



Jerry Myllymäki

# Ruiskubetonoinnin paksuudenhallinta uuden teknologian laitteilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikka (AMK)

Infrarakentaminen

Insinöörityö

5.4.2022

## Tiivistelmä

Tekijä:	Jerry Myllymäki
Otsikko:	Ruiskubetonoinnin paksuudenhallinta uuden teknologian laitteilla
Sivumäärä:	41 sivua + 0 liitettä
Aika:	5.4.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine:	Infrarakentaminen
Ohjaajat:	Lehtori Anu Ilander Kehitysinsinööri Janne Isomäki

---

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi YIT Suomi Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella tunnelin lujitustöissä käytettävän ruiskubetonin menekkiä ja sen hallintaa.

Opinnäytetyössä käytiin alussa läpi tunnelityön työvaiheet tiivistettynä, minkä jälkeen se syventyi märkäseosmenetelmällä toteutettuun ruiskubetonointiin. Työssä esiteltiin Normet Oy:n kehittelemiä automatisoituja ruiskutusjärjestelmiä ja niiden toimintaperiaatteita, sekä laserkeilaukseen perustuvaa paksuudenmittausjärjestelmää.

Työssä tarkasteltiin kolmea työmaata ja tehtiin laskelmia ruiskubetonimassan menekin osalta. Kahdella ensimmäisellä työmaalla ruiskubetonointi oli suoritettu perinteisillä menetelmillä ja kalustolla. Kolmannella työmaalla oli käytössä Normet Oy:n valmistama automatisoitunut ruiskutuskalusto. Työmaiden ruiskubetonimenekkiä tarkasteltiin ruiskutuspytäkirjoista saatujen todellisten käytettyjen massamäärien ja teoreettisten massamenekkien suhteella lasketulla hukkakertoimella. Yhteenvedossa luotiin katsaus työstä saatuihin tuloksiin ja arvioitiin minkä luonteiselle projektille uusimmalla automatiikalla varustettu ruiskutusrobotti olisi kannattava. Työn lopputuloksena saatiin tietoa automaation tuomista hyödyistä ja sen tuomista mahdollisuuksista.

Avainsanat: ruiskubetoni, tunnelin louhinta

## Abstract

Author: Jerry Myllymäki  
Title: Thickness Control of Shotcrete with new technology equipment  
Number of Pages: 41 pages + 0 appendices  
Date: 5 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Degree Programme in Civil Engineering  
Professional Major: Professional Major Environmental Construction  
Supervisors: Janne Isomäki, Development Engineer  
Anu Ilander, Lecturer

---

The client of this thesis was YIT Suomi Oy. The purpose of the thesis was to view the amount and control of shotcrete to be used in tunnel reinforcement work.

In the beginning of the thesis, the work steps of the tunneling were studied in a concise manner, after which wet mixture shotcreting was examined more deeply. Normet Oy's automated shotcrete robot systems as well as their operating principles and a thickness measurement system based on laser scanning were also described.

In the study, three construction sites were examined and calculations were made regarding the loss of shotcrete mass. On the first two sites, shotcreting had been performed using traditional methods and equipment. The third construction site used automated spraying equipment manufactured by Normet Oy. The sprayed concrete usage on the construction sites was compared with the waste factor calculated as the ratio of the actual amount of mass using both the spraying protocols and the theoretical amounts. The summary provides an overview of the results of the thesis and assessed the nature of the project for which the latest automation would be feasible and suitable for. As a result of the thesis, information about the benefits and possibilities of automation was obtained.

Keywords: Shotcrete, Tunnel mining

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tunnelinlouhinta ja päävaiheet yleisesti	2
2.1	Tunnelinlouhinta	2
2.2	Tunnelin peränajon päävaiheet	3
2.2.1	Esi-injektointi	3
2.2.2	Poraus	4
2.2.3	Panostus ja räjäytys	5
2.2.4	Lastaus	5
2.2.5	Kallionpinnan putsaus ja lujitus	6
3	Ruiskubetonoinnin perinteiset toimintatavat	7
3.1	Yleistä	7
3.2	Kalusto ja toimintaperiaate	8
3.3	Ruiskubetonimassan ominaisuudet	10
3.4	Ruiskubetonoinnin toteutus	12
3.5	Ruiskubetonoidun pinnan jälkihoito	15
3.6	Laadunvalvonta	17
4	Patterimäen tunnelin ruiskubetonointi	21
4.1	Vahvuusmittaukset ja toteutuneet vahvuudet	22
5	Tukholman E2-jätevesitunnelin ruiskubetonointi	25
5.1	Smedslättenin ruiskubetonointi	26
6	Ruiskubetonoinnin toteutus modernilla kalustolla	30
6.1	Normet SmartSpray	30
6.1.1	SmartSpray ProPlus toimintaperiaate	32
6.2	SmartSpray ProPlus kustannuksia	34
6.3	SmartScan toimintaperiaate	35
7	Förfart Stockholm moottoritieyhteys	37
7.1	Tukholman ohitustie	37

7.2 Normet SmartSpray ProPlus koekäytössä	38
8 Yhteenveto	39
Lähteet	1

## Tunnelitöissä käytettyä sanastoa

<b>Holvi:</b>	Tunnelin katto
<b>Hukkaroiske:</b>	Ruiskutettava betoni, joka ei tartu pintaan ja jää hyödyttömäksi. Koostuu pääosin betonin runkoaineesta.
<b>Katko:</b>	Kerralla louhittava tunneliosuus
<b>Komu:</b>	Heikosti kiinni oleva kivenmurikka kalliossa
<b>Perä:</b>	Tunnelin pääty
<b>Peränajo:</b>	Tunnelin teko yleisesti
<b>Porajumbo:</b>	Panostus-, injektointi-, ja pultinreikien poraamiseen tunnelissa tarkoitettu hydraulinen poravaunu
<b>Rusnaus:</b>	Louhitun kalliopinnan putsaamista irtonaisista kivistä, voidaan toteuttaa käsin tai koneellisesti

## 1 Johdanto

Ruiskubetonointi on yleisin menetelmä kallion ja tunneleiden lujitukseen, sekä se on ollut käytössä jo yli 100 vuotta lähes kaikissa kalliorakentamisen kohteissa. Vaikka ruiskubetonointia on kehitetty ja käytetty jo pidemmän aikaan, sen toteutusta ja kustannustehokkuutta on edelleen vietävä eteenpäin betonin hiilijalanjäljen ja kiristyvien suunnitteluvaatimusten takia.

Opinnäytetyön tilaajana toimi suomalainen rakennusalan yritys YIT Suomi Oy. Yhtiö on Suomen suurin rakennusalan yritys ja sen päämarkkina-alueet sijoittuvat Suomeen, Norjaan, Ruotsiin, Baltian maihin, Venäjälle, Tšekkiin, Puolaan ja Slovakiaan. YIT työllistää lähes 10 000 työntekijää ja toimii toimitila-, infra ja asuntorakentamisessa.

Rakennettavat tunnelit ovat monesti pitkiä ja niiden ruiskutukseen kuluu suuria määriä betonia. Ruiskutuksesta aiheutuva kimpoava hukkaroiske on onnistuttu minimoimaan materiaalikehityksen ansiosta, mutta betonikerroksen paksuudella ja sen hallinnalla on edelleen mahdollista saavuttaa suuret säästöt niin materiaalin kuin työn osalta. Yliruiskutus aiheuttaa valtavasti materiaalihukkaa ja liian ohueksi jäänyt kerros puolestaan vaatii aikaa vievän lisäruiskutuksen myöhemmin. Oikean paksuisen ruiskubetonipinnan ruiskuttaminen perinteisellä kalustolla perustuu suurimmalta osalta ruiskuttajan ammattitaitoon ja kokemukseen.

Työssä tarkasteltiin kehittyneen automatisoituneen kaluston tuomia vahvuuksia ja etuja. Työssä tutkittiin kolmea työmaata joista kahdessa ruiskubetonointi on toteutettu perinteisillä menetelmillä ja kolmannessa käytössä olleella lisäalustalla lähtöisin olevalla Normetin Oy:n SmartSprayPro+ automatisoidulla ruiskutuskalustolla.

Kysynnän takia Normet Oy on kehittänyt Smart-nimisen tuoteryhmän, jonka avulla ruiskun käyttäjävaikutus hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi on pie-

nempi. Opinnäytetyö pitää sisällään myös tietoa samaan tuoteryhmään kuuluvasta laserkeilaukseen perustuvasta mittausjärjestelmästä, joka on tehokas työkalu paksuudenhallintaan ja siitä saadun datan jatkokäsittelyyn.

Tietolähteinä työssä on käytetty alan kirjallisuutta ja eri verkkolähteitä. Työhön on myös kerätty aineistoa työmailta henkilöhaastattelujen avulla. Ruiskubetonointia on kahta eri menetelmää jotka ovat kuiva- ja märkäseosmenetelmä ja tämä opinnäytetyö käsittelee märkäseosmenetelmää.

## **2 Tunnelinlouhinta ja päävaiheet yleisesti**

### **2.1 Tunnelinlouhinta**

Tunnelilouhinta luokitellaan maanalaiseen louhintaan ja tunneleilla on lukuisia eri käyttökohteita. Infrarakentamisessa kallion sisälle on rakennettu mm. rautatie-, liikenne-, vesihuollon ja puolustusvoimien tunneleita. Tämän lisäksi kallion sisälle pystytään toteuttamaan väestönsuojia ja tiloja eri tarkoituksiin kuten varastoja. Maanalaiset kaivokset koostuvat myös pääosin tunneleista ja kuiluista.

Tunnelit jaetaan profiilikoon perusteella kolmeen luokkaan jotka ovat pienet-, keskisuuret- ja suuret tunnelit:

- pienet 2 - 15 m<sup>2</sup>
- Keskisuuret 15 - 100 m<sup>2</sup> (Kuva 1.)
- Suuret yli 100 m<sup>2</sup>

Tunnelilouhinnan toteutus tapahtuu yleisesti poraus-räjätysmenetelmällä. Poraus-räjätysmenetelmän työvaiheet ovat poraaminen, panostaminen, räjäyttäminen, tunnelin tuulettaminen, kiviaineksen lastaaminen ja kuljettaminen, kalliopinnan putsaaminen ja vahvistaminen. [2, s.215.]





Kuva 1 Tunneliprofiili Henriksdalin jätevedenpuhdistamon työmaalta. [15.]

## 2.2 Tunnelin peränajon päävaiheet

### 2.2.1 Esi-injektointi

Injektoinnilla tarkoitetaan kallion tiivistämistä, jossa pumpataan kallion sisään täyteainetta. Täyteaine pumpataan porareikiin, joista aine pääsee tunkeutumaan kallionrakoihin, mikä estää veden virtauksen kalliossa. Tunnelilouhinnassa esi-injektointi tarkoittaa kallion tiivistämistä ennen louhintojen aloittamista. Kaikista yleisin injektoinnissa käytettävä täyteaine on sementin ja veden sekoitus. Kalusto koostuu perinteisessä sementti-injektoinnissa pumpusta, vesisäiliöstä, välisekoittimesta, sekoittimesta ja injektointitulpasta eli mansetista. Injektointireikien poraukseen käytetään tavallisesti samaa porakalustoa kuin katkon porauksessa.

Esi-injektoinnin työsuunnitelmassa tulee olla injektioareikien poraustapa porauskaavioineen, reikien käsittelytavat, vesimenekikokeiden suoritus tapa, seosaineet ja seossuhteet, maksimipaineet, työn valvonta ja lopetus kriteerit. [5, s. 47-50.]

### 2.2.2 Poraus

Tunnelin porauksessa käytetään porajumboa (Kuva 2.). Porajumbon käyttäjä ajaa diesel- tai sähkökäyttöisen porajumbon tunnelin perälle, jossa työnjohtaja tai kuljettaja itse navigoi porakoneen asemiin. Porajumbo kytketään virtoihin sähkökaapelilla ja tulovesilinjaan liitetään vesiletku porauksen aikaista huuhtelua ja jäähdytystä varten. Peränajossa jumbossa on tyypillisesti 2 tai 3 puomia. Puomit toimivat sähkömoottoreilla ja niissä on hydrauliset tai ketjuilla toimivat syöttölaitteet joilla säädetään reikien syvyyttä ja suuntaa. Tunnelissa katkon pituus on tavallisesti 2-5 metriä.



Kuva 2 Tunneliprofiili porajumbon edestä kuvattuna. [15.]

Porakaavio laaditaan työmaainsinöörin toimesta tietokoneella ja siirretään porajumbon tietokoneelle. Porakaavion avulla katkon reiät saadaan porattua haluttuun suuntaan ja syvyyteen. Porari voi porata reiät manuaalisesti jolloin hän itse hallitsee porausta eli siirtää puomit seuraavaan reikään edellisen valmistuttua. Katko on mahdollista porata myös automaattilla, eli jumbo siirtää automaattisesti puomin seuraavaan porattavaan reikään. Automaattiporauksesta on nopea vaihtaa manuaaliseen poraukseen tilanteen vaatiessa. [2, s. 224.]

### 2.2.3 Panostus ja räjäytys

Tunnelilouhinnassa on käytössä usein putkipanoksia tai kallion sisään pumpattavia emulsiota. Emulsiolla panostettaessa käytetään siihen hyväksytyllä usein kahdella nostokorilla varustettua panostusajoneuvoa ja putkipanoksilla panostettaessa voidaan käyttää muitakin henkilönostimia. Emulsiolle tarkoitettu panostusajoneuvo asettaa sopivan panostusasteen reuna-, avaus ja pohjareikiin. Samalla ajoneuvolla pystytään tuoda panostettavaan kohteeseen räjäytukseen tarvittavat nallit, aloituspanokset ja matriisi. Ajoneuvossa matriisiin sekoitetaan kaasutusliuos, joka aiheuttaa matriisin herkistymisen räjähdysaineeksi vasta kun se on pumpattu porausreikään. Panostusajoneuvoon on myös tankattu vettä letkujen pesua ja voitelua varten. [2, s. 63, 245.]

### 2.2.4 Lastaus

Räjäytyksen jälkeen syntyvä kivimassa tulee lastata pois tunnelista jatkokäsittelyyn. Lastauksessa perinteisesti ensin kastellaan kivimassa pölyämisen estämiseksi. Työnjohtaja tai lastauksesta vastaava henkilö tilaa tarvittavan määrän kuorma-autoja kiertoon ja lastaaja lastaa kiviaineksen näiden lavalle. Kiviaineksen tilavuus tuplaantuu, kun se on räjäytetty irti kalliosta, joten yhden ammun jäljiltä jäänyt massa vaatii usein jopa usean kymmenen kuorma-auton hakemaan louhetta pois työmaalta. [7.]

### 2.2.5 Kallionpinnan putsaus ja lujitus

Louhinnan jälkeen kallionpinta puhdistetaan ja lujitetaan turvallisuussyistä. Kallion pinta rusnataan helposti irtoavista kivenmurikoista kaivinkoneeseen sopivalla rusnapiikillä tai hydraulisella vasaralla, jota kutsutaan rammeroinniksi. Kallionpinnan puhdistuksen jälkeen puhdas pinta lujitetaan. Kallionlujitustöitä tehdään työntekijöiden turvallisuuden takaamiseksi ja lopullisen rakenteen vahvuuksien ja standardien saavuttamiseksi. Peränajossa lujitus suoritetaan tunnelisyklin ja geologien kartoituksista saatujen laskelmien ja vaatimusten mukaan.

Tunnelin rakentamisessa yleisimmät lujitusmenetelmät ovat ruiskubetonointi, kallion pulttaaminen ja verkotus. Haastavissa ja suurempien lujitustarpeiden vaativissa kohteissa voidaan käyttää kallioankkureita ja erilaisia paikalla valettavia tukirakenteita. Ruiskubetonoinnin kehittyminen vuosien aikana on saanut valettavien tukirakenteiden tarpeen pienemmäksi, ja suuremmatkin tuennat pyritään toteuttamaan täyttämällä muotit ruiskubetonikalustolla.

Kallionlujityöt on mahdollista toteuttaa jälkikäteen erikseen toteutettuna, mutta tunneli- ja kalliorakennustöissä on usein taloudellisempaa toteuttaa lujitus louhinnan yhteydessä. Pitkään olleessa lujittamattomassa kalliossa on suuri mahdollisuus, että lämpötilan vaihtelut, kuormitukset ja vesi saavat aikaan halkeilua kallionpintaan. Kallionpintojen rakoilut puolestaan vaatii uudestaan perinteisen rusnauksen ja putsauksen ennen, kun päästään suorittamaan lujitus.

Tämän lisäksi taloudellisia ja teknisiä hyötyjä peränajon aikana lujittamisessa on, että louhintatyön suorittajalla on taloudelliset intressit tehdä hyvää jälkeä, jotta lujittaminen onnistuisi helpommin ja massamenekit pysyisivät pienempinä. Heikon louhintatyön tuomat mahdolliset jälkikustannukset jäävät rakennuttajan hartelle, mikäli lujitustöitä joudutaan suorittamaan jälkikäteen. [1, s. 322-323.]

### 3 Ruiskubetonoinnin perinteiset toimintatavat

#### 3.1 Yleistä

Ruiskubetonointia on kahta eri menetelmää joita ovat märkä- ja kuivaseosmenetelmä. Molemmissa menetelmissä betonimassa ruiskutetaan paineilmalla haluttuun kohteeseen. Märkäseosmenetelmä on 1950-luvulla saanut alkunsa Yhdysvalloissa ja menetelmä on tullut Suomessa käyttöön 1970-luvulla. Aluksi kyseinen menetelmä oli käytössä kaivoksilla, mutta 1990-luvulla se oli jo yleisin käytävissä oleva kallion vahvistusmenetelmä.

Ruiskubetonilla on kallionrakentamisen kannalta paljon vahvuuksia. Ruiskubetonilla voidaan lujittaa holveja sekä pystyleikkauksia (Kuva 3), sillä ominaisuuksiensa ansiosta se kantaa oman painonsa ja pysyy pinnassa kiinni. Hyvän tartunnan ansiosta ruiskubetonilla pystytään työstämään epätasaisia ja ahtaissa paikoissa olevia pintoja. Ruiskubetonointi on myös erinomainen siitä syystä, että se ei tarvitse muotteja ja sitoutumisaika on nopea, joka mahdollistaa töiden jatkamista nopeammin. [3, s. 30.]

Kallionlujituksessa ruiskubetonia voidaan käyttää raudoitettuna, raudoittamattomana, työnaikaisena ja lopullisena vahvistuksena. Työkohteesta riippuen ruiskubetonilta voidaan myös toteuttaa paksu vesitiivis rakenne tai ainoastaan kalliota sitova ohut pinnoite. Ruiskubetonoinnin ansiosta vaativat kallionrakennuskohteet ovat mahdollista toteuttaa teknisesti ja taloudellisesti. [1, s.323.]





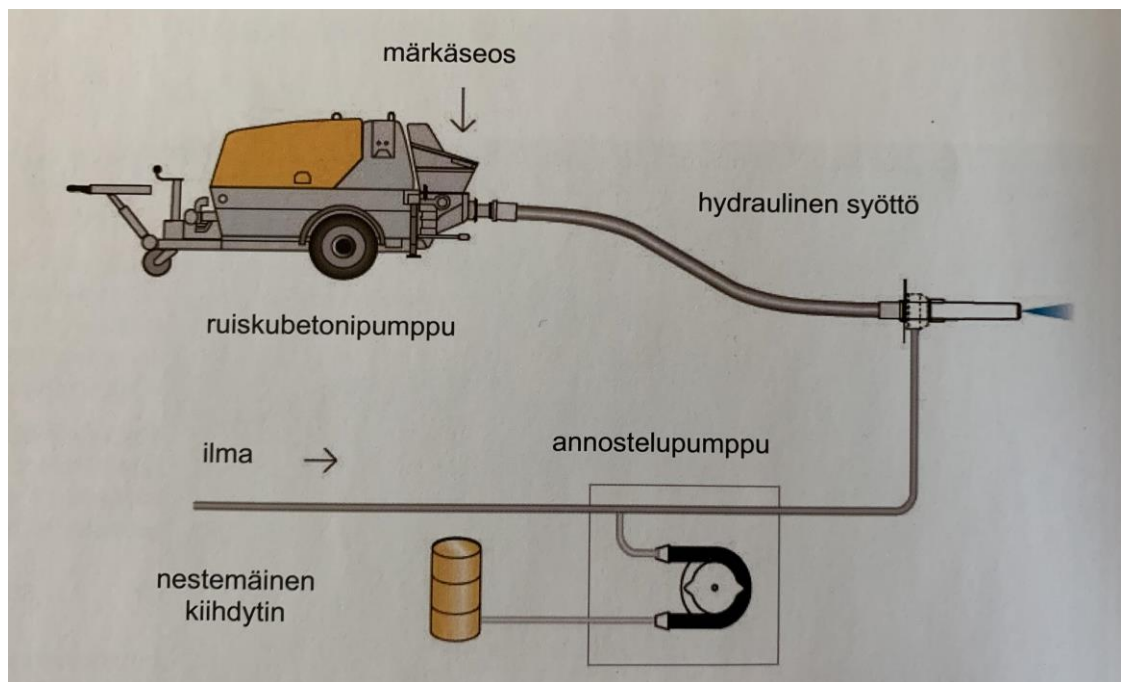
Kuva 3 Ruiskubetonointia vaijerisahattuun kallionpintaan Henriksdalin jätevedenpuhdistamon työmaalta. [15.]

### 3.2 Kalusto ja toimintaperiaate

Märkäseosmenetelmä on yleisesti käytettävä menetelmä laaja-alaisissa ruiskubetonointia vaativissa tunnelikohteissa. Yleisesti käytössä on ruiskutusrobotti (Kuva 5.), joka on pyörillä kulkevaan alustaan rakennettu ruiskutuskalusto missä

puomit ovat kauko-ohjattavat ja toimivat hydraulisesti. Tehokkain laitteisto mahdollistaa jopa 25 m<sup>3</sup>/h betonin siirtotehon. Ruiskutusrobottien avulla myös työturvallisuus ja olosuhteet ovat paremmat ja märkäseosmenetelmällä toteutettu ruiskutus mahdollistaa pienemmän hukkaroiske määrän, eli hukkaan menneen betonin. [4, s. 24-25.]

Märkäseosmenetelmän toimintaperiaatteessa käytetään valmista betonimassaa, joka sisältää runkoaineen, veden, sementin ja tarpeen mukaan seosaineet ja kuidut. Ruiskutettava betoni pumpataan letkun päässä olevalle suuttimelle mäntäpumpuilla missä seokseen lisätään paineilmaa ja kiihdytinainetta (Kuva 4). Kiihdytin aikaistaa massan sitoutumisen ja kovettumisen. Kiihdyttimen ansiosta ruiskutuskerrokset saadaan kerralla paksummiksi, mikä puolestaan vähentää odotusaikoja ja työt pystytään jatkamaan nopeammin. [1, s. 9.]



Kuva 4. Märkäseosmenetelmän toimintaperiaate. [4, s. 26.]

Paineilmalla on vaikutus hukkaroiskeen määrään. Ruiskutusteho sekä valittu kalusto määrittelevät tarvittavan määrän paineilmalle. Yleinen paineilman määrä ruiskutusta varten on 10...15 m<sup>3</sup>/min 700 kPa paineella.

Betonimassan siirtoon tarvittavaan paineilmaan vaikuttaa myös siirtoputkiston materiaali. Siirtoputkisto voi olla joustava tai teräksestä valmistettu putkisto. Joustava kumiputkisto vaatii painetta noin 75 prosenttia enemmän kuin teräksestä valmistettu putkisto ja niiden käyttö pyritään minimoimaan vain ennen suutinta olevaan linjan loppupäähän. Sisähalkaisijan tulee olla siirtoputkessa ainakin kolminkertainen massassa käytetyn runkoaineen maksimiraekokoon verrattuna. Ruiskutussuutin koostuu kumisesta tai muovisesta kärkiosasta, paineilman syöttörenkaasta ja kiihdyttimen syöttölaitteistosta. [4, s. 27-28.]

### 3.3 Ruiskubetonimassan ominaisuudet

Märkäseosmenetelmässä betonimassa valmistetaan yleisesti betonitehtaalla ja kuljetetaan työmaalle sekoitinsäiliöautossa. Betonin valinnassa on otettava huomioon, että se täyttää kaikki vaatimukset jotka ovat asiakirjoissa vaadittuja, niin tuoreen kuin kovettuneen betonin osalta.

Sementti on ratkaisevassa roolissa betonimassan ominaisuuksien kannalta. Sementtiä valittaessa on otettava huomioon rakenteelle asetetut vaatimukset kuten lujuudenkehitys, säilyvyys, kutistuminen ja sitoutumisaika. Ruiskubetonoinnissa suositellaan käyttämään CEM I ja CEM II tyyppisiä sementtejä jotka toimivat kiihdyttimien kanssa. Suuria varhaislujuuksia vaativissa kohteissa tulee käyttää nopeammin lujittuvia sementtejä. Sementtimenekki on suurta betonimassassa ja sitä tulee olla vähintään  $300 \text{ kg/m}^3$ , mutta tavallisesti käytetään  $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ . Vesi-sementtisuhde on tavallisesti 0,35-0,50 massasta riippuen.

Runkoaineena käytetään betonimassassa murskattua- tai luonnonkiviainesta, jos käytetään molempia, niin silloin kyseessä on yhdistetty runkoaines, mikä tavallisesti sisältää kahta tai kolmea eri lajitetta. Runkoaineen maksimiraekoko on tavallisesti 8 mm. Liian suuri raekoko aiheuttaa hukkaroiskeen lisääntymistä varsinkin vaakapinnoissa. Lisäaineiden käyttömahdollisuudet ovat hyvin pitkälti samat märkäruiskutuksessa kuin perinteisessä valubetonissa. Lisäaineilla perusseoksessa lisäaineiden osuus saa olla maksimissaan 5 % seoksen sisältämän sementin massasta. [4, s. 14-16, 35-37.]



Ruiskubetonin ominaisuuksiin pystytään vaikuttamaan monella eri tapaa lisäaineilla, joita esitellään alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Tavoitteet lisäaineiden ja seosaineiden käytölle ruiskubetonissa. [4, s. 16.]

Tavoite tai käyttötarkoitus	Mitattava ominaisuus	Lisäaine
Puristuslujuus Taivutuslujuus Säilyvyys	Betonin sitoutuminen ja lujuus	Vedenvähennys notkistavalla lisäaineella Seosaineet Kuidut Jälkihoitoaineet
Pumpattavuus Ruiskutettavuus	Työstettävyys <ul style="list-style-type: none"> <li>• notkeus</li> <li>• hukkaroiske</li> </ul>	Stabilaattorit Seosaineet Vedenvähennys notkistavalla lisäaineella
Lujuudenkehitys	Sitoutuminen ja kovettuminen	Ruiskubetonin kiihdyttimet Vedenvähennys notkistavalla lisäaineella
Työstettävyysaika	Avoin aika, notkeuden säilyttäminen	Sitoutumista hidastava lisäaine Notkeutta kontrolloiva lisäaine (pitkä avoin aika)

Ruiskubetonissa on mahdollista käyttää myös eri seosaineita kuten lentotuhkaa, jauhettua masuunikuonaa, silikaa ja kalkkikivifillieriä. Silika on edellä mainituista käytetyin seosaine. Ruiskubetonimassassa on tärkeää olla riittävästi hienoainesta ja seosaineilla pystytään kasvattamaan hienoainesosuutta sementin lisäystä edullisemmin, mutta kuitenkin osuus tulee olla 5...8 % sementin painosta.

Seosaineiden käytöllä voidaan myös vähentää hukkaroiskeita ja parantaa säilyvyysominaisuuksia.

Ruiskubetonimassan sitkeysominaisuuksien lisäämiseen käytetään erilaisista muovipolymeereistä valmistettuja kuituja sekä teräskuituja. Kuidut lisäävät betonirakenteen leikkaus- taivutus- ja vetolujuutta betoniin muodostuneiden halkeilun jälkeen vallitsevassa kuormituksessa, sekä lisää kestävyyttä toistuvalla veto ja puristuskuormitukselle. Käytettäessä teräs- tai polymeerisiä kuituja ruiskubetonimassan hienoainemäärän tulee olla suurempi kuin kuiduttomassa massassa, jotta ruiskuttaminen ja pumppaus onnistuvat. [4, s. 19-22.]

### 3.4 Ruiskubetonoinnin toteutus

Tiivistetysti ruiskubetonoinnin työjärjestys menee niin, että ensimmäinen vaihe on perusseoksen valmistus ja toimitus työmaalle. Seuraavaksi annostellaan kiihdytin ja suoritetaan ruiskutustyö, jonka jälkeen seuraa ruiskutuksen jälkihoito. [4, s. 58.]

Ennen ruiskutuksen aloittamista irtokivet tulee poistaa kallionpinnalta ja puhdistaa esimerkiksi painevesisuihkulla lopuista irtoaineksista ja kerrostumista. Pohjavesivuotojen ilmetessä ne tulee ohjata pois ruiskubetonisalojen avulla, jotta ruiskubetonin ominaisuudet eivät pääse heikkenemään. Ruiskutettavan pinnan esikatselu on hyvä suorittaa, missä arvioidaan pinnan imukyky ja havainnollistetaan mahdolliset haittavaikutukset ruiskubetonille. Ruiskutettavan pinnan tulee olla kostea, mutta se ei saa olla jäänyt tai liian kylmä, sillä betonimassa ei saa jäätyä. [4, s. 42-44.]

Yleensä betonimassa tilataan lähimmältä betonitehtaalta tai tehtaalta, jonka kanssa on tehty mahdollinen sopimus. Tilaaminen hoidetaan usein joko puhelimitse tai sähköpostilla perinteisesti ainakin yhtä päivää aikaisemmin. [9.]

Työmaalla tulee aina tarkistaa betonin notkeus ja lämpötila ennen ruiskutustöiden aloittamista. Ruiskubetonin virtausta säädettyäessä työmaalla suutin tulee olla pois päin alustasta. Putkisto tulee voidella laihalla vesi-sementtiseoksella ennen ruiskutustöitä. Betonin ja työtapojen tulee olla sen mukaiset, että hukkaroiskeen määrä saadaan mahdollisimman alhaiseksi. Hukkaroiskeen määrään vaikuttaa

ruiskutussuuttimen kulma ja etäisyys kalliopinnasta, kiihdyttimen annostelu, käytettävä betoni ja ruiskutettava pinta.

Ruiskutettaessa suutinta tulee ohjata tekemään ympyrämäistä tai soikiomaista liikettä. Ruiskutus aloitetaan alhaalta, jonka jälkeen edetään ylöspäin, joka minimoi hukkaroiskeen joutumista ruiskutettavalle pinnalle. Ruiskutusta tulee jatkaa aina edellisestä rajapinnasta samasta syystä. Etäisyyden suuttimen ja ruiskutettavan pinnan välillä määrittelee ruiskutussuuttimen koko sekä käytössä oleva ruiskutusteho. Liian lyhyt tai pitkä etäisyys lisää hukkaroiskeen määrää. Ruiskutusetäisyys on pienempi raudoitetussa pinnassa verraten ilman raudoitusta olevaan pintaan. Tavanomainen ruiskutusetäisyys on 0,6... 1,8 metrin väliltä.

Suuttimen tulee olla kohtisuorassa ruiskutettavaa pintaan nähden, asennon ja oikean etäisyyden poiketessa hukkaroiskeen määrä saattaa kasvaa ja betonin laatu heikentyä. Väärin kohdistettu ruiskutuskulma aiheuttaa ei-toivottuja aaltoiluja pintaan. Aina ei kuitenkaan ole mahdollista ruiskuttaa 90° kulmassa, sillä esimerkiksi raudoitusten taakse ruiskutettava massa vaatii vinomman kulman suuttimen ja pinnan välillä. Ruiskutuksen ehdoton minimikulma on kuitenkin 45°.

Kerrospaksuudet ovat tavanomaisesti tunnelin kattopinnoissa 40...120 mm. Kerrospaksuuden ylittäessä 25 mm tulee käyttää kiihdytintä. Tarpeeksi hyvällä sekoitussuhteella, kiihdyttimellä ja työn suorittajan ammattitaidolla päästään 100...500 mm paksuihin kerroksiin. Paksua kerrosta kerralla ruiskutettaessa se tulee toteuttaa usealla noin 50 mm kerroksella aloittaessa aina aloituskohdasta.

Jos pintaan ruiskutetaan lisäkerros myöhemmin, tulee huomioida, että edellinen ruiskutettu kerros on saavuttanut tarpeellisen lujuuden, sekä jos aikaa on kulunut huomattavasti, tulee rappaus puhdistaa esimerkiksi korkeapainepesurilla. Epätasaiselle louhitulle kallionpinnalle saatetaan määrittää ruiskutettavaksi tasoituskerros ennen varsinaista ruiskubetonikerrosta. [4, s. 48-51.]

Silloin kun lopputulokseksi vaaditaan tasainen ruiskubetonipinta, tulee sen kovettua ensin niin, että se kestää tasauksen tuoman rasituksen. Tasoitetun pinnan

päälle voidaan tehdä myös ohut 5...10 mm paksuinen hienokerros, missä käytettävän betonimassan raekoko on 4 mm. Hienokerrosta suorittaessa ei tule käyttää kiihdytintä ja ruiskutus tapahtuu pienellä ruiskutusteholla paineen ollessa suuri. Massan koostumus on oltava märkää ja ruiskutusetäisyys 2,5...3,5 m. [4, s. 55.]

Ruiskutus on toteutettava ennen betonin sitoutumisen alkamista, joka riippuu käytetystä sementistä ja lämpötilasta, mikäli hidastimia ei käytetä. Ruiskutettavan pinnan tulee olla +2...+38°C ja käytettävä betonimassa +5...+32°C. Ruiskubetonin jäätyislujuus on 5 MPa jonka saavuttamiseen vaaditaan vähintään +5°C lämpötila. Ruiskutuksessa käytettävän kiihdyttimen lämpötila tulee olla +5...+10°C pumpattavuuden takia. Kiihdytintä voidaan joutua lämmittämään sen ollessaan alle vaaditun lämpötilan. Kiihdytin saadaan huomattavasti tehokkaammaksi jos se lämmitetään +20...+30°C lämpötilaan. [4, s. 48-51.]



Kuva 5 Ruiskutuskalusto tunnelissa [15.]

### 3.5 Ruiskubetonoidun pinnan jälkihoito

Ruiskutustöiden jälkeen betonin jälkihoito on aloitettava pian sen jälkeen kuin sen alle on turvallista mennä tai jos ruiskutustyön joudutaan keskeyttämään yli kahdeksi tunniksi. Jälkihoito ja mahdollinen suojaus tulee suorittaa seuraavien syiden takia:

- Plastisen kutistuman minimointi
- Riittävän pintalujuuden saavuttaminen
- Riittävän säilyvyyden varmistaminen pintavyöhykkeelle
- Suojata haitallisilta säiltä
- Suojata iskuilta, värähtelyiltä tai vaurioilta.

Jälkihoidolla tulee saavuttaa betonin pinnalta matala haihtumisnopeus tai pystytävä pitämään se koko ajan märkänä. Suhteellisen kosteuden ollessa yli 85 % betonin jälkihoito ei ole välttämättä tarpeellinen. Tunneleissa ja kallioiloissa käytettävä tuuletus tulee ottaa huomioon betonin kuivumisen kannalta, sillä se kuivattaa ruiskubetonin tehokkaasti, vaikka suhteellinen kosteus ilmassa on 85 %.

Suosittelun jälkihoitomenetelmä on betonin kosteana pitäminen. Betonin jälkihoitossa on mahdollista käyttää tarkoitukseen kehitettyjä jälkihoitoaineita, mutta ainoastaan jos kyseessä on lopullinen pintakerros. Huomioitavaa on myös, että epätasainen pinta kerää paljon enemmän jälkihoitoainetta kuin tasaiset pinnat, yleisesti sopivaksi todettu määrä on noin 2,5 l/m<sup>2</sup>. Tilanteessa, jossa joudutaan ruiskuttamaan vielä uusi kerros, tulee jälkihoitoaine poistaa pinnalta, koska se heikentää merkittävästi uuden kerroksen tartuntaa. On myös mahdollista käyttää betoniin sekoitettavaa lisäainetta, joka poistaa veden haihtumisen tuoreesta ja lujittuneesta betonirakenteesta.

Betonin jälkihoitossa noudatetaan standardia SFS-EN 13670 Betonirakenteiden toteutus. Jälkihoitoaika on riippuvainen betonin pintavyöhykkeen ominaisuuksien kehityksestä, mitä kuvataan standardissa jälkihoitoluokilla. [4, s. 56.]

Mekaanista käsittelyä ruiskutetulle pinnalle ei ole suositeltavaa tehdä, sillä se saattaa olla heikentävä tekijä pinnan ja betonin väliseen tartuntaan ja aiheuttaa betonissa halkeiluja. [4, s. 55.]

### 3.6 Laadunvalvonta

Ruiskubetonointi voidaan ajatella tuotantoketjuna, jossa kaikki osa-alueet tulee olla kunnossa saavuttaakseen hyvän lopputuloksen. Prosessin perustana on suunnittelu, jolloin laaditaan rakennusselostukset, sekä määritetään laatuvaatimukset itse työlle sekä käytettävälle betonimassalle. [4, s. 58.]

Vaatimustenvalvonta koostuu lukuisista päätöksistä ja eri toimenpiteistä jotka muodostuvat alkuun laadittujen vaatimuksenmukaisuussääntöjen pohjalta ja näillä varmistetaan myös vaatimustenmukainen lopputulos. Vaatimustenvalvontaa tehdään ennen ruiskutustöiden aloittamista ja töiden aikaisesti määritellyillä testeillä. Vaatimustenvastaisuudella tulee korjata lopputulos oikeilla toimenpiteillä ja vaatimustenmukaisuudella saavutetaan hyväksytty toteutus. Hankkeeseen ryhtyvän tulee yhdessä suunnittelijan kanssa valita sille pätevyysluokan projektin ominaispiirteet, riskit ja käyttöiän vaatimukset huomioon ottaen. [4, s. 64.]

Pätevyysvaatimukset koostuvat koulutus- ja työkokemusvaatimuksista. Kalliorakenteiden työnjohtajan pätevytyymiseen vaadittava työkokemus vastaa maankäyttö- ja rakennuslain 122 c §:ssa työnjohtajan ja erityisalan työnjohtajan kelpoisuusvaatimukset esitettyjä työkokemusvaatimuksia (Taulukko 2). Työnjohtokokemuksen arvioinnin lähtökohtana on Ympäristöministeriön ohje YM4/601/2015. Työkokemukseksi ei hyväksytä lujitetun kalliotunnelin varustelua tai tunneliolo-suhteissa tapahtuvaa talon- ja infrarakentamista. [19.]

Taulukko 2. Työkokemusvaatimukset pätevyysluokittain. [19.]

LUOKKA	TYÖKOKEMUS
<b>Tavanomainen</b>	<p>Riittävä kokemus rakennusalalla rakennuskohteen laatu ja tehtävän vaativuus huomioon ottaen.</p> <p>1 vuoden kokemus kalliorakenteiden työjohtotehtävistä.</p>
<b>Vaativa</b>	<p>Riittävä kokemus ja perehtyneisyys kyseisen alan työjohtotehtävissä rakennuskohteen laatu ja tehtävän vaativuus huomioon ottaen.</p> <p>Vähintään 3 vuoden kokemus kalliorakenteiden työjohtotehtävistä, josta 1 vuosi vaativassa luokassa.</p>
<b>Poikkeuksellisen vaativa</b>	<p>Riittävä kokemus ja hyvä perehtyneisyys kyseisen alan vaativista työjohtotehtävistä.</p> <p>Vähintään 5 vuoden kokemus vähintään vaativista kalliorakenteiden työjohtotehtävistä, jotka ovat lähellä poikkeuksellisen vaativan luokan tasoa.</p>

Toisinaan ennen töiden aloittamista on tehtävä koeruiskutuksia osoittaakseen, että käytettävä massa täyttää laatuvaatimukset. Koeruiskutuksia ei kuitenkaan tarvitse tehdä, jos ruiskutustyöntekijällä on pitkä kokemus vastaavasta laitteistosta ja massasta. Betonin suunnittelu tulee tehdä kokonaan uusiksi, jos massakoostumuksessa, osa-aineissa tai käytettävässä kalustossa tapahtuu vaikuttavia muutoksia. Valmisbetonitehtaan tulee ilmoittaa henkilölle joka vastaa ruiskubetonin laadusta, jos jokin edellä mainituista muutoksista tapahtuu.



Sisäinen laadunvalvonta pitää sisällään kaikki mahdolliset toimenpiteet joilla pystytään pitämään laatu kohdallaan. Sisäisessä laadunvalvonnassa otetaan huomioon riskiaste ja toteutuksen suunniteltu käyttöikä. Betonin toimittajan sisäinen laadunvalvonta pitää sisällään myös kaikki mahdolliset toimenpiteet laadun ylläpitämiseen, minkä lisäksi massan laatuvaatimusten ja mahdollisten erityisvaatimusten täytön.

Sisäiseen laadunvalvontaan kuuluu:

- osa-aineiden valvonta (SFS-EN 14487-1)
- perusseoksen valvonta
- ruiskubetonin ominaisuuksien valvonta.

Taulukko 3. Perusseoksen valvonta (SFS-EN 14487-1) [4, s. 66.]

	Testin tyyppi	Tarkastus/tes ti	Tarkoitus	Pienin näytteenottotaajuus		
				Tarkastusluok ka 1	Tarkastusluok ka 2	Tarkastusluok ka 3
1	Notkeus, märkäseos	Testaus standardin SFS-EN 12350-2 tai SFS-EN 12350-5 mukaan	Arvioidaan vaatimuksenmukaisuus notkeuden vaatimusluokan mukaisesti ja tarkistetaan mahdolliset muutokset vesimäärässä	Tuotannon alkaessa		
2	Lisäaineen pitoisuus (ei koske kiihdyttimiä)	Lisätyn määrän tallenne	Tarkistetaan pitoisuus	Valinnainen	Jokaisesta erästä	
3	Seosainaiden pitoisuus	Lisätyn määrän tallenne	Tarkistetaan pitoisuus	Valinnainen	Jokaisesta erästä	
4	Kuitupitoisuus	Lisätyn määrän tallenne	Tarkistetaan pitoisuus	Jokaisesta erästä		

Ruiskutetun rakenteen paksuuden laadunvalvonnassa mennään yleisesti SFS-EN 1448-6 standardin pohjalta, jonka mukaan paksuuden mittaus voidaan mitata

ohuella terästangolla juuri ruiskutetusta betonista tai poraamalla reikiä kovettuneeseen betoniin ja mittatikulla mitaten (Kuva 6). Jokaisessa poratussa mittauskohdassa on 5 reikää ja standardietäisyytenä  $600 \pm 50$  mm.

Käytössä olevia paksuusmenetelmiä tämän lisäksi ovat:

- 1 mm paksuinen ohjurilanka, joka pingotetaan tappien varaan (jää betonin sisään)
- Muoviset tangot, jotka asennetaan betonialustaan määritetyin välein (jäävät noin 20 mm lopullisen pinnan alle)
- Terästanko joka toimii paksuusmittarina ennen kuin betoni on kerennyt sitoutua, tangosta luetaan suoraan vahvuus.
- Kallionpinnan skannaus ennen ruiskutusta ja tämän jälkeen [4, s. 46.]
- Laserkeilaukseen perustuva paksuudenmittausjärjestelmä: Antaa ruiskuttajalle tiedon kerrospaksuudesta välittömästi ruiskutuksen jälkeen ruiskutetulta alueelta ja tallentaa tulokset pistepilvimuodossa suoraan koordinaatistossa [6.]

Viimeisenä mainittua skannausmenetelmää nimeltään SmartScan käsitellään tässä opinnäytetyössä myöhemmin samaan tuoteryhmään kuuluvan SmartSpray Pro+ ratkaisun yhteydessä.

SFS-EN standardissa ei määritellä paksuusmittauksille tiheyttä, vaan se on määritelty projektikohtaisesti asiakirjoissa. Mikäli mittaustiheys ei ole määritelty asiakirjoissa voidaan katsoa tarkastusluokille suositellut määrittelyt.



Kuva 6 Paksuusmittaus kovettuneeseen betoniin Henriksdalin työmaalla. [15.]

#### 4 Patterimäen tunnelin ruiskubetonointi

Helsingin Pitäjänmäessä louhittiin 300 metrin pituinen kalliotunneli Raidejokeri-hankkeen pikaraitiotietä varten ja myös sitä varten tehty 55 metriä pitkä työtunneli. Ensiksi louhittiin työtunneli, jonka kautta päästiin louhimaan päätunneli. Louhittu raitiotietunneli on leveydeltään 11,5 metriä ja korkeutta on kahdeksan metriä. [8.]

Patterimäen raitiotietunnelin toteutettu rakenne vaati ruiskubetonoinnin kahdessa eri työvaiheessa. Aluksi louhintojen jälkeen kallion pinta salaojitettiin, pultitettiin ja ruiskutettiin systemaattisesti teräskuitubetonilla. Seuraavaksi tunnelin pohjalla rakennettiin hulevesilinjasto, salaojakerros ja vaadittavat eristekerrokset raitiotielle. Maatöiden jälkeen vuorossa oli verhoustarakenteen rakennus mikä piti sisällään toisen ruiskutuksen. Tunnelin seinä ja kattopinnalle asennettiin lämpöä

eristävä eristematto (Kuva 7.), joka raudoitettiin ja ruiskutettiin muovikuitubetonilla.

Ruiskutusmenetelmänä oli käytössä perinteinen märkäseosmenetelmä. Tarvittava massan määrä oli arvioitu etukäteen tietyllä hukkaroiskeprosentilla, kuinka paljon massaa menee metriltä. Ruiskuttajan ammattitaito ja silmämääräinen arviointi oli kuitenkin merkittävin tekijä hyvän lopputuloksen saavuttamiseen. [9.]



Kuva 7 Patterimäen tunnelin verhousrakenne. [8.]

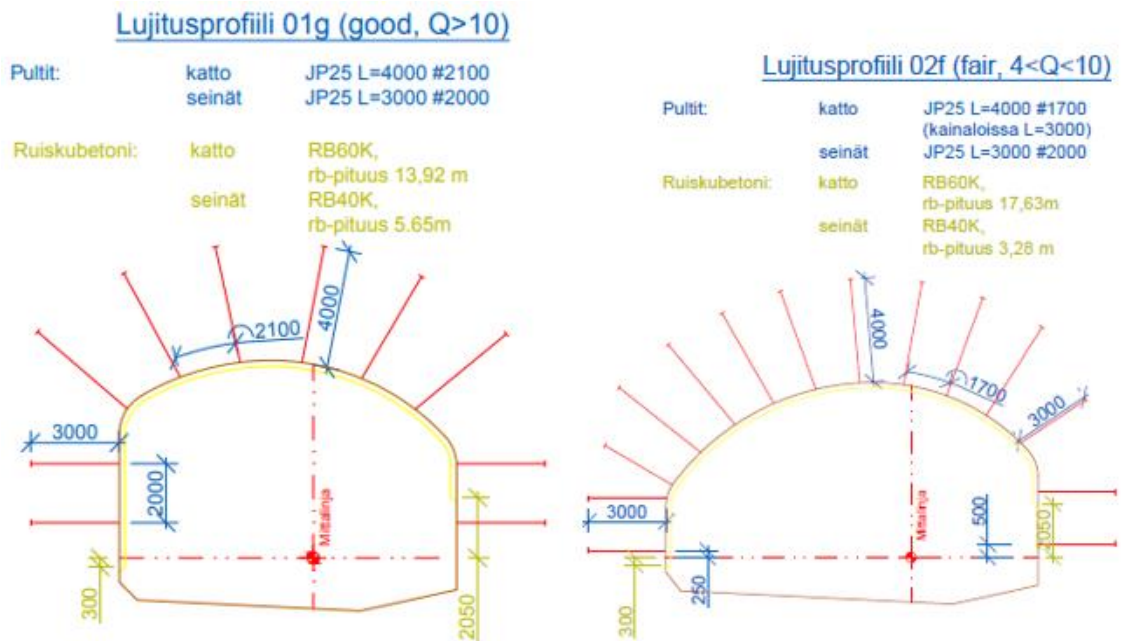
#### 4.1 Vahvuusmittaukset ja toteutuneet vahvuudet

Patterimäen tunnelissa vahvuusmittaukset suoritettiin InfraRYL:in SFS-EN 14487-1 antamien vaatimusten mukaan. Kovettuneesta ruiskubetonista otettiin poraamalla vahvuusmittauksia yksi per 100m<sup>2</sup> alue.

Kyseisellä projektilla oli tarkat vaatimukset vahvuuksien osalta ja ainoastaan pienet alitukset paikoittain sallittiin tapauskohtaisesti. InfraRYL:in SFS-EN 14487-1 mukaisesti havaittaessa alitusta paksuusmittauksessa, tuli ottaa noin metrin päästä uusi mittaus. Mikäli tässäkin mittauksessa huomattiin alitusta, tuli ruiskuttaa uusi kerros vahvuuteen asti. Kalliopinnan ruiskutuksessa pysyttiin hyvin toleransseissa ja hukkaroiskeprosentti saatiin pidettyä alhaisena kallionpinnan lujuudessa.

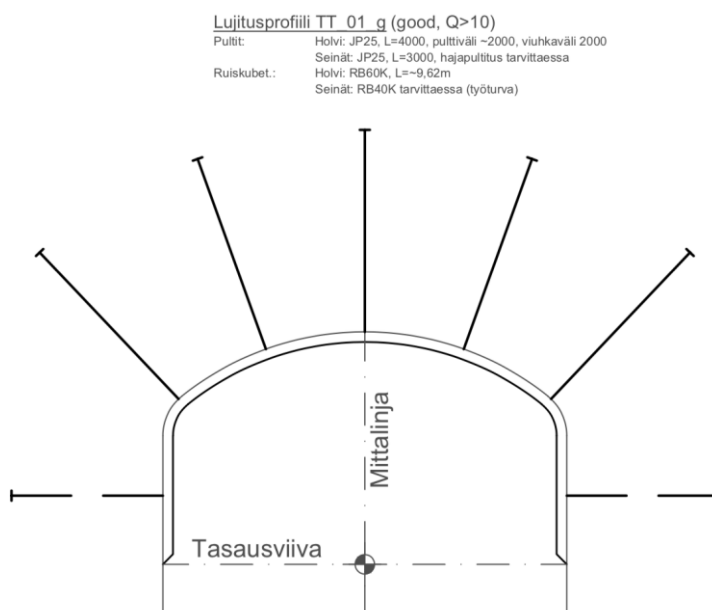
Tunnelin kallionpinta oli hyvin epätasaista, joten ruiskuttajan ammattitaito oli pääroolissa, että saavutettiin oikeat vahvuudet pienellä hukkaprosentilla. Verhousrakenteen ruiskubetonointi puolestaan erosi merkittävästi kallionpinnan ruiskutuksesta. Verhousrakenteen tasaisen pinnan ansiosta ruiskutettavuus oli paksuudenhallinnan kannalta helpompaa, mutta 90 mm paksuinen rakenne jouduttiin kuitenkin ruiskuttamaan neljässä osassa rakenteensa takia. Kahdella ensimmäisellä ruiskutuskerroksella hukkaroiske syntyi huomattavasti enemmän, sillä muovinen eristematto kiinnitettiin pulteilla, minkä takia pultilinjojen välissä oleva matto jäi elastiseksi joka kimmotti osan ruiskutettavasta massasta. [9.]

Patterimäen raitiotietunnelissa suoritettiin kallionruiskutusta 296.5 metrin matkalta. Lujitusprofiilissa ruiskubetonin osalta paksuusvaatimukset pysyivät samana koko raitiotunnelin osalta lukuun ottamatta noin 10 metrin pituista leveämmäksi louhittua profiilia. Alla oleva kuva 8 esittää vaaditut lujitukset tunnelille:



Kuva 8. Patterimäen raitiotietunnelin lujitusprofiilit.

Työtunnelissa puolestaan ruiskubetonivaatimukset olivat raitiotietunneliin verrattuna vähäisemmät. Työtunnelissa vaadittiin holviin 60 mm paksuinen kerros ja seinille ainoastaan paikoittain työturvallisuussyistä. Alla oleva kuva 9 esittää työtunnelin vaaditut lujitukset:



Kuva 9. Patterimäen työtunnelin lujitusprofiili.

Patterimäen työtunnelin ja raitiotietunnelin yhteenlaskettu teoreettinen tarvittava ruiskubetonimäärä oli  $370 \text{ m}^3$  ja toteutunut massamenekki oli  $470 \text{ m}^3$ , joten massaa meni 27 % enemmän, tällöin hukkakertoimeksi "r" saadaan 1.27. Teoreettisessa laskennassa käytetyssä kaavassa ei ole otettu huomioon kallionpinnan hukkaroiskeita tai kallionpinnan epätasaisuutta.

## 5 Tukholman E2-jätevesitunnelin ruiskubetonointi

YIT Sverige AB rakentaa E2-jätevesitunnelia Tukholmaan, mikä on osana Henriksdalın jätevedenpuhdistamon kehityshanketta. Päättunneli on pituudeltaan noin 14 kilometriä ja se kulkee kaupungin alla Bromman ja Sicklan välissä. YIT:n osuus tunnelista 7.7 kilometriä. Henriksdalın jätevedenpuhdistamo on yksi suurimpia Euroopan jätevedenpuhdistamoita ja yksi maailman suurimmista peruskallion sisään rakennetuista puhdistamoista. Puhdistamo palvelee noin miljoonaa ihmistä ja puhdistaa noin kaksi kolmasosaa suur-Tukholmasta syntyvästä kunnallisista jätevesistä. [11.]

YIT Sverige AB:n tunneliosuus lähdettiin louhimaan kolmelta eri lähtöpisteeltä, Smedslätteniltä, Eolshälliltä ja Gullmarsplanilta (Kuva 10.). Smedslätteniltä ja Gullmarsplanilta lähdettiin louhimaan huoltotunneleita, jotka yhdistyvät itse päättunneliin ja Eolshälliin louhittiin alasmenotunneli.



Kuva 10. E2 jätevesitunnelin reitti, vihreä linja on YIT AB:n osuus. [12.]

### 5.1 Smedslättenin ruiskubetonointi

E2-projektin tunneleiden ruiskutuksen vahvuusmittaukset suoritetaan poraamalla viiden reiän kuvio, samoin kuin Suomessa. Viidestä reiästä mitattujen paksuuksista tulee keskiarvon täyttyä, yksittäisessä reiässä sallitaan vajeena 75 prosentin vahvuus. Smedslättenin tunnelissa alituksia syntyi hyvin vähän, mutta yliuiskutusta puolestaan syntyi. Isommassa profiilissa päästiin paikoittain parhaillaan alle 1.5 kertoimen, mutta pienemmässä profiilissa kertoimena oli lähes poikkeuksetta 2, eli massaa meni tuplamäärä teoriaan nähden. [13.]

Määrätyn etenemän välein tunnelissa suoritetaan geologien tekemä kartoitus, joista selviää vaadittavat lujitusvaatimukset. Tarkastellessa Smedslättenin profiililtaan 49.6 m<sup>2</sup> kokoista huoltotunnelia jonka 12,05 m leveä katto vaadittiin lujitettavaksi pulteilla sekä 70 mm paksuisella teräskuitubetonikerroksella 19 metrin matkalta. Laskettaessa ensin teoreettinen massamenekki  $V = A \cdot t$ .

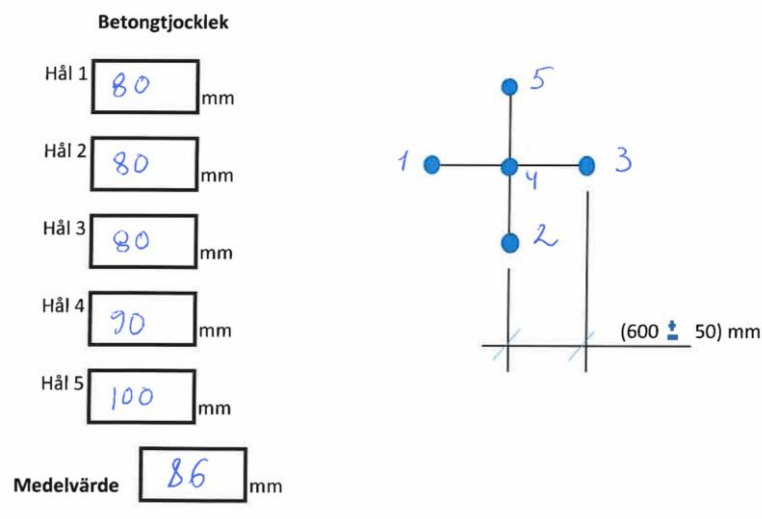
$$A = 12,05 \cdot 19 \text{ m} = 228,95 \text{ m}^2$$



$$V = 228,95 \text{ m}^2 * 0,07 \text{ m}$$

= 16,03 m<sup>3</sup> Teorettinen laskettu määrä tarvittavalle betonille.

Betonia meni kuitenkin todellisuudessa alueelle 30 m<sup>3</sup>. Jaettaessa tämä arvo teoreettisella arvolla saadaan hukkakertoimeksi "r" 1.87, eli massaa meni 87 % enemmän kuin teoriassa. Kuvassa 11 paksuusmittaus ruiskutuksesta.



Kuva 11. Smedslättenin huoltotunnelin paksuusmittaus ruiskubetonikerroksesta.

Normetilta annetaan SmartSpray ProPlussan ruiskutustarkkuudeksi +/- 5 mm, edellyttäen laitteen kalibroinnin, sekä riittävän kallionpinnan tasaisuuden. Laskettaessa teoreettisesti kyseisen holvin ruiskutukseen kuluvan massan määrä 5 mm yli ruiskutuksella olisi:

$$V = 228,95 \text{ m}^2 * 0,075 \text{ m}$$

= 17,17 m<sup>3</sup> Teorettinen laskettu määrä SmartSpray ProPlussalla

Tällä arvolla hukkeroin "r" olisi ainoastaan 1,07 kyseiseltä matkalta kerrospaksuuden osalta, kerroin kasvaa kuitenkin vielä ruiskutuksesta aiheutuvan hukkariskeen takia. Tämän perusteella säästöä syntyisi betonin osalta runsaasti ja säästöt pidemmällä matkoilla olisivat tuntuvat. Täytyy kuitenkin muistaa, että laite vaatii vielä referenssiä paljaalle kallionpinnalle ruiskutettaessa ja kyseisellä päätöksellä oli paikoittain isoakin epätasaisuutta. Siitäkin huolimatta kertoimella on varaa nousta reilusti toteutuneeseen 1,87 kertoimeen, unohtamatta pienempää käyttäjävaikutusta ruiskutustyön osalta.

Seuraavaksi tarkastellessa Smedslättenin profiililta 25,1 m<sup>2</sup> kokoista huoltotunnelia jonka 8,28 m leveä katto vaadittiin lujitettavaksi hajapultituksella sekä 50 mm paksuisella teräskuitubetonikerroksella 5 metrin matkalta. Kuvassa 12 paksuusmittaus ruiskutuksesta.

Laskettaessa ensin teoreettinen massamenekki  $V = A \cdot t$ .

$$A = 8,28 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 41,4 \text{ m}^2$$

$$V = 41,4 \text{ m}^2 \cdot 0,05 \text{ m} = 1,57 \text{ m}^3$$

= 1,57 m<sup>3</sup> – Teoreettinen laskettu määrä tarvittavalle betonille.

## Tjockleksmätning sprutbetong Enligt SS-EN 14488-6



Projektnummer \_\_\_\_\_ Projektnamn E2 Tunnel och installationsentreprenad

Datum 17.6/2021 Tid 20:00 Tunnel BT23 Sektion 237

Provtagare: \_\_\_\_\_

Placering prov

V. anfang Tak H. anfang

V. vägg H. vägg

Provmetod  
 Hammarborr  
 Kärnbörning

Avsedd tjocklek 50 mm

Betongtjocklek

Hål 1 80 mm

Hål 2 75 mm

Hål 3 140 mm

Hål 4 110 mm

Hål 5 80 mm

Medelvärde 97 mm

Kommentarer

*Provet omfattar området mellan sek 195 och sek 300 som är ca 504,86 m<sup>2</sup>*

Kuva 12 Smedslättenin pienemmän huoltotunnelin paksuusmittaus ruiskubetonikerroksesta.  
[13.]

Massaa meni todellisuudessa kyseiselle 5 metrin alueelle  $3\text{m}^3$ . Hukkakerroin "r" tästä laskettuna on:

Jaettaessa todellinen  $3\text{m}^3$  arvo teoreettisella arvolla saadaan hukkaroiskekertoimeksi 1.91, eli massaa meni 91 % enemmän kuin teoriassa.

## 6 Ruiskubetonoinnin toteutus modernilla kalustolla

### 6.1 Normet SmartSpray

Ruiskubetonin paksuudenhallinta kalliorakentamisessa on koko ajan tärkeämmässä roolissa kiristyvien suunnitteluvaatimusten, kustannusten ja betonin hiilijalanjäljen takia. Kalliotukeen vaadittavan oikean kerrospaksuuden saavuttaminen ilman ylihuiskutusta vaatii ammattitaitoa. Turvallisen maanalaisen toiminnan takaamiseksi vaadittu vähimmäiskerrospaksuus on saavutettava, mutta mahdollisimman vähäisellä ylihuiskutuksella, joka tapahtuu usein vähimmäiskerrospaksuuden varmistamiseksi. Ylihuiskuttaminen vie kuitenkin ylimääräistä aikaa tuoden lisää kustannuksia ja joissain tapauksissa saattaa olla ristiriidassa suunnitellun tunneliprofiilin kanssa vaatien rappauksen poistamista.

Alalla kokeneiden huiskuttajien löytäminen ei ole itsestäänselvyys ja niitä on aina vaikeampi löytää. Olosuhteiden takia alan tekniikkaa joudutaan kehittämään mahdollisimman tehokkaasti, jotta saadaan hyvä lopputulos pienellä laitteen käyttäjävaikutuksella ja saavuttaen mahdollisimman kustannustehokkaan huiskutuksen. SmartSpray on Normetin kehittämä automatisoituun huiskutukseen erikoistunut tekniikka ja siitä on kehitetty kolme erilaista versiota:

#### **SmartSpray Lite**

SmartSpray Lite versiossa käyttäjä ohjaa ainoastaan huiskutussuuttimen ohjausliikettä. Tämä tarkoittaa, että käyttäjän tarvitsee käyttää vain yhtä ohjaussauvaa perinteisen kahden tai neljän sijaan. Tässä versiossa suuttimen asento pysyy automaattisesti optimaalisesti kohdistettuna haluttuun pintaan.

#### **SmartSpray Pro**

SmartSpray Pro versiossa on pisteeltä pisteelle -ohjaustila, missä huiskutussuutin liikkuu automaattisesti edestakaisin kahden määritellyn pisteen välillä. Pisteeltä pisteelle -ohjaustilan lisäksi versiossa on automatisoitu suutinominaisuus, joten käyttäjän tarvitsee ainoastaan pitää suuttimen etäisyys oikeana pinnasta ja siirtää

uudelle ruiskutusalueelle edellisen valmistuttua. Se sisältää sisäänrakennetun koordinaatiston uudelleensuuntauksen, joka mahdollistaa esimerkiksi risteysalueiden ruiskutuksen koordinoitua ohjausta hyödyntäen.

### **SmartSpray ProPlus**

SmartSpray ProPlus versiolla voidaan ruiskuttaa täysin automatisoidusti ennalta määritetty alue. Automaattiruiskutus -toimintatilan päällä ollessa järjestelmä pitää valitun ruiskutusetäisyyden suuttimen ja seinäprofiilin välillä ja ylläpitää nopeutta automaattisesti saavuttaakseen halutun kerrospaksuuden. Tällä tekniikalla aloittelevan ruiskuttajan tekemä lopputulos vastaa kokeneen ammattilaisen lopputulosta perinteisillä menetelmillä. [6.]

Tämä opinnäytetyö tarkastelee ProPlus mallia ja laserkeilaukseen perustuvaa paksuudenmittausjärjestelmää nimeltä SmartScan.

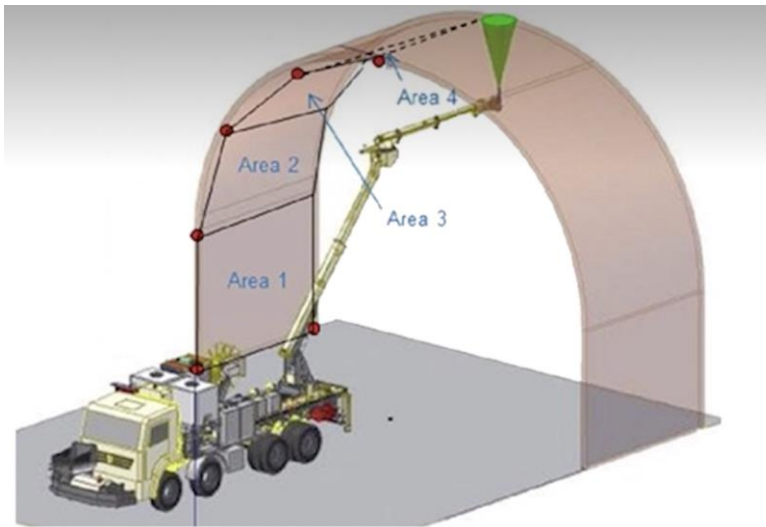
### **SmartScan**

SmartScan on ruiskubetonin paksuudenmittausjärjestelmä, joka perustuu laserkeilaukseen. Laite käyttää uusinta 3D LiDAR nimistä laser skannaustekniikkaa ja mahdollistaa kasvavassa tarpeessa olevan reaaliaikaisen dokumentoinnin. Järjestelmä on kehitelty vaativiin maanalaisiin ympäristöihin, kuten tunneleihin ja kaivoksille. SmartScan laitteistoa on tällä hetkellä tarjolla lippulaiva-tunneliruiskuihin eli Spraymec 8100, sekä kuorma-autoalustaisiin NoRunnereihin.

Järjestelmä antaa ruiskuttajalle tiedon kerrospaksuudesta koko alueelta välittömästi näytölle pistepilvimuodossa. Tämän ansiosta ruiskuttaja näkee suoraan, jos jokin alue vaatii lisää vahvuutta eikä tarvitse palata myöhemmin samaan paikkaan tekemään täydennysruiskutuksia ja lisäksi poistaa tarpeen perinteisiltä porrattavilta vahvuusmittauksilta. Betonimenekki pystytään minimoimaan kyseisen teknologian avulla, sillä se auttaa merkittävästi käyttäjää ruiskuttamaan oikean kerrosvahvuuden. Tämän avulla myös aloitteleva ruiskuttaja löytää nopeammin oikean kosketuksen koneen käytölle ja ruiskutukselle mikä antaa paremmat mahdollisuudet kehittyä taitavaksi ruiskutustyöntekijäksi. [6.]

### 6.1.1 SmartSpray ProPlus toimintaperiaate

SmartSpray ProPlus version toimintaperiaatteessa ruiskutettava alue jaetaan useaan lohkoon. Aloitus tapahtuu opettamalla puomille tunnelin profiili ottamalla tarkkeet halutulle alueelle määritellyistä kulmapisteistä (kuva 13.).



Kuva 13. Havainnekuva ruiskutettavan alueen määrittelystä tunnelissa. [6.]

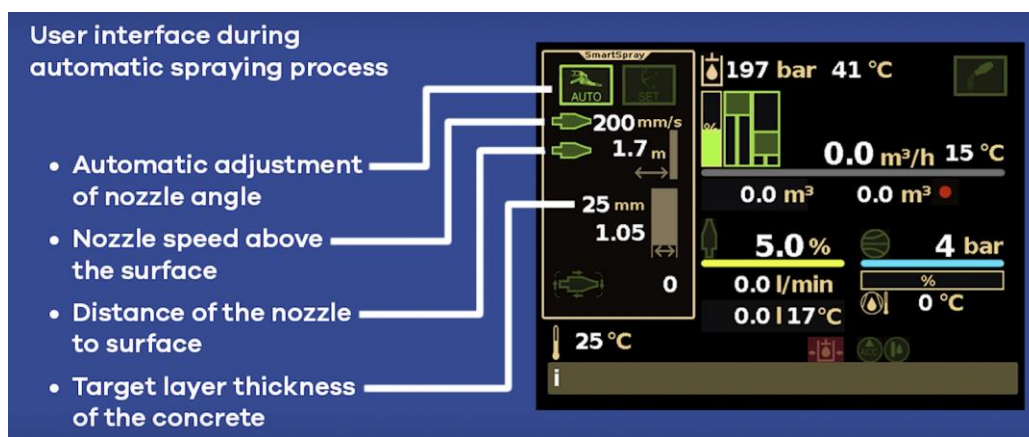
Sen jälkeen kun profiili on muodostettu määritellyistä pisteistä, ohjausjärjestelmä laskee osoitettujen pisteiden avulla geometriaan perustuvat fasetit ruiskutettaville alueille. Fasettien avulla ohjausjärjestelmä laskee suutinpäälle liikeradat. Liikeratojen laskemisen jälkeen järjestelmä lähtee suorittamaan lasketun matematiikan mukaisesti liikerataa ruiskuttaen ennalta määritetyn tasaisen ruiskutuskerroksen.

Isoilla suorilla alueilla pystytään merkata suuremmat alueet, mutta epätasaisilla kaarevilla alueella tulee merkata pienempiä alueita eli pisteiden tiheys riittävän tiheäksi tarkkuuden säilyttämiseksi. Käytännössä järjestelmässä synkronoidutaan betonipumpun tuottoon ja puomin pään liikenopeuteen, minkä avulla saadaan pyydetty kerrospaksuus.

Kun alue on saatu ruiskutettua, eli tässä tapauksessa kaarimainen alue (Kuva 12.), joudutaan ruiskua peruuttamaan aivan kuten perinteistä kalustoa käytettäessä ja tässä haasteelliseksi tulee ”sauma” -alueen ideaalinen ja tasainen ruiskutus.

Smart Sprayta käytettäessä pystytään jatkamaan ruiskuttamista samoilla parametreilla ja opetetuilla faseteilla. Tässä kohtaan operaattori ainoastaan ilmoittaa laitteelle saumakohdassa, jotta saumakohtaan ei kohdistu ylihuiskutusta. Tämä edellyttää mahdollisimman suoraviivaista koneen peruuttamista ja kallionpinnan tasaisuuden pysymistä ennallaan. Ominaisuus on kätevä, sillä siinä säästytään ajallisesti alueen uudelleen opettamiselta. [16.]

Automaattiruiskutuksen ollessa käynnissä robotti ruiskuttaa pintaa itsestään täysin automaattisesti. Operaattorilla on prosessin aikana näyttö, jonka avulla varmistetaan ruiskutuksen menevän halutulla tavalla halutuilla parametreilla. Kuva 14 mukaisella näytöllä voidaan seurata reaaliaikaisesti ylhäältä alaspäin lueteltuna: suuttimen kulman säätöä, suuttimen pyörivän liikkeen nopeutta, etäisyyttä suuttimen ja ruiskutettavan pinnan välillä ja halutun ruiskutuskerroksen paksuutta. [6.]



Kuva 14 SmartSprayn näyttö [6.]

Oikein käytettynä SmartSpray ProPlussalla päästään +-5 mm tarkkuudelle ruiskutuskerrospaksuudessa. Tämä edellyttää järjestelmän kalibroinnin olosuhteiden

mukaan. Järjestelmälle tulee mm. ilmoittaa betonisekoituksen kivikoko, käytettävä suutin ja syöttää vaaditut parametrit.

SmartSpray ProPlus automaattiruiskutusjärjestelmä on parhaiten soveltuva selkeisiin ja yksinkertaisiin tunneleihin. Tunnelin ollessa hyvin monimuotoinen tai kallionpinnan ollessa erittäin epätasaista tekee ProPlus -toiminnon epäkäytännölliseksi. Järjestelmän joustavuuden ansiosta, pystytään kuitenkin siirtymään Pro tai Lite toimintoon, jolloin ruiskutus muuttuu enemmän operaattorin hallittavaksi. [16.]

## 6.2 SmartSpray ProPlus kustannuksia

SmartSpray tuo ruiskuun lisähintaa karkeasti 65 000-70 000 € riippuen ruiskumallista. Esimerkkinä tunneliruisku Spraymec 8100 VC on lähtöhinnaltaan ilman SmartSprayta karkeasti 340 000 €, joten SmartSpraylla varustettuna hinnaksi tulisi arviolta 405 000-410 000 €.

Tällä hetkellä SmartSpray on yhteensopiva Normetin Spraymec 8100 ruiskuun sekä kuorma-autoalustaisiin NoRunnereihin. Edellä mainittuihin ruiskuihin on myös mahdollista hankkia SmartSpray Ready -paketti, jolloin ruisku on varusteltu SmartSpray valmiiksi, eli sen lisääminen onnistuu jälkikäteen. Vanhempiin ruiskumalleihin ei voida päivittää SmartSpray ominaisuutta, sillä se vaatii puomilta kehittyneen anturiteknologian.



### 6.3 SmartScan toimintaperiaate

SmartScan laitteisto pitää sisällään SprayMec-ruiskun etuosaan kiinnitettävän mittausyksikön (Kuva 15.), päälle kiinnitettävän anturin, tunnelin seiniin kiinnitettävät takaisinheijastavat kohteet, koneen sivuosaan kiinnitettävän kosketusnäytön ja tietokoneohjelmiston pistepilvidatan tarkastelulle (Kuva 17.).

SmartScan mittausjärjestelmän jokainen komponentti on tarkkaan valittu kestämään tunneli- ja kaivosolosuhteet. Mittausyksikkö on suojattu tukevalla suojakotelolla ruiskutuksesta syntyvältä kimpoavilta roiskeilta ja ruiskun pesussa käytettävältä vedeltä, sekä kosketusnäyttö on varustettu naarmuuntumattomalla pinnalla. Mittausyksikköä on saatavilla kaikkiin Normetin SprayMec ruiskuihin ja se on helposti asennettava pakkaus, joka on heti käyttövalmis eikä vaadi kalibrointia.



Kuva 15. SmartScan mittausyksikkö. [6.]

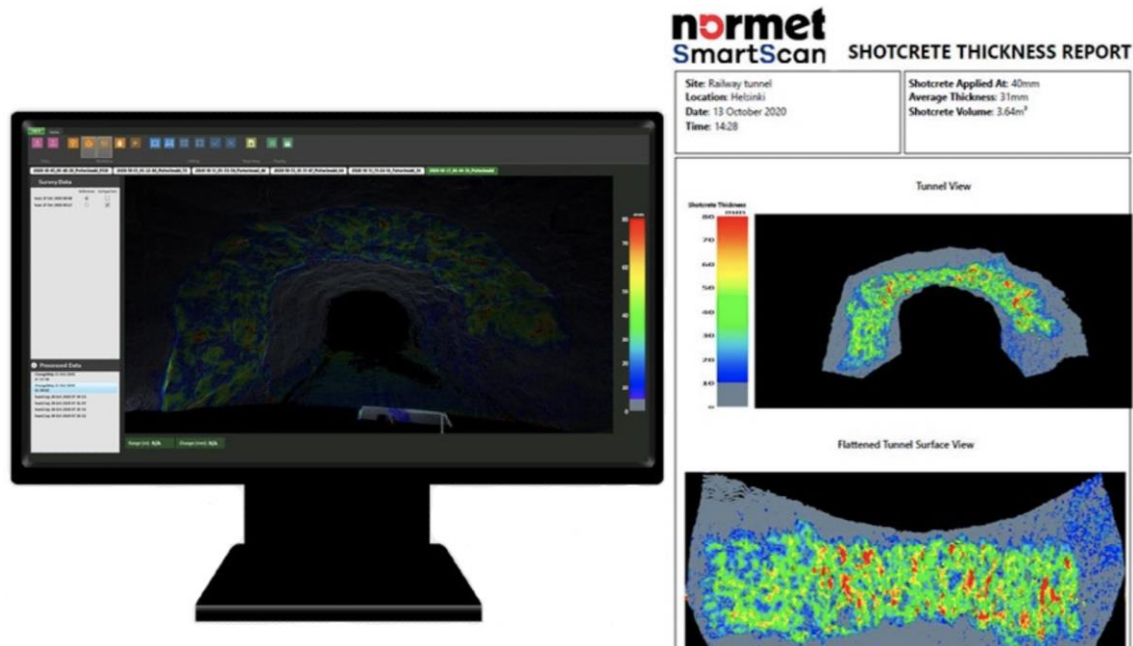
Järjestelmä perustuu tunnelin seinille kiinnitettyihin tunnettuihin takaisinheijastaviin kohteisiin, jotka ruiskun päälle kiinnitetty toinen LiDAR sensori poimii (Kuva 16.). Näiden avulla koneen etuosaan kiinnitetty mittausjärjestelmä suorittaa skannauksen ruiskutettavasta alueesta ja luo georeferoidun pintakartoituksen pistepilvi-datasta.



Kuva 16. SmartScan LiDAR sensori havaitsee tunnetut kohteet. [6.]

Seuraavaksi kun ruiskutustyö on tehty, suoritetaan toinen skannaus ja siitä saadusta datasta järjestelmä vertaa saatua tulosta ensimmäiseen skannaukseen. Järjestelmä tekee tästä datasta betonin paksuusraportin värikarttana näytölle, josta näkee mahdolliset yli- tai aliruiskutetut alueet. Käyttäjän työnkulku ruiskutusprosessin aikana pysyy samana kuin ennenkin ja skannausprosessiin kuluva aika lyhyt.

Järjestelmään kuuluva ohjelmisto mahdollistaa profiilitietojen edistyneen analyysin esimerkiksi työmaan toimistossa. Skannauksista saatua raakadataa pystytään tarkastella ja rajata sopivaksi dokumentointia varten. Ohjelmistolla pystytään edistyksellisesti tuottamaan laadunseurantaan liittyviä raportteja asiakkaalle tai arkistointiin. Datan siirto tapahtuu yhä asemansa vakiinnuttaneessa digitaalisessa pistepilvimuodossa, joka on yleisesti yhteensopiva BIM-tietomallien ja maanmittauksessa käytettävien ohjelmistopakettien kanssa.



Kuva 17. Dokumentointi käy vaivattomasti työpöytäsovelluksella. [6.]

## 7 Förbifart Stockholm moottoritieyhteys

### 7.1 Tukholman ohitustie

E4 Förbifart Stockholm on rakenteilla oleva uusi moottoritieyhteys eteläisestä Kungens kurvasta pohjoiseen Häggvikiin länsipuolella Tukholmaa. Uusi moottoritieyhteys rakennetaan, koska nykyinen keskustan ohittava nelikaistainen Essingeleden on erittäin ruuhkainen, mikä on samalla Pohjoismaiden vilkkain tie. Förbifart Stockholm tulee valmistuttua olemaan pituudeltaan 21 kilometriä, josta yli 18 kilometriä kulkee tunnelissa.

Yhteenlaskettuna hankkeelle tulee tunneleita 55 kilometrin pituudelta huolto- ja liittymätunneleiden kanssa. Hanke on ollut rakenteilla vuodesta 2015 ja arvioitu valmistuminen vuonna 2030. Valmistuttuaan tielle tulee kuusi eritasoliittymää joissa E4 Förbifart tunnelit yhdistyvät jo olemassa olevaan tieverkkoon. Kyseessä on Ruotsin yksi suurimmista infrastruktuuriprojekteista ja yhdestä maailman pisimmästä moottoritietunnelista. [17.]

## 7.2 Normet SmartSpray ProPlus koekäytössä

Implenia Sweden otti koekäyttöön täysin automatisoidun betoniruiskurobotin ensimmäisenä Pohjoismaissa Johanneslund projektilla (Kuva 18.), joka on osa Förbifart Stockholm moottoritiehanketta.

Moottoritietunnelissa louhittuun kallionpintaan asennetaan kauttaaltaan veden eristyskalvo juotettujen tartuntapulttien varaan, joten kallionpintaa vasten ei ruiskutettu automaatiota hyödyntäen. Kalvon päällä on teräsverkko lujituksena ja tunnelin reunoilla molemmin puolin on betonielementti rakenteet ja ruiskutus aloitettiin niiden kohdalta Lite toiminnolla, minkä jälkeen kone jatkoi täysin automaattiseen ruiskutukseen opetettujen pisteiden avulla.



Kuva 18. SmartSprayn kokeilua Förbifart Stockholm moottoritietunnelissa

Ruiskutettavan kerroksen paksuusvaatimuksena oli 100 mm, joka ruiskutettiin kolmessa kerroksessa. Ensimmäinen eli kalvoa vasten suoritettavassa ruiskutuskerroksessa vaatimuksena oli ohuempi 20 mm paksuinen kerros. Kalvoa vasten suoritettavassa ruiskutuksessa optimi paksuuden kanssa tulee olla tarkkana, sillä kalvo on joustava. Liikaa laitettaessa kalvo ei kannattele massaa ja liian ohut kerros ei anna tarpeeksi tukevaa kerrosta seuraavalle paksummalle kerrokselle.

## 8 Yhteenveto

Ruiskubetonoinnin paksuudenhallinnalla on suuret potentiaalit kustannussäästöjen kannalta ja sen käyttäjävaikutuksen vähentäminen on menossa teknologian kehittämisen myötä eteenpäin. Ruiskubetoni tunnelin lujitusmenetelmänä on myöskin vakiinnuttanut paikkansa vahvasti tunnelin rakentamisessa, mikä ajaa sen osalta kehitystä vielä pitkällä tulevaisuudessakin.

Lukiessa kirjallisuutta insinööriyöhön liittyen ja alan ammattilaisten kanssa keskusteltuani on henkilökohtaiseksi näkökulmaksi jäänyt, että paljaan kallionpinnan laatu ja muoto ovat avainasemassa automaattisen ruiskutustavan valinnassa. Tällä hetkellä ei välttämättä ole kustannustehokkaampaa pienialaisia kohteita mahdollisesti ruiskutuksen kannalta huonoa kallionlaatua varten investoida ainaakaan kalleimpaan ja edistyneimmällä ruiskutuspuomilla varusteltuun ruiskuun korvaten hyvin toimivaa vanhempaa ruiskua ja pätevää ammattilaista. Toki SmartSpray ProPlus versiolla varustetulla puomilla pystytään ottamaan perinteinen tai puoliautomaattinen ominaisuus käyttöön, mutta silloin ruiskun käyttäjävaikutus pysyy samana, eli vaatii ammattilaisen hyvän ruiskubetonipinnan saamiseksi.

Näin murrosaikana suurimman potentiaalin näen ruiskutuskaluston päivittämisen edistyneimpään ja vähiten käyttäjäriippuvaiseen versioon ovat suurille tunnelihankkeille. Optimaalinen olosuhde on myös kalvon päälle ruiskutettava rakenne pinnan tasaisuuden ansiosta kuten Förbifartin moottoritietunnelissa. Tämän tyyppiset kohteet ovat teknillistaloudellisesti hyviä, sillä massaa tulee suuria määriä ja hukkaroiskeen minimointi suuresta betonimäärästä on jo merkittävä.

Näkisin yrityksen kannalta järkeväksi, jos ollaan päivittämässä kehittyneimpään teknologiaan tulisi samalla panostaa ruiskuun liitettävään laserkeilaukseen perustuvaan paksuudenmittausjärjestelmään. Järjestelmä tuo tehokkuutta tunnelitöissä aikaa vievään paksuudenmittaukseen poistamalla manuaalisen mittaus-tarpeen ja mahdolliset uudelleen ruiskutukset. Tämän lisäksi pidän merkittävänä mittausjärjestelmän tuomana hyötynä nopean dokumentoinnin ja jakamisen pistepilvimuodossa, jota pystytään tehokkaasti hyödyntämään toimistossa. Paksuudenhallinnan ja sen dokumentoinnin kannalta tulee kuitenkin saada tulevaisuudessa enemmän referenssiä skannausmenetelmää käytettyjen projektien osalta, mitä voidaan verrata tähän asti vakiintuneiden menetelmien kanssa.

Yhdessä oikein käytettynä nämä työkalut ovat kuitenkin potentiaalisia tuomaan merkittäviä ajallisia ja materiaalisia säästöjä alalle, näiden myötä myös hiilijalan-jälkeä saataisiin pienennettyä. Laitteiden yleistyessä työmailla pystytään tehdä tarkempia tutkimuksia ja laskelmia tulevaisuudessa. Opinnäytetyön haasteena oli saada kattavasti konkreettista näyttöä ruiskutuspaksuudesta sillä työmaalla laite oli käytössä ainoastaan 30 metrin matkalla ja paksuudenmittaus suoritettiin ennen ruiskutusta tiheään asennetuilla mittatikuilla, joiden peitettyä katsottiin paksuuden olevan oikea.

## Lähteet

1. RIL 154-1. 1987. Tunneli- ja kalliorakennus 1. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL
2. Vuolio, Raimo. 2010. Räjätystyöt. Suomen Rakennusmedia Oy. Tampere: Tammerprint Oy.
3. Petrow, Seppo. 2014 Ruiskubetonointi ja sen mahdollisuudet. Betoniteollisuus ry. Verkkoaineisto. <[https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1404\\_30-37.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1404_30-37.pdf)>. Luettu 27.10.2021.
4. Suomen Betoniyhdistys ry. 2015. Ruiskubetoniohjeet 2015. BY – Koulutus Oy. Tampere: Tammerprint Oy
5. RIL 154-2. 1987. Tunneli- ja kalliorakennus 2. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL
6. Normet, <<https://www.normet.com/smartspray/#2bb32464>> luettu 1.12.2021.
7. Väylävirasto. Louhintaa ja räjäytyksiä tietyömailla. Verkkoaineisto. <<https://vayla.fi/ymparisto/melu-tarina/louhinnat>> luettu 6.12.2021.
8. Raide-Jokeri. Patterimäen raitiotunneli valmistuu vaihe vaiheelta. Verkkoaineisto. 23.8.2021. <<https://raidejokeri.info/patterimaen-raiotietunneli-valmistuu-vaihe-vaiheelta/>> Luettu 7.12.2021.
9. Kosonen, Reijo. Työmaapäällikkö, Patterimäen tunneli, YIT Suomi Oy, Helsinki. Microsoft Teams -keskustelu 2.6.2021.
10. Oikkonen, Panu. Normet Oy, Espoo. Microsoft Teams -keskustelu 30.10.2021

11. YIT Oyj, <<https://www.yitgroup.com/fi/news-repository/sijoittajauutiset/yit-on-sopinut-uudesta-infrahankkeesta-tukholmassa-ruotsissa-noin-130-miljoonan-euron-arvosta>> Luettu 21.12.2021
12. Byggvärlden. YIT och Veidekke får stora tunneluppdrag. Verkkouutinen. Julkaistu 26.6.2019. <<https://www.byggvarlden.se/yit-och-veidekke-far-stora-tunneluppdrag/>> Luettu 21.12.2021
13. Prusila, Jorma. Työmaapäällikkö, E2 Smedslättenin tunneli, YIT Sverige AB. Tukholma. Microsoft Teams -keskustelu 15.12.2021
14. Mining Technology. From labour-intensive to fully-automated: The evolution of underground concrete spraying. Verkkouutinen. Julkaistu 14.10.2019. <<https://www.mining-technology.com/sponsored/from-labour-intensive-to-fully-automated-the-evolution-of-underground-concrete-spraying/>> Luettu 15.12.2021
15. Myllymäki, Jerry. Insinööriopiskelija, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki.
16. Huttunen, Heikki. Chief Engineer, Concrete Spraying, Normet Oy, Iisalmi. Määttä, Kalle. Chief Engineer, Automation & Digital Twins, Normet Oy, Iisalmi. Microsoft Teams -keskustelu 4.2.2022
17. Iterio AB, <<https://iterio.se/projekt/geoteknik/forbifart-stockholm>> Luettu: 11.3.2022
18. New concrete spraying robot reduces CO2, 12.2021. Verkkoaineisto. Implenia AG <<https://impact.implenia.com/en/article/new-concrete-spraying-robot-reduces-co2-emissions/>> Luettu: 11.3.2022
19. Fise Oy, Kalliorakenteiden työnjohtaja, pätevyysvaatimukset. Verkkoaineisto. <<https://fise.fi/patevyyspalvelu/hae-patevyutta/tyonjohtajat/kalliorakennustoiden-tyonjohtaja/>>