

Anne Leivo, Pekka Vuola

Anisotrooppisuuden ja epähomogeenisuuden vaikutukset
maapadon suotovirtaukseen

30.5.2006



S Y K E

Anne Leivo

Anisotrooppisuuden ja
epähomogeenisuuden vaikutukset
maapadon suotovirtaukseen

1

30.5.2006

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	2
2	TIIVISTESYDÄMEN VEDENLÄPÄISEVYYSOMINAISUUDET	3
2.1	Anisotrooppisuus.....	3
2.2	Vedenläpäisevyyskerroin.....	5
2.2.1	Vedenläpäisevyyskerroin suoriin mittauksiin perustuen.....	5
2.2.2	Vedenläpäisevyyskerroin rakeisuuteen perustuen.....	6
2.2.3	Vedenläpäisevyyskerroimen tyypillinen vaihtelu.....	7
2.3	Tiiviys.....	8
2.4	Anisotrooppisuuden laskeminen.....	9
2.5	Epähomogeenisuus.....	10
3	SUOTOVIRTAUKSEN MALLINTAMINEN	12
3.1	SEEP/W.....	12
3.2	Mallinnettu pato.....	13
3.2.1	Padon mitat.....	13
3.2.2	Reunaehdot.....	14
3.2.3	Maamateriaalit ja vedenläpäisevyysfunktiot.....	14
3.3	Tarkasteltavat tilanteet.....	15
4	TULOKSET	18
4.1	Anisotrooppisuuden vaikutus.....	18
4.2	Padon yläosan vaikutus.....	20
4.3	Tukkeutunut pohjasuodatin.....	23
4.4	Pohjasuodattimen ja padon yläosan yhteisvaikutus.....	26
4.5	Kyllästymättömän vyöhykkeen virtauksen vaikutus.....	28
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	30

Lähteet

Liitteet HUOM Liitteitä ei esitetä tässä "nettiversiossa"

Anne Leivo

30.5.2006

1 Johdanto

Useimmat valtion padot ovat pääosin moreenista tehtyjä patoja, joita kutsutaan monesti homogeenisiksi maapadoiksi. Ainakin kaikki isoimmat näistä on rakennettu 1960- ja 1970-luvulla. Valtion omistamien P-patojen kuntoarvio käynnistettiin SYKE:ssä vuonna 2003. Jo aikaisemmin oli käsitys, että ainakin osa padoista joudutaan korjaamaan. Korjaustarve on varmistunut ensimmäisten kuntoarvioiden valmistuttua.

Anisotrooppisuudella tarkoitetaan maan tai maarakenteen kerrallisuudesta johtuvaa piirrettä, jonka johdosta erityisesti vedenläpäisevyys on erisuuruinen vaak- ja pystysuunnassa. Epähomogeenisuus eli heterogeenisuus tarkoittaa sitä, että maapohjassa tai maarakenteessa on toisistaan poikkeavia paksumpia kerroksia; padon tiivistesydämen ala- ja yläosa on voitu tehdä ominaisuuksiltaan erilaisista maa-aineksista. Suomen oloissa myös routa muuttaa maan ominaisuuksia. Anisotrooppisuus ja epähomogeenisuus ovat oleelliset tekijät maaperän ja maarakenteiden käyttäytymisessä. Ainakin osa valtionpatojen ongelmista on johtunut juuri näistä ominaisuuksista.

SYKE:ssä pidettiin tarpeellisenä tehdä teoreettinen tutkimus, jossa tarkastellaan anisotrooppisuuden ja epähomogeenisuuden vaikutuksia maapadon suotovirtaukseen. Erityisenä perusteluna tälle työlle oli saada aikaan kokonaisvaltainen käsitys asiasta, jotta samaa ongelmaa ei tarvitsisi harkita erikseen jokaisessa kuntoarvio- ja korjauskohteessa. Lisäperusteluna oli, ettei näitä ominaisuuksia käsitellä alan käsi- ja oppikirjoissa niin, että tietoutta voisi soveltaa suoraan kohteisiin. Padon tiivistesydämen anisotrooppisuuden ja epähomogeenisuuden lisäksi tässä tutkimuksessa tarkasteltiin myös pohjasuodattimen mahdollisen tukkeutumisen vaikutusta suotovirtaukseen. Laskelmat on tehty hypoteettisen padon poikkileikkauksessa SEEP/W-ohjelmalla. Käytetyt vedenläpäisevyyden parametrit on muodostettu todelliseen aineistoon perustuen.

Tämän tutkimusraportin toisessa luvussa esitetään, kuinka laskentaparametrit määritettiin. Kolmannessa luvussa esitellään mallinnettu pato, käytetty laskentaohjelma sekä laskennallisesti tarkasteltavat tilanteet. Tulokset käsitellään neljännessä luvussa ja näistä tehtävät johtopäätökset ovat aiheena viidennessä ja viimeisessä luvussa.

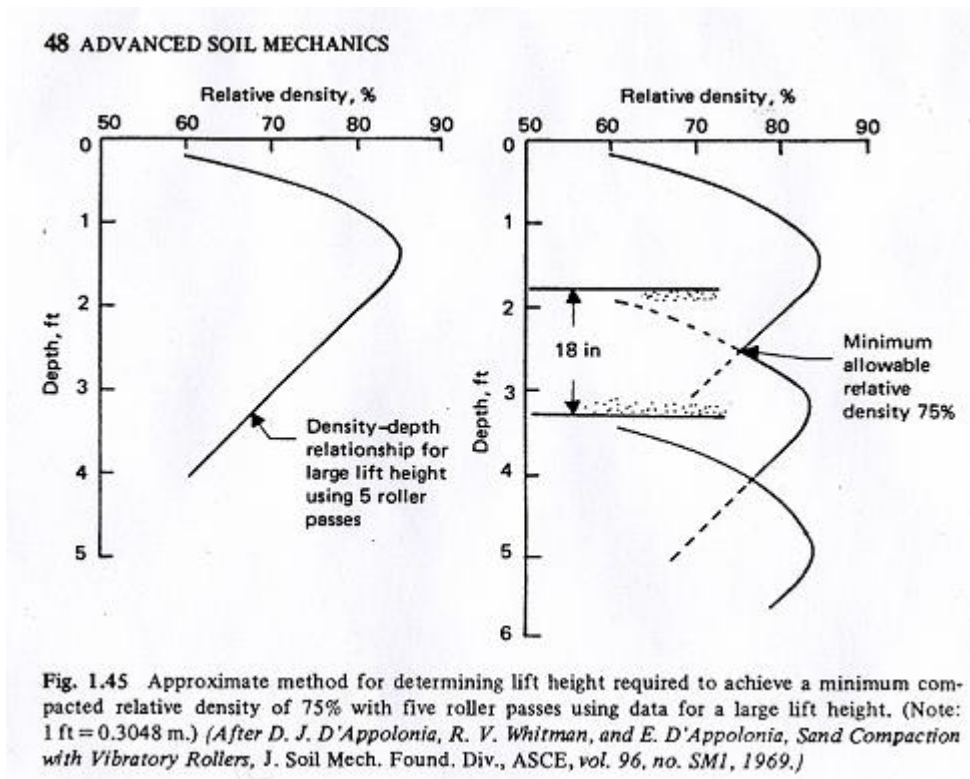
Lähtöaineiston käsitteli, laskelmat teki ja tekstin laati tekniikan ylioppilas Anne Leivo. Työn ohjasi tekniikan lisensiaatti Pekka Vuola SYKE:stä.

2 Tiivistesydämen vedenläpäisevyysominaisuudet

2.1 Anisotrooppisuus

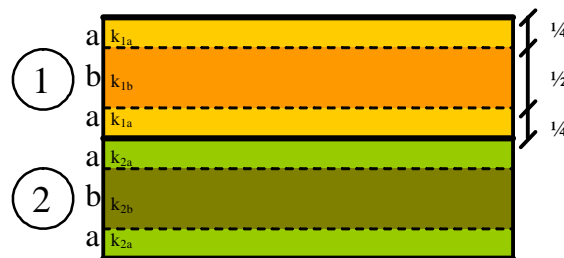
Maapadon kerroksellinen valmistustapa on syynä siihen, että vedenläpäisevyyskertoimet vaaka- ja pystysuunnassa ovat erisuuret. Tämän anisotrooppisuuden suuruutta ja vaikutusta suotovirtaukseen yritetään arvioida ns. homogeenisista moreenirunkoisista maapadoista mitattujen vedenläpäisevyyskertoimien, rakeisuuskäyrien sekä tiiviysvaihteluiden perusteella. Käytössä on ollut vedenläpäisevyysmittauksia Hautaperän, Tulisaaren ja Arkkusaaren maapadoilta. Suurin osa vedenläpäisevyysmittauksista on suoritettu kenttäkokein. Rakeisuuden ja tiiviiden vaihtelua on arvioitu Uljuan Tulisaaren ja Arkkusaaren padoista. Uljuan padoilla tehdyt mittaukset ovat rakennusaikaisia mittauksia, jotka löytyvät mm. myöhemmin, vuonna 1988, Pasi Vahanteen VTT:ssa tekemästä perustarkastusselvityksestä. Tähän lähteeseen viitataan tekstissä usein.

Vedenläpäisevyyskertoimeen vaikuttavat sekä materiaalin rakeisuus että sen tiiviys. Kahdella päällekkäisellä kerroksella voi olla erilaiset rakeisuuskäyrät ja lisäksi kummankin koneellisesti tiivistetyn kerroksen tiiviys vaihtelee syvyys suunnassa kuvan 1 osoittamalla tavalla. Kunkin kerroksen ylä- ja alapinnat ovat keskiosia löyhempiä. Kuvassa tiiviys on ilmoitettu käyttäen **suhteellista tiiviyttä**. Amerikkalaisen käytännön mukaan se voi vaihdella välillä 0...100 %. Suomalaisen käytännön mukaan suhteellinen tiiviys vaihtelee välillä 0...1. Yleensä tiiviys ilmoitetaan Suomessa käyttäen **tiiviyssastetta**, jonka vaihtelu hyvin löyhästä hyvin tiiviiseen on 75...100 %.



Kuva 1. Kerroksellisesta valmistustavasta johtuva tiiviiden vaihtelu. Kuvassa tiiviys on ilmaistu suhteellisen tiiviiden avulla. (Das 1987, s. 48)

Kuvassa 2 on esitetty malli maan kerroksellisesta koostumuksesta, johon perustuen anisotrooppisuus on päätetty laskea. Alueet 1 ja 2 kuvaavat tiivistettyjä kerroksia, joilla on erilaiset rakeisuudet. Tiiviysvaihteluun perustuen molemmat kerrokset on jaettu vielä kolmeen osaan, joista keskimmäinen (b) on kaikkein tiivein ja siis vähiten vettä läpäisevä.



Kuva 2. Anisotrooppisuuden laskemiseen käytetty maamalli. Mallissa on kaksi eri materiaalia 1 ja 2 (kellertävä ja vihreä), joiden tiiviys vaihtelee (a vaaleammat ja b tummemmat sävyt).

Mittaustuloksia analysoimalla on tarkoitus saada selville,

- millaisia vedenläpäisevyysskerroimen arvoja yhdellä pato-osuudella esiintyy (epähomogeenisuuden mallintaminen)
- miten suuri on rakeisuuden vaikutus vedenläpäisevyysskerroimen arvoon
- miten suuri on tiiviiden vaikutus vedenläpäisevyysskerroimen arvoon.

Anne Leivo

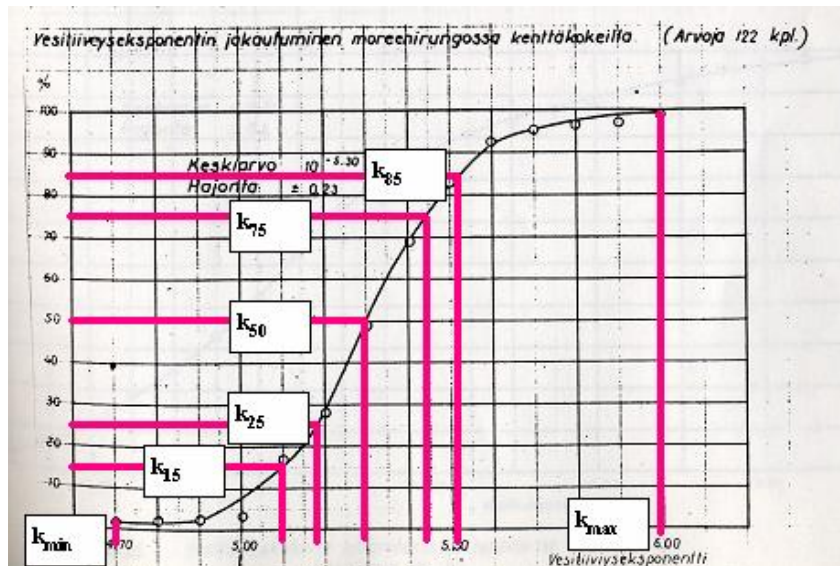
30.5.2006

Kun rakeisuuden ja tiiviyyden aiheuttama vaihtelu on saatu selville, määritetään niiden ja maamallin kerrospaksuuksien avulla vaakaja pystysuuntaiset vedenläpäisevyyskertoimet koko maamallille. Tutkimuksessa operoidaan pitkälti vedenläpäisevyyskertoimen eksponenteilla, ei niinkään itse kertoimen absoluuttisilla arvoilla.

2.2 Vedenläpäisevyyskerroin

2.2.1 Vedenläpäisevyyskerroin suoriin mittauksiin perustuen

Uljuan altaan kunkin patovälin vedenläpäisevyyskertoimen vaihtelua on kuvattu summafrequenssi-
en avulla (kuva 3).



Kuva 3. Vedenläpäisevyyskertoimen eksponentin summafrequenssikäyrä ja siitä tarkasteluun valitut arvot. (Vahanne 1988)

Kustakin kuvaajasta on määritetty seuraavia frekvenssejä vastaavat vedenläpäisevyyskertoimen arvot:

k_{min}	pienintä määritettyä frekvenssiä vastaava vedenläpäisevyyden arvo
k_{15}	arvo, jota pienempien arvojen määrä aineistossa on 15 %
k_{25}	arvo, jota pienempien arvojen määrä aineistossa on 25 % (alakvartiili)
k_{50}	arvo, jota pienempien arvojen määrä aineistossa on 50 %
k_{75}	arvo, jota pienempien arvojen määrä aineistossa on 75 % (yläkvartiili)
k_{85}	arvo, jota pienempien arvojen määrä aineistossa on 85 %
k_{max}	suurinta määritettyä frekvenssiä vastaava vedenläpäisevyyden arvo

Kerättyjen frekvenssien avulla on arvioitu vedenläpäisevyyskertoimen vaihtelua. Ala- ja yläkvartiilin ($k_{75} - k_{25}$) erotus on vaihteluväli, joka kattaa 50 % mitatuista arvoista. Arvojen k_{85} ja k_{15} erotus kattaa 70 % mitatuista vedenläpäisevyysarvoista. Jos kyseessä olisi normaalijakautunut parametri, vastaisi $k_{85} - k_{15}$ likimain sen keskihajontaa.

Anne Leivo

30.5.2006

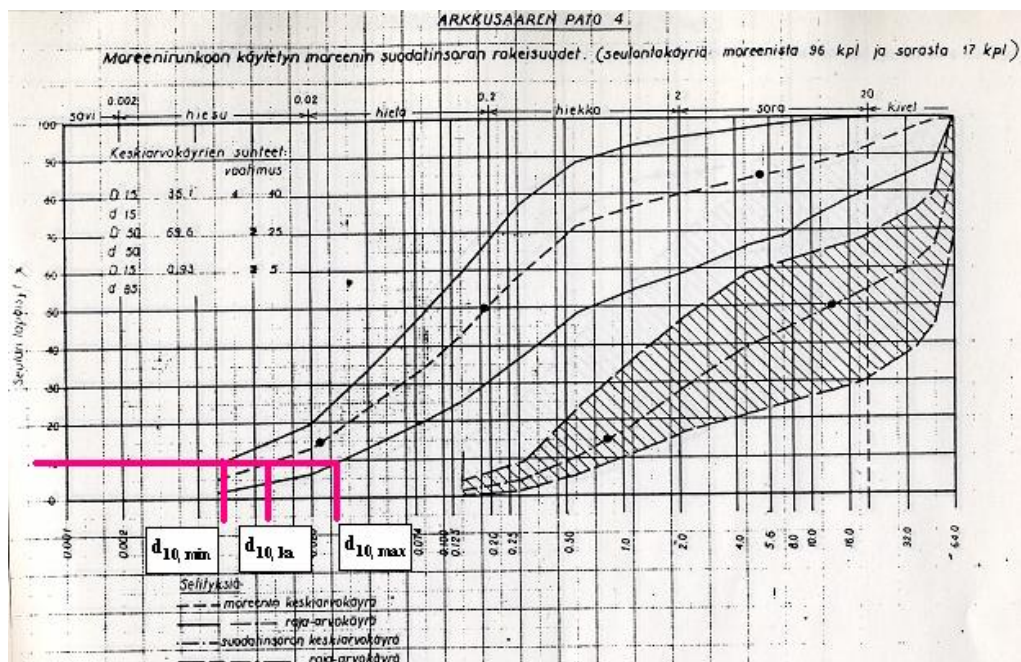
Myös vedenläpäisevyyserrointen maksimaalinen vaihtelu, $k_{\max} - k_{\min}$, tietyllä patovälillä on laskettu. Tämä maksimaalinen vaihtelu ei ole kuitenkaan suurin mahdollinen, sillä k_{\min} ja k_{\max} eivät ole aivan ääripäitä mitatuista arvoista. Anisotrooppisuuden arviointiin sovellettaessa tämä maksimaalinen vaihtelu on liian suuri, sillä padon kerrallisuus ei muodostu maan vedenläpäisevyyserrointen vaihtelusta sen suurimman ja pienimmän arvon välillä. Toisaalta, teoreettiseen tarkasteluun kannalta tämäkin vaihtelu on mielenkiintoinen.

Kun laskettiin k_{50} -arvojen keskiarvo, saatiin keskimääräiseksi vedenläpäisevyyserrointen eksponentiksi $x_{ka} = -7,33$. Eksponentin vaihtelu välillä $k_{75} - k_{25}$ on $0,27...0,7$ ja välillä $k_{\max} - k_{\min}$ $1,3...2,2$. Kaikki määritettyjä frekvenssejä vastaavat vedenläpäisevyyserrointen eksponentit ja niiden erotukset on esitetty liitteen 1 taulukoissa.

2.2.2 Vedenläpäisevyyserroin rakeisuuteen perustuen

Vedenläpäisevyyserrointen vaihtelua arvioitiin myös patomateriaalin rakeisuuden perusteella. Rakeisuuden vaihtelua Arkkusaaren ja Tulisaaren padoissa on kuvattu rakeisuuskäyrin (kuva 4). Mukana ovat rakeisuuden keskiarvo- sekä raja-arvokäyrät. Rakeisuuskäyristä voidaan määrittää vedenläpäisevyyserrointen arvo tehokkaan raekoon d_{10} avulla. Tähän on käytetty tasarakeisille maille tarkoitettua nomogrammia (kuva 5).

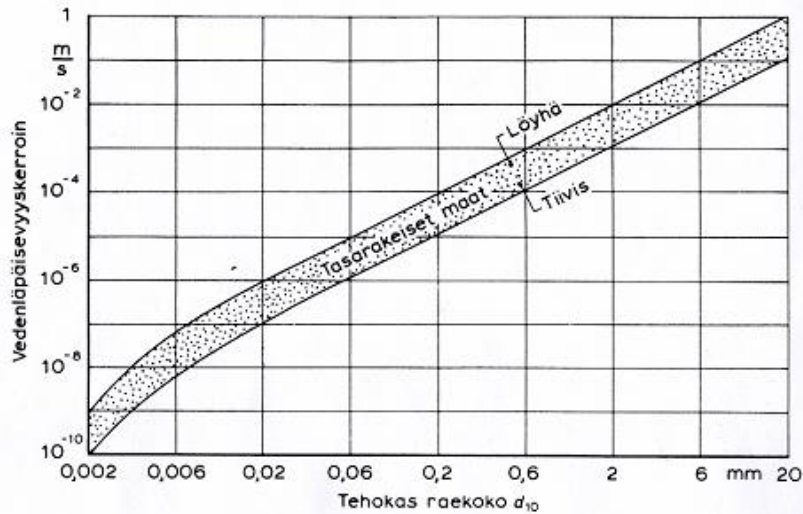
Rakeisuuden perusteella määritetyt vedenläpäisevyyserrointen arvot tukevat suorista vedenläpäisevyyserrointen mittauksista saatuja tuloksia. Rakeisuuden perusteella määritetty keskimääräinen vedenläpäisevyyserroin $k = 10^{-7,25}$ m/s on hyvin lähellä suoraan vedenläpäisevyyssmittauksista saatua tulosta ($k_{ka} = 10^{-7,33}$ m/s). Kertoimen maksimaalinen vaihtelu sen sijaan muodostuu rakeisuuden mukaan määritettynä yleisesti ottaen hieman pienemmäksi kuin suorilla vedenläpäisevyyserrointen mittauksilla; eksponentin vaihtelu välillä $k_{\max} - k_{\min}$ on $0,7...1,6$. Taulukko määritetyistä kertoimista on esitetty liitteessä 1.



Kuva 4. Rakeisuuden keskiarvo- ja raja-arvokäyrät sekä niistä määritetyt läpäisyprosenttia d_{10} vastaavat tehokkaat raekoot. (Vahanne 1988)

Anne Leivo

30.5.2006



3. Vedenläpäisevyyskerroimen riippuvuus tehokkaasta raekoosta d_{10} [mm] tasaraakeisissa maissa, [11].

Kuva 5. Vedenläpäisevyyskerroimen määräytyminen tehokkaan raekoon avulla. Myös tiivisyys vaikuttaa vedenläpäisevyyskerroimen arvoon. (RIL 157-I 1985, s. 419)

Vedenläpäisevyyskerroimen arvojen määrittämiseen on siis käytetty nomogrammia, joka soveltuu tasaraakeisille maille, vaikka padossa käytetty materiaali onkin moreenia. Tarkoituksena ei ole kuitenkaan ollut absoluuttisten vedenläpäisevyyskerrointen määrittäminen vaan lähinnä eri tavalla määritettyjen vedenläpäisevyyskerrointen vertailu keskenään. Suurempi kiinnostus kohdistuu vedenläpäisevyyskerroimen vaihteluväliin. Moreenin vedenläpäisevyyskerroin on pienempi kuin tasaraakeisen maan vedenläpäisevyyskerroin, mutta tehokkaan raekoon muutos aiheuttaa molemmissa maissa samansuuruisen muutoksen vedenläpäisevyyskerroimen arvoon. Näin ollen on voitu vertailla rakeisuuden avulla ja vedenläpäisevyysmittauksilla määritetyn k -arvon vaihteluvälin suuruutta. Rakeisuuden pohjalta määritettyjä arvoja ei ole hyödynnetty muissa tämän työn laskelmissa.

2.2.3 Vedenläpäisevyyskerroimen tyypillinen vaihtelu

Vedenläpäisevyyskerroimen vaihtelulle haluttiin löytää jonkinlaiset tyypilliset arvot, joita voidaan käyttää anisotropian laskemiseen. Tarkasteltavia vaihteluvälejä olivat:

$k_{75} - k_{25}$
 $k_{85} - k_{15}$
 $k_{\max} - k_{\min}$.

Vaihteluvälejä kuvaavat luvut luokiteltiin ja luokittelun perusteella valittiin tyypillisimmät arvot, jotka on esitetty taulukossa 1. Taulukon arvot ovat siis eräänlaisia suurempaa aineistoa kuvaavia tyyppi-arvoja. Kaikista suurin yksittäinen yhdellä patovälillä esiintynyt vedenläpäisevyyskerroimen eksponentin vaihtelu $k_{\max} - k_{\min}$ oli 2,2 yksikköä eli $k_{\min} / k_{\max} = 160$. Tämä, kuten myös maksimaalista vaihtelua ($k_{\max} - k_{\min}$) kuvaava tyyppi-arvo 1,5, ovat ääriarvoja, joiden ei sellaisenaan kannata ajatella kuvaavan koko padossa vallitsevaa anisotropiaa. Taulukon 1 arvoja on käytetty sekä anisotropian laskemiseen että padossa esiintyvän epähomogeenisuuden, padon ylä- ja alaosan erilaisten vedenläpäisevyyskerrointen arviointiin. Tyyppi-arvojen valinta on esitetty liitteessä 2.

Anne Leivo

30.5.2006

Taulukko 1. Vedenläpäisevyyskertoimen eksponentin $k = 10^X$ tyypillinen vaihtelu Δx . Suurin yksittäinen esiintynyt vaihtelu oli 2,2.

	$k_{75}-k_{25}$	$k_{85}-k_{15}$	$k_{\max}-k_{\min}$
Eksponentin vaihtelu Δx	0,6	0,9	1,5

2.3 Tiiviys

Vedenläpäisevyyskertoimen rakennusaikaisilla määrittäyksillä pyritään tarkastamaan, että patoon käytettävä materiaali täyttää rakeisuutensa puolesta sille asetetut vaatimukset. Mittaus suoritetaan tavallisesti tiivistetyn kerroksen pintaosista, jolloin kerroksen sisäinen tiiviiden vaihtelu ei näy mitaustuloksissa. Tiivistystyö arvioidaan puolestaan määrittämällä tiivistetyn kerroksen tiiviysaste.

Tiivistystyön tulos riippuu maamateriaalin rakeisuuden ja vesipitoisuuden lisäksi käytetystä kalustosta ja ajokertojen määrästä. Tiivistettävän kerroksen paksuutta voidaan lisätä, kun käytössä on raskaampia tiivistyskoneita. Arkkusaaren ja Tulisaaren padoille on niiden työselityksissä annettu kerrospaksuudeksi 70...90 cm käytettäessä raskaita täryjyriä (8,0-8,5 t) (Arkkusaaren ja Tulisaaren patojen työselitykset, patojen turvallisuuskansio).

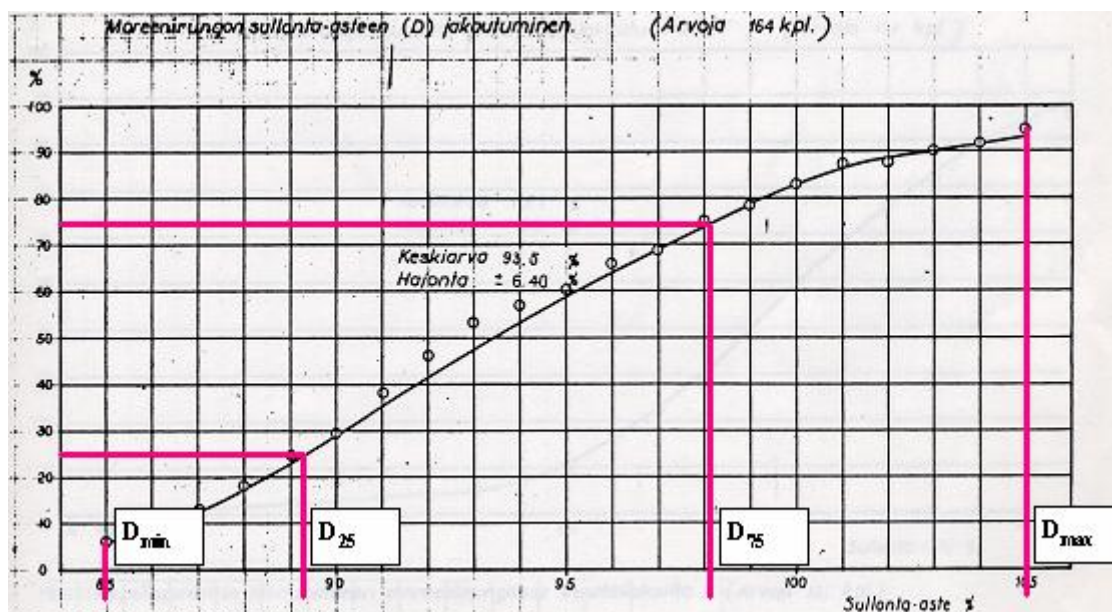
Arkkusaaren padolle annettu tiiviysvaatimus on ollut $\geq 90\%$ parannetulla Proctor-kokeella. Vastava vaatimus on Tulisaaren padolla ollut $\geq 95\%$. (Vahanne 1988) Tiiviysaste määritetään kaavan 1 mukaan:

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \cdot 100\% \quad (\text{kaava 1})$$

- D tiiviysaste
 γ_d kuivatilavuuspaino
 $\gamma_{d \max}$ Proctor-kokeella (optimivesipitoisuudessa) määritetty kuivatilavuuspainon maksimi

(Helenelund 1974)

Uljuan altaan maapadoilla mitattujen tiiviyksien vaihtelua on kuvattu summafrequenssikäyrin (kuva 6). Ylä- ja alakvartiilin tiiviysasteiden (D_{75} ja D_{25}) voidaan ajatella kuvaavan patoon tiivistetyn, noin 70-90 cm paksun kerroksen tiiviiden keskimääräistä vaihtelua. Eri patojen aineistoja tarkastelemalla saatiin tämän vaihtelun ($D_{75} - D_{25}$) suuruudeksi seitsemän prosenttiyksikköä (liite 3).

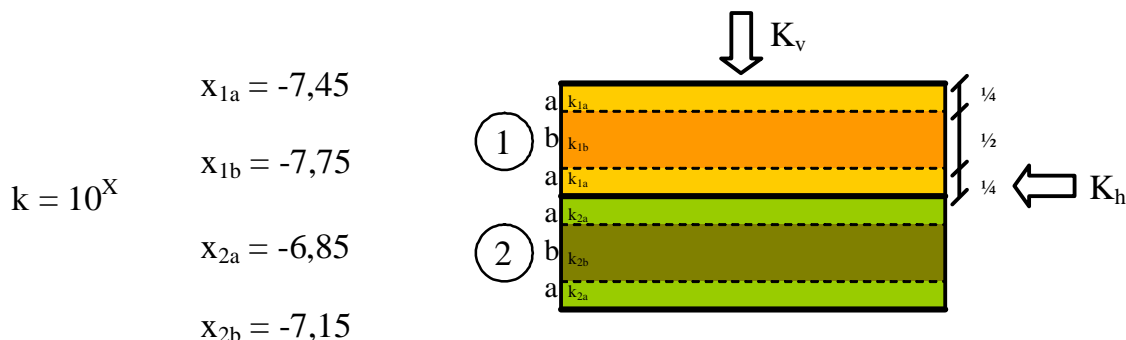


Kuva 6. Tiiviyksasteen (= sullonta-asteen) summafrekvenssikäyrä Arkkusaaren padolla ja siitä tarkasteluun valitut arvot. (Vahanne 1988)

Tiiviyksasteen 7 %-yksikön vaihtelu vastaa noin kolmannesta tiiviyksasteen mahdollisesta kokonaisvaihtelusta (75 ... 100 %). Tiiviyden vaikutus vedenläpäisevyykskertoimen eksponenttiin on enimmillään yksikön suuruinen (kuva 5). Kun tiiviyksasteen vaihtelu on noin kolmannes mahdollisesta vaihtelusta, on sen vaikutus vedenläpäisevyykskertoimen eksponenttiin noin 0,3 yksikköä.

2.4 Anisotrooppisuuden laskeminen

Rakeisuuden aiheuttamaa vaihtelua vedenläpäisevyykskertoimen eksponenttiin on päätetty kuvata taulukon 1 arvoilla. Rakeisuuden takia k-arvon eksponentti eroaa siis päällekkäisissä kerroksissa joko 0,6; 0,9 tai 1,5 yksikön verran, ääritapauksessa 2,2 yksikköä. Tiiviyden aiheuttama lisävaihtelu on 0,3 yksikköä kunkin kerroksen eri osissa. Kuvassa 7 on esitetty esimerkkiarvot anisotrooppisuuden laskemiseen, kun rakeisuuden vedenläpäisevyykskertoimen eksponenttiin aiheuttama vaihtelu on 0,6 ja tiiviyden 0,3. Kunkin materiaalikerroksen tiiviimmän keskiosan paksuudeksi on oletettu puolet materiaalikerroksen kokonaispaksuudesta. Laidoille jää vastaavasti neljäsoset.



Kuva 7. Vedenläpäisevyykskertoimen eksponentin määräytyminen rakeisuuden ja tiiviyden vaihtelun perusteella. Rakeisuuden aiheuttama vaihtelu on suuruudeltaan 0,6 ja tiiviyden 0,3.

Anne Leivo

30.5.2006

Kerroksellisen maan vedenläpäisevyyskertoimet määräytyvät kaavojen 2 ja 3 mukaan. K_h kuvaa vedenläpäisevyyskertoimen arvoa kerrosten suunnassa ja K_v kerroksia vasten kohtisuorassa suunnassa. Anisotrooppisuuden arvo saadaan laskemalla K_h / K_v .

$$K_h = \frac{\sum k_i b_i}{\sum b_i} \quad (\text{kaava 2})$$

$$K_v = \frac{\sum b_i}{\sum (b_i / k_i)} \quad (\text{kaava 3})$$

(Helenelund 1974, s. 259)

Taulukkoon 2 on koottu anisotropialle lasketut arvot. Kuvan 7 arvoilla on $K_h = 10^{-7,18}$ m/s ja $K_v = 10^{-7,42}$ m/s ja näistä laskettava anisotrooppisuus on 1,75. Tiiviyden vaihtelulle on käytetty arvon 0,3 lisäksi myös arvoa 0,4. Tiiviyden vaikutus padon anisotrooppisuuteen on pienempi kuin rakeisuuden aiheuttama vaihtelu. Rakeisuuden vaihdelleessa päällekkäisissä kerroksissa niin, että vedenläpäisevyyskertoimen eksponentit eroavat toisistaan 0,6 yksikön verran ($k = 10^X$, $\Delta x = 0,6$), on padon anisotrooppisuus noin 2. Rakeisuuden vaikutuksen noustessa arvoon $\Delta x = 0,9$ on anisotrooppisuus noin 3 ja arvolla $\Delta x = 1,5$ noin 9,5. Vedenläpäisevyyskertoimen äärimmäinen vaihtelu, $\Delta x = 2,2$, aiheuttaisi anisotrooppisuuden 45.

Taulukko 2. Rakeisuuden ja tiiviyden aiheuttama vaihtelu vedenläpäisevyyskertoimen eksponentissa sekä näiden perusteella laskettu anisotrooppisuuden arvo.

Anisotropia K_h / K_v	Vaihtelu	
	Rakeisuus	Tiiviyys
1,75	0,6	0,3
2,83	0,9	0,3
1,91	0,6	0,4
3,09	0,9	0,4
9,46	1,5	0,3
45,10	2,2	0,3

2.5 Epähomogeenisuus

On perusteltua olettaa, että ainakin osassa padoista tiivistyssydämen ala- ja yläosa on rakennettu ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavista materiaaleista. Eroista huolimatta molemmat saattavat täyttää työselityksessä annetut vedenläpäisevyysvaatimukset. Maanottoa voidaan joutua vaihtamaan, mikäli sopiva maa-aines on loppunut ensimmäisestä maanottoa paikasta. Moreenin laatu voi vaihdella huomattavasti yhdenkin ottopaikan sisällä, jos maa on lajittunutta. Myös loivan työsauman eri puolilla maa-aines voi olla peräisin eri paikoista, jolloin niiden vedenläpäisevyysominaisuudet ovat erilaiset. Näitä näkemyksiä tukevat jo aikaisemmin tässä työssä tarkastelun alaisena olleet vedenläpäisevyyskertoimien määritykset. Samalta patoväliltä mitatut k-arvot vaihtelevat hyvinkin paljon.

Anne Leivo

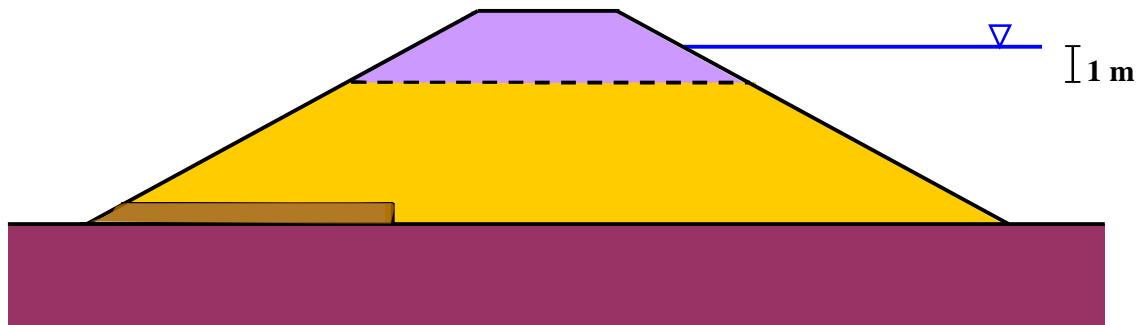
30.5.2006

Rakeisuuserosta johtuvan epähomogeenisuuden lisäksi padon yläosaa heikentää myös routa. Risto Kuusiniemen lisensiaatintyössään tutkimat patojen routavauriot osoittivat, että roudan aiheuttama maamateriaalin löyhtyminen on Suomen maapadoilla varsin yleistä. Melkein yhtä yleistä on routarajan ulottuminen padon yliveden, HW:n alapuolelle. Usein HW:n alitus on noin 30 – 40 cm, mutta myös yli puolen metrin alituksia esiintyi. Suurin HW:n alapuolelle ulottuva routaraja oli Kaitforsin padolla mitattu 70 cm. (Kuusiniemi 1995)

HW ei ole korkein padolle mitoitettu vedenpinta. Vesi saatetaan nostaa tulvan aikana lupaehtojen mukaisesti HW:n yläpuolelle. Ongelmatilanteita varten padoille on määritetty myös hätäylivesi.

Kuvassa 8 on esitetty periaatekuva mallinnuksessa käytettävästä padosta. Poikkileikkauksesta ilmenee padon koostuminen kahdesta eri materiaalista, joista ylempi johtaa vettä paremmin. Materiaaliraja on päätetty sijoittaa metrin vedenpinnan alapuolelle. Jos vedenpinnan aseman ajatellaan kuvaavan HW:tä ja materiaalirajan roudan syvyyttä, on materiaaliraja edellä esitettyjen routamittausten perusteella hieman liian alhaalla. Maa-aineksen rakeisuuden muuttumisen perusteella raja voisi olla kuitenkin millä korkeudella tahansa.

Epähomogeenisuuden vaikutus vedenläpäisevyyskerroimen arvoon on suhteellisen suuri. Taulukon 1 perusteella voi homogeenisen padon eri osien vedenläpäisevyyskerrointen ero muodostua noin 10...30-kertaiseksi ($\Delta x = 1 \dots 1,5$). Kun tiivistyssydämen alaosalta valitaan tutkitun aineiston keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin $10^{-7,3}$ m/s, saadaan löyhtyneen ja mahdollisesti karkearakaisemman yläosan vedenläpäisevyyskerroimiksi $10^{-6,3}$ m/s ja $10^{-5,8}$ m/s.



Kuva 8. Mallinnettavan padon yläosa on löyhemmästä ja mahdollisesti karkeammasta materiaalista. Kuivan puolen pohjasuodatin on puolen metrin paksuinen.

3 Suotovirtauksen mallintaminen

3.1 SEEP/W

Suotovirtauksen mallintamiseen on käytetty GEO-SLOPE Officen (version 5) ohjelmaa SEEP/W. Ohjelma käyttää elementtimenetelmää ja sillä voi ratkaista sekä tasapainotilanteen että ajan suhteen muuttuvia ongelmia. Nyt tehtävissä tarkasteluissa mallinnetaan pitkän ajan tasapainotilannetta.

Ohjelma tarvitsee lähtötiedoikseen mallinnettavan maan vedenläpäisevyysominaisuudet sekä reunaehdot. Vedenläpäisevyysominaisuuksia ovat mm. maan anisotrooppisuus ja vedenläpäisevyyskerroin. Vedenläpäisevyyskerroimen suuruus riippuu painekorkeudesta. 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:n etu on, että ohjelmalla pystytään mallintamaan uskottavasti myös kyllästymättömän vyöhykkeen virtausta. Tähän tarvittavaa tietoa vedenläpäisevyyskerroimen käyttäytymisestä negatiivisilla painekorkeuksilla voi olla kuitenkin hankala saada.

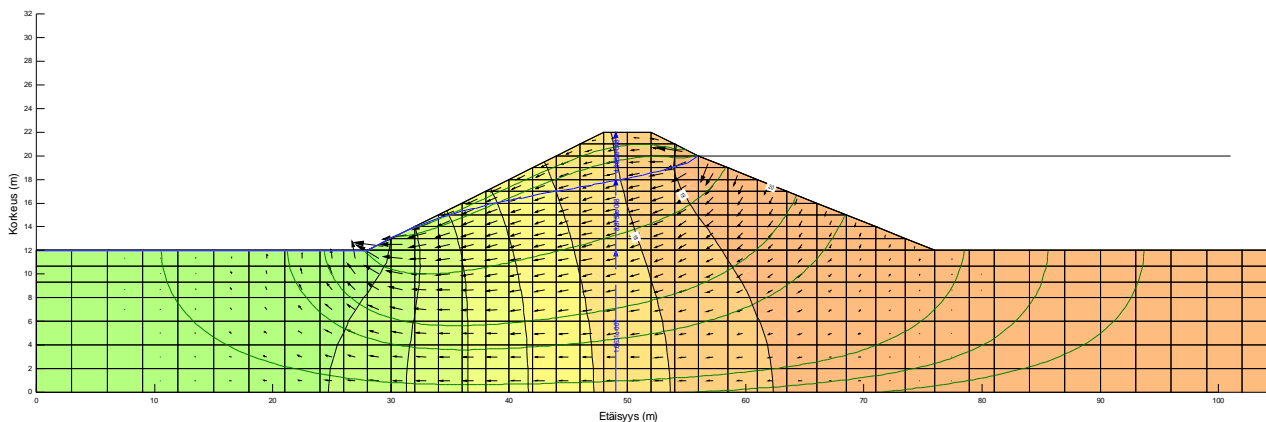
Ongelma mallinnetaan elementtimenetelmällä. Pato jaetaan elementtiverkkoon, jonka solmupisteissä laskenta suoritetaan. Elementit voivat olla kolmiota tai nelikulmioita. Verkkoa voidaan tihentää alueilla, joilla virtauksessa tapahtuvat muutokset ovat suuria. Maapadossa tällainen alue on pohjasuodattimen ympäristö. Kullekin elementille osoitetaan erikseen siinä käytettävät maan ominaisuudet (vedenläpäisevyys ja anisotrooppisuus).

Reunaehdot määrittävät ongelman tarkastelurajat. Reunaehdoja ovat mm. tunnetut painekorkeudet sekä virtausehdot. Pisteiden painekorkeus on se taso, jolle vesi asettuisi pisteeseen asennetussa pohjavesiputkessa. Altaan puolella painekorkeus reunapisteissä määräytyy altaan vedenpinnankorkeuden mukaan. Padon takana pohjavedenpinnan ajatellaan olevan maanpinnan tasolla. Kuivan luiskan solmupisteiden painekorkeudet määritetään iteroitaviksi, koska kohtaa, josta vesi tulee ulos luiskasta, ei tunneta. Virtausehto $Q = 0$ määrittää läpäisemättömän reunan. Näitä ovat yleensä tarkasteltavan ongelman oikea, vasen ja alareuna.

Laskentatuloksena ohjelma antaa kuvan virtaustilanteen ekvipotentiaaliviivoista sekä kyllästyspinnan. Käyttäjä voi täydentää kuvan virtausverkostoksi piirtämällä virtausviivoja haluamiinsa kohtiin. Veden virtausnopeus käy ilmi kuhunkin elementtiin piirretyn vektorin pituudesta. Kyllästyspinta osoittaa kyllästyneen ja kyllästymättömän vyöhykkeen rajan. Se ei ole virtausviiva, sillä veden reitti voi kulkea kyllästyneestä vyöhykkeestä kyllästymättömään ja taas takaisin, kyllästyspinnan läpi. Haluttaessa ohjelma selvittää myös padon läpi virtaavan veden määrän. Kuvassa 9 on esimerkki SEEP/W:n antamasta laskentatulostuksesta.

Anne Leivo

30.5.2006



Kuva 9. Esimerkki SEEP/W:n laskennan tuloksena antamasta virtausverkostosta.

3.2 Mallinnettu pato

3.2.1 Padon mitat

Mallinnettavan padon pohjana on käytetty Uljuan säännöstelyaltaan Arkkusaaren moreenipatoa. Uljuan allas sijaitsee Oulun lähetyvillä ja kuuluu Siikajoen vesistöön. Mallinnetun padon päämitat ovat seuraavat:

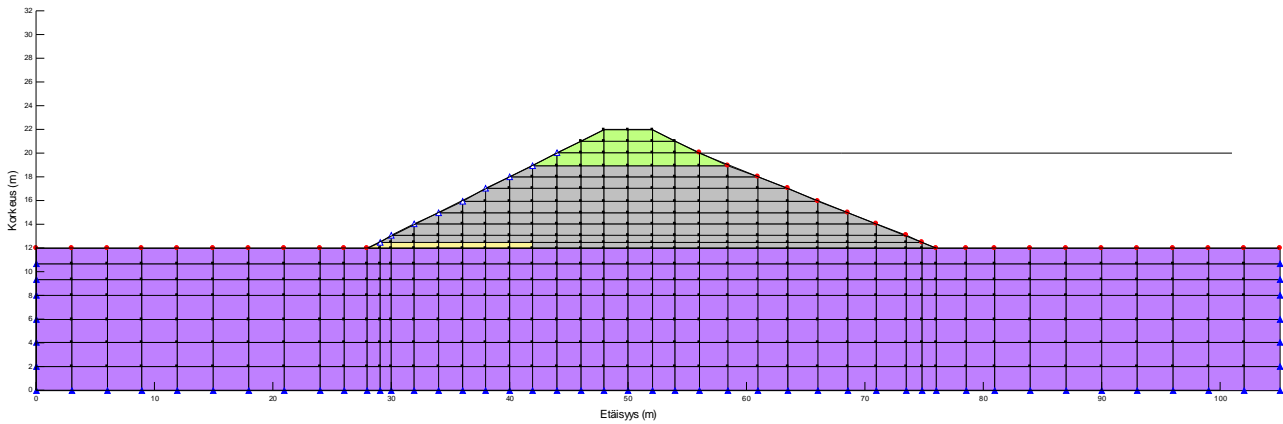
Padon rakenteellinen korkeus	10 m
Padotuskorkeus	8 m
Leveys	48 m
Kuivavara	2 m
Harjaleveys	4 m
Luiskakaltevuus	
märkä luiska	1 : 2,5
kuiva luiska	1 : 2

Poikkileikkauksessa ei ole huomioitu luiskaverhouksia, vaan tarkastelu kohdistuu ainoastaan padon vettä pidättävään osaan, tiivistyssydämeen. Todellisissa padoissa nyt poisjätetyt rakenteet lisäävät padon leveyttä, myös harjalta, sekä padon korkeutta. Poisjätetyillä rakenteilla voi olla vaikutusta myös roudan tunkeutumissyvyyteen. Veden suotautumisen kannalta tärkeä pohjasuodatin on otettu huomioon. Sillä on paksuutta 0,5 metriä ja se ulottuu kuivan luiskan alle 14 metrin matkalta. Padon juuressa pohjasuodatin päättyy maan pintaan, ei salaojaputkistoon.

Mallinnus on ulotettu noin 30 metriä padon kummallekin puolelle ja 12 metriä padon alle. Pohjaan ajatellaan olevan luonnonmaata, jonka tiiviys ei ole yhtä suuri kuin rakennetun ja konein tiivistetyn padon. Valtion padot on rakennettu pääosin maanvaraisiksi. Koska tässä tutkimuksessa haluttiin keskittyä erityisesti rakennetun padon ominaisuuksiin, mallinnetaan pohjamaata vakioarvoin. Kuvassa 10 näkyy mallinnetun padon rakenne ja käytetty elementtiverkko. Padossa elementtien korkeus on yksi metri. Pohjasuodattimen kohdalla verkkoa on tihennetty ja elementtien korkeus on 0,5 metriä.

Anne Leivo

30.5.2006



Kuva 10. Mallinnetun padon poikkileikkaus ja käytetty elementtiverkko.

3.2.2 Reunaehdot

Altaan vesisyvydeksi on oletettu 8 metriä. Käytetyssä koordinaatistossa vedenpinta on siten tasolla $y = 20$. Padon märän luiskan ja altaan pohjan solmujen reunaehdoksi tulee näin ollen 20 metrin painekorkeus. Kuivalla puolella pohjavedenpinnan oletetaan olevan maanpinnan tasossa. Maanpinnan solmujen reunaehdoksi muodostuu siis painekorkeus 12 metriä. Padon kuivan luiskan solmut jäävät ohjelman iteroitavaksi. Maan pohja ($y = 0$) ja mallinnuksen reunat oletetaan vettä läpäisemättömiksi ($Q = 0$).

3.2.3 Maamateriaalit ja vedenläpäisevyysfunktiot

Padon mallintamisessa käytetään neljää eri maamateriaalia: pohjamaa, suodatin, padon alaosa ja padon yläosa. Kullekin maamateriaalille annetaan vedenläpäisevyysfunktio sekä anisotrooppisuuden suuruus. Vedenläpäisevyysfunktiolla määritetään maan vedenläpäisevyyskerroimen arvo kyllästyneessä tilassa sekä kertoimen pieneneminen kyllästyspinnan yläpuolella, kun painekorkeus on negatiivinen.

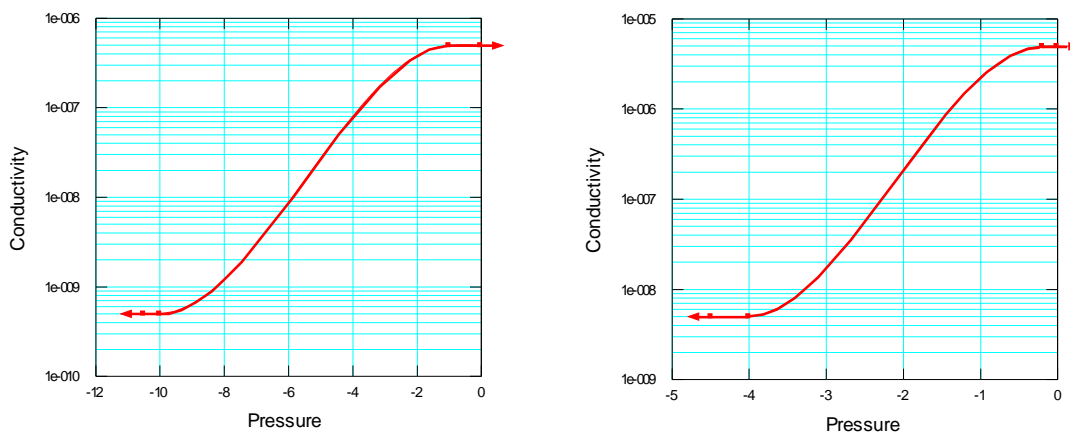
Usein suotovirtauksen laskennallinen tarkastelu rajoittuu vain kyllästyneeseen vyöhykkeeseen. Tarkastelutapaan viitataan tässä tutkimuksessa termillä **perinteinen tarkastelutapa**. Vedenläpäisevyyskerroimen kannalta perinteinen tarkastelutapa tarkoittaa sitä, että painekorkeuden muuttuessa negatiiviseksi kertoimen arvo pienenee niin rajusti, että veden virtaus kyllästymättömässä vyöhykkeessä on lähes nolla.

Kuvassa 11 on esimerkit mallinnuksessa käytetyistä vedenläpäisevyyden funktioista. Vasemmanpuoleinen vastaa muodoltaan padon ylä- ja alaosalle käytettyjä funktioita. Niissä vedenläpäisevyyskerroin pienenee tuhannesosaansa siitä, mitä se on kyllästyneessä vyöhykkeessä, kun imupaine 10 kPa saavutetaan (vastaa yhden metrin vesipatsasta). Kyllästysrajan yläpuolella vedenläpäisevyys pienenee siis niin nopeasti, että suotovirtaus rajoittuu lähes yksinomaan kyllästyneeseen vyöhykkeeseen. Muutokset kyllästyneen tilan vedenläpäisevyyskerroimen arvossa otetaan huomioon siirtämällä funktiota koordinaatistossa ylös- tai alaspäin; funktio sijaitsee koordinaatistossa ylempänä k :n arvolla $10^{-5,8}$ m/s, kuin arvolla $k = 10^{-6,5}$ m/s. Muoto pysyy samana.

Anne Leivo

30.5.2006

Kuvan 11 oikeanpuoleinen käyrä kuvaa suodatinmateriaalille käytettyä funktiota. Padon pohjasuodatin on rakennettu hyvin karkearakaisesta materiaalista. Näin ollen sen vedenläpäisevyys alenee negatiivisten painekorkeuksien puolella moreenia nopeammin. Suodattimen vedenläpäisevyyskerroin alenee tuhannesosaansa jo imupaineella 4 kPa. Pohjamaan oletetaan olevan kokonaan kyllästynyt ja siksi negatiivisten painekorkeuksien vedenläpäisevyyksiä ei sen kohdalla tarvita. Pohjamaan vedenläpäisevyysfunktioiksi riittää siis vakiofunktio, joka saa saman arvon ($k = 10^{-6.8}$ m/s) kaikilla paineilla.



Kuva 11. Vedenläpäisevyysfunktiot tiivistyssydämen hieman löyhtyneelle yläosalle (vasen) ja suodattimelle (oikea). Vedenläpäisevyyskerroin (Conductivity) on yksikössä m/s ja paine (Pressure) kPa.

Perinteisen tarkastelutavan lisäksi osa laskelmista on tehty myös käyttämällä SEEP/W:n omia materiaalimalleja, jotka ottavat paremmin huomioon kyllästymättömässä maassa tapahtuvan veden virtauksen. Nämä soveltuvat lähinnä vain padon ala- ja yläosalle, joissa kyllästymättömän maan virtauksella on merkitystä. Valmiita vedenläpäisevyysfunktioita on muokattu niin, että kyllästyneen maan vedenläpäisevyyskerroin, siis vedenläpäisevyyskerroimen arvo, kun paine ≥ 0 kPa, vastaa kullekin maamateriaalille määritettyjä arvoja. Funktioita on siis siirretty vertikaalisesti kuvan 13 koordinaatistossa. Funktioiden alkuperäiset nimet ovat Glacial Till (Compacted) ja Uniform Fine Sand #1. Esimerkit kaikista käytetyistä funktioista on esitetty liitteessä 4.

3.3 Tarkasteltavat tilanteet

Merkittävin suotovirtausta määrittävä tekijä on siis vedenläpäisevyyskerroin k . On kuitenkin syytä huomata, ettei käytettyjen kerrointen absoluuttisilla arvoilla ole niinkään merkitystä saatuihin tuloksiin, vaan paljon tärkeämmäksi muodostuvat käytettyjen kerrointen väliset suhteet.

Anne Leivo

30.5.2006

Mallinnettava moreenista tehty tiivistyssydän on päätetty jakaa kahteen osaan (kuva 12). Alaosa on rakentamisen aikaisessa kunnossaan, mutta yläosa on roudan löyhdyttämä ja/tai tehty karkeammasta materiaalista. Sen vedenläpäisevyyskertoimen eksponentti on 1-1,5 yksikköä suurempi kuin padon alaosan, eli se johtaa enemmän vettä kuin alaosa. Ylä- ja alaosan materiaalien vedenläpäisevyyskertoimien ero on siis 10...30-kertainen. Se voisi olla suurempikin, esimerkiksi satakertainen, kun ajatellaan taulukkoon 1 listattuja vedenläpäisevyyskertoimissa havaittuja suurimpia eroja. Äärimmäisten eroavaisuuksien on kuitenkin katsottu edustavan vain yksittäisiä kohtia padossa, ei niinkään suurempia massoja. Tästä syystä 10...30-kertainen ero vedenläpäisevyyskertoimissa on riittävä. Vertailun vuoksi laskenta tehdään myös aidosti homogeeniselle padolle, jossa padon ylä- ja alaosa ovat samaa materiaalia.

Toisin kuin alaosan, padon yläosan oletetaan olevan löyhtyneenä isotrooppinen. Isotrooppista tarkastelutapaa perustellaan sillä, että routa on löyhdyttäessään maata poistanut myös maan kerroksellisuuden, rakeisuusvaihtelun ja tiiviyserot, jotka olivat padon anisotropian syynä.

Padon tiiviimmälle osalle, tiivistyssydämen alaosalta, valitaan yksi vedenläpäisevyyskertoimen arvo $k = 10^{-7,3}$ m/s (tutkitun aineiston keskimääräinen vedenläpäisevyys), joka pidetään samana koko mallinnuksen ajan. Sen sijaan materiaalin anisotrooppisuutta muutetaan suoritettujen vedenläpäisevyystarkastelujen perusteella.

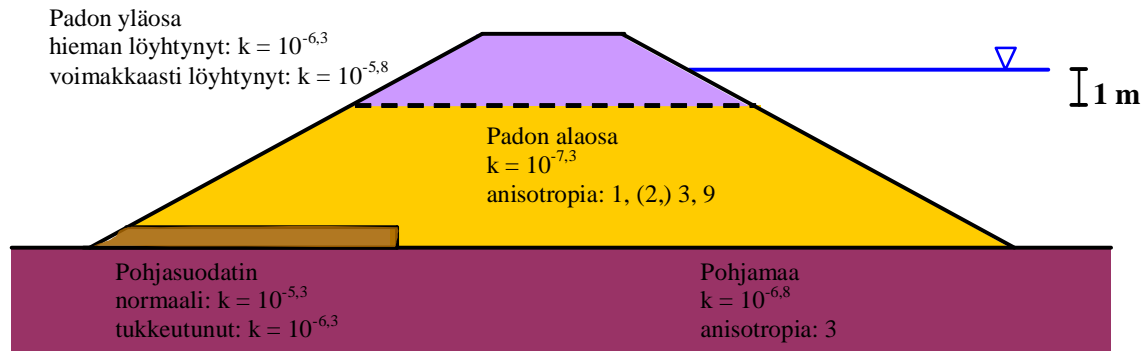
Käsin laskettaessa anisotrooppisuus otetaan huomioon jakamalla padon vaakageometria anisotrooppisuuden neliöjuurella. Jotta jako voitaisiin tehdä tasaluvuilla, on oppikirjatapauksissa päädytty käyttämään anisotrooppisuudesta arvoja 4, 9, 16 jne. Täysin vastaaviin tasalukuihin ei tarvitse tietokonelaskennan yhteydessä päätyä, koska se ei helpota tietokoneella tehtyä laskentatyötä, mutta tulosten vertailun ja miellellävyyden kannalta tutujen lukujen käyttäminen on eduksi. Anisotrooppisuutta on siten päädytty tarkastelemaan luvuilla 1 (isotrooppinen), 3 ja 9 (ks. taulukko 2). Anisotrooppisuuden arvo 2 näyttää laskelmien mukaan myös perustellulta tarkastelutilanteelta ja se vastaisi normaalikuntoisessa padossa vallitsevaa anisotrooppisuutta todennäköisemmin kuin arvo 3. Luvut ovat kuitenkin sen verran lähellä toisiaan, että niiden aiheuttama vaakageometriamuunnos olisi lähes yhtä suuri ($\sqrt{2} \approx 1,4$; $\sqrt{3} \approx 1,7$).

Mallinnuksessa käytettävä pohjamaa läpäisee vettä paremmin kuin sen päälle rakennettu pato. Pohjamaan vedenläpäisevyyskertoimen arvoksi on päätetty ottaa hiekkamoreenille tyypillinen $k = 10^{-6,8}$ m/s. Kertoimen eksponentti on näin ollen 0,5 yksikköä suurempi kuin padon alaosan ($k = 10^{-7,3}$ m/s). Pohjamaan anisotrooppisuudeksi on valittu arvo 3. Tällä suhteellisen suurella anisotrooppisuuden arvolla on tarkoitus ottaa huomioon mahdolliset eri tavoin lajittuneet kerrokset. Hiekkamoreenisessa pohjamaassa voi olla esimerkiksi karkeammin lajittuneita vyöhykkeitä, kuten suhteellisen tasarakeisia hiekkakerroksia.

Malliin kuuluu vielä puolen metrin paksuinen pohjasuodatin, joka ulottuu noin 14 metrin matkalta padon kuivan luiskan alle. Sen toimintaa tarkastellaan kahdella eri vedenläpäisevyyskertoimen arvolla. Patoturvallisuusohjeiden mukaisessa tilanteessa suodatinkerroksen vedenläpäisevyyskerroin on satakertainen padon runkoaineuksen vedenläpäisevyyskertoimeen verrattuna. Osittain tukkeutunut suodatinta mallinnetaan vedenläpäisevyyskertoimella, joka on vain kymmenkertainen rungon vedenläpäisevyyskertoimeen nähden. Mallinnuksessa käytettävät vedenläpäisevyyden ja anisotrooppisuuden arvot on esitetty kuvassa 12.

Anne Leivo

30.5.2006



Kuva 12. Padon läpi tapahtuvaa suotovirtausta tarkastellaan kuvassa esitettyjen vedenläpäisevyyskertoimen ja anisotropian arvojen eri yhdistelmillä. Lisäksi mallinnetaan homogeeninen pato, jossa padon ala- ja yläosalla on samat ominaisuudet.

4 Tulokset

Tuloksia tarkastellaan erikseen kunkin padon osan ja suotovirtaukseen vaikuttavan tekijän kannalta. Esitettyihin kuviin on piirretty eri laskentatilanteiden mukaiset kyllästyspinnat. Yksityiskohtaisemat kuvat kaikista SEEP/W-ohjelmalla tehdyistä laskelmista ovat liitteessä 5. Niissä näkyvät myös mallinnuksessa käytetty elementtiverkko, kunkin tilanteen virtausverkosto, virtauksen nopeutta kuvaavat vektorit ja tietyn poikkileikkauksen läpi kulkevan veden määrä.

4.1 Anisotrooppisuuden vaikutus

Kuvaan 13 on piirretty laskelmien perustapaus – homogeeninen ja isotrooppinen pato, jonka suodatin toimii – sekä vastaavanlainen tilanne anisotropian arvolla yhdeksän. Tämä anisotrooppisuuden lisäys on hyvin suuri; käsinlaskennassa se tarkoittaisi padon vaakageometrian jakamista kolmella. Kuvasta nähdään, ettei se kuitenkaan vaikuta padon toimivuuteen kovin dramaattisesti.

Anisotrooppisuuden kasvattaminen kallistaa virtausverkon ekvipotentiaaliviivoja ja tuo kyllästyspinnan lähemmäksi padon kuivaa luiskaa. Näin ollen kyllästyspinta saavuttaa myös pohjasuodattimen myöhemmin. Pohjasuodatin padottaa vettä jo isotrooppisessakin tapauksessa. Näin ollen 0,5 metriä paksu pohjasuodatin on alimitoitettu.

Hyväkuntoisessa padossa ei suhteellisen suurikaan anisotrooppisuus haittaa padon toimintaa. Sen sijaan suodattimen tukkeutuminen tai padon yläosan löyhtyminen ovat ilmiöitä, joiden vaikutuksia anisotrooppisuus vahvistaa merkittävästi. Kuvasta 14 nähdään, kuinka suodattimen tukkeutuminen yksinäänkin voi aiheuttaa lähteilyä kuivan luiskan juuressa. Padon yläosan löyhtyminen ei näy padon toiminnassa ulospäin yhtä nopeasti. Anisotrooppisuuden, yläosan tiiviiden ja suodattimen yhteisvaikutus onkin ratkaiseva padon toiminnan kannalta.

Ääritapauksissa anisotrooppisuuden kasvattaminen johtaa kyllästyspinnan siirtymiseen kuivaan luiskaan asti aiheuttaen lähteilyä luiskassa ja luiskan kyllästymisen vedellä (kuva 14). Molemmat, sekä lähteily että kyllästymisen, kasvattavat luiskan sortumisen vaaraa.

Muutamia laskelmia tehtiin myös anisotrooppisuuden arvolla 2, sillä tämä oli vaihtoehtoinen arvo kuvaamaan normaalikuntoisen maapadon tiivistyssydämen anisotrooppisuutta. Ero mallinnoiksiin, joissa käytettiin anisotrooppisuutta 3, osoittautui hyvin vähäiseksi.

Anne Leivo

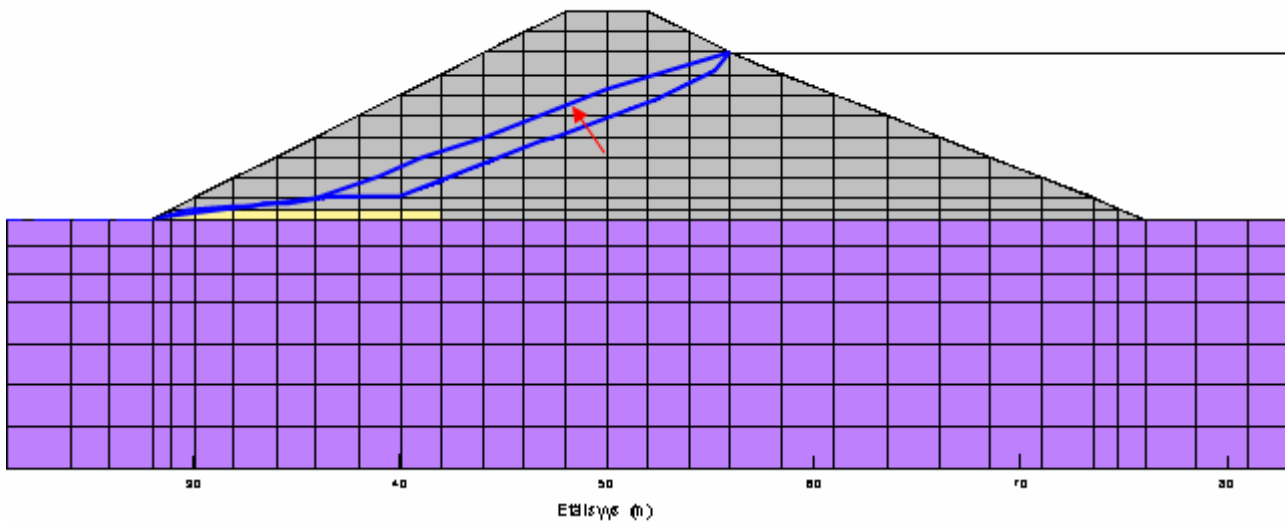
30.5.2006

Taulukko 3. Kuvassa 13 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerrointen arvot.

	Padon alaosa		Yläosa		Suodatin	
	1	2	1	2	1	2
Laskenta	1	2	1	2	1	2
Anisotropia	1	9	1	9	1	9
Vedenläpäisevyyskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-5,3	-5,3

Tiedostonimet

Laskenta 1 Harja ja pohja samaa 1_1
Laskenta 2 Harja ja pohja samaa 1_3



Kuva 13. Homogeeninen pato. Alempi viiva kuvaa kyllästyspinnan sijaintia padon ollessa isotrooppinen ja ylempi anisotropian arvolla 9. Kyllästyspinta siirtyy kohti padon kuivaa luiskaa, mutta ulkoapäin tarkasteltaessa padon toimivuudessa ei huomata eroa.

Anne Leivo

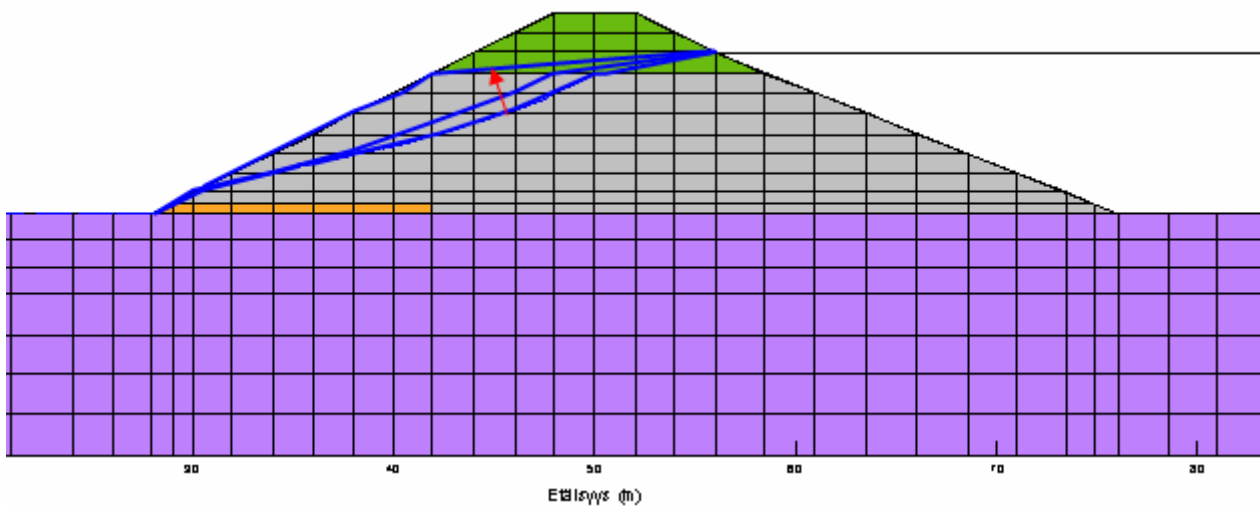
30.5.2006

Taulukko 4. Kuvassa 14 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerroimien arvot.

	Padon alaosa			Yläosa			Suodatin		
Laskenta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Anisotropia	1	3	9	1	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyyskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-6,3	-6,3	-6,3	-6,3	-6,3

Tiedostonimet

Laskenta 1 Suodatin tukossa harja ok 1_1
 Laskenta 2 Suodatin tukossa harja ok 1_2
 Laskenta 3 Suodatin tukossa harja ok 1_3



Kuva 14. Pohjasuodatin tukossa ja padon yläosa hieman löyhtynyt ($k = 10^{-6,3}$ m/s). Anisotrooppisuus kasvaa isotrooppisesta arvoon 9.

4.2 Padon yläosan vaikutus

Padon yläosan löyhtymistä on mallinnettu kahdella eri vedenläpäisevyykskerroimella; hieman löyhtynyt $k = 10^{-6,3}$ m/s ja voimakkaasti löyhtynyt $k = 10^{-5,8}$ m/s. Löyhtyneisyyden lisäksi vedenläpäisevyykskerroimissa on otettu huomioon mahdollisesti karkeampi rakennusmateriaali. Löyhtynyt yläosa on mallinnettu isotrooppisena.

Padon yläosan vaikutus suotovirtaukseen käy ilmi kuvista 15 ja 16, joista ensimmäisessä tarkastellaan isotrooppista patoa ja toisessa padon alaosan anisotropia saa arvon 3. Pohjasuodatin toimii molempien kuvien tarkasteluissa. Alimmat kyllästyspinnat kuvaavat tilannetta, jossa padon ylä- ja alaosa käyttäytyvät samoin ($k = 10^{-7,3}$ m/s). Keskimmäisten kyllästyspintojen kohdalla padon yläosa on hieman löyhtynyt ja sen vedenläpäisevyyskerroin k on kymmenkertainen padon alaosaan verrattuna. Ylimpien viivojen tapauksissa padon yläosa on voimakkaasti löyhtynyt ja sen k -kerroin on 30-kertainen padon alaosaan verrattuna.

Anne Leivo

30.5.2006

Padon yläosan löyhtyminen vaikuttaa veden suotovirtaukseen osittain samalla tavalla kuin anisotrooppisuuskin; se tuo kyllästyspintaa lähemmäksi kuivaa luiskaa ja vinouttaa ekvipotentiaaliviivoja. Kyllästyspinta tasaantuu kulkemaan pidemmän matkan löyhemmässä kerroksessa. Veden virtaus löyhtyneessä kerroksessa on nopeampaa kuin padon alaosassa.

Tilanne on kriittinen ainoastaan jälkimmäisen kuvan ylimmän kyllästyspinnan kohdalla, kun anisotropia on 3 ja padon yläosa voimakkaasti löyhtynyt ($k = 10^{-5,8}$ m/s). Kyllästyspinta käy niin lähellä kuivaa luiskaa, että vesi saattaa lähteillä luiskan yläosassa, aivan löyhtyneen ja tiiviin osan rajapinnassa. Vastaava tilanne saavutetaan myös hieman löyhtyneellä yläosalla ($k = 10^{-6,3}$ m/s), kun anisotrooppisuus on 9. Hautaperän padolla tämänkaltainen suotovirtaustilanne toteutui. Padon yläosassa maa oli ilmeisesti vettä läpäisevämpää kuin alaosassa, sillä kuivan luiskan yläosaan ilmestyi paikoitellen märkiä läiskiä.

Lähteily voi aiheuttaa luiskaan pieniä ja paikallisia juoksusortumia, jotka heikentävät patoa vähitellen. Vaikka pohjasuodatin onkin paksuudeltaan alimitoitettu (0,5 metriä) ja padottaa jonkin verran, se pelastaa tilanteen. Mallinuksissa suodatin toimii suodatinkriteerit täyttäen. Suodattimen tukkeutuminen johtaisi heti vaarallisempaan tilanteeseen.

Vaikkei löyhtynyt yläosa vielä aiheuttaisi vaarallisen näköistä suotovirtaustilannetta, on löyhtyminen padon pitkäaikaisen kunnon kannalta huono asia. Voimistunut virtaus voi aiheuttaa sisäistä eroosiota. Virtausnopeuden kasvaessa vesi tempaa reitiltään mukaansa yhä suurempia maarakeita, löyhdyttää patoa entisestään ja voimistaa suotovirtausta. Pikkuhiljaa padon läpi muodostuva eroosiosuoni voi aiheuttaa padon sortumisen.

Myös sade voi muuttaa padon vakavuutta. Mikäli kyllästyspinta on aivan kuivan luiskan tuntumassa kuten kuvassa 16, saattaa kuiva luiska muuttua rankkasateella paikoin veden kyllästämäksi. Kyllästyneelle maalle voidaan laskea luiskan kriittinen kaltevuus tasoliukupinnan sortumaa vastaan varmuuskertoimella $F = 1$:

$$\tan \beta = \frac{\gamma'}{\gamma' + \gamma_w} \tan \phi \approx 0,5 \tan \phi, \quad (\text{kaava 4})$$

jossa β on luiskan kaltevuus ja ϕ maan kitkakulma (Bowles, 1985). Luiskakaltevuudella 1:2 ($\beta = 26,6^\circ$) tulisi maan kitkakulman ϕ olla 45° , jottei luiska sortuisi märkänä.

Harjan löyhtymisen aiheuttamia riskejä, erodoitumista ja vakavuuden heikkenemistä, voidaan pienentää luiskasuodattimen ja oikeanlaisen pintaverhouksen avulla.

Anne Leivo

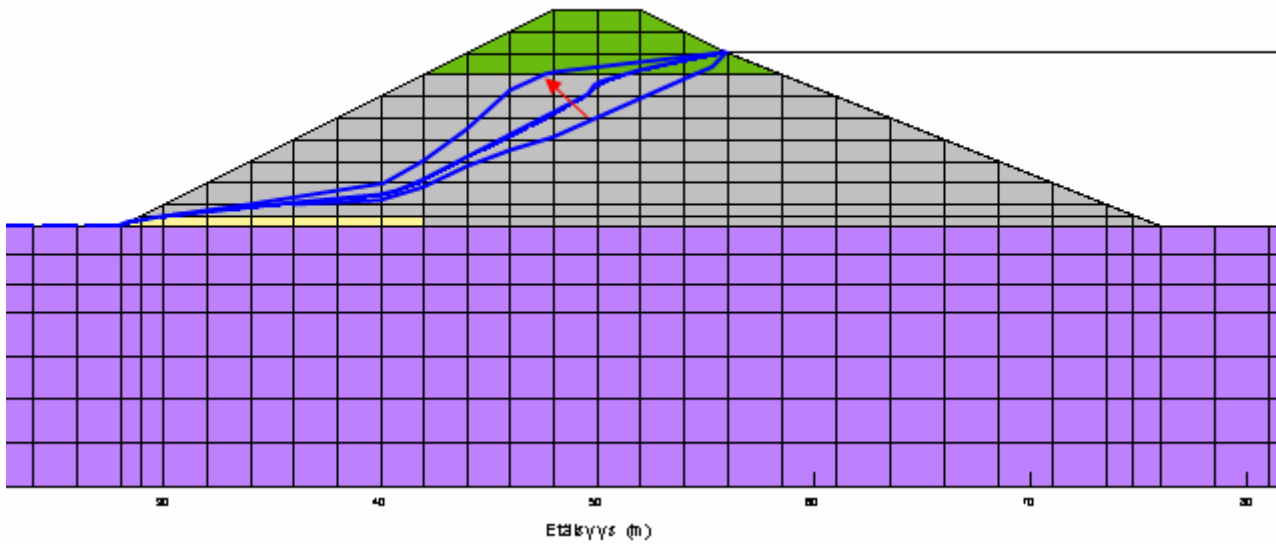
30.5.2006

Taulukko 5. Kuvassa 15 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerrointen arvot.

Laskenta	Padon alaosa			Yläosa			Suodatin		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Anisotropia	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyyskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-5,8	-5,3	-5,3	-5,3

Tiedostonimet

Laskenta 1 Harja ja pohja samaa 1_1
 Laskenta 2 Anisotrooppinen 1_1
 Laskenta 3 Harjan vaikutus 1_1



Kuva 15. Padon yläosan vaikutuksen tarkastelu isotrooppisilla materiaaleilla. Vain yläosan vedenläpäisevyykskerrointa on muutettu. Alimman kyllästyspinnan kohdalla padon yläosan $k = 10^{-7,3}$ m/s, keskimmaisessä $k = 10^{-6,3}$ m/s ja ylimmässä $k = 10^{-5,8}$ m/s.

Anne Leivo

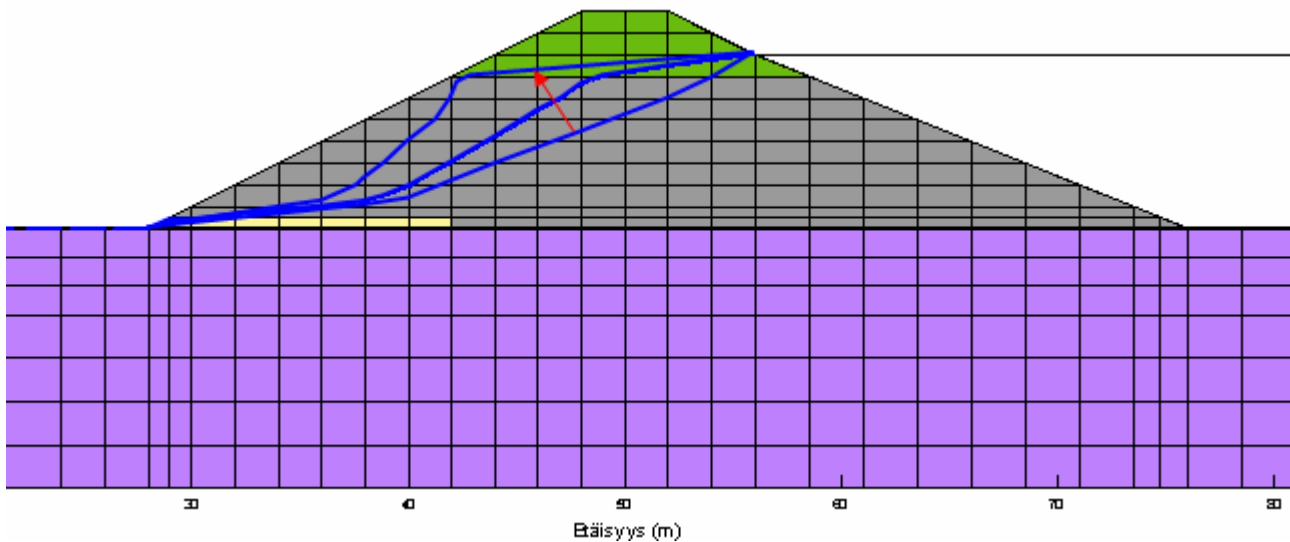
30.5.2006

Taulukko 6. Kuvassa 16 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerrointen arvot.

	Padon alaosa			Yläosa			Suodatin		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Laskenta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Anisotropia	3	3	3	3	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyykskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-5,8	-5,3	-5,3	-5,3

Tiedostonimet

- Laskenta 1 Harja ja pohja samaa 1_2
- Laskenta 2 Anisotrooppinen 1_2
- Laskenta 3 Harjan vaikutus 1_2



Kuva 16. Padon yläosan vaikutuksen tarkastelu, kun alaosan anisotropia on 3. Padon yläosan vedenläpäisevyyksarvot muuttuvat kyllästyspinnan mukaan: alin $k = 10^{-7,3}$ m/s, keskimäinen $k = 10^{-6,3}$ m/s ja ylin $k = 10^{-5,3}$ m/s. Ensimmäisessä tapauksessa myös padon yläosa on anisotrooppinen, jälkimmäisissä löyhentyntä yläosaa tarkastellaan isotrooppisena.

4.3 Tukkeutunut pohjasuodatin

0,5 metriä paksun pohjasuodattimen on jo aikaisemmin todettu padottavan vettä ja olevan siksi alimitoitettu. Padotus loppuu, kun pohjasuodattimen paksuutta kasvatetaan metriin. Tämä pätee kuitenkin vain tilanteisiin, joissa suodatin toimii patoturvallisuusohjeiden mukaisesti eli sen vedenläpäisevyys on satakertainen suojattavaan rakenteeseen nähden (Maa- ja metsätalousministeriö 1997).

Anne Leivo

30.5.2006

Tukkeutunutta suodatinta on mallinnettu vedenläpäisevyyskertoimella $k = 10^{-6,3}$ m/s, joka on vain kymmenkertainen suojuuttavan rakenteen, padon alaosan, vedenläpäisevyyteen nähden ($k = 10^{-7,3}$ m/s). Hydraulinen gradientti padosta suodattimeen pienenee ja suodatin padottaa entistä enemmän vettä. Kyllästyspinta laskee loivemmin ja suuntautuu lähinnä kuivaan luiskaan, ei niinkään pohjasuodattimeen (kuvat 17 ja 18). Vesi tulee luiskasta ulos noin 0,5 metriä pohjasuodattimen yläpuolella. Näin käy sekä isotrooppisessa tapauksessa että anisotrooppisuuden ollessa 3. Likimain tällainen tilanne toteutui Uljuan altaan Arkkusaaren padolla, jossa kyllästyspinnan ulottuminen kuivaan luiskaan oli havaittavissa pohjavesiputkista.

Tukkeutuneen pohjasuodattimen tapauksessa kyllästyspinta on paikoin kaksi metriä korkeammalla kuin mitä se on pohjasuodattimen toimiessa kunnolla. Anisotropia korostaa jonkin verran tukkeutumisen aiheuttamaa padotusilmiötä. Tämä on havaittavissa parhaiten vasta anisotropian kasvaessa arvoon 9. Padottamista voidaan lieventää, muttei poistaa, pohjasuodattimen paksuutta kasvattamalla. Lisämallinnukset osoittivat, että kaksimetrisenkin pohjasuodatin padottaa tukkeutuneena.

Kun kyllästyspinta sijaitsee padon juuressa lähellä maan pintaa, voi rankan sateen yllättäessä kuivan luiskan alaosa olla kokonaan veden kyllästämä. Paikallisten sortumien vaara kasvaa niin kyllästymisen kuin luiskan juuren lähteilyinkin takia, aivan samoin kuin löyhtyneen yläosan tapauksessa. Myös Bowlesin ehto luiskan kaltevuudelle pätee (kaava 4).

Mallinnuksia tehtiin myös laskentaohjelman vedenläpäisevyysfunktioilla, jotka ottavat huomioon virtauksen kyllästymättömässä vyöhykkeessä. Pohjasuodattimen tukkeutumista tutkittaessa saatiin näissä mallinnoissa hieman muista poikkeavia tuloksia. Yleisesti ottaen kyllästyspinta kulkee alempana, kun suotovirtaus kyllästymättömässä vyöhykkeessä sallitaan. Tukkeutuneen pohjasuodattimen tapauksessa kyllästyspinta kulkeekin pohjasuodattimen alueella korkeammalla kuin perinteisen tarkastelutavan laskelmissa. Jos kyllästymättömän vyöhykkeen virtauksen ajatellaan vastaavan paremmin todellista tilannetta padossa, niin suodattimen tukkeutuessa vesi tulee ulos kuivasta luiskasta herkemmin ja hieman ylempää kuin kuvat 17 ja 18 antavat ymmärtää.

Anne Leivo

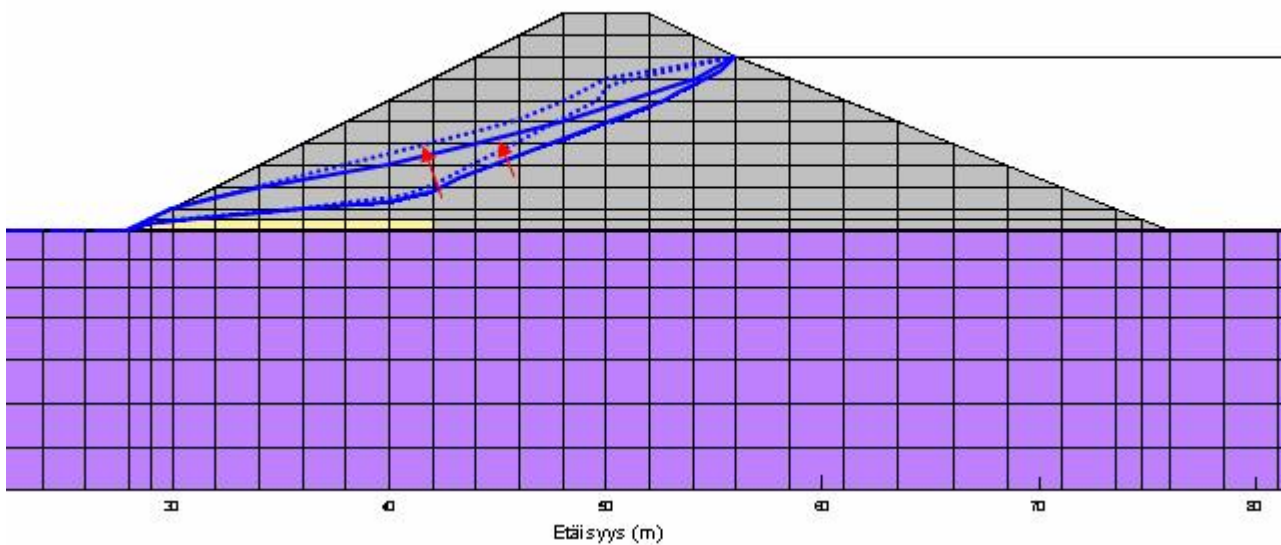
30.5.2006

Taulukko 7. Kuvassa 17 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerroinien arvot.

Laskenta	Padon alaosa				Yläosa				Suodatin			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Anisotropia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyyskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-6,3	-5,3	-6,3	-5,3	-6,3

Tiedostonimet

- Laskenta 1 Harja ja pohja samaa 1_1
- Laskenta 2 Harja ja pohja samaa 2_1
- Laskenta 3 Anisotrooppinen 1_1 (katkoviiva)
- Laskenta 4 Suodatin tukossa harja ok 1_1 (katkoviiva)



Kuva 17. Pohjasuodattimen tukkeutumisen vaikutus isotrooppisessa padossa. Yhtenäinen viiva: homogeeninen pato, padon ala- ja yläosalla on sama vedenläpäisevyyskerroin. Katkoviiva: padon yläosa on hieman löyhtynyt.

Anne Leivo

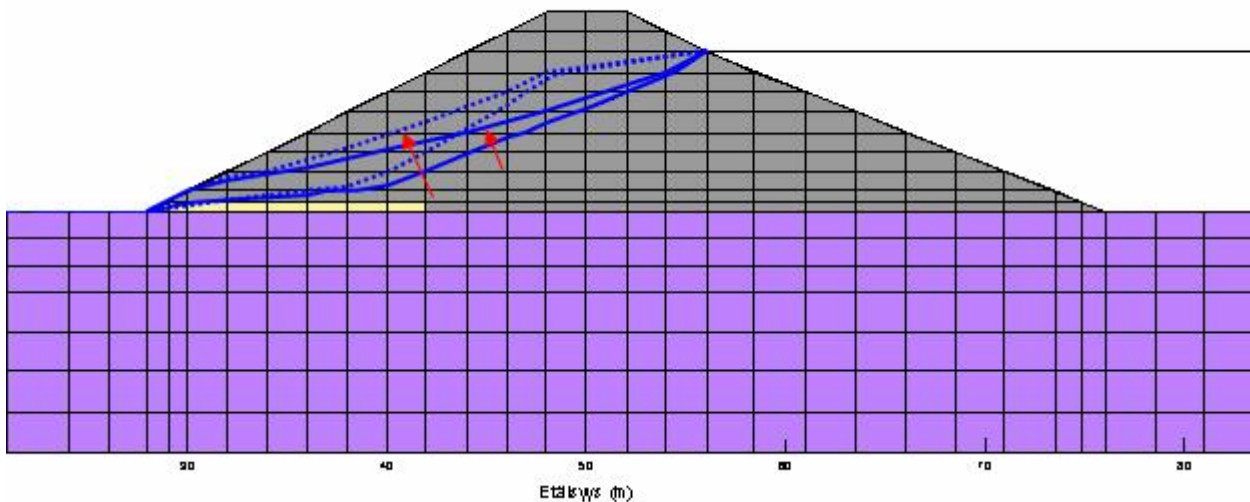
30.5.2006

Taulukko 8. Kuvassa 18 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerroimien arvot.

Laskenta	Padon alaosa				Yläosa				Suodatin			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Anisotropia	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyys- kerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-6,3	-5,3	-6,3	-5,3	-6,3

Tiedostonimet

- Laskenta 1 Harja ja pohja samaa 1_2
- Laskenta 2 Harja ja pohja samaa 2_2
- Laskenta 3 Anisotrooppinen 1_2 (katkoviiva)
- Laskenta 4 Suodatin tukossa harja ok 1_2 (katkoviiva)



Kuva 18. Pohjasuodattimen tukkeutumisen vaikutus, kun padon alaosan anisotropia on 3. Yhtenäinen viiva: homogeeninen pato, padon ala- ja yläosalla on sama vedenläpäisevyyskerroin. Katkoviiva: padon yläosa on hieman löyhtynyt. Pohjasuodattimen vaikutus on likimain yhtä suuri isotrooppisessa tapauksessa ja anisotropialla 3.

4.4 Pohjasuodattimen ja padon yläosan yhteisvaikutus

Tukkeutunut pohjasuodatin padottaa vettä ja kyllästää kuivan luiskan alaosan. Löyhtynyt yläosa aiheuttaa lähteilyä löyhtyneen ja tiiviimmän osa rajapinnassa ja tuo kyllästyspinnan kokonaisuudessaan lähemmäksi kuivaa luiskaa. Näiden kahden yhdistelmällä on siis padon toiminnan kannalta erittäin huonot seuraukset, jotka saattavat johtaa nopeasti padon sortumiseen.

Suodattimen ja padon yläosan yhteisvaikutusta on tarkasteltu useilla laskelmilla. Löyhtyneelle padon yläosalle on käytetty vedenläpäisevyykskerroimia $10^{-6,3}$ m/s ja $10^{-5,8}$ m/s. Molemmilla arvoilla mallinnus on suoritettu sekä normaalisti toimivalla ($k = 10^{-5,3}$ m/s) että tukkeutuneella ($k = 10^{-6,3}$ m/s) suodattimella. Lisäksi anisotrooppisuutta on vaihdeltu.

Anne Leivo

30.5.2006

Pohjasuodattimen tukkeutuminen nostaa kyllästyspintaa heti sen verran, että vesi tulee ulos kuivan luiskan alalaidasta noin 0,5 metriä pohjasuodattimen yläpuolella. Tämä toteutuu jo isotrooppisessa tapauksessa. Samanaikainen padon yläosan löyhtyminen voimistaa yläosan läpi tapahtuvaa suotovirtausta ja tuo kyllästyspintaa kokonaisuudessaan lähemmäksi padon kuivaa luiskaa. Yläosan ollessa voimakkaasti löyhtynyt (isotrooppinen tapaus) kyllästyspinta tulee niin lähellä kuivaa luiskaa, että luiskan alaosa on veden kyllästävä pidemmältä matkalta ja vesisade voi kyllästää koko luiskan. Kasvatettaessa anisotrooppisuutta kolmeen vesi tulee ulos myös padon ylä- ja alaosan rajalla (kuva 19, lyhyt katkoviiva). Kuiva luiska on käytännössä kokonaan veden kyllästävä.

Kuvassa 19 on mallinnettu kolme tilannetta, joissa kaikissa padon alaosan anisotropia on 3. Yhdessä näistä suodatin toimii (laskenta 2), eikä vesi tule ulos padon juuresta. Kahdessa tilanteessa (laskennat 2 ja 3) padon yläosa on voimakkaasti löyhtynyt ja laskennassa kolme kyllästyspinta tulee selkeästi kuivan luiskan reunaan asti. Laskentaohjelma hävittää luiskasta ulos tulevan veden, jolloin se ei mallinnuksessa enää kastele ja kyllästyä maata pinnalta käsin. Tämä huomioon ottaen laskennan kolme tulos näyttäisi vielä synkemmältä. Laskennassa yksi pohjasuodatin on tukkeutunut ja padon yläosa hieman löyhtynyt. Kyllästyspinta on niin lähellä luiskaa, että vesisade kyllästänee luiskan suurelta osin.

Anne Leivo

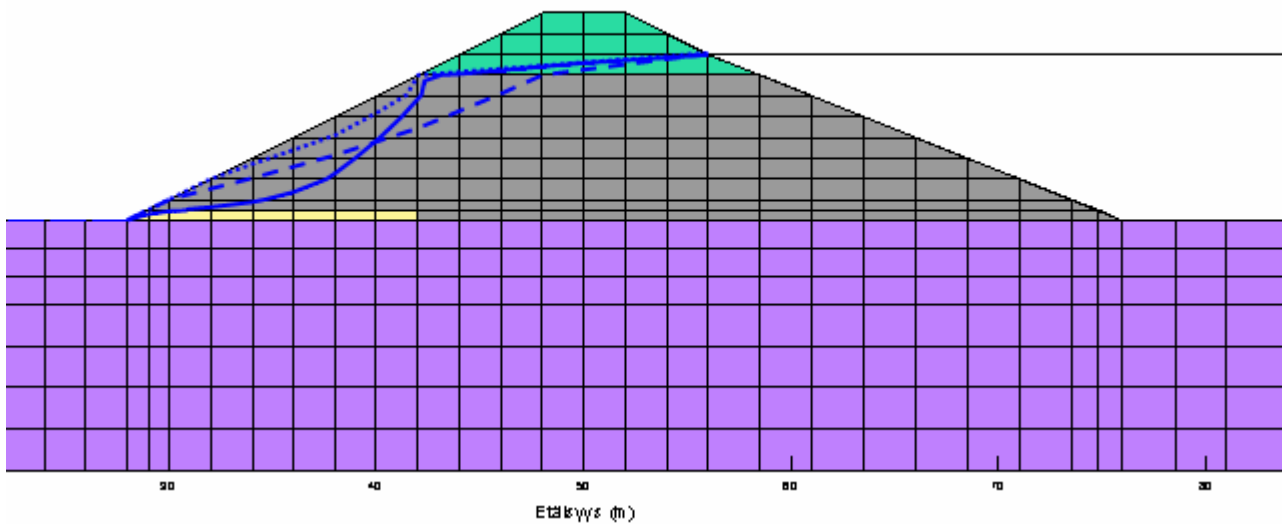
30.5.2006

Taulukko 9. Kuvassa 19 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyykskerrointen arvot.

Laskenta	Padon alaosa			Yläosa			Suodatin		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Anisotropia	3	3	3	1	1	1	1	1	1
Vedenläpäisevyykskerroin $k = 10^x$, x	-7,3	-7,3	-7,3	-6,3	-5,8	-5,8	-6,3	-5,3	-6,3

Tiedostonimet

- Laskenta 1 Suodatin tukossa harja ok 1_2 (katkoviiva)
- Laskenta 2 Harjan vaikutus 1_2
- Laskenta 3 Suodatin tukossa harja löyhä 1_2 (lyhyt katkoviiva)



Kuva 19. Padon yläosan ja pohjasuodattimen yhteisvaikutus, kun padon alaosan anisotropia on 3. Kaikissa mallinnetuissa tilanteissa padon toiminta on heikentynyt ja lähteilyä ilmenee kuivan luiskan juuressa ja/tai ylä- ja alaosan rajalla.

4.5 Kyllästymättömän vyöhykkeen virtauksen vaikutus

Lähes kaikki tähän asti esitetyt laskelmat toistettiin myös niin, että veden virtaus kyllästymättömässä vyöhykkeessä otettiin huomioon. Tämä tapahtui määrittelemällä vedenläpäisevyyksfunktioita niin, ettei vedenläpäisevyykskerroin pienene dramaattisesti heti kyllästyspinnan yläpuolella, painekorkeuden muuttuessa negatiiviseksi. Padon ala- ja yläosan vedenläpäisevyyksfunktioina käytettiin ohjelman valmiita funktioita, jotka on esitetty liitteessä 4. Yleisesti ottaen tarkastelutavan muutos näkyi tuloksissa kyllästyspinnan alenemisena (kuva 20). Tämä johtuu siitä, että vesi mahtuu nyt virtaamaan myös kyllästymättömässä vyöhykkeessä, eikä kaiken padon läpi virtaavan veden tarvitse pakautua kyllästyneeseen vyöhykkeeseen, kyllästyspinnan alapuolelle.

Anne Leivo

30.5.2006

Laskelmissa on havaittavissa samat ilmiöt kuin perinteistäkin tarkastelutapaa käytettäessä. Pato käyttäytyy edelleen samoin, eivätkä laskelmien tulokset muuttuneet oleellisesti, vaikka mallintamisperusteet olivat hieman erilaiset. Virtauksen salliminen kyllästymättömässä vyöhykkeessä näyttää jonkin verran lieventävän padon epähomogeenisuuden (padon yläosan) ja anisotrooppisuuden aiheuttamia vaikutuksia. Suodattimen tukkeutumisen vaikutuksia tarkastelutavan muutos ei lieventänyt, vaan jopa hieman vahvisti.

On syytä muistaa, ettei kyllästyspinnan sijainti kerro vielä kaikkea padon toiminnasta. Kun suotovirtausta tapahtuu myös kyllästymättömässä vyöhykkeessä, on maa paljon kosteampaa kyllästyspinnan yläpuolella kuin mitä perinteisellä tarkastelutavalla. Vaikka kyllästyspinta sijaitseekin alempana, pato lienee näin mallinnettuna alttiimpi sateen aiheuttamalle vettymiselle ja yhtä altis pintarosiolle ja –sortumille. Pintaverhousta ja luiskasuodatinta tarvitaan siis edelleen varmistamaan padon toimintakuntoa, kun patorakenteiden ominaisuudet eivät vastaa suunniteltuja.

Taulukko 10. Kuvassa 20 esitettyjen kyllästyspintojen laskemisessa käytetyt anisotropian ja vedenläpäisevyysero-kerroin $k = 10^x$ arvot.

	Padon alaosa		Yläosa		Suodatin	
	1	2	1	2	1	2
Laskenta	1	2	1	2	1	2
Anisotropia	3	3	1	1	1	1
Vedenläpäisevyysero-kerroin $k = 10^x, x$	-7,3	-7,3	-6,3	-6,3	-5,3	-5,3

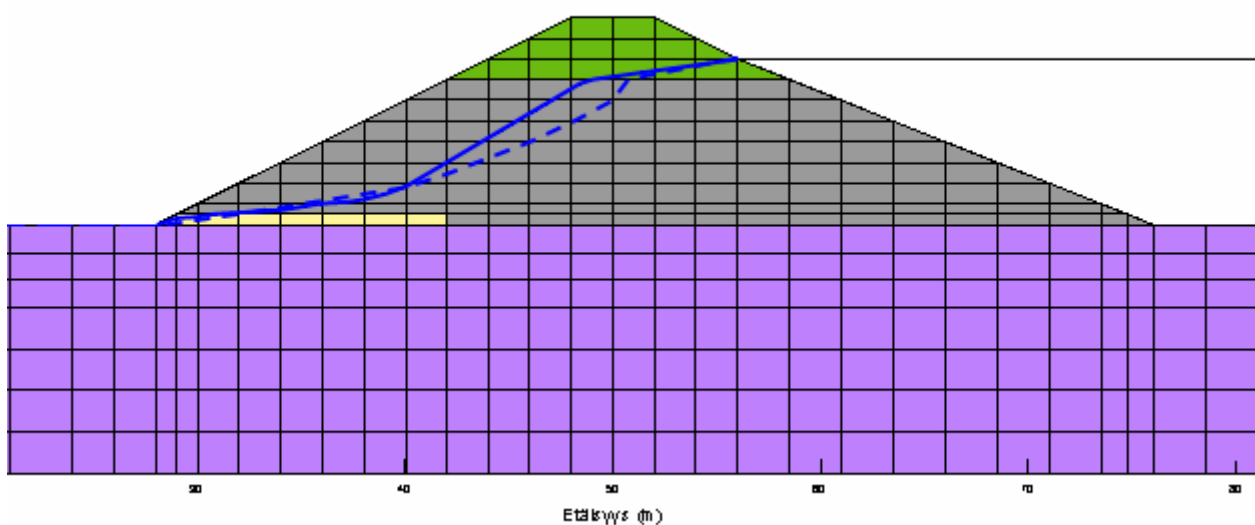
Tiedostonimet

Laskenta 1

Anisotrooppinen 1_2

Laskenta 2

Anisotrooppinen 1_2b (katkoviiva)



Kuva 20. Kun veden virtaus sallitaan myös kyllästymättömässä vyöhykkeessä, painuu kyllästyspinta jonkin verran alemmaksi. Yhtenäinen viiva: perinteinen tarkastelutapa. Katkoviiva: vesi virtaa myös kyllästymättömässä vyöhykkeessä.

5 Johtopäätökset

Maapato on lähes poikkeuksetta anisotrooppinen ja ainakin joltakin osaltaan epähomogeeninen. Tavanomainen anisotrooppisuus ja epähomogeenisuus ovat padon ominaisuuksia, eivät rakennusvirheitä.

Mallinuksissa tutkittiin padon anisotrooppisuuden, epähomogeenisuuden ja pohjasuodattimen tukkeutumisen vaikutuksia padon läpi tapahtuvaan suotovirtaukseen. Anisotrooppisuuden vaikutus yksinään ei ole kovin merkittävä. Niin ikään pelkän epähomogeenisuuden, padon yläosan suuremman vedenläpäisevyyden, vaikutukset osoittautuivat suhteellisen vähäisiksi.

Mallinuksissa käytetty tavanomainen 0,5 metriä paksu pohjasuodatin osoittautui liian pieneksi. Liian ohuena se ei pysty johtamaan kaikkea ala- ja yläpuolelta tulevaa vettä, vaan padottaa jonkin verran. Suodattimen tukkeutuminen yksinäänkin heikentää padon kuntoa merkittävästi. Vesi tulee herkästi luiskasta ulos, vaikka suodattimen paksuutta lisätäänkin. Kuivan luiskan kyllästyminen vedellä lisää luiskan sortumisen varaa.

Anisotrooppisuuden, epähomogeenisuuden ja pohjasuodattimen yhteisvaikutus on ratkaisevaa padon toiminnan kannalta. Ilmiöt vahvistavat toistensa vaikutuksia ja ongelmat kasvavat. Anisotrooppinen pato on herkempi padon yläosan löyhtymisen ja pohjasuodattimen tukkeutumisen aiheuttamille vaikutuksille kuin isotrooppinen pato. Ongelmien seurauksena voi olla luiskan vettyminen ensin pohjasuodattimen yläpuolelta ja padon ylä- ja alaosan rajapinnasta sekä mahdollinen sisäinen eroosio löyhtyneen yläosan alueella. Kyllästyspinnan siirtyessä edelleen lähemmäksi kuivaa luiskaa, voi koko luiska kyllästyä vedellä sateen sattuessa. Ääritapauksessa kyllästyspinta kulkee kuivaa luiskaa pitkin. Kaikki luetellut seuraukset heikentävät padon vakavuutta eli lisäävät sen sortumavaaraa.

Ilmi tulleita ongelmia voidaan hoitaa vyöhykepatoa muistuttavalla rakenteella. Periaatteena on, että luiskan läpi tulevan suotovirtauksen ottaa vastaan luiskasuodatin, jonka päälle rakennetaan luiskaverhous tai tukipenger. Rakenne suojaa kuivaa luiskaa estäen suotovirtauksen aiheuttamat paikallissortumat. Sopiva ratkaisu ongelmiin selvitetään patokohtaisesti.

Anne Leivo

30.5.2006

LÄHTEET

- [1] Bowles, J. 1985. Physical and Geotechnical Properties of Soils, 2. painos. Singapore. McGraw-Hill, Inc. 578 s.
- [2] Das, B. M. 1987. Advanced Soil mechanics, 2. painos. Singapore. McGraw-Hill Book Company. 511 s.
- [3] GEO-SLOPE International Ltd. 1991-2002. SEEP/W for finite element seepage analysis, User's Guide, Version 5. Calgary. GEO-SLOPE International Ltd. 547 s.
- [4] Helenelund, K.V. 1974. Maarakennusmekaniikka, 4. painos. Otaniemi. Otakustantamo. TKY/Otapaino 137. 278 s.
- [5] Kuusiniemi, R. 1995. Maapadon harjan routiminen ja routasuojauksen mitoitus, lisensiaaintyö. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Teknillinen korkeakoulu. 310 s.
- [6] Körkkö, R., Loukola, E., Maijala T. 1983. Hautaperän maapadon varmuuden tarkistus. Helsinki, Vesihallitus, Tiedotus 228. 67 s.
- [7] Maa- ja metsätalousministeriö, 1997. Patoturvallisuusohjeet. Helsinki. MMM:n julkaisuja 7/1997. 90 s.
- [8] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. 1985. Geomekaniikka I. Espoo. RIL 157-I. 479 s.
- [9] Uljuan allas, Arkkusaaren ja Tulisaaren patojen turvallisuuskansio, osat I ja II. Suomen ympäristökeskus.
- [10] Vahanne, P. 1988. Perustarkastusselvitys, Uljuan altaan patoturvallisuus. Espoo. VTT, Geotekniikan laboratorio. 29 s.

Anne Leivo

30.5.2006

Liitteet

- 1 Määritetyt vedenläpäisevyyskertoimen eksponentit Uljuan altaalla (taulukko)
- 2 Vedenläpäisevyyskertoimen vaihtelua kuvaavien tyyppiarvojen määräytyminen (taulukko)
- 3 Määritetyt tiiviysasteen arvot Uljuan altaalla (taulukko)
- 4 Käytetyt vedenläpäisevyysfunktiot (kuvaajat + taulukot)
- 5 Kaikki SEEP-suotovirtauslaskelmat (kuvat)

HUOM Liitteitä ei esitetä tässä "nettiversiossa"