



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos

Outi Kesäniemi

RAHKATURVEMOIDEN HYDRAULISET OMINAISUUDET

Lisensiaatintyö, joka on jätetty tarkastettavaksi lokakuussa 2009

Ohjaaja prof. Pertti Vakkilainen

Tekijä ja työn nimi : Outi Kesäniemi Rahkaturvemaiden hydrauliset ominaisuudet	
Päivämäärä : 23.10.2009	Sivumäärä : 144
Laitos : Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka	Professuuri : Vesitalous ja vesirakennus
Työn valvoja : Professori Pertti Vakkilainen	
Työn ohjaaja : Professori Pertti Vakkilainen	
Avainsanat : Turvemaat, hydrologinen johtavuus, van Genuchten	
<p>Tutkimuksessa selvitettiin maatumisen vaikutusta rahkaturpeen vedenjohtavuuteen vedellä kyllästyneenä ja kyllästymättömänä sekä vedenpidätyskykyyn. Näillä on suuri merkitys turvemaiden kuivatuksen suunnittelussa. Näytteet otettiin Akaassa sijaitsevalta rahkaturvepellolta, jonka kolme lohkoa oli ojitettu eri aikoina. Siten samalta pellolta saatiin kolmea maatumisastetta: hyvin maatonut, keskinkertaisesti maatonut ja heikosti maatonut turve. Näytteitä otettiin pinnasta, 31-40 cm ja 52-70 cm syvyydeltä. Laboratoriossa näytteistä mitattiin kyllästynyt vedenjohtavuus, vedenpidätyskäyrä pF-lukuun 3 asti (1 bar) sekä fysikaalisia ominaisuuksia, kuten vesipitoisuus luonnontilassa ja kyllästyneenä, tiheys, hehkutushäviö sekä huokoisuus. Lisäksi 70 cm korkeiden turveprofiilien kuivumista seurattiin tensiometriä avulla.</p> <p>Vedenpidätyskäyriin sovitettiin van Genuchtenin malli. Sen parametreja sekä mitattuja fysikaalisia ominaisuuksia käyttäen mallinnettiin turpeen kuivumista yksiulotteisella numeerisella laskentamallilla. Malli laski vedenjohtavuutta vesipitoisuuden suhteen ja veden liikkumista maaprofiilissa. Mallin tuloksia verrattiin tensiometreillä mitattuun turveprofiilin kuivumiseen. Koska mallin tulokset vastasivat hyvin mitattua kuivumista eri kerroksissa, saatiin vedellä kyllästymätön vedenjohtavuus mallin tuloksista.</p> <p>Turpeen tiheys vaihteli hyvin maatonneen turpeen arvosta 399 kg/m³ heikosti maatonneen turpeen arvoon 99 kg/m³. Kyllästyneen turpeen vedenjohtavuuden mittaustuloksissa esiintyi suurta hajontaa sekä rinnakkaisnäytteiden välillä että myös yksittäisen näytteen peräkkäisissä mittauksissa. Korkein vedenjohtavuuden keskiarvo saatiin heikosti maatonneen turpeen pintakerrokselle (1,64 m/d) ja alin sen pohjakerrokselle, 0,002 m/d. Heikosti maatonneen turpeen keskikerroksessa vedenjohtavuus oli 0,49 m/d. Keskinkertaisesti maatonneen turpeen vedenjohtavuudet olivat pintakerroksessa 0,27 m/d, keskikerroksessa 0,31 m/d ja pohjakerroksessa 0,006 m/d. Hyvin maatonneessa turpeessa vedenjohtavuus oli pinnassa 0,14 m/d, keskikerroksessa 0,20 m/d ja pohjakerroksessa 0,12 m/d. Pinta- ja keskikerroksissa vedenjohtavuus aleni maatumisasteen kasvaessa, mutta pohjakerroksessa se kasvoi maatumisasteen kasvaessa.</p> <p>Mitä maatonneempi turve, sitä alhaisempi vesipitoisuus kyllästyneenä ja sitä enemmän vettä näytteessä oli jäljellä 1 barissa. Tämä todettiin kaikissa kerroksissa. Pintakerroksessa hyvin maatonut turve sisälsi kyllästyskosteudessa 76 tilavuus-% vettä ja heikosti maatonut turve 86 tilavuus-%. 1 barin paineessa vesipitoisuudet olivat 45 tilavuus-% ja 37 tilavuus-%. Van Genuchtenin vedenpidätyskäyrän malli saatiin sovitettua mitattuihin käyriin erittäin hyvin, hyvyysluvut olivat jopa 99 %. Van Genuchtenin mallin näyttää siis sopivan myös eri tavoin maatonneelle rahkaturveelle.</p> <p>Van Genuchtenin mallilla laskettu vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuus laski profiilissa alapäin mentäessä. Tulosten mukaan vedenjohtavuus aleni selvästi heti turpeen alettua kuivua. Heikosti ja keskinkertaisesti maatonneen turpeen pintakerroksessa jo 1 cm imulla vedenjohtavuus putosi 11 prosenttiin kyllästyneestä vedenjohtavuudesta, keskikerroksessa 12–15 prosenttiin ja pohjakerroksessa 21–28 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. Hyvin maatonneessa turpeessa 1 cm imulla johtavuus laski pinnassa 27 prosenttiin, keskikerroksessa 20 prosenttiin ja pohjakerroksessa 15 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. 100 cm imulla vedenjohtavuus putosi pintakerroksessa kaikilla maatumisasteilla 0,001-0,39 prosenttiin, keskikerroksessa 0,02-0,32 prosenttiin ja pohjakerroksessa 0,09-0,37 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. Tietyllä imulla paras johtavuus esiintyi kaikissa kerroksissa maatonneimmalla turpeella, koska sen vesipitoisuus oli hyvästä vedenpidätyskyvystä johtuen korkein. Alin johtavuus tietyllä imun arvolla esiintyi vähiten maatonneessa turpeessa.</p>	

Author and name of the thesis : Outi Kesäniemi	
Hydraulic properties of peat soils	
Date : 23 October 2009	Number of pages : 144
Department : Civil and Environmental Engineering	Professorship : Water Resources
Supervisor : Professor Pertti Vakkilainen	
Instructor : Professor Pertti Vakkilainen	
Keywords : peatland, hydraulic conductivity, van Genuchten	
<p>The goal of the study was to determine the effect of decomposition on hydraulic properties of <i>Sphagnum</i> peat. Samples were taken from a cultivated moss peat field in Akaa, South-West Finland. Three sections of the field were drained at different times, resulting in different decomposition stages (slightly, moderately and highly decomposed peat). Samples were taken from the surface layer and from the depths of 31-40 cm and 52-70 cm.</p> <p>Saturated hydraulic conductivity, water retention curves up to tension of 1 bar and physical properties such as density, loss of ignition and porosity were determined in the laboratory. In addition 70 cm tall peat profiles were dried using hanging water column method. The drying was monitored using tensiometers. Van Genuchten's model was applied to the measured water retention curves, and the drying of the profiles was modeled using a 3-d numerical model. The parameters used in the model were obtained from the water retention curves and from the measured physical properties. The parameters were validated by comparing the modeled results to the measured ones, and it was found out that the model fitted very well with the measured tension values. Unsaturated hydraulic conductivity was then calculated using van Genuchten's model and the parameters obtained from the measurements.</p> <p>Density of the peat ranged from 399 kg/m³ (highly decomposed) to 99 kg/m³ (slightly decomposed). There was large variation in saturated hydraulic conductivity, both between replicas and also in results of single samples. The highest average conductivity (1.64 m/d) was found in surface layer of slightly decomposed peat. In depth of 31-40 cm the conductivity was 0.49 m/d and in depth of 52-70 cm it was 0.002 m/d. In moderately decomposed peat the conductivities were in the surface layer 0.27 m/d, in depth of 31-40 cm 0.31 m/d and in depth of 52-70 cm the conductivity was 0.006 m/d. In highly decomposed peat the conductivity was in the surface layer 0.14 m/d, in depth of 31-40 cm 0.20 m/d and in depth of 52-70 cm the conductivity was 0.12 m/d. On surface layer and in depth of 31-40 cm conductivity decreased as decomposition increased, but in depth of 52-70 cm conductivity increased as decomposition increased.</p> <p>As decomposition stage increased, the water content at saturation decreased and water content at 1 bar increased. This was the case in all the layers. In surface layer the highly decomposed peat had a volumetric water content of 76 % and slightly decomposed peat had a water content of 86 %. At pressure of one bar the water contents were 45 % for highly decomposed peat and 37 % for slightly decomposed peat. Van Genuchten's model for the water retention curve fitted very well with the measured curves, and coefficients of determination were as high as 99 %. It seems that Van Genuchten's model can be applied also for peat soil on different decomposition stages.</p> <p>Unsaturated hydraulic conductivity decreased in lower layers of the soil. According to the results, conductivity decreased clearly as the peat started to dry. In surface layer of slightly and moderately decomposed peat, unsaturated hydraulic conductivity decreased to 11 per cent of the saturated value as suction increased to 1 cm. In depth of 31-40 cm conductivity decreased to 12-15 per cent of the saturated value and in depth of 52-70 cm it decreased to 21-28 per cent of the saturated value. In highly decomposed peat conductivity decreased in surface layer to 27 per cent, in depth of 31-40 cm to 20 per cent and in depth of 52-70 cm to 15 per cent of the saturated value as suction increased to 1 cm. When suction was 100 cm, conductivity dropped in surface layer to 0.001-0.39 per cent, in depth of 31-40 cm to 0.02-0.32 per cent and in depth of 52-70 cm to 0.09-0.37 per cent of saturated value in all decomposition stages.</p> <p>On each suction, the highest conductivity was found in all layers in highly decomposed peat, because its water content was high due to high water retention capacity. The lowest conductivity on each suction was found in least decomposed peat.</p>	

Kiitän professori Pertti Vakkilaista mahdollisuudesta tehdä tämä työ sekä innostavasta ohjauksesta ja kannustuksesta työn kaikissa vaiheissa. Työ on tehty osana "Veden liikkeet orgaanisissa maissa" –hanketta, jonka muut osapuolet ovat Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus ja Helsingin yliopisto. Työtä ovat rahoittaneet Maa- ja metsätalousministeriö ja Salaojituksen tukisäätiö. Kiitokseni seuraaville henkilöille, jotka suuresti auttoivat työtä: tutkija Merja Myllys, joka opasti näytteenotossa ja jonka orgaanisten maalajien asiantuntemus oli suureksi avuksi; erikoislaboratoriomestari Aino Peltola ja tutkija Maija Paasonen-Kivekäs, opastus laboratoriomenetelmissä ja näytteiden käsittelyssä; laboratoriomestari Matti Keto ja tutkimusinsinööri Jyrki Nurminen, näytteenotto; laboratoriomestari Antti Louhio, mittalaitteiston rakentaminen ja ylläpito; tutkija Lassi Warsta, mallinnus; tutkija Timo Räsänen, vedenjohtavuus- ja vedenpidätysmittaukset keski- ja pohjakerroksesta äitiyslomani aikana.

Kiitokset vesitalouden laboratorion henkilökunnalle mukavasta työilmapiiristä sekä perheelleni tuesta ja rohkaisusta.

Otaniemessä 23.10.2009

1	Johdanto.....	15
2	Turvemaiden tutkimus Suomessa.....	17
2.1	Turvetutkimus alkoi 1700-luvulla.....	17
2.2	Soiden maatalouskäytön tutkimus.....	18
2.2.1	Metaanin muodostuminen ja hajoaminen turpeessa.....	19
2.3	Soiden metsätaloudellisen käytön tutkimus.....	21
2.3.1	Turpeen vedenpidätyskyky.....	24
2.3.2	Turpeen vedenjohtavuus.....	25
2.4	Maamekaniikan tutkimus.....	27
2.5	Muu tutkimus.....	30
3	Maavesiparametrit ja niiden määrittäminen.....	31
3.1	Maan vedenpidätyskyky.....	31
3.2	Maan vedenjohtavuus.....	31
3.2.1	Ajan suhteen muuttumattomaan tilanteeseen perustuvat menetelmät.....	32
3.2.2	Muuttuvaan tilanteeseen perustuvat menetelmät.....	34
4	Aineisto ja menetelmät.....	40
4.1	Tutkimusaineisto.....	40
4.1.1	Kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden mittaamista varten otetut näytteet 40	
4.1.2	Vedenpidätyskäyrää ja kyllästynyttä vedenjohtavuutta varten otetut näytteet.	43
4.2	Luonnontilainen vesipitoisuus, vesipitoisuus kyllästettynä, tiheys, kivennäisainepitoisuus ja huokoisuus.....	44

4.3	Vedellä kyllästyneen turpeen vedenjohtavuus.....	45
4.4	Vedenpidätyskäyrä	47
4.5	Van Genuchtenin mallin sovitus vedenpidätyskäyriin.....	50
4.6	Vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuuden määrittämiseksi tehdyt mittaukset.....	51
4.7	Kyllästymätön vedenjohtavuus van Genuchtenin mallin mukaan.....	54
5	Tulokset	55
5.1	Vesipitoisuus luonnontilassa ja kyllästyneenä, tiheys, kivennäisainepitoisuus ja huokoisuus eri kerroksissa.....	55
5.2	Vedenjohtavuus kyllästyneenä eli K-arvo.....	57
5.2.1	Hyvin maatunut rahkaturve	57
5.2.2	Keskinkertaisesti maatunut rahkaturve.....	61
5.2.3	Heikosti maatunut rahkaturve	66
5.2.4	Vedenjohtavuudet maatumisasteittain eri kerroksissa.....	69
5.3	Turpeen vedenpidätyskyky	71
5.3.1	Hyvin maatunut turve.....	71
5.3.2	Keskinkertaisesti maatunut turve	72
5.3.3	Heikosti maatunut turve.....	73
5.3.4	Vedenpidätyskäyrät kerroksittain	75
5.3.5	Vedenpidätyskäyrät maatumisasteittain.....	77
5.3.6	Vedenpidätysominaisuudet maatumisasteittain.....	79
5.4	van Genuchtenin mallin sovitus vedenpidätyskäyriin.....	80
5.4.1	Hyvin maatunut rahkaturve	80

5.4.2	Keskinkertaisesti maatunut rahkaturve.....	84
5.4.3	Heikosti maatunut rahkaturve	88
5.5	Kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuus.....	92
5.5.1	Mallin tulokset.....	92
5.5.2	Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa	96
5.5.3	Vedenjohtavuus vesipitoisuuden ja painepotentiaalin funktiona eri kerroksissa 98	
6	Tulosten tarkastelua	101
6.1	Vedenpidätyskäyrät	101
6.2	van Genuchtenin mallin sovitukset mitattuihin vedenpidätyskäyriin	101
6.3	Kyllästynyt vedenjohtavuus	102
6.4	Kyllästymätön vedenjohtavuus	105
7	Yhteenveto	107
8	Lähteet	109

Kuvaluettelo

Kuva 1. Heikosti maatuneen (H2) rahkaturvepellon profiili ja näytteenottoputket.....	41
Kuva 2. Keskinkertaisesti maatuneen (H4-6) rahkaturvepellon profiili.....	42
Kuva 3. Hyvin maatuneen (H8) rahkaturvepellon profiili.....	42
Kuva 4. Kyllästyneen vedenjohtavuuden mittaamiseen käytetty laitteisto.....	47
Kuva 5. Anderssonin imukattila.....	48
Kuva 6. Paine kattila.....	49
Kuva 7. Kyllästymättömän vedenjohtavuuden mittaamiseen käytetty laitteisto. Kuvassa kaksi maakolumnia vierekkäin.....	52
Kuva 8. Lähikuva tensiometreistä.....	53
Kuva 9. Periaatekuva kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden mittalaitteistosta.....	53
Kuva 10. Pylvään yläreuna, tensiometrien letkut ja osa dataloggeria.....	54
Kuva 11. Hyvin maatuneen rahkaturpeen (H8) pintakerroksen vedenjohtavuus mittausajankohdan funktiona.....	58
Kuva 12. Hyvin maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31–40 cm) vedenjohtavuus.....	60
Kuva 13. Hyvin maatuneen rahkaturpeen pohjakerroksen (näytteenottosyvyys 61 cm) vedenjohtavuus.....	60
Kuva 14. Keskinkertaisesti maatuneen runsassavisen rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus valutusajankohdan funktiona.....	62
Kuva 15. Keskinkertaisesti maatuneen, vähemmän savea sisältävän rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus valutusajankohdan funktiona. Näyte 3 oikeanpuoleisella y-akselilla.....	63
Kuva 16. Keskinkertaisesti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31 cm) vedenjohtavuus. Näytteet 1-3, mustia, tiiviitä, alhainen vedenjohtavuus.....	65

Kuva 17. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31 cm) vedenjohtavuus näytteissä 4 ja 5.....	65
Kuva 18. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen pohjakerroksen (näytteenottosyvyys 61 ja 70 cm) vedenjohtavuus.....	65
Kuva 19. Heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus.....	67
Kuva 20. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm).....	69
Kuva 21. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus pohjakerroksessa. Näytteenottosyvyys 52 cm (näytteet 4 ja 5), 61 cm (näyte 1) tai 70 cm (näytteet 2 ja 3).	69
Kuva 22. Vedenjohtavuudet eri kerroksissa maatumisasteittain.	70
Kuva 23. Heikosti maatuneen pintaturpeen tilavuuden muutos vedenpidätyskäyrää mitattaessa (näytelieriön tilavuus 195,28 cm ³).....	73
Kuva 24. Heikosti maatuneen pintaturpeen vedenpidätyskäyrä, kun tilavuuden muutos on otettu huomioon, verrattuna käyrään ilman tilavuuden muutoksen huomioonottamista.....	74
Kuva 25. Pintakerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.....	75
Kuva 26. Keskikerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.....	76
Kuva 27. Pohjakerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.....	76
Kuva 28. Hyvin maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa.....	77
Kuva 29. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa. .	78
Kuva 30. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa.....	78
Kuva 31. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen mitattuun vedenpidätyskäyrään.....	81
Kuva 32. Laskettu vedenpidätyskäyrä hyvin maatuneelle turpeelle jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	81

Kuva 33. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen turpeen keskikerroksen mitattuun pF-käyrään.....	82
Kuva 34. Hyvin maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	82
Kuva 35. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen mitattuun pF-käyrään.....	83
Kuva 36. Hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen van Genuchten-mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 24 asti.....	83
Kuva 37. Van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneen, runsassavisen pintaturpeen vedenpidätyskäyrään.....	84
Kuva 38. Laskettu vedenpidätyskäyrä keskinkertaisesti maatuneelle, runsassavisele turpeelle jatkettuna pF-lukuun 10 asti.....	84
Kuva 39. Keskinkertaisesti maatuneen vähäsavisen turpeen vedenpidätyskäyrän van Genuchtenin mallin sovitus.....	85
Kuva 40. Van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneelle rahkaturpeelle jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	85
Kuva 41. van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrään.....	86
Kuva 42. Keskinkertaisesti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	86
Kuva 43. van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneen turpeen pohjakerroksen pF-käyrään.....	87
Kuva 44. Keskinkertaisesti maatuneen pohjaturpeen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	87
Kuva 45. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen turpeen vedenpidätyskäyrään ilman kutistumisen huomioonottamista.....	88

Kuva 46. Laskettu vedenpidätyskäyrä heikosti maatuneelle turpeelle ilman kutistumisen huomioonottamista jatkettuna pF-lukuun 12 asti.....	88
Kuva 47. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen turpeen pintakerroksen vedenpidätyskäyrään kutistumisen huomioonottaen.....	89
Kuva 48. Laskettu heikosti maatuneen turpeen vedenpidätyskäyrä tilavuuden muutos huomioonottaen jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	89
Kuva 49. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrään.	90
Kuva 50. Kuva 50. Heikosti maatuneen turpeen keskikerroksen van Genuchtenin mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	90
Kuva 51. van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen pohjaturpeen vedenpidätyskäyrään.	91
Kuva 52. Kuva 52. Heikosti maatuneen turpeen pohjakerroksen van Genuchtenin mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 15 asti.....	91
Kuva 53. Vähän maatuneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit turveprofiilin kuivuessa.....	92
Kuva 54. Keskinertaisesti maatuneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit turveprofiilin kuivuessa.	93
Kuva 55. Hyvin maatuneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit.	93
Kuva 56. Hyvin maatuneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit kalibroiduilla parametreilla.....	94
Kuva 57. Mallia varten kalibroitu vedenpidätyskäyrä eri kerroksissa verrattuna mitattuihin käyriin.....	95
Kuva 58. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona hyvin maatuneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka. Laskennassa käytetty mitattua Ksat-arvoa. Käyrät on piirretty sekä mitatuista vedenpidätyskäyristä saaduilla van Genuchtenin parametreilla että mallia varten kalibroiduilla parametreilla.	96

Kuva 59. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka.	97
Kuva 60. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona heikosti maatuneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka.	97
Kuva 61. Pintakerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.	98
Kuva 62. Pintakerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.	98
Kuva 63. Keskikerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.	99
Kuva 64. Keskikerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.	99
Kuva 65. Pohjakerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.	100
Kuva 66. Pohjakerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.	100
Kuva 67. Laskentaverkko ja erikoissolut.	134

Taulukkoluetelo

Taulukko 1. Näytteiden fysikaalisia ominaisuuksia. Turveaineksen tiheys, huokoisuus ja hehkutushäviö määritetty vain pintakerrokselle.....	56
Taulukko 2. Hyvin maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani	57
Taulukko 3. Hyvin maatuneen rahkaturpeen (H8) vedenjohtavuudet keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjalla (näytteenottosyvyys 61 cm).....	59
Taulukko 4. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani.	61
Taulukko 5. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vähäsavisen pintakerroksen vedenjohtavuus.	62
Taulukko 6. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjamaassa (näytteenottosyvyys 61–70 cm).....	64
Taulukko 7. Heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani.	66
Taulukko 8. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjamaassa (näytteenottosyvyys 52–70 cm).....	68
Taulukko 9. Eri tavalla maatuneiden rahkaturpeiden kyllästyneet vedenjohtavuudet ja variaatiokertoimet eri kerroksissa.....	70
Taulukko 10. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) pintakerroksessa. Heikosti maatuneen turpeen kutistuminen huomioitu.....	79
Taulukko 11. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) keskikerroksessa (3 cm korkean näytteen pohjan syvyys 29 cm). Heikosti maatuneen turpeen kutistumista ei mitattu.....	79
Taulukko 12. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) pohjakerroksessa (3 cm korkean näytteen pohjan syvyys 59 cm). Heikosti maatuneen turpeen kutistumista ei mitattu.....	80

Taulukko 13. Mallista saadut haihdunnat ja valunnat mittausjaksolle.	95
Taulukko 14. von Postin maatumisasteen määrittely.....	131

1 Johdanto

Puhuttaessa turpeen vedenjohtavuudesta tarkoitetaan lähes poikkeuksetta vedellä kyllästetyn turpeen ominaisuutta niin metsäojituksen, turvetuotannon kuin turvemaiden viljelynkin kannalta. Pohjavedenpinnan yläpuolella vallitsevaa tilannetta, jossa huokosissa on osittain ilmaa ja osittain vettä, ei ole Suomessa eikä maailmallakaan vedenjohtavuuden suhteen juuri tutkittu. Pohjavedenpinnan alapuolella turve on vedellä kyllästynyt. Täydellistä kyllästytilaa ei luonnonoloissa kuitenkaan koskaan saavuteta, vaan huokosissa on aina jonkin verran ilmaa, joka ei ole päässyt poistumaan. Kyllästyneen vyöhykkeen vesi pääsee virtaamaan ojiin. Pohjavedenpinnan yläpuolella turve on kyllästyntöntä, eli osassa huokosia on vettä ja osassa ilmaa. Ojiin virtaavan veden lisäksi vettä poistuu turvemaasta haihtumalla. Mikäli maan kapillaarisuus on hyvä, haihtuneen veden tilalle pääsee nousemaan korvaavaa vettä alemmista kerroksista.

Kyllästyntöntällä kerroksella on tärkeä osa hydrologisessa kierrossa. Se muodostaa linkin pinta- ja pohjaveden välille, ja sen ominaisuudet määräävät, kuinka suuri osa sadannasta imeytyy maaperään tai jää pintavalunnaksi. Kasvit ottavat juurillaan happea ja ravinteita kyllästyntöntä kerroksesta. Sen vesipitoisuus vaikuttaa maan lujuteen ja siihen, miten juuret pystyvät tunkeutumaan maahan, miten karja ja koneet tiivistävät maata ja millaiset muokkausominaisuudet maalla on. Lisäksi kyllästyntöntän kerroksen vesipitoisuus vaikuttaa maaperän lämpöolosuhteisiin.

Eloperäisiä maalajeja ovat turpeet, multamaat, lieju ja järvimuta. Turpeet sisältävät orgaanista ainesta yli 40 %. Multamaissa on orgaanista ainesta 20–40 %, ja myös järvimudan orgaanisen aineksen pitoisuus vaihtelee samoissa rajoissa. Liejuissa on enemmän mineraalainesta kuin järvimudassa, ja orgaanista ainesta niissä on 6-20 % (Hartikainen 1992). Suomessa on alun perin ollut suota 10 miljoonaa hehtaaria, mikä on kolmannes koko maan pinta-alasta. Nykyisin tästä 24 % on luonnontilassa. 56 % alkuperäisestä suoalasta on metsitetty, ja 11 % on suojeltu. Viime vuosikymmeninä 7 % suoalasta on kuivatettu maanviljelykseen, mutta turpeen hajoamisen vuoksi suuri osa näistä pelloista luokitellaan nykyään multa- tai mineraalimaaksi. Osa kuivatetuista soista on myös metsitetty. Nykyään turvepeltoja on 85 000 hehtaaria, mikä on 3,8 % Suomen peltopinta-alasta. (Virtanen *et al.* 2003, Mylly & Sinkkonen 2004)

Turpeen kuivatusteknisistä ominaisuuksista on vain vähän tutkittua tietoa, vaikka toimiva kuivatus on oleellista turvemaiden käytössä. Ominaisuudet myös muuttuvat ajan kuluessa,

sillä ojituksen myötä turve joutuu kosketuksiin ilman kanssa, mikä kiihdyttää turpeen hajoamista. Hajoamisen myötä huokosten koko sekä niiden osuus tilavuudesta pienenevät, jolloin vedellä kyllästyneen turpeen vedenjohtokyky alenee. Samalla vedenpidätyskyky kasvaa. Nämä yhdessä huonontavat turpeen viljelyominaisuuksia. Maatuminen tuottaa myös kasvihuonekaasuja kuten metaania (CH₄) ja dityppioksidia (N₂O). Turvemaiden hydrologia tulee tuntea nykyistä paremmin, jotta turvemaita voidaan edelleen viljellä ja samalla vähentää viljelyn negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää rahkaturpeen hydraulisia ominaisuuksia, joilla on suuri merkitys turvemaiden kuivatuksen suunnittelussa. Tutkitut ominaisuudet olivat vedenpidätyskyky sekä vedenjohtavuus vedellä kyllästyneenä ja kyllästymättömänä. Ominaisuudet määritettiin kolmella eri tavalla maatuneesta rahkaturpeesta, jolloin nähtiin, miten maatuneisuus vaikuttaa turpeen hydrologisiin ominaisuuksiin. Samalla selvitettiin turpeen fysikaalisia ominaisuuksia kuten luonnontilainen vesipitoisuus sekä vesipitoisuus kyllästyneenä, turpeen tiheys ja huokoisuus. Lisäksi testattiin, toimiiko kivennäismailla yleisesti käytössä oleva van Genuchtenin malli turvemaassa sovittamalla se mitattuihin vedenpidätyskäyriin.

Mitattujen fysikaalisten ominaisuuksien ja van Genuchtenin mallin parametrien avulla mallinnettiin turveprofiilin kuivumista ja verrattiin sitä mitattuun kuivumiseen, mistä saatiin vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuus.

Luvussa 2 esitetään yhteenveto turpeen ominaisuuksista ja suomalaisesta turvetutkimuksesta. Luvussa 3 kerrotaan maavesiparametreista ja niiden määrittämisestä. Luvussa 4 on kuvattu tämän tutkimuksen aineisto ja menetelmät, luvussa 5 tulokset ja luvussa 6 tulosten tarkastelu. Yhteenveto on esitetty luvussa 7.

Liitteessä 1 on kirjallisuuskatsaus maavesien hydrologian historiasta. Tämä nähtiin tarpeelliseksi, koska suomeksi ei ole aikaisemmin selostettu, milloin ja keiden toimesta maavesihydrologian keskeiset kuvaukset on tehty ja teorit johdettu. Liitteessä 2 kerrotaan soista ja turpeen ominaisuuksista. Laskentamallin kuvaus on liitteessä 3, ja näytteiden fysikaalisia ominaisuuksia on esitetty liitteen 4 taulukoissa.

2 Turvemaiden tutkimus Suomessa

2.1 Turvetutkimus alkoi 1700-luvulla

Ensimmäiset satunnaiset maininnat turvemaiden viljelystä maassamme löytyvät 1300-luvulta. Turvemaiden viljelyn katsotaan varsinaisesti alkaneen 1660-luvulla, jolloin kirkkoherra Iisakki Brenner kehitti menetelmän, jossa suo ensin kuivattiin, sen pinta poltettiin ja pintamaahan lisättiin lantaa, jolloin sadosta tuli erittäin runsas. Kun havaittiin, että maata toistuvasti polttamalla koko turvekerros paloi pois ja jäljelle jäi usein viljelyskelvoton pohjamaa, toistuvaa polttoviljelyä alettiin pitää ryöstöviljelynä, ja se pyrittiin lopettamaan (Maasilta 1951, Lappalainen 1998, Mylly 1998). Soiden maatalouskäytön kannalta merkittävää oli Suomen Suoviljelysyhdistyksen perustaminen vuonna 1894. Yhdistys teki aktiivista tutkimustyötä 1970-luvulle asti, ja lisäksi se teki neuvontatyötä kertoen mm. polttoviljelyn haitoista. (Kotiaho 1950, Maasilta 1951, Lappalainen 1998, Mylly 1998)

Turvetutkimus alkoi Suomessa varsinaisesti 1700-luvulla, jolloin heräsi kiinnostus käyttää turvetta polttoaineena puuvarojen säästämiseksi. Tuolloin merkittävä toimija suomalaisessa turvetutkimuksessa oli Turun Akatemia. Vuonna 1736 malminetsijä ja rykmentinkirjuri Jacob Forskäl esitti kirjassaan polttoturpeelle ensimmäisen määritelmän. Sen mukaan polttoturvetta saadaan soisilta ja matalilta paikoilta erikoisesti niiltä kohdin, joissa virvatulia näkyy koko talven (Lappalainen 1998). Vuonna 1759 tehdyssä väitöskirjassa esitettiin polttoturpeen hyväksikäyttöä rautatehtaassa. Turpeen muokkauskoneiden kehitys seuraavan sadan vuoden aikana mahdollisti turveteollisuuden aloittamisen, ja polttoturvetta päästiin käyttämään 1870-luvulla. Samoin 1700-luvulla Turun Akatemiassa tutkittiin soiden maatalouskäyttöä sekä turvemaiden kuivatusta ja viljelyä, johon ihmisiä kannustettiin (Lappalainen 1998, Mylly 1998).

Vuonna 1886 perustettu Geologian tutkimuskeskus (GTK) on tehnyt turvetutkimuksia koko olemassaolonsa ajan. Vanhimmat selvitykset liittyivät soiden luonnonhistoriallisiin selvityksiin ja maaperän geologiseen kartoitukseen. Vuonna 1941 GTK aloitti systemaattisen turvevarojen kartoittamisen energiahuollon tarpeita varten. Suomessa on 51 000 km² sellaista geologista suoalaa (turvekerros yli 30 cm), jossa yksittäisten soiden ala on yli 20 hehtaaria, ja tästä suoalasta oli vuoteen 2000 mennessä kartoitettu 17 000 km². Nykyään GTK on Suomen ainoa systemaattisesti soita tutkiva organisaatio, ja se selvittää

turvevaroja paitsi energiaturvevarojen kartoittamiseksi ja maankäytön suunnittelun pohjaksi, myös muita turveraaka-aineen käyttömuotoja varten. Näitä eri käyttömuotoja ovat mm. kasvu-, ympäristö-, viherrakentamis-, öljypoisto-, kuivike-, eriste-, suodatin-, tekstiili- ja hoitoturve. (Virtanen *et al.* 2003)

2.2 Soiden maatalouskäytön tutkimus

Helsingin yliopistolla Yrjö Pessi tutki soiden käyttöä maanviljelyksessä 1950- ja 1960-luvuilla (mm. Pessi 1953, 1956, 1959, 1960, 1966). Pessi selostaa kirjassaan "Suon viljely" (1966) mm. suon raivaustekniikkaa, ojitusta, maanparannusta eli kivennäismaan lisäystä sekä maan kalkitusta, lannoitusta ja kasvinviljelyä. Helsingin yliopiston uudemmat turvetutkimukset painottuvat lähinnä metsänkasvatukseen. 1980-luvulla Puustinen *et al.* (1987) selvittivät Maatalousteknologian laitoksella salaojituksen parannusmahdollisuuksista savi- ja myös turvepelloilla.

Turpeen käyttöä kasvualustana alettiin tutkia Helsingin yliopistossa 1950-luvulla professorien Viljo Puustjärvi (mm. Puustjärvi 1960a, 1960b, 1960c) ja Erkki Kivinen toimesta (Reinikainen 1998). Tulokset koottiin vuonna 1973 kirjaksi "Kasvuturve ja sen käyttö" (Puustjärvi 1973). Kirjassa kuvataan teollisesti nostetun ja jalostetun turpeen ominaisuuksia sekä viljelytekniikkaa. Myös Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksessa on tutkittu turpeen käyttömahdollisuuksia kasvihuoneviljelyksessä ja eläinten alustamateriaalina, johon sen on todettu sopivan erinomaisesti.

Teknillisessä korkeakoulussa tehtiin vuosina 1951–1988 viisi turvemaiden maatalouskäyttöön liittyvää diplomityötä. 1950-luvulla maatalouden vesirakennuksen laboratoriossa, nykyisessä vesitalouden ja vesirakennuksen laboratoriossa, tehtiin aiheesta kaksi diplomityötä. Kujala (1951) tutki toteutettujen reikäsalojien kuntoa. Tällaisissa salaojissa ei ole putkea lainkaan, vaan salaojan seininä toimivat turvelevyt. Kujalan mukaan tällaiset ojat kestivät saraturpeessa paremmin kuin rahkaturpeessa. Koska maan painuminen huonontaa salaojien kuntoa, tulisi salaojitus tehdä vasta muutaman vuoden kuluttua suon avo-ojituksesta, jolloin painuminen on pääosin tapahtunut. Niemi (1955) puolestaan tutki suon pinnan painumista 60 vuotta ojituksen jälkeen. 1970-luvulla tehtiin vesitalouden laboratoriossa yksi turvemaihin liittyvä diplomityö, jossa tutkittiin tupasvilla-sara-rahkaturpeen painumista laboratorio-olosuhteissa veden valuessa kuormittamattomasta turvepylvästä painovoiman avulla (Jantunen 1972). 1980-luvulla vesitalouden laboratoriossa tehdyissä kahdessa diplomityössä selvitettiin turpeen vedenjohtavuuden

mittaamista kenttäolosuhteissa ja salaojituksen toimintaa turvemaidella (Virtanen 1986, Niini 1988). Näiden jälkeen ei turvemaiden viljelyyn liittyviä diplomitöitä ole TKK:lla tehty.

Kun turvemaata ojitetaan viljelykäyttöön ja sitä ryhdytään kuivattamaan, turpeen hajoaminen kiihtyy biologisen aktiivisuuden lisääntyessä ja turve tiivistyy (Pessi 1966). Hajoamisen ja tiivistymisen myötä turpeen vedenpidätyskyky kasvaa ja vedellä kyllästyneen turpeen vedenjohtokyky alenee (mm. Päivänen 1973), joten kuivatusongelmat lisääntyvät, kun turvepelto on ollut pitkään käytössä (Mylly 1998).

Puustinen *et al.* (1987) selvittivät salaojituksen parannusmahdollisuuksia turvepeltoilla, joilla ongelmia aiheutti maan liiallinen märkyys ja heikko kantavuus. Ojatiheyttä kasvattamalla kuivatustilanne koheni, muokkaustöihin päästiin ajoissa, kantavuus parani ja puinti onnistui hyvin. Puustinen *et al.* toteavat, että huonosti toimivilla turvepeltojen salaojituksilla on suuret tapauskohtaiset vaihtelut, eikä yleistettävää yhden menetelmän ratkaisumallia voi antaa. Tapauskohtaisilla ratkaisuilla voidaan heidän mukaansa ongelmalliset turvemaat kuitenkin palauttaa viljelykelpoiksi.

2.2.1 Metaanin muodostuminen ja hajoaminen turpeessa

Metaania (CH_4) muodostuu orgaanisen aineksen anaerobisessa hajoamisessa eli fermentaatiossa. Hajottajina toimivat happipakoiset mikrobit, metanogeenit, jotka kuuluvat arkkeihin (*archaeobacteria*). Hapellisessa turvekerroksessa on metanotrofisia mikrobeja, jotka vuorostaan hapettavat metaanin hiilidioksidiksi. Metaanin emissio tai vuo on näiden kahden prosessin, fermentaation ja hapettumisen, erotus. Metaanin nettotuotantoon ja pitoisuuteen vaikuttavat yhdessä maan hydrologia, kemia ja mikrobiologia (Amaral ja Knowles 1994).

Metaanin vapautuminen suolta vaihtelee suuresti sekä alueellisesti että paikallisesti, koska metaanin tuotto, hapettuminen ja kulkeutuminen ilmakehään riippuvat vallitsevista olosuhteista. Metaanin tuoton ja hapettumisen nopeudet riippuvat substraatin saatavuudesta, vaihtoehtoisten substraattien kilpailevien elektroniakseptoreiden (happi, nitraatti ja sulfaatti) läsnäolosta, hapen saatavuudesta ja vesipitoisuudesta, lämpötilasta ja metaania tuottavien ja sitä hajottavien mikrobien aktiivisuudesta. Teoriassa lämpötilan kasvu lisää metaanin tuottoa, mutta kenttäoloissa substraatin saatavuus vaikuttaa lämpötilavasteeseen (Kettunen *et al.* 2000).

Tärkeimmät metanogeenien käyttämät hiilen lähteet ovat asetaatti CH_3COO^- ja muurahaihappo HCOOH . Ravinteikkaalla suolla metaanin tuotto on runsasta, koska

juurten eritteet edistävät metaanin tuotantoa, ja lisäksi hajoavaa materiaalia on runsaasti, mikä nostaa turpeen hiilipitoisuutta ja siten metaanin tuottoa (Galand *et al.* 2005, Kettunen *et al.* 2000). Metanogeenesiä estävät sulfaatti SO_4^{2-} , nitraatti NO_3^- ja kloroformi CHCl_3 (Amaral ja Knowles 1994).

Metaania hiilidioksidiksi hapettava mikrobipopulaatio syntyy, kun saatavilla on sekä metaania että happea. Lämpötilan ei uskota säätelevän metaanin hapettumista yhtä voimakkaasti kuin sen muodostumista. Kasvipeitteisessä maassa metaani poistuu vuona kasvien läpi, ja jos kasvipeitettä ei ole, se poistuu kuplimalla. (Kettunen *et al.* 2000)

Tutkittaessa pohjavedenpinnan korkeuden vaihtelun merkitystä metaanin tuottoon ja hajotukseen havaittiin (Kettunen *et al.* 1999), että profiileissa, joissa vesipinta oli pysynyt melko vakiona (alle 5 cm muutos näytteenottoa edeltävänä 30 vuorokautena), tuotto- ja hapettumispotentialit vedenalaisissa kerroksissa olivat ainakin yhtä suuruusluokkaa suurempia verrattuna veden yläpuoliseen kerrokseen.

Lisäksi metaanin tuotto lisääntyi kohti syksyä. Tämä saattoi johtua siitä, että maaperään alkoi kertyä hiiltä, kun lämpötilan aleneminen vähensi metaanintuottajamikrobien aktiivisuutta. Kun näytteet tuotiin laboratorioon, korkeampi lämpötila lisäsi aktiivisuutta ja siten metaanin tuottoa. Lisäksi metaanintuottajapopulaation koon kasvu loppukesää kohti saattoi lisätä tuotantoa. Suurin metaanin tuotto esiintyi profiilissa, jossa vedenpinta ei ollut juuri vaihdellut, 20 cm vedenpinnan alapuolella, ja suurin hapettuminen 10 cm vedenpinnan alapuolella, missä sekä hapen että metaanin pitoisuudet olivat korkeita. Profiileissa, joissa pohjaveden pinta oli vaihdellut ennen näytteenottoa, maksimiarvot eivät riippuneet pohjavedenpinnan syvyydestä. Kettunen *et al.* (1999) toteavat, että metaanin tuotto ja hapettuminen reagoivat hyvin hitaasti pohjavedenpinnan laskuun ja siitä seuraavaan kyllästymättömään tilaan. Myös potentiaalien uudelleenaktivointi on hidasta vedenpinnan nousun jälkeen, jos potentiaalit ovat laskeneet selvästi ja olosuhteen muuttuneet sopiviksi muiden elektroniakseptoreiden pelkistymiseen. Hidas dynamiikka tarkoittaa, että sekä metaania tuottavat että sitä hapettavat mikrobit ovat kiinnittyneinä turvehiukkasiin ja pysyttelevät samassa kerroksessa, vaikka vedenpinnassa tapahtuu muutoksia. (Kettunen *et al.* 1999)

Anaerobisina metaania tuottavat mikrobit eivät lisäänty hapellisissa kerroksissa pohjavedenpinnan yläpuolella, mutta säilyvät elinkykyisinä myös hapellisina kausina. Syvemmät kerrokset säilyvät kuitenkin lähellä kyllästystilaa ja niihin jää hapettomia

mikroympäristöjä, mikä osittain selittää metaanin tuoton myös kyllästymättömissä oloissa. Metaanin hapettajat puolestaan selviävät myös hapettomissa oloissa, joten vedenpinnan vaihtelut eivät vaikuta yhtä paljon hapettumiseen kuin metaanin tuottoon. Metaanin tuoton kannalta ratkaisevaa on kuivuuden kesto. Jos kuivuus kestää alle yhden kuukauden, metaanin tuotto palaa ennalleen vedenpinnan jälleen noustua. Jos kuivuuden kesto lähestyy kahta kuukautta, metaanin tuotto loppuu. Tuotannon palautuminen on hidasta, ja metaanivuot pysyvät matalina viikkoja vedenpinnan nousun jälkeen. (Kettunen *et al.* 1999)

Pohjavedenpinta vaikuttaa paitsi suoraan maankosteuteen ja hapen määrään, myös mahdollisesti substraatin määrään. Pohjavedenpinnan laskusta seuraa kiihtyvä aerobinen hajotus, joka kuluttaa hiiliyhdisteitä, jotka hapettomissa oloissa lisäisivät metaanin tuottoa. Siksi substraatin kuluminen vähentää metaanin tuottoa. Hapettumispotentiaali voi alentua myös, koska kyllästymättömässä maassa metaanin pitoisuus alenee. Lisäksi vedenpinnan väliaikainen nousu ja sitä seuraava lasku voivat vapauttaa metaania syvemmistä kerroksista. (Kettunen *et al.* 1999)

2.3 Soiden metsätaloudellisen käytön tutkimus

Soiden metsätaloudellinen käyttö alkoi, kun nälkävuosien 1866–1868 jälkeen havaittiin metsänkasvun parantuneen maanviljelyä varten kuivatetuilla soilla. Varsinaisesti metsäojitustoiminnan katsotaan alkaneen vuonna 1908, jolloin metsähallitukseen palkattiin ensimmäiset suonkuivatusmetsänhoitajat, ja Vilppulan Jaakkoinsuolle perustettiin metsähallituksen toimesta maan ensimmäiset metsäojituksen koekentät. Vuonna 1928 Helsingin yliopistossa aloitettiin metsäojituksen opetus ja perustettiin metsäntutkimuslaitoksen suontutkimusosasto (Lappalainen 1998). Vuonna 1929 ilmestyneessä kirjassaan ”Vesiperäisten metsämaiden ojittaminen” O.J. Lukkala kuvaa eri suotyyppien soveltuvuutta metsäojitukseen, ojituksen suunnittelua, toimeenpanoa ja kunnossapitoa sekä ojituksen kustannuksia ja hyötyjä (Lukkala 1929). Uudistetut painokset ilmestyivät 1948 (Lukkala 1948) ja 1951 (Lukkala ja Kotilainen 1951).

Jaakkoinsuon koealueen toiminta alkoi varsinaisesti vuonna 1923, jolloin se siirtyi Metsätieteellisen koelaitoksen, nykyisen Metsäntutkimuslaitoksen, hallintaan (Lukkala 1951, Ojala 2002). Jaakkoinsuolta saatuja 40-vuotisia kokemuksia kuvaa vuonna 1951 ilmestyneessä kirjassa O.J. Lukkala, joka selostaa mm. koealueella tapahtunutta turpeen painumista, pohjaveden pinnan mittauksia, ojituksen vaikutusta metsän kasvuun ja suotyyppien muutoksia ojituksen myötä sekä alueella suoritettuja lannoituskokeita ja niiden

tuloksia. Vuonna 1960 Helsingin yliopiston suometsätieteen professori Leo Heikurainen kokosi käytettävissä olevan tutkimustiedon oppikirjaksi "Metsäojitus ja sen perusteet", jolla oli suuri merkitys käytännön metsäojituksen kannalta (Kaunisto 2001).

Metsäntutkimuslaitoksella turvemaita on tutkittu runsaasti. Paavilainen ja Virrankoski (1967) tutkivat veden kapillaarista nousua turpeessa. Vedellä kyllästetyt turvenäytteet asetettiin kuumaan ilmavirtaan, ja haihtumisesta seuraavaa vedenkorkeuden alenemista tarkkailtiin. Nousunopeuden todettiin pienenevän pohjaveden pinnan alentuessa (Paavilainen ja Virrankoski 1967). Asikainen (1988) selvitti kirjallisuustutkimuksen avulla epäsuoria menetelmiä turpeen vedenläpäisevyyden arviointia varten. Asikainen totesi, että yhtälöt vedenläpäisevyyden ja turpeen ominaisuuksien välille on määritetty yleensä turvelajeittain, ja niiden selitysasteet jäävät alhaisiksi, joten hydraulista johtavuutta ei voida riittävän luotettavasti määrittää turpeen tiheyden, maatumisasteen, tuhkapitoisuuden eikä kuituisuuden perusteella. Sen sijaan suurhuokosten (halkaisija $> 50 \mu\text{m}$) osuuden ja vedenjohtavuuden välille on saatu korkeita korrelaatioita. Ahti (1971) tutki tensiometrin toimintaa jyrksinturpeessa ja havaitsi mittaustarkeyden erinomaiseksi, kun mitattua arvoa ja todellista etäisyyttä pohjaveden pinnasta verrattiin keskenään. Hytönen ja Silfverberg (1991) puolestaan tutkivat ojitetuilla räme- ja korpikoekentillä, miten ojien vesipinnan korkeus vaikutti pohjaveden korkeuteen.

Viime vuosina Metsäntutkimuslaitoksen turvemaita koskevissa tutkimushankkeissa on tutkittu mm. metsän uudistamista ja metsittämistä sekä puuston ravinnetalouden hoitoa turvemaidella, metsityksen ja hakkuiden vaikutusta suometsien ja -peltojen hiilivirtoihin ja -varastoihin, ekologisesti ja taloudellisesti kestävästä metsänkasvatusta turvemaidella ja turvetuotannosta vapautuvien suopohjien metsittämisen ympäristövaikutuksia, ojitettujen turvemaiden ravinnemääriä ja ravinnedynamiikkaa sekä ravinteiden huuhtoutumista hakkuiden yhteydessä, ojitettujen turvemaiden puutavaran laatua sekä turvemaiden puunkorjuun kehittämistä. (Metsäntutkimuslaitos 2005)

Helsingin yliopiston suometsätieteen laitoksella on tutkittu ojituksen ja lannoituksen vaikutusta puuston kasvuun (mm. Seppälä 1969, Seppälä 1970, Mannerkoski ja Seppälä 1970) sekä turpeen fysikaalisia ominaisuuksia metsänkasvatuksen kannalta. Suometsätieteen laitos on perustanut pysyviä koekenttiä tutkimus- ja opetuskäyttöön eri puolille Suomea 1950-luvun lopulta lähtien (Heikurainen ja Mannerkoski 1982). Päivänen (1973) tutki väitöskirjassaan metsäojitettujen soiden turpeen vedenläpäisevyyttä ja vedenpidätyskykyä.

Heikurainen ja Seppälä (1963) tutkivat ojituksen vaikutusta turpeen lämpöoloihin. Suon kuivatusasteen noustessa haihdunta vähenee, jolloin päivälämpötila kohoaa. Toisaalta turpeen kuivuessa sen lämmönjohtokyky alenee, jolloin turpeeseen varastoituu vain vähäisiä lämpömääriä, ja yöt ojitetuilla turvemaidilla ovat kylmiä. Siten ojituksen seurauksena lämpöolot äärevöityvät. Päivittäiset lämpötilanvaihtelut ulottuivat Heikuraisen ja Seppälän mukaan kuitenkin vain 20-30 cm syvyyteen, eivätkä lämpötilamuutokset olleet metsänkasvatukselle niin haitallisia, että kuivatustehoa olisi niiden vuoksi syytä alentaa.

Ojituksen vaikutuksia turpeen kemiallisiin ominaisuuksiin tutkivat Sepponen ja Haapala (1979). Ojituksen myötä biologinen toiminta turpeessa aktivoituu, jolloin typen mobilisoituminen lisääntyy. Turvemaidissa fosfori on vaikealiukoisina orgaanisina yhdisteinä, jotka hajoavat turpeen maatuessa. Sepponen ja Haapala eivät tutkimuksessaan kuitenkaan havainneet fosforin mobilisaatiota, mikä voi johtua vapautuneen fosforin kulumisesta kasvien ja mikrobien elintoimintoihin tai vapautumisen ilmenemisestä vasta myöhemmässä vaiheessa ojituksen kuivattavan vaikutuksen ehdittyä pidemmälle. Myöskään raudan lisäystä ei havaittu, mikä mahdollisesti johtui rautaionien reaktioista muiden ionien välillä, mikä esti uuttumisen.

Ruokanen (1982) tutki lannoituksen ja kuivatuksen vaikutusta turpeen vesi- ja happioloihin sekä biologiseen aktiivisuuteen. Aerobisuusrajaa tutkittiin hopeasauvoilla ja hajotuksen aktiivisuutta selluloosaliuskoilla. Aerobisuusrajan muutokset todettiin hitaiksi ja jäykiksi verrattuna pohjavedenpinnan muutoksiin. Koekentästä riippuen aerobisuusraja sijaitsi keskimäärin joko pohjaveden pinnan ylä- tai alapuolella. Mitä lyhyempi oli ojaväli, sitä alempana sijaitsivat sekä pohjavesi että aerobisuusraja. Hajotus oli kuitenkin 20 m sarkaleveydellä tehokkaampaa kuin 10 m sarkaleveydellä, mihin ilmeisesti oli syynä lyhyen ojavälin liian tehokas kuivatus hajotustoiminnan kannalta. Yli 35 cm syvyydellä hajotus oli enää alle 5 %. Lannoitustasolla ei ollut vaikutusta aerobisuusrajaan (Ruokanen 1982). Myös Mannerkoski (1985) totesi aerobisuusrajan seuraavan pohjaveden pinnan vaihtelua. Aerobisuusrajan vaihtelun amplitudi oli pohjavesipinnan vaihtelua pienempi.

Saarenmaa (1980) tutki eri luonnontilaisten soiden turpeiden maatumisasteiden määrittämismenetelmien välisiä riippuvuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. von Postin maatumisastetta, Pjajvtshenkon maatumisprosenttia sekä sentrifugiprosenttia (Päivänen 1982a) pyrittiin yksi kerrallaan selittämään näytesyvyyden, tuhkapitoisuuden ja vesipitoisuuden avulla. Selitysasteet eivät kuitenkaan nousseet kovin korkeiksi, joten nämä tekijät eivät yksinään riitä kuvaamaan turpeen maatumisastetta millään menetelmällä

määritettynä. Myös eri maatumisasteikkojen väliset selitysasteet jäivät alhaisiksi (Saarenmaa 1980).

2.3.1 Turpeen vedenpidätyskyky

Heikosti maaton turve sisältää kyllästyskosteudessa runsaasti vettä, mutta painepotentiaalin kasvaessa se myös luovuttaa vettä helposti. Maatuneemmat turpeet sisältävät kyllästyskosteudessa vähemmän vettä, mutta painepotentiaalin kasvaessa veden poistuminen turpeesta on vähäisempää (Päivänen 1982a, Laiho 1987). Mitä pienempi on turpeen tiheys, sitä enemmän vettä se luonnollisesti sisältää kyllästyskosteudessa johtuen suuresta huokostilavuudesta. pF-arvoilla 3-4,2 turpeen vesipitoisuus kasvaa turpeen tiheyden kasvaessa, koska tiiviissä turpeessa huokokset ovat pieniä ja pidättävät vettä tehokkaasti. Alhaisemmilla painepotentiaalin arvoilla myös kasvilajikoostumuksella on vaikutusta turpeen vedenpidätyskykyyn. Kuivatussyvyydellä 100 cm (pF 2) turpeesta poistettavissa oleva vesimäärä pienenee voimakkaasti turpeen tiheyden kasvaessa siten, että hyvin maatuneesta turpeesta poistuva vesimäärä on alle 1/3 heikosti maatuneesta turpeesta poistuvasta vesimäärästä (Päivänen 1982a).

Heikurainen *et al.* (1964) saivat tutkimuksessaan suoraviivaisen yhteyden pohjavesipinnan syvyyden ja pintaturpeen (0-20 cm) vesipitoisuuden välille. 10 cm muutos pohjaveden pinnassa aiheutti noin 5 prosenttiyksikön muutoksen pintaturpeen vesipitoisuudessa sekä kenttä- että laboratoriokokeissa. Mitä syvemmälle turpeessa menttiin, sitä vähemmän turpeen vesipitoisuus muuttui pohjaveden pinnan muutosten myötä.

Ahti (1978) havaitsi pohjavesipinnan syvyyden kuvaavan pintaturpeen kosteutta sitä heikommin, mitä syvemmällä pohjavesi sijaitsee. Pohjaveden sijaitessa syvällä esiintyy pohjaveden syvyydestä riippumatonta pintaturpeen kosteusvaihtelua johtuen mm. sadevesien valumisesta ojiin, haihtumisesta ennen pohjavesipinnan saavuttamista tai sitoutumisesta pintaturpeeseen. Koska suurimmatkin pintaturpeessa havaitut painepotentiaalit olivat melko pieniä (250 cmH₂O eli pF 2,4 suurimmalla ojitussyvyydellä 70 cm), Ahti arvioi, että ojitetuilla soilla kapillaarinen yhteys pohjaveden ja pintaturpeen välillä ei kuivinakaan vuosina katkea.

Hytönen ja Silfverberg (1991) havaitsivat ojitetuilla räme- ja korpikoekentillä, että mitä syvemmälle ojien vesipinta oli säädetty, sitä pitempään ja enemmän pohjaveden pinta poikkesi ojaveden tasosta.

Mannerkoski (1985) tutki pohjavesipinnan vaihtelun vaikutuksia turvemaan ekologiaan kasvattamalla männyn ja koivun taimia ruukuissa, joiden pohjavesipintaa ja sen vaihtelua säädeltiin. Mannerkoski havaitsi, että pohjavedenpintaa laskettaessa vedenpinta asettui uudelle tasolle selvästi nopeammin kuin vedenpintaa nostettaessa. Tasoittuminen oli sitä hitaampaa, mitä suurempi oli vaihteluväli ja mitä syvemmällä turpeessa vaihtelu tapahtui. Yleisesti mitattu painepotentiaali seurasi melko hyvin pohjaveden pinnan etäisyydestä laskettua arvoa. Männyn taimilla paras kasvu oli pohjaveden sijaitessa vakiosyvyydellä 25 cm sekä sen vaihdella 25 ± 10 cm verrattuna syvyyksiin 10 cm ja 50 cm. Koivulla paras kasvu oli pohjaveden syvyydellä 50 cm sekä vaihteluvälillä 50 cm ± 10 cm.

Laiho (1987) tutki turvetuotantoa varten valmistelluilta alueilta otettujen turvenäytteiden vedenpidätyskykyä. Vesipitoisuudet eri maaveden jännityksillä mitattiin laboratoriossa. Kyllästyskosteudessa näytteet pidättivät 89,7-97,0 % vettä. pF-arvolla 4 näytteet sisälsivät keskimäärin 12,0 – 18,3 % vettä. Vedenpidätyskykyä selittivät parhaiten vesipitoisuus ennen mittauksia, tiheys, varpu- ja puuturvetekijän osuus sekä maatuneisuus.

Turpeen vedenpidätyskykyyn vaikuttaa hystereesi-ilmiö, joka turpeilla on erityisen voimakas muihin maalajeihin verrattuna. Laihon (1987) siteeraaman tutkimuksen mukaan hystereesi-ilmiö on suurimmillaan sellaisessa turpeessa, jossa on runsaasti halkaisijaltaan yli 50 µm makrohuokosia, ja pienenee maatuneisuuden, tiheyden ja tuhkapitoisuuden kasvaessa. Toistuva kuivuminen ja kostuminen alentaa vedenpidätyskykyä pysyvästi.

2.3.2 Turpeen vedenjohtavuus

Turpeiden vedenjohtavuus kasvaa järjestyksessä rahkaturve – saraturve – puuturve (mm. Päivänen 1973, Mannerkoski 1985, Myllys 1998). Päivänen (1973) tutki väitöskirjassaan metsäojitettujen soiden vedenläpäisevyyttä ja vedenpidätyskykyä. Päiväsen mukaan turpeen vedenläpäisevyys vaihteli välillä $2,0 \cdot 10^{-6}$ – $1,1 \cdot 10^{-2}$ cm/s. Samassakin turvekerroksessa vaihtelu oli jopa ± 40 %. Rahkaturpeilla yhden muuttujan malli (muuttujana tiheys, maatumisaste tai havaintosyvyyys) selitti vedenläpäisevyyden vaihtelusta 40-60 %. Muiden turvelajien kohdalla yhden muuttujan mallin selitysasteet olivat näitä alhaisempia. Kahden muuttujan (havaintosyvyyys ja tiheys/maatumisaste) malli selitti vedenläpäisevyyden vaihtelusta rahkaturpeissa yli 70 % ja sara- ja puuturpeissa noin 60 %. Päivänen toteaa, että tutkimukseen valittujen, helposti määritettävien muuttujien selityskyky jää alhaiseksi, ja tarkkoja tuloksia haluttaessa tulee mitata vedenläpäisevyyttä suoraan. Päiväsen mukaan laboratoriossa saadaan liian suuria vedenläpäisevyyden arvoja.

Melantie (1988) tutki kokeellisesti turvetuotantokentän ja metsäojitetun suon vedenläpäisevyyksiä ja niiden eroja. Turvetuotantokentän vedenläpäisevyys oli tilastollisesti merkitsevästi alempi kuin metsäojitetun suon. Vedenläpäisevyys mitattiin sekä vuorokauden että viikon kuluttua kokeen alkamisesta, eikä vedenläpäisevyydessä tänä aikana tapahtunut merkittäviä muutoksia. Parhaiten (52 %) metsäojitetun suon saraturpeen vedenläpäisevyyden vaihtelua selitti maatumisaste von Postin asteikolla mitattuna. Turvetuotantokentän vedenläpäisevyyden vaihtelulle ei löytynyt selittäviä muuttujia. Kahden muuttujan mallilla, jossa selittävinä tekijöitä olivat maatumisaste ja kosteusprosentti, pystyttiin metsäojitetun suon saraturpeen vedenläpäisevyyden vaihtelusta selittämään 61 %. Turvetuotantokentälle laadittujen kahden muuttujan mallien paras selitysaste jäi 11 prosenttiin.

Heikosti maatumisasteissa turpeissa vedenläpäisevyys on vaakasuunnassa pystysuuntaa suurempi. Maatumisasteissa turpeissa eroa eri suuntien välillä ei ole (Hailikari 1954).

Heikuraisen (1971) mukaan pohjavedenpinnan mittaamiseen käytetyn kaivon läpimitta vaikuttaa pohjavesipinnan käyttäytymiseen turpeessa. Mitattaessa haihdunnan seurauksena alenevaa pohjavesipintaa suuriläpimittainen kaivo toimii turpeen vesiolojen tasoittajana. Siten pieniläpimittainen kaivo on tässä tapauksessa tarkempi. Mitattaessa sateen aiheuttamaa pohjaveden nousua pieniläpimittainen kaivo liioittelee vesiolojen muutosta, kun taas suuriläpimittainen kaivo hidastaa muutoksia, joten sateen jälkeen pohjavesipinnan mittaaminen on epätarkkaa, käytettiinpää minkä kokoista kaivoa tahansa (Heikurainen 1971).

Viime vuosina Helsingin yliopistossa on tutkittu mm. kasvien kolonisaatiota käytöstä poistetuille suopohjille vettämisen jälkeen. Lisäksi yhteistyössä Metsäntutkimuslaitoksen kanssa tutkitaan turvemaan ravinnevaroja, karikkeen hajotusta erilaisissa kosteus- ja ravinteisuusoloissa turvemaidella ja turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutuksia Suomessa. (TUHTI 2005)

Sekä Helsingin yliopiston suometsätieteen ja metsäteknologian laitoksilla että Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa on tehty pro gradu -töitä turpeisiin liittyen 1980- ja 1990-luvuilla, Helsingissä metsänkasvatuksen ja Joensuussa turvetuotannon tarpeisiin (mm. Saarenmaa 1980, Ruokanen 1982, Eklund 1983, Laiho 1987, Asikainen 1988, Melantie 1988, Sivonen 1995, Myllynen 1995). Näissä töissä tutkittiin mm. turpeiden vedenläpäisevyyden selvittämistä epäsuorin menetelmin, lannoituksen ja kuivatuksen vaikutusta turpeen vesi- ja happioloihin sekä biologiseen aktiivisuuteen, vertailtiin erilaisia

turpeen maatumisasteen määrittämis menetelmiä ja selvitetiin veden imeytymistä turvetuotantokenttään.

Turvetuotannosta poistettujen suopohjien käyttöä metsänkasvatukseen on tutkittu Metsäntutkimuslaitoksella (Kaunisto ja Aro 1998), maatalouskäyttöön ottoa Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksessa (Virkajärvi ja Huhta 1998) ja ennallistamista takaisin suoekosysteemiksi Helsingin yliopistossa (Vasander ja Roderfeld 1998). Klöve tutki turvetuotannon kiintoainekuormituksen vähentämistä lisensiaatintyössään (1994) sekä väitöskirjassaan (1997).

2.4 Maamekaniikan tutkimus

Teknillisessä korkeakoulussa tehtiin 1960- ja 1970-luvuilla runsaasti pohjarakennuksen ja maamekaniikan diplomitöitä turpeisiin liittyen. Työssä selvitetiin turpeen geoteknisiä ominaisuuksia kuten kantavuutta, leikkauslujuutta, vetolujuutta ja murtokuormitusta sekä eri menetelmien soveltuvuutta näiden tutkimiseen (mm. Kuha 1969, Nissinen 1970, Kostianen 1972, Kosonen 1978). Nykyään pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa tutkitaan turpeiden geoteknisiä ominaisuuksia erilaisten rakennushankkeiden tarpeisiin (mm. Lojander *et al.* 1996).

Tavallinen selvityksen kohde on turpeen painuminen kuormituksen alla esimerkiksi tien penkereen rakentamista silmälläpitäen. Tällöin vedellä kyllästetyn näytteen konsolidaatiota tutkitaan ödometrikokein. Niissä kuormitusta lisätään asteittain, ja vesi pääsee poistumaan näytteestä yleensä alakautta. Konsolidaatiokokeita turpeille ovat TKK:n pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa diplomitöissään tehneet mm. Hailikari (1954), Tikka (1955) ja Kuha (1969).

Myös Metsäntutkimuslaitoksella on tutkittu turpeen painumista. Saarilahti (1992) tutki mahdollisuutta laskea kuivatuksesta aiheutuvaa turvemaalle rakennettavan tiealueen painumista geotekniikan keinoin. Näin saatu malli selitti 93,6 % havaitusta painuman vaihtelusta. Saarilahti toteaa kuitenkin, etteivät tulokset ole yleistettävissä painumien laskentaan.

Turpeen painumista aiheuttavat (McAfee 1985)

- 1) ylempien kerrosten kutistuminen kuivumisen seurauksena

- 2) alempien kerrosten tiivistyminen veden poistuessa, kun veden noste vähenee ja sen seurauksena ylempien kerrosten aiheuttama paine kasvaa
- 3) orgaanisen aineksen hajoaminen
- 4) eroosio

Kohdat 1, 2 ja 4 ovat fysikaalista painumista ja kohta 3 on kemiallista painumista. Lisäksi turvemaat painuvat koneiden aiheuttaman kuormituksen vaikutuksesta. Maatumisen aiheuttama kemiallinen painuminen voi olla jopa 2 cm vuodessa (Myllys 1998).

Painuminen voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensin maa konsolidoituu, jolloin huokosvedenpaine kasvaa ja vesi poistuu rakenteesta. Tällöin huokostilavuus pienenee ja maa painuu kasaan. Toisessa vaiheessa, ns. sekundaarisessa painumisessa huokospainetta ei enää kehity (Kosonen 1978). Sekundaarinen painuminen voi jatkua lähes loputtomasti (Carlsten 1988).

Konsolidaatiokokeita turpeille ovat tehneet mm. Kuha (1969), Hailikari (1954), Tikka (1955) ja Saarilahti (1992). Kuhan (1969) mukaan konsolidoituminen alkaa yläosasta alaosan pysyessä muuttumattomana. Kuormituksen lisääntyessä huokosveden paine lisääntyy, jolloin vesi suotautuu pois näytteestä ja koko näytteen rakenne alkaa muuttua. Näytteen painuessa kasaan myös sen vedenläpäisevyys alenee. Turvemaan painumista ojituksen ja kuivumisen seurauksena ilman kuormituslisäystä ovat tutkineet mm. Niemi (1955) ja Jantunen (1972).

Tikka (1955) tutki turvemaan kutistumista ja kuivumista kuormituksen seurauksena. Turvenäytteet oli otettu viljelyiltä ja viljelemättömiltä ojitetuilta soilta, polttoturvesuolta ja ojitetusta korvesta, ja ne edustivat maatumisasteita H4-H8 von Postin asteikolla. Näytteiden annettiin kuivua ilmakeivaksi huoneenlämmössä, jolloin ne kutistuivat 40-80 % alkuperäisestä tilavuudestaan. Pienet näytteet kutistuivat jopa 50 % suuria enemmän, mikä ilmeisesti johtui suurien näytteiden epähomogeenisuudesta ja halkeilusta. Lisäksi näytteitä kuormitettiin ödometrissä kuormituksilla 0,125, 0,250, 0,500 ja 1 kp/cm² kahden vuorokauden aikana. Painumaa seurattiin ajan funktiona. Suurimmalla kuormituksella näytteet puristuivat kokoon 40 – 60 %. Valtaojitetulta viljelemättömältä nevasuolta otettu näyte painui alkukorkeudestaan 62 %. Mitä suurempi oli näytteen huokostilavuus, sitä enemmän se painui (Tikka 1955). Saarilahden (1972) kokeissa kuormituksella 1,0 kg/cm² näytteet painuivat keskimäärin 50 % alkukorkeudestaan (Saarilahti 1972). Laihon (1987)

kokeissa turvenäytteet kutistuivat kuivuessaan ilman kuormitusta arvosta $pF=0$ arvoon $pF=4$ asti 31,3-82,7 %. Laihon siteeraamien tutkimusten mukaan alle $pF 2$:ssa ei turvemaille tapahdu kutistumista, ja suurin kutistuminen tapahtuu välillä $pF 3-4,2$.

Lukkalan (1951) mukaan painuminen on runsainta ojien kaivun aikana ja heti sen jälkeen, ja suurin osa painumasta tapahtuu kaivua seuraavana viitenä vuonna niin, että kymmenen vuoden jälkeen painuminen on jo varsin hidasta. Painuminen on voimakkainta vetisillä ja löyhäturpeisilla nevoilla, rämeillä se on heikompaa ja heikointa korpimailla.

Niemi (1955) tutki suon painumista ojituksen jälkeen. Ojasyvyydellä 270 cm suo painui ojitusta seuraavien 60 vuoden aikana alkuperäisestä korkeudestaan 49 %. Niemi havaitsi, että keskimäärin rahkasuoturpeviljelykset painuivat 20 % ja mutasuoturpeviljelykset (saraturvesuot) painuivat 25-30 %. Niemen mukaan rahkaturpeilla painuminen ei ulotu kauas ojasta. Saraturpeessa painuminen ulottuu kauemmas kuin rahkaturpeilla, ja saraturpeessa painumista tapahtuu satojen metrien päässä ojasta.

Jantunen (1972) tutki tupasvilla-sara-rahkaturpeen painumista laboratorio-olosuhteissa. Erikorkuiset (110 – 410 cm) turpepylväät kyllästettiin vedellä, minkä jälkeen veden annettiin valua painovoimaisesti pois turpeesta. Turpeen painumaa ja poistuneen veden määrää seurattiin ajan funktiona. 5000 tunnin kuluttua veden valuminen pylväistä oli lakannut. 110-senttinen pylväs painui 9,5 % ja 410-senttinen pylväs painui 25,1 %. Painuma senttimetreinä ilmaistuna oli noin puolet poistuneen veden määrästä.

Saarilahti (1992) tutki mahdollisuutta laskea kuivatuksesta aiheutuvaa tiealueen painumista geotekniikan keinoin. Aineistona käytettiin kirjallisuudesta saatuja kenttämittaustuloksia, joista arvioitiin tarvittava kosteussuhde (veden osuus kuivan aineen massasta) ja jonka painuma-arvoihin laskennallisia arvoja verrattiin. Pohjaveden pinnan alentumisesta aiheutuva kuormituslisäys laskettiin kuivatussyvyyden ja pohjavesipinnan yläpuolisen turpeen arvioidun tilavuuspainon perusteella. Painuma laskettiin tämän jälkeen käyttäen hyväksi Saarilahden laboratoriokokeissa havaitsemaa empiiristä yhteyttä painuman, kosteussuhteen ja kuormituksen välillä. Näin saatu malli selitti 92 % kirjallisuudesta saatujen painuma-arvojen vaihtelusta. Saarilahti laski teoreettista painumaa myös ns. painumissuhteen perusteella. Painumissuhde arvioitiin empiirisesti kosteussuhteen perusteella. Esikuormitus laskettiin empiirisellä yhteydellä esikuormituksen ja huokosluvun välillä, huokosluku laskettiin kosteussuhteen perusteella, ja painuma laskettiin painumissuhteen ja esikuormituksen avulla. Näin saatu malli selitti 93,6 % havaitusta

painuman vaihtelusta. Saarilahti toteaa kuitenkin, etteivät tulokset ole yleistettävissä painumien laskentaan.

Päiväsen (1982b) lämpötilassa 105 °C tapahtuneessa kuivatuskokeessa metsäojitetulta suolta otetut rikkomattomat näytteet kutistuivat 15-84 % alkutilavuudestaan siten, että suuremmilla tiheyksillä kutistuminen oli suurempaa. Keskimäärin rahkaturpeet painuivat 52,5 %, saraturpeet 45,8 % ja puuturpeet 45,1 % tilavuudesta. Myös Päiväsen kokeissa painuma oli noin puolet tai vähemmän poistuneen veden määrästä. Parhaiten painumaa selitti kahden muuttujan (tiheys ja näytteenottoisyvyys) malli (rahkaturpeelle 56 %, saraturpeelle 32 %), mutta lähes yhtä hyvään selityssasteeseen (rahkaturpeelle 52 %, saraturpeelle 32 %) päästiin käyttämällä veden osuutta tuorepainosta ja näytteenottoisyvyttä, jolloin ei tarvita tilavuustarkkaa näytteenottoa.

2.5 Muu tutkimus

Turpeen kemiallista jatkojalostamista mm. vahoiksi, hartseiksi, erilaisiksi hapoiksi, alkoholeiksi, kaasuiksi ja öljyiksi on tutkittu mm. Turun ja Joensuun yliopistoissa, Vapo Oy:ssä, VTT:llä ja GTK:ssa. Turvevahan ja -hartsin valmistamista tutkittiin VTT:llä jo 1940-luvulla. 1980-luvulla käynnistettiin useita kemiallisen jalostuksen eri osa-alueisiin keskittyviä tutkimushankkeita. Turvetta ei kuitenkaan tällä hetkellä jalosteta teollisessa mitassa johtuen kilpailevien tuotteiden vahvasta asemasta (VTT 1983, Fagernäs 1998). Turpeen käyttöä terveydenhoidossa, mm. turvekylpyjä, alettiin tutkia vuonna 1989 GTK:lla yhteistyössä Turun yliopiston kanssa (Korhonen 1998).

Oulun yliopistossa on tutkittu turpeen hydraulisia ominaisuuksia kahdella luonnontilaiselle suolle rakennetulla kosteikkopuhdistamolla, joista toiseen johdetaan kemiallisesti puhdistettuja kunnallisia jätevesiä ja toiseen turvetuotantoalueen valumavesiä. Virtausnopeuksien perusteella todettiin, että puhdistukseen osallistuva kerros oli noin 50 cm paksu molemmilla koealueilla, ja hydraulinen johtavuus oli säilynyt hyvänä usean vuoden jätevesikuormituksen jälkeenkin (Ronkanen & Kløve 2005).

3 Maavesiparametrit ja niiden määrittäminen

3.1 Maan vedenpidätyskyky

Maan kykyä sitoa vettä kuvataan vedenpidätyskäyrällä, jossa x-akselilla on maan vesipitoisuus tilavuusosuutena ja y-akselilla maahan kohdistunut imu, joka usein ilmaistaan painoyksikköä kohti. Tällöin voidaan käyttää yksikkönä vesipatsaan korkeutta, esimerkiksi $100 \text{ cm H}_2\text{O} = 0,1 \text{ bar}$. Y-akseli esitetään yleensä logaritmisena käyttämällä yksikkönä senttimetreinä ilmaistun imun kymmenkantaista logaritmia, jota nimitetään pF-luvuksi. Vedenpidätyskäyrä on kullekin maalajille ominainen.

Veden kapillaarista nousukorkeutta kuvaa kaava

$$h = \frac{0,3}{d} \quad (1)$$

missä h on nousukorkeus (cm) ja d huokosputken halkaisija (cm). Tyypillinen kuivatussyvyys on yksi metri, eli pohjavedenpinta sijaitsee tasapainotilassa 100 cm syvyydessä. Siten maan pinnassa (eli kun imun arvo on $100 \text{ cm H}_2\text{O}$) vettä on jäljellä enää sellaisissa huokosissa, joiden halkaisija on $0,003 \text{ cm}$ tai vähemmän. Siten vedenpidätyskäyrä kuvaa myös maan huokoskokojakaumaa. Jos maan vesipitoisuus 100 cm imulla on esim. 40 tilavuusprosenttia, on maan kokonaistilavuudesta 40% alle $0,003 \text{ cm}$ huokosia.

Vedenpidätyskäyrä eli imun ja maan vesipitoisuuden välinen suhde mitataan kohdistamalla vedellä kyllästettyyn maanäytteeseen ali- tai ylipainetta (esim. Vakkilainen 1986). Pienillä imun arvoilla tyhjenevät ensin suuret huokokset, ja imun kasvaessa yhä pienemmät huokokset luovuttavat vetensä.

3.2 Maan vedenjohtavuus

Maan vedenjohtavuudella tarkoitetaan sen kykyä läpäistä vettä. Vesi pääsee liikkumaan maapartikkelien väliin jäävissä huokosissa. Vedenjohtavuutta kuvaa Darcyn laki (kaava 2), jossa q on valunta aikayksikössä maan läpi (m/d) ja dH/dz on hydraulinen gradientti. Verrannollisuuserroin K on kullekin maalajille ominainen. Puhutaan K -arvosta, ja se voidaan mitata kyllästyneille näytteille pitämällä painekorkeus vakiona ja mittaamalla aika, joka kuluu tietyn vesimäärän valumiseen näytteen läpi.

$$q = K \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (2)$$

Jos maa ei ole kokonaan vedellä kyllästynyt ts. jos huokosissa on myös ilmaa, tilanne mutkistuu. Tällöin vain vettä sisältävät huokokset johtavat vettä, joten vedenjohtavuus alenee vesipitoisuuden laskiessa. Maan alkaessa kuivua tyhjenevät ensin suurimmat, hyvin vettä johtavat huokokset, ja lopulta vettä esiintyy vain kaikkein pienimmissä huokosissa, jotka eivät osallistu veden kuljettamiseen.

Richards (1931) havaitsi, että Darcyn laki pätee myös kyllästymättömässä maassa, mutta tällöin K :n suuruus riippuu maan vesipitoisuudesta.

3.2.1 Ajan suhteen muuttumattomaan tilanteeseen perustuvat menetelmät

Kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden mittaamiseen tarkoitetuissa *steady-state* – menetelmissä valunta, hydraulinen gradientti ja vesipitoisuus ovat vakioita ajan suhteen (Hillel 1982). Nämä menetelmät ovat muuttuvien olosuhteiden menetelmiä tarkempia, mutta myös hitaampia. Kyllästymättömän hydraulisen johtavuuden mittaaminen perustuu Darcyn lakiin tai Richardsin yhtälöön

$$q(\theta) = K(\theta) \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (3)$$

missä H on hydraulinen korkeus, joka koostuu painepotentiaalista h ja painovoimapotentialista z , joten

$$\frac{\Delta H}{\Delta z} = \frac{\Delta h + \Delta z}{\Delta z} = \frac{\Delta h}{\Delta z} + 1 \quad (4)$$

Kun määritelmään (3) yhdistetään massan säilymisen laki, päästään yleiseen virtausyhtälöön vaakasuuntaiselle virtaukselle

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{dh}{dx} \right] \quad (5)$$

ja pystysuoralle virtaukselle

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

Kun vallitsee yksikkögradientti (*unit hydraulic gradient* eli $\Delta H / \Delta z = 1$), jolloin virtaukseen vaikuttaa ainoastaan painovoima, on $\Delta h = 0$ eli $h = \text{vakio}$. Tällöin saadaan kaavasta (3)

$$K(\theta) = q(\theta) / 1 = q(\theta) \quad (7)$$

joten K tietyllä vesipitoisuudella eli $K(\theta)$ on yksinkertaisesti yhtä suuri kuin näytteeseen syötetty vesimäärä q . Tätä menetelmää voidaan pitää kyllästymättömän maan K -arvon mittaamisen standardimenetelmänä, koska sen taustalla oleva teoria on fysikaalisesti perusteltu, ja $K(\theta)$ saadaan suoraan mittaamalla. Infiltraatiomenetelmä soveltuu painekorkeuksille 0...-80 cm (Burke *et al.* 1986). Menetelmää voidaan muunnella mm. näytteen korkeuden tai vesisyötön menetelmän mukaan. Koe voidaan toteuttaa myös painekammiossa kahden huokoisen levyn välissä (*two-plate method*), jolloin ongelmaksi voi muodostua riittävä kontakti levyjen ja maanäytteen välillä varsinkin turpoavilla maalajeilla. Imu voidaan myös kohdistaa pelkästään näytteen alapintaan.

Yksinkertainen tapa toteuttaa yllä kuvattu menetelmä on valuttaa pitkään maanäytepylvääseen vettä tunnetulla, tasaisella nopeudella (*long-column infiltration method*) (Hillel 1982, Klute & Dirksen 1986, Burke *et al.* 1986, Dirksen 1991). Tällöin vesi kulkeutuu alaspäin painovoiman johdosta, ja sekä vesipitoisuus että painekorkeus tietyllä matkalla näytteen pinnan alapuolella asettuvat tietyssä ajassa vakioiksi ($\Delta h = 0$ eli $h = \text{vakio}$), mikä voidaan tarkastaa kahdella tensiometrillä. Tällöin vallitsee yksikkögradientti, ja pylvääseen syötetty vesimäärä ($q = Q/A$) on yhtä suuri kuin $K(\theta)$ kyseisellä vesipitoisuudella.

Vesi voidaan joko sadettaa näytteen pinnalle, sen voidaan antaa valua läpi huokoisesta levystä, johon kohdistuu negatiivinen paine, tai näytteen pinnalle valetaan huokoinen sementtikuori (*crust method*) (Burke *et al.* 1986). Sadetuksessa ongelmana on mahdollinen

näytteen pinnan rakenteen muuttuminen ja sen myötä imeytymisen vaikeutuminen sekä makrohuokosiin kulkeutuva vesi. Huokoista levyä käytettäessä ongelmana on saada riittävä kontakti näytteen ja levyn välille. Kuorimenetelmässä ei ole kontaktiongelmaa, mutta kuoren resistanssin määrittäminen on ongelmallista, ja lisäksi kuoresta uuttuvat kemikaalit voivat muuttaa maan vedenjohtokykyä (Dirksen 1991). Dirksen kokeili näytteen yläpuolelle asetettavia injektioiskuja, joilla päästiin alhaiseen vedensyöttöön (2 mm d^{-1}).

Mittaaminen voidaan aloittaa kyllästyneellä näytteellä (Klute & Dirksen 1986), minkä jälkeen virtausnopeutta alennetaan (desorptio), tai näyte voi olla alussa kuiva (sorptio) (Dirksen 1991). Kun koe tehdään peräkkäin eri virtausnopeuksilla ja siten eri vesipitoisuuksilla, saadaan määritettyä K:n riippuvuus maan vesipitoisuudesta eli $K(\theta)$. Mitä kuivempi näyte on, sitä kauemmin kestää tasapainotilan saavuttaminen, kuivalla näytteellä useista viikoista yli kuukauteen. Menetelmä on hidas mutta tarkka (Dirksen 1991). Infiltraatiomenetelmää jyrshinturpeelle vesipitoisuudella 60 % - 90 % on käyttänyt Holden (2001).

3.2.2 Muuttuvaan tilanteeseen perustuvat menetelmät

Diffusiviteettiyhälö

Tasapainotilaan perustuvissa menetelmissä haittapuolena on tasapainon saavuttamiseen kuluva pitkä aika varsinkin alhaisilla vesipitoisuuksilla. Nopeampi, mutta samalla epätarkempi tapa mitata vedenjohtavuutta on käyttää muuttuvaa vedensyöttöä tai muuten muuttuvia olosuhteita (*transient state methods*). Tällaisia laboratoriomenetelmiä ovat mm. sorptiviteetin (sorptivity, S) mittaus, instantaneous-profile-method, hot-air method sekä one-step method. Näissä menetelmissä mitataan usein hydraulista diffusiviteettiä $D(\theta)$, joka määritellään (Hillel 1980, Hillel 1982, Klute ja Dirksen 1986, Dirksen 1991)

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (8)$$

missä $dh/d\theta$ on vedenpidätyskäyrän kaltevuuden käänteisarvo kohdassa θ .

Diffuusioanalogiassa ajatellaan vesipitoisuuden gradientin toimivan vettä liikuttavana tekijänä. Diffuusioanalogia ei kuitenkaan sovellu, jos maa-aineksessa ilmenee hystereesiä eli jos maan vesipitoisuus tietyllä painepotentiaalilla riippuu siitä, onko maa kuivatus- vai kastumistilassa. Se ei sovellu myöskään, jos maa on kerrostunutta tai jos maassa vallitsee

lämpötilan gradientti. Kun diffusiviteetin määritelmä (8) sijoitetaan yhtälöön (5), saadaan yksidimensioiselle, pystysuoralle virtaukselle homogeenisessa maassa

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \right] \quad (9)$$

jonka alku- ja reunaehdot ovat

$$\theta = \theta_0 \text{ kun } t < 0, x > 0$$

$$\theta = \theta_1 \text{ kun } t \geq 0, x = 0$$

Yhtälössä (5) on siis kolme muuttujaa, θ , t ja x . Diffusiviteetti yhtälölle (5) voidaan suorittaa ns. Boltzmann-muunnos

$$\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (10)$$

missä x on etäisyys näytteen pinnasta ja t aika. Tällöin $d\lambda/dx = 1/t^{1/2}$, $dt = (-2t/\lambda)d\lambda$ ja $dx = d\lambda \cdot t^{1/2}$. Sijoittamalla nämä yhtälöön (9) ja järjestämällä saadaan tavallinen differentiaaliyhtälö

$$-\frac{\lambda}{2} \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left[D(\theta) \frac{d\theta}{d\lambda} \right] \quad (11)$$

jossa muuttujina ovat enää θ ja λ , ja jonka reunaehtoina ovat

$$\theta = \theta_0 \text{ kun } \lambda = \infty$$

$$\theta = \theta_1 \text{ kun } \lambda = 0.$$

Integroimalla θ_0 :sta θ' :een saadaan diffusiviteetille vesipitoisuudella θ' lauseke

$$D(\theta') = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right)_{\theta=\theta'} \int_{\theta_0}^{\theta'} \lambda(\theta) d\theta \quad (12)$$

missä θ_0 on vesipitoisuus näytteen pinnassa alkuhetkellä, θ' on se vesipitoisuus, jolla diffusiviteettiä lasketaan, ja θ on vesipitoisuus x :n ja t :n funktiona. Diffusiviteetti (12) voidaan ratkaista graafisesti piirtämällä kuvaajaan vesipitoisuus λ :n eli $x t^{1/2}$:n funktiona,

jolloin kuvaajasta saadaan sen kaltevuus kohdassa θ' ja pinta-ala θ' :sta θ_1 :een, ja diffusiviteetti $D(\theta')$ on puolet näiden tulosta. Tämän jälkeen diffusiviteetti muunnetaan $K(\theta)$ -arvoksi kaavalla 8. Mittaustuloksiin kohdistettavaan graafiseen integrointiin sisältyy kuitenkin useita virhelähteitä.

Diffusiviteettia voidaan mitata esim. syöttämällä vettä maa-aineksella täytettyyn vaakasuuntaiseen putkeen ja seuraamalla kosteusrintaman etenemistä kolmessa eri kokeessa noin 10, 20 ja 30 cm etäisyydelle vedensyötöstä ottaen samalla aikaa ja piirtämällä lopuksi θ $x/t^{1/2}$:n funktiona. Toinen mahdollisuus on asettaa esimerkiksi gammalaskuri 5 cm päähän vesisyötöstä ja seurata laskurin lukeman stabilisoitumista, jolloin kosteusrintama on ohittanut mittauskohdan. Tämän jälkeen laskuria siirretään eteenpäin, ja mittaukset suoritetaan mielellään ainakin kolmessa eri paikassa. Lopuksi θ ajan ja paikan suhteen lasketaan alku- ja loppukosteuden sekä gammalaskurin näyttämän lukeman perusteella. Molemmissa tavoissa diffusiviteetti lasketaan kaavalla 12.

Sorptiviteetti S

Sorptiviteettimenetelmässä selvitetään diffusiviteettifunktio $D(\theta)$ useilla peräkkäisillä yksidimensioisilla absorptiokokeilla olettamalla, että vakioalkukosteudessa θ_0 oleva maa muuttuu hetkessä loppukosteuteen θ_1 , joka on erilainen eri kokeissa.

Kun oletetaan vesipitoisuuden näytteen pinnassa muuttuvan hetkessä arvosta θ_0 arvoon θ_1 ja kun yhtälölle (5) tehdään Boltzmann-muunnos $\lambda = x/t^{1/2}$, kumulatiiviselle imeytyneelle vesimäärälle i saadaan epälineaarinen ratkaisu

$$i = St^{1/2} \quad (13)$$

missä verrannollisuuskertoimenä toimii ns. sorptiviteetti, joka määritellään

$$S(\theta_1, \theta_0) = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \lambda d\theta \quad (14)$$

missä θ_0 on alkukosteus ($\theta_0 =$ vakio) ja θ_1 loppukosteus. Sorptiviteetti kuvaa maalajin kykyä imeä vettä ja on siten maan alku- ja loppukosteudesta riippuva ominaisuus.

Koe suoritetaan siten, että vakioalkukosteudessa olevaan näytteeseen syötetään vettä niin, että kumulatiivinen imeytettävä vesimäärä i on suoraan verrannollinen ajan neliöjuureen kaavan (9) mukaisesti. Koetta jatketaan, kunnes yhteys on lineaarinen. Kun näytteeseen

imeytynyt kokonaisvesimäärä i kuvataan $t^{1/2}$:n funktiona, saadaan S suoran kulmakertoimesta kaavasta 13 eli

$$S = \frac{i}{\sqrt{t}} \quad (15)$$

Kokeita suoritetaan useita eri vedensyötöillä, jotta saadaan useihin eri kosteuspitoisuuksiin liittyvä $S(\theta_1)$. Käyttäen diffusiviteetille painotettua keskiarvoa saadaan diffusiviteetille lauseke

$$D(\theta_1) = \frac{\pi S^2}{4(\theta_1 - \theta_0)^2} \left[\frac{(\theta_1 - \theta_0)}{(1 + \gamma) \log e} \times \frac{d}{d\theta_1} (\log S^2) - \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \right] \quad (16)$$

missä γ on painotettuun diffusiviteetin keskiarvoon liittyvä muuttuja, joka voi vaihdella välillä 0,50...0,67 ilman suurta merkitystä. Menetelmä on yksinkertainen ja nopea, mutta empiirinen kerroin γ voi aiheuttaa virhettä tuloksiin. (Burke *et al.* 1986, Klute ja Dirksen 1986, Dirksen 1991)

Maastossa koe suoritetaan siten, että maasta otetaan ensin näyte alkukosteuden selvittämiseksi. Tämän jälkeen maahan asetettuun renkaaseen kaadetaan 20 mm vettä, ja sen imeytymistä ajan funktiona seurataan. Tuloksista piirretään kuvaaja, jossa y-akselilla on imeytynyt kokonaismäärä I ja x-akselilla ajan neliöjuuri. $S(\theta_{\text{alku}})$ saadaan tällöin suoran kulmakertoimesta. Yhdellä mittauksella saadaan yksi $S(\theta)$ -arvo, ja se edustaa maan ylintä noin 50 mm kerrosta. (Burke *et al.* 1986, Klute ja Dirksen 1986, Dirksen 1991)

Instantaneous-profile method

Tässä menetelmässä vedellä täysin kyllästyneen näytteen annetaan kuivua painovoiman avulla vapaasti niin, että pinta on päällystetty haihdunnan estämiseksi. Näytteen kuivuessa siitä mitataan jatkuvasti vesipitoisuutta, $\theta(z,t)$, ja painekorkeutta, $h(z,t)$, eri syvyyksillä.

Valunta ajanhetkellä t ja syvyydellä z lasketaan kaavasta

$$q(z,t) = - \int_0^z \frac{d\theta}{dt} dz \quad (17)$$

Integrointi voidaan suorittaa graafisesti kosteuden muutoksesta ajan funktiona tietyllä syvyydellä. Tämän jälkeen K lasketaan kaavalla

$$K = \frac{q(z,t)}{1 - \frac{dh(z,t)}{dz}} \quad (18)$$

Jos evaporaatio sallitaan, voidaan painekorkeuksista selvittää taso, jonka yläpuolella tapahtuu haihduntaa ja alapuolelta valuntaa alaspäin, ns. *zero-flux plane* (Burke *et al.* 1986, Klute ja Dirksen 1986, Dirksen 1991). Menetelmä on hidas mutta tarkka, ja se antaa hyviä tuloksia kuivatuksen kannalta tärkeillä painekorkeuksilla (Burke *et al.* 1986).

Hot-air method

Kostean näytteen pintaa kuivataan puhaltamalla siihen kuumaa ilmaa, jolloin evaporaatio kuivattaa näytettä. Evaporaation tulisi riippua lineaarisesti ajan neliöjuuresta. Kuivatuksen jälkeen näytteestä mitataan vesipitoisuus 5 mm viipaleista, jolloin saadaan kuvaaja $\theta(x)$, ja tästä tiedosta lasketaan diffusiviteetti kaavalla 19 kaavan 12 yhteydessä kuvatulla graafisella menetelmällä.

$$D(\theta_x) = \frac{1}{2t} \left(\frac{dx}{d\theta} \right)_{\theta_x}^{\theta_i} x d\theta \quad (19)$$

missä θ_x on vesipitoisuus syvyydellä x ajanhetkellä t ja θ_i alkukosteus (Burke *et al.* 1986, Dirksen 1991). Dirksenin (1991) mukaan tässä menetelmässä on runsaasti virhelähteitä. Menetelmää on Teknillisessä korkeakoulussa testannut Al-Soufi (1983).

One-step method

Näyte, jonka vesipitoisuus alussa tunnetaan, asetetaan painekammioon, ja painetta nostetaan yhtäkkiä tai näytteeseen kohdistuvaa imua lisätään. Näytteestä tapahtuva valunta mitataan ajan funktiona, kunnes se tasaantuu, ja valunnasta lasketaan näytteen vesipitoisuus ajan funktiona (θ_t). Diffusiviteetti ajanhetkellä t vallitsevalle kosteudelle θ_t lasketaan sen jälkeen kaavalla

$$D(\theta_t) = \frac{4L^2}{\pi^2(\theta_t - \theta_f)} \cdot \frac{d\theta_t}{dt} \quad (20)$$

missä L on näytteen korkeus, θ_t vesipitoisuus hetkellä t , θ_f lopullinen vesipitoisuus valunnan tasaannuttua ja t paineen muutoksesta kulunut aika.

Menetelmä on yksinkertainen ja antaa hyviä tuloksia rajatulla painekorkeusalueella. Se ei kuitenkaan sovellu turpoaville maalajeille. (Burke *et al.* 1986, Dirksen 1991)

4 Aineisto ja menetelmät

4.1 Tutkimusaineisto

Näytteet tätä tutkimusta varten otettiin Akaan kunnassa sijaitsevalta rahkaturvepellolta, jonka kolme lohkoa oli ojitettu eri aikoina. Siten eri lohkojen maatumisasteet poikkesivat toisistaan. Näytteet otettiin erikseen vedenpidätyskäyrän, vedellä kyllästyneen vedenjohtavuuden sekä vedellä kyllästymättömän vedenjohtavuuden määrittämistä varten. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT) samoista paikoista aiemmin ottamista näytteistä on tutkittu vedellä kyllästetyn turpeen vedenjohtavuutta ja vedenpidätyskykyä (Myllys 1992), joihin tässä tutkimuksessa saatavia tuloksia voitiin verrata.

4.1.1 Kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden mittaamista varten otetut näytteet

MTT:llä kehitetty terä asetettiin 80 cm pitkän PVC-putken alapäähän, ja yläpäähän asetettiin metallikansi (kuva 1). Putken ulkohalkaisija oli 160 mm ja seinämävahvuus 4 mm. Putki hakattiin maahan terän leikatessa turvetta, ja kun putken yläpäästä näkyi enää noin 5 cm, kaivettiin putken ympärille kuoppa, putkea kallistettiin, jotta ilma pääsi virtaamaan putken alapään ja maan väliin, jolloin turve katkesi, ja putki voitiin nostaa ylös. Lähekkäin hakattiin maahan yleensä kolme putkea, joiden nostamisessa voitiin käyttää hyväksi yhtä kuoppaa. Toiset kolme putkea hakattiin maahan vähän matkan päähän niin, että niiden kuitenkin oletettiin edustavan samaa aluetta. Näytteen kokoonpuristuminen hakkaamisen aikana arvioitiin lopuksi maapinnan ja putkessa sijaitsevan näytteen pinnan erotuksesta. Maatuneisuus määritettiin näytteiden oton yhteydessä von Postin menetelmällä, ja maaprofiilit kuvattiin. Lopuksi putkien alapäihin asetettiin tulpat ja yläpää peitettiin muovilla haihtumisen estämiseksi. Näytteet asetettiin kuljetusta varten pystyasentoon vaahtomuovipatjalle matkan aikaisen tärinän vaimentamiseksi.

Heikosti maatunut rahkaturve

Ensimmäiset kuusi näytettä otettiin vuonna 1987 raivatulta suolta, jota ei ollut kuitenkaan viljelty, ja turve oli maatunut vain vähän. Turvetta oli aikaisempien tutkimusten perusteella noin 4-5 metrin kerros. Maatumisasteeksi von Postin asteikolla arvioitiin H2, ja sama maatumisaste todettiin koko 80 cm syvässä näyteprofiilissa (kuva 1). Maan pinnasta noin 60 cm syvyydessä ja siitä alaspäin turpeessa oli runsaasti puunjätteitä. Turpeen painuma putken

sisällä verrattuna maanpintaan oli 5 cm, mikä todettiin hyväksyttäväksi määräksi näin korkeassa näytteessä.



Kuva 1. Heikosti maatuneen (H2) rahkaturvepellon profiili ja näytteenottoportket.

Keskinkertaisesti maatunut rahkaturve

Seuraavat kuusi näytettä otettiin vuonna 1980 raivatulta pellolta, joka näytteenottohetkellä oli nurmella. Turvekerroksen paksuus oli 1-2 metriä (kuva 2). Pelto oli ojituksen jälkeen ollut intensiivisessä viljelyssä ja sillä oli viljelty kauraa, sokerijuurikasta ja välillä nurmea. Pelto oli savettu läheisestä ojasta saadulla savella, joten pintaturpeen seassa havaittiin savimuruja. Ylin 17 cm kerros oli muokattua, ja sen maatumisasteeksi saatiin H6. Muokkauskerroksen alapuolinen 15 cm oli maatumisuudeltaan H4, ja näiden alapuolinen turve oli maatumisasteeltaan H5. Siinä esiintyi runsaasti puunjätteitä. Maa oli kovempaa verrattuna heikosti maatuneeseen turpeeseen, ja näytteenoton aikaiseksi painumaksi tuli 0 cm. Näiden näytteiden turve oli siis koko profiilissa keskinkertaisesti maatunutta (H4-H6).



Kuva 2. Keskimukaisesti maatuneen (H4-6) rahkaturvepellon profiili.

Hyvin maatonut rahkaturve

Kolmannet näytteet otettiin vuonna 1900 raivatulta pellolta, joka oli siten ollut pisimpään viljelyssä, ja sen turve oli hyvin maatonutta ja multamaista. Turvekerroksen paksuus oli noin yksi metri (kuva 3). Pelto oli ojituksen jälkeen ollut intensiivisessä viljelyssä ja sillä oli viljelty kauraa, sokerijuurikasta ja välillä nurmea. Maatumisasteeksi koko profiilissa arvioitiin H8 (hyvin maatonut turve).



Kuva 3. Hyvin maatonneen (H8) rahkaturvepellon profiili.

4.1.2 Vedenpidätyskäyrää ja kyllästynyttä vedenjohtavuutta varten otetut näytteet

Vedenpidätys- eli pF-käyrän mittaamista varten otettiin kunkin kolmen alueen pintakerroksista 6 näytettä 195,2 cm³ metallilieriöihin (halkaisija 7,2 cm, korkeus 4,9 cm). Kasvillisuutta sisältävä pintakerros siirrettiin lapiolla syrjään, jotta lieriöihin saatiin puhdasta turvetta. Metallilieriöiden alareuna oli teroitettu, jotta se leikkautui hyvin turpeeseen. Lieriöt painettiin maahan käsin. Vedellä kyllästyneen maan vedenjohtavuuden eli K_{sat} -arvon mittaamista varten otettiin omat näytteet 10 cm korkeisiin ja halkaisijaltaan 7,2 cm lieriöihin. pF- ja vedenläpäisevyysnäytteitä otettiin 6 kpl jokaiselta kolmelta alueelta. Lieriöiden päihin laitettiin muovitulpat ja ne asetettiin muovipusseihin haihtumisen estämiseksi. Lopuksi kaikki näytteet vietiin 4-asteiseen kylmiöön odottamaan jatkokäsittelyä.

Koska myöhemmin analyyseissä huomattiin, että keskinkertaisesti maatuneissa pintakerroksen näytteissä oli kivennäismaata jopa puolet kuiva-ainepitoisuudesta, otettiin uudet näytteet pF-käyrän ja kyllästyneen vedenjohtavuuden mittaamista varten. Rinnakkaisia näytteitä otettiin 5 kpl. Näytteet otettiin samaan aikaan (vuonna 1980) ojitetulta lohkolta, mutta kauempaa ojasta kuin alkuperäinen näyte-erä, ja niiden savipitoisuus näytteenottohetkellä arvioitiin silmämääräisesti. Näytteet otettiin samanlaisiin lieriöihin kuin ensimmäisellä näytteenottokerralla.

Koska syvemmistä kerroksista ei ollut näytteitä, otettiin myöhemmin laboratoriossa uudet näytteet sellaisista 80 cm turveprofiileista, joita ei ollut käytetty mittaamiseen. Keskikerroksesta (näytteen pohja 24-40 cm:ssä) ja pohjalta (näytteen pohja 45-70 cm:ssä) otettiin näytteet katkaisemalla putket halutusta kohdasta sahalla ja ottamalla näytteet poikkileikkauksesta. Lieriöt painettiin halkaisupintaan, ja ulkopuolelle jäänyt turve poistettiin. Kyllästyneen vedenjohtavuuden mittaamista varten näytteet otettiin metallilieriöihin, joiden sisähalkaisija oli 5,4 cm ja korkeus 7 cm, ja rinnakkaisia näytteitä otettiin 3-5 kpl. Samassa yhteydessä otettiin hyvin maatuneesta turpeesta uudet pintakerroksen näytteet. pF-näytteet otettiin metallilieriöihin, joiden sisähalkaisija oli 5,4 cm ja korkeus 3 cm. Rinnakkaisia näytteitä otettiin 3 kpl.

4.2 Luonnontilainen vesipitoisuus, vesipitoisuus kyllästettynä, tiheys, kivennäisainepitoisuus ja huokoisuus

Kyllästyneen turpeen vedenläpäisevyyden määrittämistä varten otetuista 10 cm korkeista ja halkaisijaltaan 7,2 cm näytteistä mitattiin luonnontilainen vesipitoisuus punnitsemalla ne ennen mittauksen aloitusta. Tämän jälkeen näytteet esikyllästettiin ja punnittiin uudestaan, jotta voitiin verrata kyllästysastetta ennen ja jälkeen mittausten. Vedenläpäisevyydsmittausten päätyttyä näytteet punnittiin, jotta saatiin selville niiden vesipitoisuus täysin kyllästyneenä. Tämän jälkeen näytteitä kuivattiin uunissa 105 °C lämpötilassa niiden sisältämän kuiva-aineen massan selvittämiseksi. Tarkistuspunnitusten perusteella todettiin, että näytteitä piti kuivattaa vähintään kolmen vuorokauden ajan, jotta niiden massassa ei enää tapahtunut muutoksia.

Luonnontilainen vesipitoisuus $\theta_{\text{luonnontilainen}}$ prosentteina näytteen luonnontilaisesta kokonaistilavuudesta laskettiin kaavalla

$$\theta_{\text{luonnontilainen}} = \frac{(m_{\text{luonnontil.}} - m_{\text{kuivattu}}) / \rho_{\text{vesi}}}{V_{\text{koko}}} \quad (21)$$

missä $m_{\text{luonnontil}}$ on näytteen massa luonnontilaisena (g) ja $m_{\text{kuivattu}} =$ näytteen massa 105 asteen uunikuivauksen jälkeen (g). Näiden erotus on näytteen sisältämä veden massa luonnontilassa. ρ_{vesi} on veden tiheys, 1 g/cm³. V_{koko} on näytesylinterin sisätilavuus (cm³).

Vesipitoisuus kyllästyneenä laskettiin kaavalla

$$\theta_{\text{kyllästynyt}} = \frac{(m_{\text{kyllästynyt}} - m_{\text{kuivattu}}) / \rho_{\text{vesi}}}{V_{\text{koko}}} \quad (22)$$

missä $m_{\text{kyllästynyt}} =$ näytteen massa vedenläpäisevyydsmittausten jälkeen (g) ja muut suureet kuten edellä.

Turpeen tiheys (g/cm³) saatiin kaavasta

$$\rho_{\text{turve}} = \frac{m_{\text{kuiva-aine}}}{V_{\text{koko}}} \quad (23)$$

missä $m_{\text{kuiva-aine}} =$ näytteen massa 105 asteessa tapahtuneen kuivauksen jälkeen.

Turveaineksen tiheys ($\rho_{\text{turveaines}}$) vaihtelee normaalisti välillä 1,4–1,6 g/cm³ ja likiarvona käytetään usein arvoa 1,5 g/cm³ (Päivänen 1982). Varsinkin keskinkertaisesti maatuneessa pintaturpeessa oli silmin havaittava määrä savea johtuen näytteenottoaikan läheisen ojan ruoppausmassan lisäämisestä pellolle. Siksi likiarvoa 1,5 g/cm³ ei ollut mahdollista käyttää. Turpeen kivennäisainepitoisuus määritettiin uunikuivista näytteistä raaputtamalla niistä eri puolilta muutama gramma turvetta upokkaisiin, jotka oli valmiiksi hehkutettu 550 asteessa. Näytteen sisältävät upokkaat punnittiin, hehkutettiin 550 asteessa kaksi tuntia, jäähdytettiin eksikaattorissa ja punnittiin uudestaan. Kivennäisainepitoisuus massaprosentteina laskettiin kaavalla

$$\text{kivennäisainepitoisuus} = \frac{m_{\text{hehkutettu}}}{m_{\text{uunikuiva}}} \quad (24)$$

Hehkutuksen jälkeen tiedettiin, kuinka suuri osa näytteen massasta oli orgaanista ainesta ja kuinka suuri osa kivennäismaata. Käyttämällä turveaineen tiheydelle arvoa 1,5 g/cm³ ja kivennäisainekselle arvoa 2,65 g/cm³ voitiin määrittää turve- ja saviaineksen tilavuus näytteessä ennen polttoa sekä nämä yhteen laskemalla näytteen kiintotilavuus. Jakamalla näytteen massa ennen polttoa sen lasketulla kiintotilavuudella saatiin selville tarkempi arvo aineksen tiheydelle. Tämän jälkeen turpeen huokoisuus laskettiin kaavalla

$$V_{\text{huokoset}} = \frac{\rho_{\text{turveaines}} - \rho_{\text{turve}}}{\rho_{\text{turveaines}}} \quad (25)$$

4.3 Vedellä kyllästyneen turpeen vedenjohtavuus

Vedellä kyllästyneen pintaturpeen vedenjohtavuus eli K-arvo määritettiin 10 cm korkeista ja halkaisijaltaan 7,2 cm näytteistä käyttäen vakiopainekorkeusmenetelmää. Keski- ja pohjakerrosten näytteiden halkaisija oli 5,4 cm ja korkeus 7 cm. Ennen mittauksia pintakerroksen näytteet punnittiin luonnontilaisessa vesipitoisuudessa. Keski- ja pohjakerrokselle luonnontilaista massaa ei määritetty. Sen jälkeen niitä kostutettiin asettamalla ne tarjottimelle, jossa oli keitettyä vesijohtovettä aluksi noin puoleen väliin näytteiden korkeudesta. Myöhemmin veden pintaa nostettiin noin 2/3 näytteen korkeudesta. Näytteet seisoivat tarjottimella muutaman viikon, minkä jälkeen ne punnittiin

uudestaan kyllästysasteen selvittämiseksi. Tämän jälkeen näytteet asetettiin mittalaitteeseen ja niiden läpi alettiin valuttaa vettä.

Darcyn lain mukaan vesimäärä, joka aikayksikössä virtaa määrätyn poikkileikkauksen kautta, on suoraan verrannollinen hydrauliseen gradienttiin. Darcyn laista (kaava 2)

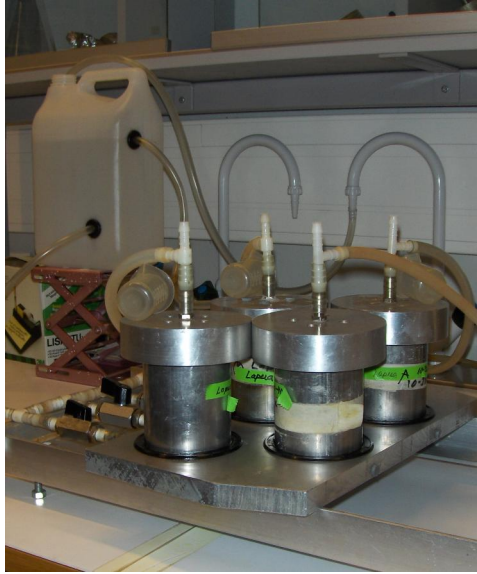
$$q = K \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

saadaan K-arvolle kaava

$$K = \frac{Qh}{tAH} \quad (26)$$

missä K on maalajin vedenläpäisevyys (cm s^{-1}), Q näytteen läpi ajassa t suotautunut vesimäärä (cm^3), h maanäytteen korkeus (cm), A maanäytteen poikkileikkausala (cm^2) ja H painekorkeus (cm).

Mittauslaite (kuva 4) koostui vesisäiliöstä ja metallialustasta, johon näytteet asetettiin ja joka oli yhdistetty vesisäiliöön muoviletkuilla. Säiliön korkeusasemaa muuttamalla vedenpinta säädettiin 10 senttimetrin korkeudelle näyteliiriöiden ulostuloputkesta, jolloin painekorkeudeksi tuli näytteiden korkeus. Vesisäiliöön valutettiin jatkuvasti vesijohtovettä, joka ylijouksuputkea pitkin valui viemäriin. Näin vedenpinta pysyi vakiotasolla. Vesisäiliö oli yhdistetty letkulla alustaan, johon näytteet asetettiin. Metallialustassa oli lieriöiden halkaisijaan sopivat syvennykset, joiden reunat oli tiivistetty kumirenkaalla. Syvennyksien pohjassa oli läpivienti jokaiselle näytteelle erikseen, ja läpivienteihin liitetyt letkut yhdistettiin säiliöön. Ennen näytteiden asettamista syvennyksiinsä näyteliiriön alareunaa rasvattiin noin 1 cm matkalta, jotta ne asettuivat tiiviisti kumirengasta vasten. Näytteiden ylä- ja alareunaan asetettiin muovisuodatin estämään maa-aineksen liikkeellelähtöä. Jokaiselle näytteelle laitettiin oma metallikansi, jossa myös oli kumitiivistys. Myös lieriöiden yläreunat rasvattiin ennen kansien asettamista. Jokaisessa kannessa oli läpivienti, johon liitetystä muoviliittimestä vesi pääsi ulos. Kun vesi virtasi näytteisiin alakautta, ilma pääsi poistumaan mahdollisimman hyvin. Laitteeseen mahtui kerralla viisi näytettä, joita mitattiin yhtä aikaa.



Kuva 4. Kyllästyneen vedenjohtavuuden mittaamiseen käytetty laitteisto.

Jokaisesta näytteestä vesi kerättiin mittalaseihin, ja läpi tulleen veden määrää seurattiin ajan suhteen. Mittausväli vaihteli 10 minuutista useampaan tuntiin. Varsinaiset mittaukset aloitettiin vasta, kun läpi tuleva vesimäärä näytti tasaantuneen. Tasaantumisen arviointi osoittautui kuitenkin hyvin vaikeaksi. Mittausten alussa läpivalutus lopetettiin yöksi, jolloin näytteet jäivät seisomaan laitteeseen täysin vedellä kyllästettyinä. Tästä seurasi, että seuraavan aamun tulokset poikkesivat selvästi edellisen päivän mittauksista, vaikka näytteessä ei olisi yön aikana pitänyt tapahtua mitään muutoksia mm. vesipitoisuudessa tai rakenteessa. Siksi valutus jätettiin myöhemmin käyntiin yöksi, ja vesi kerättiin ämpäriin tai johdettiin viemäriin. Pisin aika, jonka valutus oli yhtäjaksoisesti käynnissä, oli 8 vuorokautta.

4.4 Vedenpidätyskäyrä

Vedenpidätyskäyrä mitattiin 100 cm imuun asti käyttäen Anderssonin (1971) menetelmää (kuva 5), jossa vesi imetään näytteistä käyttäen riippuvaa vesipatsasta. 100 cm:stä 10 metriin mittausta suoritettiin painekattilassa (Soilmoisture Equipment Corp.) ilmanpaineella aikaansaatavan ylipaineen avulla.

Pintakerroksen osalta käyrä mitattiin 4,9 cm korkeisiin ja halkaisijaltaan 7,2 cm metallilieriöihin otetuista näytteistä. Ennen mittauksen alkua näytteet kyllästettiin antamalla niiden seistä tarjottimella, jossa oli keitettyä vesijohtovettä. Näytteet oli ympäröity tiiviillä verkolla, jotta turvetta ei päässyt karkaamaan kostutuksen aikana. Aluksi vettä oli noin puoliväliin näytteiden korkeudesta ja jonkin ajan kuluttua vesipinta nostettiin näytteiden

tasolle. Tämän jälkeen näytteet asetettiin huokoiselle levyille, jonka alapinta oli ympäröity kumikalvolla. Levyllä oli kerralla kolmesta viiteen näytettä. Levy sijaitsi suljetussa tilassa (kattilassa), jonka ilmankosteus pidettiin 100 prosentissa, joten näytteistä ei haihtunut vettä. Kattiloita oli käytössä kaksi. Levy oli etukäteen kyllästetty seisottamalla sitä keitetystä vesijohtovedestä noin viikon ajan. Kumikalvon läpi tulevan letkun toisen pään sijaintia muuttamalla säädettiin näytteeseen kohdistuvaa imua. Kun letkusta ei näyttänyt enää tulevan vettä, näytteet poistettiin kattilasta varovaisesti pyrkien minimoimaan maa-aineksen häviöt käyttäen apuna ohutta kalvoa, joka liu'utettiin näytteen ja levyn väliin. Levylle mahdollisesti jäänyt maa-aines kerättiin ja lisättiin näytteen päälle. Näytteet punnittiin kalvon kanssa, ja letkua siirrettiin alaspäin seuraavan haluttuun imuun. Samalla levy kostutettiin suihkepullon avulla huolellisesti, ennen kuin näytteet asetettiin takaisin liu'uttamalla ne pois kalvon päältä. Kostuttamalla levy varmistettiin kontaktin syntyminen näytteen ja levyn välille. Samalla voitiin tarkastaa, että imu toimi, mikä voitiin todeta siitä, että letkusta alkoi valua levyn kostutukseen käytettyä vettä. Aluksi suunnitelmassa oli käyttää imun arvoja 4, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 28, 33.5, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 ja 100 cm. Mittausten käynnistyttyä havaittiin, että imun lisäyksen jälkeen kului noin kaksi viikkoa siihen, ettei valuntaa enää tapahtunut. Mittauksen hitaudesta johtuen päätettiin osa mittauspisteistä jättää pois, ja mittauspisteiksi valittiin 4, 6, 8, 10, 15, 20, 28, 40, 60, 80 ja 100 cm.



Kuva 5. Anderssonin imukattila.

Kun imussa oli saavutettu 100 cm arvo, näytteet siirrettiin painekattilaan (kuva 6), jossa niiden kuivatus perustui näytteisiin kohdistuvaan ylipaineeseen, joka aikaansaatiin

paineilmalla. Paine kattilassa mittauksen hitauden vuoksi mitattaviksi paineen arvoiksi valittiin 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ja 1,0 bar. Myös painekattilassa näytteet asetettiin huokoiselle levyille, joka oli ensin kostutettu keitettyllä vesijohtovedellä. Vesi pääsi poistumaan levyn alapuolelle kiristetyn kumikalvon läpi tulevasta letkusta. Käytössä oli kaksi painekattilaa, joiden paineita voitiin säätää erikseen. Mittaus toimi periaatteiltaan samalla tavalla kuten imukattiloissakin. Näytteet punnittiin kahden viikon kuluttu paineen nostosta. Kaksi viikkoa ei veden hitaasta liikkumisesta johtuen riitä kaiken veden poistumiseen, mutta merkittävä osuus kuitenkin poistuu tässä ajassa (suullinen tiedonanto Ristolainen 2008). Kahden viikon kuluttua paineet asetettiin nolnaan, näytteet poistettiin kattilasta kalvon avulla, ne punnittiin, levy kostutettiin, näytteet asetettiin takaisin, kansi kiristettiin ruuveilla paikoilleen ja asetettiin seuraava paineen arvo samalla tarkastaen, että valunta käynnistyi. Tässä vaiheessa varsinkin heikosti maatuneet näytteet alkoivat irrota lieriön seinästä sekä painua. Sekä irtoaminen että painuminen mitattiin suuntaa-antavasti.



Kuva 6. Paine kattila.

Keski- ja pohjakerroksesta otetuille näytteille (korkeus 3 cm, sisähalkaisija 5,4 cm) käytettiin huomattavasti vähemmän mittauspisteitä. Heikosti maatuneelle turpeelle mitattiin vesipitoisuudet pisteissä 28 cm, 60 cm, 100 cm, 300 cm, 500 cm ja 990 cm. Keskinäisesti ja hyvin maatuneen turpeen keski- ja pohjakerroksessa käytettiin imun arvoja 28 cm, 63 cm, 100 cm, 490 cm ja 990 cm. Rinnakkaisia näytteitä oli kolme kummassakin kerroksessa. 100 cm imuun asti käytettiin imukattilaa ja siitä eteenpäin painekattilaa.

Kun näytteet olivat käyneet läpi koko imu- ja painesarjan, ne asetettiin lieriöineen lasialustalle ja kuivatettiin 105 asteisessa uunissa 4 vrk ajan, jotta saatiin selville näytteiden sisältämä kuiva-aineksen massa. Metallilieriö ja lasialusta punnittiin pesun ja kuivauksen jälkeen. Tämän jälkeen mittaustuloksista laskettiin veden määrä kunkin imun arvolla vähentämällä punnitustuloksista lieriön, kuiva-aineksen ja kalvon massa. Veden määrä muutettiin vesipitoisuudeksi jakamalla se lieriön tilavuudella.

4.5 Van Genuchtenin mallin sovitus vedenpidätyskäyriin

Mitattuihin vedenpidätyskäyriin sovitettiin van Genuchtenin malli (1980)

$$S_r = \begin{cases} \left[1 + (\alpha|h - h_a|)^n\right]^{-m}; & \text{jos } h \leq h_a \\ 1; & \text{jos } h \geq h_a \end{cases} \quad (27)$$

missä

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (28)$$

S_r on suhteellinen vesipitoisuus, joka vaihtelee välillä 0...1. $S_r=0$ kun maassa vallitsee jäännösvesipitoisuus ja $S_r=1$ kun maa on täysin vedellä kyllästynyt.

Suhteellinen vesipitoisuus saadaan muutettua tilavuusvesipitoisuudeksi kaavalla

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) S_r \quad (29)$$

Optimoitavia parametreja ovat α ja n . h_a on ns. ilman sisäänmenopiste (cm, usein $h_a=0$ cm). h on painepotentiaali (cm H_2O) ja θ on vesipitoisuus tilavuutta kohti. θ_r on jäännösvesipitoisuus ja θ_s vesipitoisuus kyllästyneenä. θ_s kullekin maatumisasteelle otettiin mittaustuloksista rinnakkaisten näytteiden vesipitoisuuden keskiarvona.

Jäännösvesipitoisuus θ_r voidaan määrittellä pF-käyrän asymptoottina $h:n$ saadessa hyvin korkeita arvoja, ts. se on se vesipitoisuus, joka ei enää alene imua lisättäessä. Karkeilla mailla jäännösvesipitoisuus on 0,1...2,0 % tilavuudesta ja savilla 10–20 %. Koska pF-käyrää mitattiin 1 barin paineeseen asti, ei jäännösvesipitoisuutta saavutettu.

Optimointi toteutettiin minimoimalla virhefunktiota

$$S_{error} = \sum_{i=1}^N (\theta_{laskettu,i} - \theta_{mitattu,i})^2 \quad (30)$$

Mallille laskettiin hyvyysluku R^2 kaavalla

$$R^2 = \frac{S_{dev,mean} - S_{error}}{S_{dev,mean}} \quad (31)$$

missä

$$S_{dev,mean} = \sum_{i=1}^N (\theta_{mitattu,i} - \theta_{mitattu,keskiarvo})^2 \quad (32)$$

4.6 Vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuuden määrittämiseksi tehdyt mittaukset

Vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuuden määrittämiseksi kuivatettiin 70 cm korkeita turveprofiileita, ja niiden kuivumista seurattiin tensiometrien avulla. Lisäksi veden liikkumista turveprofiilissa mallinnettiin yksiulotteisella virtausmallilla, jossa käytettiin Richardsin ja Mualem-van Genuchtenin yhtälöitä (ks. mallin kuvaus liitteessä 3). Mitattua ja mallinnettua kuivumista verrattiin toisiinsa. Mittauksien ja mallinnuksen avulla määritettiin vedellä kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuus laskennallisesti.

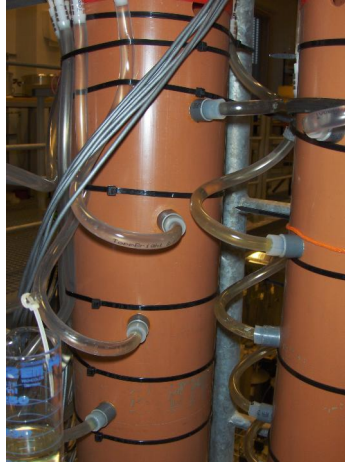
70 cm korkeaan näytteeseen asennettiin 7 vaakasuuntaista tensiometriä poraamalla niille aukot näytteen kylkeen ja poraamalla turpeeseen onkalo, jonka halkaisija oli hieman pienempi kuin tensiometrinen kärjen, jolloin kärki asettui tiiviisti turpeeseen (kuva 7). Liitoskohta tiivistettiin silikonirenkkaalla (kuva 8). Tensiometrit muodostuivat huokoisesta kärjestä, joka oli liitetty vedellä täytetyllä PVC-letkulla paineanturiin. Kun huokoisen kärjen ympärillä oleva turve kuivui, kärjen läpi siirtyi vettä turpeeseen, kunnes saavutettiin uusi hydraulinen tasapaino, ja PVC-putkeen muodostui alipaine, jota paineanturit mittasivat. Tensiometrit asetettiin 10 cm välein niin, että ylin sijaitsi 5 cm syvyydessä näytteen pinnasta ja alin 65 cm syvyydessä (kuva 9). PVC-letkut täytettiin vedellä, ja vesipinta pidettiin mittauksen aikana vakiokorkeudella. Tensiometrit oli kytketty dataloggeriin (kuva 10), ja mittaustiheyttä voitiin säädellä. Dataloggerista data oli purettavissa tietokoneelle.

Koska näyteputkia maasta nostettaessa näytteen pohja katkesi, poistettiin putken pohjalta 5 cm turvetta, ja jäljelle jäävä leikkauspinta tasoitettiin. Leikkauspinnan alapuolelle tiivistettiin huokoinen levy, jonka kuplimispaine oli 0,5 bar, ja levyn reunoille ja alapuolelle jännitettiin kumikalvo, johon tehtiin läpimeno letkulle. Letkun toisen pään korkeutta säätämällä voitiin asettaa näytteeseen haluttu imu. Imun kasvaessa turpeesta irronnut vesi kertyi kumikalvon päälle ja johtui siitä letkuun. Levyn murruttua kesken mittausten sen tilalle alimman tensiometrin alle vaihdettiin suurikokoinen tensiometrin kärki, jonka kautta imu toteutettiin.



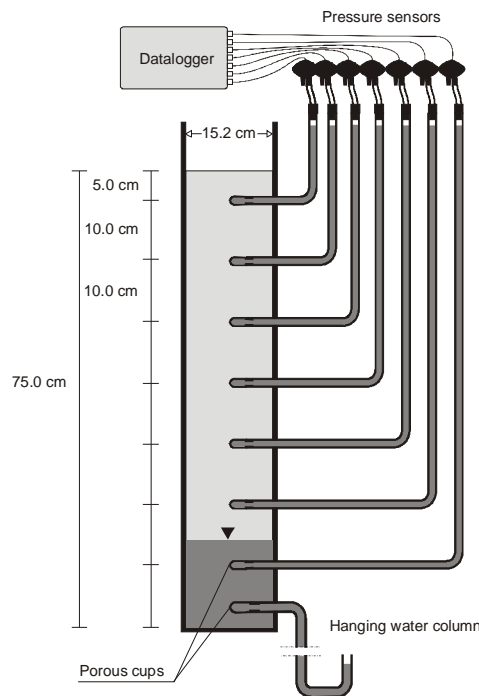
Kuva 7. Kyllästymättömän vedenjohtavuuden mittaamiseen käytetty laitteisto. Kuvassa kaksi maakolumnia vierekkäin.

Ensimmäinen käsittelyyn otettu näyte oli vuonna 1980 ojitetulta lohkolta, ja sen maatumisaste oli H4-H6. Näytteen kastelu aloitettiin marraskuussa 2005 syöttämällä näytteeseen alimman tensiometrin kautta vettä astiasta, joka aluksi oli näytteen pohjan korkeudella, ja sitä vähitellen nostettiin ylöspäin. Astian nosto tehtiin hyvin varovaisesti hydraulisen murtuman välttämiseksi. Näytteen kuivatus aloitettiin 16.3.2007. Aluksi imu toteutettiin painovoimalla, ja myöhemmin siirryttiin haihduttamiseen siten, että alaosassa sijaitsevasta imuputkesta annettiin veden haihtua vapaasti. Näytteen alareunaan kohdistuvaa imua alettiin mitata 24.4.2008. Kuivatusta jatkettiin 17.4.2009 saakka, jolloin näytteeseen kohdistuva imu oli 440 cm eli 0,44 bar mitattuna näytteen pinnasta.

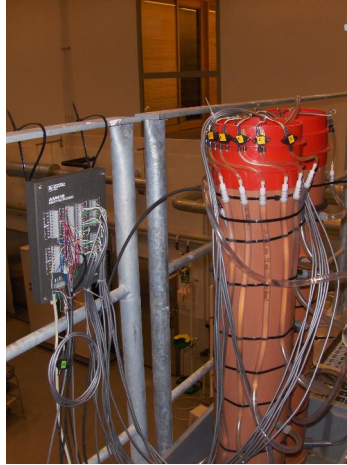


Kuva 8. Lähikuva tensiometreistä.

Kun oli todettu, että tensiometrit toimivat myös turvemaassa, otettiin mittaukseen myös ojitusvuodet 1900 ja 1987. Imun tuottamista ja veden poistumista varten asennettiin molempiin näytteisiin tensiometrin kärki aivan näytteen alaosaan, ja kastelu toteutettiin sen läpi. Koska kastuminen oli ensimmäisessä näytteessä ollut hyvin hidasta, tällä kertaa käytettiin suurempaa painegradienttia. Hyvin maatuneen näytteen kuivatus aloitettiin 17.11.07 ja heikosti maatuneen näytteen kuivatus 24.11.07. Näihin kahteen näytteeseen kohdistettiin sama imu, jota alettiin mitata 28.2.2008. Kuivatusta jatkettiin 17.4.2009 asti, jolloin imu oli 240 cm näytteen pinnasta.



Kuva 9. Periaatekuva kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden mittalaitteistosta.



Kuva 10. Pylvään yläreuna, tensiometrien letkut ja osa dataloggeria.

4.7 Kyllästymätön vedenjohtavuus van Genuchtenin mallin mukaan

Yksiulotteisessa numeerisessa laskentamallissa käytettiin van Genuchtenin menetelmää kyllästymättömän vedenjohtavuuden laskemiseen. Suhteellisen kyllästysasteen S_R ja parametrin m avulla (kohta 4.5) laskettiin suhteellinen vedenjohtavuus eri vesipitoisuuksilla van Genuchtenin (1980) esittämällä kaavalla

$$K_R = S_R^{0,5} \left[1 - \left(1 - S_R^{\left(\frac{1}{m}\right)} \right)^m \right]^2 \quad (33)$$

josta saatiin K_{unsat} kyllästyneen vedenjohtavuuden K_{sat} avulla kaavalla 34.

$$K_{unsat} = K_R K_{sat} \quad (34)$$

Kyllästyneenä vedenjohtavuutena K_{sat} käytettiin mittauksista saatua keskiarvoa.

5 Tulokset

5.1 Vesipitoisuus luonnontilassa ja kyllästyneenä, tiheys, kivennäisainepitoisuus ja huokoisuus eri kerroksissa

Taulukossa 1 on esitetty näytteistä määritetyt fysikaaliset ominaisuudet pintakerroksesta, 31-40 cm syvyydestä ja 52-70 cm syvyydestä. Arvot edustavat näytteitä, jotka otettiin kyllästyneen vedenjohtavuuden mittaamista varten.

Keskikerroksen ja pohjamaan kivennäisaineksen pitoisuutta ei määritetty, joten huokoisuuttakaan ei ollut mahdollista laskea. Näiden luonnontilainen vesipitoisuus saatiin vedenpidätyskäyrää varten otetuista näytteistä, joita oli kolme kummastakin kerroksesta. Hyvin maatuneen turpeen pintakerroksen turveaineksen tiheyden arvo on peräisin eri näyte-erästä kuin turpeen tiheys.

Hyvin maatuneen turpeen tiheys laski profiilissa alaspäin. Keskinertaisesti maatuneella turpeella pinnassa ja 31–40 cm syvyydessä tiheys oli suunnilleen sama ja alimmassa kerroksessa alempi. Heikosti maatuneella turpeella oli alimmassa kerroksessa korkein tiheys.

Taulukko 1. Näytteiden fysikaalisia ominaisuuksia. Turveaineksen tiheys, huokoisuus ja hehkutushäviö määritetty vain pintakerrokselle.

	Tiheys, kg/m ³	Turveaineksen tiheys, kg/m ³	Vesipitoisuus mittausten jälkeen (til.-%)	Huokoisuus (% kokonais- tilavuudesta)	Hehkutushäviö (% uunikuivasta massasta)
Hyvin maatonut (H8) rahkaturve					
H8, pinta	399,2	1754,3	72,7	82,4	65,8
H8, 31–40 cm	241,4		77,0		
H8, 52–70 cm	233,1		81,7		
Keskinkertaisesti maatonut (H4-H6) rahkaturve					
H6, pinta	195,8	1637,6	81,2	88,2	80,4
H6, pinta, runsaasti savea	336,2	1855,4	76,9	81,9	54,8
H4, 31-40 cm	202,2		78,3		
H5, 52-70 cm	142,6		87,1		
Heikosti maatonut (H2) rahkaturve					
H2, pinta	98,5	1550,7	87	93,6	92,5
H2, 31–40 cm	105		86,9		
H2, 52–70 cm	117,7		89,7		

5.2 Vedenjohtavuus kyllästyneenä eli K-arvo

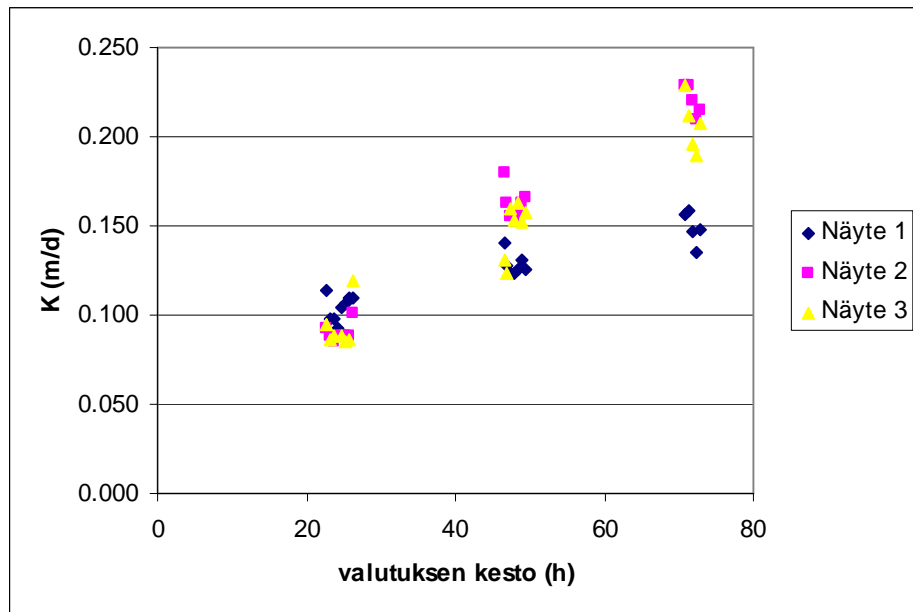
5.2.1 Hyvin maatunut rahkaturve

Pintakerros

Taulukossa 2 ja kuvassa 11 on esitetty hyvin maatuneen rahkaturpeen (H8) pintakerroksen vedenjohtavuusmittausten tulokset. Näytteet otettiin kylmiössä säilytetyn 70 cm korkean profiilin pinnasta samalla, kun syvemmistä kerroksista otettiin näytteet. Vedenläpäisevyys kolmessa rinnakkaisnäytteessä vaihteli välillä 0,12 m/d –0,15 m/d. Kaikkien kolmen rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,138 m/d, keskihajonta 0,044 m/d (31,7 % keskiarvosta), moodi 0,088 m/d ja mediaani 0,130 m/d.

Taulukko 2. Hyvin maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani

Hyvin maatunut rahkaturve, pintakerros	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Mittausten lkm	20	20	19
K-arvo (m/d)	0,124	0,148	0,143
Keskihajonta (m/d)	0,020	0,054	0,048
Variaatiokerroin (%)	15,9	36,5	33,5
Moodi (suluissa lkm)	0,098 (2)	0,088 (5)	0,086 (2)
Mediaani (m/d)	0,125	0,156	0,152



Kuva 11. Hyvin maatuneen rahkaturpeen (H8) pintakerroksen vedenjohtavuus mittausajankohdan funktiona.

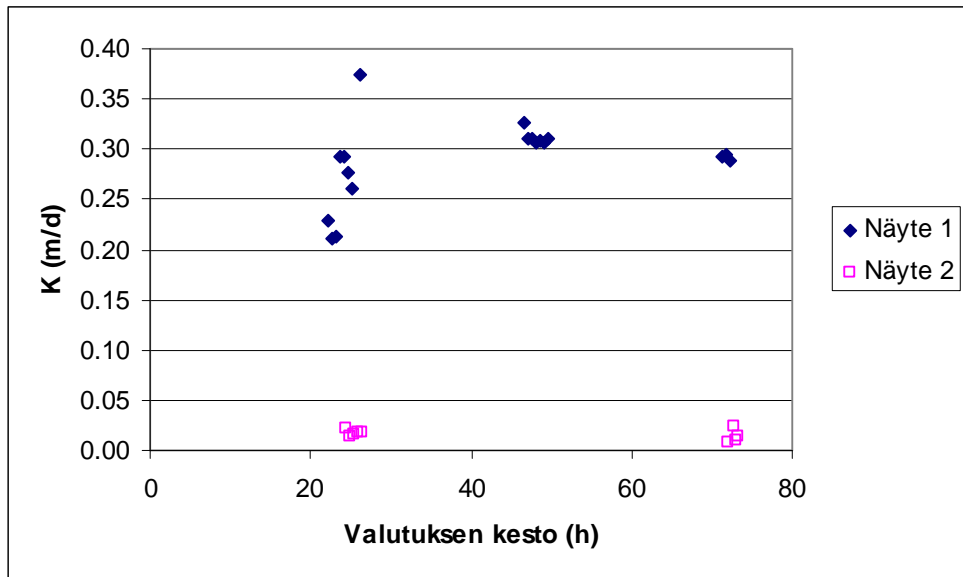
Keskikerros ja pohjamaa

Keskikerroksen (taulukko 3, kuva 12) kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,198 m/d, keskihajonta 0,135 m/d (68 % keskiarvosta), moodi 0,293 m/d ja mediaani 0,277 m/d. Kolmesta rinnakkaisnäytteestä vain kahdesta tuli vettä läpi.

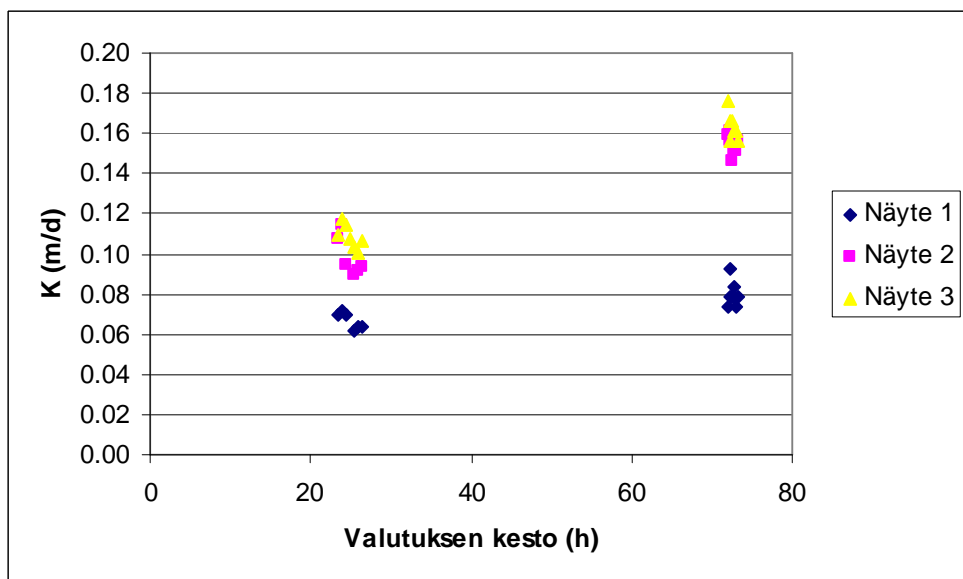
Pohjakerroksen (taulukko 3, kuva 13) kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,115 m/d, keskihajonta 0,037 m/d (33 % keskiarvosta), moodi 0,156 m/d ja mediaani 0,108 m/d.

Taulukko 3. Hyvin maatuneen rahkaturpeen (H8) vedenjohtavuudet keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjalla (näytteenottosyvyys 61 cm).

Hyvin maatunut turve, keskikerros	Näyte 1	Näyte 2	
Mittausten lkm	18	9	
Näytteen pohjan syvyys (cm)	31	31	
K-arvo (m/d)	0,289	0,016	
Keskihajonta (m/d)	0,040	0,005	
Variaatiokerroin (%)	14	32	
Moodi m/d (suluissa lkm)	0,293 (2)	-	
Mediaani (m/d)	0,294	0,017	
Hyvin maatunut turve, pohjakerros	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3
Mittausten lkm	14	14	15
Näytteen pohjan syvyys (cm)	61	61	61
K-arvo (m/d)	0,074	0,131	0,138
Keskihajonta (m/d)	0,008	0,030	0,029
Variaatiokerroin (%)	11	23	21
Moodi m/d (suluissa lkm)	0,078 (4)	0,156 (3)	0,161 (3)
Mediaani (m/d)	0,073	0,149	0,156



Kuva 12. Hyvin maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31–40 cm) vedenjohtavuus.



Kuva 13. Hyvin maatuneen rahkaturpeen pohjakerroksen (näytteenottosyvyys 61 cm) vedenjohtavuus.

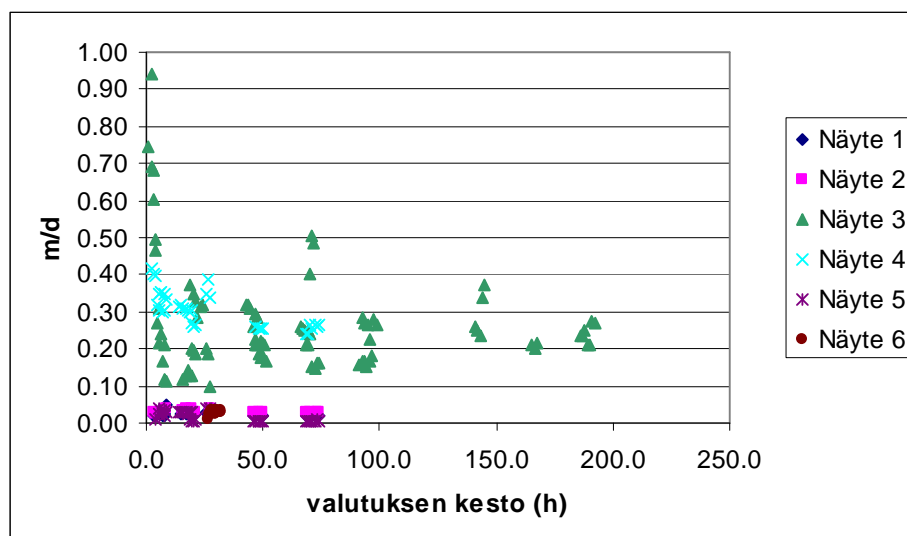
5.2.2 Keskinertaisesti maatunut rahkaturve

Pintakerros

Taulukossa 4 ja kuvassa 14 on esitetty keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen runsassavisen pintakerroksen (H6) vedenjohtavuudet, moodit ja mediaanit peräkkäisten mittausten keskiarvona. Näytteessä 3 peräkkäisten mittausten tulokset vaihtelivat paljon, joten mittausta jatkettiin yhteensä 190 tunnin ajan tulosten tasaantumista odotettaessa. Sitä ei kuitenkaan tapahtunut, vaan tulokset vaihtelivat loppuun asti välillä 0,153 m/d–0,371 m/d, ja hajonta jäi suureksi. Muiden näytteiden kohdalla mittaus lopetettiin aikaisemmin. Vedenläpäisevyys vaihteli välillä 0,019 m/d –0,305 m/d. Suurin hajonta, 70,5 %, oli tässä näyte-erässä näytteessä 5. Kaikkien kuuden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,155 m/d, keskihajonta 0,156 m/d (100,3 % keskiarvosta), moodi 0,024 m/d ja mediaani 0,124 m/d.

Taulukko 4. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani.

Keskinertaisesti maatunut rahkaturve, savinen pintakerros	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 6
Mittausten lkm	33	28	89	35	34	21
K-arvo (m/d)	0,022	0,031	0,267	0,305	0,019	0,027
Keskihajonta (m/d)	0,006	0,005	0,143	0,048	0,013	0,005
Variaatiokerroin (%)	26,7	16,3	53,7	15,9	70,5	19,7
Moodi (suluissa lkm)	0,024 (8)	0,029 (8)	0,212 (7)	0,305 (4)	0,006 (9)	0,024 (8)
Mediaani	0,024	0,029	0,236	0,305	0,015	0,028

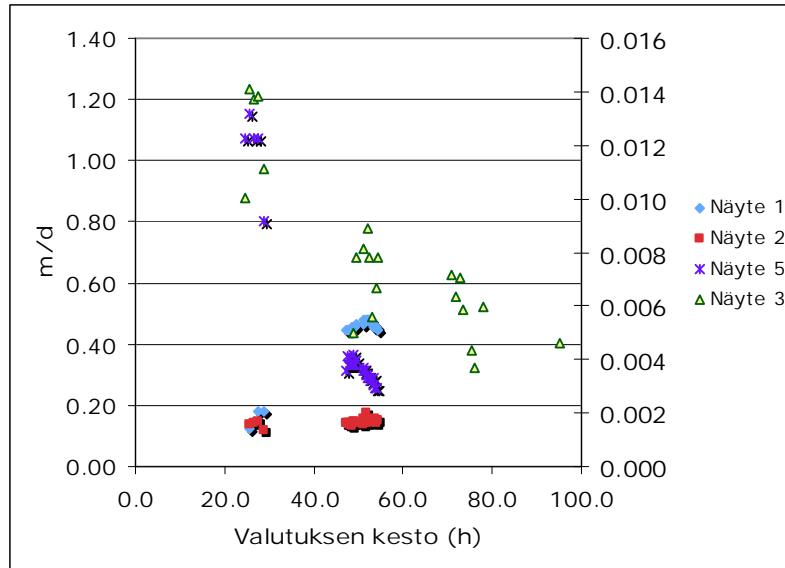


Kuva 14. Keskinertaisesti maatuneen runsassavisen rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus valutusajankohdan funktiona.

Taulukossa 5 ja kuvassa 15 on esitetty keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuudet (H_6) vähemmän savea sisältävistä näytteistä sekä moodit ja mediaanit peräkkäisten mittausten keskiarvona. Vedenläpäisevyys vaihteli välillä 0,008-0,441 m/d. Suurin hajonta, 65,5 % keskiarvosta esiintyi näytteessä 5. Näytteestä 4 ei koko mittauksen keston aikana tullut lainkaan vettä läpi. Neljän näytteen (1, 2, 3 ja 5) kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,267 m/d, keskihajonta 0,238 m/d (88,3 % keskiarvosta), moodi 0,456 m/d ja mediaani 0,180 m/d.

Taulukko 5. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vähäsavisen pintakerroksen vedenjohtavuus.

Keskinertaisesti maatunut, vähäsavinen pintakerros	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5
Mittausten lkm	28	28	21	28	28
K-arvo (m/d)	0,42	0,15	0,01	0,00	0,44
Keskihajonta (m/d)	0,13	0,01	0,00	0,00	0,29
Variaatiokerroin (%)	32	6	39	0	65
Moodi (suluissa lkm)	0,46 (7)	0,14 (5)	0,01 (3)		0,33 (5)
Mediaani	0,46	0,15	0,01	0,00	0,33



Kuva 15. Keskinertaisesti maatuneen, vähemmän savea sisältävän rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus valutusajankohdan funktiona. Näyte 3 oikeanpuoleisella y-akselilla.

Keskikerros ja pohjamaa

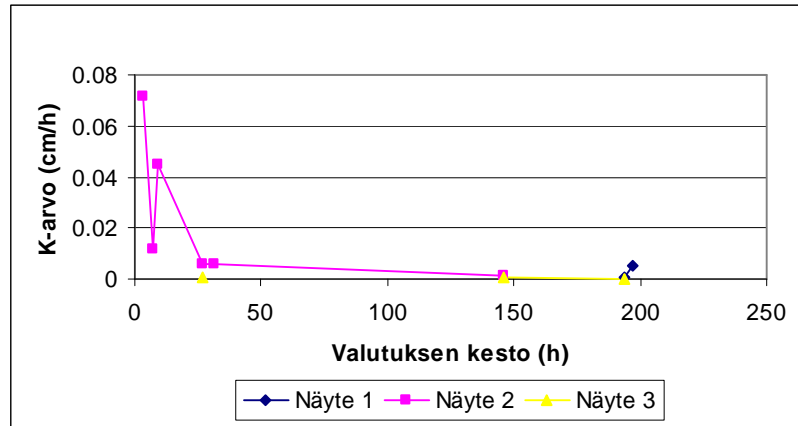
Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen ja pohjamaan vedenjohtavuudet, moodit ja mediaanit peräkkäisten mittausten keskiarvona on esitetty taulukossa 6 ja kuvissa 16, 17 ja 18.

Vedenläpäisevyyden näytekohtainen keskiarvo vaihteli keskikerroksen (H4) viidessä rinnakkaisnäytteessä välillä 0,01 cm/d – 32,1 cm/d. Kaikki näytteet oli otettu samalta syvyydeltä (31 cm), juuri sen kohdan yläpuolelta, jossa maatumisaste H4 vaihtui maatumisasteeksi H5 (noin 32 cm:ssä). Keskikerroksen näytteiden 1-3 läpituleva vesi oli mustaa, eikä kaikkina mittauspäivinä vettä edes tullut läpi. Niiden rakenne havaittiin mittausten päätyttyä hyvin tiiviiksi sekä väri mustaksi. Veden virtaus näytteiden läpi oli vähäistä ja epätasaista, joten tätä kerrosta kuvaavat ilmeisesti parhaiten näytteet 4 ja 5. Suurin hajonta, 120,3 % keskiarvosta, esiintyi näytteessä 2 ja pienin, 21,1 % keskiarvosta vastaavasti näytteessä 5. Kaikkien viiden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 20,2 cm/d, keskihajonta 16,1 cm/d (80 % keskiarvosta), moodi 37,7 cm/d ja mediaani 23,8 cm/d. Kun näytteiden 1-3 alhaiset arvot jätetään pois, oli näytteiden 4 ja 5 kaikkien mittausten keskiarvo 31,1 cm/d, keskihajonta 7,5 cm/d (24,2 % keskiarvosta), moodi 37,7 cm/d ja mediaani 34,0 cm/d.

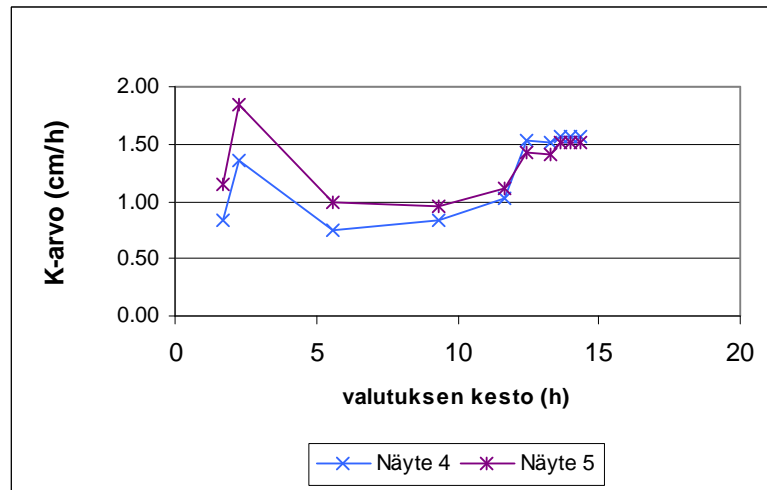
Vedenläpäisevyyden näytekohtainen keskiarvo vaihteli pohjakerroksen (H5) viidessä rinnakkaisnäytteessä välillä 0,20 cm/d – 1,38 cm/d. Suurin hajonta, 22,5 % keskiarvosta, esiintyi näytteessä 4 (syvyys 70 cm) ja pienin, 5,4 % keskiarvosta vastaavasti näytteessä 2. Kaikkien viiden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,57 cm/d, keskihajonta 0,47 cm/d (83,2 % keskiarvosta), moodi 0,30 cm/d ja mediaani 0,25 cm/d.

Taulukko 6. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjamaassa (näytteenottosyvyys 61–70 cm).

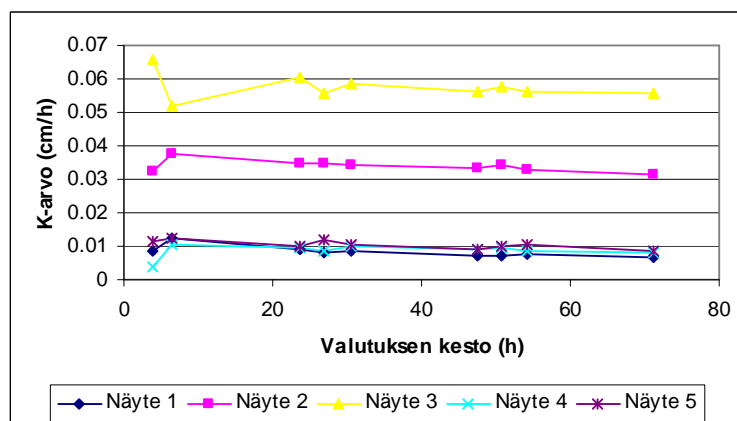
Keskinertaisesti maatunut, keskikerros (H4)	1	2	3	4	5
Mittausten lkm	2	6	3	10	10
Näytteen pohjan syvyys (cm)	31	31	31	31	31
K-arvo (cm/d)	0,070	0,565	0,012	30,108	32,148
Keskihajonta (cm/d)	0,081	0,680	0,008	8,445	6,782
Variaatiokerroin (%)	114,5	120,3	73,4	28,0	21,1
Moodi cm/d (suluissa lkm)				37,726 (3)	36,154 (3)
Mediaani (cm/d)	0,070	0,213	0,008	34,319	33,957
Keskinertaisesti maatunut, pohjakerros (H5)	1	2	3	4	5
Mittausten lkm	9	9	9	9	9
Näytteen pohjan syvyys (cm)	61	61	61	70	70
K-arvo (cm/d)	0,200	0,816	1,381	0,207	0,250
Keskihajonta (cm/d)	0,041	0,044	0,093	0,047	0,031
Variaatiokerroin (%)	20,2	5,4	6,7	22,5	12,5
Moodi cm/d (suluissa lkm)					
Mediaani (cm/d)	0,197	0,824	1,347	0,217	0,247



Kuva 16. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31 cm) vedenjohtavuus. Näytteet 1-3, mustia, tiiviitä, alhainen vedenjohtavuus.



Kuva 17. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen (näytteenottosyvyys 31 cm) vedenjohtavuus näytteissä 4 ja 5.



Kuva 18. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen pohjakerroksen (näytteenottosyvyys 61 ja 70 cm) vedenjohtavuus.

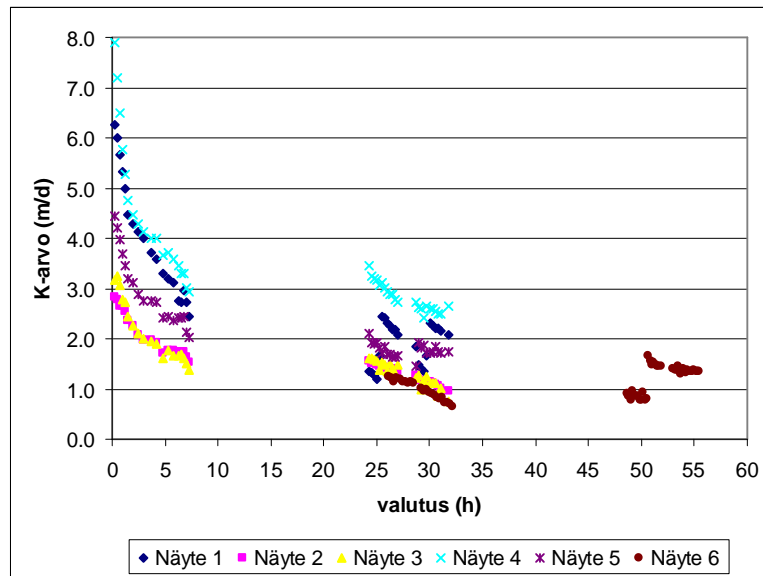
5.2.3 Heikosti maatunut rahkaturve

Pintakerros

Taulukossa 7 ja kuvassa 19 on esitetty heikosti maatuneen (H2) pintaturpeen vedenläpäisevyydet, moodit ja mediaanit. Tässä erässä havaittiin vedenläpäisevyyden voimakas lasku mittauksen keston aikana, joten keskiarvon laskennasta jätettiin alun korkeat arvot pois. Näytekohtaiset keskiarvot vaihtelivat välillä 1,131 m/d –2,888 m/d. Muihin eriin verrattuna hajonnat olivat pieniä, suurimmillaan 22,5 % keskiarvosta. Kaikkien kuuden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 1,64 m/d ja keskihajonta 0,66 m/d (40,1 % keskiarvosta). Kaikkien mittausten moodi oli 1,34 m/d ja mediaani 1,46 m/d.

Taulukko 7. Heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenläpäisevyyden keskiarvo, keskihajonta, moodi ja mediaani.

Heikosti maatunut rahkaturve, pintakerros	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 6
Mittausten lkm	24	23	30	28	25	59
K-arvo (m/d)	1,922	1,289	1,364	2,888	1,798	1,131
Keskihajonta (m/d)	0,432	0,182	0,263	0,308	0,153	0,274
Variaatiokerroin (%)	22,5	14,1	19,3	10,7	8,5	24,2
Moodi (suluissa lkm)	2,452 (2)	1,509 (2)	1,603 (3)	3,301 (2)	1,721 (4)	1,344 (6)
Mediaani (m/d)	2,116	1,344	1,391	2,877	1,745	1,132



Kuva 19. Heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen vedenjohtavuus

Keskikerros ja pohjamaa

Heikosti maatuneen rahkaturpeen keskikerroksen ja pohjamaan vedenjohtavuudet, moodit ja mediaanit peräkkäisten mittausten keskiarvona on esitetty taulukossa 8 ja kuvissa 20 ja 21.

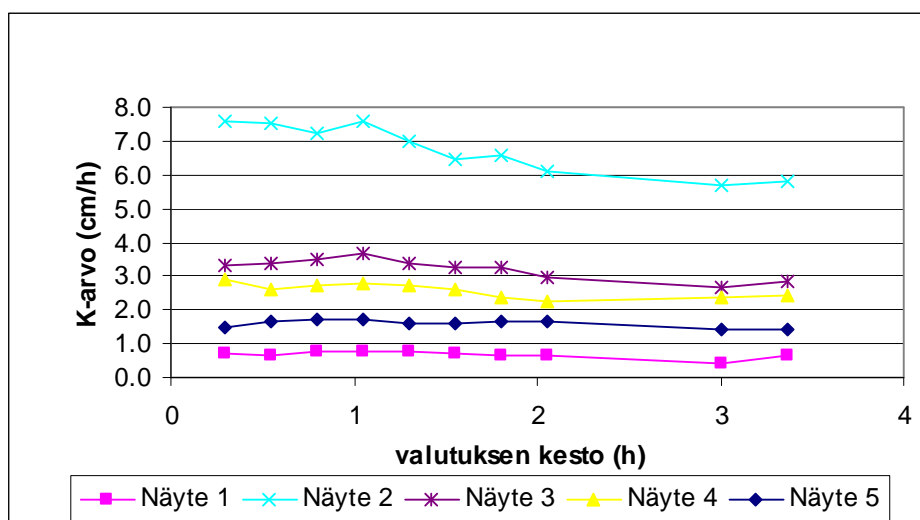
Vedenläpäisevyyden näytekohtainen keskiarvo vaihteli keskikerroksen (H2) viidessä rinnakkaisnäytteessä välillä 0,67 cm/h – 6,76 cm/h. Näytteessä 2 (ks. kuva 20), jonka vedenjohtavuus oli selvästi suurin, havaittiin mittauksen päätyttyä sisällä onkalo, joka on luultavasti aiheuttanut oikovirtausta. Suurin hajonta, 16,8 % keskiarvosta, esiintyi näytteessä 1 ja pienin, 7,7 % keskiarvosta vastaavasti näytteessä 5. Kaikkien viiden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 2,97 cm/h, keskihajonta 2,14 cm/h (72 % keskiarvosta), moodi 1,66 cm/h ja mediaani 2,62 cm/h. Ilman näytteen 2 suuria arvoja muiden näytteiden kaikkien mittausten keskiarvo oli 2,02 cm/h, keskihajonta 1,00 cm/h (50 % keskiarvosta), moodi 1,66 cm/h ja mediaani 2,01 cm/h.

Vedenläpäisevyyden näytekohtainen keskiarvo vaihteli pohjakerroksen (H2) viidessä rinnakkaisnäytteessä välillä 0,110 cm/d – 0,673 cm/d. Näytteessä 3 (näytteenottosyvyys 70 cm), jonka vedenjohtavuus oli suurin (kuva 21), havaittiin lopuksi puunpala lieriön sisäseinää vasten, mikä on mahdollisesti aiheuttanut oikovirtausta. Suurin hajonta, 25,7 % keskiarvosta, esiintyi näytteessä 2 ja pienin, 12,3 % keskiarvosta vastaavasti näytteessä 3. Kaikkien viiden rinnakkaisnäytteen kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,29 cm/d,

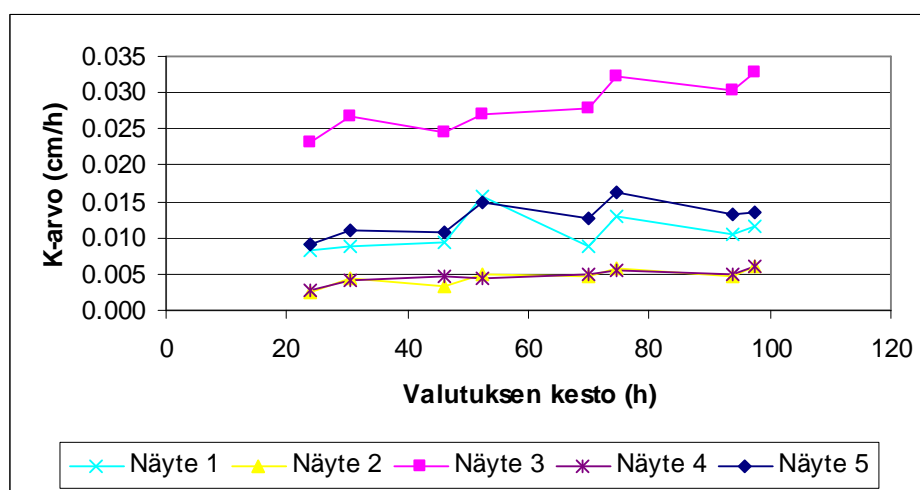
keskihajonta 0,22 cm/d (74 % keskiarvosta), moodi 0,15 cm/d ja mediaani 0,22 cm/d. Ilman näytteen 3 suurta arvoa muiden näytteiden kaikkien mittausten keskiarvo oli 0,20 cm/d, keskihajonta 0,01 cm/d (49,9 % keskiarvosta), moodi 0,15 cm/d ja mediaani 0,17 cm/d.

Taulukko 8. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenottosyvyys 31 cm) ja pohjamaassa (näytteenottosyvyys 52–70 cm).

Heikosti maatunut turve, keskikerros	1	2	3	4	5
Mittausten lkm	10	10	10	10	10
Näytteen pohjan syvyys (cm)	31	31	31	31	31
K-arvo (cm/h)	0,672	6,755	3,228	2,580	1,592
Keskihajonta (cm/h)	0,113	0,729	0,309	0,211	0,123
Variaatiokerroin (%)	16,8	10,8	9,6	8,2	7,7
Moodi cm/h (sulussa lkm)	0,646 (2)		3,406 (2)	2,620 (2)	1,659 (3)
Mediaani (cm/h)	0,691	6,768	3,289	2,620	1,616
Heikosti maatunut turve, pohjakerros	1	2	3	4	5
Mittausten lkm	8	8	8	8	8
Näytteen pohjan syvyys (cm)	61	70	70	52	52
K-arvo (cm/d)	0,258	0,110	0,673	0,112	0,304
Keskihajonta (cm/d)	0,061	0,028	0,083	0,025	0,054
Variaatiokerroin (%)	23,7	25,7	12,3	22,0	17,9
Moodi cm/d (sulussa lkm)					
Mediaani (cm/d)	0,239	0,112	0,657	0,115	0,310



Kuva 20. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus keskikerroksessa (näytteenotto syvyys 31 cm).



Kuva 21. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenjohtavuus pohjakerroksessa. Näytteenotto syvyys 52 cm (näytteet 4 ja 5), 61 cm (näyte 1) tai 70 cm (näytteet 2 ja 3).

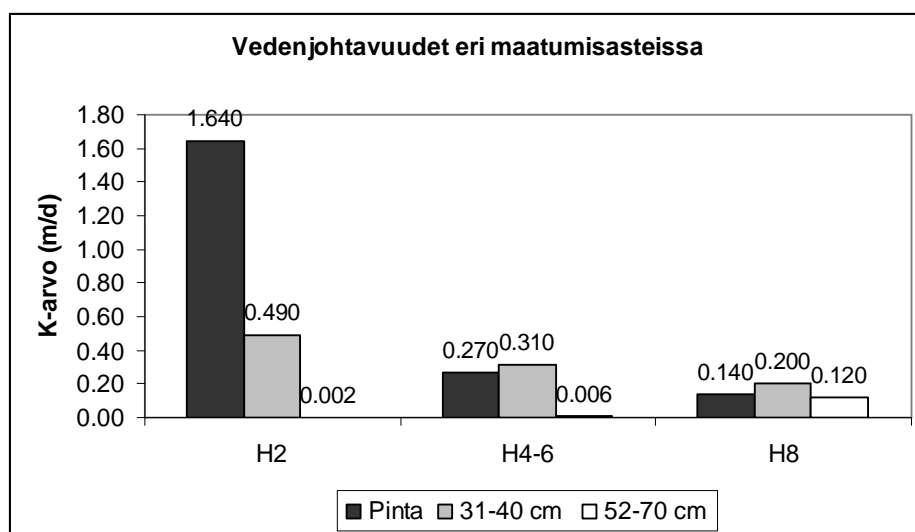
5.2.4 Vedenjohtavuudet maatumisasteittain eri kerroksissa

Taulukossa 9 on esitetty kerroksittain kullekin maatumisasteelle kaikkien mittausten keskiarvot ja variaatiokertoimet. Taulukon arvoista on jätetty poikkeukselliset arvot pois. Syvyys kuvaa 7 cm korkean näytteen pohjan korkeutta, joka vaihteli keskimmaisessä

kerroksessa 31–40 cm:ssä ja alimmassa kerroksessa 52–70 cm:ssä. Kuvassa 22 on esitetty vedenjohtavuudet eri maatumisasteissa kerroksittain.

Taulukko 9. Eri tavalla maatuneiden rahkaturpeiden kyllästyneet vedenjohtavuudet ja variaatiokertoimet eri kerroksissa.

	Pinta	31–40 cm	52–70 cm
H2	1.64 m/d 40.1 %	0.49 m/d 50 %	0.002 m/d 49.9 %
H4-6	0.27 m/d 88.3 %	0.31 m/d 24.2 %	0.006 m/d 83.2 %
H8	0.14 m/d 31.7 %	0.20 m/d 68 %	0.120 m/d 33 %



Kuva 22. Vedenjohtavuudet eri kerroksissa maatumisasteittain.

Suurimmat variaatiokertoimet esiintyivät keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa, seuraavaksi ylimmät heikosti maatuneessa turpeessa ja alhaisimmat hyvin maatuneessa turpeessa.

Pinta- ja keskikerroksessa vedenjohtavuus aleni maatumisasteen kasvaessa. Pohja-kerroksessa kuitenkin vedenjohtavuus kasvoi maatumisasteen kasvaessa.

Heikosti maatuneen turpeen vedenjohtavuus laski profiilissa alaspäin. Keskinertaisesti ja hyvin maatuneessa turpeessa vedenjohtavuus oli korkeampi 31–40 cm syvyydellä kuin pinnassa ja alin syvyydellä 52–70 cm.

5.3 Turpeen vedenpidätyskyky

5.3.1 Hyvin maatunut turve

Pintakerros

Rinnakkaisia näytteitä oli 6 kpl. Luonnontilainen vesipitoisuus näytteissä vaihteli välillä 53–67 tilavuus-%, keskimäärin 60 tilavuus-%. Kyllästyneinä näytteissä oli vettä 74–78 tilavuus-%, keskiarvo 76 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa 42–51 tilavuus-%, keskimäärin 45 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla yhteensä 31 tilavuus-%. Näistä näytteistä ei määritetty huokoisuutta, mutta kyllästyneen vedenjohtavuuden mittausta varten otetuissa näytteissä se oli keskimäärin 82,4 %. Kuvat vedenpidätyskäyristä on esitetty kohdassa 5.4. Katso kuva 31.

Keskikerros

Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 78,0- 79,9 tilavuus-% vettä, keskimäärin 78,8 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 53,0–53,9 tilavuus-%, keskimäärin 53,6 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 62,4 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 25,2 tilavuus-%. Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Katso kuva 33.

Pohjakerros

Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 81,6–84,6 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 82,7 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 57,4–68,4 tilavuus-%, keskimäärin 62,1 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 72,8 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 20,6 tilavuus-%. Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Katso kuva 35.

5.3.2 Keskinkertaisesti maaton turve

Pintakerros (H6)

Ensimmäisessä näyte-erässä rinnakkaisia näytteitä oli 6 kpl. Kivennäisaineksen osuus niiden kuiva-aineesta vaihteli välillä 39–51 %. Luonnontilainen vesipitoisuus vaihteli välillä 60–66 tilavuusprosenttia, keskimäärin 63 tilavuus-%. Täysin kyllästyneinä näytteissä oli vettä 77–81 tilavuus-%, keskimäärin 79 tilavuus-%. 1 barin paineessa vettä oli 30–41 tilavuus-%, keskimäärin 38 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla yhteensä 41 tilavuus-%. Näistä näytteistä ei määritetty huokoisuutta, mutta kyllästyneen vedenjohtavuuden mittausta varten otetuissa näytteissä se oli keskimäärin 81,9 %. Katso kuva 37.

Toisessa näyte-erässä kivennäisaineksen massaosuus kuiva-aineksesta oli 12,1–30,2 % ja rinnakkaisia näytteitä oli 5 kpl. Luonnontilainen vesipitoisuus näytteissä vaihteli välillä 21,2–35,2 tilavuusprosenttia, keskimäärin 28,1 tilavuus-%. Kyllästyneinä näytteissä oli vettä 83,2–90,4 tilavuus-%, keskiarvo 87,9 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa 35,3–39,1 tilavuus-%, keskimäärin 37,5 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla yhteensä 47,5–54,4 tilavuus-%, keskimäärin 50,4 tilavuus-%. Näistä näytteistä ei määritetty huokoisuutta, mutta kyllästyneen vedenjohtavuuden mittausta varten otetuissa näytteissä se oli keskimäärin 88,0 %. Katso kuva 39.

Keskikerros (H4)

Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 88,3–90,3 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 88,9 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 51,0–59,4 tilavuus-%, keskimäärin 54,1 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 69,5 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 34,8 tilavuus-%. Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Katso kuva 41.

Pohjakerros (H5)

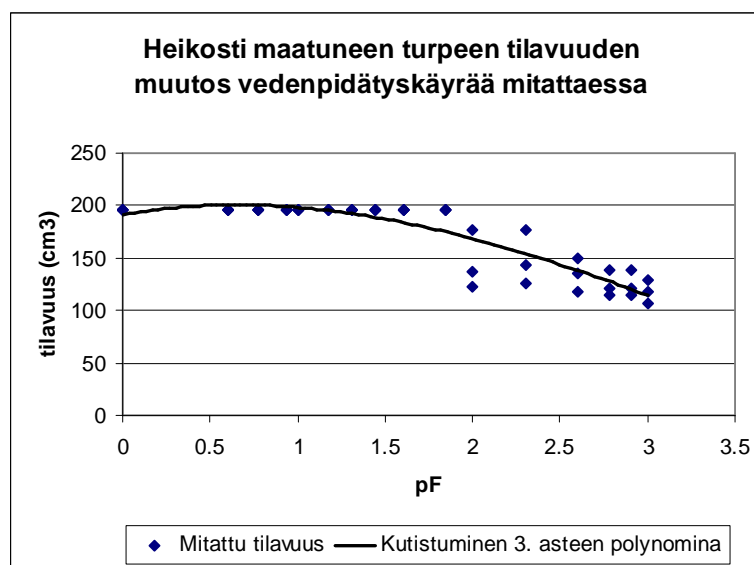
Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 87,2–90,0 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 88,2 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 41,9 tilavuus-% - 51,1 tilavuus-%, keskimäärin 46,3 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 75,2 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 41,9 tilavuus-%. Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Katso kuva 43.

5.3.3 Heikosti maatunut turve

Pintakerros

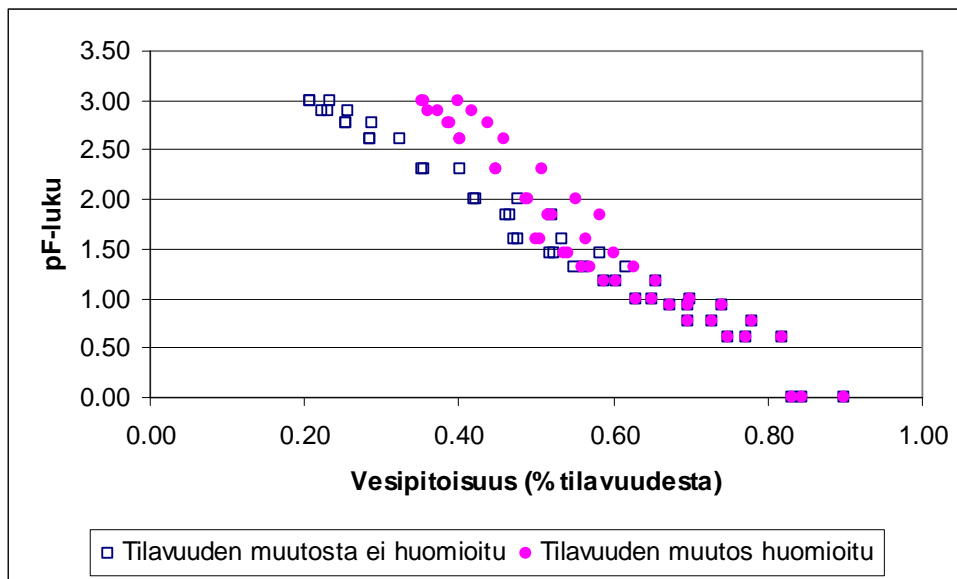
Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 83–90 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 86 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 21–23 tilavuus-%, keskimäärin 22 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä 46–53 tilavuus-%, keskimäärin 48 tilavuus-%. Näistä näytteistä ei määritetty huokoisuutta, mutta kyllästyneen vedenjohtavuuden mittausta varten otetuissa näytteissä se oli keskimäärin 93,7 %. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 64 tilavuus-%. Katso kuva 45.

Heikosti maatuneista pintakerroksen näytteistä mitattiin kuivumisen aikana suuntaantavasti näytteen irtoaminen metallisylinterin seinästä sekä näytteen painuminen. Mittaus aloitettiin pF-luvulla 2, jolloin silmämääräisesti havaittiin näytteiden irronneen reunasta. Näytteiden tilavuutta osoittavaan kuvaajaan (kuva 23) muodostui selvä hyppäys pF 2:n kohdalla, joten kutistuminen oli alkanut jo aikaisemmin. Hyppäyksen vuoksi myös vesipitoisuuden arvot eivät olleet järkeviä. Siksi tilavuuden mittaustuloksiin sovitettiin 3. asteen polynomi, jonka avulla laskettiin näytteiden tilavuus pF:sta 1,18 (15 cm) eteenpäin. Kaikille kolmelle näytteelle saatiin siten sama tilavuus, vaikka kutistumista mitattaessa suurimmalla imulla vähiten kutistuneen näytteen tilavuus oli 20 % suurempi kuin eniten kutistuneen näytteen tilavuus. pF:llä 2 vähiten kutistuneen tilavuus oli 45 % suurempi kuin eniten kutistuneen.



Kuva 23. Heikosti maatuneen pintaturpeen tilavuuden muutos vedenpidätyskäyrää mitattaessa (näytelieriön tilavuus 195,28 cm³).

Kuvassa 24 on esitetty vedenpidätyskäyrät sekä ilman tilavuuden muutosta että tilavuuden muutos huomioonottaen. 1 barin imulla näytteissä oli kutistuminen huomioonottaen 35–40 tilavuusprosenttia vettä, kun ilman kutistumisen huomioonottamista vesipitoisuus oli 21–23 tilavuus-%. Vesipitoisuus 1 barin imulla oli siis 59 prosenttia korkeampi kutistuminen huomioonottaen kuin ilman kutistumista. Näytteistä poistui mittauksen aikana 48–50 tilavuusprosenttia vettä kutistuminen huomioonottaen. Mikäli kutistumista ei huomioitu, vettä poistui 63–66 tilavuus-%.



Kuva 24. Heikosti maatuneen pintaturpeen vedenpidätyskäyrä, kun tilavuuden muutos on otettu huomioon, verrattuna käyrään ilman tilavuuden muutoksen huomioonottamista.

Keskikerros

Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl, ja 3 cm korkean näytteen pohjan syvyys oli pinnasta 29 cm. Näistä näytteistä kutistumista ei mitattu.

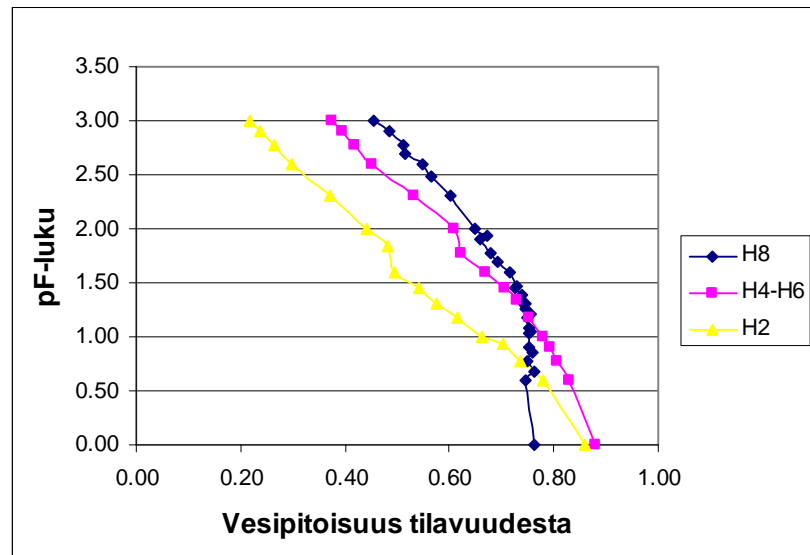
Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 94,6–96,1 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 95,5 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 37,8–44,2 tilavuus-%, keskimäärin 41,4 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 76,9 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 54,1 tilavuus-%. Katso kuva 49.

Pohjakerros

Täysin kyllästyneenä näytteet sisälsivät 88,0–91,6 tilavuusprosenttia vettä, keskimäärin 89,7 tilavuus-%, ja 1 barin paineessa vettä oli 35,5–37,3 tilavuus-%, keskimäärin 36,3 tilavuus-%. Luonnontilaisina näytteissä oli vettä keskimäärin 80,4 tilavuus-%. Näytteistä poistui 1 barin imulla keskimäärin 53,4 tilavuus-%. Rinnakkaisia näytteitä oli 3 kpl. Näistä näytteistä kutistumista ei mitattu. Katso kuva 51.

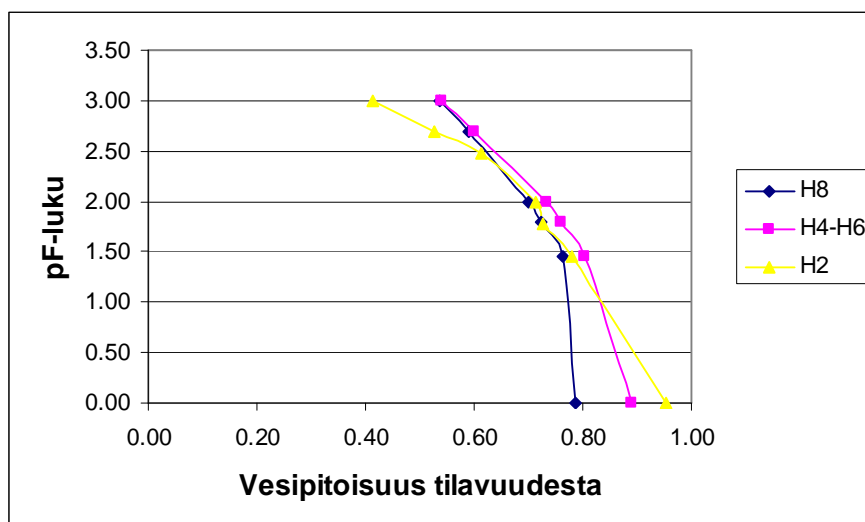
5.3.4 Vedenpidätyskäyrät kerroksittain

Kuvissa 25–27 on esitetty vedenpidätyskäyrät pinta-, keski- ja pohjakerroksessa maatumisasteittain. Arvot ovat 3-6 rinnakkaisnäytteen keskiarvoja.



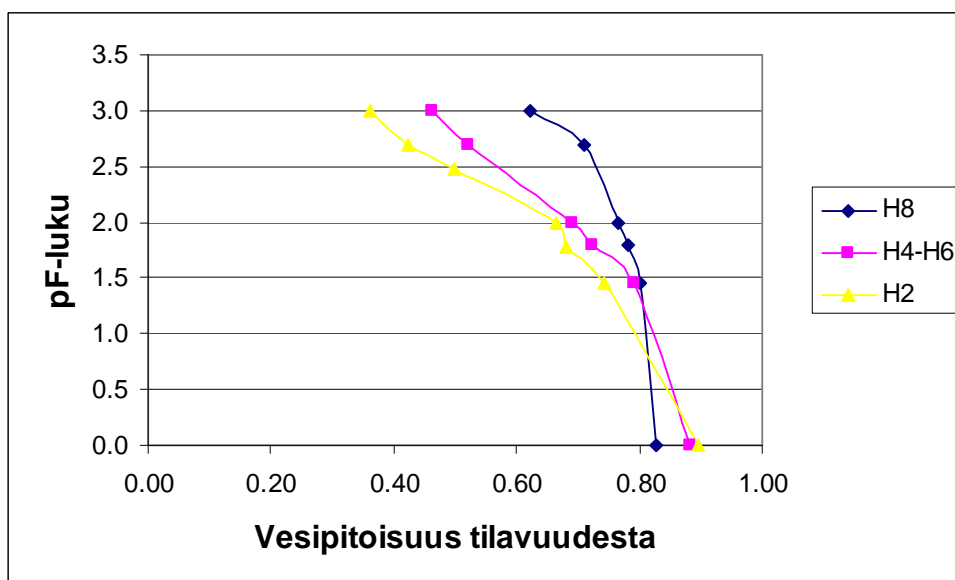
Kuva 25. Pintakerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.

Pintakerroksessa hyvin maatuneessa turpeessa on kyllästyneenä vähiten vettä, mutta noin pF-luvusta 1,3 eteenpäin hyvin maatunut turve pidättää vettä parhaiten.



Kuva 26. Keskikerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.

Kyllästyneenä eniten vettä pidättää heikosti maatunut turve, ja 1000 cm imulla se pidättää vettä vähiten.



Kuva 27. Pohjakerroksen vedenpidätyskäyrät eri maatumisasteissa.

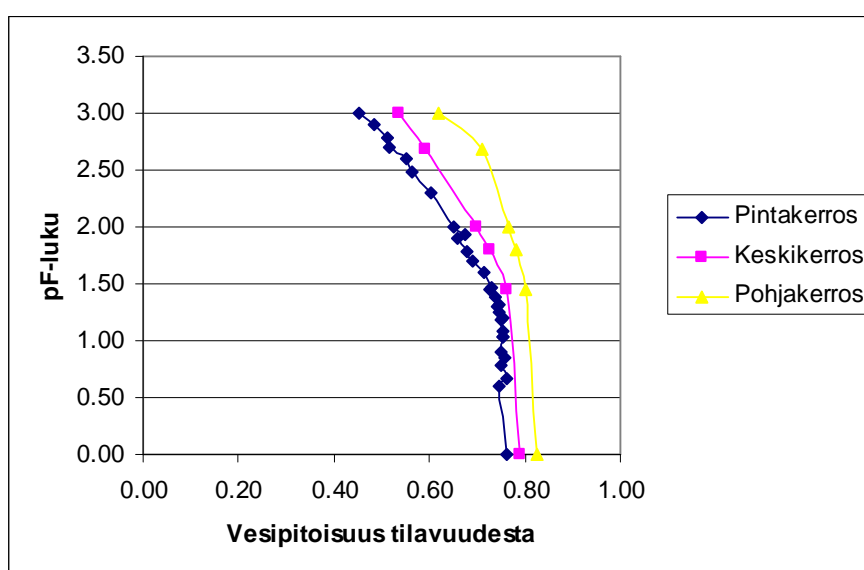
Pohjakerroksessa hyvin maatuneessa turpeessa on kyllästyneenä vähiten vettä, mutta pF-luvusta 1,5 eteenpäin hyvin maatunut turve pidättää vettä parhaiten.

5.3.5 Vedenpidätyskäyrät maatumisasteittain

Kuvissa 28-30 on esitetty vedenpidätyskäyrät maatumisasteittain eri kerroksissa. Arvot ovat kolmen rinnakkaisnäytteen keskiarvoja.

Hyvin maatonut turve

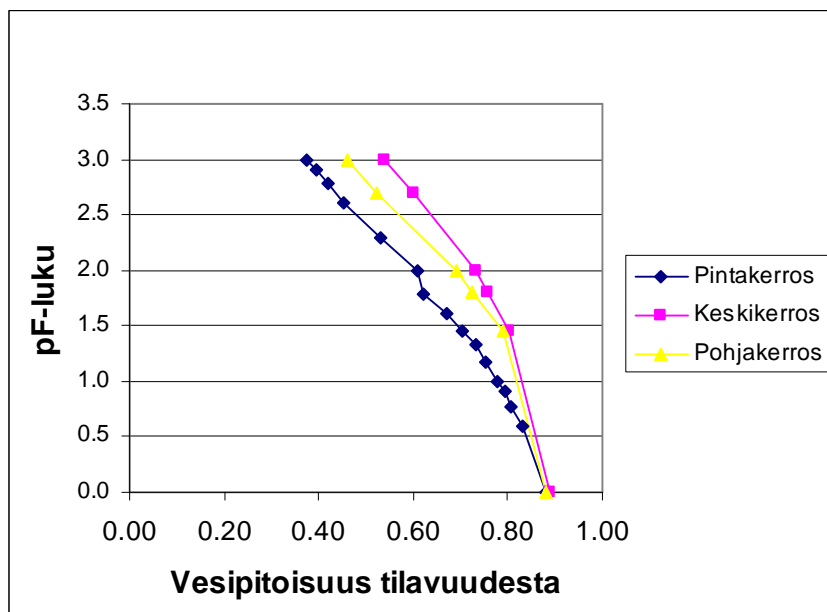
Pintakerroksessa on hyvin maatuneessa turpeessa kaikilla imuilla alhaisin vesipitoisuus ja pohjakerroksessa korkein (kuva 28). Turpeen tiheydet (keskiarvoina) ovat suunnilleen samoja pinta- ja keskikerroksessa, ja tiheys on alhaisin pohjakerroksessa. Pohjakerros kuitenkin pidättää vettä parhaiten.



Kuva 28. Hyvin maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa.

Keskinkertaisesti maatonut turve

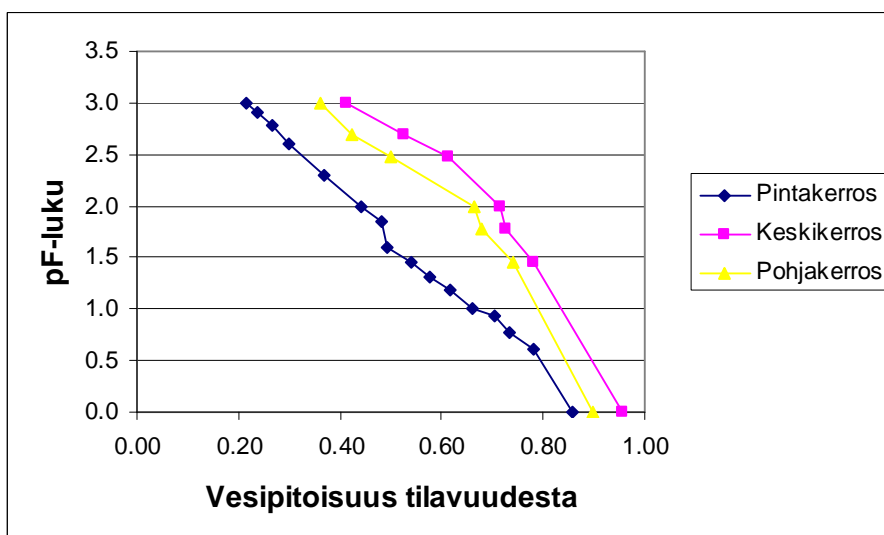
Pintakerros pidättää vähiten vettä, ja keskikerros pidättää vettä parhaiten (kuva 29). Turpeen tiheydet ovat suunnilleen samat pinta- ja keskikerroksessa. Tiheys on alhaisin pohjakerroksessa.



Kuva 29. Keskinertaisesti maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa.

Heikosti maatunut turve

Pintakerros pidättää vähiten vettä ja keskipokerros eniten (kuva 30), kuten keskinertaisestikin maatuneessa turpeessa. Turpeen tiheydet kuitenkin kasvavat alaspäin mentäessä.



Kuva 30. Heikosti maatuneen rahkaturpeen vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa.

5.3.6 Vedenpidätysominaisuudet maatumisasteittain

Taulukoissa 10–12 on koottu eri kerrosten vedenpidätysominaisuuksia maatumisasteittain.

Taulukko 10. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) pintakerroksessa. Heikosti maatuneen turpeen kutistuminen huomioitu.

Pintakerros	Kyllästynyt vesipitoisuus	Huokoisuus Ksat-näytteistä	Vesipitoisuus 1 bar	Poistui
Hyvin maatonut	76	82	45	31
Keskinkertaisesti maatonut, runsaasti kivennäisainesta	79	82	38	41
Keskinkertaisesti maatonut, vähemmän kivennäisainesta	88	88	38	50
Heikosti maatonut	86	94	37	49

Taulukko 11. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) keskikerroksessa (3 cm korkean näytteen pohjan syvyys 29 cm). Heikosti maatuneen turpeen kutistumista ei mitattu.

Keskikerros	Kyllästynyt vesipitoisuus	Vesipitoisuus 1 bar	Poistui
Hyvin maatonut	78,8	53,6	25,2
Keskinkertaisesti maatonut	88,9	54,1	34,8
Heikosti maatonut	95,5	41,4	54,1

Taulukko 12. Eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenpidätysominaisuuksia (til.-%) pohjakerroksessa (3 cm korkean näytteen pohjan syvyys 59 cm). Heikosti maatuneen turpeen kutistumista ei mitattu.

Pohjakerros	Kyllästynyt vesipitoisuus	Vesipitoisuus 1 bar	Poistui
Hyvin maatunut	82,7	62,1	20,6
Keskinkertaisesti maatunut	88,2	46,3	41,9
Heikosti maatunut	89,7	36,3	53,4

5.4 van Genuchtenin mallin sovitus vedenpidätyskäyriin

Alla on esitetty van Genuchtenin mallin (kaava 27) sovitus mitattuihin vedenpidätyskäyriin eri tavalla maatuneille turpeille sekä saadut parametrit. Lisäksi saaduilla parametreilla on laskettu vedenpidätyskäyrää eteenpäin. Koska mittaustuloksia ei ole kuin pF-lukuun 3 asti, ei käyrän loppupää ole kuitenkaan luotettava.

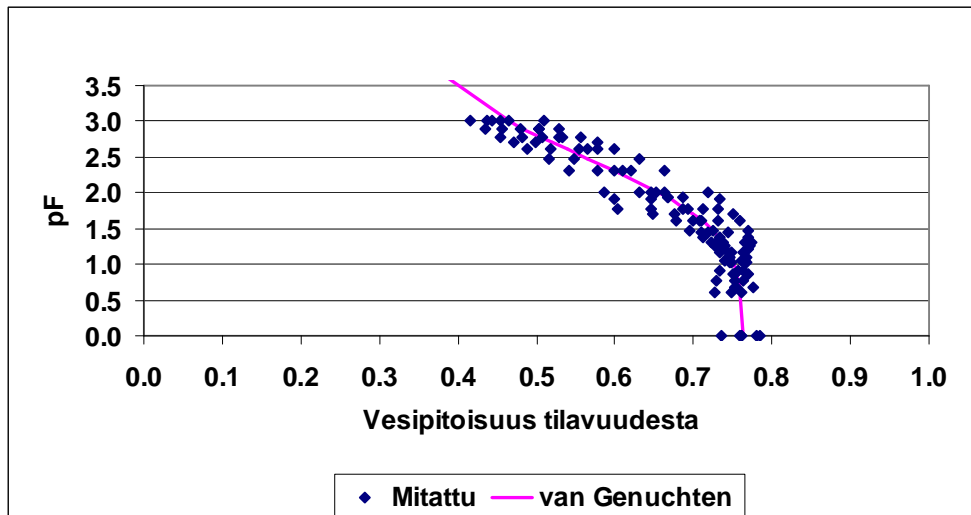
5.4.1 Hyvin maatunut rahkaturve

Pintakerros

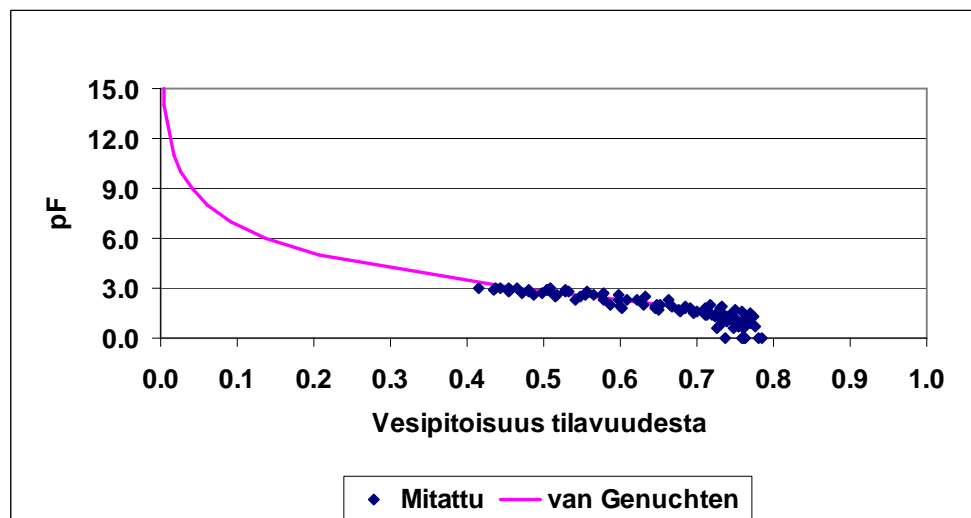
Hyvin maatuneelle pintakerroksen rahkaturpeelle (kuvat 31 ja 32) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.76, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,016307, n = 1,176560, m = 1-1/n = 0,150064.$$

Sovituksen hyvyysluvaksi saatiin $0,922 = 92,2 \%$. Näistä h_a asetettiin nolllaksi ja θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden mittausrvojen keskiarvosta. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät θ_r, α ja n .



Kuva 31. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen mitattuun vedenpidätyskäyrään.



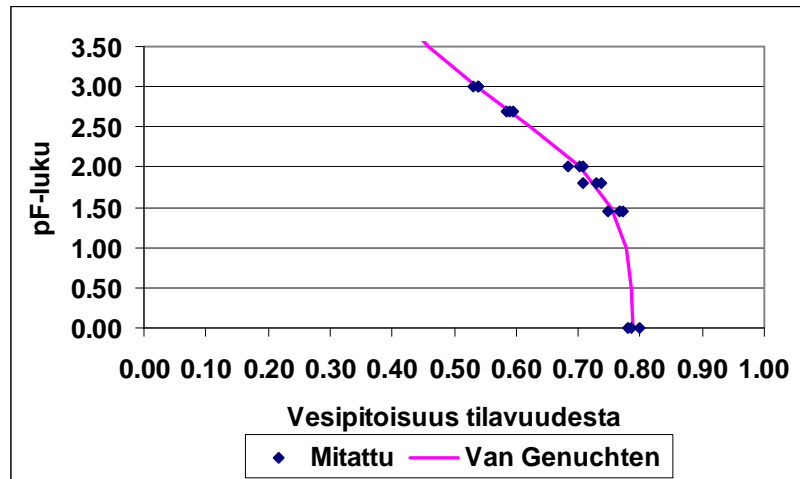
Kuva 32. Laskettu vedenpidätyskäyrä hyvin maatuneelle turpeelle jatkettuna pF-lukuun 15 asti.

Keskikerros

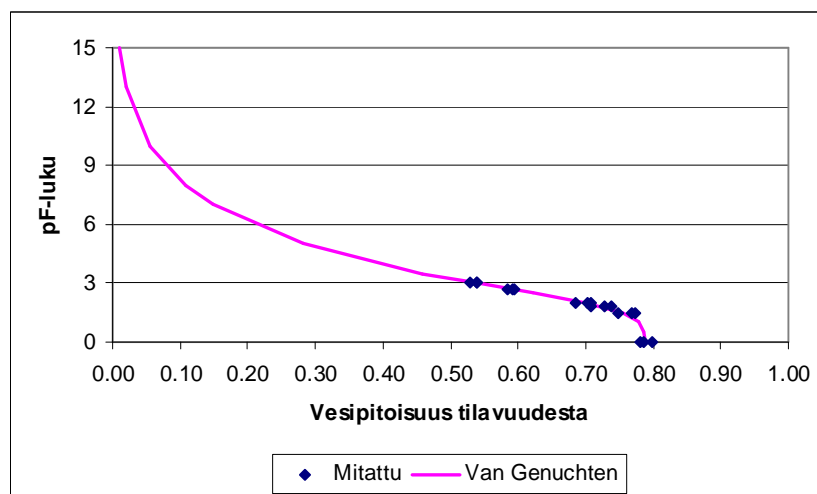
Hyvin maatuneelle keskikerroksen rahkaturpeelle (kuvat 33 ja 34) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$h_a = 0$, $\theta_s = 0,788$, $\theta_r = 0,00$, $\alpha = 0,015055$, $n = 1,140270$, $m = 1-1/n = 0,123015$.

Hyvyyssluvuksi saatiin $0,990 = 99,0\%$. h_a asetettiin nolllaksi, θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät siten α ja n .



Kuva 33. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen turpeen keskikerroksen mitattuun pF-käyrään.



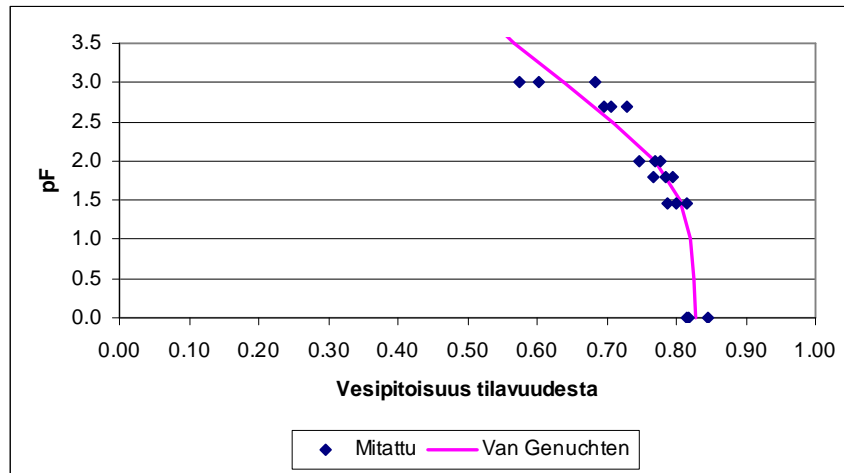
Kuva 34. Hyvin maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.

Pohjakerros

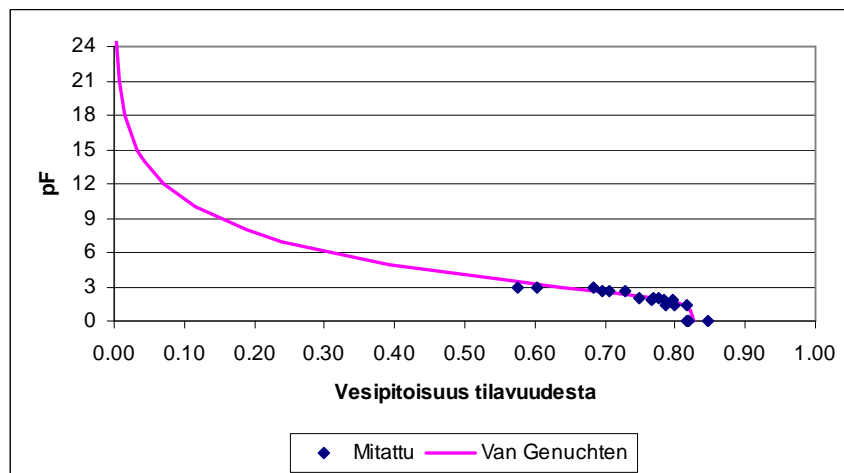
Hyvin maatuneelle pohjakerroksen (kuvat 35 ja 36) turpeelle saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$h_a = 0$, $\theta_s = 0.83$, $\theta_r = 0,00$, $\alpha = 0,010681$, $n = 1,106902$, $m = 1-1/n = 0,096578$.

Hyvyyssluvuksi saatiin $0,866 = 86,6\%$. h_a asetettiin nolllaksi, θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät α ja n .



Kuva 35. van Genuchtenin mallin sovitus hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen mitattuun pF-käyrään.



Kuva 36. Hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen van Genuchten-mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 24 asti.

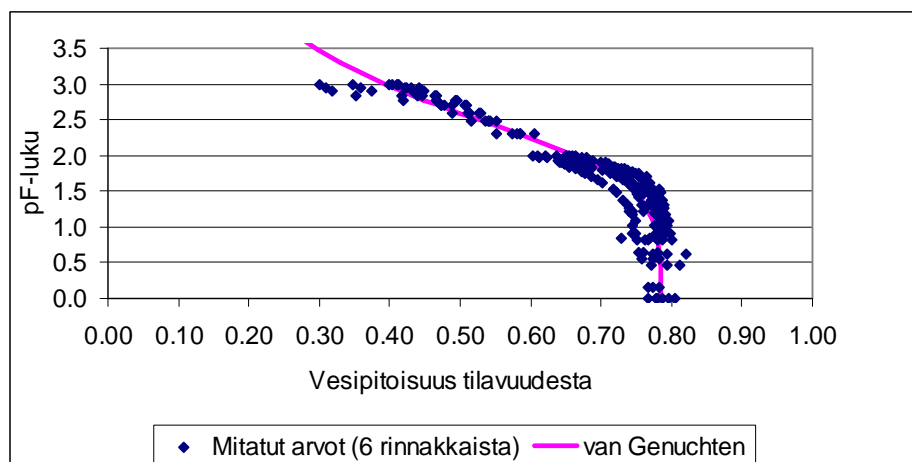
5.4.2 Keskinertaisesti maatunut rahkaturve

Pintakerros

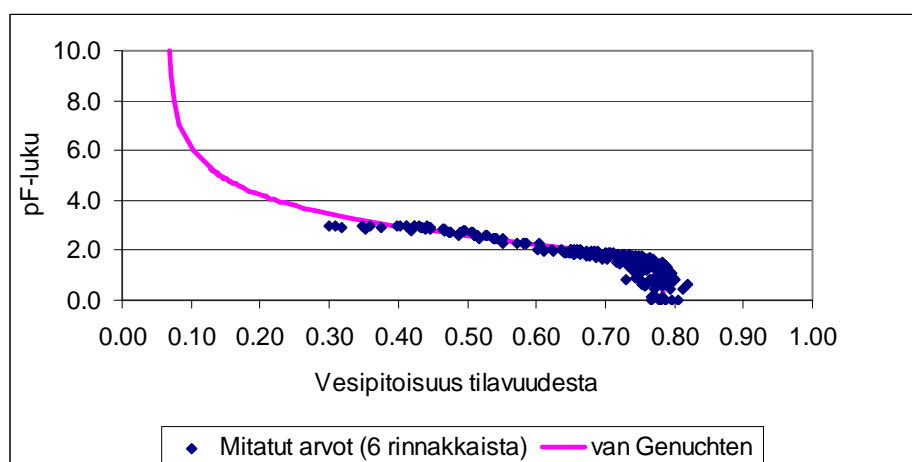
Keskinertaisesti maatuneelle, runsassaviselle pintaturpeelle (kuvat 37 ja 38) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0,79, \theta_r = 0,066233, \alpha = 0,011167, n = 1,321423, m = 1-1/n = 0,243240.$$

Hyvyytluvuksi saatiin $0,958 = 95,8 \%$. Näistä h_a asetettiin nolaksi ja θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden mittausarvojen keskiarvosta. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät θ_r , α ja n .



Kuva 37. Van Genuchtenin mallin sovitus keskinertaisesti maatuneen, runsassavisen pintaturpeen vedenpidätyskäyrään.

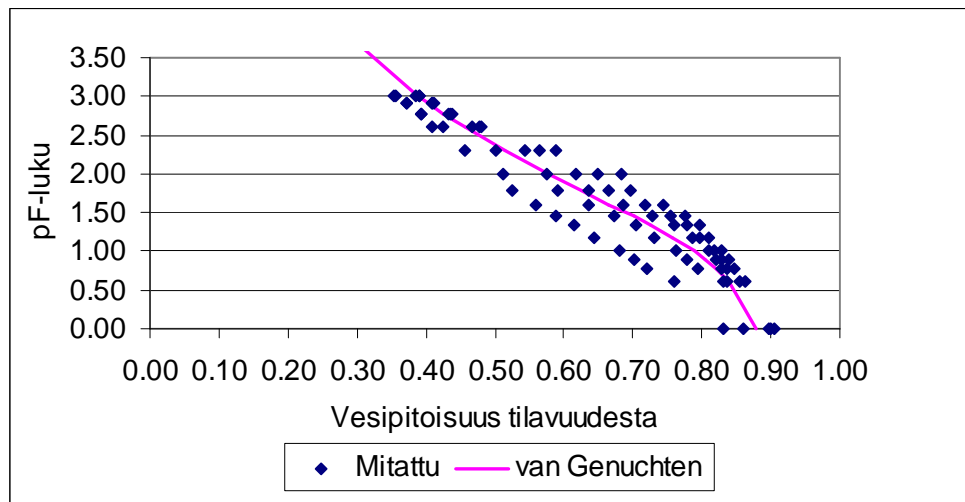


Kuva 38. Laskettu vedenpidätyskäyrä keskinertaisesti maatuneelle, runsassaviselle turpeelle jatkettuna pF-lukuun 10 asti.

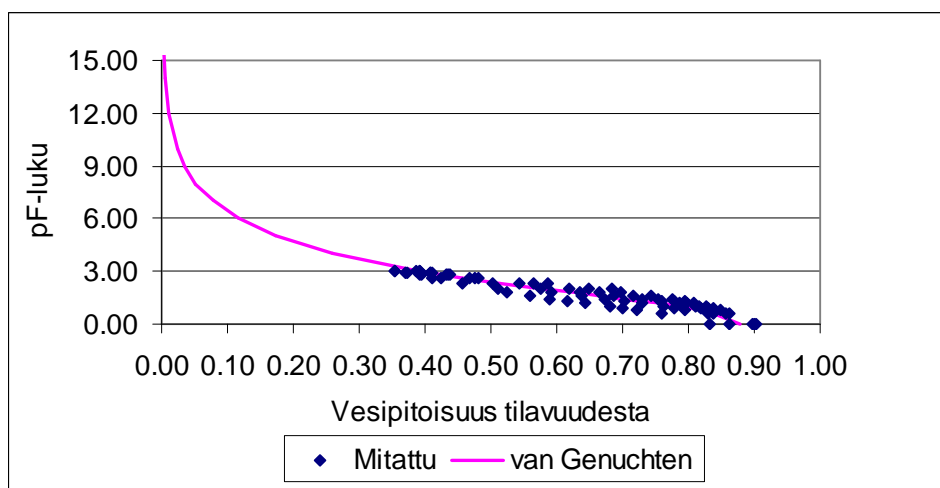
Keskinkertaisesti maatuneelle, vähemmän savea sisältävälle pintaturpeelle (kuvat 39 ja 40) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.88, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,105801, n = 1,174706, m = 1-1/n = 0,148723.$$

Hyvyyksluvuksi saatiin $0,912 = 91,2 \%$. θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät θ_r , α ja n .



Kuva 39. Keskinkertaisesti maatuneen vähäsavisen turpeen vedenpidätyskäyrän van Genuchtenin mallin sovitus.



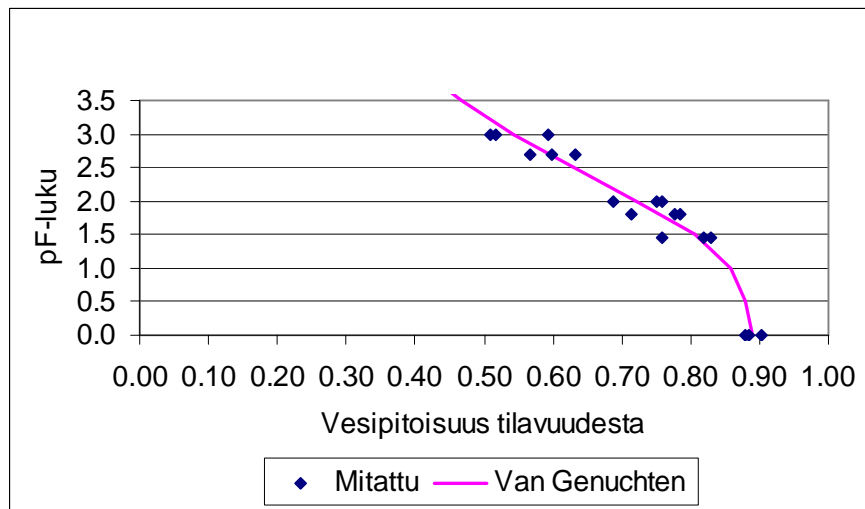
Kuva 40. Van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneelle rahkaturpeelle jatkettuna pF-lukuun 15 asti..

Keskikerros

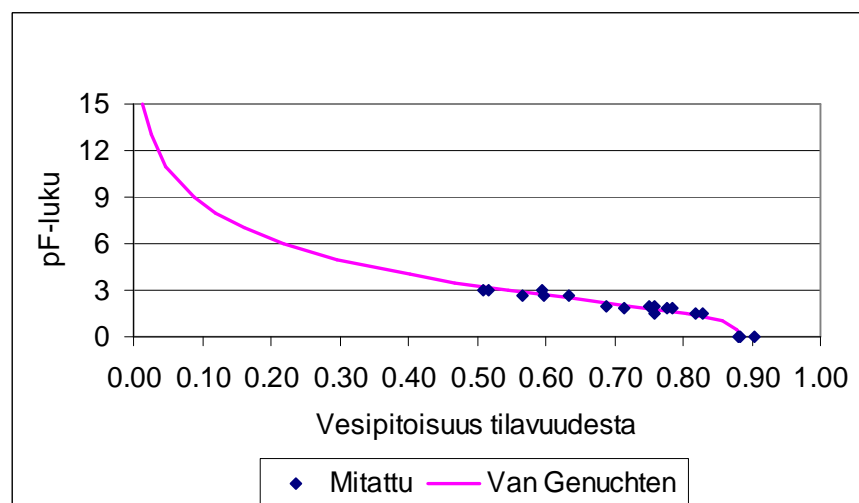
Keskinkertaisesti maatuneelle keskikerroksen rahkaturpeelle (kuvat 41 ja 42) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.89, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,040464, n = 1,131888, m = 1-1/n = 0,116521.$$

Hyvyyksluvuksi saatiin $0,939 = 93,9\%$ (Kuva). θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät α ja n .



Kuva 41. van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrään.



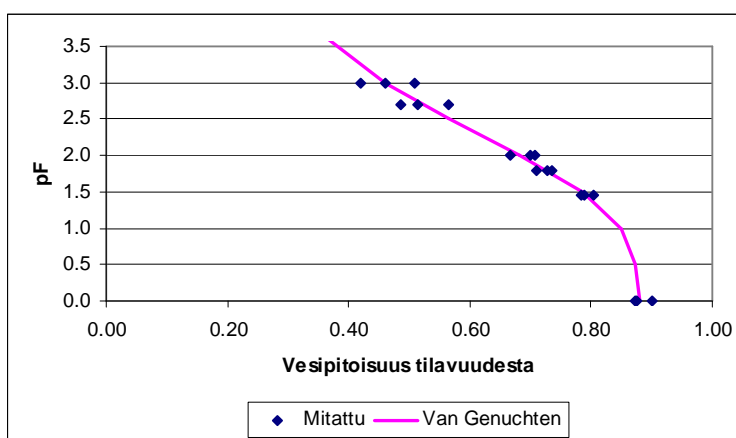
Kuva 42. Keskinkertaisesti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.

Pohjakerros

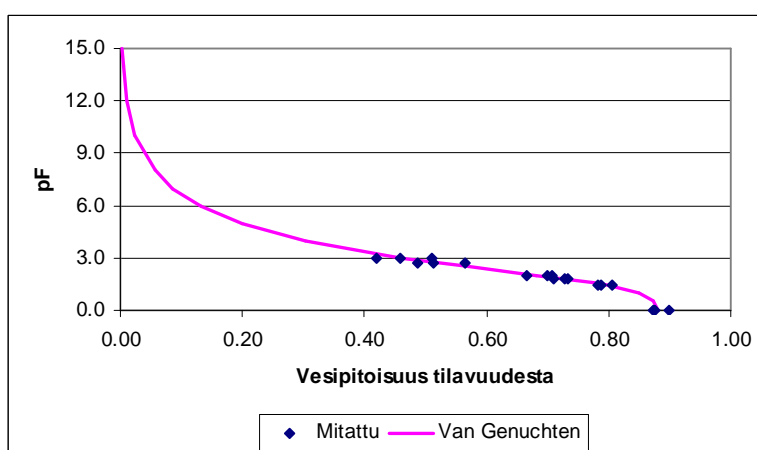
Keskinkertaisesti maatuneelle pohjakerroksen turpeelle (kuvat 43 ja 44) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.88, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,034058, n = 1,182839, m = 1-1/n = 0,154576.$$

Hyvyyksluvuksi saatiin $0,976 = 97,6 \%$. θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät α ja n .



Kuva 43. van Genuchtenin mallin sovitus keskinkertaisesti maatuneen turpeen pohjakerroksen pF-käyrään.



Kuva 44. Keskinkertaisesti maatuneen pohjaturpeen vedenpidätyskäyrä jatkettuna pF-lukuun 15 asti.

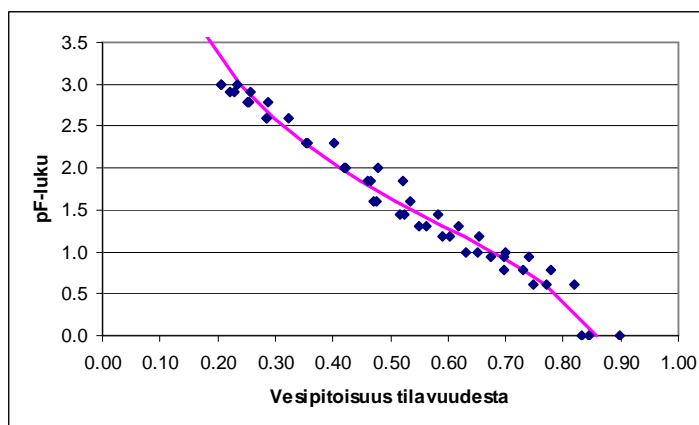
5.4.3 Heikosti maatonut rahkaturve

Pintakerros

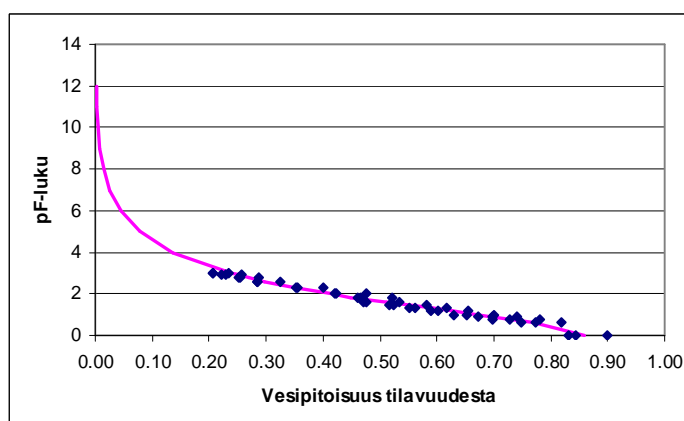
Heikosti maatonneelle pintakerroksen rahkaturpeelle (kuvat 45 ja 46) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit, kun vesipitoisuuden mittaustuloksissa ei otettu huomioon näytteiden kutistumista:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.86, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,204805, n = 1,240917, m = 1-1/n = 0,194144.$$

Hyvyyksluvuksi saatiin $0,982 = 98,2 \%$. Näistä h_a asetettiin nolllaksi ja θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät siten θ_r , α ja n .



Kuva 45. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatonneen turpeen vedenpidätyskäyrään ilman kutistumisen huomioonottamista.

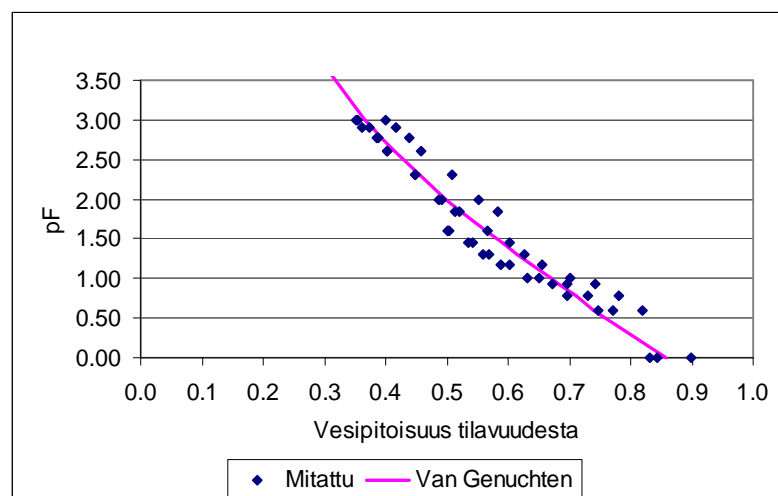


Kuva 46. Laskettu vedenpidätyskäyrä heikosti maatonneelle turpeelle ilman kutistumisen huomioonottamista jatkettuna pF-lukuun 12 asti.

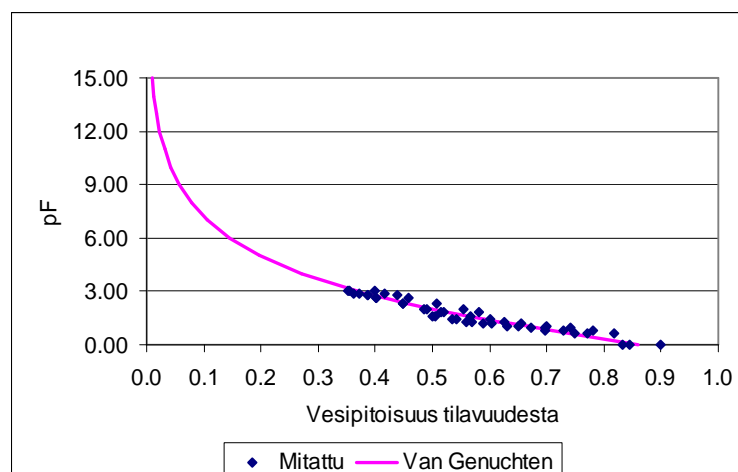
Heikosti maatuneelle pintakerroksen rahkaturpeelle (kuvat 47 ja 48) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit, kun vesipitoisuuden mittaustuloksissa otettiin huomioon näytteiden kutistuminen kuivuessa:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.86, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,563037, n = 1,134027, m = 1-1/n = 0,118186.$$

Hyvyyssluvuksi saatiin $0,952 = 95,2 \%$. Näistä h_a asetettiin nolllaksi ja θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta. θ_r asetettiin käsin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät siten α ja n .



Kuva 47. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen turpeen pintakerroksen vedenpidätyskäyrään kutistuminen huomioonottaen



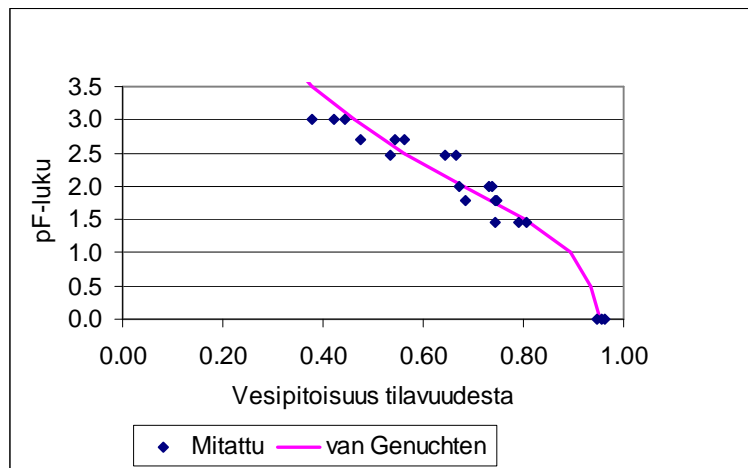
Kuva 48. Laskettu heikosti maatuneen turpeen vedenpidätyskäyrä tilavuuden muutos huomioonottaen jatkettuna pF-lukuun 15 asti.

Keskikerros

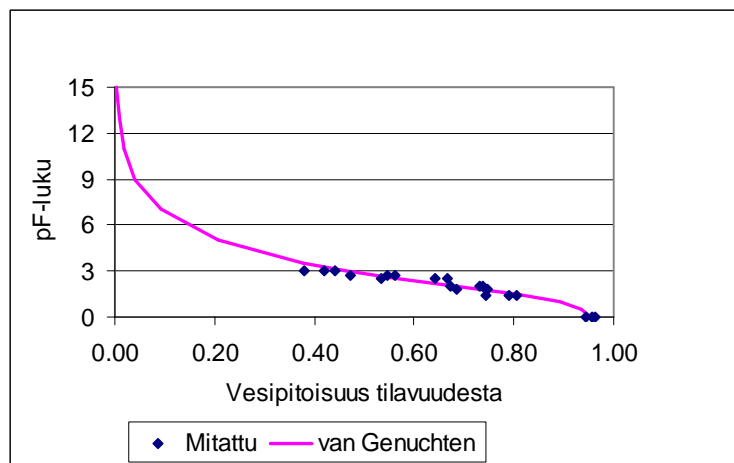
Heikosti maatuneelle keskikerroksen (kuvat 49 ja 50) turpeelle saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.95, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,061767, n = 1,175936, m = 1-1/n = 0,149614.$$

Hyvyyssluvuksi saatiin $0,924 = 92,4 \%$. θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät siten α ja n .



Kuva 49. Van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen turpeen keskikerroksen vedenpidätyskäyrään.



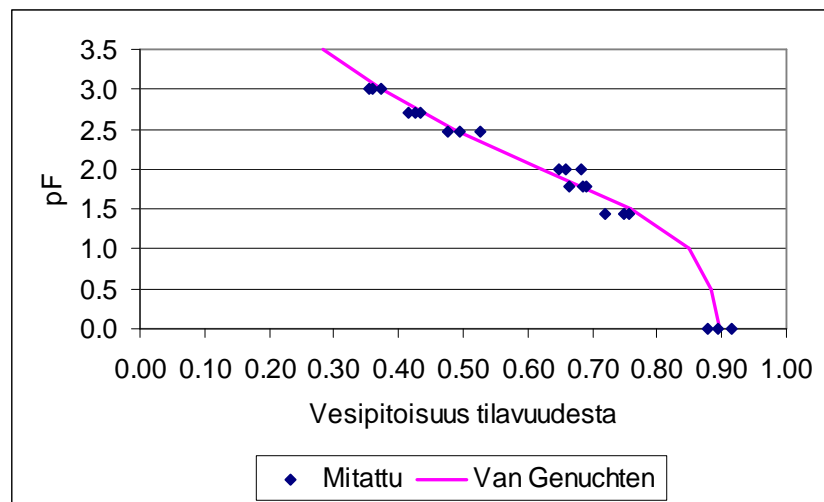
Kuva 50. Kuva 50. Heikosti maatuneen turpeen keskikerroksen van Genuchtenin mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 15 asti..

Pohjakerros

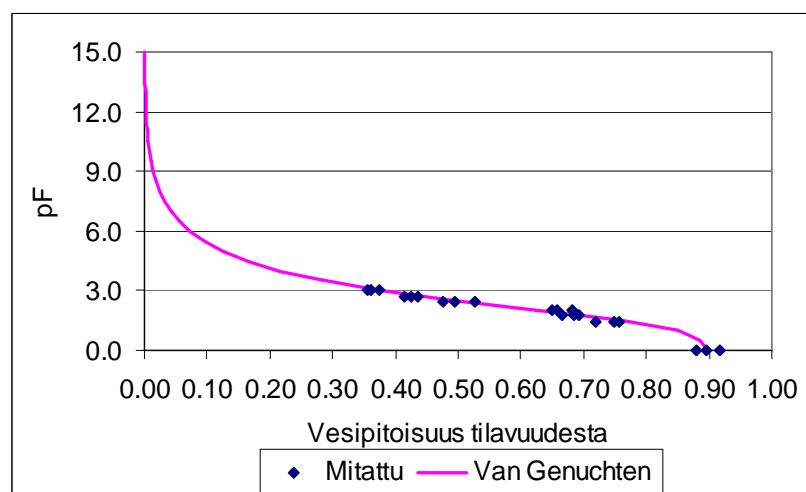
Heikosti maatuneelle pohjakerroksen turpeelle (kuvat 51 ja 52) saatiin seuraavat van Genuchten -parametrit:

$$h_a = 0, \theta_s = 0.90, \theta_r = 0,00, \alpha = 0,041096, n = 1,236271, m = 1-1/n = 0,191116.$$

Hyvyyslukuksi saatiin $0,980 = 98,0 \%$. θ_s saatiin kyllästyneiden näytteiden arvojen keskiarvosta ja θ_r asetettiin nolllaksi. Optimoitaviksi parametreiksi jäivät siten α ja n .



Kuva 51. van Genuchtenin mallin sovitus heikosti maatuneen pohjaturpeen vedenpidätyskäyrään.



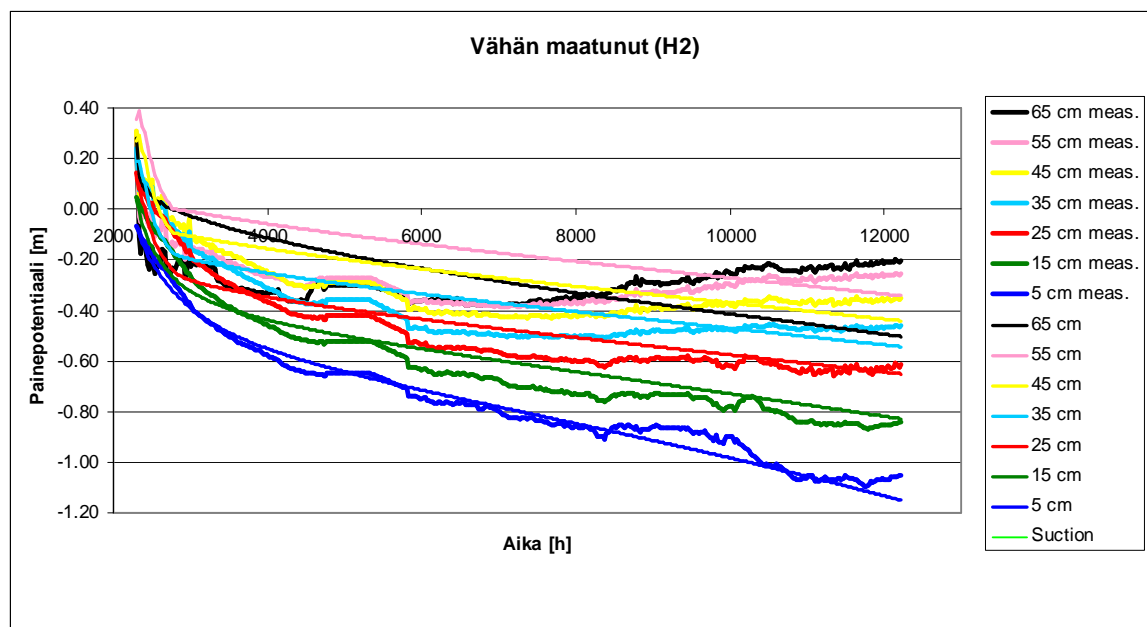
Kuva 52. Kuva 52. Heikosti maatuneen turpeen pohjakerroksen van Genuchtenin mallin sovitus jatkettuna pF-lukuun 15 asti..

5.5 Kyllästymättömän turpeen vedenjohtavuus

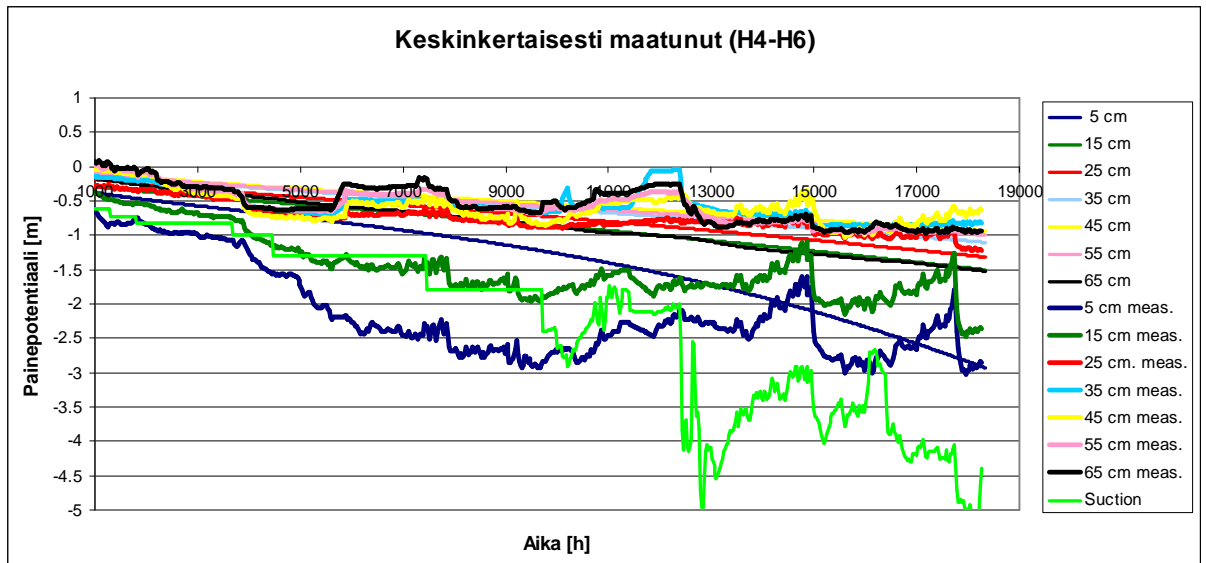
5.5.1 Mallin tulokset

Liitteessä 3 kuvatulla mallilla laskettiin turpeen kuivumista ja verrattiin sitä tensiometreillä mitattuun kuivumiseen.

Kuvissa 53–55 on mallin laskemat sekä mitatut painepotentiaalin arvot. Parametreina on käytetty mitattuja arvoja vedenjohtavuudelle ja kyllästyneelle vesipitoisuudelle sekä van Genuchtenin mallin sovituksista saatuja arvoja parametreille α ja n . Heikosti ja hyvin maatuneen turpeen kerrosrajat asetettiin niin, että pintakerroksen parametreja käytettiin ylimmässä 24 cm kerroksessa, keskikerroksen parametreja syvyydellä 24–54 cm ja pohjakerroksen parametreja 54 cm syvyydestä alaspäin. Näissä profiileissa näytteenoton yhteydessä todettiin olevan yhtenäinen maatumisaste koko syvyydeltä. Keski- ja pohjakerroksesta määritettyjen vedenjohtavuuksien ja vedenpidätyskäyrien oletettiin edustavan koko kerrosta. Keskinkertaisesti maatuneen turpeen kerrosrajat asetettiin havaittujen maatumisasteiden muutosten mukaan eli ylin kerros 0–17 cm, keskikerros 17–32 cm ja pohjakerros 32 cm alaspäin. Heikosti maatuneessa turpeessa (kuva 53) mitatut ja lasketut arvot vastaavat toisiaan erittäin hyvin.

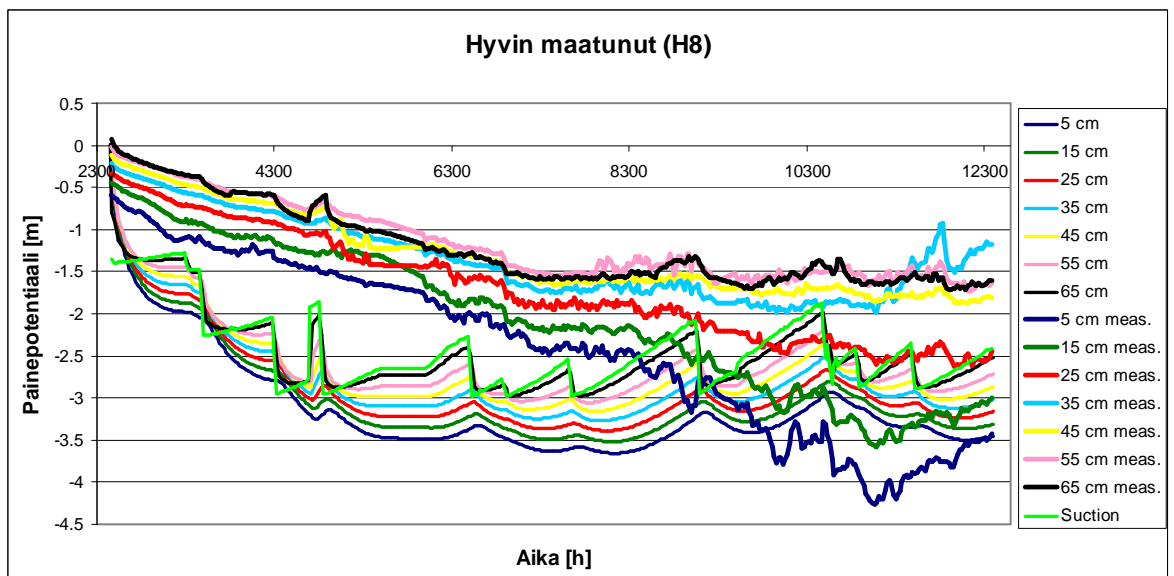


Kuva 53. Vähän maatuneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit turveprofiilin kuivuessa.



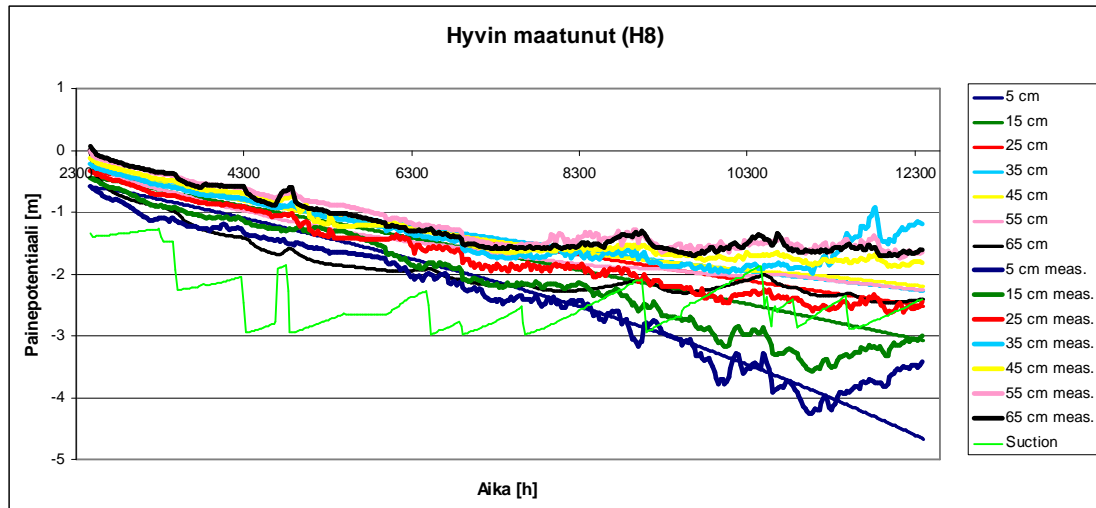
Kuva 54. Keskinkertaisesti maatonneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit turveprofiilin kuivuessa.

Myös keskinkertaisesti maatonneessa profiilissa (kuva 54) mallilla lasketut ja mitatut arvot ovat samansuuruisia.



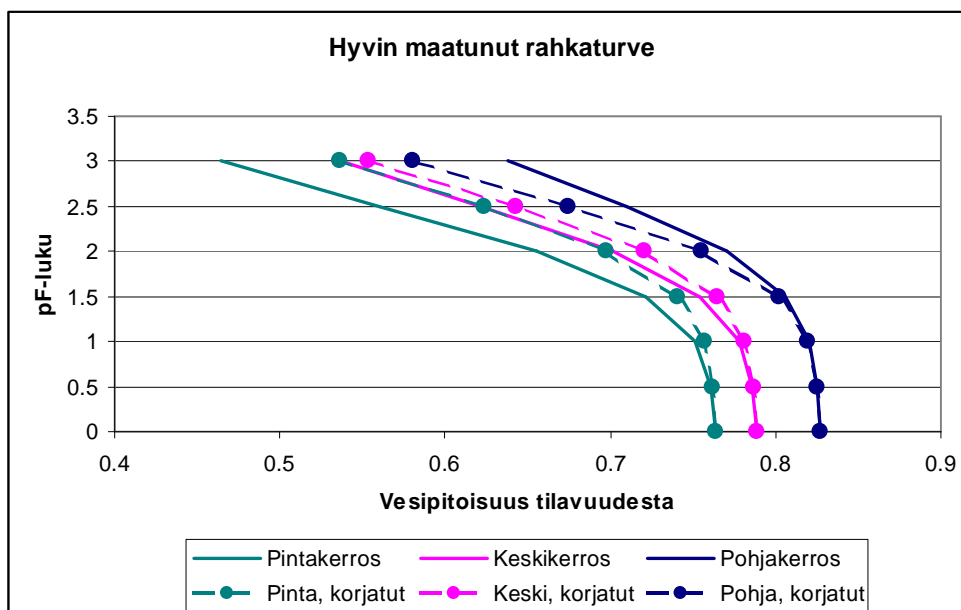
Kuva 55. Hyvin maatonneen turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit.

Hyvin maatonneessa turpeessa (kuva 55) mallin tulokset poikkesivat selvästi mitatuista arvoista. Malli seuraa mitattua imua, ja mallin mukaan maa kuivuu nopeammin kuin mittaustulosten mukaan. Siksi parametreja kalibroitiin manuaalisesti.



Kuva 56. Hyvin maatonun turpeen mitatut ja lasketut painepotentiaalit kalibroiduilla parametreilla.

Kuvassa 56 on esitetty kalibroiduilla parametreilla laskettu maan kuivuminen. Van Genuchten -parametreiksi koko profiilissa asetettiin $\alpha = 0,01$ ja $n = 1,15$, kun vedenpidätyskäyrästä saadut parametrit olivat pintakerrokselle 0,016 ja 1,177, keskikerrokselle 0,015 ja 1,140 ja pohjakerrokselle 0,011 ja 1,107. Eri kerroksissa käytettiin kuitenkin mittauksista saatuja kyllästyneitä vesipitoisuuksia. Lisäksi vedenjohtavuuden arvoksi asetettiin koko profiiliin 0,0002 m/h, kun mittauksista saadut keskiarvot olivat pintakerrokselle 0,006 m/h, keskikerrokselle 0,008 m/h ja pohjakerrokselle 0,005 m/h. Kuvassa 57 on esitetty mittauksista saaduilla parametreilla piirretyt vedenpidätyskäyrät eri kerroksissa sekä mallia varten kalibroiduilla parametreilla piirretyt vedenpidätyskäyrät kerroksittain. Pohjakerroksen käyrä muuttui huonommin pidättävään suuntaan. Keski- ja pintakerroksen käyrä muuttui paremmin pidättävään suuntaan, jolloin mallin mukaan maa kuivuu hitaammin kuin alkuperäisillä parametreilla, mikä sopii paremmin yhteen mittaustulosten kanssa. Lisäksi mallille annettu alkuperäistä alhaisempi vedenjohtavuus sallii maan kuivua aiempaa hitaammin, mikä myös parantaa yhteensopivuutta mittaustulosten kanssa.



Kuva 57. Mallia varten kalibroitu vedenpidätyskäyrä eri kerroksissa verrattuna mitattuihin käyriin.

Taulukossa 13 on esitetty mallin laskemat valunta sekä haihdunta koko mittausjaksolle (H2 mittauksen kesto 510 päivää, H4-6 mittauksen kesto 764 päivää ja H8 mittauksen kesto 517 päivää). H2:lle ja H8:lle mitattiin suuntaa-antavasti ulos tullutta vesimäärää, joka oli yhteensä noin 3,6 litraa. Mittauksista saatuja parametreja käyttäen mallin mukaan kahdesta näytteestä valui yhteensä 4,03 litraa ja kalibroituja parametreja käyttäen 3,77 litraa, mikä on hyvin lähellä mitattua arvoa.

Taulukko 13. Mallista saadut haihdunnat ja valunnat mittausjaksolle.

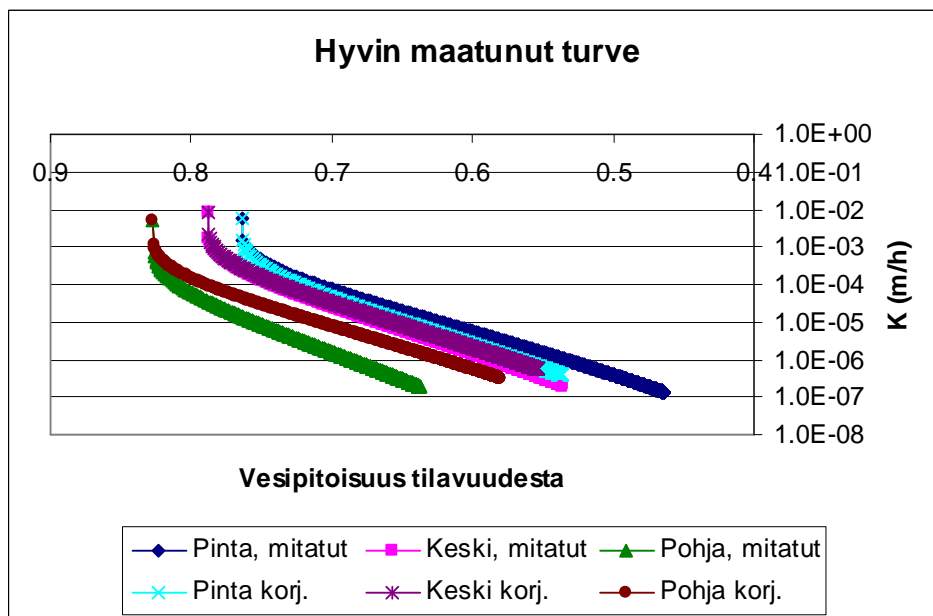
	Valunta (dm ³)	Haihdunta (dm ³)
H2	2,82	0,54
H4-H6	2,22	0,98
H8	1,21	0,53
H8, kalibr.	0,96	0,53

5.5.2 Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa

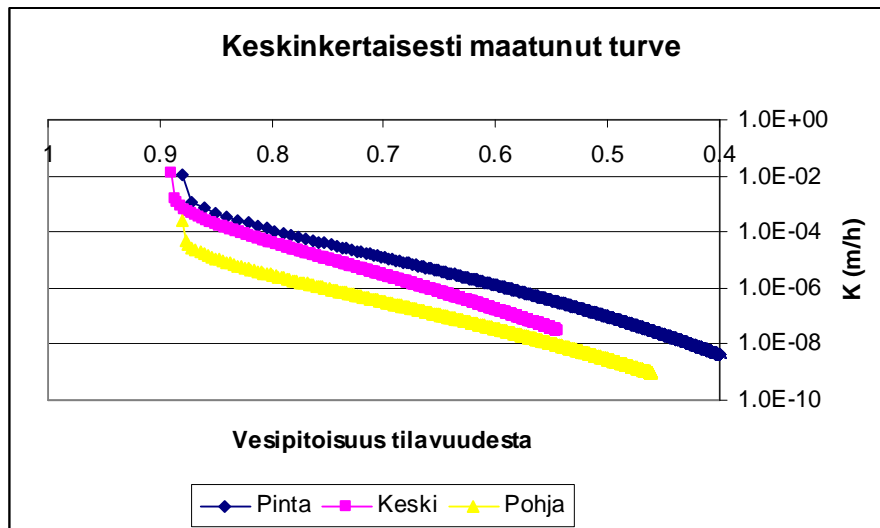
Van Genuchten mallin todettiin sopivan hyvin myös turvemaasta mitattuihin vedenpidätyskäyriin. Näin saatuja parametreja käyttävän maan kuivumista laskevan mallin tulokset sopivat hyvin yhteen mitatun kuivumisen kanssa. Siksi oli perusteltua käyttää van Genuchtenin parametreja myös vedellä kyllästymättömän maan vedenjohtavuuden laskemiseen.

Kuvissa 58–60 on esitetty eri tavalla maatuneiden turpeiden vedenjohtavuudet vesipitoisuuden suhteen eri kerroksissa. Kaikissa maatumisasteissa vedenjohtavuus tietyllä vesipitoisuudella aleni profiilissa alaspäin mentäessä.

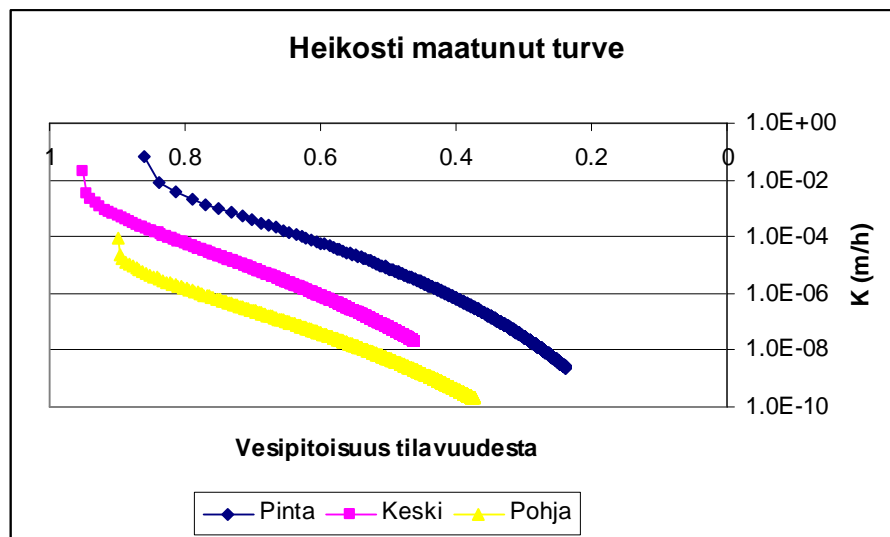
Hyvin maatuneen turpeen pF-käyrän kalibroidut van Genuchtenin parametrit olivat kaikissa kerroksissa samat, mutta kyllästyneen maan vedenjohtavuudet olivat erilaisia eri kerroksissa. Tästä johtuen vedenpidätyskäyrät olivat erilaiset eri kerroksissa ja siksi myös $K_{\text{unsat}}(\theta)$ oli erilainen eri kerroksissa.



Kuva 58. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona hyvin maatuneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka. Laskennassa käytetty mitattua K_{sat} -arvoa. Käyrät on piirretty sekä mitatuista vedenpidätyskäyristä saaduilla van Genuchtenin parametreilla että mallia varten kalibroiduilla parametreilla.



Kuva 59. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona keskinertaisesti maatonneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka.

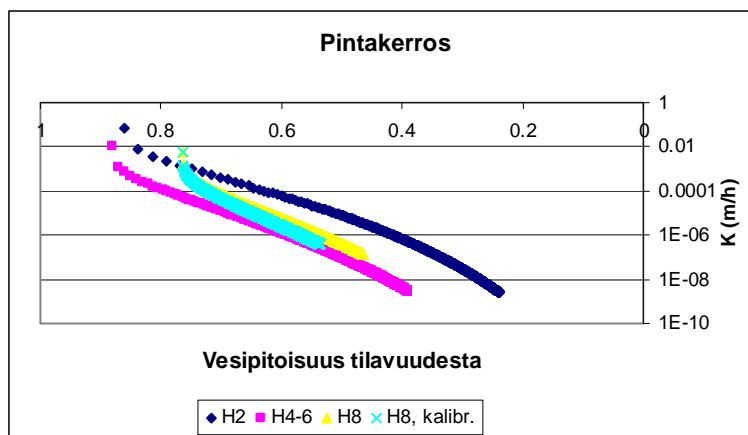


Kuva 60. Vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona heikosti maatonneessa turpeessa 1 barin imua vastaavaan vesipitoisuuteen saakka.

Kaikissa maatumisasteissa kyllästymätön vedenjohtavuus tietyllä vesipitoisuudella aleni profiilissa alaspäin.

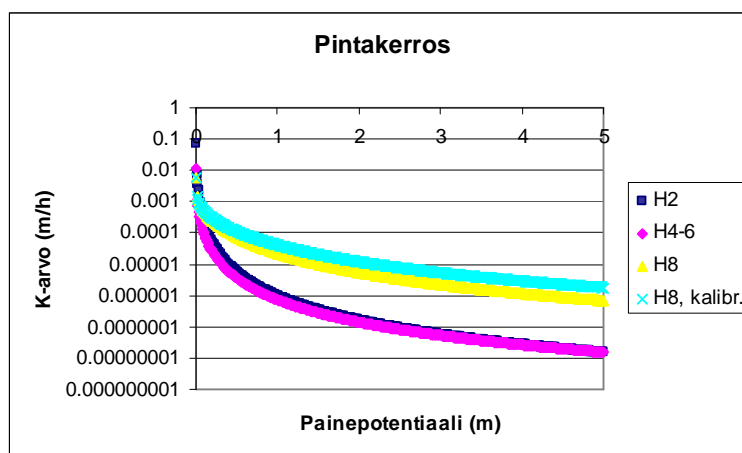
5.5.3 Vedenjohtavuus vesipitoisuuden ja painepotentiaalin funktiona eri kerroksissa

Kuvissa 61–66 on esitetty vedenjohtavuudet vesipitoisuuden ja painepotentiaalin suhteen eri kerroksissa. Hyvin maatuneelle turpeelle (H8) on laskettu arvot sekä mitattuja parametreja käyttäen että mallia varten kalibroiduilla vedenpidätyskäyrän parametreilla. Kyllästyneenä vedenjohtavuutena on käytetty mittauksista saatua arvoa.

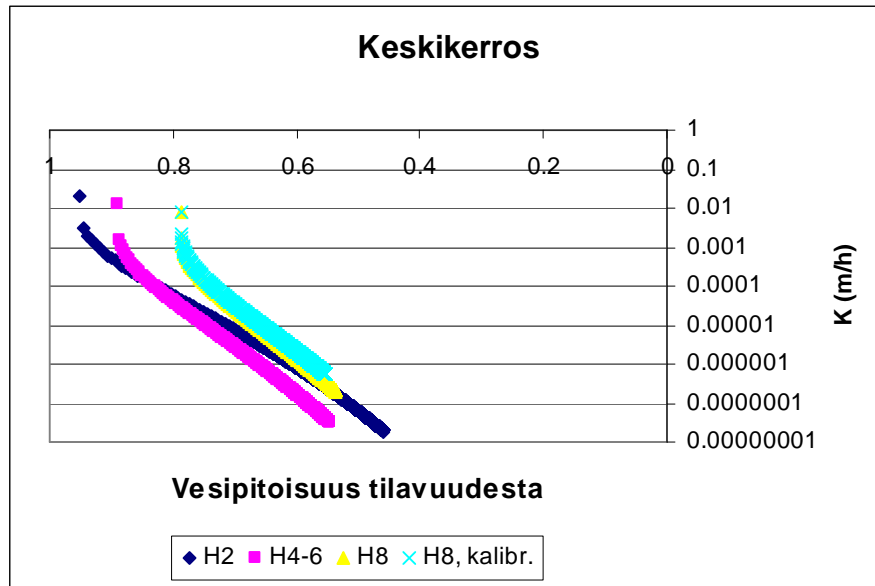


Kuva 61. Pintakerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.

Pintakerroksessa samassa vesipitoisuudessa korkein vedenjohtavuus esiintyy heikosti maatuneella turpeella, seuraavaksi korkein hyvin maatuneella ja alin vedenjohtavuus keskinkertaisesti maatuneella turpeella.

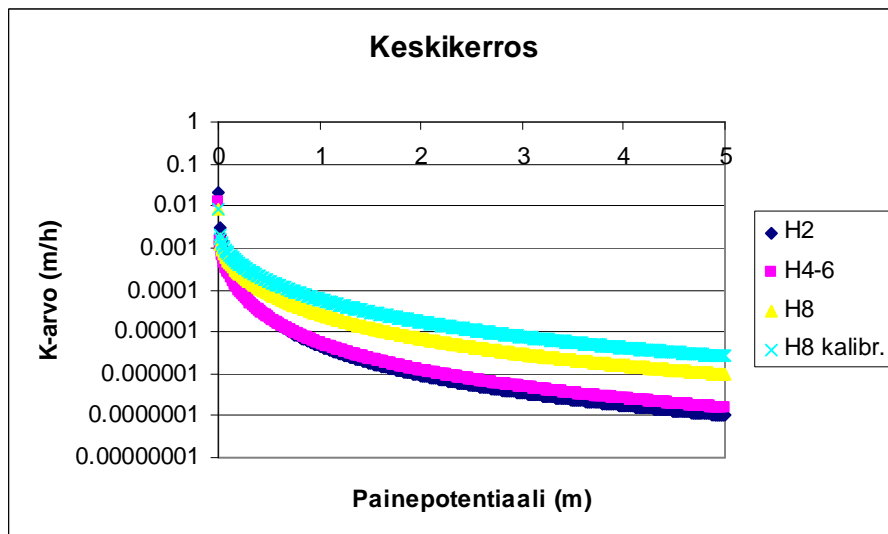


Kuva 62. Pintakerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.



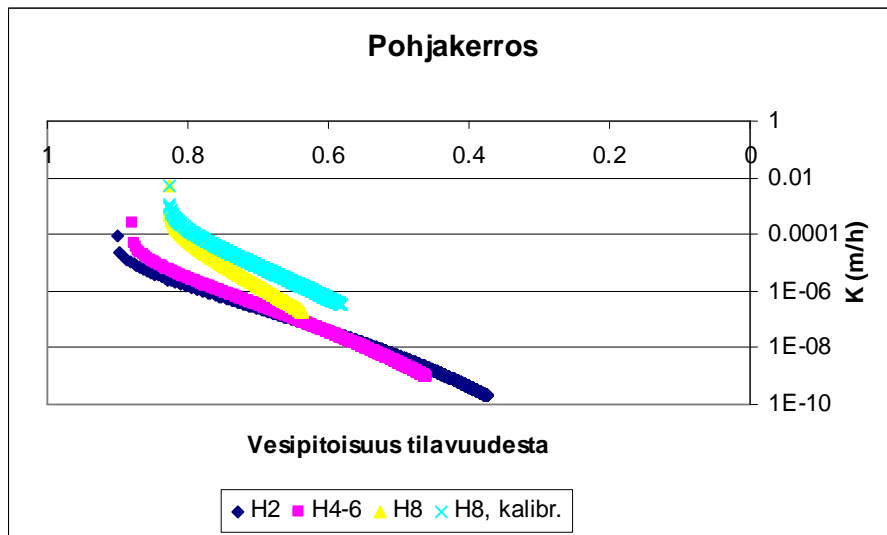
Kuva 63. Keskikerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.

Keskikerroksessa (kuva 63) samalla vesipitoisuudella korkein vedenjohtavuus esiintyi hyvin maatuneella turpeella, seuraavaksi ylin heikosti maatuneella turpeella ja alin vedenjohtavuus keskinkertaisesti maatuneella turpeella.

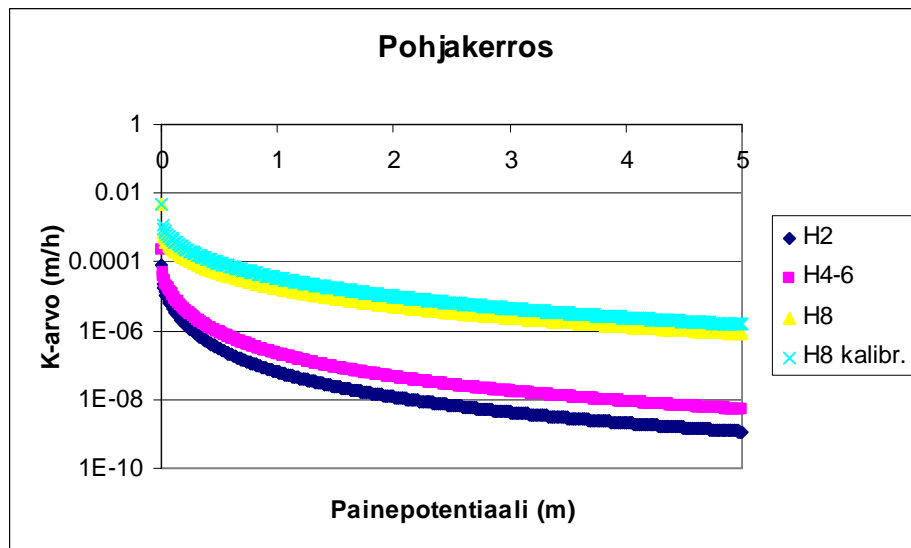


Kuva 64. Keskikerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.

Pohjakerroksessa (kuva 65) korkein vedenjohtavuus samalla vesipitoisuudella esiintyi hyvin maatuneella turpeella, ja vedenjohtavuudet heikosti ja keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa ovat hyvin samanlaiset.



Kuva 65. Pohjakerroksen vedenjohtavuus vesipitoisuuden funktiona eri maatumisasteissa.



Kuva 66. Pohjakerroksen vedenjohtavuus painepotentiaalin funktiona eri maatumisasteissa.

Korkein vedenjohtavuus eri painepotentiaaleilla esiintyy jokaisessa kerroksessa hyvin maatumella turpeella, koska sen vesipitoisuus tietyllä imulla on korkeampi kuin vähemmän maatumissa turpeissa. Alin johtavuus esiintyy heikosti maatumella turpeella, joka luovuttaa vetensä helposti imun kasvaessa.

6 Tulosten tarkastelua

6.1 Vedenpidätyskäyrät

Vedenpidätyskäyrien mittaaminen onnistui pääosin hyvin, ja hajonta rinnakkaisten näytteiden välillä oli vähäistä. Näytteitä käsiteltäessä maa-aineksen häviötä tapahtui jonkin verran, vaikka kaikki maa-aines pyrittiin keräämään levyiltä talteen. Kontaktiongelmia näytteen pohjan ja huokoisen levyn välillä ei esiintynyt. Hyvin hitaasta virtauksesta johtuen sen arvioiminen, oliko virtaus päättynyt, oli vaikeaa. Tarkistuspunnitukset osoittivat, että kahden viikon jälkeen näytteiden massa ei enää olennaisesti muuttunut, joten näytteet punnittiin kaksi viikkoa imun lisäyksen tai paineen noston jälkeen. Tässä ajassa merkittävä osuus vedestä poistuu, mutta ei kuitenkaan kaikki, koska veden liikkuminen on hyvin hidasta (suullinen tiedonanto Antti Ristolainen MTT). Tuloksista todettiin, että yhden barin paineella ei vielä havaittu taitepistettä, jossa käyrä olisi kääntynyt ylöspäin, ja koko käyrän aikaansaamista varten mittausta olisi pitänyt jatkaa vielä suuremmille paineille. Tässä työssä kuitenkin pääpaino on maankuivatuksessa, joten todettiin 1 barin olevan riittävä.

Hyvin maatuneen turpeen vedenpidätyskäyrä oli kaikissa kerroksissa jyrkin muihin maatumisasteisiin verrattuna. Saman tuloksen sai Myllys (1992), jonka näytteet olivat peräisin samalta pellolta kuin tässä tutkimuksessa käytetyt.

Mitä maatuneempi turve, sitä alhaisempi vesipitoisuus kyllästyneenä, sitä enemmän vettä näytteessä oli jäljellä 1 barissa ja sitä vähemmän vettä poistui yhteensä. Toisin sanoen heikosti maaton turve pidättää kyllästyneenä runsaasti vettä, mutta myös luovuttaa sitä helposti. Maatuneempi turve sisältää kyllästyneenä vähemmän vettä, mutta imun kasvaessa pidättää sitä paremmin kuin heikosti maaton turve. Tämä päti kaikissa kerroksissa. Samanlaisia tuloksia saivat myös Päivänen (1982a) ja Myllys (1992).

6.2 van Genuchtenin mallin sovitukset mitattuihin vedenpidätyskäyriin

Van Genuchtenin vedenpidätyskäyrän malli saatiin sovitettua mitattuihin vedenpidätyskäyriin erittäin hyvin. Hyvyysluvut olivat hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen arvoa 86,6 % lukuun ottamatta yli 90 %, parhaimmillaan jopa 99 %. Hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen alhainen hyvyysluku johtune vesipitoisuuksien

suuresta hajonnasta pF-luvulla 3. Van Genuchtenin vedenpidätyskäyrän malli on siten sovitettavissa myös eri tavalla maatuneisiin rahkaturvemaihin.

6.3 Kyllästynyt vedenjohtavuus

Kaikkien näytteiden suurin vedenjohtavuus esiintyi heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksessa ja alin sen pohjakerroksessa. Heikosti maatuneen rahkaturpeen huokokset ovat suuria, joten pintakerroksen suuri arvo on odotettavissa.

Pinta- ja keskikerroksessa vedenjohtavuus aleni maatumisasteen kasvaessa. Pohjakerroksessa kuitenkin vedenjohtavuus kasvoi maatumisasteen kasvaessa.

Heikosti maatuneen turpeen vedenjohtavuus laskee profiilissa alaspäin samalla kun tiheys kasvoi.

Keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa vedenjohtavuus oli korkein 31–40 cm syvyydellä, seuraavaksi korkein pinnassa ja alin pohjakerroksessa, tosin erot pinta- ja keskikerroksen arvoissa eivät olleet kovin suuria. Keskinkertaisesti maatuneessa turpeessa myös tiheys oli suurin 31–40 cm syvyydellä, seuraavaksi suurin pinnassa ja alin pohjakerroksessa, joten K-arvo kasvoi tiheyden noustessa. Suhde on päinvastainen kuin heikosti maatuneessa turpeessa.

Hyvin maatuneessa turpeessa vedenjohtavuus oli korkein 31 cm syvyydellä ja suunnilleen yhtä suuri pintakerroksessa ja pohjakerroksessa. Tiheys laskee profiilissa alaspäin mentäessä.

Myllyksen (1992) mukaan kaikilla maatumisasteilla vedenjohtavuus laskee profiilissa alaspäin mentäessä. Myllyks sai saman pellon näytteille korkeampia tuloksia, esimerkiksi äskettäin ojitetun turpeen pintakerrokselle noin 11 m/d (tässä tutkimuksessa 1,6 m/d) ja vuonna 1980 ojitetun turpeen pintakerrokselle noin 5 m/d (tässä tutkimuksessa 0,27 m/d). Myllyks sai vuonna 1980 ojitetun lohkon pintakerroksen maatumisasteeksi H4, kun tässä tutkimuksessa sen maatumisasteeksi saatiin H6. Vuonna 1900 ojitetun lohkon pinnan maatumisasteeksi Myllyks sai H6 ja vedenjohtavuudeksi noin 1,2 m/d. Tässä tutkimuksessa maatumisaste oli H8 ja vedenjohtavuus 0,14 m/d. Koska näiden tutkimusten välillä on yli 15 vuotta, on turve sinä aikana maatonut lisää, mikä selittää nyt saadut alhaisemmat vedenjohtavuudet verrattuna vuoteen 1992.

Vaikka jokaisessa maatumisasteessa viisi tai kuusi näytettä olivat rinnakkaisia, oli niiden välillä vedenläpäisevyydessä hyvin suuria vaihteluja. Tämä johtuu paitsi maan heterogeenisuudesta, myös näytteenoton yhteydessä tapahtuneesta erilaisesta häiriintymisestä. Lisäksi myös yksittäisessä näytteessä vaihtelu peräkkäisten mittausten välillä oli suurta. Eräs vedenjohtavuuksien vaihtelua aiheuttava tekijä ovat laitteistoon muodostuvat ilmakuplat. Vesisäiliöön johdettiin kylmää vesijohtovettä. Laitteistossa se seistessään se lämpeni huoneenlämpöiseksi, jolloin veteen liuennut ilma alkoi muodostaa ilmakuplia putkistoihin ja näytteisiin, mikä saattoi aiheuttaa vaihtelua vedenläpäisevyyteen. Ilmakuplia pyrittiin poistamaan letkuista mahdollisuuksien mukaan mittauksen kestäessä. Toinen kaasukuplia näytteisiin aiheuttava ilmiö on turpeen maatuessa muodostuva metaani. Huoneenlämpöön tuotujen näytteiden maatuminen todennäköisesti nopeutui, ja sen seurauksena myös metaania alkoi muodostua, mikä aiheutti vaihtelua mittaustuloksiin.

Samaa mittalaitteistoa on TKK:lla aikaisemmin käytetty kivennäismaiden vedenjohtavuuden määrittämiseen. Näissä maalajeissa näytteen läpi tapahtuva valunta tasoittuu mittauksen alettua, ja menetelmä toimii hyvin.

Päivänen tutki väitöskirjassaan (Päivänen 1973) vedellä kyllästetyn turpeen vedenjohtavuutta kentällä käyttäen pietsometrimenetelmää, jolla saatiin selville vaakasuuntainen vedenjohtavuus. Halutun turvekerroksen yläreunaan asti työnnettiin sisähalkaisijaltaan 1.25 tuuman alumiiniputki ja sen alapuolelle kairattiin 10 cm onkalo. Mittaus edusti siten tätä 10 cm kerrosta. Onkalo tyhjennettiin vedestä pumppaamalla, ja sen jälkeen veden nousunopeutta putkessa seurattiin ajan funktiona. Jokaiselle mittaussyvyydelle käytettiin neljää putkea ja kaikista tehtiin neljä mittausta, joten rinnakkaisia mittauksia saatiin 16. Mittaussyvyydellä 25 cm vedenjohtavuus rahkaturpeelle oli $3055 \cdot 10^{-6}$ cm/s, syvyydellä 35 cm se oli $649 \cdot 10^{-6}$ cm/s ja syvyydellä 45 cm $576 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Metreinä vuorokautta kohti nämä ovat 2,64 m/d, 0,56 m/d ja 0,50 m/d.

Tässä tutkimuksessa saatiin heikosti maatuneen turpeen pintakerroksen vedenjohtavuudeksi 1,6 m/d ja syvyydellä 31 cm arvoksi 0,49 m/d. Arvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin Päiväsen maastossa saamat tulokset. Keskinertaisesti ja hyvin maatuneen turpeen tulokset jäivät Päiväsen tulosten alapuolelle johtuen näytteiden kivennäisainepitoisuudesta, jota Päiväsen näytteissä oli huomattavasti vähemmän. Sekä tiheys että maatumisaste korreloivat Päiväsen mukaan negatiivisesti vedenjohtavuuden kanssa, joten tässä tutkimuksessa saadut alhaisemmat arvot maatuneemmalle ja tiheydeltään suuremmalle turpeelle ovat sopusoinnussa Päiväsen tulosten kanssa. Päiväsen näytteissä kivennäisainepitoisuus kuiva-

aineesta oli suurimmillaan 5,4 %, joka on vähemmän kuin tämän tutkimuksen heikosti maatuneen rahkaturpeen kivennäisainepitoisuus. Kahdessa enemmän maatuneessa näyteerässä kivennäisainepitoisuudet olivat jopa lähes 10-kertaisia Päiväsen pitoisuuksiin verrattuna. Päiväsen vertasi pietsometrituloksiaan myös aikaisemmin laboratoriossa määrittämiinsä vedenjohtavuuksiin ja totesi, että heikosti maatuneella rahkaturpeella laboratoriossa saadut tuloksia olivat 3,5-kertaisia kentällä saatuihin verrattuna. Tässä tutkimuksessa kuitenkin laboratoriossa saadut arvot ovat samaa suuruusluokkaa Päiväsen kenttämittausten kanssa. Päiväsen mukaan syitä, joiden seurauksena laboratorio-oloissa saadaan korkeampia vedenjohtavuustuloksia kuin kenttäoloissa, ovat mm. vuodot näytteen ja seinän välillä, näytteen häiriintyminen ja erilaiset paineolosuhteet.

Päiväsen tutkimuksessa vedenläpäisevyys samassa turvekerroksessa vaihteli jopa 40 % keskiarvosta. Tässä tutkimuksessa heikosti maatuneen rahkaturpeen pintakerroksen kaikkien rinnakkaisnäytteiden kaikkien mittausten hajonta oli 40,1 % keskiarvosta. Siten heikosti maatuneen turpeen vedenjohtavuuden hajonta tässä tutkimuksessa on samansuuruinen kuin Päiväsellä. Keskinertaisesti ja hyvin maatuneen turpeen vedenjohtavuuden hajonnat olivat suurempia, mutta niiden korkean savipitoisuuden vuoksi niitä ei voi verrata Päiväsen tuloksiin.

Berglundin (1996) tutkimuksissa keskinertaisesti (moderately) maatuneelle rahkaturpeelle (von Postin asteikolla H3-H5) saatiin kenttämittauksissa kyllästynyt vedenjohtavuus 0,022 cm/h eli 0,53 cm/d. Tämä on hyvin samansuuruinen arvo kuin tässä tutkimuksessa maatumisasteelle H5 saatu arvo 0,57 cm/d.

Päiväsen mukaan mitattaessa turvenäytteiden vedenjohtavuutta se alenee mittauksen alettua ja tasaantuu 1-4 vuorokaudessa. Sen voidaan ymmärtää tarkoittavan, että kyseinen aika vaaditaan, jotta turvekolloidit turpoavat täysin ja turve kyllästyy kokonaan (Sarasto 1961 ref. Päivänen 1973). Heikosti maatuneen turpeen kohdalla olisi ollut syytä jatkaa mittauksia pidempään, koska tässä näyteerässä aleneminen oli selvimmin havaittavissa. Koska aikaisempien erien tapauksessa ei selvää tasoittumista havaittu satojenkaan tuntien jälkeen, ei mittauksia jatkettu kuin muutama vuorokausi.

Laine-Kaulion (2008) mukaan käytetyn mittausmenetelmän mittakaava vaikuttaa vedenjohtavuustuloksiin metsämaassa, ja erilaisilla mittausmenetelmillä saadaan hyvin erilaisia tuloksia. Koska 7 cm korkeiden näytteiden mittakaava poikkeaa ratkaisevasti

pellolla vallitsevasta tilanteesta, kannattaisi vedenjohtavuutta mitata myös pelto-olosuhteissa. Tämä voisi antaa totuudenmukaisemman kuvan turpeen vedenjohtavuudesta.

6.4 Kyllästymätön vedenjohtavuus

Turveprofiilien kuivattamiseen käytetty laitteisto toimi pääosin hyvin. Turpeen vesipitoisuudessa tapahtuvat muutokset olivat kuitenkin hyvin hitaita ja profiilista poistuvat vesimäärät alhaisia. Tensiometrit toimivat turvemaassa yleisesti ottaen melko hyvin. Kontaktiongelmia ei esiintynyt.

Tässä työssä mitattiin ainoastaan painepotentiaalia, joka vedenpidätyskäyrän perusteella voitiin muuntaa vesipitoisuudeksi. Jotta kyllästymättömän maan vedenjohtavuus olisi ollut mahdollista laskea suoraan turveprofiilien mitatusta kuivumisesta, olisi niistä pitänyt mitata toisistaan riippumatta sekä painepotentiaalia että vesipitoisuutta. Lisäksi tässä työssä mitattiin ainoastaan turpeen kuivumista, eikä hystereesiä otettu huomioon.

Kyllästymätön vedenjohtavuus laskettiin vedenpidätyskäyristä saatujen van Genuchtenin parametrien sekä mitattujen kyllästyneiden vedenjohtavuuksien avulla. Koska kyllästymätön vedenjohtavuus laskettiin osuutena kyllästyneenä vedenjohtavuudesta, vaikuttaa kyllästyneen maan K-arvo suuresti tuloksiin. Laskennassa käytettiin kullekin maatumisasteelle ja kerrokselle kaikkien rinnakkaisnäytteiden kaikkien mittausten keskiarvoja, koska ne olivat samaa suuruusluokkaa kuin vastaavasti saadut mediaanit.

Tulosten mukaan kyllästymätön vedenjohtavuus alenee hyvin nopeasti. Jo 1 cm H₂O imulla johtavuus putosi heikosti maatuneen turpeen pintakerroksessa 11 prosenttiin, keskikerroksessa 15 prosenttiin ja pohjakerroksessa 28 prosenttiin kyllästyneestä vedenjohtavuudesta. Keskinertaisesti maatuneessa turpeessa 1 cm imulla vedenjohtavuudet olivat vastaavasti pinnassa 11 %, keskikerroksessa 12 % ja pohjakerroksessa 21 % kyllästyneestä arvosta. Hyvin maatuneessa turpeessa 1 cm imun vedenjohtavuudet olivat pintakerroksessa 27 %, keskikerroksessa 20 % ja pohjakerroksessa 15 % kyllästyneestä vedenjohtavuudesta. 100 cm imulla vedenjohtavuus laski heikosti maatuneessa turpeessa 0,001 – 0,08 prosenttiin kyllästyneestä tilanteesta vesipitoisuuden alentuessa pinnassa 45, keskikerroksessa 27 ja pohjakerroksessa 28 prosenttiyksikköä. Keskinertaisesti maatuneessa turpeessa johtavuus laski 100 cm imulla 0,01 – 0,09 prosenttiin samalla kun vesipitoisuus laski 17–30 prosenttiyksikköä. Hyvin maatuneessa turpeessa johtavuus laski 0,3-0,4 prosenttiin kyllästyneestä vedenjohtavuudesta

vesipitoisuuden laskiessa 6-11 prosenttiyksikköä. Myös Holdenin (2001) mittauksissa jyrshinturpeessa vedenjohtavuus laski nopeasti vesipitoisuuden alentuessa. Vedenjohtavuus laski sadasosaan vesipitoisuuden laskiessa kyllästyneestä tilanteesta 20 prosenttiyksikköä (Holden 2001).

7 Yhteenveto

Tutkimuksessa selvitettiin rahkaturpeen kuivatusteknisiä ominaisuuksia eri maatumisasteissa. Näytteet oli otettu Akaassa sijaitsevalta rahkaturvepellolta, jonka eri lohkot oli ojitettu eri aikoihin, ja niiden sisältämä turve oli sitä maatumempaa, mitä kauemmin ojituksesta oli kulunut aikaa. Von Postin asteikolla eri lohkojen maatumisasteet olivat noin sata vuotta sitten ojitetulla lohkolla H8, noin 30 vuotta sitten ojitetulla lohkolla H4-H6 ja noin 20 vuotta sitten ojitetulla lohkolla H2. Tämän lohkon turve oli säilynyt maatumattomana, koska lohkoa ei ollut viljelty.

Eri tavalla maatuneista rahkaturvenäytteistä mitattiin vedenpidätyskäyrät 0,1 barin imuun asti käyttäen riippuvaa vesipatsasta ja sen jälkeen 1 barin imuun asti käyttäen ilmanpaineella aikaansaatua ylipainetta. Vedenpidätyskäyrien mittaaminen onnistui hyvin ja hajonta näytteiden välillä oli vähäistä. Mitä maatumempi turve, sitä vähemmän vettä se sisälsi kyllästyneenä, mutta sitä enemmän se sisälsi 1 barin imulla. Heikosti maatunut turve sisälsi kyllästyneenä runsaasti vettä, mutta myös luovutti sen helposti. Kyllästynyt vesipitoisuus vaihteli heikosti maatuneen turpeen keskikerroksen 96 prosentista hyvin maatuneen turpeen pintakerroksen 76 prosenttiin. 1 bar paineessa vesipitoisuus vaihteli heikosti maatuneen turpeen pohjakerroksen 36 prosentista hyvin maatuneen turpeen pohjakerroksen 62 prosenttiin.

Vedenpidätyskäyriin sovitettiin van Genuchtenin malli kalibroimalla mallin parametrit pienimmän neliösumman menetelmällä. Malli sopi rahkaturpeen mitattuihin vedenpidätyskäyriin erittäin hyvin, ja sen selitysaste oli yhtä tapausta lukuun ottamatta yli 90 %.

Kyllästyneet vedenjohtavuudet mitattiin käyttäen vakiopainekorkeusmenetelmää. Menetelmä osoittautui ongelmalliseksi, näytteistä tuleva valunta ei tasoittunut ajan suhteen, ja hajonta oli suurta sekä rinnakkaisten näytteiden välillä että myös yksittäisen näytteen peräkkäisissä mittaustuloksissa. Ongelmana oli mm. kylmän vesijohtoveden lämmitessä muodostuvat ilmakuplat, jotka ilmeisesti kulkeutuivat näytteisiin, sekä näytteiden maatumisen yhteydessä muodostuva metaani, kun näytteet tuotiin kylmiöstä huoneenlämpöön. Näytteiden heterogeenisuus ja niiden häiriintyminen näytteenoton yhteydessä toivat vaihtelua tuloksiin. Pinnassa ja 31–40 cm syvyydessä vedenjohtavuus aleni maatumisasteen kasvaessa. 52–70 cm syvyydellä vedenjohtavuus kuitenkin kasvoi maatumisasteen kasvaessa. Heikosti maatuneessa turpeessa vedenjohtavuus aleni profiilissa

alaspäin. Keskinertaisesti ja hyvin maatuneessa rahkaturpeessa korkein vedenjohtavuus esiintyi 31–40 cm syvyydellä, seuraavaksi korkein pintakerroksessa ja alin 52–70 cm syvyydessä. Heikosti maatuneella turpeella (maatumisaste H2 koko profiilissa) vedenjohtavuus oli pinnassa 1,64 m/d, 31–40 cm syvyydellä 0,49 m/d ja 52–70 cm syvyydellä 0,002 m/d. Keskinertaisesti maatuneella turpeella vedenjohtavuus oli pinnassa (maatumisaste H4) 0,27 m/d, 31–40 cm syvyydellä (maatumisaste H6) 0,31 m/d ja 52–70 cm syvyydellä (maatumisaste H5) 0,006 m/d. Hyvin maatuneella turpeella (maatumisaste H8 koko profiilissa) vedenjohtavuus oli pinnassa 0,14 m/d, 31–40 cm syvyydellä 0,20 m/d ja 52–70 cm syvyydellä 0,12 m/d.

Näytteistä määritettiin myös fysikaalisia ominaisuuksia kuten tiheys (heikosti maatuneella turpeella pinnassa 98 kg/m³, keskikerroksessa 105 kg/m³ ja pohjakerroksessa 117 kg/m³, keskinertaisesti maatuneella turpeella pinnassa 196 kg/m³, keskikerroksessa 202 kg/m³ ja pohjakerroksessa 142 kg/m³ ja hyvin maatuneella turpeella pinnassa 399 kg/m³, keskikerroksessa 241 kg/m³ ja pohjakerroksessa 233 kg/m³) sekä huokoisuus. Lisäksi 70 cm korkeissa turveprofiileissa mitattiin kuivumista aloittaen kyllästyneestä tilanteesta ja kasvattamalla sitten profiilin alaosaan kohdistuvaa imua. Profiileihin oli asennettu 10 cm välein tensiometrejä, jotka mittasivat maaveden painepotentiaalia eri kerroksissa.

Turveprofiilin kuivumista mallinnettiin käyttäen mitattuja kyllästyneen tilan vedenjohtavuuksia sekä vedenpidätyskäyrien van Genuchten –parametreja. Mallin tulokset olivat hyvin yhteensopivia mitattujen kanssa. Van Genuchtenin parametreilla laskettiin turpeen vedenjohtavuus eri vesipitoisuuksilla. Tulosten mukaan vedenjohtavuus aleni selvästi heti turpeen alettua kuivua. Heikosti ja keskinertaisesti maatuneen turpeen pintakerroksessa jo 1 cm imulla vedenjohtavuus putosi 11 prosenttiin kyllästyneestä vedenjohtavuudesta, keskikerroksessa 12–15 prosenttiin ja pohjakerroksessa 21–28 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. Hyvin maatuneessa turpeessa 1 cm imulla johtavuus laski pinnassa 27 prosenttiin, keskikerroksessa 20 prosenttiin ja pohjakerroksessa 15 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. 100 cm imulla vedenjohtavuus putosi pintakerroksessa kaikilla maatumisasteilla 0,001-0,39 prosenttiin, keskikerroksessa 0,02-0,32 prosenttiin ja pohjakerroksessa 0,09-0,37 prosenttiin kyllästyneestä arvosta. Tietyllä imulla paras johtavuus oli kaikissa kerroksissa maatuneimmalla turpeella, koska sen vesipitoisuus oli hyvästä vedenpidätyskyvystä johtuen korkein. Alin johtavuus samalla imun arvolla esiintyi vähiten maatuneessa turpeessa.

8 Lähteet

- Aapala, K., Heikkilä, R. ja Lindholm, T. 1998. Suoluonnon monimuotoisuuden turvaaminen. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.). Suomen suot. Suoseura ry. Helsinki. s. 45–57
- Ahti, E. 1971. Maaveden jännityksen mittaamisesta tensiometrillä. *Folia forestalia* 112. 10 s.
- Ahti, E. 1978. Maaveden energiasuhteista ojitetulla suolla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 94 (3). 56 s.
- Ahti, E. 1987. Water balance of drained peatlands on the basis of water table simulation during the snowless period. Seloste: Ojitettujen soiden vesitaseen arvioiminen lumettomana aikana pohjavesipinnan simulointimallin avulla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 141. 64 s.
- Al-Soufi, R. W. 1983. Unsaturated hydraulic conductivity. Evaluation research study. *Lisensiaattityö*. Teknillinen korkeakoulu.
- Amaral, J. A. ja Knowles, R. 1994 Methane Metabolism in a Temperate Swamp. *Applied and Environmental Microbiology*, Nov. 1994, s. 3945-3951.
- Andersson, S. 1971. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord XXII. *Grundförbättring* 24.
- Asikainen, A. 1988. Selvitys turpeen vedenläpäisevyydestä pohjaveden alentamista varten. *Metsäntuotantotieteen syventävien opintojen tutkielma*. Joensuun yliopisto. 64s.
- Batu, V. 1998. *Aquifer Hydraulics: A Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis*. John Wiley & Sons. 752 s.
- Buckingham, E. 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. *Bulletin* 25. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.
- Buckingham, E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. *Bulletin* 38. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.
- Brooks, R. J., ja A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrol. Pap.* 3, Colorado State Univ..

- Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. Inc.* 198, pp. 71–78.
- Burke, W., Gabriels, D. ja Bouma, J. (ed.) 1986. *Soil structure assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam. 92 s.
- Carlsten, P. 1988. *Peat - Geotechnical Properties and Up-to-Date Methods of Design and Construction*. Statens geotekniska institut, Linköping, Sweden. 35 s.
- Childs, E.C., ja N. Collis-George. 1950. The permeability of porous materials. *Proc. R. Soc. London A.* 201:392–405.
- Dirksen, C. 1991. Unsaturated hydraulic conductivity. In: Keith A. Smith ja Chris E Mullins (ed.). *Soil Analysis: Physical Methods*. s. 209-269
- Eklund, M. 1983. *Maaperätutkalla suoritettavan tutkaustyön tuottavuus turvemilla*. Pro gradu-työ, Metsäteknologian laitos, Helsingin yliopisto. 38 s.
- Ekman, E. 1955. *Turve raaka-aineena*. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus 148. Helsinki. 18 s.
- Fagernäs, L. 1998. *Kemiallinen jalostus*. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.). *Suomen suot*. Suoseura ry. Helsinki. s. 114-117
- Freeze, R. Allan ja Cherry, John A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, (NJ) : Prentice-Hall , 1979. 604 s.
- P. E. Galand, H. Fritze, R. Conrad, ja K. Yrjälä. 2005. Pathways for Methanogenesis and Diversity of Methanogenic Archaea in Three Boreal Peatland Ecosystems. *Appl Environ Microbiol.* 2005 April; 71(4): 2195–2198.
- Hailikari, T. 1954. *Turvemaan vedenläpäisevyydestä*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 31 s.
- Hartikainen, H. 1992. *Maaperä*. Teoksessa: Heinonen, Reijo (toim.). *Maa, viljely ja ympäristö*. WSOY, Porvoo. s. 9-89.
- Heikurainen, L. ja Seppälä, K. 1963. *Kuivatuksen tehokkuus ja turpeen lämpötalous*. *Acta Forestalia Fennica* 76. 33 s.

- Heikurainen, L., Päivänen, J. ja Sarasto, J. 1964. Ground Water Table and Water Content in Peat Soil. Acta Forestalia Fennica 77. s. 1-18.
- Heikurainen, L. 1971. Pohjavesipinta ja sen mittaaminen ojitetuilla soilla (Ground water table in drained peat soils and its measurement). Acta Forestalia Fennica 113. 23 s.
- Heikurainen, L. ja Mannerkoski, H. 1982. Suometsätieteen laitoksen kenttäkokeet. Helsingin yliopiston suometsätieteen laitoksen julkaisuja 1. 129 s.
- Heikurainen, L. 1978. Suo-opas. Kirjayhtymä, Helsinki. 51 s.
- Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, New York, NY. 413 s.
- Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics. Academic Press, London. 364 s.
- Holden, N.M. 2001. Direct measurement of unsaturated hydraulic conductivity using Time Domain Reflectometry. Acta Hort. (ISHS) 562:353-359.
http://www.actahort.org/books/562/562_42.htm
- Hytönen, J. ja Silfverberg, K. 1991. Kuivatustehon vaikutus turvemaan lämpöoloihin. Folia Forestalia 780. 20 s.
- Jantunen, H. 1972. Drainage experiments on ErCS-peat in the laboratory. In: The Proceedings of the 4th International Peat Congress, Otaniemi, Finland. Volume II. S. 283-290.
- Jokela, A. 2002. Vilppulan tutkimusalue 80 vuotta. Parkanon tutkimusaseman vuosikertomus 2002. Metsäntutkimuslaitos. Saatavilla:
<http://www.metla.fi/metla/vuosik/parkano-vuosikertomus-2002.pdf>
- Karvonen, T. 2003. Soil and Groundwater Hydrology. Maa- ja pohjavesihydrologian www-oppikirja. Saatavissa: http://www.water.tkk.fi/wr/kurssit/Yhd-12.122/www_book/sgh.htm
- Kaunisto, S. ja Aro, L. 1998. Suopohjat metsätaloudessa. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.). Suomen suot. Suoseura ry. Helsinki. s. 130-134
- Kaunisto, S. 2001. Suometsien kasvatuksen perustana on tutkimus. Metsäntutkimus - Metlan asiakaslehti 3/2001. s. 13-15.

- Kettunen, A., Kaitala, V., Lehtinen, A., Lohila, A., Alm, J., Silvola, J., Martikainen, P. J. 1999. Methane production and oxidation potentials in relation to water table fluctuations in two boreal mires. *Soil Biology and Biochemistry* 31 (1999) s. 1741-1749.
- Kettunen, A., Kaitala, V., Alm, J., Silvola, J., Nykänen, H. & Martikainen, P. J. 2000. Predicting variations in methane emissions from boreal peatlands through regression models. *Boreal Env. Res.* 5: 115–131. ISSN 1239-6095
- Kivinen, E. 1950. "Suon" taipaleelle lähtiessä. *Suo* 1950 Nr. 1. Suoseura, Helsinki.
- Klute, A. & Dirksen, C. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Klute, A. (ed). 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* 2nd Edition. s. 703-732.
- Klöve, B. 1994. Turvetuotannon kiintoainekuormituksen vähentäminen. TKK. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Lisensiaatintyö.
- Klöve, B. 1997. Environmental impact of peat mining; development of storm water treatment methods. Doctoral dissertation. Report No 1020, Lund University. Lund, Sweden. 159 s.
- Korhonen, R. 1998. Turpeen balneologinen käyttö. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.). Suomen suot. Suoseura ry. Helsinki. s. 119-122
- Kosonen, A. 1978. Passiivinen maanpaine turpeessa. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 182 s.
- Kostiainen, T. 1972. Turvemaan vaaka- ja pystysuora kantavuus kuormituskokeiden perusteella. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 79 s.
- Kotiaho, A. 1950. Laskelmia Suomen nykyisestä suopinta-alasta. *Suo* 1950 Nr. 1. Suoseura, Helsinki.
- Kuha, P. 1969. Huokospaine- ja konsolidaatiokokeita turvenäytteillä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 40 s.
- Kujala, E. 1951. Turvemaahan tehtävistä reikäsalaojista. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 62 s.

Laiho, R. 1987. Turpeen vedenpidätyskyky. Pro gradu -työ, Suometätieteen laitos. Helsingin yliopisto. 41 s.

Laine-Kaulio, H. 2008. Subsurface flow in a forested till slope. Soil analysis, tracer experiments and physics-based modelling. Lisensiaatintyö, TKK Vesitalous ja vesirakennus. 95 s.

Lappalainen, E. 1998. Soiden käytön historiaa Suomessa. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.) Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 60-63.

Lojander, M., Forsman, J. ja Takala, J. Mechanical properties of Leteensuo peat. XII Nordiska Geoteknikermötet, NGM-96, Reykjavik. 6 s.

Lukkala, O.J. 1929. Vesiperäisten metsämaiden ojittaminen. Keskusmetsäseura Tapion käsikirjasia N:o 19.

Lukkala, O.J. 1948. Metsän ojitus sekä ojien kunnossapito ja suometsien hoito. Keskusmetsäseura Tapio. Helsinki.

Lukkala, O.J ja Kotilainen, Mauno J. 1951. Soiden ojituskelppoisuus. Keskusmetsäseura Tapio. Helsinki.

Lukkala, O. J. 1951. Kokemuksia Jaakkoinsoon koeojitusalueelta. Summary: Experiences from Jaakkoinsoo experimental drainage area. Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja 39,6. 53 s.

Maasilta, A. 1951. Tulen käytöstä soiden raivauksessa. Suo 1951 Nr. 4. Suoseura, Helsinki.

Mannerkoski, H. 1985. Effect of water table fluctuation on the ecology of peat soil. Helsingin yliopiston suometätieteen laitoksen julkaisuja 7. 190 s

Mannerkoski, H. ja Seppälä, K. 1970. Lannoituksen vaikutus istutustaimiston alkukehitykseen lyhytkortisella nevalla. Suo 1970 Nr. 1. Suoseura, Helsinki.

McAfee, M. 1985. The rise and fall of Bälinge mossar. Report 147. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.

ME102 Metsämaiden ominaisuudet, prosessit ja kasvupaikkojen luokittelu.
http://www.mm.helsinki.fi/mmeko/kurssit/ME102/13_Suoekosys.pdf

Melantie, E. 1988. Turvetuotannon vaikutus saraturpeiden vedenläpäisevyyteen. Metsäntuotantotieteen syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 54s.

Metje, M. ja Frenzel, P. 2005. Effect of Temperature on Anaerobic Ethanol Oxidation and Methanogenesis in Acidic Peat from a Northern Wetland. Applied and Environmental Microbiology, Dec. 2005, s 8191–8200

Metsäntutkimuslaitos. 2005. Metlan tutkimustietokanta. Saatavilla:
<http://www.metla.fi/tutkimus/index.htm> → Hankkeet → Kaikki hankkeet aihepiireittäin.
Viitattu 15.3.2005

Mualem, Y. 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resources Research 12:513-522 (1976)

Myllynen, A-L. 1995. Jyrsinturpeen vedenläpäisevyys. Metsäntuotantotieteen syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 42 s.

Mylly, M. 1992. Physical Properties of Agricultural Peat Soils and their Effect on Drainage. Proceedings of the 9th International Peat Congress. Uppsala, Ruotsi, 22.-26.6.1992.

Mylly, M 1998. Soiden viljely. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.) Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 64-71.

Mylly, M. & Sinkkonen M. 2004. Viljeltyjen turve- ja multamaiden pinta-ala ja alueellinen jakauma Suomessa (Summary: The area and distribution of cultivated organic soils in Finland). Suo 55(3-4): 53-60.

Niini, S. 1988. Turpeen ominaisuuksien vaikutus pellon salaojituksen toimintaan. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 114 s.

Niemi, T. K. 1955. Turvemaiden painumisesta. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 113 s.

Nimmo, J. R. ja Landa, E. R. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. 2005. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 69, March-April 2005.

- Nissinen, E. 1970. Turvekuitujen lujuusominaisuuksien tutkiminen sekä turpeen leikkauslujuuden määrittäminen kaksiosaisen kierrekairan avulla. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 53 s.
- Paavilainen, E. ja Virrankoski, K.. 1967. Tutkimuksia veden kapillaarisesta noususta turpeessa (Studies on the capillary rise of water in peat). Folia forestalia 36. 16 s.
- Pessi, Y. 1953. Kivennäismaan vaikutuksesta suoviljelyksen lämpötiloihin. Suo 1953 Nr. 6. Suoseura, Helsinki.
- Pessi, Y. 1956. Studies on the effect of the admixture of mineral soil upon the thermal conditions of cultivated peat land. Valtion maatalouskoetoiminta, Helsinki.
- Pessi, Y. 1959. Rahkasuon maanparannuksen merkityksestä. Suo 1959 Nr. 5-6. Suoseura, Helsinki.
- Pessi, Y. 1960. Ilmasto ja kasvinviljely –opastusta kasvinviljelyn soveltamisesta ilmasto- ja sääoloihin. Maamiehen käsikirjasto N:o 3. 67 s.
- Pessi, Y. 1966. Suon viljely. WSOY, Porvoo. 138 s.
- Puustinen, M., Varis, R., Luoma, T. 1987. Salaojien toimintahäiriöiden korjaus savi- ja turvemailla. Helsingin yliopisto, Maatalousteknologian laitos. Tutkimustiedote 51. 109 s.
- Puustjärvi, V. 1960a. Turve kasvualustana tomaatinviljelyssä. Suo 1960 Nr. 4. Suoseura, Helsinki.
- Puustjärvi, V. 1960b. Turpeen käyttö kurkkumultana. Suo 1960 Nr. 5. Suoseura, Helsinki.
- Puustjärvi, V. 1960c. Turve neilikan kasvualustana. Suo 1960 Nr. 6. Suoseura, Helsinki.
- Puustjärvi, V. 1973. Kasvuturve ja sen käyttö. Turveteollisuusliitto ry. Helsinki. 172 s.
- Päivänen, J. 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. Acta Forestalia Fennica 129. 70 s.
- Päivänen, J. 1982a. Turvemaan fysikaaliset ominaisuudet. Helsingin yliopiston suometsätieteen laitokset julkaisuja 2. 69 s.

- Päivänen, J. 1982b. Physical properties of peat samples in relation to shrinkage upon drying. *Silva Fennica* 1982, vol. 16 n:o 3, s. 247-265
- Reinikainen, O. 1998. Turpeen käyttö kasvinviljelyssä ja maataloudessa. Teoksessa: Vasander, Harri (toim.). *Suomen suot*. Suoseura ry. Helsinki. s. 88-92
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, Vol. 1, s. 318–333.
- Ronkanen, A-K & Kløve, B. 2005. Hydraulic soil properties of peatlands treating municipal wastewater and peat harvesting runoff (Tiivistelmä: Turpeen hydrauliset ominaisuudet kunnallisten jätevesien ja turvetuotantoalueen valumavesien puhdistukseen rakennetuilla kosteikkopuhdistamoilla). *Suo* 56(2). Suoseura, Helsinki. s. 43-56.
- Ruokanen, I. 1982. Lannoituksen ja kuivatuksen vaikutus turpeen vesi- ja happioloihin sekä biologiseen aktiivisuuteen kolmen sarkaleveys-lannoituskoekentän tulosten valossa. *Laudaturtyö*, Suometsätieteen laitos. Helsingin yliopisto. 61 s.
- Saarenmaa, L. 1980. Luonnontilaisten turpeiden todellisen tilavuuspainon ja eräiden maatumisasteen määrittämenetelmien vertailu. Pro gradu-työ, Suometsätieteen laitos. Helsingin yliopisto. 89 s.
- Saarilahti, M. 1992. Turpeen kokoonpuristuvuus ja tiealueen kuivatuspainuman arviointi. *Folia Forestalia* 788. 18 s.
- Sarasto, J. 1961. Kokeita turpeen vedenläpäisevyydestä. *Suo* 12, 24-25.
- Sepponen, P. ja Haapala, H..1979. Ojituksen vaikutuksesta turpeen kemiallisiin ominaisuuksiin. *Folia forestalia* 405. 16 s.
- Seppälä, K. 1969. Sarkaleveyden vaikutus suometsien puumäärään ja kasvuun. *Suo* 1969. Nr. 3-4. Suoseura, Helsinki.
- Seppälä, K. 1970. Sekapuukoivujen kasvun ojituksenjälkeinen kehitys turvemilla. *Suo* 1970. Nr. 2. Suoseura, Helsinki.
- Sivonen, S. 1995. Sadeveden infiltraatio turvetuotantokenttään. *Metsämaatielten syventävien opintojen tutkielma*. Joensuun yliopisto. 24 s.

Tikka, M. 1955. Turvemaan kutistuminen kuivumisen ja kuormituksen vaikutuksesta. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. 48 s.

TKK Vesitekniikan perusteet. 2008. Oppimateriaali. Saatavilla: <http://www.water.tkk.fi/wr/kurssit/Yhd-12.1020/>

Tolonen, K. 1980. Suo-Suomen synty. Teoksessa: Havas, P. (toim.) Suomen Luonto 3, s. 7–24. Kirjayhtymä, Helsinki.

Tolonen, K. 1983. Turpeiden luokitus ja stratigrafia. Teoksessa: Laine, Jukka (toim.) Suomen suot ja niiden käyttö. Suoseura ry, Helsinki. s. 29-32.

TUHTI. 2005. Helsingin yliopiston tutkimushanketietokanta. Saatavilla: <http://www-db.helsinki.fi/tuhti/index.shtml> Viitattu 15.3.05

Vakkilainen, P. Teoksessa: Mustonen, Seppo (toim.) 1986. Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys ry, Helsinki.

van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated. Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.

Warsta, L., (2005), Metsäteollisuuden energiantuotannossa syntyvän tuhkan hyötykäyttö: haitallisten aineiden kulkeutuminen, Diplomityö.

Warsta, L., (2007), Modelling overland and subsurface drainage runoffs at an agricultural field. Lisensiaatintyö, TKK Vesitalous ja vesirakennus. 70 s.

Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M. ja Karvonen, T. (2008a), Modelling runoff at an agricultural field, 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage, Helsinki - Tallina, Suomi - Viro, 6. –11.7.2008, konferenssijulkaisu.

Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. ja Taskinen, A. (2008b), Dual-permeability modelling of three-dimensional water flow at a clayey field. IASTED Symposium on Environmental Modelling and Simulation, Orlando, USA, 16. –18.11.2008, konferenssijulkaisu.

Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. ja Taskinen, A. (2009), Modelling surface and subsurface flow of water and erosion at clayey, subsurface drained agricultural field,

18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13. –17.7.2009,
Konferenssijulkaisu.

Vasander, H. ja Roderfeld, H.. Suopohjien ennallistaminen. Teoksessa: Vasander, Harri
(toim.) Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 143-147

Virkajärvi, P. ja Huhta, H.. Turvetuotannosta vapautuneiden suopohjien maatalouskäyttö.
Teoksessa: Vasander, Harri (toim.) Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 135-137

Virtanen, S.. 1986. Hydraulisen johtavuuden mittaaminen, vaihtelu ja hyväksikäyttö
salaajituksen mitoituksessa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Virtanen, K., Hänninen, P., Kallinen, R.-L., Vartiainen, S., Herranen, T. & Jokisaari, R.
2003. Suomen turvevarat 2000. Summary : The peat reserves of Finland in 2000. Geologian
tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 156. 101 s.

VTT 1983. VTT Symposium 40. Turpeen kemia, fysiikka ja biokemia. Valtion teknillinen
tutkimuskeskus. Helsinki. 76 s.

Liite 1. Maavesien hydrologian historiaa

Pohjavesihydrologian synty tieteenalana voidaan ajoittaa vuoteen 1856, jolloin ranskalainen hydraulikkainsinööri Henry Darcy julkaisi raportin Dijonin kaupungin pohjavesivaroista. Darcy tutki laboratoriossa veden virtausta hiekan läpi, ja tulokset voidaan yleistää laiksi, joka nykyään tunnetaan hänen nimellään (Freeze ja Cherry 1979). Darcyn jälkeen maaperän vesien hydrologia ovat kehittäneet erityisesti seuraavat henkilöt.

Edgar Buckingham (1904)

Edgar Buckingham loi sellaiset maan vesitaloutta kuvaavat käsitteet kuten painepotentiaali, maan vedenpidätyskäyrä, ominaisvesikapasiteetti (specific water capacity, painepotentiaalin muutos vesipitoisuuden muutoksen suhteen eli vedenpidätyskäyrän kaltevuuden käänteisarvo kohdassa θ) ja vedellä kyllästymättömän maan vedenjohtavuus. Hänen tutkimuksensa toivat lisää tietoa veden ja ilman liikkeistä kyllästymättömässä maassa. Hän tutki myös ilman diffuusiota maaperässä, maan kaasujenvaihtoa ja haihduntaa maasta. Buckingham tutki näitä Yhdysvaltain maatalousministeriön (United States Department of Agriculture, USDA) alaisessa Bureau of Soils:ssa (BOS) vain neljän (1902–1906) vuoden ajan, kunnes erimielisyyksien vuoksi lähti National Bureau of Standardsiin, missä hän työskenteli eläkeikään saakka. Siellä hänen työnkuvaansa kuuluivat heliumin valmistuksen tutkimus sotilaskäyttöön, toimiminen neuvonantajana merivoimien höyryturbiinien ja propellien suunnittelussa sekä luennointi termodynamiikasta. (Nimmo ja Landa 2005)

Buckingham syntyi 8.7.1876 ja kuoli 29.4.1940. Hän valmistui Harvardista vuonna 1887 pääaineenaan fysiikka ja toimi sen jälkeen assistenttina Harvardin yliopiston fysiikan laitoksella. Hän työskenteli myös Strasbourgin ja Leipzigin yliopistoissa ja teki väitöskirjansa jälkimmäiseen vuonna 1893, minkä jälkeen hän siirtyi opettamaan fysiikkaa ja kemiaa Bryn Mawr Collegeen Philadelphiassa. Näinä vuosina hän kirjoitti oppikirjan termodynamiikasta ja hänestä tuli apulaisprofessori. Seuraavat vuodet hän lomaili, ohjasi yliopisto-opintoihin valmistautuvia opiskelijoita ja työskenteli kuparinlouhinnan parissa Arizonassa. Tämän jälkeen Buckingham palasi akateemiseen elämään Wisconsinin yliopistossa. Oltuaan siellä vuoden hän aloitti vuonna 1902 Bureau of Soils:ssa (BOS), joka oli vuotta aikaisemmin perustettu United States Department of Agriculture (USDA) alaisuuteen laajentamaan maaperätieteiden tutkimusta.

Aluksi Buckinghamin tutkimuskohteena olivat maan kaasujen liikkuminen, erityisesti hiilidioksidin poistuminen ja hapen siirtyminen maahan sekä huokoisuuden vaikutus ilman diffuusion. Hän sai diffuusiokertoimelle maan ilmapitoisuudesta riippuvan empiirisen yhtälön. Lopuksi hän totesi, että maan ilmanvaihto tapahtuu diffuusion avulla eikä riipu ilmanpaineen vaihtelusta. Hän julkaisi tuloksensa vuonna 1904 Bulletin 25:ssä (Buckingham 1904 ref. Nimmo ja Landa 2005).

Buckinghamin suurin vaikutus maaperäfysiikan alalla oli hänen julkaisunsa vuonna 1907, Bulletin 38, "*Studies on the movement of soil moisture*". Julkaisussa oli kolme osaa (Buckingham 1907).

Sen ensimmäinen osa käsitteli veden haihduntaa maakerroksen läpi. Buckingham totesi, että jos kapillaarinen nousu vedestä maan yläpintaan osaan estyy, maa voi toimia tehokkaasti evaporaation estäjänä. Kokeita ei ollut riittävästi, jotta tekstuurin tai struktuurin vaikutuksista haihdunnan vähenemiseen olisi voinut sanoa mitään yleistä. Bulletinin toisessa osassa verrattiin haihduntaa arideissa ja humideissa olosuhteissa. Aluksi arideissa olosuhteissa haihtui enemmän kuin humideissa, mutta kolmen päivän kuluttua humideissa olosuhteissa alkoi tapahtua enemmän haihduntaa kuin arideissa, koska kuivissa oloissa maan pinnan kuivuminen esti haihduntaa. Lopulta kosteissa oloissa kokonaishaihdunnan määrä oli suurempi kuin kuivissa oloissa.

Maaperähydrologian kannalta merkittävin on Bulletin 38:n kolmas osa, joka käsittelee kyllästymättömän maan veden virtausta ja kapillaarisia voimia, joista Buckingham tunnetaan parhaiten. Hän oli ensimmäinen, joka tunnisti maahiukkasten ja veden vuorovaikutuksista muodostuvien voimien potentiaalin ja nimitti sitä kapillaaripotentialiksi. Hän yhdisti kapillaariteorian ja energiapotentiaalin maaperäfysiikan teorioihin ja oli ensimmäinen, joka selitti tarkasti, että hydraulinen johtavuus riippuu kapillaaripotentialista. Hän myös sovelsi Darcyn lain kaltaista kaavaa kyllästymättömän virtauksen laskentaan.

Johdannossa Buckingham esitti analogioita sähkövirtaan (Ohmin laki), lämpövuohon (Fourierin laki) ja Hagen-Poiseuillen putkivirtaukseen. Hän ei pitänyt Hagen-Poiseuillen oletusta lieriömäisistä putkista maavesihydrologiaan sopivana. Darcyn tai Darcyn lakia hän ei mainitse lainkaan. Nykyään Darcyn lakia käytetään laajasti maaperätieteissä, hydrologiassa, fluidimekaniikassa ja kemianteollisuudessa, mutta Buckinghamin aikoihin sen käyttö oli rajatumpaa. Mahdollisesti Buckingham ei ajatellut kapillaaripotentialin olevan sama kuin Darcyn hydraulinen gradientti. On myös ehdotettu, ettei Buckingham

tiennyt Darcyn laista. Hän kuitenkin käytti samaa ajatusta vedellä kyllästyneessä virtauksessa, millä on suuri merkitys Darcyn lain yleisen muodon vakiinnuttamisessa käyttöön nykypäivän tieteessä. Buckingham otti käyttöön matrikpotentiaalın käsitteen ja määritteli sen mitaksi sille, miten tiukasti maa pitää kiinni vedestä. Veden virtausnopeuden hän määritteli matrikpotentiaalın gradientin ja maan kapillaarisen johtavuuden tulona, analogisesti Fourierin ja Ohmin lakien kanssa. Hän totesi kapillaarisen johtavuuden riippuvan suuresti maan vesipitoisuudesta ja matrikpotentiaalın riippuvan "jollain toistaiseksi tuntemattomalla tavalla maan vesipitoisuudesta ja vaihtelevan maalajista toiseen". Buckingham pyrki myös mittaamaan vedenpidätyskäyriä, mutta suoraa menetelmää mitata matrikpotentiaalia ei vielä ollut. Hän suunnitteli ja testasi riippuvan vesipatsaan menetelmää maan vedenpidätyskyvyn mittaamisessa ja esitti mitattuja käyriä useille eri maalajeille. Erot eri maalajien välillä hän selitti johtuviksi erilaisesta huokoskoosta, kuten ajatellaan nykyäänkin. Buckingham pohti myös vedellä kyllästymättömän maan vedenjohtavuutta hyvin tarkasti ja erityisesti sen riippuvuutta maan vesipitoisuudesta. Hän kuvasi, miten vedellä täyttyneet huokokset sekä ohut vesifilmi maahiukkasten pinnalla johtivat vettä. Hän korosti partikkelin väliin jäävään kiilaan kapillaarisesti kiinnittyvää vettä. Tulevana vuosisatana vaihtoehtoinen käsitys kyllästyneistä ja kyllästymättömistä huokoisista oli yleisemmin käytössä. Monella tapaa vesitäytteisten kiilojen malli sopii paremmin kuvaamaan kyllästymättömän maan vettä, kuten viime vuosina on havaittu. Buckingham näki paljon vaivaa saadakseen vedenjohtavuudelle vesipitoisuuden suhteen kaavan. Hän pohti erilaisia huokosgeometrioita ja kuvaili kahta tarkemmin: partikkelien kontaktien väliin jäävät kiilat ja monodisperssien pallojen filmit.

Kuten jo aiemmin todettiin, Buckingham otti myös käyttöön ominaisvesikapasiteetin eli $d\psi/d\theta$, jolloin yhtälöön jäi yksi muuttuja θ

$$Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (35)$$

missä Q on valunta, λ on maan kapillaarinen johtavuus, ψ painepotentiaali, θ vesipitoisuus tilavuudesta ja x etäisyys. Itse asiassa Bulletinin 38 mittauksissa mitattiin suuretta, joka oli verrannollinen maaveden diffusiviteettiin (proportional to soil-water diffusivity). Mittauksissa näytteet 11 eri maalajista asetettiin kahdeksi kerrokseksi niin, että kerrosten vesipitoisuudet poikkesivat toisistaan. Kerroksesta toiseen siirtynyt vesimäärä tiettyssä ajassa mitattiin. Tulokset esitettiin virranneen vesimäärän osuutena alkuperäisestä vesipitoisuudesta. Buckinghamin kuvaamat vaikeudet kyllästymättömän maan

vedenjohtavuuden mittaamisessa ovat tuttuja kaikille, jotka ovat yrittäneet vastaavaa mittausta viimeisten 100 vuoden aikana: "Vaikeus pitää kolumnin toinen pää alhaisessa vakiovesipitoisuudessa; tasapainon saavuttamiseen kuluva pitkä aika; maan rakenteen muodostavien prosessien toistaminen laboratoriossa on mahdotonta"

Bulletin 38 päättyi äkisti eikä siinä ole tiivistelmää tai loppupäätelmiä kapillaarisesta johtavuudesta. Selityksenä voi olla, että Buckinghamilla oli kiire viimeistellä raporttinsa pari viikkoa ennen lähtöään BOS:sta. Kolmas osa vaikuttaa olevan kirjoitettu nopeasti. Toinen selitys voi liittyä kovaan kritiikkiin, jota Buckingham oli saanut edellisestä julkaisustaan kaasujen liikkumisesta maassa. Arvostelijana oli Chief of Division of Soil Management BOS:issa, sama henkilö joka todennäköisesti oli palkannut Buckinghamin. Koska kritiikki oli tuolloin kohdistunut pelkkiin loppupäätelmiin eikä niinkään itse tekstiin, Buckingham saattoi tarkoituksella tai huomaamattaan estää samanlaisen valikoivan lukemisen jättämällä tiivistelmän pois.

Lorenzo A. Richards (1931)

Lorenzo Adolph Richards syntyi 24.4.1904 Fieldingissä, Utahissa. Hän valmistui Utah State Universitysta pääaineena fysiikka. Hän kirjoitti vuonna 1931 valmistuneen väitöskirjansa "Capillary conduction of liquids through porous mediums" Cornellin yliopistossa. Suurimman osan työurastaan Richards teki maaperäfysiikan tutkimuksen parissa USDA:ssa (United States Department of Agriculture) Salinity Laboratoryssä Kalifornian Riversidessä. (http://en.wikipedia.org/wiki/Lorenzo_A._Richards)

Richards jatkoi väitöskirjassaan Buckinghamin työtä laajentamalla Darcyn lain kuvaamaan veden liikkumista myös kyllästymättömässä maassa. Richards otti käyttöön nykyisin Richardsin yhtälönä tunnetun osittaisdifferentiaaliyhtälön (esim. Karvonen 2003).

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (36)$$

missä $C(h)$ on vedenpidätyskäyrän derivaatta eli

$$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h} \quad (37)$$

ja θ on vesipitoisuus (-), h on painepotentiaali (m), t on aika (s), z korkeus (m) ja K vedenjohtavuus (m/s).

Richards myös kehitti uusia ja paranneltuja menetelmiä maaveden potentiaalimittaamiseen. Hän ymmärsi kapillaaripotentiaalimerkityksen kasvien ja maaperän välisissä suhteissa ja kuvaili tensiometrin toimintaperiaatteen ja käytön, sekä kehitti tensiometriä jatkuvasti eteenpäin. Hän tutki myös mahdollisuuksia mitata maaveden jännitystä tensiometrin toiminta-alueen ulkopuolella ja julkaisi vuonna 1941 artikkelin pressure-membrane -laitteesta, jonka ensisijainen tarkoitus oli uuttaa nestettä saliniteettianalyysejä varten. Hän mainitsi myös laitteen olevan käyttökelpoinen maaveden energiasuhteiden tutkimisessa.

Toinen tärkeä tutkimuskohde olivat kasvien ja maaveden suhteet. Richards ja hänen kollegansa määrittivät kokeellisesti maaveden jännityksen raja-arvot, kenttäkapasiteetin 0,33 bar ja lakastumisrajan 15 bar.

Yli 40 vuoden aikana Richards tuotti runsaasti lisätietoa maaveden energiasuhteista ja veden liikkumisesta maaperässä. Hän kehitti lukuisia nykyäänkin käytössä olevia maaperähydrologian alan mittalaitteita ja menetelmiä ja hänellä on keskeinen rooli maaperähydrologian muutoksessa kvalitatiivisesta mittauksiin ja matematiikkaan perustuvaksi tieteenalaksi. Richards kuoli vuonna 1993.

E. C. Childs ja N. Collis-George

Childs ja Collis-George (1950) kuvaavat ongelmia, joita vedellä kyllästyneen maan vedenjohtavuuden mittaamisessa esiintyy. Heidän mukaansa vedenjohtavuus laskee mittauksen keston kasvaessa mm. siksi, koska vedestä vapautuu liuennutta ilmaa maan huokosiin, kolloidinen materiaali turpoaa, hienojakoisin aines liikkuu veden mukana tukkien huokosia ja kolloidisessa aineksessa tapahtuu kemiallisia reaktioita. Siksi he ehdottavat K -arvon laskemista huokosten geometrian perusteella, joka määrää vedenjohtavuuden suoraan. Heidän mukaansa on tavallista kuvata maan rakennetta partikkelikokojakauman perusteella eikä huokoskokojakauman perusteella, ja siksi myös permeabiliteettia laskettaessa käytetään hiukkasten kokoja. He mainitsevat erityisesti Kozenyn yhtälön vuodelta 1927 (ref. Batu 1998)

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d_m^2}{180} \right) \quad (38)$$

missä K on hydraulinen johtavuus, ρ on veden tiheys, g painovoiman kiihtyvyys, μ on dynaaminen viskositeetti, n huokoisuus ja d_m partikkelikokoa kuvaava mitta. (Batu 1998)

Jos maassa on runsaasti erikokoisia partikkeleita, tämä mitta on huonosti määritelty. Fair ja Hatch (1933 ref. Batu 1998) ehdottivat mitaksi ominaispinta-alan käänteisarvoa.

$$K = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left[\frac{1}{\beta \left(\frac{\alpha}{100} \sum_{m=0}^N \frac{P_m}{d_m} \right)^2} \right] \quad (39)$$

missä β on pakkautumiskerroin, jonka arvo on empiirisesti todettu olevan noin 5, α on hiekkajyvästen muotoa kuvaava kerroin, P_m on se osuus hiekasta, joka jää peräkkäisten siivilöiden väliin, ja d_m on peräkkäisten siivilöiden reikien koon geometrinen keskiarvo (Batu 1998).

Näiden menetelmien ongelmia ovat Childsin ja Collis-Georgen mukaan mm., että niitä ei ole testattu riittävän laajalla huokoisuudella ja hiukkaskokoalueella, ne eivät toimi maassa johon on muodostunut rakenne, eivätkä ota huomioon halkeamia, koska ne eivät merkittävästi vaikuta huokoisuuteen ja ominaispinta-alaan, mutta määräävät K -arvon. Huokoisuus ja ominaispinta-ala eivät myöskään ota huomioon rakenteen anisotrooppista luonnetta, joka on maassa enemmän sääntö kuin poikkeus.

Lähtemällä Poisseuillen putkivirtauksen laista ja olettamalla kaikki putket samankokoiseksi saadaan Fair & Hatchin muoto Kozenyn yhtälöstä, joten Childs ja Collis-George toteavat yhtälön olevan todetusti paikkansapitävä ko. rakenteelle. Seuraavaksi Childs ja Collis-George johtavat K :lle kaavan, jos putket ovat keskenään erikokoisia. Ottamalla erikokoisten putkien vaikutus K :hon saadaan yhtälö, joka ei enää vastaa Kozenyn yhtälöä, joten Kozeny ei päde jos putket ovat erikokoisia.

Childsin ja Collis-Georgen teorian mukaan maa muodostuu satunnaisesti sijoittuneista ja halkaisijaltaan vaihtelevista huokosista, jotka ovat yhteydessä toisiinsa. Huokokset voidaan jakaa kokonsa perusteella huokoskokoluokkiin. Ajatuksena on laskea vedenjohtavuus, kun

kaksi maan poikkileikkausta asetetaan vastakkain, jolloin vedenjohtavuus määräytyy peräkkäin osuvien huokosten määrästä. Kaavassa otetaan huomioon kunkin huokoskokoluokan vaikutus kokonaisalaan ja oletetaan, että halkaisijaltaan pienempi huokonen määrää virtauksen, mikä tulee Poisseuillen lain r^4 :stä. Tämä yliarvioi virtausta. Toisaalta oletetaan, ettei tapahdu ohivirtausta, mikä aliarvioi virtaamaa ja kompensoi ensimmäisen oletuksen yliarvioivan vaikutuksen. Lopulta Childs ja Collis-George saavat kaavan K-arvon laskemiseen huokoskokojakauman perusteella.

Koska huokoskokojakauman laskenta voi olla työlästä, voidaan tarvittava huokoskokojakauma johtaa vedenpidätyskäyrästä. Lopuksi Childs ja Collis-George esittelevät kokeellisia tuloksia. Kokeessa mitattiin hiekan kyllästymätöntä vedenjohtavuutta. Kolumni oli 3 m pitkä ja halkaisijaltaan 2 cm. 65 cm yläreunasta sijaitsi osio, joka voitiin tarvittaessa poistaa. Pylvään yläpään muodostui vakiovesipitoisuus, ja ainoaksi gradientiksi jäi painovoima. Siten vedenjohtavuus oli yhtä suuri kuin syötetty valunta. Vesipitoisuus selvitettiin seuraavalla menetelmällä. Irrotettavan osuuden ympärille asetettiin elektrodit, joilla mitattiin osion vesipitoisuutta. Pylväs oli asetettu vesiasiaan, ja sen yläpään asetettiin haluttu valunta. Hiekka valutettiin pylvääseen ohuen vesikerroksen läpi ilmakuplien poistamiseksi. Valunta aloitettiin kyllästyneestä tilasta ja sitä alennettiin asteittain.

Childs ja Collis-George havaitsivat, että käytettäessä vesijohtovettä vedellä kyllästyneen maan vedenjohtavuuden mittauksessa vedenjohtavuus aleni mittauksen keston aikana. Tämä johtui veteen liunneen ilman kertymisestä huokosiin, mikä alensi vesipitoisuutta ja siten johtavuutta. Heidän mukaansa todellinen vedenjohtavuus oli heti mittauksen alussa saatu arvo. Kyllästymättömässä tilassa kuplat eivät aiheuttaneet ongelmia, ja vesijohtovettä saattoi käyttää. Pylvään kaltevuutta saatettiin muuttaa pystysuorasta 60 asteen kaltevuuteen, jolloin painegradientti voitiin alentaa arvoon $g/2$. Näin pystyttiin toteamaan Darcyn lain toiminta: jos se toimii, valunta on suoraan verrannollinen painegradienttiin, kun muut tekijät pysyvät vakioina. Käytetyt maalajit olivat 0,5...1 mm siivilästä läpi valunut hiekka, 0,25...0,5 mm hiekka ja 0,125 mm siivilästä läpi valunut liuskekivijauho ("slate dust"). Mitatusta vedenpidätyskäyrästä laskettiin huokoskokojakauma, josta edelleen laskettiin vedenjohtavuus, jota verrattiin mitattuihin arvoihin. Lisäksi Kozenyn menetelmällä laskettiin karkeimmalle materiaalille vedenjohtavuus.

Lopputuloksena todetaan, ettei Kozenyn menetelmä pysty ennustamaan maan vedenjohtavuutta, sen sijaan Childsin omalla menetelmällä mitatut ja lasketut

vedenjohtavuudet vastaavat toisiaan. Menetelmän ongelmana he mainitsevat sen, ettei huokosten pituuksia oteta huomioon, vaan määräävä tekijä on poikkileikkaus. Lisäksi he pitävät keinotekoisena ajatusta, että usean peräkkäisen erikokoisen huokosen systeemissä vedenjohtavuuden määrää halkaisijaltaan pienin.

Yechezkel Mualem (1976)

Mualem ehdotti Childsin ja Collis-Georgen teoriaan muutamia muutoksia (Dirksen 1991). Hän mm. laski, miten vedenjohtavuuteen vaikuttaa tilanne, jossa pienemmän huokosen jälkeen seuraa halkaisijaltaan suurempi huokonen. Olettaen että huokosten pituuksien suhde on yhtä suuri kuin niiden halkaisijoiden suhde, Mualem (1976) määritteli kahdelle peräkkäiselle huokoselle mitan ("equivalent radius of two pores"), joka oli $(r_1 r_2)^{0.5}$. Hän yhdisti oman teoriansa aikaisempiin teorioihin koskien maan vedenpidätyskykyä (Brooks ja Corey 1964 ref. Dirksen 1991) ja suhteellista hydraulista johtavuutta (Burdine 1953 ref. Dirksen 1991), ja 45 maalajin kokeellisten mittausten perusteella sai suhteelliselle hydrauliselle johtavuudelle kaavan

$$k_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \left(\frac{\int_0^\Theta (1/h) d\Theta}{\int_0^1 (1/h) d\Theta} \right)^2 \quad (40)$$

missä Θ on suhteellinen vesipitoisuus, joka vaihtelee välillä 0...1. Se on 0 kun maassa vallitsee jäännösvesipitoisuus ja 1 kun maa on täysin vedellä kyllästynyt. h on painepotentiaali. (Dirksen 1991)

M. Th. Van Genuchten (1980)

van Genuchten ehdotti vedenpidätyskäyrälle approksimaatiota

$$\Theta = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m \quad (41)$$

missä θ on kuten edellä, h painepotentiaali ja α , n ja m estimoitavia parametreja. Kun tähän sijoitetaan suhteellisen kyllästysasteen määritelmä

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (42)$$

missä θ on vesipitoisuus tilavuudesta, θ_r jäännösvesipitoisuus ja θ_s kyllästynyt vesipitoisuus, saadaan vesipitoisuudelle h :n funktiona muoto

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (43)$$

missä $m = 1 - 1/n$. Parametrit estimoidaan sovittamalla mitattu vedenpidätyskäyrä yo. funktioon.

Suhteelliseksi vedenjohtavuudeksi tietyllä vesipitoisuudella saadaan

$$k_r(\Theta) = \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (44)$$

missä Θ on suhteellinen vesipitoisuus (0..1) ja m kuten edellä. Vedenjohtavuus tietyllä vesipitoisuudella lasketaan kaavalla

$$k = K_{\text{sat}} k_r \quad (45)$$

missä K_{sat} on kyllästynyt vedenjohtavuus.

Liite 2. Turve maalajina

Suomen pinta-alasta on alun perin ollut suota kolmannes, ja suhteessa maan kokoon Suomi on maailman runsassoisin maa. Vähäinen haihdunta suhteessa sadantaan ja alava maaperä luovat edulliset olosuhteet soistumiselle. Suo syntyy, kun liian märkyyden vuoksi suokasvillisuus pääsee valtaan, ja kasviaineksen tuotto on runsaampaa kuin hajotus (Hartikainen 1992). Pääasiallisia soistumistapoja on kolme: 1) vesistön umpeenkasvu, 2) metsämaan soistuminen ja 3) ns. primaarinen soistuminen, jossa maankohoamisen myötä merenpohjasta kohoava maa joutuu suoraan suokasvillisuuden valtaan. Vesistöjen umpeenkasvun myötä on suoalastamme syntynyt noin 5-10 %, ja umpeenkasvua tapahtuu jatkuvasti pienissä metsälammissa. Metsämaa voi soistua usealla tavalla: pohjaveden kohoamisen myötä vettyvä metsäinen notko soistuu, suot laajenevat sivuilleen, tai läheisen suon turpeen korkeuskasvun vuoksi sadevedet ohjautuvat uudelle alueelle vettäen sitä. Yleisimmin metsämaa soistuu metsäpalon jälkeen, kun haihdunta äkillisesti vähenee. 7000–3000 vuotta sitten metsämaan soistuminen on ollut merkittävin suonmuodostumistapa, mutta nykyään sitä ei enää juuri tapahdu. Metsämaan soistumisen osuus suoalastamme on 35-50 %. Primaarisen soistumisen osuus suoalasta vaihtelee välillä 40-60 %, ja sen on nykyään merkittävä suonmuodostumistapa Pohjanlahden maankohoamisrannikolla. (Tolonen 1980, 1983)

Biologisesti ja metsätaloudellisesti määritellen suo on turvetta muodostava ekosysteemi, ja siihen luetaan sekä elävä kasvillisuus että siitä muodostunut turvekerros. Geologinen suo on yli 20 hehtaarin suuruinen suo, jonka turvekerros on yli 0,3 metriä paksu. (Tolonen 1980, Virtanen *et al.* 2000)

Suomalaisia suotyyppisiä ovat neva, letto, korpi ja räme. Nevat ja letot ovat aukeita ja vetisiä leton ollessa nevaa ravinteikkaampi. Karuilla nevoilla kasvaa rahkasammalta ja saroja, Pohjois-Suomessa yleisillä eutrofisilla letoilla tavataan lehtisammalia ja vaateliaita saroja. Korvessa kasvaa kuusia, tervaleppiä, myös koivuja, mustikkaa ja puolukkaa. Rämettä luonnehtivat matalat männyt ja aluskasvillisuutena on vaatimattomia rahkasammalia, saroja ja varpukasveja. Rämeet ovat tyypillisiä eteläsuomalaisia soita (Hartikainen 1992). Yleisesti rahkaisuus ilmentää erittäin vähäravinteista kasvupaikkaa, saraisuus puolestaan kohtalaisen ravinteikasta kasvupaikkaa. Vaateliaisuudeltaan näiden väliin asettuvat lyhytkortiset kasvit kuten tupasvilla ja isovarpuiset kasvit (Heikurainen 1978). Soita luokitellaan myös niiden

muodon perusteella: Pohjois-Suomen alavat aapasuot saavat ravinteita ympäröiviltä mineraalimailta ja ovat siten minerotrofisia soita. Eteläsuomalaiset keidas- tai kohosuot ovat turvekerroksen kasvaessa kohonneet pohjavesipinnan yläpuolelle ja saavat ravinteensa pääosin sadevedestä, minkä vuoksi niitä kutsutaan ombrotrofisiksi soiksi. Lisäksi Lapin pohjoisimmissa osissa tavataan ympäristöstään jopa useita metrejä kohoavia palsasoita, joiden keskiosa on ikiroudassa (Hartikainen 1992).

Vuonna 1903 Suomen Suoviljelysyhdistyksen toiminnanjohtaja E. A. Malm laski Suomen suoalaksi 102228 km². Ottaen huomioon alueluovutusten mukana poistuneet suomaat saatiin 50-luvulla suoalaksi 92321 km² (Kotiaho 1950, Maasilta 1951, Lappalainen 1998, Mylly 1998). Nykyään alkuperäisestä suoalasta yli puolet on metsäojitettu, noin kolmannes on luonnontilassa ja loput ovat viljelykäytössä, turvetuotannossa yms. (Aapala *et al.* 1998). Geologista suota on Suomessa 51000 km² (Virtanen *et al.* 2000).

Turve on eloperäinen maalaji, joka koostuu sellaisista kasvupaikalle kerrostuneista eli autoktonisista kasvillisuuden jäänteistä, jotka eivät ole ehtineet hajota ennen joutumistaan vedenpinnan alapuolelle. Happamissa olosuhteissa ainoita tehokkaita hajottajia ovat sienet, mutta ne ovat aerobeja eivätkä siten pysty toimimaan tehokkaasti suon märissä, hapettomissa oloissa (Hartikainen 1992). Paksun turvekerroksen synty vie tuhansia vuosia, jonka aikana suon pinnan ja pohjaveden on pysyttävä vakioetäisyydellä joko maanpinnan painumisen tai vedenpinnan kohoamisen seurauksena (Niini 1988).

Turpeet luokitellaan usein niiden kasvinjätekoostumuksen mukaan. Pääryhmiä on kaksi, rahkasammalien (*Sphagnum*) jäänteitä sisältävä rahkaturve ja sarojen (*Carex*) juurista koostuva saraturve. Yleisimmät rahkaturvelajit ovat tavallinen rahkaturve (S-t), sararahkaturve (CS-t) ja puunjätteitä sisältävä metsärahkaturve (LS-t). Saraturvelajeja ovat tavallisen saraturpeen (C-t) lisäksi rahkasaraturve (SC-t), metsäsaraturve (LC-t) ja ruskosammalsaraturve (BC-t) (Hartikainen 1992). Usein rahkaturpeissa havaitaan lisäksi tupasvillan (*Vaginatum*) ja saraturpeessa kortteiden ja raatteiden jäännöksiä. (Tolonen 1980).

Hartikaisen (1998) mukaan eloperäisen aineksen hajoamisessa tapahtuu sekä mineraloitumista että humifioitumista. Mineralisoitumisessa maaperän mikrobit toiminta hajottaa eloperäisiä yhdisteitä epäorgaanisiksi yhdisteiksi kuten hiilidioksidiksi, vedeksi ja erilaisiksi suoloiksi ja samalla vapautuu energiaa. Humifioitumisessa muodostuu humusta.

Hajotuksen kolme vaihetta ovat osittain päällekkäisiä. Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu solunsisäisiä hajoamisreaktioita, joita katalysoivat solun omat entsyymit. Seuraavassa vaiheessa maaeläimet kuten toukat, madot ja kovakuoriaiset muokkaavat ja hienontavat kasviainesta mekaanisesti. Maaperäeläimillä on tärkeä osuus hajotustoiminnassa, sillä mekaaninen hienontaminen ja maahan sekoittaminen helpottaa ja tehostaa hajotuksen kolmatta vaihetta, mikrobien työtä. Kolmas vaihe tapahtuu sukessiivisesti tiettyjen aineiden hajotukseen erikoistuneiden mikrobipopulaatioiden seurattessa toisiaan. Homesienet ja itiöttömät bakteerit käyttävät ensimmäisinä helpoimmin hajoavia yhdisteitä kuten sokereita ja aminohappoja. Seuraavaksi mukaan tulevat itiölliset bakteerit ja sienet, jotka osallistuvat erityisesti selluloosan pilkkomiseen. Solunsisällön hajoamisen jälkeen kasvien solunseinämät ovat vielä jäljellä lähes muuttumattomina. Varsinkin runsaasti selluloosaa ja ligniiniä sisältävät kasvinosat ovat vielä nähtävissä. Tällöin hajotusta jatkavat hidaskasvuiset sädesienet, jotka pystyvät käyttämään hyväksi myös vaikeammin hajoavia hiilen lähteitä (Hartikainen 1998).

Maan kemiallis-fysikaaliset olosuhteet, mm. lämpötila, kosteus, ravinteisuus, happamuus ja hapen saanti, vaikuttavat hajotuksen tehokkuuteen. Monet bakteerit eivät viihdy suon happamissa olosuhteissa. Sienet sietävät happamuutta, mutta ne taas tarvitsevat happea, josta vedenpinnan alaisissa kerroksissa on puutetta. Hapen puutteen vaivaamassa maassa hajotus jää kesken, ja hajotustuotteita voi syntyä orgaanisia pienimolekyyllisiä happoja ja haitallisia kaasuja kuten metaania (CH_4), eteeniä (C_2H_4) ja rikkivetyä (H_2S) (Hartikainen 1998).

Kun orgaanisen aineksen hajotuksen välituotteet reagoivat keskenään tai mikrobien syntetisoiman aineksen kanssa, muodostuvat kemialliset yhdisteet kondensoituvat helposti suurimolekyylliseksi tummaksi massaksi, humusaineiksi. Ne ovat hyvin kestäviä hajotusta vastaan ja muodostavat siksi monissa maissa tärkeimmän orgaanisen aineksen tyyppin. Maaperäterminologiassa käytetään yleisnimitystä humus. Humusaineiden tärkeimpiä funktionaalisia eli kemiallisiin reaktioihin osallistuvia ryhmiä ovat karboksyyli-ryhmät ($-\text{COOH}$), fenoliset ja alkoholiset OH -ryhmät, ketoryhmät ($-\text{C}=\text{O}$) ja metoksi-ryhmät ($-\text{OCH}_3$). Humusaineet eivät ole kemiallisesti yhtenäinen aineryhmä. Humuksen suuret molekyylit ovat hyvin monimutkaisia, eikä humusaineita jaotellakaan rakennekemiallisten ominaisuuksien vaan molekyylipainon tai liukoisuuden perusteella. Liukoisuuden mukaan humusaineet jaetaan kolmeen pääfraktioon: 1) humiini on se osa humusaineista, joka ei liukene veteen missään olosuhteissa, 2) humushapot eivät liukene veteen happamissa

olosuhteissa (pH alle 2), mutta yli pH 2:ssa ne liukenevat ja 3) fulvohapot liukenevat veteen pH:sta riippumatta. Humiini on hyvin heterogeeninen fraktio. Humushappojen molekyylipaino on suuri (5000–50000) ja niiden happoluonne ja kationinvaihtokyky perustuvat voimakkaasti dissosioituvien COOH-ryhmien ja heikommin happamien fenolisten OH-ryhmien esiintymiseen. Fulvohapoilla on humushappoja alhaisempi molekyylipaino (2000–3000) ja niissä esiintyy runsaammin karboksyyliiryhmiä. Alhainen biologinen aktiivisuus suosii fulvohappojen syntymistä (Hartikainen 1998).

Turpeen maatuneisuus selvitetään tavallisesti von Postin (esim. Päivänen 1982) asteikolla. Menetelmä perustuu turpeen silmävaraiseen tarkasteluun. Turvenäytettä puristetaan kädessä, ja maatumisaste arvioidaan näytteestä erkanevan veden värin ja sormien lävitse puristuvan massan perusteella.

Taulukko 14. von Postin maatumisasteen määrittely

Maatumisaste	Sormien läpi puristuvan veden laatu	Sormien läpi puristuva osa turvemassasta
1	Kirkas ja väritön	Ei yhtään
2	Lähes kirkas, kellanruskea	"
3	Samea, ruskea	"
4	Mutaisen ruskea	"
5	Erittäin mutainen, sis. hiukan turvelietettä	Erittäin vähän
6	Tumma, sis. runsaasti turvelietettä	1/3
7	Erittäin tummaa, paksua	1/2
8	Erittäin paksua	2/3
9	Ei vapaata vettä	Lähes kaikki
10	"	Kaikki

Liite 3. Laskentamallin kuvaus

Tekn. lis. Lassi Warsta

Turvenäytteistä määritettyjen hydraulisten parametrien toimivuutta testattiin numeerisella laskentamallilla. Simulointikokeella pyrittiin toisintamaan laboratoriokokeet mahdollisimman tarkasti käyttäen määritettyjä vedenpidätysparametreja ja hydraulisia johtavuuksia. Mallilla lasketut samankaltaiset tulokset lisäisivät parametrien käyttöluotettavuutta. Lisäksi tavoitteena oli saada lisätietoa vaikeasti mitattavista muuttujista kuten haihtuneen ja alareunan kautta ulos virranneen veden määristä. Näiden muuttujien mittaaminen oli vaikeaa, koska vesitulavuudet olivat pieniä suhteessa mittausjakson pituuteen. Tässä liitteessä esitellään mallin yleinen kuvaus sekä sovellus turvenäytteiden mallintamista varten.

Projektissa käytettiin Teknillisen korkeakoulun Vesitalouden ja vesirakennuksen tutkimusryhmässä kehitettyä yleistä laskentamallia, joka on tarkoitettu veden virtauksen ja aineiden kulkeutumisen mallintamiseen maaperässä sekä maan pinnalla. Ensimmäinen versio laskentamallista kehitettiin tierakenteissa täyteaineena käytetystä lentotuhkasta liukenevien aineiden kulkeutumisen mallintamiseen (Warsta 2005). Seuraava versio kehitettiin savipeltojen vesitalouden mallintamiseen (Warsta 2007, Warsta *et al.* 2008 a ja b). Uusin versio kehitettiin eroosion mallintamiseen savipelloilla (Warsta *et al.* 2009).

Laskentamalli on tyypiltään niin sanottu tutkimuslaitosmalli, ja se koostuu laajennettavista C++ -kielisistä luokista, joista voidaan rakentaa käsillä olevaan ongelmaan soveltuva kokonaisuus. Useista kaupallisista malleista poiketen mallilla ei ole käyttöliittymää, vaan laskentaverkot täytyy rakentaa ja tulokset analysoida erillisissä ohjelmissa. Etuna taas on laajennettavuus erilaisiin ongelmiin. Laskentamalli on sisäisesti kolmiulotteisesti hajautettu, mutta sitä voidaan käyttää myös kaksi- tai yksiulotteisten ongelmien tutkimiseen kuten tässä työssä. Alun perin malli on kehitetty dynaamisten ongelmien ratkaisuun mutta mallilla voidaan tarvittaessa tarkastella myös tasapainotilanteita.

Laskentamallin ominaisuudet:

- § 2-D pintavirtailu, kinemaattinen aaltoapproksimaatio St. Venantin yhtälöistä
- § 2-D pintaerosio, hydraulinen eroosio, pisaraerosio, sedimentin kuljetuskapasiteetti
- § Infiltraatio ja exfiltraatio

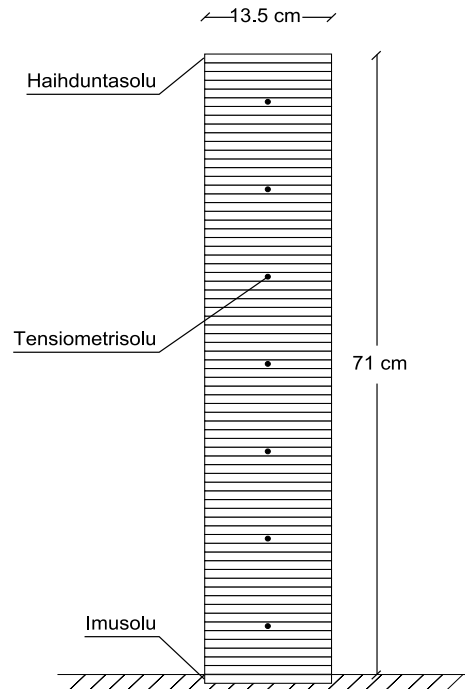
- § 3-D kyllästymätön ja kyllästynyt maa- ja pohjavesivirtaus, Richardsin yhtälö
- § Parametriset vedenpidätysominaisuudet, Mualem - van Genuchtenin menetelmä
- § 3-D aineiden kulkeutuminen maaperässä, advektio-dispersioyhtälö
- § Oikovirtaukset, dual-permeability -menetelmä
- § Savipeltoihin liittyviä erikoisominaisuuksia

Mallissa käytetty osittaisdifferentiaaliyhtälöiden implisiittinen, numeerinen ratkaisu on pääpiirteissään seuraavanlainen. Tutkittu systeemi hajotetaan laskentaverkolla soluihin. Osittaisdifferentiaaliyhtälöt muutetaan solutasolla yhtälöiksi, tässä tapauksessa kontrollitilavuusmenetelmällä. Yksittäisten laskentaselujen tilaa kuvaavat yhtälöt kootaan ryhmäksi, josta voidaan ratkaista tuntemattomien muuttujien arvot numeerisesti iteroimalla tai esimerkiksi Gaussin eliminaatioon pohjautuvilla tavoilla. Pintavirtailun ja eroosion ratkaisuun käytetään puhdasta iterointia. Maa- ja pohjavesivirtauksen laskennassa iterointia nopeutetaan tridiagonaalisella tai pentadiagonaalisella ratkaisualgoritmeilla yhden huokossysteemin tai kahden huokossysteemin tapauksissa. Dynaamisissa ongelmissa edellä kuvattu menetelmä suoritetaan jokaisella aika-askeleella kunnes koko simulaatioaika on käyty läpi.

Turvenäytteitä päädyttiin mallintamaan mittausten mukaisesti yhdessä dimensiossa. Selkeiden makrohuokosten puutteen vuoksi mallissa käytettiin vain yhtä huokossysteemiä. Kahden ylimmän tensiometrin imut olivat järjestelmällisesti suurempia kuin muiden tensiometrien imut, mikä johtui todennäköisesti näytteen yläpinnasta tapahtuneesta haihdunnasta. Laskentamallissa haihdunnalle käytettiin vakioarvoa 0,003 mm/d, jota skaalattiin lineaarisesti pienemmäksi imun yllittäessä 300 cm rajan. Mallin oleellisin osa oli ottaa huomioon turvenäytteiden alareunoihin kohdistettu muuttuva imu laskennassa. Laskennan kannalta stabiilein tapa oli luoda varsinaisen laskentaverkon alle ylimääräinen solu, jonka painepotentiaaliksi asetettiin mitattu imun arvo. Laskennan aika-askel määritettiin niin, että se kasvoi lineaarisesti ensimmäiset tuhat askelta, jonka jälkeen käytettiin tunnin vakioaika-askelta. Menetelmällä estettiin vesitasevirheet laskennan alussa kuitenkin hidastamatta laskentaa turhaan.

Turvenäytteitä kuvattiin laskennassa 72 cm korkealla laskentaverkolla. Koska laskentamallissa oli mahdollista käyttää ainoastaan heksaedrin muotoisia soluja, asetettiin yksittäisen laskentaselun ylä- ja alapinta samankokoiseksi kuin sylinterin muotoisen

turvenäytteen poikkileikkauksen pinta-ala. Verkko koostui 72 solusta joiden mitat olivat 13.47 x 13.47 x 1.0 cm. Tensiometrisolut sijaitsivat pinnasta katsoen 5, 15, 25, 35, 45, 55 ja 65 cm syvyyksissä. Kuvassa 67 on kaaviokuva mallissa käytetystä laskentaverkosta.



Kuva 67. Laskentaverkko ja erikoissolut.

Verkon yläreunaehtona käytettiin haihduntaa. Alareunaehtona käytettiin mitattua imua, joka asetettiin alimman solun painepotentiaaliksi arvoksi. Verkon sivureunat asetettiin vettä johtamattomiksi. Laskennan alkutilanne asetettiin tensiometrisoluihin suoraan mittauksista. Tensiometriä välisten solujen alkutilanne interpoloitiin lineaarisesti tensiometrisolujen imuista. Simulaatiot päädyttiin tekemään ainoastaan niille ajanjaksoille joista näytteeseen kohdistettu imu oli tallennettu (H8: mittauspäivät 103–516, 28.2.08–17.4.09, H4-H6: mittauspäivät 0-763, 16.3.07–17.4.09 ja H2: mittauspäivät 96–509, 28.2.08–17.4.09). Tällöin tensiometriä mittaukset säilyivät riippumattomina mallinnustuloksiin nähden. Tensiometriä arvojen käyttö reunaehtoina olisi tuottanut laskentaan myös vesitasevirhettä, koska tensiometriä mittaustulos kuvaa imua suhteellisen tarkasti vain juuri sen sijaintikohdassa eikä koko poikkileikkauksessa.

Näytteiden H4-H6 ja H2 osalta kalibrointia ei jouduttu käyttämään, koska simulointitulokset olivat melko hyviä. Näytteen H8 osalta parametreja ja hydraulisia johtavuuksia jouduttiin kalibroimaan. Kalibrointi tehtiin manuaalisesti parametreja muuttamalla. Tuloksina laskentamallista saatiin ajan suhteen muuttuvat tensiometriä

lukemat sekä kumulatiiviset arvot haihdunnalle ja näytteen alareunasta poistuneelle vesimäärälle. Simulointitulokset on esitetty varsinaisessa työssä **kohdassa** 5.5.

Liite 4. Näytteiden fysikaalisia ominaisuuksia.

Hyvin maatonut rahkaturve, pintakerros (H8)						
Näyte nro	1	2	3	4	5	6
Turpeen tiheys, kg/m ³	392,6	405,5	399,5			
Vesipitoisuus luonnontilassa (til.- %) (alkup. näytteistä)	0,62	0,58	0,65		0,65	0,64
Turveaineksen tiheys, kg/m ³ (alkup. näytteistä)	1697,8	1805,2	1733,2		1764,3	1770,9
Huokoisuus (til.-%) (alkup. näytteistä)	0,821	0,830	0,821		0,824	0,825
vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	72,7	73,8	71,6			
uunikuivan näytteen korkeus (alussa 10 cm), alkup. näytteistä	8,000	8,400	8,300		8,500	8,300
uunikuivan näytteen halkaisija (alussa 7,2 cm), alkup. näytteistä	6,500	6,000	6,000		6,300	6,500
V(uunikuiva)/ V(luonnontilainen), alkup. näytteistä	0,652	0,583	0,576		0,651	0,676
Hehkutushäviö (% uunikuivasta), alkup.	72,5%	60,0%	68,2%		64,6%	63,8%

näytteistä						
------------	--	--	--	--	--	--

Hyvin maatonut rahkaturve, keskikerros (H8), 31 cm			
Näyte nro.	1	2	3
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	31	31	31
Näytteen kuivamassa (g)	39,2	38,6	38,4
Turpeen tiheys, kg/m ³	244,5	240,5	239,4
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF- näytteistä, kork. 3 cm, pohja 29 cm)	63,2%	61,6 %	62,5 %
Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	78,9 %	77,2 %	74,9 %

Hyvin maatonut rahkaturve, pohjakerros (H8), 61 cm			
Näyte nro.	1	2	3
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	61	61	61
Näytteen kuivamassa (g)	41,7	33,8	36,6
Turpeen tiheys, kg/m ³	260,1	210,6	228,5
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF-näytteistä, kork. 3 cm, pohja 59 cm)	72,8 %	71,2 %	74,5 %

Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	81,7 %	81,6 %	81,8 %
---	--------	--------	--------

Keskinkertaisesti maatunut, savinen pintakerros (H6)						
Näyte nro	1	2	3	4	5	6
näyte luonnontilassa (g)	384,53	403,55	421,30	358,06	400,80	389,84
näytteen massa kyllästyneenä (g)	443,83	448,99	479,32	436,02	448,32	444,60
näytteen kuivamassa (g)	137,63	142,19	154,82	106,12	138,72	141,90
Turpeen tiheys, kg/m ³	338,0	349,2	380,3	260,6	340,7	348,5
Vesipitoisuus luonnontilassa (til.-%)	0,606	0,642	0,655	0,619	0,644	0,609
Turveaineksen tiheys, kg/m ³	1817,6	1883,2	1907,8	1798,6	1895,5	1829,6
Huokoisuus (til.-%)	0,814	0,815	0,801	0,855	0,820	0,810
vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	0,752	0,754	0,797	0,810	0,760	0,743
kyllästysaste mittauksen jälkeen	0,924	0,925	0,995	0,948	0,927	0,918

(Vvesi/Vhuokoset)						
uunikuivan näytteen korkeus (alus 10 cm)	8,200	8,300	9,000	8,500	8,300	8,300
uunikuivan näytteen halkaisija (alus 7,2 cm)	6,300	6,300	6,700	6,200	6,000	5,800
V(uunikuiva)/ V(luonnontilainen)	0,628	0,635	0,779	0,630	0,576	0,539
kivennäisaineksen massaosuus kuiva-aineesta	41,3 %	48,1 %	50,5 %	39,2 %	49,3 %	42,6 %
Hehkutushäviö (% uunikuivasta)	58,7%	51,9%	49,5%	60,8%	50,7%	57,4%

Keskinkertaisesti maatunut, saveton pintakerros (H6)	1	2	3	4	5
näyte luonnon-tilassa (g)	235,02	246	262,71	263,66	213,81
näytteen massa kyllästyneenä (g)	415,86	430,42	410,82	398,68	428,04
näytteen kuivamassa (g)	82,82	86,58	74,92	72,07	82,24
Turpeen tiheys, kg/m ³	203,4	212,6	184,0	177,0	202,0
Vesipitoisuus luonnontilassa (til.-%)	0,37	0,39	0,46	0,47	0,32

Turveaineksen tiheys, kg/m ³	1589,3	1719,5	1603,1	1581,0	1695,2
Huokoisuus (til.-%)	0,87	0,88	0,89	0,89	0,88
vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	0,79	0,80	0,81	0,82	0,84
kyllästysaste mittauksen jälkeen (Vvesi/Vhuokokset)	0,91	0,91	0,91	0,93	0,95
uunikuivan näytteen korkeus (alussa 10 cm)	8,5	8,8	8,8	8,7	(murtui irrotettaessa)
uunikuivan näytteen halkaisija (alussa 7,2 cm)	6,8	6,5	6,5	6,6	6,8
V(uunikuiva)/ V(luonnontilainen)	0,76	0,72	0,72	0,73	
kivennäisaineksen massaosuus kuiva-aineesta (%)	13,3 %	30,2 %	15,2 %	12,1 %	27,2 %
Hehkutushäviö (% kuivamassasta)	86,7 %	69,8 %	84,8 %	87,9 %	72,8 %

Keskinkertaisesti maatonut, keskikerros, H4					
Näyte nro.	1	2	3	4	5
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	31	31	31	31	31
Näytteen massa kyllästyneenä (g)	153,2	155,9	160,8	158,9	155,0
Näytteen kuivamassa (g)	30,9	31,3	33,5	31,1	29,3

Turpeen tiheys, kg/m ³	200,1	202,5	217,2	201,3	189,7
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF-näytteistä, kork. 3 cm, pohja 29 cm)	64,4 %	71,3 %	72,8 %		
Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	76,3 %	77,8 %	79,4 %	79,7 %	78,4 %

Keskinkertaisesti maatonut Pohjakerros, H5					
Näyte nro.	1	2	3	4	5
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	61	61	61	70	70
Näytteen massa kyllästyneenä (g)	158,5	159,8	163,6	164,2	162,6
Näytteen kuivamassa (g)	22,1	21,7	21,7	22,4	22,2
Turpeen tiheys, kg/m ³	143,0	140,7	140,5	145,3	143,5
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF-näytteistä, kork. 3 cm, pohja 59 cm)	74,4 %	74,2 %	76,9 %		
Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	85,1 %	86,1 %	88,5 %	88,4 %	87,6 %

Heikosti maatonut rahkaturve (H2), pintakerros						
Näyte nro	1	2	3	4	5	6
näyte luonnon-tilassa (g)	287,39	275,76	298,33	222,46	257,96	290,98

näytteen massa kyllästyneenä (g)	403,16	403	402,11	358,99	388,4	410,8
näytteen kuivamassa (g)	42,49	39,56	43,63	32,41	38,4	44
Turpeen tiheys, kg/m ³	104,4	97,2	107,2	79,6	94,3	108,1
Vesipitoisuus luonnontilassa (til.-%)	0,601	0,580	0,626	0,467	0,539	0,607
Turveaineksen tiheys, kg/m ³	1556,9	1551,7	1558,2	1540,4	1543,3	1553,9
Huokoisuus (til.-%)	0,933	0,937	0,931	0,948	0,939	0,930
vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	0,886	0,893	0,880	0,802	0,860	0,901
kyllästysaste mittauksen jälkeen (Vvesi/Vhuokokset)	0,949	0,952	0,945	0,846	0,916	0,968
uunikuivan näytteen korkeus (alussa 10 cm)	8	7,3	8	7,5	8,3	8,3
uunikuivan näytteen halkaisija (alussa 7,2 cm)	6,3	5,8	6,1	6	6,3	6
V(uunikuiva)/ V(luonnontilainen)	0,613	0,474	0,574	0,521	0,635	0,576
kivennäisaineksen massaosuus kuiva- aineesta	8,6 %	7,9 %	8,8 %	6,2 %	6,6 %	8,2 %
Hehkutushäviö (% uunikuivasta)	91,4%	92,5%	91,2%	93,8%	93,4%	92,8%

Heikosti maatunut rahkaturve, keskikerros (H2)					
Näyte nro.	1	2	3	4	5
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	31	31	31	31	31
Näytteen massa kyllästyneenä (g)	156,9	149,4	154,2	157,6	159,8
Näytteen kuivamassa (g)	18,7	15,4	15,5	16,6	15,0
Turpeen tiheys, kg/m ³	121,0	99,5	100,2	107,2	97,1
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF- näytteistä, kork. 3 cm, pohja 29 cm)	79,4 %	77,6 %	73,8 %		
Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	86,2 %	83,6 %	86,5 %	88,0 %	90,3 %

Heikosti maatunut rahkaturve, pohjakerros (H2)					
Näyte nro.	1	2	3	4	5
Näytteen (kork. 7 cm) pohjan syvyys, cm	61	70	70	52	52
Näytteen massa kyllästyneenä (g)	161,9	160,7	161,6	163,0	162,7
Näytteen kuivamassa (g)	18,8	18,1	17,8	18,0	18,3
Turpeen tiheys, kg/m ³	121,5	117,1	115,1	116,4	118,2
Luonnontilainen vesipitoisuus (pF-näytteistä, kork. 3 cm, pohja 59 cm)	76,5 %	82,3 %	82,4 %		
Vesipitoisuus mittauksen jälkeen (til.-%)	89,3 %	88,9 %	89,7 %	90,5 %	90,1 %