

Juuso Hiltunen

Loppusijoitustunnelin betonitulpan rakentamisen suunnittelu

Tekniikka ja merenkulku Pori
Rakennustekniikan koulutusohjelma
2015

Hiltunen, Juuso Matias
Satakunnan ammattikorkeakoulu,
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Maaliskuu 2015
Ohjaaja: Virtanen, Laura
Sivumäärä: 60
Liitteitä:

Asiasanat: betonitulppa, ONKALO, betonirakenne, betonointi, raudoitus, muotti.

Opinnäytetyön aiheena oli Posiva Oy:n Olkiluodossa sijaitsevaan ONKALOOon rakennettava loppusijoitustunnelin sulkeva betonitulppa. Nyt rakennettava POPLU-tulppa on osa euroopanlaajuista DOPAS-projektia, minkä tarkoituksena on kehittää sekä vertailla loppusijoitustunnelien sulkemiseen käytettäviä tulpparakenteita.

Opinnäytetyössä keskityttiin pääasiallisesti betonitulpan rakentamisessa käytettävien työmenetelmien suunnitteluun ja kehittämiseen. Varsinaisen työsuunnittelun ohella opinnäytetyössä on esitetty suunnittelua ja rakentamista ohjaavat tekniset vaatimukset sekä työturvallisuus. Työssä käsitellään tulpan rakentamisen keskeiset elementit, jotka ovat raudoitus, muottityö sekä betonointi. Opinnäytetyössä kuvataan myös vaiheet miten on päädytty käyttämään tiettyjä työmenetelmiä sekä kuvata samalla kuvataan itse työsuoritus.

Osana tulpan rakentamisen suunnittelutyötä on tehty kaksi toteutustavoiltaan eriävää menetelmäkoetta, joissa on voitu testata eri menetelmiä sekä tehty havaintoja mahdollisia kehitystoimenpiteitä varten. Työmenetelmien testaamisen ohella menetelmäkokeiden aikana on kerätty mahdollisimman paljon tietoa betonimassan kehitystyötä varten. Menetelmäkokeista saatuja tuloksia on hyödynnetty aktiivisesti myös tämän opinnäytetyön tekemisessä.

Tässä opinnäytetyössä kuvatut työmenetelmät on voitu todeta menetelmäkokeiden avulla soveltuviksi betonitulpan rakennustöissä käytettäväksi.

Construction works planning for a final disposal tunnel closing plug

Hiltunen, Juuso Matias

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Construction Engineering

March 2015

Supervisor: Virtanen, Laura

Number of pages: 60

Appendices:

Keywords: concrete plug, ONKALO, concrete structure, casting, reinforcement, formwork.

The purpose of this thesis was documenting the construction works planning process for a final disposal tunnel end plug for Finland's nuclear waste repository. The plug will be constructed to ONKALO in Eurajoki. This plug is a part of the EU DOPAS-project which aims to develop safe practices for the tunnel closing system of spent nuclear fuel final disposal.

The main issue of this thesis was the construction methods planning and research. The main elements of the plug construction are described in thesis. These main elements are reinforcement installation, formwork installation and concrete casting. There is also a description of the designing process and reasoning why the final method has been chosen for implementation. All working methods and steps are described in this thesis.

As a part of the plug's construction works and designing process, MOCK-UP test castings have been made. In these MOCK-UPS different working methods were used to make sure that the methods used for plug's construction works are the best. While testing these alternative working methods, information was collected about the concrete for the future concrete mix development process. The results of the method tests have been utilized actively in this thesis.

The usability of the working methods that have been described in this thesis have been test in these MOCK-Ups and are useful for the final construction.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TILAAJA.....	6
2.1	Posivan toimintapolitiikka	6
2.2	ONKALO ja loppusijoitus	7
3	OPINNÄYTETYÖN TAVOITE.....	9
4	POPLU-PROJEKTI.....	9
4.1	Projektin taustaa.....	9
4.2	POPLU-tulppa	10
4.3	Viranomaismääräykset ja ohjeet.....	11
4.4	Tulpan vaatimusmäärittely	12
4.4.1	Vaatimukset tulpan sijoituspaikalle	12
4.4.2	Betonitulpan teknisten ominaisuuksien ja vaatimusten määrittely	13
4.5	Vieraiden aineiden käyttö ONKALOSSA	15
5	TULPAN RAKENTAMINEN	17
5.1	Tulpan rakentamisen valmistelutyöt.....	17
5.1.1	Betonimassan kehitys ja valinta	17
5.1.2	Betonirakenteiden menetelmäkoe MOCK-UP	19
5.2	Viranomaismääräykset ja ohjeet.....	20
5.3	Toteutukseen liittyvä laadunvarmistus ja dokumentointi	22
5.4	Työturvallisuus	23
5.4.1	Työturvallisuuden huomioiminen rakennushankkeen valmistelussa.....	23
5.4.2	Työturvallisuus Posivassa	25
6	TULPAN RAKENNUSTÖIDEN TEKNISEN SUORITUKSEN SUUNNITTELU	28
6.1	Raudoitustyöt.....	28
6.1.1	Raudoituksen tekniset vaatimukset	29
6.1.2	Raudoituksen toteutus	31
6.2	Muotitus.....	37
6.2.1	Muottityön suunnittelu ja käytettävä muottikalusto.....	38
6.2.2	Muottityö	41
6.3	Betonityöt.....	44
6.3.1	Tulpan betonoinnin suunnittelu.....	44
6.3.2	Tulpan betonointi	51
7	YHTEENVETO	56
8	LOPPUSANAT	57
	LÄHTEET.....	59

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään loppusijoitustunnelin betonitulpan rakentamisen suunnittelua. Kohteena on Olkiluodossa sijaitseva Posiva Oy:n rakennuttama tuleva käytetyn ydinjätteen loppusijoitustila ONKALO ja sinne rakennettava betonitulppa-demonstraatio.

ONKALOon rakennettava POPLU-tulppa on osa Euroopan laajuista DOPAS-projektia, joka on keskittynyt kehittämään ydinpolttoaineen loppusijoitustilojen sulkemisjärjestelmiä. Posiva Oy:n rakennuttama tulppa on yksi DOPAS-projektissa rakennettavista täyden mittakaavan tulpista.

Työssä keskitytään rakennettavan betonitulpan käytännön toteutukseen ja työmenetelmien valintaan. Työn painopiste tulee olemaan rakennettavan tulpan betonoinnissa käytettävä valutekniikka ja betonoinnissa käytettävä pumppauskalusto. Työssä käsitellään myös tulpan rakentamisen muut työvaiheet, kuten raudoitus ja muottityö sekä esitetään tulpan rakentamista sanelevat tekniset ominaisuudet ja vaatimukset.

2 TILAAJA

Opinnäytetyön tilaaja on Posiva Oy. Posiva on perustettu vuonna 1995 vastaamaan omistajiensa Teollisuuden Voima Oyj ja Fortum Heat & Power:in tuottaman käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksesta. Posiva on asiantuntijaorganisaatio, joka vastaa tutkimustila ONKALON rakennustöistä ja tunnelissa tehtävistä tutkimuksista. Tulevaisuudessa yhtiö tulee huolehtimaan käytetyn ydinjätteen loppusijoituksesta ja myöhemmässä vaiheessa loppusijoituslaitoksen sulkemisoperaatiosta. Posiva työllistää tänä päivänä noin 100 eri alojen asiantuntijaa ja yhtiön liikevaihto vuonna 2012 oli 67 M€. (Posivan www-sivut 2014)

2.1 Posivan toimintapolitiikka

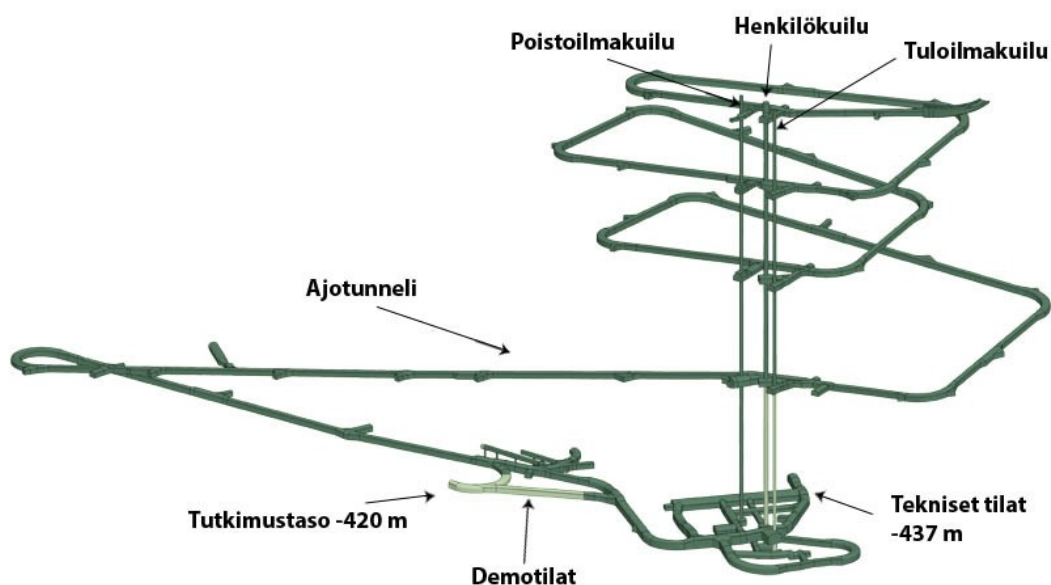
Posivan toiminnan lähtökohtana on käytetyn ydinpolttoaineen turvallinen, oikea-aikainen ja kustannuksiltaan tehokas ydinjätteen loppusijoitus yhtiön omistajien ja muiden sen toimintaa ohjaavien tahojen asettamien vaatimusten mukaisesti. Posivassa pyritään jatkuvasti kehittämään ja parantamaan toimintaa niin, että ympäristönsuojelun, lakien sekä määräyksien noudattaminen täyttyy.

Posivalla on käytössä sen toimintaa ohjaava sertifioitu (ISO 9001, ISO 14001 ja OHSAS 18001) johtamisjärjestelmä, jonka tarkoituksena on varmistaa yhtiön toiminnan korkea laatu kaikilla toimialueilla. Johtamisjärjestelmä koostuu osa-alueista, joita ovat laatu, ympäristö, ydinturvallisuus ja työterveys. Johtamisjärjestelmän joustavuudella voidaan sujuvasti yhdistää ja ohjata pienempiä prosesseja.

Posivan toimintaan vaikuttavat kiinteästi myös yhtiön sisäiset tavoitteet. Yhtiön kaikille eri organisaatioille on asetettu omat tavoitteet ja kyseisten organisaatioiden tuottaman toiminnan tulee vastata niitä koskevia tavoitteita. Yhtiön kaikkia organisaatioita koskevat yhteiset tavoitteet ovat ydin- ja säteilyturvallisuus-, laatu-, ympäristö-, yritys- ja työturvallisuustavoitteet. (Posivan www-sivut 2014. Viitattu 10.2.2014)

2.2 ONKALO ja loppusijoitus

Tällä hetkellä ONKALO toimii Posivan maanalaisena kallioperän tutkimustilana. ONKALOn rakennustyöt aloitettiin ajotunnelin louhinnalla vuonna 2004. Ajotunneli kulkee maanpinnalta syvyydeltä -437 metriä. Tasolla -437 sijaitsevat ONKALOn tekniset tilat, ne esitetään kuvassa 1. Ajotunnelin pituus on noin 5 km. ONKALOSSA tehdään paljon erilaisia tutkimuksia, joilla pyritään selventämään muun muassa loppusijoituspaikan kallio- ja pohjavesiolosuhteista. Tutkimusten tuloksia hyödynnetään loppusijoitustilojen suunnittelussa ja myöhemmin rakentamisessa. (Posivan www-sivut 2014.)



Kuva 1 ONKALO-kaavio (Posivan www-sivut 2014.)

ONKALOon on tehty laaja testausalue, joka on rakennettu varsinaisten loppusijoitustunneleiden mukaisia mittoja sekä vaatimuksia noudattaen. Tämän demonstraatiotunneleista koostuvan alueen tarkoituksena on havainnollistaa, minkälaisia tulevaisuuden loppusijoitustunneleista tulee sekä testata eri rakennusmenetelmiä. Tämän opinäytetyön aiheena oleva loppusijoitustunnelin betonitulppa tullaan myös toteuttamaan kyseiselle demonstraatioalueelle louhittuun tunneliin. (Posivan www-sivut 2014.)

Loppusijoitustilojen rakentaminen tulisi olla 2020-luvun alkupuolella sellaisessa laajuudessa, että niissä voidaan aloittaa varsinainen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus. Kun sähköä tuotetaan ydinvoimaa käyttäen, syntyy radioaktiivista jätettä, ydinjätettä. Ydinjäte voidaan luokitella kolmeen eri kategoriaan: matala- ja keskiaktiivinen ydinjäte, sekä korkea-aktiivinen ydinjäte. Matala- ja keskiaktiivinen ydinjäte varastoidaan laitosalueilla sijaitseviin voimalaitosjätteitä varten rakennettuihin loppusijoitustiloihin. ONKALON varastoitava ydinjäte on korkea-aktiivista ydinjätettä. Sitä ei voida lopullisesti varastoida voimalaitosten yhteydessä oleviin loppusijoitustiloihin. Tällä hetkellä korkea-aktiivinen käytetty ydinpolttoaine on varastoitu käytetyn ydinpolttoaineen välivarastoihin, joissa polttoainesauvoja jäähdytetään vesialtaissa ennen siirtoa varsinaisiin loppusijoitustiloihin.

Käytetyn ydinpolttoaineen kapselointia varten ONKALON alueelle tullaan maanpinnalle rakentamaan kapselointilaitos, missä käytetyt ydinpolttoainesauvat pakataan loppusijoituskapseleihin ennen kapseleiden laskemista niille porattua kuilua pitkin alas loppusijoitustilaan. Loppusijoitustila sijaitsee noin 420 metrin syvyydessä Olkiluodon kallioperässä. Kuparista valmistetut loppusijoituskapselit kuljetetaan loppusijoitustiloissa olevien keskustunneleiden kautta loppusijoitustunneleihin ja asennetaan niissä sijaitseviin loppusijoitusreikiin. Kapselin ollessa paikallaan, ympäröidään kapseli bentoniittirenkain. Kun loppusijoitustunnelin kaikki loppusijoitusreiät on täytetty, aletaan tunnelia täyttää perältä alkaen bentoniitti-savilohkoin. Lopuksi loppusijoitustunneli suljetaan tässä opinnäytetyössä käsiteltävällä betonitulpalla. (Posiva Oy - esite)

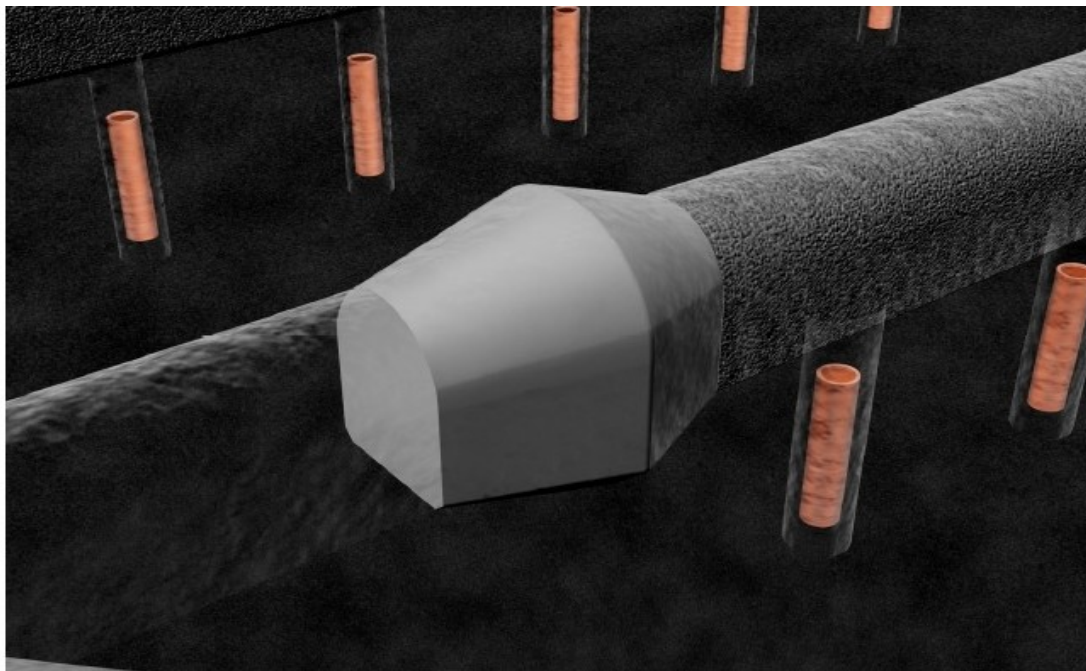
3 OPINNÄYTETYÖN TAVOITE

Tämän opinnäytetyön tärkeimpänä tavoitteena on tuottaa Posiva Oy:lle työsuunnitelma loppusijoitustunneleiden sulkemiseen käytettävän betonitulpan rakentamiseen. Nyt testaustarkoituksessa Posivan ONKALoon rakennettava tulppa on ensimmäinen maailmassa, minkä takia kaikki tulpan rakentamiseen liittyvät työvaiheet, työmenetelmät, työympäristö sekä materiaaleihin ja rakenteen toimivuuteen kohdistuvat vaatimukset ovat uusia. Rakennettavan betonitulpan erityislaatuisuuden lisäksi ONKALOn maanalaiset kalliotilat rakennustyön toteutusympäristönä tarjoavat huomattavasti haasteita. Rakentamisesta tullaan laatimaan erillinen tehtäväsuunnitelma ja menetelmäkuvaus yhdessä urakoitsijan kanssa. Opinnäytetyössä pääpaino tulee olemaan tulpan käytännön rakentamisen vaiheiden suunnittelu yhdessä Posivan kehitys- ja rakennuttamisorganisaatioiden kanssa sekä rakentamistyön suunnittelu ja tarkka dokumentointi.

4 POPLU-PROJEKTI

4.1 Projektin taustaa

Posivan POPLU- tulppakoe on osa suurempaa Euroopan laajuista DOPAS-tutkimusprojektia. DOPAS-projektiin osallistuu neljätoista ydinjäteyhtiötä ja tutkimuslaitosta kahdeksasta eri Euroopan maasta. Projektin pääpaino on käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustilojen sulkurakenteiden kehitystyössä. Projektin kustannusarvio on noin 15.7 miljoonaa euroa, josta osa on Euroopan komission maksamaa avustusta. Projektin tavoitteena on koota alan toimijat eri puolilta maailmaa yhteen, jolloin voidaan jakaa mm. suunnitteluperusteita, kehittää uusia teknologioita sekä materiaaleja loppusijoitustilojen betonitulppien toteutusta varten. Posivan tehtävänä on toteuttaa yksi viidestä täydessä mittakaavassa toteutettavista tulppakokeista. Muita vastaavanlaisia kokeita tehdään Ranskassa, Tsekissä, Ruotsissa ja Saksassa. Posiva toimii myös DOPAS-projektin johdossa ja koordinoi koko projektin etenemistä. (Posiva Oy, DOPAS-lehdistötiedote 2012)



Kuva 2 Havainnekuva betonitulpasta. (Posivan www-sivut 2014. Viitattu 10.2.2014)

4.2 POPLU-tulppa

Posivan ONKALOon rakentamasta tulpasta on tarkoitus testata tulpan alueen louhintaa, tulpan rakentamisessa käytettäviä työmenetelmiä, laadunvalvontaa, käytettävän betonimassan ominaisuuksia ja tulpan vesitiiveyttä. DOPAS-projektissa Ruotsissa on valettu jo yksi betonitulppa SKB:n (Svensk Kärnbränslehantering AB) toimesta. SKB:n betonitulppa poikkeaa rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan oleellisesti ONKALOon rakennettavasta betonitulpasta.

Posiva on tehnyt taustaselvitystä rakennettavan tulpparakenteen muodosta ja päätenyt kiilamaisen tulpan rakentamiseen. Päätöksen perusteena on kiilamaisen muodon hyvä vesitiiviys ja mekaaninen kestävyys. Kiilamaisen tulpan rakentamisesta löytyy myös esimerkkejä maailmalta. Lisäksi tulpan kiilamaisella muodolla pyritään varmistamaan, että tulpparakenne vastaanottaa mahdollisimman hyvin bentoniitin paisumisen aiheuttaman painerasituksen. Kiilamaisella rakenteella saavutetaan myös aikataulullista, sekä taloudellista hyötyä verrattuna SKB:n kupolin muotoisen tulpan toteutukseen. (Posiva Oy, State of Art: Design Alternatives 2012,2,5)

4.3 Viranomaismääräykset ja ohjeet

Ydinjätteiden loppusijoituksen turvallisuutta koskevan valtioneuvoston asetuksen (736/2008) 7 §:n mukaan "Ydinjätelaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet on luokiteltava sen perusteella, mikä merkitys niillä on laitoksen käyttöturvallisuuden tai pitkäaikaisturvallisuuden kannalta. Kultakin luokiteltavalta kohteelta edellytettävän laadun sekä sen todentamiseksi tarvittavien tarkastusten ja testausten on oltava riittävät kohteen turvallisuusmerkitykseen nähden."

Suomessa ydinenergia-alan valvovana viranomaisena toimii Säteilyturvakeskus STUK. " STUKin tehtävänä on asettaa ydinenergian käyttöä koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset ja riippumattomalla valvonnalla varmistaa, että energiaa tuottavat voimayhtiöt toimivat vaatimusten mukaisesti. Valvonta perustuu ajan tasalla olevaan säännöstöön, kattavaan tarkastustoimintaan ja säännölliseen turvallisuuden uudelleenarviointiin." (STUK WWW-sivut) STUK toimii valvovana viranomaisena myös ydinjätteen loppusijoitukseen liittyvässä toiminnassa. STUKin tehtävä loppusijoitustoiminnassa on arvioida suunnitelmien ja tutkimusten laatua, kattavuutta sekä tuloksia. (STUK, WWW-sivut, STUKin turvallisuustyö.)

STUKin laatimissa turvallisuusvaatimuksissa eli YVL-ohjeissa on määritelty ydinlaitosrakentamista koskevat yksityiskohtaiset vaatimukset ja ohjeet. Ohje YVL B.2:n mukaan ydinlaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet ryhmitellään turvallisuusluokkiin TL 1, 2,3 sekä EYT (Ei ydinteknisesti turvallisuusluokiteltu). "Rakenteiden turvallisuusluokituksen on perustuttava turvallisuustoimintojen toteuttamiseksi tai radioaktiivisten aineiden leviämisen estämiseksi vaadittavalle rakenteen kestävyydelle, eheydelle ja tiiviydelle. Rakenteen turvallisuusluokka määräytyy sen mukaan mikä näistä perusteista edellyttää vaativampaa luokkaa." (STUK, YVL B.2, 2013, 3) Posiva on luokitellut kaikki loppusijoituslaitoksen järjestelmät, rakenteet ja laitteet ohjeen YVL B.2 Ydinlaitoksen järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu mukaan. (STUK, YVL B.2, 2013, 3)

ONKALOon rakennettava loppusijoitustunnelin betonitulppa ei tutkimusvaiheessa ole vielä turvallisuusluokiteltu rakenne, vaan viranomaisvalvonnan näkökulmasta se rakennetaan EYT-rakenteena. Posivan oman kokemuksen kannalta betonitulppa tul-

laan rakentamaan kuitenkin kaikkine työvaiheineen kuten turvallisuusluokan 3 - rakenne.

4.4 Tulpan vaatimusmäärittely

4.4.1 Vaatimukset tulpan sijoituspaikalle

Loppusijoitustunnelissa tulpparakenteen tarkoitus on toimia osana loppusijoitustunnelin täyttöä, ja tämän seurauksena se on osa monieristejärjestelmää. Tästä syystä tulppa luokitellaan tekniseksi vapautumisesteeksi. YVL-ohjeessa D.5 on esitetty vaatimuksia, jotka loppusijoitukseen käytettävän kalliotilan on täytettävä. Opinnäytetyössä käsiteltävä tulpparakenne rakennetaan ONKALOon -420 metrin syvyystasolle louhitulle demonstraatioalueelle. Demonstraatioalueelle on louhittu kaksi loppusijoitustunnelin kaltaista tunnelia, joista toiseen tulppatesti tullaan tekemään. Tulppa tullaan rakentamaan niin, että se myötäilee mahdollisimman tiiviisti ympäröivää kalliota. Teknisten vapautumisesteiden kannalta kallioperän ominaisuuksien tulee olla suotuisat rakenteen pitkäaikaisen käytön vuoksi. (STUK, YVL D.5 2013, 7; Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 5); (Posiva Oy, Detailed Design of POPLU deposition tunnel end plug 2013, 3)

Pitkäaikaisturvallisuutta silmällä pitäen kallioperän olosuhteiden tulee olla mahdollisimman vakaat ja niiden tulee olla arvioitavissa tuhansien vuosien päähän. Loppusijoitustilojen sijainti tulee valita niin, että huomioidaan pitkäaikaisen turvallisuuden näkökulmasta kallioperän geologiset rakenteet ja vedenjohtavuuksien, pohjavesikemian sekä kallion mekaanisen stabiiliuden muutokset syvyyden myötä. (STUK, YVL D5, 2013, 7)

Mahdolliset vesivuodot tulee ottaa huomioon valittaessa tulpan paikkaa. Vesivuodoilla on vaikutusta muun muassa siihen, miten nopeasti tulppa on rakennettava, minkälaisissa olosuhteissa tulppaa joudutaan rakentamaan ja tulpan taakse kehittyvän paineen muodostumisessa. Tunnelissa tapahtuville vesivuodoille on määritetty kokonaismäärä tiivistyksen jälkeen. Tiivistyksen jälkeen saa vuotovesimäärä olla maksimi-

missaan 1 l/min tai yhdestä raosta $\geq 0,25$ l/min (Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 4)

Tulpan alueen louhinta tulee suorittaa käyttämällä sellaista louhintamenetelmää, että siitä aiheutuvat vauriot (EDZ) jäävät mahdollisimman pieniksi. (Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 5)

4.4.2 Betonitulpan teknisten ominaisuuksien ja vaatimusten määrittely

Loppusijoitustunnelin päätytulpan tarkoitus on toimia puskurina tunnelin suuaukolla. Betonitulpalle on määritetty turvallisuustoiminnot sekä toimintakykytavoitteet, joita on taas käytetty suunnitteluvaiheessa suunnitteluperusteina. Toimintakykyvaatimusten perustana on ollut pitkäaikaisturvallisuus ja ajatus siitä, että betonitulpan on kyettävä täyttämään sille asetetut toiminnalliset vaatimukset koko sille suunnitellun käyttöiän. ONKALOon rakennettavien betonirakenteiden suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta. (Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 6)

Tulpan pitkäaikaisturvallisuutta koskevat vaatimukset on esitetty Posivan VAHA -vaatimustenhallinta -tietokannassa. Testitarkoituksella rakennettavan betonitulpan suunnittelussa ja toteutuksessa pyritään mahdollisimman tarkasti noudattamaan varsinaisessa loppusijoitusvaiheessa rakennettavalle tulpalle asetettuja vaatimuksia.

Turvallisuustoiminnot betonitulpalle:

- Loppusijoitustulppa myötävaikuttaa puskurille ja kapselille suotuisin ja ennustettavien mekaanisten, geokemiallisten ja hydrogeologisten olosuhteiden muodostumista
- Loppusijoitustunnelin päätytulppa rajoittaa ja pidättää vapautuneiden radionuklidien kulkeutumista mahdollisessa kapselin vaurioitumistapauksissa.
- Loppusijoitustunnelin päätytulppa myötävaikuttaa tunnelia ympäröivän kallion vakauteen.

Toimintakykytavoitteet päätytulpalle:

- Loppusijoitustunnelin päätytulpan tulee hydraulisesti eristää täytetty loppusijoitustunneli muista tiloista käyttövaiheen ajan.
- Loppusijoitustunnelin päätytulpan tulee pitää täyttö paikallaan käyttövaiheen ajan.

Toimintakykytavoitteisiin perustuvat suunnitteluvaatimukset:

- Loppusijoitustunnelin päätytulpan tulee koostua materiaaleista, joilla on hyvä vedeneristyskyky ja joiden tilavuus ei pitkällä aikavälillä muutu merkittävästi.
- Loppusijoitustunnelin päätytulppa tulee suunnitella siten, että sen vedeneristyskyky säilyy vähintään niin kauan kuin siihen liittyvä keskustunneli on auki
- Kun loppusijoitustunnelin päätytulppa on menettänyt vedeneristyskykynsä, jäljelle jäävän materiaalin tulee toimia täyttönä.
- Loppusijoitustunnelin materiaalit tulee valita siten, että haitallisten aineiden pitoisuudet ja mikrobitoiminta minimoidaan.

Betonitulppa on suunniteltu toimivan hydraulisena eristeenä loppusijoitustunnelin ja keskustunnelin välillä operatiivisen vaiheen ajan. Lisäksi tulpan on tarkoitus pitää loppusijoitustunnelin täyttö paikallaan käyttövaiheen ajan. Tulpat tullaan rakentamaan loppusijoitusvyöhyteen (yli 400 metriä), minkä vuoksi suunnittelussa tulee huomioida pohjaveden aiheuttama hydrostaattinen paine. Hydrostaattinen paine loppusijoitusvyöhydessä on noin 4-4,5 MPa. Hydrostaattisen paineen lisäksi suunnittelussa tulee huomioida myös loppusijoitustunneleiden täyttömateriaalina käytettävän bentoniitin paisumisen seurauksena muodostuva paine. Paisumispaineen on arvioitu olevan noin 1-3 MPa. Edellä kuvattujen paineiden pohjalta tulppa on mitoitettu 7,5 MPa:n mukaisesti.

Tulpan tulee säilyttää hydraulinen eristävyyskyky vähintään 100 vuoden ajan. Paineen aiheuttamat vaikutukset on pyritty ottamaan huomioon muun muassa tulpparakenteen muodon suunnittelussa. Posivan suunnitteleman tulpan kiilamaisella muodolla tavoitellaan tulpan mahdollisimman hyvää paikallaan pysyvyyttä. Paineen vaikutukset on huomioitu myös raudoitussuunnittelussa. (Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 5)

Loppusijoitustunnelin betonitulpan rakenteet eivät saa sisältää materiaaleja, jotka mahdollisesti vaarantaisivat puskurin, kapselin tai kallioperän toimintaa. Materiaalivalinnoissa tulisi haitallisten aineiden (orgaaniset, hapettavat, rikki- ja typpipitoiset yhdisteet) pitoisuudet ja mikrobitoiminta minimoida. Tämän vuoksi mm. tulpan rakentamisessa käytettävät materiaalit tulee ennen niiden käyttöönottoa hyväksyttää Posivan vierasaineiden käytön valvonnasta vastaavan yksikön toimesta. Tulpan betonoinnissa käytettävä betonimassa on edellä mainitusta syystä suunniteltu ja kehitetty juuri betonitulppaa varten lähtökohtana muun muassa mahdollisimman alhainen pH-arvo.

Betonitulpan yksi tärkeä ominaisuus on, että tulppa olisi mahdollisimman vesitiivis. Tämän takia tulppa tulee suunnitella siten, että se tulee säilyttämään vedeneristyskykynsä vähintään niin kauan kuin siihen liittyvä keskustunneli on auki. Vesitiiviyttä pyritään maksimoimaan rakenteen kiilamaisella muodolla, rakenteen mitoituksella sekä materiaalivalinnoilla. Betonin kovettumisesta johtuvan kuivumiskutistuman vuoksi tulpparakenteen alue tullaan injektoimaan. (Posiva Oy, P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteen, järjestelmäkuvaus 2013, 7)

4.5 Vieraiden aineiden käyttö ONKALOSSA

Posiva valvoo tarkasti kaikkia ONKALOON vietäviä aineita. Vieraiden aineiden vienti ONKALOON vaatii Posivan hyväksynnän kyseisen aineen käyttöön ONKALOSSA ja myös maanpäällä käytettäessä niiltä osin, kuin rakennettava rakenne on suorassa yhteydessä maanalaisiin tiloihin. Vieraiden aineiden hyväksyttämismenettelyn tarkoituksena on varmistaa, että ONKALOSSA tai sen maanpäällisissä osissa ei käytetä sellaisia aineita, jotka voivat vaarantaa loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta. Posivalla on oma vieraista aineista vastaava taho, jonka kautta hoidetaan kaikki vierasainehyväksynät. (Posiva Oy, ONKALON turvallisuuskriittiset toiminnot, vieraiden aineiden valvonta 2013, 1,2)

Vierailla aineilla tarkoitetaan kaikkia sellaisia materiaaleja ja aineita, jotka eivät kuulu monieristeperiaatteeseen tai luonnolliseen ympäristöön. Posivan pitkäaikaisturval-

lisuudesta vastaava taho luokittelee materiaalin A- tai B- tasolle. B tasoon luokitellut materiaalit ja aineet voidaan käyttöehtojen määrittämisen jälkeen hyväksyä sallittujen materiaalien listalle. A- tasolle luokitellulle materiaalille tai aineelle joudutaan tekemään lisätutkimuksia. Hyväksyttämisen prosessi etenee siten, että suunnittelija hakee ONKALON suunnitelmissa esitetyille materiaaleille hyväksynnät. Koneissa ja laitteissa käytettävien aineiden hyväksynnän hakee kyseisten koneiden ja laitteiden käyttäjä. Edellä mainittujen vastuulla on toimittaa materiaalien tiedot Posivan vierasaineiden hyväksynnästä vastaavalle henkilölle. Täysin uusien materiaalien lisäksi hyväksyntä on haettava myös, mikäli aine on jo materiaalikäsikirjassa, eli hyväksytty käytettäväksi ONKALOSSA, mutta sen käyttökohde muuttuu. Työmaan vastuulla on tarkastaa, että työmaalla käytettävät materiaalit on hyväksytty materiaalikäsikirjaan. (Posiva Oy, Uuden materiaalin hyväksyntä ONKALON 2013, 1,2)

Tulpan rakentamiseen käytettävistä materiaaleista on esitetty myös vaatimukset tulpan toimintakykytavoitteissa, joissa määritetään, että tulppa ei saa sisältää sellaisia aineita ja materiaaleja, joiden kemiallinen koostumus voisi vaikuttaa loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuteen. Tulpan rakentamisessa merkittävin seikka vieraiden aineiden osalta on tulpan betonoinnissa käytettävä betonimassa. Betonimassan reseptin laadinnassa on huomioitu juuri toimintakykytavoitteissa asetettuja vaatimuksia. Tulpan rakentamiseen käytettävä betonimassa on niin sanottua matalan pH:n betonia, mikä tarkoittaa, että betonimassan sisältämän sementin määrää on pyritty pienentämään lisäämällä seosaineiden määrää. Lisäksi betonin valmistuksessa tarvittavat lisäaineet, kuten notkistin, on valittu ONKALON hyväksytyjen materiaalien listalta.

5 TULPAN RAKENTAMINEN

Betonitulppa tullaan rakentamaan 420 metrin syvyyteen louhittuun demonstraatiotunneliin. Tulppa on mitoiltaan noin 6 metriä pitkä, 4,5 metriä leveä sekä noin 5 metriä korkea, jolloin valettavan betonirakenteen tilavuudeksi tulee noin 140 m³. Rakenteen muoto ja koko yhdessä ahtaiden työskentelytilojen kanssa luovat omat mielenkiintoiset haasteensa tulpan rakentamiselle. Betonirakentamista varten ONKALON olosuhteita voidaan pitää optimaalisina, sillä luolassa lämpötila pysyttelee ympäri vuoden tasaisesti noin 15 °C:ssa. ONKALON ahtaat tilat, rakenteen massiivinen koko ja sille asetetut vaatimukset yhdessä uuden betonireseptin kanssa luovat rakentamisen suunnittelulle ja työmenetelmien valinnalle haastavat lähtökohdat.

5.1 Tulpan rakentamisen valmistelutyöt

Tulpan rakentamisessa ennen varsinaisten töiden aloitusta jo suunnitteluvaiheessa on tehty ja tullaan tekemään lukuisia ennakkokokeita muun muassa betonimassavaihtoehtoille, joiden pohjalta tehdään muun muassa valinta käytettävästä betonimassasta. Lisäksi työmaalla tullaan toteuttamaan betonoinnin menetelmäkoe.

5.1.1 Betonimassan kehitys ja valinta

Betonimassan kehitystyötä tehtiin tiiviissä yhteistyössä Aaro Kohonen Oy:n kanssa, joka toimii muun muassa betoniteknologian asiantuntijatehtävissä Suomessa. Lisäksi massan kehityksessä on ollut mukana VTT. Betonimassan kehityksen lähtötiedoiksi muodostuivat tulpalle asetetut tekniset vaatimukset, joiden peruste pohjautuu pitkäaikaisturvallisuuden asettamiin vaatimuksiin, lisäksi massan kehityksessä piti huomioida muun muassa betonimassan työstettävyys.

Rakenteen suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta, rasitusluokiksi on määritetty XC4, XS3, XA3 ja betonin lujuusluokka on C35/45. Rakenteen massiivinen koko sekä rakennuspaikan sijainti tunnelin umpiperässä ei mahdollista perinteisesti käytettävien jälkihoitomenetelmien käyttöä. Jotta voitaisiin välttyä hydrataatiossa syntyvien lämpötilaerojen aiheuttamilta halkeamilta, tulisi betonimassan olla ominaisuuksiltaan

mahdollisimman vähän lämpöä tuottavaa. Rakenteen vesitiiviyyden asettamat vaatimukset on otettava huomioon myös betonin kehityksessä. Tulpan vesitiivyyteen hyvin kiinteästi liittyen massankehityksessä on pyritty huomioimaan kuivumisen aikana tapahtuvan mahdollisen kutistuman minimointi. Pitkäaikaisturvallisuuden puolesta tulleet vaatimukset massan koostumukselle olivat matala pH sekä betonin valmistuksessa käytettävät lisäaineet, mitä voidaan ONKALOSSA käyttää. (Aaro Kohonen Oy, THE BASIS OF THE TERNARY MIX DESIGN OF THE PLUG CONCRETE 2013, 3)

Pääluokka	Rasitustekijä	Alaluokan merkintä	Olosuhdekuvaus
X0	Ei korroosioriskiä betonille tai raudoitteille	X0	Betoni sisätiloissa, jossa ilman kosteus on hyvin alhainen
XC	Karbonatisoituminen	XC1	kuiva tai jatkuvasti märkä
		XC2	Kostea, harvoin kuiva
		XC3	Kohtalaisen kostea
		XC4	Jaksollinen kastuminen ja kuivuminen
XD	Kloridien aiheuttama korrosio	XD1	Kohtalaisen kostea
		XD2	Kostea, harvoin kuiva
		XD3	Kostea ja kuiva vaihtelevat
XS	Merivedessä olevien kloridien aiheuttama korrosio	XS1	Betonia rasittavat tuulen mukana tulevat kloridit, ei suoraa kosketusta veteen
		XS2	Veden alla
		XS3	Vesirajassa ja roiskevyöhykkeellä
XF	Jäätymis-/sulamisrasitus	XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
		XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita
	Jäätymis-/sulamisrasitus ja suolarasitus	XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet
		XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet
		XA1	Kemiallisesti heikosti aggressiivinen ympäristö

Taulukko 1. Betonirakenteiden ympäristöolosuhteiden luokitus (Betoniyhdistys r.y. 2004, 253)

Lähtötiedot huomioiden tulpan betonointia varten kehitettiin kahdentyypistä betonimassaa, jotka olivat ternäärinen sekä binäärinen betonimassa. Ternäärisen betonimassan suunnittelutyötä on tehnyt Aaro Kohonen Oy ja binäärisen massan kehityksen on tehnyt VTT. Ternäärissä massassa käytetään kolmea sideaineksi luokiteltua ainetta, kun binäärimassassa niitä on kaksi. Molemmille massoille on tehty ennakkokokeita VTT:n testilaboratoriossa. Laboratoriokokeissa on pyritty selvittämään massojen lujuudenkehitystä, vesitiiviyyttä, lämpötilan kehitystä, sekä kutistumisominaisuuksia. Tulpan betonointiin käytettävän betonimassan valitaan Rudus Oy:n betoniasemalla tehtyjen tehdaskokeiden jälkeen. Ruduksen betoniasemalla tehtävien tuoremassakokeiden tarkoituksena oli tutkia betonimassan työstettävyyttä ja pumppausta, miten massa liikkuu muotissa, miten erilaiset haitat kuten raudoitus sekä muhvi-jatkokset vaikuttavat betonin valettavuuteen. Ennakkokokeiden aikana tehtiin samat kokeet sekä ternääri, että binäärimassalle. (Aaro Kohonen Oy, THE BASIS OF THE TERNARY MIX DESIGN OF THE PLUG CONCRETE 2013, 3)

5.1.2 Betonirakenteiden menetelmäkoe MOCK-UP

Ennen varsinaisen betonitulpan rakentamista tullaan ONKALO-olosuhteissa toteuttamaan MOCK-UP-betonirakenteiden menetelmäkoe. Menetelmäkoe on tarpeellista toteuttaa, kun rakennettava kohde on erittäin haastava tai kun lopputuloksen toteaminen on vaikeaa. MOCK-UP tullaan tekemään ONKALOn teknisellä tasolla -437 metrin syvyydellä. Menetelmäkokeen suunnittelussa on pyritty miettimään, miten kokeeseen saataisiin tuotua varsinaisen tulpanrakentamisen komponentit. (STUK, YVL E.6, 2013, 44)

Menetelmäkokeen tarkoituksena on kokeilla betonitulpan rakentamisessa käytettäviä työmenetelmiä. Menetelmäkokeen ja varsinaisen betonitulpan rakennustyöt tullaan teettämään urakkakilpailun perusteella valituksi tulevalla samalla urakoitsijalla. Urakkatarjousvaiheen alusta alkaen Posiva on halunnut urakoitsijan mukaan kehitystyöhön ja, että MOCK-UP:n sekä betonitulpan rakentamisen suorittaa sama urakoitsija. Betonoinnin osalta merkittäviä seikkoja menetelmäkokeessa ovat betonimassan työstettävyyden, minkälaisin keinoin betoni saadaan kulkeutumaan muottirakenteen sisällä sekä tarvitaanko valuputkia ja jos tarvitaan, minkälaisia ja mihin. Tulpan va-

lamiseen käytettävän betonimassan ominaisuudet ovat lähes kuten ITB:lla eli itsetiivistyvällä betonilla. Itsetiivistyvät betonimassat ovat notkeita ja hyvin leviäviä betonimassoja, jotka tiivistyvät erottumatta oman painonsa avulla. Tulpan betonimassasta puuttuu kuitenkin esimerkiksi itsetiivistyvissäbetonimassoissa käytettävä stabilaattori, joka on massaa koossapitävä lisäaine, jonka avulla massaa voidaan notkistaa enemmän. Koska tulppamassan kohdalla ei päästä täysin samoihin leviämätuloksiin kuin tavallisten ITB- massojen kohdalla voidaan tulppamassaa joutua hieman tiivistämään mekaanisella täryttimellä. Menetelmäkokeen yhteydessä onkin tarkoitus selvittää tiivistyksen todellinen tarve. Betoninmassan osalta menetelmäkokeessa pyritään selvittämään, miten kuljetusmatkat alas ONKALOon vaikuttavat massaan ja onko esimerkiksi työmaalla tarvetta lähteä notkistamaan betonimassaa, sekä miten betonimassa toimii työmaaolosuhteissa.

MOCK-UP:n muotin runko valmistetaan teräksestä. Muotin tukirakenne tehdään teräspalkeista, joihin kiinnitetään teräslevy. Teräslevyjen saumat hitsataan, jotta rakenteesta saadaan mahdollisimman tiivis. Muottipinta betonia vastaan on kuitenkin perinteiseen tapaan vaneri. Teräsrungon avulla muotista saadaan mahdollisimman jäykkä ja tiivis, jolloin muottirakenne vastaisi kalliota vastaan valettavia olosuhteita. Luomalla todellisia olosuhteita vastaavat olosuhteet, voidaan menetelmäkokeen aikana testata, miten muotti saadaan kauttaaltaan täyteen ja ylimääräinen ilma ulos muotista.

Varsinaisen tulpan rakentaminen tullaan tekemään kuten turvaluokan 3 -rakenne. Menetelmäkokeen betonointi tullaan myös soveltuvien osin toteuttamaan YVL -ohje E.6 mukaisia vaatimuksia noudattaen. MOCK-UP:n osalta tullaan mahdollisuuksien mukaan, laatimaan kaikki lopulliselta tulpparakenteelta vaadittavat asiakirjat.

5.2 Viranomais määräykset ja ohjeet

Ydinenergialain mukaisesti ydinenergian käytön tulee olla turvallista. Sen käytöstä ei saa aiheutua vaaraa ympäröivälle luonnolle tai ihmiselle. Ydinlaitosten turvallisuuden perustana on sen järjestelmien ja rakenteiden laatuvaatimusten mukainen suunnittelu, rakentaminen sekä käyttö ja ylläpito. Valtioneuvoston asetuksessa (736/2008)

on määritelty vaatimukset ydinjätelaitoksia varten kattaen suunnittelun, rakentamisen ja käytön. Turvaluokiteltujen rakenteiden rakentamista koskien STUK on laatinut YVL -ohjeet..

Nyt rakennettavan koetulpan, sekä myöhemmin operatiivisessa vaiheessa rakennettavien betonitulppien rakentamisessa tullaan noudattamaan YVL -ohje E.6 mukaisia vaatimuksia. YVL -ohjeessa E.6 esitetään eri työvaihteita koskevat yksityiskohtaiset vaatimukset. Ohjeessa on määritetty muun muassa suunnittelijoiden ja toteutustyöstä vastaavien henkilöiden pätevyudet, ennen töitä, työaikaiset, sekä töiden jälkeen tehtävät dokumentoinnit, tekniset vaatimukset rakenteille ja materiaaleille, sekä laadunvarmistukseen liittyvät tarkastukset. Rakenteiden suunnitteluun, valmistusta, käyttöön ja toteutuksen valvontaan vaikuttavat vaatimukset määräytyvät rakenteiden turvallisuus- ja maanjäristysluokan mukaan. Betonitulppa lukeutuu turvallisuusluokkaan 3. Koetulppa tullaan rakentamaan kuten turvallisuusluokan 3 rakenne, joten rakentamisessa tullaan soveltamaan turvallisuusluokan 3 vaatimuksia. Suunnittelussa ja toteutuksessa tulee myös huomioida YVL -ohjeeseen E.6 liittyvät muut YVL -ohjeet. (STUK, YVL E.6, 2)

Turvallisuusluokiteltujen rakennusten ja rakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa noudatetaan YVL -ohjeiden lisäksi kaikkia Suomessa voimassa olevia rakentamista käsitteleviä lakeja, säännöksiä, rakentamismääräyksiä sekä ohjeita. Betonitulpan rakentamisessa tällaisia ovat muun muassa maankäyttö- ja rakennuslaki, sekä normit ja standardit. Varsinkin työn toteutus vaiheen laadunvalvontaa ja työsuoritusta ohjailee betoninormit by50. Betoninormit perustuvat betonirakenteiden ohjeita sisältämään Rakentamismääräyskokoelman osaan B4 sekä standardiin SFS-EN 206-1 Betoni. Osa 1: Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus ja sen normatiivisiin osiin sekä kansallisiin liitteisiin. Betoninormeissa on esitetty betonirakenteiden suunnittelua ja työsuoritusta varten yksityiskohtaiset vaatimukset ja ohjeet. (STUK, YVL E.6, 2013, 2; Suomen Betoniyhdistys r.y., by50, 2012,3)

5.3 Toteutukseen liittyvä laadunvarmistus ja dokumentointi

Betonitulpan rakennustöiden toteutuksesta on sovittu Posivalla, että tulpan rakennustyöt tullaan toteuttamaan mahdollisimman tarkasti noudattaen YVL -ohje E.6:n vaatimuksia. YVL -ohjeissa on määritetty töiden toteutuksen aikana, tehtävät laadunvalvonta asiakirjat. Rakennustyöt on määrä toteuttaa, kuten turvallisuusluokkaan 3 kuululta rakenteelta on vaadittu, näin ollen tullaan myös tekemään työn edellyttämät laadudokumentit YVL -ohjeiden mukaisesti. Se, että työn toteutuksessa noudatetaan YVL -ohjeita sovelletusti tarkoittaa, että asiakirjoja ei lähetetä STUKille hyväksyttäväksi, vaan Posivan turvallisuusosasto toimii STUK:n roolissa. Tietyt asiakirjat lähetetään kuitenkin STUKille tiedoksi. Tulpan rakentaminen on ensimmäinen Posivalla tehtävä turvaluokiteltu työ, jossa noudatetaan YVL -ohjeita. Dokumentointia ajatellen YVL- ohjeiden mukana tulee joitain täysin uusia laatuasiakirjoja. Asiakirjojen toteutus jakautuu suunnittelijoiden, rakennuttajan ja toteuttajan kesken. Tarvittavat asiakirjat on esitetty taulukossa 2.

Kohta	Asiakirja	Tekijä	Lisätiedot
1	Toteutuksen laatusuunnitelma 1. Selvitys toteuttajan suorituskyvystä 2. Organisaatioselvitys vastuuhenkilöineen 3.Laaduntarkastus periaatteet 4. Suunnitelma laadunvalvonta toimenpiteistä	Rakennuttaja	
1.1	Laadunvalvontasuunnitelma	Rakennuttaja	
1.2	Betonitöiden työselitys	Suunnittelija	Suunnittelijan laatima suunnitteluasiakirja, jossa annetaan rakennesuunnitelmia tarkentavia tietoja sekä rakenteen valmistusta koskevia teknisiä vaatimuksia.
1.3	Raportti betonimassan soveltuvuudesta tulpan betonointiin	Betonitoimittaja	Betonimassalle tehtyjen ennakkokokeiden tuloksista tehty raportti, josta selviää tutkitun massan käytettävyys suunnittelussa valussa.
1.4	Lausunto menetelmäkokeessa käytettävien menetelmien hyväksyttävyydestä ja soveltuvuudesta	Rakennuttaja	Menetelmäkokeesta tehtävä loppuraportti, jossa analysoidaan kokeen onnistuminen.
1.5	Betoniosan laadunvalvontasuunnitelma	Suunnittelija	Suunnittelijan laatima suunnitelma, josta selviää kaikki rakenteen valmistukseen liittyvät tarkastus- ja laadunvalvonta toimenpiteet sekä betonointiosan valvontakohteet.

1.6	Betonitöiden menetelmäkuvaus	Toteuttaja	Rakennustyön toteuttaja laatii suunnitteluasiakirjoihin pohjautuvan yksityiskohtaisen kuvauksen töiden teknisestä toteutuksesta asetettujen vaatimusten mukaisesti.
1.7	Tarkastussuunnitelma	Toteuttaja	Sisällöltään yksityiskohtainen selvitys rakenneosan valmistukseen liittyvistä tarkastus sekä laadunvalvontatoimenpiteistä. Posivalla laadittu menetelmäkuvausten pohjalta.
1.8	Laadunvarmistuksen tarkastuskortti	Toteuttaja	Tarkastussuunnitelmaan pohjautuva asiakirja, jossa on eritelty rakennetarkastuksessa läpikäytävät tarkastuskohteet sekä havaitut virheet ja muut huomiot.
1.9	Valuosakohtainen betonointisuunnitelma/pöytäkirja	Toteuttaja	Jokaista valuosaa kohden laadittava asiakirja, jossa käydään läpi yksityiskohtaisesti valun kulku ja eri vaiheet. Valutyön aikana ylläpidetään myös betonointipöytäkirjaa.
1.10	Injektoinnin työselitys	Suunnittelija	Suunnittelijan laatima asiakirja, jossa annetaan rakennepiirustuksia tarkentavia tietoja sekä rakenteen valmistusta koskevia teknisiä vaatimuksia.
1.11	Injektoinnin laadunvalvontasuunnitelma	Suunnittelija	Sisällytetty betoniosan laadunvalvontasuunnitelmaan.

Taulukko 2. Betonitulpan toteutuksen laadunvarmistusasiakirjat. (Betoniyhdistys r.y. 2012, 123; Posiva Oy, POPLU-tulpan laadunvarmistus, toteutuksen aikaiset dokumentit, 2014,1-5 ; STUK, YVL E.6, 2013, 20,.)

5.4 Työturvallisuus

Rakentaminen lukeutuu yhdeksi vaarallisimmista toimialoista. Huomattavan suuri osa Suomessa tapahtuvista työtapaturmista sattuukin juuri rakennustyömailla. Samoin ammattitautien yleisyys muihin toimialoihin verrattaessa on rakennusalalla suuri. Rakennustyömaata voidaan hyvällä syyllä pitää yhtenä riskialttiimmista työympäristöistä.

5.4.1 Työturvallisuuden huomioiminen rakennushankkeen valmistelussa

Suomessa perusta turvalliselle työskentelylle luodaan Työturvallisuuslaissa (738/2002). Työturvallisuuslakiin nojautuen on laadittu Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009). Valtioneuvoston asetuksessa rakennustyön turvallisuudesta käsitellään tarkemmin juuri rakennusten työturvallisuutta ohjaavia määräyksiä. Valtioneuvoston asetusta rakennustöiden turvallisuudesta voidaan soveltaa hyvin laajasti ja monenlaisissa rakennuskohteissa, esimerkiksi ONKALON kaltai-

sisä maanalaisissa rakennuskohteissa. (Sosiaali- ja terveysministeriö, Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta perustelumuistio, 2009, 5,8)

Useissa työtapatapauksissa tapaturman syy on ollut työn huono suunnittelu sekä valmistelu. Huolellisella työsuunnittelulla ja suunnitelmien laadinnalla voidaan saavuttaa kaikkien osapuolten kannalta turvallinen työmaa. Lisäksi turvallisella työmaalla on huolehdittava avoimesta tiedonkulusta ja eri työvaiheiden yhteensovituksesta. Rakennustyömaan työturvallisuus on kaikkien rakennushankkeessa työskentelevien yhteinen asia, mutta viime kädessä päätoteuttaja on vastuussa, miten työturvallisuus asiat työmaalla hoidetaan.

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009) määrittää rakennuttajan velvollisuudet työturvallisuuden osalta rakennushankkeen eri vaiheissa. Rakennuttajan velvollisuutena on jo suunnitteluvaiheessa olla mukana luomassa suunnitelmia jotka mahdollistavat työn turvallisen toteutuksen.

Rakennuttajan on huolehdittava, että rakennushanketta suunniteltaessa ja valmisteltaessa arkkitehtonisessa, rakennusteknisessä ja teknisten järjestelmien suunnittelussa sekä rakennushankkeen toteuttamisen järjestelyihin liittyvässä suunnittelussa otetaan huomioon rakennustyön toteuttaminen siten, että työ voidaan tehdä turvallisesti ja aiheuttamatta haittaa työntekijöiden terveydelle."

Ennen suunnittelutöiden aloittamista rakennuttajan on laadittava rakennushanketta käsittävä turvallisuusasiakirja. Turvallisuusasiakirja sisältää hankkeen turvallisuusnäkökohtia, esimerkiksi yleisimpiä vaara- tai haittatekijöitä. Rakennuttajan on varmistettava, että suunnittelijan pätevyys on riittävä suunniteltavaan kohteeseen nähden. Suunnittelijan tulee olla kykenevä huomioimaan työn turvalliseen toteutukseen vaikuttavat tekijät. Rakennuttajan tehtävänä on tehdä suunnittelun ohjausta suunnitteluprosessin aikana varmistaakseen, että suunnitelmat ovat sisällöltään turvallisesti toteutettavissa. Suunnitteluprosessi on jatkuvaa vuorovaikutusta rakennuttajan sekä suunnittelijan välillä. Rakennuttajan tulee huolehtia, että suunnittelijalla on käytössä kaikki suunnittelutyön vaatimat tiedot tehdessään suunnittelutyötä. Rakennuttaja nimeää työmaalle turvallisuuskoordinaattorin, jolla tulee olla hankkeen vaativuutta vastaava pätevyys. Turvallisuuskoordinaattorin tehtäviin kuuluu hankkeen turvallisen

ja terveellisen toteutuksen valvonta. Turvallisuuskoordinaattori tekee yhteistyötä hankkeen eri tahojen kanssa ja on mukana esimerkiksi suunnitteluvaiheessa valvomassa, että suunnitelmissa on otettu riittävän tarkasti huomioon turvallisuuteen vaikuttavat tekijät.

Työturvallisuuden kannalta merkittävimpiä tekijöitä suunnittelutyön aikana on materiaalivalintojen tekeminen. Materiaalivalintojen kautta voidaan vaikuttaa työergonomiaan ja käytettäviin työmenetelmiin. Materiaalit ja työmenetelmät pitää valita siten, että ne edesauttaisivat työn turvallista toteutusta. Esimerkiksi raskaiden rakennusosien asentaminen tulee suunnitella siten, että asennustyössä pystytään mahdollisimman paljon hyödyntämään erilaisia apuvälineitä. Työn huolellisella suunnittelulla voidaan tehokkaasti ennalta ehkäistä erilaisten vaaratilanteiden syntyä. (Sosiaali- ja terveysministeriö, Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta perustelu-
muistio, 2009, 6, 12,14,15,17)

5.4.2 Työturvallisuus Posivassa

Posivan toiminta perustuu turvallisuuteen. Posivalle on erittäin tärkeää käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen edellyttämä pitkäaikaisturvallisuus, joka tulee huomioida myös jo rakennusvaiheen päivittäisissä töissä ja työmenetelmissä. Työturvallisuuden osalta työmaalla ei tingitä ja yleinen tavoite työmaalla onkin 0-tapaturmaa eli jokapäiväisen tekemisen lähtökohtana on töiden toteutus siten, ettei tapaturmia sattuisi.

Posiva toimii ONKALO -työmaalla päätoteuttajan ja vastaa Valtioneuvoston asetuksen rakennustyön (205/2009) turvallisuudesta päätoteuttajalle määritetyistä velvollisuuksista. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että Posiva huolehtii turvallisuuden ja terveyden kannalta tarpeellisesta työmaan yleisjohdosta ja osapuolten välisen yhteistoiminnan ja tiedonkulun järjestämisestä sekä toimintojen yhteensovittamisesta koskien koko ONKALOn työmaa-aluetta. Posiva on nimennyt valtioneuvoston asetuksen rakennustyön turvallisuudesta (205/2009) edellyttämän turvallisuuskoordinaattorin, joka toimii rakennuttajan edustajana turvallisuuteen liittyvissä asioissa. Turvallisuuskoordinaattori on myös työmaan turvallisuusvalvoja.

Rakennusurakoitsija vastaa lisäksi oman työmaa-alueensa johtovelvollisuuksista ja on näin ollen myös vastuussa työturvallisuudesta omalla työmaa-alueellaan. Urakoitsija nimeää oman vastuuhenkilön, joka vastaa omalla työmaa-alueellaan töiden turvallisen suorittamisen johtamisesta. Ennen rakennustöiden aloittamista urakoitsijan tulee toteuttaa rakennustöiden ja oman työmaa-alueensa käytön turvallisuussuunnitelu valtioneuvoston asetuksen rakennustyön turvallisuudesta mukaisesti (205/2009). (Posiva Oy, Teknisten tilojen rakennusurakan urakkaohjelma, 2012, 4,15)

ONKALO työympäristönä sisältää lukuisia vaaroja ja riskitekijöitä, jolloin töiden tarkka suunnittelu ja riskien kartoitus tulee tehdä huolellisesti. Merkittävimmän riskitekijän ONKALOSSA muodostaa tilojen ahtaus yhdessä arvaamattoman kallion kanssa. Edellä mainitun vuoksi Posivalla on määritetty, että lujittamattomalla alueella työskentely on kiellettyä, nojautuen Valtioneuvoston asetukseen räjäytys- ja louhintatyön turvallisuudesta (644/2011). Tämä tulee huomioida myös betonitulpan rakentamisen suunnittelussa ja rakennustöitä tehtäessä. Posiva harjoittaa ONKALO alueella aktiivista työsuojelutoimintaa, jonka tarkoituksena on ennaltaehkäistä tapaturmien sattumista ja kartuttaa mahdollisia riskikohtia.

Posiva järjestää työmaalla perehdytyskoulutuksen kaikille alueella työskenteleville henkilöille nojautuen valtioneuvoston asetukseen rakennustyön turvallisuudesta. ONKALO -työmaa perehdytyskoulutuksessa käydään läpi käytännön ohjeistusta liittyen ONKALO -alueella työskentelyyn ja miten esimerkiksi onnettomuustilanteessa tulee toimia. Koulutus tulee käydä kahden viikon kuluessa töihin tulosta. ONKALO-työmaan perehdytyksen lisäksi rakennusurakoitsijan on perehdytettävä omalle alueelle töihin tulevat henkilöt.

Rakennustyömaalla tulee järjestää Valtioneuvoston asetuksen rakennustyön turvallisuudesta 16§:n mukaan vähintään kerran viikossa työmaata koskeva kunnossapitotarkastus, jossa läpi käydään työmaan siisteys ja yleisjärjestelyt. Viikoittaiset kunnossapitotarkastukset ONKALO -alueella suorittaa Posivan työturvallisuusvalvojat. Kunnossapitotarkastuksen aikana tehdyt havainnot käydään läpi viikoittain järjestettävässä koordinoitukokouksessa, jossa läsnä ovat kaikki alueella toimivat tahot.

Töiden turvalliseen suorittamiseen lukeutuu eri toimijoiden tekemien töiden yhteensovittaminen niin, että eri työt voidaan suorittaa vaarantamatta muiden turvallisuutta. Myös töiden yhteensovittamista varten järjestetään viikoittain koordinoitkokouksessa. Posivan turvallisuusvalvojat suorittavat alueelle tuleville koneille ja laitteille käyttöönottotarkastuksen ennen kuin koneita voidaan käyttää ONKALOn alueella. (Posiva Oy, ONKALO- työmaa turvallisuussuunnitelma, 2011,5,8)

6 TULPAN RAKENNUSTÖIDEN TEKNISEN SUORITUKSEN SUUNNITTELU

Vaikka betonitulpan rakentamisen valmistelut ja suunnittelu vaativat huomattavasti enemmän huomiota kuin tavallinen rakentaminen, niin työn tekninen suorittaminen koostuu perinteisistä työvaiheista eli muotti-, raudoitus- ja betonointitöistä. Korkealaatuisen lopputuloksen taustalla ovat huolella tehty suunnittelu, työnaikainen laadunvalvonta yhdessä suunnitelmien mukaisen työnsuorituksen kanssa. Betonirakenteet jaetaan niiden vaativuuden mukaan kolmeen luokkaan, jotka ovat 1-, 2,- ja 3-luokka. Eri luokkiin kuuluville betonirakenteille on määritetty eritasoisia vaatimuksia, joiden tarkoituksena on ohjata työn suunnittelua ja suorittamista. pätevyysvaatimuksia. (Betonyhdistys r.y. 2005, 191)

Rakentamisen osalta projektin valmistelut alkoivat jo vuoden 2013 lopulla betonimassan kehitystyöllä. Kun massakehitys oli saatu aluilleen, aloitettiin sopivan urakoitsijan hakeminen mukaan ainutlaatuiseseen rakennushankkeeseen. Urakoitsijavalintaa tehtäessä pääpaino oli työn teknisessä toteutuksessa sekä aiemmin hankittu kokemus vastaavan vaativuusluokan töistä. Edellä mainittujen lisäksi tarjouksia katsottiin myös taloudelliselta kantilta. Urakoitsijan valintaprosessin aikana painotettiin hankkeen erityistä luonnetta ja sitä, että Posiva etsii yhteistyökumppania, tekemään kehitystyötä, jotta rakennettavan tulpan lopputulos vastaisi mahdollisimman hyvin asetettuja vaatimuksia. Tulpan rakennustyön toteutussuunnittelun aikana on tarkoitus tehdä tiiviistä yhteistyötä hankkeen eri osapuolten kanssa. Hankeen keskeiset osapuolet ovat seuraavat: työn tilaaja sekä päätoteuttaja on Posiva Oy, pääurakoitsija Hartela Oy, rakennesuunnittelu Finnmap Consulting Oy, betonimassan kehitystyö Aaro Kohonen Oy ja VTT sekä betonitoimittaja Rudus Oy.

6.1 Raudoitustyöt

Tulpan suunnitteluvaihetta varten raudoituksesta oli laadittu niin sanottu luonnossuunnitelma. Luonnossuunnitelman tarkoituksena on selventää raudoituksen pääperiaatetta ja tarkoitusta. Raudoitus on suunniteltu toteutettavaksi myötäilemään mahdollisimman hyvin kallionpinnan muotoja.

6.1.1 Raudoituksen tekniset vaatimukset

Betonitulpan raudoituksen suunnittelun ja toteutuksen käsittäviä yleisiä sekä laatuvaatimuksia on annettu muun muassa betoninormeissa ja alaan liittyvissä standardeissa. Normeissa ja standardeissa on esitetty tavanomaisempia vaatimuksia, kun taas YVL -ohjeet täydentävät kansallisia normeja ja standardeja niiltä osin kuin on katsottu tarpeelliseksi ydinlaitosrakentamisen osalta.

Raudoituksen tarkoitus osana betonitulpan rakennetta on toimia kutistumaraudoituksena. Betonin kovettumisprosessin aikana ilmenee kuivumiskutistumista, joka on seurausta siitä, että betonin kuivuminen aiheuttaa siinä olevassa vedessä jännitystä. Syntyneet jännitykset imevät vettä betonissa olevista geelihiukkosista, mikä aikaansaa geelihiukkasten välien pientymisen, minkä seurauksena myös geeli kutistuu aiheuttaen betonin kutistumisen. Kutistumisen ja muiden betonin kovettumisen aikaisten muodonmuutosten hallinta on ensiarvoisen tärkeää, koska hallitsemattomina ne voivat aiheuttaa betonirakenteen säilyvyyden kannalta merkittäviäkin halkeiluja. Betonitulpalle asetettujen tiiveys vaatimusten vuoksi halkeamien syntyminen tulee huomioida myös rakenteen toteutussuunnittelussa. Tulpan osalta kutistuminen on huomioitu raudoituksen suunnittelussa ja raudoituksen tarkoituksena on vastaanottaa mahdollisesta kutistumisesta syntyvät voimat ja jakaa ne tasaisesti betoniraudoituksen kautta koko rakenteelle. (Betonyhdistys r.y. 2005, 90, 92)

Raudoituksen suunnittelussa oleellisessa osassa on betonipeite. Betonipeite on betonin ja raudoituksen välinen betonikerros, josta käytetään työmaakielessä myös nimeä suojabetoni. Sen tarkoitus on toimia korroosiosuojana ja estää ulkopuolisten haittekkijöiden kuten kloridien pääsy raudoitukseen. Lisäksi betonipeite suojaa raudoitusta tulipalojen aiheuttamilta vaurioilta. Betonipeitteellä voidaan myös varmistaa, että raudoituksen ja muottipinnan väliin jäävä betonikerros on riittävä varmistamaan betonin hyvä tartunta raudoitukseen. Betonipeite saadaan määritettyä, kun betonipeitteen vähimmäisarvoon lisätään 10 millimetriä. Betonipeitteen vähimmäisarvoon vaikuttaa betonin rasitusluokka. Rasitusluokat sekä betonipeitteiden vähimmäisarvot ovat esitetty taulukossa 3. Betonitulpan rakenteen suunnittelussa käytetyt rasitusluokat on XC3, XS3, XA3. Suunniteltu betonirakenteen käyttöikä on 100 vuotta.. Betonitulpan yhteydessä betonipeitteen minimiarvo on kalliota vasten valettaessa ruostu-

mattomalle teräkselle 30 millimetriä. Mittapoikkeama tulpan betonirakenteen yhteydessä on ± 10 millimetriä. Tulpan suunnittelukokouksessa kuitenkin sovittiin yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa, että kalliopintoja vasten valettaessa kallion, ja raudoituksen välinen etäisyys saa olla maksimissaan 70 millimetriä. Tällä pyritään vaikuttamaan betonin kutistumaan ja sitä kautta vaikuttamaan tulpan tiiviyyteen. Jos etäisyys on enemmän kuin 70 millimetriä on kalliopinnan ja raudoituksen väliin tehtävä lisä-terästy. Muottipintojen osalta raudoitustyö suoritetaan normien mukaisia betonipeitteiden nimellisarvoja noudattaen eli betonipeite on 50 millimetriä. (Betoniyhdistys r.y. 2005, 252; Betoniyhdistys r.y. 2012, 75; Aaro Kohonen Oy 2013, THE BASIS OF THE TERNARY MIX DESIGN OF THE PLUG CONCRETE, 3;Tulpansuunnittelukokous 15.5.2014)

Rasitusluokka	Betonipeitteen vähimmäisarvo 50 vuoden käyttöiälle [mm]		Betonipeitteen vähimmäisarvo 100 vuoden käyttöiälle [mm]	
	Betoni-raudoitus	Korroosioherkkä rauditus ¹⁾	Betoni-raudoitus	Korroosioherkkä rauditus ¹⁾
X0	10	10	10	10
XC1	10	20	10	20
XC2	20	30	25	35
XC3, XC4	25	35	30	40
XS1, XD1	30	40	35	45
XS2, XD2	35	45	40	50
XS3, XD3	40	50	45	55

Taulukko 3. Betonipeitteen vähimmäisarvo eri rasitusluokissa (Betoniyhdistys r.y. 2012, 75)

Tulpan betonirakenteen betoniteräkset ovat ruostumatonta terästä B600KA2. Tavallisen A500HW harjateräksen sijaan on päädytty käyttämään ruostumatonta terästä vedoten rakenteen pitkäaikaisturvallisuuteen ja tehtävään osana loppusijoitustunnelin sulkemisjärjestelmää. Raudoitus tehdään käyttämällä halkaisijaltaan 32 millimetrin harjaterästankoja. Tankojen halkaisijan paksuus pohjautuu rakenteen massiiviseen kokoon.. Tulpan raudoitus on niin kutsuttu minimiraudoitus, tällöin raudoitukseen on mitoitettu rakenteen edellyttämä vähimmäisterästy. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että raudoitus on mitoitettu pääasiallisesti vastaan ottamaan vain betonin kuivumiskutistuman aiheuttamat voimat.

YVL -ohjeiden mukaan kaikkien turvaluokiteltujen rakenteiden rakentamiseen käytettävien materiaalien tulee täyttää niille osoitetut vaatimukset. Suomessa sovellettavia ohjeita ovat viranomaismääräykset ja ohjeet sekä standardit. Jos edellä mainittuja asiakirjoja ei voida soveltaa jonkin tietyn materiaalin hyväksyntään, voidaan soveltaa vastaavia ulkomaalaisia. Rakennusmateriaalin tai -tuotteen yleisin kelpoisuustodistus on CE-merkki. CE-merkityistä tuotteista on kuitenkin esitettävä joko suoritusilmoitustodistus (Dop) tai vaihtoehtoisesti ETA-hyväksyntä. Jos tuotteelta puuttuu sovellettava tuotestandardi tai sen valmistajalla ei ole tuotteelle eurooppalaista teknistä arviota voidaan tuote kuitenkin hyväksyä käytettäväksi tuotehyväksyntälain nojalla tehtävällä tyyppihyväksynnällä tai varmennustodistuksella. Kelpoisuustodistukset toimitetaan STUK:lle tiedoksi.

Betoniteräksille on asetettu vaatimus, että raudoituksen valmistukseen käytettävien terästen ominaisuuksien on vastattava rakennesuunnittelussa käytettyjä arvoja. Raudoitustyössä on käytettävä standardien mukaisia teräslaatuja. Poikkeustilanteissa voidaan käyttää muita teräslaatuja hyväksytyyn testauslaitoksen laatimien kokeiden perusteella tehtyjen lausuntojen mukaisesti. (STUK, YVL E.6, 2013, 8,9)

6.1.2 Raudoituksen toteutus

ONKALO -työmaalla yleisenä sääntönä on, että lujittamattoman kallion alla ei saa työskennellä. Kyseinen seikka tulee huomioida myös rakennustöiden eri vaiheiden toteutuksessa siten, että työskentely tapahtuu taukoamatta komusuojan alta. Komusuoja on tunnelin katosta mahdollisesti putoavia kiviä varten rakennettava suoja, minkä alta työ voidaan suorittaa turvallisesti. Ensimmäisen kerran asia oli esillä jo urakkaneuvotteluissa, jolloin urakoitsijoille painotettiin kyseistä sääntöä ja tiedusteltiin muun muassa heidän näkemystä työalueen komusuojauksesta. Asian tiimoilta rakennesuunnittelija on laatinut ehdotuksen, jonka mukaan tunneliin rakennettaisiin erillinen liikuteltava teräsrakenteinen tunneli, joka toimisi komusuojana. Tunnelin käyttö muodostui tarkempien selvitysten jälkeen haastavaksi käyttää, koska tunnelin teräsrakennetta tulisi siirtää edestakaisin, mikä vaatisi omat toimenpiteensä, mitkä taas vaikuttaisivat muun muassa projektin aikatauluun sekä kustannuksiin. Lisäksi tunnelin sisältä töiden suorittaminen olisi muodostunut erittäin vaikeaksi.

Kun ajatus tunnelin käytöstä unohdettiin, nousi ykkösvaihtoehdoksi tulpan raudoituksen hyödyntäminen komusuojana. Raudoituksen toteutustapaa suunniteltiin aluksi Posivalla yrityksen oman henkilökunnan toimesta. Urakoitsijavalinnan jälkeen suunnittelutyöhön tuli mukaan myös Hartela Oy. Aluksi pohdinnassa oli, jos raudoituksen katto-osa voitaisiin valmistaa esivalmistetuista elementeistä, jotka kuljetettaisiin työmaa-alueelle, jossa varsinainen asennustyö suoritettaisiin. Tämäkin vaihtoehto jouduttiin hylkäämään sen haastavan asennusvaiheen vuoksi, sillä raudoituksen työaikainen tuenta tulee suorittaa niin tiiviisti, ettei rakenteen alapuolelle jäisi kunnolla työskentelytilaa. Lisäksi katon alueelle asennettavien esivalmistettujen raudoitusteräsjatkoksien liittäminen raudoituksen muihin osiin olisi muodostunut työteknisesti erittäin haasteelliseksi.

Seuraavassa vaiheessa pohdittiin olisiko mahdollista, että tunnelin kattoon tehtäisiin pienemmästä esimerkiksi 10 millimetrin harjaterästangoista työraudoitus, työverkko. Työverkon tarkoituksena olisi, että 10 millimetriä paksuista harjaterästangoista esivalmistettaisiin maanpinnalla raudoituselementtejä, jotka asennettaisiin työmaalla oikeaan kohtaan. 10 millimetriä halkaisijaltaan olevista teräksistä valmistetut elementit olisivat kevyempiä kuin 32 millimetriä halkaisijaltaan olevasta harjateräksestä valmistetut elementit, joten niitä olisi helpompi käsitellä ja asennustyö voitaisiin tehdä suurempia elementtejä hyväksikäyttäen. Kevyemmän verkon tuentakin olisi helpommin toteutettavissa. Työverkon asentamisen jälkeen voitaisiin asentaa rakenteen varsinaiset pääteräkset. Raudoituksen ja komusuojan yhdistämisen suunnittelusta järjestettiin suunnittelupalaveri, jossa yhdessä Rakenne-Rauma Oy:n suunnittelijan sekä Hartela Oy:n edustajien kanssa käytiin läpi mahdollisia vaihtoehtoja. Edellä kuvatussa menetelmästä luovuttiin muun muassa siksi, että rakenne toteutetaan 1-luokan betonityönä, jolloin kaikki raudoituksen tekemiseen käytettävät työteräksetkin tulee mallintaa raudoitussuunnitelmiin. Lisäksi työn toteutukseen tulisi työverkon myötä yksi ylimääräinen työvaihe, mikä pidentäisi jo ennestään tiukkaa aikataulua.

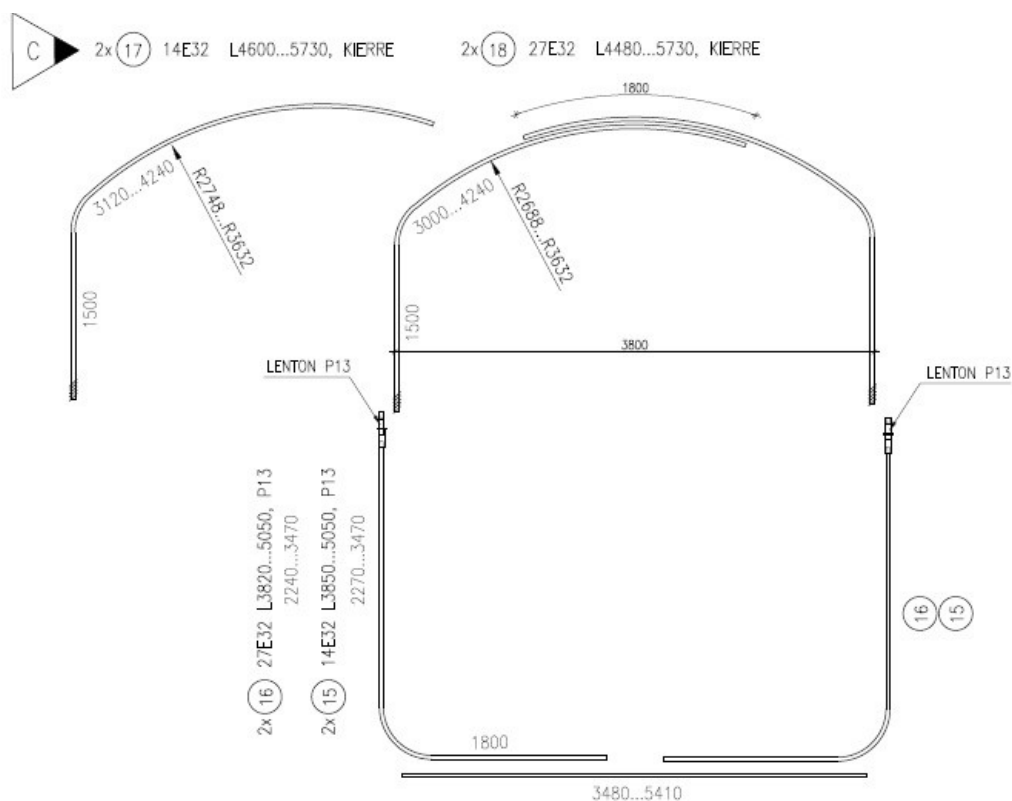
Edellä kuvatun menetelmän hylkäämisen jälkeen palattiin taas alkuperäiseen ideaan, jossa tulpan pääraudoitus toimisi oman käyttötarkoituksensa lisäksi myös työaikaisena komusuojana. Taas pohdittiin vaihtoehtoa, joka perustuisi esivalmistettuihin raudoituselementteihin, mutta nyt elementti kattaisi myös osan rakenteen seinästä. Ele-

mentit olisivat esimerkiksi 1000 millimetriä leveitä ja yhdellä elementillä voitaisiin kattaa puolet rakenteen katon profiilista ja lisäksi seinän osuus elementin leveydeltä. Tämänkin vaihtoehdon kohdalla ongelmaksi asettui valmistettavien elementtien paino ja elementtien väliset liitokset. Jatkoskohdassa jatkettavat teräkset kulkevat tietyn matkaa limittäin, jotta teräksille tulevat jännitykset siirtyisivät tangoista betoniin, sekä päinvastoin betoninilta toiseen tankoon vaurioittamatta betonirakennetta. Limijatkosta käyttämällä ongelmana olisi 32 millimetriä halkaisijalta olevan harjaterästan- gon pitkä jatkospituus, mikä hankaloittaisi varsinaista asennustyötä. Yhtenä liitos vaihtoehtona suunnitelmassa on ollut Lenton-jatkos. Lenton-jatkos on kuvattuna kuvassa 3. Elementtien kohdalla Lenton-jatkoksienkin käyttö olisi ollut erittäin haasteellista. Halkaisijaltaan 32 millimetrinen harjaterästanko painaa 6,310kg/m, joten suunnitelluille elementeille olisi kertynyt niin paljon painoa, että niiden turvalliseen käsittelyyn ja asennustyöhön asianmukaisin työkonein ei ahtaassa tunnelissa olisi ollut tilaa. Asennustyön aikana olisi myös saatettu tarvita erillistä komusuojausta, minkä toteutus olisi myös muodostunut ahtaassa tilassa ongelmaksi. (Betoniyhdistys r.y. 2005, 250)

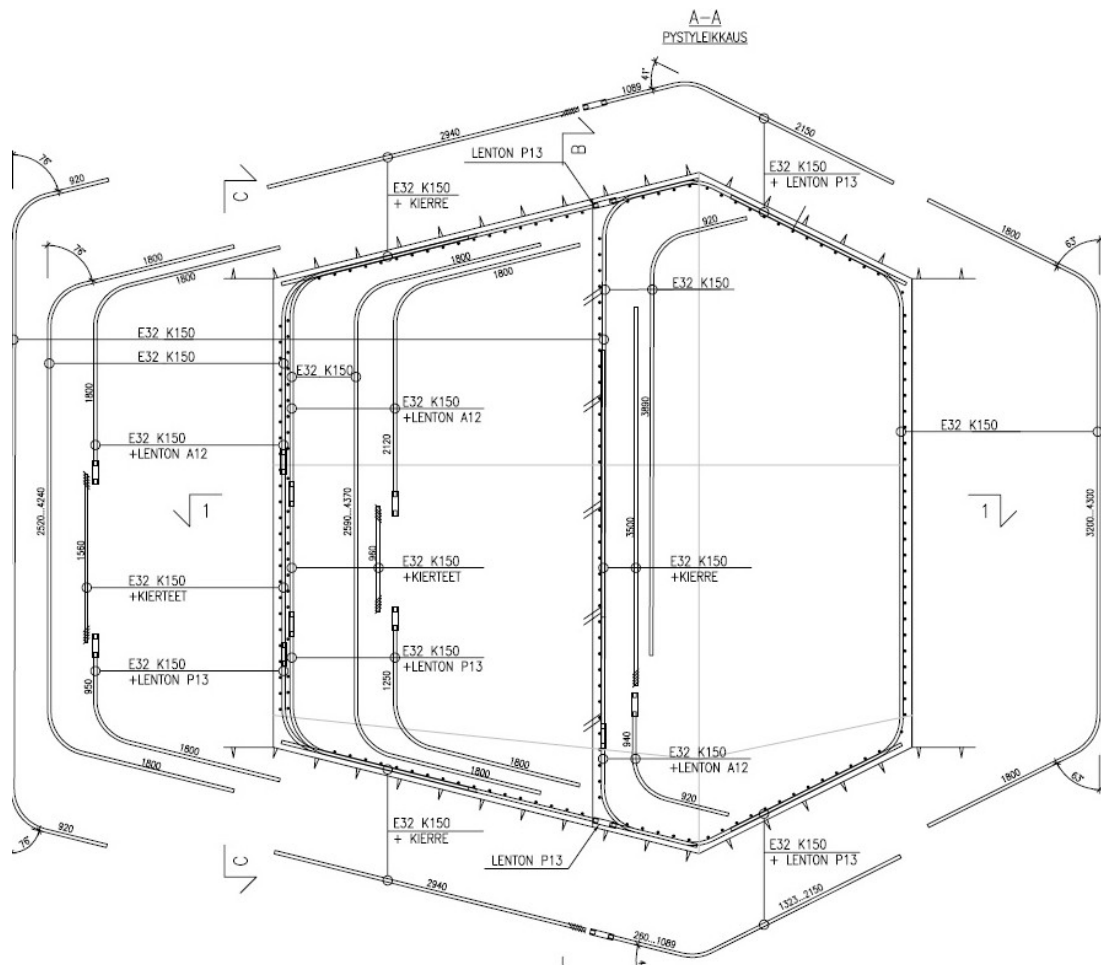


Kuva 3. Lenton-muhvijatkos. (Celsan www-sivut 2014. Viitattu 27.8.2014)

Suunnittelupalaverissa päätettiin kehittää työmenetelmää, jossa tulpan raudoituksen valmistus aloitettaisiin tulpparakenteen etuosasta. Työmenetelmä perustuu siihen, että raudoitusta tehdään valmistuen periaateleikkauksen mukaisia raudoitekehiä, joita pystytettäisiin peräkkäin. Raudoitustyö aloitettaisiin asentamalla ONKALO - työmaalle hyväksytyt betonivälitteet yhdessä työterästen kanssa tulpan lattiaa vasten. Välitteiden ja työterästen asennus tulee tehdä väliaikaisen komusuojan alta. Väliaikaisena tai työaikaisena komusuojana voidaan käyttää esimerkiksi komusuojoilla varustettua henkilönostinta, jonka korista käsin voidaan suorittaa betonivälitteiden sekä työterästen asennus tulpan lattian osuudelle. ONKALO -työmaalla on käytössä yksi komusuojoilla varustettu henkilönostin, jota voidaan käyttää apuna raudoitustyössä. Komusuojoillista henkilönostinta voidaan myös hyödyntää siten, että nostokori nostetaan vasten tunnelinkattoa, jolloin korin alapuolella voidaan työskennellä turvallisesti. (Suunnittelupalaveri 8.4.2014; Suunnittelukokous 9.4.2014)



Kuva 4. Tulppaurauditus, periaateleikkaus (Posiva Oy, 2014)



Kuva 5. Tulpanraudoitus, pystyleikkaus A-A (Posiva Oy, 2014)

Työterästen ja betonivälikkeiden asentamisen jälkeen päästään asentamaan tulpan varsinaisia pääteräksiä. Pääteräkset (E32-150 kuvassa 4) taivutetaan suunnittelijan laatiman leikkauslistan mukaisesti ennen työmaalle tuomista. Pääterästen asennus aloitettaisiin työterästen päälle rakenteen pohjalle asennettavien poikittaisterästen asentamisella. Pohjalle tulevat poikittaisteräkset (E32 yksittäinen vaakateräs k150 kuvassa 4) voidaan asentaa työterästen tavoin käyttäen apuna komusuojojallista henkilönostinta. Asennustyö voidaan tehdä joko henkilönostimen nostokorista tai työskentelemällä ylösnostetun komusuojojalla varustetun nostokorin alta. Pääteräkset voidaan kiinnittää työteräksiin sidontalangalla sitomalla. Työterästen ja pohjalle tulevien pääterästen asennustyön aikana tulee huomioida betonirakenteeseen tuleva pystysuuntainen työsauma. Työsauman kohdalta tulee jättää asentamatta vähintään kolme poikittaisterästä, jotta muottityölle jää riittävästi tilaa. Pääterästen lisäksi työterästen asentamisessa tulee huomioida rakenteeseen suunniteltu työsauma. Kun pääteräkset on asennettu rakenteen pohjalle koko tulpan alueelle, jatketaan raudoitustyötä

pääraudoituksen poikittaisteräksillä, jotka kattavat rakenteen katon ja seinien osuudet.

Seinien ja katon pääterästen (E32 periaateleikkauksen mukaiset raudoituskehät kuvassa 4) asennustyö aloitetaan asentamalla rakenteen molemmille puolille rakenteen muotojen mukaan taivutetut pystyteräkset. Katon ja seinien raudoitusta tehtäessä tulee käyttää komusuojaalista henkilönostinta, kun työskennellään raudoitetun alueen ulkopuolella. Pohjaan ja sivuille asennettavat pääteräkset liitetään toisiinsa rakenteen pohjalla tehtävin limijatkoksiksi. Jatkoskohdat tulee määrittää siten, etteivät kaikki jatkokset sijoittuisi samaan kohtaan, koska limijatkoksen kohdalla raudoitusverkon silmä pienenee huomattavasti kahden vierekkäisen harjaterästangon vuoksi. Seinien pääteräkset asennetaan kehä kerralla, minkä jälkeen asennetaan aina katon osuus. Seinien ja katon pääterästen asennuksessa ja työnaikaisessa tuennassa käytetään betonivälikkeitä sekä työteräksiä. Katon raudoitus tehdään kahdesta samanpituudesta ja samanlaisesti tunnelin katon profiilin mukaan taivutetusta harjaterästangosta, jolloin teräsjatkos tulee rakenteen lakipisteeseen. Jatkostyyppinä katon teräksissä käytetään limijatkosta. Katon osuudelle tulevien terästen liittäminen seinä teräksiin tehdään Lenton-jatkoksilla. Koska raudoitus toimii komusuojana tulee raudoituksen seinille tulevien jatkosten kestää mahdollisimman suuri kuorma mahdollisen komun pudotessa. Lenton-jatkos pystyy vastaan ottamaan kiristämisen jälkeen täyden kuorman eli vastaa siis yhtenäistä harjaterästankoa. Lenton- jatkos on myös erittäin helppo ja nopea asentaa työmaaolosuhteissa.

Toisen valuosan pääteräksiä asennettaessa tulee huomioida myös työsauman kohta, jotta ensimmäisen valuosan muotin asentamiselle jää riittävästi tilaa. Koska tulpan pitkittäisiä teräksiä ei asenneta raudoitustyön ensi vaiheessa, tulee poikittaisten pääterästen sidonta ja rakenteen jäykistäminen kaikkiin suuntiin hoitaa toisella tavalla. Poikittaisterästen sidonnassa voidaan käyttää joko raudoitussuunnitelman mukaisesti työteräksiä tai sandwich- betonielementtien sidonnassakin käytettäviä diagonaaliansaita, mitkä asennetaan poikittaisterästen väliin. Diagonaaliansaiden etuna olisi niiden asennustyön nopeus ja helppous, minkä lisäksi asennustyön voi tehdä työmaalla sama resurssi kuin raudoituksenkin eli raudoittaja. Jos taas pääterästen työnaikaisessa tuennassa ja sidonnassa käytetään työteräksiä, tarvittaisiin työterästen asennustyöhön myös hitsaajaa, jotta pääteräksien ja työterästen välinen liitos saadaan kestäväk-

si. Mikäli poikittaisten pääterästen asentamisen apuna käytettäisiin työteräksiä syntyisi myös aikatauluviivettä, koska hitsaustyön aikana raudoittajat eivät voisi työskennellä kohteessa.

Kun kaikki poikittaisteräket on asennettu koko tulpan alueelle, voidaan aloittaa ensimmäisen valuosan pitkittäisterästen asentaminen. Pitkittäisteräket asennetaan poikittaisterästen tavoin 150 millimetrin jaolla. (Pitkittäisteräket asennustyö kuvattuna kuvassa 5.) Pitkittäisterästen jatkokset tehdään pääasiallisesti limijatkoksina, mutta Lenton-jatkoksia tullaan käyttämään raudoituksessa suunnitellun työluukun sekä työsauman kohdalla. Lenton-jatkoksia käytettäessä tulee huomioida jatkoksen suurempi halkaisija raudoitustankoihin nähden. Jatkokset tulisi sijoittaa raudoitukseen siten, etteivät kaikki Lenton-jatkokset sijoitu samaan kohtaan. Mikäli kaikki Lenton-jatkokset asennettaisiin samaan kohtaan, muodostuisi jatkoksien kohdalle suunniteltua tiheämpi raudoitusverkko, mikä saattaisi haitata massan kulkeutumista ja tiivistymistä.

Ensimmäisen valuosan betonoinnin ja muotin purkamisen jälkeen raudoitustyö jatkuu toisen valuosan osalta. Toisen valuosan raudoitustyö aloitetaan työsauman kohdasta kiertämällä suorat kierteellä varustetut harjateräket työsaumassa oleviin Lenton-jatkoksiin. Muilta osin toisen valuosan raudoitustyö etenee kuten ensimmäisenkin valuosan raudoitustyö. Raudoitettaessa kummankin valuosan etuseinää tulee raudoitustyön aikana huomioida valuyhteiden sijoittelu. Valuyhteiden kohdalla raudoitusta tulee tarvittaessa muokata siten, että betonilla olisi mahdollisimman avoin ja vapaa väylä kulkeutua raudoitteen lävitse. Kun tietyn valuosan raudoitustyö on saatu valmiiksi, järjestetään raudoitustarkastus, jossa voidaan todeta raudoituksen suunnitelmienmukaisuus.

6.2 Muotitus

Betonitulpan rakennuspaikka ahtaassa tunnelitilassa yhdessä massiivisen betonirakenteen kanssa luovat haasteelliset lähtökohdat muottityön suunnittelulle. Lisäksi betonitulpan muotin suunnittelussa tulee huomioida tulpan paikalle asetetut vaatimukset kuten se, ettei tulpanalueelle eikä sen välittömään läheisyyteen (1000 milli-

metriä) kallioon saa ankkuroida mitään yli 50 millimetriä pidempää kallioankkuria. Muotin tuenta tulee ankkuroida kallioon riittävän etäälle tulpasta. Kyseinen seikka kulminoituu varsinkin tulpan ensimmäisen valuosan kohdalla, koska toisen valuosan kohdalle ei kallioon voi ankkuroida mitään. Täten tulpan ensimmäisen valuosankin muotin ankkurointi kallioon tulee hoitaa 1000 millimetrin suojavyöhykkeen ulkopuolelle.

Rakenne on tilavuudeltaan noin 140 m³ eli se on kooltaan varsin massiivinen. Myös tulpan betonointiin käytettävä betonimassa omine ominaisuuksineen tuo oman haasteensa myös muottityön suunnitteluun ja toteutukseen. Betonimassan notkean olemuksen vuoksi muotin tulisi olla myös mahdollisimman tiivis, jotta vesi ja hienoaaines eivät vuoda ulos muotin sisältä betonoinnin aikana sekä hydratoitumisreaktion alkuvaiheessa.

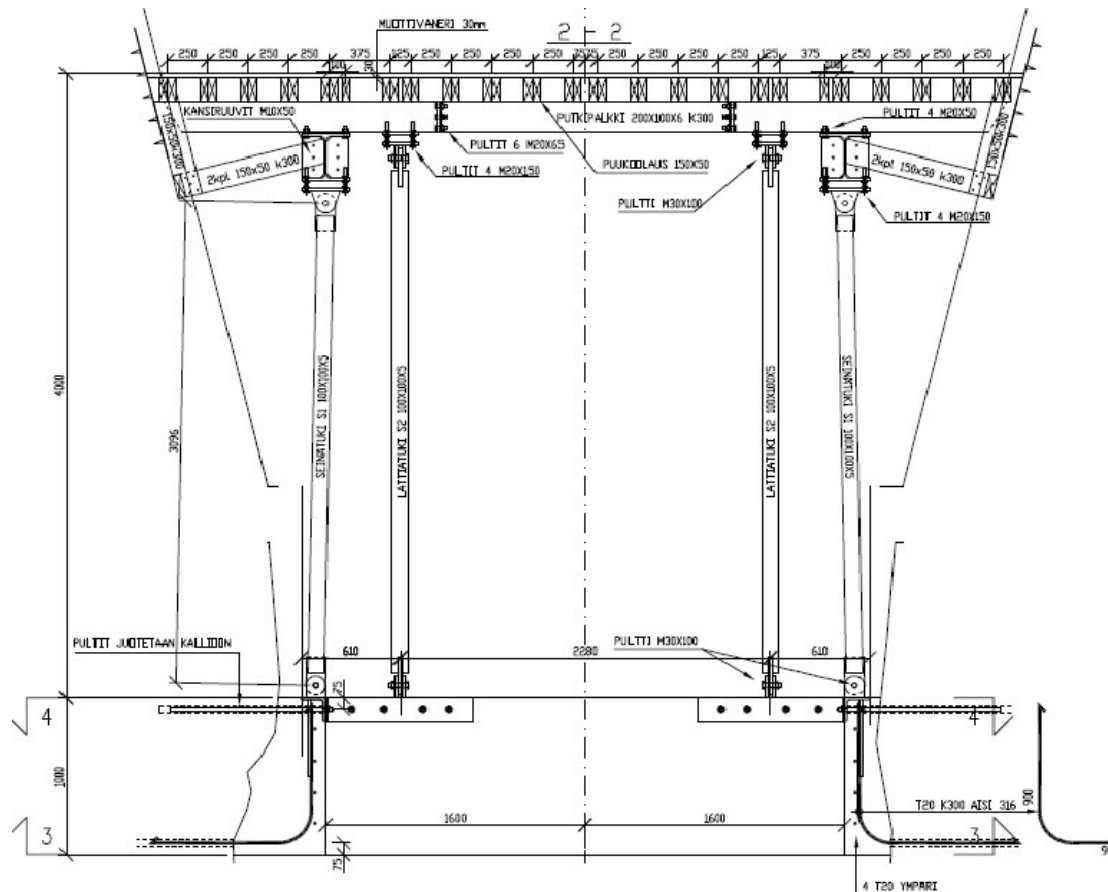
6.2.1 Muottityön suunnittelu ja käytettävä muottikalusto

Tulpan muottityön toteuttamisen suunnittelu aloitettiin jo varhaisessa vaiheessa projektia. Lähtötiedoiksi urakoitsija valintaa varten Posivalta pyydettiin alustavatarjous Doka-järjestelmämuotista. Järjestelmämuotin käyttöä pohdittiin aluksi, mutta ajatus hylättiin perustuen urakoitsijan näkemykseen järjestelmämuotin kalliimmilla kustannuksilla verrattuna paikalla rakennettavaan muottiin. Lisäksi kalliopinnan muotojen vuoksi itse muottipinta ja muotin tukirakenne tulee olla mahdollisimman laaja-alaisesti muokattavissa, mikä ei yleensä ole mahdollista järjestelmämuottien kohdalla. Kallion pinnanmuotojen lisäksi käytettävän muottijärjestelmän tulee olla sellainen, että sitä pystytään hyödyntämään tulpan molempia valuosia valettaessa mahdollisimman pienin muokkauksin. Käytettävän muottikaluston lopullinen valinta jäi urakoitsijan päätettäväksi, eikä tulpan kohdalla päädytty käyttämään järjestelmämuottia. (doka tarjous, muotin suunnittelukokous 5.9.2014)

Tulpan muottia lähdettiin suunnittelemaan yhdessä urakoitsijan kanssa, kuten raudoitustakin. Tulevan muotin rakennetta lähdettiin miettimään rakenteen massiivisen koon ja betonimassan säätelemien ominaisuuksien pohjalta. Massan tiiviyyden takia betonimassaa on kehitetty mahdollisimman vähän lämpöä kehittäväksi, jotta voidaan

minimoida kuivumisen aikana syntyviä halkeamia. Tähän on pyritty muokkaamalla massareseptiä sellaiseksi, että massan lujuudenkehitys olisi mahdollisimman hidasta. Koska massan sitoutumisprosessi on erittäin hidas ja massa on plastisessa tilassa usean tunnin ajan, tulee muotti mitoittaa niin sanotun hydrostaattisen paineen eli maksimipaineen mukaisesti. Hydrostaattinen paine on massan tilavuuspaino neliometriä kohden kerrottuna betonivalun korkeudella. Lisäksi betonimassa on ominaisuuksiltaan hyvin lähellä itsetiivistyvää betonia, joten senkin puolesta muotinmitoituksessa tulee käyttää hydrostaattista painetta. Tulpan ensimmäisen valuosa on korkeimmasta kohdasta noin 6 metriä korkea, kun korkeus kerrotaan massan tilavuuspainolla noin 2500kg/m^3 , saadaan hydrostaattiseksi paineeksi 150kN/m^2 . Betonointi suoritetaan osittain painevaluna jolloin muotin mitoituksessa tulee myös huomioida pumpun aiheuttama paine sekä muotin yläosan paineistus. Suunnitteluarvona tulpan yläosan paineistusta varten käytettiin $0,5\text{ bar:n}$ painetta eli 50 kN/m^2 . Jolloin muotin suunnitteluarvoksi tuli yhteensä 200 kN/m^2 . (Rudus Oy Itsetiivistyvä betoni, Muotin suunnittelukokous 5.9.2014)

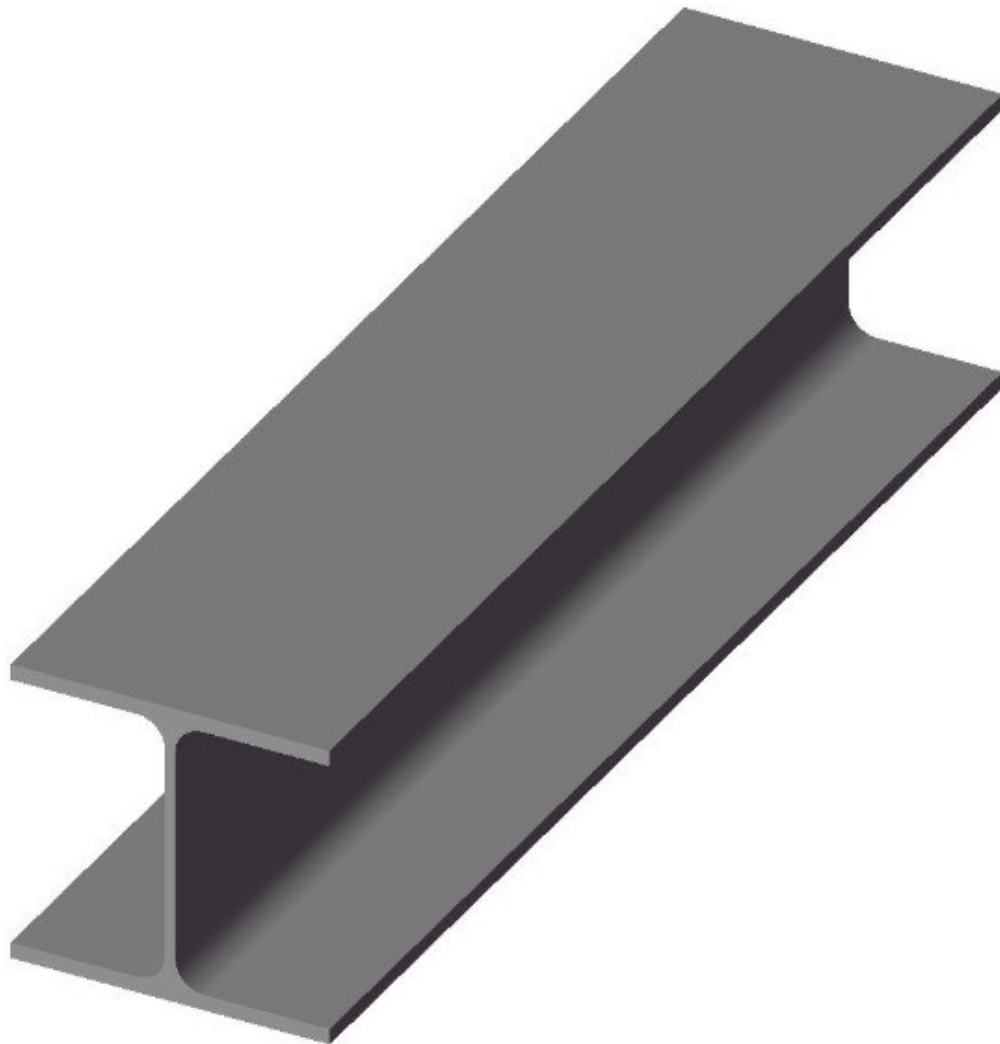
Koska muottiin kohdistuva valupaine on erittäin korkea eikä paine ehdi myöskään massan pitkän sitoutumisajan vuoksi laskemaan betonoinnin aikana, tulee muotin tukirakenteen olla todella järeä. Muotin tukirakenteen suunnittelussa tuli huomioida tulpan ahdas rakennuspaikka, sillä tunneliin oli jäätävä riittävästi tilaa, jotta betonointi voidaan suorittaa turvallisesti muotin tukirakenteen rakentamisen jälkeen. Myös tämä oli yksi järjestelmämuotin hylkäysperusteista, koska järjestelmämuotin tuenta ratkaisu oli telinetornimainen ja olisi vaatinut huomattavasti enemmän tilaa. Tilaa vaativa telinetuenta olisi hankaloittanut tulpan rakentamisen muita työvaiheita esimerkiksi betonointia. Lisäksi urakoitsija oli halukas toteuttamaan muotin itse.



Kuva 6. Tulpan muotti, periaatesuunnitelma. (Hartela Oy, 2015)

Suunnittelukokousten pohjalta muotinrakennesuunnittelija laati ensimmäisen luonnossuunnitelman tulppaa varten rakennettavasta muotista. Muotin runko muodostuisi puukoolauksesta 50mm. x 150mm. , minkä jälkeen asennetaan teräksiset vaakapalkit. Vaakapalkit ovat tyypiltään 200mm. x 100mm. x6mm. millimetrin putkipalkkeja. (Muottirakenne kuvassa 6.) Samaan tasoon tulevat vaakapalkit muodostuvat kolmesta lyhyemmästä palkista, jotta palkit olisivat miesvoimin käsiteltävissä työmaalla. Putkipalkit kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksia. Vaakapalkkien jälkeen tulee vielä teräksiset pystypalkit. Pystypalkkeja asennetaan kaksi kappaletta samoihin linjoihin joihin tulevat myös kallioon ankkuroitavat seinätuet. Pystypalkit ovat molemmin puolin uumajäkistettyjä HEA 300 palkkeja. (HEA 300 -palkki kuvassa 7.) Uumajäkistyksellä tarkoitetaan sitä, että palkin uumaan on tasaisin välein K300, hitsattu uuman profiilin mallinen teräslevy, estämään kuormittumisen aiheuttamia haitallisia muodonmuutoksia palkissa. Pystypalkit ottavat muottirakenteeseen tulevat kuormat vastaan ja välittää ne seinätukina olevien putkipalkkien välityksellä kallioon. Seinätukina toimivat palkit ovat 100mm. x100mm. x5mm. putkipalkkeja. Seinätuet kiinni-

tetään kallioon ankkuroituihin kallio tukiin. Muottipintana käytetään 30 millimetriä paksua filmivaneria. (Muotin suunnittelukokous 15.10.2014; Muotin suunnittelukokous 31.10.2014)



Kuva 7. HEA 300 - palkki. (Kontino Oy, WWW-sivut2015. Viitattu 19.2.2015)

6.2.2 Muottityö

Tulpan varsinainen muottityö alkaa muottiin tulevien teräsrakenteiden esivalmistuksella. Muotin rakentamisessa käytettävät teräsosat valmistetaan mahdollisimman pitkälle ennen niiden toimittamista työmaalle siten, ettei työmaalla tarvitse tehdä kuin hienosäätö ja varsinainen asennustyö. Teräsosat ovat rakenteeltaan säädettäviä sekä mitoiltaan lyhyitä, jotta niitä pystytään käsittelemään työmaalla miesvoimin. Tarkoi-

tuksena on, että koolauksen taakse tulevat vaakapalkistot kootaan työmaalla esivalmistetuista lyhyemmistä palkeista. Ainoat suuremmat teräsrakenteet ovat muotin tukirakenteen pystypalkit HEA 300. Kyseisten palkkien pituus on 5600 millimetriä ja niiden asennuksessa tullaan tarvitsemaan erillistä nostinta. Tulpan muottityön aloitusedellytyksenä on hyväksytty raudoitustarkastus.

Ennen kuin muottia voidaan kunnolla alkaa rakentamaan, tulee kallioon olla porattuina 31 kappaletta reikiä muotin seinätukien kiinnittämisessä käytettävien kiinnitystukkien asennusta varten. Seinätukien kiinnitysankkurit, tulpan etupuolelle, asennetaan vähintään 1000 millimetrin suojaetäisyyden päähän tulpasta. Tästä johtuen joudutaan seinätukien ankkurointia varten tekemään tasausbetonointi, koska ankkurointikohta sijoittuu tunnelin louhinnan aikaisen räjäytyskatkon kohdalle. Katkon kohdalla kallioista on lohjennut hieman normaalia enemmän kiveä. Tasausbetonointia varten tehtävään raudoitukseen kiinnitetään L:n malliset kulmaraudat, joihin on kiinnitetty tulpan muotin tukipalkkien kiinnityslevyt. Raudoituksen kiinnittämisen lisäksi kulmaraudat kiinnitetään pulteilla kallioankkureihin. Näin varmistetaan, että seinäuilta tulevat kuormat siirtyvät kulmarautojen välityksellä kallioon. Seinätukien lisäksi muotti ankkuroidaan kallioon myös tunnelin katossa ja lattiassa, jotta kuormat jakaantuisivat mahdollisimman tasaisesti. Lattia ja kattotuet asennetaan samalla tavalla kuin seinätuet ja ovat profiililtaan vastaavia.

Kun esivalmistelut on saatu tehtyä, päästään työstämään varsinaista muottia ja sen tukirakenteita. Tulpan muotin pystytys aloitetaan koolauksen 50mm. x 150mm. asentamisella. Koolausväli on keskimäärin 250 millimetriä. Valuyhteiden kohdalla koolausväli on 375 millimetriä. Koolausväliä kasvatetaan niputtamalla koolaukseen käytettävää puutavaraa valuyhteiden kohdalla. Koska muotin varsinaisia tukirakenteita ei voida asennusteknisistä syistä asentaa ennen koolausta, voidaan koolauksen pystyttämisessä käyttää apuna esimerkiksi pieniä kulmalevyjä, mitkä kiinnitetään pienin kiila-ankkurein kallioon. Muottivanerin asentamisen helpottamiseksi koolausta ei tarvitse valmistaa kerralla loppuun, vaan se voidaan viimeistellä valmiiksi, kun kaikki muottivanerit on saatu asennettua. Ennen koolauksen viimeistelyä voidaan asentaa myös valuyhteet niille osoitetuille paikoille. Asennettavat valuyhteet ovat halkaisijaltaan 100 millimetriä ja 125 millimetriä. Valuyhteet tulevat kahteen riviin 1350 millimetrin päähän päähän kallioista, yhteiden keskinäinen etäisyys on noin

2700 millimetriä. Pystysuunnassa kahden yhteen välinen etäisyys on 600 millimetriä ja porrastaen eripuolilla muottia olevien yhteiden ero korkeussuunnassa on 300 millimetriä. Lisäksi muotin ylimpään osaan rakenteen keskikohtaan asennetaan yksi 100 millimetriä halkaisijaltaan oleva valuyhde, mitä kautta valetaan rakenteen yläosa.

Muottivaneri asennetaan raudoitusta vasten etukäteen asennettuja 50 millimetriä paksuja betonivälিকেitä vasten. Välিকেiden avulla saadaan varmistettua betonipeitteen riittävyys. Muottivanerit kiinnitetään koolaukseen. Kun kaikki muottivanerit on saatu asennettua, voidaan viimeistellä koolaus muottisuunnitelman mukaisesti. Koolauksen ja muottivanerin asennusten jälkeen, asennetaan muotin alimmainen vaakapalkki ennen pystytukien asennusta. Tämä siitä syystä, että alin vaakapalkki koostuu vain yhdestä osasta, mikä on koko muottirakenteen levyinen. Pystytukien asennuksen kanssa samanaikaisesti asennetaan myös seinätuet joiden avulla pystypalkit saadaan kiinnitettyä. Kun pystytuet on saatu asennettua, aloitetaan vaakaturkien asennus pystytukien ja koolauksen väliin. Pohjalle asennetun vaakapalkin jälkeen aloitetaan kokoaamaan vaakapalkkeja osa kerrallaan pystysuunnassa siten, että kahden palkin keski-kohtien väli on 300 millimetriä. Vaakapalkit muodostuvat kolmesta osasta, joista kaksi on pituudeltaan 1700 millimetriä ja yksi 1800 millimetriä. Palkin osat liitetään toisiinsa pulttiliitoksien. Reunimmaisten vaakapalkkien osat liitetään pulttiliitoksien myös pystypalkkeihin. Muottirakenteen yläosassa rakenteen kaventuessa myös reunimmaiset vaakapalkkien osat lyhenevät. Yläosan vaakapalkkeissa on lisäksi kiinnityskohdat katontukia varten. Kun vaakapalkit on saatu asennettua, asennetaan lopuksi kattoon ja lattiaan tulevat tuet. Lopuksi asennetaan muottiin tulevat valupainemittarit, joiden avulla betonoinnin aikana voidaan seurata muottiin kohdistuvaa valupainetta. Kun ensimmäisen valuosan muotin valmistuksen kaikki työvaiheet on saatu tehtyä, järjestetään muottitarkastus, jossa tarkistetaan muotin suunnitelmien mukaisuus.

Toisen valuosan muottityöt voidaan aloittaa, kun valuosan raudoitus on tarkastettu hyväksytysti. Toisen valuosan muotin rakentaminen toteutetaan saman periaatteen mukaisesti kuin ensimmäisen valuosan muotti. Toisen valuosan muotissa tulee kuitenkin huomioida rakenteen profiilin mittojen pientyminen. Tämän seurauksena muotin vaakaturkia tulee lyhentää, jotta ne sopisivat kaventuneeseen tunneliprofiiliin. Lisäksi muotin ankkuroinnissa kallioon käytettäviä seinä-, lattia- ja kattotukia tulee

lyhentää. Toisen valuosan kohdalla ne tulee lyhentää siten, että ne voidaan asentaa muotin pystypalkin sekä kalliotuen väliin. Muotin pystypalkit tulee myös lyhentää vastaamaan tunneliprofiilin mukaista korkeutta.. Toisen valuosan muottiin tehdään myös muottitarkastus, jossa voidaan todeta muotin suunnitelmienmukainen toteutus.

6.3 Betonityöt

Tulpan teknisen toimivuuden kannalta tärkein työvaihe rakennustöissä on betonointi. Tulpan betonointi tulee suorittaa siten, että valettavasta rakenteesta tulee mahdollisimman tiivis ja valettu massa on mahdollisimman homogeenista eli tasalaatuista. Jotta lopputulos olisi paras mahdollinen, on oikeiden työmenetelmien käytöllä ja valinnalla erittäin suuri merkitys. Työmenetelmien ohella käytettävällä betonointikalustolla ja betonimassan tasalaatuisuudella on suuri merkitys lopputuloksen kannalta. ONKALOn ahtaat kalliotilat tuovat omat haasteensa betonointiin vaikuttaen käytettäviin työmenetelmiin sekä kalustoon.

6.3.1 Tulpan betonoinnin suunnittelu

Tulpan betonoinnin suunnittelu on ollut kaiken kaikkiaan pitkä prosessi. Betonointi ja sen toteuttaminen esitettyjen vaatimusten mukaan otettiin esiin jo urakoitsijan valintaprosessin aikana. Urakkaneuvotteluissa mukana olevilta urakoitsijoilta pyydettiin heidän oma näkemyksensä, miten he toteuttaisivat tulpan haastavan betonointityön. Urakoitsijavalinnan jälkeen Hartela Oy tuli mukaan kiinteästi betonoinnin kehitys ja suunnittelutyöhön. Betonoinnin suunnitteluun on osallistunut aktiivisesti myös massatoimittaja Rudus ja Aaro Kohonen Oy sekä VTT. Betonointi suunnittelulle haastetta tarjoaa edellisten työvaiheiden tavoin ONKALOn ahtaat kalliotilat, missä ei voida käyttää tavallisissa maanpäällisissä kohteissa käytettävää pumppauskalustoa.

Massan työstettävyyden arvioimista ja työmenetelmien testausta varten suunniteltiin tehtäväksi betonoinnin menetelmäkoe MOCK-UP. Suunnittelun edetessä ilmeni massan haastavien työstettävyysominaisuuksien vuoksi tarve myös toiselle menetelmäkokeelle. Ensimmäisessä menetelmäkokeessa oli tarkoitus mallintaa tulpan beto-

noinnissa valitsevia olosuhteita ja menetelmäkokeen muotti suunniteltiinkin vastamaan varsinaisessa valussa kohdattavia olosuhteita ja rakenteen muotoja. Menetelmäkokeeseen tehtiin myös tulpan raudoituksen kaltainen rauditus.



Kuva 8. Menetelmäkoe 1 muottirakenne sekä rauditus. (Posiva Oy, 2014)

Ensimmäisessä menetelmäkokeessa oli tarkoitus suorittaa betonointi koko rakenteen osalta painevaluna käyttäen yhtä valuyhdettä. Menetelmäkoetta betonoitaessa voitiin havaita, että betonimassan työstettävyyssäikä eli aika miten kauan betonimassa on pumpattavissa, on erittäin lyhyt, vaikka betonimassa on ominaisuuksiltaan hitaasti reagoiva. Menetelmäkokeen betonointi jouduttiin ensimmäisellä valukerralla keskeyttämään ja avaamaan muotti, koska betonimassan lisäaineena käytetyn notkistimen vaikutusaika oli umpeutunut, eikä massa enää kulkeutunut tai tiivistynyt muottiin vaan tukki valuyhteen. Muotti avattiin ja valuyhteen edusta puhdistettiin kovetuneesta betonista, jolloin valua päästiin jatkamaan. Toisella betonointikerralla betonimassan notkistinmäärää kasvatettiin jo tehtaalla, mikä lisäsi hieman massan pumppausominaisuuksia sekä antoi lisää aikaa myös työsuoritukseen. Massaa jouduttiin myös uudelleen notkistamaan jonkin verran kuorman saavuttua työmaalle ennen pumppauksen aloittamista. Muotin avaamisen jälkeen voitiin todeta sen täyttyneen

kauttaaltaan ja rakenteen kriittisen paikan eli yläosan tiivistyneen erinomaisesti. Betonimassan kulkeutumisessa ja tiivistymisessä rakenteen takaosaan havaittiin kuitenkin olleen ongelmia sillä betonimassan runkoaineena oleva #32 millimetrin kiviaines oli osittain pysähtynyt raudoitukseen ja samalla tukkinut myös hienoaineksen kulkeutumisen ja tiivistymisen muottipinnan ja raudoituksen väliin. (Posiva Oy, 2014. Betonointi palaveri 15.4.2014; Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 1 työmaaraportti)



Kuva 9. Menetelmäkoe 1 muotin avaamisen jälkeen. (Posiva Oy, 2014)

Menetelmäkoe 1:n kokemusten pohjalta pohdittiin toimenpiteitä, joilla betonimassa saadaan paremmin työstettäväksi sekä työmenetelmiä joilla voidaan auttaa massan kulkeutumista muotin sisällä. Betonoinnin suunnittelua jatkettiin järjestämällä betonoinnin suunnittelukokous 4.9.2014, jossa pohdittiin miten betonimassa saadaan helpommin työstettäväksi ja työstöaikaa pidennettyä. Suunnittelukokouksessa päätettiin järjestää menetelmäkoe 2, jossa testataan menetelmäkoe 1 kokemusten pohjalta muokattuja työmenetelmiä. Koska ensimmäistä menetelmäkoetta valettaessa ilmeni ongelmia massan kulkeutumisessa ja tiivistymisessä rakenteen takaosassa, päätettiin betonimassaa yrittää kuljettaa saattoputkella rakenteen takaosaan, jolloin voitaisiin estää betonimassan haitallinen erottuminen esimerkiksi raudoituksien kohdalla. Be-

tonointi aloitetaan rakenteen takaosasta ja saattoputkea vedetään ulospäin kohti muotin etuosaa pumppauksen edetessä. Yhdestä valuyhteestä valetaan aina siihen asti kunnes betonipinta saavuttaa kyseisen valuyhteen. Tämän jälkeen siirrytään seuraavaan yhteeseen, mikä on muotin toisella puolen. (Posiva Oy, 2014. Tulpan betonoinnin suunnittelukokous 4.9.2014)

Toisessa menetelmäkokeessa päätettiin myös kokeilla minkälainen vaikutus massan lämpötilan laskemisella, on notkistimen vaikutusaikaan. Ensimmäisen menetelmäkokeen aikana notkistimen ominaisuudet alkoivat hävitä noin 45 minuuttia sekoittamisen jälkeen. Tämän jälkeen betonimassa muuttui notkeasta jäykäksi hyvin nopeasti. Tällöin betonimassan lämpötila oli noin 23 °C. Toista menetelmäkokeetta varten työmaalle toimitettiin kahta eri lämpöistä betonimassaa. Viileämpi betonimassa oli lämpötilaltaan 10-15°C ja lämpimämpi 20-25°C celsiusastetta. Molempia betonimassoja pumpattiin puolen kuution kokoisiin laatikoihin, joissa voitiin seurata betonimassan sitoutumista sekä notkistimen vaikutusaikaa.

Ensimmäiseen menetelmäkokeeseen verraten toisen menetelmäkokeen yhteydessä törmättiin ongelmaan betonimassan notkeuden kanssa. Kun ensimmäisessä menetelmäkokeessa betonimassan notkeuden määrittävän leviämäkokeen tulokset olivat 570 ja 600 millimetrin välillä, toisen menetelmäkokeen aikana tehtaalla otetun leviämäkokeen tulos oli hieman yli 400 millimetriä, vaikka resepti oli täysin sama kuin ensimmäisen menetelmäkokeen aikana. Massaa jouduttiin siis notkistamaan jo tehtaalla huomattavasti enemmän kuin ensimmäisen menetelmäkokeen aikana. Ensimmäisestä menetelmäkokeesta poiketen menetelmäkoe 2:n aikana betonimassaa ei jouduttu lisänotkistamaan työmaalla. Tämän perusteella voitiin tehdä havainto, että toisen menetelmäkokeen aikana myös notkistimen toiminta-aika oli pidempi kuin ensimmäisen menetelmäkokeen aikana. Lisäksi kolmeen laatikkoon pumpatut erilämpöiset betonimassat osoittivat, että lämpötilalla ei oletusarvojen vastaisesti ollut suurta vaikutusta betonimassan työstöaikaan. Suuremman painoarvon massan toiminta-ajan kasvulle toisessa menetelmäkokeessa voidaan antaa, reilusti kasvaneelle notkistin määrälle. Vaikka toisen menetelmäkokeen tulokset kumoavatkin osittain ensimmäisen menetelmäkokeen aikaiset havainnot betonimassan lyhyestä toiminta-ajasta tulee varsinaisen tulpan betonointi ja betonimassan toimittaminen työmaalle suunnitella siten, ettei betonointiin tai betonimassan toimitukseen tule ylimääräisiä katkoja. Tämä tarkoittaa

käytännössä sitä, että betonoinnin aikana ei voida noudattaa betoninormien mukaisia valunopeuksia. Massaa tulee pumpata rakenteeseen jatkuvalla syötöllä siten, että aiemmin pumpatun massan päälle pumpattaisiin tuoretta massaa ennen kuin notkistimen vaikutusaika umpeutuu. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että rakenteen toiselta puolelta toiselle puolelle ja takaisin siirrytään noin puolessa tunnissa. Kun betonointia suoritetaan edellä kuvatusti, tulee betonin toimitus työmaalle oltava jatkuvaa. Seuraavaksi pumpulle tulevan kuorman on oltava työmaalla näytteen ottoa varten samaan aikaan, kun edeltävä kuorma siirtyy pumpulle. Tällöin on matkalla työmaalle oltava ainakin kaksi kuormaa yhtäaikaisesti ja lisäksi asemalla yksi.

Vaikka toisessa menetelmäkokeessa betonimassa saatiin lopulta työmaalla notkistettua notkeudeltaan löysemmäksi kuin ensimmäisessä menetelmäkokeessa, ilmeni pumppauksen alkaessa ongelmia massan kulkeutumisessa pumpun putkiston läpi. Tähän syynä voidaan pitää massan matalaa sisäistä kitkaa, minkä johdosta karkea ja hienoaines pyrkivät erottumaan. Kyseistä ilmiötä edesauttaa betonimassan sisältämän notkistimen runsas määrä. Erottumisen hillitsemiseksi varsinaisen tulpan betonin pumppauksen aloittamista varten päätettiin tehdä oma liukastusmassa, joka voidaan pumpata linjaston läpi ennen kuin aloitetaan varsinaisen betonimassan pumppaus. Liukastusmassan tarkoituksena on pienentää kitkaa pumppulinjan putkissa, jotta varsinainen betonimassa kulkisi putken läpi sujuvammin.

Myös toisen menetelmäkokeen yhteydessä havaittiin että, rakenteen takaosaan jää muotin ja raudoituksen väliin ilmataskuja, johon betonimassa ei kulkeudu. (Kyseinen ilmiö kuvattuna kuvassa 9) Toisessa menetelmäkokeessa betonimassan etenemistä muotissa voitiin seurata, koska muotti oli yläosastaan auki ja rakenteen takaosassa muottipintana oli muovinen pleksilevy. Kun betonimassaa pumpattiin saattoputken välityksellä rakenteen takaosaan, karkea kiviaines pyrki levittäytymään putken edustalle ja hienoaines lähti taas kulkemaan kohti muotin etuosaa. Kohdatessaan raudoitusverkon, tukki osa karkeasta kiviaineesta raudoitusverkon silmän, jolloin myös hienoaineen kulkeutuminen hankaloitui raudoitusverkon taakse. Toisessa menetelmäkokeessa betonia pumpattiin saattoputken läpi tarkoituksena vetää putkea ulos valun etenemän mukaisesti. Tässä ei menetelmäkokeessa onnistuttu täydellisesti, mutta siitä huolimatta massan pumppaus sujui ongelmitta. Saattoputken käyttö perustuu

samaan menetelmään, mikä on yleisesti käytössä korkeissa betonivaluissa, joissa massan pudotuskorkeutta pyritään minimoimaan erottumisvaaran pienentämiseksi.



Kuva 10. Menetelmäkoe 2: Betonin pumppausta saattoputkella. (Posiva Oy, 2014)

Koska betonoinnin aikana silmämääräisesti näytti, että betonimassassa tapahtuisi erottumista, päätettiin eripuolilta rakennetta porata rakennekoelieriöitä, joiden avulla pystytään selvittämään betonimassan koostumus. Rakennekoelieriöt osoittivat, että muilta osin betonimassa oli hyvinkin homogeenista eli tasalaatuista, mutta raudoituksen kohdalla on havaittavissa poikkeamaa muuhun rakenteeseen nähden. Raudoituksen taakse ei ollut kulkeutunut raekooltaan suurempaa kiviainesta vaan tila oli täyttynyt hienoaineella.

Toisen menetelmäkokeen tulosten analysoinnin jälkeen suunnittelutyö jatkui pumppaustekniikan kehittämisellä, koska menetelmäkoetta betonoitaessa betonin saattoputkea ei saatu vedettyä ulos muotin sisältä suunnitellun tasaisesti. Menetelmäkokeessa putkea yritettiin liikuttaa miesvoimin sekä taljan avulla. Tulpan kohdalla betonointi hoidetaan pienikokoisen pumppuauton kanssa, minkä lyhyt puomi mahdollistaa työskentelyn ONKALOSSA. Pumppuauton puomilla valettaessa saattoputkea voidaan vetää ulos muotista puomia liikuttamalla. Lisäksi pumppuauton puomia liikuttelemalla voidaan valuletkua siirtää muotin eri puolilla olevien valuyhteiden välil-

lä. Saattoputkia varten raudoituksen sisälle tulee rakentaa ylimääräiset tasot, joiden päälle saattoputket voidaan asentaa ennen betonointityön aloitusta. Betonoinnin aikana pumpun puomin päässä oleva lyhyt kumiletku liitetään valmiiksi asennettuihin saattoputkiin. Jotta tulpan betonointi voidaan suorittaa edellä kuvastusti, tulee työmaalla olla kyseiseen työhön soveltuvaa pumppauskalustoa. Betonipumppuauton puomin on auettava alle 4,7 metriä korkeassa tilassa. Tämä asettaa melkoisen haasteen käytettävälle pumppauskalustolle ja kaluston hankinnalle työmaalle, koska yleisesti ahtaissa paikoissa käytettävät pumppuautot vaativat tilaa vajaat 5 metriä. Asianmukaisen pumppauskaluston saamiseksi on tehty yhteistyötä Rudus Oy:n kanssa. Pumppuauton letku on halkaisijaltaan 4" samoin kuin letkun päähän kiinnitettävä saattoputki. Saattoputkella valettaessa muotissa oleva valuyhde on halkaisijaltaan 5". Rakenteen yläosan viimeinen betonointi suoritetaan painevaluna 4":n valuyhteen kautta. Tällöin pumpun letku kiinnitetään suoraan valuyhteeseen, minkä välityksellä rakenteen valamaton osa pumpataan täyteen.

Betonimassan työstettävyyden, tiivistymisen ja leviämisen helpottamiseksi menetelmäkokeiden tulosten pohjalta on pohdittu mahdollisuutta käyttää pienempi rakeista runkoainesta tulpan tiheästi raudoitetuilla alueilla. Mahdollisesti käytettävä runkoaine olisi maksimissaan 16 millimetriä, muilta osin betonimassaresepti pysyisi ennallaan. Pienemmällä kiviaineella voitaisiin mahdollistaa betonin varmempi kulkeutuminen ja tiivistyminen rakenteen tiheästi raudoitetuilla alueilla, rakenteen pohjan sekä katon osuudet. Muilta osin tulppa valettaisiin betonilla, minkä maksimi raekoko on 32 millimetriä. Käytettäessä pienempää kiviaineen maksimiraekokoa saattaa ongelmaiseksi muodostua 32 millimetrin kiviainesta suurempi betonimassan kutistuma. Pienempi kiviaineisen betonimassan lisäksi on tehty suhteitus myös vielä hienomalle massalle, mitä voidaan pumpata ennen varsinaista betonoinnin aloitusta pumpun linjaston läpi. Kyseisen massan tarkoituksena on liukastaa linjasto, jotta varsinaisen betonimassa ei juuttuisi pumppuputken sisään. (Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 2 työmaaraaportti; Tulpan betonoinnin suunnittelukokous 3.11.2014)

6.3.2 Tulpan betonointi

Tulpan varsinainen betonointi voidaan aloittaa, kun valettavalle betonointiosalle on myönnetty betonointilupa. Betonointilupa myönnetään kullekin betonointiosalle erikseen järjestettävässä aloitusvalmiustarkastuksessa. Aloitusvalmiustarkastuksen päälimmäinen tarkoitus on varmistaa, että betonointiin liittyen tehtävät laadunvalvonta-asiakirjat ovat ajan tasalla ja työmaalla on riittävä aloitusvalmius työn toteutusta varten. Aloitusvalmiustarkastuksessa käydään läpi kaikki kyseiseen työhön liittyvä dokumentointi, minkä jälkeen varsinainen aloitusvalmius todetaan kyseisellä työkohteella pidettävässä katselmuksessa. Aloitusvalmiustarkastus järjestetään betonointi ajankohtaan nähden riittävän ajoissa, jotta mahdollisten aloitusvalmiustarkastuksessa ilmenevien puutteiden korjaamiseen jää riittävästi aikaa. Aloitusvalmiustarkastuksessa on läsnä tilaaja, urakoitsija sekä viranomainen. Betonirakenteen massiivisuuden ja haastavan luonteen vuoksi tulppa on 1-luokan betoni rakenne, joten urakoitsijan tulee nimetä työtä varten 1-luokan betonityönjohtaja. (STUK, YVL E.6, 2013,23)

Ennen betonointityön aloittamista sekä ennen aloitusvalmiustarkastusta työmaa valmistellaan betonointia varten. Betonitöiden valmisteluun kuuluu betonoinnissa käytettävien koneiden ja laitteiden testaus, urakoitsijan laatiman betonointisuunnitelman hyväksyttäminen tilaajalla sekä työsuorituksen läpikäynti urakoitsijan työntekijöiden kesken. Lisäksi betonointia varten työmaalle on perustettava betonimassan koostumuksen ja ominaisuuksien testausta varten näytteenottopiste, jossa voidaan tarkistaa betonimassan notkeus leviämäkokein. Betonointia varten yhteistyössä urakoitsijan, suunnittelijoiden sekä betonimassan toimittajan kanssa on laadittu varautumissuunnitelma, mikäli betonoinnin aikana ilmenee ongelmia. Varautumissuunnitelman avulla korjaavat toimenpiteet ovat selvillä jo ennen betonointia. Ennen betonoinnin aloittamista tulee työmaalla olla varautumissuunnitelman mukaisesti betonin pumppausta varten varattu varakalusto. Varakalustona voidaan käyttää esimerkiksi erillistä hydrauliiikka yksikköä, minkä avulla pumpun puomia voidaan ohjata, mikäli pumpun oma hydrauliiikka jostain syystä rikkoontuu. Lisäksi pumpun mahdollisen rikkoutumisen vuoksi tulee työmaalla varautua vaihtoehtoisella pumpulla.

Kun aloituslupa betonoinnille on myönnetty, voidaan aloittaa varsinainen tulpan betonointityö. Betonityöt alkavat betoniasemalla massan valmistamisella. Ennen beto-

niauton lähettämistä työmaalle betoniasemalla tulee tarkistaa betonin notkeus leviämäkokeen avulla. Tuoremassa- ja menetelmäkokeiden kokemuksiin pohjautuen ihanteellinen notkeus betonille on leviämäkokeella mitattuna 560-650 millimetriä. Jos notkeus jää alle tavoite notkeuden tulee betonimassaa notkistaa asemalla ennen kuorman lähettämistä työmaalle. Työmaalle betonimassa toimitetaan 4m³ kuormissa siten, että työmaalle saapuu betoniauto 15 minuutin välein. Työmaalle saapuessaan betonikuorma ajaa betonin näytteenottopisteelle, missä betonille tehdään aluksi silmämääräinen tarkistus betonin notkeuden määrittämiseksi. Jos betoni voidaan todeta silmämääräisellä tarkistuksella riittävän notkeaksi, siirtyy auto suoraan pumpulle. Betonimassan laadunseurantaa varten betonin leviämä kuitenkin mitataan, notkistustarpeesta riippumatta. Siinä tapauksessa, jos betoni näyttää silmämääräisessä tarkistuksen yhteydessä jäykältä tai massaa on jouduttu asemalla notkistamaan, otetaan betonista leviämäkoke. Leviämäkokeella pyritään tarkistamaan mahdollisen notkistuksen tarve sekä lisättävä notkistin määrä. Lisänotkistamisen jälkeen betonimassaa sekoitetaan 5 minuuttia ja tehdään uusi leviämäkoke, mikäli leviämäkokeen tulos on kelvollinen, siirtyy betoniauto mittauspisteeltä pumpulle. Saapuvista betonikuormista mitataan leviämäkokeen lisäksi massan lämpötilaa, ilmamäärä sekä seurataan massan mahdollista erottumista. Tarvittaessa voidaan ottaa näytteitä betonimassan kutistumisen tutkimista varten. Betonin näytteenottopisteellä valmistetaan, myös massan myöhemmää laadunvalvontaa varten Tulppabetonimassan ja betonitöiden laadunvalvontasuunnitelman mukaiset rakennekoekappaleet 150 mm kuutiomuoteilla. Rakennekoekappaleita tullaan valmistamaan betonin puristuslujuuden (91 vrk), vedenpitävyyden sekä pH-arvon määrittämiseksi. (Posiva Oy, 2014. Tulppabetonimassan ja betonitöiden laadunvalvontasuunnitelma.)

Kun betonimassa on todettu laatuvaatimusten mukaiseksi, siirtyy auto pumpulle. Ennen varsinaisen tulppamassan pumppaamista pumpunlinjaston läpi pumpataan hienojakoinen (0-8mm) liukastusmassa.. Liukastusmassa on tarkoitus pumpata työmaalla erilliseen astiaan ja kuljettaa pois ONKALOsta. Jos tulpan betonointi päätetään suorittaa kahta eri betonimassaa käyttäen, betonointi aloitetaan pienempi rakeisella betonimassalla, eikä erillistä liukastusmassaa tarvitse käyttää. Tulpan betonointi aloitetaan alimmaisesta valuyhteestä rakenteen pohjalta. Pohjan betonointia varten muotissa on kaksi valuyhdettä samassa korkeusasemassa. Valuyhteen korkeusasema suhteessa tulpan muotoon aiheuttaa sen, että saattoputkea ei voida käyttää suunnitellusti

ensimmäisen valuyhteen kohdalla. Muotin sisään voidaan kuitenkin syöttää esimerkiksi pumpun puomiin kiinnitettävä erillinen kumiletku minkä kautta tulpan pohja saadaan betonoitua. Kun pumppaus aloitetaan rakenteen pohjalta, tulee betonointia vasten olevan kalliopinnan oltava puhdas ja kuiva. Näin voidaan varmistaa betonin mahdollisimman hyvä tartunta kalliopintaan.

Mikäli betonointi päätetään aloittaa betonimassalla, minkä kiviaineen maksimi raekoko on 16 millimetriä, tulee valettavan betonikerroksen oltava mahdollisimman ohut, ettei kiviaineen hienompi raekoko aiheuta haitallista kutistumaa kovettuvassa rakenteessa. Tarkoituksena on peittää vain pohjan raudoitus hienompi rakeisella betonimassalla ja näin varmistaa, että betonimassa tiivistyy tasaisesti kallion ja raudoituksen väliin. Betonin pumppaus aloitetaan muotin alaosassa olevasta oikean puoleisesta valuyhteestä ja pumppausta jatketaan kunnes pohjan teräkset on saatu peitettyä betonilla. Seuraavaksi siirrytään vasemman puolen valuyhteeseen. Vasemmanpuoleisesta valuyhteestä pumppausta jatketaan kunnes rakenteen vasemman puolen pohjan teräkset on saatu peitettyä betonilla. Jos pohja betonoidaan betonimassalla, minkä maksimiraekoko on 16 mm, vaihdetaan kahden ensimmäisen yhteen jälkeen 32 mm betonimassaan. Mikäli tulpan pohja betonoidaan 32 mm betonimassalla, ei muotin alaosaan tarvita samaan korkeusasemaan kahta valuyhdettä. Tällöin betonointi aloitetaan muotin vasemmassa reunassa sijaitsevasta alimmasta valuyhteestä. Betonia pumpataan muottiin tasaisissa noin 300 mm kerroksissa. Valettavan betonikerroksen vahvuutta voidaan seurata muotissa olevista muista valuyhteistä ja valuyhdettä vaihdetaan, kun betonipinta saavuttaa kulloinkin käytössä olevan valuyhteen. Tällöin muotin sisällä oleva saattoputki vedetään kokonaan ulos ja valuyhde suljetaan sulkulevyllä. Pumpun päässä oleva kumiletku kiinnitetään muotin oikeassa reunassa valuyhteessä olevaan betonin saattoputkeen. Seuraava valuyhde on korkeussuunnassa 300 mm edellistä ylempänä. Kun letku on kiinnitetty saattoputkeen, aloitetaan betonointi rakenteen takaosasta mahdollisimman läheltä raudoitusta. Betonointia jatketaan edellä kuvatusti, kunnes saavutetaan muotin lakipisteessä oleva valuyhde. Valuyhteiden sijoittelussa muottiin on pyritty huomioimaan, ettei betonin pudotuskorkeus kasvaisi 300 mm suuremmaksi. (Posiva Oy, 2014. Kiviaineksen maksimiraekoko tulpan tiheästi raudoitetuilla alueilla.)

Tulpan yläosan betonointi suoritetaan yhdestä valuyhteestä käsin, mikä on sijoitettu keskelle muottirakennetta. Yläosan betonointi eroaa aiempien valukerrosten betonoinnista, sillä yläosassa ei käytetä saattoputkea vaan betonipumpun letku kiinnitetään suoraan muotissa olevaan valuyhteeseen. Kyseisen kaltaista betonointimenetelmää kutsutaan painevaluksi. Painevalussa betoni pumpataan yhdestä valuyhteestä suljettuun muottiin. Painevalua varten muottiin asennetaan ilmastusputket, joiden kautta muotin sisällä oleva ilma pääsee poistumaan betonimassan tieltä. Betonin pumppausta jatketaan, kunnes ilmastusputkista tulee ulos sementtiliimaa. Tämän jälkeen ilmastusputket poistetaan ja niitä varten muottiin tehdyt reiät tiivistetään. Kun tulpan yläosa on saatu valettua täyteen ja ilmastusputket poistettu, paineistetaan tulpan yläosa. Paineistuksen tarkoituksena on tiivistää muotissa oleva betoni ja varmistaa, että muotti on täyttynyt betonilla. Paineistusta varten muottiin on asennettu painemittareita. Tulpan yläosa paineistetaan 50kN/m^2 paineella 20–30 minuutiksi. Jos paineet laskevat paineistuksen aikana on betonimassa tiivistynyt eli painunut. Tällöin muottiin pumpataan lisää betonia ja yläosa paineistetaan uudelleen. Muottiin asennetuilla painemittareilla voidaan seurata myös alempien valukerrosten muottipaineita betonoinnin aikana. Muotin suunnittelussa käytetty maksimi muottipaine on 200kN/m^2 , mitä ei betonoinnin missään vaiheessa saa ylittää. (Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 2 läpikäynti.)

Painemittareiden lisäksi rakenteeseen tullaan asentamaan myös lämpötila-anturit, joiden avulla voidaan määrittää betonin sitoutumisajan alku sekä seurata betonin lujuuden kehitystä. Lämpötilaseuranta aloitetaan heti, kun mitta-anturit ovat peittyneet betoniin ja seuranta jatketaan vähintään 10 vuorokautta tai kunnes lämpötilaero valetun rakenteen ja ympäristön välillä on enintään 20 celsiusastetta. Betonin kovettumisen aikana betonimassan lämpötila ei saa ylittää $+60\text{ }^\circ\text{C}$.

Ensimmäisen valuosan jälkihoitoa jatketaan vähintään 7 vuorokautta. Tulpan kohdalla jälkihoidolla tarkoitetaan käytännössä sitä, että muotti pidetään kovettuvan betonirakenteen suojana eristämään kosteuden sekä lämpötilan karkaamista rakenteesta betonin kovettumisen aikana. Kun jälkihoitoaika on umpeutunut, voidaan muotin purku aloittaa, mikäli betonipuristus lujuus on vähintään 10MN/m^2 . Betonin puristuslujuus määritetään betonoinnin aikana otetuista olosuhdekoekuutioista. Mikäli muotin purkamisen jälkeen rakenteen ja ympäristön välillä on yli $20\text{ }^\circ\text{C}$, tulee valettu

betonipinta suojata toisen valuosan raudoitustöiden ajaksi ja varmistaa betonipinnan riittävä kosteus.

Tulpan toinen valuosa betonoidaan käyttäen samoja työmenetelmiä kuin ensimmäistä valuosaa betonoitaessa. Merkittävin ero valuosien betoinneissa on etenkin jälkihoidossa, mitä toisen valuosan kohdalla jatketaan vähintään kolme viikkoa. Tällöin betoni on saavuttanut muotipurkulujuuden, mikä on 60% rakenteen nimellislujuudesta eli noin 30 MN/m². Lujuus määritetään rakennusvaiheessa valmistetuille olosuhdekoekuutioille tehtävällä puristuslujuuskokeella. (Posiva Oy, 2014. Betonirakenteiden työselostus; Posiva Oy, 2014. Tulppabetonimassan ja betonitöiden laadunvalvontasuunnitelma.)

7 YHTEENVETO

Työn yhteenvedoksi koottiin POPLU-tulpan keskeiset vaatimukset ja vaikutukset sekä niiden huomioiminen töiden suunnittelussa ja käytännön toteutuksessa. Yhteen-
veto on esitetty taulukossa 4.

Vaatus	Vaatimusten vaikutus	Vaatimusten toteutuminen
Pitkäaikais- turvallisuus: Betonimassan matala pH-arvo.	1.Materiaali- valinnat	Betonimassan pH arvoa on pyritty laskemaan korvaamalla osa sementistä muilla sideaineilla, silika ja lentotuhka. Näillä on ollut vaikutus betonimassan työstettävyyteen, mikä on pyritty huomioimaan työsuunnittelussa pohtimalla pienemmän ki- viaineksen käyttöä maksimiraekokona sekä työmenetelmien valinnassa esimerkiksi saattoputken käyttö betonoinnin aika- na.
Vedeneristys- kyky: Tunkeuman vaa- timus betonikehi- tyksessä on ollut max 50 mm. (tuolla massalla päästiin 5 milliin)	1.Materiaalivalinnat 3. Jälkihoito 3. Injektointi	Silikalla saadaan lisättyä betonin tiiviyyttä ja vedenpitävyyttä. Riittävä kuivumisaika (3kk) ennen injektointia. Huolellisesti suunniteltu ja toteutettu jälkihoito pienentää rakenteen kutis- tumaa sekä vähentää halkeamien syntyä.
Hydraulinen kestävyys: Suunnittelukäyttö ikä 100 vuotta	1. Huolellinen työ- menetelmien ja laadunvarmistuksen suunnittelu.	Silika lisää betonin lujuutta sekä kemiallista kestävyyttä. Be- tonimassan koostumuksen lisäksi töiden huolellisella suunnit- telulla ja tarkalla laadunvalvonnalla varmistetaan, että rakenne tulee olemaan vaatimusten mukainen.
Työturvallisuus	1.Tekninen suunnit- telu 2. Työmenetelmien valinta	Työturvallisuus on huomioitu kaikkien työvaiheiden sekä työmenetelmien suunnittelussa esimerkiksi: - raudituksen toteutussuunnittelussa siten, että rauditus toi- mii myös työnaikaisena komusuojana - pumppauskaluston valinnassa siten, että käsin tehtävien ras- kaiden taakkojen siirrot on minimoitu.

Taulukko 4. Yhteenvedo.

8 LOPPUSANAT

Tämän opinnäytetyön tekeminen johdatti minut kirjaimellisesti syvälle betonirakentamisen maailmaan eikä vain siksi, että rakennettava betonitulppa tulee sijaitsemaan yli 400 metrin syvyydessä kallion sisällä. Tulpan rakentamisen suunnittelu ja opinnäytetyön tekeminen johdattivat minut mukaan täysin uuden betonimassan kehitystyöhön.

Tulpan rakentaminen on osa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustunneleiden sulkemisjärjestelmien kehitystä. Vaikka nyt ollaan kehittämässä täysin uudenlaista järjestelmää, ei silti kaikkia työvaiheita ja menetelmiä, joita tämän massiivisen betonirakenteen rakentaminen vaatii, ole jouduttu keksimään uudelleen. Työvaiheiden ja työmenetelmien suunnittelussa on pyritty kehittämään nimenomaan tulpan rakentamista ajatellen edullisimmat työmenetelmät yhdistelemälle esimerkiksi eri rakennusosien merkityksiä kuten rauditus. Tulpan rauditus on suunniteltu siten, että se on toteutettavissa oman tarkoituksensa lisäksi toimimaan myös työnaikaisena komusuojana. Betonointiin käytettävä betonimassa on kehitetty vain ja ainoastaan kyseistä käyttötarkoitusta palvelemaan ja vastaamaan sille asetettuja vaatimuksia, mitkä johtavat juurensa loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden puolelta. Työmaalla ja betoniasemalla tehdyissä kokeissa on betonimassa saatu mahdollisimman helpoksi työstää.

Työtä tehdessäni olen saanut tutustua ja olemaan mukana betonimassan kehityksessä ja valmistamisessa, tutustunut betonirakenteiden laatuvaatimukseen sekä olla osallisena vaativan betonirakenteen suunnittelussa. Itse sain paneutua erityisesti työtä tehdessä erilaisiin betonin pumppaustekniikoihin, betonimassan koostumukseen sekä raudituksen erilaisiin jatkostyypeihin. Kokonaisuutena prosessia voidaan pitää varsin onnistuneena sillä tulpan suunnitelmat ja työmenetelmät on saatu hiottua viimeistä piirua myöten vastaamaan tulpan haasteita ja asetettuja vaatimuksia. Lisäksi olen saanut työskennellä opinnäytetyötä tehtäessä erittäin ammattitaitoisten sekä kovan luokan betoniammattilaisten kanssa.

Haluan kiittää Posiva Oy:tä ja erityisesti Lauri Piitari, joka mahdollisti minulle tämän erityisen mahdollisuuden tehdä opinnäytetyö näin ainutlaatuisesta ja mielenkiintoisesta projektista. Lisäksi kiitos kuuluu kaikille muille projektissa mukana olleille erityisesti Hannu Leinolle ja Kai Österlundille, joilta olen saanut paljon kokemuksen mukana tullutta teknistä tietämystä. Heidän lisäksi Auli Olenius ansaitsee kiitoksen, häneltä saaduista arvokkaista neuvoista, joita hän on antanut tämän projektin aikana.

Työn ohjaajana koulun puolelta toimi Laura Virtanen. Iso kiitos kuuluu myös hänelle sillä hän on oman Olkiluoto kokemuksensa vuoksi ymmärtänyt työn tekemisen haasteellisuuden ydinlaitosympäristössä.

LÄHTEET

Aaro Kohonen Oy, 2013. The BASIS OF THE TERNARY MIX DESIGN OF THE PLUG CONCRETE. Posiva Oy arkisto.

Betoniyhdistys r.y., 2012. by50 Betoninormit 2012. Lahti: Esa Print Oy

Betoniyhdistys r.y., 2005. by201 Betonitekniikan oppikirja. Jyväskylä: Gummerus.

Celsa Oy:n www-sivut. 2014. Viitattu 27.8.2014. <http://www.celsa-steelservice.fi>

Hartela Oy, 2014. Muotin suunnittelukokous 5.9.2014

Hartela Oy, 2014. Muotin suunnittelukokous 24.9.2014

Hartela Oy, 2014. Muotin suunnittelukokous 15.10.2014

Hartela Oy, 2014. Muotin suunnittelukokous 31.10.2014

Posiva Oy, 2013. Detailed design of POPLU deposition tunnel end plug. Posiva Oy arkisto.

Posiva Oy, 2012. DOPAS-lehdistötiedote. <http://www.posiva.fi/dopas>

Posiva Oy. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitus Olkiluodossa.

Posiva Oy, 2013. P.145 Loppusijoitustunnelin tulpparakenteet, järjestelmäkuvaus. Posiva Oy arkisto.

Posiva Oy, 2014. Betonoinointi palaveri 15.4.2014. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Betonirakenteiden työselostus. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Kiviaineksen maksimiraekoko tulpan tiheästi raudoitetuilla alueilla 6.11.2014. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 1 työmaaraportti. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 2 työmaaraportti. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Menetelmäkoe 2 läpikäynti. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Tulppabetonimassan ja betonointitöiden laadunvalvontasuunnitelma. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2013. ONKALON turvallisuuskriittiset toiminnot, vieraiden aineiden valvonta. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2011. ONKALO -työmaa turvallisuussuunnitelma. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. POPLU -tulpan laadunvarmistus, toteutuksen aikaiset dokumentit. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2012. State of Art: Design Alternatives. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2013. Uuden materiaalin valinta ONKALOon. Posiva Oy sähköinen arkisto.

Posiva Oy, 2014. Tulpan betonoinnin suunnittelukokous 3.11.2014

Posiva Oy:n www-sivut. 2014. Viitattu 10.2.2014. <http://www.posiva.fi>

Posiva Oy, 2014. Suunnittelupalaveri, 8.4.2014.

Posiva Oy, 2014. Suunnittelukokous, 9.4.2014.

Rudus Oy. Itsetiivistyväbetoni-ohje.

STUKin www-sivut. 2014. Viitattu 17.2.2014. <http://www.stuk.fi>

STUK, 2013. YVL B.2 Ydinlaitosten järjestelmien, rakenteiden ja laitteiden luokittelu. STUK www-sivut, sähköinen arkisto.

STUK, 2013. YVL D.5. Ydinjätteiden loppusijoitus. STUK www-sivut, sähköinen arkisto.

STUK, 2013. YVL E.6. Ydinlaitoksen rakennukset ja rakenteet. STUK www-sivut, sähköinen arkisto.

Valtioneuvosto, 2009. Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta, perustelumuistio.