

Kalajärven maapadon suotovirtauksen mallinnus



Johanna Martio, Pekka Vuola
Suomen ympäristökeskus
27.8.2007

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	2
2	KALAJÄRVEN MAAPATO	3
3	MAAN HYDRAULISISTA OMINAISUUKSISTA.....	4
3.1	Maaperä ja vedenläpäisevyys.....	4
3.2	Anisotrooppisuus	4
3.3	Hydraulinen murtuma	5
3.4	Sisäinen eroosio.....	6
4	MALLINNETTU POIKKILEIKKAUS	7
4.1	Maapato ja maaperä.....	7
4.1.1	Maapadon mitat	7
4.1.2	Maaperä.....	7
4.2	Mallinnetut tarkastelutilanteet.....	9
4.3	Mallinnuksen periaatteet.....	10
4.4	Elementtiverkko ja maaparametrit	11
5	HYDRAULINEN MURTUMA JA SISÄINEN EROOSIO	13
6	SUOTOVIRTAUSLASKELMAT	17
6.1	A) Suotovirtaus suurimmilla tunnetuilla vesipinnoilla.....	17
6.2	B) Suotovirtaus keskimääräisillä vesipinnoilla	19
6.3	C) Suotovirtaus kunnostuksen jälkeen.....	21
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPITEET.....	25
8	KIRJALLISUUSVIITTEET.....	26
9	LIITTEET	27

1 JOHDANTO

Kalajärven pato on Suomen valtion omistama 10 km pitkä maapato, joka rakennettiin 1970-luvulla. Tässä tutkimuksessa keskityttiin Kalajärven maapadon paalulla 20+65 olevaan ongelmakohtaan, missä padon kuivalla puolella on maaperässä esiintynyt ajoittain liian suuria huokosveden paineita. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää, mistä nämä korkeat paineet aiheutuivat. Lisäksi arvioitiin korkean vedenpaineen vaikutusta padon taustaan ja erään korjaustavan vaikutusta vedenpaineisiin. Tämä tutkimus on osa kuntoarviota, jolla pyritään selvittämään, tarvitseeko Kalajärven maapato mahdollisesti peruskorjausta. Kalajärven padon murtuma aiheuttaisi vahinkoa Peräseinäjoen taajamassa ja alajuoksulla.

Kalajärven padon paalulla 20+65 olevaa ongelmakohtaa mallinnettiin SEEP/W-tietokoneohjelmalla, jolla tehtiin maaperän suotovirtauslaskelmat. Maaperän kerroksille määritettiin kokeilemalla sellaiset vedenläpäisevyysominaisuudet, joilla mitatut vesipaineet toteutuivat.

Paalun 20+65 suotovirtauslaskelmat mallinnettiin seuraavissa tarkastelutilanteissa:

- A) Alkuaikojen korkeat pohjaveden painekorkeudet ja altaan vesipintana kesäy livesi $HW_{LUPA} = +105,5$.
- B) Viime aikojen tilanteen matalammat pohjaveden painekorkeudet ja altaan vesipintana keskimääräinen $W = +105,2$.
- C) Mahdollinen tulevaisuuden tilanne erään kunnostusmenetelmän jälkeen.

Lähtöaineiston käsitteli, laskelmat teki ja tekstin laati tekniikan ylioppilas Johanna Martio. Työn ohjasi tekniikan lisensiaatti Pekka Vuola Suomen ympäristökeskuksesta.

Kansilehden valokuva: Kalajärven maapadolta noin paalulta 20: Johanna Martio [2].

2 KALAJÄRVEN MAAPATO

Kalajärven maapato sijaitsee Länsi-Suomen ympäristökeskuksen (LSU) alueella Seinäjoen kaupungissa 2 - 3 km itään Peräseinäjoen kylästä. Ympäristökeskus toimii padon omistajan, Suomen valtion, edustajana ja hoitaa padon turvallisuustarkkailun, käytön ja kunnossapidon tehtävät.

Kalajärven maapato ympäröi Kalajärven tekojärven allasta noin 10 km matkalta. Altaan varastokapasiteetti on 45 milj. m³. Maapato on homogeeninen moreenipato, joka valmistui vuonna 1976. Se on P-pato, jonka suurin korkeus on 7,60 m (kuva 1).



Kuva 1. Kalajärven maapadolta. Kuva: Johanna Martio [2].

3 MAAN HYDRAULISISTA OMINAISUUKSISTA

3.1 Maaperä ja vedenläpäisevyys

Kalajärven padon paalun 20+65 alueen ylin maakerros on turvetta. Sen alla on kerroksellinen maakerros, joka on pääosin silttiä ja hiekkaa. Syvemmällä on hiekka- ja sorakerros ja sen alla moreeni. Maaperätiedot saatiin tähän tutkimukseen aikaisemmista Kalajärvellä tehdyistä maaperätutkimuksista. Padon kohdalla on tehty massanvaihto, eli pato on perustettu turpeen alla olevan maan varaan.

Turve on eloperäinen maalaji, joka sisältää usein kasvisjätteitä ja mineraaliainesta. Turpeen tilavuuspaino vaihtelee yleensä välillä $\gamma = 8 - 12 \text{ kN/m}^3$ [8]. Turpeen vedenläpäisevyys vaihtelee välillä $k = 10^{-2} - 10^{-6} \text{ m/s}$ riippuen esimerkiksi turvelajista, mineraaliaineksen määrästä, konsolidoitumis- sekä maatumisasteesta [8]. Vedenläpäisevyys on suurempi vaaka- kuin pystysuunnassa varsinkin kuituisissa turpeissa. Kuormituksen vaikutus turpeen vedenläpäisevyyteen on merkittävä, koska vähäinenkin lisäkuormitus pienentää luonnontilaisen turpeen vedenläpäisevyyttä oleellisesti. Turpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyskerroin on kuitenkin edellä mainittuja arvoja suurempi [8].

Siltti on hienorakeinen maalaji, jonka vedenläpäisevyys on pieni. Vedenläpäisevyyssker toimien arvot ovat yleensä siltillä $k = 10^{-5} - 10^{-9} \text{ m/s}$ [8]. Siltin tilavuuspaino vaihtelee yleensä välillä $\gamma = 17 - 20 \text{ kN/m}^3$ [8].

Hiekka ja sora kuuluvat karkearakeisiin maalajeihin. Karkearakeisille maalajeille on ominaista hyvä vedenjohtavuus ja pieni kapillaarisuus. Soran vedenläpäisevyyssker toimien arvot vaihtelevat tyypillisesti välillä $k = 10^{-2} - 10^{-4} \text{ m/s}$ ja hiekan välillä $k = 10^{-4} - 10^{-6} \text{ m/s}$ [8]. Tilavuuspainon arvot vaihtelevat yleensä soralle ja hiekalle välillä $\gamma = 15 - 20 \text{ kN/m}^3$ [8].

Moreeni on yksi Suomen yleisimmistä maalajeista ja pohjamoreeni on yleisin moreenityyppi, joka peittää kallioperää. Suomen moreenimaalajeille on tunnusomaista niiden kivisyys ja lohkaraisuus. Kivet ovat myös usein särmikkäitä. Paksuja pohjamoreenikerrostumia, kuten paalulla 20, esiintyy lähinnä vain kallioperän heikkousvyöhykkeiden kohdilla [8]. Moreenin vedenläpäisevyyden vaihtelut johtuvat eniten moreeniaineksen raakoostumuksesta. Pohjamoreeni on lajitekoostumukseltaan usein suhteistunutta siltti- tai hiekkamoreenia. Pohjamoreeni on usein rakenteellisesti tiivistä, millä on tärkeä merkitys moreenimaalajien vedenläpäisevyyteen. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkastella pohjamoreenin tiiviyttä sen paremmin, koska sillä ei katsota olevan huomattavaa merkitystä maaperän suotovirtaukseen paalulla 20+65. Hiekkamoreenin vedenläpäisevyyskerroin on suuruusluokkaa $k = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ m/s}$ ja silttimoreenin vastaavasti $k = 10^{-8} - 10^{-10} \text{ m/s}$ [8]. Moreenin tilavuuspaino on yleensä välillä $\gamma = 18 - 23 \text{ kN/m}^3$ [8].

3.2 Anisotrooppisuus

Maan anisotrooppisuus tarkoittaa maan kerrallisuudesta johtuvaa ominaisuutta. Se vaikuttaa erityisesti maan vedenläpäisevyyteen, joka on tällöin erisuuruinen vaaka- ja pystysuunnassa. Maakerroksen anisotrooppisuus ja vedenläpäisevyys vaikuttavat merkittävästi

maaperän suotovirtaukseen, minkä takia ne ovat valittu tämän tutkimuksen muuttuviksi parametreiksi.

Anisotrooppisuuden arvo saadaan jakamalla kerrosten suuntainen (eli vaakasuuntainen) vedenläpäisevyyskerroin k_h kerroksia vasten kohtisuorassa olevalla vedenläpäisevyyskerroin k_v , eli anisotrooppisuuden arvo saadaan laskemalla k_h/k_v .

Anisotrooppisuus otetaan huomioon suotovirtausta käsin laskettaessa jakamalla padon ja maaperän vaakageometria anisotrooppisuuden neliöjuurella. Anisotrooppisuudelle voidaan esimerkiksi valita arvo 9, jolloin padon ja maaperän vaakamitat jaetaan luvulla 3 ($= \sqrt{9}$), kuten tässä tutkimuksessa on tehty. Maaperän ja padon vaakageometria päätettiin jakaa kolmella, jotta maaperän suotovirtauksen tulkitseminen mallinnuksen yhteydessä helpottuisi. Näin pystyttiin mallintamaan padon maaperää laajemmin vaakasuunnassa.

Anisotrooppisuuden arvo 1 tarkoittaa isotrooppisuutta, mikä merkitsee veden virtauksen kannalta sitä, että maakerroksen vedenläpäisevyys on sama niin vaaka- kuin pystysuunnassakin. Isotrooppisuus on harvinaista luonnontilaisilla mailla.

3.3 Hydraulinen murtuma

Hydraulinen murtuma on ääri-ilmiö, jossa maa menettää lujuutensa ja kantavuutensa sekä voi esimerkiksi halkeilla. Sisäinen eroosio on yleensä voimakasta hydraulisen murtuman yhteydessä.

Kun tarkasteltavassa virtaustilanteessa vesi suotautuu ylöspäin ja hydraulinen gradientti i saavuttaa kriittisen hydraulisen gradientin i_c arvon, maamassassa tapahtuu hydraulinen murtuma. Silloin maa menettää lujuutensa ja alkaa "kuohua". Kriittinen hydraulinen gradientti i_c on maalajivakio, jonka arvo vaihtelee homogeenisessa kivennäismaassa välillä 0,7 – 1,2 [8]. Se lasketaan kaavalla (1) homogeeniselle maapohjalle. Hydraulinen gradientti i lasketaan kaavalla (2).

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}, \quad (1)$$

missä

γ' = maan tehokas tilavuuspaino [kN/m^3] ja

γ_w = veden tilavuuspaino (noin 10 kN/m^3).

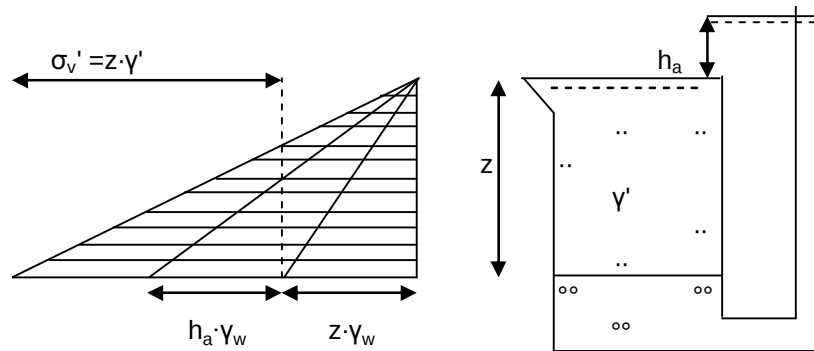
$$i = \frac{h_a}{z}, \quad (2)$$

missä

h_a = painekorkeus vertailutasoon (esim. maanpinnan) yläpuolella [m] ja

z = virtausmatka (pystysuunnassa esim. kerroksen paksuus) [m] (kts. kuva 2).

Kuva 2 esittää, miten vesipaineet määritetään. Jos $h_a \cdot \gamma_w$ suurenee kuvan 2 tilanteessa, varmuus hydraulista murtumasta vastaan pienenee.



Kuva 2. Mallikuva vesipaineiden suuruudesta.

Varmuus maapohjan hydraulista murtumista vastaan on kerrokselliselle maapohjalle laskettavissa kaavalla (3).

$$F = \frac{W'}{U} = \frac{\sigma_v'}{h_a \cdot \gamma_w} = \frac{\sum (\gamma_i' \cdot z_i)}{h_a \cdot \gamma_w}, \quad (3)$$

missä

F = varmuuskerroin hydraulista murtumista vastaan,

W' = maakappaleen tehokas paino [kN],

U = huokosveden ylipaineen aiheuttama nostava voima [kN],

σ_v' = tarkastelupinnalla vaikuttava tehokas raepaine [kPa],

z_i = kunkin maakerroksen paksuus [m] ja $z = \sum z_i$ ja

γ_i' = kunkin maakerroksen tehokas tilavuuspaino [kN/m³].

3.4 Sisäinen eroosio

Sisäinen eroosio tarkoittaa yleisesti ottaen suotovirtaustilanteessa maa-aineksen erodoitumista padon tai maaperän sisällä. Siltti ja hieno hiekka ovat maalajeista herkimpiä sisäiselle eroosiolle.

Sisäistä eroosiota tapahtuu maamassassa, kun vesi virtaa hienorakeisesta maalajista ulos tai karkearakeiseen maalajiin. Hienoa maa-ainesta kulkeutuu tällöin rajapinnan läpi. Jos tällainen sisäinen eroosio keskittyy yhteen kohtaan, voi lopputuloksena olla eroosiosuonen syntyminen padon läpi eli piping-ilmiö ja padon sortuminen. Suodattimella pyritään estämään tällainen padon sortuminen.

Toisen tyyppisessä sisäisessä eroosiossa epästabiliin maan hienoaines lähtee liikkeelle suuren hydraulisen gradientin ja virtausnopeuden takia. Tällöin virtausnopeus edelleen kasvaa ja hienoaines kulkeutuu pois veden mukana. Sisäinen eroosio alkaa yleensä luonnonmailla jo paljon pienemmällä hydraulisen gradientin arvolla, kuin mitä tarvitaan maapohjan hydrauliseen murtumiseen. Pidentämällä veden suotovirtausmatkaa voidaan yrittää estää tämän tyyppinen sisäinen eroosio.

Sisäinen eroosio voi kehittyä myös patoon syntyneissä halkeamissa. Niitä voivat aiheuttaa erityisesti padon epätasainen painuma ja routa.

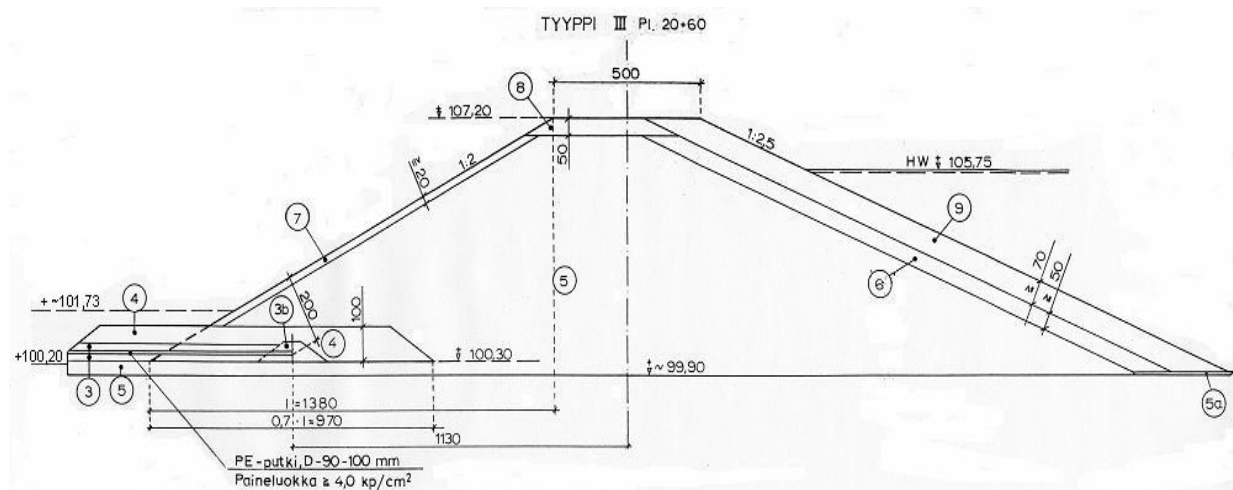
4 MALLINNETTU POIKKILEIKKAUS

4.1 Maapato ja maaperä

4.1.1 Maapadon mitat

Padon poikkileikkaus paalulla 20+65 esitetään kuvassa 3. Mallinnuksessa otettiin laskentaan mukaan vain suotovirtauksen kannalta oleelliset osat, jotka ovat moreenista tehty tiivistesydän (5) ja sorasta tehty pohjasuodatin (4).

Mallinnettaessa maanpinnan tasona käytettiin tasoa +101,5 ja padon harja oli täten tasossa +107,0. Kun mallinnuksessa nollassa valittiin taso +90,0, tällöin maanpinta tuli tasolle +11,5 ja padon harja +17,0.



Kuva 3. Paalulla 20+65 olevan padon poikkileikkaus.
 4. Pohjasuodatin, jossa on kivisaloja (3b), 5. Tiivistesydän, 6. Luiskasuodatin,
 9. Märän luiskan louheverhous. [10]

4.1.2 Maaperä

Paalu 20+65 sijaitsee pehmeiköllä, joka on muuta ympäröivää maaperää alempana. Notko alkaa noin paalulta 19+70 ja loppuu paalulle 22+00. Notko on padon pituussuunnassa noin 230 metriä pitkä. Ennen altaan täyttööä paalun 20+65 luona oli ollut peltoa. Pellon maaperä oli ollut märkää ja huonosti kantavaa. Nykyisin padon kuivalla puolella, paalun 20+65 luona, on koivikkoa, joka kuivattaa aluetta. Paalun 20+65 lähellä on myös ollut padon märällä puolella altaassa entinen maanottopaikka. Kalajärven altaassa on myös padon rakentamisen jälkeen noussut turvelauttoja ylös altaan pohjasta, mutta ei nouse enää.

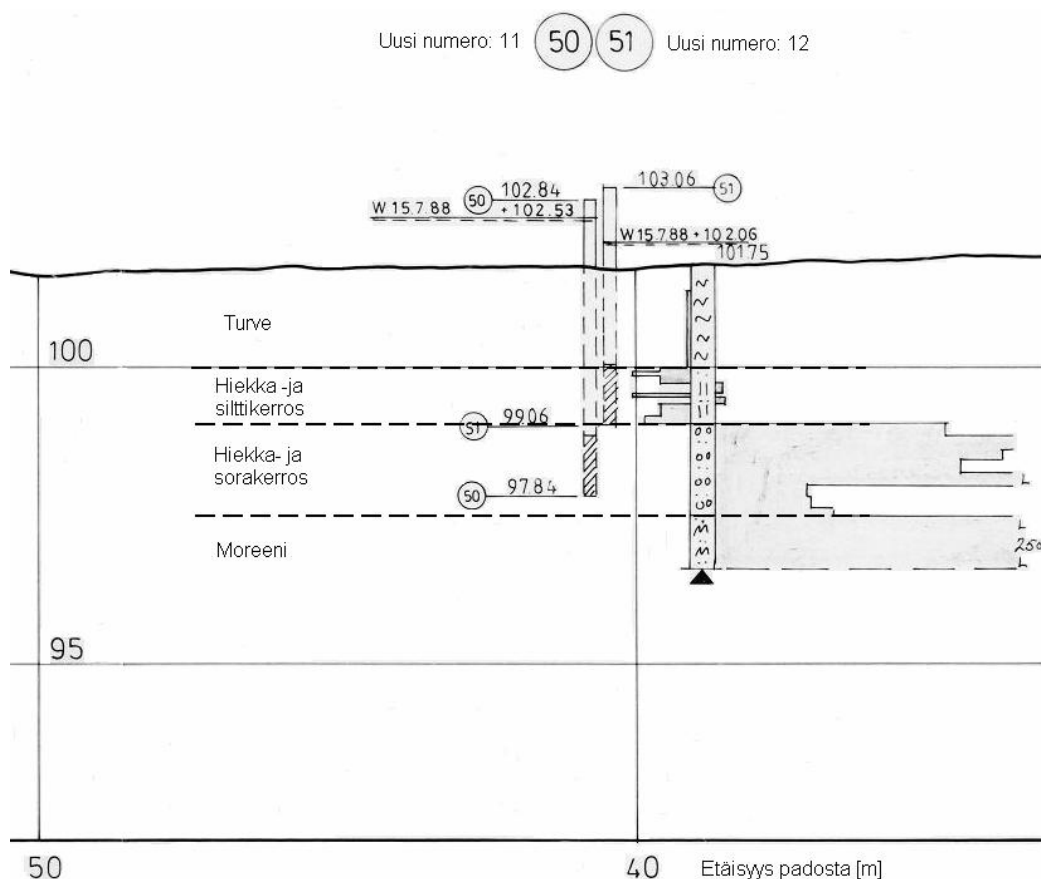
Mallinnettaessa paalulla 20+65 olevaa maaperää käytettiin taulukossa 1 olevia kerroksia ja kerrosrajauksia. Paalun 20+65 maaperä on maanpinnalta alaspäin mentäessä seuraavanlainen: turvekerros, kerrallinen hiekka- ja silttikerros, lajittunut hiekka- ja sorakerros sekä viimeisenä moreenikerros. Kallio näyttäisi olevan syvällä, joten se ei vaikuta merkittävästi maaperän veden suotovirtauksiin.

27.8.2007

Taulukko 1. Maaperälle määritetyt maakerrokset ja niiden paksuudet. Taulukossa esitetään mallinnettaessa käytettyjä maan tasoja.

Maakerros	Kerrosrajat	Kerroksen paksuus [m]
Turve	+11,5...+10,0	1,5
Kerrallinen hiekka- ja silttikerros	+10,0...+8,5	1,5
Lajittunut hiekka- ja sorakerros	+8,5...+7,0	1,5
Moreeni	+7,0...+0,0	7,0
Yhteensä	+11,5...+0,0	11,5

Paalun 20+65 lähellä sijaitsee neljä pohjavesiputkea (putket 11, 12, 13 ja 14) maapadon kuivalla puolella, jossa on metsikköä. Pohjavesiputkien sijainti- ja putkitiedot ovat taulukossa 2. Kyseessä olevat putket on asennettu 22.6.1988. Kuvassa 4 on esitetty eräs maaperän painokairaustulos vuodelta 1988 pohjavesiputkien 11 ja 12 vierestä. Kuvassa 4 näkyy myös pohjavesiputkien painekorkeudet päivältä 15.7.1988.



Kuva 4. Pohjavesiputkien 11 ja 12 vieressä olevan kohdan kairaustulos sekä putkien vesipinnat. Pohjavesiputkien 11 ja 12 vanhat numerot olivat 50 ja 51. Katkoviivat ja maalajinimet kuvaavat putken 11 luona olevia todellisia maakerroksia. [10]

Taulukko 2. Paalulla 20+65 olevien pohjavesiputkien tiedot. [5]

Putket [n:o]	Paalu [PL]	Etäisyys padosta [m]	Maanpinta	Yläpää	Kärkitaso	Siivilää [m]	Pituus [m]
11	20+65	39	+101,75	+103,34	+97,84	1,0	5,5
12	20+65	40	+101,75	+103,06	+99,06	1,0	4,0
13	20+65	59	+101,65	+103,47	+96,47	1,0	7,0
14	20+65	79	+101,66	+102,88	+96,88	1,0	6,0

Putkista mitatut vesipinnat ovat ylittäneet ennakkovaroituksena toimivan hälytysrajan lukuisia kertoja. Hälytysrajana on 0,5 metrin painekorkeus maanpinnan yläpuolella [2]. Putken 11 vesipinta on ollut enimmillään noin 1,6 metriä maanpinnan yläpuolella.

Tämän mallintamistyön tarkoituksena oli löytää maaparametrit, joilla havaitut vedenpinnat toteutuvat pohjavesiputkissa. Tämän avulla pyritäisiin ymmärtämään, mikä on kyseisessä maapadon kohdassa ongelmana. Maaparametreja olivat kunkin kerroksen vedenläpäisevyysero k [m/s] ja anisotrooppisuus (K-Ratio). Maaperäkerrokset sekä niiden paksuudet määritettiin aikaisempien tutkimustulosten perusteella.

4.2 Mallinnetut tarkastelutilanteet

Mallinnuksessa keskityttiin maaperässä tapahtuvaan suotovirtaukseen paalulla 20+65. Maaperälle haettiin kokeilemalla oikeat vedenläpäisevyyssominaisuudet hyödyntäen mitattuja painekorkeuksia sekä altaan veden pintaa. Tämän mallinnuksen sekä padon muun kuntoarvion avulla pyritään arvioimaan, tarvitseeko Kalajärven pato peruskorjausta.

Tässä työssä päätettiin tarkastella Kalajärven padon suotovirtausta paalulla 20+65 kolmessa erilaisessa tilanteessa:

- Alkuaikojen korkeat pohjaveden painekorkeudet ja altaan vesipintana kesäy livesi $HW_{LUPA} = +105,5$ (menneisyys).
- Viime aikojen tilanteen matalammat pohjaveden painekorkeudet ja altaan vesipintana keskimääräinen $W = +105,2$ (nykyisyys).
- Mahdollinen tulevaisuuden tilanne erään kunnostusmenetelmän jälkeen (tulevaisuus).

Kaikkein vaarallisinta mahdollista tilannetta ei ole mallinnettu. Mallinnettuja korkeampia vesipintoja ovat lupaehdoissa $HW_{TULVA} = +105,75$ sekä padon rakenteen määrittävä hätylivesi $HW_{HÄTÄ} = +106,20$ [13].

Kevään 2007 korkeimmat pohjavesiputkien vesipinnat olivat lähellä tarkastelutilannetta B. Kevään 2007 korkein vesipinta pohjavesiputkessa 11 oli vähän ylempänä kuin sen vesipinta tilanteessa B.

Mallintamisen lopputulos haettiin optimoimalla. Optimoimalla tarkistettiin parametriyhdistelmä, joka toteutti mitatut vesipinnat parhaiten. Optimoinnissa oli kyse parametrien keskinäisistä suhteista, ei niinkään vedenläpäisevyyssertoimien tai muiden parametrien tarkoista arvoista.

4.3 Mallinnuksen periaatteet

Kalajärven maapadon maaperän suotovirtauksen mallintamiseen käytettiin GEO-SLOPE Officen ohjelmaa SEEP/W (Version 5.20) [9]. SEEP/W-ohjelma käyttää elementtimenetelmää, ja sillä on mallinnettu tässä tarkastelussa pitkän ajan tasapainotilannetta. Ohjelmalla voi myös mallintaa ajan suhteen muuttuvia ongelmia.

Lähtötietoina SEEP/W-ohjelma tarvitsee mallinnettavan maan ja padon vedenläpäisyominaisuudet sekä reunaehdot. Vedenläpäisyominaisuuksina on tässä tarkastelussa käytetty maan vedenläpäisevyyskerrointa ja anisotrooppisuutta.

SEEP/W-ohjelmalle ilmoitetaan maalajin anisotrooppisuus K-Ratio – lukuna, joka laskeaan kaavan (4) mukaan.

$$K_Ratio = \frac{k_y}{k_x} \Leftrightarrow k_y = K_Ratio \cdot k_x, \quad (4)$$

missä

$k_y = k_v$ = maakerroksia vasten kohtisuorassa oleva vedenläpäisevyyskerroin ja

$k_x = k_h$ = maakerrosten suuntainen vedenläpäisevyyskerroin [9].

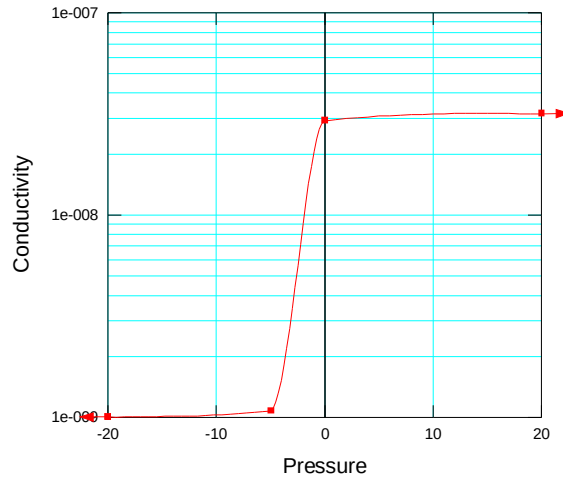
Kappaleen "3.2 Anisotrooppisuus" mukaan anisotrooppisuuden arvo saadaan laskemalla k_h/k_v , mutta SEEP-ohjelma ottaa huomioon anisotrooppisuuden K-Ratio -arvona. Ohjelma saa vedenläpäisevyyskerroimen k_x ohjelmalle annetusta vedenläpäisevyysvakiofunktioista ja vedenläpäisevyyskerroimen k_y ohjelma laskee annetusta K-Ratio – luvusta. Esimerkiksi K-Ratio = 1/40 (= 0,025) tarkoittaa, että vedenläpäisevyyskerroin y-suunnassa (eli maakerroksia vasten kohtisuorassa) on 40 kertaa pienempi kuin x-suuntainen vedenläpäisevyyskerroin.

Yksinkertaisessa mallinnuksessa voidaan olettaa, että painekorkeuden ollessa negatiivinen vedenläpäisevyyskerroin muuttuu niin pieneksi, ettei vesi käytännössä virtaa maan kyllästymättömässä vyöhykkeessä. Todellisuudessa virtausta tapahtuu myös tässä vyöhykkeessä. SEEP/W-ohjelman etu on, että sillä kyetään mallintamaan uskottavasti myös kyllästymättömän vyöhykkeen virtausta. [4]

Padon moreenisen tiivistesydämen yläosa on osittain kyllästyneessä tilassa kyllästyspinnan yläpuolella. Jotta tämä tilanne mallinnettaisiin oikein, patomoreenin vedenläpäisevyyskerroin k määritettiin kuvan 5 mukaiseksi. Kyllästymättömän osan suotovirtaus ei tosin vaikuta merkittävästi maaperässä tapahtuvaan suotovirtaukseen.

Maaperä sekä padon pohjasuodatin ovat kokonaan vedellä kyllästyneet, joten niiden osalta ei tarvita negatiivisten painekorkeuksien vedenläpäisevyyksiä. Niiden vedenläpäisevyysfunktioit ovat siis vakiofunktioita, jotka saavat saman arvon kaikilla paineilla.

27.8.2007



Kuva 5. Maapadon tiivistesydämen vedenläpäisevyysfunktio. Vedenläpäisevyyskertoimen (Conductivity) yksikkö on m/s ja huokosvedenpaineen (Pressure) yksikkö on kPa.

Pato ja maaperä jaettiin elementtiverkoksi, jonka solmupisteissä laskenta suoritettiin. Tässä tarkastelussa elementit olivat pääsääntöisesti nelikulmioita, mutta padon luiskissa ne olivat kolmioita. Verkkoa tihennettiin alueilla, joilla suotovirtauksessa tapahtuvat muutokset oletetaan suuriksi. Kaikille elementeille osoitettiin erikseen niissä käytettävät maan ominaisuudet, kuten vedenläpäisevyys ja anisotrooppisuus.

Mallinnettava ongelma rajattiin reunaehdoilla, joita olivat tunnetut painekorkeudet sekä erilaiset virtausehdot. Solmun painekorkeus on se taso, jolle vesi asettuisi pisteeseen asennetussa pohjavesiputkessa. Padon kuivan luiskan solmupisteiden painekorkeudet annettiin ohjelman iteroitaviksi, koska kohtaa, josta vesi tulee ulos luiskasta, ei tunnettu. Läpäisemätön reuna määritetään virtausehdolla $Q = 0$. Läpäisemättömiä reunoja mallinnuksessa olivat tarkasteltavan tilanteen oikea ja vasen reuna sekä mallin alareuna.

SEEP/W-ohjelma antoi laskentatuloksena kuvan padon kyllästyspinnasta sekä ekvipotentiaaliviivoista. Laskija täydensi kuvan virtaustilanteen virtausverkostoksi piirtämällä virtausviivoja maaperään. Suotoveden virtausnopeus kävi ilmi elementteihin piirretyistä vektorien pituuksista. Ohjelma myös tulosti padon läpi virtaavan veden määrän.

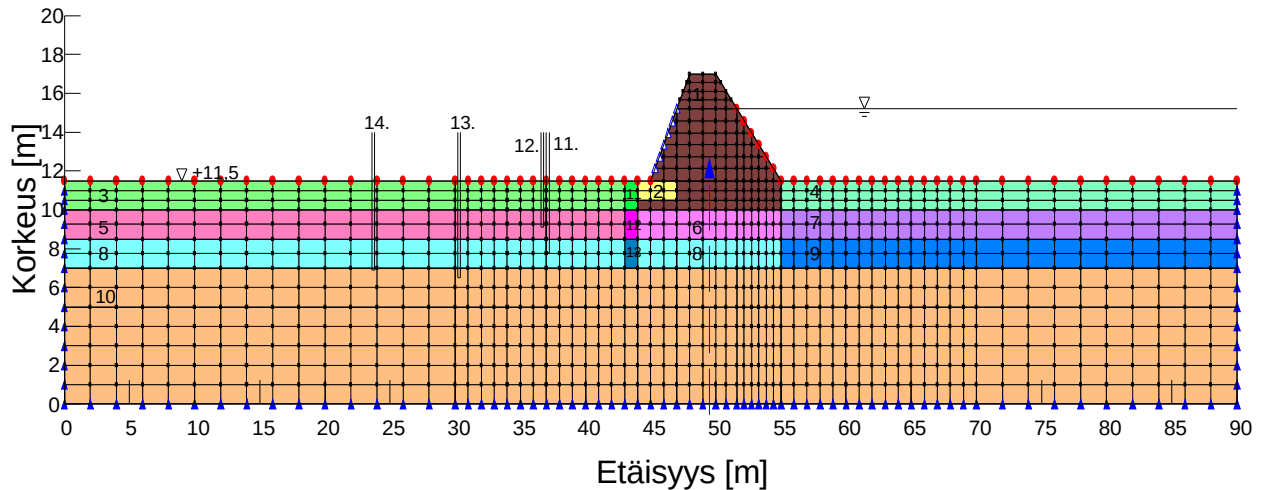
4.4 Elementtiverkko ja maaparametrit

Kaikissa tarkastelutilanteissa oletettiin, että anisotrooppisuus kaikille maaperän maille sekä padon eri osille olisi 9. Padon ja maaperän vaakamitat on siis jaettu kolmella, jolloin on pystytty mallintamaan leveämpi poikkileikkaus. Laskentamallin yksi vaakametri siis vastaa todellisuudessa kolmea vaakametriä.

Kaikissa tarkastelutilanteissa mallinnuksessa käytetty elementtiverkko oli tiheämpi padon luona ja kauempana hieman harvempi. Maanpinta oli myös kaikissa tarkastelutilanteissa

27.8.2007

tasolla +11,5 (luonnossa +101,5). Kuvassa 6 on mallinnetun padon poikkileikkaus ja mallinnuksessa käytetty elementtiverkko sekä pohjavesiputkien 11, 12, 13 ja 14 sijainnit.



Kuva 6. Kalajärven padon mallinnettu poikkileikkaus ja käytetty elementtiverkko.

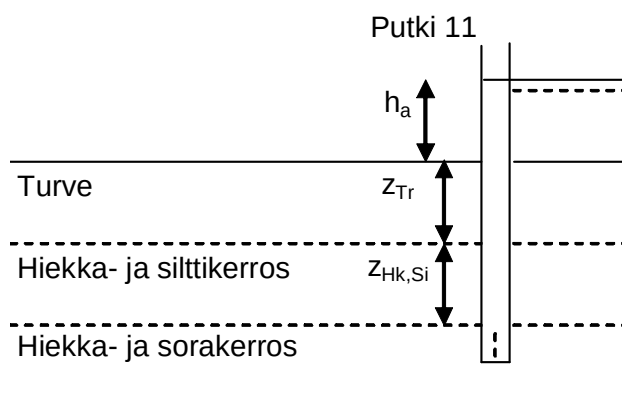
Kuvassa olevat numerot vastaavat: 1: tiivistesydän (ruskea väri), 2: pohjasuodatin (kelt.), 3 ja 11: turve, 4: turve (altaan puolella), 5, 6, 7 ja 12: kerrallinen hiekka- ja silttikerros, 8, 9 ja 13: lajittunut hiekka- ja sorakerros, 10: moreeni (11 ja 12 ovat massanvaihtokaivannon paikka tilanteessa C padon kuivalla puolella). Kuvassa ovat myös pohjavesiputket 11, 12, 13 ja 14.

HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.

Pohjavesiputken 12 siiviläkärki on kerrallisessa hiekka- ja silttikerroksessa muiden pohjavesiputkien kärkien ollessa syvemmällä lajittuneessa hiekka- ja sorakerroksessa tai vähän sen alla pohjamoreenissa. Tästä syystä putken 12 painekorkeus on alhaisempi kuin muiden putkien, vaikka putki sijaitseekin putkien 11 ja 13 välissä. Tämän takia linjassa oleville putkille 11, 13 ja 14 annettiin mallinnuksessa enemmän arvoa, varsinkin putkelle 11, josta oli havainnointu suurimmat painekorkeudet ja se myös sijaitsee lähimpänä patoa. Pohjavesiputki 14 sijaitsee kauimpana padosta. Pohjavesiputkien tiedot esitettiin taulukossa 2.

5 HYDRAULINEN MURTUMA JA SISÄINEN EROOSIO

Hydraulista murtumista on epäilty tapahtuneen maaperässä tarkastelutilanteessa A. Sellainen tapahtuu, jos varmuuskerroin hydraulista murtumaa vastaan (F_s) on pienempi kuin 1. Varmuuskertoimen F_s arvo noin 4 katsotaan riittäväksi, jotta rakennelma olisi turvallinen [1]. Sen tulee olla yli 2 hiekkamaassa ja yli 2,5 silttisessä maassa [8]. Kuva 7 on mallikuva varmuuskertoimen laskemiseen tarvittavien parametrien määrittämisestä pohjavesiputken 11 luota.



Kuva 7. Mallikuva varmuuskertoimen F_s laskemista varten pohjavesiputken 11 luota.

Taulukossa 3 on tarkastelutilanteen A todellinen maanpinnan korkeus ja pohjavesiputken 11 hydraulinen korkeus sekä mallinnuksessa käytetyt vastaavat lukemat. Taulukossa 4 on tilanteelle B samat tiedot kuin taulukossa 3. Taulukossa 5 on turpeelle sekä hiekka- ja silttikerrokselle valitut keskimääräiset tilavuuspainot sekä niitä vastaavat tehokkaat tilavuuspainot. Siinä on myös kyseisten maakerrosten todelliset paksuudet pohjavesiputken 11 luota sekä maakerrosten keskimääräiset paksuudet, joita käytettiin suotovirtauksen mallinustilanteissa. Taulukoon 6 laskettiin hydraulista murtumaa vastaan varmuuskerroin F_s kaavalla (3) tarkastelutilanteissa A ja B. Varmuuskerroin määritettiin pohjavesiputken 11 luota. Laskelmat tehtiin käyttäen taulukoiden 3, 4 ja 5 parametreja.

Taulukko 3. Tarkastelutilanteen A todellinen ja suotovirtauksen mallinnuksessa käytetty maanpinnan korkeus sekä pohjaveden painekorkeus.

	Maanpinta	Painekorkeus Putki 11	Painekorkeus h_a [m]
Todellinen	+101,8	+103,3	1,5
Mallinnus	+101,5	+103,3	1,8

Taulukko 4. Tarkastelutilanteen B todellinen ja suotovirtauksen mallinnuksessa käytetty maanpinnan korkeus sekä pohjaveden painekorkeus.

	Maanpinta	Painekorkeus Putki 11	Painekorkeus h_a [m]
Todellinen	+101,8	+102,5	0,7
Mallinnus	+101,5	+102,5	1,0

Taulukko 5. Hydraulisen murtuman varmuuskertoimen F_s laskemiseen tarvittavia parametreja pohjavesiputken 11 luota.

Maakerros	Tilavuuspaino		Todellinen	Mallinnus
	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Paksuus z [m]	Paksuus z [m]
Turve	12	2	1,7	1,5
Hiekka- ja silttikerros	17	7	0,9	1,5

Taulukko 6. Hydraulisen murtuman varmuuskerroin F_s tarkastelutilanteissa A ja B pohjavesiputken 11 luota, laskettu käyttäen taulukoiden 3, 4 ja 5 parametreja.

	Tarkastelutilanne	Varmuuskerroin F_s
Todellinen tilanne	A	0,65
Mallinnustilanne	A	0,75
Todellinen tilanne	B	1,39
Mallinnustilanne	B	1,35

Tarkastelutilanteen A varmuuskertoimien F_s arvot ovat alle 1. Maapadon taustan hydraulista murtumista on todennäköisesti tapahtunut padon käytön alkuaikoina, jolloin pohjaveden painekorkeudet ovat olleet korkeat.

Tarkastelutilanteen B varmuuskertoimien F_s arvot ovat yli 1, mutta yhä alle 2...4. Vaikka tilanne on parantunut ajan kuluessa, niin varmuus ei siltikään ole riittävä.

Herkkyystarkasteluna on laskettu varmuuskertoimen F_s arvo vielä hieman korkeammilla tilavuuspainoilla. Taulukossa 7 ovat nämä hieman korkeammat tilavuuspainot sekä niitä vastaavat tehokkaat tilavuuspainot turpeelle sekä hiekka- ja silttikerrokselle. Siinä ovat myös kyseisten maakerrosten todelliset paksuudet pohjavesiputken 11 luota sekä maakerrosten paksuudet mallinnustilanteissa. Taulukoiden 3 ja 4 arvoja käytettiin myös seuraavissa laskemissa. Taulukossa 8 esitetään uudet arvot varmuuskertoimelle F_s kaavalla (3) laskettuna tarkastelutilanteissa A ja B.

Taulukko 7. Hydraulisen murtuman varmuuskertoimen F_s laskemiseen tarvittavia parametreja pohjavesiputken 11 luota.

Maakerros	Tilavuuspaino		Todellinen	Mallinnus
	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	Paksuus z [m]	Paksuus z [m]
Turve	13	3	1,7	1,5
Hiekka- ja silttikerros	18	8	0,9	1,5

Taulukko 8. Hydraulisen murtuman varmuuskerroin F_s tarkastelutilanteissa A ja B pohjavesiputken 11 luota, laskettu käyttäen taulukoiden 3, 4 ja 7 parametreja.

	Tarkastelutilanne	Varmuuskerroin F_s
Todellinen tilanne	A	0,82
Mallinnustilanne	A	0,92
Todellinen tilanne	B	1,76
Mallinnustilanne	B	1,65

Taulukoon 6 laskettuna ja taulukossa 8 esitetyn herkkyystarkastelun perusteella ei varmuus padon taustan hydraulista murtumista vastaan ole ollut eikä ole vielääkään riittävä.

Patojen turvallisuus hydraulista murtumaa ja sisäistä eroosiota vastaan voidaan myös laskea kaavojen (5) ja (6) avulla (Lane 1935).

Painotettu vuotomatka L_w :

$$L_w = \frac{\sum L_h}{3} + \sum L_v, \quad (5)$$

missä

ΣL_h = horisontaalisten etäisyyksien summa lyhyintä virtaustietä pitkin ja

ΣL_v = vertikaalisten etäisyyksien summa lyhyintä virtaustietä pitkin.

Painotettu vuotosuhde C_w :

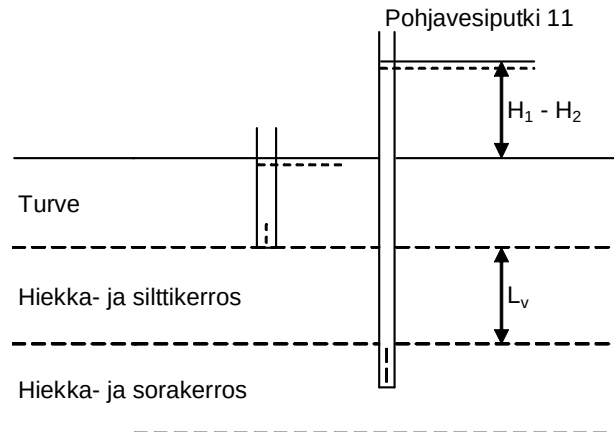
$$C_w = \frac{L_w}{H_1 - H_2}, \quad (6)$$

missä

H_1 = vesisyvyys ennen patoa ja

H_2 = vesisyvyys padon jälkeen.

Kuva 8 on mallikuva painotetun vuotosuhteen laskemiseen tarvittavien parametrien määrittämisestä pohjavesiputken 11 luota. Tässä tilanteessa horisontaalisten etäisyyksien summa lyhyintä virtaustietä pitkin on nolla ($\Sigma L_h = 0$).



Kuva 8. Mallikuva painotetun vuotosuhteen C_w laskemista varten pohjavesiputken 11 luota.

Taulukossa 9 on painotetun vuotosuhteen suositellut arvot eri maalajeille. Vuotosuhteen pitää olla yhtä suuri tai suurempi kuin taulukon 9 arvot, jotta rakennelma olisi turvallinen. Taulukossa 10 on tarkastelutilanteille A ja B lasketut painotetun vuotosuhteen arvot.

Taulukko 9. Painotetun vuotosuhteen C_w -arvot eri maalajeille [1 (table 2.9)].

Materiaali	C_w
Hyvin hieno hiekka tai siltti	8,5
Hieno hiekka	7,0
Hiekka	6,0
Karkea hiekka	5,0
Hieno sora	4,0
Karkea sora	3,0
Plastinen savi tai (medium) savi	2,0 - 3,0
Kova savi (hard clay)	1,8
Kova maapohja (hard pan)	1,6

Taulukko 10. Tarkastelutilanteiden A ja B painotettu vuotosuhde C_w laskettuna käyttäen taulukoiden 3, 4 ja 5 oikeita mittoja aikaisemmista pohjatutkimuksista.

Tarkastelu-tilanne	L_w [m]	$H_1 - H_2$ [m]	C_w
A	0,9	1,5	0,60
B	0,9	0,7	1,29

Tarkastelutilanteiden painotetut vuotosuhteet ovat välillä 0,6...1,3. Niiden pitäisi olla vähintään välillä 6,0...8,5. On siis ilmeistä, että sisäistä eroosiota tapahtuu padon taustalla.

6 SUOTOVIRTAUSLASKELMAT

6.1 A) Suotovirtaus suurimmilla tunnetuilla vesipinnoilla

Tarkastelutilanteessa A mallinnettiin padon alkuaikojen korkeat pohjaveden painekorkeudet ja altaan vesipintana kesäylivesi $HW_{LUPA} = +105,5$. Altaan vesipinta oli mallinnuksessa $+15,5$. Mallinnuksessa käytettiin taulukossa 11 olevia mitattuja painekorkeuksia pohjavesiputkille.

Taulukko 11. Mallinnuksessa käytettyjä painekorkeuksia tarkastelutilanteessa A.

Pohjavesiputki	Mallissa A	Luonnossa
11	+13,3	+103,3
13	+12,8	+102,8
14	+12,7	+102,7
12	+12,3	+102,3

Tilanteessa A haluttiin ottaa selvää, vaikuttavatko altaassa mahdollisesti olevat kuopat maaperän suotovirtaukseen. Sen tähden päätettiin jokaisesta tilanteesta mallintaa kaksi eri vaihtoehtoa: 1) koko mallin turvekerroksella oli sama vedenläpäisevyyskerroin ja 2) altaan pohjassa olevalle turvekerrokselle annettiin suurempi vedenläpäisevyyskerroin kuin kuivalla puolella olevalle, koska oletettiin, että kuoppien takia altaan pohjan turvekerros läpäisisi vettä paremmin.

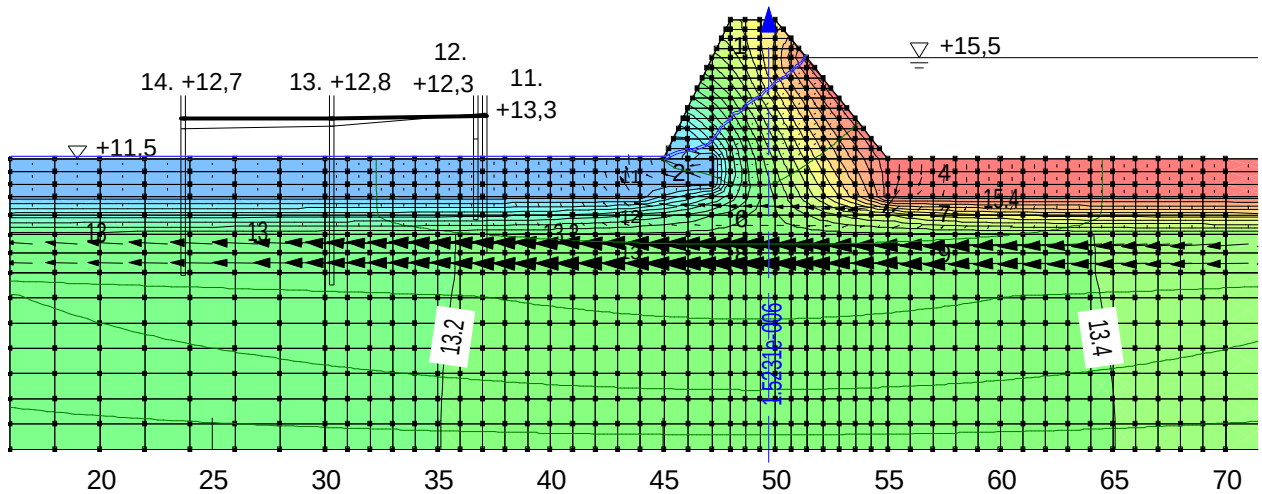
Taulukossa 12 on tarkastelutilanteessa A saadut tulokset vedenläpäisevyyskerroinille ja anisotrooppisuuksille. Taulukossa 12 ilmoitetaan maalajien lisäanisotrooppisuus $1/(K\text{-Ratio})$ – lukuna (kaava 4), koska kaikissa tarkastelutilanteissa oli jo alkuoletuksena kaikille maalajeille alkuanisotrooppisuus 9. Ainoastaan kerralliselle hiekka- ja silttikerrokselle (tasolla $+10,0 \dots +8,5$) tuli lisäanisotrooppisuudeksi 40.

Taulukko 12. Tarkastelutilanteen A tulokset suurimmilla tunnetuilla vedenpinnoilla.

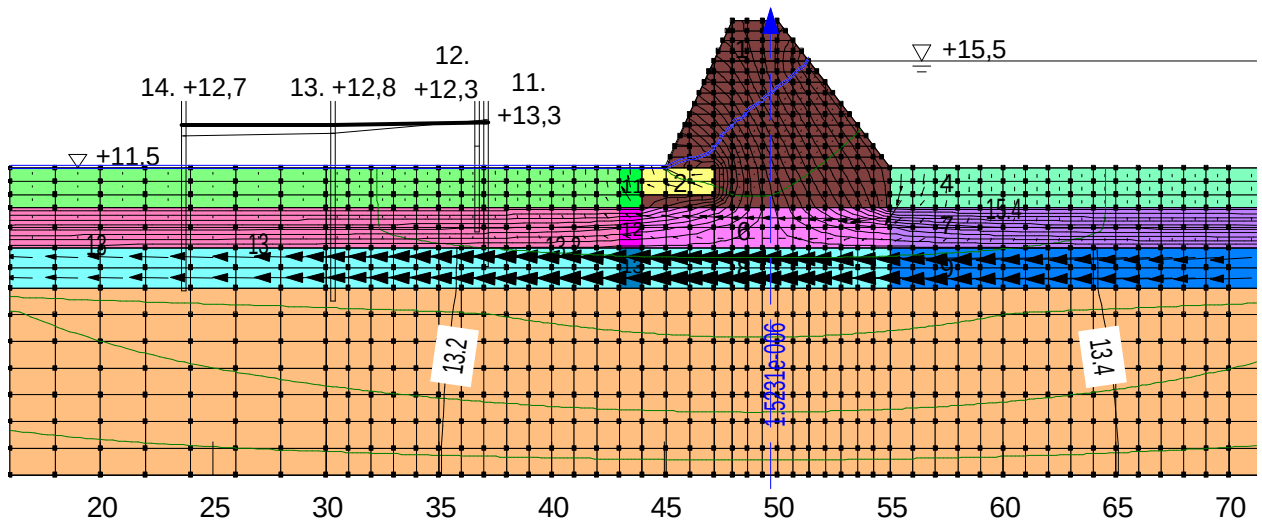
Maakerros	Kerrosrajat	Vedenläpäisevyyskerroin k [m/s]	Alkuanisotrooppisuus	Lisäanisotrooppisuus $1/(K\text{-Ratio})$
Tiivistesydän (moreenipato)	+17,0...+10,0	$10^{-7,5}$	9	-
Pohjasuodatin (sora)	+11,5...+10,5	10^{-6}	9	-
Turve	+11,5...+10,0	10^{-5}	9	-
Kerrallinen hiekka- ja silttikerros	+10,0...+8,5	10^{-7}	9	40
Lajittunut hiekka- ja sorakerros	+8,5...+7,0	10^{-5}	9	-
Moreeni	+7,0...+0,0	10^{-7}	9	-

Taulukon 12 vedenläpäisevyyskerroimen k - ja $K\text{-Ratio}$ -arvot saatiin optimoimalla tarkastelutilannetta A. Kuvissa 9 ja 10 on tarkastelutilanteen A maaperän suotovirtauksista mallinnettu lopputulos käyttäen taulukon 12 parametreja. Tilanteen A mallinnuslopputulos laajemmalla alueella sekä lopputuloksen muutama läheinen optimointitulokset ovat nähtävillä liitteissä.

27.8.2007



Kuva 9. Tarkastelutilanteen A maaperän suotovirtaustulos suurimmilla tunnetuilla vesipinnoilla, värit painekorkeuksien mukaan. Ohut viiva sekä pohjavesiputkien vieressä olevat lukemat ovat mitattuja painekorkeuksia. Paksu viiva kuvaa mallilla laskettuja painekorkeuksia.
HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.



Kuva 10. Tarkastelutilanteen A suotovirtaustulos, värit maalajien mukaan. Ohut viiva sekä pohjavesiputkien vieressä olevat lukemat ovat mitattuja painekorkeuksia. Paksu viiva kuvaa mallilla laskettuja painekorkeuksia.
HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.

Pohjavesiputki 11 saa mallinnuksen mukaan painekorkeuden väliltä +13,2...+13,3 (eli väliltä +103,2...+103,3), jolla välillä on myös mitattu painekorkeus +13,3. Putket 13 ja 14 saavat mallinnuksen mukaan painekorkeudet väliltä +13,1...+13,2 (eli väliltä +103,1...+103,2). Mallinnuksella saatiin putkille 13 ja 14 hieman mitattuja suuremmat painekorkeudet, mutta tilanne on käsitelty tasotapauksena. Todellisessa maaperässä vesi pääsee purkautumaan padon suunnassa sivuille päin pois pehmeiköltä, mikä selittää ainakin osittain eron mallinnettujen ja mitattujen painekorkeuksien välillä putkissa 13 ja 14. Mallinnustilanteessa vettä virtaa mallinnetun maaperän ja padon läpi noin $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Johanna Martio

27.8.2007

Maaperän suurimmat virtausnopeudet ovat noin tasolla +8,5...+7,0 hiekka- ja sorakerroksessa. Pienimmät suotoveden virtausnopeudet ovat pohjamoreenissa.

Toisessa kohdassa annettiin altaan puoleiselle turvekerrokselle vedenläpäisevyyskertoimeksi 10^{-3} m/s muiden vedenläpäisevyyskertoimien ja maaparametrien pysyessä samoina. Vaikka altaan puoleiselle turvekerrokselle (eli maakerrokselle altaan pohjalla) annettiin suurempi vedenläpäisevyys oletettujen kuoppien takia, tarkastelutilanne ei mallinnettaessa huomattavasti muuttunut tilanteesta, jossa sekä altaan puoleisella että padon taustan puoleisella turvekerroksella oli sama vedenläpäisevyys. Tästä voisi päätellä, että ainakaan tässä tilanteessa altaassa olevien kuoppien vaikutus ei ole suuri. Liitteissä on esimerkki altaan puoleisen turvekerroksen vedenläpäisevyyskertoimen suurentamisen vaikutuksesta tarkastelutilanteeseen A.

6.2 B) Suotovirtaus keskimääräisillä vesipinnoilla

Tarkastelutilanteessa B on mallinnettu padon viime aikojen matalammat pohjaveden painekorkeudet sekä altaan keskimääräinen vesipinta $W = +105,2$. Tämä tilanne kuvaa padon keskimääräistä nykytilannetta. Mallinnus tehtiin keskimääräisillä dokumentoiduilla painekorkeuksilla. Altaan vesipinta oli mallinnuksessa +15,2. Mallinnuksessa käytettiin taulukossa 13 olevia havainnoituja painekorkeuksia pohjavesiputkille.

Taulukko 13. Mallinnuksessa käytettyjä painekorkeuksia tarkastelutilanteessa B ja C.

Pohjavesiputki	Malleissa B ja C	Luonnossa
11	+12,5	+102,5
13	+12,4	+102,4
14	+12,3	+102,3
12	+12,1	+102,1

Tilanteessa B jatkettiin siitä, mihin jäätin tilanteessa A. Tilanteessa B annettiin eri lisäanisotrooppisuuden arvo kerrallisen hiekan- ja silttikerroksen kuivalle puolelle kuin saman kerroksen märälle puolelle. Tämä johtui siitä, että epäiltiin maaperässä padon taustalla tapahtuneen hydraulista murtumista ja sisäistä eroosiota padon käytön alkuaikoina. Taulukossa 14 on tarkastelutilanteelle B optimoidut tulokset vedenläpäisevyyskertoimille ja anisotrooppisuuksille. Taulukossa 14 ilmoitetaan maalajien lisäanisotrooppisuus $1/(K\text{-Ratio})$ – lukuna (kaava 4).

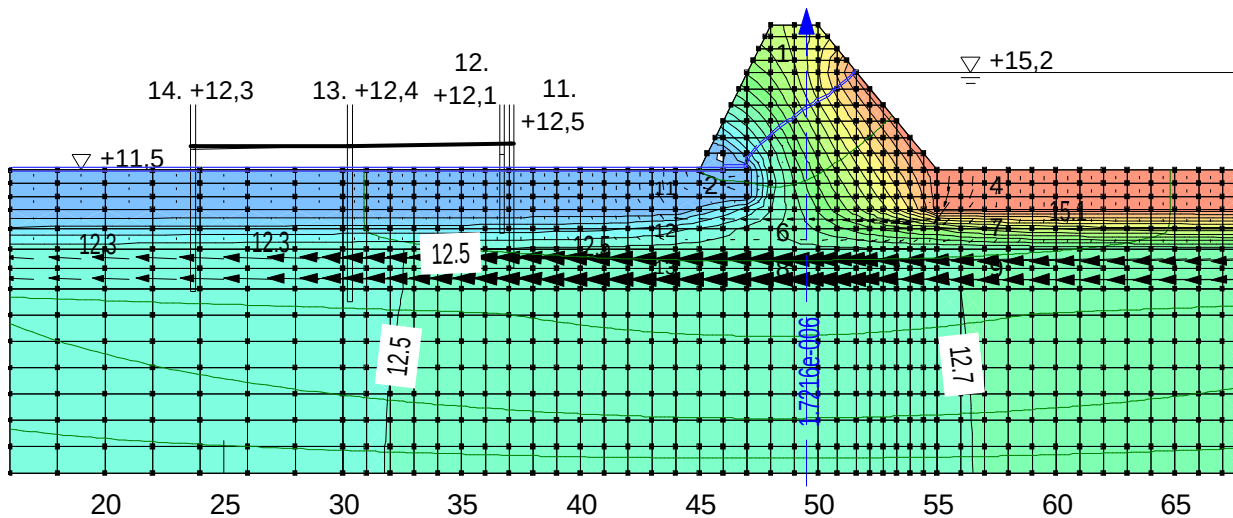
27.8.2007

Taulukko 14. Tarkastelutilanteen B tulokset keskimääräisillä vesipinnoilla.

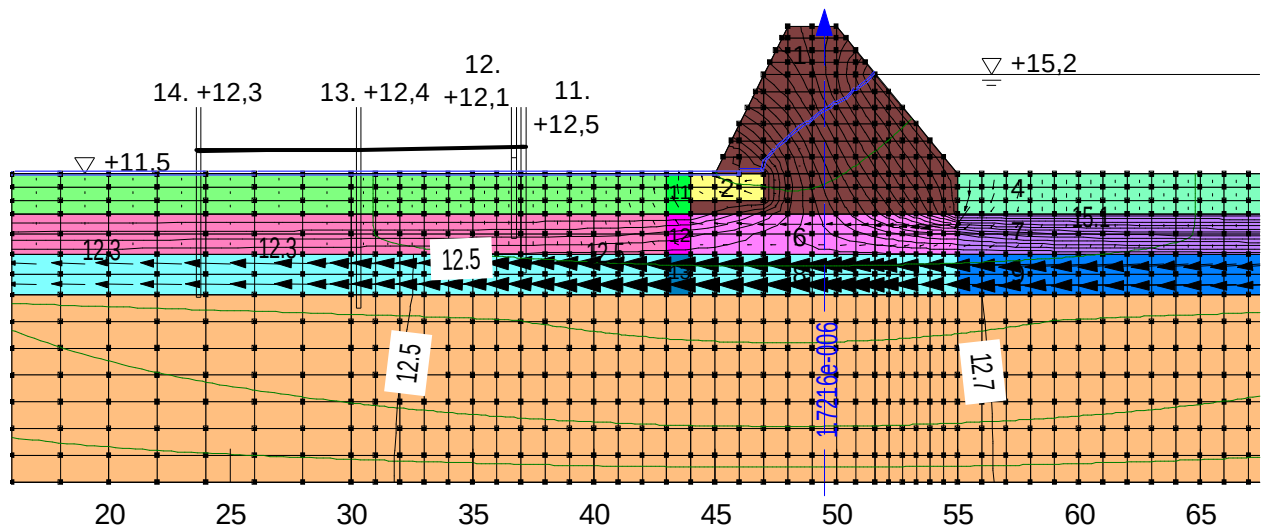
Maakerros	Kerrosrajat	Vedenläpäisevyyskerroin k [m/s]	Alkuanistrooppisuus	Lisäänisotrooppisuus 1/(K-Ratio)
Tiivistesydän (moreenipato)	+17,0...+10,0	$10^{-7,5}$	9	-
Pohjasuodatin (sora)	+11,5...+10,5	10^{-6}	9	-
Turve	+11,5...+10,0	10^{-5}	9	-
Kerrallinen hiekka- ja silttikerros (altaan puolella)	+10,0...+8,5	10^{-7}	9	40
Kerrallinen hiekka- ja silttikerros (kuivalla puolella)	+10,0...+8,5	10^{-7}	9	19
Lajittunut hiekka- ja sorakerros	+8,5...+7,0	10^{-5}	9	-
Moreeni	+7,0...+0,0	10^{-7}	9	-

Altaan puolella pidettiin kerrallisella hiekka- ja silttikerroksella lisäänisotrooppisuuden arvona 40. Kuivalle puolelle optimoitiin hiekka- ja silttikerrokselle lisäänisotrooppisuudeksi 19.

Kuvissa 11 ja 12 on tarkastelutilanteen B maaperän suotovirtauksien mallinnettu lopputulos käyttäen taulukon 14 parametreja. Tilanteen B mallinnuslopputulos laajemmalla alueella sekä lopputuloksen muutama läheinen optimointitulos ovat nähtävillä liitteissä.



27.8.2007



Kuva 12. Tarkastelutilanteen B suotovirtaustulos, värit maalajien mukaan. Ohut viiva sekä pohjavesiputkien vieressä olevat lukemat ovat mitattuja painekorkeuksia. Paksu viiva kuvaa mallilla laskettuja painekorkeuksia.

HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.

Pohjavesiputki 11 saa mallinnuksen mukaan painekorkeuden väliltä +12,5...+12,6 (eli väliltä +102,5...+102,6), jolla välillä on myös mitattu painekorkeus +12,5. Putkien 13 ja 14 vastaavat arvot ovat välillä +12,4...+12,5 (eli välillä +102,4...102,5). Putkelle 13 oli mitattu painekorkeudeksi +12,4, joka on tällä välillä. Mallinnuksella saatiin putkelle 14 hieman mitattua suurempi painekorkeus, koska tilanne on käsitelty mallinnuksessa tasotapauksena. Mallinnustilanteessa vettä virtaa mallinnetun maaperän ja padon läpi noin $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Virtaama on noin 10 % suurempi kuin tilanteessa A, vaikka vesipaine altaan puolella on tilanteessa B noin 10 % pienempi kuin tilanteessa A. Maaperän suurimmat virtausnopeudet ovat noin tasolla +8,5...+7,0 hiekka- ja sorakerroksessa. Pienimmät suotoveden virtausnopeudet ovat pohjamoreenissa.

6.3 C) Suotovirtaus kunnostuksen jälkeen

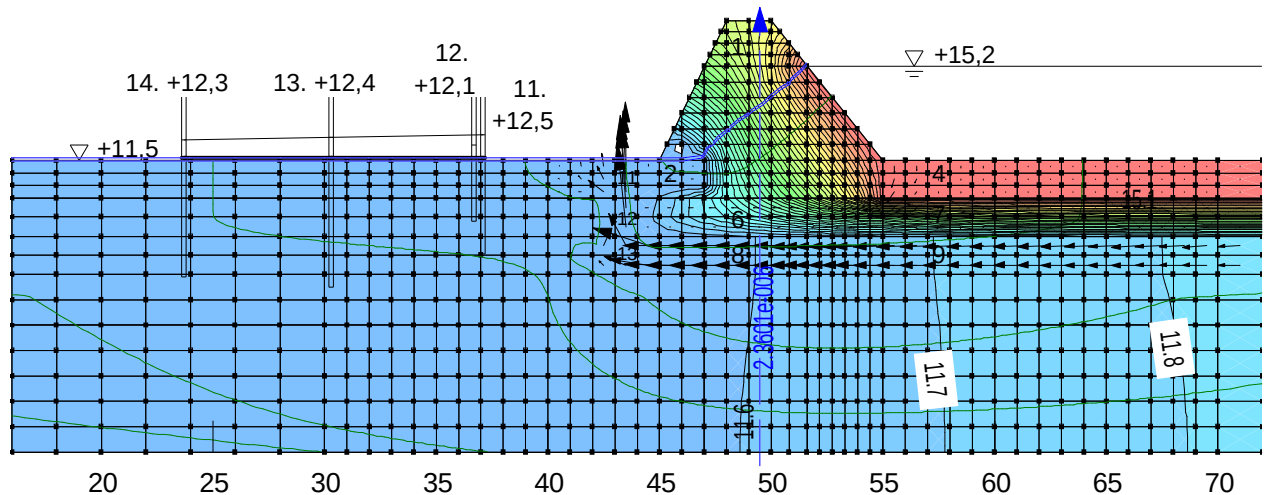
Tarkastelutilanteessa C mallinnettiin erään kunnostusmenetelmän jälkeistä, mahdollista tulevaisuuden tilannetta. Kunnostusmenetelmäksi valittiin massanvaihtokaivanto lähelle maapadon kuivan luiskan alareunaa, josta vesipaine pääsee purkautumaan hallitusti ylös keinotekoisen lähteen kautta. 3 metriä leveä ja syvä kaivanto kaivettaisiin turpeen ja kerallisen maan läpi hiekka- ja sorakerrokseen. Se täytettäisiin karkearakeisella maalla, kuten soralla. Tarkastelutilanteessa C haluttiin määrittää, miten massanvaihto vaikuttaa padon kuivatukseen ja maaperän suotovirtaukseen käyttämällä massanvaihtokaivannon soralle vedenläpäisevyyskerrointa 10^{-5} m/s ja 10^{-6} m/s .

Altaan vesipinta oli mallinnuksessa +15,2 (luonnossa +105,2). Taulukossa 14 oli tarkastelutilanteelle B optimoidut maaparametrit, joita käytettiin myös tilanteessa C.

Kuvissa 13 – 16 on tarkastelutilanteen C mallinnetut lopputulokset maaperän suotovirtauksista käyttäen taulukon 14 parametreja ja massanvaihtokaivannon soralle tarkoitettuja

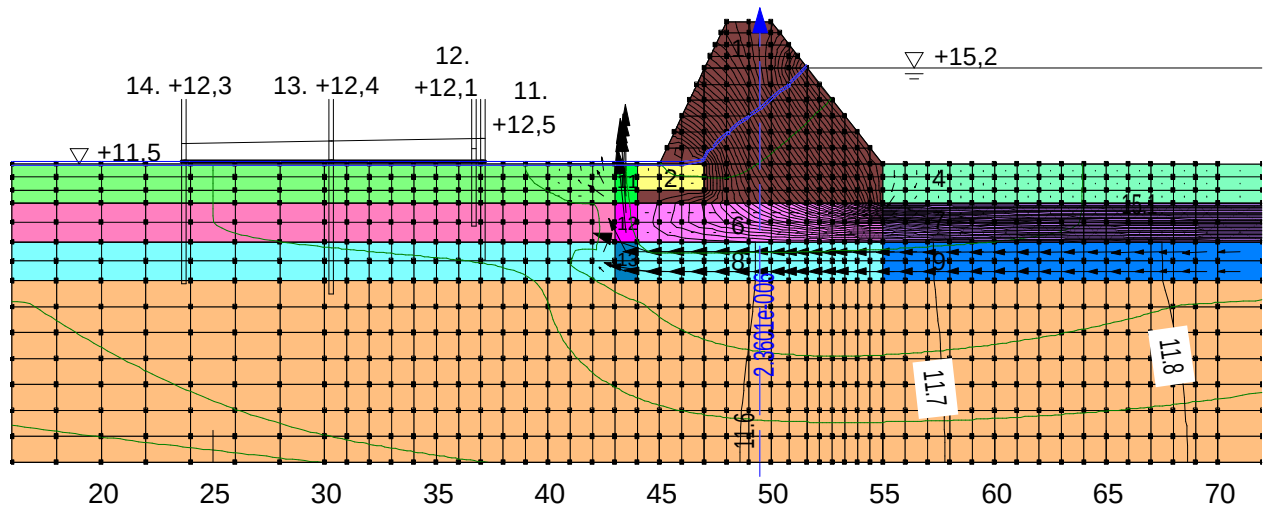
27.8.2007

parametreja. Tilanteen C mallinnuslopputulokset ovat nähtävillä laajemmalla alueella liitteissä.



Kuva 13. Tarkastelutilanteen C maaperän suotovirtaustulos keskimääräisillä vesipinnoilla kunnostuksen jälkeen, kun massanvaihdon vedenläpäisevyyskerroin on $k = 10^{-5}$ m/s, värit painekorkeuksien mukaan. 11 ja 12 ovat massanvaihtokaivannon paikka padon kuivalla puolella, keinotekoisen lähteen kohdalla. Ohut viiva sekä pohjavesiputkien vieressä olevat lukemat ovat mitattuja painekorkeuksia tilanteessa B. Paksu viiva maanpinnan lähellä kuvaa mallilla laskettuja painekorkeuksia kunnostuksen jälkeen.

HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.



Kuva 14. Tarkastelutilanteen C maaperän suotovirtaustulos keskimääräisillä vesipinnoilla kunnostuksen jälkeen, kun massanvaihdon vedenläpäisevyyskerroin on $k = 10^{-5}$ m/s, värit maalajien mukaan. 11 ja 12 ovat massanvaihtokaivannon paikka padon kuivalla puolella, keinotekoisen lähteen kohdalla. Ohut viiva sekä pohjavesiputkien vieressä olevat lukemat ovat mitattuja painekorkeuksia tilanteessa B. Paksu viiva maanpinnan lähellä kuvaa mallilla laskettuja painekorkeuksia kunnostuksen jälkeen.

HUOM! Todellinen vaakamatka on kolminkertainen.

Kuvien 13 ja 14 perusteella vedenläpäisevyyskertoimella 10^{-5} m/s pohjavesiputket 11 - 14 saavat mallinnuksen mukaan painekorkeuden väliltä +11,5...+11,6 (siis väliltä +101,5...+101,6). Painekorkeudet ovat noin 0,1 metriä maanpinnan yläpuolella. Mallinnustilanteessa vettä virtaa mallinnetun maaperän ja padon läpi noin $2,4 \cdot 10^{-6}$ m³/s. Virtaa-



Johanna Martio

27.8.2007

ma on 1,4-kertainen tilanteeseen B verrattuna. Tämä on siis suurempi suotoveden virtaama kuin tilanteissa A tai B. Suurimmat virtausnopeudet ovat noin tasolla +8,5...+7,0 hiekka- ja sorakerroksessa. Kuvien 13 ja 14 perusteella massanvaihtokaivannon kohdalle maapadon kuivalle puolelle muodostuisi aivan selvä lähde, josta vesi täytyisi johtaa jotenkin hallitusti pois, esim. kaivojen avulla.

Kuvien 15 ja 16 perusteella vedenläpäisevyyskertoimella 10^{-6} m/s pohjavesiputket 11 - 14 saavat mallinnuksen mukaan painekorkeuden väliltä +11,5...+11,7 (eli väliltä +101,5...+101,7). Mallinnustilanteessa vettä virtaa mallinnetun maaperän ja padon läpi noin $2,3 \cdot 10^{-6}$ m³/s. Tämä on suurempi suotoveden virtaama kuin tilanteissa A tai B, mutta hieman pienempi kuin arvolla $k = 10^{-5}$ m/s tilanteessa C. Suurimmat virtausnopeudet ovat noin tasolla +8,5...+7,0 hiekka- ja sorakerroksessa. Tässäkin tapauksessa massanvaihtokaivannon kohdalle muodostuisi aivan selvä lähde, josta vesi täytyisi johtaa jotenkin hallitusti pois.

Tilanteessa C ei vaikuttaisi olevan vaaraa padon taustalla olevassa maapohjassa tapahtuvasta hydraulisesta murtumisesta. Padon taustalla voi kuitenkin vielä tapahtua sisäistä eroosiota kuten myös padon alla olevassa maapohjassa. Padon taustan sisäisen eroosion riski on suurimmillaan mahdollisen massanvaihtokaivannon kohdalla, kun maasta pulpuava vesi voi tuoda maan hienoainesta ylös. Padon alapuolella olevassa maapohjassa olevat virtaamat tai virtausnopeudet saattavat kasvaa liian suuriksi, jolloin sisäisen eroosion riski kasvaa maapohjassa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA TOIMENPITEET

Laskelmien perusteella vaikuttaa siltä, että Kalajärven maapadon käytön alkuvuosina padon kuivalla puolella maapohjassa paalulla 20+65 on tapahtunut taustan hydraulista murtumista ja sisäistä eroosiota. Arvioita hydraulisen murtuman tai sisäisen eroosion aiheuttamista uhista patoturvallisuudelle ei ole tehty tässä tutkimuksessa.

Tarkastelutilanteet pystyttiin mallintamaan järkevillä parametreilla. Ongelmana vaikuttaa olevan lajittunut hiekka- ja sorakerros, jonka kautta vesi pääsee padon ali taustalle. Ongelmaa kasvattaa vielä se, että padon tausta sijaitsee notkossa, eli taustan luonnon maanpinta on alempana kuin ympärillä oleva maanpinta.

Mikäli tehtäisiin vedenpaineen purkujärjestely hiekka- ja sorakerroksesta, laskisi se maaperän huokospainetta padon taustalla tehokkaasti. Tämän korjaustavan merkittävimpiä riskejä saattaa olla hiekka- ja sorakerrosta pitkin tapahtuvan virtaaman ja virtausnopeuden kasvu. Etuina taas ovat hallittu kuivatus ja taustan maaperän kuivuminen jonkin verran. Taustalla ei enää pääse tapahtumaan hydraulista murtumista.

Kesällä 2007 pidetyn määräaikaistarkastuksen ja tehtyjen laskelmien perusteella padolla aloitettiin tehostettu tarkkailu. Padolla on tarkoitus käynnistää suunnittelu, jonka avulla määritetään korjaustöiden tarve, niiden mahdollinen laajuus ja teknilliset yksityiskohdat.

8 KIRJALLISUUSVIITTEET

- [1] Das, Braja M. (The University of Texas At El Paso): Advanced Soil Mechanics; McGraw-Hill International Editions – Civil Engineering Series; New York 1987.
- [2] Kalajärven padon määräaikaistarkastus, 13.6.2007 Seinäjoki.
- [3] Kuusiniemi, Risto: Maapadon harjan routiminen ja routasuojauksen mitoit-
tus; liseniaattityö, Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaus-
tekniikan osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka, Espoo 1995.
- [4] Leivo, Anne ja Vuola, Pekka: Anisotrooppisuuden ja epähomogeenisuuden
vaikutukset maapadon suotovirtaukseen, Suomen ympäristökeskus
(SYKE), 30.5.2006.
- [5] Länsi-Suomen ympäristökeskus: Kalajärven allas – Patorakenteet – Turval-
lisuuskansio.
- [6] Länsi-Suomen ympäristökeskus: Padot ja patoturvallisuus:
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=4087&lan=fi>
- [7] Maa- ja metsätalousministeriö: Patoturvallisuusohjeet – MMM:n julkaisuja
7/1997.
- [8] RIL 157-I Geomekaniikka I; Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki
1985.
- [9] SEEP/W Version 5.20 – ohjelma; Suomen ympäristökeskuksen lisenssi.
Sekä käyttökirja: SEEP/W – for finite element seepage analysis - Version 5
- User's Guide; GEO-SLOPE Office; GEO-SLOPE International Ltd;
Kanada 2002.
- [10] Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Geotekniikan laboratorio, G-3002: Kan-
sio III: Kyrönjoen vesistöaloussuunnitelma – Kalajärven allas – Kalajär-
ven altaan maapato; Tilaaja: Tie- ja vesirakennushallitus, Vesistöosasto,
tilattu 1969.
- [11] Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Geoteknillinen laboratorio, G-3002:
Lausunto - Tilaaja: Tie- ja vesirakennushallitus, Vesistöosasto, Mikonkatu
2, Helsinki 10 – Tehtävä: Kyrönjoen vesistöaloussuunnitelma, Kalajärven
säännöstelyaltaan maapadon rakennussuunnitelma osa 1; 31.10.1969.
- [12] Vattenfall: Jord- och stenfyllningsdammar; Happy Printing AB, Tukholma
1988.
- [13] Vuola, Pekka: Kalajärven allas; Suomen ympäristökeskus, 29.6.2007
(Word-dokumentti: Kalajärvi_kommentteja_1.doc).
- [14] Ympäristötietojärjestelmä Hertta 5.0; Patoturvallisuuden tietojärjestelmä
(PATO), Suomen ympäristökeskus. <http://wwwi5.ymparisto.fi/i5/554e.htm>

9 LIITTEET

1. Tarkastelutilanteen A mallinnuslopputulos (suotovirtauslaskelma-kuvat, K-Ratio = 1/40)
2. Tarkastelutilanteen A läheinen optimointitulos (suotovirtauslaskelma-kuva, K-Ratio = 1/38)
3. Tarkastelutilanteen A läheinen optimointitulos (suotovirtauslaskelma-kuva, K-Ratio = 1/45)
4. Tarkastelutilanteen A läheinen optimointitulos (suotovirtauslaskelma-kuva, K-Ratio = 1/55)
5. Tarkastelutilanteen A mallinnuslopputulos, kun turpeella $k = 10^{-3}$ m/s (suotovirtauslaskelma-kuvat, K-Ratio = 1/40)
6. Tarkastelutilanteen B mallinnuslopputulos (suotovirtauslaskelma-kuvat, K-Ratio = 1/40 ja K-Ratio = 1/19)
7. Tarkastelutilanteen B läheinen optimointitulos (suotovirtauslaskelma-kuva, K-Ratio = 1/40 ja K-Ratio = 1/18)
8. Tarkastelutilanteen B läheinen optimointitulos (suotovirtauslaskelma-kuva, K-Ratio = 1/40 ja K-Ratio = 1/20)
9. Tarkastelutilanteen C mallinnuslopputulos, kun $k = 10^{-5}$ m/s (suotovirtauslaskelma-kuvat, K-Ratio = 1/40 ja K-Ratio = 1/19)
10. Tarkastelutilanteen C mallinnuslopputulos, kun $k = 10^{-6}$ m/s (suotovirtauslaskelma-kuvat, K-Ratio = 1/40 ja K-Ratio = 1/19)