Betonimassan kovettuminen

Betonimassan kovettumiseen vaikuttavat tekijät on tunnettava, jotta edellytykset korjaustyön onnistumiselle olisivat olemassa. Kovettumisreaktioihin vaikuttavat sementin, lisäaineiden ja seosaineiden ominaisuudet sekä betonimassan koostumus. Ulkoisista tekijöistä tärkeimpiä ovat säilytysaika, lämpötila ja kosteus.

Sementin laadulla, määrällä ja vesi-sementtisuhteella on kovettumisreaktiossa keskeinen merkitys. Lisäaineista hidastimet nopeuttavat yleensä kovettumista sen jälkeen, kun niiden hidastava vaikutus on lakannut. Sama vaikutus on yleensä notkistimilla ja joillakin huokostimilla.

Betonimassan kovettuminen voi suotuisissa olosuhteissa jatkua vuosikautia. Betonimassa kovettuu sitä nopeammin, mitä korkeampi sen lämpötila on, mutta betonin lopullinen lujuus on vastaavasti pienempi. Toisaalta korjausbetonoinnissa saa pakasella käyttää vain pakaslaasteja. Betonin lujuudenkehitystä voidaan arvioida ns. lämpöastevuoro-kausien (N) avulla (kuva 20), jotka lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$N = \sum (T + 10^{\circ}\text{C}) \times \Delta t$$

T = betonin lämpötila (°C)

$\Delta t$  = aika (vrk)

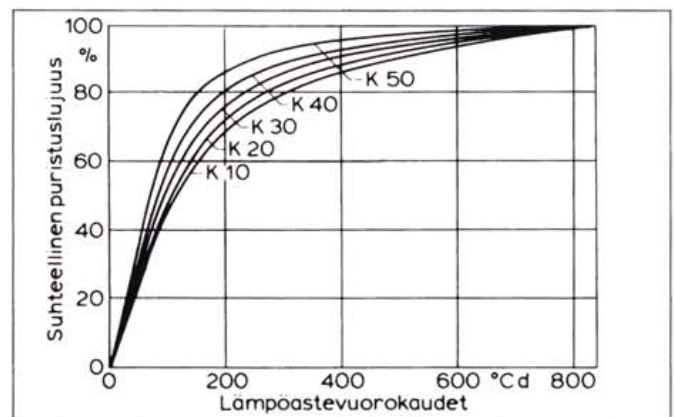
Betonimassan kovettumisreaktion edellytyksenä on riittävä vesimäärä. Tämän vuoksi betoni on pidettävä kosteana yleensä vähintään viikon ajan.

Tämän lisäksi on huolehdittava siitä, että betonin lämpöastevuoro-kausien määrä on riittävä kovettumisen varmistamiseksi.

Suosittelavin jälkihoitomenetelmä on vesi ja oikein asennettu muovipeite. TVH:n hyväksymiä jälkihoitoaineita voidaan myös käyttää. Jälkihoitoaine on valittava niin, että se voidaan helposti poistaa seuraavan työvaiheen niin vaatiessa.

Kun rakenne asettuu tasapainokosteuteen ympäristössään, betonin kovettuminen hidastuu ja lakkaa pintaosista alkaen.

Betonin kovettumista seurataan tarvittaessa testaamalla rakenteita kimmovasaralla tai laboratoriossa olosuhdekoekappaleiden avulla.



Kuva 20. Betonin suhteellisen puristuslujuuden riippuvuus kovettumisajasta ja -lämpötilasta eri lujuusluokissa käytettäessä suomalaisia yleis- ja nopeastikovettuvia portlandsementtejä / 26 /

### 4.2 Lujuus- ja tartuntaominaisuudet

Betonin ominaisuuksia arvioidaan yleensä puristuslujuuden perusteella, koska puristuslujuuden määrittäminen on selväpiirteistä ja koska useimmat betonin ominaisuudet riippuvat jossain määrin puristuslujuudesta. Siltojen korjausrakentaminen poikkeaa yleisestä käytännöstä, koska siinä muut betonin säilyvyyteen vaikuttavat tekijät ovat useimmiten määräävämpiä kuin puristuslujuus.

Puristuslujuus, kuten muutkin betonin ominaisuudet, riippuu sementtikiven ja runkoaineen ominaisuuksista sekä niiden välisestä tartunnasta. Puristuslujuuteen vaikuttavat ennen kaikkea

- vesi-sementtisuhde
- betonin ikä
- sementin ja runkoaineen laatu.

Huokostus ja riittämätön tiivistäminen pienentävät puristuslujuutta.

Mahdollisimman alhaiseen vesi-sementtisuhteseen pyrkiminen on puristuslujuudenkin kannalta tärkeää, koska reagoimatta jäänyt vesimäärä muodostaa kapillaarihuokosia, jotka pienentävät puristuslujuutta. Betonin säilyvyyden kannalta tarpeelliset lisähuokokset vaikuttavat samalla tavalla, joten huokostusta ja puristuslujuudelle asetettavia vaatimuksia on tarkasteltava rinnakkain.

Runkoaineeksi on valittava aine, jonka raekoko on mahdollisimman suuri, mutta toisaalta runkoaineen tulee olla oikein suhteitettua. Puristuslujuus pienee, jos runkoaineena käytetään kevytsoraa.

Lujuudenkehityksen nopeus riippuu sementtilaadusta (kuva 15). Tavallisesti betonin lujuus arvioidaan, kun betoni on 28 vuorokauden ikäistä.

Betonin vetolujuus on selvästi pienempi kuin puristuslujuus. Tästä syystä betoni halkeilee. Betonin vetolujuus on noin 10 % sen puristuslujuudesta.

Korjausrakentamisessa uuden betonin tartunnalla vanhaan rakenteeseen on ratkaiseva merkitys. Jot-

ta saataisiin aikaan mahdollisimman hyvä tartunta, on toimittava seuraavasti:

- Piikkaus on tehtävä niin, ettei vaurioiteta paikalleen jäävän betonin pintaa. Tartuntapinnan tulee olla rosainen, eikä siihen saa jäädä irtonaista ainesta tai epäpuhtauksia.
- Vanhan rakenteen pinnat on kasteltava hyvin noin vuorokautta ennen betonointia. Betonoinnin alkaessa pinnan tulee olla kostea muttei märkä (kiiltävä).
- Erityisen tärkeää on se, että tiivistäminen tehdään oikealla tavalla ja huolellisesti.
- Tartuntaa voidaan parantaa käyttämällä nesteytettyä betonia taikka betonimassaan sekoitettavia tai tartuntapintaan harjaamalla levitettäviä polymeerituotteita. Polymeerituotteita käytettäessä on noudatettava tarkoin valmistajan käyttöohjeita.

Ruiskubetonointi on tartunnan kannalta hyvä työmenetelmä.

Tartuntalujuus on suoraan verrannollinen puristuslujuuden neliöjuureen.

### 4.3 Muodonmuutosominaisuudet

Uuden ja vanhan betonirakenteen liittäminen toisiinsa on ongelmallista, koska kutistumisesta johtuvat jännitykset aiheuttavat halkeamia.

Betoniin syntyy muodon- ja tilavuudenmuutoksia seuraavista syistä:

- kemialliset reaktiot
- lämpötilan muutokset
- kosteuden muutokset
- kuormitukset.

Tärkein betonin muodon- ja tilavuudenmuutoksia aiheuttava kemiallinen reaktio on sementin ja veden hydrataatio, jossa syntyvän sementtigelin tilavuus on pienempi kuin reaktioon osaa ottaneiden aineiden alkuperäinen yhteistilavuus.

Rakenteen eri osien väliset lämpötilaerot aiheuttavat jännityksiä. Jos jännitykset ovat suurempia kuin betonin lujuus, syntyy halkeamia.

Siltarakenteen eri osien rajakohdissa esiintyy myös jännityksiä, koska eri materiaalien pituuden lämpötilakertoimet vaihtelevat taulukosta 9 ilmenevällä tavalla.

Betoni kutistuu kuivuessaan. Varsinkin uuteen rakenteeseen syntyy jännityksiä, kun betonimassa kovettuaan vähitellen asettuu ympäristönsä edellyttämään kosteuteen. Mitä kuivempi ympäristö on, sitä enemmän vettä haihtuu ja vastaavasti sitä enemmän betoni kutistuu (ks. taulukko 10).

Taulukko 9. Siltarakenteissa käytettävien materiaalien pituuden lämpötilakertoimia ja kimmokerroin

| Materiaali         | Pituuden lämpötilakertoimen $1/^\circ\text{C} \times 10^{-6}$ | Kimmokerroin GPa |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|------------------|
| Betoni             | 10                                                            | 25–40            |
| Kevytsorabetoni    | 8–10                                                          | 9–30             |
| Teräs              | 11                                                            | 210              |
| Alumiini           | 24                                                            | 71,1             |
| Luonnonkivi        | 8–12                                                          | 65–125           |
| Epoksi (EP)        | 45–65                                                         | 2,5              |
| Polyuretaani (PUR) | 100–200                                                       | 0,7–7            |
| Polyesteri (UP)    | 55–100                                                        | 2–4,5            |
| Akryyli (PMMA)     | 50–90                                                         | 2,5–3,1          |

Taulukko 10. Betonin kutistuminen ympäristöolosuhteiden mukaan /6/

| Ympäristö    | Ympäristön suhteellinen kosteus % | Betonin suhteellinen kutistuma % |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Vesi         | 100                               | 0                                |
| Hyvin kostea | 90                                | 0,1—0,2                          |
| Ulkoilma     | 70                                | 0,2—0,4                          |
| Kuiva ilma   | 40                                | 0,3—0,5                          |

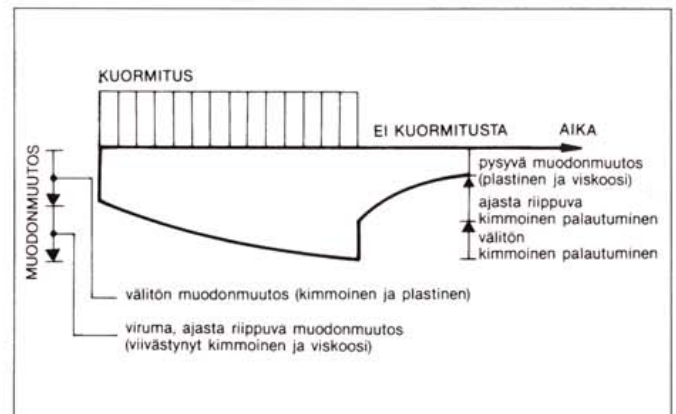
Betonin jälkihoito on tehtävä huolellisesti, ettei betonin vesipitoisuus pääse laskemaan ennen kuin betoni kestää kutistumisesta johtuvat vetojännitykset. Rakenteet on myös suunniteltava siten, että kutistuminen ja lämpötilanmuutoksista aiheutuvat tilavuudenmuutokset pääsevät vapaasti tapahtumaan.

Kuivuminen ja kutistuminen riippuvat ajasta. Massiivinen rakenne kuivuu ja kutistuu hitaammin kuin ohut rakenne. Saman rakenteen eri osat voivat olla eri mittaisia ja kuivua siksi eri tahdissa. Tämä synnyttää betoniin sisäisiä jännityksiä. Rauditus vastustaa kuivumiskutistumista, koska sen mitat eivät muutu kosteuden muuttuessa. Rakenne, jossa on tiheä rauditus, kutistuu vähemmän kuin harvaan raudoitettu rakenne. Rauditus jakaa halkeamat tasaisesti rakenteeseen, jolloin halkeamat jäävät pieniksi.

Koska vanha rakenne estää yleensä uuden valun kutistumisen, on betonin koostumus valittava niin, että kutistuminen jää mahdollisimman vähäiseksi. Lisäksi korjattavat rakenteet on suunniteltava siten, että lämpötilan muutoksista aiheutuvat rakenneosien väliset liikkeet pääsevät tapahtumaan.

Betonin kuormituksesta aiheutuvia muodonmuutoksia on vaikea määrittää. Jos jännitykset ovat pienenhköjä, voidaan käyttää kimmoteoriaa eli muo-

donmuutos on suoraan verrannollinen jännitykseen. Jos jännitys on noin puolet suurempi kuin betonin puristuslujuus, muodonmuutos ei ole enää suoraan verrannollinen jännitykseen. Tällaisessa tapauksessa syntyy myös plastista muodonmuutosta ja muodonmuutos kasvaa nopeammin kuin jännityksen perusteella olisi odotettavissa. Jos jännitys tällöin poistetaan, betoniin jää pysyvä muodonmuutos. Sitä vastoin kimmoiset eli elastiset kappaleet palaavat alkuperäiseen muotoonsa, kun kuormitus lakkaa vaikuttamasta. Lisäksi materiaaleilla on ajasta riippuva muodonmuutos nk. viruma, jota sanottiin aikaisemmin betonirakenteissa hiipumaksi. Virumalla tarkoitetaan sitä, että kuormitetun betonikappaleen muodonmuutos jatkuu ajan kuluessa (kuva 21).



Kuva 21. Kuormituksen aiheuttamien betonin muodonmuutosten periaate

Virumista esiintyy kaikkien jännitystapausten yhteydessä (puristus, veto, taivutus, leikkaus ja vääntö). Viruman vaikutus kokonaismuodonmuutokseen on huomattava.

#### 4.4 Betonin tiiviysominaisuudet

Jos betoni ei ole tiivistä ja jos rakenteissa on paljon halkeamia, pääsevät korroosiota aiheuttavat aineet tunkeutumaan helposti betoniin ja yhä suurempi pinta joutuu niiden vaikutuksen alaiseksi. Lisäksi betonin karbonatisoituminen on voimakkaampaa, jos betoni ei ole tiivistä ja tasalaatuista.

Tavoitteiksi on asetettava mahdollisimman suuri raekoko ja mahdollisimman pieni vesi-sementtisuhde. Tinkimään voidaan lähteä esimerkiksi seuraavista tavoitearvoista:

- kiviaineksen suurin raekoko 32 mm
- vesi-sementtisuhde 0,40.

Tällöin on otettava huomioon rakenteen mitat, raudituksen muoto ja tankojen välit, betonin siirtotapa ja työmaan yleiset järjestelyt.

Ruiskubetonin tiiviyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Tarkkailtavia osatekijöitä ovat runkoaiheen laatu ja rakeisuus sekä vesi-sementtisuhde.

Betonin käsittelyyn liittyvät työtekniilliset ongelmat voidaan ratkaista lisä- ja seosaineita käyttämällä esimerkiksi seuraavasti:

- Jos raudotteet ovat tiheitä, on käytettävä notkistinta. Notkistinta tulisi käyttää tehonotkistimen tapaan eli pyrkimällä samalla pienentämään vesi-sementtisuhdetta.

- Huokostus parantaa betonimassan muokkautuvuutta, lisää notkeutta ja vähentää osa-aineiden erottumista. Lisäksi betonin vesitiiviys yleensä paranee, koska ilmakuplat katkaisevat kapillaariverkoston.
- Silika tiivistää betonia, jolloin kapillaarihuokosten osuus sementtikivessä jää tavallista pienemmäksi. Toisaalta silika lisää betonin plastista kutistumista aiheuttaen halkeilua, ellei jälkihoito ole tehokasta.

## 4.5 Betonin säilyvyys

Betonirakenteen säilyvyydellä tarkoitetaan betonin kykyä säilyttää tärkeät teknilliset ominaisuutensa ulkoisten rasitustekijöiden vaikuttaessa.

Betonin säilyvyyteen vaikuttavia ulkoisia rasitustekijöitä ovat

- kosteus
- kloridit ja muut ympäristön epäpuhtaudet
- pakkasen ja lämpötilan vaihtelut
- liikenteen, virtaavan veden ja jään aiheuttama kuluminen.

Näiden ulkoisten rasitustekijöiden vaikutuksia kiihdyttäviä betonin ominaisuuksia ovat

- huono tiiviys
- pinnan halkeilu
- voimakas karbonatisoituminen
- vähäinen suojahuokosten määrä.

Tyypillisiä betonia vaurioittavia rasitustekijöitä silloissa ovat

- pakkassuolarasitus
- liikenteen, virtaavan veden ja jään aiheuttama kulutus.

Suomessa pakkasen rapauttaa betonia. Teiden talvikunnossapidossa käytettävät kloridisuolat pahentavat rapautumista. Pakkasen heikennettyä betonia muut rasitustekijät kuluttavat betonirakenteiden pintoja ja aiheuttavat lopullisen rapautumisen.

Betonia kuluttavat tekijät otetaan huomioon siltarakenteelle asetettavia tavoitteita määritettäessä. Tarvittaessa rakenne verhotaan tai pinnoitetaan. Muut säilyvyysvaatimukset (ks. taulukko 8) on asetettu betonin käyttöikää koskevien tutkimusten ja laskelmien perusteella / 12 /.

### 4.51 Betonin pakkasenkestävyys

Betonin pakkasenkestävyydellä tarkoitetaan betonin kykyä vastustaa toistuvien jäätymis- ja sulamisvaiheiden aiheuttamaa rapauttavaa vaikutusta.

Betonin säilyminen riippuu sekä ulkoisista olosuhteista että betonin laadusta. Pakkasvaurioita aiheuttavat lähinnä kosteus ja lämpötilojen vaihtelut. Pakkasvaurio syntyy, kun betonin huokosissa oleva vesi jäätyy ja aiheuttaa tilavuuden muutoksen ja paineen, jotka puolestaan synnyttävät betoniin sisäisiä säröjä. Useat jäätymis- ja sulamisjaksot rapauttavat vähitellen betonin.

Paine betonin sisällä kehittyä kahdessa vaiheessa. Aluksi suurissa kapillaareissa tapahtuva jäätyminen aiheuttaa nk. hydrostaattisen paineen. Myöhemmin pakkasen edelleen vaikuttaessa voivat syntyneet kiteet lähteä kasvamaan nk. osmoottisen paineen siirtäessä kosteutta jääkiteiden läheisyyteen. Betonin säilymisen kannalta jääkiteiden kasvu on usein vaarallisempaa kuin pelkkä hydrostaattinen paine.

Veden virtaus, jäälautat, uitto ym. pahentavat pakkasen synnyttämiä rapautumisvaurioita vesistösiltojen alusrakenteissa ja muissa vesirakenteissa.

Kloridisuolat pahentavat pakkasen aiheuttamaa rasitusta lähinnä voimistamalla jääkiteiden kasvua. Liukkaudentorjuntasuolat aiheuttavat tilanteen, jossa betoni on jäätyneenä alhaisessa lämpötilassa mutta betonin pinnalla on sulaa imeytymiskykyistä vettä. Jään sulattaminen betonin pinnalta aiheuttaa lisäksi sen, että betonin lämpötila pinnan lähellä alenee äkillisesti, koska sulattamiseen tarvittava lämpö tulee alla olevasta betonista.

Osmoottisen paineen kehittyminen betonin pinnalla johtaa pinnan rapautumiseen. Rapautumista edistää pinnan lujuuden alentuminen sulamisen johdosta. Lisäksi klorideilla saattaa olla lievä kemiallinen vaikutus betoniin.

Betonin säilyvyyteen vaikuttavat samat sisäiset ominaisuudet, kuten suojahuokossuhde ja lujuus, riippumatta siitä, onko betonin vaurioitumisen aiheuttanut hydrostaattinen vai osmoottinen paine.

Suojahuokossuhde ilmaisee ilmahuokosten suhteellisen osuuden kokonaishuokostilavuudesta eli sen, miten suuri osa betonin huokostilavuudesta pysyy ilmatäytteisenä vesisäilytyksessä normaali-paineessa. Betonin pakkasvaurioalttiutuu pienenee suojahuokossuhteen kasvaessa, koska ilmahuukokset pienentävät betoniin syntyviä paineita.

Rapautumisnopeus riippuu myös betonin mekaanisista ominaisuuksista ts. sen vastustuskyvystä rapauttavia voimia vastaan. Mekaanisten ominaisuuksien mitaksi soveltuu puristuslujuus. Mitä suurempi betonin puristuslujuus on, sitä hitaammin jäätympaine ja muut samanaikaisesti vaikuttavat dynaamiset voimat rapauttavat betonia. Rapautumisnopeus voidaan näin ollen arvioida suojahuokossuhteen ja puristuslujuuden avulla.

Betonin säilyvyyden kannalta korjausrakentamisessa on syytä käyttää portlandsementtiä. Portlandsementti on lisäaineiden käytön kannalta turvallinen. Muiden sementtien seosaineet voivat aiheuttaa ongelmia lisäaineiden annostelussa.

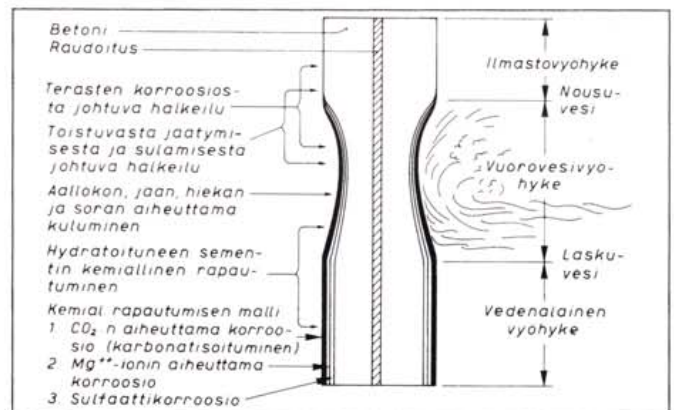
#### 4.52 Betonin kulutuksenkestävyys

Siltarakenteiden pintoja kuluttavat esimerkiksi liikenne ja nestevirtaukset. Veden mukanaan kuljetamat kiinteät ainekset aiheuttavat eroosiota vesirakenteisiin (kuva 22). Eroosion nopeus riippuu

- ainesten määrästä, muodosta ja kovuudesta
- veden virtausnopeudesta
- betonipinnan muodosta sekä betonin laadusta.

Vaikka hyvälaatuinen betoni voi kestää tasaisen, pinnansuuntaisen ja nopean virtauksen vaikutusta, voi ns. kavitaation esiintyminen nopeasti virtaavassa ja pyörteisessä vedessä johtaa betonin vaurioitumiseen. Kavitaatiovaurioita esiintyy avoimissa kanavissa, jos veden virtausnopeus on yli 12 m/s, mutta umpinaisissa johdoissa virtausnopeuden ollessa paljon pienempikin. Kavitaation vaurioittama betonipinta on rosainen päinvastoin kuin eroosion aiheuttama sileäksi kulunut pinta.

Betonipäälysteitä rasittavat erityisesti nastarenkaat ja ajoneuvojen kovat pyörät. Betonin kulutuksenkestävyys on sitä parempi, mitä suurempi sen puristuslujuus sekä runkoaineen raekoko, kovuus ja suhteellinen tilavuus ovat.



Kuva 22. Betonin merirakenteen rasitusvyöhykkeet / 27 /

## 4.6 Betonin kyky suojata raudoitusta korroosiolta

Raudoitustankojen säilyminen betonissa perustuu betonin emäksisyyteen ja tiiviyteen. Emäksisessä ympäristössä teräksen pinnalle muodostuu tiivis oksidikalvo, joka estää korroosiovirtojen kulkemisen. Korroosio voi käynnistyä vain, jos tämä nk. passiivikalvo jostakin syystä rikkoutuu. Käytännössä passiivikalvo voi rikkoutua vain halkeamissa tai jos betonipeitteessä tapahtuu merkittäviä kemiallisia muutoksia. Sillankorjaustöiden kannalta haitallisia kemiallisia muutoksia ovat betonipeitteen karbonatisoituminen ja kloridien tunkeutuminen betoniin.

### 4.61 Betonin karbonatisoituminen

Karbonatisoitumisella tarkoitetaan ilman hiilidioksidin reagoitua betonin kalsiumhydroksidin kanssa. Reaktio tapahtuu ilmatilassa kaikilla betonipinnoilla ja sen seurauksena betonin pintakerros neutraloituu. Normaali-ilmatilassa karbonatisoituneen betonin pH on noin 8, mikä on riittävän alhainen passiivisuojan tuhoutumiselle ja korroosion alkamiselle.

Betoni karbonatisoituu hitaasti rakenteen pinnalta käsin. Karbonatisoitunut vyöhyke pinnan läheisyydessä on varsin jyrkkärajainen, ja se saadaan helposti näkyviin pH-indikaattoreilla, esimerkiksi fenolftaleiiniliuoksella. Kun vyöhyke saavuttaa raudoituksen, teräspintojen korroosio alkaa.

Karbonatisoitumisnopeus riippuu monista betonin ominaisuuksista, mutta ennen kaikkea sen tiiviydestä. Tiiviys puolestaan on riippuvainen betonin vesi-sementtisuhteesta. Karbonatisoitumissyvyys riippuu ajasta ja vesi-sementtisuhteesta / 28 /. Kuvan 23 arvot ovat yläraja-arvoja, joten ne hie-man liioittelevat tavanomaista tilannetta.

Kuten kuvasta 23 voidaan todeta, sadeveden mahdollinen pääsy rakenteen pintaan vaikuttaa oleellisesti karbonatisoitumisnopeuteen. Jos rakenne on suojattu sateelta, karbonatisoituminen on huomattavasti nopeampaa kuin jos rakenne on alttiina sa-

tavasti nopeampaa kuin jos rakenne on alttiina sa-teille. Tämä johtuu siitä, että betonin huokosissa oleva vesi hidastaa hiilidioksidin pääsyä betoniin sekä siitä, että syvällä betonissa oleva kalsiumhydroksidi voi liuenneessa muodossa kulkeutua sadeveden mukana pintaa kohti.

Karbonatisoitumissyvyys ( $l_c$ ) on betonissa yleensä verrannollinen ajan neliöjuureen seuraavan kaavan mukaisesti / 11 /.

$$l_c = k \times \sqrt{t} \text{ (mm)}$$

Vastaavasti aika, joka tarvitaan korroosion alkamiseen on verrannollinen betonipeitepaksuuden ( $L$ ) neliöön seuraavan kaavan mukaisesti / 11 /.

$$t = (L/k)^2 \text{ (vuotta)}$$

Kaavoissa karbonatisoitumiskerroin  $k$  voidaan laskea kuvan 23 tietoja vastaten sateelta suojatuilla rakenteilla kaavasta:

$$k = 26 \times (w/c - 0,3)^2 + 1,6$$

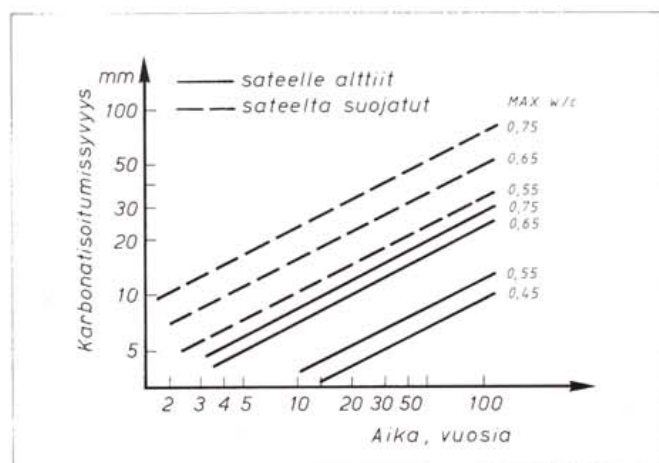
tai lujuuden funktiona seuraavasti:

$$k = 0,0083 \times (53 - f_c)^2 + 1,6$$

Kaavoissa  $w/c$  tarkoittaa vesi-sementtisuhdetta ja  $f_c$  28 vuorokauden ikäisen betonin puristuslujuutta. Sateelle alttiina olevien rakenteiden karbonatisoitumiskerroin on noin 0,4-kertainen.

Edellä esitetystä voidaan päätellä, että betonipeitteen paksuudella on keskeinen merkitys raudoitteiden korroosiosuojauksessa. Toinen merkittävä tekijä on betonin tiiviys, joka riippuu sen vesi-sementtisuhteesta tai lujuudesta. Betonirakenteen pinnan tiiviyteen vaikuttaa myös jälkihoito ratkaisevalla tavalla.

Rakenteen käyttöikä raudoituksen korroosion suhteen voidaan arvioida kuvasta 24. Käyttöikä on laskettu betonipeitteen karbonatisoitumiseen kulu-van ajan lisäksi aktiivinen korroosioaika siihen hetkeen, jolloin betonipeite lohkeaa korroosiotuotteiden johdosta.



Kuva 23. Karbonatisoitumissyvyys ajan funktiona (yläraja-arvot)

## 4.62 Kloridien tunkeutuminen betoniin

Kloridi-ionit ( $\text{Cl}^-$ ) pääsevät vapaasti kulkeutumaan betoniin kosteuden mukana, mutta betonin huokokset hidastavat merkittävästi niiden tunkeutumista. Rakenteiden pinnoille, joihin suolainen vesi pääsee vaikuttamaan, syntyy kloridipitoisuusgradientti ts. kloridipitoisuus alenee tasaisesti syvyyden funktiona.

Kloridipitoisen ja kloridittoman betonin välillä ei ole jyrkkää rajaa, niinkuin on karbonatisoituneen ja karbonatisoitumattoman betonin välillä. Siksi on oleellista tietää, mikä on ns. kriittinen kloridipitoisuus eli kloridipitoisuuden kynnyisarvo, jota suurempi kloridipitoisuus rikkoo passiivikalvon ja käynnistää korroosion. Korroosion alkamisajankohtana voidaan pitää hetkeä, jolloin raudoituksen syvyydessä oleva betoni saavuttaa kriittisen kloridipitoisuuden.

Betonin kriittisenä kloridipitoisuutena (raudoituksen syvyydessä) voidaan pitää 0,07 %  $\text{Cl}^-$  betonin painosta happoliuoksena mitattuna ja 0,05 %  $\text{Cl}^-$  vesiliuoksena mitattuna. Jännitetyjen betonirakenteiden kriittiset kloridipitoisuudet ovat puolet edellä mainituista.

Yleisten teiden silloilla tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan reunapalkkien raudoituksen korroosion alkamisajankohta laskea talvihoitoluokkaan 1 kuuluvilla teillä seuraavan kaavan / 12 / avulla:

$$t = \frac{10}{12 \times D} \times L^2$$

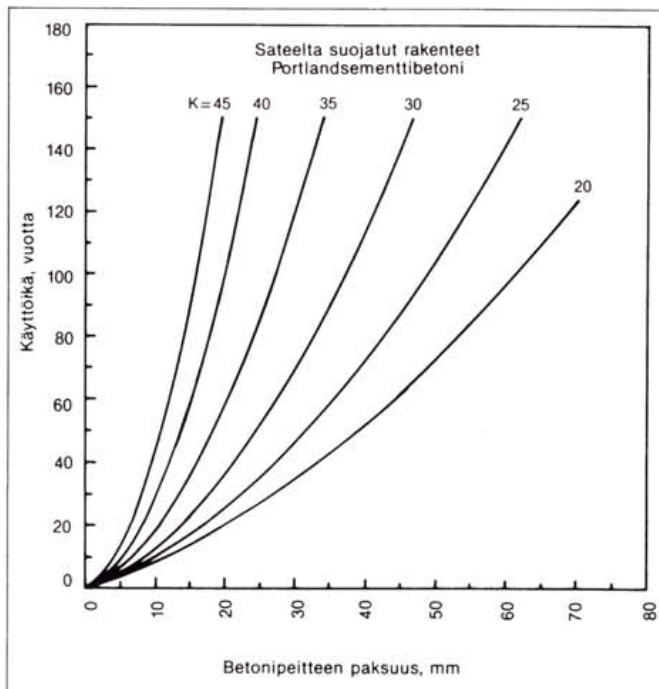
jossa  $D = 0,6 \times (55 - f_c)^2 + 15 \text{ (mm}^2\text{/vuosi)}$

$L$  = betonipeite

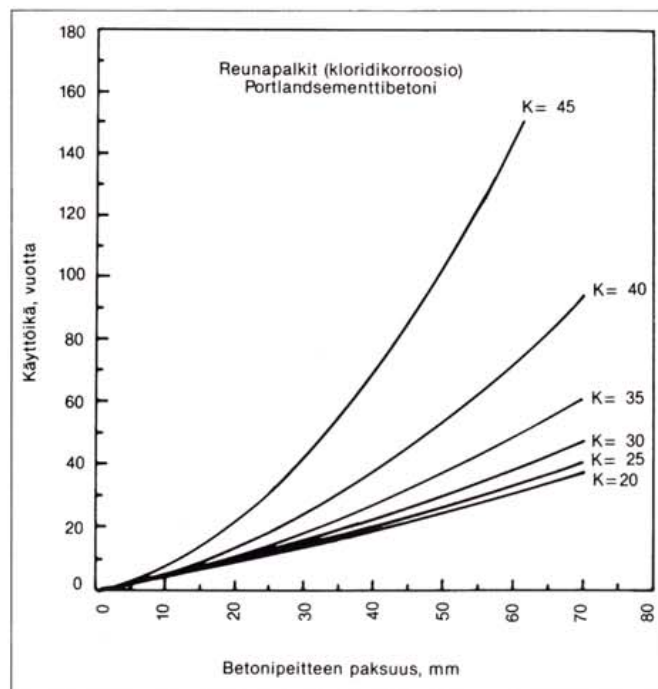
Kaavassa  $f_c$  tarkoittaa 28 vuorokauden ikäisen betonin puristuslujuutta.

Edellä esitetystä voidaan päätellä, että betonipeitteellä on ensiarvoisen tärkeä merkitys myös suojaattaessa raudoitusta klorideilta. Myös betonin tiiviys on tärkeä, mikä tulee kaavassa esille puristuslujuuteen sisältyvänä. Halkeilu on otettava erikseen huomioon.

Kloridit kiihdyttävät korroosiota, joten aktiivinen korroosioaika ja sitä kautta rakenteen käyttöikä lyhenevät (kuva 25) muihin rakenteisiin (kuva 24) verrattuna.



Kuva 24. Ilmatilassa olevan, sateelta suojatun rakenteen käyttöikä / 12 /



Kuva 25. Reunapalkin käyttöikä / 12 /

## 5 BETONIMASSAN OMINAISUUDET

### 5.1 Muokkautuvuus

Betonimassan ominaisuuksia ovat

- tiivistyvyys
- koossapysyvyys
- notkeus.

Näistä ominaisuuksista käytetään yhteisnimitystä muokkautuvuus.

Betonimassa on työstettävää, jos se tiivistämisen jälkeen täyttää hyvin muotit ja koossapysyvää, jos massan osa-aineet jakautuvat tasaisesti.

#### 5.11 Tiivistyvyys

Tiivistyvyydellä tarkoitetaan betonimassan kykyä täyttää muotit ja ympäröidä laudoitus tiiviisti ja siten, ettei betoniin jää tärytyksen jälkeen onteloita.

Betoni ei tiivisty itsestään, vaan sitä on tiivistettävä eri tavoin. Mekaaninen tiivistys tehdään sauva-, taso- tai muottitäryttimellä.

Notkistavat lisäaineet vähentävät tärytystarvetta. Betoni saattaa erottua liikaa tärytettäessä.

#### 5.12 Koossapysyvyys

Koossapysyvyydellä tarkoitetaan betonimassan kykyä säilyä homogeenisena kuljetuksen, siirtojen ja käsittelyn aikana. Betonimassa pyrkii betonityön eri vaiheissa erottumaan, jolloin betonin laatu huononee ja vaihtelee rakenteen eri osissa.

Runkoaineen erottumisella tarkoitetaan karkeiden rakeiden erottumista sementtiliimasta. Veden erottumisella tarkoitetaan veden nousua betonimassan pintaan ja raskaampien osa-aineiden painumista alaspäin.

Jotta betonimassa olisi koossapysyvää, siinä tulee olla riittävästi hienoja aineksia eli sementtiä ja täyteainetta, mutta massan rakeisuuden tulee kokonaisuudessaan olla ohjeiden mukainen. Huokostavat lisäaineet ja silika parantavat betonin koossapysyvyyttä.

#### 5.13 Notkeus ja vesi-sementtisuhde

Notkeus on muokkautuvuuteen vaikuttavista ominaisuuksista tärkein. Notkeudella tarkoitetaan betonimassan kykyä muuttaa muotoaan niin, että massa siirtyy haluttuun paikkaan muotissa ja täyttää muotin.

Betonimassan notkeuteen vaikuttavat sementin, veden, ilman ja runkoaineen keskinäiset seossuhteet sekä runkoaineen rakeisuusominaisuudet ja rakeiden pinta. Betonimassan notkeusluokitus on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Betonimassan notkeussuositus

| Notkeusluokka       | Notkeuden likimääräiset raja-arvot |                                                         |                                 |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
|                     | Betoni-kartio<br>Painuma<br>mm     | VB-koje<br>Betoni-kartion<br>muodonmuutos-<br>aika s VB | MO-koje<br>Iskujen<br>lukumäärä |
| Nestemäinen         | > 150                              | —                                                       | —                               |
| Vetelä              | 150...100                          | 1...2                                                   | 4...13                          |
| Notkea              | 100...60                           | 2...3                                                   | 13...20                         |
| Plastinen           | 60...30                            | 3...5                                                   | 20...35                         |
| Jäykkä              | 30...0                             | 5...10                                                  | 35...70                         |
| Hyvin jäykkä        | —                                  | 10...20                                                 | —                               |
| Maakostea           | —                                  | 20...40                                                 | —                               |
| Puristustärytettävä | —                                  | > 40                                                    | —                               |

Sillankorjaustöissä käytetään yleisesti notkistavia lisäaineita. Notkistavien lisäaineiden vaikutusaika on yleensä lyhyt, 0,5–1,5 tuntia. Notkeutta ei saa työmaalla säädellä vettä lisäämällä. Liika vesi suurentaa vesi-sementtisuhdetta, jolloin betonin lujuus ja säilyvyys huononevat. Notkeus muuttuu ajan funktiona.

### 5.2 Ilmapitoisuus

Ilmapitoisuudella tarkoitetaan tiivistetyn betonimassan sisältämää ilmamäärää.

Hyvin tiivistetty betonimassa sisältää maksimiraekoosta riippuen 1–3 % ilmaa. Huokostavia lisäai-

neita käytettäessä tulee kokonaisilmamäärän olla kaikkien työvaiheiden jälkeen vähintään 4 %, jos betonin puristuslujuus on korkeintaan 40 MN/m<sup>2</sup> ja suuremmilla lujuuksilla vähintään 3 %.

Sementtikivessä on huokosia, jotka voivat olla kokonaan tai osittain vesitäytteisiä. Huokokset voidaan jakaa ryhmiin seuraavasti (kuva 26):

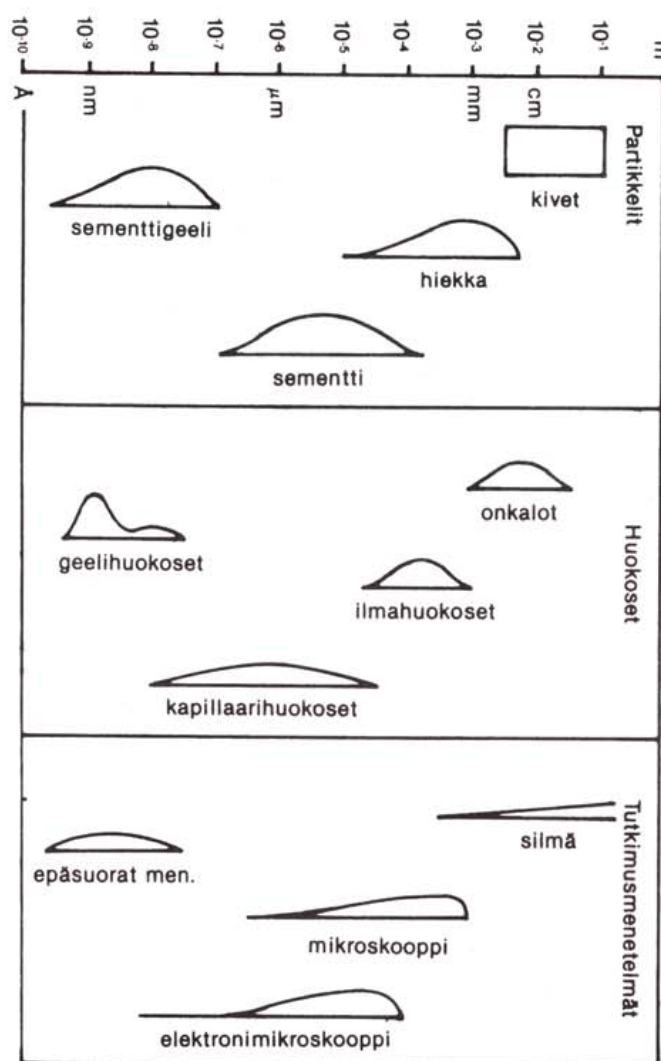
- geelihuokokset
- kapillaarihuokokset
- suojahuokokset ja
- suurhuokokset.

Geelihuokosia syntyy aina sementtikiveen. Geelihuokokset ovat kooltaan noin  $0,001 \mu\text{m}$ , ja niiden osuus sementtigelin kokonaistilavuudesta on noin 25 %.

Kapillaarihuokokset syntyvät sementtiliimassa olleesta ylimääräisestä vedestä, joka ei ole sitoutunut hydrataatiossa eikä ole joutunut geelihuokostilaan. Kapillaarihuokokset ovat kooltaan keskimäärin  $1 \mu\text{m}$ . Kapillaarihuokokset ovat yhteydessä toisiinsa joko välittömästi tai geelihuokosten välityksellä. Ulkopuolinen kosteus imeytyy pääasiassa kapillaarihuokosiin, joten ne ovat veden jäätyessä pakkasenkestävyyden kannalta haitallisia.

Pakkasenkestävää betonia valmistettaessa tarvitaan suojahuokosia, jotta kapillaarihuokosiin jäävän veden paine pääsee purkautumaan niihin. Suojahuokosia saadaan syntymään huokostavien lisäaineiden avulla. Suojahuokokset ovat kooltaan  $10\text{--}300 \mu\text{m}$ . Suojahuokokset jäävät suuren kokonsa vuoksi ilmatäytteisiksi. Tällöin ne pystyvät lieventämään huokosveden jäätyessä syntyvää painetta ja ovat siten pakkasenkestävyyden kannalta hyödyllisiä.

Suurhuokokset syntyvät sementtikiveen epätäydellisen tiivistyksen seurauksena. Niiden koko on vähintään  $1000 \mu\text{m}$ .



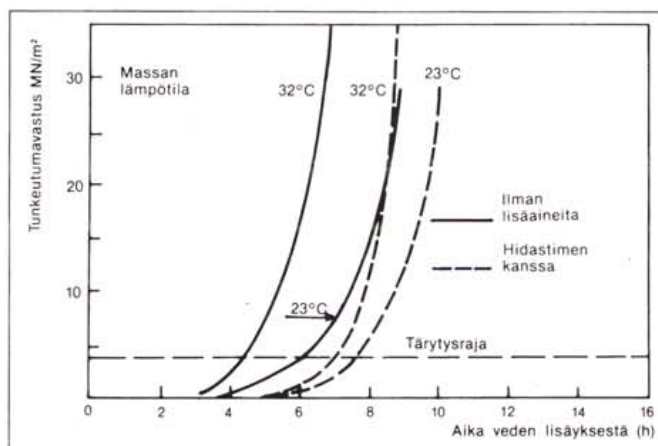
Kuva 26. Betonin huokosrakenne ja tutkimusmenetelmät

### 5.3 Sitoutuminen

Betonin sitoutumisaikaa kuvataan ns. tärytysrajalla, joka määritetään tunkeutumavastuskokeella. Betonin tärytysraja katsotaan saavutetun, kun tunkeutumavastus nousee arvoon  $3,5 \text{ MN/m}^2$ . Betonin kovettumisreaktion katsotaan alkavan sitoutumisen päättyttyä.

Betonin sitoutumista voidaan säädellä hidastavilla lisäaineilla. Notkistavilla lisäaineilla saattaa olla sitoutumista hidastava sivuvaikutus, joka on syytä tuntea. Ilman lämpötila vaikuttaa luonnollisesti sitoutumiseen (kuva 27).

Sitoutumisvaiheessa olevaa sementtiliimaa ei saa häiritä, koska seurauksena voi olla huomattava lujuuden kato.



Kuva 27. Lämpötilan ja hidastavan lisäaineen vaikutus betonin täryttävyyteen