

Karoliina Lehesvuori

PAINEVALU ONKALON JA LOPPUSIJAITUSTILOJEN  
BETONIRAKENTEISSA

Tekniikka ja merenkulku Pori  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
2010



# PAINIEVALU ONKALON JA LOPPUSIJOITUSTILOJEN BETONI- RAKENTEISSA

Lehesvuori, Karoliina  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Maaliskuu 2010  
Laurikainen, Markku  
Sivumäärä:

Asiasanat: painevalu, kalliorakenteet, betonirakenteet, valutekniikka, IT-betoni

---

## TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön aiheena oli painevalutekniikka ja sen käyttäminen mahdollisen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituspaikan, ONKALON, betonirakenteissa. Tarkoituksena oli tehdä Posiva OY:lle yhtiön käyttöön osaksi laatusuunnitelmaa Painevalurakenteiden menetelmäkuvaus ja tarkempi tutkimus menetelmästä työmaan ja urakoitsijan käyttöön.

Pääasiassa työssä keskityttiin valutekniikoiden vertailuun, käytettävään painevalutekniikkaan teoriassa, sen variaatioihin, muotitukseen sekä työssä käytettävään kalustoon.

Työn aikana painevalutekniikalla valettiin kaksi palokatkoseinää, joissa oli mahdollista tehdä tavanomaista tarkempia tutkimuksia. Seinien toteutuksesta saatuja tuloksia apuna käyttäen menetelmäkuvaus muokattiin käyttökelpoiseen muotoon.

Tutkimuksissa käsiteltiin sekä paineen että lämpötilan käyttäytymistä valun aikana ja sen jälkeen. Painevalutekniikan todettiin sopivan hyvin kohteeseen.

# COMPRESSED CONCRETING IN ONKALO AND NUCLEAR WASTE DEPOSIT SITES CONCRETE STRUCTURES

Lehesvuori, Karoliina

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in construction engineering

March 2010

Laurikainen Markku

Number of pages:

Key words: compressed concreting, concrete structures, tunnel constructions

---

## ABSTRACT

The purpose of this thesis was to create a method statement of concrete walls built in a tunnel construction site using the technique of compressed concreting. The thesis was commissioned by Posiva Oy, which is the subscribing company of ONKALO research tunnel and the possible nuclear waste deposit site in Eurajoki Finland.

The main focus in the thesis was in finding an efficient form work method and studying the fairly young concreting technique and its variations. Also the different concreting techniques were compared with each other.

During summer 2009 there were the firewalls built in ONKALO tunnel. In those walls were possible to do more specific studies considering the compressed concreting.

The studies considered the pressure and temperature of concrete and their behaviour during and after concreting.

The compressed concreting technique was found very efficient for the ONKALO site.

# SISÄLLYS

JOHDANTO.....	6
1 TILAAJA.....	7
1.1 Organisaatio ja toimintapolitiikka .....	7
1.2 ONKALO ja kalliotilat.....	8
2 TAVOITE.....	9
3 TYÖN SUUNNITTELU .....	10
3.1 Työn aloitus.....	10
3.2 Työn toteutus .....	10
4 ONKALO- TYÖMAA .....	11
4.1 ONKALON olosuhteet.....	11
4.2 Betonirakenteet tunnelissa.....	11
5 VALUTEKNIKOIDEN SOPIVUUS ONKALON TARPEISIIN.....	12
5.1 Ruiskubetoni.....	12
5.2 Perinteinen valutekniikka .....	13
5.3 Painevalu14	
6 PAINEVALUTEKNIikka .....	15
6.1 Painevalu teoriassa.....	15
6.2 Painevalu ONKALO-työmaalla.....	15
6.3 Itsetiivistävä betonimassa.....	16
7 MUOTITUS.....	17
7.1 Muottimateriaalin valinta .....	17
7.2 Levypintaisten muottien mitoitus .....	19
7.2.1 Laskuesimerkki .....	21
7.3 Muottityö.....	23
8 SEINIEN TOTEUTUS .....	23
8.1 Rakenteiden toteutuksessa käytettävä kalusto.....	23
8.2 Henkilökuiluperä -290 .....	24
8.2.1 Valupaineet .....	26
8.2.2 Lämmön kehitys .....	27
8.2.3 Valmis pinta .....	29
8.3 Tuloilmakuiluperä -290.....	30
8.3.1 Valupaineet .....	31
8.3.2 Valmis pinta .....	32

9 TULOSTEN TARKASTELU.....	32
9.1 Seinien toteutus.....	32
9.2 Paineen käyttäytyminen valun ja paineistuksen aikana .....	33
9.3 Lämpötilojen käyttäytyminen.....	33
10 LOPPUSANAT.....	34

LÄHTEET

LIITTEET

## JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan mahdollisuuksia toteuttaa betonirakenteita tunneliolosuhteissa painevalutekniikkaa käyttäen. Kohteena on Posiva Oy:n rakennuttama mahdollinen käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitustila ONKALO Eurajoen Olkiluodossa ja tunneliin toteutettavat palokatkoseinät.

Työssä keskitytään nimenomaan kalliopintaan rajoittuviin rakenteisiin ja niissä esiintyviin mahdollisiin ongelmiin. Tarkemmin kantaa otetaan etenkin muotituksen eri vaihtoehtoihin, tunnelissa käytettävään kalustoon, betonimassoihin ja valutekniikkaan.

Työn käytännön esimerkit ovat tunnelissa 9.6.2009 ja 28.8.2009 painevalutekniikalla valetuista paloseinistä. Seinät on toteutettu Posiva Oy:lle tekemäni painevalun menetelmäkuvausta noudattaen. Myös työn kokeellinen osuus kuten paineen käyttäytymisen ja lämmönkehityksen seuranta on tehty näitä seiniä toteutettaessa. Tällöin saatiin varmistettua, että olosuhteet ovat todellisuutta vastaavat.

Kesällä 2009 toteutetuissa seinissä käytettiin levymuotteja. Kuitenkin louhinnan edetessä -437 tutkimustasolle seiniä tullaan tekemään kymmeniä, jolloin on syytä harkita myös järjestelmämuottien käyttöä. Muottitekniikoita käsitellään luvussa 7.

Mittausmenetelmiä ja tuloksia tarkastellaan työn lopussa luvuissa 8 ja 9.

# 1 TILAAJA

Työn tilaaja, Posiva Oy, on vuodesta 1995 lähtien toiminut asiantuntijayhtiö. Sen ensisijainen tarkoitus on vastata omistajayritystensä (Teollisuuden Voima Oyj ja Fortum Heat & Power) käyttämän ydinpolttoaineen loppusijoitustilojen rakentamisesta, jätteen loppusijoituksesta ja siihen liittyvistä tutkimuksista, mutta myös muista alaan liittyvistä asiantuntijatehtävistä sekä loppusijoituslaitoksen sulkemisesta käytön jälkeen. Vuonna 2008 Posiva Oy:n henkilöstömäärä oli noin 80 ja liikevaihto 55 M€.

## 1.1 Organisaatio ja toimintapolitiikka

Posivan yhtiön toimintapolitiikkaa kuvattu seuraavasti: *"Posivan toiminta tähtää käytetyn ydinpolttoaineen turvalliseen, oikea-aikaiseen ja kustannustehokkaaseen loppusijoitukseen yhtiön omistajien ja muiden tahojen vaatimusten mukaisesti. Posivassa sitoudutaan toiminnan jatkuvaan parantamiseen siten, että ympäristösuojelun ja yhteiskunnan vaatimukset lakea ja määräyksiä noudattaen täyttyvät. Toiminnan turvallisuuden hallinta on kokonaisvaltaista ja suunnitelmallista."* (Posivan www-sivut 2009).

Säteilyturvakeskuksen (STUK) kanssa tehdään jatkuvasti yhteistyötä ja toimintajärjestelmässä on huomioitu myös STUK:n YVL-ohjeet ja Kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) suositukset.

Posivan toiminnan pohjana on toimintajärjestelmä, joka koostuu erilaisista Posivan toimintaa kuvaavista käsikirjoista, organisaatiokuvauksista, toimintasäännöistä, prosessikuvauksista sekä menettely- ja työohjeista. Toimintajärjestelmää luotaessa suuntaa ovat antaneet mm. ISO -9001 Laatustandardi, ISO -14001 Ympäristöstandardi, OHSAS -18001 Työturvallisuus-standardi sekä yleiset yritysturvallisuuden periaatteet. Myös STUK:n YVL-ohjeet ja IAEA:n suositukset on otettu huomioon. Det Norske Veritas myönsi Posiva Oy:lle laatujohtamisen ISO -9001:2000 sertifikaatin 15. joulukuuta 2008.

## 1.2 ONKALO ja kalliotilat

Tällä hetkellä louhittava ONKALO on tutkimustunneli, jonka kalliotilat (ajotunneli, apu- ja tutkimustilat sekä pystykuilut) on suunniteltu liitettävän osaksi Olkiluotoon myöhemmin mahdollisesti louhittavaa käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituspaikkaa. ONKALOn toteutussuunnittelu tehdäänkin laitossuunnittelun yhteydessä, jotta voidaan varmistua siitä, että kaikki viranomaisvaatimukset huomioidaan jo ONKALOn rakennusvaiheessa. Maanalaisen tutkimustilan louhinta- ja rakennustyöt aloitettiin vuonna 2004. (Posiva Oy, TKS- 2009 s. 150 -151)

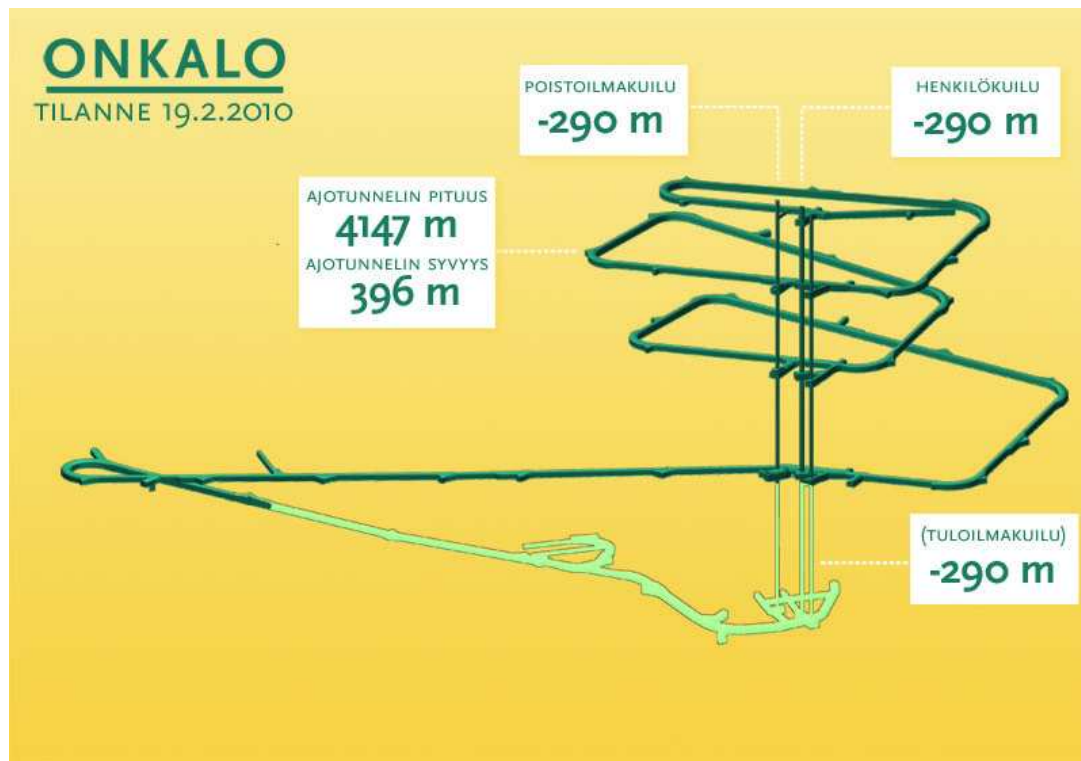
Posivan toiminnan seuraavana tavoitteena on jättää loppusijoitustilojen rakentamislupahakemus vuoden 2012 aikana. Tähän tavoitteeseen tähtäävät niin käynnissä olevat tutkimukset, loppusijoitustekniikan kehittäminen kuin maanalaisen tutkimustilan, ONKALOn, rakentaminen.

ONKALOn tilaajana ja päätoteuttajana toimii Posiva Oy, louhinnasta vastaa opinnäytetyön tekohetkellä SK-kaivin Oy ja rakennustöistä Rakennustyöt Ville Kauppi Oy. Muita työmaalla toimivia urakoitsijoita ovat mm. Suomen Malmi Oy, LVT-Putki Oy, Prismarit Oy ja Rauman sähköpalvelu Oy.

Urakoitsijoiden lisäksi tunnelissa, joka toimii tällä hetkellä tutkimustilana, työskentelee myös useita tutkijoita. Geologit kartoittavat kalliooperää ja tutkivat töiden vaikutusta kallion rakenteisiin, hydrogeologit tarkkailevat vuotovesiä ja pohjavedenpaineita. Tutkimusten avulla selvitetään kallion sopivuutta loppusijoituspaikaksi.

Louhinnan on suunniteltu olevan loppusijoitusvyvydellä (-420m) keväällä 2010. 19. helmikuuta 2010 mennessä louhinta on edennyt paalulle 4147 eli -396 metriin (Kuva 1). Kuvassa 1 tummanvihreä alue on jo toteutettu ja vaaleampi osuus on vielä louhimatta. Louhinnan ohella tunnelissa käynnissä ovat tutkimukset, rakennustekniset työt ja tunnelin varustelut.





Kuva 1 ONKALO -kaavio 19.2.10

## 2 TAVOITE

Työn tavoitteena oli tuottaa Posiva Oy:lle menetelmäkuvaus tunneliolosuhteissa tehtäville painevaluille. Menetelmäkuvaus on liitetty työn loppuun. Lisäksi työhön kuului painevalutekniikan ominaisuuksien tutkiminen ja vertailu muihin valutekniikoihin nähden sekä muottimateriaalien vertailu ja -valinta.

### 3 TYÖN SUUNNITTELU

#### 3.1 Työn aloitus

Opinnäytetyöni tekeminen alkoi kartoittamalla karkea pohja työni laajuudelle. Samalla aloin perehtyä aiheeseen etsimällä referenssejä ja aineistoa työlle sekä lukemalla että kyselemällä tutkimastani tekniikasta. Työmaalla rakentamisaikaiset tapahtumat tuli myös dokumentoida.

Painevalutekniikasta oli hyvin vaikea löytää kirjallista tietoa, sillä suuri osa työmailla keskuudessa liikkuvasta osaamisesta on niin kutsuttua ”hiljaista tietoa”, joka siirtyy betonityönjohtajalta toiselle suullisena - ja käytännön oppina. Hyödyllisimmät tiedot valutekniikasta ja toteutustavoista löysinkin betonityönjohtajia, etenkin Ville Laurilaa, haastatellessani.

Tämän kaltaisena painevalua ei juuri ole Suomessa tehty, joten kaikki työmaalla oleva kalusto ja työtavat ovat juuri tälle kohteelle muokattuja.

#### 3.2 Työn toteutus

Alun perehtymisen jälkeen lähdin kentälle tekemään haastatteluja. Sain paljon hyödyllistä tietoa Laurilan lisäksi työmaapäälliköltämme Timo Niemitalolta, joka on aikaisemmin urallaan ollut toteuttamassa vastaavia rakenteita.

Sain myös mahdollisuuden tutkia työssäni painevalutekniikkaa käytännössä, kun ONKALOon valettiin kaksi kuilunperäseinää käyttäen kyseistä valutekniikkaa. Erilaisten tutkimustulosten saamiseksi, seiniin lisättiin ylimääräisiä painemittareita. Kummassakin seinässä mittarit asetettiin toisistaan eroaviin paikkoihin, jotta tulokset olisivat mahdollisimman monipuolisia. Painemittareiden lisäksi seiniin jätettiin muotitusvaiheessa varaukset lämpömittareille, jotka mahdollistivat lämmönkehityksen seuraamisen. Mittausmenetelmiä ja tuloksia tarkastellaan työn lopussa luvuissa 8 ja 9.

Menetelmäkuvauksen lisäksi työn liitteeksi tuli piirtää AutoCAD:llä painevalun tyyppisuunnitelma. Suunnitelman tuli sisältää painemittareiden, valuventtiilien ja mahdollisten lämpöantureiden teoreettinen sijoittelu. Tyyppisuunnitelma on liitteenä työn lopussa (Liite 2).

Sain menetelmäkuvauksen ulkoasusta ja sisällöstä tarkat ohjeet yhtiön käyttämistä sisäisistä asiakirjamalleista. Mukailen siis kirjoitelmassa yhtiön asetteluohjeita.

## 4 ONKALO- TYÖMAA

### 4.1 ONKALON olosuhteet

Vaikka tunnelin ilmasto onkin koko ajan lähes vakio, vaihtelee lämpötila muutamilla asteilla vuoden aikana pysyen kuitenkin koko ajan yli  $+0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vaihtelu johtuu tunneliin maan päältä johdettavan raittiin ilman vaikutuksesta.

Tunneli on aina kostea kallion raoista vuotavan veden vaikutuksesta. ONKALOSSa mitattu vuotomäärä on keskimäärin 35 l/min.

### 4.2 Betonirakenteet tunnelissa

ONKALON tutkimustunneliin on jo louhinnan ollessa käynnissä aloitettu toteuttaa tarvittavia rakenteita. Tunnelin kuiluperäseiniä on tällä hetkellä toteutettu kahdeksan (8) kappaletta. Ensimmäisenä seinien toteutusmenetelmäksi valittiin ruiskubetonointi, jolla ei kustannustehokkaasta toteutuksesta huolimatta kuitenkaan saavutettu haluttuja ominaisuuksia. Loput osastoivista paloseinistä on sen vuoksi päätetty toteuttaa painevalumenetelmällä.

Alussa seiniä rakennetaan kuiluperiin eli kohtiin, joissa ajotunnelista haarautuu lyhyt tunneli, jonka perälle nousuporataan pystykuilu mm. ilmanvaihtoa varten (Kuva 1).

Kuiluperien osastointi jo rakennusvaiheessa on turvallisuussyistä erittäin tärkeää, sillä raitis ilma ohjataan kuiluja pitkin alemmille tasoille ja onnettomuustilanteessa tuloilmakuilun tasot toimivat myös suojatiloina.

Myöhemmässä alatason hallilouhintavaiheessa osastoivia rakenteita tullaan rakentamaan vielä kymmeniä. Työtä voisi tuossa vaiheessa kutsua jo sarjatuotannoksi. Silloin esimerkiksi muottitekniikkaan kannattaa ajan ja kustannusten säästämiseksi miettiä tarkkaan eri vaihtoehtoja.

Muita tunneliin ONKALO -projektin aikana toteutettavia betonirakenteita ovat erilaiset muuntamo- ja sähkötilat sekä tarvittavat tutkimus- ja huoltotilat. Louhinnan ja sen myötä raskaan liikenteen päätyttyä tunnelissa myös ajotunnelin paloseinät tullaan muuttamaan väliaikaisista rakenteista pysyviksi betoniseiniksi.

Ennen työnaikaisia valuja ONKALOSSA oli toteutettu jo kahdeksan paloseinää sekä kolme muuntamo- ja sähkötilaa. Muuntamo- ja sähkötiloissa seinä- ja lattiarakenteet on toteutettu perinteisesti avomuottiin ylhäältä päin valamalla. Tilojen katot on varmistettu ruiskubetonoimalla kallion pinta.

## 5 VALUTEKNIIKKOIDEN SOPIVUUS ONKALON TARPEISIIN

Alusta asti oli selvää, että seinät oli toteutettava paikallavaluna, sillä tarpeeksi suuria elementtejä olisi mahdoton kuljettaa kapeaa tunnelia pitkin paikoilleen ja kallion sekä mahdollisen elementin väli olisi myös tiivistettävä paikalla valaen. Työmaalla valettaessa pystytäänkin paremmin toteuttamaan yksilöllisiä rakenteita esimerkiksi louhinnan jälkiä mukaillen (Paikallavalurakentaminen, RTT, osa 1 ja 8).

### 5.1 Ruiskubetoni

Ruiskubetonointi on yleisesti tunnelilujituksessa pultituksen lisäksi käytetty tekniikka. Tässä menetelmässä betoni ruiskutetaan kohteeseen ruiskutussuuttimen kautta ja se vaatii vain yksipintaisen muotin. Olemassa olevaa rakennetta vasten

ruiskutettaessa ei muottia tarvita ollenkaan. Suomessa ruiskubetonointia käytetään kallion ja maan lujittamisen lisäksi muun muassa korjausrakentamisessa. Parhaiten ruiskubetonointi soveltuu ohuiden ja muodoltaan vaihtelevien betonirakenteiden toteutukseen. (Kaivos- ja louhintatekniikka, 227)

ONKALON kuiluperien seinissä ruiskubetonoinnin käyttöä perusteltiin aluksi yksipintaisen muotin käytöllä ja betonointikaluston löytymisellä työmaalta, mikä pudotti seinistä aiheutuvia kustannuksia. Ruiskubetonoidun seinän ominaisuudet eivät kuitenkaan vastanneet haluttuja ominaisuuksia, sillä seinään on hyvin vaikea tehdä tasareunaista aukkoa ja siihen on myös hankala ripustaa esim. puhaltimia tai oviaukon sulkuelementtejä seinän murtumisen johdosta.

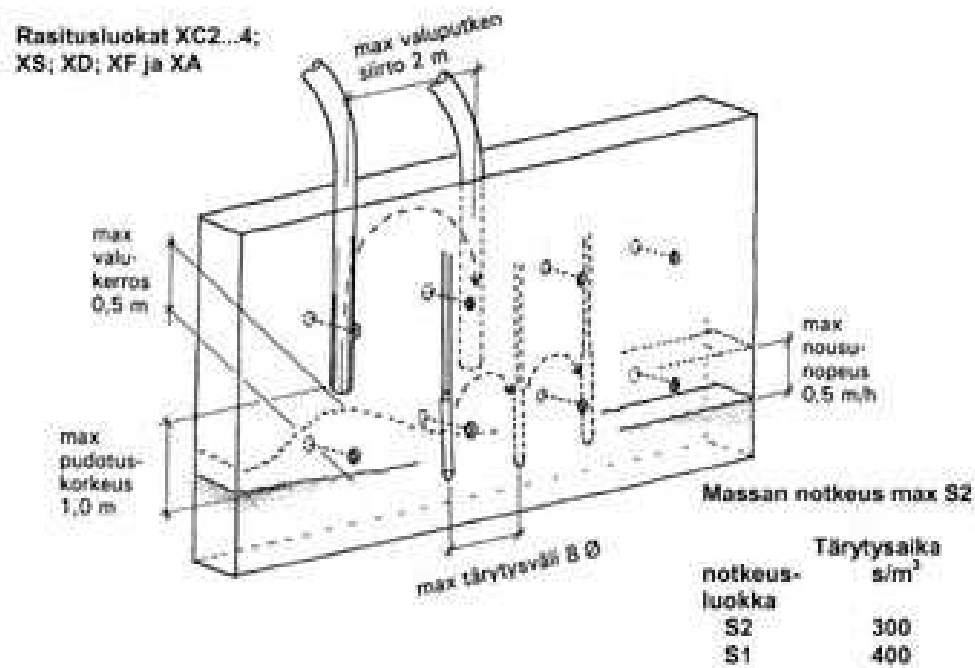
Aukkojen jättö ruiskutusvaiheessa on vaikeaa, koska suuttimesta ruiskutettu betoni leviää laajalle alueelle, eikä koneella pysty ohjaamaan betonin leviämistä senttimetrin tarkkuudella. Seinän valmistuttua aukon sahaaminen esimerkiksi timanttiporalla ei onnistu, sillä se murenee helposti. Myös tartuntojen poraaminen on työläämpää kuin tasaisissa rakenteissa eikä niiden pysymisestä heikon murtolujuuden vuoksi ole takeita varsinkaan raskaita elementtejä asennettaessa.

## 5.2 Perinteinen valutekniikka

Perinteistä valutekniikkaa, jolla tarkoitan ylhäältäpäin tapahtuvaa valua yhdeltä sivulta avonaiseen muottiin, on mahdollista käyttää tunneliolosuhteissa jossain määrin esim. kalliopintaan joka suunnalta rajoittumattomia seinä- tai lattiarakenteita tehdessä.

Jotta kiviaineksen ja veden erottuminen massasta estettäisiin, tulee betonimassa valaa muottiin mahdollisimman matalalta suoraan alaspäin. Pudotuskorkeus saa enimmillään olla 1,5 m (Kuva 2).

Korkeissa seinärakenteissa valukerroksen korkeus saisi olla enintään 40 cm, jotta betoni saataisiin hyvin tiivistettyä. Korkeammilla valuosilla myös paine ja sitä kautta muottien vaatimukset kasvavat. (Betoniopas).



Kuva: by201

Kuva 2 Valun toteutus, by201

Perinteinen paikallavalutekniikka ei kuitenkaan sovellu käyttöön silloin, kun valettavan rakenteen pinta on saatava kauttaaltaan tiiviiksi kalliopintaa vasten. Niinpä tekniikkaa ei voida hyödyntää palokatkoseinissä.

### 5.3 Painevalu

Painevalutekniikka antaa mahdollisuuden toteuttaa hyvin monimuotoisia rakenteita vaativissakin olosuhteissa. Valun jälkeen tiivistäminen ei ole pakollista IT- massaa käytettäessä, sillä nimensä mukaisesti massa alkaa heti valamisen jälkeen tiivistyä. Tavanomaista betonimassaa käytettäessä tiivistäminen on kuitenkin toteutettava.

Normaalisti täryttämällä tiivistäminen ei onnistu, sillä tärytintä ei saada muottiin sisälle. Muottijärjestelmiä käytettäessä olisi mahdollista käyttää ulkopuolisia täryttimiä, kun käytettävä massa ei ole itsetiivistyvää betonia.

## 6 PAINEVALUTEKNIikka

### 6.1 Painevalu teoriassa

Painevalulla tarkoitetaan niin kutsutun aukottoman muotin täyttämistä massalla valuventtiilien kautta. Olennaista tekniikalle on myös se, että massa työnnetään muottiin alhaalta ylöspäin. Yleisesti painevalutekniikasta puhuttaessa kuitenkin pelkkä muotin täyttäminen aukottomasti riittää.

ONKALO- työmaalla käytetyssä tekniikassa haluttiin kuitenkin varmistua rakenteen tiiviyydestä, joten tekniikkaa muokattiin kohteelle sopivammaksi. Muotin täytyttyä betonista, se päätettiin vielä paineistaa.

Painevalu on Suomessa vielä melko vähän käytetty valutekniikka. Sitä on hyödynnetty muun muassa korjausrakentamiskohteissa pilarien vahvistamisessa ja hankalapääsyisissä, vaativissa rakenteissa esimerkiksi siltatyömailla sekä elementtitehtailla pilarien ja palkkien valussa. Myös terästä käsiteltäessä painevalu on hyvin yleinen tekniikka, joskin kohteet ovat useasti pienempiä ja betonin sijaan voidaan valussa käyttää mm. alumiinia.

Betonimassojen, etenkin itsetiivistyvän betonin (ITB), ominaisuuksien kehittymisen myötä siitä on tullut varsin hyvä vaihtoehto myös isommissa projekteissa esimerkiksi tunnelityömailla.

### 6.2 Painevalu ONKALO-työmaalla

Alhaalta ylöspäin aukottomaan muottiin työnnettävällä betonimassalla täytetty muotti paineistetaan heti muotin täytyttyä. Paineistus tulee pitää niin kauan kunnes paine muotissa tasaantuu eikä lähde enää tippumaan, riittävänä voidaan pitää n. 20-30 min paineistusta. Tällöin voidaan turvallisesti todeta muotin olevan kokonaan täynnä, ja ettei rakenteen lujuudelle haitallisia ilmataskuja ole päässyt syntymään.

Muottipintaan asennetaan tuplauksen yhteydessä pumppausventtiilit ja painemittarit, joiden paikat on ennalta määrätty työnjohdon ja valvojien toimesta rakenteen koosta ja muodosta riippuen. Teoreettiset paikat löydetä betonoinnin tyyppisuunnitelmasta (Liite 2).

Muottiin on myös mahdollista asentaa lämpöantureita vähintään 3-5 cm:n syvyyteen muottipinnasta (raudoituskerros) lämpötilavaihtelujen ja betonin lujuuden kehittymisen seuraamiseksi. Anturit tulee asentaa muottilevyjen rajapintoihin, jotta liiallisten reikien tekemiseltä muottiin vältetään.

Betoni pumpataan pumppausventtiilin kautta muottiin ja paineistetaan muottien täytyttyä kokonaan 0,6 bar (60 kN/m<sup>2</sup>) asti. Paineistus on pidettävä noin 30 min ajan, kunnes paine tasaantuu eikä enää lähde laskemaan. Tämän jälkeen venttiilit suljetaan. Valu tehdään noin 2 m:n portaissa. Portaiden välinen odotusaika on puolestatoista (1,5) tunnista kahteen (2) tuntiin, jolla varmistetaan muotin alaosan massan jähmettyminen, jottei valupaine alemmissa kerroksissa pääse nousemaan yli muottien mitoituspaineen kuitenkin niin, ettei valuosien välille pääse muodostumaan saumakohtia.

### 6.3 Itsetiivistyvä betonimassa

Itsetiivistyvälle betonimassalle on ominaista notkea, valuva ja hyvin leviävä koostumus. Se tiivistyy erottumatta oman painonsa avulla. Itsetiivistyviä massoja käytettäessä ei siis tarvita täryttämistä.

Rudus Oy on tehnyt ITB -massoilleen painevalumahdollisuuksia selvittävän tutkimuksen. Tutkimuksen mukaan valutekniikka vaikuttaa vain vähän massan käyttäytymiseen. Painevaluja tehtäessä voidaan siis käyttää itsetiivistyviä betonimassoja. Tämä mahdollistaa tiivistysvaiheen ohittamisen tarvittaessa. Portaittain valettaessa varsinkin alemmissa valukerroksissa voidaan kuitenkin käyttää apuna muottiin kiinnitettäviä täryttimiä kerroksien ja valusaumojen tiivistämisen varmistamiseksi.



## 7 MUOTITUS

### 7.1 Muottimateriaalin valinta

Kalliorakenteiden toteutuksessa on tärkeää ottaa huomioon vallitsevat olosuhteet. Määräviä valintakriteereitä ovat materiaalin uudelleen käytettävyyden ja edullisuuden lisäksi kuljetettavuus ja helppo työstettävyys ahtaissa ja kosteissa tiloissa.

ONKALO louhitaan alkuvaiheessa yksiperälouhintana eli käytössä on vain yksi kulkureitti. Pienimmillään ajotunneli on profiililtaan 5,5m x 6,3m. Tämä antaa tiukat rajat myös materiaalien kuljetusmahdollisuuksille tunnelissa.



Kuva 3 Henkilökuiluperän seinän muottityöt

Kasetti- ja muita muottijärjestelmiä harkitessa tuli ottaa huomioon myös ONKALOn pitkäaikaisturvallisuuden määräykset, joiden mukaan tunneliin ei saa viedä vieraita aineita, joiden vaikutusta esim. tulevaisuudessa loppusijoitukseen käytettäville kuparikapseleille ja bentoniitille ei ole tutkittu. Kalliorakenteiden kanssa kosketuksiin ei myöskään saa joutua edellä mainittuja aineita eikä sinne kuulumattomia orgaanisia aineita.

Järjestelmämuotit vaativat aina ennen valua esikäsittelyn öljymällä ne ja valun jälkeen pesun, jotta muotteja voitaisiin käyttää uudelleen. Näin ollen pitkäaikaisturvallisuuden määräykset ainakin hidastaisivat järjestelmämuottien käyttöönottoa, pahimmassa tapauksessa jopa estäisivät sen.

Järjestelmämuotista pyydettiin mm. PERI:ltä tarjous (liite 5), johon kuului myös alustava muottisuunnitelma. Tarjous jouduttiin kuitenkin hylkäämään myös sen vuoksi, että muottien sallituksi maksimipaineeksi ilmoitettiin  $60 \text{ kN/m}^2$ , joka ei olisi teoreettisen paineen ja varmuuskertoimen tulona riittänyt paineistuksen aikana.

Vaikka järjestelmämuotti olisikin valittu käyttöön, olisi kallionpintaa mukailevat osat tarvinnut tehdä levystä tai muusta helposti muotoiltavasta muottimateriaalista, koska muottielementit ovat tietyn kokoisia ja muotoisia eikä vuokrakalustoon voi tehdä tarvittuja muutoksia.

Muita vartenotettavia mahdollisuuksia muottimateriaaliksi olivat koivuvaneri ja lauta. Lautamuotin valintaa puolsivat sen edullisuus, helppo muotoilu kalliopinnan mukaiseksi ja pienin materiaalihukka. Vaihtoehto kuitenkin hylättiin nopeasti koska muotin saaminen riittävän tiiviiksi olisi haastavaa, kun kyseessä hyvin notkea, jopa vetinen, betonimassa. Lisäksi pikkutarkan työn määrä helposti venyttäisi aikatauluja.

Muottimateriaaliksi ensimmäiseksi toteutettaville seinärakenteille valittiinkin levymuotti. Levymuotti oli vaihtoehtoista edullisin, koska levyä olisi joka tapauksessa käytetty kalliopinnan ja muottikaluston välissä ja seinien aikataulut olivat liian kaukana toisistaan järjestelmämuottien vuokrausta ajatellen. Lisäksi levyä käyttäen saatiin muotista tehtyä kalliopinnanmukainen tehokkaammin kuin laudasta toteuttaen. Vaikka hukkamateriaalia seinämuotin toteuttamisesta jäisi, olisi

muottipaloja mahdollista käyttää hyväksi seuraavaa muottia tehtäessä. Niinpä levymuotti oli kaikki vaiheet huomioiden kustannustehokkain ja sopivin vaihtoehto tähän kohteeseen.

## 7.2 Levypintaisten muottien mitoitus

Muottilaskut ONKALON painevaluseinille pystytettiin laskemaan Kone- Ratu 06-3029 levymuotin suunnitteluohjeen mukaan. Laskut oli mahdollista tehdä korttia apuna käyttäen, sillä teoreettinen valupaine ei rakenteiden ja valuosien koon vuoksi päässyt nousemaan yli  $60 \text{ kN/m}^2$ . Myös paineistusvaiheessa paine nostettiin  $60 \text{ kN/m}^2$ .

Levypintaisten seinämuotin mitoitus perustuu Suomen rakentamismääräyskokoelman B 10 Puurakenteet, 1990 ja RIL 147: Tukitelineet, 1993 ohjeisiin ja määräyksiin. Mitoituksessa käytettiin sallittujen jännitysten menetelmää. (Kone-Ratu 06-3029, s.16)

Laskujen lisäksi käytettiin edellä mainitun kortin mukaan levypintaisten seinämuotin monogrammia (Kaavio 1).

Mitoituksessa huomioitiin muottivanerin taipuma, koolaus leikkaukselle ja kiskopaineelle sidejuoksua vastaan mitoitettuna, sidejuoksut leikkaukselle mitoitettuina ja muottisidejaon mitoitus.

ONKALON painevaluissa paine on korkeimmillaan paineistuksen aikana  $60 \text{ kN/m}^2$ , jolloin muottirakenteet on mitoitettava  $1,5 \times 60 \text{ kN/m}^2$  eli vähintään  $90 \text{ kN/m}^2$  valupaineelle.



Kuva 4 Valmis levymuottipinta HK-290

Laskut on tehty Kone-Ratu 06-3029 kortin kaavojen ja taulukoiden mukaan:

*Valupaine =  $p = kt * kh * ky * po$ , jossa*

*$kt$  = betonimassan lämpötilan vaikutuksen korjauskerroin*

*$kh$  = betonimassan sitoutumisen hidastumisen korjauskerroin*

*$ky$  = betonimassan tilavuuspainon vaikutuksen korjauskerroin*

*$po$  = valupaineen perusarvo*

*Hydrostaattinen paine =  $h = kt * kh * ho$*

*$ho$  = hydrostaattisen painekorkeuden perusarvo*

Korjauskertoimet ja painearvot saadaan tapauskohtaisesti Ratu -kortin taulukoista ja kuvista. (Kone-Ratu 06-3029, s.3-4)

### 7.2.1 Laskuesimerkki

Henkilökuiluperän ja kuiluliittymän välinen seinä tasolla -290

#### 1. Laskennallinen valupaine

$kt = 0,75$  *Betonimassan lämpötila työstettäessä 22 °C*

$kh = 1,0$  *Ei hidastimia*

$ky = 1,0$  *Tilavuuspaino (nimellinen) 25 kN/m<sup>3</sup>*

$po = 50 \text{ kN/m}^2$  *Notkeus vetelä ja nousunopeus 1,5 m/h*

$ho = 2 \text{ m}$  *Sama taulukko kuin yllä*

$$p = 0,75 * 1 * 1 * 50 \text{ kN/m}^2 = 37,5 \text{ kN/m}^2$$

$$h = 0,75 * 1 * 2 \text{ m} = 1,5 \text{ m}$$

Paineistuksen aiheuttama paine (suurin valunaikainen paine) on 60 kN/m<sup>2</sup>.

Varmuuskerroin 1,5

$$\text{Laskennallinen paine } p = 1,5 * 60 \text{ kN/m}^2 = 90 \text{ kN/m}^2$$

Muotin mitoituksessa käytetään jatkossa laskennallisena paineena kahdesta edellisestä suurempaa eli  $p = 90 \text{ kN/m}^2$

Nomogrammista saadut tulokset:

*Muottimateriaali vähintään: 18 mm koivuvaneri, käytetään 18mm koivuvaneria*

*Koolaus vähintään: T18-3 50x100, käytetään T30-3 50x100*

*Koolausjako enintään 275mm, käytetään jakona 275 mm*

*Sidejuoksut vähintään 425mm, käytetään juoksuissa 400mm*

*Siteitä vähintään 3,8 kpl/m<sup>2</sup>, laitetaan 4 kpl/m<sup>2</sup>*

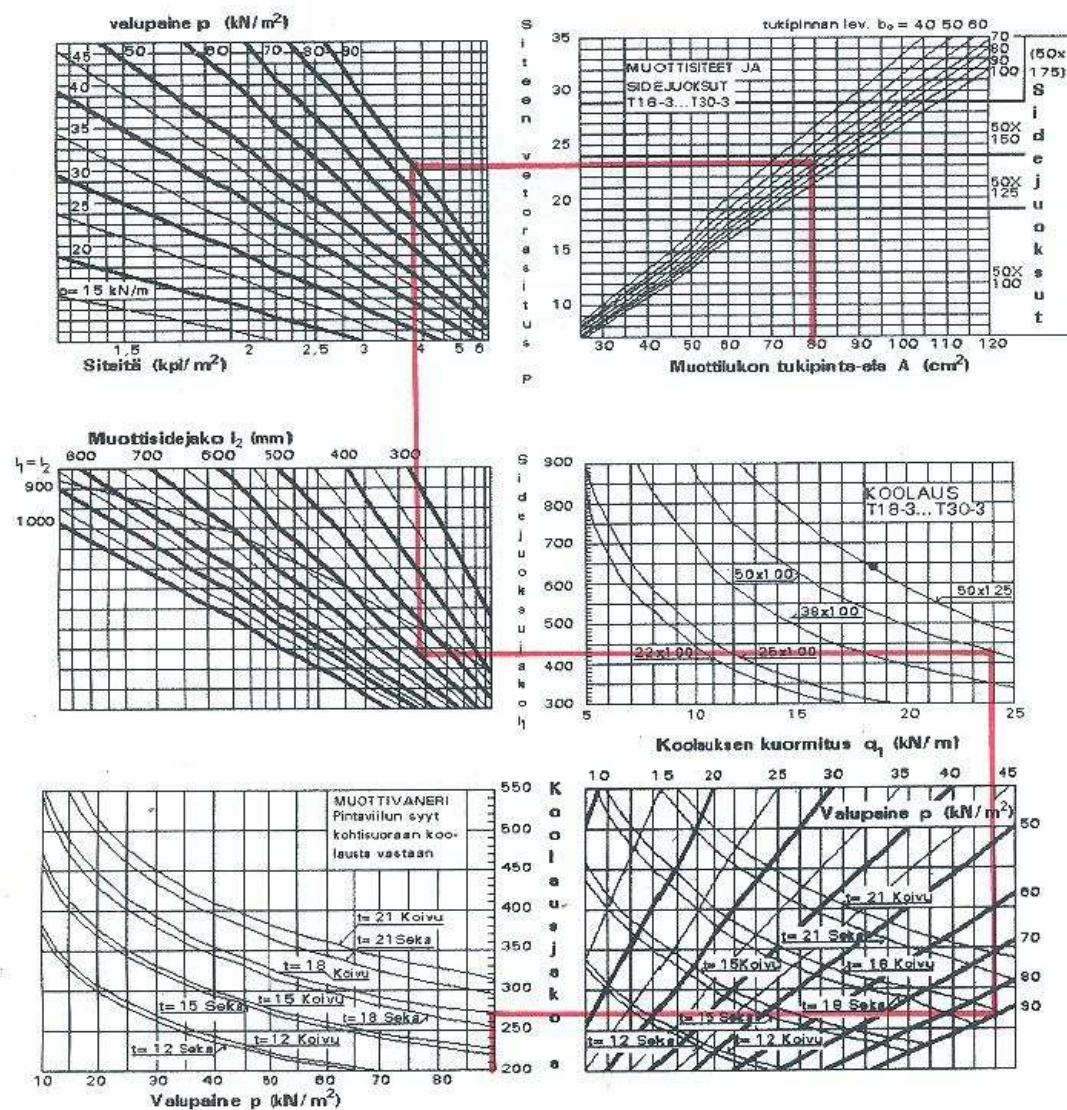
*Muottilukon vaadittu tukipinta-ala vähintään 80 cm<sup>2</sup>*

*Vetorasitus muottisiteelle 22 kN*



## 3 Levypintainen seinämuotti

Henkilökuilo -290, valupaine 90 kN/m<sup>2</sup>



Merkinnot

- $a$  = koolauksen k/k
- $A$  = muottilukon tukipinta-ala
- $b_0$  = muottilukon tukipinnan leveys
- $l_1$  = sidejuoksun k/k
- $l_2$  = muottisidejako k/k
- $p$  = valupaine
- $P$  = muottisiteen vetorasitus
- $t$  = muottivanerin paksuus

Kuva 17. Muottivanerin ja koolauksen mitoitus.

### 7.3 Muottityö

Muotitusta varten alapuoliseen rakenteeseen (tässä kalliin) kiinnitetään aluspuut, joihin muotin alapää kiinnitetään. Muotit asennetaan paikoilleen ja vaakajuoksuja asennetaan muotin taakse seinäritä vää määrää korkeudesta riippuen. Vinotukien avulla muotti asennetaan pystyyn.

Toinen muottipuolisko asennetaan seiniä valettaessa keiden ja muottisiteiden avulla paikoilleen. Kun tuplaus on tehty, asennetaan venttiilit, painemittarit ja lämpöanturit paikoilleen.

Muottien tulee olla tarpeeksi tiiviit, jotta vesi ja hieno kiviaines eivät pääse liiallisesti valumaan ulos muotista. Muottien tulee myös kestää hionnin ja massan kovettumisen aikaiset paineet, jotta rakenteen muotitukset pysyvät sallituissa rajoissa. (3 BY 50, s. 112). Tiivistys tulee vastata myös liittyviin rakenteisiin ja kalliin käyttämällä saumakohdissa saumapintaamiseksi muotin molemmat puolet ylittävää tiheää muottiverkkoa.

## 8 SEINIEN TOTEUTUS

Kaikki paloseinät on suunniteltu kestämaan vähintään vuoden käyttö ja loushinnasta johtuva 5kN räjäytyspaine. Lisäksi kostea virtaavan veden vuoksi tulee käytettävän betonin olla sulfaatin kestävä luokaksi seinille on määritelty XA1. Seinät valetaan itsestivistävällä betonimassalla, jonka lujuusluokka on K40-2 ja käytetyn kiviaineksen suurin sallittu koko #32.

### 8.1 Rakenteiden toteutuksessa käytettävä kalusto

Valussa käytettiin betonimassan purkamiseen kohteeseen pumppuautoja, joissa massa kuljetettiin myös työmaalle. Erillistä massan vastaanottoa ei näin ollen tarvittu vaan kuorma päästiin purkamaan kohteeseen heti paikan päällä.

Auton koolle vaatimukset asetti tunnelin profiili ja ajotien kaltevuus, koska betoniauton tuli pystyä kääntymään tunnelissa ja ajamaan alas hallitusti. Massa tuotiinkin paikalle 5 m<sup>3</sup>:n betonisäiliö autoilla.

Seinien valussa käytettiin levymuotteihin upotettavia valuventtiilejä (kuva 5), jotka on tehty nimenomaan pumppuautoon yhteensopiviksi. Valuputken pää kiinnitettiin tiiviisti venttiiliin käyttäen kynsiliitintä. Venttiilien sulku tapahtui mekaanisesti sulkulevyä käyttäen.

Kuva 5 Valuventtiili

Venttiilien lisäksi muotteihin lisättiin painemittareita. Yleensä valuun riittää kolme painemittaria, mutta tarkempien tutkimustulosten saamiseksi kahteen työssä tarkkailtuun seinään mittareita asennettiin kuusi kappaletta seinää kohti. Lämpömittareita asennettiin 12 kpl lämmönkehityksen seuraamiseksi.

## 8.2 Henkilökuiluperä -290

Henkilökuiluperään valettu betoniseinä oli profiililtaan 10,5m x 6m. Seinän piirustukset on liitetty työn loppuun (Liite 1). Isoin louhinnan tässä vaiheessa valettavista seinistä oli haastava muotituksen kannalta myös muotonsa vuoksi.



Ylilouhinnan vuoksi seinän vasempaan reunaan jouduttiin tekemään alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen kulma, jotta se saataisiin valettua kallion pintaa vasten. Kulman vuoksi muotit jouduttiin vahvistamaan vasemman reunan ja kulman kohdalta, jotta ne kestäisivät valupaineen ilman liiallisia muodonmuutoksia.

Henkilökuiluperä -290 tason palokatkoseinän toteutus alkoi jo toukokuun alussa muottitöillä. Kynnysosan valu yhden metrin korkoon tehtiin 27.5.2009 lopullisen painevalun helpottamiseksi (kuva 6). Kynnysosa valamalla varmistettiin, että muotin alaosa on tiivis, eikä haitallisista raoista muotin ja kallion alapinnassa ollut ongelmia paineistuksessa.



Kuva 6 Kynnysvalu 27.5.2010

Loput seinästä valettiin 9.6.2009. Työt aloitettiin aamulla klo. 7:30 ja päivä kesti 16:00 asti. Mukana valussa minun lisäksi oli 3 rakennusmiestä, 1-luokan betonityönjohtaja ja betoniauton kuljettaja.

Vaikka kalliopintaan oli ennen muottien tekoa asennettu muotin reunat tiivistävää muottiverkkoa (kuva 7), oli yhden miehen seurattava koko valun ajan reunojen pitävyyttä, sillä IT- massa on hyvin notkeaa ja nesteytettynä se pyrkii ulos pienimmästäkin raosta.

Jos massa alkoi valua ulos muotin ja kalliopinnan välistä, oltiin lisätiivistykseen verkkoa lisäämällä koko ajan valmiita. Välillä valua jouduttiin hidastamaan, jotta suurimmat vuodot saatiin tukittua ennen kuin massaa saatiin nostettua korkeammalle.

Valun päätteeksi muotit ja telineet pestiin betoniroskeista.

#### 8.2.1 Valupaineet

Painemittareita seurattiin koko valun ajan säännöllisin väliajoin ja paineet kirjattiin ylös jokaisesta mittarista. Tarkimmat tulokset haluttiin paineistuksen ajalta, jolloin oletettiin sekä paineiden että paineen muutoksien olevan suurimmat.

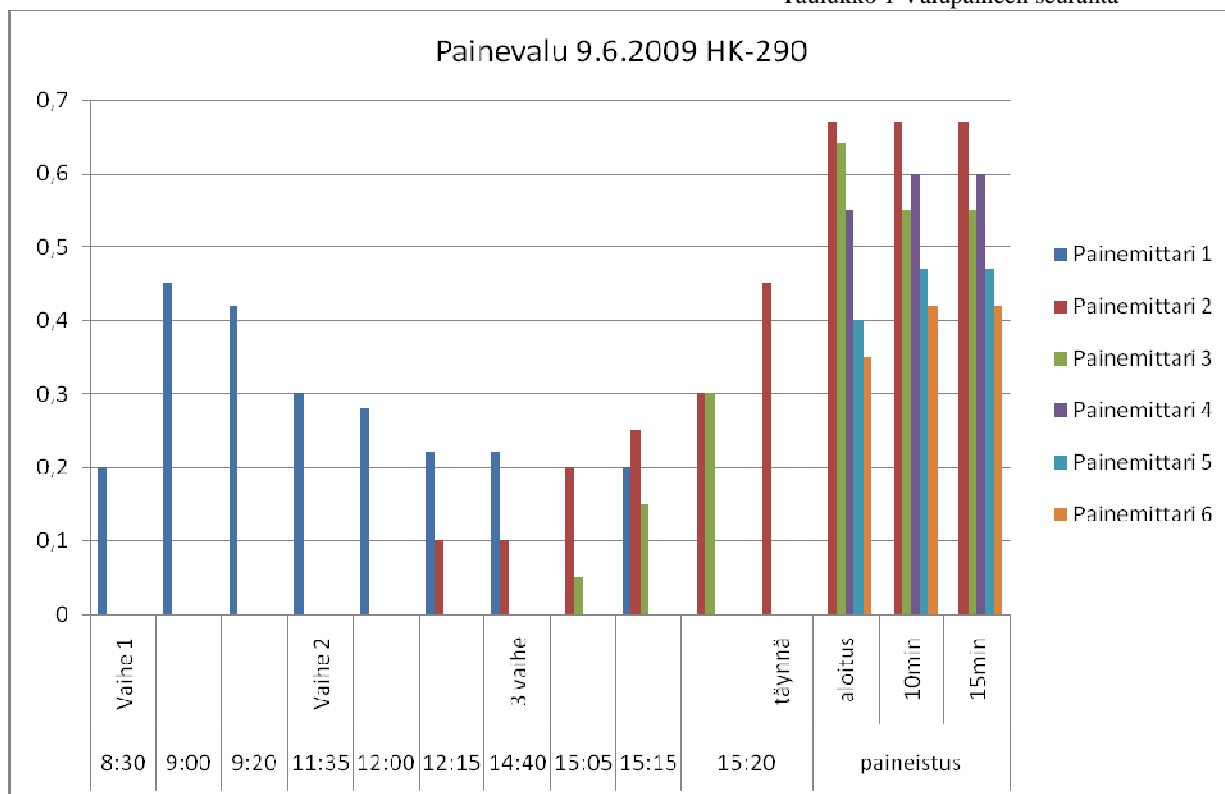
Mitoitusarvona aikaisemmissa laskuissa käytettiin  $60 \text{ kN/m}^2$ , johon paine paineistuksen aikana ylimmän valuosan mittareiden mukaan nostetaan. Tavanomaisesti painemittarit sijoitetaankin vain muotin yläosaan. Tarkempien tietojen saamiseksi mittareita lisättiin myös alempiin valuosiin. Näin paineen kehitystä pystyttiin seuraamaan koko valun ajan seinän eri osissa.

Valun ensimmäisissä eli niin kutsutuissa porraskorkeuksissa ei paine päässyt nousemaan yli  $45 \text{ kN/m}^2$ . Paineistuksen aikana mittarin 2 mukaan paine alkoi kuitenkin nousta 4 metrin korkeudessa. Korkeimmillaan paine oli  $67 \text{ kN/m}^2$  eli lähes  $10 \text{ kN/m}^2$  korkeampi kuin paineistuksen suunniteltu  $60 \text{ kN/m}^2$ .

Massa ei siis selvästikään ollut kovettunut niin paljon valuosien välissä, kuin olimme olettaneet. Varmuuskertoimen ansiosta paine kuitenkin pysyi sallituissa rajoissa eli

alle 90 kN/m<sup>2</sup> ja paineistusta voitiin jatkaa ilman lisätoimenpiteitä eikä muodonmuutoksia ylityksestä huolimatta syntynyt.

Taulukko 1 Valupaineen seuranta



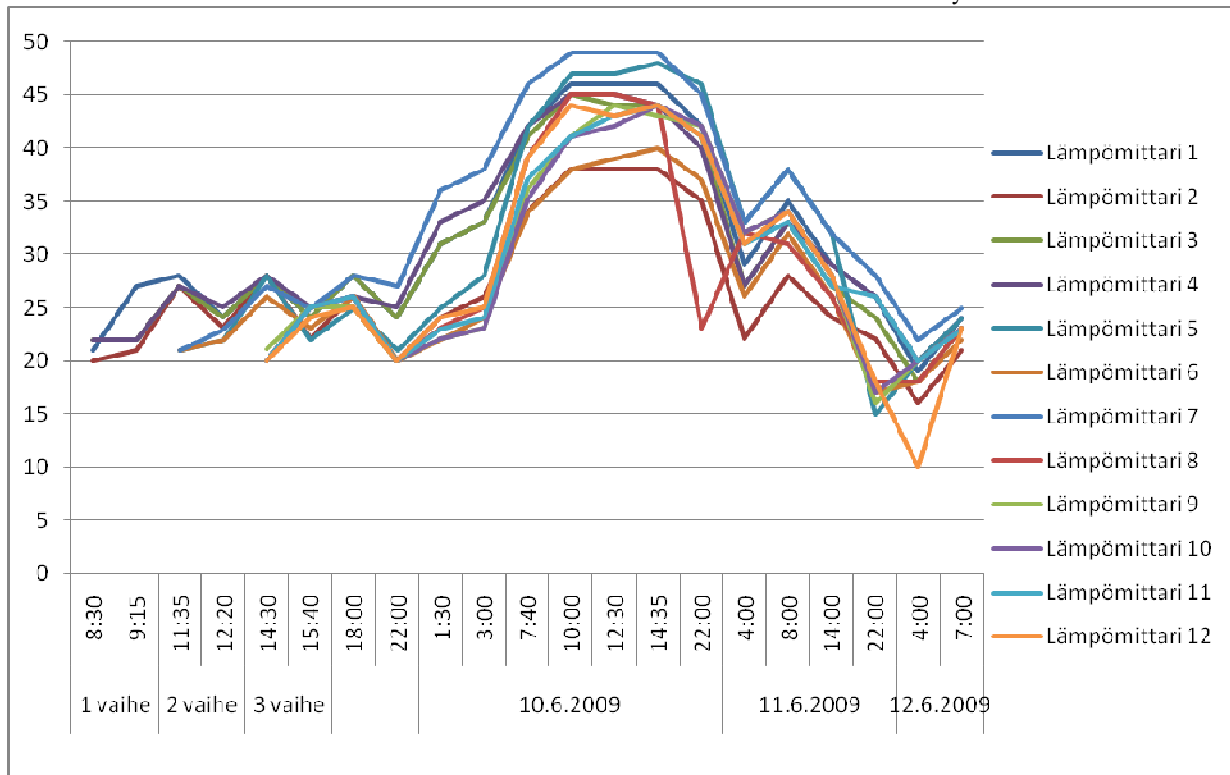
### 8.2.2 Lämmön kehitys

Myös lämmönkehitystä seurattiin, jotta saataisiin tietoa seinän lujuuden kehityksestä. Lämpömittareista mittarit 1-3 olivat seinän alaosassa eli ensimmäisessä valuportaassa. Mittareista 4-7 asennettiin toisen valuportaan kohdalle ja loput mittarit seinän yläpään osaan. Lämpötilat mitattiin valun aikana kuusi kertaa ja kolmen seuraavan vuorokauden aikana vielä 15 kertaa, jotta lämpöpiikki saataisiin mahdollisimman tarkasti selville..

Betoni oli valettaessa +22° C. Lämpö lähti kehittymään muutamalla celsiusasteella heti, kun valettava kerros saatiin valmiiksi eikä betonia enää päästetty muottiin.

Odotusajan päätyttyä, kun massaa alettiin uudelleen valaa muotteihin, laski lämpö myös alemmassa kerroksessa takaisin 22:een °C:sta.

Taulukko 2 Lämmönkehityksen seuranta



Neljätuntia valun jälkeen massan lämpötila alkoi nousta tasaisesti ylöspäin. Nousua jatkui seuraavat 12 tuntia, jolloin lämpö saavutti lakipisteensä 48,5 °C. Seuraavan kahden vuorokauden aikana lämpö laski taas entiselleen eli 22 asteeseen.

Kiihdytetty IT-massa käyttäytyi normaaliin betonimassaan verrattuna paljon ärhäkämmin ja keräsi lämpöä hyvin nopeasti. Myös lähes 50 asteen lämpötila oli työmaalla yllätys. Lämpötilojen käyttäytyminen kuitenkin selittää betonin lujuuden nopean kehittymisen. Muottien purku aloitettiin kolme vuorokautta valun jälkeen, kun lämpötila oli pudonnut takaisin lähtölukemiin.

### 8.2.3 Valmis pinta

Muotteja alettiin purkaa kolme päivää valun jälkeen purkamalla ensin tuplauspinta. Koska ilmasto tunnelissa on koko ajan kostea, ei seinän kastelu jälkihoitona ole välttämätön, mutta kuitenkin suositeltavaa. Niinpä seinän pintaa seurattiin tarkasti purun jälkeen, jottei kuivuudesta johtuvia halkeamia vain päässyt muodostumaan.

Muottien purkamisen jälkeen seinän lopullinen pinta tarkastettiin ja lopullinen tulos hyväksyttiin tilaajalla.

Seinässä ei havaittu puutteita ja se hyväksyttiin sellaisenaan.



Kuva 7 Muottiverkon ja injektointiletkun asennus

### 8.3 Tuloilmakuiluperä -290

Tuloilmakuiluperän paloseinän toteutus alkoi 6.8.2009 teline- ja muottitöillä. Kun muotin ensimmäinen puoli ja rauditus oli saatu tehtyä, tuplattiin alaosa taas 1,20 metriin ja toteutettiin kynnysvalu. Tämän jälkeen muotit tuplattiin ylös asti ja asennettiin sekä paine- että lämpömittarit.

Varsinainen valupäivä oli 28.8.2009. Alun perin valu oli suunniteltu alkavaksi aamulla klo 7.30. Massan toimitusvaikeuksista johtuen valun alkamisajankohtaa oli kuitenkin siirrettävä myöhemmäksi. Työt päästiin aloittamaan vasta klo 13.15, kun ensimmäinen betoniauto saapui työmaalle.

Siitä eteenpäin työt etenivät sujuvasti, vaikkakin odostuajat valukerroksien välillä olivat lähemmäs kaksituntisia. Valu saatiinkin päätökseen vasta 18.00 ja siivouksen jälkeen työt saatiin lopullisesti päätökseen klo 19.00.

Betonimassa oli toimitusvaikeuksien lisäksi normaalia vetisempää ja sen vaikutuksia lopputulokseen mietittiin jo valun aikana. Uutta massaa ei kuitenkaan saatu paikalle tarpeeksi nopeasti, joten päätettiin jatkaa valua, jottei valusaumaa pääsisi kerrosten väliin syntymään.

Työn aikana sattui yksi läheltä piti –tapaus, kun yksi työmiehistä sai venttiililtä toiselle siirryttäessä massaa päälleen huomattavan määrän. Vaarallisen tilanteesta teki massan ja siinä käytettyjen kemikaalien vaikutus iholle. Paljaalle iholle päästessään massa kuivattaa ja kuorii ihon pois hyvin nopeasti. Tässä tapauksessa suojana olivat suojakäsineet ja työvaatteet, jolloin nopea vaatteiden vaihto ja suihku estivät suuremmat vahingot.

### 8.3.1 Valupaineet

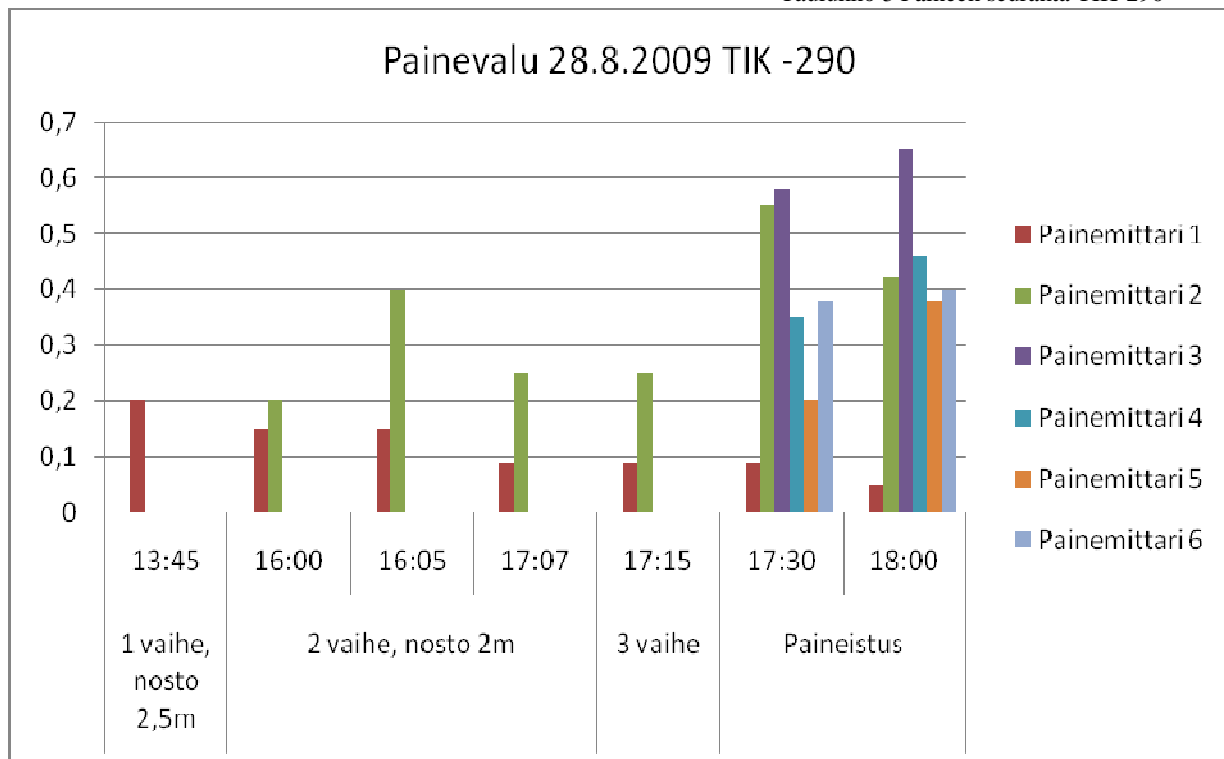
Tuloilmakuilun paloseinä on huomattavasti pienempi, jolloin paineiden ei oletettu edes teoreettisesti nousevan henkilökuilunperään valetun seinän paineiden tasolle kuin paineistuksen aikana.

Paineet jäivätkin selvästi pienemmiksi tässä seinässä ja ennen paineistusta suurin mitattu paine oli 40 kN/m<sup>2</sup> (Taulukko 3).

Vaikka valukerrosten välinen odotusaika oli tuloilmakuilun paloseinää valettaessa suuremmat kuin edellisessä seinässä, pääsi toisessa kerroksessa paine nousemaan jälleen lähes 70 kN/m<sup>2</sup>. Paineistus tehtiin tässä seinässä hieman yli 0,40 bar:ssa eli 40kN/m<sup>2</sup>. Paine saatiin pysymään samana puoli tuntia, vaikkei massaa enää lisätty muottiin. Tällöin voitiin turvallisesti todeta muotin olevan kokonaan täynnä.

Tuloilmakuilun -290 paloseinään asennettujen venttiilien ja mittareiden paikat löytyvät liitteestä 4.

Taulukko 3 Paineen seuranta TIK-290



### 8.3.2 Valmis pinta

Muottien purkamisen jälkeen voitiin nähdä valun aikaisten tapahtumien vaikutus valmiiseen seinäpintaan. Seinän yläosassa, ylimmän valukerroksen kohdalla oli havaittavissa selvää ainesten erottumista.

Kiviaines oli päässyt erottumaan liiallisen veden johdosta. Seinässä se näkyi pintaan muodostuneena hiekkamaisena kerroksena. Koska kerros oli hyvin ohut eikä kyseessä ollut kantava rakenne, ei tarkempia rakenteeseen kohdistuvia tutkimuksia eikä reklamaatioita toimittajalle tehty. Seinä hyväksyttiin sellaisenaan.

## 9 TULOSTEN TARKASTELU

### 9.1 Seinien toteutus

Kummankaan seinän toteutus ei ollut oppikirjan mukainen, minkä vuoksi niistä olikin hyötyä menetelmäkuvauksen muokkaamisessa käytännöllisemmäksi.

Henkilökuiluperän seinää valettaessa viivästyksiä aiheutti massan puristuminen muotin reunojen yli. Koska ongelmaan oli kuitenkin varauduttu, ei siitä aiheutunut haitallisia vaikutuksia. Verkotuksen valunaikaisen lisäämisen ja tiivistämisen jälkeen pystyttiin töitä jatkamaan normaalisti loppuun saakka.

Tuloilmakuilussa -290 tasolla suurimmat ongelmat koituivat massan toimitusongelmista. Alimmat valuosat saatiin valettua hyvänlaatuisella massalla, mutta viimeisessä toimituserässä oli jouduttu viivästymisen vuoksi käyttämään kemiallista nesteytintä, jotta massa pysyisi käyttökelpoisena. Hidastimen vaikutuksesta jo ennestään vetelä massa oli hyvin vetistä ja vaikeasti valettavaa.

Jos kyseessä olisi ollut kantava rakenne, olisi rakennetutkimus ollut välttämätön.



## 9.2 Paineen käyttäytyminen valun ja paineistuksen aikana

Koska paine ei valun ensimmäisissä eli niin kutsutuissa porrasvaiheissa päässyt nousemaan yli 45 kN/m, voimme todeta, että valuportaiden korkeus (2-2,5m) ja keskenäinen odotusaika (1-1,5h) olivat sopivat.

Toisen valuosan paineen nouseminen paineistuksen aikana oli yllättävä havainto kaikille mukana olleille. Osaltaan paineen voidaan olettaa nousseen, koska toinen kerros ei ehtinyt kovettua riittävästi, jotta paineistus ei vaikuttaisi siihen.

Samanlainen reaktio oli havaittavissa kummassakin seinässä, vaikka valuosien välisillä odotusajoilla oli huomattavat erot toisiinsa nähden. Lisäksi vaikka tuloilmakuilun -290 seinä paineistettiin vain 40 kN/m<sup>2</sup>, kun henkilökuilun seinässä paine nostettiin aina 60 kN/m<sup>2</sup>, nousivat paineet molemmissa seinissä samoille lukemille 67 kN/m<sup>2</sup>. Tässä valossa tarkan selityksen saaminen paineen käyttäytymiselle vaatisi vielä lisätutkimuksia.

## 9.3 Lämpötilojen käyttäytyminen

Valujen ajan massan lämpötila pysytteli 22 °C tienoilla. Pari tuntia valun ja paineistuksen valmistumisen jälkeen, lämpötila alkoi nousta melko nopeasti. Jo kahdessatoista tunnissa saavutti se huippunsa, lähes 50° C. Samassa ajassa lämpötila myös laski takaisin lähtöpisteeseen.

Lämpötilat käyttäytyivät hyvin johdonmukaisesti ja tasaisesti kummassakin seinässä. Lämmön käyttäytymisessä suurin ero tavanomaisen massan käyttäytymiseen verrattuna oli nopeus. Osittain nopeus johtui käytetyistä kemiallisista kiihdyttimistä ja IT-massan ominaisuuksista, mutta myös paineistuksen voidaan olettaa vaikuttaneen asiaan, sillä Rapid-massatkaan eivät yleensä saavuta noin korkeita lämpötiloja ilman erityistä lämmittämistä.

Eri osatekijöiden vaikutuksen lämpötilojen käyttäytymiseen löytämiseksi vaadittaisiin lisää tutkimuksia.

## 10 LOPPUSANAT

Työ antoi mahdollisuuden tutkia minulle ennestään outoa valutekniikkaa niin teoriassa kuin käytännössäkin. Löysin moniin kysymyksiin vastauksen, mutta jokaisen vastatun kysymyksen tilalle löytyi uusi, entistä hankalampi. Jotta olisin voinut vastata niihin kaikkiin, olisi tarvittu loputon määrä tutkimuksia, resursseja ja aikaa. Koska niitä ei ollut saatavilla, oli työtä rajattava.

Paneuduin työssä mielestäni olennaisimpiin ja työn tilaajalle tärkeimpiin kohtiin. Auki jääneitä kohtia varten pitää tehdä lisätutkimuksia ja opiskella lisää myös käytettyjen materiaalien ja ainesten käyttäytymistä sekä erikseen että yhdessä.

Lopuksi haluan vielä kiittää työni onnistumisen mahdollistaneita tahoja. Ensimmäkin kiitokset Posiva Oy:lle mahdollisuudesta tutkia tätä menetelmää ja etenkin Timo Niemitaloa työni ohjaamisesta.

Koulun puolelta työtäni ohjasi Markku Laurikainen, joka ansaitsee kiitoksen ymmärtävyydestään, avustaan ongelmakohtissa ja aidosta kiinnostuksesta.

Sain korvaamatonta tietoa painevalutekniikasta ja ONKALO-työmaan erikoisuuksista Ville Laurilalta. Suuret kiitokset myös siis hänelle, kuten myös kaikille ONKALOLla työskenneille.

## LÄHTEET

Posivan toimintapolitiikka. Viitattu 14.5.2009. <http://www.posiva.fi/toimintapolitiikka>

Posiva Oy, 2009, TKS-2009, Olkiluodon ja Loviisan voimalaitosten ydinjätehuolto: Selvitys suunnitelluista toimenpiteistä ja niiden valmistelusta vuosina 2010-2012

Lohja Rudus Oy Ab, 2004, Tutkimusraportti Itsetiivistyvä betoni, Pilarien ja palkkien painevalu, 23.11.2004 Lohja Rudus Oy Ab

Hakapää A, Lappalainen P, 2008, Kaivos- ja louhintatekniikka, Kaivannaisteollisuusyhdistys ry, Opetushallitus

RTT Betoniteollisuus, 1995, Paikallavalurakentaminen, RTT

Ratu-kortisto, 1995, Muottikaluston valinta ja käyttö, suunnitteluohje, Kone- Ratu 06-3032, Rakennustieto Oy

Ratu-kortisto, 1995, Laut- ja levymuottirakenteiden suunnitteluohje, Kone-Ratu 06-3029, Rakennustieto Oy

Suomen Betoniyhdistys ry, 2004, Betoninormit 2004 BY 50, Suomen Betonitieto Oy

Suomen Betoniyhdistys ry, 2006, Betonioppikirja BY 201, Suomen Betonitieto Oy

Betoniopas. Viitattu 27.3.2010. <http://www.betoni.com/fi/Betoniopas>

Haastattelut 16.3.2009 ja 6.5.2009 Ville Laurila

Haastattelu 27.2.2009 Timo Niemitalo

## LIITTEET

Liite	1	Painevalun menetelmäkuvaus
Liite	2	Betonoinnin tyyppisuunnitelma
Liite	3	HK -290 kuiluliittymäseinän rakennepiirustus
Liite	4	TIK -290 kuiluliittymäseinän rakennepiirustus
Liite	5	Tarjous PERI järjestelmämuotti

Kuvat nähtävillä vain SAMK:n kirjastossa.



## 11 KOHDETIEDOT

Työmaa: ONKALO

Työmaan yhteystiedot: Olkiluoto, 27160 Eurajoki  
Puh. 02 8372 2883

## 12 TYÖSISÄLTÖ

Työ/tehtävä: Betonirakenteet, painevalu

Vastaava työnjohto: Vastaava mestari,  
työmaamestari, työkohtai- nen työnjohto:  
etumies

Ohjeelliset työryhmät: 1 rakennusammattimies ja 2  
rakennusmiestä

Perustyöryhmät: 1 rakennusammattimies ja 2  
rakennusmiestä

Ryhmille yhteiset: 1 Mittaryhmä  
takymetrimittauksiin  
(päivävuorossa)

## 13 AIKATAULU

Aikataulun tarkistus: Tarpeen mukaan (osana  
aikataulukontrollia)

Osakohteiden suoritusjärjestys:

Pohjan puhdistus, paikan mittaaminen, tartunnat,  
muottityö, raudoitus/ varaukset, tuplaus,  
valuventtiilien ja painemittareiden asennus,  
betonointi ja jälkihoito

Tuotantonopeus: Soveltuvan aikataulun mukaan

Välitavoitteet: Soveltuvan aikataulun mukaan.

Aikataulun seuranta: Tilanneviivalla viikoittain /  
kuukausittain.

## 14 TYÖN KUVAUS

### Yleistä

Työsuoritusta johtaa betonityönjohtaja. Hänen on oltava paikalla oleellisten työvaiheiden kuten betonoinnin aikana. 1-luokan betonityönjohtaja tulee olla saatavilla paikalle 1-luokan valujen aikana, muulloin työtä voi johtaa 2-luokan betonityönjohtaja.

Kalliopintaa vasten valettaessa maa-aines poistetaan kokonaan kallion pinnalta. Tämän jälkeen suoritetaan vielä kallion pesu betonoitavasta kohdasta.

Tulevan rakenteen paikka mitataan ja merkitään alla olevaan rakenteeseen/ kallion pintaan.

Työ tehdään BY 50 kohdan 4.2 Työsuoritus mukaan sisältäen muottityöt, raudoitukset, betonoinnin ja jälkihoitotyöt kuitenkin niin, että betonointi tehdään painevaluna nesteytettyä (IT) betonia käyttäen kohdan "painevalu" ja liitteen 5 Betonoinnin tyyppisuunnitelman periaatteita noudattaen.

### Muotitus

Muottien tulee olla tiiviit, jotteivät vesi ja hieno kiviaines pääse liiallisesti valumaan ulos muotista. Tiivistys tulee varmistaa myös liittyviin rakenteisiin ja kallioon käyttämällä saumakohdissa saumapintaan kiinnitettävää muotin molemmat puolet ylittävää tiheää muottiverkkoa.

Muoteissa ja tukirakenteissa ei saa betonoinnin ja betonin kovettumisen aikana tapahtua haitallisia

muodonmuutoksia. Rakenteen tulee vastata suunnitelmia sallittujen mittapoikkeamien rajoissa.

Muoteissa tai niiden pintakäsittelyaineissa ei saa käyttää materiaaleja, jotka voivat vaikuttaa haitallisesti betonin, teräksen tai rakenteen ominaisuuksiin.

Suunnitelmaa laadittaessa on otettava huomioon myös työsuorituksen aiheuttamat kuormitukset. Lisäkuormituksia voi aiheuttaa valunaikaisen paineen nousu yli laskennallisen kuorman sekä purkuvaiheen kuormitukset.

Tukirakenteet saa purkaa vasta, kun on luotettavasti voitu todeta betonin kovettuneen niin paljon, että rakenteet kestävät niille tulevat rasitukset. Muottien ei-kantavat osat on mahdollista tarvittaessa purkaa betonin saavutettua 5 MN/m<sup>2</sup> keskimääräisen puristuslujuuden.

Muotitusta varten alapuoliseen rakenteeseen kiinnitetään alaohjauspuut, joihin muotin alapää kiinnitetään. Muottisivut asennetaan paikoilleen ja vaakajuoksuja asennetaan muotin taakse seinään muottisuunnitelman mukaan. Vinotukipuiden avulla muotti säädetään pystysuoraan. Toinen muottipuolisko asennetaan seiniä valettaessa välikkeiden ja muottisiteiden avulla paikoilleen.

Muottien mitoitus tehdään seinämäisille ja kalliota vastaan tuleville betonirakenteille erillisen työsuunnitelman ja laskelman mukaan, kun on odotettavissa betonin valupaineen kohoavan yli 2 m:n staattisen paineen (yli 50 kN/m<sup>2</sup>). ONKALON painealuissa paine on korkeimmillaan paineistuksen aikana 60 kN/m<sup>2</sup>, jolloin muottirakenteet on mitoitettava 1,5x60 kN/m<sup>2</sup> eli vähintään 90 kN/m<sup>2</sup> valupaineelle huomioiden myös valupaineen aiheuttama muottilevyn taipuma.

## Raudoitus

Raudoitteita käsiteltäessä tulee katsoa, ettei niihin synny haitallisia muodonmuutoksia. Varastoinninkaan aikana raudoitteisiin ja betoniterästankoihin ei saa liiaksi muodostua korroosiota, korkeintaan kevyttä pintaruostetta.

Raudoitukset tulee valmistaa ja asentaa annettujen piirustusten ja muiden mahdollisten ohjeiden mukaisesti. Raudoitus asennetaan käyttäen piirustuksissa annettuja



betonipeitteen nimellisarvoja. Suojapeitteen paksuus on aina kuitenkin oltava vähintään  $35 \pm 10$  mm.

Raudoitteet puhdistetaan tartuntaa huonontavista aineista ennen muotteihin sijoittamista. Raudoitteet ja raudoitustangot tuetaan muotteihin välikkeiden tai työraudoituksen avulla niin tiheästi ja sidotaan toisiinsa tarvittaessa työraudoitusta käyttäen niin lujasti, että raudoitteiden asema betonoinnin jälkeen täyttää vaatimukset.

Betonipeite mitoitetaan siten, että myös työraudoitusta suojaa suunnitelmienmukaiset betonipeitteet.

Raudoitteiden ja varausten paikka mitataan muottiin. Varaukset asennetaan paikoilleen jonka jälkeen asennetaan välikkeet raudoitusta varten. Irto- tai verkkoteräksiset tuetaan työteräksiin tai välikkeisiin ja sidotaan kiinni. Tuplaverkotusta varten asennetaan asennuspukit ensimmäiseen verkkoon.

## Betonityöt

### Yleistä

Betonimassan tulee liittyä saumattomasti muoteissa ennestään olevaan tuoreeseen betoniin ennen kuin tämä alkaa kovettua. Tästä johtuen valuportaiden väli saa maksimissaan olla kaksi (2) tuntia. Pystyrakenteiden betonoinnissa rajoitetaan nousunopeus siten, ettei haitallisia jälkipainaumia synny ja voidaan luotettavasti todeta muottien täyttyneen.

Betonin tiivistyksessä on otettava huomioon seuraavaa.

- Tulee kallioon rajoittuvissa painevalurakenteissa kysymykseen vain ulkopuolista tärytintä käytettäessä.
- IT- massaa ei tarvitse tiivistää
- Jälkitärytys poistaa plastisen painuman aiheuttamia ongelmia esim. poikkileikkausten muutosten ja yläpinnan raudoituksen kohdalla.
- Jälkitärytys lisätiivistää tehokkaasti betonia. Jälkitärytys on tehtävä ennen betonin sitoutumista.
- Muut kuin IT-massat vaativat tärytyksen tiivistykseen

Betonoinnin nousunopeutta joudutaan rajoittamaan korkeissa rakenteissa painumisen, vedenerottumisen ja paineen kasvamisen vuoksi.

## Painevalu

Painevaluja tehtäessä voidaan käyttää itsetiivistyvää betonimassaa (ITB). Se mahdollistaa tiivistysvaiheen ohittamisen tarvittaessa. Varsinkin alemmissa valukerroksissa voidaan käyttää apuna muottiin kiinnitettäviä täryttimiä kerroksien ja valusaumojen tiivistämisen varmistamiseksi. Muottipintaan asennetaan tuplauksen yhteydessä pumppausventtiilit ja painemittarit, joiden paikat on sovittu valvojan kanssa. Muottiin on myös mahdollista asentaa lämpöantureita vähintään 3-5 cm:n syvyyteen muottipinnasta (raudoituskerros) lämpötilavaihtelujen ja kovettumisen seuraamista varten. Antureita tulisi asentaa joka valuportaaseen, jotta osien väliset erot voidaan huomioida. Lisäksi ne tulisi sijoittaa muottilevyjen rajapintoihin, jotta ylimääräisiltä rei'ityksiltä vältytään.

Betoni pumpataan pumppausventtiilin kautta muottiin ja paineistetaan muottien täytyttyä kokonaan 0,6 bar (60 kN/m<sup>2</sup>) asti. Paineistus on pidettävä noin 30 min ajan, kunnes paine tasaantuu eikä enää lähde laskemaan. Tämän jälkeen venttiilit suljetaan. Valu tehdään noin 2 m:n portaissa. Portaiden välinen odotusaika on puolestatoista (1,5) tunnista kahteen (2) tuntiin, jolla varmistetaan muotin alaosan massan jähmettyminen, jottei valupaine alemmissa kerroksissa pääse nousemaan yli muottien mitoituspaineen.

## Jälkihoito

Vastavaletun betonipinnan sopiva jälkihoitoaika on rakenteesta ja sääolosuhteista (tunnelissa suhteellisen vakio) riippuen yleensä 3-14 vrk. Riittävä kosteus lujoudenkehitystä varten turvataan joko kastelemalla betonia, estämällä veden haihtuminen esim. muovilla peittämällä tai ruiskuttamalla jälkihoitoaine. Mikäli rakenteen massa edellyttää lämpötilaerojen kontrollia, valuosa eristetään 10-15 mm:n PE - vaahtomuovieristeellä lämpötilan ja jäähtymisnopeuden kontrolloimiseksi.

## Betonirakenteiden jälki-injektointi

Jälki-injektointi on tehtävä, jos suunnitelmissa niin on määrätty, tai jos on odotettavissa, että saumapinnat jäävät valettaessa vajaiksi.

Injektointiletkut on asennettava ennen valua sellaisiin paikkoihin, joihin voidaan olettaa raon syntyvän, esimerkiksi kalliopinnan ja betonivalun saumakohtaan. Letkun paikka on yleensä keskellä saumaa, tarvittaessa voidaan käyttää useampaa letkua. Liian pitkää letkua ei saa käyttää, jotta voidaan varmistua siitä, että injektointimassa levittyy tasaisesti ja raot täyttyvät suunnitellusti. Letkut on asennettava niin, että ne kestävät valun aikaisen valupaineen vahingoittumattomina. Letkua ei saa kiinnittää raudoitukseen, eikä siihen saa tehdä liian jyrkkiä taivutuksia. Injektointiletkun alkupää on kiinnitettävä huolella, ettei se valun aikana joudu rakenteen sisään. On kuitenkin varmistettava, että liitoskohta on riittävästi valun sisällä liukumien estämiseksi.

Injektointi on suoritettava suunnittelijan ilmoittamilla paineilla ja niin pitkään, että kaikkien rakojen ja kolojen voidaan olettaa täyttyneen. Mahdollisesta jälki-injektoinnista tehdään pöytäkirja (Liite 3).

## 15 LAATUVAATIMUKSET

### 15.1 Laatuvaatimuksissa noudatettavat asiakirjat

BY 50 luvun 5 mukaan. Laadunvarmistuksesta toimitettavan massan osalta vastaa SFS sertifioitu toimittaja.

Tehtäväkohtaisessa tarkastus- ja testaussuunnitelmassa mainitut asiakirjat (Liite 1).

### 15.2 Työohjeet

Hyväksytyt työohjeet ja piirustukset.

### 15.3 Materiaalivaatimukset

Työohjeissa ja piirustuksissa mainitut materiaalit. Työmaan laatuinsinööri tarkastaa työmaalle tulevat pysyvät materiaalit. Niistä tehdään materiaalien tarkastuskortit.

## 16 USEIN ESIINTYVIÄ ONGELMIA, ELI POA (POTENTIAALISTEN ONGELMIEN ANALYYSI)

Ongelma	Hälytin	Torjunta	Korjauskeino
<i>Toiminnalliset ongelmat</i>		Sauvatäryttimen käyttö	
- Valu harva			
<i>Tekniset ongelmat</i>	Pullistuminen	Muottien mitoitus valupaineelle, ohjeistus valunopeudelle (rajoitus:valunopeuden hidastaminen)	Lisätuenta
- Muottien kesto			
<i>Hankinnan ongelmat</i>	Ei materiaalia	Hankinnan varmistus toimitusaikojen osalta	Vaihtoehtoiset toimittajat
- Toimitus myöhässä			
- Toimitus keskeytyy valuportaiden välillä			
- Toimitus etuajassa	Materiaali paikalla, ennen kuin olla valmiita betonoimaan.	Materiaalitilaus tarkemmaksi	
<i>Jälki-injektointi:</i>			
<i>Toiminnalliset ongelmat</i>	Injektointimassa ei etene	Letkujen tarkistus ennen injektoinnin aloittamista	Letkun pään suojaus, sekä letkujen oikeaoppinen kiinnitys
-Injektointiletku tukossa	letkussa		
<i>Jälki-injektointi: Tekniset ongelmat</i>			
-Letkut eivät kestä	Letkun rikkoutuminen		Oikeanlaiset letkut sekä oikeat valupaineet

## 17 LOGISTIIKKA

Materiaalitoimitukset:

Materiaali tilataan auton omalla purkukalustolla työmaalle.

Materiaalien varastointi:

Materiaalitoimittajalla.

Ympäristö:

Jätteenkäsittely ja lajittelu hoidetaan TVO:n  
työturvallisuusoppaan kohdan "järjestys, siisteys ja

jätehuolto” mukaan Posivan osoittamiin kontteihin.  
Posiva hoitaa jätekonttien tyhjennykset.

## 18 KONEET, KALUSTO, TYÖVÄLINEET

Betonipumppu (pumppuauto tai vaihtoehtoisesti esim. tunnelipumppu), valuventtiilit ja painemittarit.  
Mahdollista käyttää myös lämpöantureita.

## 19 TYÖTURVALLISUUS

Työturvallisuusvastuuhenkilöt:

Urakoitsijan työnjohtaja ja linjaorganisaation ylemmät esimiehet.

Poistumis- ja pelastautumissuunnitelma:

SK-Kaivin Oy: Poistumis- ja pelastautumissuunnitelma  
(ONK-100580)

Turvallisuussuunnitelma:

ONKALOn turvallisuussuunnitelma (ONK-002231)

Työturvallisuusmittaukset:

Mittaukset turvallisuussuunnitelman mukaan.

Tarvittavat henkilökohtaiset suojaimet:

Kypärä, suojahaalarit, -käsineet ja turvasaappaat.  
Tunnelissa työskenneltäessä on oltava myös  
pakenemislaitte ja muut siellä vaadittavat suojaimet.

Erityissuunnitelmien tarve:

Muottisuunnitelmat painemitoituksineen.  
Betonointisuunnitelma 1-luokan rakenteille, muille  
painevalun tyyppisuunnitelma, jossa nousunopeudet,  
valuventtiilien paikat, painemittareiden sijoitus ja sekä  
pumppaus- että muottipaineet on ilmoitettu.

## 20 LAADUNVARMISTUS

Laadunvarmistuksen vastuuhenkilö:

Tilaaajan laatuinsinööri

Mallityö:

Ei tarpeellinen.

Tarkastukset:

Tehtäväkohtaisen tarkastus- ja testaussuunnitelman mukaisesti (Liite 1) sisältäen laaduntarkastukset ja varmennustoimet:

- ennen työn aloitusta
- työn aikana
- työn jälkeiset laadunvarmennukset

Tarkastukset ja niiden tuottamat dokumentit on lueteltu työn laadunvarmistuksen tarkastuskortissa (Liite 2).

Urakoitsijan työnjohdon ja Posiva Oy:n rakennusvalvojan tulee varmistaa työvaiheiden hyväksyttävyys aina ennen seuraavaan vaiheeseen siirtymistä.

Mittaukset:

Tarkemittaukset

Dokumentointi:

Tarkastus- ja testaussuunnitelman mukaan

Aikataulun ohjaus:

2-viikkoisaikataulu

Palaverit, kokoukset ja niissä käsiteltävät asiat:

Ennen työn aloittamista pidetään aloituspalaveri, jossa käydään läpi työmenetelmä ja tilaajalta saadut suunnitelmat sekä laadunvarmistusmenettely sekä mahdolliset kohteelle tehdyt erityissuunnitelmat rakenneluokan mukaan. Yksi aloituskokous seinäryhmää kohti riittää.

Tiedon välitys työryhmälle:

Työnjohdon välityksellä.