

Ilma maassa ja suotoveden yhtälöt

S.S.H. Kasi

Geofysiikan osasto, Helsingin yliopisto

Abstract

Soil air and equations of percolating water. Observations and air flow measurements have shown that it is necessary to use the infiltration and percolation calculation methods for both the water and air of the unsaturated soils. The piston flow method seems to be of importance. An introduction to the water-air models of Morel-Seytoux is presented.

1. JOHDANTO

Pohjaveden yläpuolella maassa on ilmaa. Kasi (2001, 2003, 2004) on tehnyt havaintoja harjuissa ja mäillä isokivisessä huokoisessa maastossa tapahtuvista ilman virtauksista. Näillä harjuilla tai mäissä talvisaikaan ihan keskellä talvea ilman lämpötilasta riippumatta maasta nousee lämmintä ilmaa joka sulattaa lumen ja kesällä päinvastoin samoin kohdin ilmaa virtaa sisälle maahan. Mäkien ja harjujen juuressa virtauksen on havaittu kesällä tapahtuvan ulos harjasta (Okko 1957, Kasi, 2001, 2004). Pohjavesi näin paikoin on useiden kymmenien metrien syvyydessä. Ilman ulosvirtaus on selvä myös harjuilla olevissa supissa (Kasi 2004), joissa harjasta tullut ilma jäähdyyttää koko supan. Voimakas sadetapahtuma kesällä 2004 selvästikin lisäsi ulosvirtauksen voimakkuutta (Kasi 2004). Ainakin talvella 2005 Lammin Mustasupan pohjalla oli havaittavissa luntasulattava ilmavirtaus. Sisällä harjuissa ja mäissä on tällöin ylipainetta ulkoilman paineeseen nähden ja syntyy ulosvirtaus. Ylipaineen merkittävä syy on pohjavettä kohti vajoavat sulamis- ja sadevedet.

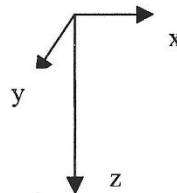
Kun maaperä on suhteellisen tasainen ja kerroksellinen, on oletettavissa, että maanilman on vaikeampi syrjäytyä vajoavan suotoveden tieltä. Vajovesi aiheuttaa alempiin ilma- ja vesikerroksiin paineen, joka voi siirtyä kapillaarivyöhykkeeseen ja saada aikaan pohjaveden pinnan nousun (Grip ja Rodhe, 1988, Morel-Seytoux, 1973). Saattaa olla, että sateen jälkeen syvässä pohjavedessä ei ole mitään nousun merkkejä (Grip ja Rodhe, 1988). Grip ja Rodhe erottavat kolme eri nopeutta: vesihuikkasten nopeuden v_h , Darcyn nopeuden q ja paineen siirtymisnopeuden v_p . He antavat tyypillisinä arvoina: $q = 1$ mm/h, $v_h = 4$ mm/h ja $v_p = 100$ mm/h. Suuretta q (vesimäärä pinta-alayksikön läpi) voisi kutsua yksinkertaisesti virraksi (Vesivuo ei vaikuta yhtä hyvältä kuin vesivirta tässä yhteydessä).

Sulamis- ja sadevesi imeytyy maahan ja kyllästää sen. Useinkin on erotettavissa suotoveden eturintama. Toisaalta vesi löytää kanavia, jotka täyttyvät ensiksi sormimaisesti. Rintamavirtausta on seurattu veden ^{18}O -isotooppipitoisuuksien avulla (Grip ja Rodhe, 1988). Sama voisi hyvinkin tapahtua mittaamalla maan vesinäytteiden ilmapitoisuutta (Kasi, 1990), ilmeisesti parhaiten, argonpitoisuutta.

Maaveden suotautumisen ja vajoamisen hyvä tietokonemallinnus on vaikeaa. Viime aikoihin asti maan ilman vaikutus on pääasiassa sivuutettu.

2. MAAN ILMANJOHTAVUUS

Kokoonpuristumattoman fluidin (neste tai kaasu, tiheys ρ) virtavektorille q syvyys z -suuntaisen painovoiman (kiihtyvyyden g) vaikuttaessa pätee (Morel-Seytoux, 1973) Darcy'n laki:



$$\mathbf{q} = -\frac{K}{\rho g} \nabla p + K \mathbf{e}_z, \quad (1)$$

jossa ∇p on fluidin painegradientti ja $\mathbf{e}_z$ vertikaalisuunnan (alas) yksikkövektori. q on energiakorkeuden

$$h = \frac{p}{\rho g} - z \quad (2)$$

negatiivinen gradientti (kaava 1) kerrottuna maan johtavuuskertoimella

$$K = \frac{k \rho g}{\mu} \quad (3)$$

Tiheys ρ ja viskositeetti μ tässä veden tai kaasun johtavuuden suureissa ovat fluidin suureita, kun taas k on maa-aineen suure: läpäisevyys.

Kun kyseessä on kaasu kuten ilma, kokoonpuristumattomuus-oletusta ei useinkaan ole syytä tehdä, siis $\rho = \rho(p)$ ja kaava (2) voidaan korvata Hubbertin (1940) potentiaalilla

$$H = \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho g} - z. \quad (4)$$

Morel-Seytoux (1973) osoittaa että kaava (1) pätee myös tällöin.

Green ja Ampt (1911) ovat mitanneet hiedan, hiuen ja saven ilman- ja vedenjohtavuudet, kun näytteet olivat aluksi kuivia. Koska k on maa-ainesta karakterisoiva suure, pitäisi heidän tuloksistaan laskettavien k -arvojen ($k = K\mu/\rho g$) suhteen olla 1. He saivat

Maalaji	hieta	hiue	savi
k_i/k_v	2	3-6	14

jossa alaindeksi i tarkoittaa ilmaa ja v vettä. He mainitsevat, että puhtaalle hiekalle arvo on 1, koska silloin veden kolloidiset sidokset (siis kostusvaikutukset) ovat vähäiset, ja että suhde voi savelle olla arvoa 14 suurempi.

3. VAKIO ILMANPAINEN

Jos ilmanpaine maassa ei missään vaiheessa pääse yhtään kasvamaan, niin voidaan olettaa, ettei ilma vaikuta veden virtaukseen, ja käyttää pelkästään vesilaskua. Silloin maan vesi-suureet voidaan ratkaista sijoittamalla Darcyn virta (1) vesimassan tasapainoyhtälöön

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} = n \frac{\partial S}{\partial t} \quad (5)$$

n on huokoisuus ja S veden osuus huokostilasta. Saadaan Richards'in kaava.

Richards (1931) kirjoittaa laboratoriomittaustensa koeolosuhteista: "Air in the column was at atmospheric pressure". Kokeissa näytteiden ylä ja alapuolella oli niiden kokoa hieman laajemmat tiilikäppaleet. Suorakulmaisten näytteiden pituudet olivat 4,0...4,5 cm. Green ja Ampt (1911) mittasivat 35...38 cm pitkin savi- ja hiue- sekä 70 cm pitkin hieta-, mutta kapein (1,9 ja 1,35 cm², vastaavasti), näyttein lasisylintereissä, jolloin myös ilmanjohtavuuden määrittäminen onnistui.

4. SUOTO- ja VAJOVEDEN YHTÄLÖT

Googletta haulla: "Green-Ampt" tuli 846 osumaa. Kirjallisuudessa alkaa olla maaveden mallinnusta ns. mäntä- eli Green-Ampt menetelmällä. Green ja Ampt (1911) pitivät pysty-

suoran näytetangon (lasiputkessa) päällä vakiokorkeaa a vesikerrosta. Tällöin saadaan imeyännäksi (heillä infiltraatioksi dl/dt)

$$q = K_p \left(1 + \frac{a + h_k}{z}\right), \quad (6)$$

jossa z nyt on vesirintaman syvyys kuivassa maa-ainetangossa. K_p on vesikylläisen maan vedenjohtavuus eli vajoveden (painovoimaveden) virta, ja h_k on kapillaarikorkeus. Kaavasta (6) päästään pintavalunnan rajahtoon

$$q = K_p \left(1 + \frac{h_k}{z}\right) \quad (7)$$

asettamalla $a = 0$ (Ksiazynski, 1994). Ksiazynski käsittelee myös usean peräkkäisen sadanta-tapausten vaikutuksesta syntyvän suodon.

On laskettava sekä ilman että veden liike. Kuten edellä on mainittu kaava (1) pätee, kun kyseessä on pelkästään ilman liike. Kun huokoisessa aineessa tapahtuu kahden fluidin liike, on useissa julkaisuissa esitetty tarpeelliseksi ratkaista kahden kaksitermisen Darcyn yhtälön ryhmä (Kasi, 1995)

$$\mathbf{q}_l = -K_{ll} \nabla h_l - K_{lm} \nabla h_m, \text{ jossa } l, m = 1, 2 \text{ ja } m \neq l. \quad (8)$$

Tähän struktuuriin päästään sijoittamalla kaavasta (2) ratkaistu p kaavaan (1). K_{ll} kertoimilla on edelleen johtavuusmerkitys. Kun fluidina on vesi ja ilma (Kasi, 1995) en ole vielä päässyt varmuuteen, että kaava (8) on silloin tarpeellinen.

Veden ja ilman tapauksessa kirjoittakaamme massojen säilymislait (5) yhdessä paikka-dimensiossa (z) Morel-Seytoux'in (1973) esittämällä tavalla: vedelle

$$n \partial S_v / \partial t + \partial q_v / \partial z = 0 \quad (9)$$

ja ilmalle

$$n \partial (\rho_i S_i) / \partial t + \partial (\rho_i q_i) / \partial z = 0. \quad (10)$$

S_v ja S_i ovat veden ja ilman osuudet huokoisuudesta n ja q :t vastaavat virrat, nyt siis oletettuina z -suuntaisiksi. Ilman tiheyttä emme oleta vakioksi, vaan

$$\rho_i = \frac{p_i M_i}{RT}, \quad (11)$$

jossa kuitenkin Morel-Seytoux (1973) olettaa lämpötilan vakioksi. Pääasiassa hän käsittelee tapauksia, jossa maaperä on homogeeninen, ja käyttää Darcyn yhtälöä sekä ilmalle että vedelle. Hän käyttää fluidin l läpäisevyyden suhteellisia läpäisevyyksiä r_l ($l = i, v$) jolloin

$$K_i = kr_i \rho g / \mu_l. \quad (12)$$

Morel-Seytoux (1973) käsittelee imeyntää ja suotoa useilla menetelmillä. Hän myöskin nojaa ainakin kahteen havaintoon siitä, että kosteusrintama suodossa kuivaan homogeeniseen maahan säilyttää tietyn muodon (on pelkästään translatoorisessa liikkeessä). Hän valitsee uuden syvyysmuuttujan: $Z = z - \zeta(t)$, jonka $\zeta(t)$ on kosteusrintaman piste. Hän muotoilee yhtälöitä käyttäen tätä muuttujaa, jolla on ajasta riippuva origo.

Imeyntä ja suotorintaman ratkaisu on kehitetty myös suoraan käsittelemällä Darcyn yhtälöä ($1, \mathbf{q} = q\mathbf{e}_z$) vedelle ja ilmalle ja yhtälöitä (9,10,11,12) differenssimenetelmällä (Phuc ja Morel-Seytoux, 1972). Seuraavan sivun kuvan tapauksessa heillä on 10 tunnin sade, jonka intensiteetti on $2K_p$. Homogeenisessa maassa on aluksi tasainen $S_v = 0,2$ kosteus. 4 m 95 cm syvyydellä on vettäläpäisemätön vaakapinta. Hetkellä 1550 s pinnalla alkaa kasvaa lätäkö. Huokostilassa pysyy ilmaa 10 %. Muu ilma virtaa ylös. Kuten kenttähavainnoissa (esim. Grip ja Rodhe, 1988) niin laskussa pohjalla alkaa ensimmäisinä tunteina kertyä vettä. Ilmalla taas on ylös suuntautuva vastavirta.

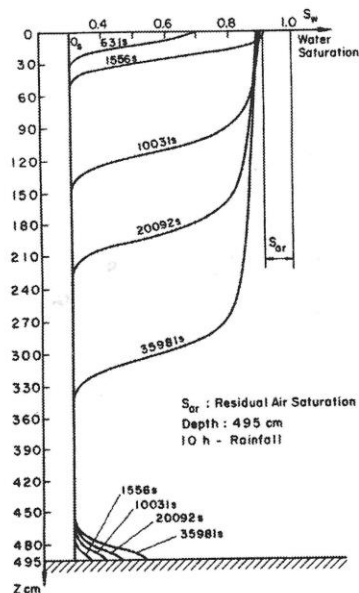


FIG. 32. Infiltration process in the case of an impervious lower boundary (Phuc and Morel-Seytoux, 1972).

Kuva. Lasku kuivahkon ($S_v = 20\%$) maan kostumisesta 10 h sateessa (Morel-Seytoux, 1973).

LÄHTEET

- Green, H. ja G.A. Ampt 1911. Studies on soil physics. Part I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* **4**, 1-24.
- Grip, H. ja A. Rodhe 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren. Uppsala.
- Hubbert, M.K. 1940. The theory of ground-water movement. *J. Geol.* **48**, 785-944.
- Kasi, S. 1990. Oanvända spårämnen för studier om mark- och grundvatten. *Vannet i Norden* **23**(2), 46-53, ja sen julkaisematon lisäys, joka oli jaettavana Kalmarin NHK:ssa 1990.
- Kasi, S. 1995. Uutta veden ja sen saasteiden kulkemiseen maaperässä. *XVII Geofysiikan Päivät*, 37-39.
- Kasi, S. 2001. *Harjujen tuuletus johtuu ilman liukoisuudesta veteen*. *XX Geofysiikan Päivät*, 57-60.
- Kasi, S. 2003. *Maan ilma ja vajovesi*. *XXI Geofysiikan Päivät*, 53-55.
- Kasi, S. 2004. *Raportti tutkimuksesta: Mustasupanharjun kesätuuletuksen mittaus*. Maa- ja Vesiteknikan tuki.
- Ksiazynski, K.W. 1994. The piston model of transient infiltration in unsaturated soil. *Groundwater Quality Management* (toim. K. Kovar ja J. Soveri). IAHS-**220**, 141-148.
- Morel-Seytoux, H.J. 1973. Two-phase flows in porous media. *Advances in Hydroscience* **9**, 119-202.
- Okko V. 1957. On the thermal behaviour of some Finnish eskers. *Fennia* **81**(5), 1-38.
- Phuc, Le Van ja Morel-Seytoux, H.J. 1972. Effect of soil air movement and compressibility on infiltration rates. *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.* **36**, 237-241.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics* **1**, 318-333.