



**SAVONIA**



# PATOTYÖMAAN LAADUN- TARKKAILU JA TYÖMAAN VALVONTA

TEKIJÄ/T: Jukka Ruotsalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jukka Ruotsalainen	
Työn nimi Patotyömaan laaduntarkkailu ja työmaan valvonta	
Päiväys 22.11.2013	Sivumäärä/Liitteet 52
Ohjaaja(t) Lehtori Raimo Lehtiniemi, Lehtori Juha Pakarinen, Yhdyskuntatekniikan insinööri Mikko Airaksinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Yara Suomi Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kesällä 2013 Siilinjärvellä Yara Suomi Oy:n kaivosalueella alkoi Mustin padon korotus ja osittainen uuden penke-reen rakentaminen. Korotus tehtiin, koska rikastusprosessista syntyvälle rikastushiekalle tarvittiin lisää tilaa. Projek- tin kestoksi arvioitiin noin kolme vuotta.</p> <p>Patotyömaan laaduntarkkailulla ja työmaan valvonnalla varmistetaan, että padon rakenteet ovat kestäviä ja ne toimivat suunnitellusti. Velvoite padonrakennuksen laaduntarkkailuun on ilmoitettu lainsäädännössä, sillä huonolaa- tuiset rakenteet sortuessaan vaarantavat pahimmillaan alueen ympäristön ja lähiasutuksen. Turvallisuuden lisäksi myös taloudellisilla sekoilla on merkitystä, sillä padot ovat kalliita investointeja. Laaduntarkkailulla ja työmaan val- vonnalla ehkäistään rakenteellisia virheitä, jotka vaativat korjaamista tai purkamista.</p> <p>Opinnäytetyön aiheena oli kyseisen työmaan laaduntarkkailu ja työmaan valvonta, ja tavoitteena oli varmistaa kes- tävät patorakenteet. Työssä paneuduttiin aluksi patoturvallisuuteen, patojen suunnittelun lähtökohtiin, patoraken- teisiin sekä rakenteiden laadunvalvontamenetelmiin. Edellä mainitut toimivat taustana laaduntarkkailuun sekä työ- maan valvontaan, joista työn loppupuoliskoon koottiin kattava kuvaus.</p> <p>Patotyömaan rakennusvaiheita kesältä 2013 olivat esimerkiksi patopohjan raivaus, massanvaihdot, kallioiden beto- nointi ja moreeni-, suodatin- ja tukipengerrakenteiden rakentaminen. Laaduntarkkailua tehtiin kaikissa työvaiheis- sa, ja lisäksi rakennusmateriaalit ja patopohja todettiin kelvollisiksi laadunvalvontakokeilla. Kaikki rakenteet ja näyt- teidenottoaikat mitattiin ja kartoitettiin. Tuloksena työstä saatiin laadunvalvontaraportti.</p> <p>Rakennuttajana oli Yara Suomi Oy ja pääurakoitsijana toimi E. Hartikainen Oy. Näytteiden käsittelyn hoiti Pöyry Oy, ja padon korotuksen suunnitelmat laati Ramboll Oy.</p>	
Avainsanat Pato, padot, laadunvalvonta, laaduntarkkailu, työmaan valvonta	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Jukka Ruotsalainen			
Title of Thesis Quality Control of the Dam Site			
Date	22.11.2013	Pages/Appendices	52
Supervisor(s) Mr Raimo Lehtiniemi, Lecturer, Mr Juha Pakarinen, Lecturer, Mr Mikko Airaksinen, Civil Engineer			
Client Organisation/Partners Yara Suomi Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of quality control of a dam site is to ensure structural durability and that structures perform as designed. Legislation obligates to control the quality of dam sites because inferior structures pose a threat to the surrounding environment and dwellings. It is also more economical to build a dam which needs less repairing. Quality control effectively prevents structural flaws which need correcting or dismantling.</p> <p>The purpose of the thesis was to carry out the quality control of the Musti dam site. The construction project of the Musti dam site was started at the Yara Suomi Oy mine site in the summer of 2013. The goal of the project was to raise height of the existing structures and building some new embankment. Extra deposit space was needed for tailing sand coming from the ore enrichment process. This thesis studied dam safety, basics of dam designing, dam structures and the practical methods of quality control.</p> <p>Different phases in the construction of the Musti dam site were the clearing of groundwork, mass exchanges, concreting of parts of the bed rock and building of the moraine, filter and support embankment structures. Quality control was performed in all the phases. In addition, raw material of the structures and groundwork were examined to be eligible by the means of quality control. As an outcome a comprehensive progress report of the construction site was made about the things aforementioned. Different parties which took part in the construction project were Yara Suomi Oy, E. Hartikainen Oy, Ramboll Oy and Pöyry Oy.</p>			
Keywords Dam, Dams, Quality control			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	PATOTURVALLISUUS .....	7
2.1	Padon suunnittelu .....	7
2.2	Patoluokat .....	7
2.2.1	1-luokan pato .....	8
2.2.2	2-luokan pato .....	8
2.2.3	3-luokan pato .....	9
2.2.4	Padon luokittelematta jättäminen .....	9
2.3	Padon tarkkailu .....	9
3	PATOTYYPIT .....	10
3.1	Vyöhykepato .....	10
3.2	Homogeeninen maapato .....	11
3.3	Louhepato .....	11
4	MAAPATOJEN SUUNNITTELU .....	13
4.1	Maastotutkimukset .....	13
4.1.1	Yleispiirteinen pohjatutkimus .....	13
4.1.2	Rakennekohtainen pohjatutkimus .....	13
4.2	Materiaalitutkimukset .....	14
4.2.1	Tiivistysmateriaalit .....	14
4.2.2	Moreenin rakeisuuskäyrä ja eroosioherkkyys .....	14
4.2.3	Suodatinmateriaalit .....	15
4.2.4	Tukipengermateriaalit .....	16
5	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	17
5.1	Koekuopat .....	17
5.2	Painokairaus .....	17
5.3	Näytteenotto .....	18
5.4	Kallionäytekairaukset ja vesimenekikokeet .....	19
6	RAKENTEIDEN LAADUNVALVONTAMENETELMÄT .....	21
6.1	Seulonta ja areometrikoe .....	21
6.2	Parannettu Proctor-koe .....	23
6.3	Tiivysmittaukset Troxler-laitteella .....	24

7	MUSTIN PADON SIJAINTI JA YLEINEN KUVAUS .....	26
8	MUSTIN PADON RAKENNUSVAIHEET JA TYÖNAIKAINEN LAADUNVALVONTA .....	28
8.1	Alustavat työt, patopohjan raivaustyöt ja massanvaihdot.....	28
8.2	Moreenirakenteet.....	35
8.3	Tukipengerrakenteet ja luiskaverhous .....	39
8.4	Suodatinrakenteet.....	40
8.5	Muut poikkeavat rakenteet .....	44
9	KALLIONÄYTEKAIRAUKSET MUSTIN PADOLLA.....	45
9.1	Patoalueen kallioruhjeet .....	45
9.2	Vesimenekikokeet .....	45
10	LAADUNVALVONNAN YHTEENVETO .....	47
10.1	Patotyömaan laadunvalvonnan yleiset seikat .....	47
10.2	Toteutuneet rakenteet ja laadunvalvontatulokset .....	47
	LÄHTEET .....	49
	LIITE 1: PITUUSLEIKKAUS PADONKOROTUKSESTA.....	50
	LIITE 2: MAANÄYTTEIDEN, MOREENIEN JA MURSKOIDEN TULOKSET.....	51
	LIITE 3: TROXLER-MITTAUSTEN TULOKSIA.....	52

## 1 JOHDANTO

Yara Suomi Oy:n tehtailla Siilinjärvellä tuotetaan rikkihappoa, typpihappoa, fosforihappoa sekä lannoitteita. Tehtaiden vieressä on avolouhos, josta louhitaan apatiittimalmia fosforihapon ja lannoitteiden raaka-aineeksi. Rikastusprosessin sivutuotteena syntyy myös esimerkiksi kalkkia, biotiittia ja kiillettä, jota LKAB Oy jatkojalostaa. Siilinjärven louhoksella louhitaan kallioperää vuodessa noin 8 000 000 m<sup>3</sup>, joista rikastamolle ajettavan malmiksi laskettavan raaka-aineen osuus on noin 4 000 000 m<sup>3</sup>. Jäljelle jäävä osa on sivukiveä eli raakkua, josta huonolaatuisimmat ajetaan läjityksiin tai tienpohjiin, ja kovemmasta tehdään mursketta.

Rikastusprosessista syntyy noin 7 000 000 m<sup>3</sup> rikastushiekkaa. Rikastushiekka on rikastusprosessin sivutuote, joka syntyy kun apatiittia rikastetaan louhitusta raaka-aineesta. Malmin apatiittipitoisuus vaihtelee 2 - 5 % välillä, mutta valmiissa apatiittirikasteessa, pitoisuus on noin 40 %. Rikaste toimii raaka-aineena fosforihappotehtaalle. Louhitusta apatiitista noin 90 % saadaan rikastettua, mutta loput 10 %, jota ei onnistuta taloudellisesti erottamaan, päätyvät Mustin patoaltaalle läjitykseen rikastushiekan ohella. Rikastushiekka pumpataan rikastamolta veden mukana Mustin patoaltaalle läjitykseen. Prosessissa on käytössä suljettu vesikierto, eli vesi pumpataan takaisin rikastamolle vesialtaalta, kun taas rikastushiekka läjittyy patoaltaalle. Varsinaisen patoaltaan vieressä on niin sanottu laskeutusallas, jossa vesi selkeytetään laskeuttamalla ennen kuin se pumpataan takaisin prosessiin muiden laskeutusaltaiden kautta.

Nykyisestä Mustin pato-altaasta on kuitenkin tila loppumassa noin kahden vuoden kuluessa, ja lisätilavuuden saamiseksi patoaltaan nykyisiä penkkoja korotetaan keskimäärin viisi metriä. Lisäksi uutta patopenkkaa rakennetaan paikoitellen lisää. Yhteensä korotettavaa penkkaa on noin neljä kilometriä. Patopenkat on suunniteltu niin, että korotusvaraa jää vielä tulevaisuudenkin varalle, jos kaivostointi jatkuu nykyistä vuoteen 2035 ulottuvaa suunnitelmaa pidemmälle. Padonkorotusprojekti on suunniteltu kolmivuotiseksi. Moreenia on laskettu menevän noin 700 000 m<sup>3</sup>rtr, louhetta 250 000 m<sup>3</sup>rtr ja suodatinrakenteiden murskeita noin 200 000 m<sup>3</sup>rtr. Varsinaisen patopenkan ohella tullaan rakentamaan myös kuljetusreittejä sekä yksi työpato. Muita padonkorotukseen liittyviä töitä ovat myös maaston raivaukset noin 100 000 m<sup>2</sup> alalta, massanvaihdot ja tiivistykset.

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena toteuttaa laadunvalvontaa ja varmistaa, että pato rakennetaan suunnitellusti. Ohella tulee myös dokumentoitua padonrakennuksen eteneminen sekä rakennekerrosten toteutunut rakenne mahdollista myöhempää tarkastelua varten. Asianmukainen laadunvalvonta vaatii myös patotyyppien, patovaurioiden sekä patoturvallisuuslain tuntemusta, minkä takia niitäkin käsitellään tässä työssä. Lisäksi tutustutaan esimerkiksi suoritettaviin tiiveys- ja vedenläpäisevyysmittauksiin sekä maanäytteiden rakeisuusmäärittäisiin kirjallisuuskatsauksella ja käytännön kokeilla.

## 2 PATOTURVALLISUUS

Pato rakennetaan vuonna 2009 voimaan tulleen patoturvallisuuslainsäädännön mukaan. Patoturvallisuuslain ja valtioneuvoksen asetuksen tavoitteena on "varmistaa turvallisuus padon rakentamisessa, kunnossapidossa ja käytössä sekä vähentää padosta aiheutuvaa vahingonvaaraa." (Patoturvallisuuslaki 494/2009, 1 §).

### 2.1 Padon suunnittelu

Padon omistajan kannattaa ottaa yhteyttä paikalliseen patoturvallisuusviranomaiseen padon suunnittelun alussa ja varmistaa, että patoturvallisuusvaatimukset otetaan huomioon jo alusta alkaen.

Omistajan on myös toimitettava padon rakentamista koskevat suunnitelmat patoturvallisuusviranomaiselle. (Patoturvallisuusopas 2012, 9.) PTL 6 §:ssa ja PTA 1 §:ssa asetetaan pätevyysvaatimukset padon suunnittelijalle. Padon suunnittelijalla täytyy olla riittävän syvä asiantuntemus patoturvallisuusvaatimuksista sekä padon turvallisuuteen vaikuttavista tekijöistä, kuten olosuhteista, käytöstä ja turvajärjestelmistä. (Patoturvallisuusopas 2012, 7.)

Mittavissa patoprojekteissa nimetään aina pääsuunnittelija, joka voi olla myös itse padon suunnittelija. Pääsuunnittelijan vastuualueeseen kuuluvat eri osa-alueet, kuten hydrologinen mitoitus, patorakenteet, juoksutusrakenteet ja tarkkailulaitteet sekä niiden yhteensovitus. (Patoturvallisuusopas 2012, 9.) Padon toimivuutta tarkastellaan kohteen vaatimassa laajuudessa. Kohteesta riippuen voidaan tarkastella esimerkiksi padon ja uomien toimintaa, mahdollisten ylipadotuksien kokoa ja kestoa, normaaleja käyttötilanteita kesäisin ja talvisin, erinäisiä tulvatilanteita sekä käyttöhäiriöistä, -ongelmista tai -virheistä seuraavia tilanteita. (Patoturvallisuusopas 2012, 9.)

Vesistöpato mitoitetaan virtaamalle, joka aiheuttaa padolla suurimman juoksutus-tarpeen. Mitoitus esitetään tätä virtaamaa vastaavan tulvan (mitoitustulva) vuotuisena todennäköisyytenä tai toistuvuutena.

Vesistöpadon mitoitustulvana käytetään tulvaa, joka esiintyy:

- 1) 1-luokan padolla 0,02 - 0,01 prosentin todennäköisyydellä eli keskimäärin kerran 5 000 - 10 000 vuodessa;
- 2) 2-luokan padolla 0,2 - 0,1 prosentin todennäköisyydellä eli keskimäärin kerran 500 - 1 000 vuodessa;
- 3) 3-luokan padolla 1 - 0,2 prosentin todennäköisyydellä eli keskimäärin kerran 100 - 500 vuodessa.

Vesistöpato mitoitetaan siten, että mitoitustulvan aikana padotusaltaan vedenkorkeus ei ylitä padon turvallista vedenkorkeutta, kun padon juoksutuskapasiteetti ilman voimalaitoksen koneistovirtaamia on käytössä. (Patoturvallisuusasetus 319/2012, 2 §).

### 2.2 Patoluokat

Padot luokitellaan 1-, 2-, ja 3-luokkaan vahingonvaaran perusteella. Luokittelu voidaan kuitenkin jättää tekemättä, jos patoturvallisuusviranomaisen mielestä padosta ei aiheudu vaaraa. Patoturvallisuuslaki koskee vesistö-, jäte- ja kaivospatoja ja tulvapenkereitä, mutta myös tilapäisiä patoja kuten työpatoja. (Patoturvallisuusopas 2012, 18.)

Luokittelussa huomioidaan patopenkereen sortumaa seuraava tulva-aallon vahingonvaara ja altaan tyhjenemisestä padon yläpuolelle aiheutuva vaara. Jätepatojen luokitteluun vaikuttaa myös altaassa olevan aineen laatu ja määrä, ympäröivän alueen maankäyttö sekä aineen mahdollisesta leviämisestä syntyvät haitat esimerkiksi pohjavedelle, vesistöille tai muille luontoarvoille. Jätepadot voidaan kuitenkin luokitella myös samoin perustein kuin vesistöpadot, jos sortuman jälkeisen tulva-aallon haitat katsotaan suuremmaksi kuin padotun aineen leviäminen. (Patoturvallisuusopas 2012, 18.)

Pato sijoitetaan vahingonvaaran perusteella johonkin seuraavista luokista:

- 1) 1-luokan pato, joka onnettomuuden sattuessa aiheuttaa vaaran ihmishengelle ja terveydelle taikka huomattavan vaaran ympäristölle tai omaisuudelle;
- 2) 2-luokan pato, joka onnettomuuden sattuessa saattaa aiheuttaa vaaraa terveydelle taikka vähäistä suurempaa vaaraa ympäristölle tai omaisuudelle;
- 3) 3-luokan pato, joka onnettomuuden sattuessa saattaa aiheuttaa vain vähäistä vaaraa.

Luokittelua ei tarvitse tehdä, jos patoturvallisuusviranomainen katsoo, että padosta ei aiheudu vaaraa. (Patoturvallisuuslaki 494/2009, 11 §).

### 2.2.1 1-luokan pato

1-luokan padot ovat patoja, jotka onnettomuuden sattuessa aiheuttavat vaaraa joko ihmisille, terveydelle tai ympäristölle. Ihmisille ja terveydelle aiheutuvaa vaaraa katsotaan olevan, jos padon alapuolisella alueella on asutusta ja mahdollisen sortuman jälkeinen tulva-aalto aiheuttaa vahinkoa kyseiselle asutukselle. (Patoturvallisuusopas 2012, 18-19.)

Pato voidaan luokitella 1-luokkaan myös ympäristölle aiheutuvan vaaran perusteella. Tällaisia vaaroja ovat esimerkiksi jos tulva-aallon tai jäte- tai kaivospadon onnettomuuden seurauksena tuhoutuu joko suojeltua aluetta tai harvinainen laji, tai pohja- tai pintaveteen pääsee epäpuhtauksia. (Patoturvallisuusopas 2012, 18-19.)

Luokitus 1-luokkaan voidaan tehdä myös omaisuuden perusteella, jos pato-onnettomuus aiheuttaa huomattavia menetyksiä rahallisesti. Menetyksiksi voidaan laskea esimerkiksi asuinrakennuksia, julkisia rakennuksia, yhteiskuntaan vaikuttavia rakennuksia kuten sähkön ja veden jakeluun liittyvät rakennukset, tuotantolaitokset tai infrastruktuuria. (Patoturvallisuusopas 2012, 18-19.)

### 2.2.2 2-luokan pato

2-luokan padot voivat aiheuttaa vaaraa terveydelle, mutta eivät ihmishenkien menetystä onnettomuustilanteissa. Ympäristölle ja omaisuudelle saattaa taas mahdollisesti aiheutua vähäistä suurempaa vaaraa, mutta vähemmän kuin 1-luokan padon pato-onnettomuudessa. (Patoturvallisuusopas 2012, 19.)

Jäte- ja kaivospadoista 2-luokkaan katsotaan padot, jotka aiheuttavat onnettomuustilanteissa vähäistä suurempaa vaaraa vesistöjen laadulle, pilaavat viljelysalueita tai rajoittavat niiden pitkäaikais- ta käyttöä, tai pilaavat talousvesikaivoja. (Patoturvallisuusopas 2012, 19.)



### 2.2.3 3-luokan pato

3-luokan patoja ovat vain vähäistä vaaraa aiheuttavia. Onnettomuuksien sattuessa niistä ei todennäköisesti aiheudu haittaa ihmisille tai terveydelle, ja suurimmillaan vain vähäistä haittaa ympäristölle tai omaisuudelle. (Patoturvallisuusopas 2012, 19.)

3-luokan patojen sortumatapauksissa patojen alapuoliset kiinteistöt eivät saa vahingoittua, mutta vähäisiä vahinkoja viljelyksille voi syntyä. Jos kyseessä on jätepato, niin padottu aine on laadultaan sellaista, että onnettomuudesta seuraa korkeintaan lyhytaikainen vaikutus purkuvesistöön ja että se ei aiheutua pilaantumisvaaraa pohjavesistöille. (Patoturvallisuusopas 2012, 19.)

### 2.2.4 Padon luokittelematta jättäminen

Pato voidaan jättää luokittelematta, jos sen korkeus alittaa ohjeelliset kolme metriä. Patoturvallisuusviranomaisen voi kuitenkin päättää alle kolme metristen padon luokituksesta, jos siitä aiheutuu vähäistä tai enemmän vaaraa. Viranomaisen voi myös päättää jättää luokittelematta yli kolme metriä korkean padon, jos siitä ei aiheudu vaaraa. (Patoturvallisuusopas 2012, 19 - 20.)

## 2.3 Padon tarkkailu

Tarkkailuohjelma koostuu sekä jatkuvatoimisesta tarkkailusta että määräaikaista tarkkailukierroksista. Velvoite tähän tulee patoturvallisuuslaista- ja asetuksesta. Ohjelmassa on otettava huomioon kaikki turvallisuuteen vaikuttavat asiat. Kun rakennetaan uusia patoja, on suositeltavaa että padon suunnittelija tekee myös tarkkailuohjelman. Vanhojen patojen tarkkailuohjelman tekee määräaikaistarkastuksen asiantuntija. (Patoturvallisuus opas 2012, 22.)

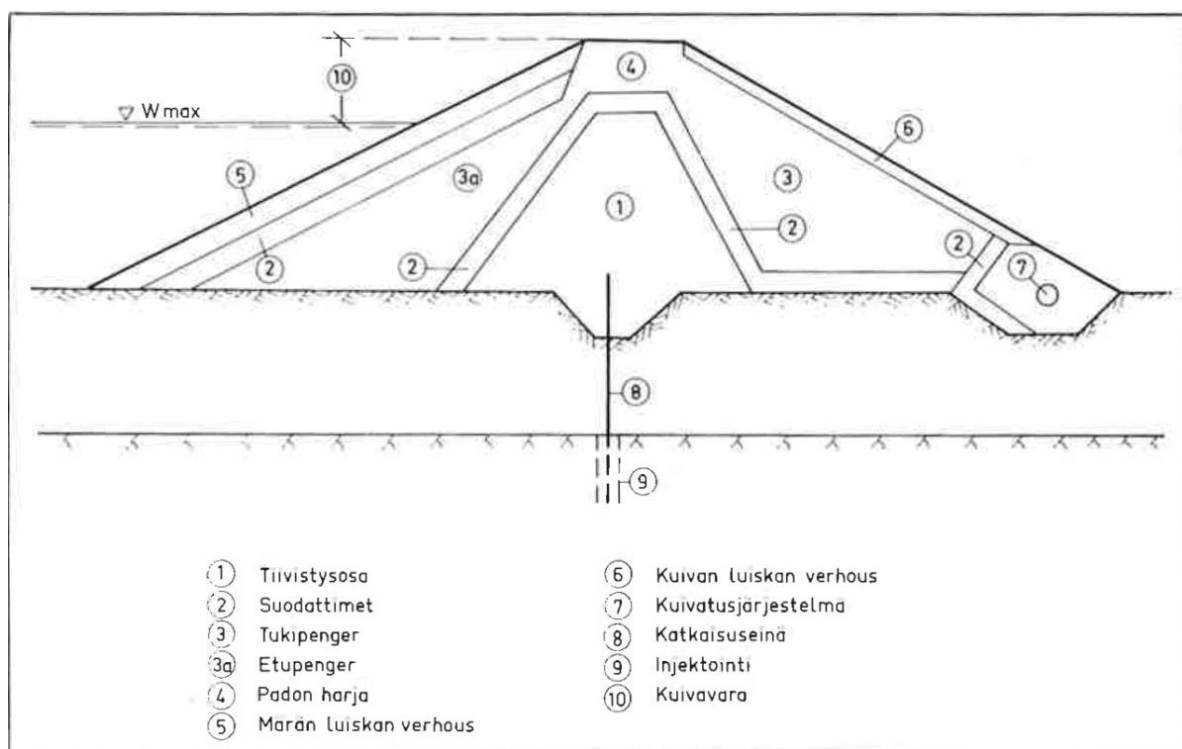
Tarkkailuohjelmassa esitetään padon tarkkailun aikavälit, tarkkailtavat kohteet ja tarkkailuun liittyvät toimenpiteet erikseen padon käyttöönoton ja käytön ajalle. Tarkkailuohjelmassa esitetään myös, miten padon tarkkailua tehostetaan tulvien, rankkasateiden, kovien tuulien ja muiden vastaavien erityisten rasisitusten aikana. (Patoturvallisuusasetus, 319/2012, 8 §).

Aikavälit tarkkailulle suunnitellaan niin, että ongelmat huomataan ajoissa. Padon ensitäytön ajan tarkkailu voi olla koko aikaista, mutta kun tilanne vakiintuu, voidaan tarkkailukertoja vähentää portaittain harvemmaksi. Kaivospadoilla tarkkailukertojen määrä suunnitellaan padon käyttötavan mukaan joko joka päivä tapahtuvaksi tai harvemmaksi. (Patoturvallisuus opas 2012, 22.)

### 3 PATOTYYPIT

Padoiksi kutsutaan rakenteita, jotka joko estävät tai sulkevat luonnollisen vedenkulun. Suomen yleisimmät patotyyppit ovat homogeeninen maapato, pysty- tai vinosydämellä rakennettu vyöhykepato, louhepato sekä betonipadot. Nämä padot voidaan jaotella useampiin alatyyppeihin. (Slunga 2004, 2.)

Rakenneosien sijoitus ja mitat voivat vaihdella suuresti patotyyppin mukaan. Kaikki osat eivät välttämättä ole selkeästi eroteltavissa, vaan osien toimintaa on yhdistelty käyttämällä valittuja materiaaleja. Kuvassa 1 maapatojen rakenteelliset osat. (Leskelä 2004, 17.)



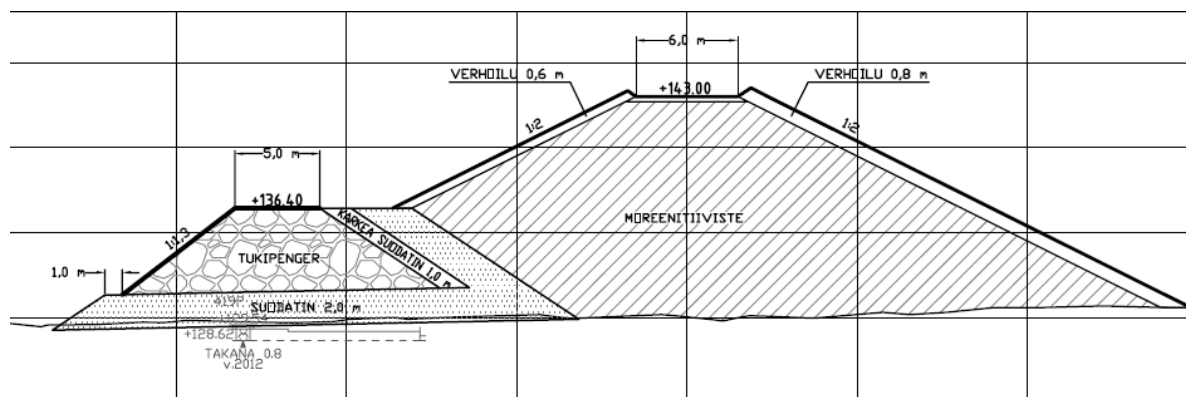
Kuva 1. Maapatojen rakenteellisiä osia (RIL 123 1979, 73)

#### 3.1 Vyöhykepato

Vyöhykepato on rakennettu vedenläpäisevyydeltään erilaisista materiaaleista. Veden virtaus padon läpi estetään tiivistysosalla, joka voidaan rakentaa maasta tai keinotekoisesta aineesta, esimerkiksi betonista, teräksestä, asfaltista tai muovista. Tiivisteosarakenteelle on olemassa erilaisia rakenteellisiä mahdollisuuksia. (Slunga 2004, 3.)

Vyöhykepatojen rakenteissa eri materiaaleja voidaan käyttää eri suhteissa. Padon etuina ovat että karkeat materiaalit vähentävät padon kokonaistilavuutta, koska ne mahdollistavat jyrkemmät luiskat, sekä sopivalla suunnittelulla patoa on mahdollista rakentaa myös sateella ja pakkasella. Vyöhykepatojen rakentaminen on mahdollista periaatteessa vuoden ympäri, toisin kuin homogeenisen maapatojen. Haittoja ovat mm. työn valvonnan vaikeutuminen kun käsitellään erinäisiä rakennusmateriaaleja eri rakennekerroksissa. Kosketuksissa olevien materiaalien on täytettävä keskenään kriteerit suo-

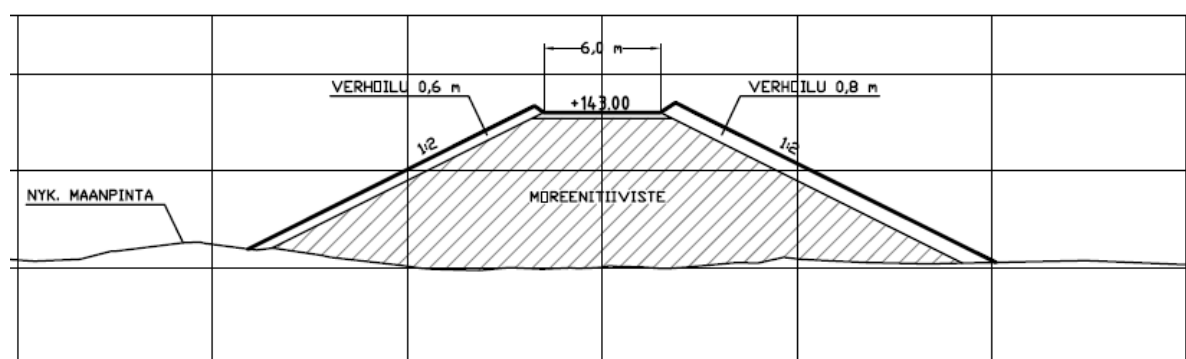
datukseen liittyen, mikä voi olla hankalaa tehdä ilman massojen ylimääräistä käsittelyä. Varsinkin isoissa vyöhykepadoissa vierekkäisten rakennekerrosten eriävät muodonmuutosominaisuudet voivat olla haasteellisia ratkottavia ongelmia. (Slunga 2004, 3.) Kuvassa 2 tyypillinen vyöhykepadon poikkileikkaus Mustin patoalueelta.



Kuva 2. Tyypillinen poikkileikkaus vyöhykepadosta (Kohonen 2012)

### 3.2 Homogeeninen maapato

Homogeeninen maapato on yhdestä maamateriaalista rakennettu pato, jonka tyypillinen poikkileikkaus on nähtävissä kuvassa 3. Maapatojen korkeus on yleensä alle kymmenen metriä, mutta maapadoista voidaan tehdä jopa 50 m korkeita. Pato voidaan rakentaa esimerkiksi kuivakuorisavesta, siltistä tai moreenista. Homogeenisen maapadon etuina ovat rakentamisen selkeys ja tiiveyden valvonnan yksinkertaisuus. Savea ja silttiä käytettäessä rakennekerrosten tiivistäminen voi kuitenkin olla hankalaa. Haittoina taas ovat rakentamiseen vaadittavat suuret massamäärät sekä rakennusajan vaatimat hyvät sääolosuhteet. Sateella ja pakkasella rakentaminen ei onnistu. (Slunga 2004, 2.)

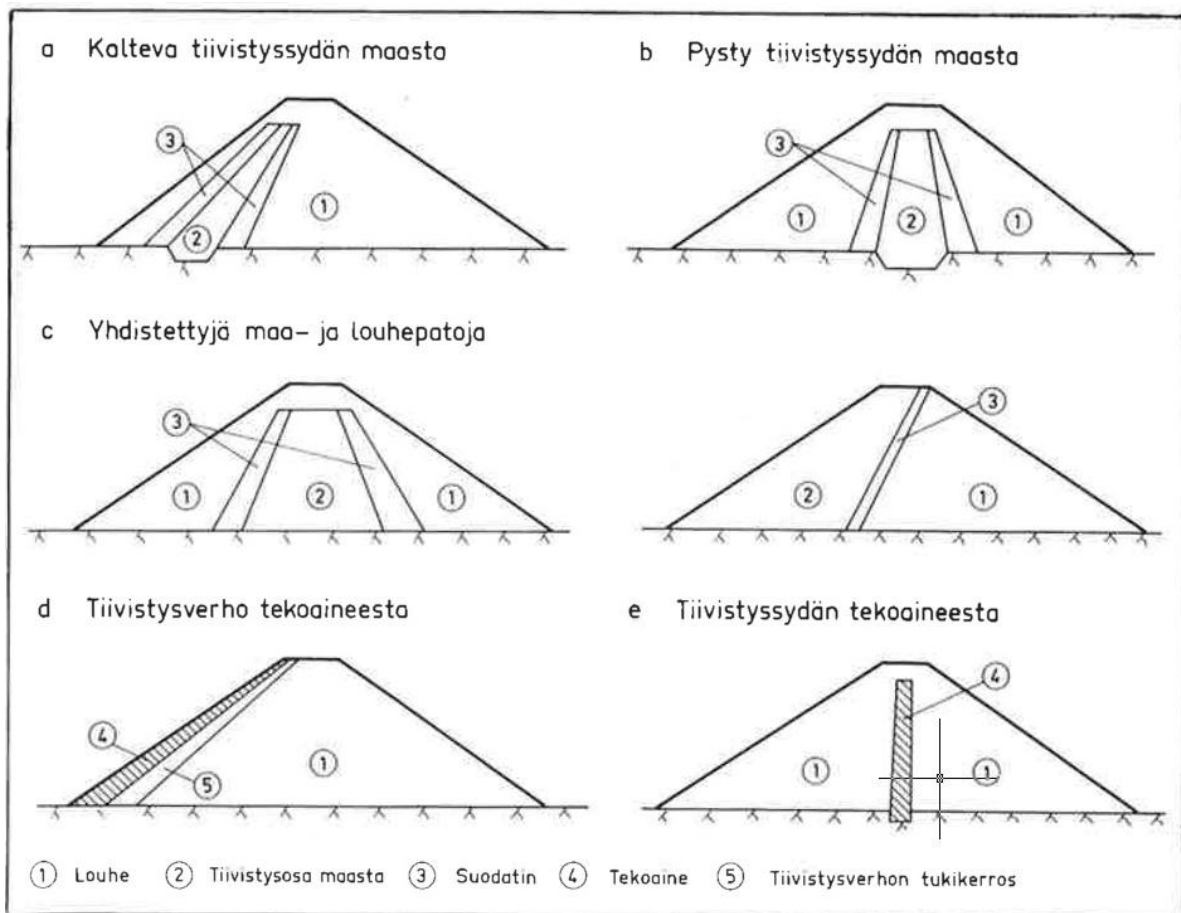


Kuva 3. Poikkileikkaus Mustin patoalueen homogeenisestä maapadosta (Kohonen 2012)

### 3.3 Louhepato

Louhepadoissa materiaalit ovat suurimmaksi osaksi hyvin vettä läpäisevää louhetta tai luonnonkiveä. Myös louhepatojen tiivistesyden tehdään huonosti vettä läpäisevästä materiaalista, kuten maasta tai keinotekoisesta aineesta. Näitä patoja voidaan rakentaa säästä riippumatta, kunhan rakennemateriaaleihin ei vain pääse lunta tai jäätä, lukuun ottamatta tiivistysosaa joka joudutaan yleensä tekemään sulalla kelillä. Toisena etuna louhepadoissa on mahdollisuus tehdä niistä ylivirtauksen kestä-

viä, mutta toisaalta ne vaativat kantavamman pohjan kuin maapadot. Usein louhepatoihin rakennetaan tekoaineesta tiivisteverho padon luiskan päälle, ja näitä käytetään esimerkiksi paikoissa joissa on jatkuvia suuria ja nopeita vedenpinnan vaihteluita. (Slunga 2004, 3.) Kuvassa 4 on esitelty joitain louhepatotyypppejä.



Kuva 4. Louhepatotyypppejä (RIL 123 1979, 75)

## 4 MAAPATOJEN SUUNNITTELU

Padot suunnitellaan suunnitellun alueen geologian ja maaperän mukaan. Suunnittelijan täytyy ottaa nämä seikat huomioon, ja tehtävä taloudellinen sekä turvallinen rakenne saatavilla olevista materiaaleista. Maapadot ovat erilaisia keskenään, ja näin ollen yleispätevää yksityiskohtaista suunnitelmaa ei voi laatia. (Leskelä 2004, 5.)

Maapatoja on käytetty ja käytetään yhä kastelu- sekä talousveden varastointiin, ja näitä patoja on määrällisesti eniten. Seuraavana ovat vesivoimaan ja tulvasuojeluun tarkoitettut padot. Vesivoimalat kuitenkin ovat tunnetuimpia patoja, sillä ne ovat saaneet eniten huomiota julkisuudessa, ja moni ei edes ole tietoinen muunlaisten patojen olemassaolosta. Lisäksi kaivoksille tehdään jätepatoja, ja kaatopaikoille, jotka ovat pohjavesialueiden läheisyydessä, tehdään patorakenteita. (Leskelä 2004, 2.)

### 4.1 Maastotutkimukset

#### 4.1.1 Yleispiirteinen pohjatutkimus

Yleispiirteiseen pohjatutkimuksen taustalla ovat ilmakuvat, kartat maaperästä ja geologiasta ja materiaalialueet, sekä vaativissa kohteissa ruhjeilleet kalliot, siirtovyöhykkeet ja vanhat maaperän liikunnat. Aluetta tutkitaan myös geofysikaalisilla tutkimusmenetelmillä sekä koekairauksilla, joilla karotetaan kantava maa- ja kalliopohja. (Leskelä 2004, 5 - 6.)

Topografia määrittelee lyhimmän mahdollisen patolinjan, ja yleispiirteisellä pohjatutkimuksella varmistetaan että lyhin linja on myös taloudellisesti kannattavin. Maapohjan huono kantavuus, korkean vedenläpäisevyysarvon omaavat kerrostumat ja padon läheisyydessä olevien alueiden heikot kuivatusmahdollisuudet vaikuttavat taloudellisuuteen heikentävästi. Näistä sekoista johtuen topografisesti paras patolinja saattaa muodostua varsin läpäisevään kerrostumaan, mistä seurauksena suotovedet padon ympäri saattavat olla merkittäviä. Geofysikaalisilla tutkimuksilla, kairauksilla ja maasta otettavilla näytteillä varmistetaan edullisin mahdollinen patolinja. Samalla on myös tutkittava mahdolliset kallion injektointitarpeet kallionäytekairauksilla ja vesimenekikokeilla. Myös pohjaveden syvyys on tutkittava mahdollisen kuivatusojan kaivun kustannusten arvioinniksi. (Leskelä 2004, 5 - 6.)

#### 4.1.2 Rakennekohtainen pohjatutkimus

Padon pohjan kantavuus, lujuusominaisuudet sekä vedenläpäisevyys tutkitaan rakennekohtaisessa pohjatutkimusvaiheessa geofysikaalisilla menetelmillä, kairauksilla ja näytteenotoilla. (Leskelä 2004, 6.)

Kairauksia on syytä tehdä noin 50 m välein, ja padon helman ulkopuolelle ulottuvia poikkileikkauksia noin 100 - 150 m välein. Näytteitä otetaan ainakin joka neljännessä kairauksesta. Jos kallionpinta on tarpeeksi lähellä maanpintaa, kallionäytekairauksia ja vesimenekikokeita pitäisi tehdä noin 250 m välein. (Leskelä 2004, 6.)

Maastossa on tärkeää tehdä myös pohjavesihavainnot, ja ne olisi hyvä aloittaa ainakin vuotta ennen rakennustöiden aloittamista. Padon alle jäävistä siltti-, hiekka- ja sorakerrostumista on määritettävä vedenläpäisevyys. (Leskelä 2004, 6.)

## 4.2 Materiaalitutkimukset

Rakennusmateriaaleja on ensisijaisesti etsittävä padotusalueelle jääviltä alueilta, mikäli se on vain mahdollista. Näin rakennusmateriaalien ympäristökustannuksia ei pääse muodostumaan. Jos materiaaleja hankitaan patoalueen ulkopuolelta, ne vaativat maa-aineslain mukaisen käsittelyn. Käsittely voi lisätä projektin kustannuksia sekä kestoja. (Leskelä 2004, 7.)

### 4.2.1 Tiivistysmateriaalit

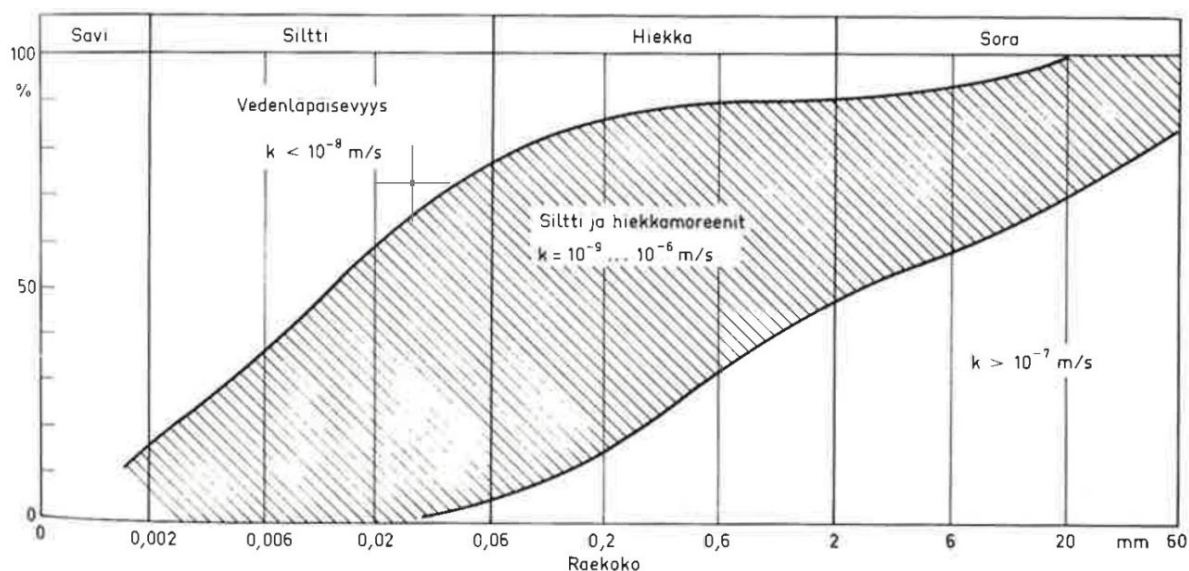
Tiivistysmateriaalit ovat oleellisia materiaaleja maapadoissa. Olosuhteiden mukaan tiivistysmateriaaleina voidaan käyttää savia, silttejä, moreeneita sekä rinnemuodostumia, jotka vastaavat rakeisuudeltaan moreenia. Eri materiaaleja voidaan myös sekoittaa keskenään, mutta se on kallista, kuten myös tiivistysosan materiaalin korvaaminen jollain keinomateriaalilla. (Leskelä 2004, 8.)

Ohjearvona tiivistysmateriaalin vedenläpäisevyydelle on  $k = 10^{-7}$  m/s, ja materiaalin pitäisi olla mahdollisimman homogeenistä ja eroosiokestävää. Käsittelyn kannalta materiaalin pitäisi olla tarpeeksi kuivaa ja se ei saisi olla kovin lohkarista. Muodostumille on syytä olla hyvät ajoyhteydet, mahdollisuus kuivattaa ne ottotasa myöten, rakennuttajan omistuksessa ja tarpeeksi lähellä maan pintaa, ettei pintamaita tarvitse poistaa paljoa. (Leskelä 2004, 8.)

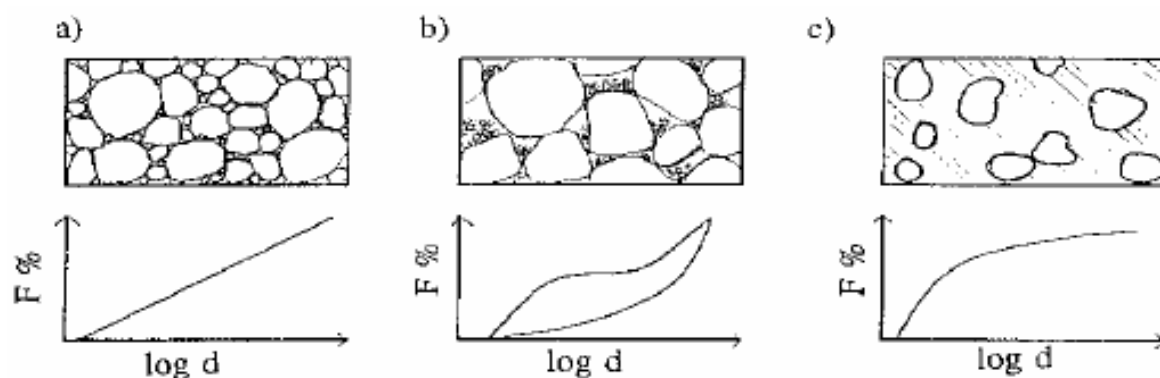
Hankesuunnitteluvaiheessa on kartoitettava tiivistysmateriaalimuodostumat maastosta, jotta voidaan tehdä kustannusvertailuja vaihtoehtoisten materiaalien määrän ja laadun suhteen. Laatutekijöitä ovat esimerkiksi rakeisuus, kosteus, kivisyys ja arvioitu tiivistettävyyys. Kun suunnittelu etenee, on mahdollisilta alueilta otettava näytteet laboratoriokokeita varten, joissa tutkitaan mm. luokitusominaisuudet, optimivesipitoisuus, vedenläpäisevyys sekä lujuus- ja painumaominaisuudet. Vedenläpäisevyys tulisi määrittää suotovirtauslaskelmia varten todennäköisessä sullontakosteudessa. (Leskelä 2004, 8.)

### 4.2.2 Moreenin rakeisuuskäyrä ja eroosioherkkyys

Suomessa maapatojen tiivistysosa on yleensä siltti- tai hiekkamoreenia. Kuvassa 5 näkyy rakeisuusvyöhyke, jolle käytettävät tiivistysmoreenit osuvat miltei aina. Kuva 6 havainnollistaa kuvan 5 rakeisuuskäyrien mukaisia maa-aineksia. Mitä lähempänä materiaalin rakeisuuskäyrä on suoraa, sitä suurempi sen sisäisen eroosion vastustuskyky on. (Leskelä 2004, 8 - 9.)



Kuva 5. Moreenien rakeisuusvyöhyke Suomen maaperällä (RIL 123 1979, 75)



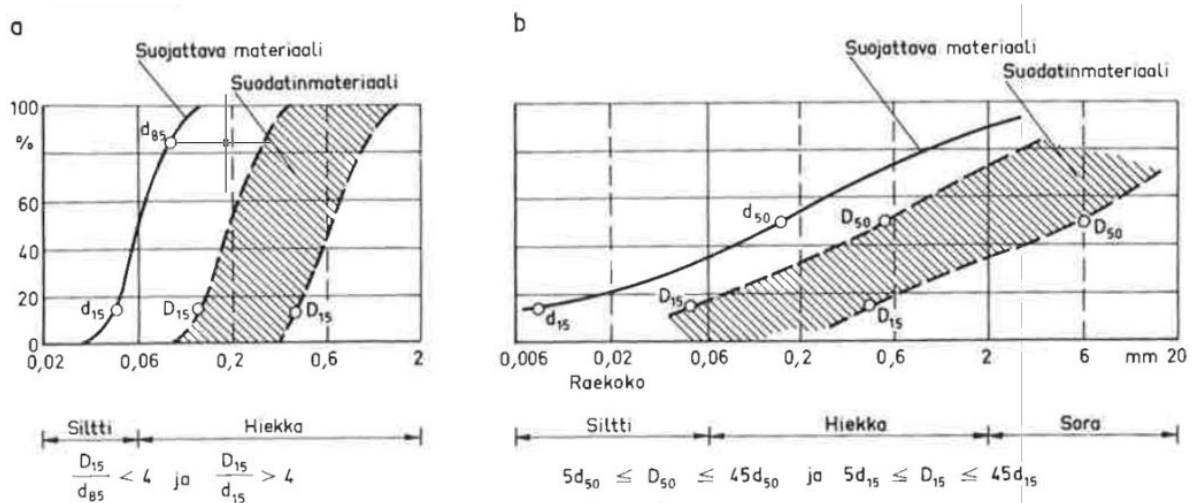
Kuva 6. Rakeisuuskäyrän havainnollistaminen (Leskelä 2004, 9)

Rakeisuuskäyrän lisäksi on olemassa muitakin tapoja arvioida moreenin kelpoisuutta tiivistysmateriaaliksi. Esimerkiksi yksi tapa on tutkia onko moreenissa tarpeeksi 0,063 mm:n seulan läpäisevää hienoainesta. Hienoainesta pitäisi olla vähintään 12 % 6 mm seulan läpäisseestä aineesta. Jos kohde on vaativa, pitäisi myös selvittää onko moreenissa paljon kvartsirakeita, sillä ne tekevät moreenista eroosioherkempää. (Leskelä 2004, 11.)

#### 4.2.3 Suodatinmateriaalit

Suodatinmateriaalit ovat maapadoissa oleellisia tiivistysmateriaalien tavoin, varsinkin sen toimivuuden suhteen. Materiaalitutkimukset vastaavat tiivistysmateriaaleille tehtäviä tutkimuksia, eli niiden suhteen selvitetään sullottavuus, vedenläpäisevyys, sekä luokitus- ja lujuusominaisuudet. Yleisiä suodatinmateriaaleja ovat hiekka ja sora, mutta myös keinomateriaalien, esimerkiksi suodatinkan-kaan, käyttö on yleistynyt viime vuosina. Suodatinmateriaali estää tiivistysosan eroosiota ja johtaa padon läpi suotautuvat vedet pois hallitusti. Suodatinmateriaalit eivät saa olla myöskään eroosioherkkiä verrattuna viereisiin rakennekerroksiin, kuten karkeampaan suodattimeen tai tukipenkereeseen. (Leskelä 2004, 12.)

Suodatinmateriaaleille on muodostettu eri käyttötarkoituksia varten suojattavan ja suojaavan materiaalien rakeisuuksiin perustuvia kriteereitä. Kuvassa 7 kuvattuna kaksi rakeisuuskäyriin perustuvaa kriteeriä.



Kuva 7. Suodatinmateriaalien kriteerit a) Terzaghin (1967) mukaan, b) Kjærnslin (1960) mukaan (RIL 123 1979, 78.)

Rakeisuuskäyrien lisäksi on kuitenkin kehitetty muitakin kriteereitä, sillä pelkkien käyrien käyttäminen materiaalivalintojen perustana on joskus johtanut epätoivottuihin tuloksiin. Muita kriteereitä ovat lisäksi seuraavat (Leskelä 2004, 13):

- Suodatinmateriaalin sekä suojattavan materiaalin rakeisuuskäyrien tulee olla lähelle samanmuotoisia.
- Jos suojattavassa materiaalissa on paljon soraa tai karkeampaa lajitetta, niin suojattavan materiaalin rakeisuus määritellään 20 mm seulan läpäisevästä osasta. Suodatinmateriaalin rakeisuus määritellään edellä mainitun rakeisuuden perusteella.
- Suodatinmateriaalissa täytyy olla alle 5 % 0,06 mm seulan läpäisevää hienoainesta, ja hienoaines ei saa omata koheesiota.
- Suodatinmateriaalissa täytyy olla alle 3 % orgaanista materiaalia.
- Suodatinmateriaalin vedenläpäisevyyden täytyy olla 10 - 100 kertainen verrattuna suojattavan materiaalin vedenläpäisevyyteen.
- Jos suojataan moreenia joka sisältää hienoainesta yli 30 %, tulee suodatinmateriaalin D15 olla alle 0,7 mm.

#### 4.2.4 Tukipengermateriaalit

Jos padon suodatin-, tiivistys-, kuivatus- ja verhoilurakenteet on suunniteltu asianmukaisesti, tukipengermateriaalit eivät ole padon toiminnan kannalta tärkeitä. Tukipenkereeseen kuitenkin kannattaa etsiä luja ja hyvin vettä läpäisevää materiaalia, ja mikäli louhetta on saatavilla niin yleensä sitä on myös syytä käyttää. Tukipenkereen materiaalivaatimuksia ovat alhainen hinta, helppo käsittely, suuri vedenläpäisevyys ja hyvä lujuus. Louheen lisäksi tukipengermateriaaleina on käytetty myös hiekkaa, soraa ja moreenia, jossa ei ole paljoa hienoainesta. (Leskelä 2004, 15.)



## 5 TUTKIMUSMENETELMÄT

### 5.1 Koekuopat

Koekuopat ovat luotettava tutkimuskeino, kun tutkitaan lähellä maanpintaa olevia kerroksia. Koekuopista selviää mm. eri maakerrokset ja niiden maalajit, maaperän epäpuhtaudet, maan tiiveys, kiivisyys ja lohkaraisuus, maan kaivuominaisuudet, kuopan seinämien vakavuus sekä pohjaveden pinnan korkeus. Kuopista voidaan ottaa myös näytteitä laboratoriotutkimuksiin. (Vepsäläinen 2004, 4.)

Koekuopista tehdään yleensä maan lujuusominaisuudet huomioiden 1,5 - 4 m syviä. Yli 1,5 m syvissä kuopissa on hyvä kiinnittää huomiota työturvallisuuteen sortumavaaran takia. Valmis koekuoppa valokuvataan ja lisäksi tehdään koekuoppapöytäkirja. (Vepsäläinen 2004, 4 - 5.)

### 5.2 Painokairaus

Suomessa painokairaus on suosituin pohjatutkimusmenetelmä. Painokairaukset tehtiin aluksi käsin, mutta nykyään käytetään monitoimikairoja, joissa on vaunualusta. Menetelmä on kuitenkin sama. Painokairauksen tulokset merkitään ylös pöytäkirjaan, josta sitten piirretään kairausdiagrammi. Diagrammissa vasemmalla puolella näkyy vapaasti painunut osuus, ja oikealla kiertämällä tai lyömällä painuneet osuudet. Vapaasti painuneella osuudella käytetään joko skaalaa 1:100 tai 1:200, kiertämällä tai lyömällä taas skaala on puolikierrosten lukumäärä / 0,2 m. Kairausdiagrammista näkyvät myös maalajit. (Vepsäläinen 2004, 5.)

Painokairauksella selviää eri kairausvastustukselliset maakerrosten rajat sekä kerrospaksuudet. Maalajeista voidaan tehdä päätelmiä myös tunto- ja äänihavaintojen pohjalta. Parhaimmillaan painokairaus on hienorakeisissa maalajeissa. Tiiviiseen moreeniin painokaira ei tunkeudu, mutta löyhästä moreenista ja kitkamaalajeista selviävät kerrosten tiiveys. (Vepsäläinen 2004, 6.)

Muita kairaustyyppisiä ovat esimerkiksi tärykairaus, heijarikairaus, puristinkairaus, CPTU-kairaus, puristin-heijarikairaus, siipikairaus ja porakonekairaus. Eri kairaukset sopivat erilaisiin käyttötarkoituksiin, jotka on listattu taulukossa 1. (Vepsäläinen 2004, 6 - 13.)

Taulukko 1. Kairausmenetelmien käyttötarkoituksia (TPO-83, 51)

Kairausmenetelmän pääasiallinen käyttötarkoitus	Selvitettävä seikka	Kallion pinnan sijainti	Tiiviin pohjakerroksen sijainti	Tiiviydeltään erilaisten maakerrosten rajat	Maakerrosten lujuus likimäärin	Maakerrosten lujuus tarkasti	Maakerrosten tiiviyys likimäärin	Maalajiryhmä	Lyöntipaaluipituuden arviointi
Kairausmenetelmän toissijainen käyttötarkoitus tai selvitetävän seikan selvitystarkkuus on heikko									
Painokairaus	●	○	●	●	○		●	●	○
Heijarikairaus	○	○	●	○	○		●	○	●
Puristinkairaus			○	●	●		●	●	○
Siipikairaus						●			
Tärykairaus		○	●					○	○
Porakonekairaus (paineilmakairaus)		●	○						○

### 5.3 Näytteenotto

Kairauksen yhteydessä näytteitä kerätään tarkempiin tutkimuksiin laboratorioon, jossa selvitetään maan ominaisuuksia. Maaperästä voidaan ottaa joko häiriintymättömiä tai häiriintyneitä näytteitä. Häiriintymättömistä näytteistä on mahdollista määrittää esimerkiksi muodonmuutos-, indeksi-, lujuus-, routivuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudet. Häiriintyneistä näytteistä taas voidaan tutkia rakeisuus, maalajiluokitus ja vesipitoisuus. Taulukossa 2 ovat erinäiset näytteenottotavat sekä niiden soveltuvuus maalajikohtaisesti.

Taulukko 2. Näytteenottotapoja sekä niiden soveltuvuus eri maalajeille (TPO-83, 58)

Näytteenottotapa tai -otin	häiriintymätön näyte						Häiriintynyt näyte						Ka
	Maalaji						Maalaji						
	Lj	Sa	Si	Hk	Sr	Mr	Lj	Sa	Si	Hk	Sr	Mr	
Koekuoppa	○	●	●	○		○	●	●	●	○	●	●	
Kierrekaira *							○	●	●	○			○
Lapiokaira *							○	○	●	●	○		○
Kannukaira							○	●	●	○			
Pienoismäntäotin *							○	●	●	●			
Läpivirtausotin								○	●	●			●
Heijarikairan näytteen otin									●	●	○		○
Mäntäottimet	○	●	○				○						
Porakonekaira													
- putkik, + näytt. otto								○	○	●	●	●	○
- vesi- ja ilmahuuhtelu										○	○	○	○
Kallionäyttekairaus													●

#### Merkinnät:

- Saadaan hyviä näytteitä, suositeltava menetelmä
- Saadaan näytteitä, toissijainen menetelmä
- \* Näytteenotto vaikeaa pohjavedenpinnan alapuolella karkeissa maalajeissa)

#### 5.4 Kallionäytekairaukset ja vesimenekikokeet

Kallionäytekairaus on tutkimusmenetelmä, jolla otetaan jatkuvatoimisesti näytettä kalliosta. Pyörítettävän putkiston päässä oleva timanttiterä leikkaa kalliosta sylinterinmuotoista näytettä. Näytteen halkaisija vaihtelee välillä 36 - 88 mm, mutta tavallisesti se on 42 mm. Kallionäytekairausta nimitetään myös sydännäytekairaukseksi tai timanttikairaukseksi. (Ravaska 2004, 10.) Kuvassa 8 näkyy kallionäytekairauskalusto, ja kuvassa 9 lopputuote eli kairasydämet.

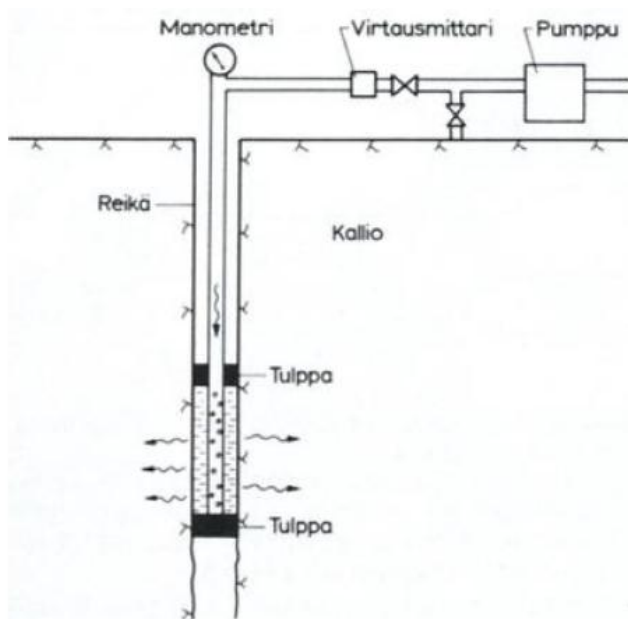


Kuva 8. Kallionäytekairauskalustoa (Heino 2013-08-01.)



Kuva 9. Kairasydämiä (Heino 2013-08-01.)

Vesimenekikokeilla tutkitaan kallion rakoilua ja vesitiivyyttä. Kairattu reikä tukitaan kumitulpilla, jonka jälkeen reikään pumpataan paineella vettä. (Ravaska 2004, 10.) Kuvassa 10 on periaatteellinen kuva vesimenekikokeesta.



Kuva 10. Kaksitulppainen vesimenekikoe (Ravaska 2004, 10)

Vesimenekikokeen tulokset esitetään Lugeon-yksikössä. Lugeonin määrä lasketaan kaavalla 1

$$vm = \frac{Q}{t L p} \quad (1)$$

jossa  $vm$  on vesimenekki eli lugeon,  $Q$  on vesimäärä,  $t$  on mittausaika,  $L$  on kairausreiän mittausvälin pituus ja  $P$  on kokeessa käytetty paine. (Ravaska 2004, 11.)

Kairatun alueen kallion vedenläpäisevyyksiä on mahdollista arvioida kaavalla 2

$$k = \frac{q}{2 \pi L h} \ln \frac{L}{r}, L \geq 10r \quad (2)$$

jossa  $k$  on vedenläpäisevyys,  $q$  on virtaama,  $L$  on kairausreiän mittausvälin pituus,  $h$  on painekorkeus ja  $r$  on kairareian säde. (Ravaska 2004, 11.)

## 6 RAKENTEIDEN LAADUNVALVONTAMENETELMÄT

Rakenteiden laadunvalvonnalla varmistetaan, että pato tulee rakennetuksi suunniteltujen raja-arvojen puitteissa ja että pato toimii suunnitellusti. Rakenteiden laadunvalvontamenetelmiä ovat muun muassa maastossa suoritettavat Troxler-mittaukset, GPS-mittaukset ja laserkeilaukset mitta-usaineiston käsittelyineen ja laboratoriossa suoritettavat sullonta-, seulonta- ja areometrikokeet.

### 6.1 Seulonta ja areometrikoe

Seulonta ja areometrikoe ovat tarpeellisia kun tutkitaan maa-aineita, joissa on karkeiden rakeiden joukossa myös paljon hienoainesta. Esimerkiksi useimmat moreenit sisältävät paljon hienoainesta. Pienillä rakeilla on taipumus tarttua sekä toisiinsa että suuriin rakeisiin niin tiukasti, ettei kuivaseulonnalla saada luotettavia tuloksia. Paljon hienoainesta sisältävät maa-ainekset myös menevät hitaasti hienoimmista seuloista läpi. Yksi syy täsmälliseen tutkimukseen on routivuus, sillä muuttaman prosentin heitto rakeisuuksissa voi ratkaista onko maa-aines routivaa vai routimatonta. Myös leikkauslujuuden muodostumistapaan sekä vedenläpäisevyyden määrittämiseen tarvitaan tietoa pienikokoisista rakeista. (Jääskeläinen 2011, 29.)

Kuivaseulonnan seulasarjassa on 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm seulat. Koska maalajien nimeämisessä ei huomioida yli 64 mm rakeita, ei sen suurempia seuloja tarvita. Jos yli 64 mm ainesta on merkittäviä määriä, maalajia voidaan kuvata kiviseksi tai lohkariseksi. Pienin seula 0,063 mm, koska käytännön syyt valmistuksessa tulevat vastaan, seulonta on pienikokoisilla rakeilla työlästä ja hienot rakeet eivät ole enää kovin vakioläpimittaisia vaan levymäisiä tai neulamaisia. (Jääskeläinen 2011, 16 - 17.)

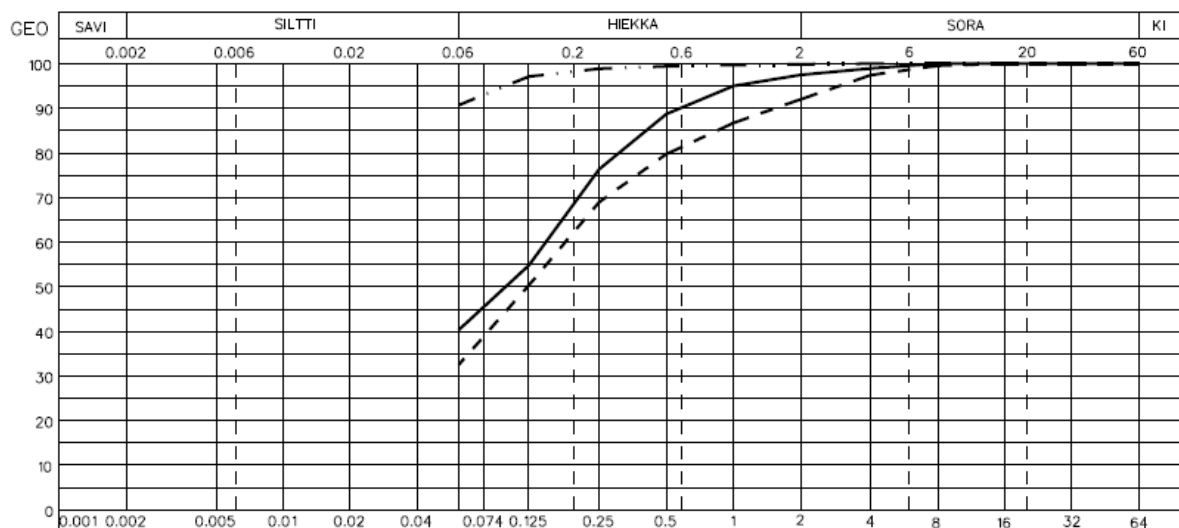
Kuivaseulonnassa näyte punnitaan märkänä, kuivataan uunissa 105 asteen lämmöllä, ja punnitaan uudestaan kuivana. Punnitusten perusteella voidaan laskea näytteen luonnollinen vesipitoisuus kaavalla 3

$$w\% = \frac{G_w}{G_s} 100 \quad (3)$$

jossa  $w\%$  on vesipitoisuus,  $G_w$  on näytteen paino kosteana ja  $G_s$  on näytteen paino kuivana. (Jääskeläinen 2011, 16.)

Tämän jälkeen kuivattu kiviaines ajetaan täryseulan lävitse, seuloille jääneet ainekset punnitaan ja lasketaan seuloille jääneiden aineiden osuudet prosentteina koko näytteestä. Rakeisuuskäyrä piirretään näiden tulosten perusteella. (Jääskeläinen 2011, 16.)

Pesuseulonnassa pestään rakeet 0,063 mm seulan läpi vedellä, ja seulaan jääneelle ainekselle tehdään kuivaseulonta. Seulan läpäiselle ainekselle tehdään sitten areometrikoe. Lopuksi lasketaan koko aineen rakeisuuskäyrä. (Jääskeläinen 2011, 29.) Kuvassa 11 on rakeisuuskäyrä kuivaseulonnasta ennen areometrikokeen tuloksia.



Kuva 11. Moreenin rakeisuuskäyriä ilman areometrin tuloksia (Litmanen, 2013)

Areometrikoe perustana on Stokesin laki, jonka mukaan tietyn tiheyden omaavan pallon vajoamisnopeus nesteessä riippuu pallon aineen tiheydestä, nesteen tiheydestä ja viskositeetistä sekä pallon halkaisijan neliöstä. (Jääskeläinen 2011, 30.) Kaavassa 4 Stokesin laki:

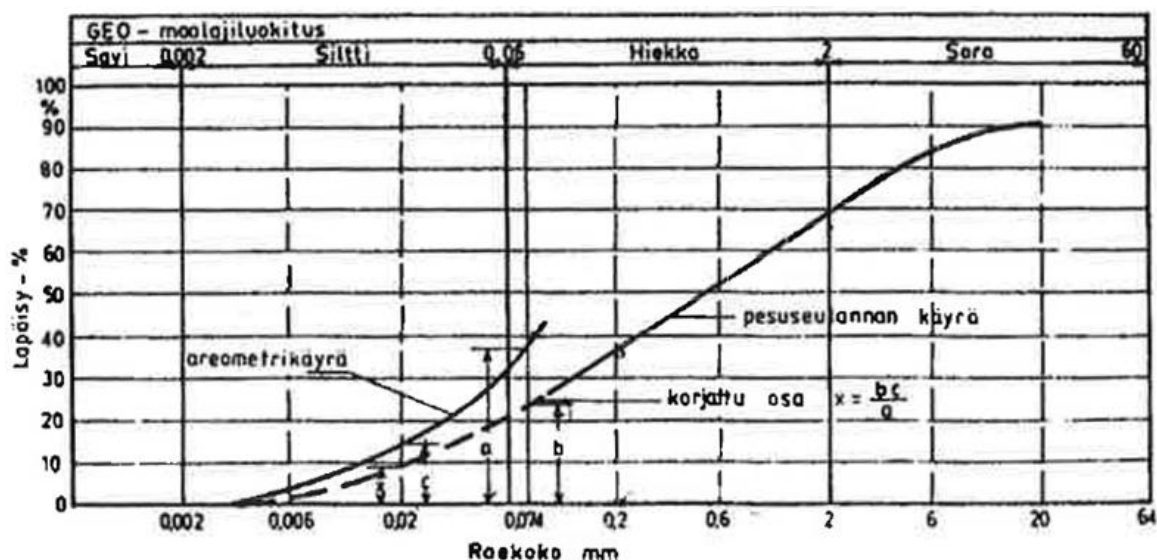
$$v = \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{18\mu} d^2 \quad (4)$$

jossa  $v$  on pallon nopeus,  $g$  on putoamiskiinto,  $\rho_s$  on pallon aineen tiheys,  $\rho_w$  on nesteen tiheys,  $d$  on pallon halkaisija ja  $\mu$  on nesteen viskositeetti.

Koe tehdään moreeneilla yleensä 100 g näytteellä. Kokeessa käytetään peptisaattoriuosta (50 ml), ja tislattua vettä niin, että seoksen kokonaismäärä moreenit ja nesteet mukaan lukien on noin 1000 ml. Välineistönä on yli 1000 ml:n mitta-astia, areometri joka koostuu laajentumaosasta, sukkulasta ja mittaputkesta sekä lämpömittari. (Jääskeläinen 2011, 31 - 32.)

Kokeessa sekoituksen jälkeen areometri asetetaan astiaan. Karkeammat rakeet vajoavat nesteessä nopeammin kuin hienot, ja nesteen tiheyden vaihdellaessa areometrin syvyys vaihtuu nopeasti ja näyttää näin tiheyserot. Areometrin painopisteen ja pinnan välinen erotus kuvaa tulkittavan raekoon laskeutunutta matkaa. Yleensä areometrin lukema otetaan ylös 1 min, 6 min, 1 h, 5 h, 1 vrk ja 4vrk välein. Samalla mitataan myös nesteen tiheys ja lämpötila, jolloin voidaan laskea raekoot ja läpäisyprosentit. Laskemisen sijaan on kuitenkin helpompaa käyttää valmiita nomogrammeja. (Jääskeläinen 2011, 32.)

Seulonnan sekä areometrin tulokset yhdistetään, jotta saadaan yhtenäinen rakeisuuskäyrä. Koska myös areometrikokeen käyrä alkaa 100 prosentista, täytyy sitä muokata niin että se alkaa siitä mihin pesuseulonnan käyrä päättyy. Yhtenäistä käyrää varten areometrin tulos 0,063 mm kohdalla on kerrottava sellaisella luvulla, että tulos muuttuu vastaamaan seulonnan lukua kohdalla 0,063 mm. Areometrin muut tulokset kerrotaan samalla kertoimella. (Jääskeläinen 2011, 34.) Kuva 12 havainnollistaa käyrien yhdistämistä. Kuvassa on käytössä vielä vanhan seulastandardin mukainen 0,074 mm seula.



Kuva 12. Areometrikäyrä korjataan kertomalla sen läpäisyprosentit luvulla  $b/a$  (Jääskeläinen 2011, 34.)

## 6.2 Parannettu Proctor-koe

Proctor-kokeen ideana oli tutkia laboratoriossa maanäytteen maksimikuivatilavuuspaino sekä optimivesipitoisuus. Työkoneiden kehittyessä työmailla kuitenkin alettiin tavoittaa parempia tiivysasteita kuin laboratoriossa, minkä takia koetta kehitettiin antamaan vastaavampia tuloksia paremmille työkoneille. Kehitystyön tuloksena on parannettu Proctor-koe. (Jääskeläinen 2011, 54.)

Koe suoritetaan sangollisella maanäytettä, josta on seulottu yli 16 mm rakeet. Näyte jaetaan 3 kg osiin, jotka kostutetaan eri kosteuksiin. Tavoitteena on, että optimivesipitoisuus jäisi kostutettujen näytteiden vesipitoisuuksiin väliin. (Jääskeläinen 2011, 54.)

Näytteet tiivistetään yksi kerrallaan viidessä kerroksessa koesynterissä pudotusvasaralla. Pudotuksia tehdään 25 kerrosta kohden, vasara painaa 4,54 kg ja pudotuskorkeutena on 45,7 cm. Vasara on ohjuritangossa kiinni, ja sitä pudotetaan 50 mm halkaisijaltaan, näytteen pinnalla olevaan aluskappaleeseen. Kappaleen paikkaa vaihdetaan pudotuksien välillä, jotta saadaan tasainen tiivistys aikaiseksi. (Jääskeläinen 2011, 54.)

Viidennen kerroksen jälkeen näytteen pinnan pitäisi olla hieman yli koesynterin yläreunasta. Tämän jälkeen sylinteristä irrotetaan kaulusrenkas, ja koesynterin yli menevä osuus poistetaan teräsviivottimella. Näyte punnitaan, jonka jälkeen siitä otetaan osa kuivatettavaksi, jotta tarkka vesipitoisuus voidaan määrittää. (Jääskeläinen 2011, 54.) Sylinteriin jäävän osan tilavuuspaino saadaan kaavalla 5

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (5)$$

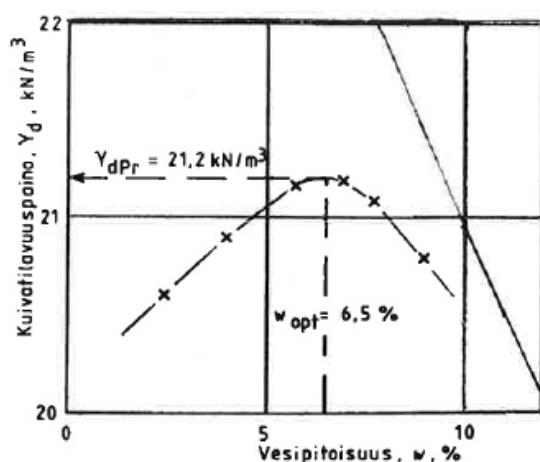
jossa  $\gamma$  on näytteen tilavuuspaino,  $G$  on näytteeseen kohdistuva painovoima ja  $V$  on näytteen tilavuus.

Kuivatilavuuspaino saadaan kaavalla 6

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}} \quad (6)$$

jossa  $\gamma_d$  on kuivatilavuuspaino.

Koe toistetaan kaikille näytteille, jonka jälkeen tuloksista piirretään diagrammi, jonka pystyakselilla on kuivatilavuuspaino ja vaaka-akselilla vesipitoisuus. Kuvassa 13 näkyy esimerkki parannetun Proctor-kokeen tuloksesta. Kuvassa näkyvän kaaren lakipiste näyttää sekä optimivesipitoisuuden sekä maksimikuivatilavuuspainon. Kyllästyneen aineen rajakäyrä näkyy oikealla, ja siitä näkee teoreettisen maksimin kuivatilavuuspainolle tietyllä vesipitoisuudella. (Jääskeläinen 2011, 55.)

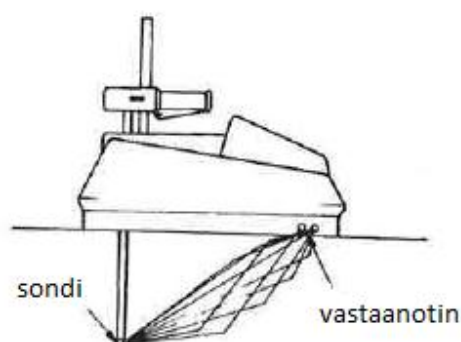


Kuva 13. Esimerkki parannetun Proctor-kokeen tuloksesta (Jääskeläinen 2011, 55)

Kokeen tuloksesta on nähtävissä vesipitoisuuden vaikutus tiivyyteen. Varsinkin moreenien vesipitoisuusalue on pienehkö, jos halutaan saavuttaa tiiviysvaatimukset. (Jääskeläinen 2011, 55.)

### 6.3 Tiivysmittaukset Troxler-laitteella

Troxler-mittaukset pohjautuvat gammasäteilyyn. Käynnissä ollessaan maahan upotetun sauvan päästä lähtee gammasäteilyä laitteen pohjassa olevaan vastaanottimeen. Tilavuuspainon ja vesipitoisuuden laite laskee maa-aineksen absorboimasta säteilyn määrästä. Kuvassa 14 näkyy laitteen toimintaperiaate. (Jääskeläinen 2011, 62.)



Kuva 14. Troxler-laitteen toimintaperiaate (Jääskeläinen 2011, 62)



Työmaata valvottaessa käytetään kuitenkin yleensä tiiviysastetta tilavuuspainon sijaan. Tiiviysaste on yksinkertaisempi käyttää, koska se vertaa vain rakenteen kuivatilavuuspainoa parannetulla Proctor-kokeella mitattuun maksimikuivatilavuuspainoon. Työmaalle laadittavassa työselityksessä esitetään rakenteelle tiiviysastevaatimus. Kun maa-aineksen maksimikuivatilavuuspaino selvitetään, voidaan työmaalle laskea jo etukäteen vaadittu saavutettava kuivatilavuuspaino. (Jääskeläinen 2011, 53.)

Kun tiedetään rakenteen vallitseva tilavuuspaino sekä parannetusta Proctor-kokeesta saatu mitattavan kohteen maksimikuivatilavuuspaino, voidaan tiiviysaste laskea kaavalla 7

$$tiiviysaste = \frac{\gamma_{dL}}{\gamma_{dmax}} 100\% \quad (7)$$

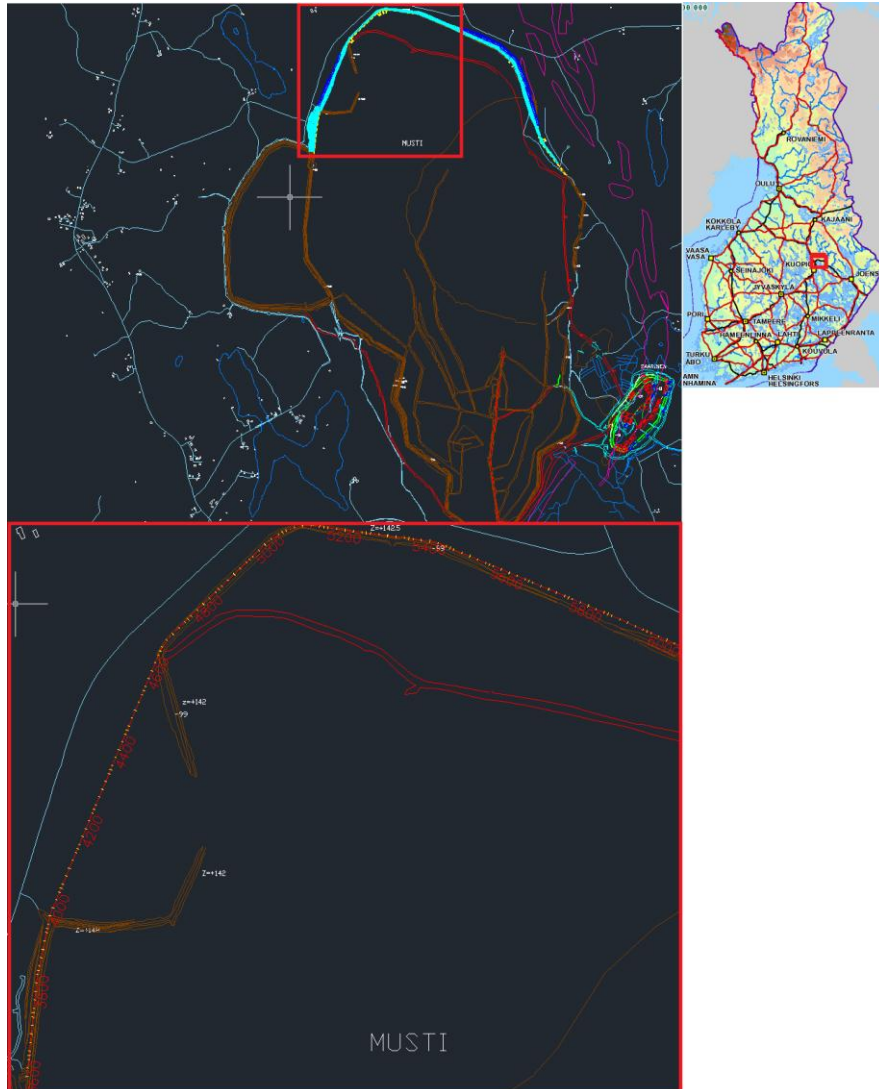
jossa *tiiviysaste* on vertailuprosentti rakenteen kuivatilavuuspainon ja parannetusta Proctor-kokeesta saadun maksimikuivatilavuuspainon välillä,  $\gamma_{dL}$  on rakenteen mitattu kuivatilavuuspaino ja  $\gamma_{dmax}$  on parannetulla Proctor-kokeella mitattu maksimikuivatilavuuspaino.

(Jääskeläinen 2011, 53.)

Troxler laitetaan tasaiselle tai tasatulle maapohjalle, jonka jälkeen laitteessa oleva sauva työnnetään maahan noin 10 - 30 cm syvyyteen. Koska Troxler-laitteella ei päästä kovin syväälle, on paksumpia penkereitä rakennettaessa mittaukset suoritettava jokaisella kerroksella. Laite on nopea käyttää, mutta kivisessä maassa sillä ei pystytä tekemään kokeita. Troxlerin säteilevän luonteen takia käyttäjänä on oltava asianmukaisen koulutuksen saanut henkilö, joka vastaa myös laitteen säilytyksestä. (Jääskeläinen 2011, 62 - 63.)

## 7 MUSTIN PADON SIJAINTI JA YLEINEN KUVAUS

Mustin rikastushiekka-altaan pato sijaitsee Siilinjärvellä Yaran kaivosalueen pohjoispäässä. Kuvassa 15 on patoalueen ja patotyömaan sijainti kartalla.



Kuva 15. Patotyömaan sijainti kartalla (Ruotsalainen 2013)

Padolla on tällä hetkellä pituutta vesiallas mukaan lukien noin 15 km, ja penkereen korkeus on keskimäärin noin 15 m. Rakenteet ovat suurimmaksi osaksi vyöhykepatoa, mutta pohjoinen osa on 4 km pituudelta moreenista tehtyä homogeenistä maapatoa. Mustin patoa on aloitettu rakentamaan 80-luvun puolessa välissä. Patoa on vuosikymmenten saatossa rakennettu lisää ja korotettu aina tarpeen vaatiessa. Suuremman luokan laajennuksia on ollut puolenkymmentä, viimeisempänä vesialtaan rakentaminen vyöhykepatona vuosina 2007 - 2008. Ennen Mustin patoa käytössä oli Raasion patoallas, joka on rakennettu noin vuonna 1979. Nykyisin Raasion allas toimii kiertovesialtaana.

Tämän hetkinen harjan korkeus on tasolla 142 m merenpinnasta mitattuna. Patoa korotetaan paaluväliä 3600 - 5040 korkoon 143 m, ja paalulta 5040 paalulle 7400 korotus tehdään asteittain korkoon 157 m asti. Taulukkoon 1 on koottu tarkemmat tiedot korotuksista paaluväleittäin. Liitteessä 1

on pituusleikkaus suunnitellusta padonharjan korkeudesta sekä arvioidusta padon pohjan korkeudesta.

Taulukko 3. Padon harjan korko merenpinnasta paaluittain (Ruotsalainen, 2013)

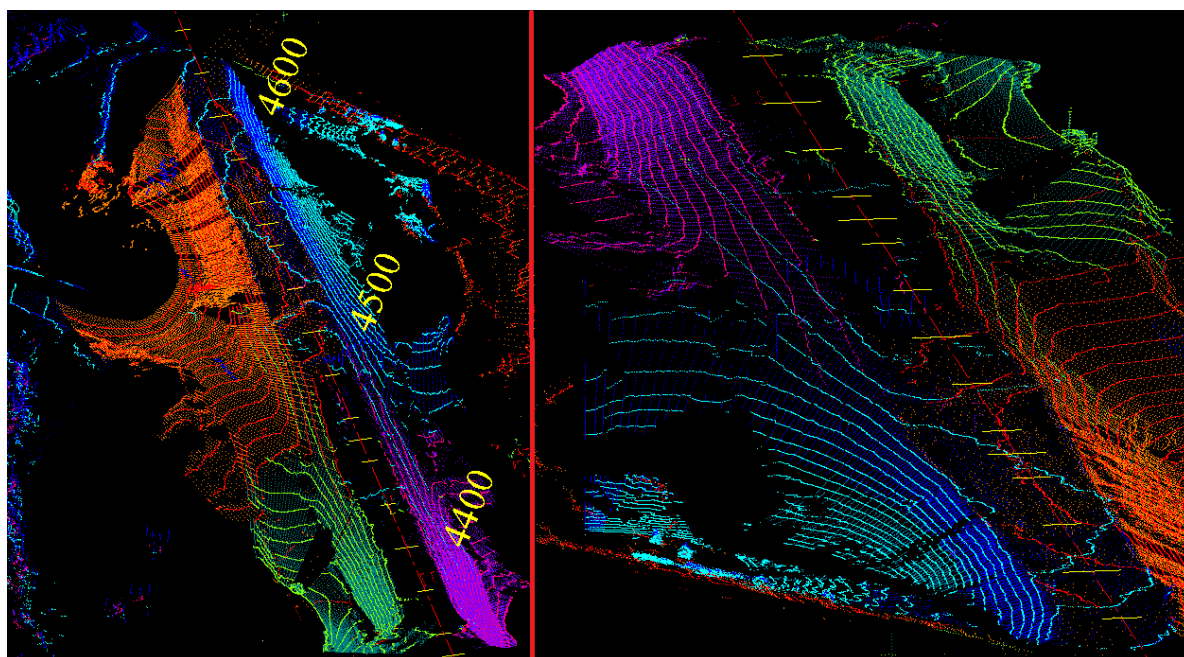
Paaluväli	Korko	Kaltevuus
3600 - 5040	143 m	
5040 - 5820	143..152 m	1,11 %
5820 - 6820	152 m	
6820 - 7220	152..157 m	1,26 %
7220 - 7400	157 m	

Syynä erikoiseen kaltevan harjan ratkaisuun on rikastushiekan läjittyminen 1..2 % läjityskulmaan. Mitä lähempänä patopenger on nykyistä rikastushiekan purkupaikkaa, sitä korkeammaksi se tehdään. Patopenkereen korkeus on optimoitu tuottamaan mahdollisimman paljon läjitystilaa kustannuksiin nähden.

Projektin kestoksi on arvioitu noin kolme vuotta. Padon korotus ja osittainen uuden penkereen rakentaminen ulottuu paalulta 3600 paalulle 7400, mutta kesällä 2013 patotyömaa keskittyi rakennustöiden osalta lähinnä paaluvälille 3600 - 6000.

## 8 MUSTIN PADON RAKENNUSVAIHEET JA TYÖNAIKAINEN LAADUNVALVONTA

Mustin padon rakennusvaiheiden ja työnaikaisessa laadunvalvonnassa käytettiin apuna GPS-mittalaitteistoa sekä laserkeilainta. Patopohja, padon rakenteet sekä erinäiset näytteidenottopaikat mitattiin ja kartoitettiin vähintään työohjeen vaatimalla tarkkuudella (keskimääräinen pisteväli noin 10 m), suurimmaksi osaksi kuitenkin huomattavasti tarkemmin sillä laserkeilain mittaa pisteitä noin 10 cm välein. Kuvassa 16 on havainnollistettu käsittelemätöntä keilausaineistoa. Näytteiden tutkimuksen teki Pöyry Oy, ja padon suunnitelmat on laatinut Ramboll Oy. Työmaan kalustona oli neljä dumpperia, kahdeksan louheautoa, kaksi puskukonetta, neljä kaivinkonetta, valssijyrä ja pyöräkuormaaja.



Kuva 16. Käsittelemätöntä keilausaineistoa (Ruotsalainen 2013)

### 8.1 Alustavat työt, patopohjan raivaustyöt ja massanvaihdot

Ennen rakennustöiden aloittamista patoalueelle tehtiin pohjatutkimuksia, joiden perusteella laadittiin lopulliset suunnitelmat työpadolle, padon korotukselle sekä uuden patopenkereen rakentamiselle. Näiden perusteella taas laadittiin työohje, aikataulus ja kartoitettiin mahdollisia ongelmia ja kuinka varautua niihin. Tutkimukset tehtiin talvella 2013. Pohjatutkimusohjelma sisälsi painokairauksia sekä koekuoppia, joiden perusteella selvitettiin muun muassa pohjamaan rakeisuuksia ja vedenläpäisevyyksiä. Kairauksia ja kuoppia tehtiin yhteensä noin 115 kappaletta noin neljän kilometrin osuudelle. Pohjatutkimukset suoritti Pöyry Oy.

Pohjan raivaustyöt aloitettiin keväällä 2013 paaluväliltä 3900 - 4600, ja raivaus ulotettiin välille 3600-6200 kesän aikana. Tätä ennen maastoon oli merkattu raivauksen rajat noin 10 m päähän suunnitellun padon luiskasta. Paaluvälille 4000 - 4600 tehdään kokonaan uutta patopengertä. Kuvissa 17 ja 19 näkyy maasto ennen raivausta ja kuvissa 18 ja 20 jälkeen raivauksen. Raivaustöitä oli syksyyn mennessä tehty yhteensä noin 145 000 m<sup>3</sup>itd edestä.



Kuva 17. Maasto ennen raivaustöitä paalulta 4600 etelään päin (Ruotsalainen 2013-05-14)



Kuva 18. Maasto 25 päivän jälkeen raivauksen aloittamisesta (Ruotsalainen 2013-06-10)

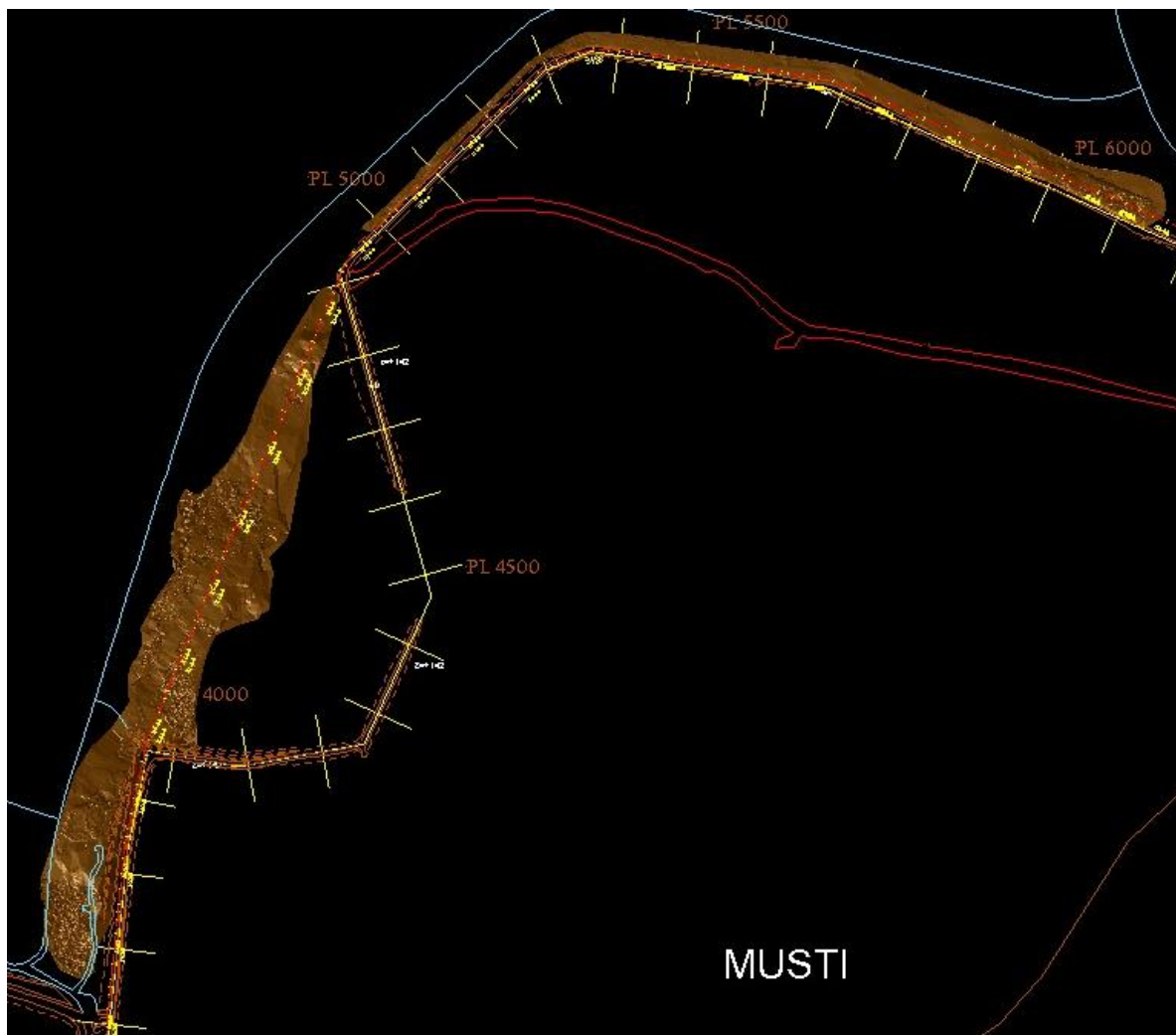


Kuva 19. Maastoa ennen raivausta paalulta 3900 pohjoiseen päin kuvattuna (Ruotsalainen 2013-05-29.)



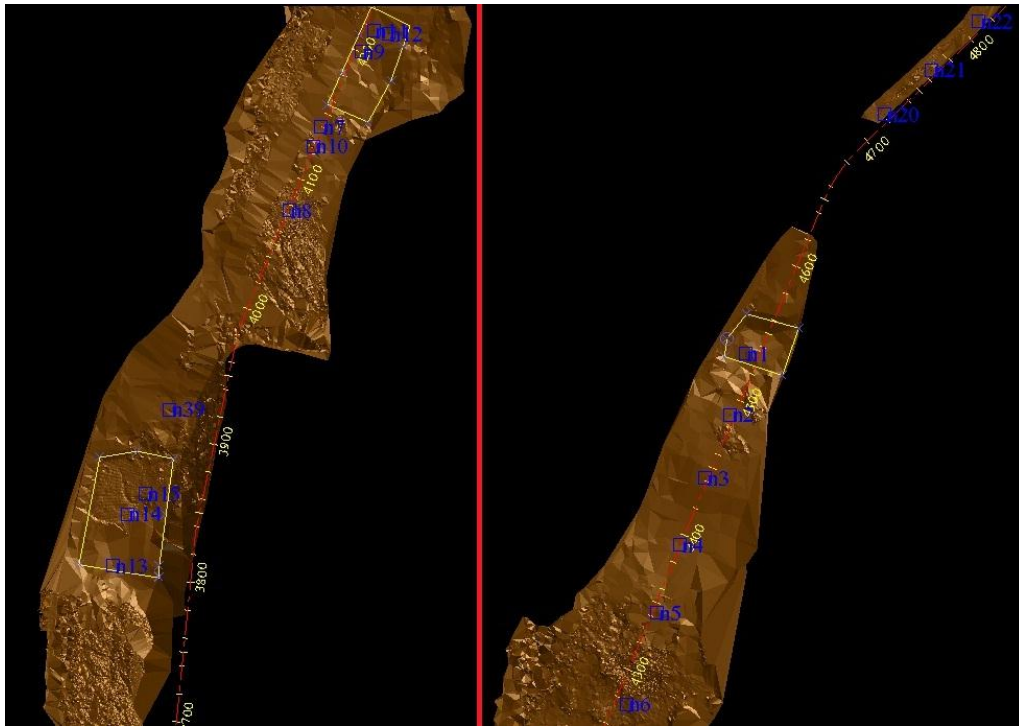
Kuva 20. Raivattua maastoa (Ruotsalainen 2013-06-25)

Raivaus ulotettiin patopohjan kohdalta kantavaan maahan asti, eli käytännössä moreeniin tai kalli-oon. Raivatulta patopohjalta otettiin noin 50 m välein tai maalajin vaihtuessa näytteet Pöyrylle laboratoriotutkimuksiin, jossa selvitettiin rakeisuus ja maalajiluokitus sekä tarvittaessa vedenläpäisevyys. Kallioisilta kohdilta näytteitä ei kuitenkaan tarvinnut ottaa. Rakeisuus tutkittiin pesuseulonnalla ja areometrillä, vedenläpäisevyys taas kiinteäseinäisellä tai joustavaseinäisellä sellillä. Kuvassa 21 raivatun patopohjan kartoitus kokonaisuudessaan.

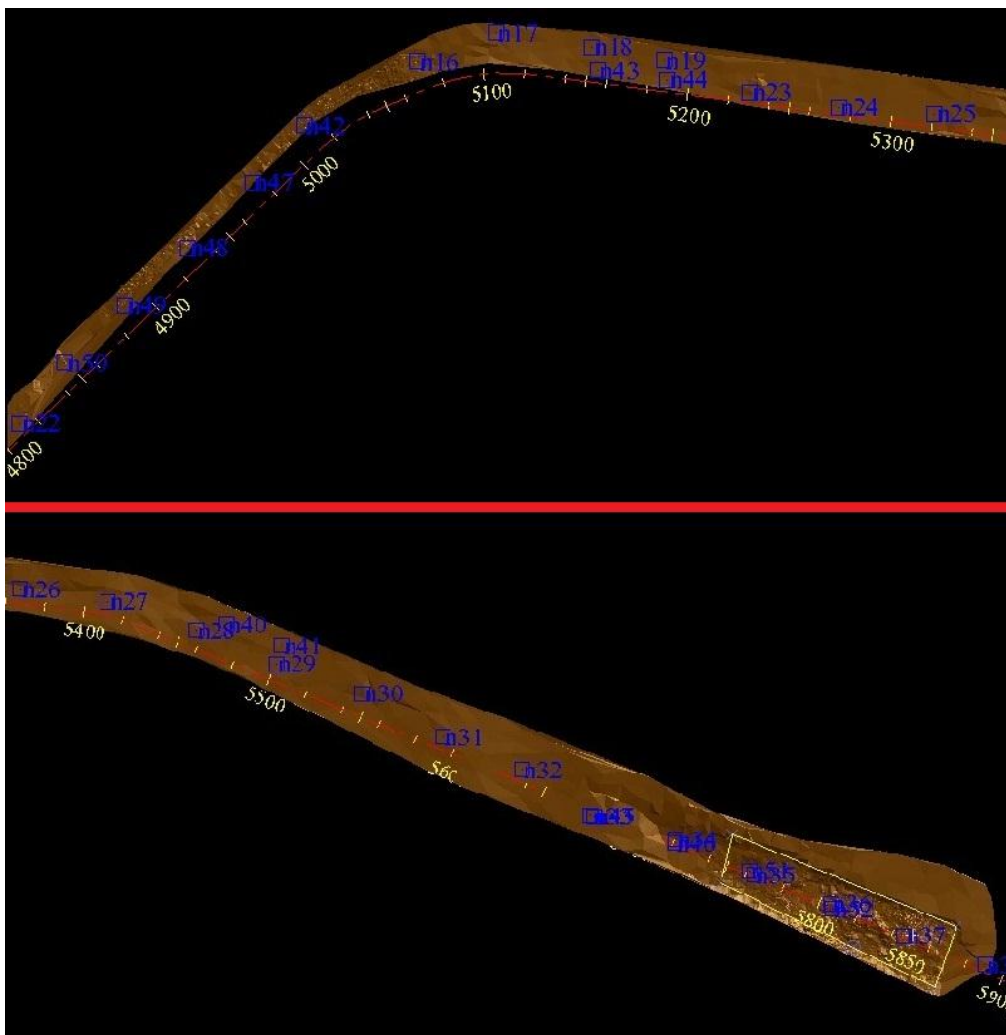


Kuva 21. Patopohjan toteutunut raivaus kuvattuna ruskealla pintamallilla (Ruotsalainen 2013.)

Yhteensä raivatulta patopohjalta otettiin 52 näytettä. Jos pohjamaa ei täyttänyt patomoreenin rakeisuuskriteereitä, tutkittiin vedenläpäisevyys, jonka tuli olla alle  $k = 10^{-7}$  m/s. Paaluilla 3850, 4200, 4440 ja 5800 - 5900 jouduttiin tekemään suuria massanvaihtotöitä, sillä niillä kohdin kantamattomat tai huonosti vettä pidättävät maakerrokset ulottuivat ennustettua syvemmälle. Massanvaihdossa kantamattomat sekä vettä huonosti pidättävät maakerrokset korvattiin moreenilla. Kuvaan 22 on merkitty patopohjasta otettujen näytteiden ja massanvaihtokohtien sijainti paalulta 4800 etelään, ja kuvaan 23 paalulta 4800 pohjoiseen ja itään päin.



Kuva 22. Näytteet on merkattu karttaan sinisellä neliöllä, ja massanvaihtokohtat keltaisella viivalla (Ruotsalainen 2013.)



Kuva 23. Merkinnät samanlaiset kuin kuvassa 22. Uusintanäytteet näkyvät kartassa päällekkäin (Ruotsalainen 2013.)



Patopohjan avokalliokohdat täytyi työohjeen mukaan moreenisen tiivistyssydämen alalta puhdistaa niin, ettei niiden päälle jäänyt yli 50 mm suurempia rakeita. Aluksi kalliot puhdistettiin karkeasti kaivinkoneella, ja sen jälkeen vesipesulla. Jäljelle jääneet isommat kappaleet siivottiin pois käsin. Puhdistuksen jälkeen kalliot ”slammattiin”, eli betonoitiin, pinnasta noin 10 cm paksuudelta. Kyseisiä menetelmiä oli tarpeen käyttää lähinnä rikkinäiseen ja avoimia rakoja sisältävään kallioon, joita suurimmassa osassa esiin kaivetuista kallioista ei kuitenkaan ollut. Enimmäkseen kallioiden pinnat puhdistettiin vain karkeasti kaivinkoneella. Jos kallion päällä oli kantavaa moreenia, kalliota ei kaivettu esiin koska jääkauden aikaiset jäiden vetäytymiset ovat tiivistäneet moreenit tiukasti kallioita vasten.

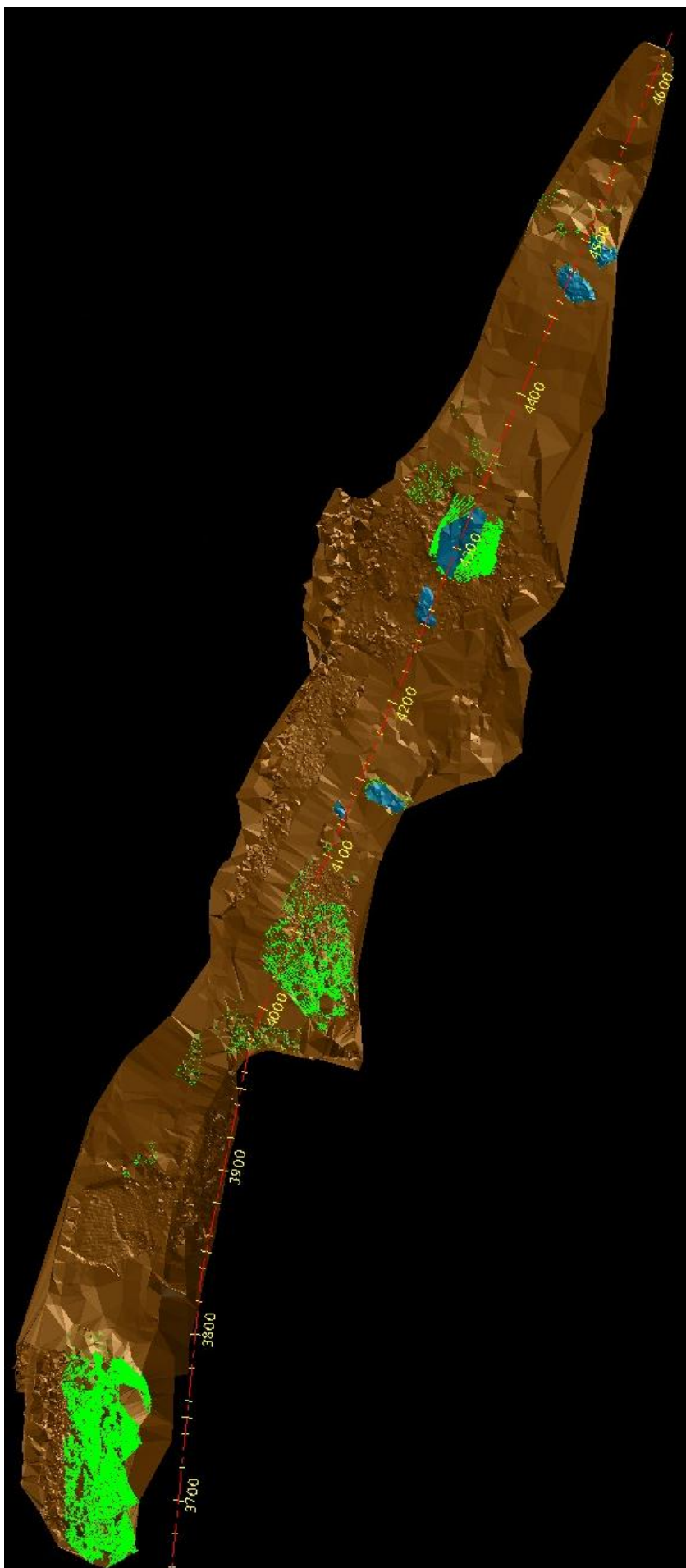
Kuvassa 24 näkyy huolellisesti puhdistettu kallio, ja kuvassa 25 betonoitua kalliota. Kuvaan 27 on merkitty patopohjan karkeasti kaivinkoneella puhdistetut kallio-osuudet kokonaisuudessaan, sekä kolme huolellisesti puhdistettua ja slammattua kallio-osuutta.



Kuva 24. Puhdistettua kallion pintaa (Ruotsalainen 2013-7-4)



Kuva 25. Kuvan 24 kalliot betonoitavina (Ruotsalainen 2013-7-5)



Kuva 26. Vihreällä värillä näkyvät mitatut kallion pinnat, ja sinisellä betonoidut alueet (Ruotsalainen 2013.)

## 8.2 Moreenirakenteet

Mustin padolla käytettiin moreenia vyöhykepadon osalta tiivistyssydämen tekemiseen ja päärakennusaineena homogeenisessa maapadossa. Moreenia ajettiin kesällä 2013 paaluvälille 3600-6000 noin 270 000 m<sup>3</sup>itd. Harjakorkeuteen rakennettiin paaluväli 4500 - 4600. Moreenien ottopaikat sijaitsevat kaivosalueella, pääosin muutaman kilometrin säteellä patotyömaasta.

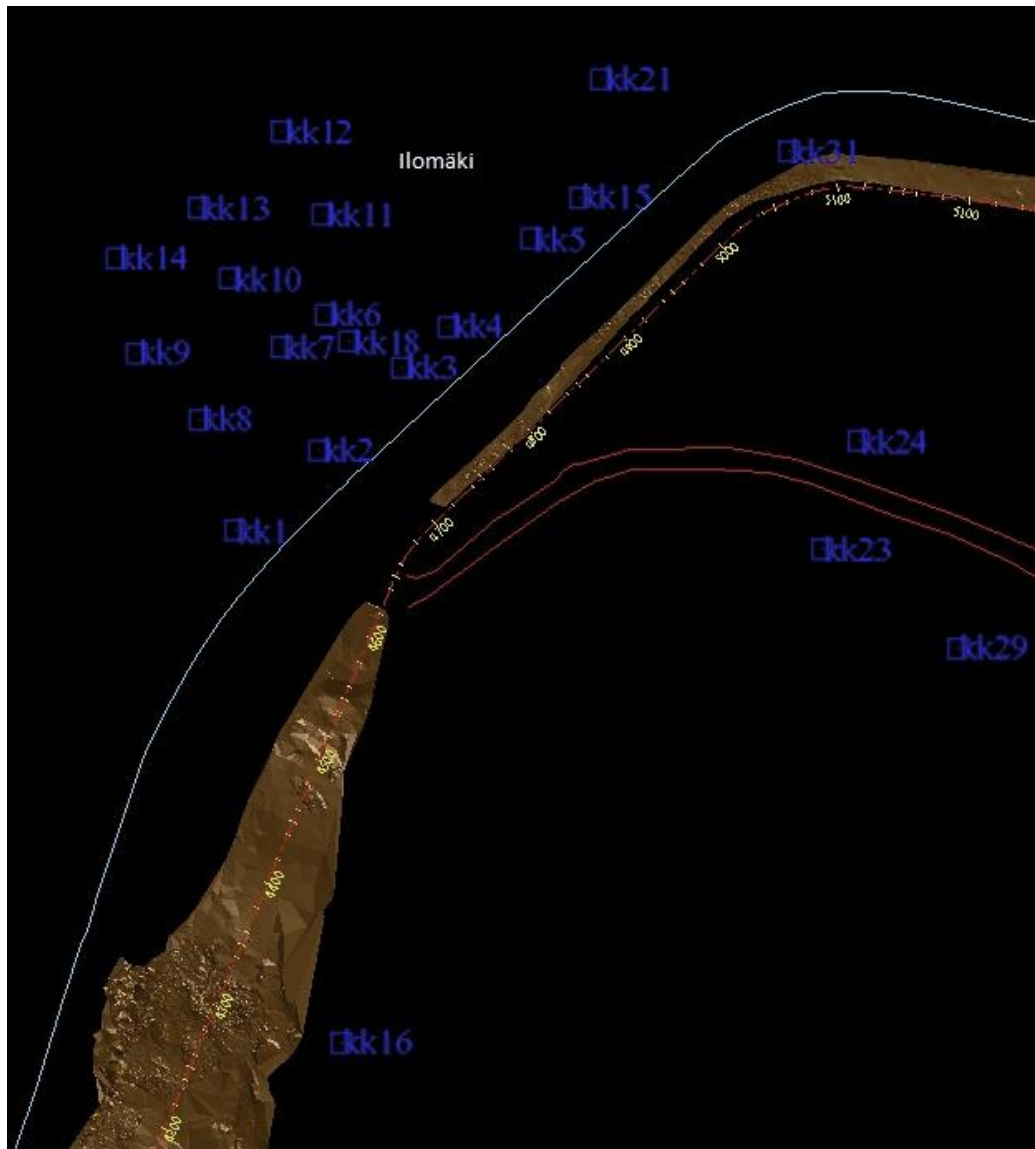
Ottopaikoilta on otettu useita maanäytteitä lapiolla koekuopista, joille tehtiin rakeisuus- ja maalajimääritykset, vedenläpäisevyyskoe sekä parannettu Proctor-koe. Koekuoppänäytteitä otettiin yhteensä 48 kappaletta. Kuva 27 havainnollistaa näytteenottotapaa sekä tavanomaisen koekuopan kokoa.



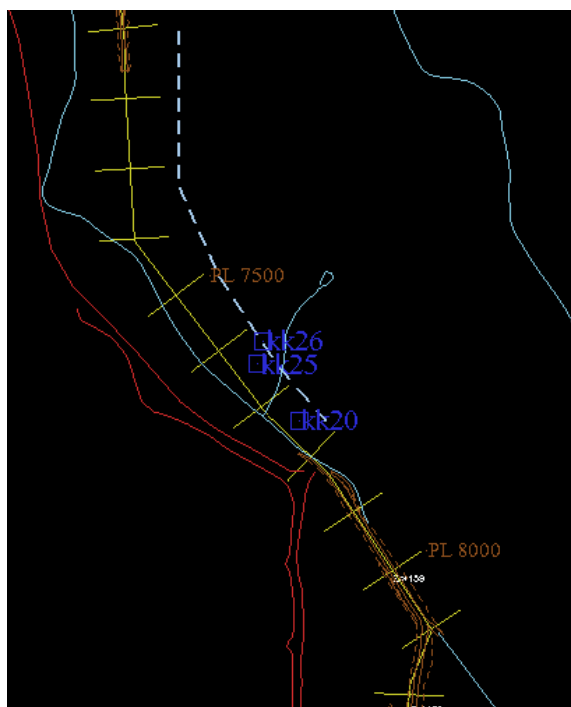
Kuva 27. Pöyryn asiantuntija näytteenotossa (Ruotsalainen 2013-10-7)

Rakeisuuden, maalajin ja vedenläpäisevyyden tiedoilla todettiin moreenin soveltuvuus rakenteeseen, ja parannetulla Proctor-kokeella selvitettiin moreenin maksimikuivatilavuuspaino, jotta moreenin tiiveysaste voitaisiin selvittää valmiista rakenteesta. Työohjeen vaatimuksina olivat vähintään yksi rakeisuustutkimus 10 000 m<sup>3</sup>ktr kohti, ja yksi vedenläpäisevyydetutkimus ja parannettu Proctor-koe 50 000 m<sup>3</sup>ktr kohti. Edellä mainittuja tutkimuksia kuitenkin tehtiin enemmän kuin mitä minimivaatimus oli.

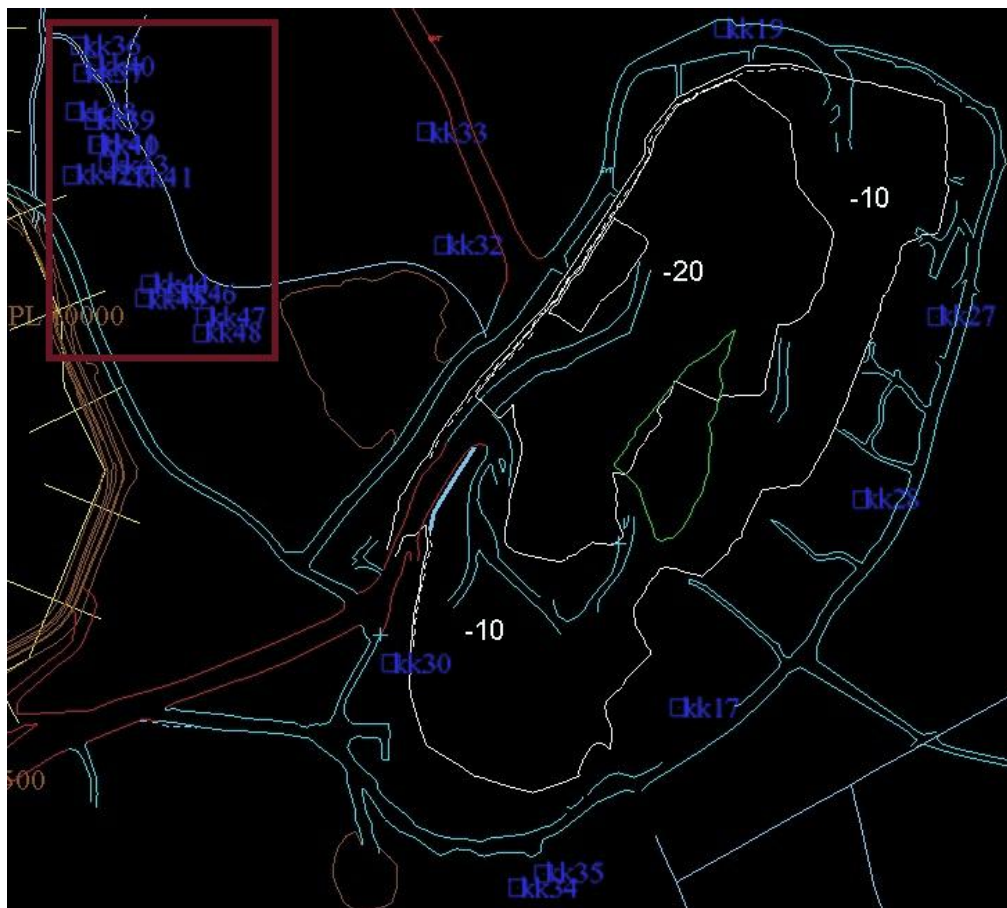
Moreenit pyrittiin ensisijaisesti ottamaan sekä Särkijärven louhoksen että Saarisen louhoksen laajentamisalueilta. Työmaan lähistölle on ajettu myös varastoon moreenia louhoksien maanpoistoista, ja alun perin suurin osa moreeneista oli tarkoitus ottaa käyttöön kyseisestä läjityksestä. Moreeni varastoläjityksellä kuitenkin osoittautui märäksi ja osittain jäätyneeksi talven jäljiltä (jäätyneitä moreenia oli vielä heinäkuussa), minkä takia valtaosa moreeneista ajettiin muilta ottopaikoilta. Kuvassa 28 ja 29 näkyvät moreenien ottopaikat kesältä 2013. Kuvassa 30 ovat Saarisen louhoksen läheisyydessä olevat koekuopat sekä suunniteltu moreenin ottopaikka kesälle 2014.



Kuva 28. Ilomäen ja patotyömaan lähialueiden koekuopat (Ruotsalainen 2013)

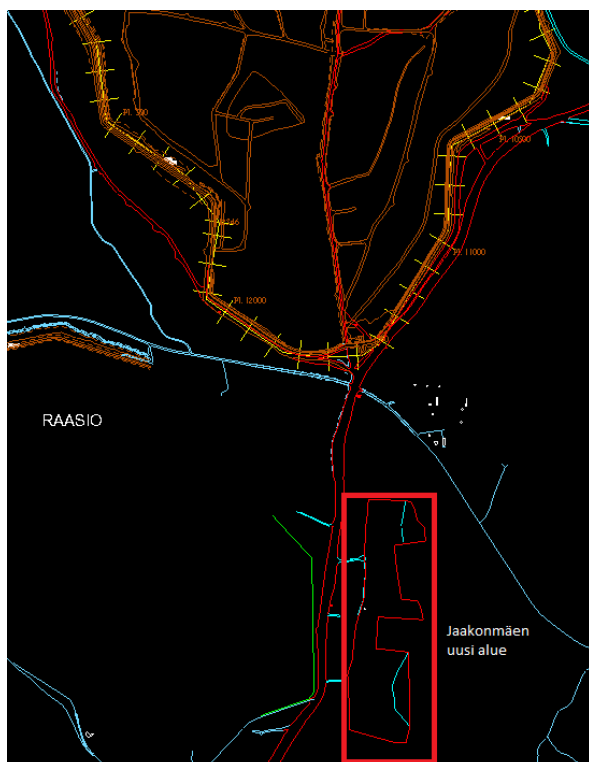


Kuva 29. Koekuopat niin sanotulla ukkokuusella eli moreenivarastolla (Ruotsalainen 2013)



Kuva 30. Saarisen louhoksen viereiset koekuopat. Punaisella on rajattu koekuopat kesän 2014 suunnitellulta ottopaikalta (Ruotsalainen 2013.)

Kuvassa 31 on toinen suunniteltu alue kesän 2014 ottopaikaksi. Alueelle on tehty karkea kartoitus ja arvioitu moreenien syvyyksiä silmämääräisesti, mutta koekuoppia ei ole vielä tehty.



Kuva 31. Jaakonmäen suunniteltu moreenialue kartalla (Ruotsalainen 2013)

Moreeneille on työohjeessa annettu seuraavat vaatimukset:

- Moreenin rakeisuuden tulee olla sellainen, että siinä on 0,063 mm:n seulan läpäiseviä lajitteita vähintään 15 % siitä aineosasta, joka läpäisee 5,6 mm seulan.
- Moreenin vedenläpäisevyyskerroin ei saa olla suurempi kuin  $10^{-7}$  m/s eikä mielellään pienempi kuin  $10^{-8}$  m/s.

Moreeneista eroteltiin ottopaikalla pintamaat, ylisuuret kivet ja muut maa-ainekset, jotka eivät täytyä työohjeen vaatimuksia. Lisäksi moreenin vesipitoisuus piti olla sopiva että sen pystyi tiivistämään. Moreenin otto, kuljetus ja varastointi täytyi järjestää niin ettei moreeni päässyt kastumaan, lietty-mään tai lajittumaan.

Moreenirakenteet pyrittiin rakentamaan pääosin työohjeen mukaisesti noin reilun metrin kerroksissa mahdollisimman pitkänä "mattona". Käytännössä tämä ei kuitenkaan ollut aina mahdollista, sillä avokallioiden puhdistukset, betonointi sekä massanvaihtokohdat hidastivat työmaan etenemistä tietyiltä osin. Näille kohdin ei voitu ajaa moreenia ollenkaan ennen kuin kyseiset työvaiheet oli tehty kokonaisuudessaan. Moreenit tiivistettiin yleensä lopuksi 14 t valssivetoisella täryjyrällä, mutta muullakin ajokalustolla, kuten 40 t painoisella puskukoneella ja 160 t louheautoilla, oli toden näköisesti oma tiivistävä vaikutuksensa. Osasta rakenteita mitattiin Troxlerilla tilavuuspainoja, joiden tiiviysaste oli yli 100% verrattuna parannetuista Proctor-kokeista saatuihin sullontatuloksiin.

Penkereet luiskattiin, kun moreenia oli saatu rakennettua tarpeeksi sen verran monta kerrosta päällekkäin että luiskaus olisi mielekästä tehdä, eli noin 4 - 5 kerroksen välein. Luiskauksen jälkeen luiskat tiivistettiin kaivinkoneeseen kiinnitettävällä tärylevyllä.

Moreenirakenteiden laadunvalvonta tehtiin GPS-mittalaitteistolla, jolla tarkistettiin rakennekerrosten paksuus ja luiskien oikea kaltevuus ja sijainti. Työohjeessa esitetään moreenirakenteille seuraavia vaatimuksia:

- Luiskan kaltevuus saa olla poikkeava tiivistyssydämen kohdalta enintään  $\pm 1:0,1$ .
- rakenteen paksuus saa poiketa -200...+500 mm suunnitellusta.
- harjankorkeus saa poiketa 0...+200 mm suunnitellusta.

Eniten korjattavaa tuli juuri luiskien kaltevuudessa ja paksuudessa, sillä työmaalla ei ollut nykyaikaisilla GPS-järjestelmillä varustettua kaivinkonetta, jolla luiskan olisi voinut tehdä maastomallin avulla kerralla laatuvaatimukset täyttäväksi. Luiskien kaltevuus merkattiin luiskamerkeillä noin 20 m välein, jonka jälkeen luiskauksen onnistuminen oli työkoneen kuljettajan vastuulla.

Moreenin tiiviysastetta tarkkailtiin Troxler-laitteella. Troxler-mittauksia täytyi suorittaa työohjeen mukaan vähintään yksi 1 000 m<sup>2</sup> kohden, mutta mittauksia tehtiin huomattavasti enemmän, yhteensä noin 330 kappaletta.

Työohjeessa on myös maininta että vesivolymetrillä täytyisi tehdä varmistus- ja kalibrointimittauksia yksi kymmentä troxler-mittausta kohden, koska Troxler-laite ei välttämättä anna oikeaa tulosta kivi-

sessä moreenissa. Vesivolymetrin sijaan käytettiin hiekkavolymetriä, jolla tehtiin yhteensä kolme mittausta. Volymetrimittauksen tulokset olivat yhdenmukaisia Troxler-mittausten kanssa. Volymetrimittausten määrästä tingittiin, koska Troxler-mittauksia tehtiin huomattavasti vaadittua enemmän.

Minimivaatimuksena tiiviysasteelle oli 92 %, johon päästiin lähes aina. Keskimääräinen tiiviysaste oli noin 96 %. Poikkeuksena osa ajetuista moreeneista oli sen verran märkiä, että niiden täytyi antaa kuivua pari vuorokautta ennen uusintamittausta.

### 8.3 Tukipengerrakenteet ja luiskaverhous

Paaluvälille 4000 - 4600 rakennettiin tukipengertä ja luiskaverhousta noin 15 000 m<sup>3</sup>itd edestä. Kuvassa 161 on tyypillinen poikkileikkaus tukipenkereestä, luiskaverhoilusta ja niiden viereisistä rakenteista. Tukipenkereen materiaalit ajettiin Saarisen louhoksesta malmin louhinnan yhteydessä louhista sivukivistä. Louhe on rakeisuudeltaan sekarakeista. Tukipenkereelle on työohjeessa asetettu seuraavat vaatimukset:

- Tukipenkereen harjan korkeus saa poiketa suunnitelmista -100...+200 mm.
- Harjan leveys on oltava -200...+500 mm etäisyydellä suunnitellusta etäisyydestä.
- Märän puolen luiskan keskimääräinen kaltevuus saa poiketa suunnitellusta kaltevuudesta  $\pm 1:0,1$ .
- Kuivan puolen luiskan keskimääräinen kaltevuus ei saa alittaa suunniteltua kaltevuutta.

Tukipenger rakennettiin 2 m paksuina kerroksina, jotta rakenteessa ei tapahtuisi lajittumista ja kuljetuskaluston tiivistämisvaikutuksesta saataisiin kaikki hyöty irti. Kuvassa 32 kuva osittain rakennetusta tukipenkereestä.



Kuva 32. Tukipenkereeseen on ajettu louhetta vaakasuodattimen päälle (Ruotsalainen 2013-08-24.)

Louheverhouksen maksimirakekooksi on työohjeessa määritelty joko 300 mm tai 2/3 louheverhouksen paksuudesta. Louheverhouksen paksuudeksi on määritelty minimissään 800 mm märälle puolelle ja 500 mm kuivalle puolelle. Näin ollen louheverhoukseenkin on voitu ajaa karkearakeisempaa kuin louhetta kuin 300 mm, kunhan on huolehdittu että verhouksen paksuus on riittävän suuri. Kuvassa 33 on tavanomaista louheverhousta Mustin padolta.



Kuva 33. Kuvassa näkyy moreenista tiivistyssydäntä sekä louheverhousta (Ruotsalainen 2013-09-11.)

Louheverhous rakennettiin suurimmaksi osaksi kippaamalla louhekuorma padon päälle, jonka jälkeen vastaanottokoneena toiminut kaivinkone siirsi louheen moreeniluiskan päälle ja taputteli louheen tiiviiksi. Paaluvälin 4500 - 4600 kuivan puolen luiska kuitenkin osittain tehtiin poikkeuksellisesti kippaamalla louhe padon juureen, ja työntämällä louhe siitä puskukoneella padon luiskaa pitkin kohti padon harjaa. Menetelmä osoittautui nopeammaksi ja siistimmäksi kuin kaivinkoneella vastaanotto, mutta käytännön syistä näin on mahdollista tehdä vain kuivan luiskan puolella. Märän luiskan juurella ei ole työmaatietä, jota pitkin kuljetuskalusto pääsisi liikkumaan.

#### 8.4 Suodatinrakenteet

Hienommalle suodatinmateriaalille, eli vaakasuodattimen ja tiivistyssydäntä vasten olevan suodatinkerroksen murskeelle on työohjeessa asetettu seuraavia vaatimuksia:

- Rakeisuus 0...35 mm.
- Hienoainespitoisuuden (raekoko alle 0,063 mm) pitää olla alle 5 %.
- $d_{15} = 0,125...1,0$  mm
- $d_{50} = 0,6...6,0$  mm

Karkealle suodattimelle, eli louhetukipenkereen ja hienomman suodattimen erottavalle suodatinkerrokselle, on työohjeessa seuraavat kriteerit:



- Rakeisuus 0...300 mm.
- Hienoainespitoisuus (raekoko alle 0,063 mm) alle 3 %.
- $d_{15} = 2...25$  mm
- $d_{50} = 30...130$  mm

Lisäksi suodatinmateriaalien tulee olla rapautumatonta, kiillepitoisuuden alle 30 % ja vedenläpäisevyyden tiivysasteessa 92 % suurempi kuin  $k \geq 10^{-4}$  m/s.

Suodatinmateriaalien laadunvalvontaa varten otettiin yhteensä kahdeksan näytettä 0 - 32 mm suodatinmurskeesta. Näytteet 1 - 3 otettiin valmiista suodatinrakenteesta, 4 - 6 murskekasasta ja 7 - 8 suoraan linjalta. Näytteistä tutkittiin rakeisuus, vedenläpäisevyys sekä kiillepitoisuus. Taulukkoon 4 on koottu edellä mainitut tiedot kiillepitoisuutta lukuun ottamatta, sillä sen määrittämiseksi ei ole löytynyt luotettavaa menetelmää.

Kiillepitoisuus pitäisi määrittää, koska kiille on eroosioherkkää ja vaakasuodatin toimii ajotienä. Vaarana on, että jos vaakasuodatin sisältää paljon kiillettä, se jauhautuu raskaan ajokaluston alla nopeasti pienemmiksi rakeiksi. Pienemmät rakeet saattavat tukkia suodattimen, eli suodattimen vedenläpäisyarvo  $k$  laskee liian pieneksi. Kuitenkin Yaran geologin mukaan silmämääräisesti arvioiden näytteet vaikuttavat sisältävän vähemmän kuin 30 % kiillettä.

Taulukko 4. Murskenäytteiden tuloksia (Ruotsalainen, 2013)

Näyte	Vesipi-toisuus (%)	Laji	Vedenläpäisevyys (m/s)
MN1	1,4	KaM 0/32	$2 \cdot 10^{-6}$
MN2	0,9	KaM 0/32	$1,5 \cdot 10^{-5}$
MN3	1,2	KaM 0/32	-
MN4	0,7	KaM 0/32	$7 \cdot 10^{-6}$
MN5	0,9	KaM 0/32	$3,3 \cdot 10^{-6}$
MN6	1,8	KaM 0/32	$2,2 \cdot 10^{-5}$
MN7	0,6	KaM 0/32	-
MN8	1,2	KaM 0/32	$8,2 \cdot 10^{-7}$

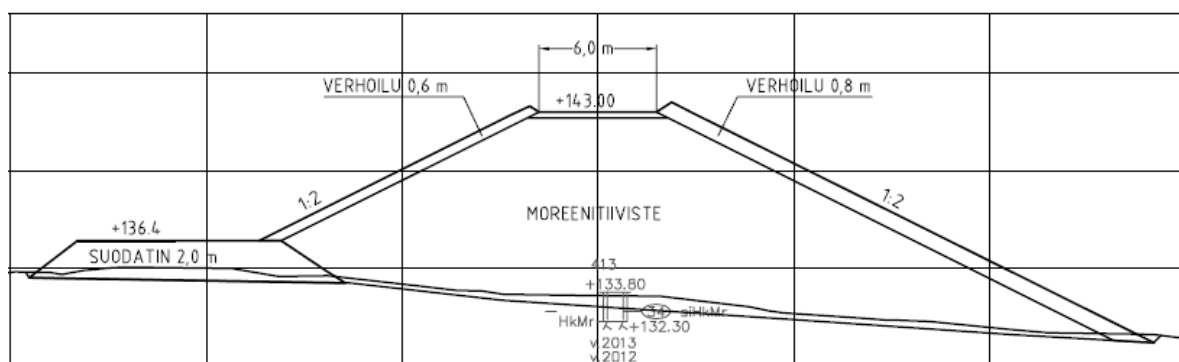
Kiillepitoisuuden lisäksi myös vedenläpäisevyyden selvittämisessä oli omat haasteensa, sillä laitteistot jolla pystytään tutkimaan rakeisuudeltaan 0 - 32 mm mursketta ovat harvinaisia. Esimerkiksi näytteistä 1,2, 4, 5 ja 8 on seulottu pois yli 20 mm rakeet ennen kuin niille on tehty vedenläpäisevyystutkimukset, sillä yli 20 mm rakeita sisältävää näytettä ei saatu sullottua selliin haluttuun tiiveyteen. Tällä on oletettavasti vedenläpäisyarvoa pienentävä vaikutus. Näytteet 6 ja 8 on tehty seulomattomilla näytteillä, mutta niitä ei ole saatu sullottua haluttuun tiiveyteen. Tämä taas voi vaikuttaa mitattuun vedenläpäisevyyteen kasvattavasti.

Vaikka tutkitut vedenläpäisevyydet ovat pienempiä kuin työohjeen ohjeellinen arvo  $k = 10^{-4}$  m/s, niin ne täyttävät yleisen suodatinkriteerin: suodatinmateriaalin täytyy olla 10...100 kertaa vettä lä-

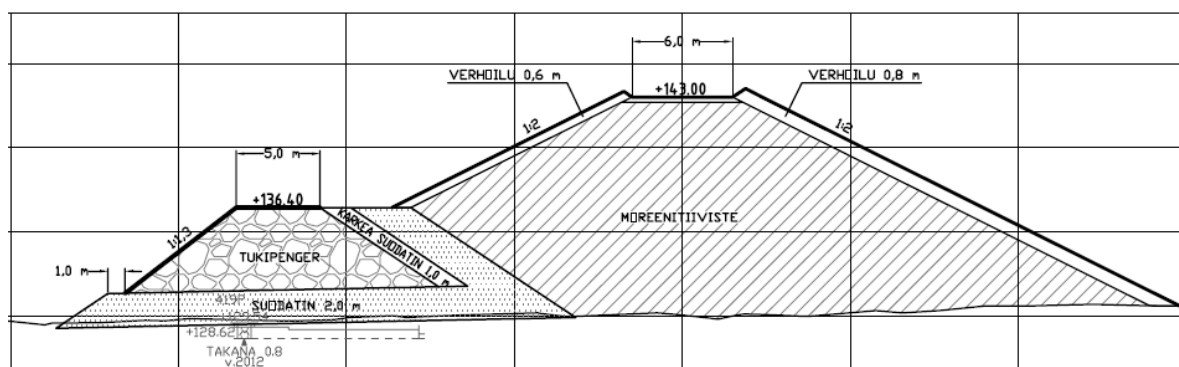
päisevämpää kuin suojattava materiaali. Vedenläpäisevyyssarvojen käypäisyys tarkistutettiin myös padon pääsuunnittelijalla.

Murskeen toteaminen kelpoiseksi suodatinmateriaaliksi oli aikaa vievä prosessi, ja sillä oli hidastava vaikutus työmaan etenemiseen. Paaluvälin 4100 - 4300 tukipenkereen rakentamista ei voitu aloittaa ennen kelpoisuuden toteamista, sillä tukipenkereen alle jäävän vaakasuodattimen purku- ja korjaustyöt olisivat tulleet kalliiksi. Sateisina päivinä, jolloin moreenipengertä ei voitu rakentaa, tukipenkereen rakentamisen sijaan kalustoa käytettiin muihin vähemmän kiireellisiin työtehtäviin. Tukipenkereen viereen taas ei voinut ajaa moreenia ennen kuin tukipenger oli rakennettu.

Mustin padolle rakennettiin sekä vaakasuodatin- että vinosuodatinrakenteita. Homogeenisen maapadon kohdalle tehtiin pääasiassa vain vaakasuodatin, ja vyöhykepadon rakenteisiin tehtiin myös vinosuodattimet. Vaakasuodattimen rakennusmateriaalina käytettiin nimellisesti 0 - 32 mm mursketta, kun taas vinosuodattimiin rakennettiin karkeampi suodatinkerros 0 - 300 mm murskeesta ja hienompi suodatinkerros 0 - 32 mm murskeesta. Kuvassa 34 on homogeenisen maapadon poikkileikkaus, johon on suunniteltu vaakasuodatin. Kuvassa 35 on taas poikkileikkaus vyöhykepadosta vinosuodattimien kanssa.



Kuva 34. Homogeenisen maapadon poikkileikkaus paalulta 4060 0 - 32 mm rakeisella vaakasuodattimella (Kohonen 2013)



Kuva 35. Vyöhykepadon poikkileikkaus paalulta 4220 suodatinrakenteinen (Kohonen 2013)

Suodattimen paksuus saa työohjeen mukaan poiketa suunnitellusta -100...+200 mm. Luiskan kaltevuudelle, leveydelle ja sijainnille vaatimukset käyvät ilmi poikkileikkauksista, vaikka työohjeessa niitä ei erikseen mainitakaan.

Vaakasuodattimet rakennettiin suurelta osin noin metrin kerroksissa, lopullisen paksuuden ollessa noin kaksi metriä. Raivatun patopohjan pinnan muotojen takia vaakasuodattimen paksuus on paikoitellen yli kolmekin metriä. Vaakasuodatinta käytettiin myös työnaikaisena työmaatienä, joten siitä haluttiin rakentaa ajokelpoinen, vaikka suodatinmateriaalia kuluikin enemmän. Syksyyn 2013 mennessä suodatinrakenteisiin ja työmaatiestöön oli ajettu yhteensä noin 87 000 m<sup>3</sup> 0 - 32 mm mursketta. Vaakasuodatinmurskeen tilavuuspaino mitattiin Troxler-mittauksin, joiden vaatimuksena oli 92 % parannetusta Proctor-kokeesta saadusta sullontatuloksesta. Tiiveysaste oli poikkeuksetta aina yli 92 %.

Paaluvälille 4100 - 4300 vinosuodattimet rakennettiin rinnakkain reilun metrin siivuissa, 0-300 mm mursketta metrin paksuudella ja 0 - 32 mm mursketta kahden metrin paksuudella. Tiivistys hoidettiin valssivetoisella täryjyrällä. Tiivistyksen jälkeen luiskat tehtiin vaadittuun muotoonsa kaivinkoneella ja tiivistettiin tärylevyllä. Kuvassa 36 näkyy osittain valmis karkeasuodatin ja kuvassa 37 vinosuodatin.



Kuva 36. Tärylevyllä tiivistetään karkeasuodatinta. Vasemmalla näkyy myös puskkone työntämässä moreenia noin metrin kerroksena (Ruotsalainen 2013-08-26.)



Kuva 37. 0 - 32 mm murskeesta rakennettu vinosuodatin osittain peitettyä moreenilla. Vasemmalla myös täryjyrä työn touhussa (Ruotsalainen 2013-08-27.)

## 8.5 Muut poikkeavat rakenteet

Työmaan edetessä on tullut esiin seikkoja, joita ei ole pystytty alkuperäisissä suunnitelmissa ottamaan huomioon. Paaluvälillä 3600-3900 vettä suotautuu huomattavia määriä padon sekä padon alitavien ruhjeiden läpi, joka aiheutti veden patoutumisen paalun 3800 massanvaihtokuoppaan. Moreenia ei voitu ajaa kuoppaan, sillä märkänä moreeni ei tiivisty.

Ongelma ratkaistiin tekemällä kaivo massanvaihtokohtaan ja pumppaamalla vedet sen kautta takaisin patoaltaan sisäpuolelle. Kuvan 38 kaivoa korotetaan kaivonrenkailla moreenisydämen mukana aina harjalle asti. Betoniset kaivon renkaat on ympäröity 16-32 mm murskeella, joka taas on ympäröity 0 - 300 mm hienolouheella.

Varmuuden vuoksi, jotta ongelmia ei tulisi liiallisten suotovirtausten kanssa, massanvaihtokohdan vaakasuodattimeen ajettiin sepeliä metrin kerros. Tällä varmistetaan että vesi suotautuu padon läpi hallitusti eikä lähde nousemaan tiivistesydämessä yli suunnitellun korkeuden. Lisäksi tiivistesydämen laitaan rakennettiin salaojarakenne.



Kuva 38. Kaivorakennetta rakennetaan paalulle 3800 moreenisen tiivistesydämen sisään (Ruotsalainen 2013-09-04.)

## 9 KALLIONÄYTEKAIRAUKSET MUSTIN PADOLLA

### 9.1 Patoalueen kallioruhjeet

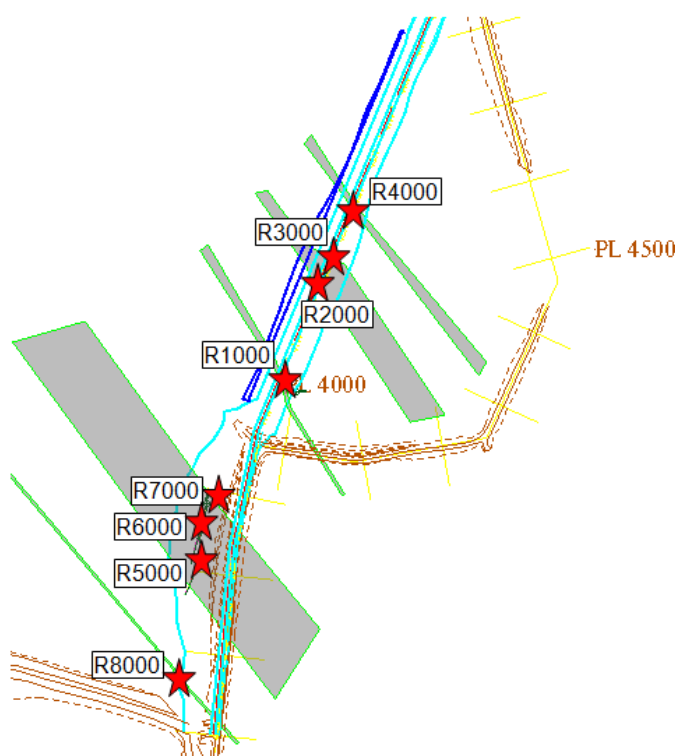
Mustin padoilla on havaittu maanpoiston yhteydessä tähän mennessä viisi selvää ruhjetta. Ruhjeet ulottuvat vanhojen patopenkkojen alle, ja jäävät uuden rakennettavan osuuden alle. Ruhjeet ovat hyvin rikkonaisia, ja ruhjevyöhykkeen vedenjohtavuus on suuri. Ne aiheuttavat mahdollisesti vesien suotautumista padon alitse padon ulkopuoliselle maa- ja kallioperälle. (Heino 2013.)

Mustin alueen kalliot ovat suurimmalta osalta graniittigneissejä, eli koko alueen vanhimpia kiviä ja ne kuuluvat ns. pohjagneissikompleksiin. Näille kallioille ovat tyypillistä luode-kaakkosuuntaiset ruhjevyöhykkeet. (Heino 2013.)

### 9.2 Vesimenekkikokeet

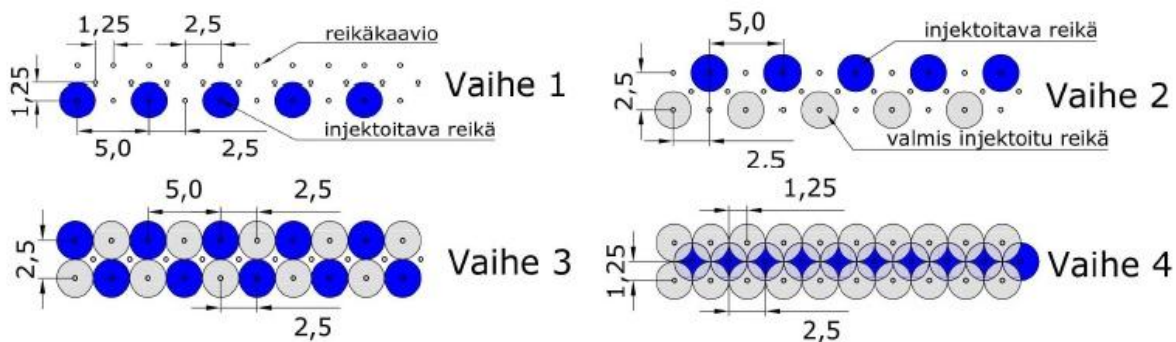
Vesimenekkikokeet tehtiin timanttikairauskalustolla. Urakoitsijana oli Kati oy. Putkikalustona oli BQTK, jolla kairasydämen halkaisija on noin 40 mm ja reiän ulkohalkaisija 56 mm. Reikiä suunniteltiin yhteensä kahdeksan kappaletta viiteen eri ruhjeeseen, ja ne lävistivät kallion pinnoilta havaitut ruhjeet kohtisuoraan. Reikiä porattiin yhteensä 268,3 m, ja maakairauksen osuus oli 30,4 m. Vesimenekkikokeet suoritettiin kairauksen edetessä reiän pohjaa vasten. (Heino 2013.)

Kairauksen tuloksina saatiin tieto siitä, että jokainen havaittu ruhje ulottui useita metrejä pintaa syvemmälle. Kuvassa 39 näkyvät ruhjeiden ja kairareikien sijainnit. Suurin osa on huonossa tai erittäin huonossa kivessä, ja hyvän tai kohtalaisen luokituksen saa vain alle viidesosa. (Heino 2013.)



Kuva 39. Ruhjeet merkitty harmailla alueella ja kairareiät punaisilla tähdillä (Heino 2013.)

Kairaustietojen perusteella pääsuunnittelija on laatinut suunnitelmat kahden ruhjeen injektoinnista. Injektoinnilla pyritään laskemaan vesimenekki ruhjeen kohdalla alle yhden lugeonin. Paalun 3650 (kairareikä R8000) ruhje injektoidaan noin 15 m pituudelta leveys suunnassa ja enintään 35 m syvyys suunnassa. Paalun 4200 (kairareiät R2000 ja R3000) injektoinnin leveys on noin 45 m ja syvyys 35 m. (Kohonen 2013.) Injektointi pyritään tekemään ennen kevättä 2014, jotta se ei olisi patotyömaan tiellä. Kuvassa 40 on injektioverhon periaate.



Kuva 40. Injektointi vaiheittain suoritettuna (Kohonen 2013)

## 10 LAADUNVALVONNAN YHTEENVETO

### 10.1 Patotyömaan laadunvalvonnan yleiset seikat

Työmaan kokoon suhteutettuna korjausta tai purkamista vaativia rakenteita tehtiin Mustin padolla varsin vähän. Suurimmalta osin korjaukset koskivat moreenipenkereen paksuutta sekä luiskan kaltevuutta, jotka olivat helposti korjattavissa. Ongelmat kuitenkin korjattiin asianmukaisesti, lukuun ottamatta paalun 3950 määrän puolen karkea- ja vinosuodattimia. Tällä kohden suodattimien korjaus on siirretty ensi keväälle sääolosuhteiden takia.

Kesän 2013 aikana työmaa saatiin sinänsä hyvälle tolalle, että suurimmat haasteet, esimerkiksi suuret massanvaihdot ja niihin liittyvät työvaiheet, eivät jääneet kevään 2014 murheiksi vaan keväällä on sujuva jatkaa padon rakentamista. Esimerkkinä paalun 3800 massanvaihtokohta kaivoineen: jos moreenirakenteita ei olisi ennätetty tai onnistuttu sääolosuhteiden tai ongelmien takia nostamaan nykyiselle tasolle (joilla ne pysyvät kuivana ja tiiviinä), keväällä 2014 moreenirakenteet kyseisen paalun ympäristöstä pitäisi toden näköisesti purkaa ja läjittää kuivumaan.

Kokonaisuutena työmaa edistyi hyvän tavan mukaisesti, mutta joissain yksityiskohdissa on vielä parannettavaa. Näitä asioita ovat esimerkiksi tiedon kulku rakennuttajan ja urakoitsijan välillä, sekä sisäinen tiedon kulku molemmilla osapuolilla. Välillä aikataulut viivästyivät myös näytteiden tutkimisessä sekä suunnitelmapiirustusten sähköisessä toimittamisessa.

Rakenteiden osalta parannettavia asioita ovat kelvottoman moreeniaineksen ajo (jota ei tosin tapahtunut kuin kahtena iltana), vaakasuodattimen leveys ja paksuus, karkea- ja vinosuodattimien leveydet ja paksuudet, moreenikerrosten tiivistämisspaksuus, moreenipinnan rikkominen vanhan kerroksen päältä ennen uuden moreenikerroksen ajamista, tiivistyssydämen luiskaus, työmaan vesien hallinta ja massanvaihtokohtien kaivantojen viimeistely.

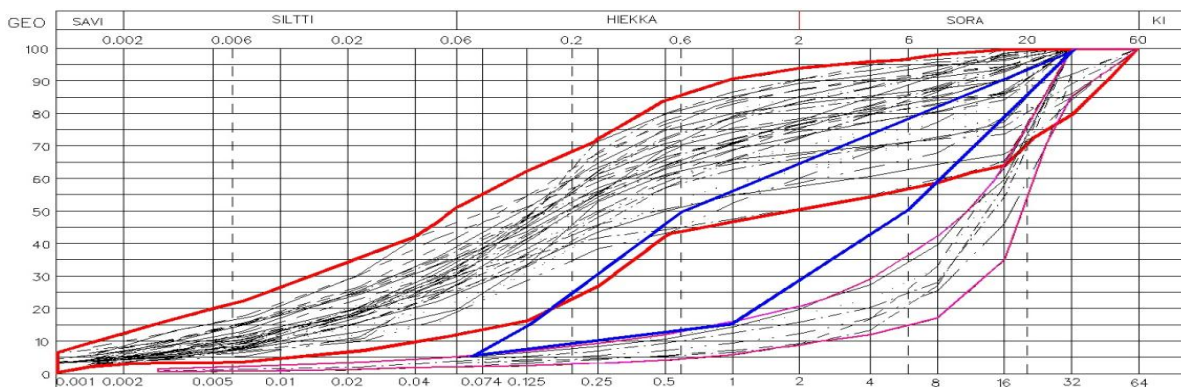
Suurin syy edellä mainittuihin ongelmiin on toden näköisesti kiire, mutta osaa (erityisesti tiedonkulkua) voisi vähentää pelkästään muuttamalla asenteita. Toisena keinona on myös lisätä ja tarkentaa työmaan suunnitelmallisuutta, jolloin nopeiden ratkaisujen tarve työmaalla vähenisi ja rakennustöiden kulku olisi paremmin ennakoitavissa. Tätä kautta suunnitelmallisuus vähentäisi myös kiirettä, ja kiireestä johtuvat ongelmat vähenisivät.

### 10.2 Toteutuneet rakenteet ja laadunvalvontatulokset

Patopohjalta otetut maanäytteet, kalliopintojen tutkimukset, tarvittavien kallioiden betonoinnit, ruuhjeiden injektointitarpeiden kartoitukset ja massanvaihdot ovat varmistaneet että pato on rakennettu sopivalle pohjalle. Liitteeseen 2 on koottu oleelliset tiedot patopohjalta otetuista maanäytteistä.

Käytetyt rakennusmateriaalit ovat olleet pääosin työohjeessa lueteltujen kriteereiden mukaisia lukuun ottamatta suodatin murskeiden rakeisuuksia. Murskeiden kelpoisuus suodatinmateriaaliksi on

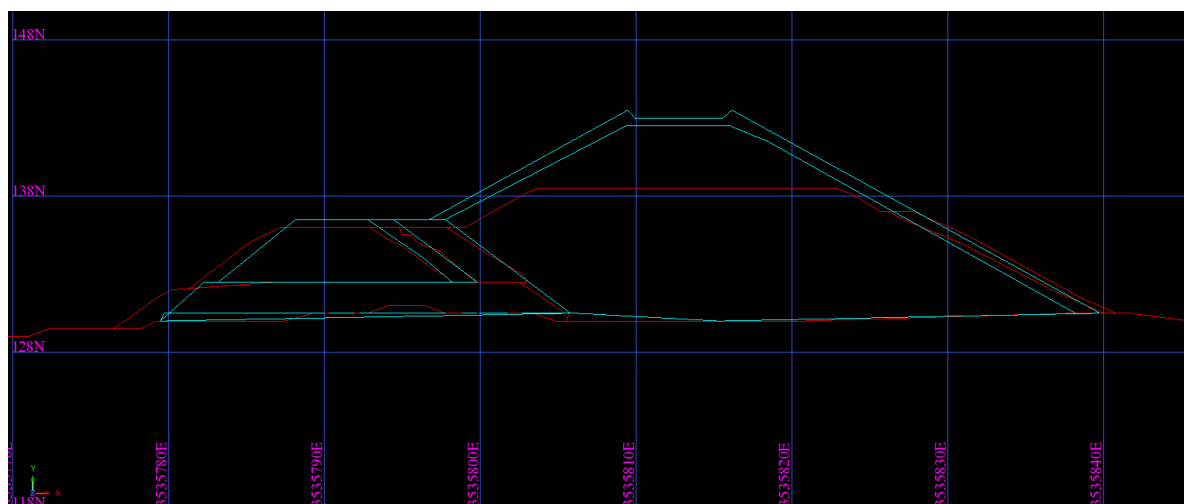
kuitenkin tarkistutettu pääsuunnittelijalla. Kuvassa 41 on esitetty rakeisuusvyöhykkeet, joille rakenteisiin käytetyt moreenit ja 0 - 32 mm murskeet sijoittuvat. Lisäksi kuvassa on myös hahmoteltu työhjeen mukaista rakeisuusvyöhykettä murskeille. Liitteessä 2 on esitetty myös moreenien ja murskeiden tutkimustulokset.



Kuva 41. Käytettyjen moreenien rakeisuudet näkyvät punaisella rajauksella ja murskeiden violetilla. Siniselle alueelle on hahmoteltu työhjeen mukainen vyöhyke murskeille (Ruotsalainen 2013.)

Troxler-mittauksilla on varmistettu että rakenteet on tiivistetty vähintään riittävän tiiviiksi, enimmäkseen jopa tiiviimmin. Liitteessä 3 esimerkki Troxler-mittausten tuloksista paikkatietoineen.

Toteutuneet rakenteet ovat suurimmaksi osaksi varsin yhdenmukaisia suunnitelmapiiirustuksien kanssa, lukuun ottamatta kohtia joissa padon pohjan raivaustyöt ovat ulottuneet suunniteltua syvemmälle. Rakennekerroksia on jouduttu hiukan muokkaamaan vastaamaan uusia olosuhteita. Tällaisia kohtia ovat lähinnä massanvaihtokohdat paaluilla 3850 ja 4500. Myös paaluilla 4000 - 4050 on tehty muutoksia, sillä pohjan raivausta tarvitsi tehdä arvioitua matalammalle. Matalammasta raivauksesta johtuen tukipenkereen korkeudeksi näillä main olisi tullut joitain kymmeniä senttimetrejä, minkä takia tyydyttiin vain vaakasuodattimen rakentamiseen kyseiselle välille. Pato on lisäksi myös keskeneräinen, joten syksyllä 2013 suoritettut viimeiset mittaukset eivät kaikilta osin kuvaa lopullista rakennetta. Kuvassa 42 on esimerkki poikkileikkauksesta, jossa verrataan toteutunutta ja suunniteltua vyöhykepatoa.



Kuva 42. Toteutunut rakenne punaisella ja suunniteltu sinisellä kuvitettuna (Ruotsalainen 2013.)



## LÄHTEET

- HEINO, Pasi 2013. Yara Oy:n sisäinen raportti. Sijainti: Yara Oy:n sähköiset kokoelmat.
- JÄÄSKELÄINEN, Raimo 2011. Geotekniikan perusteet. 3. painos 2011. Jyväskylä: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy
- KOHONEN, Esa 2013. Mustin rikastushiekka-altaan pohjoispadon rakennussuunnitelma: patopohjan verhoinjektointi. Sijainti: Yara Oy:n sähköiset kokoelmat.
- KOHONEN, Esa 2013. Pohjoispadon korotus tasolle +143 / +152 / +157. Sijainti: Yara Oy:n sähköiset kokoelmat
- LITMANEN, Mikko 2013. Moreenin rakeisuuskäyriä ilman areometrin tuloksia [digikuva]. Sijainti: Yara Oy:n sähköiset kokoelmat.
- LESKELÄ, Antti 2004. Maapatojen rakenteet. Patu-kurssi 6: Maapadot. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Patoturvallisuusohje 2012.
- Patoturvallisuuslaki 494/2009.
- Patoturvallisuusasetus 319/2012.
- RIL 123 1979. Vesirakenteiden suunnittelu 1. painos 1979. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
- RAVASKA, Olli 2004. Suomen maa- ja kallioperä II. Patu-kurssi 3: Geotekniikka. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- RUOTSALAINEN, Jukka 2013. Kuvat patotyömaasta [digikuvia]. Sijainti: Yara Oy:n sähköiset kokoelmat.
- SLUNGA, Eero 2004. Patojen rakentaminen ja tekniset ratkaisut erilaisilla pohjilla. Patu-kurssi 3: Geotekniikka. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- TPO-83 1983. Talonrakennuksen pohjatutkimusohjeet. 1. painos 1983. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys SYG.
- VEPSÄLÄINEN, Pauli 2004. Geotekniset maastotutkimukset. Patu-kurssi 3: Geotekniikka. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.



## LIITE 2: MAANÄYTTEIDEN, MOREENIEN JA MURSKIEN TULOKSET

Näytteen nro	Paikka	Syvyys (m)	Näytteen-ottopvm	Ottaja / tapa	Vesipitoisuus (%)	Maalaji (pesuseulonta)	Huom!
1	KK1		vk21/2013	Tilaja / la	7,4	siHkMr	
2	KK2		"	"	12,1	siHkMr	
3	KK3		"	"	9,7	siHkMr	
4	KK4		"	"	4,8	srHkMr	
5	KK5		"	"	7,9	HkMr	
6	KK6		"	"	7,2	siHkMr	
7	KK7		"	"	7,2	siHkMr	
8	KK8		"	"	11,1	siHkMr	
9	KK9		"	"	12,7	saSiMr	
10	KK10		"	"	9,5	srHkMr	
11	KK11		"	"	8,1	srHkMr	
12	KK12		"	"	8,3	siHkMr	
13	KK13		"	"	8,8	siHkMr	
14	KK14		"	"	4,5	srHkMr	
15	KK15		"	"	5,3	srHkMr	
16	KK16		5.6.2013	Pöyry / la	13,3	siHkMr	
17	KK17		26.6.2013	Pöyry / la	9,1	siHkMr	
18	KK18		4.7.2013	Pöyry / la	10,6	srHkMr	Vedenläp. 6,7E-8 m/s. Max kuivatil. 2095 kg/m <sup>3</sup>
19	KK19		10.7.2013	Pöyry / la	9,7	siHkMr	Vedenläp. 8,0E-8 m/s. Max kuivatil. 2045 kg/m <sup>3</sup>
20	KK20		11.7.2013	Pöyry / la	7,9	srHkMr	Max kuivatil. 21,8 kN/m <sup>3</sup>
21	KK21		13.8.2013	Pöyry / la	10,6	srHkMr	
22	KK22		19.8.2013	Pöyry / la	9,3	siHkMr	Max kuivatil. 22,2 kN/m <sup>3</sup>
23	KK23		27.8.2013	Pöyry / la	10,1	siHkMr	Max kuivatil. 20,8 kN/m <sup>3</sup>
24	KK24		27.8.2013	Pöyry / la	15,0	HkMr	
25	KK25		2.9.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
26	KK26		2.9.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
27	KK27		2.9.2013	Pöyry / la		srHkMr	Teku
28	KK28		2.9.2013	Pöyry / la		srHkMr	Teku
29	KK29		6.9.2013	Pöyry / la	10,7	HkMr	
30	KK30		6.9.2013	Pöyry / la	11,0	siHkMr	
31	KK31		13.9.2013	Pöyry / la	12,4	siHkMr	
32	KK32		13.9.2013	Pöyry / la	6,8	siHkMr	
33	KK33		17.9.2013	Pöyry / la	9,8	siHkMr	
Patopohjan maanäyte (16WWE0069.BAEE21)							
1	N1		vk23/2013	Pöyry / la	16,5	siHkMr	
2	N2		vk23/2013	Pöyry / la	5,2	siHkMr	
3	N3		vk23/2013	Pöyry / la	8,9	siHkMr	
4	N4		vk23/2013	Pöyry / la	7,0	siHkMr	
5	N5		vk24/2013	Pöyry / la	16,8	siHkMr	
6	N6		vk24/2013	Pöyry / la	18,6	siHkMr	
7	N7		vk24/2013	Pöyry / la	15,7	siHkMr	
8	N8		vk24/2013	Pöyry / la	12,7	siHkMr	
9	N9		vk26/2013	Pöyry / la	13,2	saSi	Kaivettiin pois
10	N10		5.7.2013	Pöyry / la	18,9	siHkMr	
11	N11		10.7.2013	Pöyry / la	11,6	saSi	Vedenläp. 1,1E-10 m/s. Max kuivatil. 2120kg/m <sup>3</sup>
12	N12		15.7.2013	Pöyry / la	9	siHkMr	
13	N13		12.7.2013	Pöyry / la	12,3	siHkMr	
14	N14		12.7.2013	Pöyry / la	9,4	srHkMr	
15	N15		12.7.2013	Pöyry / la	8,8	siHkMr	
16	N16		14.7.2013	Pöyry / la	21,1	siHk	Vedenläp.arvio 1E-8 - 9E-8 m/s
17	N17		14.7.2013	Pöyry / la	13,1	siHkMr	
18	N18		14.7.2013	Pöyry / la	13,2	srHkMr	
19	N19		14.7.2013	Pöyry / la	19,1	saSi	Pinnassa savinen kerros, kaivettiin pois
20	N20		16.7.2013	Pöyry / la	8,1	HkMr	
21	N21		16.7.2013	Pöyry / la	7,5	HkMr	
22	N22		16.7.2013	Pöyry / la	14,4	siHkMr	
23	N23		22.7.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
24	N24		22.7.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
25	N25		22.7.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
26	N26		22.7.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
27	N27		22.7.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
28	N28		22.7.2013	Pöyry / la		hkSi	Teku, Vedenläp.arvio 1E-9 - 9E-9 m/s
29	N29		22.7.2013	Pöyry / la		saSi	Teku, Vedenläp.arvio 1E-9 - 1E-10 m/s
30	N30		22.7.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
31	N31		22.7.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
32	N32		22.7.2013	Pöyry / la		Hk	Teku, Vedenläp.arvio 1E-7 - 1E-9 m/s
33	N33		22.7.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
34	N34		22.7.2013	Pöyry / la		Hk	Teku, Vedenläp.arvio 1E-7 - 1E-8 m/s
35	N35		1.8.2013	Pöyry / la		HkMr	Teku
36	N36		1.8.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
37	N37		1.8.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
38	N38		1.8.2013	Pöyry / la		srHkMr	Teku
39	N39		1.8.2013	Pöyry / la		siHkMr	Teku
40	N40		6.8.2013	Pöyry / la	9,7	siHkMr	
41	N41		6.8.2013	Pöyry / la	13,1	Si	Vedenläp.arvio 1E-9 - 1E-10 m/s
42	N42		6.8.2013	Pöyry / la	23,1	siHkMr	
43	N43		6.8.2013	Pöyry / la	10,4	HkMr	Pisteestä 19, savikerroksen pois kaivettua
44	N44		6.8.2013	Pöyry / la	20,1	siHk	Vedenläp.arvio 1E-8 - 1E-10 m/s
45	N45		6.8.2013	Pöyry / la	9,3	siHkMr	
46	N46		6.8.2013	Pöyry / la	11	siHkMr	
47	N47		6.8.2013	Pöyry / la	10,9	siHkMr	
48	N48		6.8.2013	Pöyry / la	14,1	siHk	Vedenläp.arvio 1E-8 - 1E-10 m/s
49	N49		6.8.2013	Pöyry / la	14,5	siHkMr	
50	N50		6.8.2013	Pöyry / la	16,3	siHkMr	
51	N51		6.8.2013	Pöyry / la	12,2	siHkMr	
52	N52		6.8.2013	Pöyry / la	21,9	hkSi	Vedenläp.arvio 1E-9 - 9E-9 m/s
Suodatinmurskenäytteet(16WWE0069.BAEE21)							
1	MN1		8.7.2013	Pöyry / la	1,4	KaM 0/32	Vedenläp. 2E-6 m/s
2	MN2		8.7.2013	Pöyry / la	0,9	KaM 0/32	Vedenläp. 1,5E-5 m/s
3	MN3		8.7.2013	Pöyry / la	1,2	KaM 0/32	
4	MN4		11.7.2013	Pöyry / la	0,7	KaM 0/32	Vedenläp. 7E-6 m/s
5	MN5		24.7.2013	Pöyry / la	0,9	KaM 0/32	Vedenläp. 3,3E-6 m/s
6	MN6		19.8.2013	Pöyry / la	1,8	KaM 0/32	Vedenläp. 2,2E-5 m/s
7	MN7		27.8.2013	Pöyry / la	0,6	KaM 0/32	
8	MN8		2.9.2013	Pöyry / la	1,2	KaM 0/32	Vedenläp. 8,2E-7 m/s

## LIITE 3: TROXLER-MITTAUSTEN TULOKSIA

Nro./ piste	Pvm.	Rakeisuus	Vedenläp	Tiiviyys	Mittaus- syvyys maap.	Täyttöma- ateriaali (maalaji)	Kuivatila- uuspaino [kg/m <sup>3</sup> ]	Märkätila- uuspaino [kg/m <sup>3</sup> ]	Vesi- määrä [l/m <sup>3</sup> ]	Vesi- pitoisuus [%]	kuivatila- uuspaino [kg/m <sup>3</sup> ]	Optimi- vesipitoi- sus [%]	Tiiviyys- aste [%]				paalu
														x	y	z	
1	13.6.2013			x	300	HkVr	2038	2238	200,0	9,8	2170	7,6	93	7009806.277	3535904.083	133.933	4510
2				x	300	HkVr	2312	2427	115,2	5,0	2170	7,6	>100	7009802.383	3535910.515	133.700	4510
3	25.6.2013			x	300	HkVr	2151	2321	169,5	7,9	2170	7,0	99	7009859.249	3535929.125	136.104	4570
4				x	200	HkVr	2122	2234	111,6	5,3	2170	7,0	98	7009831.496	3535906.948	134.598	4540
5				x	150	HkVr	1974	2180	205,5	10,4	2170	7,0	91	7009839.937	3535931.020	134.766	4550
6				x	300	HkVr	2018	2112	94,4	4,7	2170	7,0	93	7009809.736	3535933.591	132.304	4530
7				x	300	HkVr	2137	2261	124,1	5,8	2170	7,0	98	7009799.264	3535936.006	132.332	4520
8				x	300	HkVr	2084	2199	114,8	5,5	2170	7,0	96	7009807.737	3535923.345	133.149	4520
9				x	300	HkVr	2127	2344	216,5	10,2	2170	7,0	98	7009824.602	3535927.083	132.764	4540
10				x	150	HkVr	2215	2302	86,6	3,9	2170	7,0	>100	7009730.911	3535892.956	138.557	4440
11				x	300	HkVr	2121	2234	113,2	5,3	2170	7,0	98	7009740.595	3535898.722	138.558	4450
12				x	150	HkVr	2053	2168	114,8	5,6	2170	7,0	95	7009747.071	3535891.488	138.472	4450
13				x	250	HkVr	2214	2332	117,9	5,3	2170	7,0	>100	7009746.984	3535883.056	138.338	4450
14				x	300	HkVr	2142	2262	119,5	5,6	2170	7,0	99	7009734.434	3535877.333	138.337	4440
15				x	300	HkVr	2087	2160	72,5	3,5	2170	7,0	96	7009730.583	3535884.877	138.416	4440
16				x	300	HkVr	2164	2284	119,5	5,5	2170	7,0	100	7009722.208	3535880.555	137.802	4430
17				x	250	HkVr	2185	2334	149,2	6,8	2170	7,0	>100	7009724.481	3535875.393	137.709	4430
18		x		x	200	Ms 0/32	2232	2269	36,5	1,6	2350	5,8	95	7009769.703	3535875.067	137.591	4470
19				x	150	Ms 0/32	2132	2170	37,5	1,8	2350	5,8	91	7009791.422	3535880.265	136.714	4490
20				x	300	Ms 0/32	2274	2329	55,3	2,4	2350	5,8	97	7009811.028	3535886.820	135.821	4510
21	25.6.2013			x	300	Ms 0/32	2247	2288	41,2	1,8	2350	5,8	96	7009830.302	3535895.860	135.592	4530
22				x	150	Ms 0/32	2194	2231	37,0	1,7	2350	5,8	93	7009850.402	3535906.385	136.388	4550
23				x	250	HkVr					2170	7,0	90	7009834.685	3535925.115	134.610	4550
24				x	300	HkVr	1965	2180	214,9	10,9	2170	7,0	91	7009681.656	3535854.465	137.209	4380
25				x	200	HkVr	2013	2195	182,1	9,0	2170	7,0	93	7009672.822	3535875.696	137.220	4380
26	26.6.2013			x	250	HkVr	1864	2002	138,0	7,4	2170	7,0	86	7009707.848	3535865.239	137.164	4410
27				x	300	HkVr	1951	2175	223,9	11,5	2170	7,0	90	7009699.418	3535870.697	137.644	4400
28				x	300	HkVr	1969	2170	200,9	10,2	2170	7,0	91	7009690.081	3535882.664	137.424	4400
29				x	300	HkVr	2064	2202	138,0	6,7	2170	7,0	95	7009678.497	3535859.767	137.283	4380
30				x	300	HkVr	2040	2203	162,6	8,0	2170	7,0	94	7009822.991	3535928.231	134.248	4540
31				x	250	HkVr	2009	2161	151,8	7,6	2170	7,0	93	7009831.041	3535936.316	134.240	4550
32				x	300	HkVr	1998	2191	193,2	9,7	2170	7,0	92	7009804.461	3535934.363	133.727	4520
33				x	300	HkVr	2070	2231	161,0	7,8	2170	7,0	95	7009803.513	3535945.762	134.332	4530
34				x	200	HkVr	2072	2232	159,5	7,7	2170	7,0	95	7009823.218	3535950.722	134.539	4550
35				x	300	HkVr	1985	2135	150,3	7,6	2170	7,0	91	7009850.295	3535947.452	136.385	4570
36				x	300	HkVr	2145	2305	159,5	7,4	2170	7,0	99	7009868.055	3535942.683	137.879	4580
37	27.6.2013			x	200	HkVr	2109	2285	176,4	8,4	2170	7,0	97	7009688.229	3535880.410	137.385	4390
38				x	300	HkVr	2079	2249	170,2	8,2	2170	7,0	96	7009697.782	3535868.962	137.819	4400
39				x	300	HkVr	1960	2152	191,7	9,8	2170	7,0	90	7009802.632	3535944.067	135.449	4520
40				x	300	HkVr	2042	2237	194,8	9,5	2170	7,0	94	7009795.423	3535939.737	135.228	4520
41				x	300	HkVr	2121	2282	161,1	7,6	2170	7,0	98	7009810.446	3535944.343	135.611	4530
42				x	300	HkVr	1822	2032	210,0	11,5	2170	7,0	84	7009823.770	3535947.384	136.092	4550
43				x	200	HkVr					2170	7,0	84	7009826.570	3535944.999	136.046	4550
44				x	300	HkVr	1904	2223	319,0	16,8	2170	7,0	88	7009825.172	3535941.477	136.061	4540
45				x	300	HkVr	1973	2194	220,8	11,2	2170	7,0	91	7009831.089	3535928.568	136.128	4550
46				x	300	HkVr	2008	2194	185,6	9,2	2170	7,0	93	7009833.288	3535920.292	136.114	4540
47				x	150	HkVr	2132	2290	158,0	7,4	2170	7,0	98	7009819.505	3535914.637	135.777	4530
48				x	300	HkVr	2094	2257	162,6	7,8	2170	7,0	96	7009809.209	3535919.510	135.532	4520
49				x	200	HkVr	2032	2218	185,6	9,1	2170	7,0	94	7009799.312	3535930.936	135.228	4520
50				x	300	HkVr	1918	2139	220,9	11,5	2170	7,0	88	7009811.897	3535931.866	135.373	4530
51				x	300	HkVr	2015	2247	231,6	11,5	2170	7,0	93	7009818.254	3535941.245	135.723	4540
52				x	300	HkVr	1928	2170	242,3	12,6	2170	7,0	89	7009827.193	3535942.314	136.177	4550
53				x	300	HkVr	1971	2216	245,4	12,5	2170	7,0	91	7009838.110	3535935.960	136.613	4550
54				x	300	HkVr	1864	2131	266,8	14,3	2170	7,0	86	7009839.402	3535934.958	136.671	4560
55				x	300	HkVr	2198	2431	232,5	10,6	2170	7,0	>100	7009846.882	3535924.849	136.908	4560
56	26.6.2013			x	250	HkVr	1860	2119	259,2	13,9	2170	7,0	86	7009856.791	3535931.123	137.474	4570
57				x	150	HkVr	1912	2131	219,3	11,5	2170	7,0	88	7009850.598	3535940.068	137.142	4570
58	28.6.2013			x	200	HkVr	2009	2226	216,9	10,8	2170	7,0	93	7009856.906	3535932.800	137.461	4570
59				x	300	HkVr	2131	2287	156,2	7,3	2170	7,0	98	7009847.936	3535937.407	136.952	4560
60				x	300	HkVr	2055	2272	216,9	10,6	2170	7,0	95	7009843.650	3535953.663	136.685	4570
61				x	300	HkVr	1965	2184	218,5	11,1	2170	7,0	91	7009819.196	3535945.725	135.824	4540
62				x	200	HkVr	2075	2239	163,9	7,9	2170	7,0	96	7009811.004	3535945.088	135.600	4530
63				x	300	HkVr	2236	2431	195,1	8,7	2170	7,0	>100	7009862.655	3535946.433	137.645	4580
64				x	150	HkVr	1944	2150	206,0	10,6	2170	7,0	90	7009876.904	3535945.398	138.123	4590
65				x	250	HkVr	2026	2253	226,8	11,2	2170	7,0	93	7009676.360	3535858.220	138.728	4370
66	4.7.2013			x	200	HkVr	2068	2279	211,2	10,2	2170	7,0	95	7009810.554	3535912.753	136.644	4520
67				x	250	HkVr	2041	2195	154,2	7,6	2170	7,0	94	7009824.328	3535919.030	136.882	4530
68				x	300	HkVr	2039	2204	165,0	8,1	2170	7,0	94	7009838.473	3535924.685	137.507	4550
69				x	200	HkVr	2045	2227	181,9	8,9	2170	7,0	94	7009854.311	3535930.689	137.688	4570
70				x	300	HkVr	2004	2248	243,6	12,2	2170	7,0	92	7009865.477	3535937.712	137.616	4580
71				x	250	HkVr	2053	2286	232,8	11,3	2170	7,0	95	7009860.724	3535947.991	137.538	4580
72				x	300	HkVr	2031	2233	202,0	9,9	2170	7,0	94	7009846.392	3535943.025	137.655	4570
73				x	300	HkVr	2103	2277	174,2	8,3	2170	7,0	97	7009832.837	3535938.183	137.366	4550
74				x	250	HkVr	2087	2264	177,3	8,5	2170	7,0	96	7009818.373	3535933.619	136.706	4540
75				x	300	HkVr	2121	2303	181,9	8,6	2170	7,0	98	7009806.315	353592		