

Betonirakenteen ikääntyminen satojen vuosien käyttöiän aikana

Simulointimenetelmä käyttöiän hallintaan

Olli-Pekka Kari, tekniikan tohtori
olli-pekka.kari@aalto.fi

Betonirakenteiden käyttöiät ovat pidentymässä satoihin vuosiin ylittäen ajanjakson, joka voidaan kattaa sekä kokemusperäisesti että normipohjaisilla suunnittelumenetelmillä. Pidentyneet käyttöiät vaativat siten myös käyttöiän hallintaan käytettävien menetelmien kehittämistä. Olli-Pekka Karin Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitokselle tehdyn väitöstyön [1] päätuloksena esitettiin yleinen termodynaaminen malli betonirakenteen ikääntymisen arviointiin. Mallia sovellettiin matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden loppusijoituskonseptin betonirakenteiden ikääntymisen simulointiin.

Betonin ikääntymisilmiöiden vuorovaikutus

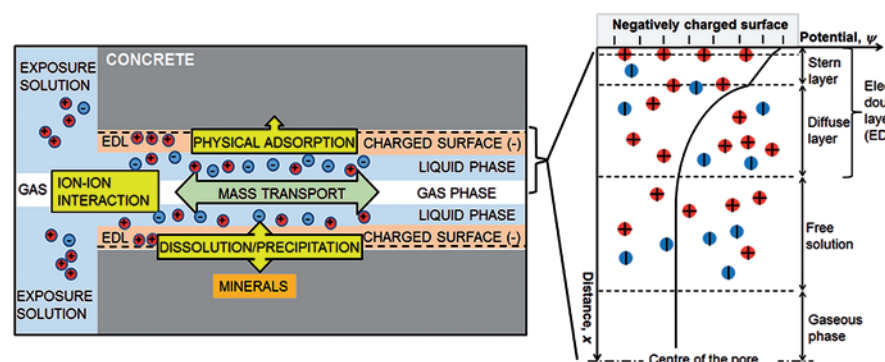
Betonirakenne altistuu käyttöikänsä aikana erityyppisille ikääntymisilmiöille, jotka syntyvät haitallisten aineiden ja betonin välisestä vuorovaikutuksesta. Tavanomaisimpia ilmiöitä ovat betonin karbonatisoituminen sekä kloridien, sulfaattien ja muiden turmeltumista aiheuttavien ionien tunkeutuminen rakenteeseen. Sementtimatriisin komponenttien liukenemisella on myös merkittävä vaikutus. Lisäksi suomalaisissa olosuhteissa vaikuttaa usein jäätymis-sulamisrasitus. Ilmiöille on yhteistä, että ne vaikuttavat jokainen omalla tavallaan mikrorakenteeseen muokaten betonin materiaaliominaisuuksia. Esimerkiksi betonin karbonatisoituminen aiheuttaa alkalisuuden vähenemistä sekä muutoksia sementtimatriisin pääkomponentteihin, huokosrakenteeseen ja -liuokseen. Nämä tekijät voivat johtaa raudotteiden korroosion lisäksi jopa paikalliseen betonin huokoisuuden kasvuun ja hydrataatio- tuotteiden epästabiiliuteen, millä on vaikutusta myös muihin ikääntymisilmiöihin. Muutokset mikrorakenteessa vaikuttavat ionien kulkeutumisen lisäksi niiden sitoutumiseen ja siten ionien tunkeutumiseen rakenteeseen.

Ikääntymisilmiöiden mallinnus

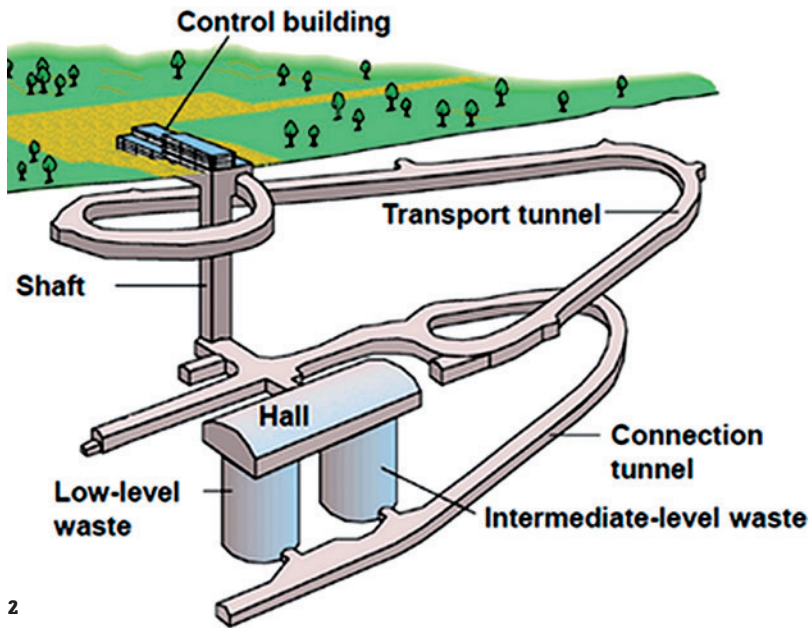
Ikääntymisilmiöiden matemaattisen tarkastelun perustana oli väitöstyössä betonin huokosissa tapahtuvat prosessit, joita on esitelty kuvassa 1. Ympäristöstä rakenteeseen kaasu- tai neste-faasissa tunkeutuvat ionit reagoivat huokosliuoksessa olevien ionien kanssa. Liukenemis- ja saostumisreaktioita tapahtuu mineraalien ja ionien välillä. Tämän lisäksi olennaista on myös ionien fysikaalinen adsorboituminen huokosten sähköisesti varautuneelle pintakerrokselle. Ionit voivat kiinnittyä suoraan sementtihydraattien

negatiivisesti varautuneeseen pintaan tai muodostaa sidoksia muiden ionien kanssa kuvainnollisessa Stern-kerroksessa, mikä vaikuttaa merkittävästi ionien siirtymiseen huokosessa. Positiivisesti varautuneiden ionien, eli kationien määrä on suurempi diffuusiokerroksessa kuin huokosen keskiosissa, jossa sähköinen varaus ei vaikuta.

Koska systeemillä on luonnollinen pyrkimys tasapainoon, voidaan asiaa tarkastella matemaattisesti väitöstyössä esitellyllä termodynaamisella mallilla. Malli koostuu faasien



1 Betonin huokosissa tapahtuvat prosessit skemaattisesti. [1]



2 Suomalainen matala- ja keskiaktiivisten ydinjätteiden loppusijoituskonsepti. [3]

tasapainotarkastelu-, pintakompleksisuus- sekä ionien diffuusiomoduuleista. Laskentojen tuloksena saadaan eri ajanhetkillä halutut käyttöiän arvioinnissa tarvittavat parametrit, kuten mineraalien ja huokoisuuden jakaumat sekä turmeltumista aiheuttavien haitallisten aineiden pitoisuudet betonissa. Lisäksi saadaan perusteita tunnistaa mahdollinen ajankohta raudoitteiden korroosion käynnistymiselle.

Mallin varmentaminen vaatii laajoja laboratoriokoesarjoja

Mallin toiminnan varmentamiseksi suoritettiin tutkimuksessa laaja sarja erilaisia laboratoriokoekteita. Koekappaleina käytettiin sulfaatin kestävästä sementistä valmistettuja betonikoekappaleita, jotka oli valmistettu pitkäkestoisessa tutkimusohjelmassa [2]. Koekappaleita oli säilytetty toistakymmentä vuotta vakio-olosuhteissa ilma- tai liuossäilytyksessä. Laboratoriotutkimukset voitiin karkeasti jakaa kuuteen eri osa-alueeseen, jotka käsittivät huokoisuuden liittyvät tarkastelut, huokosliuoksen ominaisuudet, kiinteiden faasien ja elementtien jakaumat sekä aineiden tunkeutumisen betoniin. Useissa tapauksissa laboratorioanalyysit olivat hyvinkin herkkiä ja vaativat laajoja koesarjoja.

Mallin sovelluskohteena loppusijoitustilojen betonirakenteet

Suomalaisessa loppusijoituskonseptissa matala- ja keskiaktiiviset ydinjätteet sijoitetaan kallioiloihin, joissa betonirakenteiden vapautumisesteiden (kuva 2) edellytetään säilyvän toimintakuntoisina satojen vuosien ajan. Ikääntymisen kannalta tarkastelu voidaan sovelluksen rajaamana jakaa ilmiöihin, jotka tapahtuvat tilojen käytön aikana sekä tilojen sulkemisen jälkeen. Tilojen käyttövaiheessa betonirakenne altistuu pääosin ilmassa olevan hiili-

dioksidin aiheuttamalle karbonatisoitumiselle. Tässä vaiheessa tapahtuvat ilmiöt vaikuttavat tilojen sulkemisen jälkeisiin prosesseihin, jolloin tilat täyttyvät pohjavedellä ja rakenne altistuu pohjavedessä oleville betonin kannalta aggressiivisille ioneille ja toisaalta sementtimatriisin komponenttien liukenemiselle ympäröivään pohjaveteen. Simuloinnissa tarkasteltiin tilannetta, jossa tilojen käyttövaiheen pituus on 100 vuotta ja sulkemisen jälkeinen aika 400 vuotta. Tutkimuksessa tarkasteltiin sulfaatinkestävästä sementistä valmistettua betonia, jonka vesi-sementtisuhte oli 0.43

Käyttövaiheen aikana (kuvat 3 ja 4) sementtihydraattien sekä huokoisuuden ja pH-arvon jakaumissa on tapahtunut muutoksia. Erityisesti kokonaishuokoisuus on vaihdellut ja betoniin on syntynyt paikallinen korkeamman huokoisuuden alue. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää betonirakenteelle kohtuullisina, koska muutokset eivät ole aiheuttaneet merkittävää turmeltumista eivätkä ole ulottuneet raudoitteiden tavanomaiselle asennussyvyydelle. Korroosiota ajatellen on myös pH-arvo pysynyt varsin korkeana. Ilmiöiden voidaankin katsoa vaikuttavan lähinnä sulkemisvaiheen jälkeiseen ajanjaksoon.

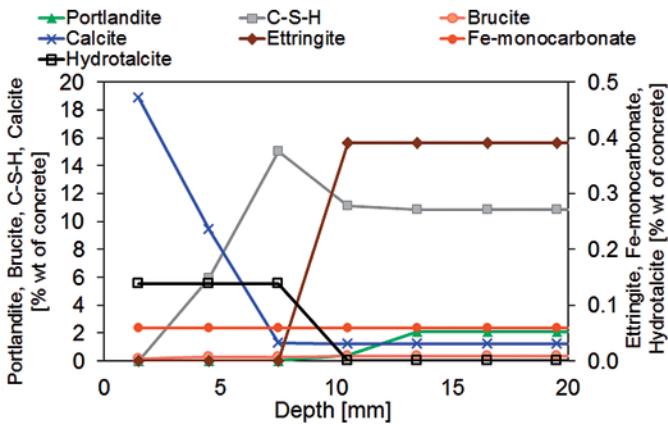
400 vuoden sulkemisvaiheen jälkeen (kuvat 5 ja 6) on tilanne betonin suhteen pysynyt hyväksyttävänä. Muutokset ovat pääosin alle 25 millimetrin syvyydessä, jota voidaan pitää vähäisenä suhteessa betonipeitepaksuuteen ja vapautumisesteiden kokonaispaksuuteen. Raudoitteiden korroosion arviointi on sen sijaan tulkinnallinen, koska kloridikorroosion käynnistymishetken arviointi edellyttää tapauskohtaisia pitkäaikaisia kokeita kirjallisuusarvojen [4] vaihdelleessa merkittävästi. Mahdollisuutta kloridin käynnistämälle raudoitteiden korroosiolle ei voida täysin sulkea pois.

Mallin sovellus yleisesti betonirakenteiden ikääntymisen hallintaan

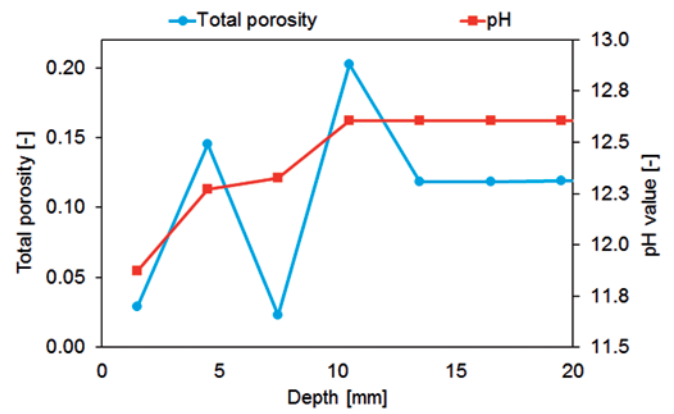
Yleisesti voidaan todeta, että betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelun kannalta tärkeää on ymmärtää ja analysoida betonissa tapahtuvia fysikaaliskemiallisia ilmiöitä ja niiden keskinäistä vuorovaikutusta. Tavanomaisinakin pidettyjen ikääntymisilmiöiden taustalla voi olla lukuisia vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa esitetyllä ilmiöihin perustuvalla fysikaaliskemiallisella mallilla voidaan ennen kaikkea tunnistaa vallitsevat ikääntymisilmiöt sekä arvioida niiden vaikutusta betonin turmeltumiseen. Vastaavasti esitettyyn malliin perustuvilla simuloinneilla voidaan jo suunnittelun alkuvaiheessa optimoida materiaalivalintoja havaitsemalla mahdolliset myöhemmällä käyttöiällä hitaasti paljastuvat turmeltumistekijät. Työssä luotu malli soveltuu kaikille betonirakenteille julkisivuista merivesirakenteisiin. Sitä voidaan käyttää eri betonilaaduille määrittämällä alkutilanteessa vallitsevat ympäristöolosuhteet ja betonin materiaaliikohtaiset parametrit ennen ikääntymisilmiöiden vaikutusta.

Viitteet:

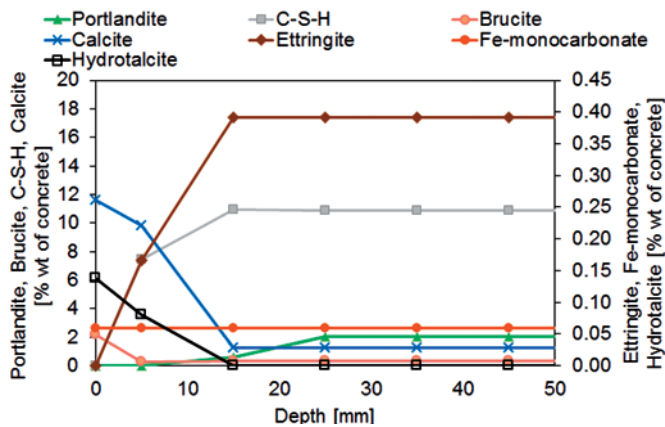
- [1] Kari, O. P., 2015. Long-term ageing of concrete structures in Finnish rock caverns as application facilities for low- and intermediate-level nuclear waste. Doctoral dissertation, Aalto University. <https://aalto.doc.aalto.fi/handle/123456789/15114>
- [2] Ipatti, A., 2004. Concrete long-term durability under final disposal conditions – laboratory and field tests 1997-2003. Report, TVO, VLJ-4/04.
- [3] [http://www.stuk.fi/\(12/2013\)](http://www.stuk.fi/(12/2013))
- [4] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C., and Vennesland, Ø., 2009. Critical chloride content in reinforced concrete – A review. Cem. Concr. Res. 39, 1122-1138.



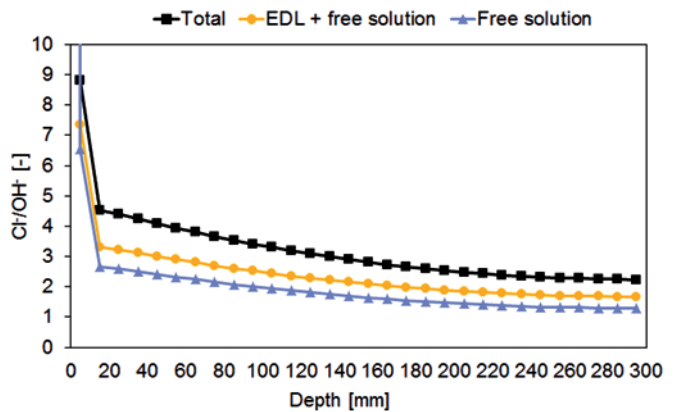
3 Sementtihydraattien jakauma 100 vuoden käyttövaiheen jälkeen. [1]



4 Betonin kokonaishuokoisuuden ja pH-arvon jakaumat 100 vuoden käyttövaiheen jälkeen. [1]



5 Sementtihydraattien jakauma 400 vuoden sulkemisvaiheen jälkeen. [1]



6 Cl-/OH- -jakaumat kokonaisklorideille sekä klorideille sähköisessä varauskerroksessa ja vapaassa liuoksessa 400 vuoden sulkemisvaiheen jälkeen. [1]

Long-term ageing of concrete structures in Finnish rock caverns as application facilities for low- and intermediate-level nuclear waste

In the Finnish disposal concept concrete-made engineered barriers ensuring the safety of low- and intermediate-level waste repositories in rock caverns are designed to remain serviceable for hundreds of years. With regard to the ageing of the concrete, the lifetime of the disposal facilities will be divided into the periods before and after the closing of the caverns, when the concrete will be exposed to two different sets of environmental conditions.

The research pointed out that the ageing of concrete in the disposal conditions is a complex physiochemical phenomenon that cannot be predicted by diffusion models based only on Fick's second law for periods considerably exceeding the period covered experimentally. A thermodynamic model, which considers ion-ion and ion-cement hydrate interactions as well as the properties of the gas phase in multi-ionic transport in concrete, was introduced in the study. A statistical methodology was presented for evaluating the effect of uncertainties on the results.

A range of experimental data extracted from sulphate-resistant Portland cement concretes exposed to natural carbonation or the penetration of aggressive substances under submersion for 13 years in a controlled environment was used for evaluating the thermodynamic model.

The theory of the model was shown to give a plausible basis for estimating the long-term ageing phenomena of concretes, particularly in practical applications where the design periods of structures are hundreds of years. The thermodynamic simulation method also makes it possible to observe the latent factors involved in the deterioration of the concrete. The method considered is general and can be applied to different concrete mixes by defining their casespecific initial values.

Generally, the sulphate-resistant type of concrete with a water-to-cement ratio of 0.43 performed satisfactorily during the simulated period of 500 years, but the initiation of the corrosion of the steel reinforcement cannot be

excluded. The leaching of calcium-bearing components from the concrete affects the strength of the concrete. However, the main detrimental reactions of the concrete take place at a depth of less than 50 millimetres from the exposed surface, which is typically a relatively small part of the whole structural thickness and, especially, of the total set of multiple technical barriers.

Statistical analyses of the factors and the consideration of uncertainties in the simulation results can be used for improving the reliability of the thermodynamic model. The role of the aggregates in the deterioration of the concrete should also be evaluated in the future and more sophisticated models for the alteration of calcium silicate hydrate are necessary if the timescale is significantly extended beyond 500 years.