

## Teräsbetonipaalujen säilyvyssuunnittelu

Teräsbetonipaaluja ympäröivän maaperän ominaisuudet saattavat vaikuttaa paalujen säilyvyyteen. Normaalitylanteessa paalut jäävät pohjaveden pinnan alle ja betoni karbonatisoituu hyvin hitaasti, jos ollenkaan. Näin ollen raudotteet eivät ruostu ja paalut kestävät vaurioitumattomana hyvin pitkään. Toisaalta paalut ovat harvoja rakenteita, jotka ovat suojaamattomana alttiita maaperän kemiallisille rasituksille. Tyypillisenä esimerkkinä maaperän kemiallisesta rasituksesta on sulfaattirasitus. Lisäksi paaluja voi rasittaa myös pohjaveden normaalia korkeampi kloridipitoisuus.

Käytännössä suunnittelijat ovat päätyneet paalujen osalta varsin vaihteleviin rasitusluokkiin. Betoniyhdistyksen päivittäessä julkaisua *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – Opas suunnittelijoille* (by68) myös paalut haluttiin ottaa mukaan osana esimerkkirakenteita, tavoitteena teräsbetonipaalujen säilyvyssuunnittelun yhtenäistäminen.

**Normaalitapauksissa teräsbetonipaalut suunnitellaan 100 vuoden suunnittelukäyttöiälle ja rasitusluokaksi riittää XC2, joka kattaa betonin karbonatisoitumisen aiheuttaman teräskorroosioriskin.**

Maaperäanalyysia suositellaan, mikäli on syytä epäillä, että paaluihin kohdistuu sulfaatti-, kloridi- tai muu kemiallinen rasitus. Analyysitulosten perusteella määritellään tarvittavat täydentävät rasitusluokat:

- Sulfaattien aiheuttama kemiallinen rasitus (XA1-XA3)
- Kloridien aiheuttama teräskorroosio (XS1-XS3)

Mikäli paaluihin kohdistuu muu kuin sulfaattien aiheuttama kemiallinen rasitus, tulee paalujen säilyvyysvaatimukset määritellä

tapauskohtaisesti.

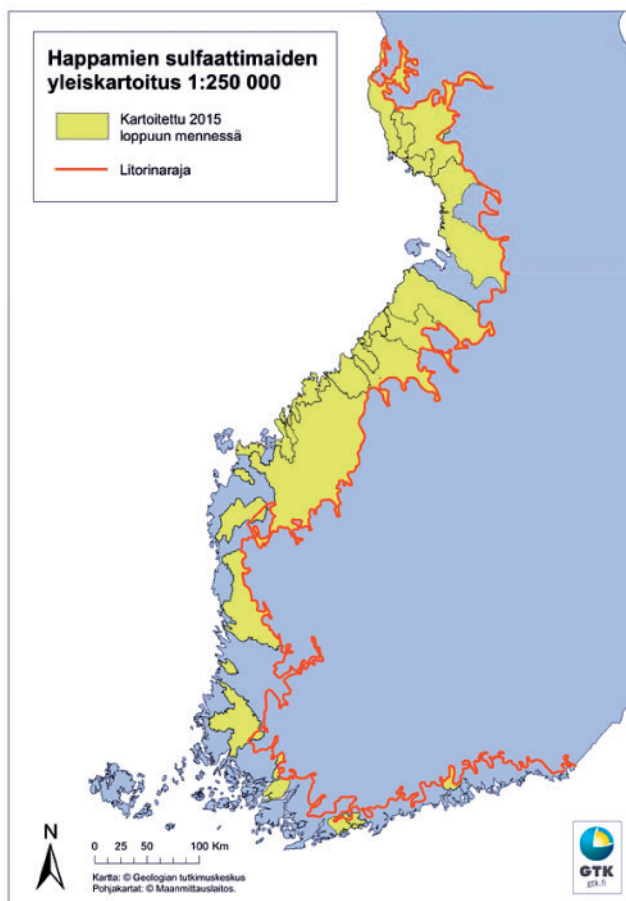
Muita rasitusluokkia ei paaluille tarvitse määrätä, ellei siihen ole hyvin perusteellisia syitä. Esimerkiksi pakkasrasitukselle paalut eivät normaalisti altistu maanalaisina rakenteina ja näin XF-rasitusluokkia ei tarvita. Myöskään jäänsulatusaineet (XD-luokat) eivät normaalisti aiheuta paaluihin rasituksia, vaikka paalut olisivat esim. tierakenteen yhteydessä. Mikäli paaluja käytetään esim. laiturirakenteissa niin, että paalut ovat alttiina merivedelle, on

säilyvyssuunnittelu tehtävä laiturirakenteiden periaatteiden mukaisesti.

Mikäli suunnittelukäyttöikä poikkeaa normaalista 100 vuodesta, on paalujen säilyvyssuunnittelu tehtävä tapauskohtaisesti.

### Happamat sulfaattimaat

Suomessa esiintyy happamia sulfaattimaita, jotka ovat potentiaalisesti aggressiivisia paaluille ja muille suojaamattomille betonirakenteille. Happamia sulfaattimaita esiintyy erityisesti muinaisen Litorina-meren korkeimman



**1** Happamien sulfaattimaiden tyypilliset esiintymisalueet. Geologian tutkimuslaitos, GTK. Happamat sulfaattimaat esiintyy yleensä Litorina-meren rantaviivan alapuolella, Etelä-Suomessa noin 40 m korkeuskäyrän alapuolella ja Pohjois-Suomessa noin 100 m korkeuskäyrän alapuolella.

**Taulukko 1 Rasitusluokkayhdistelmän valinta pohjaveden sulfaatti- ja/tai kloridipitoisuuden mukaan.**

| Pohjaveden sulfaattipitoisuus                               | Pohjaveden kloridipitoisuus  |                              |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                                             | Kloridipitoisuus ≤ 1000 mg/l | Kloridipitoisuus > 1000 mg/l |
| Sulfaattipitoisuus ≤ 200 mg/l                               | XC2                          | XC2; XS2                     |
| Sulfaattipitoisuus: 200...600 mg/l                          | XC2; XA1                     | XC2; XS2; XA1                |
| Sulfaattipitoisuus > 600 mg/l, mutta korkeintaan 3000 mg/l. | XC2; XA2                     | XC2; XS2; XA2                |

Pohjaveden sulfaattipitoisuus > 3000 mg/l (XA3-luokka) on käytännössä erittäin harvoin esiintyvä tilanne, tällöin paalujen vaatimukset tulee määritellä tapauskohtaisesti, kuten myös XA-rasitusluokan määräytyessä muun kuin sulfaattipitoisuuden perusteella. Kriittinen kloridipitoisuus on valittu niin, että vaikka betoni olisi kyllästetty pohjavedellä, jonka kloridipitoisuus on 1000 mg/l, vaaraa terästen korroosiolle ei ole.

rannan alapuolisilla alueilla, jotka ovat nousseet kuivalle maalle jääkauden jälkeisen maankohoamisen seurauksena. Kuvassa 1 on esitetty alueet, joissa happamia sulfaattimaita pääosin esiintyy. Geologian Tutkimuslaitoksen (GTK) Hapamat sulfaattimaat -karttapalvelussa tarjotaan GTK:n tuottamaa kartoitustietoa happamien sulfaattimaiden esiintymisestä ja ominaisuuksista koko Suomen rannikkoalueella karkeasti muinaisen Litorina-meren korkeimpaan rantatasoon saakka.

Mikäli on mahdollista, että rakennuspaikalla esiintyy happamia sulfaattimaita, maaperä on tutkittava tarkemmin. Tällaiset maat voivat olla aggressiivisia paaluille ja muille vastaaville rakenteille, joissa maaperä on suoraan kontaktissa betonirakenteen kanssa. Ongelmia esiintyy lähinnä vain pohjavedenpinnan yläpuolisissa rakenteissa.

#### Paalujen rasitusluokkayhdistelmät ja vaatimukset paaluille

Paalujen rasitusluokat valitaan Taulukon 1 mukaisesti ja vastaavat teräsbetonipaalujen vaatimukset on esitetty Taulukossa 2.

Taulukossa 2 on esitetty myös käytettävät paalutyypit. Normaali paalu soveltuu olosuhteisiin, jolloin ei ole merkittäviä sulfaatti- tai kloridirasituksia. Sulfaatinkestävä paalutyyppi vaaditaan, mikäli pohjaveden sulfaattipitoisuus ylittää arvon 600 mg/l ja rasitusluokaksi määrittyy XA2.

Sulfaatinkestävyysvaatimus nostaa teräsbetonipaalun hintaa noin 10 %. E-Paalu vaaditaan, mikäli pohjaveden kloridipitoisuus on korkea (> 1000 mg/l). Tällöin betonipeitettä joudutaan kasvattamaan 45 mm:iin ja siten myös betonipaalujen teräsmäärät kasvavat. E-Paalu on noin 20% kalliimpi kuin normaali paalu.

*Jouni Punkki, professori, TkT  
Betoniviidakko Oy*

**Taulukko 2. Teräsbetonipaalujen vaatimukset rasitusluokkien perusteella. Suunnittelukäyttöikä on 100 v.**

|                      | Suunnittelukäyttöikä | Raudoitustyyppi<br>(tr = tavanomainen betoniraudoite) | Lujuusluokka | Betonipeitteen nimellisarvo [mm] <sup>1)</sup> | Vesti-sementtisuhde | Sementtityyppi   | Paalutyyppi                 |
|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------|---------------------|------------------|-----------------------------|
| <b>XC2</b>           | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 25                                             | –                   | – <sup>3)</sup>  | Normaali                    |
| <b>XC2; XA1</b>      | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 25                                             | 0,50                | – <sup>3)</sup>  | Normaali                    |
| <b>XC2; XA2</b>      | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 25                                             | 0,45                | SR <sup>4)</sup> | Sulfaatinkestävä            |
| <b>XC2; XS2</b>      | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 45 <sup>2)</sup>                               | 0,40                | – <sup>3)</sup>  | E-Paalu                     |
| <b>XC2; XS2; XA1</b> | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 45 <sup>2)</sup>                               | 0,40                | – <sup>3)</sup>  | E-Paalu                     |
| <b>XC2; XS2; XA2</b> | 100 v                | tr                                                    | C35/45       | 45 <sup>2)</sup>                               | 0,40                | SR <sup>5)</sup> | E-Paalu<br>sulfaatinkestävä |

1) Betonipeitteen sallittu mittapoikkeama on 5 mm ja raudoitteen mittapoikkeama sisäänpäin 10 mm. Mikäli käytetään poikkeavaa mittapoikkeaman arvoa, on myös betonipeitteen nimellisarvoa korjattava.

2) Paalun minimikoko on 300 x 300 mm<sup>2</sup>.

3) Ei vaatimuksia sementtityypille; kaikki standardin SFS 7022 taulukon 2-FI mukaiset sementit

4) XA2 tai XA3-rasitusluokan määräytyessä sulfaattipitoisuuden perusteella: Käytettävä sulfaatinkestävää SR-sementtiä (CEM I - SR3) tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä.

5) XS2 & XA2-rasitusluokkayhdistelmä: Sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä tai jos käytetään sulfaatinkestävää SR-sementtiä (CEM I - SR3), suositellaan säilyvyyttä parantavien seosaineiden käyttöä. Liikenneviraston kohteissa sideaineen tulee sisältää 3...5% silikaa.



## Kloridirasitusten (XD- ja XS-rasitusluokat) huomioiminen betonipaalujen suunnittelussa

Teräsbetonipaalujen rasitusluokkien valintaa sekä säilyvyyssuunnittelua on käsitelty Paaluinfossa 2/2016 (Betonilehti 3/2016, ladattavissa betoni.com-sivustolta). Rasitusluokan valintaan vaikuttavat pohjaveden sulfaatti- ja kloridipitoisuudet ja siten joissakin tapauksissa tarvitaan normaalin XC2 rasitusluokan lisäksi myös rasitusluokka XA1 tai XA2 sekä pohjaveden kloridipitoisuuden ylittäessä arvon 1000 mg/l tarvitaan myös rasitusluokka XS2. Vaatimukset betonin laadulle sekä raudoituksen betonipeitteelle määräytyvät rasitusluokkayhdistelmän perusteella. Tarvittavien rasitusluokkayhdistelmien perusteella on kehitetty neljä RT Betonipaalu<sup>®</sup> paalutyyppejä:

- **Normaali vakiopaalu.** Täyttää rasitusluokkien XC2 ja XA1 vaatimukset
- **Sulfaatinkestävä.** Täyttää rasitusluokkien XC2 ja XA2 vaatimukset
- **E-Paalu.** Täyttää rasitusluokan XC2 lisäksi myös kloridirasitusluokkien XD2 ja XS2 sekä rasitusluokan XA1 vaatimukset
- **E-Paalu, sulfaatinkestävä.** Täyttää rasitusluokkien XD2, XS2 ja XA2 vaatimukset

Esitetyt paalutyypit täyttävät käytännössä kaikki teräsbetonipaaluille tulevat ympäristörasitukset 100 vuoden suunnittelukäyttöiällä. Mikäli kuitenkin muita rasitusluokkia tarvitaan, kyseessä on erikoispaalu joka on suunniteltava erikseen tapauskohtaisesti.

Viime aikoina on esiintynyt epätietoisuutta erityisesti kloridirasitusten osalta (rasitusluokat XD ja XS). Joissakin tapauksissa paalujen rasitusluokaksi on valittu rasitusluokka XD3. Tällöin kyseessä on erikoispaalu, jonka kustannukset ovat edellä esitettyjä paalutyyppejä korkeammat ja toimitusajat selvästi pidempiä.

Käyttöikämitoituksen yleisenä lähtökohdانا on valita mahdollisimman oikeat rasi-

tusluokat ja välttää ylimitoitusta. Ylimitoitus voi parantaa tilannetta yhden ominaisuuden osalta, mutta samalla se usein heikentää tilannetta joidenkin muiden ominaisuuksien osalta, esim. halkeiluherkkyys jne.

### Betonirakenteiden kloridirasitukset

Klorideja voi joutua betonirakenteeseen yleisimmin joko merivedestä tai klorideja sisältävistä jäänsulatusaineista. Myös teollisuusjätevedet tai uima-allasvesi voivat sisältää klorideja. Kloridien alkuperän sekä kloridirasituksen ankaruuden perusteella määritetään XD- tai XS-rasitusluokka. Mikäli betoni on kosketuksissa veden kanssa, joka sisältää muista lähteistä kuin merivedestä peräisin olevia klorideja, rakenteet luokitellaan SFS-EN 206:n mukaisesti XD-rasitusluokkiin seuraavasti:

#### XD1

Kohtalaisen kostea. Betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman sisältämille klorideille.

#### XD2

Märkä, harvoin kuiva. Uima-altaat. Betoni on alttiina kloridipitoisille teollisuusvesille.

#### XD3

Märkä ja kuiva vaihtelevat. Sillan osat, jotka ovat alttiina kloridipitoisille roiskeille. Jalakäytävät. Paikoitustalojen laatat.

Vastaavasti mikäli betoni on alttiina klorideille, jotka ovat peräisin merivedestä tai ilman kuljettamasta merivedestä peräisin olevasta suolasta, rakenteet luokitellaan XS-rasitusluokkiin seuraavasti:

#### XS1

Kosketuksessa ilman kuljettaman suolan

kanssa, mutta ei suorassa kosketuksessa meriveteen. Lähellä rannikkoa tai rannikolla olevat rakenteet.

#### XS2

Pysyvästi veden alla. Merirakenteiden osat.

#### XS3

Vuoroveden ja roiskeen vyöhykkeellä. Merirakenteiden osat.

### TERÄSBETONIPAALUJEN KLORIDIRASITUKSET

#### Rasitusluokat XD

Rasitusluokissa XD kloridien lähde on jäänpoistossa käytettävät kloridisuolat. Käytännössä paalut eivät voi olla suorassa kosketuksessa jäänsulatusaineiden kanssa ja siten rasitusluokat XD1 ja XD3 eivät ole mahdollisia paalujen osalta. Rasitusluokka XD1 edellyttäisi, että kloridit kulkeutuisivat ilman mukana paalujen pinnalle. Rasitusluokka XD3 taas edellyttäisi kloridipitoisen veden roiskumista paalujen pinnalle.

Rasitusluokka XD2 on mahdollinen teräsbetonipaaluille. Periaatteessa jäänsulatusaineet voivat kohottaa pohjaveden kloridipitoisuutta siten, että kloridit voisivat tunkeutua pohjavedestä betoniin. Kloridirasitus kohdistuu kuitenkin hyvin paikallisesti tien välittömään läheisyyteen ja pohjavettä on laajalla alueella ympäristössä. Lisäksi jäänsulatusaineita käytetään vain osan aikaa vuodesta. Siten käytännössä pohjaveden kloridikoncentraatio laimenee nopeasti. Onkin epätoiminnallista, että pohjaveden kloridipitoisuus nousisi jäänsulatusaineiden vaikutuksesta yli paalubetonille vaarattomaksi osoitetun pitoisuuden 1000 mg/l.

**Taulukko 1.** XD- ja XS-rasitusluokkien kuvaus  
Betoninormien BY65:2016:n mukaisesti, mahdollinen  
tilanne betonipaalujen osalta sekä esimerkkejä.

| Rasitus-<br>luokka | Rasitusluokan kuvaus (BY65:2016)                                                                                                                 | Mahdollinen tilanne<br>betonipaalujen osalta                                                       | Esimerkkejä betonipaaluissa                                                                                          |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>XD1</b>         | Kohtalaisen kostea. Betonia rasittavat ilmavirran mukana tulevat suolat. Meluseinät tien vieressä.                                               | Paalut alttiina ilmavirran mukana kulkeutuville klorideille. Kloridien lähde on jäänsulatusaineet. | Ei mahdollinen.                                                                                                      |
| <b>XD2</b>         | Kostea, harvoin kuiva. Betonia rasittavat klorideja sisältävät teollisuusvedet.                                                                  | Paalut kloridipitoisessa pohjavedessä. Kloridien lähde on jäänsulatusaineet.                       | Tierakenteiden välittömässä läheisyydessä olevat paalut, kun pohjaveden kloridipitoisuus > 1000 mg/l. <sup>(1)</sup> |
| <b>XD3</b>         | Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen. Suoloja sisältäville roiskeille tai suolaukselle alttiit rakenteet.                                        | Paalut alttiina kloridipitoisille roiskeille. Kloridien lähde on jäänsulatusaineet.                | Ei mahdollinen.                                                                                                      |
| <b>XS1</b>         | Kosketuksessa ilman kuljettaman suolan kanssa, mutta ei suorassa kosketuksessa meriveteen. Rakenteet avomeren rannalla.                          | Paalut alttiina ilmavirran mukana kulkeutuville meriveden klorideille.                             | Ei mahdollinen.                                                                                                      |
| <b>XS2</b>         | Pysyvästi veden alla. Merirakenteiden ja siltojen merivedenalaiset osat.                                                                         | Paalut meren pohjassa tai lähellä meren rantaa.                                                    | Meren välittömässä läheisyydessä olevat paalut, kun pohjaveden kloridipitoisuus > 1000 mg/l. <sup>(1)</sup>          |
| <b>XS3</b>         | Meriveden vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä. Merirakenteiden ja siltojen meriveden vaihtelu- ja roiskevaikutuksille alttiit osat kuten välituet. | Paalut alttiina meriveden roiskeille.                                                              | Ei käytännössä mahdollinen. Paalujen tulisi olla osin meressä ja osin ilmassa.                                       |

(1 = Paalutyypit RTB-300-16E ja RTC-350-16E täyttävät rasitusluokkien XD1-3 ja XS1-3 vaatimukset. Mikäli kyseessä on myös rasitusluokan XA2 sulfaattirasitus, edellä mainitun tuotetunnuksen perään lisätään kirjainpari SR, esimerkiksi RTB-300-16ESR.

### Rasitusluokat XS

Merivedessä tai meren välittömässä läheisyydessä betonipaalut saattavat altistua meriveden klorideille. Rasitusluokka XS1 kuitenkin edellyttäisi, että paalu olisi suoraan alttiina ilman kuljettamalle merivesisumulle. Tällainen tilanne ei liene käytännössä mahdollinen.

Sitä vastoin merenpohjassa tai lähellä meren rantaa oleva paalu voi edellyttää rasitusluokkaa XS2. Meriveden välittömässä läheisyydessä pohjaveden kloridipitoisuus tulee mitata ennen rasitusluokan määrittämistä, sillä XS2 rasitusluokka on tarpeellinen vasta, kun pohjaveden kloridipitoisuus ylittää arvon 1000 mg/l.

Rasitusluokkaan XS3 kuuluvat rakenteet, jotka ovat osan aikaa merivedessä ja osan aikaa ilmatilassa. Tällainen rakenne voisi olla esimer-

kiksi merivedessä oleva laituri, jossa paalut ovat osa merenpinnan yläpuolelle ulottuvaa rakennetta. Suomen ilmastossa tällaiseen rakenne kohdistuu aina myös pakkasrasitus, joten rakenteelle tulee määrittää myös pakkas-suolarasitusluokka XF4. Kokonaisuudessaan tällainen rakenne on hyvin kyseenalainen säilyvyyden kannalta.

Taulukkoon 1 on koottu kloridirasitusluokkien kuvaus Betoninormien BY65:2016:n mukaisesti, mahdollinen tilanne betonipaalujen osalta sekä erimerkkirakenteita.

Paalujen osalta mahdollisia kloridirasitusluokkia ovat ainoastaan luokat XD2 ja XS2. Tällöinkin edellytyksenä on, että pohjaveden mitattu kloridipitoisuus on vähintään 1000 mg/l. Mikäli kloridipitoisuus jää alle 1000 mg/l, ei rasi-

tusluokkaa XD2 tai XS2 tarvita, vaan terästen korroosion osalta rasitusluokaksi asetetaan normaali paalujen rasitusluokka XC2.

*Jouni Punkki, TkT, professori  
Risto Mannonen, TkT  
Betoniviidakko Oy*

Rasitusluokkia XD1, XD3, XS1 tai XS3 ei tule käyttää teräsbetonipaalujen yhteydessä. Kyseiset rasitusluokat on tarkoitettu tilanteisiin, joissa betonirakenne on alttiina ilmavirran mukana tuleville klorideille tai rakenteeseen kohdistuu kloridipitoisen veden roiskeita.