



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TUOMAS MÄKITALO

MAA- JA BETONIPADON RAKENTEET, TOIMIVUUS JA SÄÄDÖKSET

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Tim Länsivaara
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
3. huhtikuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

MÄKITALO, TUOMAS: Maa- ja betonipadon rakenteet, toimivuus ja säädökset

Diplomityö, 135 sivua

Elokuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: Prof. Tim Länsivaara

Avainsanat: Maapato, betonipato, patolainsäädäntö, suotovirtaus, injektointi

Tässä opinnäytteessä tutkittiin maa- ja betonipatoja, niiden rakenteita ja kunnossapitoa sekä niitä koskevaa lainsäädäntöä ja muita säädöksiä. Lisäksi selvitettiin Nokian Tehdassaaren patojen historiaa ja nykytilannetta sekä korjausvaihtoehtoja Tehdassaaren eteläiselle padolle. Työn tarkoituksena on myös tuoda esiin suomalaisille patorakenteille tyypillisiä vaaratekijöitä ja padon tilan seurannan kannalta oleellisia seikkoja. Esimerkitapauksena patovuodon korjaamisesta käsitellään Melon voimalaitospatoa.

Uusi patoturvallisuuslaki (494/2009) astui voimaan 1.10.2009 ja se koskee sekä vesistöettä jäte- ja kaivospatoja. Valtioneuvoston asetus patoturvallisuudesta (319/2010) astui voimaan 5.5.2010 ja se tarkentaa patoturvallisuuslakia. Lain soveltamisala on laajempi kuin vanhassa laissa ja padolle asetettavat vaatimukset porrastetaan padosta aiheutuvan vahingonvaaran mukaan. Uusi patoturvallisuusopas julkaistiin 9.11.2012. Sen tarkoitus on täydentää ja selventää esimerkein ja selostuksin laissa ja asetuksessa esitettyä.

Patorakenteita voidaan jaotella esimerkiksi rakennusmateriaalin mukaan maa- ja betonipatoihin tai staattisen toiminnan mukaan gravitaatio- ja holvipatoihin. Maapatojen alatyyppejä ovat homogeeninen maapato, joka koostuu vain yhdestä materiaalista, sekä vyöhykemaapato, joka on rakennettu vedenläpäisevyydeltään erilaisista materiaaleista. Suotovirtauksen hallinta on maapadolla ensiarvoisen tärkeää, sillä se muodostaa hallitsemattomana sisäisen eroosion riskin ja uhan padon vakavuudelle. Muut oleellimmat vaaratekijät ovat ylivirtaus ja riittämätön stabiliteetti.

Betonipatojen käyttöikään vaikuttavien tekijöiden tunnistaminen on oleellista Suomen vanhojen betonipatojen kunnossapidon kannalta. Betonipatojen säilyvyyteen vaikuttavia tärkeimpiä seikkoja ympäristörasitusten lisäksi ovat esimerkiksi betonin pakkaskestävyys, vesi-sementtisuhte sekä raudoituksen betonipeite ja siten alttius korroosiolle. Patoturvallisuuslain mukaisesti luokitelluilla padoilla esiintyviä vaurioita ja niiden vakavuutta kartoitetaan jatkuvan tarkkailun lisäksi vuosi- ja määräaikaistarkastuksilla.

Melon voimalaitospadon maapato-osaa on korjattu mm. pontittamalla ja injektoimalla vuosina 2005, 2006 ja 2012. Patovuodon paikantaminen ja sen syyn selvittäminen monimutkaisella, useista rakenneosista koostuvalla vyöhykemaapadolla on haastavaa, mutta välttämätöntä korjaustoimenpiteiden kohdistamiseksi oikeaan paikkaan. Padolle asennetut, kattavat seurantajärjestelmät ovat tärkeässä asemassa, jotta korjaustoimenpiteiden onnistumista voidaan arvioida. Nokian Tehdassaaren eteläinen pato on myös korjauksen tarpeessa ja ensisijainen vaihtoehto on maapato-osan injektointi.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

MÄKITALO, TUOMAS: Earth and Concrete Dam Structures, Operability and Official Guidelines

Master of Science Thesis, 135 pages

August 2013

Major: Municipal Engineering

Examiner: Professor Tim Lämsivaara

Keywords: Earth dam, concrete dam, dam legislation, seepage, grouting

This thesis comprises earth and concrete dam structures, their maintenance and related legislation as well as other statutes. It also deals with the Factory Island dams in the city of Nokia by presenting their history and current status, as well as repair alternatives for the Southern Dam. Another purpose of the thesis is to present typical threats to Finnish dam structures and essential concerns related to dam monitoring. The Melo power station dam is presented as an example of a dam repair case.

The new Dam Safety Act (494/2009) entered into force on October 1st 2009 and it covers watercourse dams as well as waste dams and mine dams. The Government Decree on Dam Safety entered into force on May 5th 2010 and it specifies the Dam Safety Act. The scope of the act is more extensive compared to the old act. Dams are classified into three classes: 1, 2 and 3 based on the risk scale of the dam. The new Dam Safety Guide was published on November 11th 2012. Its purpose is to complement and clarify what is presented in the Act and Decree by examples and reviews.

Dams can be classified into categories by construction material and by functional principle. The most common construction materials are earth and concrete and dams can function as gravitational or arch dams. Earth dams can be further divided into homogeneous earth dams, which only consist of one material, and into zoned-earth dams, which consist of zones of dissimilar material. Seepage control is vital on an earth dam, as uncontrolled seepage can lead to internal erosion and therefore risk the stability of the entire dam. Other main concerns are overtopping and inadequate slope stability.

Identification of the factors affecting the service life of concrete dams is essential when it comes to maintaining the aging concrete dams in Finland. In addition to environmental stresses, the most important matters affecting the service life of concrete dams are frost resistance, water-cement ratio and concrete cover, which in large part determines the corrosion resistance of the structure. Dams classified according to the Dam Safety Act are under constant surveillance and are inspected regularly by annual and periodic inspections.

The earth dam section of the Melo power station dam has been repaired using sheet piling and grouting in 2005, 2006 and 2012. Locating a dam leak and identifying its cause on a complex zoned-earth dam is challenging, but necessary, in order to target the repair measures correctly. Extensive monitoring systems play a major role in determining the effect of repair measures. The southern portion of the Factory Island Dam in Nokia also needs repair. The primary method is grouting the earth dam section.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n geosuunnitteluyksikössä. Työn rahoittajat ovat Nokian kaupunki, Hämeen ELY-keskus ja A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Lisäksi Maa- ja vesitekniikan tuki ry on myöntänyt työlle apurahan. Työ on laajasta aihepiiristään johtuen venynyt vuoden mittaiseksi projektiksi, mutta vaativuutensa takia työn tekeminen on ollut myös hyvin palkitsevaa.

Työtä varten perustettiin ohjausryhmä, johon kuuluivat Juha Menonen Nokian kaupungilta, Mikko Sulkakoski ja Timo Maijala Hämeen ELY-keskuksesta, Mauri Kulman A-Insinöörit Suunnittelu Oy:stä sekä professori Tim Länsivaara Tampereen teknillisestä yliopistosta. Lisäksi työn edetessä ohjausryhmään liittyi patoasiantuntija Antti Leskelä. Ohjausryhmälle haluan lausua parhaat kiitokseni työn mahdollistamisesta sekä saamastani avusta ja tuesta. Lisäksi kiitän Teuvo Kasaria A-Insinöörit suunnittelu Oy:stä ja Mikko Niemistä Minisub Oy:stä heidän avustaan ja asiantuntemuksestaan koskien Nokian Tehdassaaren patoja. Kiitokset myös kaikille muille, joilta olen saanut apua työn puitteissa sekä A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n geosuunnitteluyksikölle hyvän työympäristön tarjoamisesta.

Tampereella
26.7.2013

Tuomas Mäkitalo

SISÄLLYS

Termit ja niiden määritelmät	VIII
1 Johdanto	1
1.1 Taustaa	1
1.2 Tutkimuksen tavoite	3
2 Patoja koskevat säädökset ja ohjeet	4
2.1 Patolainsäädäntö	4
2.1.1 Yleistä.....	4
2.1.2 Patojen luokittelu.....	4
2.1.3 Patoturvallisuuteen liittyvät asiakirjat	6
2.1.4 Padon suunnittelu	7
2.1.5 Muu patoihin liittyvä ohjeistus	8
2.2 Tilastotietoa patorakenteista.....	8
2.3 Patojen tarkkailu	9
3 Patorakenteet	11
3.1 Patojen jaottelu	11
3.2 Tekniset vaatimukset ja kuormitukset	12
3.3 Patojen yleiset suunnitteluperusteet	13
3.4 Patorakenteet Suomessa	14
4 Maapadot	17
4.1 Patotyytit ja rakenteet.....	17
4.1.1 Homogeeninen maapato.....	19
4.1.2 Vyöhykemaapato	21
4.2 Maapatoon liittyvät rakenteet.....	24
4.3 Suotovirtaus	25
4.4 Suotovirtauksen hallinta	27
4.5 Riskejä ja sortumismekanismeja.....	33
4.6 Ylivirtaus	35
4.7 Padon vakavuus	38
4.8 Toimivuuden varmistaminen	39
4.9 Tyypilliset vauriot.....	40
5 Betonipadot	42
5.1 Patotyytit ja rakenteet.....	42
5.1.1 Gravitaatiopato	45
5.1.2 Holvipato	49
5.1.3 Yhdistetyt maa- ja betonipadot	50
5.2 Betonipatojen käyttöikä	51

5.3	Käyttöikään vaikuttavat tekijät.....	51
5.3.1	Sementin ominaisuudet	52
5.3.2	Betonin pakkasenkestävyys	55
5.3.3	Betonin karbonatisoituminen	57
5.3.4	Halkeilu.....	58
5.3.5	Pintavauriot.....	60
5.3.6	Raudoituksen korroosio	61
5.3.7	Kemiallinen vaurioituminen.....	62
5.3.8	Vuodot ja suodot	64
5.4	Betonipadon korjausperiaatteita	64
5.4.1	Betonin paikkaaminen.....	64
5.4.2	Halkeamien korjaaminen	66
5.4.3	Betonin pinnoitus	67
5.5	Tarkastukset ja tarkkailu	68
5.5.1	Yleistä	68
5.5.2	Vuositarkastus ja määräaikaistarkastus.....	69
5.5.3	Betonipadon tarkastaminen	70
6	Patovuodon korjauskohde: Melon voimalaitospato	74
6.1	Kohteen yleiskuvaus	74
6.2	Padon rakenteet	75
6.3	Vuotohavainnot ja toimenpiteet syksyllä 2005.....	77
6.3.1	Ensimmäinen päivä.....	77
6.3.2	Tapahtumat 31.10.–1.11.2005	78
6.4	Patovuodon tutkimukset ja korjaukset.....	78
6.4.1	Tutkimusvaihe 1: kalliovuodon selvittäminen	79
6.4.2	Tutkimusvaihe 2: padon tiivisteiden kunnon selvittäminen.....	79
6.4.3	Korjausvaihe 1: tyhjätilojen täyttö ja tiivistyspontti	80
6.4.4	Tutkimusvaihe 3: vuodon etsiminen syvemmältä.....	82
6.4.5	Korjausvaihe 2: vuodon tukkiminen ohjurilaatan alla	84
6.4.6	Padon tiivistysinjektointi	88
6.4.7	Tyhjätilan tutkimukset padon pohjoisosalla.....	89
6.5	Padon tarkkailurakenteet	91
6.6	Jälkityöt	92
6.7	Havainnot korjauksen jälkeen	92
6.7.1	Suodattimissa olevat putket	92
6.7.2	Alatasanteen putket	93
6.8	Padon kuntoarvio korjausten jälkeen	94
6.8.1	Betonirakenteet.....	94
6.8.2	Moreenitiiviste.....	94
6.8.3	Suodattimet ja tukipenkereet.....	95

6.9	Jatkotoimenpiteet.....	96
6.10	Tilanne talvella 2012.....	96
6.11	Tutkimukset keväällä 2012.....	97
6.12	Tiivistysinjektointi kesällä 2012.....	99
7	Nokian Tehdassaaren padot	101
7.1	Kohteen historia.....	101
7.2	Padon rakentaminen ja nykytila	102
7.3	Kohteen maaperäkuvaus.....	104
7.4	Padon tarkkailuohjelma	107
7.5	Padossa esiintyneet vauriot ja toimivuuden kannalta oleelliset tekijät	108
7.5.1	Vakavuus.....	110
7.5.2	Suotovirtaus ja vuodot	112
7.5.3	Betonirakenteiden kunto	113
7.6	Padon luokitus ja sen perusteet	116
7.7	Padon korjaussuunnitelma	117
7.7.1	Vaihtoehto 1, injektointi.....	117
7.7.2	Vaihtoehto 2, suihkuinjektointi	119
7.7.3	Vaihtoehto 3, porapaaluseinä.....	123
8	Yhteenveto.....	127
8.1	Patojen kunnossapito Suomessa	127
8.2	Melon voimalaitospato	127
8.3	Nokian tehdassaaren padot	128
	Lähteet.....	130

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Kuivavara	Padon kuivavara on padotetun aineen ylimmän tarkoitetun korkeustason ja padon harjan välinen korkeusero.
Turvavara	Padon turvavara on padon tiivistysosan yläpinnan ja HW-tason välinen korkeusero.
Ylivesi, HW	Patokohtainen, lupapäätöksen mukainen ylin sallittu padon yläpuolinen vedenkorkeus, tai ellei tätä ole määrätty, suunniteltu ylin vedenkorkeus padon käyttöaikana
Hätäylivesi, hätä-HW	Hätäylivesi on ylivedenkorkeus, jonka ylittäminen voi aiheuttaa muutoksia patorakenteissa.
Mitoitustulva	Mitoitustulva on padon luokittelun perusteella määräytyvää toistumisaikaa vastaava tulovirtaamahydrografi eli tulovirtaaman aikakäyrä.
Padon korkeus	Padon korkeus lasketaan padon ulkopuolisen maanpinnan ja padotetun aineen ylimmän tarkoitetun yläpinnan välisenä korkeuserona. Tulvapenkereen ja pohjapadon korkeus lasketaan tästä poiketen patorakennelman ulkorajan alimman kohdan ja padon harjan välisenä korkeuserona.
Suotovirtaus	Maa-ainesrakeiden välisen huokostilan kautta tapahtuva, veden tai muun nesteiden paine-erosta johtuva virtaus.

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

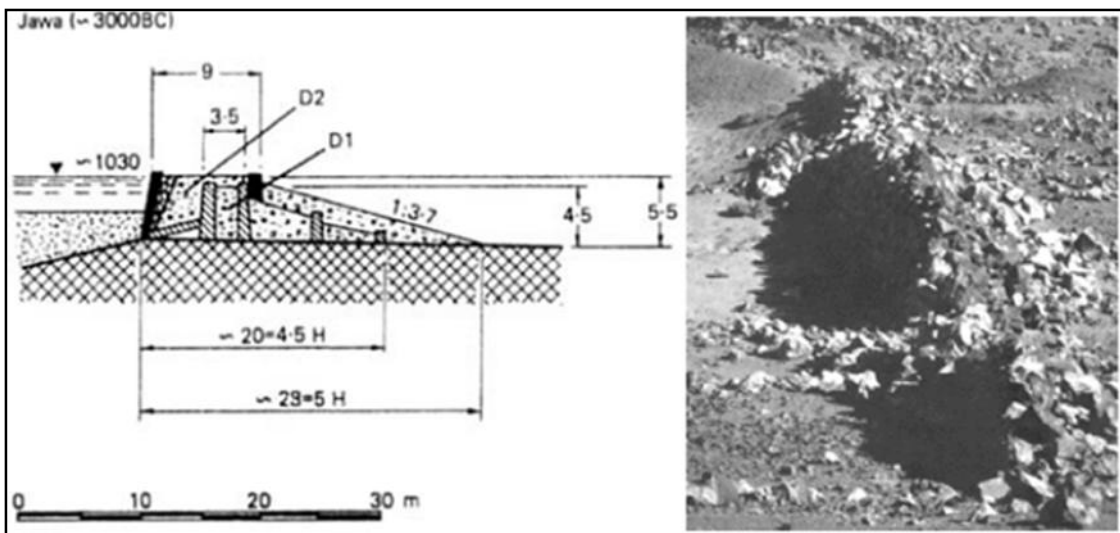
Pato on seinä- tai vallimainen rakenne, jolla rajoitetaan nesteen tai nestemäisesti käytettyvän aineen luonnollista juoksua tai estetään se kokonaan. [3] Padon rakentamisen tarkoitus voi olla veden varastointi tai vesistön vedenkorkeuksien ja virtaamien säännösteleminen esimerkiksi vedenhankintaa, vesivoimaa, vesiliikennettä tai kastelua varten, mutta usein pato palvelee samanaikaisesti useaa tarkoitusta. Patoja ja patomaisia rakenteita käytetään myös tulvasuojelussa haluttaessa estää vesistön nousu alaville rannoille. Padoilla on roolinsa myös kaivos- ja teollisuustoiminnassa, jossa niitä käytetään esimerkiksi jätepatoina estämään teollisuusjätteiden leviäminen ympäristöön. [1, 10]

Ensimmäiset historian tuntemat padot rakennettiin ohjaamaan vettä maatalouskäyttöön ja suojaamaan alavia jokirantoja. [1, 2] Vanhimmissa padoista löytyy merkkejä jopa ajalta, jonne historian tuntemuksemme ei yllä, ja ne sijaitsivat Lähi-idän sivistyskansojen alueilla. Maailman vanhimpana, kohtuullisen luotettavasti dokumentoituna patona pidetään maamateriaalista ja kivimuurauksesta tekoallaspadoksi rakennettua Jawan patoa Jordaniassa, jonka iäksi on arvioitu noin 5 000 vuotta. Padossa oli vettä vasten oleva tiivistysosa ja sen takana taustatäyttö. Tiivistysosan edessä oli lähes vaakasuora tiivistepatja, jonka tarkoitus oli pidentää veden suotomatkaa. Padon korotuksen yhteydessä siihen tehtiin myös kivisuodatin suojaksi nopeasta vedenlaskusta aiheutuvaa huokosvedenpaine-eroa vastaan. Padon ikä huomioon ottaen se oli hyvin monimutkainen rakennelma. [13]

Varhaisia patoja rakennettiin myös Egyptissä, Kiinassa ja Intiassa [1]. Varhaiset padot olivat gravitaatiopatoja ja niissä ylä- ja alavirranpuoleiset pinnat olivat kaltevia ja padon pohjan leveys moninkertainen verrattuna padon korkeuteen [9]. Rakennustekniikka ei ollut kovin kehittynyttä, mutta silti rakennettiin yli kymmenen metriä korkeita patoja, jolloin myös sortumia sattui usein. Padonrakennustaito kehittyikin lähinnä yrityksen ja erehdyksen kautta. [13] Roomalaiset veivät padonrakennuksen uuteen mitataakseen ja rakensivat suuria tekoallaspatoja, joilla voitiin turvata asutuksen veden saanti kuivan kauden yli. Tämän mahdollistivat roomalaisten kehittämä vedenpitävä laasti sekä alkeellinen sementti, jonka sideaineena käytettiin kalkkia ja tuliperäistä

hiekkaa. [4] Ainakin kaksi roomalaisten rakentamaa patoa on yhä käytössä Espanjassa, noin 1900 vuotta niiden rakentamisen jälkeen. [13]

Ensimmäinen holvipato rakennettiin todistettavasti 500-luvulla Turkin ja Syyrian rajalle ja sitä käytettiin tulvasuojeluun ja vesihuoltoon. [9] Ensimmäinen varsinainen betonipato on vuosina 1887–1888 rakennettu San Mateon pato Kaliforniassa. Ensimmäiset teoriat ja laskentamenetelmät patojen vakavuuden ja lujuuden määrittämiseksi kehitettiin Ranskassa 1800-luvun puolivälissä, jolloin nykyisen padonrakennustaidon voidaan katsoa syntyneen. [1] Nosteen vaikutus padon suunnitteluun alettiin ottaa huomioon vuoden 1882 jälkeen, kun 41-metriseen patoon sijoitettiin kivilasaojat. [9] Modernin padonrakennuksen voidaan katsoa alkaneen 1900-luvun alkupuolella, kun maamekaniikan, pohjatutkimusmenetelmien ja rakentamisaikaisen laadunvalvonnan kehitys muutti padonrakennuksen empiirisestä tieteestä analyttiseksi. [15]



Kuva 1. Jawan maapato Jordaniassa ja sen jäännökset. [13]

Padoilla hallittavien suurten vesimassojen takia patorakenteiden sortumisella on lähes aina katastrofaaliset seuraukset lähialueen asutukselle ja ympäristölle, joten patorakenteiden suunnitteluun ja ylläpitoon tulee kiinnittää erityistä huomiota. Patoihin suunnitellaankin nykyään lähes poikkeuksetta järjestelmiä uhkaavien tilanteiden varalle, kuten tulvaluukkuja estämään ylivirtaus vedenpinnan noustessa liian korkealle. Reaaliaikaisilla seurantamittauksilla ja suotovesimäärien seurannalla tarkkaillaan padon tilaa, jotta tarvittaessa voidaan ryhtyä toimenpiteisiin. Vakavia patovaurioita sattuu erittäin harvoin, mutta ilman asianmukaisia toimenpiteitä mahdollisesti vaaralliseksi kehittyviä häiriötilanteita sattuu Suomessakin joka vuosi. Padon, sen perustuksen ja patoaltaan asianmukaisesta ja turvallisesta rakentamisesta ja niiden käyttöön aikaisesta tarkkailusta muodostuu suuri vastuu, joten patojen rakentamisesta ja käytön aikaisesta tarkkailusta säädetään lailla. [7]

Fossiilisten polttoaineiden ja niillä tuotetun energian kallistuminen johtaa rakennuskelpoisen vesivoiman yhä tarkempaan hyödyntämiseen. Nykyään rakentamisessa valalla olevat arvot, ympäristöystävällisyys ja uusiutuvuus, lisäävät entisestään vesivoiman houkuttelevuutta ja kilpailukykyä energiantuotantomenetelmänä. Varsinkin tiheään asutetuilla, teollistuneilla alueilla parhaat patopaikat ovat jo käytössä, jolloin tarpeen vaatiessa joudutaan rakentamaan geologisesti tai muulla tavalla epäedullisemmille paikoille. Tällöin tarvitaan entistä tarkempia tutkimuksia ja tutkimusmenetelmiä rakennushankkeen onnistumiseksi ja turvallisuuden varmistamiseksi. Kehittynyt padonrakennustaito mahdollistaa haasteellisempien patopaikkojen hyödyntämisen, mutta se ei ole taatua turvallisuudesta, kuten monet modernina padonrakennusaikakautena sattuneet pato-onnettomuudet osoittavat. [1, 2, 42]

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tässä opinnäytteessä käsitellään Suomessa olevien patojen rakenteita, patojen toimivuutta sekä toimivuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimus rajataan vesistöpatoihin ja niiden osalta maa- ja betonipatoihin sekä näiden yhdistelmiin. Työssä tutustutaan patoja uhkaaviin vaaratekijöihin ja siihen, miten pato voidaan suunnitella ja sen kunnossapito toteuttaa turvallisesti. Lisäksi arvioidaan erilaisten vauriotyyppien vaikutusta padon kestävyYTEEN ja elinkaareen ja sitä kautta turvallisuuteen. Korjausmenetelmiä ja korjaustoimenpiteisiin liittyviä riskejä ja onnistumisia kartoitetaan esimerkkikohteiden kautta. Patoja koskevat lait, asetukset ja ohjeet esitellään katsauksen muodossa.

Tutkimuksen tavoitteena on myös palvella Nokian kaupunkia Tehdassaaren padon tilan ja historian selvittämiseksi. Kyseessä on vuotava pato, jonka nykytila ja padolla aiemmin sattuneet häiriötilanteet selvitetään mahdollisimman tarkasti kokonaiskuvan kartoittamiseksi. Tavoitteena on luoda mahdollisimman hyvät edellytykset kohteeseen laadittavalle korjaussuunnitelmalle.

Tutkimusta aiheesta tarvitaan kansallisen patoturvallisuuden kannalta, sillä työn tarkoituksena on tuoda yksityiskohtaisesti esille suomalaisille patorakenteille tyypillisiä vaaratekijöitä ja padon tilan seurannan kannalta oleellisia seikkoja. Myös alalla vallitsevien käytäntöjen yhtenäistäminen ja patorakenteiden suunnitteluvaatimusten sekä korjausmenetelmien esitleminen suunnittelijan näkökulmasta edesauttavat patoturvallisuutta.

2 PATOJA KOSKEVAT SÄÄDÖKSET JA OHJEET

2.1 Patolainsäädäntö

2.1.1 Yleistä

Suomessa patoturvallisuuden kehittäminen alkoi 1970-luvulla ja ensimmäinen patoturvallisuuslaki ja -asetus astuivat voimaan vuonna 1984. Nykyään patoihin sovelletaan uudistettua patoturvallisuuslakia (494/2009), joka on tullut voimaan 1.10.2009. Lain 4 §:n mukaan padolla tarkoitetaan seinämäistä tai vallimaista rakennetta, jonka tarkoituksena on pysyvästi tai tilapäisesti estää rakenteen takana olevan nesteen tai neste-mäisesti käyttäytyvän aineen leviäminen taikka säädellä padotetun aineen pinnan korkeutta. Laki koskee siis kaikkia patoja niihin kuuluvine rakennelmineen ja laitteineen riippumatta siitä, mistä aineesta tai millä tavalla pato on rakennettu tai mitä ainetta sillä padotetaan. [5, 7]

Lain mukaan vesistöpadolla tarkoitetaan vesistössä olevaa patoa, jätepadolla patoa, jolla padotetaan terveydelle tai ympäristölle haitallisia tai vaarallisia aineita ja tulva-penkereellä rakennetta, jonka tarkoituksena on estää veden leviäminen vesistön tai meren tavanomaista korkeamman vedenkorkeuden aikana. Laki koskee samalla myös kaivospatoja eli kaivostoimintaan liittyviä maanpäällisiä patoja, jotka ovat lähes poikkeuksetta jätepatoja. Vesistöpatoihin sovelletaan patoturvallisuuslain lisäksi vesilakia ja jätepatoihin ympäristönsuojelulakia. Valtioneuvoston asetus patoturvallisuudesta (319/2010) astui voimaan 5.5.2010 ja se tarkentaa patoturvallisuuslakia. [5, 6]

Lainsäädännön uudistuksella patoturvallisuuden sääntely on saatettu vastaamaan hyviksi havaittuja ja toimivia käytäntöjä, jotka ovat kehittyneet osin ilman lainsäädännön tukea. Lakiin ei sisälly lupamenettelyä, vaan padon rakentamisen luvanvaraisuus perustuu edelleenkin muihin lakeihin, lähinnä vesilakiin, ympäristönsuojelulakiin ja maankäyttö- ja rakennuslakiin. Patoturvallisuuslaki täydentää niitä lupamenettelyssä huomioon otettavilla patoturvallisuusnäkökohdilla. [6]

2.1.2 Patojen luokittelu

Lain soveltamisala on laajempi kuin vanhassa laissa. Aiemmassa laissa käytetystä kolmen metrin alarajasta padon korkeudelle on luovuttu ja padolle asetettavat vaatimukset porrastetaan padosta aiheutuvan vahingonvaaran mukaan luokittelemalla padot

kolmeen luokkaan. Luokitus perustuu siihen, miten suuren vaaran pato sortuessaan aiheuttaa. Padon luokittelussa huomioidaan sortumatapauksessa syntyvästä tulva-aallosta padon alapuolelle aiheutuva vahingonvaara sekä vedenpinnan äkillisestä alenemisesta padon yläpuolelle aiheutuva vaara. Jätepatojen osalta vaara voi aiheutua tulva-aallon lisäksi myös purkautuvan jätemateriaalin ominaisuuksien vuoksi. Aiemmin käytössä olleet luokat P, N ja O on korvattu vastaavasti luokilla 1, 2 ja 3, jotka määritellään seuraavasti:

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

Luokitusta ei kuitenkaan tarvitse tehdä, mikäli padosta ei patoturvallisuusviranomaisen mielestä aiheudu vaaraa. Patoturvallisuuslaissa tarkoitettujen patojen luokittelu koskee vesistöpatojen lisäksi myös jäte- ja kaivospatoja sekä tulvapenkereitä. Luokittelu koskee myös lain tarkoittamia tilapäisiä patoja kuten työpatoja [5, 6]

Patoturvallisuuslain mukaisen 1-luokan padon luokittelussa mainitun vaaran ihmishengelle ja terveydelle voidaan katsoa olevan kyseessä esimerkiksi silloin, kun padon alapuolella on pysyvää tai vapaa-ajan asutusta siten, että padon sortumasta syntyvä tulva-aalto voi tuhota yhdenkin tällaisen rakennuksen. Lain määritelmä tarkoittaa siis yhdenkin ihmishengen menetystä tai vakavaa loukkaantumista, minkä vaara voi aiheutua myös julkisissa rakennuksissa. Jätepatojen osalta kyseinen vaara saattaa syntyä myös jätemateriaalin ominaisuuksien takia. Ympäristölle aiheutuvan vaaran vuoksi 1-luokkaan luokiteltu pato saattaa sortuessaan aiheuttaa merkittävien luontoarvojen menetyksen, kuten suojelualueen tai vedenhankinnan kannalta oleellisen alueen tuhoutumisen tai pilaantumisen. Pato voidaan luokitella 1-luokan padoksi myös silloin, jos omaisuusvahingot onnettomuustilanteessa ovat merkittäviä. Tällöin ne voivat kohdistua esimerkiksi rakennuksiin, sähkön- tai vedenjakeluun, tuotantolaitoksiin, liikenneverkkoihin tai muihin yhteiskunnan kannalta tärkeisiin kohteisiin. [6]

Patoturvallisuuslain mukainen 2-Luokan pato voi aiheuttaa vaaraa terveydelle, muttei ihmishengen menetystä. Ympäristölle ja omaisuudelle se saattaa aiheuttaa vähäistä suurempaa vaaraa ja vahinkoja myös asuinrakennuksille, mutta veden nousukorkeus ja virtausnopeus eivät saa olla sellaisia, että ihmisen olisi mahdollista huuhtoutua tulva-aallon mukana. Luokan 2 jäte- ja kaivospadot saattavat onnettomuustilanteessa aiheuttaa esimerkiksi kalastusalueena käytetyn vesistön, viljelysalueiden tai talousvesikaivojen vähäistä suurempaa pilaantumista tai huononemista. Luokan 3 padosta ei onnettomuustilanteessa mitään ilmeisimmin voi aiheutua vaaraa ihmishengelle tai terveydelle tai vähäistä haittaa lukuun ottamatta ympäristölle tai padon alapuolella ole-

valle omaisuudelle. Pohjavesiesiintymien pilaantumisvaaraa ei saa aiheutua, sen sijaan lievät vahingot viljelyksille ovat mahdollisia. [6]

Pato voidaan jättää myös patoturvallisuusviranomaisen toimesta luokittelematta. Yleensä 3-luokan padon ja luokittelemattoman padon välinen raja kulkee kolmen metrin korkeudessa, millä tarkoitetaan padotetun aineen ylimmän pinnan ja padon ulkopuolisen maanpinnan välistä korkeuseroa. Katsoessaan tarpeelliseksi, patoturvallisuusviranomaisen voi kuitenkin päättää myös tätä matalampien patojen luokittelusta, mikäli padosta aiheutuu ainakin vähäistä vaaraa. Toisaalta myös tätä korkeampi pato voidaan jättää luokittelematta, mikäli siitä ei aiheudu vaaraa. [6]

2.1.3 Patoturvallisuuteen liittyvät asiakirjat

Padon omistaja on käytännössä henkilö tai taho, joka on ilmoitettu patoturvallisuusviranomaiselle padosta vastaavaksi. Padon omistaja vastaa mahdollisista patonnettomuuksista aiheutuvista vahingoista siten kuin vahingonkorvauslaissa (412/1974), vesilaissa (587/2011) ja laissa ympäristövahinkojen korvaamisesta (737/1994) säädetään. Vaikka patoturvallisuusviranomaisella on oikeus valvoa padon turvallisuutta, ei se poista tai vähennä padon omistajan vastuita, joita ovat lisäksi velvollisuus patonnettomuuksien ehkäisyyn ja onnettomuudesta aiheutuvien vahinkojen rajoittamiseen sekä ilmoitusvelvollisuus patoa koskevista hätäilmoituksista patoturvallisuusviranomaiselle. Myös muista patoturvallisuuden kannalta poikkeuksellisista tilanteista tulee viipymättä ilmoittaa ja antaa samalla tarpeelliset selvitykset patoturvallisuuden valvonnan kannalta. Padon omistajalla on velvollisuus selvittää patoan koskevat säännökset ja määräykset ja oma-aloitteisesti huolehtia niiden noudattamisesta. [6]

Patoturvallisuuslain mukaisen 1-luokan padon omistajan on laadittava vahingonvaaraselvitys ihmisille ja omaisuudelle sekä ympäristölle aiheutuvasta vahingonvaarasta, mutta patoturvallisuusviranomaisen päätöksellä se voidaan laatia myös muusta kuin 1-luokan padosta, jos se on tarpeen padon luokittelua tai luokan muuttamistarpeen arviointia varten. Padon omistajan tulee laatia padon turvallisuussuunnitelma toimenpiteistä 1-luokan padon onnettomuus- ja häiriötilanteissa. Turvallisuussuunnitelmassa on kyse padon omistajan omatoimisesta varautumisesta vaaratilanteisiin. Pelastustoimen suunnitelmien laadinta patonnettomuuksien varalle sekä pelastustoiminta onnettomuustilanteissa kuuluvat pelastusviranomaiselle pelastuslain (379/2011) mukaisesti. [5, 6]

Padon omistajan tulee toimittaa patoturvallisuusviranomaiselle omat yhteystietonsa ja padon käyttöhenkilöstön yhteystiedot sekä patoa koskevat asetukset säädetty tekni-

set tiedot. Patoturvallisuusviranomaisen tallentaa tiedot Suomen ympäristökeskuksen patoturvallisuuslain valvontaa varten ylläpitämään tietojärjestelmään. Järjestelmä sisältää tiedot luokitelluista padoista sekä padoista, jotka on päätöksellä jätetty luokittelun ulkopuolelle. Padon omistajalle annetaan oikeudet päästä lukemaan oman patonsa tietoja ja näin varmistumaan niiden ajantasaisuudesta. [6, 31]

Patoturvallisuusviranomaisen ja padon omistajan tulee säilyttää kustakin padosta ajantasaiset tulosteet tietojärjestelmästä sekä muut padon turvallisuuden kannalta tärkeät asiakirjat siten, että ne ovat mahdollisissa häiriötilanteissa nopeasti saatavilla. Nämä tulosteet ja asiakirjan muodostavat patoturvallisuuskansion. Kansion tarkka sisältö vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta suuren osan siitä muodostavat tulosteet patoturvallisuuden tietojärjestelmästä. Lisäksi sen tulee sisältää padon toteutuma-asiakirjat turvallisuuden arvioimista, korjauksia ja kunnossapitoa varten. Padon omistuksen vaihtuessa on padon omistuksesta luopuvan toimitettava patoturvallisuuskansio uudelle omistajalle ja ilmoitettava omistajan vaihtumisesta patoturvallisuusviranomaiselle. [5, 6, 31]

Patoturvallisuusasiakirjat ovat viranomaisten asiakirjoina lähtökohtaisesti julkisia, kuten *laki viranomaisten toiminnan julkisuudesta* toteaa pykälässä 1. Kyseisen laki käsittelee salassa pidettäviä viranomaisten asiakirjoja pykälässä 24, ja patoturvallisuutta koskien kysymykseen saattavat tulla 24 §:n kohdat 7 ja 8, joiden mukaan *rakennelman turvajärjestelyjä koskevat asiakirjat sekä onnettomuuksiin ja poikkeusoloihin varautumisesta koskevat asiakirjat* tai osa niistä voidaan katsoa joissain tapauksissa salassa pidettäviksi. [31]

2.1.4 Padon suunnittelu

Patoturvallisuuslain 6. §:n mukaan padon suunnittelijalla on oltava riittävä asiantuntemus patoturvallisuusasioissa ja patoturvallisuusasetuksen 1. §:n mukaan tämän lisäksi soveltuva koulutus ja kokemus vastaavien rakenteiden suunnittelusta. Myös tarkkailuohjelman laatijalla olisi suositeltavaa olla samantasoinen pätevyys kuin padon suunnittelijalla. PTL 6. §:n mukaan myös padon käytöstä, tarkkailusta ja tarkastuksista vastaavalla henkilöllä on oltava riittävä asiantuntemus patoturvallisuusasioissa. PTA 1. §:n mukaan padon käyttöhenkilökunnalla tulee olla riittävä perehtyneisyys padon turvallisuuden vaikuttaviin olosuhteisiin ja padon käyttöön sekä turvajärjestelmiin. [6]

Padon luokka tulee selvittää jo suunnitteluvaiheessa, sillä luokitus vaikuttaa siltä vaadittaviin ominaisuuksiin. Luokka tarkistetaan ennen käyttöönottoa käyttöönottotarkastuksessa, mutta mikäli se katsotaan tarpeelliseksi, esimerkiksi olosuhteissa tapahtuneiden muutosten takia, voidaan luokka tarkistaa myöhemminkin. Padon omistajan on

hyödyllistä olla yhteydessä patoturvallisuusviranomaiseen jo suunnittelun alkuvaiheissa, jolloin varmistetaan patoturvallisuusvaatimusten asianmukainen huomioon ottaminen. Padon rakenteellisen varmuuden ja käyttövarmuuden on oltava sellaisella tasolla, ettei siitä aiheudu vaaraa turvallisuudelle. Padon rakentamisen jälkeinen varmuus määräytyy suunnittelussa ja toteutuksessa käytettyjen ratkaisujen ja mitoituksen perusteella. Oleellinen tekijä on myös rakennusaikainen valvonta ja hyvin laaditut toteuma-asiakirjat. Ratkaisevaksi nousee usein myöhempi varmuus, johon vaikuttavat lisäksi ajan myötä padossa ja sen käyttöolosuhteissa tapahtuneet muutokset sekä tehdyt korjaus- ja kunnossapitotoimenpiteet. Padon omistajan velvollisuutena on suunnitella ja rakentaa pato siten, ettei sen käyttämisestä aiheudu vaaraa turvallisuudelle. Tämä velvollisuus koskee myös padon korjaus- ja muutostöitä. [6]

Patoturvallisuuslain lisäksi vesistöpatoja koskee vesilaki (587/2011) ja valtioneuvoston asetus vesitalousasioista (1560/2011). Vesilaissa otetaan kantaa vesilupahakemuksen laatijan pätevyyteen, ja lain mukaan laatijalla tulee hankkeen laatu, laajuus ja vaikutukset huomioon ottaen olla riittävä asiantuntemus hakemuksen laatimiseksi. [52]

2.1.5 Muu patoihin liittyvä ohjeistus

Uusi patoturvallisuusopas oli koekäytössä vuoden 2011 loppuun asti, minkä jälkeen se viimeisteltiin ja julkaistiin 9.11.2012. Patoturvallisuusopas korvaa patoturvallisuusohjeet (MMM:n julkaisuja 7/1997), jotka poistuivat käytöstä 1.10.2009. Patoturvallisuusoppaassa esitetty ei ole padon omistajaa sitovaa, vaan oppaan tarkoitus on täydentää ja selventää esimerkein ja selostuksin laissa ja asetuksessa esitettyä. Vain laista ja asetuksista tulevat vaatimukset ja velvollisuudet ovat padon omistajaa oikeudellisesti sitovia. Tarkemmin patoturvallisuusoppaan sisältöä on käsitelty kappaleessa 3.3. [6]

Patoturvallisuuslain mukaisen toiminnan yleinen ohjaus, seuranta ja kehittäminen kuuluvat maa- ja metsätalousministeriölle. Laissa tarkoitettuna patoturvallisuusviranomaisena toimii patoturvallisuusasioissa toimivaltainen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus). Maa- ja metsätalousministeriö voi määrätä ELY-keskuksen toimimaan patoturvallisuusviranomaisena toisen ELY-keskuksen alueella.

2.2 Tilastotietoa patorakenteista

Patojen tarkkaa lukumäärää maailmassa ei ole selvitettävissä tilastojen perusteella. Kansainvälisen suurpatojärjestön (ICOLD) rekisteristä löytyy noin 15 000 yli 15 metriä korkeaa patoa tai patokokonaisuutta. Joidenkin lähteiden mukaan pelkästään Kiinassa on noin 85 000 vesiallasta, jotka on pääosin muodostettu maapatojen avulla. Täten

pienetkin penkereet mukaan lukien maailman patojen määrä on suuruusluokkaa 500 000. Maapatojen osuus kaikista maailman padoista on arviolta 85–90 %. [3, 10]

Suomenkaan patojen määrä ei ole tarkasti tiedossa. Patoturvallisuuslain mukaisen tarkkailun piirissä on noin 500 patoa, mutta virallisen luetteloinnin ulkopuoliset padot ja tulvapenkereet mukaan lukien yhteismäärä nousee tuhansiin. [3, 10]

2.3 Patojen tarkkailu

Padon omistajan tulee laatia luokitellulle padolle tarkkailuohjelma, mikäli patoa ei tarkkailla muun lain mukaisesti patoturvallisuusviranomaisen hyväksymällä tavalla. Tarkkailun tulee koskea patoturvallisuuteen vaikuttavia seikkoja padon käyttöönoton ja käytön aikana. Padon omistajan on tarkastettava 1- ja 2-luokan padon kunto ja turvallisuus vähintään kerran vuodessa (vuositarkastus) ja järjestettävä viiden vuoden välein tai tarvittaessa useamminkin 1-, 2- ja 3-luokan padoilla määräaikaistarkastus, johon patoturvallisuusviranomaisella ja pelastusviranomaisella on oikeus osallistua. Määräaikaistarkastuksessa selvitetään padon kunnan muutokset ja sen turvallisuuteen vaikuttavat seikat huomioiden muutokset maankäytössä ja sää- ja vesioloissa. Mikäli määräaikaistarkastuksessa ei saada riittävää varmistusta sille, että pato täyttää sille asetetut turvallisuusvaatimukset, on padon omistajan tehtävä perusteellinen selvitys padon tai sen osan kunnosta. Tätä selvitystä kutsutaan kuntoarvioksi. [5, 6, 32]

Näistä vuosi- ja määräaikaistarkastuksista sekä jatkuvasta tarkkailusta muodostuu padon tarkkailuohjelma. Ohjelma on laadittava sellaiseksi, että kaikki patoturvallisuuteen vaikuttavat seikat tulevat tarkkailun ja tarkastusten kohteeksi. Tarkkailuohjelmasta tulee yksiselitteisesti käydä ilmi tarkkailtavat kohteet ja tarkkailulaitteiden sijainti- ja asennustiedot. Jatkovaa tarkkailua tehdään vuosi- ja määräaikaistarkastusten välillä ja niiden aikavälit määritetään siten, että mahdolliset ongelmat havaitaan riittävän ajoissa. Padon käyttöönoton yhteydessä tarkkailuväli on tiheämpi ja tilanteen vakiinnuttua siirrytään harkinnan perusteella harvempiin tarkkailukertoihin. Yleensä betonirakenteilla tarkkailukäynnit voivat tapahtua harvemmin kuin maapadoilla. Tarkkailutiheys on riippuvainen padon tyypistä ja käyttötavasta. [6]

Suomessa on ollut vain muutamia padon sortumistapauksia, mutta häiriötilanteita tapahtuu säännöllisesti ja ilman tarkoituksenmukaista tilanteen hoitamista ne saattaisivat mahdollisesti johtaa vakaviin patovaurioihin. Uuden, vuonna 2009 voimaan astuneen patoturvallisuuslain mukaan padolla sattuneesta turvallisuuden kannalta poikkeuksellisesta tilanteesta tehdään ilmoitus patoturvallisuusviranomaiselle ja ilmoitukset tallennetaan viranomaisen tietojärjestelmään. Tällä tavoin tarkoituksena on palvella patoturvallisuuden ylläpitoa ja muodostaa tietopankki, jota voidaan hyödyntää tulevai-

suuden häiriötilanteissa sekä oppia uutta analysoimalla häiriötilanteista koottuja tieto-
ja. [7, 33]

3 PATORAKENTEET

3.1 Patojen jaottelu

Jokaisella padolla on yksilöllisiä ominaisuuksia, jotka erottavat sen muista. Tästä syystä patojen jaottelukaan ei ole kovin yksinkertaista ja se voidaan tehdä monella tavalla. Monessa padossa on piirteitä useammasta tyypistä ja rakenneratkaisusta. Taulukossa 1 on esitetty joitakin jaottelutapoja.

Taulukko 1. Patojen jaottelutapoja. [1]

JAOTTELUTAPA	LUOKAT	KUVAUS
Staatillisen toiminnan mukaan	Gravitaatiopato	Padon oma paino joko yksinään tai yhdessä vedenpaineen alaspäin suuntautuvan komponentin kanssa johtaa vaakasuoran vedenpaineen perustuksille.
	Holvipato	Pääosa vedenpaineesta johdetaan vaakasuoran holvin välityksellä sivuilla oleviin kallioihin tai tukiin.
ICOLD:n (International Commission on Large Dams) jaottelu	Maapato	Tiivistetystä maasta tehty homogeeninen tai vyöhykkeellinen pato, jonka tilavuudesta vähintään 50 % on maata.
	Louhepato	Padon rungon materiaalina on louhe tai luonnonkivi, jota on vähintään 50 % padon tilavuudesta.
	Massiivipato	Massiivinen betonista tai kivistä tehty pato, jonka vakavuus perustuu pääasiassa padon massa.
	Ripapato	Pato muodostuu virran suuntaisista tukiseinistä ja niiden ylävedenpuoleiseen päähän eri tavoin aikaansaadusta, tiivistä seinämästä.
	Holvipato	Yläveteen päin kaareva pato, joka siirtää suurimman osan kuormituksesta seinämiin tai tukiin padon päissä. Paksuus pohjalla on yleensä pienempi kuin 60 % padon korkeudesta.
	Moniholvipato	Vierekkäisistä holveista muodostettu pato, jossa holvien kannat yhtyvät pystysuoriksi seinämiksi siirtäen kuormitukset perustuksille.

Huomionarvoista yllä olevassa taulukossa on se, että ICOLD:n jaottelu ottaa kantaa padon rakennusmateriaaliin. Yleistykseenä voidaan sanoa, että maa- ja louhepadot ovat

gravitaatiopatoja ja betonipadot voivat olla sekä gravitaatio- että holvipatoja. Suomen maasto tosin ei tarjoa mahdollisuuksia holvipatojen rakentamiseen. Pysyviksi tarkoitettuissa patorakenteissa käytetään nykyään rakennusaineena lähes poikkeuksetta betonia tai maata ja louhetta, kun taas työnaikaisissa patorakenteissa yleisimpiä materiaali- vaihtoehtoja ovat puu, maa ja louhe sekä teräspontti. [1]

Geologisilla olosuhteilla on huomattavan suuri vaikutus sekä patopaikan ominaisuuksiin että sitä kautta valittavaan patotyyppiin. Kapeat rotkolaaksot ovat ominaisia paikkoja betonipadoille, kun taas laakeampi maasto tarjoaa edellytykset maapadolle. Molempien rakentamiselle materiaalien paikallinen saatavuus asettaa reunaehdoja. Tiedot patopaikan geologisesta rakenteesta ovat oleellisia, jotta saavutetaan padon toiminnan ja turvallisuuden kannalta vaadittava lopputulos. [25]

3.2 Tekniset vaatimukset ja kuormitukset

Padolle voidaan määritellä useita teknisiä vaatimuksia. Näitä ovat padon, sen perustan ja päätytukien vakavuus kaikissa staattisissa ja dynaamisissa kuormitustapauksissa. Suotovirtaus padon osien läpi tulee hallita ja kohteen mukaan järjestää suotovesien keräily ja rajoittaa suotoveden määrää. Liiallista nosteesta aiheutuvaa kuormitusta tulee ehkäistä, kuten myös materiaalien erodoitumista, löyhtymistä, halkeilua ja haitallisten vuotokanavien muodostumista. Padon kuivavaran tulee olla riittävä ylivirtauksen ehkäisemiseksi ja sen suunnittelussa tulee ottaa huomioon patorakenteen ja sen perustan painumat sekä tulva-aukkojen kapasiteetti. [17]

Patoihin kohdistuu hyvin monenlaisia kuormituksia, joiden oleellisuus suunnittelussa vaihtelee tapauskohtaisesti. Tärkein kuormittava tekijä vesistöpadoilla on luonnollisesti padotettavan veden hydrostaattinen paine, joka määritetään vapaan vesipinnan korkeuden mukaan ottaen huomioon myös sen vaihtelut. Ylimpänä vedenkorkeutena käytetään vähintään sitä korkeutta, jolta tulva-aukot pystyvät purkamaan suurimman tulvavirtaaman. Padon ja sen perustan huokosissa, raoissa ja halkeamissa vaikuttava hydrostaattinen paine kohdistaa betonipatoon nostevoiman, joka tulee ottaa huomioon vakavuustarkasteluissa. [1]

Muita patoon kohdistuvia kuormituksia ovat veden törmäämisestä rakenteeseen aiheutuva virtauspaine, aaltoilun aiheuttamat kuormat, jäänpaine- ja -sysäyskuormat, lämpötilarasitukset, lumi- ja tuulikuorma sekä maanjäristyskuormat. Tuulikuormaa ei suomalaisen kokoluokan padoissa tarvitse huomioida ja seisminen aktiivisuus on maassamme niin vähäinen, ettei sillä ole merkitystä padon mitoituksen kannalta. Joissakin tapauksissa patoa kuormittaa myös liikenne. [1]

3.3 Patojen yleiset suunnitteluperusteet

Suomessa padon hydrologisesta mitoituksista säädetään valtioneuvoston asetuksella patoturvallisuudesta. Sen mukaan vesistöpato mitoitetaan virtaamalle, joka aiheuttaa padolla suurimman juoksutustarpeen ja mitoitus esitetään tätä virtaamaa vastaavan tulvan (mitoitustulva) vuotuisena todennäköisyytenä eli 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 voimallituksen koneistovirtaamia on käytössä. Mitoitustulvan suuruuteen ja esiintymiseen vaikuttaa padon yläpuolisten järvien säännöstelytilavuus. Vesistöpatojen mitoitustulva määritetään virtaamahavaintoihin perustuvalla toistuvuusanalyysillä tai hydrologisella mallilaskennalla. [5, 6]

Padotettavan vedenpinnan turvallisena korkeutena pidetään hätäylivedenkorkeutta (hätä-HW). Hätäylivedenkorkeus on ylivedenkorkeus, jonka ylittäminen voi aiheuttaa muutoksia patorakenteissa. Esimerkiksi maapadoilla hätäylivedenkorkeus on yleensä tiivisteosan yläpinnan korkeus. Hätäylivedenkorkeus on merkittävä patoturvallisuuslomakkeisiin ja samalla on selvitettävä, miten hätäylivedenkorkeus on määritetty. [5, 6]

Patoturvallisuusoppaan mukaan (viitaten patoturvallisuusasetukseen) maapadon kokonaisvarmuuden tulisi pysyvässä suototilassa olla vähintään 1,5 ja rakennustyön loppuvaiheessa sekä äkillisessä vedenpinnan laskussa vähintään 1,3. Kalliolle perustetun betonirakenteisen padon varmuus kaatumista tai liukumista vastaan tulee kokonaisvarmuusmenettelyllä olla vähintään 1,5 normaaleissa kuormitustilanteissa ja vähintään 1,3 poikkeuksellisissa kuormitustilanteissa. Mikäli koheesio otetaan huomioon mitoituksessa, on varmuusluvun oltava vähintään 2. Lisäksi patoon vaikuttavien voimien resultantin on kohdistuttava pohjan keskimmäisen kolmanneksen alueelle eikä padon ylävirranpuoleisessa reunassa saa olla vetojännityksiä. [6]

Maapadon kuivavara, eli padon harjan ja HW-tason välinen korkeusero, määräytyy joko suurimman aallonkorkeuden tai routamitoituksen perusteella. Minimivaatimus on 1- ja 2-luokan padoilla vähintään kerran 10 vuodessa toistuvan roudan syvyys tai 1,75 kertaa suurin aallonkorkeus, joista routamitoitus on yleensä määräävä tekijä. Roudan

tunkeutumisyyvyyttä voidaan kuitenkin vähentää routaeristyksellä tai muilla rakenteellisilla ratkaisuilla. 3-luokan maapadot tulisi mitoittaa vastaavasti, mutta käyttäen vähintään kerran viidessä vuodessa toistuvan roudan syvyyttä. Betonipadon kuivavaran tulisi olla vähintään 1,75 kertaa suurin aallonkorkeus padolla. Maapadoille määritellään lisäksi turvavara, joka on padon tiivistysosan yläpinnan ja HW-tason ero, Sen minimiarvo on 1- ja 2-luokan padoilla 0,4 m ja 3-luokan padoilla 0,3 m. [6]

Padolle tulee olla toimivat kulkuyhteydet ja mahdollisuus padon huoltoon on suunniteltava sekä tarpeen mukaan varmistettava myös tulva- ja pato-onnettomuustilanteissa. Padon harjan tulee olla riittävän leveä ja rakenteeltaan soveltuva kunnossapitokaluston liikennöinnille. Padon harjan tulee olla koko pituudeltaan liikennöintikelpoinen 1- ja 2-luokan padoilla. Harjan leveyden minimiarvo on 1-luokan padoilla vähintään 4 m, 2-luokan padoilla 3,5 m ja 3-luokan padoilla 3 m. Harjan leveysvaatimus kuitenkin kasvaa padon korkeuden mukaan. Padon liikenteellinen saavutettavuus ja padon harjan liikennöitävyys vaaditaan myös patoturvallisuusasetuksessa. [6]

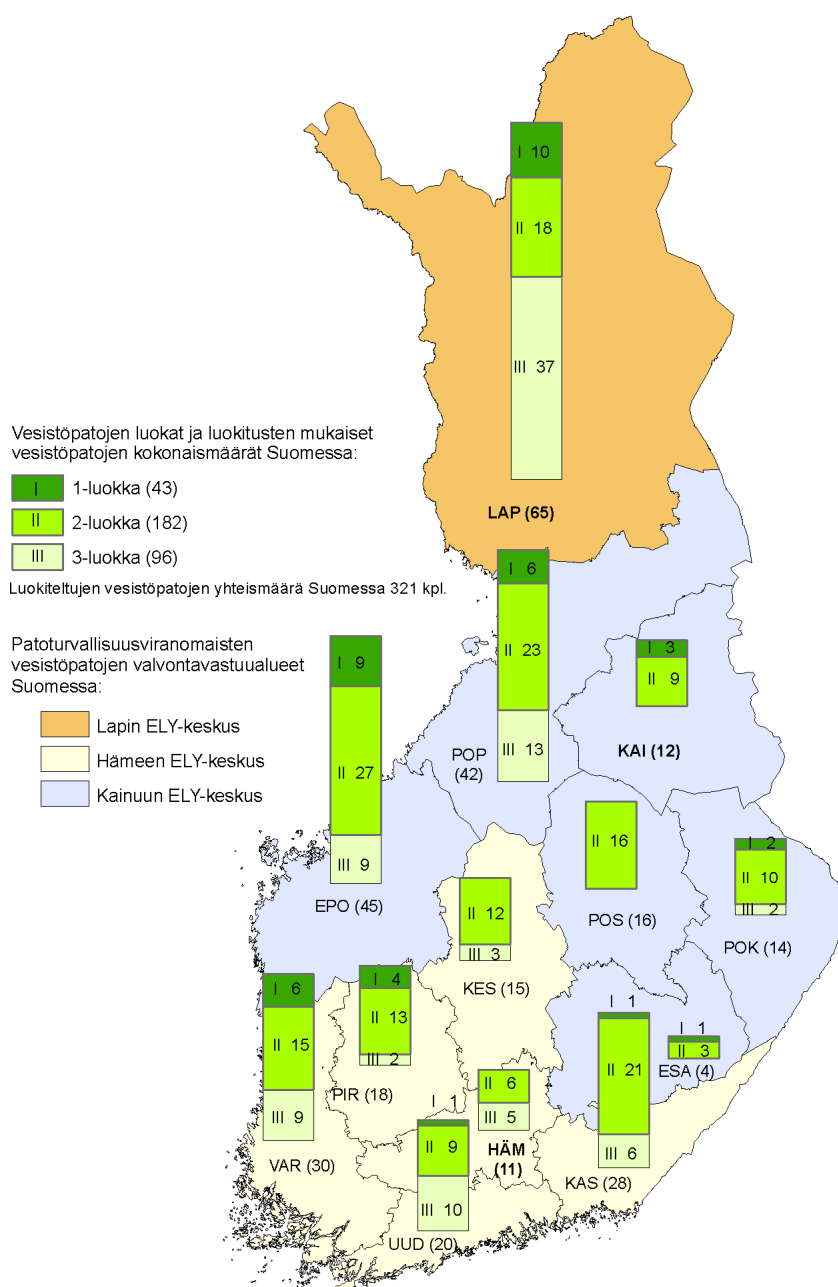
Maapadon suodatinrakenteet ja kuivatusjärjestelmä tulee mitoittaa siten, että ne pysyvät kaikissa olosuhteissa suojaamaan tiivistysosaa sisäistä eroosiota vastaan ja purkamaan padon läpi, ali ja ympäri suotautuvat vedet sekä tasaamaan mahdolliset virtausgradienttien huiput. Padon tulvaluukkujen suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä niiden riittämättömyys tai toimintahäiriö voi aiheuttaa ylipadotuksen ja sitä kautta sortumavaaran padolla. Luukuille tuleekin suunnitella varanostojärjestelmä, jolla ne saadaan avattua esimerkiksi sähkökatkoksen yhteydessä. Maapadon suunnittelua on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4 ja betonipadon suunnittelua kappaleessa 5. [32]

3.4 Patorakenteet Suomessa

Suomessa on luokiteltuja patoja noin 430, joista valtio omistaa noin 50. Näistä padoista vesistöpatoja on noin 320 ja loput jäte- ja kaivospatoja. Suomen patojen pääasialliset käyttötarkoitukset ovat tulvasuojelu, sähköntuotto, veden varastointi, virkistyskäyttö sekä jätteen ja kaivostoiminnassa syntyvien aineiden padotus. Suurin osa maamme padoista on rakennettu toisen maailmansodan jälkeen. Luokiteltujen patojen lisäksi maassamme on tuhansittain luokittelemattomia tulvapenkereitä ja muita pienempiä patoja. [10, 33]

Patoturvallisuuden säännöllinen seuranta alkoi valtion omistuksessa olleiden sähköyhtiöiden toimesta vuonna 1962 ja valtion padoilla 1972 vesihallituksen (nykyisin Suomen ympäristökeskus) toimesta. Enemmistö 1-luokan padoista on maapatoja ja osa betonista rakennettuja gravitaatiopatoja. Betonipatoja käytetään usein vedenpinnan kor-

keuden säätelyyn ja useilla voimalaitoksilla on koneaseman ympärillä betonipato, joka jatkuu maapatona. [33]



Kuva 2. Luokitellut vesistöpadot Suomessa (7/2011). [Kuva: Hämeen ELY-keskus]

Suomessa patoja on rakennettu alun perin maanviljelyksen ja vesimyllyjen tarpeisiin. Kuitenkin patoja rakennettiin jo ennen sähkövoiman tarvetta kanaviin nostamaan vesipintaa sulkujen yläpuolella. Kanavanrakennuskausi käynnistyi 1830-luvulla ja huipentui Saimaan kanavan rakentamiseen vuonna 1856. Kuvassa 3 näkyy kanavan rakentamista 1800-luvun tekniikoilla. Useiden muiden maiden tapaan ei Suomessakaan ollut 1900-luvun alussa käytettävissä erityisiä teoreettisia perusteita padonrakennukseen. Yrityksen ja erehdyksen kautta taito kehittyi ja suuria epäonnistumisia sattui vain har-

voin. Perinteinen padonrakennusmateriaali oli puu, mutta myös maavalleja käytettiin. [13]

Maapatojen tiivistysosana käytettiin yleensä puuponttiseinää aina 1950-luvulle asti. Seinä ympäröitiin savi-, siltti- tai moreenivyöhykkeellä suotovesien hidastamiseksi. Puupontin tilalla alettiin vähitellen käyttää teräsponttia tai betoniseinää, joka myös suojattiin vastaavasti. Kun tietämys maapadoista lisääntyi, voitiin niitä alkaa rakentaa myös ilman tekoaineesta koostuvaa tiivistysosaa. Etenkin suodatinrakenteiden käyttö ja maarakennuskoneiden kehitys mahdollistivat puhtaan maapadon yleistymisen. Patojen tyypin ja yksityiskohtien suunnittelussa alettiin myös huomioida rakennuspaikan läheisyydestä saatavat maamateriaalit, mikä johti moreenin yleistymiseen patojen rakennusmateriaalina. [13]



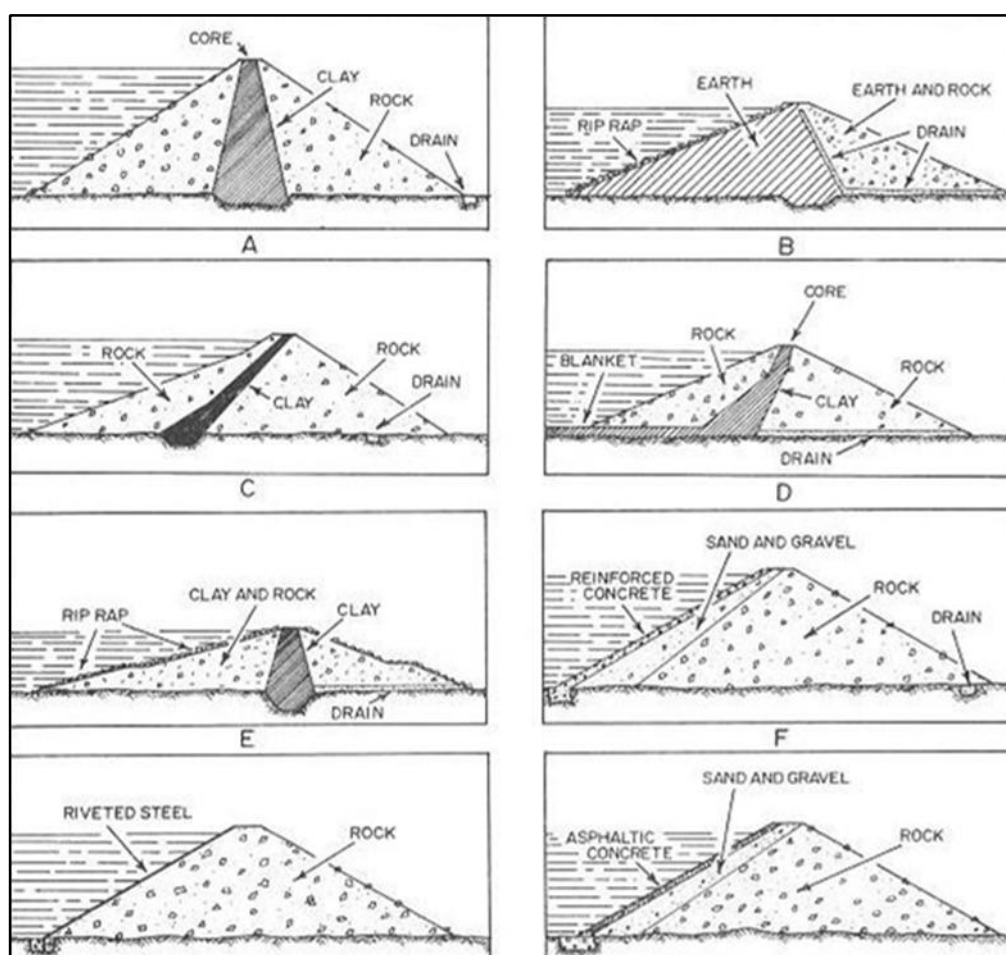
Kuva 3. Taipaleen kanavatyömaa Varkaudessa vuonna 1868. [13]

Sotien jälkeen maapatojen rakentaminen keskittyi Pohjois-Suomeen, ja patojen pääasiallinen käyttötarkoitus oli vesivoiman tuotto sekä tulvasuojelu. Voimalaitospatoihin käytettiin usein rakennusmateriaalina louhetta, jota saatiin esimerkiksi laitosten alakanavan syvennyslouhinnasta. Näin luiskat voitiin rakentaa jyrkemmiksi säästämällä rakennusmateriaalia. Pohjanmaalle on rakennettu maapatoja tulvasuojelua varten 1960–1980-luvuilla. Suomen korkein pato on 38-metrinen ja vuonna 1971 valmistunut Porttipahdan tekoaltaan pato, joka on maasta rakennettu vyöhykepato. [13]

4 MAAPADOT

4.1 Patotyypit ja rakenteet

Maasta rakennetut padot ovat vallimaisia gravitaatiopatoja, joiden vakavuus perustuu niiden massaan. Rakennusmateriaaleina voidaan käyttää esimerkiksi louhetta, soraa, hiekkaa ja moreenia. Maapato voidaan rakentaa homogeenisena maapatona (kuva 5), jolloin käytetään (suurimmaksi osaksi) vain yhtä rakennusmateriaalia tai vyöhykepatona, jossa on eri maamateriaaleista koostuvia vyöhykkeitä. Joskus eritellään louhepadot vielä omaksi luokakseen, vaikka ne ovatkin periaatteessa vyöhykepatoja, joissa käytetään tukipengermateriaalina karkeampaa, kalliosta louhimalla saatua kiviainesta. [1, 2]



Kuva 4. Erityyppisiä maapatoja. [2]

Vyöhykepatoja voidaan edelleen luokitella esimerkiksi tiivistysosan sijainnin ja kaltevuuden perusteella. Vyöhykepadot, joissa tiivistysosa on tehty jostakin muusta ainees-

ta kuin maasta (esim. puu, teräs, betoni, muovi), voidaan joissakin tapauksissa lukea omaksi luokakseen. [1, 2, 3]

Mikäli homogeeninen maapato tehdään karkeasta aineksesta, kasvavat padon mitat tarpeettoman suuriksi, jotta vedenläpäisevyys saataisiin pidettyä halutuissa rajoissa. Hienorakeisesta aineksesta tehtynä padon vedenläpäisevyys saadaan alhaiseksi, mutta rakenteellinen pysyvyys muodostuu ongelmaksi, jolloin luiskien kaltevuudet täytyy tehdä loivina ja materiaalimenekki kasvaa tässäkin tapauksessa. Näistä syistä maapadot rakennetaan nykyään usein vyöhykepadoina (kuva 7), joissa maamateriaaleja yhdistelemällä saadaan aikaan mahdollisimman edullinen ratkaisu saatavilla olevista rakennusmateriaaleista. [3] Huomionarvoista on, että jokainen padon suunnittelutehtävä johtaa erilaiseen poikkileikkaukseen, ja toisinaan padon luokittelu johonkin tyyppiin on vaikeaa. [1]

Homogeeninen maapato on selkeä rakentaa ja valvonta on helppoa tiivistämisen osalta, mutta massamenekki on yleensä suurempi kuin vyöhykepadolla. Kuitenkin savea ja silttiä käytettäessä itse tiivistystyö saattaa olla ongelmallista. Lisäksi kuiva luiska vettyy suotovirtauksen vaikutuksesta, mikäli ei käytetä erityisiä suodatinrakenteita, ja se saattaa vaikuttaa haitallisesti padon stabiliteettiin. Vyöhykepadon rakentaminen on vaativampaa ja eri materiaalien rajapinnat tuovat lisähaasteita. Lisäksi varsinkin vinolla tiivistysosalla varustetut vyöhykepadot ovat arkoja painumille ja muille muodonmuutoksille. Luiskien stabiliteetti vyöhykepadodoissa on yleensä parempi ja ne kestävät ääritilanteita, esimerkiksi nopeaa vedenpinnan laskua, homogeenisia patoja paremmin. Louheesta rakennettuna vyöhykepadon tilantarvetta saadaan pienennettyä ja erikoisrakenteilla varustettuna ne voidaan tehdä kestävämmän ylivirtausta, mutta padon perustalle kohdistuvat rasitukset ovat louhepadolla suuremmat. [1, 3, 15]

Maapadon patotyyppin ja rakennusmateriaalien valintaan vaikuttavat materiaalien saatavuus, laatu ja riittävyys, kustannukset sekä patopaikan rajoitukset. Suomen olosuhteissa on useimmiten patopaikan lähiympäristössä rakentamiseen soveltuvia materiaaleja saatavilla, jotka ilman erityisiä käsittelyvaiheita kelpaavat maapadon rakentamiseen. Niilläkin seuduilla, joilla irtomaamateriaaleja ei kohtuullisin kustannuksin ole mahdollista saada paikalle, voidaan louhia kalliota padon rakennusaineeksi ja käyttää padon muiden rakenteiden perustusvaiheessa saatuja irtomaita. Rakennusmateriaalit muodostuvat ongelmaksi lähinnä ulkomaisissa kohteissa, joissa geologiset olosuhteet ovat suurpiirteisemmät ja kalliolaatu on usein heikkoa. [1]

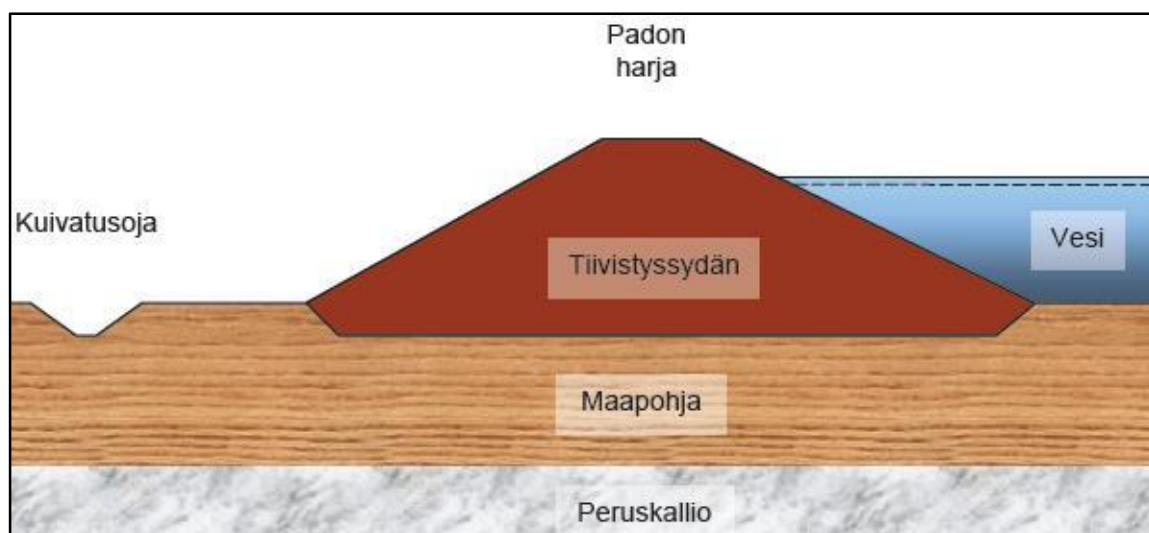
Joissakin tapauksissa myös rakentamisaika ja rakentamisen vaativuus sekä tarvittavan laadunvalvonnan taso saattavat vaikuttaa patotyyppiin, kuten myös ennen rakentamista tarvittavien tutkimusten ja selvitysten määrä ja laatu. Padotettavan virran työnai-

kainen hallinta saattaa myös nousta ratkaisevaksi. Nykyisin ympäristönäkökohdat ovat tärkeässä roolissa ja sekä valmiin padon että maamateriaalien ottopaikkojen sulauttaminen ympäröivään maisemaan tulee ottaa huomioon. [3, 15]

4.1.1 Homogeeninen maapato

Homogeeniset maapadot ovat pienehköjä, korkeudeltaan yleensä alle 10-metrisiä, mutta erikoisratkaisuilla niistä on mahdollista rakentaa paljon suurempia. Ne tehdään ainakin Suomessa useimmiten moreenista, mutta voidaan käyttää myös savea, silttiä, hiekkaa ja ääritilanteessa niitä sekoittamalla saatuja materiaaleja. Homogeenisessa maapadossa on nimestään huolimatta yleensä kuitenkin eri materiaalista tehty verhousrakenne märässä luiskassa ja lisäksi joissakin tapauksissa yksinkertainen suodatin- ja kuivatusrakenne. [3]

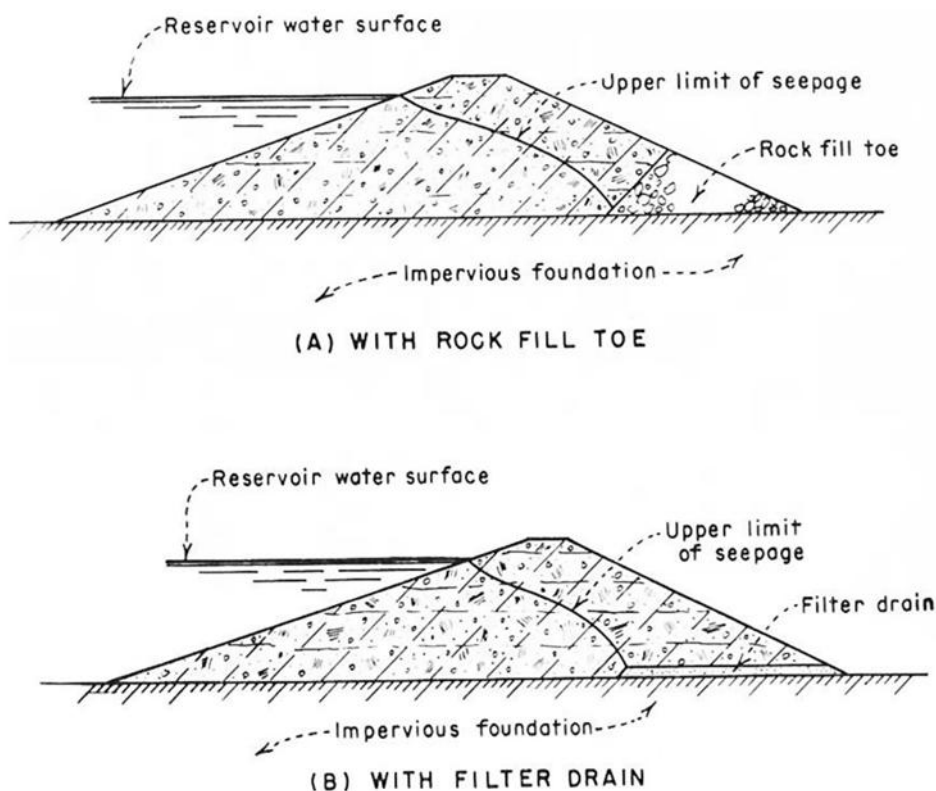
Verhouksen tehtävänä on kestää aaltojen, virtaavan veden ja jään aiheuttamat rasitukset siten, että ne eivät vahingoita patoa. Lisäksi se parantaa luiskan vakavuutta (pienempi materiaalimenekki jyrkemman luiskan ansiosta) ja ehkäisee sisäistä eroosiota. Mikäli materiaalin vedenläpäisevyys on suurempi kuin 10^{-6} m/s, on maapadon läpi suotautuvan veden määrä huomattavan suuri, jolloin padon kuivatusrakenteiden oikea mitoitus on erittäin tärkeää. [1]



Kuva 5. Homogeeninen maapato. [14]

Märkä luiska on syytä tehdä suhteellisen loivaksi stabiiliteetin takia, varsinkin jos nopea vedenpinnan lasku veden pitkän varastointiajan jälkeen on mahdollista. Tässä tilanteessa huokosvedenpaine luiskassa ei ehdi tasoittua samassa tahdissa vedenpinnan laskun kanssa, vaan maa-aines pysyy vedellä kyllästyneenä ja aiheuttaa suotovirtauksen luiskaan päin löyhdyttäen sitä. Kyseinen tilanne on usein myös padon kokonaisvakavuuden kannalta kriittisin. [15]

Täysin homogeenisessa maapadossa suotovirtaus kattaa padon kuivasta luiskasta noin alimman kolmasosan alareunasta laskettuna, mikäli vedenpinnan taso pysyy tarpeeksi korkealla riittävän pitkään. Näin tapahtuu riippumatta patomateriaalin vedenläpäisevyydestä tai luiskien kaltevuudesta. Tämän vuoksi nykyisin homogeenisiinkin maapatoihin sijoitetaan, pienimpiä patoja lukuun ottamatta, suotovirtausten hallintaan tarkoitettuja suodattimia, jolloin luiskia voidaan jyrkentää. Teoreettinen suotoviiva homogeenisellä maapadolla on esitetty kuvassa 6. Todellisuudessa suotoviiva poikkeaa teoreettisesta jonkin verran, sillä padon kerroksellisen rakennustavan takia patoon muodostuu kohtia, joissa vaakasuora vedenläpäisevyys on pystysuoraa vedenläpäisevyyttä suurempi. [1, 15]



Kuva 6. Kuivatusrakenteen sijoitusvaihtoehtoja homogeenisessa maapadossa ja teoreettinen suotoviiva. [15]

Suodattimien tehtävänä on hallita ja ohjata suotautuvaa vettä siten, että maarakeet eivät lähde liikkeelle, pienentää huokosvedenpaineita ja estää eri materiaaleista tehtyjen kerrosten maarakeiden sekoittuminen keskenään. Näin ollen voidaan periaatteessa eritellä kaksi eri tarkoitukseen käytettyä suodatinta, joille käytetään englannin kielessä nimityksiä *filter* ja *drain*. Molemmat johtavat vettä, mutta *filterin* tehtävä on toimia rakennekerrosten välissä ja estää myös maamateriaaleja sekoittumasta keskenään, kun taas *drain* pääasiassa kuljettaa vettä. Jälkimmäisestä voidaan suomen kielessä käyttää nimitystä kuivatusjärjestelmä. [21]

Kuivatusjärjestelmänä voidaan käyttää louhetta tai muuta patoa karkearakeisempaa materiaalia (hiekkä, sora) sekä joissakin tapauksissa salaojaputkia. Pelkkiä putkia ei kuitenkaan pitäisi käyttää ainoana kuivatusrakenteena, sillä ne voivat mennä tukkoon hienoaineksesta tai kasvustosta. Lisäksi vedenpaineen aiheuttamat kuormat ja padon paino voivat irrottaa ne liitoksistaan, jolloin putkista saattaa olla enemmän haittaa kuin hyötyä. Salaojaputkia tulisi käyttää kuivatusrakenteena vain kuivan luiskan alaosissa, missä ne voidaan tarkastaa, huoltaa ja tarvittaessa korvata uusilla. [15, 16]

Eräs ulkomailla käytetty rakennetyyppi on tiivispintainen homogeeninen maapato (kuva 8), jossa on karkeahkosta materiaalista koostuva runkorakenne ja vettä huonosti läpäisevä, esimerkiksi betonista, asfaltista, muovista tai teräksestä koostuva pinnoite. Uusissa kohteissa on nykyään käytetty paljon louherunkoisia, betonilla päällystettyjä patoja. Tämän tyyppisiä, jopa yli 100-metrisiä patoja löytyy muun muassa Etelä-Amerikasta. Yhdysvalloissa ja Euroopassa taas on rakennettu asfaltilla päällystettyjä sora- ja hiekkarunkoisia patoja. Rakenteen etuja ovat yksinkertaisuus vyöhykemattoon verrattuna ja nopea rakentamisaikataulu. Haasteena on tiivisteen liittäminen märän luiskan tyvessä pohjaan. Pohja voidaan lisäksi tiivistää esimerkiksi injektoimalla. [2, 3]

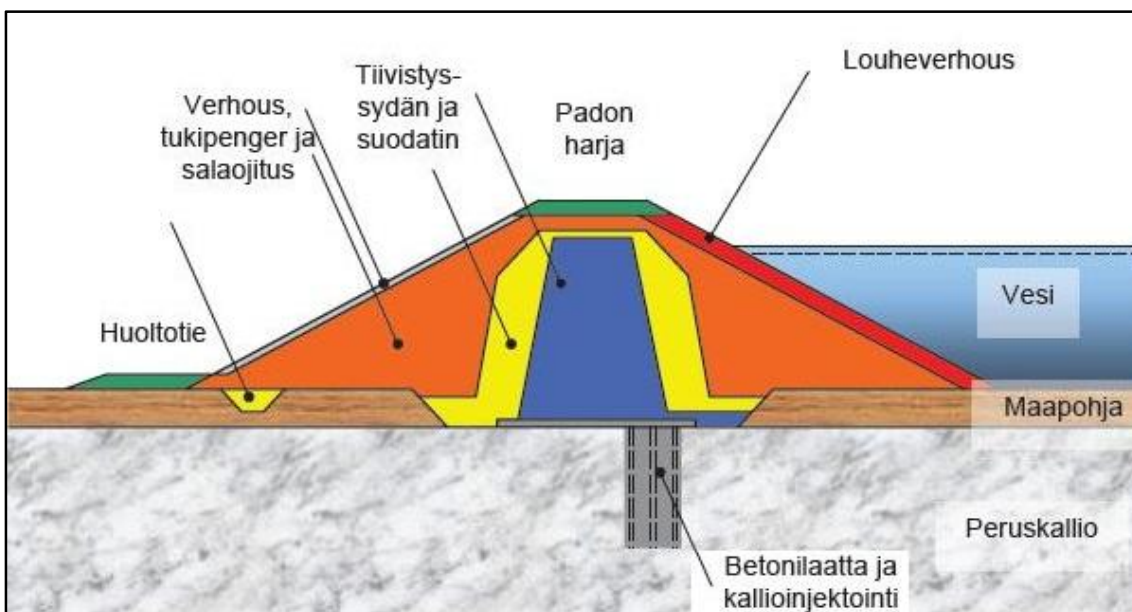
4.1.2 Vyöhykemaapato

Vyöhyke(maa)padolla tarkoitetaan vedenläpäisevyydeltään erilaisista materiaaleista rakennettua patoa ja siihen kuuluu vettä huonosti läpäisevästä materiaalista tehty tiivistysosa ja suodattimet sekä tukipenkereet. Tiivistysosalla estetään (hidastetaan) veden virtaus padon läpi ja se voidaan sijoittaa padon keskilinjalle tai vinosti siitä yläveiteen päin aina märän luiskan pintaan asti. Pystysuoraa tiivistysosaa tulisi kuitenkin yleensä suosia, sillä sen kontaktipaine pohjamaahan on suurempi, tehden liitoksesta teoriassa tiiviimmän. Lisäksi se sietää painumia kaltevaa tiivistysosaa paremmin. Suodattimet yleensä ympäröivät tiivistysosaa ja tukipenkereet suodatinta. Joskus tukipenger voi yksinään toimia suodattimena, jolloin erillistä suodatinta ei tarvita. Lisäksi voidaan vedenpuoleisessa luiskassa käyttää verhousta eroosiosuojana ja padon alapuolisen suotovirtauksen rajoittamiseksi erilaisia liityntärakenteita kallioon tai tiiviiseen pohjamaahan, kuten injektointia, tiivistysuraa tai katkaisuseinää. [1, 2, 3, 17]

Suodattimien tehtävä on suojata tiivistysosaa sisäiseltä eroosiolta ja poistaa suotovedet suunnitellusti yhdessä muun kuivatusjärjestelmän kanssa. Näin voidaan ehkäistä myös padon ohitse tapahtuvan suotautumisen aiheuttamaa eroosiota padon takana. Suodattimet parantavat myös padon vakavuutta alentamalla rakennusaikaisia ja vedenpinnan vaihteluista johtuvia huokosvedenpaineita. Suodatinmateriaalit valitaan ns. suodatinkriteerien perusteella, joita on johdettu edellä esitettyjen toimintavaatimus-

ten perusteella. Suodatinkriteerien avulla voidaan määrittää rakeisuuskäyrän sallitut rajat, kun suojattavan materiaalin rakeisuus tunnetaan. Joihinkin kriteereihin vaikuttavat lisäksi mm. maalajin lajittuneisuus, rajakerroksen pinnan kaltevuus ja veden virtaussuunta. Yleisimmät suodatinmateriaalit ovat hiekka, sora ja murske. [1]

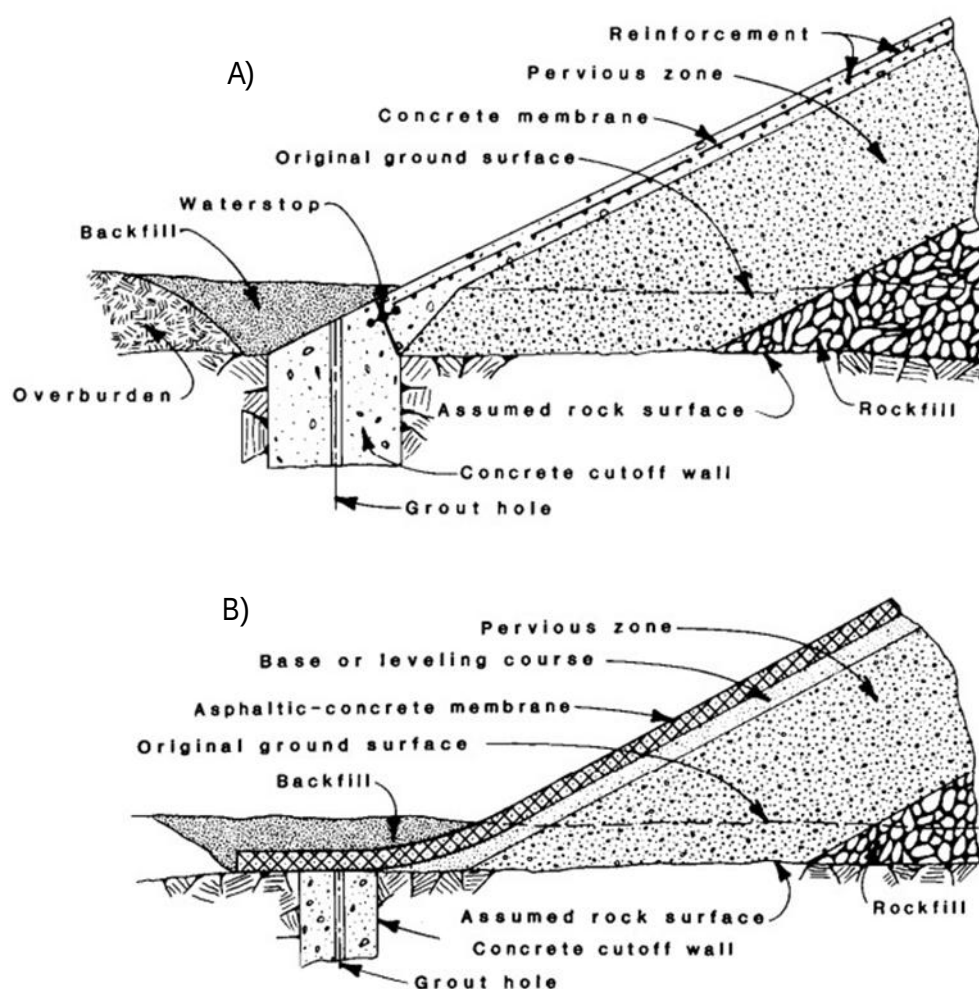
Tukipenkereet tarjoavat lisäsuojaa ja pitävät padon pystyssä, ylävirranpuoleinen tukipenger lisäksi suojaa patoa nopealta vedenpinnan laskulta ja alavirranpuoleinen tukipenger toimii myös suodattimena märkäviivan hallinnassa. Suotovirtauksen hallinnan kannalta tehokkain rakenne on sellainen, jossa padon vedenläpäisevyys kasvaa keskijalalta molempia luiskia kohti siirryttäessä. Tiivistysosan maksimileveys määräytyy kokonaisstabiileetin ja suotovirtauksen mukaan. [1, 15]



Kuva 7. Vyöhyketyyppinen maapato. [14]

Suomessa tiivistysosaan käytetään tavallisimmin siltti- tai hiekkamoreenia, ja vedenläpäisevyysvaatimus valmiille tiivisterakenteelle on 10^{-7} m/s. Savia ja silttejä ei Suomessa juuri käytetä, sillä kuivakuorisavien ja -silttien määrät ovat tavallisesti liian pieniä ja vesipitoisuudeltaan normaalien koheesiomaiden käyttö hankaloittaa tiivistystä liikaa. Savien ja silttien vedenläpäisevyys on yleensä selvästi alle 10^{-7} m/s, joten tiivistystyön yhteydessä saattaa niihin muodostua suuria huokosvedenpaineita heikentäen padon rakennusaikaista vakavuutta. Hiekan ja soran käyttö tiivistemateriaalina tulee kysymykseen vain, kun muita materiaaleja ei ole saatavilla. Keski-Euroopassa on pyritty aikaansaamaan moreenia muistuttavia materiaaleja sekoittamalla savea ja karkeara-keisia maalajeja, sekä lisäämällä erilaisia kemikaaleja. Menetelmää ei ole käytetty Suomessa. [1]

Vyöhykepadoissa on siirrytty käyttämään ulkomailla yhä enemmän louhetta ja tiivistysverhoa padon märän luiskan päällä, kuten kuvassa 8 on esitetty. [15] Tämä on toimiva ratkaisu varsinkin kalliolle tai muuten tukevalle pohjalle rakennetulla padolla, sillä louhepadon jyrkemmät luiskat rasittavat pohjamaata enemmän ja vino tiivistysosa kestää siirtymiä pystysuoraa huonommin. Näin toteutettu pato vaatii kuitenkin vähemmän tilaa. Louhepato saattaa olla edullisempi ratkaisu myös silloin, kun patotyömaalla joudutaan louhimaan ja louhe on patoon soveltuvaa, rakentamisolosuhteet ovat sateiset tai rakentamiselle sopiva vuodenaika on lyhyt. Louhepadoilla tiivistysverhon ja louheen väliin tarvitaan kuitenkin haasteellisempi suodatinrakenne kuin tavanomaisella vyöhykepadolla. [1, 17]



Kuva 8. Erilaisia tiivistysrakenteita louhepadon märässä luiskassa: [15]

- A) Teräsbetoninen tiivistysrakenne
- B) Asfalttinen tiivistysrakenne

Mikäli sopivan maamateriaalin saanti tiivistysosaa varten on ongelmallista, käytetään usein tekoaineesta, kuten asfaltista tai muovista tehtyä tiivistysosaa. Tällainen ratkaisu soveltuu hyvin toistuvien ja nopeiden vedenpinnan vaihteluiden alaisille padoille, sillä suotovirtaus ja sen tuomat ongelmat padossa häviävät lähes kokonaan. [1]

4.2 Maapatoon liittyvät rakenteet

Padolla on luonnonmukaisen vedenpinnan nostamisen ohella yleensä tarkoitus myös säädellä vesistön virtaamia, minkä mahdollistamiseksi maapatoihin tehdään erilaisia aukkorakenteita haluttujen virtaamien juoksuttamiseksi. Padon varsinaiseen tehtävään tarkoitettujen aukkojen lisäksi patoon on suunniteltava myös tulva-aukot, joiden avulla varmistetaan, ettei vedenpinta padolla nouse suunniteltua korkeammaksi ja pato joudu alttiiksi ylivirtaukselle. Kuvassa 9 on esimerkki tulvaluukusta. [1]



Kuva 9. Tulvaluukku Melon voimalaitospadolla.

Perusperiaatteena tulva-aukkojen suunnittelussa on, että pelkästään niiden avulla kyetään juoksuttamaan koko mitoitusvirtaama. Yleensä maapadoilla käytetään myös suhteellisen suurta varmuuskerrointa, varsinkin jos patoaltaan tilavuus on suuri ja padon alapuolella on asutusta. Varsinaisten tulva-aukkojen lisäksi voidaan tehdä vielä ylisyyaukkoja, jotka tulevat käyttöön automaattisesti veden noustessa riittävään korkeuteen. [1]

Tulva-aukkojen rakenteet mitoitetaan muiden patorakenteiden tavoin. Normaaliin kuormitusten lisäksi on huomioitava pilareiden välisestä jäänpaineesta sekä luukkujen ja patosillan tukireaktioista pilareihin aiheutuvat patolinjan suuntaiset kuormat. Tulvaluukun sijoitus patolinjalla vaikuttaa roudan tunkeutumiseen patorakenteeseen, mikä on huomioitava routamitoituksessa. Virtaamien säännöstelemiseksi aukot varustetaan liikuteltavilla sulkulaitteilla, joiden rakenteet riippuvat padon koosta ja siitä, kuinka

usein luukkuja joudutaan avaamaan. Pienillä padoilla on aikaisemmin käytetty puisia luukkuja tai settejä, mikäli luukkuja avataan vain harvoin. Suuremmissa aukoissa yleisimpiä ovat teräsrakenteiset taso- tai segmenttiluukut moottorikäyttöisellä nostokoneistolla varustettuna. Tulva-aukkojen lukumäärä tulisi mitoittaa siten, että aukot riittävät mitoitusvirtaaman purkamiseen, vaikka yhden aukon avauslaitteet olisivat epäkunnossa. [1]

Koska maapadon ja betonirakenteiden väliset saumakohdat ovat veden suotovirtauksen kannalta kriittisiä alueita, on veden virtausmatkaa pidennettävä niiden kohdalla. Näissä kohdissa periaatteena on saada veden virtausmatka kaksinkertaiseksi verrattuna tiivistysosalta vaadittavaan minimivirtausmatkaan kyseessä olevassa vesipaineessa tai käytettävä vedenläpäisevyydeltään selvästi pienempää materiaalia. [1]

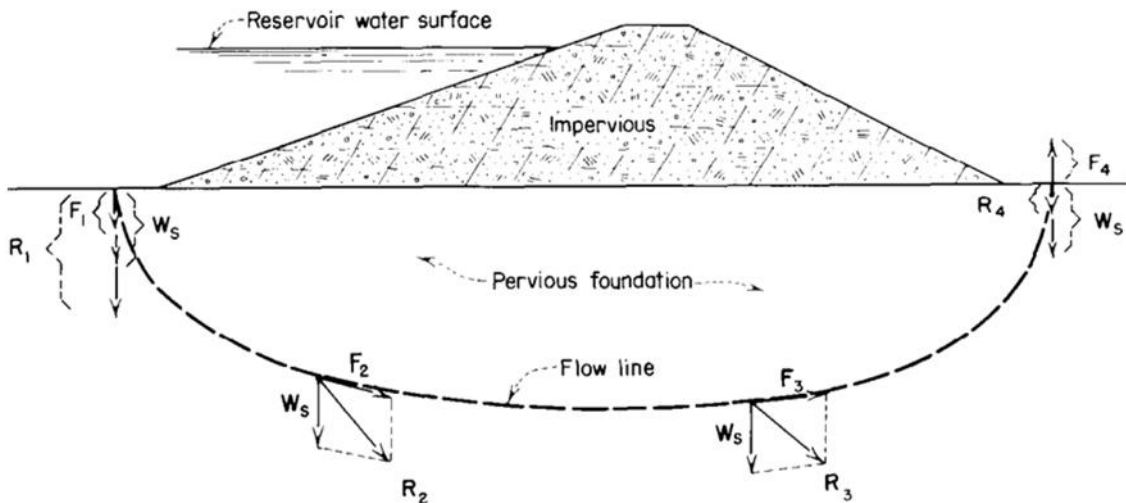
Maapadon tiivistysosan liittäminen kalliopohjaan vaatii yleensä erikoisratkaisuja. Lähes pystysuoralla tiivistysosalla voidaan käyttää siirtymäkerrosta, joka tehdään yleensä seulotusta moreenista. Vinoa tiivistysosaa käytettäessä voidaan se liittää kallioon tai injektointilaattaan esimerkiksi betoniseinällä, mutta siirtymäkerros on tässäkin tapauksessa tarpeen. Pystysuuntaisiin betonirakenteisiin on pato helpoin liittää käyttämällä tiivistysosan sisään ulottuvaa teräsponttiseinää. Mitä vinompi ja ohuempi tiivistysosa on, sitä hankalammaksi sen liittäminen tulee. Mikäli teräsponttia tai vastaavaa ei käytetä, huomionarvoista on huolehtia riittävästä suotovirtausmatkasta sekä riittävästä maanpaineesta, jotta tiivistysosa pysyy tiukasti kiinni rakenteessa. [1]

4.3 Suotovirtaus

Padon tehtävänä on estää veden virtaus siinä määrin, että haluttu korkeusero muodostuu padon eri puolilla olevien vesipintojen välille. Maapadolla tapahtuu kuitenkin aina suotovirtausta padon läpi ja usein myös sen alitse ja ohi. Padon eri puolilla vallitsevan vedenpaine-eron tulisi tasaantua siten, että se laskee padon poikkileikkauksen eri osissa. [1] Suotovirtaus aiheuttaa kuormitusta padolle ja sitä voidaan hallita materiaalinnoilla ja suodatinrakenteilla, jolloin päästään suurelta osin eroon sen haittavaikutuksista, mutta hallitsemattomana suotovirtaus saattaa vaarantaa koko padon vakavuuden. [15]

Veden virtaus maa-aineksen läpi aiheuttaa suotovoimia, jotka aiheutuvat kitkasta veden ja maan huokostilan pintojen välillä, aivan kuten tapahtuu veden virratessa putkessakin. Kuvassa 10 on esitetty tilanne, jossa maapato on rakennettu suhteellisen läpäisemättömästä materiaalista ja suotovirtaus tapahtuu padon alitse. Veden virtaus lisää padon märässä luiskassa olevan maan tilavuuspainoa voimalla F_1 , jolloin maan tehokas tilavuuspaino on voimien W_s ja F_1 resultantti R_1 . Voiman F_1 suuruus on verran-

nollinen tietyllä matkalla tapahtuvaan kitkahäviöön. Koska virtauksen käytettävissä oleva poikkipinta-ala yleensä pienenee veden virratessa padon ali, sen nopeuden täytyy kasvaa virtauksen pysyessä vakiona. Tämän seurauksena myös kitkahäviö kasvaa, mikä on kuvassa osoitettu suhteellisesti pidemmillä vektoreilla F_2 ja F_3 . [15]



Kuva 10. Suotovirtaukseen liittyvien voimien komponentit. [15]

Veden virratessa kuivan luiskan puolella ylöspäin, kohdistaa se maapartikkeleihin ylöspäin suuntautuvan voiman. Mikäli $F_4 > W_s$, on resultantin suunta ylöspäin ja tapahtuu hydraulinen murtuma. Tämä murtuma etenee usein progressiivisesti veden kuljettaessa maa-ainesta mukanaan ja muodostaa padonalaisen vuotokanavan, jota kutsutaan myös eroosiosuoneksi. Tällainen eroosiosuoni voi kehittyä perustan ohella myös itse patoon ja vyöhykepadolla sen tiivistysosaan. Tilanteen kehittyminen johtaa virtaaman kasvuun ja jopa padon sortumaan, mikäli vuotokanava kehittyy aina patoaltaaseen asti. Padon pohjamaahan kehittynyt eroosiosuoni saattaa aiheuttaa hydraulisen murtuman pitkänkin matkan päässä padon takana. Harvassa kallioperässä (esimerkiksi kalkkikivialueilla) on todettu lähteitä useiden kilometrien päässä patopaikalta. [1, 7, 15]

Tälle eroosion kaltaiselle ilmiölle käytetään yleisesti nimitystä "piping", eli putkenkaltaisen virtauskanavan muodostuminen sisäisen eroosion vaikutuksesta. Yhteiseurooppalaisen suunnittelustandardiston eli eurokoodin geoteknistä suunnittelua käsittelevässä osassa, eurokoodi 7:ssä siitä käytetään suomennosta putkieroosio. Kokemusten mukaan kuvatun kaltainen tilanne voi syntyä hitaasti ajan mittaan ja sitä seurata nopea padon alavirranpuoleisen perustan nostemurtuma. Tällainen virtauskanavan muodostuminen ei kuitenkaan aina etene progressiivisesti murtumaan asti. Jos padon perusta tai padon alaosa on maalajiltaan suhteistunutta, saattaa virtaus kuljettaa siitä hienoaineksen pois jättäen jälkeensä karkearakeisen, luonnollisesti syntyneen "suodatti-

men”. Tämä taas todennäköisesti pysäyttää eroosion veden päästessä virtaamaan kearakeisen materiaalin läpi suhteellisen vaivattomasti. [15]

Sisäisen eroosion vaarallisuutta lisää se, että ennen ilmiön kehittymistä tarpeeksi pitkälle, siitä ei usein ole näkyvissä ulkoisia merkkejä. Pahimmassa tapauksessa sisäinen eroosio saattaa murtaa padon vain tuntien kuluttua ensimmäisten havaittavien merkkien ilmaantumisesta. [22] On yleensä vaikeaa sanoa, johtaako putkieroosio aina padon sortumaan vai pysähtyykö se ennen vakavampia seurauksia. Pato on kuitenkin suunniteltava siten, ettei putkieroosiota pääse tapahtumaan. Tärkeää on veden virtausnopeuden hallinta, ja siihen vaikuttavat Darcyn lain mukaan hydraulinen gradientti sekä maalajin vedenläpäisevyys. Padon suunnitteluvaiheessa on oleellista tarkistaa virtausviivaverkostoihin perustuvilla laskelmilla suotautuvan veden virtausnopeus, jotta se ei kasva eroosiota aiheuttavaan suuruusluokkaan. Myös virtauksen suunta ja suotoveden ylin raja ovat oleellisia tietoja mahdollisen eroosioriskin arvioimisessa. [1, 10, 15]

Pohjamaat, joilla on pieni vedenläpäisevyys, eivät yleensä ole alttiita eroosiolle, koska vesipintojen välinen paine-ero on virtausvastuksen takia tasaantunut ennen kuivan luiskan saavuttamista jo lähes kokonaan. Sen sijaan vaarallisia ovat mitkä tahansa heikkousvyöhykkeet pohjamaassa, suodatinrakenteen seinämät, padon (tiivistysosan) ja pohjamaan rajapinta ja padon läpäisevät putket tai muut vyöhykkeet, jotka muodostavat rajakohdan veden virtauksessa ja joita pitkin suotovesi pääsee purkautumaan alavirran puolelle ilman suuria kitkahäviöitä. Suotovirtauksen keskittymisestä heikkousvyöhykkeisiin voi seurata sisäistä eroosiota veden kuljettaessa maa-ainesta mukanaan, ja se on siinä mielessä erilaista kuin nostemurtumasta alkava eroosio, että se ei edellytä hydraulista murtumaa. Kuvassa 11 on esitetty padon läpi kulkevan putken ympärillä olevia, suotomatkaa pidentäviä rakenteita. [1, 15]

Virtausviivalaskelmilla voidaan periaatteessa arvioida vain hydraulisesta murtumasta liikkeelle lähtevää sisäistä eroosiota, jonka pitäisi tapahtua heti altaan täytyttyä ja suotovirtauksen vakiinnuttua. Koska näin ei yleensä ole, voidaan päätellä, että monet sortumat johtuvatkin rakenteen heikkousvyöhykkeisiin perustuvasta sisäisestä eroosiosta, jota ei voida virtausviivaverkostoilla tai muilla teoreettisilla menetelmillä analysoida. [15]

4.4 Suotovirtauksen hallinta

Padon läpi tapahtuva suotovirtaus on yleensä helpompi hallita kuin padon alitse tapahtuva, sillä padon rakennusmateriaalit ovat tiedossa ja niiden mitoituksessa otetaan suotovirtaus huomioon. Esimerkiksi tiivistysosan muotoilulla ja mitoilla voidaan vaikut-

taa ylimmän suotoviivan asemaan ja siten sijoittaa kuivatusjärjestelmä oikein. Padon läpi suotautuvan veden määrää taas voidaan vähentää paksuntamalla tiivistyssydäntä tai käyttämällä huonommin vettä läpäisevää materiaalia. Padon alitse tapahtuvan suodon selvittämiseen tarvittavat lähtötiedot ovat vaikeammin määritettävissä ja ne edellyttävät maaperä- ja/tai kallioperätutkimuksia. [1]

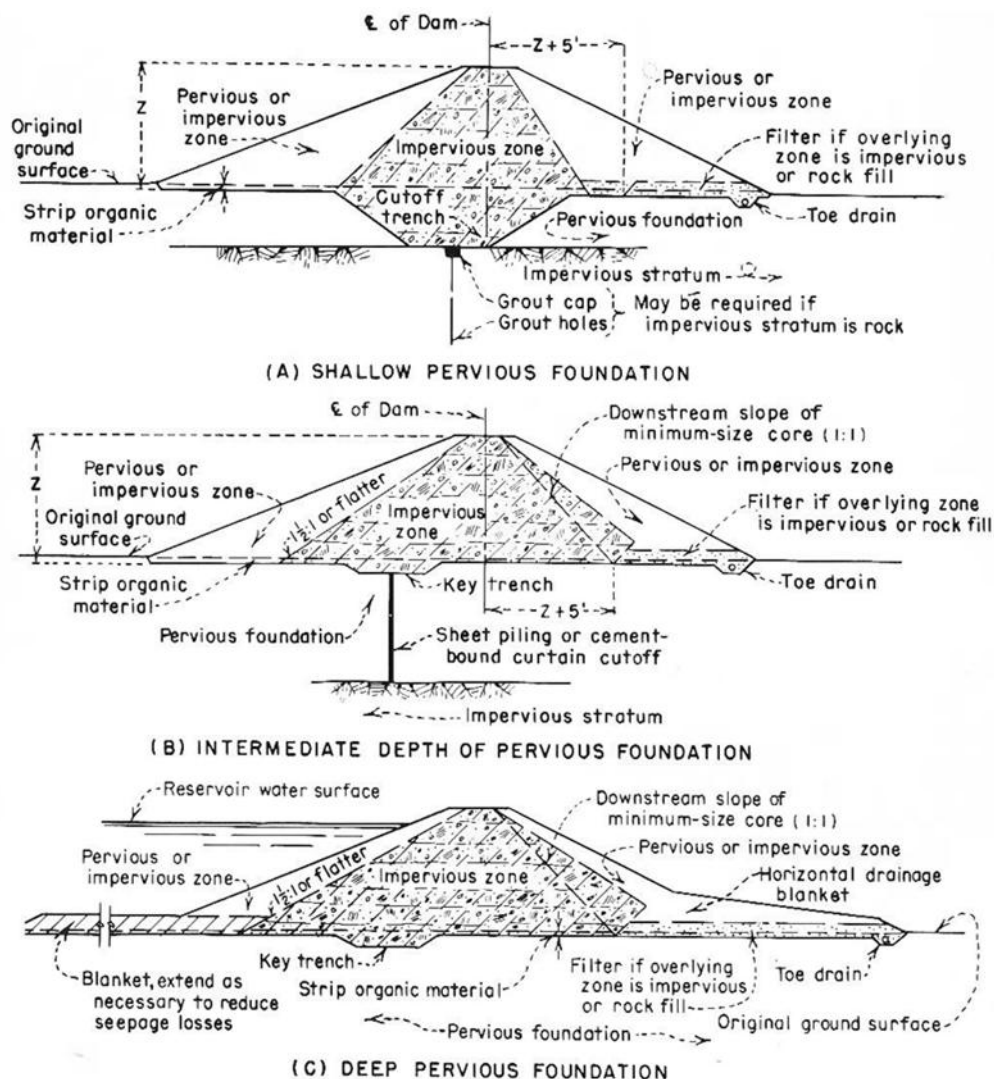


Kuva 11. Sisäisen eroosion torjumiseksi käytettäviä, suotomatkaa pidentäviä kaulusmaisia rakenteita padon läpi kulkevan betoniputken ympärillä. [76]

Padon alitse tapahtuvaa suotovirtausta voidaan kuitenkin hallita monella tavalla tai jopa estää se kokonaan. Vettä läpäisevien maakerrosten alapuolelle, usein kallioon asti, voidaan ulottaa tiivistysseinä. Materiaalina voidaan käyttää betonia, teräsponattia, (teräs)betonista kaivinpaaluseinää tai suihkuinjektointia. Tiivistysseinärakenteissa ongelmallisimpia paikkoja ovat seinän liitokset padon tiivistysosaan ja kallioon tai vettä läpäisemättömiin maakerroksiin, sillä virtaus keskittyy usein niihin ja suuren paineeron ja sitä kautta suuren virtausnopeuden vuoksi pienetkin raot voivat aiheuttaa sisäistä eroosiota. [1]

Myös injektioimalla sementillä, bentoniitillä tai kemikaaleilla voidaan valmistaa seinämäisiä rakenteita. Injektointimateriaali valitaan maaperän mukaan ja tarvittaessa voidaan käyttää useampia aineita tai muuttaa aineen koostumusta kesken injektoinnin. Injektoidun seinän rakentaminen onnistuu parhaiten sora- ja hiekkamaissa ja injektointiaineen viskositeettia on muutettava maan vedenläpäisevyyden mukaan. [1]

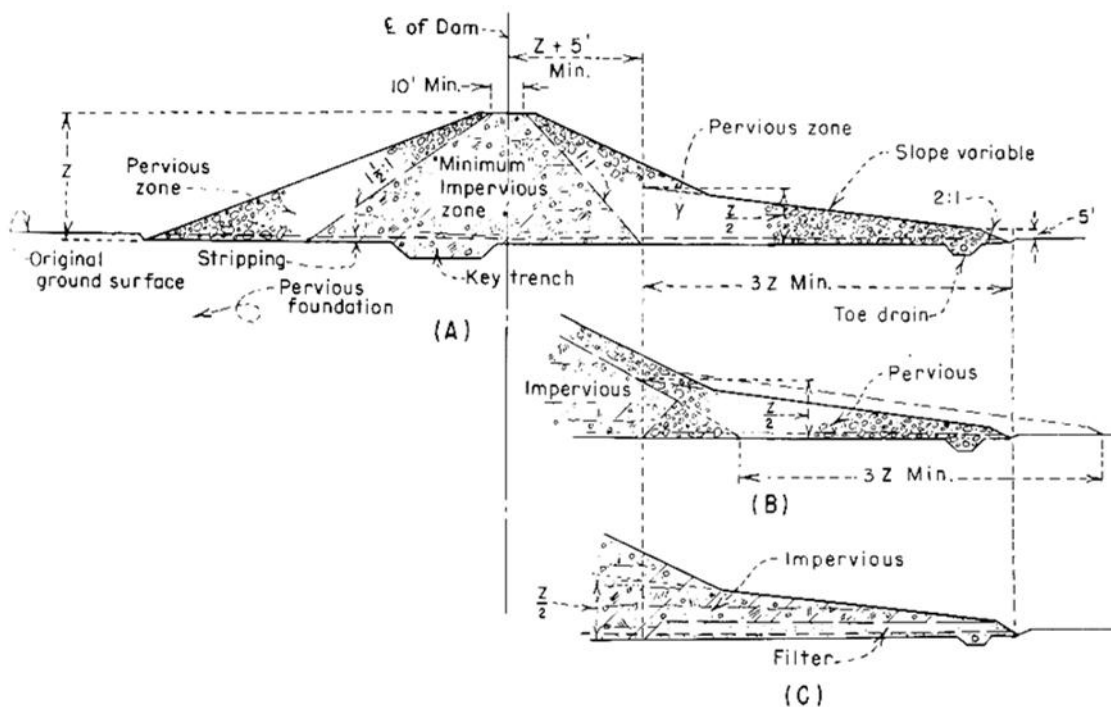
Tiivistysseinän paksuus riippuu käytettävästä menetelmästä, seinän korkeudesta ja padon vedenläpäisevyydestä. Kaivinpaaluseinien ja valettujen betoniseinien paksuus on yleensä 0,5...1,0 metriä kun taas injektoidut rakenteet tehdään yleensä paksummiksi siten, että ne ohenevat alaspäin mentäessä. Mikäli padon alla olevat vettäjohtavat kerrokset eivät ole liian paksuja, voidaan padon tiivistysosa ulottaa tiiviiseen kerrokseen asti. [1]



Kuva 12. Esimerkkejä vyöhykepadon perustamisesta vettä läpäisevälle pohjamaalle. [15]

Padon alitse suotautuvaa vesimäärää voidaan pienentää pidentämällä suotomatkaa, eli esimerkiksi ulottamalla tiivistysosa eräänlaisena tiivistyspatjana padon märeille puolelle ja jatkamalla sitä riittävän pitkälle, kuten kuvan 12 kohdassa c. Näin voi olla taloudellista menetellä, kun tiivistysseinä kalliioon tai tiiviiseen kerrokseen tulisi liian syväksi tai vaikeaksi rakentaa. Tiivistyspatjaa voidaan myös käyttää yhdessä määrämittaisen (ei tiiviiseen kerrokseen asti ulottuvan) tiivistysseinän kanssa. [15]

Tiivistyspatja voidaan rakentaa myös osittaisena, esimerkiksi kattamaan vain suurimman virtausnopeuden osuus virran pohjasta, josta hienompi aines on kulkeutunut pois ja se on siten vedenläpäisevyydeltään suurempi. Tiivistyspatja pienentää suotoa, mutta sen ei voi olettaa poistavan kokonaan putkieroosion mahdollisuutta, sillä jokaisen padon perustassa on luonnollisesta anisotrooppisuudesta johtuvia vyöhykkeitä, joissa korkea, paikallinen paine-ero on mahdollinen. Tämän vuoksi riittävät suodatinrakenteet ovat vettäläpäisevällä pohjamaalla aina tarpeen, mikäli täysimittaista katkaisuseinää ei ole mahdollista rakentaa. [15]

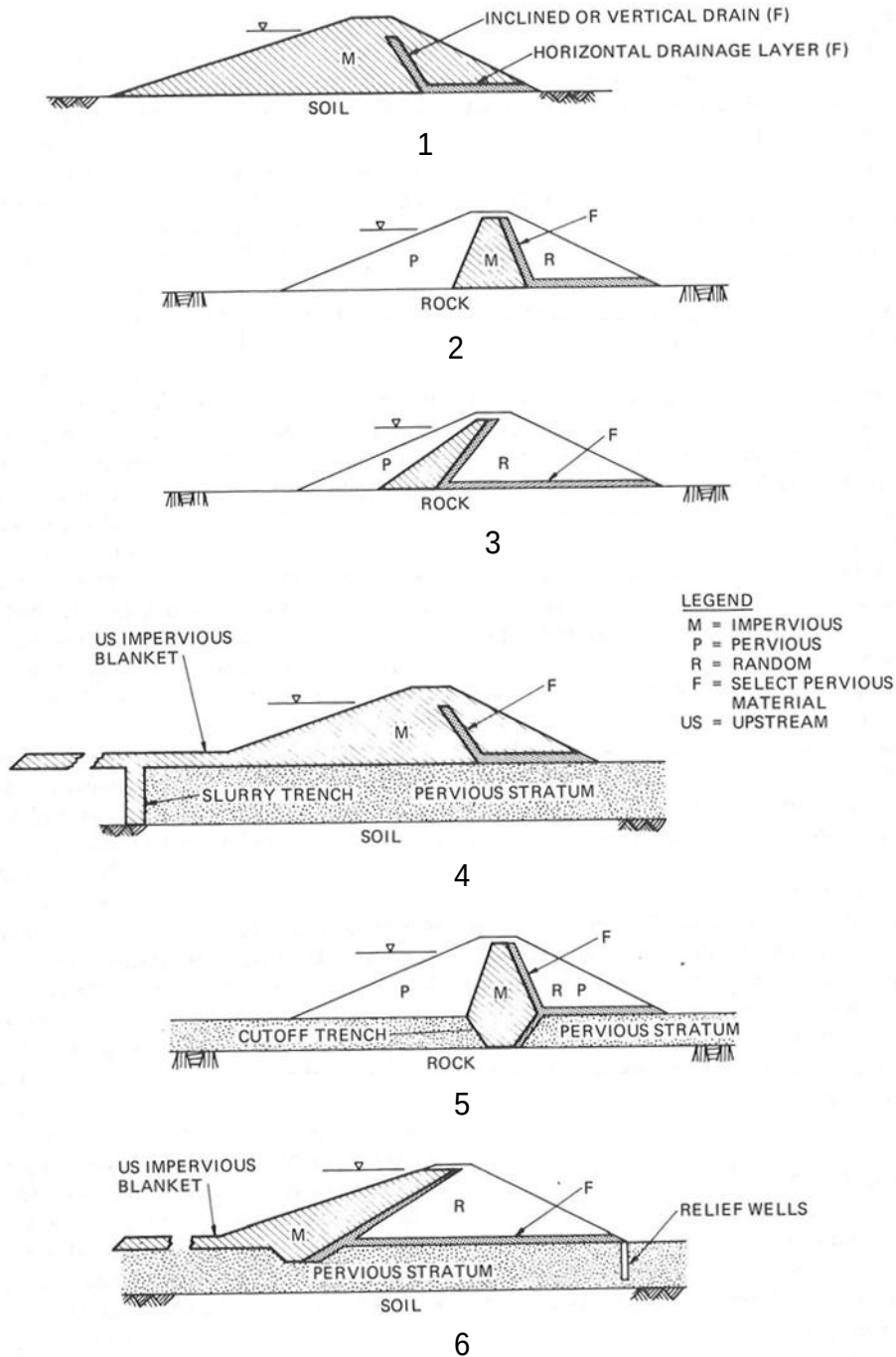


Kuva 13. Kuivaa luiskaa jatkamalla toteutettu kuivatusrakenne vyöhykepadolla. [15]

Joissakin tapauksissa taas padon alitse suotautuva vesimäärä on merkityksettömän pieni, mutta sisäisen eroosion riski on silti olemassa. Tällöin voidaan kuivan luiskan jatkeeksi rakentaa käänteisellä suodattimella varustettu painopenger (kuva 13) tai käyttää pystyjoja johtamaan suotovedet kuivatusjärjestelmään. [1] Suodattimena toimiva painopenger purkaa suotovedet ja vähentää hydraulisen murtuman riskiä kuivassa luiskassa kohdistamalla painoa sille osalle perustaa, jossa on ylöspäin suuntautuvia suotovoimia. Painopenger toimii parhaiten vettäläpäisevillä, homogeenisilla pohjamaille, kun katkaisuseinää ei saada tarpeeksi tiiviiksi. Jos maa on kovin anisotrooppista, voi rakenteen tehokkuus kärsiä, sillä vedenläpäisevyys pystysuunnassa on yleensä huomattavasti pienempi kuin vaakasuunnassa. [15]

Kuvan 13 tapauksissa A ja B penkereen jatkaminen alavirtaan riittää, sillä pengermateriaali on vettä läpäisevää. Erona on vain tiivistyssydämen koko. Tapauksessa B on esitetty katkoviivalla vaadittu painopenkereen koko, mikäli tiivistyssydäntä ei olisi viistetty.

suus on pienempi kuin vedenpintojen välinen korkeusero, jolloin se ei välttämättä riitä pidättämään kerroksen alapintaan syntyvää suotovedenpainetta. Kerroksen paksuus voi kuitenkin olla sen verran suuri, että kuivatusojien käyttäminen ei ole mielekästä. [15]



Kuva 15. Erilaisia maapatorakenteita. Rakenteet 1–3 ovat tiiviillä pohjamaalla ja 4–6 vettä läpäisevällä pohjamaalla. [16]

Tässä tilanteessa kaivojen tulisi ulottua vettä läpäisevään kerrokseen siten, että tiiviin kerroksen ja läpäisevän kerroksen kuivatetun yläosan yhteispaino riittää vastustamaan ylöspäin suuntautuvaa suotopainetta. Yleensä kaivon syvyydeksi riittää padon korkeus.

Kaivot vaativat toisinaan huoltoa ja tarkastuksia tukkeutumisen varalta ja niiden rakentaminen saattaa olla vaativaa, joten ensisijaisesti käytetään muita suotovesien hallintamenetelmiä. [15]

Kuvassa 15 on esitetty maapatorakenteita, joista käy hyvin ilmi erilaisia suotovirtauksen hallintaan suunniteltuja rakenneratkaisuja. Tapaus 1 on hyvin tyypillinen läpäisemättömälle pohjamaalle perustettu homogeeninen maapato, jossa on vaakasuora suodatin jatkettuna vinolla pystysuodattimella. Suomessa yleisin suodatintyyppi on juuri vaakasuodatin, joka soveltuu hyvin matalille maapadoille, mutta korkeammissa padoissa sitä tulee jatkaa pystysuodattimella. Suomessa on yleinen myös moreenista tehty puhtaasti homogeeninen maapatorakenne, josta suodattimet ja verhousmateriaalit voivat puuttua kokonaan. [10, 15]

Tapaus 4 on samankaltainen, mutta padon perusta on vettä johtavaa, jolloin tarvitaan lisäksi katkaisurakenne estämään suotovirtaus padon alitse. Tapaukset 2 ja 5 kuvaavat vyöhykepatoa sekä vettä läpäisemättömällä että läpäisevällä pohjamaalla. Padon tiivistysosa on molemmissa tapauksissa ulotettu vettä läpäisemättömään kerrokseen. Tapauksissa 3 ja 6 on käytetty padon keskilinjasta ylävirran puolelle sijoitettua tiivistysosaa. Tapauksen 6 rakenteessa käytetään suotovirtauksen hallintaan määrän luiskan etupuolelle jatkettua tiivistyspatjaa, jolla pidennetään suotomatkaa. Kuivan luiskan hydraulinen murtuma estetään suotopaineen purkukaivojen avulla. [15]

4.5 Riskejä ja sortumismekanismeja

Maapatojen sortumiseen johtavat syyt voidaan jaotella yleisesti kolmeen luokkaan. Näitä ovat liukupintasortumat, ylivirtaus ja hallitsematon suoto. Kaksi viimeistä ovat yleisimmät syyt ja kattavat sortumista suurimman osan. Näiden syiden osuus kaikista sortumista kuitenkin vaihtelee eri lähteissä, ja usein padon sortuminen onkin seuraustan monen tekijän yhteisvaikutuksesta. Maapadon vaurioitumismekanismeja on havainnollistettu kuvassa 17. [17]

Maapatojen yleisin sortumisen syy Yhdysvalloissa on riittämättömistä tulva-aukoista johtuva ylivirtaus padolla. Seuraavaksi yleisin syy on suotovirtauksen aiheuttama putkieroosio, jossa patoon muodostuu progressiivisesti etenevä vuotokanava. Osan sortumisista ovat aiheuttaneet myös maapadoilla sattuneet liukusortumat sekä vuodot tulva-aukoista. Joidenkin lähteiden mukaan taas putkieroosio tai muuntyyppinen liiallinen suoto aiheuttaa jopa 50 % sortumistapauksista maapadoilla. [17, 21]

Syitä maapadon sisäiseen eroosioon on lukuisia, joista oleellisimpina padon suunnittelussa tehtävät virheet. Padon läpi vietävät putket tai muut rakenteen muodostavat

aina riskikohdan, sillä veden virtaus keskittyy maan ja rakenteen välisiin rajapintoihin, joissa virtausvastus on ympäröivää maata pienempi. Lisäksi putket voivat pettää liitoksistaan ja ne yleensä painuvat eri tavalla kuin pato, jolloin niiden ympärille saattaa muodostua jopa avorakoja. Käytettäessä tällaisia rakenteita padon sisällä, tulisi veden virtausmatkaa pyrkiä kasvattamaan vähintään kaksinkertaiseksi esimerkiksi putkiin hitsattavien laippojen avulla. Patomateriaalin jäätyminen putkien ulostulokohdan ympärillä saattaa aiheuttaa putkien routanousua avaten lisäreittejä vedelle. [1, 22]

Puutteet padon rakentamisessa ja rakentamisen laadunvalvonnassa voivat myös lisätä sisäisen eroosion riskiä. Tällaisia puutteita voi esiintyä patomateriaalien tiivistysvaiheessa ja varsinkin tiivistystyössä edellä mainittujen rakenteiden ympärillä. Kuvassa 16 on esitetty padon läpi viedyn putken ympärille kehittyneen sisäisen eroosion sorruttama pato. [1, 22]

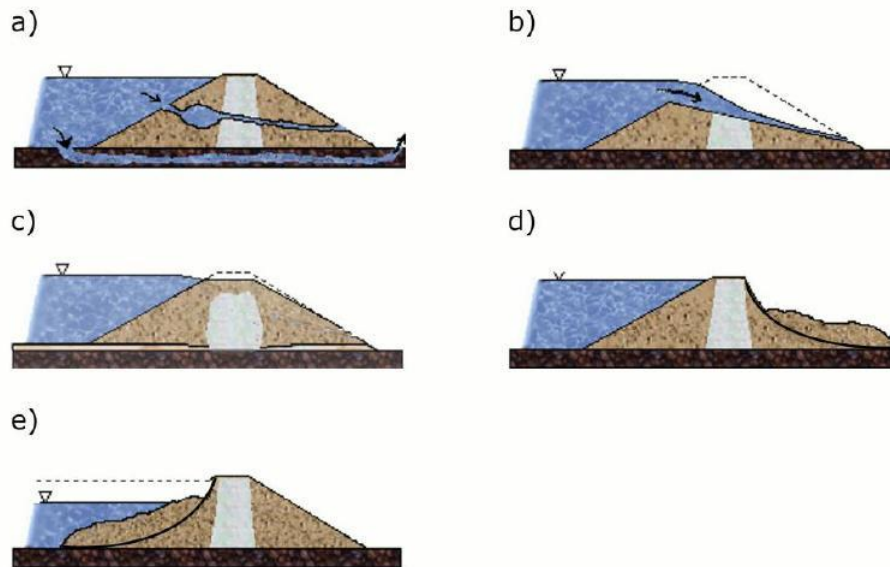


Kuva 16. Sisäisen eroosion sorruttama maapato.

Muita sisäisen eroosion riskitekijöitä ovat patorakenteen päällä kasvavat puut, joiden juuret voivat jättää patoon syviä reikiä, kun puu kaatuu esimerkiksi myrskyssä. Varmin tapa välttyä tältä riskiltä on kaataa puut, mutta joissakin kohteissa puut on tietyillä alueilla padossa säästetty virkistyskäyttöä ajatellen. Yleensä edellytyksenä on, että lähistöllä on saatavilla maamateriaalia puiden kaatuessa mahdollisesti syntyvien kuoppien välittömään täyttämiseen. Myös eläimet voivat aiheuttaa patovaurioita ja edesauttaa sisäisen eroosion muodostumista kaivamalla koloja patorakenteeseen. [22]

Merkkejä mahdollisesti pitkälle kehittyneestä sisäisestä eroosiosta ovat samean suoto-veden purkautuminen padon kuivan luiskan puolelta tai muualta kuivatusjärjestelmästä sekä kuoppien tai vajoamien ilmaantuminen minne tahansa patorakenteeseen tai

sen taakse. Pitkälle kehittyneessä tapauksessa voi patoaltaassa havaita pyörteen tai muun merkin veden virtauksesta vuotokanavaan. Alkavia merkkejä sisäisestä eroosios-
ta ovat suotoveden määrän lisääntyminen, lähteiden syntyminen padon taustaan ja
veden virtaus jonkin padon läpäisevän rakenteen, esimerkiksi putken tai tulva-aukon,
vierustassa tai sen reunaa pitkin. [7, 22]



Kuva 17. Maapadon vaurioitumismekanismeja: [7]

- a) Sisäinen eroosio
- b) Ylivirtaus
- c) Padon ja pohjamaan painuminen
- d) Liukupintasortuma (kuiva luiska)
- e) Liukupintasortuma (märkä luiska)

Maapadon suunnittelu on nykyaikaisista menetelmistä ja työkaluista huolimatta yhtä paljon taidetta kuin tiedettä. Monimutkaisten materiaalmallien ja analyysityökalujen käyttö edellyttää aina yksinkertaistuksia, joten mallit eivät koskaan vastaa luonnon todellista monimutkaisuutta. Tämän osoittavat modernin padonrakennuksen aikana tapahtuneet sortumat padoilla, joiden rakentamisessa sovellettiin nykyaikaista suunnittelua ja mitoitusta sekä asianmukaista rakentamistapaa. [18] Viimeisen neljänneksen vuosisadan aikana (1980–2005) on sortunut 38 suurta patoa, joista 36 ovat maa- tai louhepatoja. Yleisin syy maailmanlaajuisesti on ylivirtaus. [19]

4.6 Ylivirtaus

Padon muodostamaan tekoaltaaseen virtaavan veden määrän ylittäessä sieltä pois virtaavan määrän aiheutuu vedenpinnan nousua. Tämä voi hallitsemattomana aiheuttaa vaaratilanteen varsinkin maapadoilla, jotka on yleensä suunniteltu siten, ettei veden korkeus tavanomaisissa olosuhteissa saavuta padon harjaa. Mikäli vedenpinta nousee padon yläreunaa korkeammaksi esimerkiksi poikkeuksellisen tulvan ja altaan

juoksutuskapasiteetin ylittymisen takia, tapahtuu ylivirtausta. Muita syitä ovat esimerkiksi altaan vedenpintaan vaihteluja aiheuttavat kovat tuulet, maanvyöryt altaaseen, sulamis- tai muiden pintavesien äkillinen valuminen altaaseen ja samassa virrassa ylempänä olevan padon murtuminen tai vedenjuoksutus. Riippuen padon rakenteista ja siitä, miten ja mille korkeustasolle tiivistysosa sijoittuu, saattaa vaaratilanne syntyä jo matalammillakin vedenpinnan korkeustasoilla. Maapadot kestävät ylivirtausta rakennusmateriaalista riippuen yleensä erittäin huonosti, sillä virtaava vesi kuljettaa maa-ainesta mukanaan ja täten ilmiö kiihtyy virtauskanavan kasvaessa, johtaen yleensä tarpeeksi pitkään jatkuessaan padon sortumiseen. [7, 19, 24]



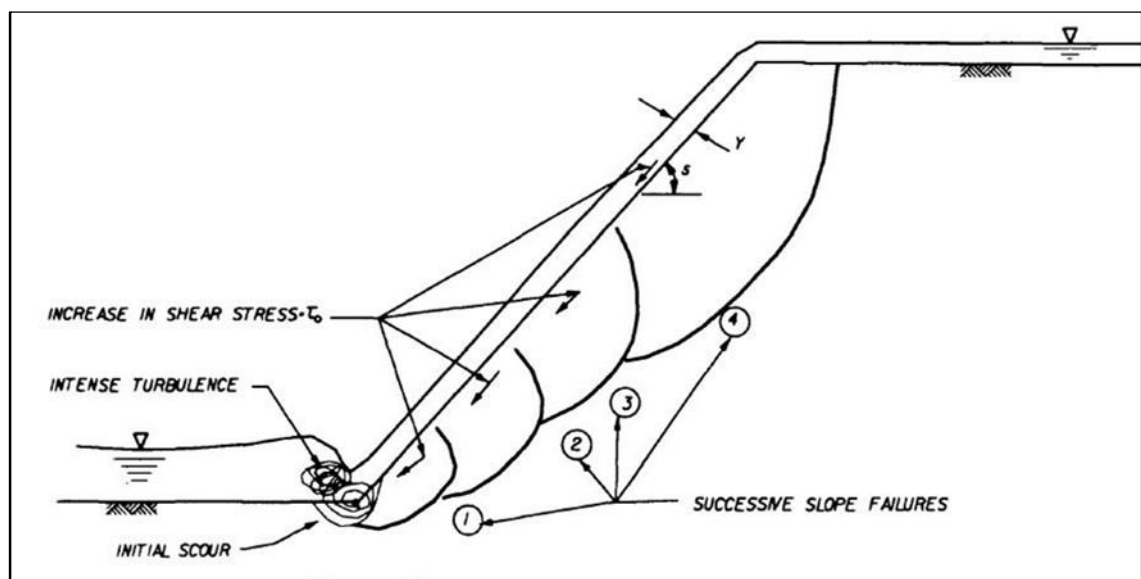
Kuva 18. Ylivirtaus maapadolla laboratorio-olosuhteissa. [19]

Ylivirtaustapahtuma voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa padon yli tapahtuva virtaus vahingoittaa vain padon kuivaa luiskaa ja osaa harjasta, mutta ei kuitenkaan vaikuta virtaaman suuruuteen, joka pysyy alkuvaiheessa suhteellisen vakiona. Kun padon harja alkaa pettää, muodostuu suureneva virtauskanava ja ilmiö alkaa kiihtyä. Kuvassa 18 on näkyvissä maapadolla tapahtuva ylivirtaus, joka on vahingoittanut padon kuivaa luiskaa ja jossain määrin myös padon harjaa. [19]

Ylivirtaus saattaa alkaa vahingoittaa patoa myös kuivan luiskan juuresta, padon ja pohjamaan rajakohdasta, kuten on esitetty kuvassa 19. Syynä on luiskakaltevuuden jyrkkä muutos, jolloin veden virtaus muuttuu turbulentiksi ja alkaa syövyttää luiskan juurta. Tässä tapauksessa ylivirtauksesta aiheutuvia vahinkoja vähentää padon taustassa mahdollisesti seisova vesi, joka ottaa vastaan osan veden liike-energiasta. [24]

Ylivirtauksen vaarallisuus on verrannollinen padon harjan ylittävään vedenkorkeuteen, sillä se vaikuttaa virtausnopeuteen ja virtauksen määrään. Kasvillisuus ja sen juuristo saattaa ehkäistä eroosion kehittymistä. Tällöin pato voi kestää ylivirtausta rajoitetun ajan varsinkin, mikäli virtaus tapahtuu tasaisesti pidemmällä harjan matkalla, eikä keskity vain tiettyyn kohtaan. Kuivan luiskän jyrkkyys vaikuttaa myös ylivirtauksen vaarallisuuteen, sillä loivat luiskat kestävät virtaavaa vettä jyrkkiä paremmin. [7, 24]

Padon kuivavara tarkoittaa padon harjan ja suunniteltua ylivettä (HW:tä) vastaavan vedenkorkeuden välistä korkeuseroa. Kuivavaran on oltava riittävä estämään padon ylivirtaus kaikissa tilanteissa, kuten tuulen tai aaltoilun seurauksena. Kuivavaran (ja myös tiivistysosan) suunnittelussa tulee ottaa lisäksi huomioon padon ja sen perustan painuminen. Pysyvien patojen harja on tehtävä vähintään $1,75 \cdot h$ (h =aallon maksimikorkeus) HW:n yläpuolelle. Tiivistysosan routimisvaara tai luiskän verhouksmateriaali saattaa edellyttää vieläkin korkeampaa harjakorkeutta. Esimerkiksi betonista verhousta pitkin aalto nousee korkeammalle kuin kiviheitokkeesta tehtyä. [1]



Kuva 19. Ylivirtauksen johtaminen progressiiviseen luiskasortumaan maapadolla. [24]

Kuva 19 selittää osittain, miksi homogeeniset maapadot kestävät vyöhykepatoja paremmin ylivirtausta. Niiden loivempi luiskakaltevuus vähentää ylivirtaavan veden nopeutta ja siten sen aiheuttamia vaurioita. Lisäksi homogeeniset maapadot rakennetaan plastisemmista, usein savea sisältävistä maamateriaaleista, jotka ovat vähemmän alttiita sisäisille vaurioille (eroosiolle) niiden pienemmän vedenläpäisevyyden ja suuremman koheesion ansiosta. Plastisten savien tiivistäminen optimia suuremmissa vesipitoisuuksissa johtaa kuitenkin alempaan lujuuteen, joten materiaalivalinta on usein kompromissi lujuuden ja muodonmuutoskestävyyden välillä. [24]

Ylivirtaukseen johtava patoaltaan vedenpinnan nousu altistaa padon myös muille riskitekijöille. Näitä ovat kasvavan hydraulisen gradientin myötä lisääntyvän suotovirtauksen aiheuttama mahdollinen sisäinen eroosio ja kuivan luiskan vettyminen ja mahdollinen eroosio. Nämä voivat tapahtua huomaamatta ja aiheuttaa lopulta padon sortumisen yhdessä ylivirtauksen kanssa. Täten pelkän ylivirtauksen vaikutus padon vakavuuteen on hankalaa määrittää, sillä ylivirtausta harvoin tapahtuu ilman näitä ilmiöitä. Huomionarvoista on se, että tavallista korkeammalle noussut vedenpinta kuormittaa patoa poikkeuksellisesti jo ennen kuin ylivirtausta tapahtuu ja ylivirtauksen tapahtuessa se ei ole ainoa riskitekijä padolla. Ylivirtauksen yleisin syy on tulvaluukkujen puutteellinen mitoitus tai niiden toimintahäiriö. [7, 24]

4.7 Padon vakavuus

Penkereen vakavuuteen vaikuttavat pohjamaan ominaisuudet, pengermateriaalit ja näiden geometria. Maa- ja louhepatojen murtumisen syynä on pohjamaan leikkauskestävyyden ylittyminen yleensä vain silloin, kun ne on perustettu kaltevalle maanpinnalle tai maa- tai kallioperässä kulkee vinoja kerrosrajoja tai heikkousvyöhykkeitä, joita pitkin leikkauspinta pääsee muodostumaan. Tasaiselle tai lähes tasaiselle pohjamaalle perustettujen maa- ja louhepatojen yleisimmät murtumisen syyt ovat aiemmin käsitelty hallitsematon suotovirtaus padon läpi tai sen alitse sekä ylivirtaus. [2, 17]

Maapatojen vakavuus on yleensä pienimmillään rakennustöiden päätyttyä, kun huokosvedenpaine on suurimmillaan, eikä se ole vielä ehtinyt tasaantua. Vakavuuden laskennassa huomioidaan huokosvedenpaine käyttämällä tehokkaita jännityksiä, mutta kokonaisjännityksiä voidaan käyttää tiivistysosalla, kun se on tehty savesta tai siltistä. Tällöin suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota ja se on suoritettava mahdollisimman hyvin valmista patorakennetta vastaavassa vesipitoisuudessa ja tiiviydessä. [1] Muita tarkasteltavia tilanteita ovat käyttötila (jatkuva suototila) sekä vedenpinnan nopea lasku ja siitä muodostuva huokospainetila sekä padon rakenteesta ja paikallisista olosuhteista riippuen myös muut tilanteet. [20]

Tarkemmissa laskelmissa on huomioitava eri materiaalien murtuminen erisuurilla muodonmuutoksilla. Vyöhykepadolle tehtävissä vakavuuslaskelmissa tulee siis koheesion ja kitkakulman arvoja määritellä huomioida, että kitkamaassa ja koheesiomaassa maksimilujuudet eivät toteudu yhtä suurilla muodonmuutoksilla. Esimerkiksi kitkamaan suurin leikkauslujuus mobilisoituu jo pienellä muodonmuutoksella, kun taas saavutettaessa saven suurin lujuus, voidaan kitkamaalle soveltaa enää jäännöslujuutta. Rakentamisen aikaista vakavuutta arvioidessa tulee valita epäedullisin mahdollinen kuormitustilanne, johon vaikuttavat padon tyyppi ja rakentamisjärjestys. Padon harjan leveydellä on maa- ja louhepadoissa vain vähän vaikutusta vakavuuteen,

joten leveyden määrää pääasiassa padon harjan käyttötarkoitus esimerkiksi ajotienä. [1, 17]

Maapatojen vakavuus käyttötilassa lasketaan tehokkailla jännityksillä huomioiden sekä padon läpi että alitse tapahtuva suotovirtaus. Tässäkin tapauksessa on otettava huomioon padon vakavuuden kannalta epäedulliset tekijät, esimerkiksi kuivan luiskan kylälästyminen sateen vaikutuksesta ja sen vaikutus suotovirtaukseen sekä altaan vedenpinnan nousu. [1] Vakavuuslaskelmissa vaadittava varmuusluvun arvo riippuu lähinnä siitä, kuinka tarkasti eri tilanteissa vallitseva huokospaine ja leikkauslujuusparametrit voidaan arvioida. [20]

4.8 Toimivuuden varmistaminen

Padoissa voidaan käyttää kohteen koon ja vaativuuden mukaan harkittua määrää instrumentointia padon rakentamisen ja käytön aikaisen toimivuuden varmistamiseksi. Kohteen seurannalla ei kuitenkaan voida korvata huolellista suunnittelua, vaan se on pelkkä työkalu, jolla varmistetaan rakenteen toiminta halutulla tavalla. Nykytekniikalla mittausten tarkkuus, luotettavuus ja taloudellisuus ovat parantuneet selvästi, joten seuranta tulee kysymykseen yhä pienemmissä hankkeissa. Automaattisilla, jatkuvasti mittaavilla laitteilla saadaan usein tietoa, jota ei muuten voitaisi hankkia kustannusten, henkilökunnan puutteen tai kohteen luoksepääsemättömyyden takia. [17]

Instrumentoinnin suunnittelu vaatii asiantuntemusta, jotta saadaan juuri ne tiedot, joista ollaan kiinnostuneita. Mittalaitteiden valinnassa on hyödyllistä, mikäli saatava tieto menee hiukan päällekkäin (toisin sanoen saadaan sama tieto useammasta mittalaitteesta), jotta mahdolliset virheet rakenteen toiminnassa voidaan varmistaa luotettavasti. Oleelliset mittaus suureet ovat: [17]

- siirtymät, muodonmuutokset,
- rakenteen ja pohjamaan rasitukset (betonipadoilla),
- huokosvedenpaine,
- nostevoima (betonipadoilla),
- märkäviivan sijainti (pohjavedenpinta),
- suotoveden laatu ja määrä,
- virtaussuunta ja -nopeus,
- lämpötila (routa).

Padon painumia voidaan yksinkertaisimmin seurata vaaitsemalla padon harjalle ja kuivaan luiskaan sijoitettuja mittapisteitä. Korkeammilla padoilla on tarpeen selvittää myös padon sisäisiä liikkeitä, jolloin tarvitaan painumamittareita, inklinometrejä ja ekstensiometrejä. Maanpainemittareilla voidaan myös mitata muodonmuutoksia välil-

lisesti. Optinen kuitu antaa mahdollisuudet sekä siirtymien että suotovirtauksen jatkuvaan arvioimiseen tarvittaessa koko padon pituudelta, mutta mittalaitteen hinnan takia menetelmä ei tule kysymykseen kuin harvoissa kohteissa. [1, 51]

Huokosvedenpaineet mitataan työn aikana asennettavien mittareiden avulla, jotka liitetään tietokoneeseen, jotta lukemaväli saadaan tarpeeksi tiheäksi. Vesipintoja voidaan havainnoida pohjavesiputkista. Padon läpi suotautuvan veden määrää voidaan mitata kuivatusjärjestelmän kokoojajoista tai -putkista asentamalla niille mittapatoja. Pumppaamalla hoidetun kuivatuksen tapauksessa pumppujen käyntiajoista ja tiedossa olevasta pumppaustehosta voidaan laskea suotoveden määrä. Padon ali ja ympäri suotautuvan veden määrä on vaikeampi arvioida, sen selvittämisessä voidaan hyödyntää pohjavesiputkien ja huokospainemittareiden paine-erotietoja. [1]

Mittauksissa on dokumentoitava myös tuloksiin mahdollisesti vaikuttavat taustatekijät, kuten hydrologiset ja meteorologiset olosuhteet. Pitkäaikaisella seurannalla saadaan selville padon niin sanottu normaalitila, jonka perusteella voidaan asettaa hälytysrajat eri suureille, esimerkiksi huokosvedenpaineelle ja vesipintojen korkeuksille. [17]

Padon tarkkailu ja monitorointi on ensiarvoisen tärkeää, sillä lähes kaikki vakavat patovauriot alkavat pienistä poikkeamista padon toiminnassa, johtaen lopulta suurempiin vaurioihin ja pahimmassa tapauksessa mahdolliseen onnettomuuteen. Monitoroinnilla ja mittausdatan nopealla käsittelyllä varmistetaan se, että poikkeamat padon normaalissa toiminnassa havaitaan tarpeeksi ajoissa, mikä on monessa tapauksessa oleellista patoturvallisuuden kannalta. [26]

4.9 Tyypilliset vauriot

Patorakenteet tarvitsevat jatkuvaa kunnossapitoa, jonka tarkoituksena on estää rakenteen heikkeneminen ja haitallisten suotovyöhykkeiden kehittyminen. Kunnossapito kohdistuu maapadoilla pääasiassa padon luiskaverhousien, suotamisen ja eroosion sekä kuivatusjärjestelmän kontrollointiin. Kunnossapitotarve todetaan tietyin väliajoin toistuvilla tarkastuksilla sekä jatkuvalla tarkkailulla. [23]

Padon ylävedenpuoleinen luiska on alttiina aaltojen ja jäiden kuluttavalle vaikutukselle, joka rikkoo sen verhousta ja johtaa pitkittyessään pintaeroosioon. Alaveden puolella sade- ja suotovedet, liikenne, routa ja maata kaivavat eläimet voivat vahingoittaa luiskaa. Lisäksi roudan sulamisen aikana ohut verhous saattaa pyrkiä liukumaan alas. Luiskavauriot on kuitenkin yleensä helppo havaita tarkastuksissa, ennen kuin niistä aiheutuu padolle vakavaa vaaraa. Padon harjan madaltuminen pohjamaan ja/tai patoraken-

teen painumisen tai padon (esimerkiksi liikenteellisen) kuormittamisen takia on usein vaikeampi ongelma. [23]

Painumat ja painumaerot saattavat aiheuttaa patorakenteeseen halkeamia, joihin suotovirtaus voi keskittyä johtaen sisäiseen eroosioon. Erityisen alttiita tälle ovat maapadon liitoskohdat muihin rakenteisiin sekä padon liittymäkohdat ympäröivään maastoon, varsinkin jos ne ovat jyrkkiä. Padon tiivistysosan ja rakenteen tai kallion rajapintaan saattaa syntyä puolijuoksevia, liettyneitä vyöhykkeitä, johtaen korkeisiin huokosvedenpaineisiin padon kuivan luiskan puolella. Padon pohjan tiivistämisessä ja yhdistämisessä pohjamaahan saattaa olla puutteita, ja tätä kautta voi tapahtua voimakasta vuotoa. Heikko kalliolaatu aiheuttaa myös ongelmia. [23]

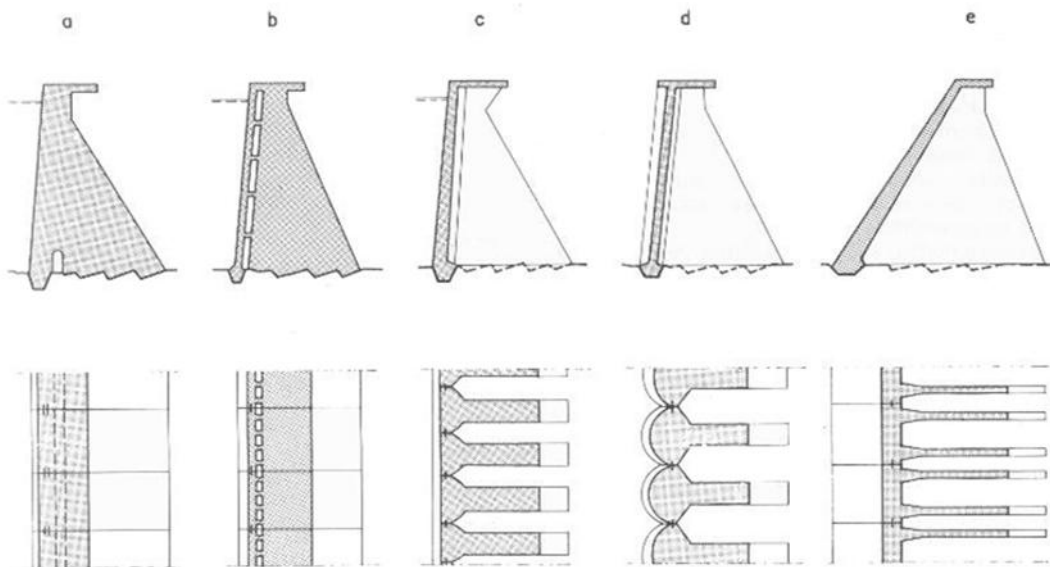
Homogeenisen maapadon tapauksessa padon vakavuuteen saattaa vaikuttaa suotoviihan kohoaminen padon sisällä. Syynä on usein hienoaineksen kulkeutuminen, mikä johtaa kuivan luiskan tiivistymiseen, vedenläpäisevyyden pienenemiseen ja huokospaineen kasvuun. Mikäli ilmiötä ei havaita ajoissa kuivan luiskan vettymisestä, saattaa se johtaa progressiiviseen luiskasortumaan. Vyöhykepadoiden suodattimet ja kuivatusjärjestelmä pitävät vedenpaineet hallinnassa mikäli ne toimivat suunnitellulla tavalla. Vyöhykepadoiden vaarana on hydraulinen murtuma silloin, kun kokonaisjännitys jossakin vyöhykkeessä alenee padossa tapahtuvien jännitysmuutosten takia. [23]

Näkyviä vaurioita maapatoon voi aiheutua sisäisen eroosion kehittyessä tarpeeksi pitkälle. Kuten edellä on kuvattu (kappaleet 4.3. ja 4.4.), ilmiö alkaa usein padon kuivasta luiskasta ja vuotokanava kehittyy patoaltaaseen päin. Kun suotautuva vesimäärä ja sen nopeus kasvaa tarpeeksi, vesi alkaa kuljettaa mukanaan hienoa maamateriaalia, jolloin vuotokanava kasvaa. Sisäinen eroosio alkaa vyöhykepadolla usein myös eri maamateriaalien rajapinnasta, esimerkiksi tiivistyssydäimestä ulos suotautuva vesi voi kuljettaa sen materiaalia suodatinkerrokseen. Kun maa-ainesta on kulkeutunut pois tarpeeksi, jää patoon tyhjätillaa, johon yläpuolinen materiaali lopulta putoaa, jättäen jälkeensä padon pintaan asti ulottuvan vajoaman. Parhaassa tapauksessa pato tällä tavoin ”korjaa” itseään ja tyhjätillan pudonnut maamateriaali tiivistää rakenteen pienentäen suotoa ja eroosiota, mutta tilanne voi myös kehittyä huonommaksi. Mikäli suotoveden kasvavasta määrästä ja muuttuvasta laadusta ei ole tehty havaintoja, saattaa tämä olla ensimmäinen ulkoinen merkki vauriosta, jolloin tilanne on ehtinyt kehittyä jo melko pitkälle. [26]

5 BETONIPADOT

5.1 Patotyytit ja rakenteet

Betonipadoista puhuttaessa jaetaan ne usein gravitaatio- ja holvipatoihin. Gravitaatiopatotyyppejä (kuva 20) ovat massiivinen pato, lamellipato ja laattapato. Kaksi viimeistä voidaan lukea ripapatojen alatyypeiksi ja ne ovat kevennettyjä versioita massiivisesta padosta. Gravitaatiopadon periaate on sama kuin maapadossakin. Padon oma massa yksinään tai yhdessä vedenpaineen alaspäin suuntautuvan komponentin kanssa siirtää vaakasuoran vedenpaineen perustalle pitäen padon paikallaan. Tällöin painovoiman ja vedenpaineen resultantin vaikutussuora on padon kuivan luiskan juureen nähden ylävirran puolella. Holvipadon toimintaperiaatteena on johtaa pääosa vedenpaineesta vaakasuoran holvin välityksellä sivuilla oleviin kallioihin tai tukiin. Pato voidaan muodostaa myös useasta vieri viereen sijoitetusta holvista, jolloin muodostuu moniholvipato. Suomen maasto-olosuhteet eivät tarjoa mahdollisuuksia holvipatojen rakentamiselle, eikä niitä maastamme löydy. [1, 27]



Kuva 20. Betonista rakennettuja gravitaatiopatotyyppejä. Kuvat a ja b esittävät massiivisia patoja, joista b on luiskaverhottu. C ja d ovat lamellipatoja ja e on laattapato.

Betonipadot ovat rakenteeltaan hoikempia verrattuna maapatoihin ja ne kohdistavat suurempia kuormia perustaan ja päätytukiin. Täten vaatimukset perustalle ovat suuremmat, sillä sen epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat rasisusten epätasaista jakautumista

padossa ja täten rakenteen ylimitoitusta. Betonipadon murtumismekanismit ovat tavallisesti äkkinäisempiä verrattuna maapatoon, sillä murtumista edeltävät oireet ovat usein huomaamattomampia. Maapatojen yleiset riskitekijät sisäinen eroosio ja luis-kasortumat eivät yleensä ole riskitekijöitä betonipadolla, vaan murtumiset johtuvat padon kaatumisesta, liukumisesta, perustan eroosiosta tai rakenteen murtumisesta. Ylivirtaus voi olla riskitekijä myös betonipadolla, sillä se voi syövyttää perusmaata tai -kalliota padon taustalla. [38]

Betonin käyttö patojen rakennusmateriaalina on viime aikoina vähentynyt. Yksi syy tähän on maanrakennuskoneiden ja -rakennustekniikan voimakas kehitys viime vuosikymmeninä. Lisäksi betonipadoille hyvin soveltuvat patopaikat on suureksi osaksi jo rakennettu. Mikäli padon vaatimuksena on vain pidättää vettä määrätyllä alueella, on se lähes aina taloudellisinta toteuttaa maa- tai louhepatona, mutta jos patoon sijoitetaan esimerkiksi voimalaitosrakenteita, on betonipato ensisijainen vaihtoehto. [1]

Betonipadon rakentaminen tulee kysymykseen myös silloin, kun maapatoon tarvittavia materiaaleja ei ole saatavissa taloudellisen matkan päästä patopaikalta. Myös maapadon luiskien tukeminen rakennuspaikan ahtauden, padon muodon, perustamisolosuhteiden tai työaikaisten järjestelyjen takia saattaa johtaa niin kohtuuttomiin kustannuksiin, että betonipato on kokonaistaloudellisesti kannattava. Muita syitä betonipadon valintaan ovat patopaikan ongelmalliset ilmasto-olosuhteet, jotka haittaavat maapadon rakentamista. Betonipatoihin on yksinkertaisempaa rakentaa suuren kapasiteetin tulva-aukot, joten padon alttius ylivirtaukselle suosii betonipadon valintaa. [1]

Patopaikan geometria usein määrää valinnan gravitaatio- ja holvipadon välillä, mutta muitakin seikkoja voi tulla kysymykseen. Holvipato tarvitsee toimiakseen kohtuullisen jyrkkäreunaisen patopaikan, jossa kuormat voidaan siirtää reunatuille, kuten kuvassa 21. Tällaisessa paikassa holvipato tulee edullisemmaksi, sillä se vaatii huomattavasti vähemmän rakennusmateriaalia. Holvipato tulee kysymykseen, mikäli patopaikat leveyden suhde korkeuteen on 10:1 tai pienempi, ja pienemmillä suhteilla kuin 5:1 se on hyvin todennäköisesti edullisin patotyyppi. [16]

Holvipato vaatii kantavan perustan, jonka muodonmuutosmoduuli ihanteellisessa tilanteessa on jonkin verran betonin moduulia pienempi, sillä holvipato ei kestä epätaisia painumia tai siirtymiä. Korkeilla betonipadoilla perustan lujuuden tulee olla suuri, ja mikäli padon pohjapinta-alaa joudutaan suurentamaan lähellä perustustasoa pohjapaineen pienentämiseksi, saattaa gravitaatiopato tulla edullisemmaksi. Myös tulvaaukkojen kapasiteettivaatimukset saattavat vaikuttaa patotyyppin valintaan, varsinkin, mikäli ne on patopaikan takia sijoitettava itse patoon. Gravitaatiopatoon on helpompi rakentaa suuren kapasiteetin tulva- ja ylivirtausaukot. [16]

Padon perustan vedenläpäisevyys vaikuttaa betonipatoon kohdistuvaan nosteeseen ja sitä kautta vakavuuteen. Koska holvipato ei vastusta vedenpainetta massallaan, nosteen vaikutus sen vakavuuteen ei ole niin suuri kuin gravitaatiopadolla. Gravitaatiopato taas usein vaatii hankkeen kokonaishintaan vaikuttavia, kallioon sijoitettuja katkaisu- ja kuivatusrakenteita hallitsemaan suotoa ja nostetta. Suuret lämpötilamuutokset patopaikalla voivat aiheuttaa huomattavia jännityksiä ohutprofiiliseen holvipatoon. Tällöin eristämisen, lämpösuojakäsittelyn tai rakennepaksuuden kasvattamisen myötä muodostuvien lisäkustannusten takia voi gravitaatiopato tulla edullisemmaksi. [16]



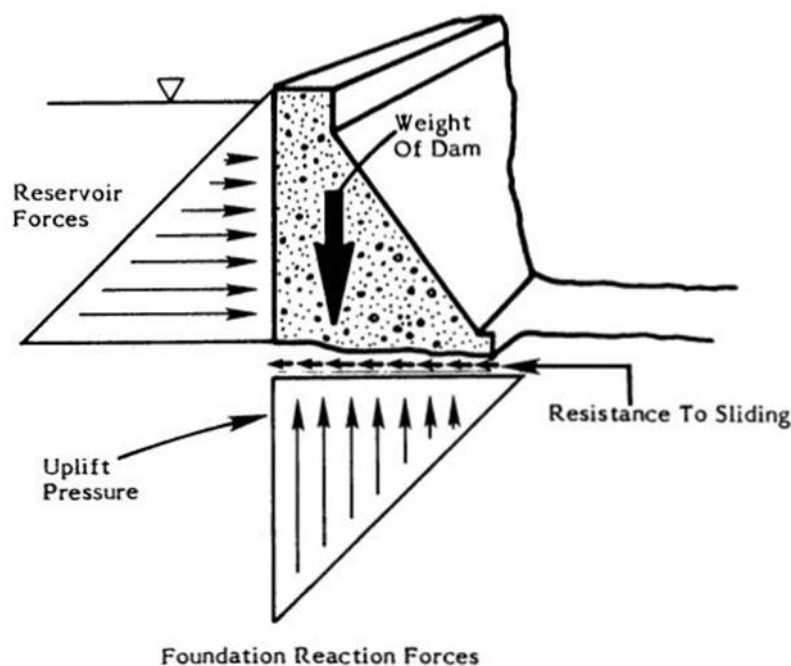
Kuva 21. Manavgatin holvipato Turkissa. Kuvassa holvipadolle tyypillinen, jyrkkäreunainen patopaikka. [59]

Gravitaatiopatojen alatyypeistä ripapadot tulevat kysymykseen hyvin monenlaisilla patopaikoilla, mutta ihanteellisin on kanjoni kohtuullisen loivilla seinillä, jolloin padon liittäminen niihin on helpompaa. Ripapadon etuna massiiviseen gravitaatiopatoon nähden on pienempi rakennusmateriaalin tarve, ja sillä saavutetaan 30...40 % betoni-massasäästö massiiviseen patoon verrattuna. Tämä perustuu pienempään nosteeseen padon alla. Ripapato vaatii kuitenkin lujemman perustan, sillä pienemmän pohjapinta-alan takia pohjamaan rasitukset ovat suuremmat. Pohjalaattojen avulla se voidaan kuitenkin perustaa huonompilaatuisellekin kalliolle tai joissakin tapauksissa myös maanvaraisesti. Ripapadot kestävät myös suhteellisen hyvin epätasaisia siirtymiä, mut-

ta koska ripapadon pohjan paksuus ja sitä myöten suotomatka padon alitse on paikoitellen pieni, vaativat ne suhteellisen vesitiiviin perustan. [16, 27]

5.1.1 Gravitaatiopato

Gravitaatiopadot suunnitellaan siten, ettei rakenteeseen synny merkittäviä vetojännityksiä. Puristusjännityksetkin jäävät yleensä melko alhaisiksi betonin lujuuteen nähden, joten vahvaa raudoitustakaan ei tarvita. Normaalikuormitustapauksissa betonipadoilla ei saa esiintyä vetojännitystä padon yläveden puoleisessa reunassa. Massiivisissa raudoittamattomissa padoissa ei vetojännityksiä yleensä sallita lainkaan. Kuvassa 22 on esitetty tyypillinen gravitaatiopato sekä oleellisimmat siihen kohdistuvat rasitukset. [1, 28]

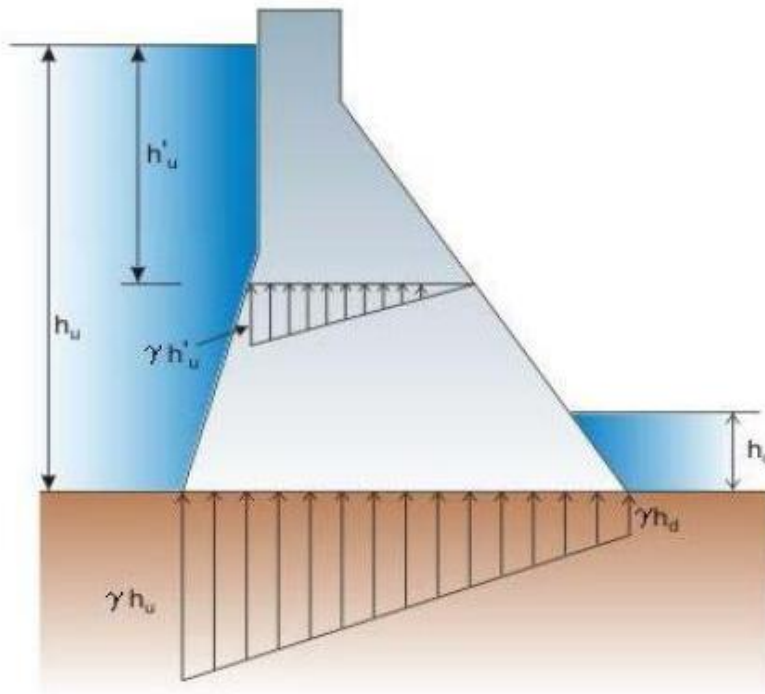


Kuva 22. Betoniseen gravitaatiopatoon kohdistuvat voimat. [38]

Betonipatojen perustan kantavuus on erittäin tärkeää, koska sille kohdistuvat rasitukset nousevat yleensä suuremmiksi kuin vastaavalla maapadolla. Betonipato on myös herkempi epätasaisille painumille. Täten joudutaankin patopaikalla usein kaivamaan kallio esiin, sillä vain harvoin maakerrokset kestävät betonipadon niille aiheuttamat rasitukset. Kallioperustalle on myös helpompi asettaa tiiviysvaatimuksia vedenläpäisevyyden suhteen. Vedenläpäisevyys mitataan vesimenekkikokeilla pumppaamalla kooreikiin vettä ja mikäli vesimenekki on korkeintaan $0,1 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{atm} \cdot \text{m})$, voidaan kalliota pitää riittävän tiiviinä. Muussa tapauksessa sitä tiivistetään injektoimalla. [1]

Maanvaraisten patojen perustalle ei aseteta vastaavaa vedenläpäisevyysvaatimusta, vaan suotovesimäärät ovat tapauskohtaisia. Oleellisempaa on virtauksen voimakkuus

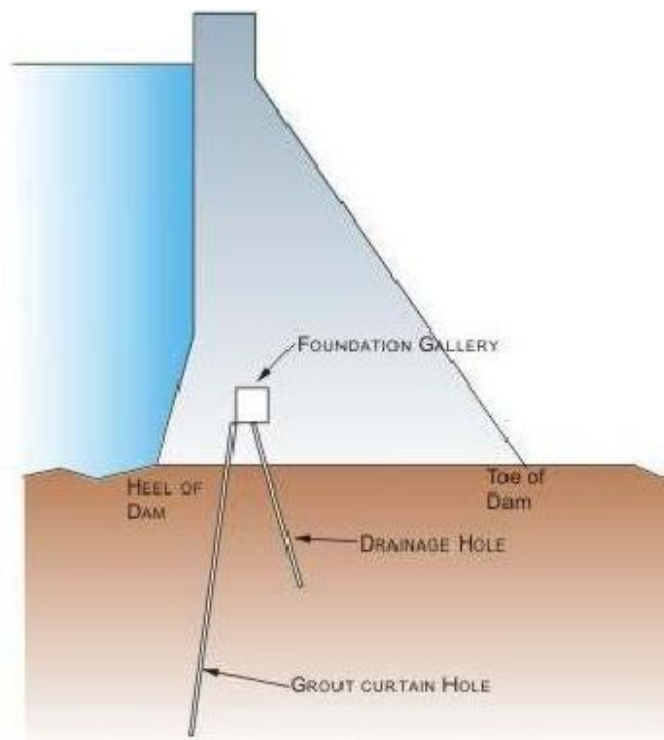
ja sen kyky kuljettaa maa-ainesta mukanaan. Tätä voidaan arvioida määrittämällä niin sanottu painollinen vuotosuhde, joka tarkoittaa painollisen vuotomatkan suhdetta vesipintojen korkeuseroon. Eri maalajeille on annettu ohjearvot, jotka perustuvat valmiista padoista saatuihin kokemuksiin. [1]



Kuva 23. Betonipadon perustassa ja missä tahansa padon vaakasuuntaisessa leikkauksessa vaikuttava noste. Kuvassa kuivatusjärjestelmää ei ole huomioitu. [29]

Eräs merkittävimmistä betonipatoon kohdistuvista kuormista on veden hydrostaattinen paine, joka kohdistaa patoon sivusuuntaisen voiman. Tämän voiman hallitsemiseksi on gravitaatiopadolla oleellista padon liittyminen perustaan sekä patoon kohdistuvien voimien resultantin paikka sen kaatumisen estämiseksi. Parhaan tuloksen saamiseksi on rapautunut ja rikkinäinen kallio poistettava ja kallio pyrittävä louhimaan resultantin suuntaa vastaan kohtisuoraksi. Mikäli kalliossa on heikkousvyöhykkeitä ja padon varmuus liukumista vastaan riittämätön, voidaan padon ylävedenpuoleiseen kantaan louhia kalliorauhoitetulle kynnyksrakenteelle, jolloin padon liukumiseen vaaditaan lisäksi joko kynnyksen leikkauskestävyyden ylittyminen tai sen edellä olevan maa- tai kalliomassan siirtyminen. Kallion varaan perustettaessa tulee perustan kantavuus harvoin kriittiseksi tekijäksi suomalaisissa kallioissa, tosin pehmeämpiä hiekka- ja savikiäkin tavataan. Maanvaraisissa padoissa on perusmaan murtuminen tarkasteltava erityisen huolella. Pieniä patoja on Suomessa perustettu esimerkiksi silttimoreenin varaan. [1]

Betonipadon ja sen perustan huokokset, halkeamat ja saumakohtat täyttyvät väistämättä vedellä, jolloin patoon kohdistuu hydrostaattisia voimia. Rakenteen ulkoisissa pinnoissa vaikuttava huokosvedenpaine on ulkoisen vedenpaineen suuruinen ja rakenteen sisällä sen oletetaan muuttuvan suoraviivaisesti. Rakenteen ja perusmaan tai kallion välissä, kohtisuoraan rakenteen pohjapintaa vastaan vaikuttaa varsinainen nostevoima, jolla saattaa olla joissakin tapauksissa oleellinen vaikutus rakenteen kokonaisvakavuuteen ja se täytyy siten ottaa suunnittelussa huomioon. Nosteen suuruuden oletetaan pitkän ajan tilanteessa olevan padon ylävedenpuoleisella reunalla täyden vedenpaineen suuruinen ja laskevan lineaarisesti nolnaan tai alavedenpuoleisen vedenpaineen suuruiseksi, mikäli padolla sellaista on. Nosteen suuruutta voidaan arvioida myös suotovirtausanalyysin avulla, mikäli käytössä on padon perustan vedenläpäisevyyssiedot. [1, 15, 27]



Kuva 24. Katkaisurakenne ja perustan kuivatusjärjestelyt betonisella gravitaatiopadolla. [29]

Patoon voidaan tehdä tarkastuskäytäviä ja -kuiluja, jotka toimivat salaojina ja pienentävät huokosvedenpainetta ja nostetta. Niitä voidaan käyttää sekä rakenteiden että suotovesimäärien tarkkailuun, mutta pienemmissä rakenteissa niitä ei aina ole mahdollista toteuttaa. Padon perustana toimivaan kallioon voidaan myös porata kuivatusreihiä, jotka tehdään usein lähelle padon ylävedenpuoleista reunaa. Tällöin on huolehdittava siitä, että reiät eivät muodosta suoraa poistoreittiä padotetulle vedelle. Täten kuivatusrakenteiden käyttö vaatii usein suotovirtauksen hallintaa, joka toteutetaan katkaisuseinällä tai injektoimalla aikaan saadulla seinämäisellä rakenteella. Valinta

riippuu perustan vedenläpäisevyydestä, ja mikäli injektointi ei onnistu, käytetään katkaisuseinää. Katkaisusyvyyden tulisi olla 65...80 % vesipintojen korkeuserosta. [1, 15]

Kuvassa 24 on esitetty ratkaisu kalliolle perustetun padon sisään asennetusta kuivatusjärjestelmästä. Veden suotomatkaa on pidennetty injektointiverholla, jonka alavedenpuolelle on sijoitettu halkaisijaltaan 100 mm teräsputket. Putket toimivat perustan kuivatuksessa estäen liiallisten vedenpaineiden syntymistä. Putkien koko, väli ja syvyys määräytyvät perustan ominaisuuksien (esimerkiksi kalliolaadun) ja patoaltaan syvyyden mukaan. Ohjearvo putkien ulottumissyvyydelle on 20...40 % altaan syvyydestä ja 30...75 % injektointiverhon syvyydestä. Injektointiverhon syvyys taas riippuu perustan laadusta ja voi vaihdella suhteellisen paljon, välillä 30...70 % vesipintojen korkeuserosta. Putket johtavat suotovedet padon sisällä olevaan tarkastuskäytävään, joka toimii samalla kuivatusrakenteena. Käytävä on hiukan kallistettu vesien kokoamiseksi yhteen paikkaan, josta ne voidaan pumpata eteenpäin. Käytävää käytetään myös työnaikaisena injektointialustana, josta porataan reiät perustan injektointia varten, kun padon perusta on valettu. [1, 29]

Kuivatusjärjestelyiden lisäksi padon vakavuutta voidaan parantaa ankkureiden avulla, jotka voivat olla esijännitettyjä tai jännittämättömiä. Ankkureiden toimintaperiaate on kuitenkin ristiriidassa gravitaatiopadon toimintaperiaatteen kanssa, joten niitä käytetään vain poikkeustapauksissa. Ankkureille sallittava osuus padon varmuudesta vaihtelee sen mukaan, voidaanko niiden jännitys myöhemmin tarkistaa. [27]

Betonista rakennettu pato tulee jakaa liikuntasaumoilla osiin (monoliitteihin), joiden koko riippuu betoniin käytetyn sementin laadusta ja määrästä. Liikuntasaumojen avulla vältetään betonin halkeilu, joka on seurausta betonin jäähtymisen, kuivumisen ja lämpötilan laskun siihen aiheuttamista jännityksistä, jotka saattavat ylittää betonin vetolujuuden. Halkeamat ovat haitallisia betonin vesitiiviyyden, lujuuden ja ulkonäön kannalta. Liikuntasaumat ovat pystysuoria ja virransuuntaisia, ja niiden väli on tavallisesti noin 6...12 metriä. Pidempää saumaväliä voidaan käyttää, mikäli pienennetään betonin sementtimäärää tai hidastetaan sen sitoutumista. Myös betonin jäähdyttäminen sitoutumis- ja kovettumisaikana mahdollistaa suuremman saumavälin. Betonin kovettuessa tuottama hydrataatiolämpö on suurinta massiivisilla betonipadoilla, jotka vaativat siten huolellista suunnittelua ja eniten toimenpiteitä. Betonimassan esijäähdytys on tehokain tapa alentaa betonin lämpötilaa. Siinä betoniin käytettäviä kiviaineksia ja vettä jäähdytetään erikseen haluttuun lämpötilaan. Jälkijäähdytys vähentää halkeilua ja se voidaan hoitaa betonin sisään sijoitetuilla jäähdytysputkilla. [1, 27]

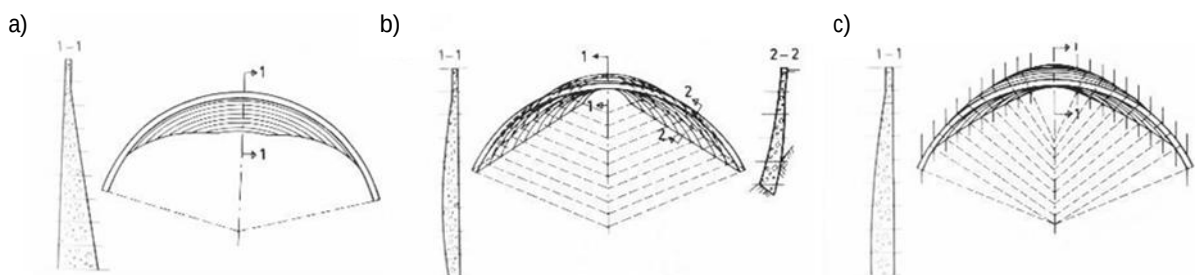
Myös rakenteen käyttötarkoitus vaikuttaa valittavaan liikuntasaumaväliin, jos kysymyksessä ovat koneasemarakennukset tai juoksutusrakenteet. Saumat sallivat raken-

teen kutistumisen, mutta laajeneminen ei pääse tapahtumaan vapaasti, sillä viereiset monoliitit valetaan toisiaan vasten. Valu toteutetaan kuitenkin niin, että betonin tartunta estetään eikä betoniteräksiä asenneta sauman yli. Tiivistemateriaalina yleisin on edelleen rst-pelti, mutta myös pvc-nauhoja käytetään. Liikuntasaumojen lisäksi rakennetta jaetaan työsaumoilla valuosiin, joista vierekkäisillä tulisi pitää viikkojenkin väli, jolloin suurin osa betonin kuivumiskutistumisesta on ehtinyt tapahtua. Myös työsaumat varustetaan tiivistepelleillä tai -nauhoilla. [27]

5.1.2 Holvipato

Gravitaatiopadosta poiketen holvipadon vakavuus perustuu sekä padon omaan massaan että kuormien siirtymiseen päätytuille, jotka ovat yleensä kalliota. Patopaikan ominaisuuksilla ja geometrialla onkin suuri vaikutus holvipadon suunnitteluun ja mitoitukseen, sillä se vaatii päätytukien lisäksi lujan kallioperustan. Padon pituuden suhde korkeuteen on tärkeä patopaikan soveltuvuutta kuvaava luku, ja parhaat olosuhteet holvipadolle ovat silloin, kun holvin jänneväli ei muodostu suuremmaksi kuin 3...5 kertaa padon korkeus. Hiukan tätä suuremmillakin suhteilla saattaa holvipato tulla edullisimmaksi vaihtoehdoksi nykyaikaisten suunnittelu- ja laskentamenetelmien ansiosta. [1, 16, 30]

Holvipadon valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat myös esimerkiksi perustan kaivutarve, virran työnaikainen hallinta, rakennusmateriaalien saatavuus ja tulva-aukkojen mitoitus. Tavanomaista leveämmällekin paikalle voidaan harkita käytettäväksi holvipatoa tietyin erityisratkaisuin, joita ovat muotoiltujen nivelten käyttö sivutuilla vetojännitysten vähentämiseksi, betonin esijännitys ja lämpöliikkeiden hallinta. [1, 16, 30]



Kuva 25. Erilaisilla geometrioilla toteutettuja holvipatoja: a) vakiosäteinen holvi, b) vakiokulmainen holvi, c) muuttuväsäteinen holvi [1]

Holvipadon geometriselle muodolle on useita vaihtoehtoja, joista yksinkertaisin ja aikanaan yleisin on lieriö. Siinä ylavedenpuoleinen pinta on pystysuora ja alavedenpuoleinen pinta kalteva, jolloin holvin paksuus kasvaa tasaisesti alaspäin. Tämä on nimeltään vakiosäteinen holvi (constant-radius arch, kuva 25, a), joka saattaa yhä tulla kysymykseen, kun padon pituuden ja korkeuden suhde on suuri. Nykyään käytetyt holvi-

patotyyppit ovat vakiokulmainen holvi (constant-angle arch) ja muuttuväsäteinen holvi (variable-radius arch), joilla saavutetaan säästöjä betonimäärissä verrattuna vakiosäteiseen holviin. [1, 30]

Holvipato on staattisesti epämääräinen rakenne, ja sen suunnittelu on siten työläämpää ja vaativampaa kuin muiden patotyyppien. Holvipadon mitoituksessa tarvitaan tavallisesti kehittyneitä laskentamenetelmiä, mutta nykyisin työtä on helpottanut tietotekniikan kehitys. Holvipadon perustan merkitys on suuri, joten patopaikan luonnollinen pinta tulisi kaivaa ehjään kallioon saakka ja tasoittaa mahdollisimman hyvin, tarvittaessa myös louhimalla. Sama pätee padon sivutukien perustamiselle, sillä kaikki epätasaisuudet perustassa johtavat valmiin padon rasitusten keskittymiseen epäedullisesti, jolloin pato joudutaan ylimitoittamaan vain tiettyjen kohtien takia. Tästä johtuen ylilouhintaa tasaisen perustan saavuttamiseksi on usein edullisempi vaihtoehto. Huomioitava seikka on myös holvipadon patolinjan jatkeen (tangentin) ja sivutukien kallion korkeuskäyrien välinen kulma, jonka pitäisi olla padon ylemmässä puoliskossa vähintään 40 astetta, jotta kallioon ei muodostu suuria paikallisia leikkausjännityksiä. [1, 16]

5.1.3 Yhdistetyt maa- ja betonipadot

Yhdistetyt padot hyödyntävät maa- ja betonipatojen parhaita ominaisuuksia. Useimmiten ne koostuvat betonisesta gravitaatiopadosta, joka on joko massiivista tai ripapatotyyppiä ja siihen liittyvistä maapato- tai louhepato-osuuksista. Betonipatoon rakennetaan tulva-aukot, joita voidaan käyttää myös rakennusaikaiseen virtaamien hallintaan. Vaadittaessa suurta ylivirtauskapasiteettia, rakennetaan betonipatoon ylivirtausosuuksia. Maapato-osuudet taas hyödyntävät paikallisia rakennusmateriaaleja johtaen kokonaistaloudellisesti edulliseen lopputulokseen. [1, 16]

Hydraulisten ominaisuuksien lisäksi yhdistetyn padon valintaan vaikuttaa maaston topografia. Yhdistetty pato sopii paikkaan, jossa maaston korkeuserot ovat loivapiirteisempiä kuin esimerkiksi holvipatoa varten. Laakeilla, laaksomaisilla alueilla esiintyy lisäksi suurehkoja tulvavirtaamia, jolloin pelkkää maapatoa varten vaadittavat tulva-aukot tai ohivirtaustunnelit tulisivat kalliiksi ja rakennusaikaiset järjestelyt hankaliksi. Tällöin ratkaisu on liittää maapatoon tulva-aukoilla varustettu betoniosuus. Yhdistettyä patoa suunniteltaessa esteeksi saattaa nousta perustan kantavuus betonipato-osuuden kohdalla. Mikäli padotettavien vedenpintojen korkeusero on yli 10 m, vaaditaan yleensä kallioperusta. [1, 16]

5.2 Betonipatojen käyttöikä

Lähtökohtaisesti betonipatojen säilyvyys ja käyttöikä eroavat maapadoista, sillä betonipadot ovat herkempiä useille ympäristön rasituksille. Betonipatoihin vaikuttavat luonnolliset rasitukset voivat olla mekaanisia, fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia ja ne voidaan jaotella lisäksi pysyviin, tilapäisiin tai onnettomuusluontoisiin rasituksiin. Suunnittelun helpottamiseksi ympäristötekijöitä tulisi mahdollisuuksien mukaan kuvata numeerisilla arvoilla, mutta tämä on lähtökohtaisesti vaikeaa. Monessa yhteydessä puhutaan pelkästään ympäristön aggressiivisuudesta ja viitataan siten rakenteeseen kohdistuvan rasituksen suuruuteen. Rakenteen suunnitteluarvoja, kuten esimerkiksi betonin vesi-sementtisuhdetta, peitepaksuutta ja laatuluokkaa voidaan kuvata numeerisesti ja joissain tapauksissa näiden suureiden avulla voidaan muodostaa suunnitteluparametreista riippuvia, kvantitatiivisia arvoja rakenteeseen kohdistuville rasituksille ja erityisesti niiden vaikutuksille. [34]

Suomen betonipadoista suuri osa on vanhoja, joten tutkittaessa olemassa olevien rakenteiden säilyvyyttä ja vaurioita, on huomioitava rakennusaikaiset suunnitteluohjeet ja laatuvaatimukset. Patorakenteissa vielä 1950-luvulle asti käytetyn betonin sideaineen laatu ei vastaa nykyvaatimuksia pitkäaikaissäilyvyyden osalta. Syitä tähän ovat olleet sideaineen saatavuusongelmat, valmistusajan betoniteknologian taso sekä betonin seosaineiden (lentotuhka, masuunikuona, silika) laatu ja niiden käyttökokemusten puute. Näiden puutteiden lisäksi patorakenteisiin kohdistuvien intensiivisten rasitusten myötä on betonipatoihin syntynyt vaurioita joskus jo lyhyen käyttöajan jälkeen.

Syynä mineraalisten seosaineiden käyttöön on ollut muun muassa sideaineen lämmönkehityksen rajoittaminen massiivisissa voimalaitosrakenteissa sekä tarvittavan lujuuden saavuttaminen. Nykyään näiden seosaineiden ja lisäaineiden käytöllä on todettu olevan lisäksi haittavaikutuksia, joita voidaan rajoittaa valitsemalla betonin koostumus oikein sekä huomioimalla siitä johtuvat vaatimukset työn suorituksessa. Tämän opinnäytetyön puitteissa keskitytään ensisijaisesti olemassa olevien patojen käyttöikään eikä niinkään siihen, miten uusia patoja rakennettaessa käyttöikä tulee huomioida. [36]

5.3 Käyttöikään vaikuttavat tekijät

Vaikka betonirakenteisiin kohdistuu monimuotoisia rakenteen laatuun haitallisesti vaikuttavia prosesseja, kuten jäätymis-sulamisrasitusta, alkali-silikareaktioita ja kemiallisia rasituksia, ei rakenteen betonin kunto ole usein ratkaiseva tekijä käyttöiän kannalta. Ratkaisevampaa on tavallisesti betoniterästen korroosiokestävyys, joka määrittelee rakenteen toimivuuden ja kestävyys etenkin vaativissa olosuhteissa. Betonirakenteen kunnolla ja ominaisuuksilla on suora yhteys terästen kuntoon, sillä ne ovat riippu-

vaisia betonipeitteen suojavaikutuksesta. Patorakenteet kuitenkin muodostavat vesirakentamisessa oman kategoriansa, sillä niissä harvoin käytetään jännitettyjä rakenteita ja teräsmäärät ovat tavallisesti pieniä, joten myös terästen vaikutus vaurioiden syntyyn on pienempi kuin muissa vesirakenteissa. [60]

Patorakenteissa ei myöskään käytetä korroosioherkkää raudoitusta ja betonin peitepaksuudet ovat yleensä betoninormien minimivaatimuksia suurempia. Betonin laatu-tekijät ja säilyvyyteen vaikuttavat ominaisuudet ovat siis käyttöiän kannalta tärkeässä asemassa. Ympäristön vaikutus on merkittävä, kun pato on aggressiivisen ympäristön vaikutuksen alainen, kuten on tilanne esimerkiksi betonisilla jätepadoilla. Kuten muihinkin betonirakenteisiin, betonipatoihin kohdistuvat rasitukset vaikuttavat yhdessä enemmän kuin niiden erillisvaikutusten summa. [35, 36]

Taulukko 2. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien suositeltavat raja-arvot. [Standardi SFS EN 206-1]

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosio- tai syöpy- misriskiä	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäädätyssulatusrasitus				Aggressiivinen kemiali- nen ympäristö		
						Merivesi			Muun kuin meriveden kloridit									
	X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3
Suurinw/c	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Vähimmäis- lujuusluokka	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Vähimmäis- sementti- (määrä) (kg/m³)	---	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Vähimmäis- ilmamäärä (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a	---	---	---
Muut vaatimukset												Standardin [A1] EN 12620 <A1] mukainen kiviaines, jolla on riittävä jäädätyssulatuskestävyys				Sulfaatinkes- tävä sementti ^b		

^a Jos lisähuokostusta ei käytetä, betonin toiminnalliset ominaisuudet tulisi testata sopivalla testausmenetelmällä vertaamalla sitä betoniin, jonka jäädätyssulatuskestävyys ko. rasitusluokassa on osoitettu.

^b Jos SO₂ johtaa rasitusluokkiin XA2 ja XA3, on ehdottomasti käytettävä sulfaatinkestävää sementtiä. Jos sementti on luokiteltu sulfaatinkestävyyden perusteella, rasitusluokassa XA2 (ja jos sitä voidaan käyttää, myös rasitusluokassa XA1) tulisi käyttää tavallista tai korkean luokan sulfaatinkestävää sementtiä. Rasitusluokassa XA3 tulisi käyttää korkean luokan sulfaatinkestävää sementtiä.

Tärkeimmät betonin säilyvyyteen vaikuttavat materiaalitekijät on esitetty standardissa SFS-EN 206-1 (taulukko 2), jossa annetaan betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot eri rasitusluokissa suunnitellun käyttöiän mukaan. Tärkeimmät tekijät ovat betonin vesi-sementtisuhde, lujuusluokka, sementtimäärä, sekä vähimmäisilmamäärä, joka kertoo osittain pakkasenkestävyydestä. Näiden vaatimusten lisäksi suunnitellun käyttöiän saavuttamiseen vaikuttavat betonin riittävä ja asianmukainen jälkihoito sekä betonin sisältämän kiviaineksen ominaisuudet. [35, 37]

5.3.1 Sementin ominaisuudet

Sementin ominaisuudet ja siihen liittyvät betonin suureet ovat tärkeässä asemassa betonirakenteen pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Sementtilaatujen sopivuus eri rasitusluokkiin vaihtelee niiden koostumuksen mukaan. Standardissa SFS-EN 206-1 on esi-

tetty suositus betonin koostumusta koskeviksi raja-arvoiksi koskien betonia, johon on käytetty standardin EN 197-1 mukaista portlandsementtiä CEM I ja nimellisraekooltaan maksimissaan 20...32 mm kiviainesta (taulukko 2). Standardissa ei kuitenkaan oteta huomioon sementtilaatujen kaikkia rasitusluokkakohtaisia eroavaisuuksia. Tästä esi-merkkinä eri sementtilaatujen soveltuvuus karbonatisoitumis- ja kloridirasituksessa on esitetty taulukossa 3. [35]

Tärkeä betonimassan ominaisuus on myös vesi-sementtisuhte, sillä se määrää suurelta osin kovettuneen betonin läpäisevyyden ja huokosrakenteen vaikuttamalla valmiin betonin kapillaarihuokosverkoston jatkuvuuteen. Mitä harvempi ja epäjatkuvampi kapillaarihuokosverkosto on, sitä vähemmän vettä ja siihen liuenneita aineita betoniin pääsee imeytymään.

Taulukko 3. Sementtilaatujen kestävyys karbonatisoitumis- ja kloridirasituksessa. [35]

Sementtityyppi	Koostumus			Kestävyys	
				Karbonati-soituminen	Kloridirasitus
CEM I	Portland			Hyvä	Huono
CEM II/A-V	Portland	Lentotuhka	6-20 %	Kohtalainen	Hyvä
CEM II/B-V	Portland	Lentotuhka	21-35 %	Kohtalainen	Erinomainen
CEM II/A-S	Portland	Masuunikuona	6-20 %	Huono	Erittäin hyvä
CEM II/B-S	Portland	Masuunikuona	21-35 %	Hyvin huono	Erinomainen
CEM II/A-D	Portland	Silika	6-10 %	Kohtalainen	Hyvä
CEM III/A	Portland	Masuunikuona	36-65 %	Älä käytä	Erinomainen
CEM III/B	Portland	Masuunikuona	66-80 %	Älä käytä	Erinomainen
CEM III/C	Portland	Masuunikuona	81-95 %	Älä käytä	Ei tiedetä

Käytännössä vesi-sementtisuhteen maksimiarvo on noin 0,6 ja betonimassan tulee sisältää riittävästi hienoja aineksia eli sementtiä ja filleriä. Lisäksi tiiviin betonin aikaansaamiseksi on otettava huomioon sen muokkautuvuus, huolellinen tiivistäminen ja jälkihoito, jotta voidaan valmistaa tiiviitä rakenteita. Jälkihoitoon kuuluu betonirakenteen kosteana pitäminen 1–2 viikon ajan, jotta siihen ei muodostuisi kuivumishalkeamia. Valmiin betonirakenteen vedenpitävyyttä voidaan testata normikoe-kappaleilla, joiden halkaisija on 150 ja korkeus 300 mm. Kokeessa kappaleen päihin kohdistetaan vedenpaine-ero, ja mitataan veden enimmäistunkeuma sekä lasketaan sen perusteella vedentunkeumaluku. [35, 43]

Sementtimäärän vaikutus betonin ominaisuuksiin on otettava huomioon, ja lujuusluokasta C35/45 lähtien sementtimäärä nousee niin suureksi, että betonin kovettuessa syntyvä hydrataatiolämpö saattaa aiheuttaa tiiviyden alenemista, halkeilua ja lujuuden alenemista. Tällöin on käytettävä mineraalisia seosaineita, joilla hidastetaan betonin kovettumista ja siten hallitaan lämmöntuottoa. Korkean hydrataatiolämmön haitalli-

nen vaikutus betonin tiiviyteen saa aikaan harvemman mikrorakenteen ja siten edesauttaa mm. kloridien tunkeutumista betoniin. Mineraalisia sideaineita käytettäessä tulee kuitenkin varmistua siitä, ettei betonista tule liian tiivistä ja siten altista pakas- ja pakkassuolarasitukselle. Etenkin suurta silikamäärää käytettäessä betoniin imeytyvä vesi ei ehdi haihtua syklien välillä ja betonin rapautuminen voi alkaa rakenteen sisältä. [35]

Taulukko 4. Betonirakenteeseen kohdistuvia rasituksia. Ylimpänä standardin SFS-EN 206-1 mukaan luokitellut rasitukset.

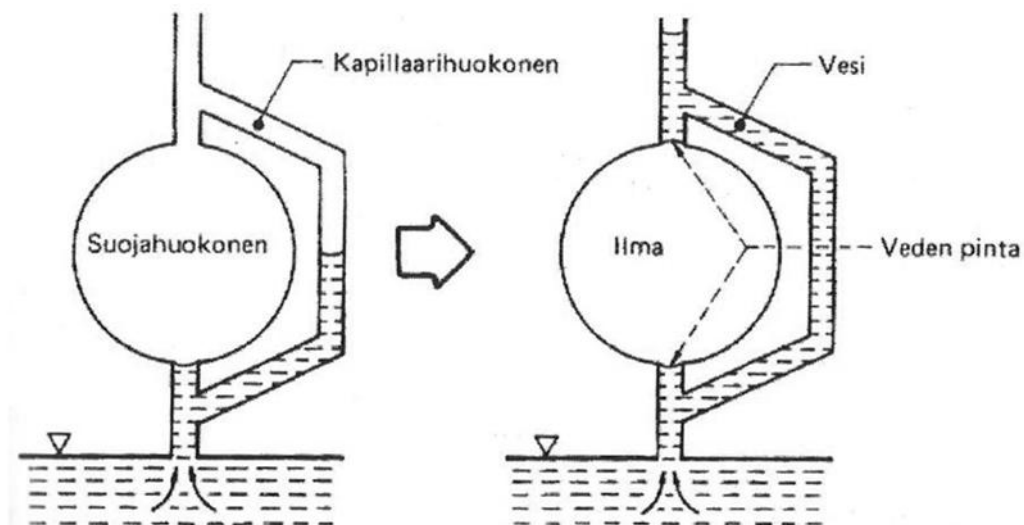
Rasitustyyppi	Rasitusluokka
Kemiallinen rasitus	XA1...XA3
Ilman hiilidioksidi (karbonatisoituminen)	XC1...XC4
Kloridit, pakkassuola	XD1...XD3
Jäätymis-sulamisrasitus	XF1...XF4
Meriveden kloridit	XS1...XS3
Sulfaatit, nitraatit	
Eroosio	
Jään aiheuttama kuluminen ja kuormitus	
Kavitaatio vesiteissä	
Lämpöliike ja kosteustilan vaihtelut	
Kutistuminen	
Viruminen	
Perustamisolosuhteiden muutokset	
Pohjaveden korkeustason muutokset	
Vedenpaine	
Maanpaine	
Routuminen	
Suunnittelukuormat ym. mekaaniset rasitukset	
Työ- ja materiaalivirheet	
Kunnossapitovirheet	

Vesi-sementtisuhteen lisäksi vesimäärä on tärkeä tekijä betonin säilyvyyden kontrolloimisessa. Vesimäärää vähentämällä voidaan vähentää suhteellisesti myös sementtimäärää, mikä puolestaan vähentää lämmöstä aiheutuvaa kutistumista, autogeenistä kutistumaa ja kuivumiskutistumaa betonissa. Käytännön kokemusten mukaan sementtimäärä on usein liian korkea, jotta halkeilemattomien, säilyvyydeltään pitkäikäisten rakenteiden valmistaminen olisi mahdollista. Toisin kuin sideaine ja runkoaine, vesimäärä on useissa tapauksissa eniten vaihteleva ja vaikeimmin mitattava betonin ainesosa, koska käytetyn kiviaineksen vesipitoisuus vaihtelee. [35]

5.3.2 Betonin pakkasenkestävyys

Betonin pakkasenkestävyys tarkoittaa sen kykyä säilyttää alkuperäiset ominaisuudet huolimatta toistuvista jäätymis-sulamissykleistä. Sementtikiven kapillaarihuokosverkostoon imeytyy vettä, jonka tilavuus kasvaa sen jäätyessä noin 9 %, aiheuttaen hydraulista painetta ja vaurioittaen betonia. Toistuessaan nämä syklit aiheuttavat betonin pakkasrapautumisen. Pakkaskestävyyden takaamiseksi käytetään betonimassan liissäineena huokostinta, jolla betoniin aikaansaadaan suojahuokosia, joihin vesi voi jäätyessään laajeta. Suojahuokosten ja kapillaarihuokosten eroa on selvennetty kuvassa 26. [35, 36, 40, 43]

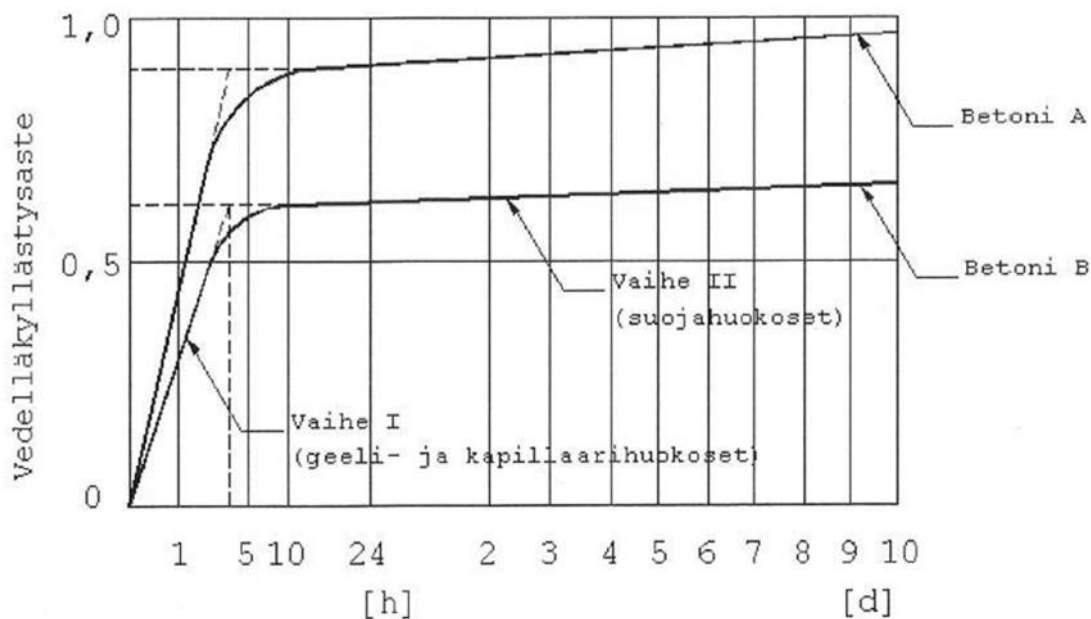
Suojahuokokset jäävät suuren kokonsa vuoksi ilmatäytteisiksi kapillaarihuokosten täytyessä vedellä. Suojahuokokset voivat täyttyä vedellä vain silloin, kun betoni on pitkään yhtämittaisesti vedessä, kuten on mahdollista patorakenteiden vesirajan betonille. Suojahuokosten täyttyminen vedellä on kuitenkin erittäin hidasta, sillä se perustuu niissä olevan ilman liukenemiseen kapillaarihuokosten veteen. Kuvassa 27 on esitetty huokostamattoman ja suojahuokostetun betonikappaleen kyllästysasteen kasvu ajan suhteen vesiupotuksessa. [35, 36, 40, 43]



Kuva 26. Suojahuukosten pysyminen ilmatäytteisinä veden imeytyessä betonin kapiillarihuokosiin. [43]

Suojahuukosille asetetaan tiettyjä vaatimuksia, jotta betoni kestää jäätyvän veden vaikutukset. Suojahuukosten tulee olla riittävän lähellä toisiaan ja niiden ominaispinta-ala riittävän suuri. Suureita betonin pakkasenkestävyyden arviointiin ovat suojahuukosten suhteellinen osuus betonin kokonaistilavuudesta sekä suojahuukossuhde, eli painekäsittelyssä betoniin tunkeutuneen vesimäärän osuus kokonaishuokosmäärästä. Suojahuukossuhteen arvo vaihtelee välillä 0...1 ja pakkasenkestävällä betonilla se on yleensä yli 0,17. [35, 43]

Suojahuokossuhde kuitenkin kuvaa vain vesiupotuksessa täyttymättömien huokosten tilavuusosuutta kokonaishuokosmäärästä, mutta ei anna tietoa huokoskoosta tai niiden jakaantumisesta, joten sitä ei voida pitää luotettavana tietona betonin pakkasenkestävyydestä. Tehtäessä kyseinen koe vanhasta patorakenteesta otetusta koekappaleesta, saadaan kuitenkin selville, onko betoni selkeästi lisähuokostamatonta. Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan lisäksi arvioida laboratoriokokeilla, kuten ohuthietutkimuksella, suolapakkaskokeella ja jäädytys-sulatuskokeella. [35, 43]



Kuva 27. Kyllästysasteen kasvu huokostamattomassa (A) ja suojahuokostetussa betonissa (B). [43]

Lisähuokostusaineiden käytöstä julkaistiin ensimmäinen, todennäköisesti vähälle käytölle jäänyt ohje RIL A27 vuonna 1956 ja vasta vuonna 1976 saatiin varsinainen betonin säilyvyyteen liittyvä ohje BY9. Tässä ohjeessa esitetty betonin lisähuokostusvaatimus (suoja- huokossuhde) on kuitenkin nykykäsityksen mukaan riittämätön, ja lisäksi myöhemmin on todettu, että käytetty suojahuokossuhteen testaustapa on epätarkka menetelmä. Tähän testaukseen perustuivat myös vuosien 1989 ja 1992 BY32-ohjeet. Vasta ohjeessa BY50-2004 on esitetty asianmukaiset betonin pakkasenkestävyysvaatimukset ja sen testaustavat. Täten voidaan olettaa, että monien Suomen patojen betonin pakkasenkestävyys on nykytietämyksen valossa kyseenalainen. [35, 36, 40, 43]

Vanhojen ohjeiden mukaan tehtyjen rakenteiden pakkasenkestävyys riippuu pääasiassa siitä, millaisen huokosrakenteen huokostamiseen käytetty lisäaine on saanut aikaan. Huokosten koon ja jakaantumisen betonissa tulisi olla sellaisia, että ne toimivat varsinaisina suojahuukosina. Myös vesi-sementtisuhde vaikuttaa pakkasenkestävyyteen. Alhaisella suhteella valmistetut betonirakenteet sisältävät vain vähän kapillaari-

huokosia, joten betoni saattaa kestää jonkin verran pakkasrasitusta, mutta nykykäsit-
tyksen mukaan sitä ei voi kuitenkaan pitää varsinaisesti pakkasenkestävänä. Suomesta
löytyy kuitenkin yli sata vuotta vanhoja betonipatoja, jotka ovat kestäneet pakkas-
rasitusta suhteellisen hyvin. [35, 36, 40]

5.3.3 Betonin karbonatisoituminen

Betonin karbonatisoituminen tarkoittaa sen neutraloitumista (pH-arvon alenemista)
ilman hiilidioksidin vaikutuksesta, jolloin betonin luonnollinen emäksisyys vähenee ja
sen teräksiä suojaava vaikutus heikkenee. Karbonatisoituminen johtuu kemiallisista
reaktioista, joissa ilman hiilidioksidi reagoi sementtikiven alkalisten hydroksidien kans-
sa. Betonin luonnollinen emäksisyys on peräisin pääasiassa sementin hydrataatiossa
syntyneestä kalsiumhydroksidista. Betonin pH on tavallisesti noin 12–13, mutta mui-
den hydroksidien konsentraatiosta riippuen se voi olla enemmänkin. Tämä betonin
huokosveden korkea alkalisuus sekä sen teräksen pinnalle muodostama oksidikalvo
estävät tehokkaasti korroosion etenemistä. Myös terästä suojaavan betonin alhainen
läpäisevyys estää korrosoivien aineiden pääsemisen kosketukseen teräksen kanssa.
Raudoituksen korroosio käynnistyy, kun kosteutta ja happea on saatavilla ja betonin
pH-arvo alenee pienemmäksi kuin noin 9,5. [35, 36, 40, 43]

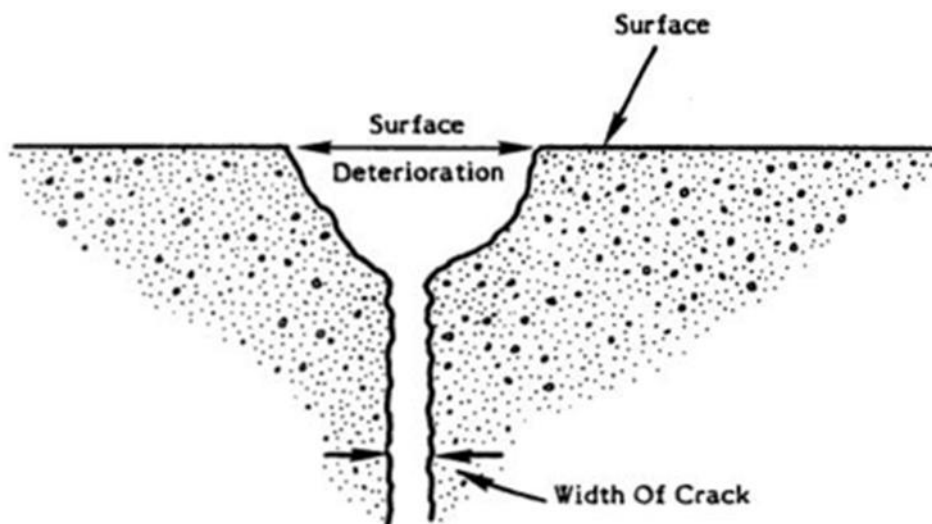
Karbonatisoituminen alkaa betonin pintaosasta ja sen etenemisnopeus hidastuu reak-
tion edetessä sekä betonin tiiviyn mukaan. Karbonatisoitumisrintaman muoto beto-
nissa voi olla hyvin epäsäännöllinen, mutta sen neutraloiva vaikutus on suuri, sillä pH:n
lasku arvosta 13 arvoon 10 voi tapahtua vain muutaman millimetrin matkalla. Neutra-
loitumisen muutosalue on erilainen kuivissa ja kosteissa olosuhteissa. Tämän johdosta
betonin karbonatisoitumisrasitus on standardin SFS-EN 206-1 ja betoninormin BY50-
2004 mukaan jaettu neljään rasitusluokkaan XC1...XC4. [35, 40, 43, 67]

Karbonatisoitumisnopeus on suurimmillaan kun suhteellinen ilmankosteus on noin
50...70 %. Tätä kuivemmissa olosuhteissa ei ole saatavilla riittävää kosteutta karbonati-
soitumisreaktiolle ja kosteammissa olosuhteissa taas ilmassa oleva vesi alkaa estää
hiilidioksidin tunkeutumista rakenteeseen. Karbonatisoitumisnopeus riippuu lisäksi
betonin tiiviyydestä ja kalsiumhydroksidipitoisuudesta. Näin ollen siihen voidaan vaikut-
taa vesi-sementtisuhteella, sementtitaadulla ja -määrällä, betonin jälkihoidolla sekä
mineraalisilla seos- ja lisäaineilla. Sementissä käytettävät mineraaliset seosaineet (ma-
suunikuona, lentotuhka, silika) lisäävät betonin karbonatisoitumista. Korroosion lisäksi
karbonatisoituminen aiheuttaa betonin läpäisevyyden ja huokoisuuden sekä huokos-
koon pienenemistä ja lujuuden ja kimmokertoimen kasvua. Betonin kutistuma ja viru-
ma voivat myös kasvaa. [35, 40, 43, 67]

Karbonatisoitumista on käsitelty jo 1960-luvulla julkaistuissa kirjoituksissa, mutta ennen 1980-lukua sitä ei ole otettu riittävästi huomioon. 1970-luvun loppupuolella ja 1980-luvun alussa julkaistiin useampia perusteellisia tutkimuksia, joissa käsiteltiin betoniterästen korroosiota ja 1980-luvun lopulla ja etenkin 1990-luvun puolella alettiin kiinnittää enemmän huomiota betonin karbonatisoitumiseen. [40]

5.3.4 Halkeilu

Kaikissa betonirakenteissa voi esiintyä halkeilua ja se on usein ensimmäinen merkki jännitystilän muutoksista tai alkavista ongelmista. Halkeama syntyy, kun betoniin kehittyy sen vetolujuuden ylittäviä vetojännityksiä. Nämä jännitykset saattavat aiheutua ulkoisista kuormituksista tai betonirakenteen tilavuuden muutoksista esimerkiksi lämpöliikkeiden tai kemiallisten reaktioiden vaikutuksesta. Halkeamat ovat yleisiä, mutta niiden vaatimat toimenpiteet ja vakavuus vaihtelevat. Usein halkeamat muodostavat reitin rakenteen sisään, mikä edesauttaa betonin vaurioitumista muilla tavoin. [38]

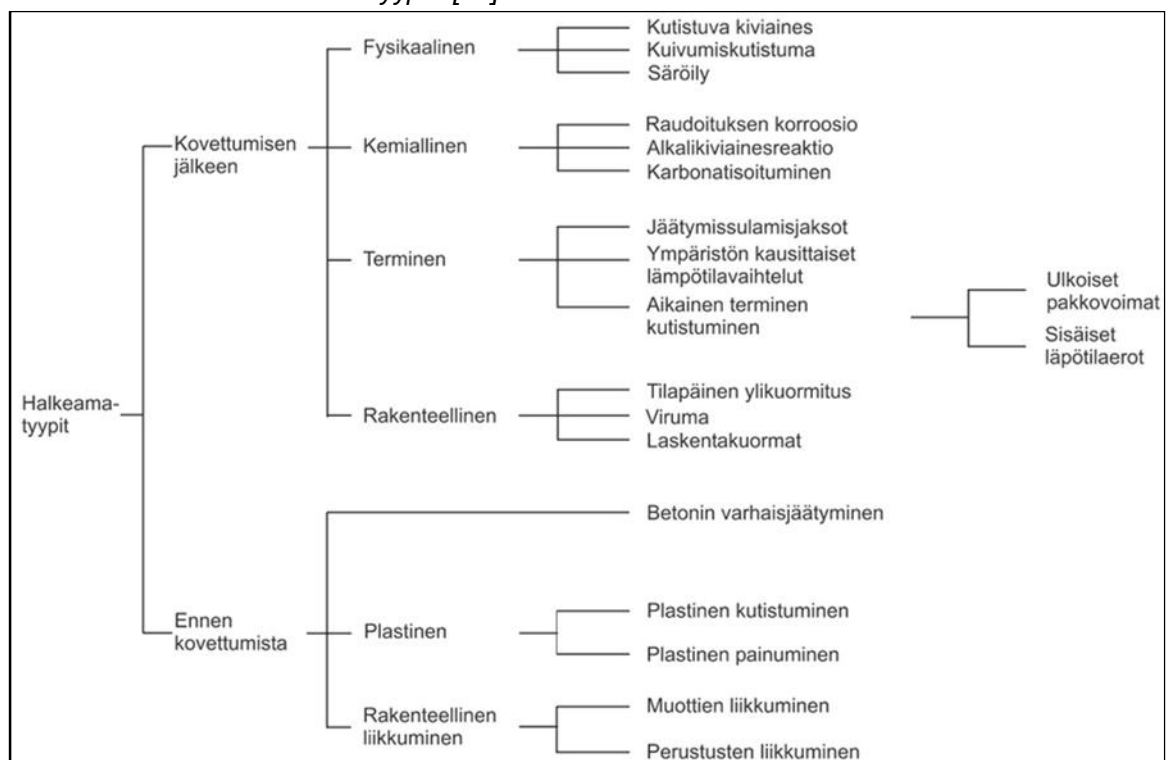


Kuva 28. Betonirakenteessa olevan halkeaman leveyden mittaaminen.

Halkeamaleveyden mittaaminen saattaa toisinaan olla hankalaa, sillä betonipinnan rapautuneisuus ja kulumat saattavat vääristää halkeaman todellisia mittoja. Pinnan kunto on otettava huomioon, mutta sen ei pidä antaa vaikuttaa halkeamaleveyden mittaukseen (kuva 28), joka on suoritettava sellaiselta syvyydeltä, etteivät pinnan vauriot vaikuta mittaustulokseen. Halkeamien suunnat tulee myös huomioida, ja ne voivat olla esimerkiksi vaaka-, pysty- tai vinohalkeamia. Halkeamat ovat joko rakenteellisia eli rakenteen läpi ulottuvia halkeamia tai pintahalkeamia. Toisinaan halkeamien syvyyttä saattaa olla vaikea määrittää, mikäli halkeama jatkuu pitkälle rakenteen sisään. Erittäin tärkeää on halkeamien havainnointi ajan suhteen, toisin sanoen niiden muutokset edellisiin tarkastuksiin nähden. Kokenut tarkastaja voi kyetä tekemään päätelmiä betonissa vaikuttavista jännityksistä halkeamien perusteella. [36, 38]

Halkeamatyyppejä ja niiden syntymekanismeja on useita. Rakenteellinen halkeama voi vaikuttaa jonkin rakenneosan toimintaan ja se johtuu usein padon ylikuormituksesta. Syynä voi olla tilapäinen ylikuormitus, mutta rakenteellinen halkeama voi aiheutua mitoituskuormallakin, mikäli padon lujuusarvot ovat jääneet suunniteltujen alapuolelle esimerkiksi työvirheiden, laadunvalvonnan puutteiden tai materiaaliongelmiin takia. Usein rakenteellisia halkeamia esiintyy padon kohdissa, joihin jännitykset keskittyvät. Näitä ovat aukkojen terävät kulmat, suurten lämpötilagradienttien alueet ja perustan epäjatkuvuuskohdat, joita voi syntyä materiaalien vaihtelun tai siirtymien johdosta. [38]

Taulukko 5. Betonin halkeamatyypit. [73]



Rakenteelliset halkeamat ovat usein epäsäännöllisiä, vaihtavat suuntaa, eivätkä tavallisesti kulje padon pääakselien suuntaisesti. Muita tunnusmerkkejä ovat halkeamien leveys ja mahdollisesti havaittavat betonikappaleiden liikkeet halkeaman molemmin puolin. Kutistumishalkeamat aiheutuvat betonin tilavuuden muutoksista, mikä taas aiheuttaa vetojännityksiä rakenteeseen. Nämä tilavuuden muutokset voivat aiheutua esimerkiksi betonin kastumisesta ja sitä seuraavasta kuivumisesta. Kutistumishalkeamat ovat yleensä kapeita ja matalia, eikä niissä näy liikkeitä mutta ne voivat olla kuitenkin melko pitkiä. Suurin osa kutistumishalkeamista ilmaantuu heti rakentamisen jälkeisen betonin kovettumisen yhteydessä. [38]

Terminen halkeilu johtuu betonirakenteen lämpötilanvaihteluista. Rakentamisen yhteydessä ratkaisevassa osassa on sementin koostumuksesta riippuva betonimassan lämmönkehitys sen kovettuessa. Hydrataatiolämmönmuodostuksen jälkeinen jäähtyminen ei tapahdu samalla tavalla kaikkialla rakenteessa, mistä aiheutuu vetojännityksiä betoniin aiheuttaen mahdollista halkeilua. Lämpötilavaihteluista johtuvat halkeamat muodostavat usein neliömäisiä verkostoja ja ovat yleensä kutistumahalkeamia syvempiä. [38]

Padon tarkastuksen yhteydessä havaittujen halkeamien vaatimat toimenpiteet vaihtelevat tapauskohtaisesti. Minimissään halkeamat dokumentoidaan, jotta niiden kehittymistä voidaan seurata jatkossa. Jos tarkastaja ei osaa arvioida halkeamien vakavuutta ja tarvittavia toimenpiteitä, tulee kysyä neuvoa asiantuntijalta. Mikäli epäillään halkeamien kehittymistä vakavammiksi, voidaan niiden tarkkailuväliä tihentää ja asentaa paikalle mittalaitteita tarkemman seurannan takaamiseksi. Uusia ja laajamittaisia halkeamia havaittaessa tulisi ottaa välittömästi yhteyttä asiantuntijaan.

5.3.5 Pintavauriot

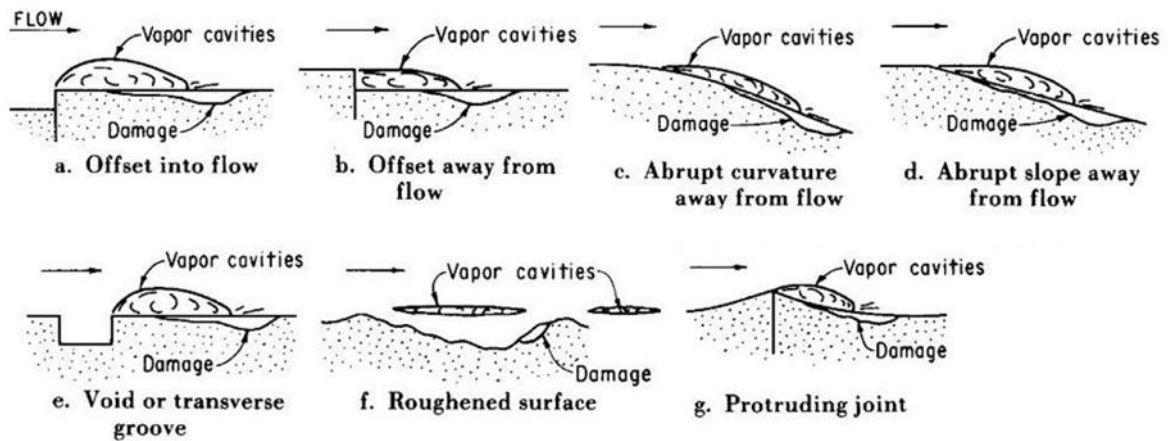
Suomessa pahin pato- ja muita vesirakenteita vaurioittava tekijä on betonipinnan toistuva jäätyminen ja sulaminen, johon vesirajan vaihtelualueella yhdistyvät myös veden ja jään aiheuttamat eroosiovauriot. Myös tulva-aukkojen betonirakenteet ja sivuseinät ovat erityisen alttiita pakkasvaurioille. Betonipinnan jäätyminen ja sulaminen näkyy usein verkkohalkeiluna, joka johtuu materiaalin tilavuudenmuutoksista lähellä pintaa. Näin tapahtuu esimerkiksi veden tunkeutuessa betonin sisältämiin sopivan kokoisiin (kapillaari)huokosiin ja sitten laajetessa jäätyessään. [36, 38]



Kuva 29. Betonin pintavauriotyyppejä, vasemmalta alkaen: lohkeilu, säröily, rapautuminen. [38]

Betonin pinnassa tapahtuu myös lohkeilua, säröilyä ja rapautumista (kuva 29). Nämä vauriot saattavat johtua suuresta puristusjännityksestä, iskuista tai pakkasrasituksesta. Muita mahdollisia syitä ovat väärä betonimassan koostumus, kemiallinen rasitus, eroosio tai betonin sisällä olevan raudoituksen korroosio. Näitä vaurioita tapahtuu usein

rakenteen reunoilla ja kulmissa tai halkeamien ympärillä sekä muissa kohdissa, joista lohkeaa helposti palasia. Vaikka nämä vauriot rajoittuvatkin tavallisesti pintaan eivätkä yleensä ole vakavia, saattavat ne heikentää rakenteen kestoa muita rasituksia vastaan ja ohentaa betonin suojaepäksuutta tai jopa paljastaa raudoituksen. [36, 38]



Kuva 30. Kavitaation syntyminen erimuotoisilla virtauskanavilla. [41]

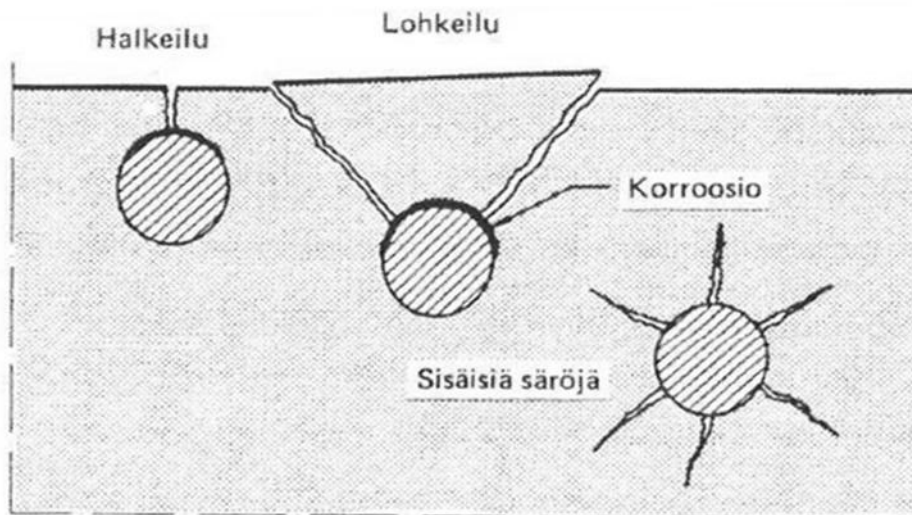
Vesi aiheuttaa betonirakenteisiin eroosiovaurioita, jotka lisääntyvät huomattavasti, mikäli vesi kuljettaa mukanaan kuluttavia kiviainepartikkeleita. Vaurioitumiseen vaikuttaa myös virtaavan veden nopeus. Erityisen alttiita veden eroosiolle ovat tulva-aukot ja ylivirtausrakenteet. Veden kuluttava vaikutus ilmenee myös kavitaationa, joka tarkoittaa tyhjätilojen (ilmakuplien) muodostumista virtaavaan veteen suurilla virtausnopeuksilla. Kun nämä kuplat saavuttavat korkeamman paineen alueen, ne katoavat aiheuttaen paineiskuja virtauskanavan (yleensä betonisille) pinnoille. Kavitaatio saattaa aiheuttaa hyvälaatuisellekin betonipinnalle suuria vahinkoja suhteellisen lyhyessä ajassa. Virtauskanavan muodon vaikutusta kavitaation syntyyn on esitetty kuvassa 30. [38, 41]

5.3.6 Raudoituksen korroosio

Raudoituksen korroosion syntyä edesauttaa aiemmin mainittu betonin karbonatisoituminen sekä betonipatorakenteisiin kuuluvissa silloissa ja niiden alapuolella tai vierustoissa tapahtuva tiesuolaus, joka altistaa rakenteita klorideille. Ulkomailla patorakenteisiin kloridirasituksia aiheutuu myös merivedestä. Klorideja voi myös joutua betoniin jo massan valmistuksen yhteydessä jonkin ainesosan mukana. Korroosiotapahtuma on erilainen riippuen siitä, onko korroosio alkanut betonin karbonatisoitumisesta vai kloridien tunkeutumisesta betoniin. [38, 40, 43]

Kloridien pääasiallinen tunkeutumistapa rakenteeseen on diffuusio. Varsinkin kohteissa, joissa betoni pääsee vuorotellen kastumaan ja kuivumaan, myös kapillaarivoimat

aiheuttavat kloridien pääsyä rakenteeseen, mikä on diffuusiota nopeampi prosessi. Kloridien tunkeutumistehokkuuden lisäksi korroosion alkamiseen vaikuttaa se, miten suuri osa klorideista pääsee terästen kanssa kosketuksiin, sillä hydrataatiotuotteet ja sementin mineraalit sitovat klorideja. Lisäksi korroosion alkamiseen vaadittava kloridipitoisuus teräksen pinnalla vaihtelee olosuhteista ja rakenteen ominaisuuksista riippuen, joten tarkkoja yleistysä siitä, missä vaiheessa kloridikorroosio alkaa, ei voida tehdä. [43, 67]



Kuva 31. Raudoituksen korroosion vaikutuksia betoniin. [43]

Kloridien tunkeutuminen betoniin poistaa raudoitteita suojaavan passiivikalvon paikallisesti, jolloin kloridit aiheuttavat niin kutsuttua pistekorroosiota. Kloridien aiheuttaman korroosion nopeus on suurempi kuin karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion nopeus. Korroosiossa syntyy rautahydroksidia, joka muuttuu hapen ja veden vaikutuksesta ruosteeksi (rautaoksidi). Koska korroosiotuotteella on alkutilannetta suurempi tilavuus, syntyy rakenteeseen sisäisiä jännityksiä, jotka voivat betonin vetolujuuden ylittyessä rikkoa ympärillä olevaa suojabetonia. Merkkejä raudoituksen korroosiosta ovat betonin suorat, yhdensuuntaiset halkeamat tasavälein vastaten raudoituksen sijoittelua, muut vastaavan kaltaiset pintavauriot sekä betonin pinnalle asti suotautuneet ruostetahrat. Paisuvien korroosiotuotteiden vaikutusta betoniin on esitetty kuvassa 31. [43, 67]

5.3.7 Kemiallinen vaurioituminen

Betonin kemiallinen vaurioituminen liittyy yleensä sementtikiven eri hydrataatiotuotteiden kemiallisiin reaktioihin ulkopuolisten aineiden kanssa. Pelkästään ulkopuolelta tulevan haitallisen aineen aiheuttama betonin vaurioituminen on Suomessa hyvin harvinaista. Betonin korroosioksi kutsutaan kemiallisia vaurioita, joita voivat aiheuttaa

sekä betonin ulkoiset että sisäiset tekijät. Betonin merkittävän korroosion syntymiseksi haitallisesti vaikuttavien aineiden pitoisuuksien tulee olla riittävän suuria ja betonissa on oltava riittävästi kosteutta. Reaktioita nopeuttavat veteen liunneen haitta-aineen paine tai virtaus, korkea lämpötila ja betonin ajoittainen kuivuminen. Koska betonia vaurioittavissa kemiallisissa reaktioissa tarvittavat aineet kulkeutuvat siihen useimmiten veden mukana, paranee betonin kemiallinen kestävyys tekemällä siitä mahdollisimman vesitiivistä. Myös sideainetyypin valinnalla voidaan vaikuttaa kemialliseen kestävyys, mutta usein betonin tiiviydellä on siihen suurempi vaikutus. [43]

Betonin korroosio voidaan luokitella kolmeen tyyppiin, joita ovat:

- 1) kalsiumhydroksidin liukeneminen ja poistuminen betonista johtaen sementtikiven mineraalitasapainon vahingolliseen muutokseen,
- 2) betoniin kulkeutuneiden yhdisteiden ja ionien reagointi sementtikiven eri komponenttien kanssa,
- 3) paisuvien reaktiotuotteiden synty, jolloin kiteytymispaine rikkoo betonia.

Eräs vakavimmista betonin vaurioista on sulfaattikorroosio, joka aiheutuu sulfaattien reagoitessa kalkin ja aluminaattien kanssa. Tällöin muodostuu uusia, tilavuudeltaan suurempia tuotteita, mikä johtaa sisäisten jännitysten kasvuun ja betonin halkeiluun. Reaktioketjussa syntyy lopulta ettringiittiä, jonka tilavuus on moninkertainen lähtöaineisiin verrattuna. Muodostuvat halkeamat helpottavat edelleen sulfaattien tunkeutumista betoniin ja rakenteen vaurioituminen nopeutuu. Sulfaatit voivat olla lähtöisin kiviaineesta tai joskus myös sementistä, mutta yleisimmin kuitenkin rakenteen ympäristöstä. Sulfaattirasitukselle altistuvissa betonirakenteissa voidaan käyttää sulfaatinkestävää sementtiä. [43]

Kemiallisista vaurioitumistypeistä yleisimpiä on alkali-kiviainesreaktio, jonka aiheuttama vaurioituminen on verrattavissa lähinnä sulfaattien aiheuttamaan vaurioitumiseen. Sitä esiintyy yleisimmin käytettäessä silikaa betonin seosaineena. Alkali-silikareaktio tapahtuu alkalisen betonimassan ja reaktiivisen silikan välillä, usein pitkän ajan kuluessa. Reaktiossa muodostuu kalsiumsilikaattihydraattigeeliä, joka paisuu ja aiheuttaa rakenteeseen sisäistä painetta rikkoen sitä. Seuraukset saattavat olla vakavia reaktion jatkuessa tarpeeksi pitkään. Yleisimmät vauriot ovat verkkohalkeamat ja saostuman tyyppiset vaaleat alueet etenkin kiviainepartikkelien ympärillä. Suomessa betonirakentamisessa käytetty luonnonkiviaines on hyvälaatuista, eikä alkali-kiviainesreaktioista aiheutuvia vaurioita ole maassamme havaittu. [38, 40, 43]

Kalkkisuodot ja -saostumat muodostuvat veden kuljettamista betonin sisältämistä suoloista, kuten kalsiumhydroksidista tai -karbonaatista. Nämä suolat ovat peräisin sementistä ja ne liukenevat veteen. Rakenteen saumat ja halkeamat muodostavat reittejä vedelle betonirakenteen pintaan, jolloin veden haihtuessa betonipintaan jää saos-

tumia. Saostumien syntyminen saattaa johtaa vuotojen kasvuun ja betonin laadun nopeampaan huononemiseen, mutta toisinaan saostuminen voi toimia itseään korjaavasti ja pysäyttää vuodon ilman toimenpiteitä. [38]

5.3.8 Vuodot ja suodot

Selvyyden vuoksi käsitteet vuoto ja suoto on hyvä erottaa toisistaan, vaikka joissakin lähteissä niitä käytetäänkin kuvaamaan samaa asiaa. Vuoto tarkoittaa padon avoimista reiteistä, kuten saumoista ja halkeamista purkautumalla vuotavaa vettä. Suodolla taas tarkoitetaan padon materiaalin tai sen perustan läpi tunkeutuvaa vettä.

Vuodot betonipadolla aiheutuvat yleisimmin halkeamista, avoimista saumoista, rikkokontuneista tiivisteistä ja vuotavista putkista tai salaojista. Joskus myös betoni saattaa olla niin harvaa ja kulunutta, että vesi voi suotautua sen läpi. Selviä merkkejä vuodosta ovat padon alavedenpuoleisen seinämän kastuminen, kosteus padon sisäisissä tarkastuskäytävissä sekä sedimenttien kertyminen ja niiden aiheuttama tahraantuminen saumojen ja halkeamien kohdalla. Pitkälle kehittyneessä tilanteessa vettä saattaa tihkua tai virrata alavedenpuoleisista saumoista ja halkeamista. Myös virtaamien kasvu kuivatusjärjestelmän putkissa voi merkitä padon vuotoa. Vuodot voivat aiheuttaa betonin liukenemista ja sen laadun heikkenemisen nopeutumista sekä alentaa lujuutta. Vuodoista voi aiheutua myös padon vakavuuden kannalta vaarallista hydrostaattista painetta, mikäli se on sellaista, jota ei padon suunnittelussa ole huomioitu. [38]

Suotoa tapahtuu betonipadon perustan alta sekä padon ympäri päätytukien kautta. Perustan kautta tapahtuva suoto on usein vaikeaa estää kokonaan eikä se aina ole tarkoituksellistakaan. Suotoja esiintyy vettäläpäisevän pohjamaan alueella, lisäksi ongelmakohtia ovat usein betonipadon liittymät muihin rakenteisiin, kuten maapatoon, injektointiverhoon tai katkaisuseinään. Suotoa tapahtuu jossain määrin aina, mutta mikäli suotovesien määrä alkaa lisääntyä, edellyttää se tarkempia tutkimuksia ja seurantaa, sillä suotovesien lisääntyminen kertoo usein padon tai sen perustan alkavasta vaurioitumisesta. [38, 40]

5.4 Betonipadon korjausperiaatteita

5.4.1 Betonin paikkaaminen

Yleisimpiä paikkaamista vaativia vaurioita betonipadoilla ovat pakkasen ja jäätymissulamisrasituksen aiheuttamat lohkeamat vesirajan alueella. Raudoituksen korroosio aiheuttaa myös lohkeilua, sillä raudoituksen ruostumisessa syntyy tilavuudeltaan alkuperäistä suurempia reaktiotuotteita, jotka johtavat lopulta suurtenkin palojen loh-

keamiseen betonista. Tällöin paikkaamisen tarkoitus on raudoituksen korroosion aiheuttaman paikallisen vaurion korjaaminen ja korroosion pysäyttäminen. [72, 75]

Korroosiovauriot ovat yleisimpiä klorideille alttiina olevilla alueilla, eli padon liikennöidyillä osilla. Betoniin saattaa myös syntyä paikkaamista vaativia onkaloita jo valuvaiheessa työvirheen seurauksena. Toisinaan ne saattavat tulla esille vasta, kun betonin pinta on lohkeillut pois. Onkalot saattavat aiheutua myös huonosta tiivistämisestä tai valumuottien muodostamista koloista. Ajoneuvojen ja veneiden törmäykset saattavat aiheuttaa paikkaamista vaativia vaurioita. [72]

Paikkaamiseen käytetyn aineen tulee vastata ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvin korjattavaa betonia. Ongelmia syntyy varsinkin silloin, kun paikkausaineen ja alkupeiräisen betonin lujuus tai pituuden lämpötilakerroin eivät vastaa toisiaan tarpeeksi hyvin. Myös paikkausmateriaalin kutistuminen aiheuttaa usein paikan halkeilua tai jopa irtoamisen. Paikkausaineissa käytetäänkin polymeerejä, joilla parannetaan aineen ominaisuuksia. Polymeeri voi myös toimia joko varsinaisena sideaineena tai lisäaineena. Edellisiä kutsutaan massoiksi ja jälkimmäisiä laasteiksi, sillä niissä sideaineena toimii sementti. [72, 75]



Kuva 32. Rapautunutta betonia Tjusterbynskosken padolla Porvoossa.

Sementtipohjaiset paikkauslaastit ovat valumattomia ja niitä käytetään paikattaessa pystypintoja sekä kaltevia pintoja ja viisteitä. Myös rakenteiden alapintoja voidaan

paikata joko muottiin sulloen tai ilman muottia. Polymeeripohjaiset massat ovat myös valumattomia ja niitä käytetään paikattaessa pieniä, alle 2 dm³:n koloja. Näitä voivat olla esimerkiksi halkeamat, jolloin massoja käytetään sulkuaineena ennen injektointia tai täytettäessä auki piikattu halkeaman pintaosa. Sideaineena käytettävä polymeeri on yleensä epoksi. Laastien ja massojen runkoaineena käytetään yleensä luonnonkiviainesta raekooltaan 0...4 mm. Laasteihin voidaan lisätä myös kuituja, jotka vaikuttavat laastin halkeilukäyttäytymiseen. Kuitutyyppi valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Teräskuituja voidaan käyttää, mikäli pinnalta ei vaadita hyvää ulkonäköä, sillä pintaan jäävät teräskuidut ruostuvat. [72, 75]

5.4.2 Halkeamien korjaaminen

Halkeamatyyppejä ja halkeamien syntyä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.3.4. Pääsääntöisesti betonirakenteisiin syntyy halkeamia, kun rakenteen vetolujuus ylittyy. Teräsbetonirakenteen raudoituksen toimiminen täydellä kapasiteetilla kuitenkin edellyttää halkeamien muodostumista rakenteen vetopuolelle. Useimmat betonipadot taas suunnitellaan siten, ettei rakenteeseen synny vetojännityksiä lainkaan.



Kuva 33. Halkeamia Vääräkosken voimalaitospadolla Orimattilassa.

Kuormituksesta aiheutuneiden rakenteellisten halkeamien lisäksi yleisiä ovat pintahalkeamat, joita aiheutuu yleisesti kuivumiskutistumisesta. Halkeaman korjaustarpeeseen vaikuttaa sen syntyvän lisäksi halkeamaleveys sekä sijainti. Esimerkiksi leveät, kloridirasituksen alaiset halkeamat ovat kiireellisiä, sillä ne heikentävät merkittävästi betonin teräsiä suojaavaa vaikutusta. Yleisesti ottaen patorakenteet ovat kuitenkin massiivisia

ja suhteellisen kevyesti raudoitettuja, joten pääsääntöisesti niille voidaan sallia enemmän halkeamia kuin esimerkiksi jännitetyille betonirakenteille. Määrääväksi tekijäksi halkeamien suhteen saattaakin nousta padon vesitiiviys. [73, 75]

Halkeamakorjaukset jakautuvat kahteen periaateratkaisuun: injektointiin ja imeyttämiseen. Injektointia käytetään, kun halutaan estää halkeamien ja onkaloiden haitalliset seurausvaikutukset betonirakenteessa. Injektoinnin päämääränä on tiivistää rakenne siten, ettei rakenteeseen pääse raudoituksen korroosiota kiihdyttäviä tai muita haitta-aineita. Lisäksi sen tarkoitus on estää vesivuodot ja vahvistaa rakennetta. Rakenteelliseen halkeamien korjaamiseen voidaan käyttää epoksi-injektointia, joka muodostaa olemassa olevan betonin kanssa yhtenäisen rakenteen. Sitä ei kuitenkaan voida käyttää halkeamiin, joiden leveys vielä muuttuu. Niihin voidaan käyttää vesitiivistä uretaa, joka ei kuitenkaan lujita ongelmakohtaa rakenteellisesti. [73, 75]

Imeyttämällä voidaan korjata halkeamat, jotka ovat syntyneet plastisen kutistumisen tai plastisen painuman seurauksena. Halkeamat eivät ole rakenteellisia, mutta vaikuttavat kuitenkin säilyvyyteen. Tällaiset halkeamat ovat pieniä, yleensä 0,1...0,2 millimetrin levyisiä. Imeytys ei sovi rakenteellisten halkeamien korjaamiseen, sillä se ei korjaa betonia rakenteellisesti. Halkeilun tai muun vastaavan vaurion syy tulee aina selvittää oikean korjaustoimenpiteen valitsemiseksi. Mikäli korjaamista vaativassa halkeamassa on vesivuoto, tulee sen haittavaikutukset korjaustoimenpiteille poistaa esimerkiksi ohjaamalla vuoto rakenteen muuhun kohtaan. [73]

5.4.3 Betonin pinnoitus

Betonia voidaan pinnoittaa rakenteen suojaamiseksi ympäristön haittavaikutuksilta ja siten rakenteen käyttöiän pidentämiseksi sekä toissijaisesti ulkonäön parantamiseksi. Pinnoitus voi toimia myös korjausmenetelmänä esimerkiksi silloin, kun rakenteessa esiintyy alkavaa verkkohalkeilua johtuen jäätymis-sulamisrasituksesta tai jälkihoidon puutteellisuudesta. Myös raudoitustankojen suuntaisia, plastisesta painumasta, kutistumisesta tai valuvirheestä johtuvia halkeamia voidaan korjata pinnoituksella. Lisäksi pinnoitusta voidaan käyttää vakavampien vaurioiden korjauksen yhteydessä ulkonäön parantamiseen varsinaisten korjaustoimenpiteiden jälkeen. [74]

Ennen pinnoitusta tulee vesi- ja kosteusvuodot estää ja antaa rakennekosteuden asettua tasapainotilaan. Pinnoitettava pinta tulee suihkupuhaltaa välittömästi ennen pinnoitusta. Soveltuvia menetelmiä ovat kohteesta ja käytettävästä pinnoitteesta riippuen vesihiekkapuhallus, hiekkapuhallus ja soodapuhallus. Työsaumat on suunniteltava etukäteen siten, että saumat eivät erotu häiritsevästi rakenteesta sijoittamalla ne esimerkiksi rakenteen särmien kohdille. [74]

Pinnoitus ei sovellu rakenteille, joiden kloridipitoisuus tai kloridirasitus on suuri. Tällaisia voivat olla liikennöidyt betonipadot, joilla käytetään suolausta sulana pitämiseen. Tällöin rakenteen suojaamiseen soveltuva menetelmä on impregnointi, jossa betonin pintaan avautuvien huokosten seinämiin muodostetaan vettä hylkivä kerros. Betonin huokosrakenne voidaan tällöin säilyttää avoimena tai täyttää osittain. Kloridirasitetuille pinnoille voi tulla kysymykseen myös ruiskubetonointi. [74]

5.5 Tarkastukset ja tarkkailu

5.5.1 Yleistä

Patoturvallisuuslain 13. §:n mukaan on jokaiselle patoturvallisuuslain mukaisesti luokitellulle padolle laadittava tarkkailuohjelma, johon sisältyy sekä varsinaista tarkkailua että määräajoin tapahtuvia tarkastuksia. Padon tarkkailulla tarkoitetaan vuosi- ja määräaikaistarkastusten välillä tapahtuvaa padon kunnon ja toimivuuden tarkkailua silmä- tai mittalaitteiden avulla. Ohjelman laatiminen on padon omistajan tai haltijan velvollisuus, mutta käytännössä sen laatii usein omistajan konsultti. Tarkkailuohjelmassa esitetään tarkastustoimenpiteet määräaikaisten ja vuositarkastuksille. Patoturvallisuusviranomaisen hyväksyy tarkkailuohjelman. [6, 39]

Padon tarkkailua suorittaa normaalisti käyttö- ja huoltohenkilöstö, jolla on oltava riittävä asiantuntemus patoturvallisuusasioissa ja perehtyneisyys padon turvallisuuteen vaikuttaviin olosuhteisiin, padon käyttöön ja turvajärjestelmiin. Käyttöhenkilöstön on myös osattava tulkita valvontatietoja oikein ja tunnettava riskitekijät sekä toimintatavat häiriötilanteissa myös kaukokäytössä olevilla padoilla. Poikkeuksellisten olosuhteiden aikana tai niiden jälkeen tehdään tarpeen mukaan ylimääräisiä tarkastuskäyntejä padolle. Poikkeukselliset olosuhteet ja niissä toimiminen määritellään patokohtaisesti padon tarkkailuohjelmassa, ja ne voivat tarkoittaa esimerkiksi tulvia, rankkasateita tai kovia tuulia. [6, 39]

Tarkkailun yhteydessä todetuista, patoturvallisuuteen vaikuttavista rakenteellisista ja toiminnallisista häiriötilanteista on laadittava häiriötilanneraportti, jossa esitetään häiriön syy, tehdyt tutkimukset ja toimenpiteet. Mikäli kyseessä on turvallisuuden kannalta poikkeuksellinen tilanne, on padon omistajan tehtävä hätäilmoitus hätäkeskukselle. Hätäilmoituksesta ja muistakin padon turvallisuuden kannalta poikkeuksellisista tilanteista on viipymättä ilmoitettava patoturvallisuusviranomaiselle. [6, 39]

5.5.2 Vuositarkastus ja määräaikaistarkastus

Padon vuositarkastuksen yhteydessä käydään läpi vuoden aikana tehdyt mittaukset, havainnot ja havaitut muutokset padon mittaussuureissa. Mittauslaitteiden kunto tarkistetaan, kuten myös korjauksia vaativat kohdat padosta. Erityistä huomiota tulee kiinnittää tulva-aukkojen ja -kynnysten sekä voimalaitosten juoksutuslaitteiden kuntoon. Laitteiden toiminta tarkastetaan koekäyttöillä ja käydään läpi suoritettut tulvatorjuntatoimenpiteet ja poikkeuksellisten säiden ja tilanteiden takia tehdyt tarkastustoimenpiteet. Luokkien 1 ja 2 patojen vuositarkastuksista ja koekäytöistä tulee laatia raportti padon omistajan turvallisuuskansioon ja 1-luokan padon osalta se tulee lähettää myös patoturvallisuusviranomaiselle, joka tallentaa sen patoturvallisuusvalvonnan tietojärjestelmään. [6]

Määräaikaistarkastus suoritetaan padolla vähintään viiden vuoden välein ja ensimmäisen tarkastuksen ajankohta lasketaan padon käyttöönotosta. Kaikki saman padotusalueen patorakenteet tarkastetaan samalla tarkastuskerralla, vaikka patorakenteilla olisi eri omistaja. Määräaikaistarkastusta varten laaditaan asialista, joka yhdessä vuositarkastusten raporttien ja mittaustulosten kanssa toimitetaan etukäteen tarkastukseen osallistuville. Patoturvallisuusviranomaiselle on myös ennen tarkastusta esitettävä yhteenveto tarkkailutiedoista edellisten viiden vuoden ajalta sekä asiantuntijan alustava arvio padon kunnosta. [6]

Määräaikaistarkastuksessa käsitellään vuositarkastuksessa tarkastettavien asioiden lisäksi vahingonvaaraselvityksen ja turvallisuustarkkailuohjelman ajan tasalla olo sekä mahdolliset padon luokitukseen vaikuttavat muutokset, joiden yhteydessä voi olla aiheellista täydentää muita patoturvallisuusasiakirjoja. Padon rakenteet tarkastetaan ja todetaan varsinkin patoturvallisuuden kannalta tärkeiden laitteiden toimintakunto mukaan lukien luukut ja niiden varanostojärjestelmä. [6]

Betonipatoihin ja tarvittaessa myös maapatoihin liittyvät vedenalaiset rakenteet tulee tarkastaa määräajoin ja tarkastuksen tulee olla osa padon tarkkailuohjelmaa. Osa vedenalaisista rakenteista voidaan tarkastaa vedenpinnan ollessa alhaalla, mutta ne joita ei voida, tulee tarkastaa muilla keinoin. Käytännössä tämä tarkoittaa sukellustarkastusta tai teknisten apuvälineiden käyttöä, joita ovat esimerkiksi skannaava kaikuluotain ja monikeilain. Sukellustarkastus tai muulla keinolla tehty vedenalaisten osien tarkastus on tarpeen etenkin silloin, kun vesirajan alapuolella on havaittu ongelma tai padon sisäiseen tarkastuskäytävään vuotaa vettä. Joissakin tapauksissa sukeltamalla voidaan kartoittaa ongelman laatua ja laajuutta silloin, kun se ei muutoin olisi mahdollista. [6, 38]

Lisäksi tarkastetaan padolla oleva kasvillisuus ja muut mahdolliset tekijät, jotka voivat aiheuttaa haittaa padon kunnossapidolle tai tarkkailulle. Padon hydrologinen mitoitus ja muutokset vesiolosuhteissa tarkastetaan sekä todetaan mahdolliset muutostarpeet. Padon vuosi- ja määräaikaistarkastukset tulee suorittaa sulana vuodenaikana. [6]

5.5.3 Betonipadon tarkastaminen

Lain puitteissa padolle suoritettava tarkastus voi olla vuositarkastus, määräaikaistarkastus tai kuntoarvio, mutta kaikissa on kyse padon kunnan tarkastamisesta. Padon tarkastamisella pyritään havaitsemaan vikoja tai puutteita, jotka saattavat vaikuttaa padon turvallisuuteen tai sen asianmukaiseen toimintaan. Vaurioiden syyt ja laajuus sekä laajenemismahdollisuus on selvitettävä, kuten myös arvioitava vaurioiden vaikutus patorakenteen kestävyys. Alustavasti voidaan myös määrittää padon korjaustarvetta ja -ajankohtaa. Ennen tarkastusta tulee ottaa selvää patoon liittyvistä perusasioista, jotta voi paremmin ymmärtää tarkastuksessa havaittuja seikkoja ja varsinkin sitä, miten mahdolliset ongelmat kehittyvät ajan kuluessa ja mihin asioihin tulisi tarkastuksessa kiinnittää erityistä huomiota.

Padosta saatavilla oleva tieto vaihtelee kohteesta riippuen, ja hyödyllisiä tietoja ovat ainakin padon suunnittelu- ja mitoituseriaatteen, materiaalitiedot, työnaikaiset pöytäkirjat sekä toteutumatiiedot. Padon käytönaikaisiin seurantalokeihin ja instrumentoinnista saataviin tietoihin sekä aiempien tarkastusten ja koekäyttöjen raportteihin tulee myös tutustua kohteen kokonaiskuvan hahmottamiseksi. Haastattelemalla padon käyttöhenkilökuntaa saadaan arvokasta tietoa, sillä henkilökunnalla on parempi käsitys padon päivittäisestä toiminnasta, kuin mitä tarkastaja voi yhdellä käyntikerralla saada selville. Käyttöhenkilökunta pääsee myös seuraamaan padon toimintaa erilaisissa tilanteissa, kuten esimerkiksi vedenpinnan ollessa eri korkeuksilla, eri lämpötiloissa ja sääolosuhteissa sekä tulvaluukkujen ollessa auki ja kiinni. Tarkastaja ei voi yhdellä tarkastuskerralla havaita kaikkien käyttötilanteiden aikana esiintyviä ongelmia. [38]

Tarkastuksesta on syytä tehdä yksityiskohtaiset muistiinpanot sekä ottaa valokuvia niiden tueksi. Erityistä huomiota tulee kiinnittää kohtiin, joissa mittaukselliset osoittavat esiintyvän ongelmia tai joissa ongelmia on havaittu aikaisemmin. Ongelmakohtien myöhemmän paikallistamisen vuoksi ne tulee sitoa mahdollisimman tarkasti johonkin kiinteään kohtaan, esimerkiksi liikuntasamaan, valuosaan (monoliittiin) tai salaojaputkeen sekä korkeustasoon suhteessa vedenkorkeuteen tai korkeuteen merenpinnasta. [38]

Tarkastus on hyvä aloittaa padon harjalta, mistä saa hyvän kokonaiskuvan alueesta ja voi tehdä havaintoja suuresta osasta patoa. Harjalla kulkiessa tulee havainnoida sen

kuntoa sekä siihen kiinnittyvien rakenteiden, esimerkiksi kaiteiden kiinnityskohtia ja niiden mahdollisia vaurioita. Liikuntasaumojen kunto niiden näkyviltä osin ja eristykset, monoliittien rajapinnat sekä niiden mahdolliset vauriot tulee havainnoida ja tarkkailla mahdollisia siirtymiä niiden välillä. Harjalla kulkeva (silta)kansirakenne tulee tarkastaa varsinkin sen liittymiskohdilta päätytukiin. [38]



Kuva 34. Betonipadon silmämääräistä tarkastamista Yhdysvalloissa. [57]

Suoran betonipadon muodonmuutoksia voi havainnoida harjan jatkeelta keskittämällä katse tarkasteltavaan linjaan ja siirtymällä sivuittain usean havaintokulman aikaansaamiseksi. Apuna voi käyttää kiikareita havaintomatkan näennäiseksi lyhentämiseksi ja näin saada siirtymät ja poikkeamat näyttämään suuremmilta ja täten havaittavammilta. Havainnointiin voi käyttää apuna myös vertailuviivoja, joita muodostavat olemassa olevat vaaka- tai pystysuorat rakenteet padossa, kuten esimerkiksi kaiteet, tukimuurit, kiskot, liikuntasaumat tai maalatut viivat päällysteessä. Padon ylävedenpuolen osuus

tulisi tarkastaa harjalta, päädyiltä sekä mahdollisuuksien mukaan veneestä tai nostokorista. Havaintopaikkojen lukumäärään vaikuttavat padon mitat. Patoaltaan vedenpinnan tulisi olla ylavedenpuoleisen tarkastuksen aikana mahdollisimman alhaalla. [38]



Kuva 35. Muun muassa halkeamien paikallistamiseen käytetty tarkastuskäytävä Hooverin padolla Arizonassa, Yhdysvalloissa. Toistaiseksi vain harmittomia hiushalkeamia on löydetty. [58]

Mikäli padolla tapahtuu poikkeavaa vuotoa tai rakenteessa on vaurioita, niistä löytyy yleensä merkkejä alavedenpuolelta. Tältä puolelta tarkastusta suorittaessa tulisi vedenpinnan olla mahdollisimman korkealla, jolloin vuotojen havaitsemisen todennäköisyys kasvaa. Tästä syystä padon eri puolten tarkastukset voi joutua tekemään eri ajan-kohtina. Myös alavedenpuolelta pato tulisi tarkastaa useammasta havaintopisteestä ja erityistä huomiota tulee kiinnittää padon juureen, jossa rakenne yhtyy perustaan. Tässä kohdassa tulee havainnoida erityisesti suotoveden esiintymistä, halkeilua ja rakenteen muutoksia padon pituuden matkalla. [38]

Tarkastus tulee ulottaa riittävän kauas padon ympäristöön, sillä padon ali suotautuvat vedet saattavat tulla maan vedenläpäisevyysominaisuuksista riippuen pinnalle vasta kaukana padosta. Erityisesti on huomioitava kaikki muutokset maaperässä, liukupintamurtumat, kuopat, uppoumat, kosteikot ja runsaan kasvillisuuden alueet sekä muut tekijät, jotka voivat kertoa suotoveden esiintymisestä. Padon liityntäkohdat päätytukiin tai muihin rakenteisiin tulee tarkastaa, sillä näissä kohdissa voi esiintyä betonin halkeilua padon liittyessä kallioon ja siirtymiä tai epästabiilisuutta padon liittyessä maapa-

toon tai muuhun penkereeseen. Instrumentoidulla padolla mittalaitteet kertovat usein hydrostaattisen paineen kasvusta, mikäli suotovedet lisääntyvät. [38]

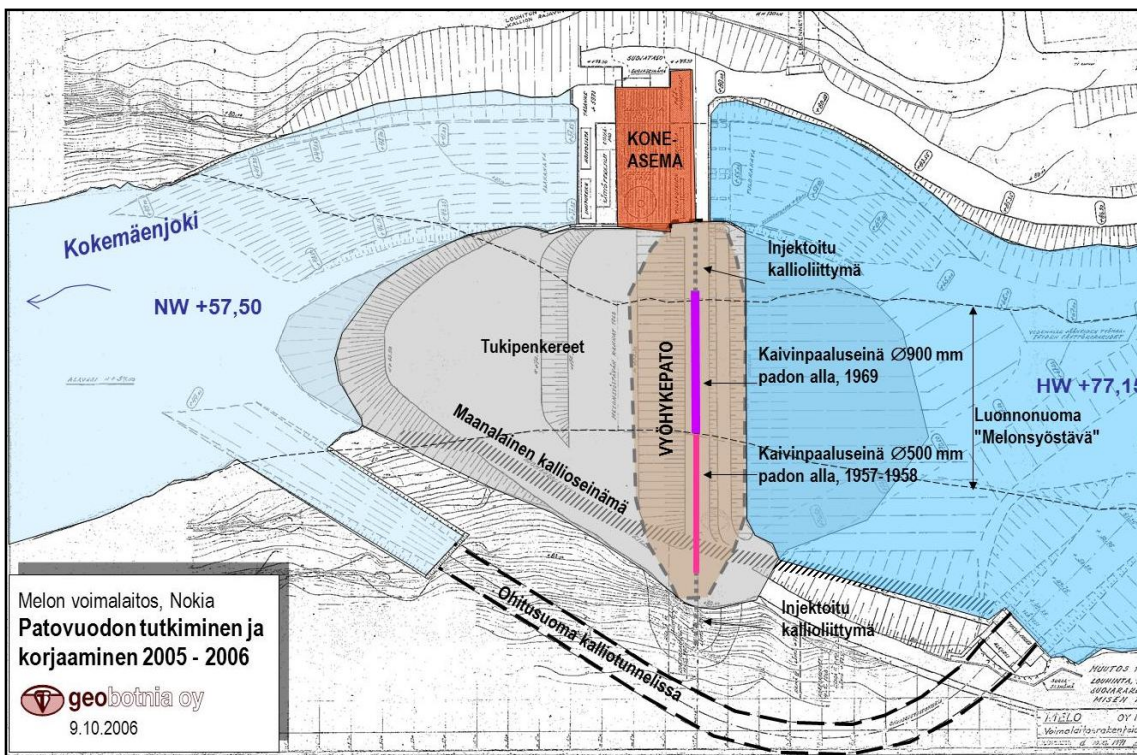
Betonipadon tarkastuksen yhteydessä tulisi käydä läpi myös padonsisäiset tarkastuskäytävät, joita on ainakin suurilla padoilla. Kuvassa 35 on esitetty Yhdysvaltain Arizonassa sijaitsevan Hooverin padon sisään johtava tarkastuskäytävä. Tarkastustilasta nähtävissä olevien putkistojen ja muiden rakenteiden toiminta tulee tarkastaa, lisäksi salaojaputkista voi mahdollisuuksien mukaan tehdä virtaamamittauksia ja verrata niitä aikaisempiin havaintoihin. Mahdolliset vesipainemittarilukemat tulee havainnoida ja verrata niitä aikaisempiin havaintoihin. Näkyvissä olevat betonipinnat on tarkastettava ja havainnoitava kaikki pintaviat, halkeamat ja kulumat. Pintoja kannattaa verrata padon ulkopuolisiin pintoihin, jotta voi määrittää esimerkiksi halkeamien jatkuvuuden koko rakenteessa. [38]

Betonipadon kuntoarvioon voi liittyä myös laboratoriotutkimuksia, mikäli rakenteiden kunto halutaan selvittää luotettavasti. Yleisimpiä koemenettelyitä ovat ohuthietutkimus, puristus- ja vetolujuuskokeet, karbonatisoitumismääritys ja kloridipitoisuusmääritys. [38]

6 PATOVUODON KORJAUSKOHDE: MELON VOIMALAITOSPATO

6.1 Kohteen yleiskuvaus

Melon voimalaitos sijaitsee Kokemäenjoen Nokianvirrassa, noin neljä kilometriä Nokian keskustan länsipuolella Pyhäjärven alapuolella. Alun perin paikalla virrannut koski oli nimeltään Melonsyöstävä, ja joki kulkee kapeassa, jyrkkäreunaisessa kallioperän ruhjelaaksossa. Voimalaitos ja vesitiet on rakennettu alkuperäisen uoman pohjoispuolelle kalliorinteeseen, jota on avarrettu louhimalla. Voimalaitoksen eteläpuolella on harjalta mitattuna noin 120-metrinen maapato. Ohijuoksutusta varten on rakennettu kalliotunneli, joka kiertää padon eteläpuolelta. Voimalaitoksen pudotuskorkeus on 19,5 metriä ja keskivirtaama 145 kuutiometriä sekunnissa. [11]



Kuva 36. Melon voimalaitospadon yleiskartta.

Ensimmäiset suunnitelmat voimalaitoksen rakentamiseksi paikalle tehtiin jo 1920-luvulla. Rakennustöihin päästiin kuitenkin vasta vuonna 1968 ja voimalaitos valmistui kesällä 1971. Pääsuunnittelija oli Imatran Voima Oy, pääurakoitsija Perusyhtymä Oy ja rakennuttaja Oy Nokia Ab. Voimalaitoksella säädetään Pyhäjärven pintaa tasojen

+75,50...+77,15 välillä. Melon voimalaitospatoon liittyviä korkeuksia ilmoitettaessa käytetään korkeusjärjestelmää NN. [11]

6.2 Padon rakenteet

Maapato on tyypiltään vyöhykepato, jonka poikkileikkauksen keskikohdalla on tukipenkereiden ja suodattimien välissä tiivistysosa. Tukipenkereet ovat louhetta, suodattimet soraa ja tiivistysosa moreenia. Korkeusero maapadon harjan ja alkuperäisen uoman pohjan tason välillä on noin 34 metriä, mutta ennen maapadon rakentamista uoma on kuitenkin täytetty, jolloin varsinaisen maapato-osan korkeudeksi jää 22 metriä. Padon harjan korkeustaso on +80,00. [12]



Kuva 37. Melon voimalaitospato etelän suunnasta kuvattuna. (Kuva: Juha Hurme)

Koska pato sijaitsee ruhjelaaksossa, on ehjä kalliopinta varsin syvällä. Jääkauden aikana rotkolaaksoon on kerrostunut maa-aineksia ja ympäröiviltä kalliorinteiltä irronneita kiviä jopa 40 m paksuiksi kerrostumiksi. Tästä syystä padon liittymä kallioon on toteutettu kaivinpaaluseinällä ennen varsinaisen maapadon rakentamista. Kaivinpaaluseinän liittymäkohta kallioon on varmistettu injektointiverholla. [12]

Kaivinpaaluseinä on rakennettu kahdessa vaiheessa: eteläinen osa vuosina 1957–1958 käyttäen läpimitaltaan 500 mm kaivinpaaluja ja lähempänä koneasemaa oleva osa vuonna 1969 käyttäen 900 mm kaivinpaaluja. Seinä koostuu vierekkäin paikallavaletuista, poikkileikkaukseltaan pyöreistä, toisiaan leikkaavista ja raudoittamattomista

on testattu rakeisuusmäärityksin, vedenläpäisevyyssmittauksin ja tiiviyskokein. Tukipenkereen alle ei ole tehty suodatinta, sillä se on ilmeisesti katsottu tarpeettomaksi maapadon ali tapahtuvan virtauksen katkaisevan kaivinpaaluseinän takia. [12]

Tiivistysosassa käytetyn moreenin vedenläpäisevyys on ennakkokokeiden perusteella ollut 10^{-8} ... 10^{-7} m/s. Rakeisuuden perusteella se on kuitenkin ollut jonkin verran enemmän, sillä tiivisteeseen on käytetty pääosin vain 10...15 % hienoainesta sisältävää soramoreenia tai soraista hiekkamoreenia. Tiivistystyö on kuitenkin onnistunut tiiviyskokeiden perusteella kohtalaisen hyvin. [12]

Suodatinmateriaali on keskisoraa, raekooltaan 4...8 mm ja sen vedenläpäisevyys ennakkokokeiden perusteella on 10^{-4} ... 10^{-3} m/s. Vanhoista valokuvista ilmenee, että suodatin on tehty vanhan padonrakennustavan mukaisesti huuhtelemalla se kerroksittain vedellä, jolloin hienoaines on valunut alas moreenia vasten ja karkeammat rakeet tukeutuvat louhetta vasten. Tukipenkeret on tehty hieman suunniteltua leveämmiksi, sillä padon märeille puolelle on sijoitettu kapea tasanne hieman vesirajan yläpuolelle ja kuivalle puolelle on tehty laaja alatasanne, jonka luiskan alaosa sijaitsee 60...100 metrin päässä patolinjasta. Padon poikkileikkausmuoto käy ilmi kuvasta 38, jossa on myös näkyvissä penkereelle suunniteltu alkuperäinen muoto. Padon moreenitiivisteiden päälle on tehty louhetäyttö ja sen päälle sorakerros kulkutiekseksi. [12]

6.3 Vuotohavainnot ja toimenpiteet syksyllä 2005

6.3.1 Ensimmäinen päivä

Maapadon eteläosassa, keskilinjän märeillä puolella havaittiin perjantaina 28.10.2005 kello 8:15 kuoppa, jonka halkaisija oli noin 4,0 metriä ja syvyys noin 3,5 metriä. Kuopan pohja ulottui ylävedenpintaan saakka ja sen pohjalla oli vettä. Laitoksen johtaja ilmoitti asiasta Hämeen ympäristökeskukseen ja Nokian palomestarille. Kuopasta otettiin kuvia ja ne lähetettiin PVO-Vesivoima Oy:n edustajalle sekä tekniselle asiantuntijalle, jolta saatiin ensimmäiset toimenpideohjeet. [12]

Samana päivänä kuoppaan ja ylävedeen laitettiin väriainetta vuotoreitin selvittämiseksi. Kuopassa olevan vedenpinnan taso vaaittiin ja todettiin sen olevan yläveden kanssa samalla tasolla, eli +76,80 (NN). Kuopan tilavuudeksi arvioitiin noin 45 m³. Paikalle saatiin ensimmäinen maarakennusurakoisija kello 10:00 ja padolle ryhdyttiin ajamaan valmiiksi jakavan kerroksen soraa. Samalla ylävettä ajettiin alaspäin noin 0,20 metriä, jolloin vedenpinta kuopan pohjalla laski vastaavasti. [12]

Kello 12:00 päätettiin kuoppa täyttää soralla teknisen asiantuntijan ohjeen mukaisesti. Noin 1,0 metrin paksuudelta täytettiin kaivinkoneen kauhalla ilman tiivistystä. Tämän jälkeen asennettiin suodatinkangas ja täytettiin kuoppa kokonaan. Suodatinkankaana käytettiin luokan 2 kangasta, sillä ohjeen mukaista luokan 4 kangasta ei olisi saatu paikalle tarpeeksi nopeasti. [12]

Palokunnan sukeltajat tarkastivat patoa samana päivänä yläaltaan puolelta kuopan kohdalta noin 30 metrin matkalta. Alavirran puoli tarkistettiin veneellä, kuten myös ohitustunneli. Missään ei havaittu muutoksia. Padon alapuoli tarkastettiin ennen pimeän tuloa väriaineen varalta, mutta mitään merkkejä siitä ei havaittu. Illalla kuoppa saatiin täytettyä noin 50 m³:lla soraa. Kuopan päälle laitettiin merkkilippu, jonka avulla täyttömateriaalin vajoamista voitaisiin seurata. Lipun asento tarkastettiin silmämääräisesti 2 tunnin välein eikä seuranneen viikonlopun aikana havaittu muutoksia. [12]

Padon suunnitelmien ja rakennusaikaisten asiakirjojen selvitys käynnistettiin vaurion syyn selvittämiseksi. Kuopan sijaitessa lähellä etelärantaa pidettiin eräänä mahdollisuutena sitä, että patoon olisi syntynyt kallion kautta vuotokanava, joka purkautuisi ohitustunneliin kuljettaen sinne maa-ainesta. [12]

6.3.2 Tapahtumat 31.10.–1.11.2005

Maanantaina 31.10.2005 todettiin kuopan painuneen noin 10 m³ verran. Alakanavan tarkastuksessa ei havaittu liikettä eikä väriainetta. Kuoppa täytettiin ja lisää soraa ajettiin varastoon. Teknisen asiantuntijan ohjeen mukaan varauduttiin kuoppaa täyttämään soralla sitä mukaa kun painumista tapahtui. [12]

Maanantaina padon omistaja sopi vaurion tutkimusten aloittamisesta Geobotnia Oy:n kanssa. Tiistain aikana kuopassa ei tapahtunut muutoksia. Ohitustunneli tarkastettiin veneellä ja kaikuluotaimella. Paikalla pidettiin 1.11.2005 viranomaiskokous, johon osallistuivat edustajat Hämeen ympäristökeskuksesta, Tampereen palolaitokselta ja PVO-Vesivoima Oy:stä. Kokouksessa päätettiin, että myös padon alavirran puolen luiska tarkastetaan sukeltamalla. [12]

6.4 Patovuodon tutkimukset ja korjaukset

Geobotnia Oy:n tutkimusryhmä saapui paikalle keskiviikkona 2.11.2005. Kaksihenkiseen ryhmään kuului lisäksi monitoimikaira maa- ja kalliokairauksiin sekä näytteenottoon ja mittauksiin. Tutkimusryhmä oli mukana koko tutkimusvaiheen ja myöhemmän injektointiputkien porausvaiheen ajan. Töitä tehtiin kahden viikon jaksoissa siten, että ryhmä työskenteli aina 10 vrk ja piti sitten taukoa 4 vrk. [12]

6.4.1 Tutkimusvaihe 1: kalliovuodon selvittäminen

Vanhojen asiakirjojen tutkiminen johti epäilykseen kallion kautta tapahtuvasta vuodosta. Tämän todennäköisyyttä lisäsi se, että kallion tiedettiin olevan hyvin rikkonaista eikä maanalaisen kallioseinämän tarkkaa paikkaa suhteessa vauriokohtaan tiedetty. Mikäli kuoppa sijoittuisi kallioseinämän eteläpuolelle eli rannan puolelle jyrkännettä, olisi kalliovuoto mahdollinen. [12]

Tutkimus aloitettiin kartoittamalla patoalue, mittaamalla kuopan paikka ja vertaamalla näitä vanhoihin piirustuksiin. Kalliojyrkänteen paikkaa selvitettiin porakonekairauksilla, jotka sijoitettiin tiivisteen märälle puolelle tukipenkereen tasanteelle. Porakonekairauksen perusteella todettiin kalliopinnan olevan kuopan kohdalla ainakin 30 metrin syvyydessä (tason +49 alapuolella) eli ainakin 8 metriä alkuperäisen maanpinnan alapuolella. Tästä noin 10 metriä etelään tavoitettiin kalliopinta tasolta +52,8 ja siitä edelleen 10 metriä etelään tasolta +63,0. [12]

Näiden kairauksen ja mittausten perusteella todettiin 3.11.2005 että maanalaisen kallioseinämän täytyy sijoittua vauriopaikasta noin 8...10 metriä etelään. Tästä pääteltiin, ettei vuoto voi tapahtua kallion kautta. Mikäli näin olisi, myös kuoppa olisi syntynyt selvästi etelämmäs, lähelle padon rantaliittymää. [12]

Lisävarmistus tälle olettamalle saatiin 6.11.2005 tehdyistä sukellustarkastuksista, joiden mukaan tunneliin ei ollut tullut irtomaa-ainesta. Tunnelin pohjalla todettiin ainoastaan vähäisiä määriä terävasärmäistä kiviainesta, joka lienee peräisin tunnelin katon tai seinämien rapautumisesta. [12]

6.4.2 Tutkimusvaihe 2: padon tiivisteen kunnon selvittäminen

Torstaina 3.11.2005 asennettiin padon keskilinjän alavirran puolelle välitasanteelle pohjavesiputki pohjavedenpinnan havainnointia varten. Putkesta havaittiin, että vedenpinta tasanteen kohdalla oli huomattavan ylhäällä, noin 7,5...8,0 metriä alaveden yläpuolella. Alatasanteelle asennettiin 6.11.2005 lisää pohjavesiputkia vedenpinnan muodon ja myöhempien korjaustoimien vaikutusten havainnoimiseksi. Lisäputket asennettiin padon suuntaiseen riviin vuotopaikalta koneasemalle päin. Lisäputkista tehtyjen havaintojen perusteella selvisi, että vedenpinta laskee selvästi vuotopaikalta koneasemalle päin. Kahdesta putkesta kuului selviä virtauksen ääniä. [12]

Tutkimuksia jatkettiin moreenitiivisteen läpi tehdyillä heijarikairauksilla, joilla etsittiin heikkousvyöhykkeitä ja mahdollisia tyhjätiloja. Kairauksia tehtiin useassa vaiheessa laajentaen ja tihentäen tutkimusaluetta. Kairaukset ulotettiin pääasiassa koko maapa-

to-osan läpi, noin 20...23 metrin syvyyteen pinnasta. Kairauksilla löydettiin tiivisteestä erittäin löyhiä kohtia ja tyhjätilaa, jonka läpi kairatangot putosivat. Tiivisteeseen todettiin olevan kauttaaltaan suhteellisen löyhässä tilassa. [12]

Veden virtausta tiivisteeseen läpi tutkittiin merkkiainekokeella 6.11.2005. Voimalaitoksen koneet olivat seisseet koko yön, eikä vedessä ollut virtausta. Koe aloitettiin kello 9:15. Porakonetanko asennettiin 20 metrin syvyyteen tukipenkereeseen, noin 5 metriä padon harjalla olevan kuopan etupuolelle ja merkkiaine pumpattiin tangon läpi. Väri alkoi näkyä keskimmaisessa alatasanteen pohjavesiputkessa noin 3 minuutin kuluttua. Koe toistettiin nostamalla tankoja 10 metriä ylemmäs ja jatkamalla pumppausta, tällä kertaa väriä ei näkynyt putkessa. [12]

Värin ulostulo havaittiin alakanavassa useassa paikassa kello 10:35. Tarkastuksessa havaittiin myös kolme kirkkaan veden ulostulopaikkaa. Nämä näkyivät rannalta lähes vedenpinnan tasolla, koska alakanavassa ei ollut muuta virtausta. Tämän jälkeen jatkettiin heijarikairauksia padolla ja pohjavesipintojen tarkkailua. [12]

Tutkimusten tuloksia arvioitiin padon omistajan kanssa käydyssä neuvottelussa 7.11.2005. Neuvottelussa päätettiin uusien heijarikairausten tekemisestä heikkousvyöhykkeen/vuotokanavan paikallistamiseksi. Lisäkairausten perusteella todettiin 9.11.2005, että eniten löyhtynyt vyöhyke oli tasovälillä +66...+72 (8...14 m syvyydessä) ja sen leveys oli noin 5...6 m. Vyöhyke suuntautui alaviistoon suhteellisen jyrkästi, noin 40° kulmassa (vastaa huuhtoutuneen materiaalin kitkakulmaa) ja kapeni ulostulopäässä, tiivisteeseen määrällä puolella. [12]

Tästä tehtiin johtopäätös, että vuoto tapahtuu moreenitiivisteeseen läpi ja kyseessä on putkieroosio (ks. kappale 4.3). Löyhän ja tyhjätiloja sisältäneen vyöhykkeen mitat ja kaltevuus sopivat hyvin kirjallisuudessa esitettyihin tutkimuksiin putkieroosiosta. Vedenpinnan havaittujen korkeuserojen ja materiaalin oletetun vedenläpäisevyyden sekä merkkiainekokeiden perusteella laadittiin ensimmäinen arvio vuodon suuruudesta. Karkeat laskelmat osoittivat, että vuodon suuruus voisi olla noin 1...3 m³/s. [12]

6.4.3 Korjausvaihe 1: tyhjätilojen täyttö ja tiivistyspontti

Korjausmenetelmää käsiteltiin padon omistajan kanssa käydyssä neuvottelussa 7.11.2005. Tuolloin päädyttiin siihen, että paras tapa vuodon katkaisemiseksi ja moreenitiivisteeseen vesitiiviyyden varmistamiseksi on pontin lyöminen tiivisteeseen läpi. Epäiltiin kuitenkin, että pontituksen aiheuttama tärinä voisi romahduttaa heikkokuntoisen tiivistysosan tai saada vuotokanavan muuttamaan äkillisesti paikkaa ja syövyttämään jokaisen lyödyn pontin viereen uuden tyhjätilan. Riskin minimoimiseksi päätettiin teh-

dä ensin täyttöinjektointi käyttäen paisuvaa ja nopeasti kovettuvaa uretaania ja aloittaa pontin lyönti vasta tämän jälkeen. [12]

Korjaussuunnitelman laatimiseksi alettiin selvittää injektointiaineiden ominaisuuksia ja toimitusaikoja, kuten myös eri ponttiprofiilien toimitusaikoja sekä ponttausurakoitsijoita ja kalustoja. Injektointi suunniteltiin aloitettavaksi padon märältä puolelta (syntyneen kuopan kohdalta) ja täydennettäväksi keskilinjän kuivalta puolelta. Ponttiseinä sijoitettiin padon keskilinjalle ja ponttien pituudeksi valittiin 16 metriä, jotta ne ulottuivat varmuudella vuotokanavan alapuolelle. [12]

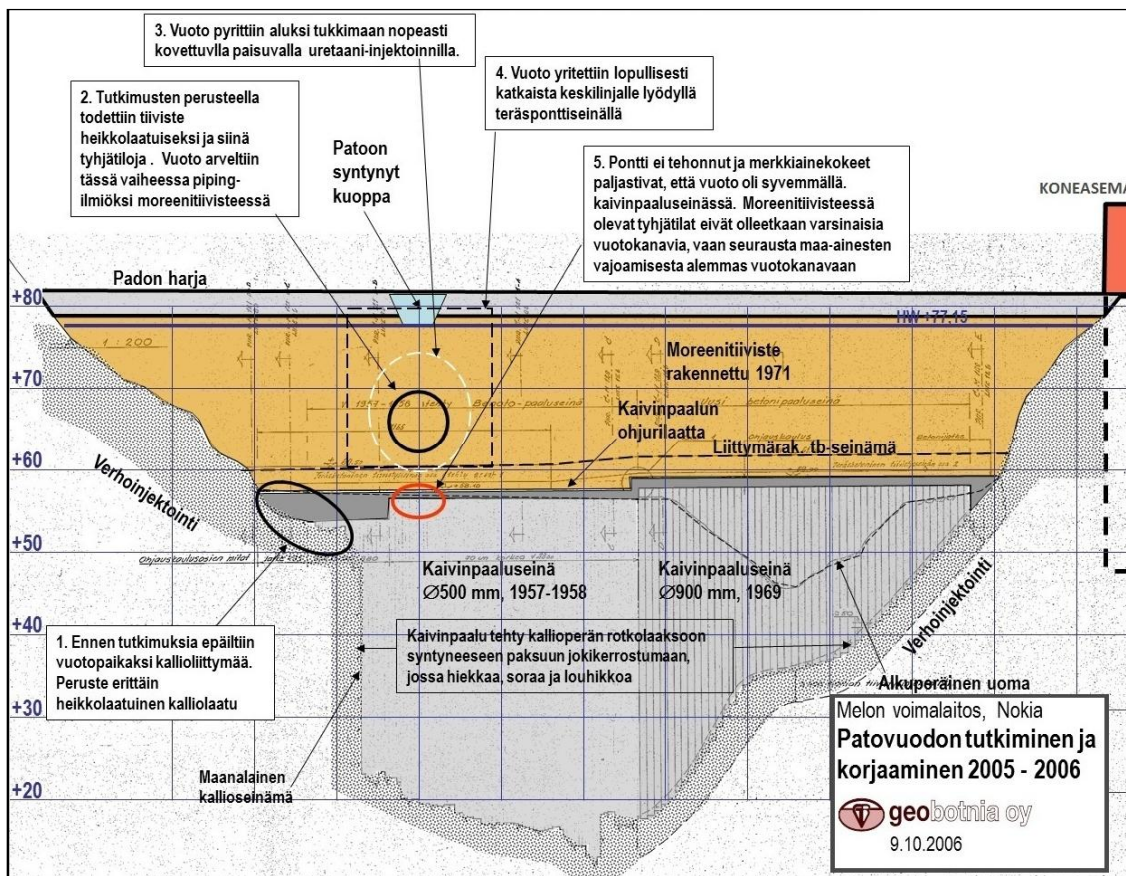
Injektointityö aloitettiin 15.11.2005. Injektoinnissa käytettiin paisuvaa polyuretaania ja kiihdytintä, jotka sekoitettiin kuivatyönä sekoittimessa ja pumpattiin injektointiputkeen. Putket olivat teräksisiä RR50-putkia, joihin tehtiin uritus injektoitavan vyöhykkeen kohdalle ja ne asennettiin maaputkiporauksena vesihuuhtelulla. Pääosa uretaanista injektoitiin vuotokanavan ylävedenpuoleiseen päähän käyttäen sekä pystysuoria että vinoja reikiä. Injektointisyvyys padon harjalta mitattuna oli noin 10...13 metriä. [12]

Injektointityön aikana jokiveden lämpötila oli +6 °C. Injektointiaineet säilytettiin lämpimässä ja sekoitus tehtiin uretaanivalmistajan ohjeiden mukaisesti lämmitetyssä kontissa. Saatujen tietojen mukaan paisumis- ja kovettumisreaktion olisi pitänyt tapahtua hyvinkin nopeasti jopa selvästi pakkasen puolella. Koska injektointi vaikutti tehottomalta, päätettiin tätä testata niin kutsutulla ämpäritestillä. Havaittiin, että jokiveden lämpötiloissa reaktio jää hyvin vaillinaiseksi ja paisuminen alkaa vasta 6...8 minuutin kuluttua aineen sekoittamisesta veteen. Lisäksi injektoimisen yli 10 metrin syvyyteen vedenpinnan alle, suurempaan paineeseen epäiltiin hidastavan ja heikentävän reaktiota entisestään. [12]

Edellä mainitun havainnon jälkeen päätettiin injektointia kuitenkin vielä jatkaa siten, että ylävirranpuoleisiin injektointiputkiin syötettiin lämmintä vettä samalla, kun alapuolelle injektoitiin. Uretaanimenekki oli kaikkiaan 1325 kg, mutta mitään muutoksia vedenpinnoissa ei havaittu. Uretaania ei myöskään havaittu pohjavesiputkissa tai alapuolella. Injektointi lopetettiin 21.11.2005. [12]

Pontitus päätettiin aloittaa, vaikka injektointi ei aiheuttanut muutoksia vuotoon. Aina-kin osan uretaanista arvioitiin paisuneen ja kovettuneen moreeniseen tiivistysosaan, mikä vähentäisi pontituksen riskejä. Pontitus aloitettiin 21.11.2005 noin 40-tonnisella koneella ja profiililla AU14. Padon harjalla, tiivistysosan päällä oleva louhetäyttö kaivettiin pois moreenin yläpintaan saakka. Pontit toimitettiin 12-metrinä ja ne jatkettiin

työmaalla 18-metrisiksi. Pontit lyötiin kaivettuun uraan niiden alapään ulottuessa likimain tasoon +60 (noin 20 metriä padon harjalta). [12]



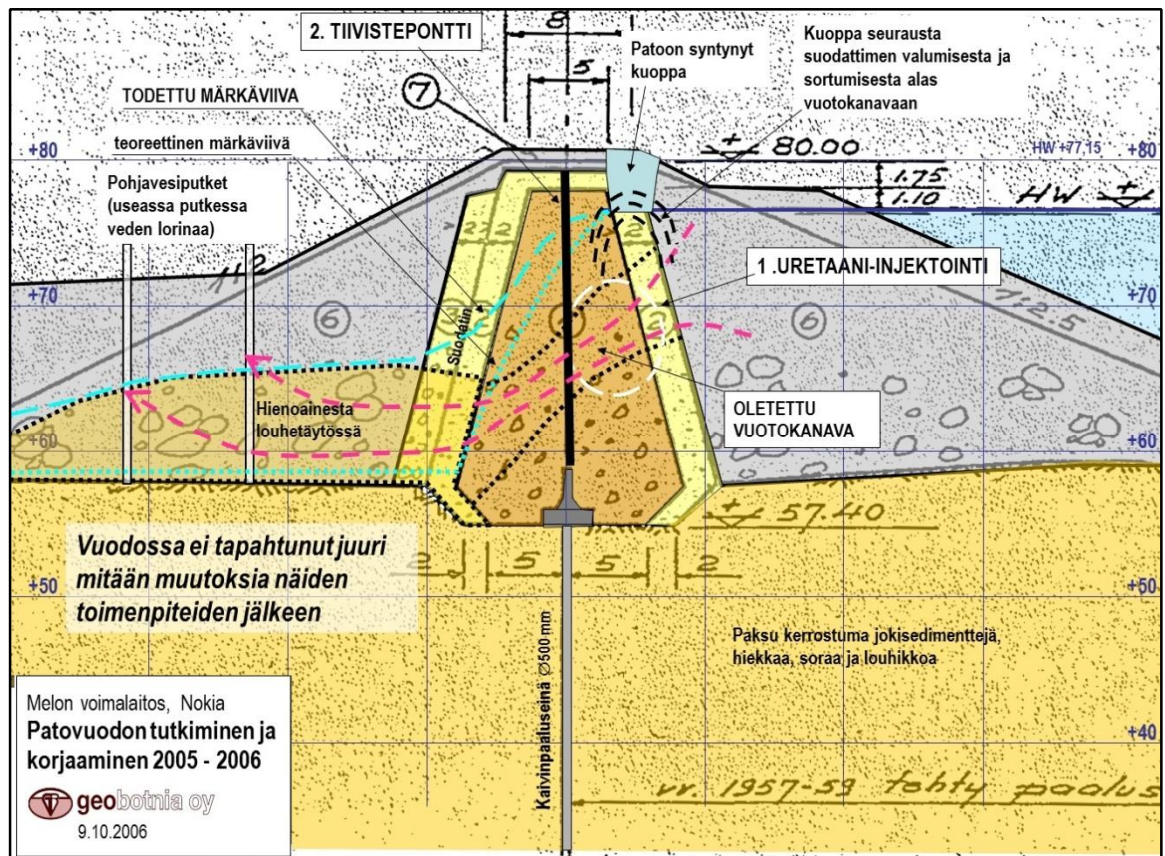
Kuva 39. Pituusleikkaus Melon padosta. Vuotopaikan etsintä ja ensimmäiset toimenpiteet vuodon korjaamiseksi. [71]

Ponttiseinä toteutui likimain suunnitellun mukaisena. Suuri osa ponteista tavoitti maapadon alla olevan teräsbetoniseinän, mutta pontituksen jälkeen ei vedenpinnoissa kuitenkaan havaittu muutoksia. Vaikka kaksi ponttia oli jäänyt ylemmäs, todisti tämä alkuperäisen putkieroosioteorian vääräksi. Oletettu vuotokanava katkaistiin niin monella pontilla, että vedenpinnoissa olisi pitänyt havaita muutos. Vuotokohdan oli pakko sijaita syvemmällä, pohjamaassa tai pohjamaan ja patorakenteen rajapinnassa. [12]

6.4.4 Tutkimusvaihe 3: vuodon etsiminen syvemmältä

Padon rakenteen takia pohjamaan kautta tapahtuvan vuodon täytyy pääasiassa kulkea mären puolen tukipenkereestä suoraan pohjamaahan. Tällöin ei tärkein vuotokanava välttämättä kulje lainkaan moreenisen tiivistysosan kautta. Tiivistysosassa todettu löyhyys ja tyhjätilat olisivatkin seurausta tiivistemateriaalin ja suodattimien valumisesta tai romahtamisesta niiden alapuolelle veden virtauksen takia syntyneisiin tyhjätiloihin. Patomateriaalin hakiessa paikkaansa osa tyhjätilasta on lopulta saavuttanut padon harjan johtaen havaitun kuopan syntymiseen. Tätä teoriaa tukee kuopan syntyminen

suodattimen kohdalle. Suodatinkerros koostuu koheesiottomasta sorasta, joka varisee alaspäin selvästi moreenimateriaalia nopeammin. Padon keskilinjän kuivalla puolella todettu löyhyys on oletettavasti syntynyt vastaavalla tavalla. [12]



Kuva 40. Poikkileikkaus Melon padon maapato-osasta. Alkuperäisen, putkieroosioon perustuneen vauriohypoteesin perusteella tehdyt toimenpiteet. [71]

Moreenisen tiivistysosan löyhtyminen on johtanut myös sen läpi virtaavan suoto-vesimäärän kasvamiseen, jolloin tilanne olisi jatkuessaan johtanut huomattavasti laajamittaisempaan syöpymään. Tiivistysosan läpi virtaava vesimäärä on kuitenkin varsinaiseen vuotoon verrattuna ollut merkityksettömän pieni, joten pontituksen vaikutusta ei ole havaittu vesipinnoissa. Todettiin, että pontitus ei ollut turhaa, vaan se poisti tiivistysosan laajamittaisen syöpymän riskin ja että ponttien lyöntienergia on samalla tiivistänyt löyhtynyttä tiivistysosaa. [12]

Vuodon täytyi siis ohittaa kaivinpaaluseinä, mutta sen ei kuitenkaan uskottu kulkevan koko kaivinpaaluseinän, ohjurilaatan ja betonisen liittymäseinämän muodostaman rakenteen ylitse, koska silloin pontti olisi katkaissut osan vuodosta. Todennäköisempänä pidettiin vuotoa kaivinpaaluseinässä. Vanhojen rakennesuunnitelmien tarkastamisen yhteydessä havaittiin, ettei ohjurilaattaa ollut suunniteltu kestävänsä sen päällä olevan maapadon painoa. Laatan kestäminen ehjänä edellytti sen alapuoliselta maa-kerrokselta riittävää jäykkyyttä. [12]

Maapato on kuormittanut maapohjaa aiheuttaen ohjurilaatan kohdalla laskennallisesti vähintään 300 mm painuman. Ohjurilaatta taas on tukeutunut kaivinpaaluseinään, eikä ole päässyt painumaan samalla tavalla, jolloin sille on kohdistunut huomattavan suuri pystykuorma. Laatasta on murtunut mahdollisesti ensin toinen puoli, minkä seurauksena kaivinpaaluseinään on kohdistunut taivutusta ja tämä on aiheuttanut vaakahalkeilua ja mahdollisesti kaivinpaaluseinän yläpään vääntymisen poikki. Kyseisestä murtumishypoteesista keskusteltiin padon omistajan edustajien kanssa ja vakuututtiin sen mahdollisuudesta. [12]

Edellä mainittu vaurioteoria ja vuotokanava päätettiin varmistaa tutkimusporauksilla, joilla selvitettäisiin ohjurilaatan korkeusasema ja mahdollinen alapuolinen tyhjätila. Lisäksi varmistettaisiin vuotoreitti merkkiainekokeilla sekä laatan ylä- että alapuolelta. Tutkimukset tehtiin 28.11.–9.12.2005. [12]

Porauksissa todettiin laatan paksuudeksi noin 700 mm ja sen alapinnan tasoksi noin +57,4 (22,6 m padon harjalta). Kaikissa porauksissa laattaa ei havaittu, mikä saattaa kertoa laatan vaurioitumisesta ja murtumisesta pienemmiksi kappaleiksi. Laatta on saattanut vaurioitua myös jo rakennusvaiheessa. Kohdissa, joissa laatta voitiin todeta, havaittiin sen alla olevan tyhjätilaa 0,1...0,2 metriä. [12]

Merkkiainekokeita tehtiin syöttämällä putkella merkkiainetta keskilinjan teräsponsin märältä puolelta sekä laatan ala- että yläpuolelta. Merkkiainetta tarkkailtiin kuivan puolen suodattimeen asennetuista tarkkailuputkista. Laatan yläpuolelta syötettyä ainetta ei havaittu putkissa, mutta laatan alapuolelta syötetty merkkiaine havaittiin putkissa jo kahden minuutin kuluttua ja alakanavassa alle kahdessa tunnissa. Johtopäätöksenä todettiin, että ohjurilaatan alla on tyhjätila, jota pitkin vuoto tapahtuu. Havainnot siis vahvistivat rakenteellisen arvion perusteella laaditun teorian. [12]

6.4.5 Korjausvaihe 2: vuodon tukkiminen ohjurilaatan alla

Suunnitelma

Korjaustavasta neuvoteltiin padon omistajan kanssa seuraavasti [12]:

- A) Vuoto voitaisiin mahdollisesti tukkia oikeaan paikkaan syötetyllä, nopeasti paisuvalla ja kovettuvalla uretaanilla. Ongelmana pidettiin alhaista lämpötilaa ja siitä, ettei uretaani ehdi sitoutua tarpeeksi nopeasti.
- B) Ennen injektointia olisi vuotoa mahdollista pienentää lyömällä ponttiseinä määrän puolen suodattimen ja moreenitiivisteiden rajapintaan. Ongelmana olisi ponttien saaminen tavoitesyvyyteen.

- C) Patoon voisi rakentaa uuden tiivistyslinjan lyömällä ponttiseinän keskilinjan kuivalle puolelle. Seinän tulisi ulottua moreenitiivisteiden läpi siten, että se ohittaa ohjurilaatan reunan ja läpäisee myös vuotokanavan.
- D) Uretaanin ohella harkittiin muiden injektointimateriaalien käyttöä. Esille nousi niin kutsuttu voimalaasti, joka on pääasiallisesti vedenalaisissa korjausvaluissa käytetty sementtipohjainen erikoismassa. Voimalaasti on sitkeää ja hankalasti injektoitavaa, mutta se kestää erottumatta voimakkaassakin vesivirtauksessa.

Neuvottelun perusteella laadittiin suunnitelma, jossa vuotokanavan tukittaisiin seuraavalla tavalla [12]:

- 1) Pienennetään virtausnopeutta vuotokanavassa lyhyellä ponttiseinällä, joka lyödään padon keskilinjan ylävirran puolelle ulottuen noin tasoon +54.
- 2) Rakennetaan patoon teräsponttiseinällä uusi tiivistyslinja tiivistysosan kuivalle puolelle, noin 2,5 m keskilinjasta. Seinällä katettiin koko vanhan kaivinpaaluseinän osuus, joten sen pituudeksi muodostui noin 33 metriä. Ponttiseinän alapään tavoitetaso oli vuotokohdalla 12 metrin pituisella osuudella +50 ja muualla +52.
- 3) Tukitaan vuotokanava käyttäen etusulun ja keskilinjan väliin sijoitettua uretaani-injektointia. Massan suunniteltiin kulkeutuvan kaivinpaaluseinän ja vauriokohdan väliin, jolloin vuoto tulppautuisi ja vuotokanavan syöpyminen estyisi.
- 4) Täytetään tyhjätilat ja tiivistetään pato sementti-bentoniitti-injektoinnilla. Toimenpide kohdistetaan maapadon ja pohjamaan liittymiskohtaan (tasovälille +56,5...+61,0) ja ulotetaan koko vanhan kaivinpaaluseinän matkalle sekä vuotokohdan päällä koko löyhtyneeseen moreenitiivisteeseen. Injektointilinja sijoitetaan padon keskilinjan ja uuden tiivistysponttilinjan väliin.

Etusulku ja varsinainen tiivistyslinja

Etusulku tehtiin 12.–20.12.2005 ponttiprofiililla AU14. Etusulkua ei saatu lohkareisuudesta johtuen tavoitesyvyyteen, vaan se jäi noin tasolle +59. Pontituksen seurauksena vesipinta padon kuivalla puolella laski 0,3...0,4 metriä eli vähäinen virtausta heikentävä vaikutus saavutettiin. [12]

Varsinainen tiivistyslinja tehtiin 20.12.2005–27.2.2006 padon keskilinjan kuivalle puolelle, josta poistettiin patotien runkona ollut louhe 1,5 metrin syvyydeltä. Käytetty ponttiprofiili (Larssen 755) oli hieman järeämpi kuin tähän mennessä käytetyt, ja seinä jouduttiin tekemään paikoitellen kolmesta peräkkäisestä pontista hitsaamalla. Ponttien upottaminen moreenitiivisteiden läpi onnistui, vaikka seinää jouduttiinkin välillä vetämään ylöspäin ja lyömään uudelleen. [12]

Pontit pysähtyivät maapadon ja ohjurilaatan alla olevaan lohkaraiseen pohjamaahan. Ponttien keskimääräiseksi alapään tasoksi muodostui +56,75. Vuodenvaihteen jälkeen lyötiin vuotokanavaan lisäksi yksittäisiä kärkivahvistettuja pontteja, joiden alapään tasoksi muodostui keskimäärin +54,85. Pohjavedenpinta padon taustassa laski suurimmillaan 1,3 metriä, mutta palautui osittain. Tästä voitiin päätellä, että vuotokanava syöpyi lisää ja virtaus etsi uusia reittejä. Pohjavesiputkista havaittu pysyvä vedenpinnan alenema oli noin 0,2...0,5 metriä. [12]

Tukkimisinjektointi

Suunnittelukokouksessa 10.1.2006 päätettiin käyttää voimalaasti-injektointia vuotokohdan tukkimiseen. Vuotopaikalle asennettiin 10.–24.1.2006 sisäläpimitaltaan 47-millimetrisiä, teräksisiä RR50-putkia padon keskilinan märeille puolelle noin 0,7 metrin ruutuun. Osa putkista asennettiin ohjurilaatan läpi kaivinpaaluseinän lähelle ja osa laatan etupuolelle vuotokanavaan huuhtoutuneeseen karkeaan kiviainekseen. Putket olivat alapäästään avoimia mahdollistaen voimalastin syötön alapään kautta nostamalla putkea injektoinnin edetessä. Putkipituus oli 27 metriä. [12]

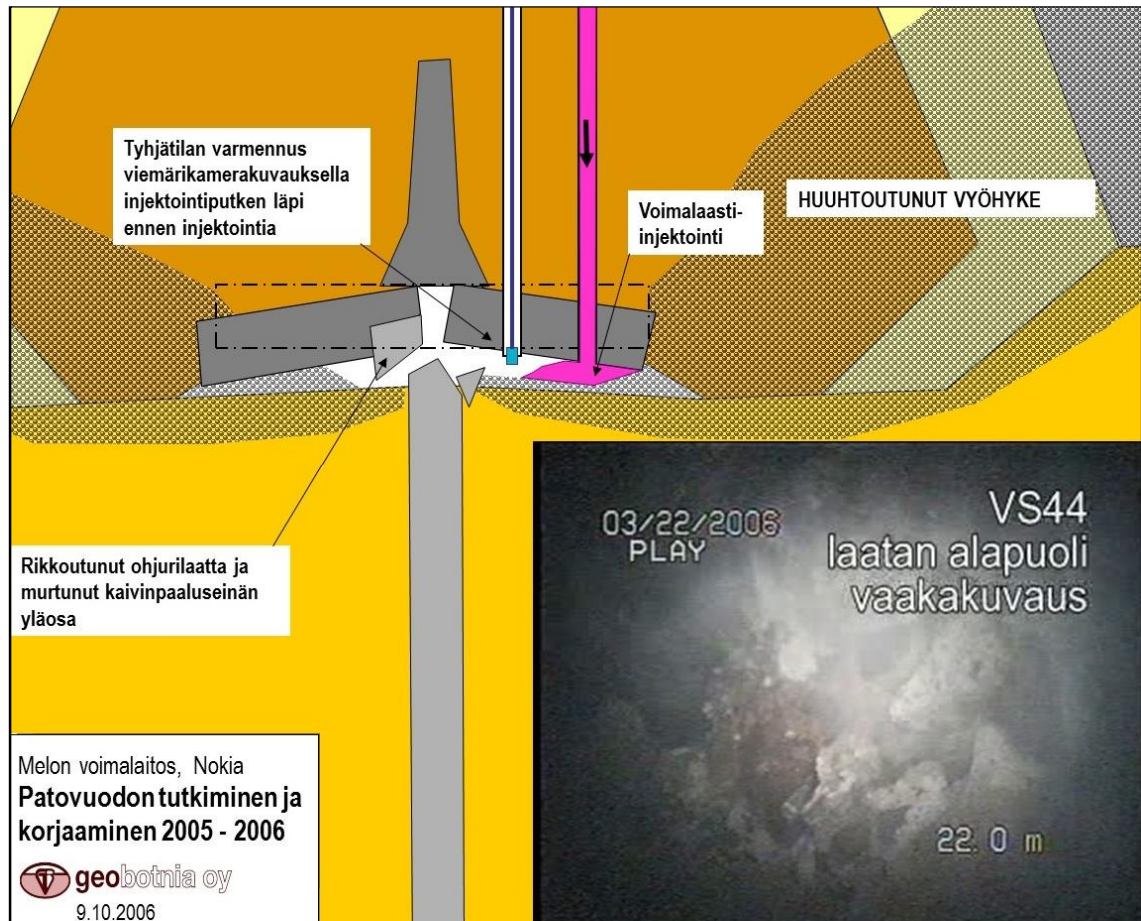
Voimalaasti-injektointi aloitettiin 25.1.2006 ylävirran puoleisista pisteistä ohjurilaatan etupuolelta. Injektoinnissa oli vaikeuksia johtuen laastin jäykkyydestä, pitkästä pumpausmatkasta ja laastin tunkeutumiskyvystä kiviseen pohjamaahan. Voimalaastilla saatiin injektointia löyhää soraa ja tyhjätiloja sisältäneet kohdat, mutta yhtenäisen injektointivyöhykkeen tekeminen ei onnistunut. Ohjurilaatan alle injektointiaessa menekki oli myös heikkoa, lukuun ottamatta selkeitä tyhjätiloja, joihin laastia saatiin menemää satoja kiloja. [12]

Injektoinnin ohjaamisessa alettiin käyttää padon omistajalta saatua nauhoitettavaa vierärikameraa 27.2.2006 alkaen. Kameralla kuvattiin ja varmennettiin asennetun injektointiputken läpi tyhjätilojen olemassaolo sekä havainnoitiin veden virtausnopeutta tyhjätilassa. Kameralla myös täsmätettiin injektointiputken korkeusasema siten, että laasti saatiin mahdollisimman hyvin tyhjätilaan. [12]

Kuvauksissa ilmeni ohjurilaatan alla 50...200 mm tyhjätila, jossa veden virtaus oli nopeaa. Virtauksen havaittiin kuljettavan kiintoainehiukkasia ja liikuttavan tyhjätilan pohjalta olevia sorarakeita. Kaivinpaaluseinän kyljessä havaittiin vaakasuora rako, jota kohti vesi virtasi. Lisäksi saatiin havaintoja ohjurilaatan vaurioista, kuten halkeilusta ja terästen paljastumisesta. [12]

Neuvottelussa 22.2.2006 päädyttiin voimalaasti-injektoinnin jatkamiseen. Tämä suunniteltiin toteutettavan siten, että alussa kaivinpaaluseinän vuotokohdan eteen injektointia vyöhykettä laajennetaan kaareksi, joka liittyy kaivinpaaluseinään vuotokohdan mo-

lemmiltä puolilta. Laajennukset tehdään ohjurilaatan alapuoliseen tyhjätilaan. Tällä pyritään rajoittamaan virtausta ja parantamaan kaivinpaaluseinän vauriokohtaan tehtävän injektoinnin onnistumismahdollisuutta. Tyhjätilojen alapuolista vuotokanavaa injektoidaan sementti-bentoniittilaastilla. Näiden injektointien jälkeen tehdään tulppaus pumpppaamalla injektoidun kaaren sisäpuoliseen tyhjätilaan mahdollisimman nopeasti voimalaastia ja lisäämällä välillä mursketta putkista, jotta saadaan laasti kiilattua betoniseinän rakoon. [12]



Kuva 41. Vuotokanavan paikallistaminen ja injektoinnin ohjaaminen viemärikameralla. [71]

Tulppaus toteutettiin edellä mainitulla tavalla helmi-maaliskuussa 2006. Injektointi oli hidasta ja reikäkohtainen menekki varsin pieni. Kalliomurskeen syöttöä oli kokeiltu jo aiemmin, mutta tuolloin putket tukkeutuivat. Koska veden virtaus havaittiin kameralla suureksi, päätettiin murskeen syöttöä yrittää uudelleen kahden maaputken läpi. [12]

Raekooltaan 2...8 mm kalliosepeä syötettiin 20.–23.3.2006 välisenä aikana. Toiseen putkeen sitä meni noin 1,5 m³ ja toiseen 0,4 m³. Vesipinnat padon keskilinjan takana olevalla välitasanteella laskivat äkillisesti 0,2...1,0 m. Sepelin syötön jälkeen reuna-alueiden ja laatan alustan sementti-injektointi oli niin valmis, että varsinaisen vuoto-

paikan voimalaasti-injektointi voitiin aloittaa. Väriainekokeilla varmistettiin, että eri paikoista syötetty väri hakeutui aina samaan vuotokohtaan. [12]

Injektointi suoritettiin vauriokohdan eteen asennettujen kolmen injektointiputken kautta nopeassa tahdissa 30.3.2006. Injektointien jälkeen, saman päivän iltana tehdysissä pohjavesipintojen mittauksessa havaittiin, että padon harjalla, kaivinpaaluseinän kuivalla puolella olevien tarkkailuputkien vesipinnat olivat laskeneet parhaimmillaan 12 metriä. Myös alatasanteen putkien vedenpinnat laskivat. Vuotopaikan injektointi varmistettiin vielä sementti-injektoinnilla. [12]

Voimalaasti-injektointeja tehtiin 25.1.–4.4.2006 välisenä aikana 25 injektointiputken kautta yhteensä 29,7 tonnia. Injektointi oli teknisesti vaikeaa ja edellytti tiheää pisteväliä, mutta vauriokohta saatiin kuitenkin tulpattua. Koko injektointityön aikana alakanaavan luiskassa esiintyi vuotopaikalta tulevaa virtausta ja lähteitä, merkkeinä vuodosta. Kolme päivää voimalaasti-injektoinnin jälkeen virtausta ja lähteitä ei enää ollut näkyvissä eikä niitä ilmaantunut enää työn loppuaikana. [12]

Kaivinpaaluseinän vauriokohta oli injektointihavaintojen ja viemärikamerakuvausten perusteella noin 1,0 metrin pituinen vaakahalkeama seinän ja ohjurilaatan liittymäkohdassa. Laatan alle oli muodostunut suurimmillaan noin 0,25 metrin korkuinen tyhjätila. Vuotokanava näytti kapenevan kiilamaisesti kohti kaivinpaaluseinän vauriokohdtaa, joten vuotoveden virtausnopeuden on täytynyt kiihtyä voimakkaasti kohti kaivinpaaluseinän rakoa. Arvioiden mukaan virtausnopeus vuotokanavassa on voinut olla 3...8 m/s, joka on tarpeeksi suuri huuhtomaan kaikki alle 6 mm rakeet mukanaan. Tulos on yhtenevä viemärikamerakuvausten kanssa. [12]

6.4.6 Padon tiivistysinjektointi

Patolinjan injektointi

Varsinaisen vuodon tulppaamisen jälkeen pato tiivistettiin sementti-bentoniittilaastilla aikaisemmin laaditun suunnitelman mukaisesti. Injektoinnilla tiivistettiin maapadon ja pohjamaan raja (ohjurilaatan tyhjätilat) koko vanhemman kaivinpaaluseinän matkalla sen molemmin puolin. Lisäksi tiivistettiin vuotopaikan löyhtynyt moreenitiiviste keskilinjan ja uuden tiivisteponnin välissä. Injektointiverhon korkeus oli 6,0 metriä ja se kohdistettiin ponttiseinän alapäähän betonilaatan molemmin puolin. Vuotopaikan sementti-bentoniitti-injektointia varten tehty injektointiverho oli korkeampi, noin 18 metriä ja sen alapää sijoittui tasolle +54. [12]

Injektointi suoritettiin useassa kierroksessa siten, että ensin injektointiin joka neljäs piste, minkä jälkeen tihennettiin väliä joka toiseen ja lopuksi väliin jääneet pisteet. Kunkin

pisteen injektointi aloitettiin pohjalta ja sitä nostettiin yhden metrin välein. Ensimmäisellä kierroksella (4,0 m välein olevat putket) injektointimäärät olivat tyypillisesti 1000...2000 kg injektointilaastia/1,0 m nosto. Tihennyspisteissä määrät hieman vähenivät ja viimeisessä vaiheessa saatiin injektointipaine nousemaan 700...1000 kPa:iin, mikä kertoi tyhjätilojen täytön onnistumisesta suunnitelmien mukaan. [12]

Rantaliittymän vuodon injektointi

Vuodon tulppaamisen jälkeen vedenpinta laski kaikissa alatasanteen putkissa, mutta yhdessä vedenpinta jäi muuta ylemmäs. Kyseessä oli eteläisin, rantaa lähimpänä oleva putki, johon epäiltiin virtaavan kevään pintavesiä kalliorinnettä pitkin. Koska vedenpinta putkessa vaihteli äkillisesti, pääteltiin padossa olevan vuoto myös sen rantaliittymässä. Vuodon vaikutus oli kuitenkin jäänyt aikaisemmin havaitsematta päävuodon takia. [12]

Vuoto on tapahtunut injektointihavaintojen perusteella ilmeisesti moreenin ja kalliota vasten tehdyn injektointilaatan rajapinnassa, jossa ei suunnitelmien mukaan ole liittymärakennetta, toisin kuin kaivinpaaluseinän päällä. Alkuperäisen suunnitelman mukainen injektointi alensi vedenpintaa, mutta se nousi pian ylöspäin. Tästä syystä injektointia rantaliittymän kohdalla päätettiin täydentää sementti-bentoniitti-injektointina. Täydentävä injektointi tehtiin padon pohjoisosan täyttöinjektoinnin jälkeen 19.–27.7.2006 välisenä aikana. Lisäinjektointia tehtiin 7 pisteessä ja sen vaikutuksesta pohjavesipinnat palautuivat välitasanteella aikaisemmalle, alimmalle tasolle. [12]

Yhteenveto

Sementti-bentoniitti-injektointia tehtiin 31.1.–8.6.2006 välisenä aikana yhteensä 65 pisteessä. Laastin menekki oli 303 tonnia (sisältää veden). Matalampaa injektointiverhoa tehtiin yhteensä 19 metrin matkalle ja korkeampaa 28 metrin matkalle. [12]

Laastin seossuhde oli pääosin seuraava: vesi/sementti/bentoniitti = 66/27/7 paino-%:a. Suurin käytetty paine oli 500...700 kPa. Alatasanteen pohjavesiputkissa vesipinta alenoi injektoinnin aikana 1,3...4,4 metriä ja sen tasoksi muodostui alavedenpintaan nähden hyväksyttävä, noin +58...+60. [12]

6.4.7 Tyhjätilan tutkimukset padon pohjoisosalla

Tutkimukset ja suunnittelu

Rakennetietojen perusteella uudempi kaivinpaaluseinä on patolinjan suunnassa noin 36 metriä pitkä ja se päättyy ennen koneasemaa jyrkästi nousevaan kalliorinteeseen. Seinän korkeus on enimmillään lähes 40 metriä. Ohjurilaatta poikkeaa rakenteeltaan hieman vanhasta seinästä. Se on poikkileikkaukseltaan viistetty siten, että paksuus

ulkoreunalla on vain 400 mm mutta leveydeltään se on hieman vanhaa laattaa suurempi. Liittymärakenteena maapatoon laatan päällä on 2,4 metriä korkea teräsbetoni-seinä. Ohjurilaatan alla on luonnonuomaan tehty sora- ja louhetäyttö ja kallio on hie-man ylempänä kuin vanhemmalla seinällä. [12]

Näiden tietojen perusteella päädyttiin arvioon, että uudemmassa kaivinpaaluseinässä on todennäköisesti vastaava rakennevirhe kuin vanhassa seinässä. Täten siihenkin voi syntyä vastaava vaurio, jossa maan painumisen seurauksena ohjurilaatan alle syntyy tyhjätila johtaen laatan ja/tai kaivinpaaluseinän vaurioitumiseen. [12]

Uudemman kaivinpaaluseinän ohjurilaatan kuntoa ja tyhjätiloja selvitettiin tutkimus-porauksilla aikavälillä 23.4.–11.5.2006. Aluksi tehtiin maaputkiporauksia 11 pisteessä, joista kahdeksassa pisteessä havaittiin 50...200 mm tyhjätilaa betonilaatan alla. Kah-dessa pisteessä ei todettu betonilaattaa lainkaan. Pisteet kuvattiin viemärikameralla ja viidessä pisteessä havaittiin hidasta veden virtausta. Merkkiainekokeilla tutkittiin, joh-tuuko virtaus kaivinpaaluseinän läpi tapahtuvasta vuodosta. Kokeilla löydettiin kaksi pistettä, joista oli vuotoyhteys kuivan puolen tutkimuspisteisiin. [12]

Padon omistajan kanssa 15.5.2006 käydyssä neuvottelussa todettiin, että padon raken-teellinen vika (tyhjätilat) on poistettava ja samalla todettu pieni vuoto tukittava. Tyhjä-tilojen olemassaolo vaarantaa betonirakenteiden kestävyys ja mahdollistaa vaurioti-lanteessa suuren vuodon syntymisen. [12]

Betonilaatan alla olevat tyhjätilat päätettiin täyttää paisuvalla ja nopeasti kovettuvalla uretaanilla. Uretaanin päädyttiin siksi, että sementtimenekki laatan alla olevaan täyt-töön voi olla hankalasti ennakoitavissa ja loppupainetta on vaikea saavuttaa. Injektoin-nin ajoittumisen lämpimään kauteen katsottiin edesauttavan uretaani-injektointia. Injektointi suunniteltiin tehtäväksi 2,0 metrin välein niiltä osin kun laatta on olemassa ja sen alla on havaittu tyhjätila. [12]

Tämän lisäksi päätettiin täyttää myös vanhan (eteläisen) kaivinpaaluseinän märän puo-len ohjurilaatan loput tyhjätilat. Aikaisemmin oli injektoitu kyseiseltä kohdalta vain keskilinjän kuiva puoli. Tämä tyhjätilan täyttö päätettiin tehdä sementti-bentoniittilaastilla 2,0 metrin välein. [12]

Tyhjätilan täyttöinjektoinnit

Vanhemman kaivinpaaluseinän märän puolen ohjurilaatan alaiset loput tyhjätilat täy-tettiin 23.5.–8.6.2006. Injektointi tehtiin pelkästään tyhjätilaan täyttöinjektointina. Injektointipisteitä oli 9 kappaletta ja reikäkohtainen laastimenekki oli 1300...3500 kg. [12]

Pohjoisosan uretaani-injektointia varten injektointiputket asennettiin kesäkuun 2006 aikana, yhteensä 25 kappaletta. Injektointi ajoitettiin lämpimän veden aikaan välillä 17.–19.7.2006. Injektointiputkista mitattiin padossa olevan veden lämpötilaksi +17 °C. Injektointi aloitettiin yläveden puolelta joka toiseen putkeen. Toisella kierroksella injektointiin loput yläveden puoleiset putket. [12]

Toisena injektointipäivänä mitattiin kuivalla puolella olevien injektointiputkien vesipinnat ja havaittiin niiden laskeneen 0,24...2,00 metriä edellisestä päivästä. Todettiin, että injektoinnilla oli ilmeisesti saatu uudemmassa seinässä todettu vuoto ainakin pääosin tukittua. Tämän jälkeen injektointiin kuivan puolen putket vastaavalla tavalla. [12]

Yläveden puolelle meni uretaania 12 putkeen yhteensä 1582 kg ja alaveden puolelle 12 putkeen 1993 kg. Teräksiset uretaaniputket täyttyivät injektointiaessa uretaanilla eikä niitä voi huuhdella puhtaaksi. Injektoinnin jälkeisenä päivänä putkista poistettiin ylimääräiset kolme metriä kiertämällä ne auki. Patotiehen jääneet kuopat betonoitiin. [12]

6.5 Padon tarkkailurakenteet

Korjaustoimenpiteiden jälkeen patoon suunniteltiin tarkkailujärjestelmä mahdollisten uusien vuotojen havaitsemiseksi. Koska olemassa olevaan patoon ei suotovesien keräilyputkistoa ole mahdollista järkevästi toteuttaa, päädyttiin taustan vedenpintaa tarkkailemaan huomattavasti tavanomaista tiheimmällä havaintoputkiverkolla. [12]

Ensimmäinen havaintoputkilinja suunniteltiin kuivan puolen suodattimeen. Linja koostui kuudesta putkesta, joiden väli on noin 15 metriä. Nämä putket varustettaisiin automaattisella ja reaaliaikaisella paineantureihin perustuvalla seurannalla. Toinen havaintoputkirivi suunniteltiin alatasanteelle. Tähän riviin tulisi yhdeksän putkea, joista osa oli korjaustyön aikana käytettyjä putkia. [12]

Alatasanteen tarkkailuputket asennettiin kesäkuun lopulla 2006. Putkien halkaisija oli 50 mm ja materiaali polyeteeni sekä siiviläosan pituus viisi metriä. Putket varustettiin teräksisellä suojaputkella, jossa on lukollinen kansi. Tarkkailuputket on esitetty kuvassa 42. [12]

Padon harjalle suodattimeen sijoittuvat putket asennettiin vinosti ulospäin kaltevuuteen 8:1 ja varustettiin vastaavilla suojaputkilla. Rakennuttaja hankki näihin putkiin paineantureihin perustuvan automatisoinnin, jolla mittaustieto siirtyy langattomasti valvomoon. [12]

6.6 Jälkityöt

Padon harjalta, vuotopaikan kohdalta kaivettiin injektointityössä löyhtyneiden alueiden yläosat pois noin 1,5 metrin syvyydeltä. Etusulkuna käytetty ponttiseinä polttoleikattiin 1,0 metrin syvyydeltä (tasolta +79,0) ja täyttö tehtiin soralla. Sorakerroksen päälle rakennettiin kantava kerros 0...55 mm kalliomurskeesta, jonka pintaan tehtiin tasauseros 0...16 mm kalliomurskeesta. Kaikki kerrokset tiivistettiin 400 kg tärylevyllä. [12]

Padon pohjoisosan uretaani-injektointialueella tehtiin pelkästään tasauseros. Työn aikana kallistuneet ja irronneet padon reunamerkkitolpat oikaistiin ja asennettiin uudelleen. Valaisinpylväät oikaistiin ja alue siistittiin. Yli jääneet pontin pätkät ja teräspankukset toimitettiin kierrätykseen. [12]

6.7 Havainnot korjauksen jälkeen

6.7.1 Suodattimessa olevat putket

Padon harjalle, kuivan puolen suodattimeen asennetuissa tarkkailuputkissa 1...6 olivat vedenpinnat asentamisen jälkeen heinäkuussa 2006 tasolla +57,5...+60, lukuun ottamatta putkea 3, jossa taso oli +62,0. Elo-syyskuun aikana 2006 vedenpinnat useissa putkissa nousivat 2...3 metriä, lähestyen putken 3 tasoa, joka oli pysynyt likimain samana. Nousu ei ollut jatkuvaa, sillä vedenpinnoissa havaittiin ajoittain myös laskua. [12]

Koneaseman puoleisista tarkkailuputkista 4...6 kuuluu virtaavan veden ääni, joka on voimakkain putkessa 6. Edellä mainituista poikkeaa päävuotopaikan kohdalla oleva putki 2, jossa vedenpinta on pysynyt jatkuvasti tason +60 alapuolella. [12]

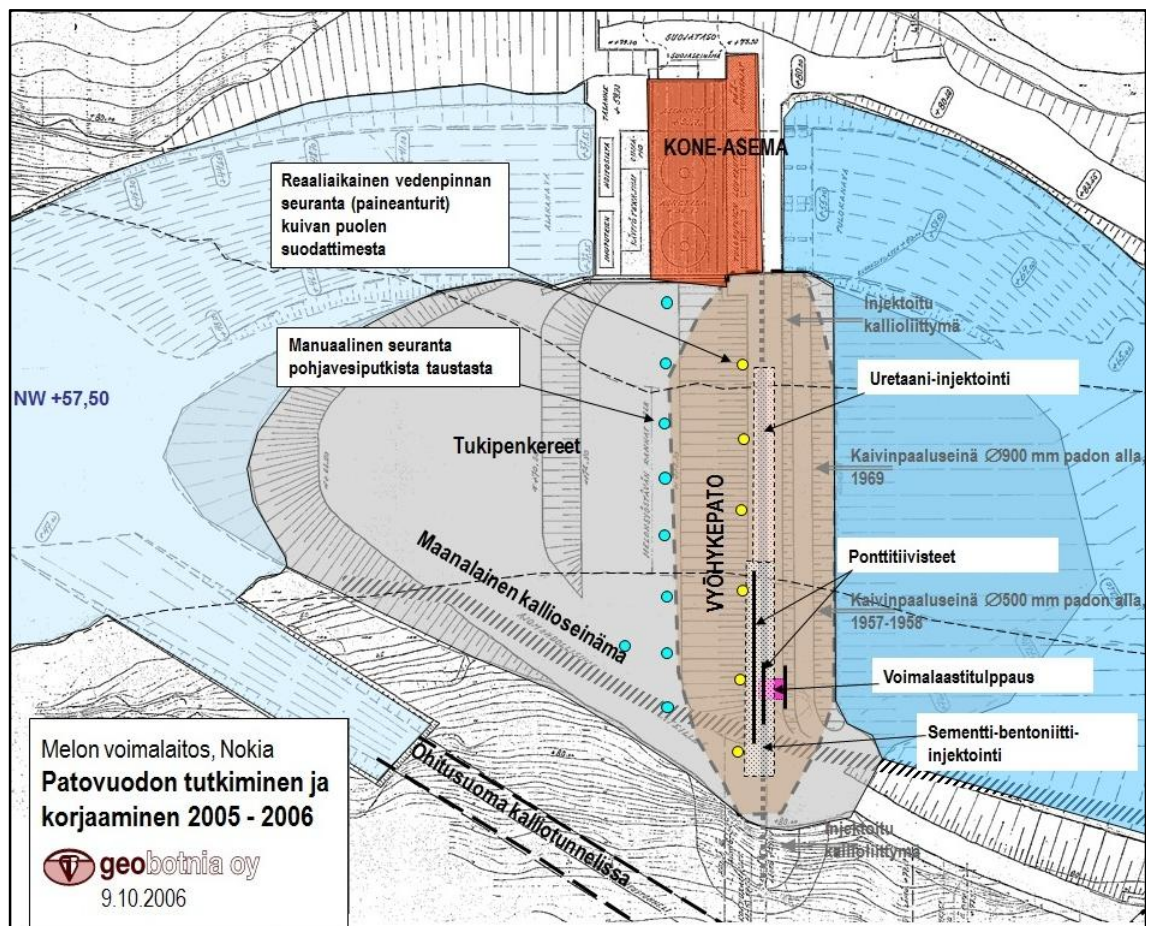
Tarkkailuputket pyrittiin asentamaan siten, että niiden alapää osuisi suodattimen alaosan keskelle. Putkien toteutunut asema on lähellä moreenitiivisteen ja suodattimen rajapintaa, jossa suotoveden virtaussuunta on lähes pystysuora. Lisäksi rakenteiden rajapintojen sijainneista ei ole tarkkaa tietoa. Rajapinta ei välttämättä ole tasomainen vaan mahdollisesti sahalaitainen johtuen rakennustavasta, jossa moreenitiivistysosa ja suodatin on korotettu vierekkäin kerroksittain. [12]

Vedenpinta putkessa saattaa sijoittua alemmas kuin märkäviiva. Tämä johtuu siitä, että putkeen suotautuu vettä alueilta, joissa se on suotoveden kyllästävässä moreenissa ja vettä taas poistuu putken siitä kohdasta, joka on yhteydessä suodattimeen. Virtaavan veden ääni syntyy suotoveden putoamisesta putkessa jo olevan veden pinnalle, mutta putki ei kuitenkaan täyty, sillä se pääsee tyhjenemään suodattimeen. Tämä selittää

myös sen, että vedenpinta asettui nykyiselle tasolleen vasta kuukauden viiveellä moreenin huokospainetilanteen tasoituttua putkien asentamisen jälkeen. Putken vedenpinta on siis ylempänä kuin suodattimen vedenpinta ja se reagoi todennäköisesti hyvin herkästi moreenitiivisteessä tapahtuviin virtaustilan muutoksiin. Tämä on otettava huomioon arvioitaessa putkien tarkkailutuloksia. [12]

6.7.2 Alatasanteen putket

Alatasanteen tarkkailuputkissa ei yhtä poikkeusta lukuun ottamatta havaittu vastaavaa vedenpintojen nousua kuin suodattimen putkissa, vaan vedenpintojen kehitys on ollut alaspäin. Tarkkailutulosten perusteella korjauksen jälkeisenä aikana elo-syyskuussa 2006 ei vuoto ole ainakaan havaittavissa määrin uusiutunut. [12]



Kuva 42. Padon korjaustoimenpiteet ja tarkkailurakenteet. [71]

Vedenpinnan korkeudet havaintoputkissa sopivat hyvin normaalin hyväkuntoisen maapadon tilanteeseen. Tukipenkereen vedenpinnat asettuvat rakenteen vedenläpäisevyyden, padon läpäisevän suotovirtaaman sekä tukipenkereeseen imeytyvän sadannan mukaiseen korkeusasemaan, joka on jonkin verran alavedenpinnan yläpuolella.

Sadanta ja alavedenpinnan vaihtelut aiheuttavat havaittuihin vedenpintoihin pieniä muutoksia. [12]

6.8 Padon kuntoarvio korjausten jälkeen

6.8.1 Betonirakenteet

Kaivinpaaluseinässä todettiin korjaustöiden aikana halkeamia, jotka ovat todennäköisesti aiheutuneet siitä, että ohjurilaatan ulokkeet ovat murtuessaan rikkoneet paalujen yläpäät. Halkeilua esiintynee siis vain paalun yläpäässä, likimain sen halkaisijaa vastavalla korkeudella. [12]

Yläosan halkeilua esiintyy sekä vanhemmalla että uudemmalla kaivinpaaluseinäosuu-
della. Tyhjätilat on täytetty korjaustöiden yhteydessä vanhemman seinän osalta sementti-injektoinnilla ja uudemman seinän osalta uretaanilla. Patoon ei kohdistu uusia kuormituksia eikä betonirakenteiden liikkuminen halkeamia avaavalla tavalla ole todennäköistä. Kaivinpaaluseinässä ei ole tiedossa syvemmällä olevia vaurioita, eikä niiden olemassaolo ole todennäköistä. [12]

Kaivinpaaluseinän ohjurilaatat ovat suurelta osin rikkoutuneet ja korjaustyön aikaisten havaintojen perusteella ne puuttuvat paikoin kokonaan. Kaivinpaalujen rakennusvaiheessa käytetyn ohjurilaatan ulokkeilla ei ole patorakenteessa mitään toiminnallista merkitystä, vaan ne muodostavat patoon rakenteellisen heikkouden. [12]

Vaurioituneissa ohjurilaatoissa voi tapahtua pieniä liikkeitä, mutta koska ne ovat jo murtuneet irti kaivinpaaluseinästä ja liittymärakenteesta, eivät ne voi aiheuttaa uusia halkeamia. Tyhjätilojen täyttämisen ansiosta liikkeet eivät voi olla suuria. Täten ohjurilaattojen liikkeistä ei arvioida olevan vaaraa padolle. [12]

Kaivinpaaluseinän päällä oleva, liittymärakenteena maapatoon toimiva teräsbetoniseinä todettiin kairauksissa ja ponttien lyönnissä likimain suunnitelmien mukaisesta paikasta. Koska merkkiainekokeet eivät osoittaneet päävuotopaikalla vuotoyhteyttä liittymärakenteen kohdalla (vain sen alla), on rakenne todennäköisesti ehjä. Raudoitettu liittymärakenneseinä kestää muita maapadon alapuolisia rakenteita paremmin leikkaus- ja taivutusrasituksia. [12]

6.8.2 Moreenitiiviste

Varsinaisen vuotopaikan kohdalla korjausta edeltävässä tilanteessa moreenitiiviste oli löyhä, huuhtoutunut ja sisälsi tyhjätiloja. Kokonaisuutena arvioiden sen kunto oli hyvin heikko. Korjauksen aikana moreenitiiviste on kuitenkin ponttien lyönnin aiheuttaman

tärinän seurauksena tiivistynyt huomattavasti. Lisäksi teräspontti muodostaa tiivisteseen sekä vesieristeen että mekaanisen lujitteen. Tiiviys on varmistettu vielä injektointeilla. Täten on arvioitu, että korjauksen jälkeen tiiviste on vuotopaikalla alkuperäistä huomattavasti paremmassa kunnossa. [12]

Padon eteläinen rantaliittymä tiivistettiin vuodon takia maainjektointina. Myös kyseinen liittymä on nyt paremmassa kunnossa kuin ennen korjausta. Ilman injektointia vuoto olisi todennäköisesti vähitellen kasvanut ja voinut muodostua kriittiseksi. Korjaustyön aikana havaittiin alapuolen vedenpinnoissa muutoksia molempiin suuntiin. Ilmeisesti injektointin aikana vesi on muodostanut uusia vuotoreittejä. Korjauksen jälkeen tilanne näytti olevan hallinnassa, mutta rantaliittymän vuodon uusiutuminen on mahdollista. [12]

Vuotopaikan ulkopuolella moreenitiivisteen kunto vastaa likimain korjausta edeltävää tilaa. Pelkästään alaosa (liittymä ohjurilaattaan) on lujitettu ja tiivistetty injektoimalla. Moreenitiivisteeseen kohdistuu paikallinen, ympäristöä suurempi hydraulinen gradientti siinä kohdassa, missä siihen asennettu tiivisteponniti päättyy. Kyseisessä kohdassa sisäisen eroosio riski on suurempi kuin muualla. Rakenteen kestävyys vaikuttaa moreenin laatu ja rajapinta moreenin ja suodatinkerroksen välillä. Kyseistä kohtaa on syytä tarkkailla. [12]

6.8.3 Suodattimet ja tukipenkereet

Suodattimien laatua ei selvitetty korjaustyön aikana, mutta koska vuoto sijoittui maapadon alle eikä itse maapatoon, on suodattimien laatu ollut rakentamisen jälkeen vähintään tyydyttävällä tasolla. Vuodon seurauksena suodattimen alaosa on paikallisesti vaurioitunut. Kuivan puolen suodattimen läpi ja ali on kulkeutunut huomattava määrä moreenin hienoainesta vaurioittaen suodatinta ja heikentäen sen ominaisuuksia. Vastaavaa huuhtoutumista on tapahtunut myös märän puolen suodattimen pohjalla. Tämä on havaittavissa suodattimeen asennettujen tarkkailuputkien vedenpinnoissa, jotka ovat vuotopaikalla muuta patoa alempana, sillä vesi pääsee purkautumaan tehokkaammin vaurioituneen suodattimen kautta. [12]

Vuotopaikalla tapahtuva suotovirtaus on huomattavasti vähäisempää kuin normaalilla maarakenteella, johtuen vuotopaikan tiivistämisestä. Näin ollen myös sitomattomaan moreenitiivisteeseen kohdistuva hydraulinen gradientti on aiempaa pienempi. Paineero kohdistuu kaivinpaaluseinään ja sen kanssa yhtenäiseksi tiivisterakenteeksi ponnaamalla ja injektoimalla muodostettuun vyöhykkeeseen, jossa sisäisen eroosion riski on vähäinen. Täten suodattimen paikallinen huuhtoutuminen ja hienoainespitoisuuden kasvu ei muodosta patoon heikkouskohtaa. [12]

Kuivan puolen louhetukipenkereeseen on vuotokohdan alapuolella kulkeutunut noin 60...70 m³ hienoainesta. Tämän seurauksena louhepenkereen tyhjätila on kyseisessä kohdassa pienentynyt, mikä ei vaikuta padon stabiliteettiin eikä merkittävästi tukipenkereen hydrauliseen toimivuuteen. Muualla tukipenkereet ovat likimain alkuperäisessä kunnossa. Molemmilla puolilla olevien tasanteiden ansiosta padon stabiliteetti on edelleen erittäin hyvä. [12]

6.9 Jatkotoimenpiteet

Korjaustoimenpiteiden jälkeen patoturvallisuuskansiota uusittiin. Tiedot patovuodosta ja sen korjaamisesta muodostavat olennaisen osan uutta patoturvallisuuskansiota. Myös aiempi tarkkailuohjelma uusittiin, sillä aikaisemmin maapadossa ei ollut varsinaisia tarkkailurakenteita. Uusi tarkkailuohjelman perustuu silmämääräisen tarkkailun ohella vedenpintojen seurantaan korjaustyön aikana asennetuista putkista. [12]

Turvallisuustarkkailuohjelmassa on kiinnitettävä erityistä huomiota seuraaviin asioihin [12]:

- Rantaliittymässä suotovirtaus saattaa ajan myötä kasvaa (vuodon uusiutumiskilpi)
- Ponttiseinän pään kohdalla suuri vedenpaine-ero moreenitiivisteessä muodostaa eroosioriskin
- Mahdollinen virtauksen äänen muuttuminen havaintoputkissa, voi johtua virtaustilan muutoksista
- Tarkkailutulosten merkitystä on arvioitava suhteessa tiedossa oleviin vaurioihin ja korjauksiin

Mikäli patoon syntyy uusia, suuria vuotoja, tulee toimenpiteet suunnitella niiden syntymekanismin ja sijainnin mukaan. Mahdollisia korjaustoimenpiteitä vuodosta riippuen ovat rantaliittymän täydentävä tiivistysinjektointi, tiivistepontin jatkaminen koko padon alueelle sekä syväinjektointi uudemman kaivinpaaluseinän alueella. [12]

6.10 Tilanne talvella 2012

Padon käyttöhenkilökunta havaitsi korjatulla maapato-osuudella kuivassa luiskalla lumipinnan alapuolella sulan alueen, joka ulottui noin yläveden pinnan korkeudelta padon kuivaa luiskaa pitkin alaveteen saakka. Lisäksi havaintoputkissa havaittiin nopeita pohjavedenpinnan vaihteluita. Sula alue oli noin 30 metriä leveä. Epäiltiin, että suotovesi olisi alkanut kiertää teräsponttiseinää joko etelä- tai pohjoispuolelta tai molemmin puolin. Toinen esitetty vaihtoehto oli, että padon alavirran puoleinen suodatin on tukkeutunut, eivätkä suotovedet pääse purkautumaan niille tarkoitettua reittiä pitkin. [68]

Padon tilaa päätettiin tutkia heat pulse -mittauksilla sekä suolaliuoskokeilla. Heat pulse -mittaus tehdään pohjavesiputkeen asennettavalla lämpöanturilla, joka mittaa putkessa olevan veden virtaustilaa neljässä eri suunnassa. Lisäksi lämpötilaeroja tarkastelemalla saadaan selville suotoveden virtaussuunta sekä arvio vesimäärästä. Suolaliuoskoe tehdään myös pohjavesiputkesta laittamalla putkeen suolaliuosta. Suolaliuoksen etenemistä seurataan havaintoputkista ja padon alapuolella olevasta vesistöstä tarkoitusta varten rakennetulla sähköinduktiokojeella, johon on liitetty tietokone. [68]

Havaintoputkia tarkastellessa 28.2.2012 havaittiin kuitenkin, että halkaisijaltaan 50 mm suojaputken sisällä olevan pohjavesiputken sisähalkaisija on vain 38 mm, mikä on liian vähän 40-millimetriselle mitta-anturille. Lisäksi ylimmän rivin kuusi putkea on kairattu viistoon suodattimen suuntaisesti, jolloin heat pulse -mittausta ei niissä voi tehdä. Haittoja olisi aiheutunut myös yläaltaassa ja alapuolisessa vesistössä olleesta jäästä. [68]

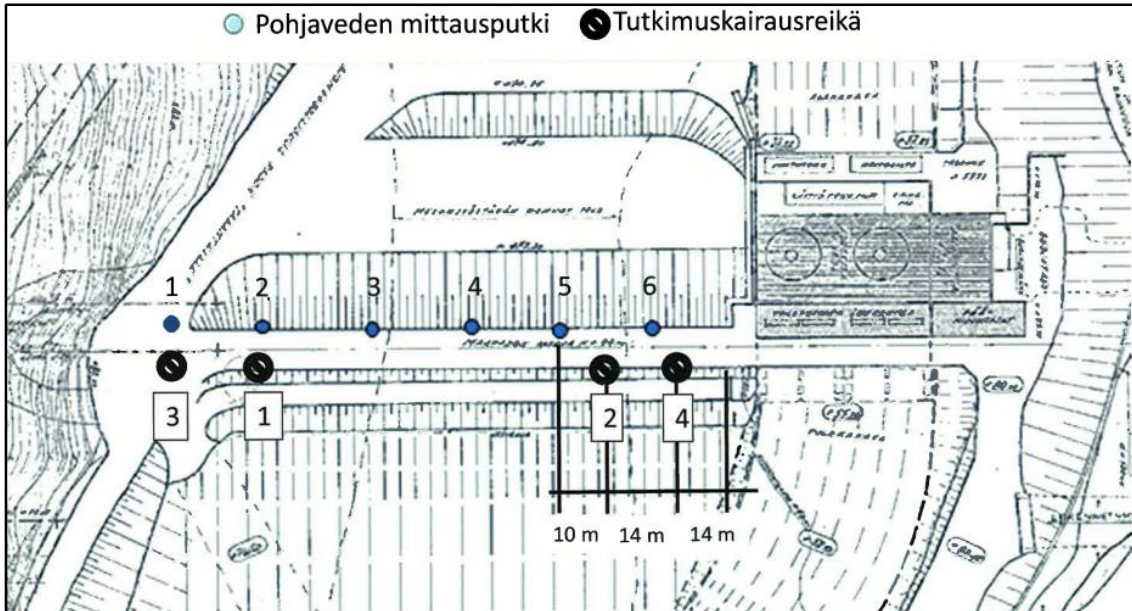
Edellä mainituista syistä työ päätettiin lykätä tehtäväksi sulana aikana, touko- tai kesäkuussa. Lisäksi esitettiin, että padolle kairataan kokeita varten kolme reikää ylimmän tiivisteponttiseinän ylävirran puolelle, pohjavesiputkien 2, 4 ja 6 kohdalle. Kairattuja reikiä hyödynnettäisiin mittauksissa ja niistä otettaisiin maanäytteet. Seuranta varten kairattaisiin myös kolme reikää padon kuivan luiskan puolelle vastaaville kohdille. Muutoin mittauksissa voidaan käyttää jo padolla olevia pohjavesiputkia. Mahdollisen vuotokohdan löytyessä suoritettaisiin padolla tiivistysinjektointi. Mikäli suodatin osoittautuu toimimattomaksi, voitaisiin se korjata esimerkiksi poraamalla patoon liuskasalojat. [68]

6.11 Tutkimukset keväällä 2012

Kairaukset aloitettiin toukokuussa. Tutkimuspisteet valittiin tilaajan kanssa huomioiden aiemman patovaurion yhteydessä tehdyt korjaukset ja tiivistystyöt. Tutkimuspisteet sijoitettiin padon suodatinkerrokseen asennettujen pohjavesiputkien kohdalle, padon keskilinjan märeille puolelle, kuvan 43 mukaisesti. [69]

Kairaukset aloitettiin aiemman vuotopaikan kohdalta näytteenottokairauksina. Ensimmäinen reikä kairattiin kaivinpaalun ohjurilaatan yläpinnan tasolle noin 21 metrin syvyyteen padon harjalta. Näytteet nostettiin metrin jaksoissa ja analysoitiin silmämääräisesti pussituksen yhteydessä. Kaikki reiästä nostetut näytteet olivat häiriintymätöntä tasalaatuista moreenia. [69]

Näytteenoton jälkeen tehtiin suolaliuosmittaus. Pohjavesiputkiin asennettiin sähkönjohtavuusmittarit ja suolaliuoksen syöttö aloitettiin kairausputken kautta tutkimusreikään. Sähkönjohtavuusmittarit nostettiin ylös 20 tunnin kuluttua suolan syötöstä ja niiden rekisteröimät arvot siirrettiin tietokoneelle. Havaittiin, ettei mittausputkiin ollut virrannut padon sisälle syötettyä suolaa. [69]



Kuva 43. Kairauspisteet 1–4 keväällä 2012 tutkimuksissa. [69]

Toinen kairauspiste sijoitettiin lähelle teräsponttiseinän voimalaitoksen puoleista päätyä. Reikä kairattiin kaivnopaaluseinän ohjurilaatan yläpinnan tasolle. Näytteenoton yhteydessä havaittiin kahden metrin häiriintynyt kerros syvyydellä 4...6 metriä, jota seurasi häiriintymätön kerros 13 m syvyydelle asti. Syvyydeltä 13,30 m reiän pohjalle asti kairausvastus oli vähäinen ja maa-aines veden kyllästämää häiriintynyttä materiaalia, jota ei saatu nostettua ylös. [69]

Pohjavesiputkiin nro 6 ja 32 asennetut sähkönjohtavuusmittarit reagoivat patoon syötetyn suolaliuoksen aiheuttamaan sähkönjohtavuuden nousuun noin puolen tunnin kuluttua suolan syöttämisestä. Sähkönjohtavuus nousi huippuunsa noin kahdessa tunnissa, minkä jälkeen se alkoi tasaisesti laskea. Putki 32 sijaitsee kauempana padon taustassa, mutta silti sähkönjohtavuuden nousupiikki oli tässä putkessa nopeampi. Tämä merkitsee lyhyempää tai virtausvastukseltaan vähäisempää vuotoreittiä ponttiseinän alitse. Putkelle 6 suolavesi taas on todennäköisesti virrannut seinämän vierustaa pitkin. [69]

Kolmas tutkimuspiste sijoitettiin pohjavesiputki 1:n kohdalle ponttiseinän pään tulvakanavan puoleisen pään läheisyyteen. Kairaus ja suolakoe suoritettiin aiempien tutki-

muspisteiden tapaan. Tutkimuspisteestä nostetut näytteet olivat tasalaatuista, häiriintymätöntä moreenia. Tutkimusreikään syötetty suolaliuos ei aiheuttanut sähkönjohtavuuden kasvua alapuolisissa mittausputkissa. [69]

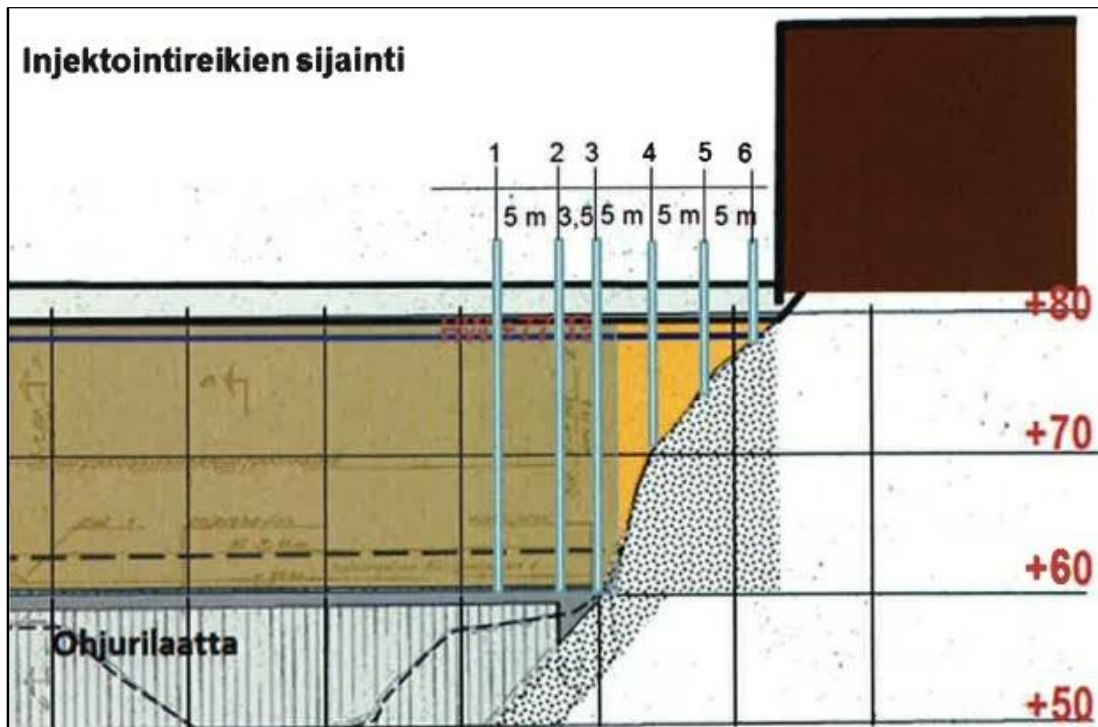
Padon suunnitelmien mukaan voimalaitoksen tukimuurin ja tiivistysponttiseinän välissä on noin 20 metrin ponttiseinätön osuus. Neljäs tutkimuspiste sijoitettiin noin 14 metriä voimalaitoksen tukimuurista etelään. Kairaus päätettiin kallioon 13 metrin syvyydellä. Maanäytteet olivat 5 metrin syvyydelle tasalaatuista, häiriintymätöntä moreenia. Viiden metrin tasolta alaspäin kairausvastus oli pieni ja nostetut näytteet olivat häiriintyneitä ja veden kyllästämiä. Reikään ei tehty suolavesikoetta. [69]

Tutkimusten perusteella oletettiin aiemmin vaurioituneen ja korjatun padon eteläpään olevan kunnossa. Tähän viittasivat myös kairaukset, joiden mukaan patomateriaali oli tasalaatuista ja häiriintymätöntä. Suolaliuoskokeetkaan eivät paljastaneet vuotoja tutkitulla osuudella. [69]

Padon pohjoispään tutkimuksilla havaittiin padossa vaurioita kummankin tutkimuspisteen kohdalla. Havainnot kairauksista ja suolaliuoskokeista viittasivat moreenisen tiivistysosan eroosiovaurioihin. Tähän viittasivat myös nopea sähkönjohtavuuden nousu suolaliuoskokeessa sekä pohjaveden pintojen vaihtelut alueella sijaitsevassa havaintoputkessa nro 6. Havaittu padon taustan sulana pysyminen johtui ilmeisesti padon läpi suhteellisen nopeasti virtaavan veden lämpöenergiasta. Tutkimusten ja aiemmin tehtyjen havaintojen perusteella padon pohjoispäässä oli meneillään padon sisäinen eroosio, jonka pysäyttämiseksi oli syytä aloittaa korjaustoimenpiteet viivytyksettä. [69]

6.12 Tiivistysinjektointi kesällä 2012

Vuotoalueen injektointi aloitettiin tutkimuspisteen 2 kohdalta ja injektointiaineena käytettiin sementin, bentoniitin ja hiekan seosta, johon oli lisätty muovikuituja. Injektointi aloitettiin reiän pohjalta ja kunkin jakson pumppausta jatkettiin, kunnes kerros täyttyi. Kuuteen kairattuun injektointireikään pumpattiin yhteensä 102 m³ injektointiainetta. Suurinta massamenekki oli rei'issä 1 ja 4. [70]



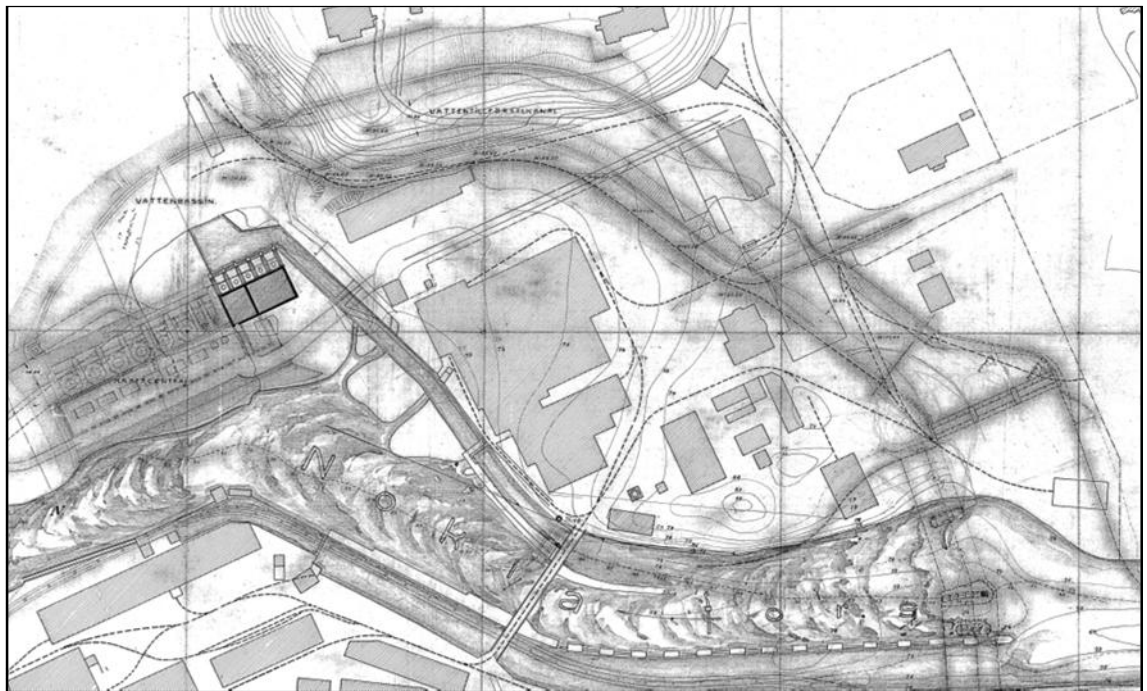
Kuva 44. Kesän 2012 tiivistysinjektoinnissa käytettyjen reikien sijainti padon pohjoispäässä. [70]

Injektointityön jälkeen varmistettiin padon tiiviys uusilla suolaliuoskokeilla. Sähkönjohtavuus mittauspisteissä ei tällä kertaa enää noussut. Täten todettiin injektoinnin täyttäneen padon sisäisen eroosioalueen ja tukkineen vuotoreitin moreenisen tiivistysosan läpi. Korjausinjektoinnin lopputarkastus pidettiin padolla 8.11.2012 ja padon todettiin olevan tiivis koko pituudeltaan. Tilannetta padolla seurataan tiheästi. [70]

7 NOKIAN TEHDASSAAREN PADOT

7.1 Kohteen historia

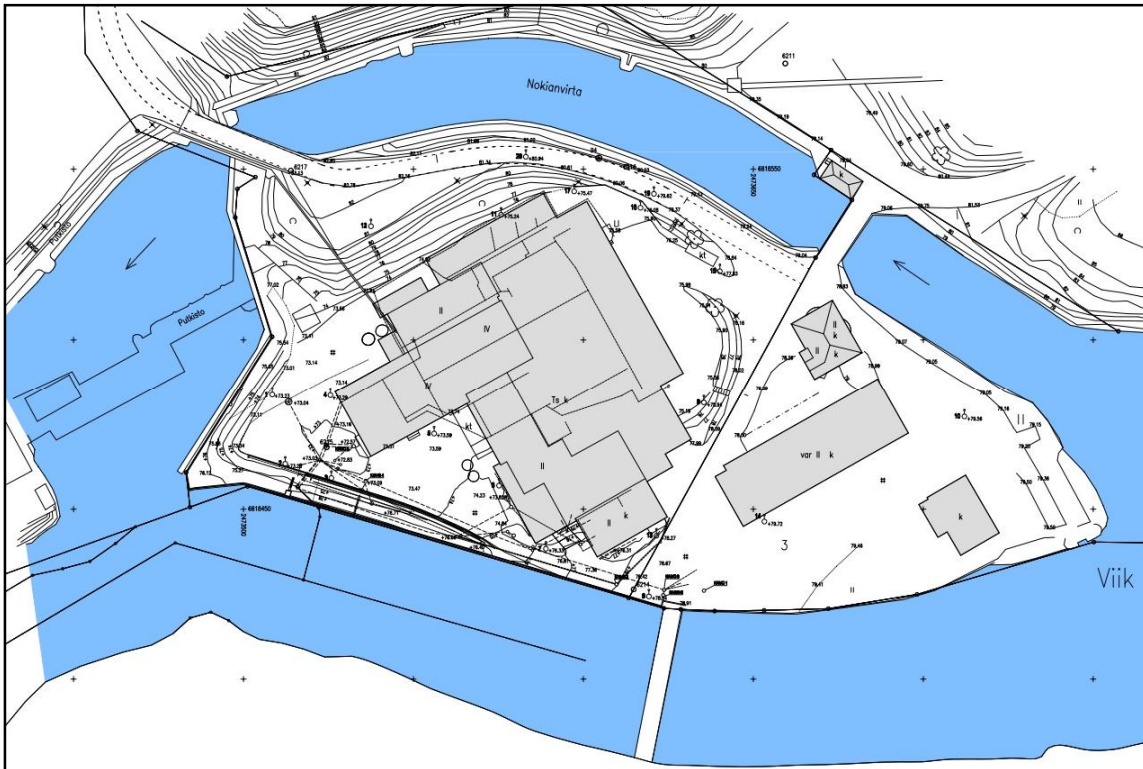
Lähellä Nokian kaupungin keskustaa sijaitsevan Nokianvirran Emäkosken pohjoisrannalle alkoi keskittyä teollisuustoimintaa Fredrik Idestamin perustettua paikalle puuhiomon vuonna 1868. Varhaisessa vaiheessa laitteet toimivat mekaanisesti vesivoimalla ja virrasta saatiin vettä teollisuuden prosesseihin. Pahvin valmistus alkoi 1871, paperin 1880 ja sulfiittiselluloosan 1886. Sähköntuotanto alkoi voimalaitoksen valmistuttua vuonna 1903 ja sähköntuotannon edistämiseksi rakennettiin kanava patoineen vuonna 1913. Kuvassa 45 on esitetty Tehdassaaren alue 1900-luvun alussa. Padon avulla vedet ohjattiin tehdasalueen pohjoispuolista kanavaa myöten voimalaitokseen, ja tehdasalue erotettiin saareksi. [46]



Kuva 45. Suunnitelmakartta tehdasalueesta 1900-luvun alusta. Kuvassa alue ei vielä ole saari, sillä voimalaitokselle johtava pohjoispuolen kanava on vasta hahmotelma, kuten myös luonnontilaisen Emäkosken itäpäässä oleva sulkupato. Eteläisen uoman ylittävä silta on eri paikassa kuin nykyään (ks. kuva 46), sillä sitä on siirretty ylävirtaan tunkkaamalla.

Kolme kilometriä Tehdassaaresta alavirtaan valmistui Melon voimalaitospato vuonna 1971, minkä seurauksena vedenpinta saaren eteläpuolella olevassa luonnonuomassa nousi Pyhäjärven tasoon ja uoma rajautui saaren reunaksi rakennettua kivitukimuuria

vasten. Saaren pohjoispuolitse kiertävässä vanhan voimalaitoksen yläkanavassa vesi on ollut Pyhäjärven tasolla jo 1920-luvulta alkaen. Vedenpinnan nousun takia Tehdassaarta ympäröiviä eteläpuolen tukimuurirakenteita jouduttiin tiivistämään ja korottamaan. Rakenteet suunniteltiin kuitenkin väliaikaisiksi, noin 20 vuoden käyttöiälle, sillä tehtaan toiminnan oletettiin loppuvan 1980-luvulla. Nykyään rakenteet ovat kuitenkin yli 40 vuotta vanhoja ja yhä tarpeellisia. [46, 47]



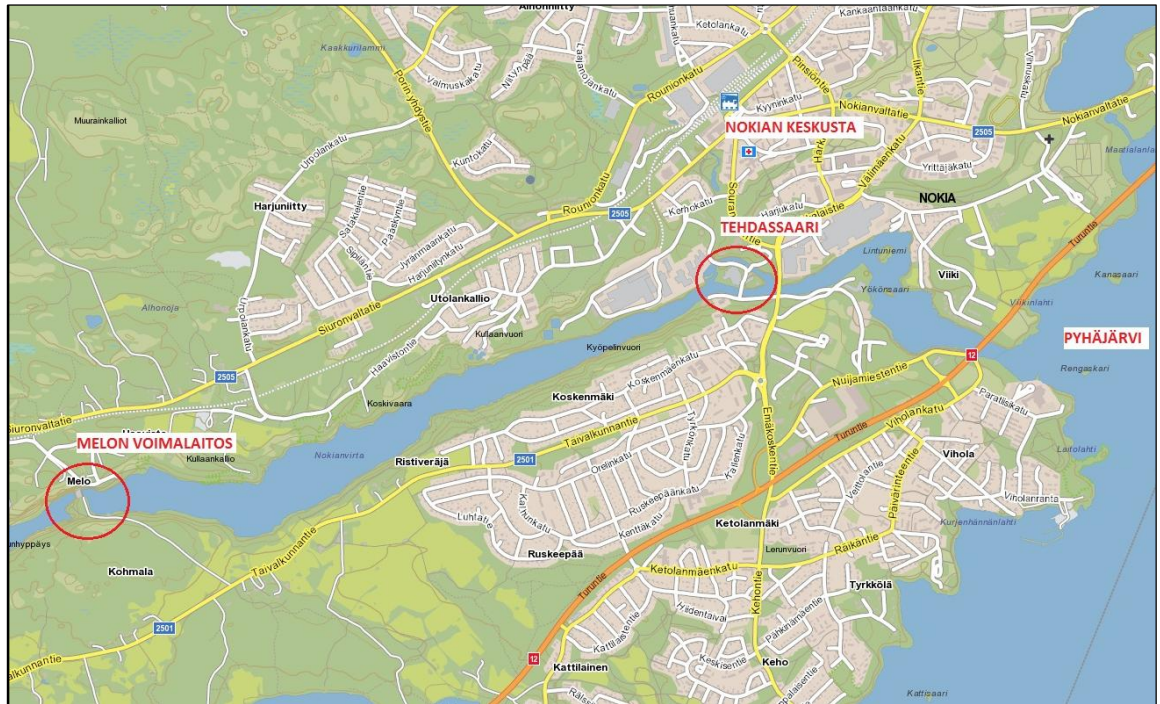
Kuva 46. Asemakartta Tehdassaaresta nykytilanteessa. Vanhan voimalaitospadon ääriviivat ovat näkyvissä kuvan vasemmassa reunassa.

Patorakenteiksi muodostui sellaisia rakenteita, joita ei alun perin ollut suunniteltu padoksi. Näin syntynyt pato tunnetaan myös Upofloorin patona (saarella sijaitsevan tehtaan mukaan) ja Kymarnon patona. Tässä työssä siitä käytetään nimitystä Tehdassaaren eteläinen pato. Tehdassaaren patoja ovat eteläinen ja pohjoinen pato, joista eteläinen erottaa luonnonuoman saaresta ja pohjoinen taas on pääosin betonikaukalorakenne, jota pitkin vesi virtasi nykyään jo käytöstä poistetulle voimalaitokselle. Kuvassa 45 hahmotelmana näkyvä, eteläisen uoman itäpään sulkupato on purettu. [46, 47]

7.2 Padon rakentaminen ja nykytila

Saaren nykytila käy ilmi kuvasta 46. Vuoden 1970 rakennustöistä saatavilla olevien suunnitelmien ja toteutumakuvien perusteella eteläisen padon perustana oleva vanha luonnonkivimuuri verhottiin teräsbetonirakenteella ja sen päälle rakennettiin betoni- nen kulmatukimuuri, jonka etureuna (virran puoleinen reuna) tukeutuu kivimuuriin ja

takareuna on maanvarainen. Teräsbetoninen kuorirakenne sekä kulmatukimuuri toteutettiin paikallavalettuina käyttäen lautamuottia padon itä-länsisuuntaisessa osassa sekä levymuottia läntisestä taitteesta pohjoiseen suuntautuvassa osassa. Padon poikkeileikkauksia on esitetty kuvassa 53. [47]



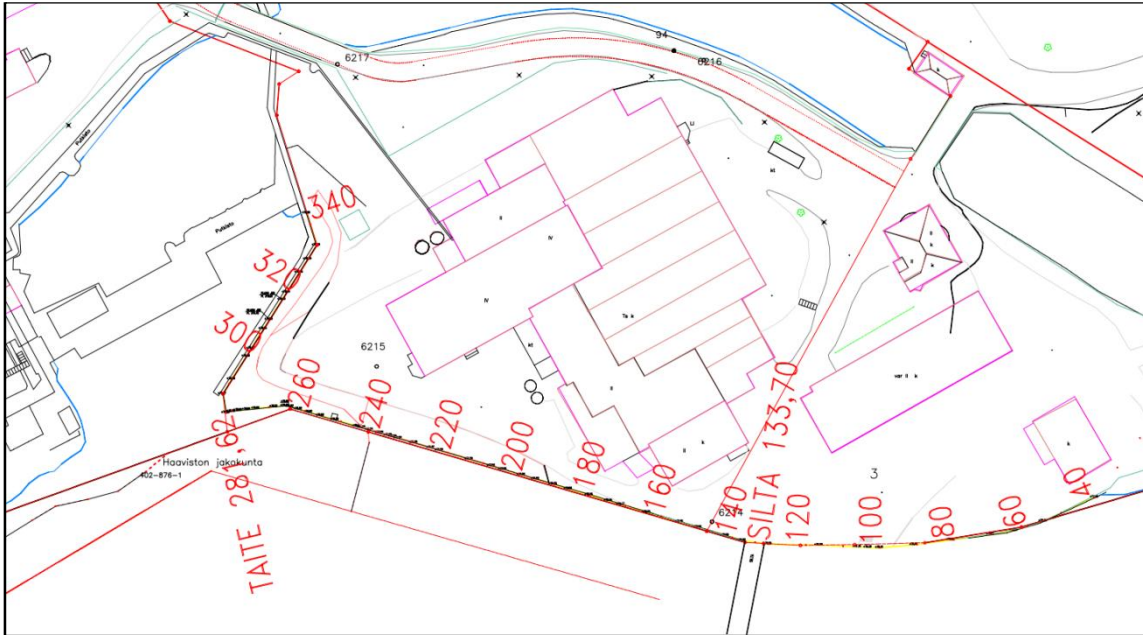
Kuva 47. Tehdassaaren ja Melon voimalaitoksen sijoittuminen Nokialla.

Betoninen patorakenne on tehty vanhan patorakenteen päälle vanhoja rakenteita poistamatta. Lisäksi eteläinen pato tiivistettiin vuotojen vähentämiseksi olemassa olevan rakenteen alle rakennetulla tiivistysseinällä (schlitzwand-seinä), joka on paikoin ulotettu kallioon ja paikoin päätetty lohkareiseen pohjamaahan. Seinä on mitä ilmeisimmin valettu betonista jyrkkäseinämäiseen kaivantoon, joka on täytetty bentoniittilietteellä kaivannon tukemiseksi. Seinän rakentamisvaihetta on esitetty kuvassa 49. [47, 56]

Tehdassaaren eteläisessä padossa esiintyy jatkuvaa vuotoa, joka ilmenee veden suotautumisena tehtaan kanaaleihin. Ajoittain vuototilanne on pahentunut ja joitakin korjauksia on jouduttu tekemään, kuten kappaleesta 7.4 ilmenee. Padon läpi tai alitse suotautuvan veden tarkkaa määrää on vaikea arvioida, sillä tehtaan lattian alapuolisiin kanaaleihin kertyy myös tehtaan prosessivettä. Myös pohjoispuolen padolta saattaa suotautua jonkin verran vettä.

Suotoveden määrä on onnistuttu likimääräisesti mittaamaan sellaisena aikana, kun tehtaan toiminnassa on ollut katkos. Mittaus on suoritettu pumppaamolle johtavasta

kokoojakanaalista mittaamalla veden virtausnopeus poikkileikkauksessa noin 10 metrin matkalla. Mittauspäivä oli 27.7.2005 eli ennen kappaleessa 7.5 mainitun vuotokohdan tukkimista. Mittausten perusteella tehtaan lattian alapuolisten kanaalien kautta kokoojakanaaliin kertyvien suotovesien määrä oli noin 2400 litraa minuutissa, mikä oli vuodosta johtuen tavanomaista huomattavasti suurempi. Pumppausvesimäärät vuotokohdan tukkimisen jälkeen on laskettu purkuputken virtaamatietojen perusteella vuonna 2011, jolloin virtaamaksi saatiin 726 litraa minuutissa.



Kuva 48. Tehdassaaren eteläisen padon paalulinja.

Vesi pumpataan tehdasrakennuksen alaisesta kanaalista virtaan kolmella sähkökäyttöisellä pumpulla, joiden käyntiaikoja seurataan. Lisäksi varalla on dieselkäyttöinen pumppu. Kolmen sähköpumpun yhteiskapasiteetti on noin 7000 l/min ja dieselpumpun noin puolet tästä. Eteläisen padon taustaa on tuettu useampaan otteeseen. 1980-luvulla sitä on korotettu soralla ja vuodenvaihteessa 2003–2004 toteutettiin paaluvälille 190...250 kivikorirakenne padon vakavuuden lisäämiseksi ja betonirakenteiden liikkeiden vähentämiseksi. [47, 54]

7.3 Kohteen maaperäkuvaus

Saaren eteläpuolinen luonnonuoma on ollut luonnontilassa vuolaasti virtaava Emäkoski, joten uoman pohja on rikkonaista ja vaikeakulkuista karikkoa, kuten kuvassa 50 on näkyvissä. Uomassa on alun perin ollut suurehkoja korkeuseroja, ja todennäköisesti etenkin sen syvenevää länsiosaa on täytetty sekalaisella, kivisellä materiaalilla ja itäosaa ruopattu 1930-luvulla. Pohjoispuolen vanhaan voimalaitokseen johtava uoma sijoittuu moreenimaaperään itäosastaan. Länsiosa on reunamuodostuman lievealueel-

la, joka sisältää sora- ja hiekkavaltaisia kerrostumia. Uoman loppuosuus, joka sijaitsee tehdasrakennusten koillispuolella, on louhittu kallioon. [48, 49]



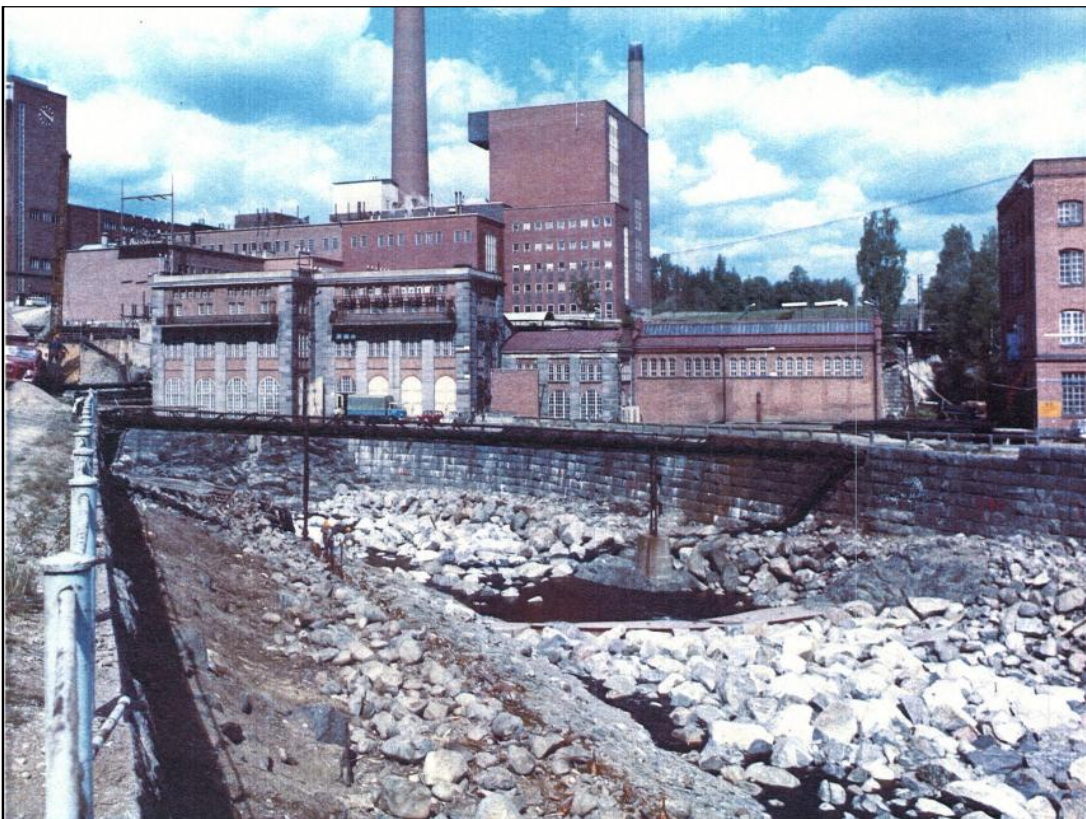
Kuva 49. Tiivistysseinän tekoa alkuperäisen luonnonkivimuurin alle.

Kalliopinta on alueen keskiosassa suhteellisen tasainen välillä +60...+65 (korkeusjärjestelmä NN), mutta se nousee alueen länsi- sekä pohjoisosaa kohti ja on entisen voimalaitoksen lähellä maanpinnassa paikoin näkyvissä. Tehdasrakennuksen lounaiskulman edessä on kalliossa syvennys, jossa sen pinta on noin tasolla +56. Kalliota peittävät maakerrostumat ovat rakenteeltaan erittäin tiiviitä. Tämä on seurausta siitä, että maa-aineksen raekoko vaihtelee siltistä isoihin kiviin saakka sellaisessa suhteessa, että vedenläpäisevyys on yleensä suhteellisen pieni. Paikoin maan kerrosrakenne on kuitenkin lajittunut siten, että hienoin kiviaines puuttuu, jolloin vedenläpäisevyys on hyvinkin suuri. Tällaisia hyvin läpäiseviä välikerroksia esiintyy huomattavasti enemmän vettä läpäisevien kerrostumien välissä, etenkin alueen eteläosassa. [48, 49]

Edellä mainitut havainnot perustuvat Pohjatutkimus Oy:n vuonna 1969 tekemään selvitykseen [48] ja sen mukaan kyseiset läpäisevät kerrostumat eivät ole paikallisia, hydrologisessa mielessä eristettyjä muodostumia, vaan laajempialaisia kokonaisuuksia. Tämä on päätelty kaivoista tehtyjen koepumppausten laaja-alaisesta vaikutuksesta

vedenpintaan sekä kaivojen ympärille muodostuvien suppiloiden epäsymmetrisyydestä, mikä viittaa vaihtelevaan vedenläpäisevyyteen. [48]

Pohjaveden virtaussuunta on likimain pohjoisesta etelään. Pohjavesi on korkealla tehdasrakennuksen pohjoispuolella todennäköisesti siksi, että vettä vuotaa vanhan voimalaitoksen betoniverhoillusta tulokanavasta. Vedenpinta viettää loivasti tehdasrakennusta kohti ja laskee sitten suhteellisen jyrkästi johtuen rakennusta ympäröivästä sala-ojituksesta. Täten maa-aines alueella on melko huonosti vettä läpäisevää. Pääasiassa vesi virtaa tehdasrakennuksen lounaisosassa olevaa uoman osaa kohti, jossa myös eniten vettä läpäisevät kerrostumat on havaittu. [48]

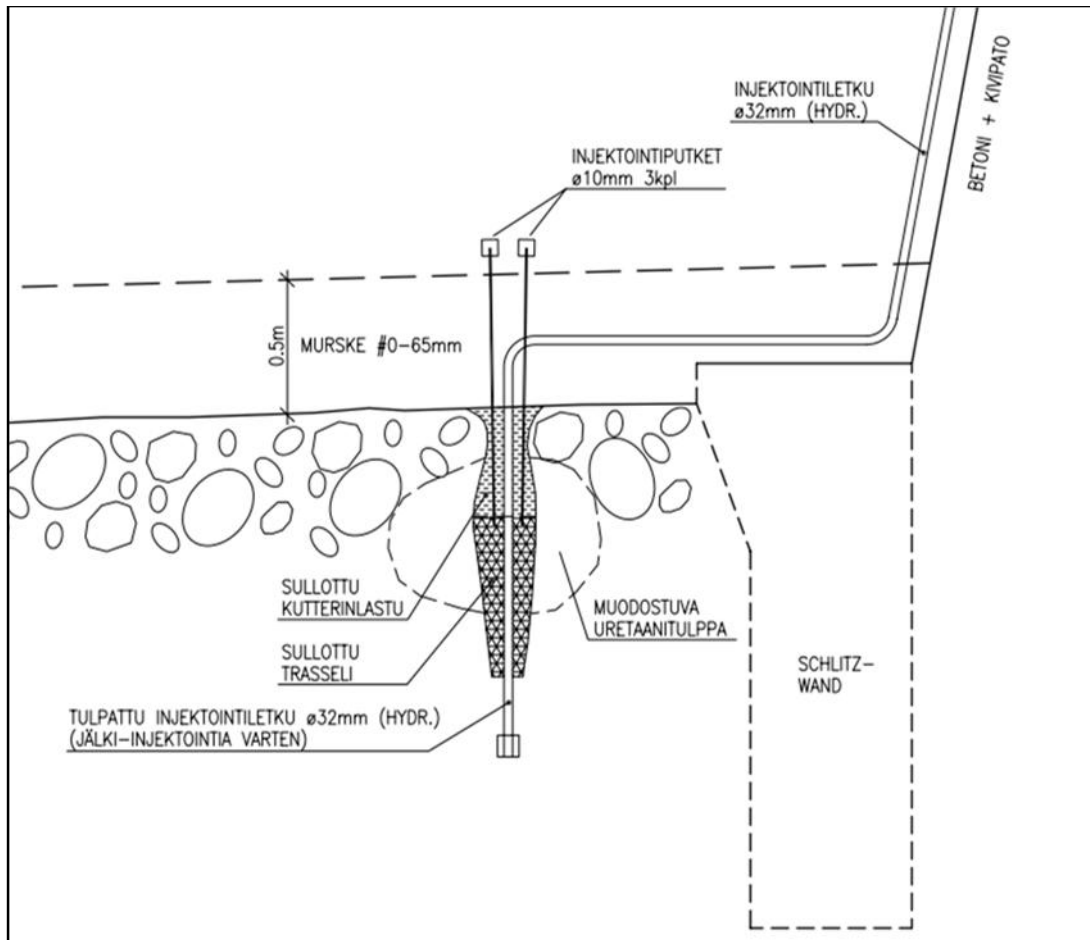


Kuva 50. Vanha vesivoimalaitos ja saaren eteläpuolinen luonnonuoma, joka on kuiva patoamisen johdosta.

Maaperä ei siis ole kauttaaltaan tiivistä moreenia, vaan seassa on hyvin vettä läpäiseviä välikerroksia. Selvityksen mukaan vedenpinnan nousu 8 metrillä eteläuomassa tulee aiheuttamaan suurta vesivuotoa suojattavalle alueelle ja pihamaan kuivanapito pelkästään pumppaamalla edellyttää suurien vesimäärien jatkuvaa pumppaamista. Täten selvityksessä ehdotetaan tiivistysseinän rakentamista eteläisen uoman rantamuurin alle, mikä myös toteutettiin. [48]

7.4 Padon tarkkailuohjelma

Padon siirtymiä on mitattu padon harjalle asennetuista siirtymämerkeistä vuodesta 1987 alkaen A-Insinöörit Geotesti Oy:n toimesta. Mittaukset ovat käsittäneet kuusi patolohkoa (monoliittia), jotka ovat noin 16 metrin mittaisia kulmatukimuureja. Mittauksia varten on vuonna 1987 kunkin patolohkon pystymuurin yläreunan kumpaankin päähän asennettu kohdistusristillä varustetut tarkkailutapit, joiden asema on mitattu vuosittain. Syksystä 2005 lähtien on mitattu myös näiden tappien korkeusasema. [50]



Kuva 51. Joulukuussa 2005 patovuodon korjaamiseksi suoritettun uretaanitulppauksen periaate. [53]

Vuodesta 2003 alkaen siirtymämittaukset on tehty takymetrikalustolla sekä kulmatta etäisyyshavaintoihin perustuen. Tulokset on annettu kulmahavaintoihin perustuvan laskennan mukaisina alkuperäistä teodoliittimittauksiin perustuvaa laskenta- ja tulostustapaa käyttäen. Seurantapisteverkostoa on laajennettu vuonna 2006 asentamalla kunkin patolohkon keskelle lisäpiste. Vuonna 2010 seurantaan on otettu myös Eteläisen padon länsiosa, eli osuus taitteen (paaluluku 281,62) jälkeen. Lisäksi kivi- rakenteen yläpinnalle on asennettu kolme metallitankoa tarkkailupisteiksi. Padon siirtymiä on käsitelty kappaleessa 7.5.3. [50]

Vuonna 1987 on alueelle asennettu laaja pohjavesiputkiverkosto, jonka avulla pohjaveden asemaa seurattiin vuoteen 1996 asti. Osa putkista pystytettiin lukemaan vielä 1998 mutta ne ovat vähitellen tukkeutuneet ja muuttuneet käyttökelvottomiksi. Vuonna 2005 on alueelle asennettu 16 kappaletta uusia pohjavesiputkia, joista kuusi on yhä toiminnassa. Vuonna 2008 on asennettu 13 kappaletta putkia ja aloitettu laajempi pohjavesitarkkailu. Pohjavesiputkien luennan yhteydessä tarkistetaan myös vesipinnan asema ja virtaustilanne viidessä kaivossa, joiden kautta vuoto- ja sadevedet ohjautuvat pumppaamolle. Näiden tarkkailtavien kaivojen mittaustuloksiin vaikuttavat mittaushetken ja edeltävien päivien sademäärät, joten tulosten tulkinta vaatii asiantuntemusta. Saadut tulokset käydään varmistamassa uudelleen heti poutaisemman jakson jälkeen, jolloin mahdolliset poikkeamat yleensä palaavat normaalitilaan. [48, 49, 50]

Vuonna 1988 kunnostettiin pakkasen rikkomat liikuntasaumat ja peitettiin ne teräslevyillä. Osa padon pystyhalkeamista on injektoitu vuonna 2001 ja samana vuonna padon harjan liikuntasaumoihin on asennettu padon osien (betonisten monoliittien) suhteellisen liikkeen tarkan mittaamisen mahdollistavat merkkiliuskat. Pohjavedenpintojen korkeustaso tarkistetaan kaivoista kuukausittain ja sähkökäyttöisten poistopumppujen käyttöastetta seurataan viikoittain sekä dieselkäyttöisen varapumpun riittävyys tarkastetaan koekäyttämällä kuukausittain. Padon tilanne on lisäksi tarkistettu vuosittain sukellustutkimuksella. [50]

7.5 Padossa esiintyneet vauriot ja toimivuuden kannalta oleelliset tekijät

Vuonna 2005 todettiin padossa lisääntynyttä vuotoa, joka ilmeni suotovesien poispumppaamiseen normaalisti käytettävien sähkökäyttöisten pumppujen varapumppuna käytettävän dieselpumpun käyttöasteen nousuna. Havainto tehtiin koekäytössä, jolloin dieselpumppu joutui lähes kapasiteettinsa äärirajoille, kun sitä tällöin käytetään ainoana pumppuna. Saman vuoden kesänä suoritetussa sukellustutkimuksessa havaittiin uoman pohjassa kaksi onkaloa, joihin vettä virtasi selvästi havaittavissa määrin. Ensimmäinen niistä sijaitsee uoman yli johtavan sillan alapuolella paalulla 103,23 ja toinen tehtaalle johtavan ajoluiskan kohdalla paalulla 185,78. [50]

Vuotokohdat paikattiin joulukuussa 2005 uretaanitulppauksella, jonka periaate käy ilmi kuvasta 51. Korjaustoimenpiteessä vuotokohtaan tehtiin tulppa trasselista ja kutterinlastusta, ja tulpan läpi asennettiin injektointiletkut. Letkujen kautta suoritetun injektoinnin avulla vuotokohta tiivistettiin ja tulpan avulla vältettiin injektointiaineen karkaaminen virran mukana. Vuotokohta eristettiin lisäksi murskepatjalla. Sillan yläpuoli-

sen onkalon tilkitsemisen jälkeen vesipinta laski mittausten mukaan lähimmässä sala-ojakaivossa (etäisyys noin 40 metriä) tilkitsemistä edeltävään tasoon verrattuna noin yhdellä metrillä. [53, 54]

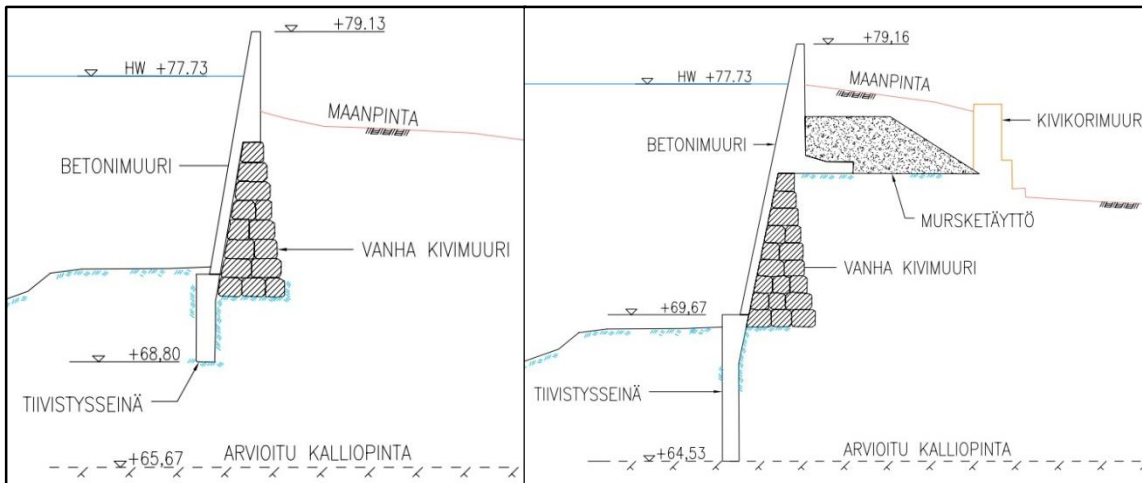


Kuva 52. Tehtaan ajoluiskaan vuonna 2008 ilmestynyt syöpymä ja päällystevaurio. (Kuva: Hannu Kylänpää)

Vuonna 2008 tehtaan alapihalle johtavalle ajoluiskalle syntyi syöpyimiä ja niiden seurauksena päällystevaurioita. Lisäksi pumppujen käyntiasteen todettiin kohonneen selvästi. Tästä syystä suoritettiin vuoden 2008 lopussa täydennysinjektointi vuonna 2005 havaittuihin vuotokanaviin. Tämän mahdollistivat aikaisemmissa korjauksissa myöhempää varmistamista varten kumpaankin uretaanitulppaan asennetut injektointiletkut. Lokakuussa 2008 suoritettu täydennysinjektointi palautti suotovirtaustilanteen vuoden 2005 korjausta edeltäneelle normaalitasolle. Ajoluiskan päällysteeseen asennettiin mahdollisten syöpymien vaikutusten rekisteröimiseksi tarkkailupisteet, joiden liikkeitä on seurattu Nokian kaupungin toimesta. [50]

Tehdassaaren padon suotovirtaustilaa on tutkittu vesipintahavaintojen lisäksi aika ajoin myös väriainekokeilla. Vuoden 2005 vuotojen yhteydessä tehtiin useita kokeita ja

mitattiin aikaa, joka väriaineella kestää suotautua virrasta tehdasrakennuksen alla olevaan kokoojakanaaliin. Vuodon ollessa käynnissä ja pumppujen toimiessa poikkeuksellisen suurella kapasiteetilla, oli vuotoaika noin 25 minuuttia ja se kasvoi tukkimisen jälkeen 50 minuuttiin.



Kuva 53. Poikkileikkaukset Tehdassaaren eteläisen padon paaluluvuilta 186 ja 240. Kuvan korkeudet järjestelmässä N2000 (Vastaa noin korkeustasoa NN +0,53 metriä).

Alueen pohjavesiseurannan perusteella suotovirtaustilanne on erittäin stabiili (2010). Seurannan mukaan pohjavesipinnat ovat pysyneet saaren tarkkailuputkissa lähes muuttumattomalla tasolla vaihtelun ollessa yleensä vain 10...20 cm mittauskertojen välillä, johtuen lähinnä sääolosuhteiden vaihteluista. Vesipintojen kokonaistilanne on korkeuskäyrinä esitettyä hyvin samankaltainen kuin 1980-luvulla asennettujen pohjavesiputkien perusteella piirretty yleistilanne tehdasalueella. [50]

7.5.1 Vakavuus

Padon tukimuurin vakavuutta on tutkittu laskennallisesti vuonna 2001 kulmatukimuurin mitoitusohjelmalla ja ympyräliukupintoihin perustuvalla vakavuuslaskennalla. Mallinnuksessa on tehty yksinkertaistuksia, sillä kumpaakaan ohjelmista ei ole tarkoitettu kyseisen tapauksen mitoitukseen, joten tulokset ovat suuntaa antavia. [55]

Kulmatukimuurin laskelmissa oletetaan sen olevan vanhan kivimuurin päällä ja betonimuurin olevan hiekan varassa. Tukimuurin takalaipan pituuden ollessa 3,0 metriä, saadaan laskennalliseksi varmuudeksi $F=1,5$ maapohjan murtumista vastaan ja liukumista vastaan $F=1,1$. Kitkakulman osavarmuuskerroin on 1,25. [55]

Liukupinta-analyysillä on tutkittu tilannetta, jossa betoniseinä on murtunut betonitukimuurin jalan alareunasta. Varmuudeksi sortumaa vastaan on saatu 1,3...1,7 riippuen vedenpainetasosta padon sisäpuolella. Seurantamittausten mukaisella vedenpinnan

korkeustasolla varmuus on $F=1,5$. Vanhan kivimuurin alapuolisen osan kokonaisvarmuus murtumista vastaan on $F=2,8$. [55]



Kuva 54. Tehdassaaren eteläinen pato kasvavan paaluluvun suuntaan kuvattuna, noin paalulta 195. Patolohkoissa on havaittavissa selvää hammastusta. Oikealla kaiteen takana nähtävissä padon tukemiseksi vuonna 2004 valmistunut kivikorirakenne.

Laskelmien mukaan padolla ei ole välitöntä sortumavaaraa, vaikka tukimuurin etureunan betonirakenne olisi täysin halkeillut ja teräkset olisivat täysin poikki. Suuremman vaaran rakenteen sortumiselle muodostaa kuitenkin suotovirtaustilanne ja sen vaihtelut. Rakenteen toiminta maapatona on epämääräistä ja virtaustila padon takana heikentää sen vakavuutta oleellisesti. Sisäisen eroosion kehittymistä padolla on usein mahdotonta havaita, ennen kuin sen vaikutukset padon turvallisuudelle ovat jo huomattavat. [55]

Patoturvallisuusasiakirjoihin merkitty hätä-HW-taso on 78,25 (NN), joka vastaa muurin harjan korkeutta. Siitä, aiheuttaako näin korkea vedenpinta vaurioita padolle, ei ole varmaa tietoa, sillä Pyhäjärven pinta on Kokemäenjoen suulla ollut mittausten aloittamisesta (1961) ylimmillään tasolla +77,21 (NN). Tehdassaaren eteläisen padon hätä-HW-taso tulisikin määritellä uudelleen, sillä vaikka se ei vaikuta Melon padon normaalityötoimintaan, saattaa se rajoittaa vedenpinnan korkeuden säätelyä poikkeustilanteissa.

7.5.2 Suotovirtaus ja vuodot

Vuoden 2008 täydennysinjektoinnin jälkeen suotovesimäärät ovat pysyneet vakaalla, pumppujen suorituskyvyn kannalta hyväksyttävällä tasolla. Tehtaan ja padon välissä olevalla ajotiellä ja alapihalla on kuitenkin havaittu päällystevaurioita aiheuttaneita syöpymiä vuosina 2008, 2011 ja 2013.



Kuva 55. Toukokuussa 2013 tehtaan alapihalle ilmestynyt noin metrin syvyinen syöpymä, joka havaittiin päällysteen pettäessä trukin pyörän alla.

Nokian kaupungin keskelle ajotietä asentamien tarkkailupisteiden mittaustulosten perusteella ajotien yleistasossa ei ole tapahtunut mittaustarkkuuden ylittäviä painumia vuoden 2008 jälkeen. Silmäämääräisesti tarkasteltuna päällysteen epätasaisuus on padon puoleisella sivulla kuitenkin lisääntynyt.

Suotovirtaus ja sen aiheuttamat muutokset maassa aiheuttavat todennäköisesti suuren osan patoelementtien liikkeistä. Merkittävämpiä muutoksia ilmenee yleensä muutamana vuoden välein näkyvinä ongelmina, esimerkiksi lähteinä, syöpyminä ja pumppausvesimäärien kasvuna. Padon rakenteen ja maaperän laadun takia jatkuvaa suotovirtausta ei voi estää ja se todennäköisesti huuhtoo jatkuvasti mukanaan hienoaainesta, jonka poistumisen myötä maan vedenläpäisevyys kasvaa ajan myötä entisestään. Muutos ei ole tasaista ajallisesti tai paikallisesti, ja uudet ongelmakohdat voidaan yleensä paikantaa vasta uusien näkyvien muutosten myötä. Mahdollinen uhka on myös suotovirtauksen ja siten vesimäärien lisääntyminen siten, että käytössä olevien pumppujen kapasiteetti ei enää riitä. [50]

Tähän mennessä ongelmallisiksi kehittyneet muutokset suotovirtaustilanteessa ovat näkyneet myös pumppausvesimäärissä ja muodostuneet virtauskanavat on pystytty vesipintatietojen ja sukellustutkimusten avulla paikallistamaan. Mittausten ja tarkastusten jatkaminen seurantaohjelman mukaan onkin ensiarvoisen tärkeää, jotta kuva tilanteesta pysyy ajan tasalla ja tilanteen kehittyminen voidaan tunnistaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. [50]

7.5.3 Betonirakenteiden kunto

Huura Oy on tutkinut padon kuntoa betonirakenteiden osalta ensimmäisen kerran vuonna 1996. Uusin tarkastuselostus on kesäkuulta 2011, jolloin tarkoituksena oli määrittää rakenteen jäljellä oleva käyttöikä säilyvyyden kannalta. Tutkimuksessa rakenteen kuntoa ja siinä tapahtuneita muutoksia verrattiin vuonna 1996 tehtyyn tutkimukseen. Patorakenteet tarkastettiin silmämääräisesti padon kuivalta puolelta ja betoninäytteet otettiin samalta alueelta kuin vuonna 1996. Betonista tehtiin myös kaksi ohuthietutkimusta. Yhteensä vuonna 2011 otettiin kuusi kappaleita näytteitä, joista kolme betonin karbonatisoitumistutkimukseen ja kolme vetolujuustutkimukseen. Uoman puolelta ei otettu näytteitä. [56]

Vuonna 1996 on patomuurista tehty seuraavia havaintoja, joita myös vuoden 2011 havainnot vastaavat [56]:

1. Betonin tiivistys on ollut puutteellista ja siinä on runsaasti tiivistyshuokosia.
2. Patomuurissa on pystyhalkeamia 4–5 metrin välein, paikoin tiheämmässäkin. Halkeamat ulottuvat koko rakenteen läpi ja ne johtuvat todennäköisesti kuivumiskutistumisesta.
3. Halkeamaleveydet vaihtelevat paljon, noin välillä 0,1...1,0 mm.
4. Vedenalaisilla osilla on sukellustarkastuksen mukaan myös vaakahalkeamia, joiden syy saattaa olla rakenteen taipuminen vedenpaineen vaikutuksesta. Sukeltajan arvion mukaan osa vaakahalkeamista sijaitsee padon poikkileikkauksen muutoskohdissa. Vedenalaisten halkeamien reunat ovat rapautuneet halkeaman molemmin puolin 10–15 cm:n leveydeltä 2–3 cm:n syvyyteen.
5. Muurissa on läntisestä taitteesta pohjoiseen päin mentäessä noin neljän metrin etäisyydellä paha lohkeama, jonka koko on noin 0,5 m². Lohkeaman syy saattaa olla jokin törmäys, suuri paine rakenteen kohdalla tai valmistusvaiheessa rakenteen sisään jäänyt puukappale.

Betonirakenteen säilyvyyden kannalta tärkeässä osassa on raudoituksen betonipeitteen paksuus ja sen laatu. Padon betonipeitteen mittausta on tehty vuoden 1996 tarkas-

tuksen yhteydessä, ja se muuttuu ajan kuluessa vain vähän betonin pintarapautumisen seurauksena. Mittauksissa havaittiin uoman puolella betonipeitteen vaihtelevan välillä 25...40 mm ja muurin alareunassa vesirajan tuntumassa olevan pääosin yli 40 mm. Padon kuivalla puolella peitepaksuudet vaihtelevat itä-länsisuuntaisella osalla välillä 10...30 mm ja läntisen taitteen pohjoispuolisella osalla välillä 25...40 mm. Muurin harjalla peitepaksuudet ovat myös välillä 25...40 mm. Raudoituksen betonipeitteet eivät vastaa vedenalaisilla osilla nykyistä 50 mm:n vaatimusta, mutta ovat muualla lähes riittävät. [56]

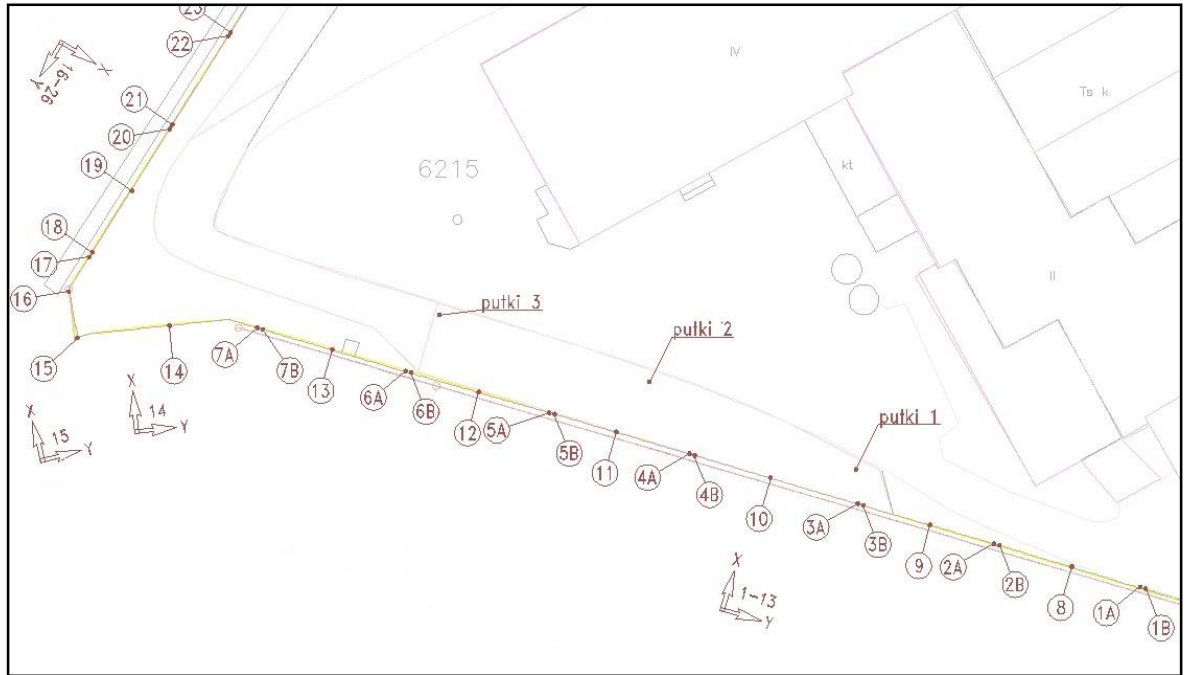


Kuva 56. Betonin vetolujuus- ja karbonatisoitumisnäytteiden ottokohta vuoden 2011 tutkimuksessa. [56]

Betonin karbonatisoitumisen tutkimiseksi porattiin rakenteista timanttikoralla kolme näytettä. Laboratoriotutkimusten mukaan karbonatisoituminen ei ole merkittävästi edennyt viimeisen 15 vuoden aikana eikä se ole ongelma padon betonipinnoissa, jos verrataan sitä raudoituksen peitepaksuuksiin. Karbonatisoitumissyvyys on keskimäärin padon betonirakenteissa alle 7 mm, joten betoni suojaa yhä raudoitusta. [56]

Betoniterästen korroosio voi aiheuttaa betoniin sisään painetta, rikkoen rakennetta halkeilun ja lohkeilun kautta. Korroosioalttiuden määrittämiseksi raudoituksen potentiaali on mitattu vuonna 1996 patomuurin sisäpinnasta. Potentiaalini todettiin selvästi alentuneen, ja mittausten perusteella korroosiota voi esiintyä etenkin halkeamien kohdalla ja vesirajan alapuolisella osalla. Patorakenteisiin pakkasesta aiheutuneet vau-

riot kartoitettiin silmämääräisesti. Patomuurin uomanpuoleisessa pinnassa havaittiin vedenpinnan vaihtelualueella 0,50...1,0 metriä korkea, rapautunut kaista. Syyksi todettiin betonipinnan mekaaninen sekä jään ja pakkasen yhteisvaikutusten aiheuttama rasitus. Myös patomuurin päällä todettiin esiintyvän lievää pakkasrapautumista aivan betonin pinnassa. [56]



Kuva 57. Eteläisen padon siirtymämittauspisteet.

Betonin puristus- ja vetolujuus on tutkittu vuonna 1996. Lujuus ei yleensä ole määräävä tekijä rakenteen säilyvyyden kannalta, mutta sen on oltava kuitenkin riittävä laasti-paikkausten ja pinnoitusten alustaksi, jotta korjaustyö voisi onnistua. Betonin puristuslujuusnäytteet on otettu muurin sisä- ja ulkopuolelta ja puristuslujuudeksi on saatu 69...79 MPa. Betonin vetolujuudeksi saatiin 3,8...4,1 MPa muurin kuivalla puolella ja 1,9 MPa uoman puolella, lähellä vesirajaa ja rapautunutta kaistaa. Vetolujuus kuivalla puolella mitattiin uudelleen samoista kohdista vuonna 2011 ja tulokseksi saatiin 3,5...3,9 MPa, joten betonirakenteen vetolujuus ei ole juurikaan huonontunut vuoden 1996 mittauksesta. Kaikki arvot ylittävät korjaustöille vaaditun tason 1,5 MPa. [56]

Padon betonirakenteiden kannalta merkittävimmät säilyvyyttä vaarantavat tekijät ovat rakennusvaiheen kuivumiskutistumasta aiheutuneet halkeamat sekä pakkasrasituksesta ja virtaavasta vedestä aiheutuneet rapautumat vedenpinnan vaihtelualueella. Nämä myös vaikuttavat betonipeitteen paksuuteen ja laatuun, jolloin vauriokohdissa raudoituksen korroosio voi olla jo paikallisesti käynnissä, vaikka betonin karbonatisoituminen ei olekaan vielä kovin pitkällä. [56]

Padon käyttöiän kannalta merkittävässä asemassa ovat myös sen siirtymät, joita on mitattu vuodesta 1987 saakka kappaleessa 7.4 kuvatulla tavalla. Siirtymämittauspisteet on esitetty kuvassa 57. Patoelementtien reunimmaisista pisteparit (1A–1B, 7A–7B ja 2B– 6A) ovat pysyneet mittausten mukaan lähes paikoillaan (kokonaissiirtymä noin 10...15 mm) koko tarkkailuajan. Eniten siirtyneen lohkon (4A–5B) yläreunan tarkkailupisteiden mitattu kokonaissiirtymä uomasta pihan suuntaan on noin 45...50 mm ja siirtymät jatkuivat tasaisina vuoteen 2004. Vuoden 2004 alussa tapahtuneen padon keskiosan taustatäytön korottamisen ja kivikorituennan rakentamisen jälkeen ovat padon tarkkailupisteet keskiosa mukaan lukien pysyneet paikoillaan. Käytännön mittaustarkkuus on noin ± 3 mm, mikä rajoittaa hyvin pienten siirtymien havaitsemista. [50, 56]

Patoelementtien liikkumisesta ja niiden liike-eroista johtuen elementtien liikuntasaumoissa esiintyy hammastusta. Siirtymätarkkailupisteiden korkeusasemissa ei ole tapahtunut mittaustarkkuuden ylittäviä pystysuuntaisia liikkeitä sen jälkeen, kun korkeusasemien mittaukset aloitettiin vuonna 2005. Padon taitteen (paaluluku 281,62) jälkeisellä osalla uusien pisteiden 14–28 mittauksissa ei tähänastisen ajallisesti lyhyehkön mittausjakson aikana ole todettavissa mittaustarkkuuden ylittäviä siirtymiä. [50, 56]

7.6 Padon luokitus ja sen perusteet

Hämeen ympäristökeskuksen päätöksellä Tehdassaaren padon luokitus muutettiin 16.2.2007 luokasta N luokkaan P, eli nykyluokituksen mukaan luokasta 2 luokkaan 1. Padon on siis patoturvallisuuslain sanoin katsottu ”onnettomuuden sattuessa aiheuttavan vaaraa ihmishengelle ja terveydelle taikka huomattavan vaaran ympäristölle tai omaisuudelle”. Padolla suojataan saarella sijaitsevaa teollisuuslaitosta, jonka alakerta ja kellari sekä osa piha-alueesta ovat pysyvästi joenpinnan alapuolella. Padon sortuminen muodostaisi vaaran tehdasrakennuksessa työskenteleville ihmisille ja aiheuttaisi merkittävät taloudelliset vahingot. [61]

Padon vahingonvaaraselvityksen mukaan padon sortumisen seurauksena vedenpinta saarella nousisi Pyhäjärven pinnan tasolle ja vesisyvyys tulva-alueella olisi noin 4 metriä. Patoon syntyvän aukon suuruudesta riippuen alueen täyttyminen vedellä kestäisi likimääräisten laskelmien mukaan noin viidestä minuutista puoleen tuntiin. Varastokäytössä oleva teollisuuslaitoksen maanalainen kellari täyttyisi vedellä kokonaan ja tuotantotilana oleva ensimmäinen kerros täyttyisi noin yläneljännekseensä saakka. [61, 62]

Todennäköisin murtumissyys rakenteelle on lisääntyvän suodon aiheuttama sisäinen eroosio. Mikäli padon läpi ja alitse suotautuva vesimäärä lisääntyy ja/tai sen nopeus

kasvaa, alkaa vesi kuljettaa mukanaan hienoaainesta syövyttäen maata ja johtaen sen stabiiliteetin heikentymiseen. Tästä taas seuraisi liukupinnan muodostuminen kyseiseen padonosaan tai sen alle ja padon äkillinen murtuma. Mahdollisen murtuman äkillisestä luonteesta johtuen padon tarkkailuohjelman merkitys on suuri, jotta poikkeaviin havaintoihin voidaan reagoida ajoissa ja saada tarvittaessa henkilöstö turvaan. [62]

Tehdasrakennuksessa työskentelee yhtä aikaa keskimäärin 33 henkilöä, joista 20 vahinkouhan alaisessa 1. kerroksessa. Kastuvan alueen kokonaispinta-ala on noin 12 000 m². Ihmishengelle kohdistuvan vaaran ja huomattavan omaisuusvahingon riskin lisäksi ympäristöön on onnettomuustapauksessa mahdollista levitä pieniä määriä tehtaan prosesseissa käytettäviä ympäristölle haitallisia kemikaaleja. [62]

7.7 Padon korjaussuunnitelma

7.7.1 Vaihtoehto 1, injektointi

Kuten kappaleesta 7.5 käy ilmi, patoa on injektoitu jo aikaisemmin, mutta tähänastiset injektoinnit ovat olleet täsmäkorjauksia padossa esiintyneisiin vuotokohtiin. Varsinaisessa korjauksessa injektointitoimenpiteet kohdistetaan padon maapato-osaan pidemmälle matkalle sekä sen liittymäkohtiin muihin rakenteisiin.

Pato korjataan täyttämällä maarakenteessa mahdollisesti olevat tyhjätilat injektointiaineella. Injektointi kohdistetaan suurimpien vuotokohtien kohdalle (paaluluvut 103 ja 187) sekä niiden väliselle alueelle. Reikäväli on 4 metriä. Injektointi kohdistuu alueelle, jossa tiivistysseinää ei ole viety kallioon saakka, noin paaluvälille 80...210. Tämä alue ilmenee vanhoista rakennepiirustuksista.

Injektointiaineena käytetään seosta, joka koostuu vedestä, sementistä, bentoniitista, hiekasta ja muovikuiduista. Injektointiaineen koostumusta säädellään massamenekin mukaan. Mikäli maassa tapahtuu voimakasta veden virtausta, käytetään polyuretaanipitoista sideainetta. Saumojen tai halkeamien korjaamiseen betonirakenteen vuotokohdissa voidaan käyttää voimalaastia, joka on pääasiallisesti vedenalaisissa korjausvaluissa käytetty sementtipohjainen erikoismassa. Voimalaasti on sitkeää ja se kestää erottumatta voimakkaassakin vesivirtauksessa. Injektointi aloitetaan vuotokohtiin nähden kauimmaisista pisteistä. Viimeisenä injektoidaan havaittujen vuotojen kohdat.

Injektointiin käytetään kulmatukimuurin kuivalta puolelta porattuja pystysuoria tai tarvittaessa kallistettuja reikiä. Reiät pyritään tekemään vanhan kivimuurin takapuolelle mahdollisimman lähelle tiivistysseinää. Kivimuurin läpiporaamista tulee välttää, mutta kulmatukimuurin betonisen anturan läpi voi porata. Reiät porataan kalliopintaan

saakka. Porauksessa tulisi käyttää mahdollisimman vähän vesihuuhdeltua maaperän häiriintymisen minimoimiseksi.

Injektointiaine ulotetaan tiivistysseinän vuotokohtiin, joita voi olla seinän saumoissa, seinän ja betonirakenteen välissä sekä seinän ja maamateriaalin pysty- tai vaakasuuntaisissa rajapinnoissa. Tyhjätilaa injektointiaineella täytettäessä tulee suotovirtaus ottaa huomioon, sillä se voi huuhdella materiaalia mukanaan. Suotovirtauksen suunta on virrasta saarta kohti, mikä tulee ottaa huomioon injektoinnissa ja injektointipaineen valinnassa. Myös hydrostaattinen paine-ero työntää injektointiainetta kohti saarta. Paine-eron suuruus riippuu märkäviivan sijainnista padon taustassa.



Kuva 58. Tiivistysinjektointia Melon voimalaitospadolla kesällä 2012.

Maan mahdollisista tyhjätiloista saadaan poraustyön aikana viitteitä kairan liikkeistä. Esimerkki käytettävästä kalustosta on esitetty kuvassa 58. Jos kaira etenee portaittain tai putoaa äkillisesti pidempiä osuuksia, voidaan maassa olettaa esiintyvän tyhjätiloja tai löyhempiä kerrostumia. Injektointityön aikana tyhjätiloja voidaan arvioida massamenekin perusteella. Mahdolliset tyhjätilat voivat vaikuttaa haitallisesti injektointiaineen kulkeutumissuuntaan. Injektointipaineen valinnalla, injektointiaineen koostumuksella ja reikien injektointijärjestyksellä vaikutetaan injektointiaineen leviämiseen ja kulkeutumiseen halutulla tavalla. Injektointi tiivistää viereisiä maamassoja ja pienentää siten tyhjätiloja maamateriaalissa.

Injektointityön aikana on rakenteita ja veden virtaustilan mahdollisia muutoksia seurattava. Suotovesien määrää voidaan seurata pumppujen käyntiaikatiedoista sekä vedenpinnan vaihteluista tehtaan alapuolisessa kanaalissa. Vedenpinnan korkeustasoa voidaan tarkkailla kaivoista ja pohjavesiputkista. Injektointiaineen kulkeutuminen virtaan on havainnoitava veden värin perusteella. Injektoinnin onnistuminen varmistetaan kontrolliputkien avulla. Putkia on asennettava injektointityön seurantaan varten reikävälillä (4 metriä) puoliväleihin, eli 2 metrin etäisyydelle kustakin varsinaisesta injektointireiästä. Näistä putkista tarkkaillaan injektointiaineen leviämistä. Putkien kautta on myös mahdollista injektoida, mikäli injektointiaine ei käytetyllä reikävälillä leviä tarpeeksi laajalle alueelle.

Mursketäytön tarpeellisuus virran puolelle arvioidaan injektointimenetelmän ja tarpeellisten injektointipaineiden perusteella. Mursketäytön tarkoituksena on estää injektointiaineen leviäminen virran puolelle ja toisaalta estää suurempien virtausnielujen syntyminen. Mursketäytön tehtävä on myös muodostaa vastapainetta rakenteen betonikuorelle, jonka taakse injektoinnista muodostuu painetta. Toisaalta betonirakenteen alaosan peittävä mursketäyttö estää mahdollisten uusien vuotokohtien tarkan paikallistamisen. Mursketäytön materiaalin tulee olla raekokojakaumaltaan tarkoitukseen soveltuvaa, ettei se esimerkiksi lähde liikkeelle virran mukana. Mursketäytön tarpeellisuuden arvioi injektointiurakoitsija.

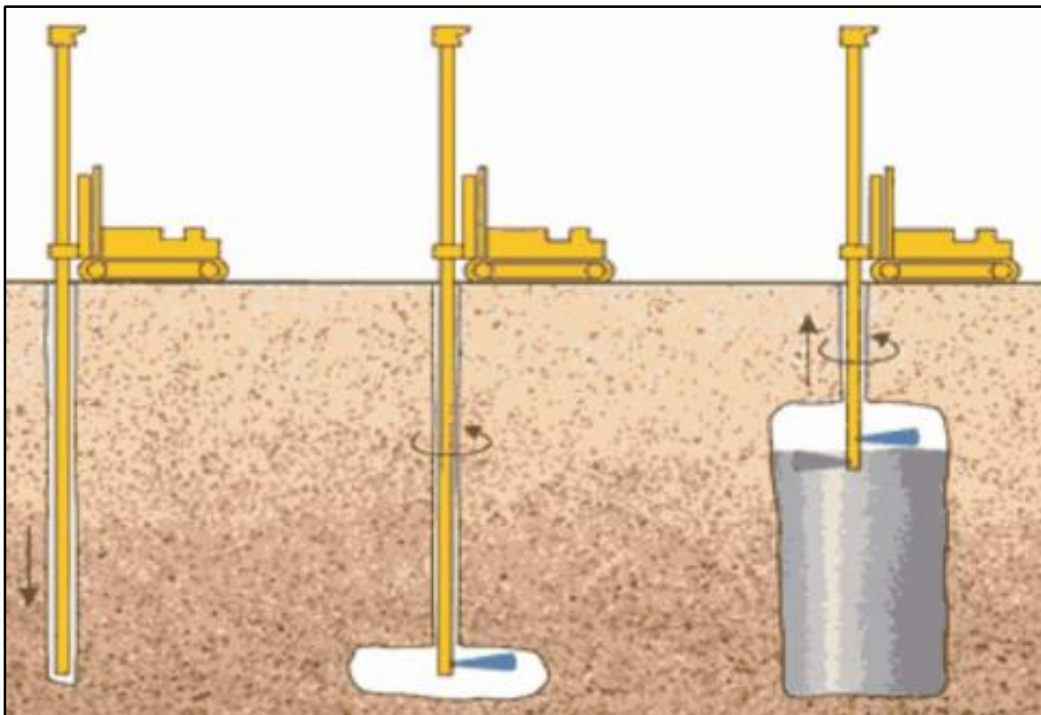
Koeinjektointi on suoritettava ennen varsinaista laajempaa työtä. Koeinjektointeja tehdään siten, että niiden voidaan olettaa edustavan koko rakennetta. Koeinjektoinnin aikana seurataan pumpattavia vesimääriä. Injektointiaine, injektointitekniikka ja injektointipaineet on valittava siten, että injektointiaine tunkeutuu muurin alapuolella ja takana oleviin tyhjätiloihin.

7.7.2 Vaihtoehto 2, suihkuinjektointi

Suihkuinjektoinnissa maahan porattuun reikään suihkutetaan porauskaluston suuttimen kautta korkealla, yli 300 barin paineella sideainesuspensiota. Suihkun vaikutuksesta maa erodoituu ja sekoittuu sideaineeseen muodostaen maabetonirakenteen. Sideaineen suihkutusta aloitetaan yleensä poratun reiän pohjalta, samalla kun kalustoa nostetaan ylöspäin sitä pyörittämällä. Näin aikaansaadaan pilarimainen rakenne, joka vastaa likipitään raudoittamatonta betonia. Vierekkäisten pilareiden avulla voidaan muodostaa seiniä, joita on käytetty myös patorakenteissa, esimerkkinä kuva 60. [63]

Maa-aineksen syrjäyttämisen tehostamiseksi voidaan suihkutuksessa käyttää paineilmaa tai vettä erillisestä suuttimesta. Paineilman käyttöä kutsutaan kaksivaiheiseksi menetelmäksi, kun taas kolmivaiheisessa menetelmässä suihkutetaan ensin korkealla

paineella vettä paineilman kanssa ja sementtisuspension injektointipaine on pienempi. Tyypillisesti suihkuinjektoidulle maalle saavutetaan maalajista riippuen 2...20 MPa:n puristuslujuuksia. Vedenläpäisevyys vaihtelee yleensä välillä 10^{-8} ... 10^{-10} m/s. Suihkuinjektoinnissa käytettävä sideaine valmistetaan tavallisesti sementistä ja vedestä vesi-sementtisuhteen arvolla 0,5...1,5. Suihkuinjektoinnissa muodostuu aina suihkuinjektointilietettä. Sillä tarkoitetaan ylimääräistä sementtisuspension eli vesi-sementtiseoksen paluuvirtaamaa, jonka seassa nousee myös maa-ainesta. Lietettä nousee varsinakin suihkutettaessa, mutta mahdollisesti myös porattaessa. [63, 64]



Kuva 59. Suihkuinjektoinnin vaiheet: poraus määräsyvyyteen, suihkutuksen aloitus, nosto pyörittäen. [63, 64]

Tehdassaaren eteläisen padon korjaamiseen voidaan käyttää suihkuinjektoimalla valmistettua seinää, jolla katkaistaan padon vesivuodot. Seinä koostuu vierekkäin sijoitetuista suihkuinjektointipilareista, joiden halkaisija on esimerkiksi 1200 mm. Vierekkäiset pilarit tulee limittää rakenteen vesitiiviiden takaamiseksi. Pilarit ovat raudoittamattomia, joten niiden taivutuskapasiteetti on hyvin rajallinen. Pystytukina voidaan tarvittaessa käyttää porapaaluja tai HEB-palkkeja, jotka jäykistävät rakenteen ottamalla vastaan taivutusjännitykset. Pilarit asennetaan padon kuivalle puolelle sellaiselle etäisyydelle padosta, ettei suihkuinjektointiseinään kohdistu merkittäviä vaakavoimia. Pohjavedenpinta padon taustassa laskee valmiin seinän kohdalla, joten seinään kohdistuu vedenpainetta. Tämä kuorma tulee huomioida seinän mitoituksessa. Sideaineeseen on lisättävä bentoniittia, jotta saavutetaan patorakenteelta vaadittava vesitiiviys. [8, 63, 64]

Ensimmäinen työvaihe on poraus määräsyvyyteen, ja se suoritetaan käyttäen vasaraa tai maaperäominaisuuksien salliessa pelkkää huuhtelua. Huuhtelussa johdetaan poran kärkiosan suuttimien läpi vettä tai sementtisuspensiota matalalla paineella, jolloin maan kärjen alla juoksettuu ja porakanget saadaan painettua maahan pelkällä pyörytyksellä ilman vasaran käyttöä. Poraus tulee tavallisesti ulottaa vähintään 0,5 metrin syvyydelle kallioon. Koska kyseessä on patoseinän rakentaminen eikä kalliolaadusta ole tietoa, tulee poraus ulottaa tätä syvemmälle, vähintään 2 metrin syvyydelle kallioon. Tällöin saadaan tiivistettyä myös kallion mahdolliset pintaruhjeet. [63]

Injektoinnin aloittamisessa käytetty paine määräytyy maaparametrien mukaan. Injektointipaine voidaan nostaa tavoitetasolle vasta sitten, kun sideainesuspension paluuvirtaama todetaan normaaliksi. Pilari suihkutetaan tavoitetasoon, joka on kuitenkin vähintään 0,5 metrin etäisyydellä maanpinnasta. Suihkutuksen aikana mitataan esimerkiksi siirtymiä, painumia ja pohjaveden korkeutta. Suihkuinjektointiprosessia seurataan erityisesti suihkuinjektointiin tehdyllä laitteistolla, joka mittaa suihkutus-, nosto- ja pyörimisnopeutta sekä virtaamia. Suihkuinjektointiparametrien seuraaminen suihkutuksen aikana on olennaista tulosten laadunvalvontaa varten.

Porausjärjestystä koskevia menetelmiä on kaksi. Tuore-tuore-menetelmässä pilarit suihkuinjektoidaan järjestyksessä vuorotellen odottamatta edellisen pilarin sitoutumista, kun taas primääri-sekundääri-menetelmässä viereisen pilarin injektointia ei voida aloittaa, ennen kuin pilari on saavuttanut tietyn, etukäteen määritellyn lujuuden. Kun kahden pilarin väliin jätetään vähintään yksi injektoimaton pilari, saavat pilarit lujittua häiriintymättä. Tuore-tuore-menetelmän käytön mahdollisuutta tässä kohteessa tulee selvittää tarkemmin, sillä laaja-alainen pilarointi häiritsee maaperää ja saattaa aiheuttaa painumia tai siirtymiä kohteen lähellä olevissa rakenteissa. Tehdassaaren eteläisen padon ylimmän osan kulmatukimuurin laippa on maanvarainen, joten sen painumisvaara tulee huomioida. [63]

Suihkuinjektoinnissa maaperän ominaisuudet vaikuttavat suuresti syntyvän maabetonin laatuun. Muita lopputuloksen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat suihkun nosto- ja pyöritysnopeus, suihkutuspaine ja -virtaama sekä sideainesuspension koostumus. Valmiista pilareista voidaan porata näytteitä laboratoriokokeita varten. Yleisin testattava ominaisuus on puristuslujuus. Tehdassaaressa patoseinäksi tarkoitetun suihkuinjektointirakenteen tärkein ominaisuus on pieni vedenläpäisevyys, jonka voidaan olettaa korreloivan puristuslujuuden kanssa ainakin jossain määrin. Puristuslujuuskokeen lisäksi voidaan pilareista otetuille näytteille tehdä myös vedenläpäisevyyskokeita. [63, 64]

Tehdassaaressa riskitekijöitä ovat rakeisuudeltaan vaihtelevat maakerrokset ja mahdolliset tyhjätilat. Suihkuinjektointiliete saattaa kulkeutua tyhjätilojen myötä tavoite-

alueen ulkopuolelle ja maanpinta vajota hetkellisesti injektointipaineen maaperää häiritsevän vaikutuksen takia. Mikäli lietettä ei nouse reiästä normaalisti tai massan pinta vajoaa syvemmälle reikään, tulee suihkutusta keskeyttää. Alueella sijaitsevat viemärit ja muut putket saattavat tukkeutua injektointilietteestä ja kuljettaa sitä pois kohdealueelta. Putkistojen sijainti tulee selvittää ennen työn aloittamista. [63]



Kuva 60. Suihkuinjektointia Teestan patotyömaalla Intiassa. Menetelmällä rakennetaan kallioon ulottuva 40-metrinen vesitiivis katkaisuseinä. [65]

Riskitekijän muodostaa suihkuinjektointityön suorittaminen suotovirtauksen alaisessa maaperässä. Riippuen veden virtausnopeudesta ja virtaamasta, saattaa suotovirtaus vaarantaa keskeneräiset pilarit kuljettaen sideaineen ja maan seosta pois ennen kuin pilarit saavuttavat tarvittavan lujuuden. Lisäksi pilareiden suihkutusta ja vesitiiviydeltään hyvän lopputuloksen saavuttaminen kallion ja maan rajapinnassa on todennäköisesti ongelmallista tiiviin moreenin ja mahdollisesti kivisen maaperän takia. Esteet, kuten lohkariekat maaperässä, tekevät pilarista epäsäännöllisen ja pilari saattaa jäädä ohueksi. [8, 64]

Rakenteen pitkäaikaiskestävyydestä kohteen olosuhteissa ei ole tietoa. Pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttaa varsinkin pakkanen, jota suihkuinjektointipilarit eivät kestä. Täten ne joudutaan sijoittamaan roudattomaan syvyyteen tai routaeristämään. Pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttavat myös viruma, jälkiettringiitti-ilmiö ja pohjaveden aggressiivisuus. [8, 64]

7.7.3 Vaihtoehto 3, porapaaluseinä

Tehdassaaren padon suotovirtauksen hallintaan ja siten padon vakavoittamiseen voidaan käyttää poraamalla asennettavaa, vesitiivistä RD-paaluseinää. Seinä koostuu teräsputkipaaluista, jotka kiinnitetään toisiinsa lukkoprofiileilla. Lukkoprofiilit on kiinnitetty tehtaalla paaluihin hitsaamalla. RD-paaluseinä voidaan porata kivien ja lohkareiden läpi ja asentaa vesitiiviisti kallion sisään. Seinän lukkojen vesitiiviys tulee varmistaa bitumipohjaisella tiivistysmassalla tai hitsaamalla ne vesitiiviiksi. [8]

Tukevasti kallioon asennetulle porapaaluseinälle voidaan sallia suuria pysty- ja vaakakuormituksia. RD-paaluseinässä voidaan käyttää eri paalukokoja alkaen paalusta RD170 paaluun RD1200 asti, mutta pohjoismaisissa olosuhteissa suurin käytännöllinen paaluhalkaisija on noin 800 mm. Taloudellisesti järkevin paalukoko määräytyy rakennusteknisistä lähtökohdista, kuten tukemistarpeesta ja -kapasiteetista. Paaluputket liitetään toisiinsa lukkoprofiileilla, joita on seinää varten kehitetty kahta eri tyyppiä: E21-lukko ja RM/RF-lukko (kuva 61). RM/RF-lukkoon voidaan sisällyttää injektointikanava, jonka avulla varmistetaan paaluseinän alapään vesitiiviys. [8, 66]



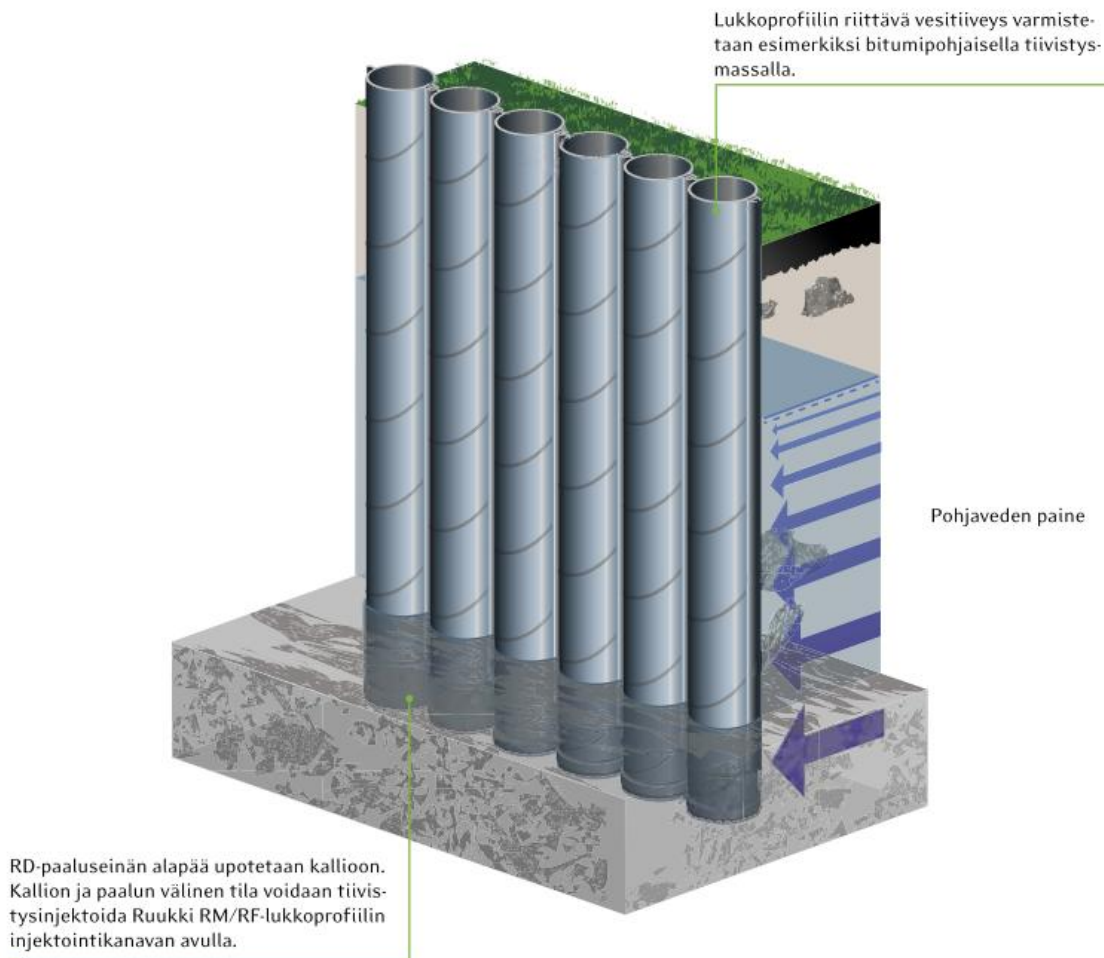
Kuva 61. Paaluputkien kiinnittämistä varten käytettävät lukkoprofiilit, vasemmalla RM/RF-lukko ja oikealla E21-lukko. [66]

Ponttilukoilla varustetun seinän asennuksen mahdollistaa porauksessa käytettävä paalun ulkohalkaisijaa suurempi avarrinkruunu, jolla saadaan tila lukkoprofiileille. Koska maahan paalua varten syntyvä reikä on vähintään noin 40 mm paalun halkaisijaa suurempi, saattaa syntyvä tyhjätila aiheuttaa siirtymiä tai painumia viereisissä rakenteissa. Tämä tulee ottaa huomioon etenkin silloin, kun seinää asennetaan olemassa olevien rakenteiden viereen tai maassa on jo valmiiksi jännitystiloja. [8, 66]

Padolla tulee suunnittelun tueksi tehdä pohjatutkimuksia kalliopinnan sijainnin tarkempaa selvittämistä varten. Täten paalujen asennustaso voidaan määrittää ja paalut voidaan tilata määrämittäisinä. Koska paaluseinä asennetaan kallioon, tulee myös kalliolaatu selvittää riittävillä porakonekairauksilla. Paalut suositellaan porattavan ehjään kallioon kolme kertaa paalun halkaisijan verran tai vähintään 500 mm. Kuitenkaan yli 1500 mm:n poraus ehjään kallioon ei ole tavanomaisessa suomalaisessa kallioperässä tarkoituksenmukaista. RD-paaluseinä voidaan mitoittaa teräsrakenteena tai teräsbe-

toniliittorakenteena, mikäli paalut betonoidaan ja mahdollisesti raudoitetaan. Pitkäaikaisissa ja pysyvissä rakenteissa, joihin myös Tehdassaaren patorakenne lukeutuu, tulee ottaa huomioon teräspaalujen korroosio. [66]

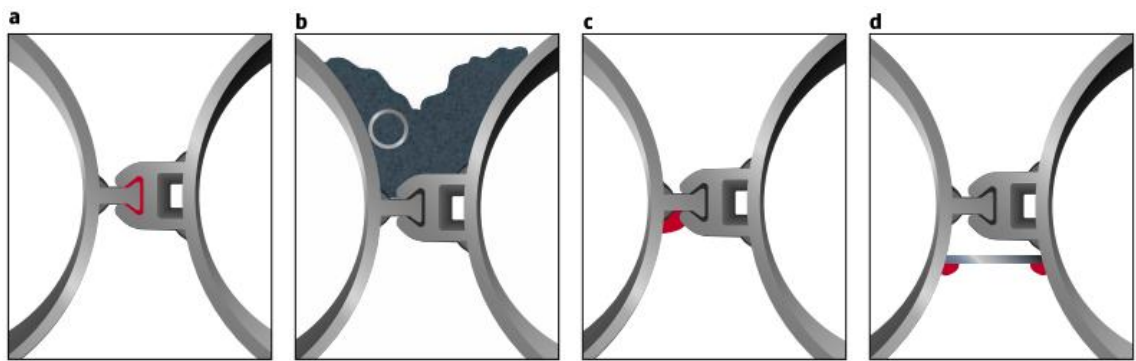
RD-paaluseinän vesitiiviys riippuu voimakkaasti maaperän ominaisuuksista ja on yleensä riittävä useimpiin käyttötarkoituksiin. Mikäli maaperän vedenläpäisevyys on pieni (hienorakeiset maat) ja vedenpaine-ero seinän eri puolilla kohtuullinen (alle 80 kPa), on lukon läpäisevä vesimäärä merkityksettömän pieni. Rakennettaessa pysyvää patoseinää vaihteleviin maaperäolosuhteisiin tulee seinän vesitiivyyttä kuitenkin parantaa. Vaihtoehtoja tiivistämiseen ovat bitumipohjaisen tiivistysaineen käyttö lukkoprofiilissa, veden vaikutuksesta laajentuvan tiivistysmassan käyttö tai injektointi seinän takana lukon kohdalla. Paras mahdollinen RD-paaluseinän vesitiiviys saavutetaan hitsaamalla lukkoprofiilin ja paaluputken väli kaivun jälkeen (kuva 63, c ja d). [66]



Kuva 62. Periaatekuva vesitiiviinä toteutetusta RD-paaluseinästä. [66]

Paaluseinän alapään vesitiiviys riippuu välittömästi kallion päällä olevan maakerroksen vedenläpäisevyydestä. Tehdassaaren maaperä ei tutkimusten mukaan ole kauttaaltaan tiivistä moreenia, vaan tiiviiden kerrosten välissä on vettä läpäiseviä kerroksia. Nämä

kerrokset voivat lisäksi olla yhteydessä uoman pohjaan. Täten paaluseinän alapään vesitiiviys joudutaan varmistamaan injektoimalla paalujen ja kallion välissä oleva tila (kuva 64). Tukiseinän alapuolisen kallion tiivistysinjektointi voidaan tehdä RM/RF-lukon injektointikanavaa käyttämällä sekä tarvittaessa myös paaluputkien vierestä tai niiden läpi. Paaluseinän taustan injektointi onnistuu poraamalla injektointiputket seinän taakse tai paalujen saumakohtiin. Injektointiputket voidaan myös kiinnittää paaluihin ennen niiden asennusta. Injektoimalla paaluseinän liitoskohta kallioon, toimii tukiseinä osittain momenttijäykkänä mastorakenteena vähentäen tukemistarvetta. Tästä huolimatta tulee seinä ankkuroida kallioon vähintään yhdeltä tasolta riittävän vaakajäykkyyden saavuttamiseksi. [8, 48, 66]

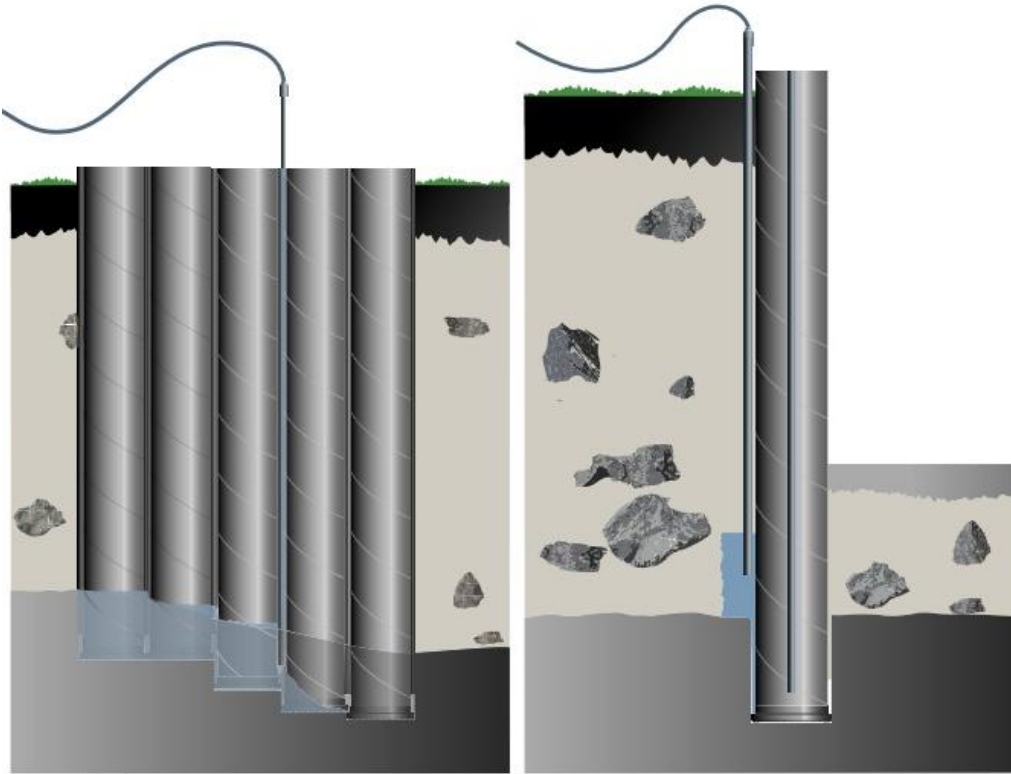


Kuva 63. RD-paaluseinän vesitiiviyyden parantaminen lukkoprofiilin osalta tiivisteaineella (a) tai injektoimalla (b) sekä hitsaamalla (c ja d). [66]

Porapaaluseinä voidaan asentaa joko pihan tai virran puolelle nykyistä patoa. Virran puolelle asentaminen ei kavenna jo ennestään ahdasta piha-aluetta, mutta virta kapeenee jonkin verran. Tähän tarvitaan viranomaisen lupa. Seinän asentaminen vaatii työpatorakenteen, mikäli työ tehdään kuivatyönä. Työpatorakenne saattaa rajoittaa veden virtausta Nokianvirrassa. Pihan puolelle asentamisen työnaikaiset järjestelyt haittaavat tehtaalle menevää liikennettä ja työn valmistuttua piha-alue kapenee pysyvästi. Pihan puolelle asennetun seinän tukemistarve on vähäisempi, sillä se tukeutuu maahan pidemmältä matkalta. Toisaalta seinän poraus maahan työputkea suuremmalla avarrinkruunulla häiritsee maata seinän ympäristöstä ja saattaa aiheuttaa siirtymiä nykyisiin rakenteisiin. [8, 66]

Tiiviissä kitkamaassa siirtymät paaluseinän läheisyydessä ovat kuitenkin vähäisiä, sillä käytettäessä porauksessa ilmahuuhtelua täyttyvät ylikoon avarrinkruunu aiheuttaman tyhjätilat ainakin osittain porasoijalla. Siirtymiä voidaan vähentää rajoittamalla iskuvoiman ja paineilman käyttöä siten, että huuhtelu toimii oikein ja poraus etenee sopivalla nopeudella. Painumariski on suurempi löyhillä kitka- ja täyttömailla sekä pehmeillä koheesiomailla. Painumisen syy on yleensä tyhjätilan täyttyminen seinän viereisellä pohjamaalla. Painumariskin minimoimiseksi on suositeltavaa käyttää RM/RF-lukko-

tyyppiä ja porausjärjestelmää, jolla saavutetaan mahdollisimman vähäinen paineilman karkaaminen paalua ympäröivään maaperään. Painumille ja siirtymille herkissä koh-teissa on suositeltavaa aloittaa työ koeluonteisena kauempana varottavista rakenteista tai tehdä ennen varsinaisen asennustyön aloittamista koeasennus, jonka perusteella painumia voidaan arvioida luotettavasti. [8, 66]



Kuva 64. Paaluseinän taustan injektointi. [66]

Lisää riskejä muodostuu seinän asennuksesta nykyisen padon sisäpuolelle suotovirtauksen alaiseen maahan, johon saattaa syntyä hallitsemattomia virtauskanavia työn seurauksena. Lopputilanteessa työn valmistuttua padon vedenpitävä osa siirtyy lähemmäs tehdasrakennusta, jolloin mahdollisesti suotautuvan veden suotomatka lyhenee. Nykyinen patoseinä kyllästyy vähitellen vedellä, sillä vesi ei pääse enää virtaamaan uuden, vesitiiviin seinän läpi. Luvan saaminen nykyisen patoseinän purkamiselle on ongelmallista, sillä Tehdassaari on Museoviraston suojelema kohde.

8 YHTEENVETO

8.1 Patojen kunnossapito Suomessa

Suomen padot ovat pääosin suhteellisen hyvässä kunnossa. Tämä on ainakin osittain seurausta patoturvallisuuslain vaatimasta, padon omistajien suorittamasta tarkkailusta ja tarkastuksista sekä viranomaisvalvonnasta, johon sisältyy muun muassa joka viides vuosi tehtävät määräaikaistarkastukset. Normaalit kunnossapitotoimenpiteet ovat yleensä olleet riittäviä, mutta myös joitakin suurempia korjauksia vaatineita tapauksia on tullut esiin, esimerkiksi Uljuan altaan maapadot on peruskorjattu ja Tammerkosken yläkosken ja keskiputouksen betonipatorakenteet on uusittu lähes kokonaisuudessaan. Maapadoilla on ollut erilaisia tiivistysinjektointeja, joita on tehty Melon voimalaitospadon lisäksi muun muassa Uljuan allaspadolla, Pamilon voimalaitospadolla, Kalajärven altaan padolla sekä Tainionkosken voimalaitospadolla.

Tavallisimpia korjaustoimenpiteitä betonipadoilla ovat vesirajapaikkaukset ja muut pakkasvauriokorjaukset sekä liikuntasaumojen korjaukset. Suomen betonipadot ovat säilyneet hyvin, vaikka vanhimmat niistä ovat yli sata vuotta vanhoja. Pakkasenkestävyyteen alettiin kiinnittää huomiota vasta 1900-luvun puolenvälin jälkeen, ja eräs syy vanhojen patojen kestävyteen onkin sementin koostumus. Nykysementeissä raemuoto on yksinkertaisempi, jolloin lujittuminen tapahtuu nopeammin ja loppulujuus saavutetaan aikaisemmin. Vanhoilla betonipadoilla hydrataatioreaktio on saattanut jatkua kymmeniä vuosia, johtaen korkeampaan loppulujuuteen. Vanhoista patorakenteista on koekuormituksilla mitattu jopa yli 100 MPa puristuslujuuksia.

Suomen ympäristökeskus ylläpitää tietojärjestelmää patoturvallisuuslain mukaista patojen valvontaa varten. Patoturvallisuusviranomainen tallentaa järjestelmään lain edellyttämät asiakirjat ja aineistot padon vuosi- ja määräaikaistarkastuksista sekä mahdollisesti padolle laaditut kuntoarviot. Näin padon kunnossapitotietojen ja padon rakennusaikaisten suunnitelmien pohjalta voidaan padon turvallisuutta arvioida kattavasti.

8.2 Melon voimalaitospato

Korjauskohteena Melon voimalaitospato ilmentää hyvin patovuodon korjaukseen liittyviä ominaispiirteitä. Padoilla vaurioita saattaa syntyä yllättäen ja äkillisesti, joten kattava tarkkailu on avainasemassa niiden havaitsemisessa. Padoilla tapahtuvia muutoksia havaittaessa vaaratekijöiden erottaminen harmittomista muutoksista ei aina ole help-

poa, joten kaikki poikkeavuudet tulee raportoida eteenpäin. Melon tapauksessa suuren kuopan ilmestyminen patoon oli selkeästi havaittava muutos, joten tieto siitä meni nopeasti eteenpäin ja toimenpiteisiin ryhdyttiin viivyttelämättä.

Padon moniosaisen rakenteen vuoksi varsinaista vauriokohtaa ei onnistuttu paikantamaan heti, mutta sitä ennen tehdyt toimenpiteet tukivat ja tiivistivät patoa. Vuotokohdan paikantamisessa oli suuresti apua siitä, että padosta oli käytettävissä rakentamisen aikaiset piirustukset ja suunnitelmat. Suomessa osa padoista on niin vanhoja, että asia ei näin aina välttämättä ole, jolloin vuodon syyn selvittäminen on haasteellisempaa. Vuodon syntymekanismin selvittämisestä oli apua korjausmenetelmän ja -materiaalien valinnassa. Padolle asennetut tarkkailuputket mahdollistivat korjaustoimenpiteiden vaikutusten välittömän havainnoinnin. Putkista voitiin havainnoida vesipintoja ja todeta mittalaitteilla veden sähkönjohtavuutta suolavesikokeiden yhteydessä. Näin voitiin päätellä vuotoyhteyksien olemassaoloa padon tiivistysosan eri puolilla.

Melon voimalaitospadolla toistaiseksi viimeiset korjaustoimenpiteet on tehty kesällä 2012, jolloin patoa tiivistettiin injektoimalla. Korjausten onnistuminen on todettu suolavesikokeilla ja korjauksen lopputarkastus on pidetty marraskuussa 2012. Padon tarkkailu jatkuu toistaiseksi tehostetusti.

8.3 Nokian tehdassaaren padot

Sekä Tehdassaaren pohjoinen että eteläinen pato ovat korjauksen tarpeessa. Pohjoisen puolen uoma on rakennettu 1913 ja siinä patona toimii betoninen kuorirakenne sekä luonnonmaavalli. Huonokuntoinen betonirakenne on rapautunut ja halkeillut, mutta maavalli toimii suurelta osin uomaa maapatona kohtuullisen hyvin paksuutensa ja tiiviin, luonnonmaasta koostuvan rakenteensa takia. Suotomatkat pohjoisen puolen uomasta tehtaan alapuolisiin kanaaleihin ovat niin pitkiä, että eteläisen padon on katsottu olevan tehtaan toiminnan kannalta ongelmallisempi.

Eteläisellä padolla todettiin vakavuusongelma, joka ilmeni patoelementtien liikkeenä, varsinkin paaluluvun 220 tienoilla. Vakavuus saatiin halutulle tasolle tukemalla padon taustaa kivikorirakenteella vuodenvaihteessa 2003–2004. Nykyään vakavampi ongelma on padon tiiviys. Eteläisellä padolla 2000-luvulla vuotokohtiin suoritettut täsmäkorjaukset ovat toistaiseksi pitäneet padon toiminnassa ja suotovesien määrän kohtuullisena. Uusia vuotoja voi kuitenkin ilmaantua milloin tahansa. Suurin syy tähän on lohkarainen ja vettä läpäiseviä kerroksia sisältävä pohjamaa. Osittain pohjamaan koostumuksesta johtuen padon alle rakennettua tiivistysseinää ei ole ulotettu koko padon matkalta tiiviiseen kallioon. Kyseinen osuus sijoittuu noin padon paaluvälille 85...205 ja pahimmat vuotokohdat ovat osuneet tälle osuudelle.

Syntyneet vuotokohdat ovat seurausta sisäisestä eroosiosta, joka aiheutuu suotovirtauksesta maaperässä kivi- ja betonirakenteisen padon alitse. Virtaava vesi kuljettaa hienoinesta mukanaan synnyttäen patoon tyhjätiloja, jotka ovat ilmenneet myös padon takaisen luiskan päällystevaurioina. Yhdessä suotovirtauksen ja padon takana liikennöivän raskaan kaluston aiheuttaman tärinän vaikutuksesta maaperän tila ei ole stabiili ja uusia vuotoreittejä syntyy todennäköisesti myös tulevaisuudessa.

Padon korjausmenetelmistä suihkuinjektointi ei sovellu kohteen olosuhteisiin lohkaraisen maaperän takia, lisäksi jatkuva suotovirtaus todennäköisesti aiheuttaisi työnaikaisia ongelmia. Padon korjaaminen porapaaluseinällä taas ei ole kustannusten kannalta mahdollista ainakaan lähitulevaisuudessa. Sopivin ja kustannuksiin nähden tehokkain menetelmä padon korjaamiseksi on maapato-osan tiivistysinjektointi. Työn kustannukset tarkentuvat vasta, kun työ on käynnissä, sillä injektoinnin massamenekkejä ei etukäteen voi tarkasti arvioida. Tiivistysinjektointi on kuitenkin merkittävästi edullisempi kuin kaksi muuta esiteltyä vaihtoehtoa, sillä sen hintaluokka on arviolta satojatuhansia euroja, kun taas porapaaluseinän kustannukset nousevat miljooniin.

Padon korjausaikataulu riippuu käytettävissä olevista määrärahoista. Korjaustyö voidaan näillä näkymin aloittaa aikaisintaan vuonna 2015. Tiivistysinjektointimenetelmän soveltumista kohteeseen olisi hyödyllistä selvittää koeinjektoinnilla mahdollisimman pian. Koeinjektoinnin jälkeen voitaisiin tarkemmin arvioida korjaamisen kustannuksia ja onnistumismahdollisuuksia. Muutokset padon tilassa saattavat vaikuttaa korjausaikatauluun. Padon tilaa seurataan tarkkailuohjelman mukaisesti.

Tehdassaaren eteläisen padon hätä-HW-taso on tarkoitus määrittää mahdollisuuksien mukaan padon vakavuuslaskentaan perustuen. Tällä hetkellä Patoturvallisuusasiakirjoihin merkitty hätä-HW-taso on 78,25 (NN), joka vastaa muurin harjan alinta korkeutta. Patoon saattaa kuitenkin aiheutua vaurioita jo tätä tasoa alemmilla vedenkorkeuksilla. Ongelmaa voi lähestyä laskennallisesti mallintamalla patomuuri ja laskemalla sen vakavuus esimerkiksi elementtimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmilla. Näin saadaan määritettyä turvallinen hätä-HW-taso, jotta poikkeustilanteessa tiedettäisiin mille tasolle Pyhäjärven pinta voitaisiin nostaa aiheuttamatta padolle vaaraa.

LÄHTEET

- [1] Holm, J., Leskelä, A. 1979. Padot, RIL 123, Vesirakenteiden suunnittelu. Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki.
- [2] Wahlstrom, Ernest E. 1974. Dams, Dam Foundations, and Reservoir Sites. Developments in Geotechnical Engineering 6. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.
- [3] Leskelä, A. 2003. Maapatojen suunnittelu ja rakentamisen perusteet. Patoturvallisuuskoulutuksen materiaali 14.6.2005. Fortum Hydropower Services.
- [4] Smith, Norman. 1971. A History of Dams, London: Peter Davies, s. 25–49, ISBN 0-432-15090-0.
- [5] Patoturvallisuuslaki 26.6.2009/494. [Viitattu 2.5.2012].
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2009/20090494>
- [6] Isomäki, E., Maijala, T., Sulkakoski, M., Torkkel, M. (toim.) 2012. Patoturvallisuusopas. Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen julkaisuja. Hämeenlinna. [Viitattu 20.2.2013]. Saatavilla:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=296564>
- [7] Kirves, R. 2010. Häiriötilanteet Suomen padoilla. Opinnäytetyö. [Viitattu 20.2.2013]. Saatavilla:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=384863&lan=fi&clan=fi>
- [8] Oldén, V. 2010. Vaativien olosuhteiden tukiseinärakenteet. Opinnäytetyö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [9] Laasonen, J. 2005. Betonipadot ja patoturvallisuus. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. 2.-4.2.2005 Oulu. Fortum Hydropower Services.
- [10] Saarinen, M. 2010. Kasvillisuuden, eläinten ja luvattomien toimenpiteiden vaikutus maapatoihin. Opinnäytetyö. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan osasto.
- [11] Melon Voimalaitos. Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Sivu päivitetty 4.2.2011. [Viitattu 9.7.2012]. Saatavilla:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=19719&lan=fi>

- [12] PVO-Vesivoima Oy. 2006. Melon voimalaitospato, Nokia. Selostus patovuodon tutkimuksista ja korjaustoimenpiteistä.
- [13] Ravaska, O. 2005. Maapatojen historia ja rakennusmateriaalit. Patoturvallisuuskoulutus 14.-15.6.2005. Seinäjoki.
- [14] Vuola, P. Luento: *Patoturvallisuudesta ja patotekniikasta*. 15.4.2010. TTY:n kurssin *Yhdyskunnan geotekniikka* luentomateriaali.
- [15] Design of Small Dams. 1960. United States Department of the Interior. Washington.
- [16] Handbook of Dam Engineering. 1977. Van Nostrand Reinhold Company. Litton Educational Publishing, Inc.
- [17] General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. 2004. US Army Corps of Engineers. Engineer Manual. [Viitattu 11.8.2012] Saatavilla: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- [18] Londe, P. Lessons From Earth Dam Failures. Coyne et Bellier, Consulting Engineers, Paris. Konferenssin Symposium on Problems and Practice of Dam Engineering, 1.-5.12.1980 Bangkok, Thaimaa.
- [19] Marche, C. 2005. Embankment dam overtopping and collapse: an innovative approach to predict the breach outflow hydrograph. Department of Civil Engineering. WIT Transactions on the Built Environment, Vol 84, WIT Press.
- [20] Slunga, E. 2005. Patojen rakentaminen ja tekniset ratkaisut erilaisilla pohjilla. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 3 materiaali. 19.8.2004.
- [21] Filters for Embankment Dams. Best practices for Design and Construction. 2011. Federal Emergency Management Agency.
- [22] Internal Erosion of Earth Dams. 1984. Association of State Dam Safety Officials. 450 Old East Vine Street, Lexington, Kentucky 40507.
- [23] Slunga, E. 2005. Maapadon riskianalyysi kunnostustarpeen tarkastelussa ja padon normaali heikkeneminen. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 6 luentomateriaali. 15.6.2005.
- [24] Gilbert, P., Miller, S. 1991. A Study of Embankment Performance During Overtopping. Technical Report GL-91-23. Geotechnical Laboratory, Department of the Army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississippi.

- [25] Lyyra, R. 2004. Betonipadot, Rakennusgeologiset näkökohdat ja tutkimusperiaatteet. Patoturvallisuuskurssin nro 3 luentomateriaali.
- [26] Dam Safety Guidelines. 1987. ICOLD, Bulletin 59. ISSN 0534-8293.
- [27] Laasonen, J. 2005. Betonipadot ja patoturvallisuus. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali. 14.1.2005. Fortum Hydro-power Services.
- [28] Muhonen, V. 2005. Betonipatojen suunnittelu ja rakentaminen. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali. 12.1.2005. Fortum Hydropower Services.
- [29] Design and Construction of Concrete Gravity Dams. Hydraulic Structures for Flow Diversion and Storage. National Programme on Technology Enhanced Learning. Ministry of HRD, Government of India.
- [30] Arch Dam Design. 1994. US Army Corps of Engineers. Engineer Manual 1110-2-2201. Department of the Army. [Viitattu 3.10.2013]. Saatavilla: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>
- [31] Saarinen, M. 2012. Padon turvallisuuskansion päivitys ja tietojärjestelmä. Patoturvallisuuden neuvottelupäivän luentomateriaali 12.1.2012. Hämeen ELY-keskus.
- [32] Pyyny, J. 2012. Asiantuntijan alustava arvio padon kunnosta. Patoturvallisuuden neuvottelupäivän luentomateriaali 12.1.2012. Kemijoki Oy.
- [33] Vuola, P., Kuusiniemi, R., Maijala, T. 2004. Condition assessment of Government-owned dams in Finland. 13th Conference of the British Dam Society, Long-term benefits and performance of dams. University of Kent, Canterbury.
- [34] Ekström, T. 2001. Durability check of existing concrete dams subjected to environmental degradation. Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Sweden. Proceedings of the ICOLD European Symposium, Geiranger, Norway.
- [35] Meuronen, A. 2005. Betonin ja betoniterästen ominaisuudet. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali 2.–4.2.2005. Aaro Kohonen Oy, Koronakatu 2, Espoo.
- [36] Meuronen, A. 2005. Betonirakenteiden vauriot. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali 2.–4.2.2005. Aaro Kohonen Oy, Koronakatu 2, Espoo.
- [37] Siltabetonien P-lukumenettely. Tiehallinnon selvityksiä 30/2005. Helsinki. [Viitattu 4.12.2012]. Saatavilla: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/rakenta1.htm>

- [38] Atkinson, R., Chastain, J., Huston, S., Lofton, E. Inspection of Concrete and Gravity Dams. Training Aids for Dam Safety. Association of State Dam Safety Officials.
- [39] Muhonen, V. 2005. Betonipatojen tarkastukset ja tarkkailu. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali 2.–4.2.2005. Fortum Hydropower Services.
- [40] Meuronen, A. 2003. Betonipatojen kunnossapito ja käytännön kokemuksia. Patoturvallisuuden täydennyskoulutusohjelma. Kurssin nro 5 luentomateriaali 2.–4.2.2005. Aaro Kohonen Oy, Koronakatu 2, Espoo.
- [41] Falvey, H. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph No. 42. Bureau of Reclamation, Denver Office. PO Box 25007, Denver, Colorado 80225.
- [42] Varshney, R. 1982. Concrete Dams. Second Edition. Oxford & IBH Publishing Company CO.
- [43] Iso-Mustajärvi, P. 2008. Kurssin RTEK-3140 Betonitekniikka oppimateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.
- [44] Imatran voimalaitos. Fortumin verkkojulkaisuaineisto. [Viitattu 5.10.2012]. Saatavilla:
<http://verkkojulkaisu.viivamedia.fi/fortumesfi/imatranvoimalaitos>
- [45] Virtuaali Vuoksi. Etelä-Karjala-instituutin Vuoksi-projektin verkkoaineisto. [Viitattu 5.10.2012]. Saatavilla:
http://www3.lut.fi/eki/vuoksivirtaa/virtuaalimatka_vuoksella/suomenruhr/taionkoskenvoimalaitos.html.
- [46] Tehdassaari. Nokian kaupungin esite. [Viitattu 15.10.2012]. Saatavilla: <http://nokiankaupunki-fi-bin.directo.fi/@Bin/de33d731798a448d742c38a05e945df9/1350293075/application/pdf/11717/tehdassaari.pdf>
- [47] Valtonen, M., Wikström, R. 2005. Upofloorin padon kuntoarvio. Insinööritoimisto Geotesti Oy. WSP LT-Konsultit Oy. Työnumero 050296.
- [48] Lausunto Melon voimalaitoksen aiheuttaman vedenpinnan nousun vaikutuksesta pohjavedenpintaan Oy Kymarno Ab:n tehdasrakennuksen alueella sekä mahdollisista suojatoimenpiteistä. 1969. Pohjatutkimus Oy. Helsinki.
- [49] Kasari, T., Kulman, M. 2011. Tehdassaaren yläuoman ja padon korjaaminen, Nokia. Selvitys. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

- [50] Valtonen, M. 2010. Upofloorin pato, Nokia. Liite 5: Arvio padon kunnosta. A-Insinöörit Suunnittelu Oy.
- [51] Asiantuntijahaastattelut, Antti Leskelä. 20.11.2012.
- [52] Vesilaki (587/2011). [Viitattu 10.12.2012]. Saatavilla: www.finlex.fi.
- [53] Wikström, R., Valtonen, M. 2005. Tulppaussuunnitelma, Upofloorin pato. WSP LT-Konsultit Oy. Insinööritoimisto Geotesti Oy.
- [54] Valtonen, M. 2005. Vuoden 2005 sukellustarkastusten vuotohavainnot. Upofloorin pato, Nokia. Insinööritoimisto Geotesti Oy.
- [55] Punkari, S. 2001. Vakavuuslaskennat, Upofloorin pato. Insinööritoimisto Geotesti Oy. Työnumero 010220.
- [56] Huura, J., Mustonen, L. 2011. Tarkastusselostus, Upofloorin pato, Nokia. Huura Oy. Tampere 28.6.2011.
- [57] Kleinschmidt USA. Dam and Spillway Safety Inspections and Evaluations. [Viitattu 31.1.2013]. Saatavilla: <http://www.kleinschmidtusa.com/service-areas/hydroelectric-engineering-hydropower-engineering-consultants/dam-and-spillway-engineering/dam-and-spillway-safety-inspections-and-evaluations/>.
- [58] Fillingham, D. Hoover Dam. [Viitattu 31.1.2013]. Saatavilla: <http://www.davidfillingham.com/Vacations/LasVegas/HooverDam/HooverDam.htm>.
- [59] Arch Dam On The Manavgat River In Turkey. [Viitattu 31.1.2013]. Saatavilla: <http://www.globeimages.net/img-arch-dam-on-the-manavgat-river-in-turkey-14551.htm>.
- [60] Gjörv, O. E. 2009. Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments.
- [61] Suomen ympäristökeskuksen lausunto Nokia Tehdasalueen suoja-padon eli Upofloorin padon turvallisuustarkkailuhjelmasta. 2008. Hämeen ympäristökeskus, Hämeenlinna.
- [62] Upofloorin padon vahingonvaaraselvitys. 2007. Insinööritoimisto Pekka Leiviskä, Tyrnävä.
- [63] Pykälämäki, M. 2012. Suihkuinjektointilietteen käsittelyn kehittäminen. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikka. Saatavilla: <http://publications.theseus.fi/handle/10024/42010>

- [64] Viitala, J. 2011. Suihkuinjektoinnin käyttö perustusten vahvistamisessa. TTY:n kurssin *MPR-5120 Perustusten vahvistaminen* luentomateriaali.
- [65] Constructing watertight cutoffs using jet grouting and grouting. Teesta Dam, Sikkim State, India. Soletanche Bachy. [Viitattu 27.2.2013]. Saatavilla: http://www.bachy-soletanche.com/SBF/sitev4_uk.nsf/technique/teesta-dam
- [66] Ruukki RD-paaluseinän esite. Saatavilla: www.ruukki.fi
- [67] Somerville, G. 2008. Management of Deteriorating Concrete Structures. Taylor & Francis Publishing.
- [68] Lahtonen, P. 2012. Melon maapadon tutkimukset 27.–28.2.2012. PVO-vesivoima Oy.
- [69] Kylmänen, I. 2012. Melon maapadon vuototutkimukset. Kemijoki Aquatic Technology.
- [70] Kylmänen, I. 2012. Melon maapadon tiivistysinjektointi. Kemijoki Aquatic Technology.
- [71] Patovuodon tutkiminen ja korjaaminen 2005–2006, Melon voimalaitos, Nokia. 2006. Geobotnia Oy. Powerpoint-esitys patovuodon korjaamisesta.
- [72] Betonin paikkaus - yleisohje. 2010. SILKO 1.231. Siltojen korjausohjeet (SILKO). Tiehallinto, Siltatekniikka.
- [73] Halkeamien korjaaminen - yleiset laatuvaatimukset. 2002. SILKO 1.233. Siltojen korjausohjeet (SILKO). Tiehallinto, Siltatekniikka.
- [74] Betonipinnan pinnoitus - työkohtaiset laatuvaatimukset. 2012. SILKO 2.253. Siltojen korjausohjeet (SILKO). Liikennevirasto, Taitorakenneyksikkö.
- [75] Dam Safety: Concrete Repair Techniques. 2011. Ohio Department of Natural Resources. Division of Soil and Water resources. Fact Sheet 94–32.
- [76] Conduits through Embankment Dams. 2005. Best Practices for Design, Construction, Problem Identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair. Federal Emergency Management Agency. US Department of Homeland Security.