Betoni käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksessa

Tapio Vehmas, Markku Leivo ja Erika Holt,
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Elina Paukku ja Aki Meuronen,
Sweco Rakennetekniikka Oy
Jari Dunder ja Petri Koho,
Posiva Oy

Posiva Oy rakentaa yhden maailman ensimmäisistä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksista Olkiluotoon. Loppusijoituksen turvallisuus perustuu moninkertaisten vapautumisesteiden käyttämiseen. Betoni ei toimi varsinaisena vapautumisesteenä loppusijoituslaitoksessa, mutta monissa rakenneratkaisuissa betonilla on merkittävä rooli. Esimerkiksi loppusijoitustunneleiden sulkemiseen käytetään massiivisia betonirakenteita.

Loppusijoituksessa käytettävälle betonille on asetettu tarkat vaatimukset. Tärkein yksittäinen vaatimus betonille on hyvä yhteensopivuus vapautumisesteiden kanssa. Posiva Oy on kehittänyt yhdessä VTT:n ja Sweco Rakennetekniikka Oy:n (ennen Aaro Kohonen Oy) kanssa betonin suhteitusta, joka on yhteensopiva loppusijoituslaitoksen vapautumisesteiden kanssa. Kehitystyön tuloksena valettiin ensimmäiset loppusijoitustunneleiden sulkemiseen käytettävät betonirakenteet Posivan tutkimusluolaan loppuvuodesta 2015.

Johdanto

Posiva Oy rakentaa yhden maailman ensimmäisistä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitoksista. Loppusijoituksen valmistelu alkoi 1980 ja vuonna 2000 valittiin loppusijoituspaikaksi Eurajoen Olkiluoto. Rakentamislupa loppusijoituslaitokselle saatiin marraskuussa 2015. Nykyisen aikataulun mukaan Posiva Oy jättää käyttölupahakemuksen vuonna 2020 ja aloittaa loppusijoituksen 2020-luvulla. Nykyisen suunnitelman mukaan loppusijoituslaitos suljetaan 2120-luvulla. Loppusijoitetun ydinpolttoaineen radioaktiivisuus laskee runsaan uraanimalmiesiintymän tasolle 250 000 vuodessa.

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus tapahtuu 400 – 450 metrin syvyyteen Olkiluodon peruskallioon. Loppusijoituksen turvallisuus perustuu moninkertaisten vapautumisesteiden käyttämiseen. Yhden esteen vajavuus tai ennustettavissa oleva muutos ei vaaranna eristyksen toimivuutta. Vapautumisesteinä toimivat polttoaineen olomuoto, loppusijoituskapseli, bentoniittipuskuri, tunneleiden täyteaine ja ympäröivä peruskallio. Käytetty ydinpolttoaine on keraamisessa olomuodossa, joka niukkaliukoisuutensa takia toimii ensimmäisenä vapautumisesteenä. Käytetty ydinpolttoaine pakataan kaasutiiviisiin kupari-valurauta-kapseleihin, jotka kestävät korroosiota ja suojaavat polttoainenippuja syvällä peruskalliossa tapahtuvalta mekaaniselta rasitukselta. Peruskallioon sijoitetut kapselit ympäröidään bentoniittisavesta valmistetulla puskurilla, joka kykenee sitomaan itseensä potentiaalisesti vapautuvia radionuklideja. Bentoniittisavi myös suojaa kapselia mahdollisilta kallion liikahduksilta sekä vähentää veden liikkumista kapselin läheisyydessä. Tunneleiden täytemateriaali koostuu bentoniittisavesta valmistetuista lohkoista ja pelleteistä. Täyteaineilla estetään tunnelien muuttuminen pohjaveden virtausreiteiksi sekä säilytetään tunnelien mekaaninen vakaus. Syvälle peruskallioon sijoitettuna kapselit ovat suojassa maanpäälisiltä muutoksilta ja loitolla ihmisten normaalista elinympäristöstä. Pitkäaikaisturvallisuuden kannalta on oleellisinta että loppusijoitustilat täytetään ja suljetaan siten, että tilanne kalliossa palautuu mahdollisimman lähelle loppusijoitustilojen louhimista edeltävää luonnontilaa.

Betonimassojen vaatimukset ydinjätteen loppusijoituksessa

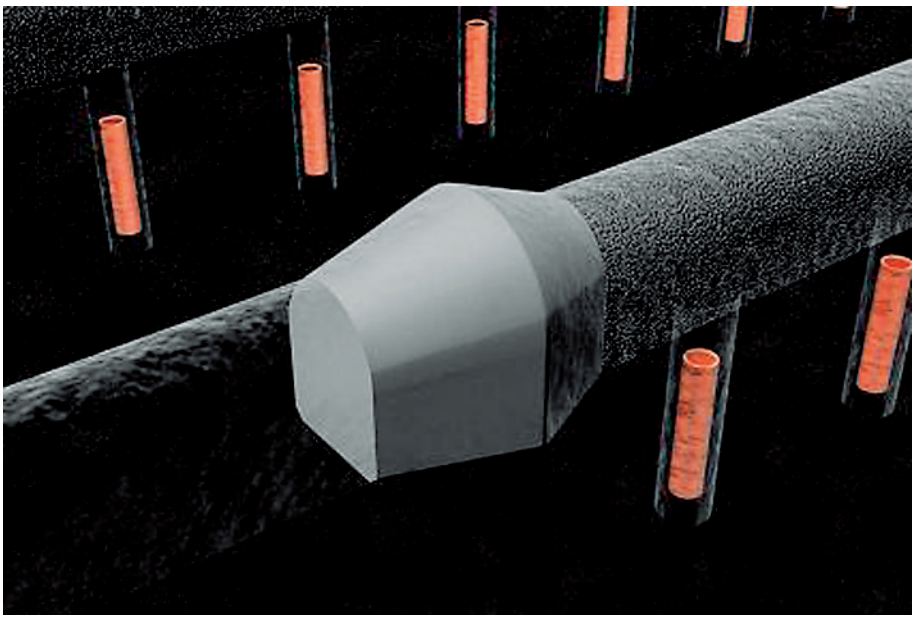
Posiva Oy:n loppusijoituskonseptissa betonimateriaalit eivät toimi vapautumisesteinä. Betonia ja laastia käytetään kuitenkin huomattavia määriä loppusijoitustiloissa. Injektointilaasteja ja ruiskubetonointia käytetään normaalin kallio-tekniikan tapaan. Ennen loppusijoituslaitoksen sulkemista sementtipohjaisten materiaalien määrä pyritään minimoimaan poistamalla mekaanisesti esimerkiksi ruiskubetonointi. Merkittävän osan suljettavaan luolastoon jäävästä betonista muodostavat tunnelien sulkemiseen käytettävät massiiviset betoniset tulpparakenteet, joilla jokainen loppusijoitustunneli suljetaan. Betonisten tulppien tehtävänä on eristää luolaston eri osat toisistaan ja estää mekaaninen ja hydrologinen vuorovaikutus luolaston eri osien välillä loppusijoituslaitoksen toiminnan ajan. Loppusijoitustunnelien betonitulppien suunniteltu käyttöikä on siis ainoastaan sata vuotta. Kuitenkin betoniset tulpat jäävät osaksi loppusijoituslaitosta ja niiden tulee olla yhteensopivia vapautumisesteiden kanssa. Betonitulpat ovat suorassa vuorovaikutuksessa täytemateriaalien kanssa ja mahdollisesti välillisesti vuorovaikutuksessa bentoniittipuskureihin.

Yksittäinen betonitulppa on noin kuusi metriä pitkä ja halkaisijaltaan 4,35 – 6,35 metriä. Betonia yksittäinen tulppa sisältää noin 160 m^3 ja raudoitteita noin kaksikymmentä tonnia. Tulppien arvioitu kokonaismäärä on 130 kappaletta, jolloin tulppien kokonaistilavuudeksi muodostuu 20 800 kuutiometriä. Massiivisessa kohteessa betonirakenteen lämpötilan nousu on rajoitettu alle 60°C asteeseen. Betonitulppien tavoitelujuus on yli 45 MPa ja vesitiiveys tulee saavuttaa alle 50 mm kerrosvahvuudella.

1 Betonitulpan valumuotti.

Artikkelin valokuvat: VTT ja Posiva Oy

1



2

3

2 Betoninen loppusijoitustunnelin tulppa Posivan KBS-3V konseptin mukaan (Kuva Posiva Oy).

3 Betonimassa.

4 Mock-up muotti ja raudoitukset.

5 Betonitulpan valu.

Kutistuman tulee olla mahdollisimman pieni. Ympäristönsä perusteella tulppamassan tulee täyttää säilyvyysluokan XA3 vaatimukset. Betonin soveltuvuus päätettiin arvioida toiminnallisten ominaisuuksien perusteella. Betonien sulfaatinkestävyys, tiiveys ja alhainen veden tunkeutuma osoitettiin kokeellisesti.

Tärkein tulppabetonin vaatimuksista liittyy kuitenkin tulppamassan yhteensopivuuteen vapautumisesteiden kanssa. Bentoniittisavi, josta puskuri ja täytemateriaalit koostuvat, on epästabiili korkeassa pH:ssa. Bentoniittisaven liukoisuus lisääntyy eksponentiaalisesti pH:n ylittäessä arvon kymmenen. Käytännössä pH:n alittaessa arvon 11, voidaan todeta bentoniittisaven liukoisuuden olevan riittävän alhainen. Betonin huokosveden pH on tyypillisesti yli kolmetoista. Tavallinen betoni ei siis sellaisenaan sovellu loppusijoituslaitoksen betonitulppiin korkean emäksisyytensä vuoksi. Betonin huokosveden pH:n on todettu olevan riippuvainen sideaineen kalsium/pii -suhteesta ja vapaiden alkalien määrästä. Tasapainossa olevan sideaineen kalsium/pii -suhteen alittaessa arvon 0,9 pH laskee alle yhdentoista. pH arvon kymmenen alittavan sideaineen tasapaino kalsium/pii -suhde on alle 0,6. Normaalin sementin kalsium/pii -suhde on tyypillisesti yli kolme. Pii-pitoisilla seosaineilla (silika, lentotuhka) saadaan sideaineen kalsium/pii -suhde laskettua hyväksyttävälle tasolle. Jokaista sataa sementtikiloa kohden tulee siis lisätä 55 – 95 kiloa silikaa tai vastaavia seosaineita, jotta betoni olisi yhteensopiva vapautumisesteiden kanssa.

Loppusijoitusluolastossa käytettävät materiaalit hyväksytetään tiukan prosessin kautta. Vierasainehyväksynnän tarkoituksena on varmistaa materiaalien soveltuvuus loppusijoitusympäristöön. Betonitekniikan kannalta ongelmallisimmat kielletyistä materiaaleista ovat polykarboksylaatit. Polykarboksylaatit voivat mahdollisesti kompleksoida vapautuvia radionuklideja liukenevaan muotoon ja edesauttaa radionuklidien kulkeutumista ympäristöön. Valtaosa nykyään käytetyistä tehonotkistimista ovat polykarboksylaatteja.

Loppusijoitusympäristöön soveltuvien betonimassojen tulee olla lujia, tiiviitä, omata matala lämmönnousu ja sulfaattipitoisuus, sisältää lähes puolet seosaineita sideaineestaan ja kestää luolaympäristön kemiallinen rasitus. Lisäksi betonimassan tulee olla hyvin työstettävä ilman yleisintä käytössä olevaa tehonotkistinta. Tyypillisesti betonimassan hyvä lujuus, tiiveys ja säilyvyys saavutetaan matalalla vesi/sideaine -suhteella. Betonimassan alhainen lämpötilannousu ja sulfaattipitoisuus saavutetaan matalalla sideainepitoisuudella. Yhtäaikainen matala vesi/sideaine -suhde ja sideainepitoisuus saavutetaan ainoastaan alhaisella kokonaisvesipitoisuudella. Betonin tulee kuitenkin olla hyvin työstettävä.

Betonimassojen kehitystyö

Vastaavia betonimassoja on aiemmin tutkittu Kanadassa ja Ruotsissa. Kanadan loppusijoituskonsepti eroaa Posiva Oy:n konseptista ja Kanadassa suunnitellun massan työstettävyys ei mahdollista tulppamaista valua. Ruotsin loppusijoituskonsepti on hyvin samankaltainen kuin Posiva Oy:n. Ruotsalaisen massan vesipitoisuus oli kuitenkin liian korkea täyttääkseen asetetut laatuvaatimukset. Lisäksi ruotsalaisessa massassa käytetty notkistin oli polykarboksylaattipohjainen. Kumpikaan olemassa olevista betonimassoista ei siis sovellu sellaisenaan Olkiluodon loppusijoituslaitokseen. Ruotsin ja Kanadan massojen perusteella suunniteltiin kaksi suomalaista betonimassaa, joiden sideainekoostumukset erosivat toisistaan. Ensimmäisen massan sideainekoostumus oli

4

5

Taulukko 1. Betonimassavaihtoehdot.

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2
CEM I	120 kg/m³	105 kg/m³
Silika	80 kg/m³	91 kg/m³
Lentotuhka	–	84 kg/m³
Kvartsihiekka	256 kg/m³	114 kg/m³
Kiviaines	1805 kg/m³	1840 kg/m³
Notkistin	15 kg/m³	12,6 kg/m³
Tehollinen vesi	125 kg/m³	126 kg/m³
Leviämä	650 mm	550 mm

Taulukko 2. Betonitulpan valun laadunvalvontatulokset.

	Betoni		
	Tavoite	16 mm kiviaineksella	32 mm kiviaineksella
Leviämä	600 ± 40 mm	610 ± 40 mm	610 ± 80 mm
Puristuslujuus (91d)	> 50 MPa	78,5 MPa	87,0 MPa
Vesitiiveys (91d)	< 50mm	2 mm	2 mm
Suotoliuoksen pH (91d)*	< 11	10,9	10,9
Valettu kokonaismäärä	–	80 m³	96 m³

* määritetty Olkiluodon pohjavesisimulantissa.

identtinen ruotsalaisen version kanssa. Massan kokonaissideainepitoisuus oli 200 kg/m³, josta 120 kg/m³ oli Portland sementtiä ja 80kg/m³ silikaa. Toinen massa sisälsi kolme sideaineosaa, 105 kg/m³ sementtiä, 91 kg/m² silikaa ja 84 kg/m³ lentotuhkaa. Molempien massojen vesipitoisuus pyrittiin kokeellisesti säätämään mahdollisimman pieneksi kuitenkin säilyttäen massojen hyvä työstettävyys.

Ensimmäinen ratkaistava ongelma oli tehonotkistimen valinta. Posiva Oy on käyttänyt hyvällä menestyksellä naftaleenipohjaista notkistinta tutkimusluolaston injektoinneissaan. Esikokeissa naftaleenipohjaisen notkistimen todettiin toimivan hyvin myös suunnitelluissa massoissa. Identtinen massakoostumus toistettiin käyttäen kilomääräisesti samaa polykarboksylaatti- ja naftaleeninotkistin annostusta. Molempien massojen leviämäksi saatiin 650 ± 30mm. Naftaleeninotkistimen kuiva-ainepitoisuus oli luonnollisesti korkeampi, mutta merkittävää hydrataation hidastumista ei havaittu.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa suomalaisten massojen vesipitoisuus minimoitiin kokeellisesti. Molempien massojen tehollinen vesimäärä saatiin laskettua laboratoriokokeissa alle 125 kg/m³, leviämän ollessa parhaimmillaan 650 mm. Matalan vesipitoisuuden saavuttamista edesauttoivat hienojakoisten materiaalien pakkautumisen optimointi ja runsas notkistimen käyttö. Vesipitoisuuden minimoimisen seurauksena betonin reologinen käyttäytyminen kuitenkin muuttui. Betonimassojen plastiseksi viskositeetiksi mitattiin yli 200 Pas, kun tyypillinen itsestään tiivistyvien betonien plastinen viskositeetti on välillä 20 – 120 Pas. Luonteeltaan kehitetyt massat olivat siis hyvin hitaita.

Kummankin kehitetyn massan todettiin ylittävän betonille asetetut vaatimukset. Massojen lopulliset koostumukset on esitetty Taulukossa 1. Massojen lujuudet ylittivät 50 MPa:n vaatimuksen alle 28 vuorokauden iässä. Vuoden iässä 200 kg/m³ sideainetta sisältävä betoni on rikkonut sadan megapascalin rajan. Yhdeksänkymmenen yhden vuorokauden iässä suoritettu vesitiiveyskoe (EN 12390-8) antoi kummallekin massalle veden tunkeutuman syvyydeksi alle 5 millimetriä. Molempien betonien todettiin kestävän sulfaattirasitusta erittäin hyvin.

Laboratoriosta käytäntöön

Massojen soveltaminen käytännössä kuitenkin oli edelleen kyseenalainen johtuen korkeasta plastisesta viskositeetistä. Lisäksi massojen hyvän työstettävyyden saavuttamiseen vaadittiin suurta sekoitustehoa. Seuraavat koesarjat suoritettiin betoniurakoitsijan toimesta. Kokeiden perusteella massan koostumusta muutettiin teolliseen tuotantoon sopivammaksi ja valittiin massan koostumus valuihin. Massavaihtoehto kaksi valittiin käytettäväksi massaksi.

Ennen varsinaista valua suoritettiin niin sanotut mock-up kokeet. Mock-up valun tarkoituksena oli simuloida itse valutapahtumaa ja selvittää valun suoritusmahdollisuudet. Mock-up valu suoritettiin tulpan geometriaa jäljittelevään valumuottiin. Valumuotti sisälsi raudoitteiden lisäksi tulpan yläosan harjanteen joka aikaisempien kokemusten perusteella tiedettiin haastavaksi. Mock-up valujen perusteella massan työstettävyysaikaa pidennettiin, maksimiraekokoa laskettiin raudoitteiden läheisyydessä ja valupisteiden lukumäärää kasvatettiin. Lisäksi päätettiin käyttää saattoputkea muotin sisällä, jotta betonimassa saataisiin valumaan tasaisemmin muotin takaosaan. Kolmannella yrittämällä onnistuttiin mock-up rakenteen valamisessa hyvin.

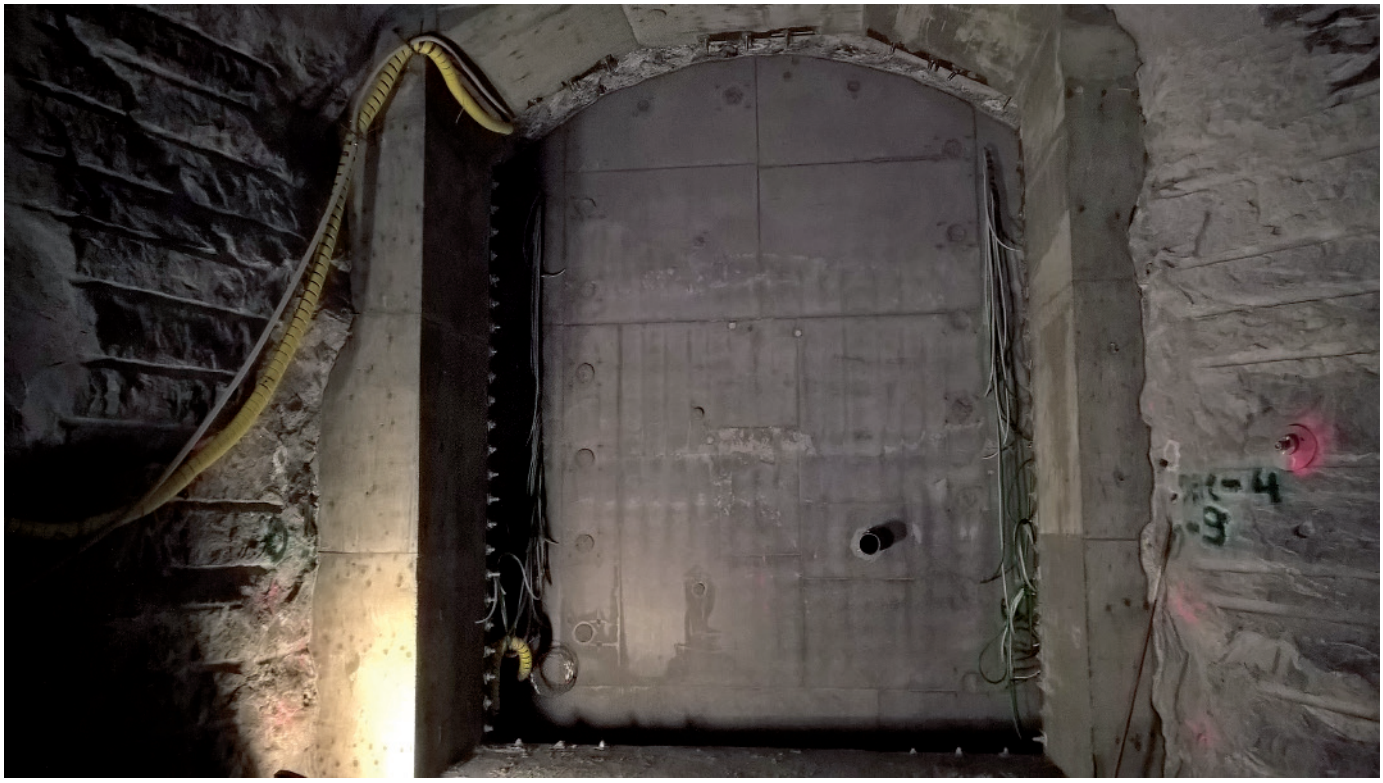
Maanalainen tulpparakenne valettiin kahdessa osassa Posivan tutkimusluolaan (ONKALO). Ensimmäinen osa valettiin 15. heinäkuuta 2015 ja toinen osa syyskuun 16. päivä 2015. Betoni toimitettiin tutkimusluolaan neljän kuution kuormina ja betonikuormien toimitusväli tutkimusluolaan oli 20 minuuttia. Kokonaisuudessaan valut kestivät 10 –12 tuntia. Betonimassan laadunvalvontaa suoritettiin ennen kuorman lähtöä betoniasemalla ja tutkimusluolassa ennen muottiin pumppaamista. Ainoastaan yksi kuorma jouduttiin lisänotkistamaan ennen muottiin pumppaamista. Muita ongelmia ei laadunvalvonnassa havaittu. Betonimassan lämpötilan nousu rakenteen keskeltä mitattaessa jäi alle 45°C. Laadunvalvonnan tulokset on esitetty Taulukossa 2.

Lopputarkastelussa betonivalun todettiin onnistuneen hyvin. Betonin saavuttaessa 91 vuorokauden iän suoritetaan betonitulpan ja kallion välisen tilan injektointi lopullisen vesitiiveyden varmistamiseksi. Jatkossa tulpan vesitiiveyttä tullaan tutkimaan ohjaamalla tulpan taakse 42bar hydrostaattinen paine. Paine vastaa hydrostaattista painetta 420 metrin syvyydessä. Lisäksi tulppa sisältää yli sata sensoria joilla tulpan sisäisiä jännitystiloja, suhteellista kosteutta, kallioon kohdistuvaa painetta, lämpötilaa ja vesitiiveyttä voidaan tarkkailla automaattisesti.

Kiitokset

Kirjoittajat haluavat kiittää kaikkia projektiin osallistuneita tahoja: Sweco Rakennetekniikka Oy:tä tulpan rakennesuunnittelusta, betonin vaatimusten määrittelystä ja kehitystyöstä; Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:tä betonin kehitystyöstä, testauksesta ja laadunvalvonnasta; Rudus Oy:tä betonin testaamisesta, toimittamisesta ja mock-up valuista; Hartela Oy:tä tulpan valmistamisesta vastaavana urakoitsijana ja Posiva Oy:tä projektin hallinnasta ja ohjaamisesta.

Euroopan unionin Euroopan atomienergiayhteisö on rahoittanut projektia seitsemännen kehysohjelman puitteissa (FP7/2007–2013, rahoituslupa numero 323273, DOPAS -projekti). DOPAS-projektin loppuseminaari pidetään Turussa 25.–27. toukokuuta 2016. Lisätietoa seminaarista löytyy DOPAS-projektin internet sivuilta: http://www.posiva.fi/dopas.



6 Valmis betonitulppa.

Concrete in final disposal of spent nuclear fuel

Posiva Oy is building in Olkiluoto one of the first final disposal repositories for spent nuclear fuel in the world. The safety of final disposal is based on the use of multiple release barriers. Concrete is not used as an actual release barrier in the final disposal facility, but plays a significant role in many of the structural solutions. Massive concrete structures are needed, for example, for the closure of the final disposal tunnels.

Very strict requirements have been specified for concrete used in the final disposal repository. The most important of the requirements is good compatibility of concrete with the release barriers. Posiva Oy has together with VTT Technical Research Centre of Finland and Sweco Rakennetekniikka Oy developed the proportioning of concrete to make it compatible with the release barriers used in the final disposal facility. The first concrete structures for the closure of the final disposal tunnels, based on the results of this development work, were poured in Posiva's underground research facility in late 2015.

As the schedule stands today, Posiva Oy will submit the application for the construction licence in 2020 to start final disposal activities in the 2020's. According to the current plans, the final disposal repository is to be closed in the 2120's. The radioactivity of the nuclear fuel placed in the final disposal repository will be reduced to the level of a rich uranium deposit in 250 000 years.

The spent nuclear fuel is placed for final disposal at a depth of 400 - 450 metres. The amount of concrete and grout used in the final disposal facility is considerable. Injection grouting and shotcreting are used in the same way as in normal rock engineering. The massive concrete end plug structures used for the closure of each tunnel constitute a significant part of the concrete that will stay in the repository after its closure. These concrete plugs are designed to isolate the different parts of the tunnel system from each other and to prevent mechanical and hydrological interaction between the tunnel parts at the operating stage of the final disposal repository. In other words, the planned service life of the concrete plugs is only a hundred years. However, the plugs will stay underground as part of the final disposal repository and must be compatible with the release barriers. The concrete plugs will be in direct interaction with the backfill materials and possibly in indirect interaction with the bentonite buffers.

The concrete end plugs are about six metres long and 4.35 – 6.35 metres in diameter. The total number of the plugs is ca. 130.

The properties required of the concrete batches to make them suitable for the final disposal environment include high strength and density as well as low temperature rise and sulphate content. Almost half of the binding agent content shall consist of admixtures and the concrete must be resistant to the chemical stresses present in the underground environment. The fresh concrete must also be highly workable without the need for the most commonly used superplasticiser. The strength, density and durability criteria can typically be achieved through a low water/binder ratio. A low water/binder ratio simultaneously with a low binder content can only be achieved by means of a low total water content. But the concrete still needs to be easily workable.

Kirjallisuutta:

- Holt, E; Leivo, M; Vehmas, T. Low-pH concrete developed for tunnel and plugs used in nuclear waste containment. Concrete Innovation Conference, 2014, CIC 2014, 11-13 June 2014, Oslo, Norway.
- Leivo, M; Vehmas, T; Holt, E. Developing Low pH concrete for tunnel plugging structures in nuclear waste containment. 2014, NCR 2014, 13-15 August 2014, Reykjavik, Iceland.
- http://www.posiva.fi/dopas