

Jani Nyman

Vesitiiviin kaivannon rakentaminen (Urheilupuisto)

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Rakennusinsinööri AMK
Rakennustekniikka
Insinööriyö
Päivämäärä

Tekijä(t) Otsikko	Jani Nyman Vesitiiviin kaivannon rakentaminen (Urheilupuisto)
Sivumäärä Aika	34 sivua 29.04.2013
Tutkinto	Rakennusinsinööri, AMK
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infra
Ohjaaja(t)	Erkki Virtanen, Peab Infra Oy Kai Kouvo, Metropolia AMK
<p>Opinnäytetyön aiheena on vesitiiviin kaivannon rakentaminen. Työssä keskityttiin Länsimetron Urheilupuiston hankkeeseen ja sen sisältämään suurempaan asemakaivantoon. Työ tehtiin Peab Infra Oy:lle, joka toimii kyseisen hankkeen pääurakoitsijana.</p> <p>Opinnäytetyössä käytiin läpi eri työvaiheita ja menetelmiä vesitiiviin kaivannon varmistamiseksi. Työvaiheita olivat tukiseinän asennus ja sen tiivistys suihkuinjektioinnilla sekä kallioperän tiivistäminen verhoinjektioinnilla. Tukiseinä vaihtoehtoja käsiteltiin muutama sekä pohjavedenhallintaa käytiin läpi, koska se liittyy olennaisesti syviin kaivantoihin. Erilaisten vuotokohtien tiivistäminen oli osa vesitiiviyden varmistamista.</p> <p>Lähteitä aiheeseen löytyi kirjallisuudesta jonkin verran, mutta suurin hyöty löytyi työvaiheisiin tehdyistä työ- ja laatu suunnitelmista sekä muista urakan asiakirjoista. Hankkeen suuruudesta johtuen näitä asiakirjoja löytyi hyvin urakoitsijan ja tilaajan toimesta. Ne olivat myös paremmin ajan tasalla ja yksityiskohtaisempia, kuin monet kirjallisuus lähteet. Suuri hyöty oli myös vertailukohtana käyttämäni aikaisempi työmaa, jossa oli paljon ongelmia liittyen aiheeseen. Työkokemuksesta oli hyötyä, ettei tarvinnut opiskella jokaista työvaihetta erikseen ja osasi ennakoida missä saattaa tulla ongelmia.</p> <p>Kaivannon vesitiiviyys ja pohjavedenhallinta onnistui työmaalla mielestäni hyvin. Urakka on vielä osittain kesken, mutta suurempaa riskiä vesitiiviyden kannalta ei enää ole tiedossa. Urakka antoi hyvää ja monipuolista kokemusta sekä lisätietoa erilaisista injektioinneista.</p>	
Avainsanat	Pohjavesi, injektointi, suihkupaalutus, vesitiivis kaivanto, tukiseinä

Author(s) Title	Jani Nyman Waterproof trench construction
Number of Pages Date	34 pages 29 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Infrastructural Engineering
Instructor(s)	Erkki Virtanen, Peab Infra Oy Kai Kouvo, Metropolia AMK
<p>The subject of this thesis is waterproof trench construction. The study focused on the West Metro, Urheilupuisto project's larger station trench. The study was done for Peab Infra Ltd, which acts as the general contractor for the project.</p> <p>The study went through the various stages and processes needed to ensure a waterproof trench. The steps included mounting the support wall and sealing it by jet grouting, as well as bedrock injection. A few retaining wall options were discussed and groundwater management was reviewed, as it is intrinsically linked to the deep pits. The sealing of various leaks was part of ensuring water resistance.</p> <p>Sources for the subject were found in literature to some extent, but the greatest benefit was found in the stages of work carried out and the quality of the plans and other contract documents. Because of the magnitude of the project, these documents were amply found by the contractor and the subscriber. They were also more up-to-date and more detailed than many literature sources. A comparison with former construction site which had a lot of problems related to the topic was also very beneficial. Work experience was useful, every stage did not need to be studied separately and potential problem areas could be predicted.</p> <p>Trench water resistance and the ability to control the groundwater at the site succeeded well. The construction project has not been completed yet, but no greater risks in terms of water resistance exists any longer. The contract gave a good and varied experience, as well as additional information on the various injection methods.</p>	
Keywords	Groundwater, injection, jet grouting , waterproof trench, retaining wall

Sisällys

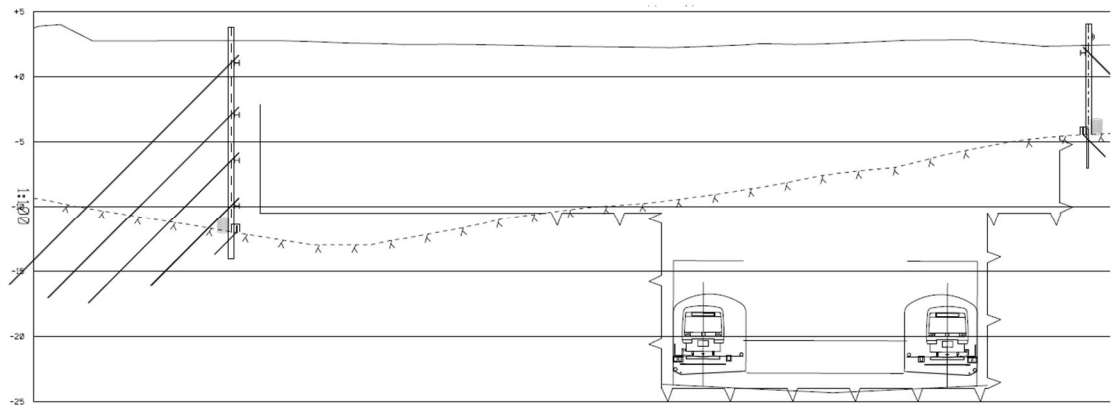
1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön taustaa	1
1.2	Tavoitteet ja rajaus	1
1.3	Yleistä	2
2	Pohjaolosuhteet	3
3	Tukiseinä	4
3.1	Teräsponttiseinä	4
3.2	Porapaaluseinä	6
3.3	Kaivinpaaluseinä	7
3.4	Tukiseinä	8
4	Suihkuinjektointi	9
4.1	Suunnittelu ja tekniikka	10
4.2	Työvaiheet	11
4.3	Tuotannon hallinta	12
4.3.1	Materiaalit ja kalusto	12
4.3.2	Seuranta ja poikkeamat	12
5	Verhoinjektointi	14
5.1	Suunnittelu ja tekniikka	14
5.2	Työvaiheet	16
5.3	Tuotannon hallinta	16
6	Ongelmakohdat	17
6.1	Ankkurikotelot/-reiät	17
6.2	Ponttiseinän ja kallion väli	20
6.3	Kalliopohja	21
7	Pohjaveden hallinta	22
7.1	Pohjaveden alentaminen	22
7.2	Seuranta	23

7.3 Pohjaveden imeytys	23
8 Yhteenveto	25
Lähteet	29
Liitteet	
Liite 1. Liitteen nimi	
Liite 2. Liitteen nimi	

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön taustaa

Opinnäytetyö tehdään Peab Infra Oy:lle, joka toimii tällä hetkellä pääurakoitsijana Länsimetron Urheilupuiston työmaalla. Urheilupuiston metroasema sijoittuu nimensä mukaisesti Tapiolan Urheilupuistoon, Barona Areenan (Espoon Bluesin kotihalli) läheisyyteen. Urakassa kaivetaan asemakaivanto, joka on pinta-alaltaan kolmen jalkapallokentän kokoinen ja syvimmillään noin 18 metriä. Jatkourakassa avolouhinnan jälkeen syvyys maanpinnasta on noin 30 metriä.



Kuva 1. Periaatekuva Urheilupuiston asemasta (GE 709_003 URP)

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on kartoittaa menetelmiä ja riskejä liittyen asemakaivannon vesitiivyyden varmistamiseen. Työssä selvitetään työmenetelmiä eri riskien estämiseksi sekä niiden toteutuessa. Urakkaan sisältyy myös ajotunnelin maanrakennustyöt, mutta opinnäytetyössä keskitytään suurempaan asemakaivantoon.

Tavoitteena on saada tietoa työmenetelmistä vesitiiviin kaivannon varmistamiseksi sekä vaihtoehdoista joiden avulla pystytään reagoimaan työmaatilanteessa kun kohdataan ongelmia pohjaveden kanssa.

Urakka on alkanut toukokuussa 2011 ja sen on tarkoitus valmistua kesällä 2013. Insinööriyötä tehtäessä esityöt vesitiivyyden varmistamiseksi, kuten suihkupaalutus ja verhoinjektointi on pääosin tehty. Maankaivua päästään seuraamaan, mutta se ei tule valmistumaan kokonaan. Insinööriyön aikataulun ja urakan rakennusvaiheiden myötä tullaan riskeissä keskittymään kaivannon pohjan tiiveyteen, sekä ongelmiin kaivun lähestyessä alimpia tasoja.

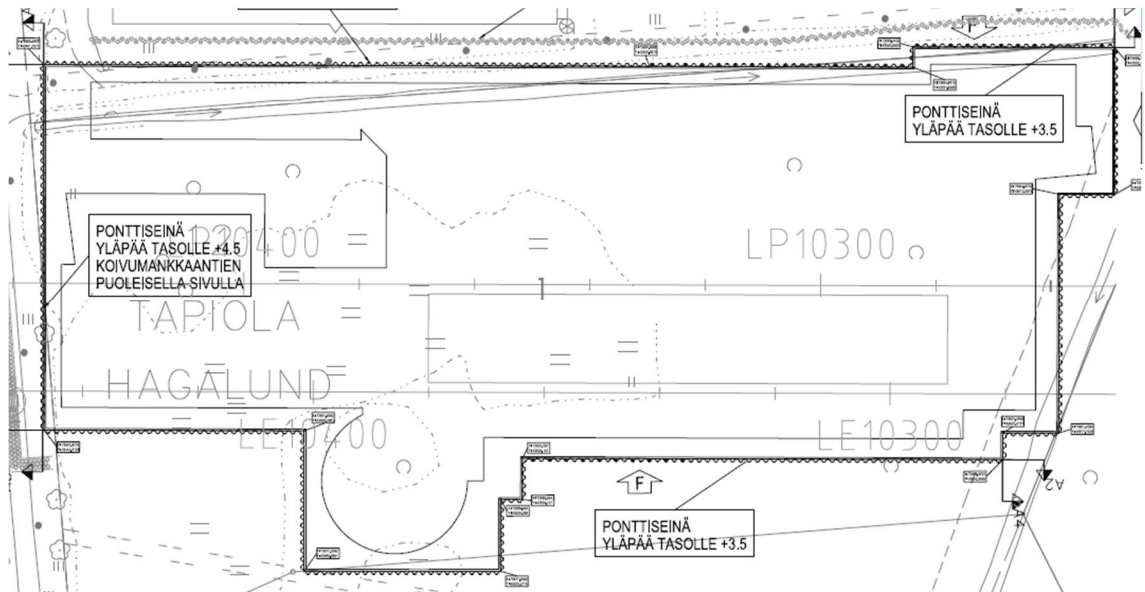
1.3 Yleistä

Asema ei ole kallioasema, kuten muut länsimetronasemat(3). Rakentaminen toteutetaan maankaivuna ja avolouhintana. Peab Infran urakkaan kuuluu aseman maankaivu sekä sitä varten toteutettava tukiseinä. Tukiseinä toteutetaan ankkuroituna ponttiseinä, joka jäykistetään syvemmillä osuuksilla porapaaluilla.

Maankaivun edetessä tulee pohjavesi kaivannossa pitää kaivutason alapuolella, jotta vältetään pohjan hydrauliselta murtumiselta. Pohjavesi on alueella ylhäällä ja kaivannon rakentaminen ei saisi vaikuttaa ympäristöön, koska mm. viereisen rakennuksen lattia on perustettu maanvaraisesti (1). Jotta pohjavettä voidaan alentaa ja kaivua päästä suorittamaan, tulee tukiseinän olla mahdollisimman vesitiivis sekä pohjaveden hallinta järjestelmät kunnossa. Näiden asioiden varmistamiseksi tarvittaviin työmenetelmiin (mm. suihkuinjektointi, verhoinjektointi ja pohjavedenimeytys) perehdytään tässä opinnäytetyössä.



Kuva 2. Ilmakuva työmaasta, vasemmalla mm. Barona- ja Esport-areenat (3).



Kuva 3. Urheilupuiston asemakaava (GE 703_001 URP), Pontitettava alue on noin 70m x 200m.

2 Pohjaolosuhteet

Asemakaivanto sijoittuu tasaiselle peltoalueelle. Kaivanto sijaitsee paksun savikerrostuman alueella. Kuivakuori on alueella ohut, jonka alla on erittäin pehmeää savista liejua. Tämän alla on lihavaa savea. Savikerrostuman alla on kitkamaakerrostuma, joka enimmäkseen on suhteistunutta moreenia. Moreeni on heikosti vettä läpäisevää. Moreenissa on jonkin verran kiviä ja lohkareita. Kitkamaakerroksessa on yhdessä näytepisteessä havaittu ohut kerros soraista hiekkaa. Työssä tulee varautua myös laajempaan vettä johtavaan kerrokseen. Kallion pintaosa on paikoin erittäin rikkonaista.(1.)

Maanpinnan korkeus vaihtelee alueella tasojen +2 ja +4 välillä. Kuivakuorisavea alueella on noin 0,5 m ja löysää savea 5-10 m. Moreeni kerros vaihtelee 1-6 m välillä. Kallio tai kivi on saavutettu 5-15 metrin päässä maanpinnasta.(2.)

Pohjavedenpinnan tarkkailua varten on rakennusalueiden ympäristöön asennettu pohjavedentarkkailuputkia. Pohjavedenpinta kaivannon ympäristössä on melko tasainen ja suurin osa kaivannon välittömässä läheisyydessä olevista pisteistä on vaihdellut välillä +1.8...+2.3. Pohjavedenpinnan korkeusasemaa tullaan tilaajan toimesta tarkkailemaan myös työnaikaisesti, mutta urakoitsija täydentää rakennuttajan tekemää pohjavesitarkkailua.(1.)

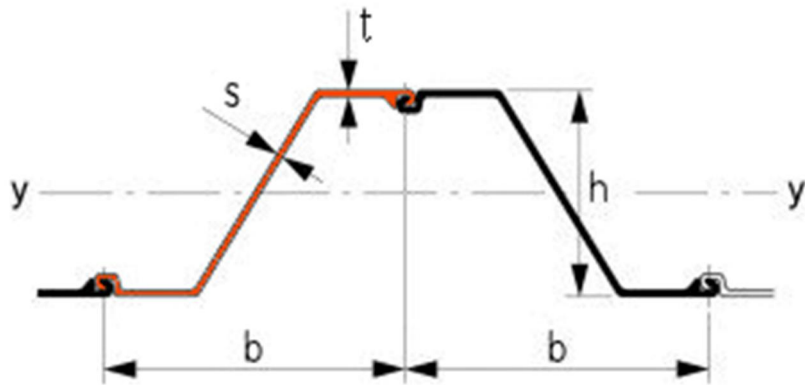
3 Tukiseinä

Mitä tahansa kaivantoa suunniteltaessa on mietittävä tuentamenetelmät, millä rakentaminen tullaan toteuttamaan. Urheilupuiston asemakaivannon rakentamisessa on otettava huomioon rakennusajan pituus, jolloin tukiseinä tulee mitoittaa pysyväksi rakenteeksi. Alueella aivan kaivannon läheisyydessä sijaitsevan tennishallin lattiat ovat perustettu maanvaraisesti, jolloin ympäristön painumien seuraukset korostuvat. Lisäksi alueella oleva korkea pohjavedenpinta lisäävät tukiseinän vesitiiviiden tärkeyttä. Tuetaan on ollut vaihtoehtoina teräsponttiseinä, kaivinpaaluseinä tai porapaaluseinä. Myöhemmät kaksi erityisesti kaivannon syvimmillä ja vaatimilla osuuksilla.(1.)

3.1 Teräsponttiseinä

Teräsponttiseinä on yleisimmin Suomessa käytetty tuentaratkaisu kaikissa vähänkään syvemmissä kaivannoissa, missä esimerkiksi kaivannon luiskaaminen ei ole vaihtoehtona. Ponttiseinä on rakenne, jossa teräsprofiilit asennetaan kiinni toisiinsa niiden ponttilukkorakenteella. Teräsprofiileja voidaan käyttää myös lyömällä ne maahan vierekkäin, mutta ponttiinsa asentamalla seinästä tulee käytännössä vesitiivis. Lisäksi seinän ollessa yhtenäinen sen taivutusvastus kasvaa huomattavasti.

Ponttiprofiileja on erilaisia ja niistä yleisimmin käytetty on U-profiili. Kaivannon koon ja sitä kautta tukiseinän vaatimukset mahdollistavat myös raskaamman Z-profiilin käytön. Z-profiilin etuna tässä tapauksessa on sen suurempi taivutusvastus ja parempi upotusjäykkyys.



Kuva 4. Z-teräsponttiprofiili (5)

Ponttiseinän asentamiseen on useita eri tapoja mm. täryttäminen, lyöminen ja painaminen. Yleisin suomessa käytetty menetelmä näistä on täryttäminen. Tämä on myös tässä urakassa käytettävä tapa jo pelkästään rakennusselostuksen perusteella: Ponttien lyömiseen tulee käyttää korkeataajuusvasaraa (1).

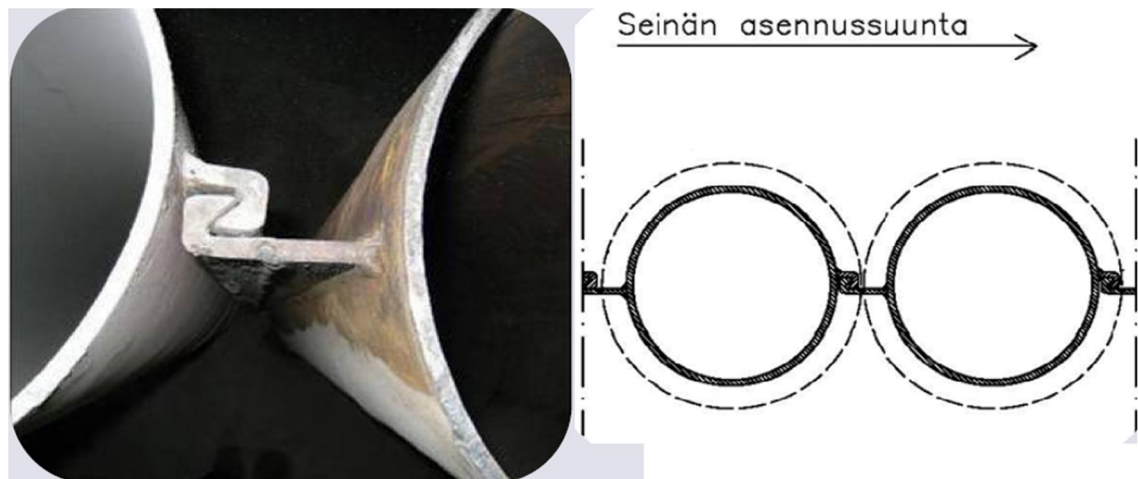


Kuva 5. Ponttiseinän asentamista Urheilupuiston työmaalla (3)

Ponttiseinää asennettaessa riskeinä ovat mm., että pontteja ei saada asennettua haluttuun tavoitesyvyyteen. Tällöin pontin ja kallion väli vaatii enemmän tiivistystoimenpiteitä ja riskit kasvavat. Pontteja lyötäessä on erityistä huomiota kiinnitettävä myös siihen, että pontit pysyvät koko ajan suorassa. Ponttiseinällä on usein tapana lähteä kallistumaan asentamissuuntaansa. Ponttiseinän kallistuminen kertaantuu eteenpäin mentäessä, joten seuranta jokaisen pontin kohdalla on tärkeää. Korjaustapana on usein uusi aloitus jo lyötyjen ponttien viereen. Tällä tavalla ponttiseinään jää epäjatkuvuuskohta, jolla on erittäin suuri haittavaikutus ponttiseinän vedenpitävyyteen. (14.)

3.2 Porapaaluseinä

Porapaaluseinä on viime vuosina kehitelty uusi tukiseinäratkaisu, jossa porattavien teräspaalujen sivuihin hitsataan vastaava lukkorakenne kuin teräsponttiseinässä. Paalut porataan vierekkäin pontteihinsa niin, että lyhyempi lukko on asennussuuntaa kohti. Porapaalun alapäässä oleva avarrinkruunu tekee tilaa paalun ympärille, jotta paalun kyljessä olevalle lukollekin on tilaa. Seuraavan paalun toinen lukko voi olla pidempi, koska sille on kaksin verroin tilaa kts.kuva 6.



Kuva 6. Porapaaluihin hitsatut lukot ja esimerkki kuva.(15)

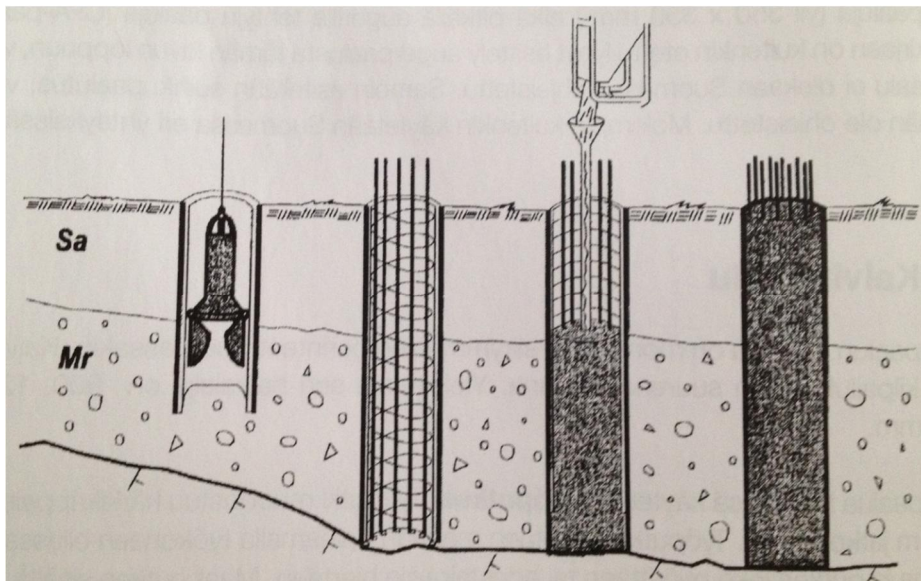
Porapaaluseinän etuna on sen asennettavuus hankalaankin maaperään sekä varmuus kalliokontaktista ja alapään asennustasosta. Nämä asiat poistavat riskejä ja antavat lisätietoa edesauttamaan rakentamista. Asennusta ei estä kivinen maaperä ja porapaalut saadaan porattua suoraan kallioperään. Tähän asti olleissa kohteissa

porapaaluseinä on asennettu yleensä noin 1-2 metriä kallioon. Koska porapaaluseinän alapää on kalliossa poistaa se myös tarpeen seinän alapään ankkuroimiseen/ juuritappien tekemiseen, verrattuna ponttiseinään.(15.)

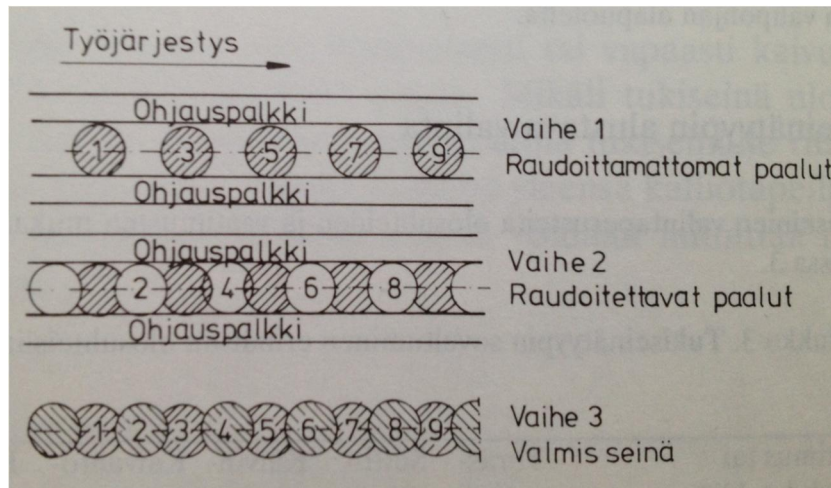
Porapaaluseinää voidaan käyttää tukiseinän lisäksi myös perusrakenteena. Tämä antaa jatkorakentamiselle uusia suunnittelumahdollisuuksia.

3.3 Kaivinpaaluseinä

Kaivinpaalua tehtäessä maahan upotetaan työputki, jota tyhjennetään erikoiskauhoilla tai ruuviporalla poraten. Maan ollessa kivistä käytetään erikoisporia tai raskaita meisseleitä pohjan möyhentämiseen. Kun halutaan parantaa kalliokontaktia, voidaan samoin menetelmin tehdä syvennystä kallionpintaan. Putken ollessa tavoitesyvyydessä tyhjennetään se kokonaan ja pohja puhdistetaan huolella. Tyhjään työputkeen asennetaan valmis raudituskehikko, jonka jälkeen se valetaan täyteen betonilla. Valun edetessä työputkea nostetaan ja lyhennetään samalla.(4.)



Kuva 7. Kaivinpaalun valmistus (Pohjarakennuksen perusteet, s.96)



Kuva 8. Kaivinpaaluseinä (RIL 181-1989, s.31)

Kaivinpaaluseinä muodostuu limittämällä vierekkäisiä paaluja. Paaluista vain joka toinen raudoitetaan.(6.)

3.4 Tukiseinä

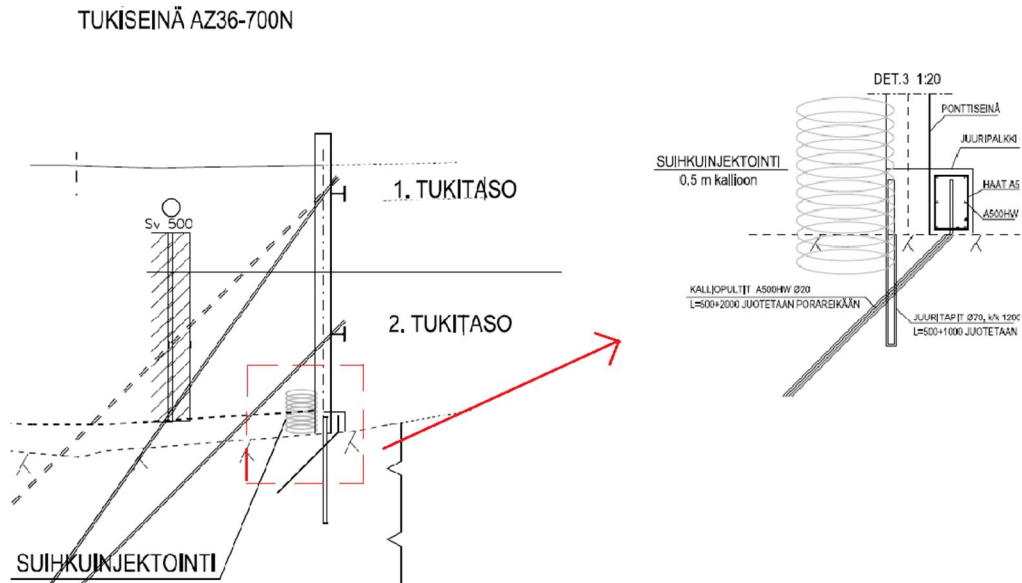
Tukiseinäratkaisuksi kaivantoon tuli teräsponttiseinä vahvistettuna porapaaluilla syvimmillä osuuksilla. Ponttiseinän etuina verrattuna porapaaluseinään tai kaivinpaaluseinään on sen nopeampi asentaminen. Ponttiseinä on vaihtoehtoista kevyin ratkaisu ja kustannuksiltaan huomattavasti edullisempi kuin muut kaksi vaihtoehtoa.



Kuva 9. Kuvassa tukiseinäosuutta, joka on vahvistettu porapaaluilla

4 Suihkuinjektointi

Suihkuinjektoinnilla on tarkoitus varmistaa ponttiseinän ja kalliopinnan välisen alueen vesitiiveys. Pontin alapää ei aina saavuta kalliopintaa, eikä siitä huolimatta ole välttämättä vesitiivis. Menetelmässä porataan erikoisporatanko haluttuun syvyyteen. Tangon kärjessä olevan suuttimen kautta voidaan korkeapainesuihkulla leikata ja osin syrjäyttää maakerros, johon suihkupaalu halutaan. Alaspäin porattaessa käytetään vesi- tai sementtilaastileikkausta ja ylöspäin nostettaessa sementtilaastisuihkutusta. Pyörittämällä ja hitaasti nostamalla poratanko saadaan maahan muodostumaan pyöreä maabetonipilari, suihkuinjektointia kutsutaan myös suihkupaalutukseksi. (1, 4.)



Kuva 10. Suihkuinjektointin periaate ja detajli (GE 709_002 URP)

4.1 Suunnittelu ja tekniikka

Suihkuinjektointipilarit toteutetaan k/k 0,7m välein ja niiden teoreettinen halkaisija tulee olemaan 1 m. Pilareiden pituus riippuu pontin alapään ja kallion välisestä etäisyydestä. Suihkuinjektointia aloittaessa pontin alapään taso on tiedossa. Esireikää porattaessa saadaan selville kallionpinnan taso (mikäli kallion rikkonaisuudesta tai muusta johtuen porarilla ei ole varmuutta kallion tasosta otetaan yhteys tilaajaan). Esiporaus suoritetaan ponttiin valmiiksi hitsatusta työputkesta ja ulotetaan 1 m syvyydelle kallioon. Suihkuinjektointi aloitetaan 0,5 m kalliopinnan alapuolelta. Pilarin tekemisessä käytetään 400 baarin painetta ja 1.0 vesi-sementtisuhdetta. Sementtiä suihkutetaan noin 700–900 l/m. Todellinen määrä määritellään koetulosten avulla. Teoreettinen volyyymi/m on $0,52 \times \pi \times 1 = 785 \text{ l/m}$.

Suihkuinjektointimenetelmänä tilaaja on esittänyt ”primääri-sekundääri” -menetelmää, jossa pilareista suoritetaan ensin esim. joka kolmas pilari ja 24h kovettumisen jälkeen näiden ensiksi tehtyjen väliin seuraavat ja niin edespäin. Urakoitsija aikoo ensisijaisesti käyttää ”fresh to fresh” -menetelmää, jossa suihkuinjektointi toteutetaan vierekkäisiin reikiin ilman 24h kovettumisaikaa. Sementtilietteen takaisinvirtaus tapahtuu edellisestä työputkesta ja näin varmistetaan pilariseinämälle mahdollisimman hyvä tiiveys ja yhtenäisyys.

4.2 Työvaiheet

- Ennen ponttien asennusta hitsataan kiinni työputki 139,7x3,6. Putki hitsataan kiinni jokaiseen ponttiin 0,7 m välein. Lisäksi pontin alapäähän hitsataan vahvempi putki 139,7x10 joka täytetään betonilla. Tämä siksi, että vältetään työputken rikkoontuminen alas lyötäessä.
- Hitsausten jälkeen pontti lyödään aina kovaan pohjamaahan asti korkeataajuusvasaralla.
- Esiporataan reiät jokaiselle suihkuinjektointipilarille. Reikä porataan vähintään D=115 mm poralla. Porausta ja injektointia ei voida tässä tapauksessa suorittaa samanaikaisesti, koska korvattavan maa-aineksen on päästävä ylös viereistä työputkea pitkin injektointia tehtäessä. Etukäteen poratut ja mahdollisesti tukkeutuneet reiät aukiporataan uudelleen.
- Koska injektointikärjessä sijaitsevat suuttimet ovat hieman porakruunua ylempänä, on injektointi aloitettava 0,5 syvältä kalliosta. Tämän vuoksi esiporaus suoritetaan vähintään 1 m kalliioon. Jos ollaan epävarmoja kallion pinnasta, otetaan yhteyttä tilaajaan ja pyydetään ohjeita jatkotoimenpiteisiin.
- Suihkupilarit tehdään pääasiassa "fresh to fresh" -menetelmällä, jotta saavutetaan paras mahdollinen tiiveysaste kallion ja pontin alapään välille. Jos takaisinvirtausta ei synny edellisestä tehdystä pilarista (suihkutus ei ole yhtenäinen), on tämä huomioitava ja arvioitava jatkotoimenpiteet.
- Jos "fresh to fresh" -menetelmä aiheuttaa ei-toivottuja riskejä, suihkutusta voidaan toteuttaa myös primääri-sekundääri-suihkutuksena.

(2)



Kuva 11. Teräsponttiprofiili, johon on hitsattuna työputket.(3)

4.3 Tuotannon hallinta

Ennen työn aloittamista tehdään koepilarisarjat, jotta saadaan määriteltyä sopivat injektointiparametrit. Koepilareita tehdään vähintään kolme kappaletta kullakin parametriyhdistelmällä. Paikaksi on valittava mahdollisimman hyvin alueen maaperä olosuhteita vastaava alue.

Taulukko 1. Koepilarisarjojen parametrit

parametrit	sarja 1	sarja 2
nousunopeus (cm/min)	38	30
pyöritysnopeus (r/min)	10	10
suutinkoko	2x3,5mm	2x3,5mm
paine (bar)	400	400
vesi-sementtisuhde	1,0	1,0
injektoinnin virtausnopeus (l/min) (teoreettinen)	n.266	n.266
sementtimäärä (l/m) (teoreettinen)	n.700	n.900

Koepilareiden testien perusteella valitaan sopivat parametrit, millä tuotanto aloitetaan.

4.3.1 Materiaalit ja kalusto

Injektointimassassa käytetään Portland-sementtiä ja vesijohtovettä, muita aineita ei saa käyttää. Käytettävä kalusto (2):

Koneet: Soilmec ja ABI
 2 kpl sekoittaja Tecniwell Twm 20
 2 kpl agitaattori, volym 3 m³
 2 kpl sillo, 25 t
 2 kpl triplex korkeapainepumppu, typ Tecniwell Tw 352.

4.3.2 Seuranta ja poikkeamat

Sementtilietteen paluuvirtaus ohjataan kaivettuun kuoppaan. Lietteen laatua ja määrää valvotaan koko ajan silmämääräisesti. Käytettävän sementtilietteen vesi-sementtisuhdetta tarkkaillaan joko Mud Balance -menetelmällä tai punnitsemalla 1 litran annos sementtilietettä.(1,2.)

Paluuvirtauksen loppumisen syy voi olla esim. tukos paluuputkessa, jolloin putki puhdistetaan 50-100 Bar injektointipainetta. Mikäli syynä ovat suuret onkalot tai korkea

hydraulinen johtavuus, pitää ottaa yhteyttä tilaajaan ja vastaavaan geoteknikkoon. Samoin toimitaan, mikäli paluulietteen laadussa havaitaan poikkeamia esim. tummaa lietettä → humuspitoinen maakerros.(1,2.)

Suihkutuksen keskeytyessä tulee työn jatkuessa suihkutusta limittää 10 cm. Mikäli työtä ei voida jatkaa 60 minuutin kuluessa, tulee limityksen olla 20 cm.

Jo tehtyjen suihkupilareiden lietteen tasoa työputkessa tulee tarkkailla. Pinnan korkeustason tulee pysyä stabiilina, ettei valmiissa pilareissa tapahdu poishuhtoutumista/eroosiota.



Kuva 12. Porattuja näytteitä valmiista suihkupaalutuksesta sekä kalliosta.(13)

5 Verhoinjektointi

Tähän mennessä käsitellyistä asioista ponttiseinä estää veden pääsyn maanpinnasta ponttien alareunaan sekä suihkuinjektointi pontin alareunasta kalliopintaan. Verhoinjektoinnilla tiivistetään kaivannon ympärystä kalliopinnasta alaspäin, tavoitteena estää veden kulkeutuminen kallioperästä kaivantoon. Ponttiseinän ulkopuolelle porataan syviä kallioreikiä määräväleihin, joista pumpataan sementtiä paineella kallioperään. Toimenpide toteutetaan koko kaivannon ympärille, jolloin kallioon saadaan muodostumaan tiivis "sementtiverho".

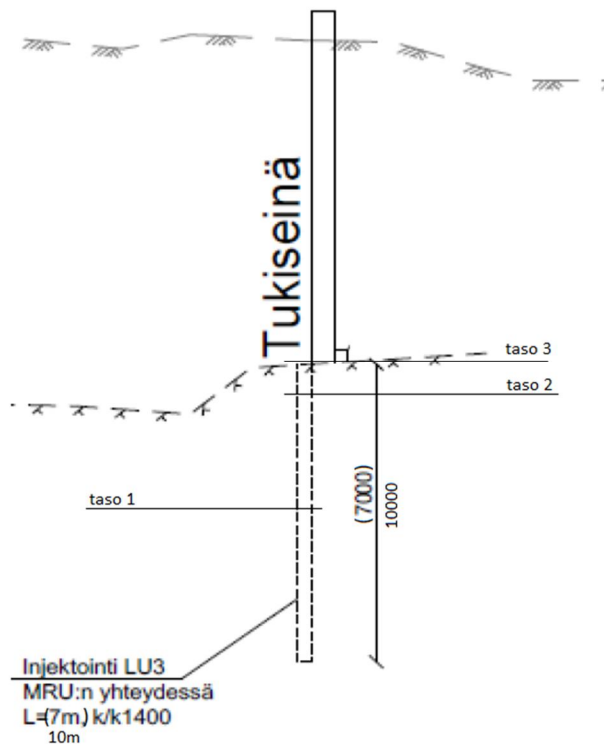
5.1 Suunnittelu ja tekniikka

Injektointia varten tehtävät kallioreiät porataan pääsääntöisesti samoista työputkista mitkä ovat asennettu suihkuinjektointia varten. Ennen verhoinjektoinnin aloittamista on suihkuinjektoinnin täytynyt saavuttaa riittävä lujuus, jotta se kestää verhoinjektoinnin aiheuttaman kuormituksen.

Ensimmäisessä vaiheessa injektoinnit suoritetaan k/k 2,8 m välein. Toisessa eli tiivistysvaiheessa injektointi suoritetaan riippumatta ensimmäisen vaiheen tuloksista samalla k/k välillä. Ensimmäisen vaiheen reikiin väliin niin, että lopullinen k/k väli injektioinneilla on 1,4 m. Mikäli tarvitaan lisätiivistämistä, niin kolmannessa vaiheessa suoritetaan injektointi jäljellä oleviin työputkiin (lopullinen väli 0,7 m).

Injektointireiät porataan 10 m syvyiseksi kalliopinnasta alaspäin (tilaajan vaatimus 7 m). Kallionpinnan taso on saatu selville suihkuinjektoinnin yhteydessä, kun on suoritettu esiporauksia.

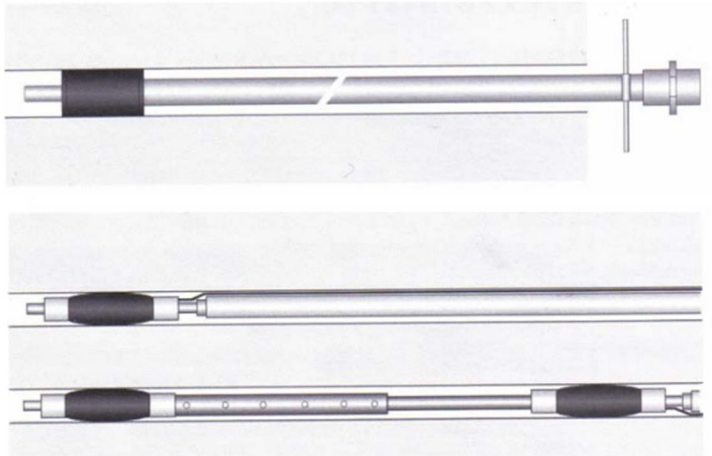
Kun reiät on porattu, tulee ne huuhdella vesiletkulla ja suorittaa vesimenekikoe. Vesimenekikokeessa kallioreikään tiivistetään mansetti. Mansetin läpi syötetään vettä niin, että saavutetaan 0,5 MPa korkeampi paine kuin pohjaveden paine. Tämän jälkeen aloitetaan mittaus, kuinka paljon vettä menee viiden minuutin aikana reikään. Mikäli reikä on tiivis, täytetään se sementillä, muuten aloitetaan injektointi. (1,7.)



Kuva 13. Verhoinjektoinnin poikkileikkaus (KR TAS_03 URP-A)

Injektointi suoritetaan reiän pohjalta ylöspäin kolmessa tasossa. Ensimmäisessä vaiheessa mansetti asetetaan 5 m kallioinnasta. Tällöin loppupaineen on oltava 2 MPa suurempi kuin pohjaveden paineen. Toisessa vaiheessa mansetti asetetaan metri kallioinnasta ja loppupaine täytyy olla 1 MPa. Viimeisessä vaiheessa mansetti asetetaan puoliksi työputkeen ja puoliksi suihkuinjektointiin, loppupaineen oltaessa 0,5 MPa.

Injektoinnit suoritetaan yksi reikä kerrallaan. Mikäli injektointi reikien välillä havaitaan yhteys, tulee reiät injektoida samanaikaisesti. Tämän takia injektointireikiä ei tule porata kerralla enempää kuin mitä kalustolla on mahdollista injektoida yhdellä kertaa. (1,7.)



Kuva 14. Erilaisia injektointimansetteja (12)

5.2 Työvaiheet

- 1) Porataan injektointireiät 1. injektointivaihetta varten.
- 2) Porausreikä huuhdotaan puhtaaksi vedellä viemällä letku reiän pohjalle.
- 3) Mitataan vesimenekin tasot injektointimenettelyn määrittämiseksi.
- 4) Injektoidaan määriteltyjen injektointikriteerien mukaisesti
- 5) Suoritetaan injektointivaihe 2:n sekä mahdolliset injektointivaihe 3:n poraukset.
- 6) Vaiheet 1–5 toistetaan, kunnes vaadittava tiiviys katsotaan saavutetuksi (7).

5.3 Tuotannon hallinta

Ennen töiden aloittamista injektointilaastille tehdään esitestaus kolmella eri vesisementtisuhteella. Jokaiselle laasti seokselle tehdään seuraavat testit (7):

- Marsh-kartio juoksevuuden tarkistamiseksi EN 445:2007/API Recommended practice 13B-1, Third edition, December 2003 standardin mukaisesti
- Suodatuspumppu tunkeumaominaisuuksien tarkastamiseksi standardin SS-EN 144497:2007 mukaisesti, mukaan lukien b_{krit} ja b_{min} -arviointi

- Mud balance -laite vesi-sementtisuhteen tarkastamiseksi standardin EN 445:2007 mukaisesti
- Veden erottuminen standardin SS 13 75 31 mukaisesti.

Testien perusteella valitaan sopiva laastiseos, joka täyttää laatuvaatimukset. Töiden edetessä testauksia tehdään joka injektointikerran yhteydessä sekä aina, kun otetaan vastaan uutta materiaalia. Lisäksi kaluston toiminnan tarkastuksia tehdään kerran kuukaudessa.(7.)

6 Ongelmakohtat

6.1 Ankkurikotelot/-reiät

Teräsponttiseinä on itsessään lähes vesitiivis, mutta koska ponttiseinä tuetaan ankkuroinnilla, tulee ponttiseinään reikä jokaisen ankkurin kohdalle. Yksittäisestäkin reiästä tuleva vesimäärä voi vuorokausi tasolla olla huomattava. Urheilupuiston asemakaivantoon tulee kuitenkin noin 500 kpl ankkureita, joten kaikkien ankkurikoteloiden tiivistäminen vaatii paljon miestyötä. Jokainen ankkurireikä ei vuoda ja varsinkin ylemmällä tukitasolla ei ole ollut suurempaa ongelmaa. Alimmille tukitasoille mentäessä vedenpaine ponttiseinän takana kasvaa ja kokemuksesta on huomattu veden ominaisuus hakea aina helpoin reitti. Useammasta vierekkäisestä ankkurista saattaa vuotaa vain yksi, mutta kun sen veden tulo saadaan loppumaan, siirtyy veden tulo seuraavaan ankkuriin jne. Vesi etsii koko ajan heikointa kohtaa ja vuoto ei välttämättä tule heti näkyviin, mutta kun vedenpinta ponttiseinän takana on päässyt nousemaan ja vedenpaine kasvamaan paljastuu taas uusia vuotoja.



Kuva 15. Vuotava ankkurikotelo (13)

Ankkurireikien tiivistämistä on alustavasti tehty hitsaamalla ankkurikotelot mahdollisimman tiiviiksi sekä tekemällä täyttövaluja koteloihin. Kotelot ovat kumminkin hankalia työstää ja näillä menetelmillä ei niitä saada täysin tiiviiksi. Työvaiheet lähinnä helpottavat lopullista tiivistämistä, joka tehdään injektoimalla. Injektointi voidaan tehdä normaalina sementti-injektointina tai kemiallisena injektointina käyttäen uretaanipohjaisia injektointiaineita.

Työmenetelmä molemmilla aineilla on sama. Ponttiseinään tehdään pieni reikä ja asennetaan nippa niin, että injektointi saadaan suoritettua ankkurikotelon taakse. Mikäli vedenvirtaus ja paine häiritsevät liikaa, voidaan injektointia helpottaa tekemällä toinen reikä alemmaksi. Vesi purkautuu luonnollisesti alemmasta reiästä, jolloin ylemmästä reiästä päästään injektoimaan ankkurikotelon tausta. Tämän jälkeen alempi nippa voidaan tukkia tai siitä voidaan jatkaa injektointia, mikäli nähdään tarpeelliseksi.



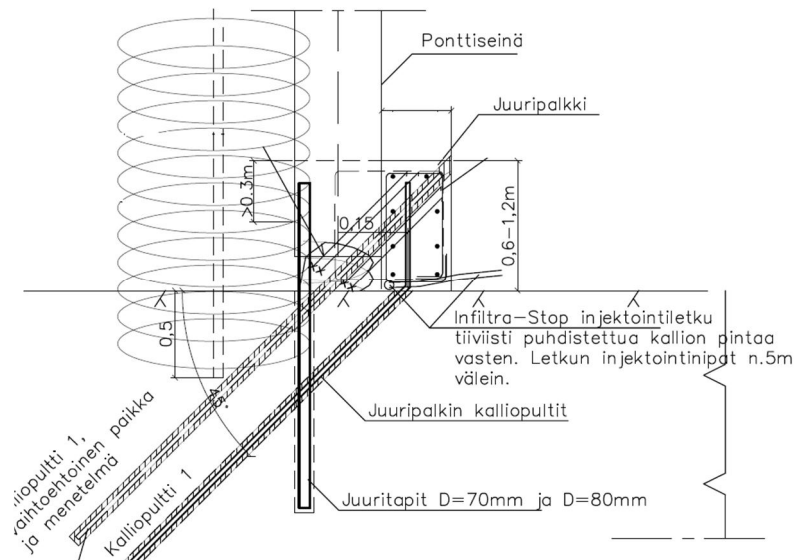
Kuva 16. Ympyröitynä on pari kappaletta injektointinippoja.(13)

Sementillä injektoitaessa laastista pitää tehdä melko jäykkää sekä käyttää kiihdytintä. Ongelmana on kuitenkin sementin hitaampi reagointi ja sitä kautta injektointilaastin huuhtoutuminen veden mukana pois. Etuna sementtiä käyttäessä on materiaalin edullisuus verrattuna kemiallisiin injektointiaineisiin. Vesivuodon ollessa reilumpi ei sementin käyttö onnistu.

Kemialliset injektointiaineet, joita käytetään vesivuotojen tukkimiseen, ovat pääasiassa uretaanipohjaisia. Niiden toiminta perustuu nopeaan reagointiin veden kanssa. Yleensä ne ovat kaksikomponenttiseoksia, jossa toinen komponentti toimii kiihdyttimenä. Kiihdyttimen määrällä injektointiaineen reagointiaikaa voidaan säädellä muutamista sekunneista minuutteihin. Injektointiaine on perusmuodossaan öljymäistä nestettä, kohdatessaan vettä aine reagoi ja muuttuu uretaanivaahdoksi. Reagoidessaan aine paisuu täyttäen alkuperäisen tilavuutensa moninkertaisesti. Kemialliset injektointiaineet ovat toimiva ratkaisu melko koviinkin vesivuotoihin.

6.2 Ponttiseinän ja kallion väli

Pontin alapäähän kalliopinnalle tehdään normaalitilanteessa betoninen juuripalkki. Ennen juuripalkin valua asennetaan injektointiletku kallion pinnalle pontin alapään viereen. Mikäli vesivuotoja tulee vielä valun jälkeen, pystytään ne injektoimaan letkun kautta helposti.

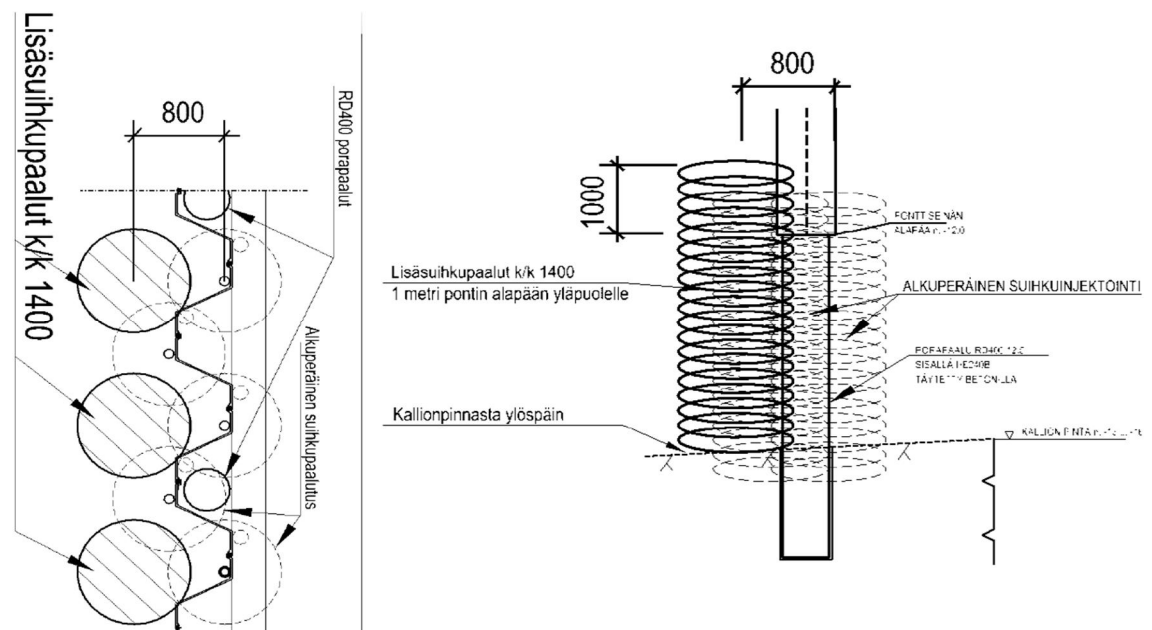


Kuva 17. Kuvassa on osoitettu injektointiletkun paikka juuripalkissa. (GE 709_010 URP)

Suunniteltu rakenne ei kuitenkaan onnistu silloin, kun pontit eivät ole saavuttaneet kalliopintaa. Juuripalkki voidaan toteuttaa lisäpultituksin ja -raudoituksin mikäli pontit ovat kalliopinnasta korkeintaan 1,5 metrin päässä ja suihkuinjektointi on onnistunut kyseisellä kohdalla.

Ponttien ollessa liian ylhäällä kalliopinnasta täytyy alueelle tehdä lisäsuihkupaaluja. Lisäpaaluja tehdään alkuperäisen suihkuinjektoinnin viereen vahvistamaan suihkupaaluseinämää. Työ toteutetaan nostamalla suihkupaalut metrin pontin alapäästä ylöspäin.

M



Kuva 18. Lisäsuihkupaalujen suunnitelma (GE TAS_018 URP)

6.3 Kalliopohja

Kuten luvussa 5 on kerrottu, on Urheilupuiston asemakaivanto verhoinjektoitu ympäriinsä. Verhoinjektoinnilla muodostetaan kallioon niin sanottu sementtiverho, joka on Urheilupuiston tapauksessa ainakin kymmenen metriä syvä, riippuen kuinka ja mihin suuntaan injektointi on kulkeutunut kalliossa. Verhoinjektoinnilla on estetty suurin veden liike kallioperässä, mutta siitä huolimatta saattaa pohjavesi päästä kaivantoon syvemmältä kallioperästä.

Tarvittaessa kalliopohjan tiivistäminen suoritetaan injektoimalla, johon vaihtoehtoina on etukäteen maanpinnalta suoritettava injektointi tai vasta kaivuun jälkeinen injektointi. Kaivannon sisäpuolella suoritettussa koepumppauksessa vedentulo tyrehtyi suurimmassa osassa putkista ja 90 % vedestä tuli yhdestä putkesta. Koepumppauksen aikana verhoinjektointi on ollut vielä osittain kesken, joten kaivannon tiiviyys tulee vielä parantumaan. Edellä mainitut asiat on ollut viitteenä siihen, että kalliopohja kaivannossa on suurimmalta osin tiivis ja etukäteen suoritettavaan injektointiin ei ole nähty tarvetta. Kalliopohjan injektointi tullaan arvioimaan kaivun edetessä kalliopintaan.

7 Pohjaveden hallinta

Pohjavettä tulee hallita kaivannon ulkopuolella, missä sen pinta ei saa päästä alenemaan sekä kaivannon sisäpuolella, missä sitä pitää alentaa. Pohjaveden alentamista kaivannossa ei saa aloittaa ennen suihku- ja verhoinjektointitöiden valmistumista. Tähän on poikkeuksena koepumppausten hyvät tulokset ja sitä kautta tilaajan lupa.

Kaivannon sisäpuolella pohjavettä alennetaan kaivutöiden edetessä. Pinnan alentamisella estetään hydrauliset murtumat kaivuvaiheessa. Saven ollessa vähemmän vesipitoista se ei myöskään ole niin löysää ja häiriintymisherkkää, jolloin sen käsittely helpottuu.

Kaivannon ulkopuolella pohjavettä imeytetään takaisin maaperään, jotta saadaan pohjaveden pinta pysymään ylhäällä. Pohjaveden aleneminen aiheuttaa ympäristön painumista. Mahdolliset painumat aiheuttavat vaurioita alueella olevissa rakenteissa ja rakennuksissa, kuten katu- ja viemäriakenteet tai aivan kaivannon läheisyydessä olevassa tennishallissa, jonka lattia on maanvaraisesti perustettu.(1,10,11.)

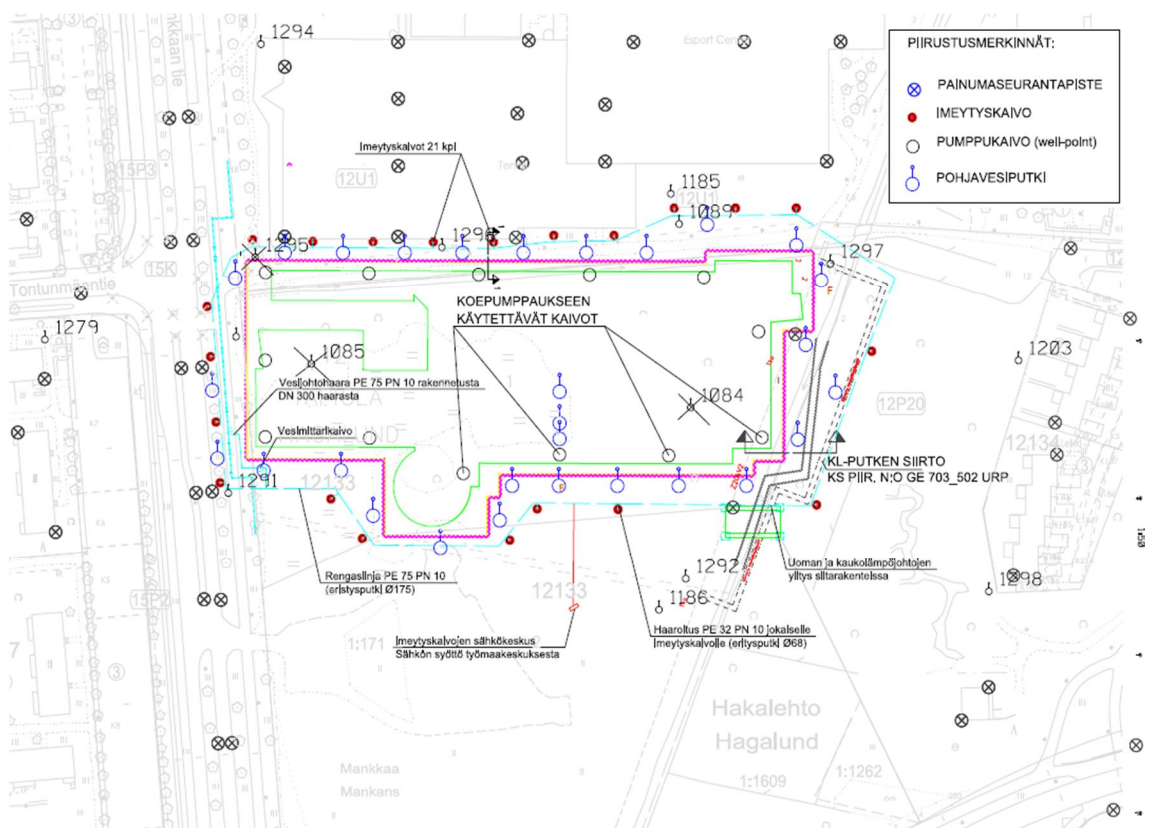
7.1 Pohjaveden alentaminen

Pohjaveden alentaminen toteutetaan kaivannon sisäpuolelle asennettavista putkikaivoista. Ennen kaivun ja pohjaveden alentamista tulee imeytysjärjestelmän olla toimiva ja testattu. Alkuvaiheessa tulee tehdä myös koepumppaus, jolla arvioidaan pumpattavia vesimääriä. Pohjavettä alennetaan kaivun edetessä pitämällä sen pinta aina kaivutason alapuolella. (1,11.)

Pumpattavat vedet tulee johtaa selkeytysaltaaseen ja sieltä läheiseen Mankkaan puroon tai mahdollisesti imeytykseen (1,11).

7.2 Seuranta

Pohjaveden hallintasuunnitelmassa on määritelty painumaseurantapisteet sekä pohjaveden tarkkailuputket, joista seuranta suoritetaan. Pohjavedenpintaa seurataan kaivannon sisä- ja ulkopuolella sijaitsevista tarkkailuputkista. Mahdollisia ympäristön painumia mitataan hieman laajemmalla alueella, mm. läheisen urheiluhallin lattia on painumaseurannassa. Seuranta toteutetaan tilaajaan ohjeiden mukaan päivittäin tai viikoittain. Seurantatulokset pohjavedenpinnasta sekä painumaseurantapisteistä toimitetaan tilaajalle, joka päättää jatkotoimenpiteistä mahdollisten painumien tai pohjaveden alenemisen tapahtuessa.(1.)

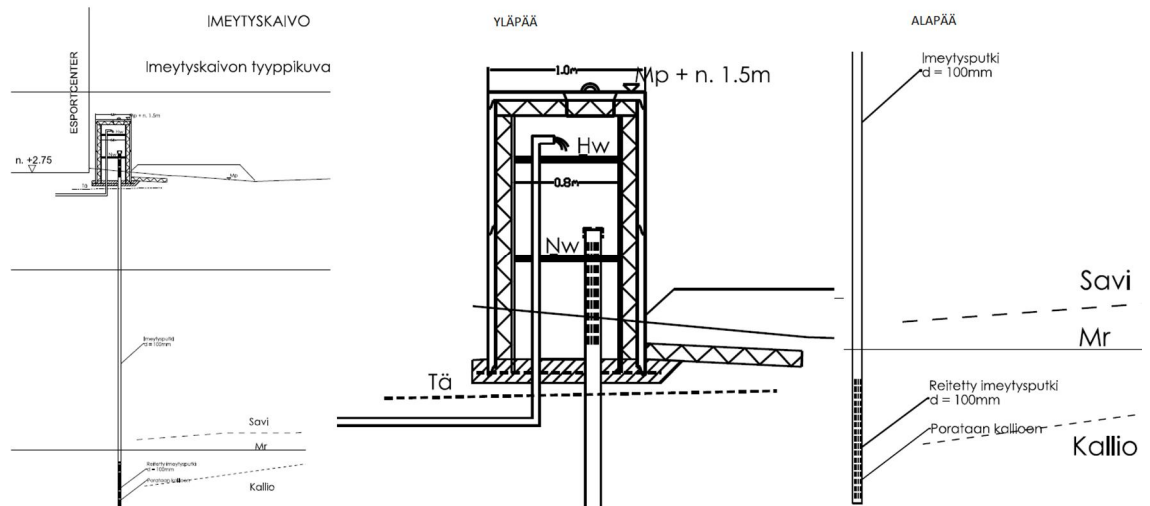


Kuva 19. Pohjaveden hallintasuunnitelman kuva (GE 703_501 URP)

7.3 Pohjaveden imeytys

Pohjaveden imeytyksellä pidetään pohjavedenpinta normaalilla tasolla ja korvataan kaivannosta pois pumpattua pohjavettä. Imeytysjärjestelmä koostuu 21 kappaleesta imeytyskaivoja, jotka on sijoitettu kaivannon ulkopuolelle. Imeytystä varten maahan

porataan imeytysputki, poraus ulotetaan 2 m kallion sisään. Imeytysputki on alapäästään rei'itetty 3,5 metrin matkalta. Yläpäässä maan pinnalla putken ympärille/päälle rakennetaan imeytyskaivo. Kaivojen sisällä on uimuriventtiilit, jotka ohjaavat vedensyöttöä pitäen vedenpinnan koko ajan 1 metrin maan pinnan yläpuolella.(9,10.)



Kuva 20. Imeytyskaivon periaate (GE 703_501 URP)

8 Yhteenveto

Ajatus opinnäytetyön aiheesta – vesitiiviin kaivannon rakentaminen – tuli melko luonnollisesti. Aikaisemmalla työmaalla oli ongelmia tukiseinän vesitiivyyden kanssa, mikä aiheutti paljon ongelmia. Nyt Urheilupuiston työmaalla oli tiedossa melko vastaavanlainen tilanne, mutta huomattavasti suuremmassa mittakaavassa. Työmaan suuruuden takia suunnittelussa oli jo otettu kaivannon vesitiivyyden varmistaminen eri tavalla huomioon ja oli mielenkiintoista päästä mukaan urakkaan, johon oli jo jonkinlaista vertailukohtaa edelliseltä työmaalta.

Tukiseinämistä itselläni oli kokemusta vain U-profiililla tehdyistä ponttiseinistä. Urheilupuistossa ponttiprofiilina käytettiin aikaisemmin mainittua raskaampaa Z-profiilia. Itse en päässyt näkemään ponttien asennusta, koska en ollut työmaalla heti alusta lähtien. Työmaalle tullessa olin kuitenkin hieman yllättynyt, kuinka niinkin suuri määrä ponttiseinämää on saatu lyötyä ilman kallistumisongelmia. Kaivun edetessä olen päässyt näkemään ponttiseinän alapään. Pontit ovat saavuttaneet hyvin kalliopinnan ja niissä on ollut vähän vaurioita ja vääntymistä, jotka lisäävät ongelmia asennusvaiheessa. Raskaampi profiili on kustannuksiltaan kalliimpi ja harvemmin käytetty, joten sitä ei yrityksillä välttämättä ole varastossa kuten yleisempää U-profiilia. Sillä on kuitenkin huomattavia etuja tukiseinän lopputuloksen kannalta. Vastaavanlaisissa urakoissa jossa tukiseinän vesitiiveys ja muutenkin onnistuminen on tärkeää, pidän Z-profiilin käyttöä ehdottomasti järkevänä.

Ponttiseinän alapään tiivistämisestä suihkuinjektoinnilla itselläni ei ollut aikaisempaa kokemusta. Edellisellä työmaalla suoritettiin maainjektointia kohdilla, jossa ponttiseinä oli jäänyt ylös kallionpinnasta. Tämän tulokset eivät olleet odotettuja ja Urheilupuistossa käytetyn suihkuinjektioinnin lopputulos on ollut huomattavan paljon tiiviimpi. Tähän mennessä kaivetuilla osuuksilla ponttiseinä on saavuttanut kalliopinnan niin, että en ole suihkupaaluja päässyt näkemään kaivannossa. Koeporausten näytteet (kts. kuva 12.) antavat kuitenkin hyvän kuvan onnistuneen suihkuinjektioinnin tuloksista. Suihkuinjektioinnin työmaalla suorittivat Peab:in ruotsalainen injektointiyksikkö, joka käytti luvussa 4 mainittua "fresh to fresh" -menetelmää.

Itselläni ei vertailukohtaa kohtaa tähän ole, mutta ruotsalaiset vakuuttivat tämän menetelmän toimivuuteen ja tulokset ovat ainakin olleet hyviä. Suihkuinjektointi yleisesti on mielestäni hyvä ja toimiva ratkaisu ponttiseinän alapään tiivistämiseen.

Alustavasti oli jo tiedossa, että kallio on kaivannon alueella osittain erittäin rikkonaista. Tämän takia verhoinjektointi oli tarpeellista kaivannon vesitiiviyyden varmistamiseksi. Työn edetessä injektointimäärät kasvoivat alkuperäisestä arviosta moninkertaiseksi. Verhoinjektointiin käytettiin yhteensä 700000 kiloa sementtiä. Injektointityötä tehneiden kanssa jutellessa, useampi sanoi työn tuntuneen välillä järjettömältä. Verhoinjektoinnilla on ollut kumminkin huomattava vaikutus kaivannon vesitiiviyyteen. Jatkourakassa kaivantoa jatketaan louhimalla ja tässä vaiheessa aikaisemmin suoritettut injektoinnit varmasti helpottavat jatkoa ja vähentävät injektointitarpeita myöhemmässä vaiheessa. Verhoinjektointi on tarpeellista, kun on tiedossa rikkonaista kalliota ja erityisesti kun rakentamista jatketaan kalliopinnasta alaspäin.

Pohjavedenhallintasuunnitelma oli myös huomattavasti kattavampi kuin edellisellä työmaalla, jossa suoritettiin alustavasti vain pohjavedenpinnan seuranta. Imeytyskaivoja rakennettiin valmiiksi ennen pohjaveden alentamista, jolloin reagointivalmius oli heti pohjavedenpinnan mahdollisesti alentuessa. Pohjaveden alentaminen kaivannon sisäpuolella onnistui hyvin. Pohjavedenpinnan seurannassa on työmaan aikana havaittu alentumisia mm. ankkurirei'istä tulleiden runsaiden vuotojen seurauksena. Imeytysjärjestelmää on käytetty onnistuneesti pitämään pohjavedenpintaa sallituissa rajoissa. Pinnan nouseminen on edellyttänyt vuotojen tukkimista.

Luvussa 6 mainituista ongelmakohtista ankkurikoteloiden tiivistäminen on edelleen käynnissä oleva prosessi. Kaikkia ankkuritasoja ei ole vielä tehty ja tulevat ankkurit ovat luonnollisesti alemmilla tasoilla, jossa vedenpaine on korkeampi. Tiivistämistä on tehty injektoinneilla eikä muutakaan ratkaisua ole tullut. Alemmille tasoille mentäessä on kemiallinen injektointi todennäköisesti ainoa vaihtoehto, ainakin ensi hätään.

Ponttiseinän ja kallion väliin on tähän asti kaivetuilla osuuksilla pystytty aina toteuttamaan juuripalkki. Syvemmillä osuuksilla, jossa oli havaittu ponttien ylösjäämistä, ei kaivua ole vielä suoritettu loppuun. Ongelma kyseisillä alueilla on tosin

poistunut suunnitelmamuutosten myötä. Luvussa 3 mainitsemani porapaaluseinää on toteutettu kahdella osuudella kaivannossa. Asennettua porapaaluseinää voidaan tarvittaessa hyödyntää jatkorakentamisessa.



Kuva 21. Ponttiseinän eteen tehtyä porapaaluseinää.(13)

Kalliopinnasta on tähän asti kaivettu esiin noin 70 %. Kalliopohja ei ole tähän mennessä edellyttänyt injektointeja. Kaivuun edetessä syvemmällä osuudella on joitain havaintoja tullut, että pohjasta saattaisi tulla vettä. Vesimäärät eivät ole estäneet kaivutöiden etenemistä. Mikäli pohjanvuotoa havaitaan kaivun jälkeen tai se alkaa haitata liikaa kaivutöitä, täytyy kalliopohjaa injektoida. Alustavasti sementillä, mutta suurissa vesivuodoissa voidaan kemiallista injektointia käyttää myös kallion injektoimiseen.

Kokonaisuudessaan Urheilupuiston asemakaivannon vesitiiviys ja sen edellyttämät rakennusvaiheet sekä pohjaveden hallinta ovat mielestäni onnistuneet hyvin. Verrattuna edelliseen työmaahan, ovat nämä asiat otettu huomattavasti paremmin huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Tämä mainitsemani edellinen työmaa oli myös Länsimetron hanke ja kuulin sen aikana muidenkin urakoitsijoiden ongelmista pohjaveden kanssa. Luulen siis myös Länsimetron organisaation viisastuneen projektin varrella ja tajunneen kaivantojen vesitiiviiden tärkeyden. Erityisesti sen huomioon ottamisen jo

suunnitteluvaiheessa, eikä vain mainintana urakkapapereissa. Nämä tietenkin ovat omia pohdintojani. Joka tapauksessa hyvin suunniteltu ja huolellisesti toteutetut työt kaivannon tiivistämiseksi takaavat helpomman jatko työskentelyn, koska jokainen ylimääräinen vesi litra haittaa ja hidastaa rakentamista.

Lähteet

- 1 Rakennusselostus LU3A MRU, Urheilupuiston ajotunneli ja asema, maanrakennusurakka, Länsimetro
- 2 Suihkuinjektioinnin työsuunnitelma, Peab Infra Oy
- 3 Länsimetro Oy:n kotisivut, <http://www.lansimetro.fi/>, luettu 29.4.2013
- 4 Pohjarakennuksen perusteet
- 5 ArcelorMittar, <http://www.arcelormittal.com/sheetpiling/>, luettu 29.4.2013
- 6 RIL 181-1989
- 7 Verhoinjektointimenetelmän kuvaus, Golder Associates
- 8 Työsuunnitelma; pohjaveden alentaminen, Peab Infra Oy
- 9 Urheilupuiston pohjaveden imeytys, hankekohtainen työselostus, Länsimetro
- 10 Imeytyskaivojen työsuunnitelma, Peab Infra Oy
- 11 Pohjaveden alentaminen työsuunnitelma, Peab Infra Oy
- 12 Kalliotilojen injektointi 2006 (By 53)
- 13 Jani Nyman, Urheilupuisto
- 14 Ponttiseinän asennusaikaisen kallistumisen estäminen, Sami Paavola 2011
- 15 SGY geotekniikan seminaari, kokemukset porapaaluseinistä, Ruukki

Liite 1

1 (1)

