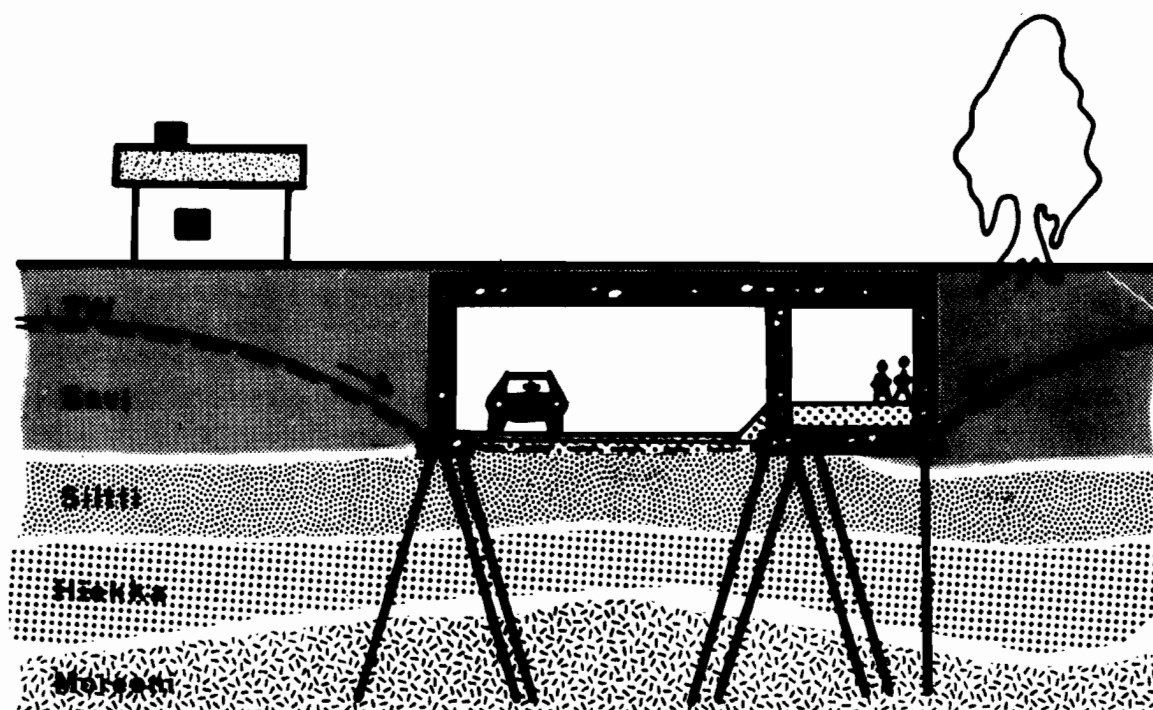




Kai Gulin

---

## RAKENTAMISEN VAIKUTUS POHJAVEDEN TASOON JA RAKENNUSTEN PAINUMIIN HELSINGIN PUISTOLASSA

---

Kai Gulin

RAKENTAMISEN VAIKUTUS POHJAVEDENPINNAN TASOON  
JA RAKENNUSTEN PAINUMIIN HELSINGIN PUISTOLASSA

Geoteknisen osaston tiedote 29



## TIIIVISTELMÄ

Tämä selvitys on tehty Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla. Työssä tarkasteltiin rakentamisen aiheuttamaa pohjavedenpinnan alenemista ja tämän aiheuttamaa rakennusten painumista Helsingin Puistolassa. Tavoitteena oli alueelta saatua pohjavesi- ja painumahavaintoaineistoa hyväksikäyttäen löytää laskentamenetelmä, jonka avulla rakentamisen vaikutus pohjavedenpinnan korkeuteen voidaan arvioida.

Puistolaa aseman ja Suuntimotien alikulkutunnelit rakennettiin vuosina 1977...1979. Alueella aloitettiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston toimesta pohjavesi- ja rakennusten painumatakkailu jo vuonna 1974. Laskelmat perustuvat näihin tarkkailumittauksiin sekä rakennuspaikoilla suoritettuihin koepumppauksiin.

Pohjavedenpinnan aleneman vaikutusalue arvioitiin koepumppaus- tulosten perusteella sekä analyysitietä että numeerista laskentamenetelmää käyttäen. Jälkimmäisessä otettiin käyttöön ns. vuototekijä, jota vaihtelemalla etsittiin koepumppauksen aikana havaittu pohjavedenpinnan alenema mahdollisimman hyvin toteutettava ratkaisu. Parhaan tuloksen antanutta vuototekijän arvoa käytettiin alikulkutunnelien aiheuttaman pohjavedenpinnan alenemisen arviointiin. Laskelmien tuloksia verrattiin alueella suoritettuihin pohjavedenpinnan pitkäaikaishavaintoihin.

Lopullista pohjavesitilannetta kuvaavan laskelman pohjalta määritettiin kahden, alikulkutunnelien läheisyydessä sijaitsevan rakennuksen painumat tangenttimoduulimenetelmällä. Laskelmien tuloksia verrattiin rakennusten havaittuihin painumiin.

Siitä huolimatta, että laskelmat sisältävät monia likimääräisyyksiä ja olettamuksia, voidaan vuototekijän avulla suoritettulla numeerisella laskentamenetelmällä saavuttaa suhteellisen hyviä tuloksia. On kuitenkin huomattava, että menetelmää on sovellettu vain paineellisen pohjaveden johtomuodostuman tapaukseen, eikä muista vielä ole kokemuksia.

Selvityksen lopussa esitetään syvärakentamiseen liittyvän pohjavesitilanteen suunnittelun sisältö rakennushankkeen eri vaiheissa.



## ABSTRACT

This study was carried out at the Geotechnical Department of the City of Helsinki. It involved observing the lowering of groundwater level causing building settlement originating from construction work carried out in the Helsinki Puistola area. The object was to find a calculation method for estimating the effect of construction on the groundwater level, using the observation data on groundwater and building settlement.

The underpass tunnels of Puistola and Suuntimotie were built during 1977...1979. The groundwater and settlement observations were started by the Geotechnical Department of the City of Helsinki as early as 1974. The calculations are based on these observations and on the results of test pumping at the building sites.

The effected area, where the lowering of the groundwater level took place, was estimated by using the test pumping results with an analytical as well as a numerical calculation method. In the latter case a so-called leakage factor was used to obtain a result that adapts to the observed groundwater level of the test pumping as accurately as possible. The leakage factor rendering the most accurate solution was used to calculate the lowering of the groundwater level caused by the underpass tunnels. The calculation results were compared with the observation data of long duration in the area.

Using the results of the final groundwater calculation, settlements of two buildings, close to the underpass tunnels, were estimated. The results were then compared to the observed building settlements.

In spite of the fact that the calculations contain many approximations and assumptions it is possible to achieve relatively good results by numerical calculation involving the leakage factor. However, the method has been used only in cases of artesian aquifer and the adaptability to other aquifer types has not been tested in this study report.

In the final part of the study is suggested the contents of the groundwater plan in different phases of subsurface planning.

## ALKUSANAT

Liikenneväylien parantamisessa on nykyisin tärkeällä sijalla eritasoristeyksien rakentaminen. Taaajama-alueilla ei maisemallisista syistä ja mm. liikennemelun johdosta haluta ylittää valmiita väyliä rakentamalla korkeita penkereitä ja siltoja. Vaihtoehdoksi jäävät alikulkutunnelit, jotka rakennetaan lähes poikkeuksetta pohjavedenpinnan alapuolelle. Jos lukuun ei oteta kehitteillä olevia jäädytysmenetelmiä, on rakentaminen suoritettava ainakin työnaikaista pohjavedenalennusta käyttäen. Savialueilla tästä aiheutuu painumien kiihtymistä ja mahdollisia haittoja sekä vahinkoja rakenteille ja kivoille. Yksityiskohtaisilla ympäristöselvityksillä ja rakentamismenetelmien valinnalla voidaan tällaisten kohteiden rakennuskustannuksissa saavuttaa useiden miljoonien markkojen säästöjä.

Oheisessa selvityksessä, joka perustuu DI Kai Gulinin diplomityöhön, on tutkittu Puistolan aseman ja Suuntimotien alikulkutunnelien tarkkailuaineiston pohjalta pohjavedenalennuksen käsittelyyn soveltuvia laskentamenetelmiä. Alenema-alueen määrittämisestä on selvitetty koe-pumppauksista saatujen tulosten perusteella analyttisellä laskentamenetelmällä sekä elementtilaskelmilla. Puistolan alikulkutunneleiden kokemukset on tällä tavoin taltioitu ja jalostettu suunnitteluohjeiden muodossa hyödynnettäväksi poikittaisyhteyksien rakentamisessa erityisesti Pohjois-Helsingin alueella.

Helsingissä 4.10.1982



Usko Anttikoski  
osastopäällikkö

## SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## ALKUSANAT

## MERKINNÄT

|       |                                                                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | JOHDANTO.....                                                                                    | 1  |
| 2.    | VEDEN ESIINTYMINEN MAAPERÄSSÄ.....                                                               | 2  |
| 2.1   | Veden sitoutuminen maaperään.....                                                                | 2  |
| 2.2   | Maaperän vedenläpäisevyys.....                                                                   | 3  |
| 2.3   | Pohjaveden johtomuodostumat.....                                                                 | 5  |
| 2.4   | Veden virtaus maaperässä.....                                                                    | 7  |
| 3.    | POHJAVEDEN ALENEMISTA AIHEUTTAVAT TEKIJÄT.....                                                   | 9  |
| 3.1   | Sadannan vaikutus.....                                                                           | 9  |
| 3.2   | Rakentamisen vaikutus.....                                                                       | 10 |
| 4.    | POHJAVEDEN ALENEMISEN VAIKUTUS MAAPERÄÄN.....                                                    | 12 |
| 4.1   | Huokosvedenpaineen muutos.....                                                                   | 12 |
| 4.2   | Koheesiomaan kokoonpuristuminen.....                                                             | 14 |
| 5.    | POHJAVEDEN ALENEMISEN VAIKUTUSALUEEN LASKEMINEN...                                               | 17 |
| 5.1   | Laskentamenetelmät.....                                                                          | 17 |
| 5.2   | Analyyttinen laskentamenetelmä.....                                                              | 17 |
| 5.3   | Elementtimenetelmään perustuva laskenta.....                                                     | 20 |
| 5.31  | Menetelmän periaatteet.....                                                                      | 20 |
| 5.32  | Elementtiyhtälöt.....                                                                            | 23 |
| 5.33  | Elementtiverkon laatiminen.....                                                                  | 24 |
| 5.34  | Tietokone- ja piirtämisohjelma.....                                                              | 26 |
| 6.    | KOKEMUKSIA POHJAVEDENPINNAN ALENEMISESTA KAHDEN<br>ALIKULKUTUNNELIN RAKENTAMISEN YHTEYDESSÄ..... | 28 |
| 6.1   | Kohteen toteuttamistapa ja alueen pohja-<br>suhteet.....                                         | 28 |
| 6.2   | Pohjavedenpinnan tarkkailujärjestelmä.....                                                       | 30 |
| 6.3   | Painetason kehitys tarkkailun aikana.....                                                        | 31 |
| 6.4   | Koepumppauksiin perustuvat ratkaisut.....                                                        | 31 |
| 6.41  | Koepumppaukset.....                                                                              | 31 |
| 6.42  | Analyyttinen ratkaisu.....                                                                       | 35 |
| 6.43  | Numeeriset ratkaisut.....                                                                        | 42 |
| 6.431 | Ratkaisu elementtiverkon kokoa<br>muuttamalla.....                                               | 42 |

|       |                                                                                           |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.432 | Ratkaisu virtausvastusta käyttäen.....                                                    | 48 |
| 6.5   | Lopulliseen, alikulkutunnelien rakentamisen jälkeiseen, tilanteeseen perustuva ratkaisu.. | 54 |
| 6.51  | Reunaehdot.....                                                                           | 54 |
| 6.52  | Laskelmat, joissa Suuntimotien siltti-kerrosta ei huomioida.....                          | 54 |
| 6.53  | Laskelmat, joissa huomioidaan Suuntimotien silttikerros.....                              | 59 |
| 7.    | POHJAVEDENPINNAN ALENEMISESTA AIHEUTUNEET RAKENTEIDEN PAINUMAT.....                       | 64 |
| 7.1   | Esimerkkirakennukset.....                                                                 | 64 |
| 7.2   | Rakennus A.....                                                                           | 64 |
| 7.21  | Rakennus- ja perustamistapa.....                                                          | 64 |
| 7.22  | Pohjasuhteet.....                                                                         | 66 |
| 7.23  | Lasketut ja havaitut painumat.....                                                        | 67 |
| 7.3   | Rakennus B.....                                                                           | 70 |
| 7.31  | Rakennus- ja perustamistapa.....                                                          | 70 |
| 7.32  | Pohjasuhteet.....                                                                         | 71 |
| 7.33  | Lasketut ja havaitut painumat.....                                                        | 72 |
| 8.    | POHJAVESITILANTEEN SUUNNITTELU SYVÄRAKENTAMISEN OSANA PEHMEIKKÖALUEILLA.....              | 76 |
| 8.1   | Pohjavesitilanteen suunnittelun tarve.....                                                | 76 |
| 8.2   | Pohjavesitilanteen huomioiminen ennakkosuunnitteluvaiheessa.....                          | 76 |
| 8.3   | Pohjavesitilanteen huomioiminen luonnos- ja rakennussuunnitteluvaiheissa.....             | 77 |
| 8.4   | Yhteenveto pohjavesisuunnittelun sisällöstä..                                             | 78 |
| 9.    | YHTEENVETO.....                                                                           | 80 |
|       | KIRJALLISUUSLUETTELO.....                                                                 | 82 |
|       | LIITTEET                                                                                  |    |

## MERKINNÄT

|             |                                                                                         |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| A           | vettäläpäisevän kerroksen poikkipinta-ala, $m^2$                                        |
| $H_I$       | maakerroksen I paksuus, m                                                               |
| $H_{II}$    | maakerroksen II paksuus, m                                                              |
| J           | hydraulinen gradientti                                                                  |
| L           | virtausmatka, m                                                                         |
| M           | kokoonpuristuvuusmoduuli, kPa                                                           |
| N           | $= \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$                                 |
| Q           | pohjaveden virtaama, $m^3/s$                                                            |
| $Q_i$       | virtaama pumppauskaivosta i, $m^3/s$                                                    |
| $Q_{kok}$   | pumppauskaivojen yhteenlaskettu virtaama $= \sum_{i=1}^n Q_i$ , $m^3/s$                 |
| R           | vaikutussäde, m                                                                         |
| $T_p$       | primaarinen aikatekijä                                                                  |
| $V_b$       | huokoisen aineen kokonaistilavuus, $m^3$                                                |
| $V_v$       | huokostilan tilavuus, $m^3$                                                             |
| $(V_v)n_e$  | tehoton huokostilavuus, $m^3$                                                           |
| a           | vuototekijä, $\frac{1}{m}$                                                              |
| c           | virtausvastus, s                                                                        |
| $c_v$       | konsolidaatiokerroin, $cm^2/s$                                                          |
| $\bar{c}_v$ | maakerrospaksuuksien suhteessa painotettu keskimääräinen konsolidaatiokerroin, $cm^2/s$ |
| d           | vettäjohtavan maakerroksen paksuus, m                                                   |
| d'          | puoliläpäisevän maakerroksen paksuus, m                                                 |
| e           | huokosluku                                                                              |
| f           | nesteen viskositeetista ja maan raakoosta riippuva kerroin                              |
| h           | pohjavedenpinnan painekorkeus, m                                                        |

|                     |                                                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------|
| $h_o$               | alkuperäinen pohjaveden painekorkeus, m               |
| $h_1, h_2$          | pohjaveden painekorkeus, m                            |
| $h_w$               | pohjaveden painekorkeus pumppauskaivossa, m           |
| $\Delta h$          | painekorkeuden alenema                                |
| $\Delta h_i^{hav}$  | havaintopisteessä i havaittu painekorkeuden muutos, m |
| $\Delta h_i^{lask}$ | havaintopisteessä i laskettu painekorkeuden muutos, m |
| $k$                 | vedenläpäisevyys, m/s                                 |
| $k'$                | puoliläpäisevän maakerroksen vedenläpäisevyys, m/s    |
| $m$                 | normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku             |
| $m_2$               | ylikonsolidoituneen osan moduuliluku                  |
| $n$                 | huokoisuus, %                                         |
| $n_e$               | tehokas huokoisuus, %                                 |
| $r$                 | etäisyys, m                                           |
| $r_i$               | havaintopisteen i etäisyys pumppauskaivosta, m        |
| $s$                 | neliösumma                                            |
| $t$                 | aika, s                                               |
| $\Delta u_w$        | huokosvedenpaineen muutos, kPa                        |
| $v$                 | virtaamanopeus, m/s                                   |
| $z$                 | syvyys, m                                             |
| $\beta$             | jännityseksponentti                                   |
| $\gamma_w$          | veden tilavuuspaino, N/m <sup>3</sup>                 |
| $\tilde{V}$         | operaattorimatriisi                                   |
| $\epsilon$          | suhteellinen kokoonpuristuma, %                       |
| $\bar{\epsilon}$    | jäännösmuodonmuutos, %                                |
| $\lambda$           | vuotokerroin, m                                       |
| $\sigma_{vo}$       | yläpuolella olevien maamassojen paino, kPa            |
| $\sigma_p$          | konsolidaatiojännitys, kPa                            |
| $\sigma_v$          | vertailujännitys = 100 kPa                            |
| $\sigma_z$          | kuormitus syvyydessä z, kPa                           |
| $\Psi$              | muotofunktiomatriisi                                  |
| $\sim$              |                                                       |



## 1. JOHDANTO

Rakennettaessa pohjavedenpinnan alapuolelle kellaritiloja, liikenneväyliä, väestönsuojia tms. on selvitettävä onko rakenteiden oltava vesitiiviitä vai voidaanko pohjavedenpintaa alentaa pysyvästi. On siis oleellisen tärkeää ennalta selvittää rakentamisen aiheuttaman pohjavedenpinnan aleneman suuruus ja laajuus sekä sen vaikutus ympäristöön.

Helsingin Puistolaan on vuosina 1977...1979 rakennettu kaksi pääradan alittavaa tunnelia. Tämän johdosta rakennettiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston toimesta alueelle pohjavesi- ja painumatarkkailuverkosto, josta ensimmäiset havainnot ovat jo vuodelta 1974.

Tämän työn tavoitteena on ollut, yllämainittuja pohjavesiselvityksiä ja havaintotietoja hyväksikäyttäen, löytää laskentamenetelmä, jonka avulla rakentamisen vaikutus pohjavedenpintaan voidaan mahdollisimman tarkasti arvioida. Elementtimenetelmällä suoritettu laskenta antoi tässä tapauksessa suhteellisen hyviä tuloksia, mutta koska työssä rajoituttiin käsittelemään vain yhtä kohdetta, ei menetelmän soveltuvuutta muihin vastaaviin tapauksiin voitu selvittää.

Lisäksi tarkasteltiin sekä laskennallisesti määritetyn että havaitun pohjavedenpinnan alenemisen aiheuttamaa rakennusten painumista. Selvityksen lopussa esitetään pohjavesitilanteen suunnittelun sisältö rakennushankkeen eri vaiheissa.



## 2. VEDEN ESIINTYMINEN MAAPERÄSSÄ

### 2.1 Veden sitoutuminen maaperään

Maanpinnan alla vesi voi esiintyä nesteinä, vesihöyryinä tai jääänä. Vesi maanpinnan alla luokitellaan yleensä veden liik-  
kumismahdollisuuksien sekä veteen vaikuttavien fysikaalis-  
kemiallisten voimien perusteella eri vyöhykkeisiin. Eri esiin-  
tymismuotojen ja vyöhykkeiden välillä ei kuitenkaan ole selviä  
rajoja /2/.

Sen mukaan kuinka vesi on sitoutunut maaperään voidaan se jao-  
tella seuraavasti /2, 26, 6, 16/:

- Hygroskooppi- vesi. Elektrostaattisten voimien  
johdosta maarakeisiin tiukasti sitoutunut vesi.
- Kapillaarivesi. Edellistä löyhemmin sitoutunut.  
Kapillaarivesi kiinnittyy maarakeiden väliin ja  
pintoihin pintajännitysvoimien avulla.
- Adsorptio- eli vaippavesi. Adsorptio- ja kapillaari-  
voimien maarakeiden pintaan ohueksi kalvoksi sitomaa  
vettä.
- Vajovesi eli liikavesi. Painovoiman vaikutuksesta  
hitaasti alaspäin suotautuvaa vettä.

Maaperä voidaan jakaa vyöhykkeisiin maaperän kyllästysasteen,  
vedenpaineen ja veden liikkuvuuden mukaan /6, 8, 26/, kuva 1.

Juurivyöhyke ulottuu maanpinnasta kasvillisuuden pääjuuriston  
syvyyteen saakka. Juurivyöhykkeessä on hygroskooppista, ka-  
pillaari- ja vajovettä. Välivyöhyke ulottuu juurivyöhykkeen  
alareunasta kapillaarivyöhykkeeseen. Välivyöhykkeessä on  
myös liikkumatonta maarakeiden ympärille kapillaari- ja hygro-  
skooppisten voimien johdosta sitoutunutta vaippavettä. Vajo-  
vesi on liikavettä, joka liikkuu alaspäin painovoiman vaiku-  
tuksesta. Vedenpaine on välivyöhykkeessä ilmakehän painetta



Kuva 1. Maaperän vesivyöhykkeet /2/.

pienempi. Kapillaarivyöhyke ulottuu pohjavedenpinnasta kapillaarisen nousukorkeuden verran ylöspäin. Koska kapillaarivyöhyke on yleensä huomattavasti ohuempi kuin pohjavesivyöhyke, ei sitä pohjavesivirtausta tarkasteltaessa oteta huomioon. Juuri-, väli- ja kapillaarivyöhykkeet muodostavat yhdessä nk. maavesi- eli kyllästämättömän vyöhykkeen. Pohjavesivyöhyke alkaa pohjavedenpinnasta ja päättyy vettäläpäisemättömään kerrokseen. Pohjavesivyöhykkeessä on myös maakerrosten ympärille sitoutunutta vaippavettä.

## 2.2 Maaperän vedenläpäisevyys

Maaperän vedenläpäisevyyteen vaikuttaa oleellisesti huokoisuus. Huokoisuus on huokoisen aineen huokostilan ja aineen koko tilavuuden suhde:

$$n = \frac{V_v}{V_b} \quad (1)$$

$V_v$  on huokostilan tilavuus

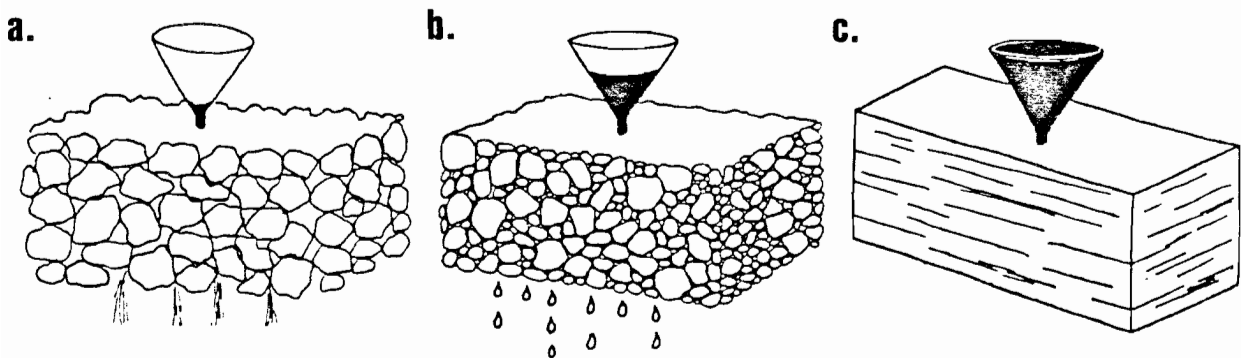
$V_b$  huokoisen aineen koko tilavuus

$V_v$  sisältää myös virtauksen kannalta tehottomat huokokset. Virtauksen kannalta huomioonotettavia huokosia ovat sellaiset, jotka ovat yhteydessä toisiinsa. Tehokas huokoisuus on toisiinsa yhdistettyjen huokosten ja väliaineen koko tilavuuden suhde /6/:

$$n_e = \frac{V_v - (V_v)n_e}{V_b} \quad (2)$$

$(V_v)n_e$  on virtauksen suhteen tehoton huokostilavuus.

Paitsi huokoisuudesta riippuu vedenläpäisevyys myös huokoisen aineen ei-kapillaaristen huokosten jatkuvuudesta, rakenteesta, kerrosrakenteesta ja huokosiin suljetun ilman määrästä. Lisäksi vedenläpäisevyyteen vaikuttavat nesteen viskositeetti, lämpötila ja tiheys /16/, kuva 2.



Kuva 2. Maalajien vedenläpäisevyys /16/.

- a) Lajittunut, karkearakeinen kitkamaa. Suuri vedenläpäisevyys.
- b) Lajittumaton, tiivis kitkamaa. Pieni vedenläpäisevyys.
- c) Koheesiomaa. Vettä läpäisemätön /16/.

Vedenläpäisevyyden riippuvuus huokoisuudesta voidaan esittää kaavalla /24, 25/

$$k = f\left(\frac{e^3}{1+e}\right) = f\left(\frac{n^3}{(1-n)^2}\right) \quad (3)$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

e on huokosluku

f kerroin, joka riippuu nesteen viskositeetista ja maan raakoosta

Maalajin vedenläpäisevyys voidaan määrittää laboratoriossa ja kentällä. Laboratoriomenetelmissä on heikkoutena se, että määritysten lukumäärä on yleensä liian pieni maaperän heterogeenisuuteen nähden ja että vettäjohtavasta kerroksesta saatu näyte on häiriintynyt, jolloin saatu vedenläpäisevyyden arvo on vain suuntaa-antava. Kenttäolosuhteissa voidaan keskimääräinen vedenläpäisevyys määrittää koepumppauksen avulla suurelle alueelle yhdellä kertaa. Vedenläpäisevyyden suuruusluokat eri maalajeilla esitetään taulukossa 1.

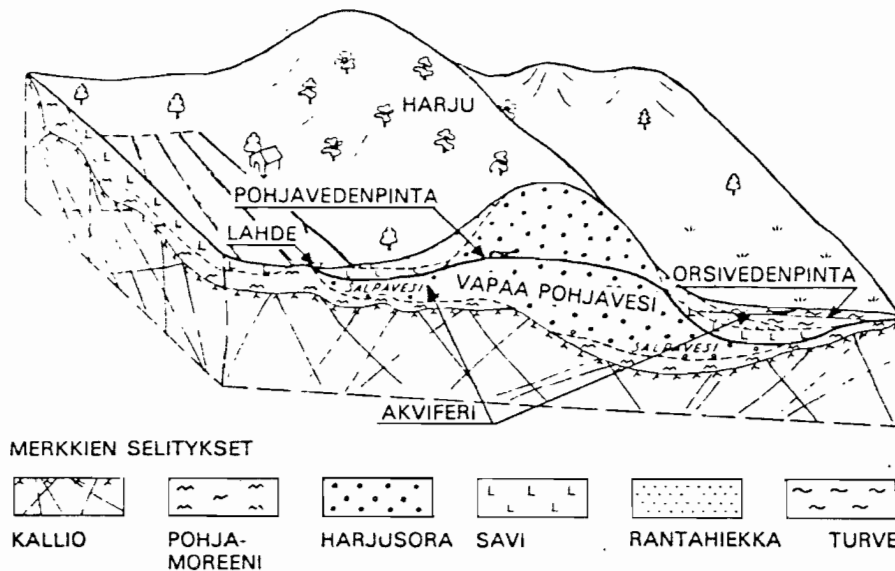
Taulukko 1. Eri maalajien vedenläpäisevyyksien suuruusluokat /14/.

|  | Maalaji                        | Vedenläpäisevyys<br>k (cm/s)         |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|
|  | Sora                           | > 1                                  |
|  | Hiekka<br>(suht. tasarakeinen) | 1...10 <sup>-3</sup>                 |
|  | Siltti<br>(suht. tasarakeinen) | 10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-6</sup> |
|  | Moreeni                        | 10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-7</sup> |
|  | Savi                           | 10 <sup>-6</sup> ...10 <sup>-9</sup> |

### 2.3 Pohjaveden johtomuodostumat

Pohjaveden johtomuodostumat (engl. aquifer) ovat pohjavettä sisältäviä, hyvin vettä johtavia maanpinnan alaisia maa- tai kalliomuodostumia. Vesi imeytyy sadannasta ja pohjavesistä maanpinnan läpi ja suotautuu ylempien kerrosten läpi johtomuodostumiin /2, 3/.

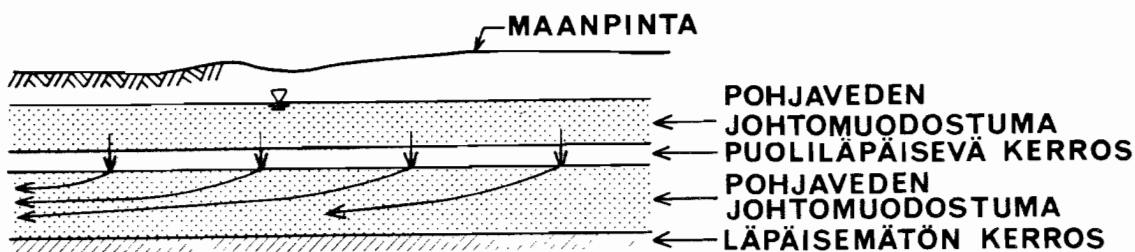
Pohjaveden johtomuodostumat jaetaan paineellisiin tai vapaisiin. Edellinen rajoittuu yläpinnastaan vettä läpäisemättömään maakerrokseen (esim. savi) ja jälkimmäisen yläpinta on vapaasti liikkuva, kuva 3.



Kuva 3. Erilaisia pohjaveden johtomuodostumia /2/.

Pohjavettä paineellisessa pohjaveden johtomuodostumassa kutsutaan salpavedeksi.

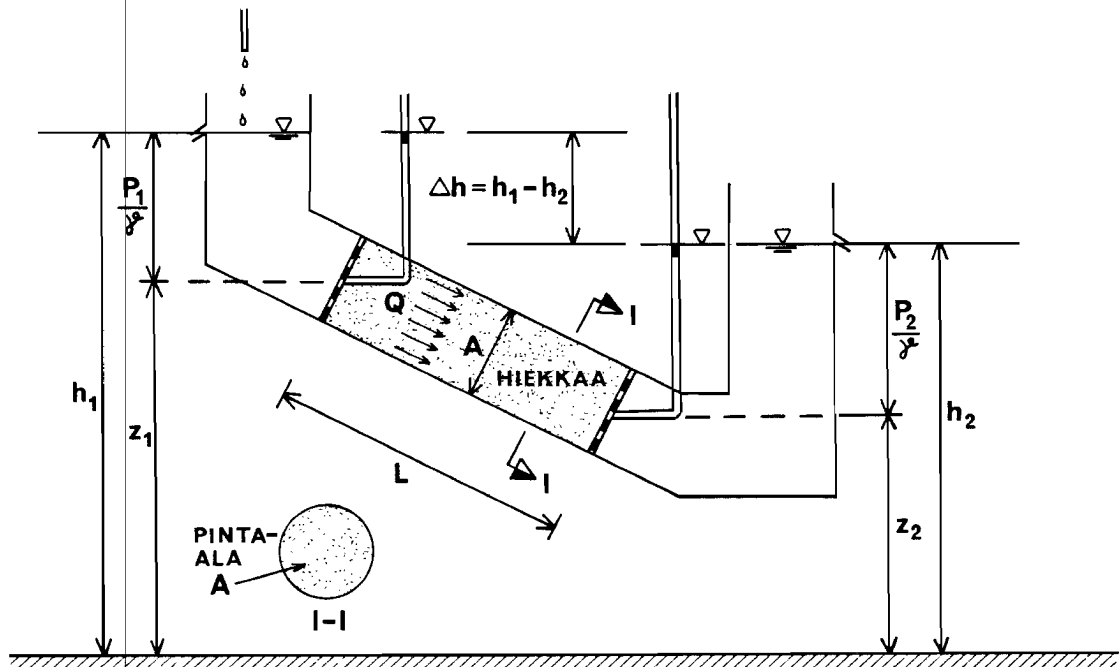
Paineellisen ja vapaan johtomuodostuman välillä esiintyy väli-muoto "vuotava pohjaveden johtomuodostuma" (leaky aquifer) /5/. Tällöin pohjavesi rajoittuu ylä- tai alapuolella olevaan puoliläpäisevään maakerrokseen, kuva 4.



Kuva 4. Veden virtaus puoliläpäisevän maakerroksen rajoittamassa pohjaveden johtomuodostumassa /5/.

## 2.4 Veden virtaus maaperässä

Darcyn lain mukaan on hiekkapilarin läpi kulkeva virtaama  $Q$  suoraan verrannollinen hiekkakerroksen poikkipinta-alaan  $A$  sekä hiekkakerroksen ylä- ja alapintoihin vaikuttavien vedenpaineiden korkeuseroon ( $h_1 - h_2$ ) ja kääntäen verrannollinen hiekkakerroksen vahvuuteen  $L$ , kuva 5.



Kuva 5. Suotovirtaus kaltevassa asennossa olevan sylinterin läpi /6/.

Darcyn laki voidaan ilmaista käyttäen kuvan 5 merkintöjä seuraavasti:

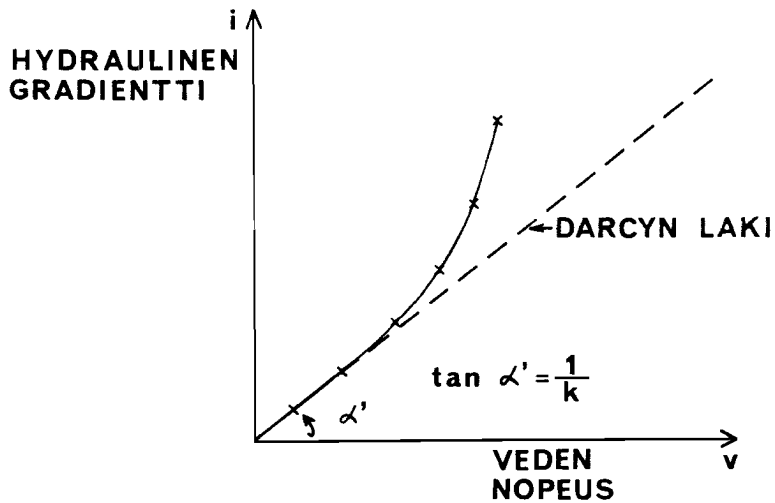
$$Q = k \cdot A (h_1 - h_2) / L \quad (4)$$

$$v = k(h_1 - h_2) / L = kJ \quad (5)$$

$v$  on virtaamanopeus

$k$  vedenläpäisevyys

Kun virtaamanopeus  $v$  kasvaa, muuttuu virtaus vähitellen turbulenttiseksi, jolloin  $q$ :n ja hydraulisen gradientin  $J$  riippuvuus poikkeaa Darcyn lain mukaisesta suoraviivaisesta riippuvuudesta, kuva 6.



Kuva 6. Hydraulisen gradientin riippuvuus virtaamanopeudesta.  
Periaatekuva /5/.

Luonnollisessa pohjaveden virtauksessa on virtausnopeus kuitenkin yleensä niin pieni, että Darcyn lakia voidaan soveltaa.

Tässä työssä on käsitelty pohjaveden virtausta paineellisessa johtomuodostumassa. Vettäjohtava maakerros on oletettu täysin veden kyllästämäksi, homogeeniseksi ja isotrooppiseksi, eli vedenläpäisevyys on virtaussuunnasta riippumaton kaikilla maakerroksessa, ts.  $k = k_x = k_y = k_z$ .

3. POHJAVEDEN ALENEMISTA AIHEUTTAVAT TEKIJÄT  
3.1 Sadannan vaikutus

Sade- ja sulamisvesistä maanpinnan läpi imeytyneestä vedestä osa haihtuu kasvillisuuden kautta takaisin ilmakehään ja osa suotautuu alaspäin pohjavesikerrokseen. Imeytynyt vesimäärä riippuu useista tekijöistä, kuten sadannan laadusta (lumi- tai vesisade), ajallisesta jakautumisesta, maaston muodosta, maanpinnan laadusta (luonnontilainen, päällystetty jne.), kasvillisuudesta, maanpinnan tilasta (kuivuus, routa) sekä ennen kaikkea maa- ja kallioperän vedenjohtavuudesta.

Suurin imeytymiskerroin (imeytyneen veden ja sademäärän suhde) on hiekka- ja sora- mailla 0.6 ... 0.8 /16/. Kertoimen arvo vaihtelee kuitenkin siten, että Etelä-Suomessa on mitattu arvoja 0.65 ... 0.78 /23/ ja Lapissa 0.42 ... 0.61 /13/.

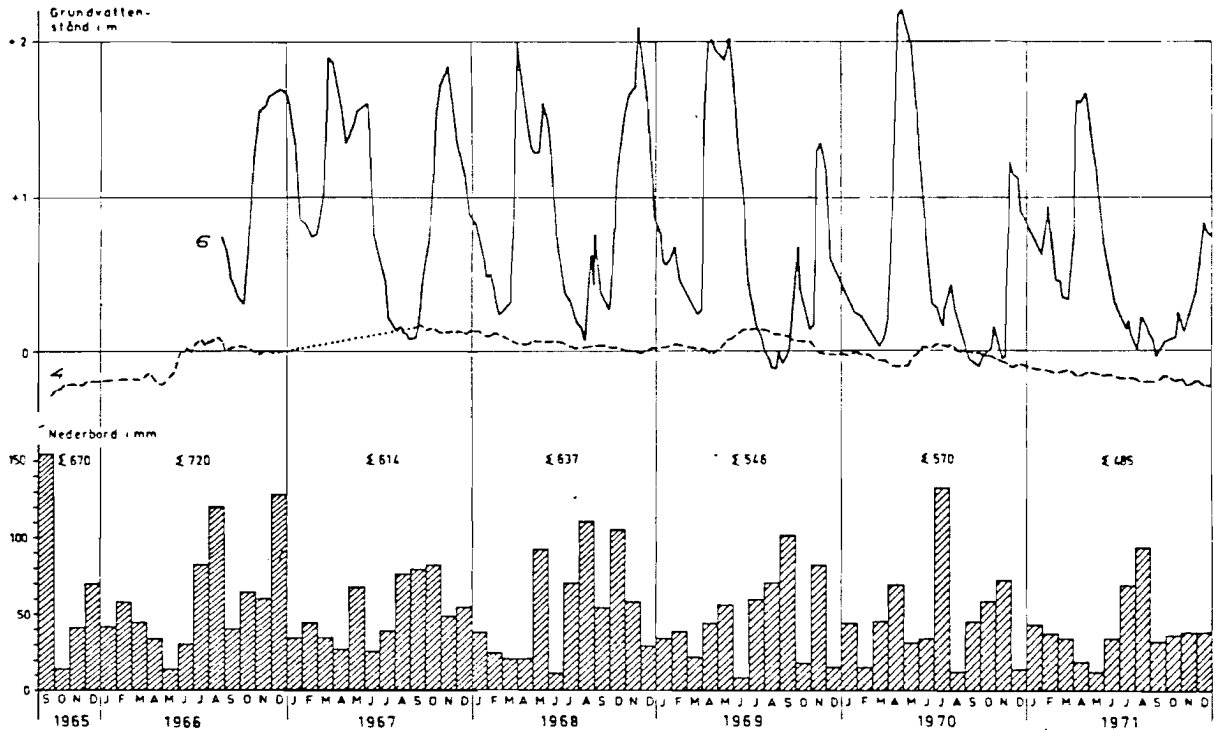
Savimaille tulevasta sadevedestä pääosa poistuu pintavesi- valuntana, eikä pohjavettä muodostu. Knutssonin ja Morfeldtin /16/ mukaan imeytymiskerroin on 0 ... 0.1.

Pohjavedenpinnan luonnollinen vuosivaihtelu riippuu muutoksista imeytyneen veden määrässä. Sadannan ja pohjavedenpinnan muutoksien välillä on viipymä, joka vaihtelee muutamasta tunnista useisiin kuukausiin. Aikaviipymän pituuteen vaikuttaa maan kosteuspitoisuus, vedenläpäisevyys, pohjavesialtaan muoto ja pohjavedenpinnan korkeus /3/, kuva 7.

Suomessa vuosisadanta on keskimäärin 500...700 mm. Yleensä elokuu on runsassateisin, niukkasateisimmat ovat helmi- ja maaliskuu. Kokonaissademäärä jakaantuu maantieteellisesti siten, että Etelä-Suomen rannikko on runsassateisin ja Lapin läänin pohjoisosa niukkasateisin.

Suomen sääolosuhteissa pohjavedenpinta nousee maksimikorkeutensa keväällä roudan ja lumen sulamisen yhteydessä. Kesän aikana pohjavesi laskee, haihtumisen ja kasvien vedentarpeen





Kuva 7. Pohjavedenpinnan vaihtelu paksussa hiekkaharjussa (4) ja moreenissa (6). Tärnsjö, Västmanland, Ruotsi /16/.

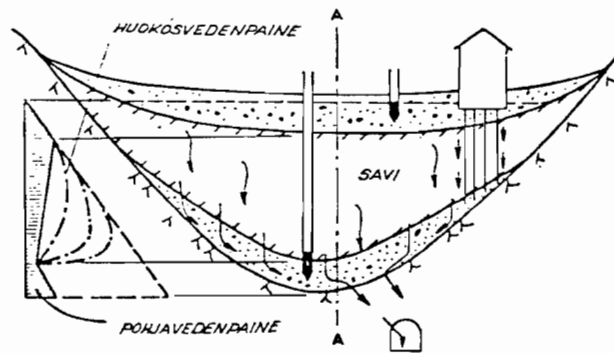
estäessä uuden pohjaveden syntymisen. Syksyllä kasvien vaikutuksen pienentyessä ja sateiden lisääntyessä muodostuu pohjavettä, ja maksimikorkeus saavutetaan marras- joulukuussa. Maan jäädyttyä pohjavesi taas laskee ennen keväistä huippuarvoa.

### 3.2 Rakentamisen vaikutus

Pohjavedenpinnan aleneminen kaupungeissa ja taajamissa on tällä hetkellä varsin yleinen ongelma, jonka pääasialliset syyt ovat:

- syvärakentamisen lisääntyminen
- kunnallistekniikan rakentaminen
- imeytysalueiden pieneneminen.

Pahimmat ovat seuraukset yleensä silloin, kun pehmeiköllä puhkaistaan pohjavesiallas, kuva 8. Tukholmassa on todettu monia tunnelitöiden yhteydessä sattuneita vahinkoja.



Kuva 8. Pohjavesi purkautuu paineellisesta pohjaveden johtomuodostumasta alla olevaan tunneliin /7/.

Esim. Karlaplanin /4/ alueella pohjaveden painetaso laski 6 m, mikä aiheutti 30 m paksussa savikerroksessa 30 cm painumat. Savikerroksen alla on noin 0.5 m paksu vettäläpäisevä pohjakerros. Huolimatta pienestä vuotovesimäärästä ( $600 \text{ m}^3$ ) ulottuivat vaikutukset laajalle alueelle.

Myös kunnallistekniikan rakentaminen on aiheuttanut eräissä tapauksissa pohjaveden alenemisen. Viemäreiden arinarakenteessa yleisesti käytetty sepeli toimii tehokkaana salaojana leikkautuessaan vettäjohtaviin maakerroksiin.

Kaupunkialueella päällystetään katuja ja pihoja, jolloin sadevesi johdetaan pois eikä se pääse imeytymään maaperään. Näin vähenee pohjaveden luonnollinen korvautuminen ja vedenpinta laskee vähitellen.

#### 4. POHJAVEDEN ALENEMISEN VAIKUTUS MAAPERÄÄN

##### 4.1 Huokosvedenpaineen muutos

Pohjaveden aleneminen aiheuttaa maapohjassa huokosveden ylipaineen, joka purkautuu konsolidaation kautta. Huokospaineen muutos jakaantuu maakerroksessa eri tavalla riippuen sen aiheuttajasta.

Tarkastellaan kahta, ehkä yleisimmin savikoilla vallitsevaa tilannetta, joista toinen on pintakuivatuksen ja toinen saven alta tapahtuvan kuivatuksen aiheuttama. Edellisessä voi aiheuttajana olla salaojitus tai viemäröinti, jälkimmäisessä yleensä tunnelityö tai syvällä olevan rakenteen kuivatus.

Pintakuivatuksen aiheuttama pohjaveden aleneminen synnyttää vedellä kyllästetyssä maassa huokosveden ylipaineen, jonka suuruus on:

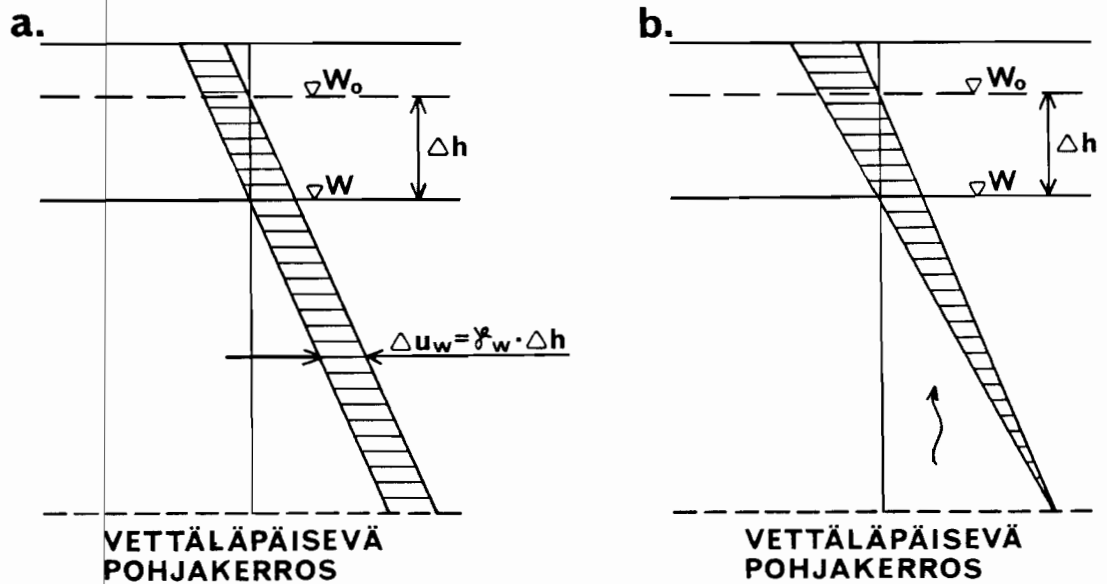
$$\Delta u_w = \gamma_w \cdot \Delta h \quad (6)$$

$\gamma_w$  on veden tilavuuspaino

$\Delta h$  pohjaveden alenema

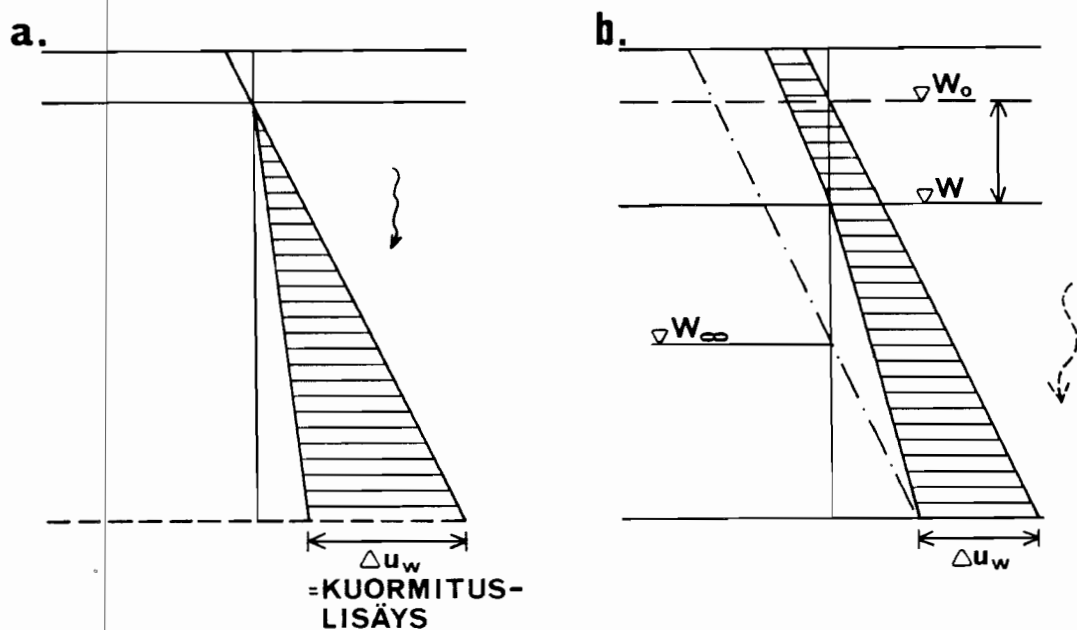
Jos vedenpaine alennuksen jälkeenkin jakaantuu hydrostaattisesti, vallitsee kuvassa 9a esitetty tilanne. Vettä läpäisevässä kerroksessa vallitseva vedenpaine riippuu kerroksen hydrostaattisesta vedenpaineesta. Pintakuivatuksesta huolimatta voi vedenpaine pohjakerroksessa pysyä muuttumattomana, jolloin syntyy hydrodynaaminen tapaus, jossa vettä virtaa hitaasti pohjakerroksesta ylöspäin, kuva 9b /10, 12/.

Lähellä sijaitsevan kalliotunnelin vesivuodot voivat alentaa hydrostaattisen vedenpaineen vettä läpäisevässä pohjakerroksessa siten, että siihen rajoittuvassa pehmeässä maakerroksessa tapahtuu huokosvedenpaineen muutos, kuva 10a. Huonosti vettä läpäisevässä maakerroksessa voi huokospaine pintakerroksissa pysyä muuttumattomana, jolloin maahan imeytyvä sadevesi korvaa alaspäin virtaavan veden /10, 12/.



Kuva 9. Pohjaveden alenemisesta aiheutuva huokosvedenpaineen muutos /12/.

Jos imeytymistä ei pääse tapahtumaan, alenee huokosvedenpaine vähitellen tasoon, joka vastaa pohjavedenpinnan hydrostaattista painetta, kuva 10b.



Kuva 10. Pohjaveden alenemisesta aiheutuva huokospaineen muutos, kun vedenpaine laskee vettäläpäisevässä pohjakerroksessa /12/.

## 4.2 Koheesiomaan kokoonpuristuminen

Sitä mukaa kun huokosveden ylipaine purkautuu, siirtyy kuormitus maarakeisiin ts. muuttuu tehokkaaksi jännitykseksi. Huokosveden poistuminen aiheuttaa maakerroksen kokoonpuristumisen, konsolidaation, jonka nopeus riippuu maan vedenläpäisevyydestä, paksuudesta ja kokoonpuristuvuudesta.

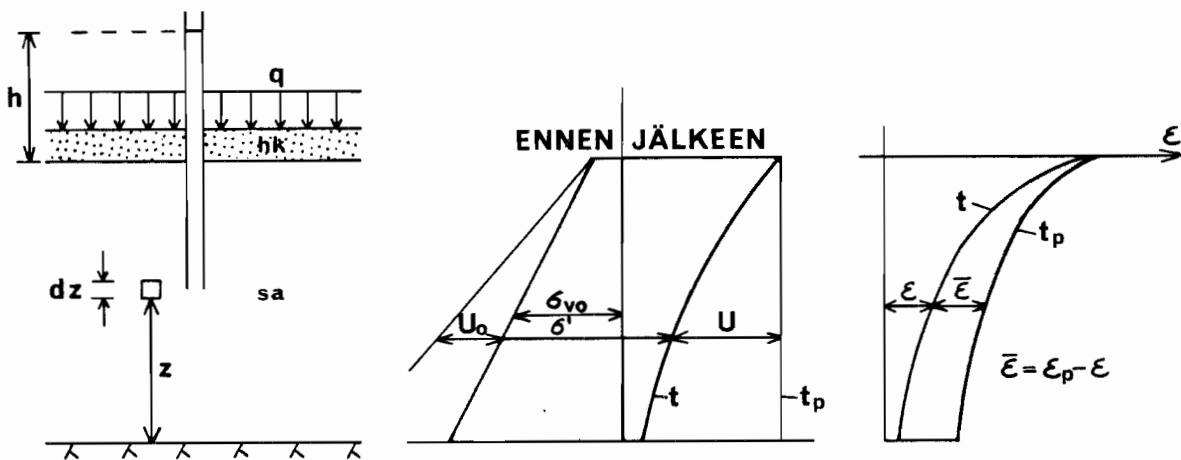
Janbun /14/ mukaan konsolidaatioprosessin nopeus riippuu jäännösmuodonmuutoksen gradientista  $\bar{\epsilon}$ , kuva 11.

$$\frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}}{\partial z^2} \quad (7)$$

$v$  on huokosveden virtausnopeus

$c_v$  konsolidaatiokerroin

$\bar{\epsilon}$  jäännösmuodonmuutos



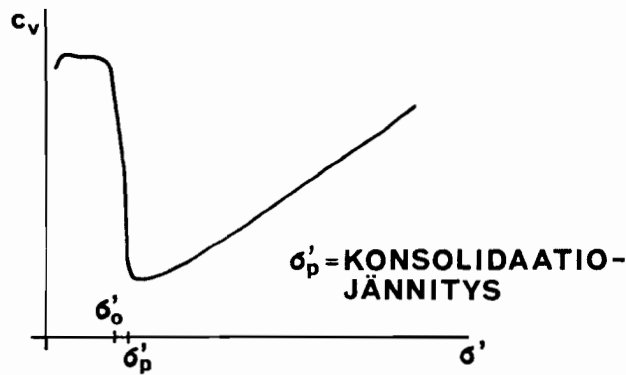
Kuva 11. Yksidimensioinen primaarikonsolidaatio. Periaatekuva /14/.

Konsolidaatiokerroin  $c_v$  on suoraan verrannollinen sekä vedenläpäisevyyteen  $k$  että kokoonpuristuvuusmoduuliin  $M$ :

$$c_v = \frac{kM}{\gamma_w} \quad (8)$$

$\gamma_w$  on veden tilavuuspaino

Kuvassa 12 on esitetty konsolidaatiokertoimen vaihtelu tehokkaan jännityksen funktiona. Siirryttäessä ylikonsolidoituneelta alueelta normaalikonsolidoituneelle alueelle pienenevät  $c_v$ :n arvot.



Kuva 12. Konsolidaatiokertoimen riippuvuus tehokkaasta jännitystilasta /14/.

Normaalikonsolidoituneella alueella lisääntyy kokoonpuristuminen, jolloin  $k$  pienenee ja  $M$  kasvaa. Tulo  $kM$  on joko miltei vakio tai lievästi kasvava /14/.

Konsolidaatiokertoimen määrittäminen tapahtuu ödometrikokeen tai kolmiakselikokeen avulla. Lähteessä /15/ on tarkemmin esitetty kertoimen määrittämisetavat. Koska  $c_v$  voimakkaasti riippuu vallitsevasta jännitystilasta, on oleellista, että se määritetään sille kuormitusvälille, joka vastaa maapohjassa vallitsevaa jännitystilaa.

Edellä mainitut painumisnopeuteen vaikuttavat tekijät voidaan yhdistää aikatekijään:

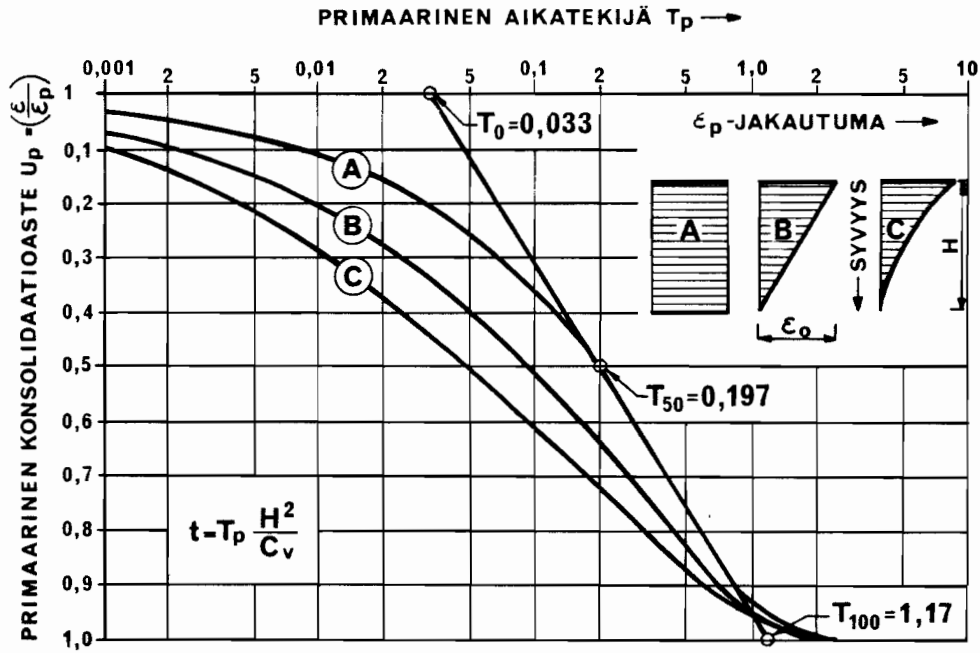
$$T_p = c_v \frac{t}{H^2} \quad (9)$$

$t$  on aika

$H$  huokosveden suurin virtausmatka

Konsolidaatioasteen ja aikatekijän välinen riippuvuus kolmen  $\epsilon$ - $z$  jakautuman tapauksessa esitetään kuvassa 13.

Tässä työssä on rakennusten A ja B, liite 1, painuma-aikoja laskettaessa käytetty tapausta A. Käytetyt kokoonpuristuvuusparametrit sekä laskentatulokset esitetään luvussa 7.



Kuva 13. Primaarisen konsolidaatioasteen ja aikatekijän välinen riippuvuus /14/.

## 5. POHJAVEDEN ALENEMISEN VAIKUTUSALUEEN LASKEMINEN

## 5.1 Laskentamenetelmät

Kun pohjavedenpintaa joudutaan työnaikaisesti tai lopullisesti laskemaan pohjarakennustöiden yhteydessä, on selvitettävä tästä mahdollisesti aiheutuvat vaikutukset ympäristöön. Pohjavedenpinnan aleneminen aiheuttaa maaperässä kuormituksen lisäyksen, joka pehmeikköalueilla johtaa maapohjan painumiseen ja rakenteiden mahdolliseen vaurioitumiseen. Puupaalujen lahoaminen ja kaivojen kuivuminen ovat myös välittömiä seurauksia pohjavedenpinnan alenemisesta. Suunnitteluvaiheessa onkin oleellista selvittää kuinka suuri aleneminen tulee olemaan ja kuinka laajalle se vaikuttaa.

Tässä työssä esitetään kaksi laskentamenetelmää, joita käytettiin pohjavesitilanteen tarkasteluun koepumppauksen aikana ja pohjavedenpinnan aleneman vaikutusalueen arvioimisen lopullisessa tilanteessa. Toinen menetelmä on analyyttinen ja perustuu Dupuitin approksimaatioon /9, 2, 26/ kun taas toinen on numeerinen laskentamenetelmä, jossa laskelmat on suoritettu elementtimenetelmän avulla. Pitkäaikaista tilannetta kuvaava havaintotuloksiin perustuva jälkilaskenta-analyysi on suoritettu numeerisesti.

Laskentakohteena on Puistolän aseman lähiympäristö. Alueella on tehty kaksi pääradan alitusta, Suuntimotien alikulkutunneli ja Puistolän asematunneli, joiden kuivatus on aiheuttanut pysyvän pohjavedenpinnan alenemisen.

Laskentayhtälöitä johdettaessa oletetaan, että pohjaveden johtomuodostuma on homogeeninen ja isotrooppinen sekä rajaton. Lisäksi tehdään olettaimus, että kaivot ulottuvat vettäjohtavan kerroksen pohjaan saakka.

## 5.2 Analyyttinen laskentamenetelmä

Soveltamalla Dupuit'n approksimaatiota /9/ saadaan paineellisessa pohjaveden johtomuodostumassa kuvitellun saaren keskipisteessä kaivon antoisuudeksi /2, 26/:

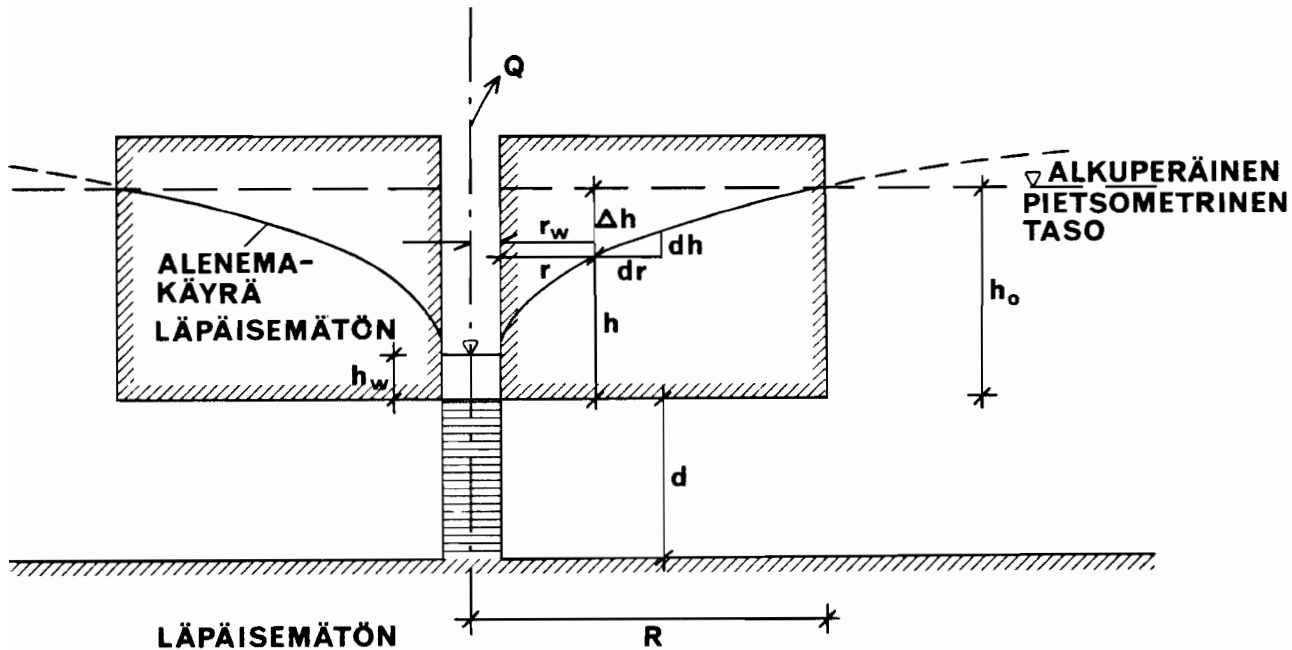


$$Q = Av = 2\pi rkd \frac{dh}{dr} \quad (10)$$

$r$  on etäisyys kaivosta

$k$  vedenläpäisevyys

$d$  salpavesikerroksen paksuus



Kuva 14. Pysyvä virtaus kaivoon paineellisessa pohjaveden johtomuodostumassa kuvitellulla ympyränmuotoisella saarella /27/.

Integroimalla yhtälö (10) rajaehdoilla, kuva 14

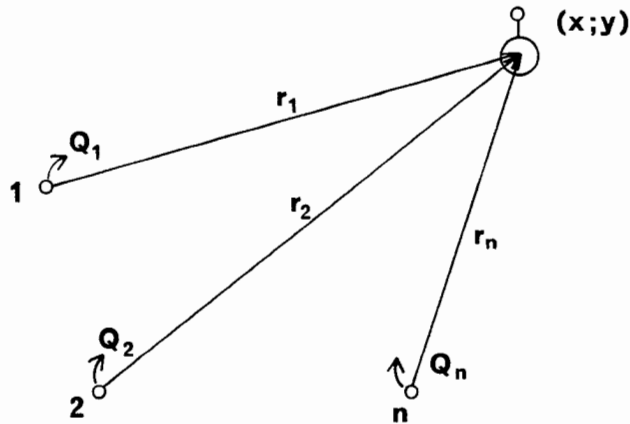
$h = h_w$ , kun  $r = r_w$  ja  $h = \Delta h + h_w$ , kun  $r = R$ , saadaan:

$$\Delta h = \frac{Q}{2\pi kd} \ln \left( \frac{R}{r_w} \right) \quad (11)$$

Tapauksessa, jossa on useampia kaivoja, saadaan havaintopisteessä  $(x, y)$ , jonka etäisyys pumppauskaivoista on  $r_i$  ( $i = 1 \dots n$  on kaivojen lukumäärä), yhtälön (11) mukaisesti, kuva 15.

$$\Delta h(x, y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i}{2\pi kd} \ln \frac{R}{r_i} \right) \quad (12)$$

$R$  on vaikutussäde



Kuva 15. Pumppauskaivojen etäisyys havaintopisteestä (x, y)

Kohteessa, jossa suoritetaan koepumppauksiin perustuva laskenta, voidaan määrittää vaikutussäde  $R$  ja maakerroksen keskimääräinen vedenläpäisevyys  $k$ , kun tunnetaan tasapainotilaa vastaavat alenemat havaintopisteissä ja pumppausasemien antoisuudet. Yhtälö (12) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\Delta h(x, y) = \frac{Q_{\text{kok}}}{2\pi kd} (\ln R - \ln \bar{r}) \quad (13)$$

$$Q_{\text{kok}} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (14)$$

$$\ln \bar{r} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\text{kok}}} \ln r_i \quad (15)$$

Merkitsemällä jokaisessa koepumppauksen havaintopisteessä alenema puolilogaritmiseen koordinaatistoon, jossa vaakakselilla on  $\ln \bar{r}$  ja pystyakselilla  $\Delta h(x, y)$ , voidaan piirtää regressiosuora, jonka yhtälö on muotoa:

$$\Delta h = A \ln \bar{r} + B \quad (16)$$

$$A = \frac{Q_{\text{kok}}}{2\pi kd} \quad (17)$$

Yhtälöstä (13) havaitaan, että kun  $r_i$  kasvaa, muuttuu  $\Delta h(x, y)$  lopulta negatiiviseksi. Pienin mahdollinen  $\Delta h(x, y)$  on kuitenkin 0, joten käytännössä oletetaan, että pumppauksen

vaikutussäde on  $R$ , kun

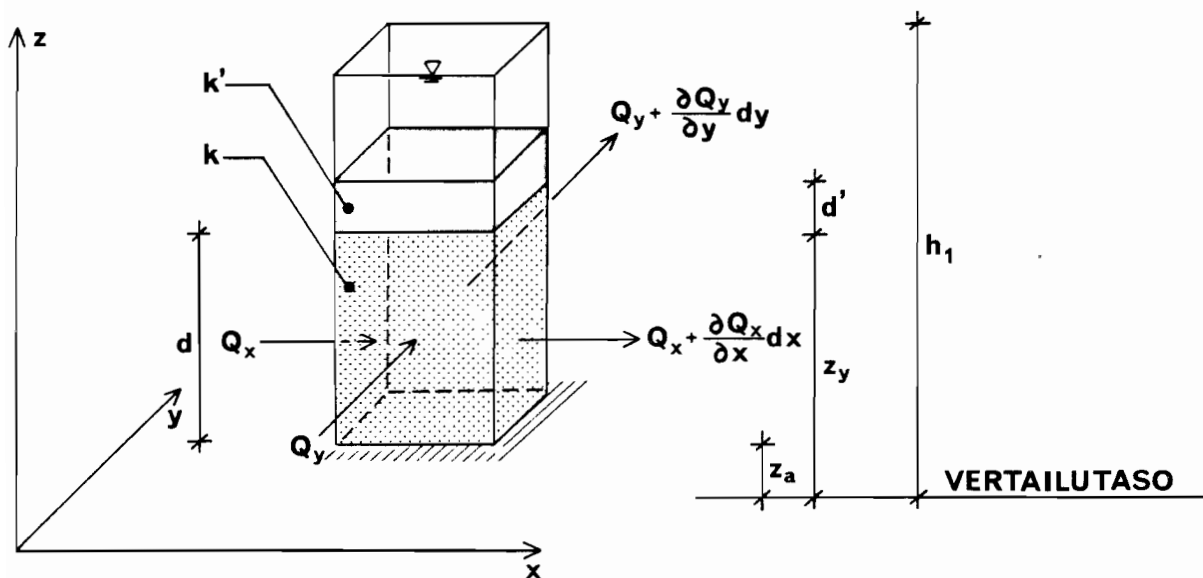
$$\Delta h(x, y) = 0, \text{ eli } \ln \bar{r} = \ln R = \frac{B}{A} \quad (18)$$

Koepumppauksen olisi kestettävä niin kauan, että saavutetaan tasapainotila, jolloin vedenpinnat havaintoputkissa eivät sanottavasti muutu. Tasapainotilanteen saavuttamiseen kuluva aika vaihtelee kohteesta riippuen. Vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän vedenläpäisevyys, pohjavesialtaan koko ja yhteydet toisiin altaisiin.

### 5.3 Elementtimenetelmään perustuva laskenta

#### 5.31 Menetelmän periaatteet

Tarkastellaan kaksidimensioista, paineellista pohjavesivirtausta homogeenisessa, isotrooppisessa vettä johtavassa kerroksessa. Oletetaan, että vettäjohtavaa kerrosta rajoittaa yläpinnassa puoliläpäisevä ja alapinnassa vettäläpäisemätön kerros, kuva 16.



Kuva 16. Maan tilavuusalkion tulo- ja menovirtaamat, kun paineellista pohjaveden johtomuodostumaa rajoittaa yläpinnassa puoliläpäisevä kerros.

Maan tilavuusalkion virtaamat toteuttavat yhtälön:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + v_z = 0 \quad (19)$$

$Q_x$  on virtaama x-suunnassa

$Q_y$  virtaama y-suunnassa

$v_z$  virtaamanopeus z-suunnassa

Darcyn lain mukaan on virtaamanopeus suoraan verrannollinen vedenläpäisevyyteen ja hydrauliseen gradienttiin. Virtaamanopeus puoliläpäisevän maakerroksen läpi voidaan kirjoittaa kuvan 16 merkintöjä käyttäen:

$$v_z = -k' \frac{h_1 - h}{d} \quad (20)$$

Vastaavasti saadaan  $v_x$ :n ja  $v_y$ :n määritelmät:

$$\begin{aligned} v_x &= -k \frac{\partial h}{\partial x} \\ v_y &= -k \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \quad (21)$$

Kun  $k$  on vakio kerroksen paksuuden yli, ovat virtaamat  $x$  ja  $y$  -suunnissa:

$$\begin{aligned} Q_x &= \int_{z_a}^{z_y} v_x dx \\ Q_y &= \int_{z_a}^{z_y} v_y dy \end{aligned} \quad (22)$$

Soveltamalla Dupuit'n /10/ otaksumaa, jonka mukaan painekorkeus  $h = h(x, y)$  saadaan:

$$\begin{aligned} Q_x &= \int_{z_a}^{z_y} -k \frac{\partial h}{\partial x} dz = -kd \frac{\partial h}{\partial x} \\ Q_y &= \int_{z_a}^{z_y} -k \frac{\partial h}{\partial y} dy = -kd \frac{\partial h}{\partial y} \end{aligned} \quad (23)$$

$$d = z_y - z_a$$

Sijoittamalla  $Q_x$ :n,  $Q_y$ :n ja  $v_z$ :n lausekkeet jatkuvuusyhtälöön 19 saadaan:

$$\frac{\partial}{\partial x}(kd \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(kd \frac{\partial h}{\partial y}) - \frac{k'}{d} (h_1 - h) = 0 \quad (24)$$

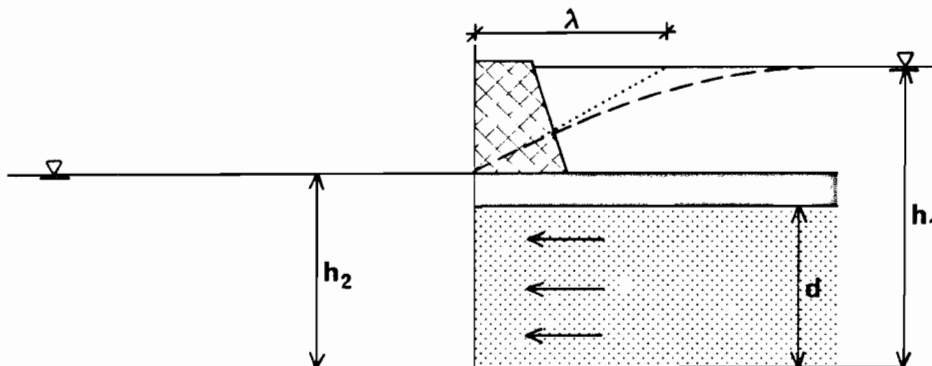
Merkitään erotusta  $h_1 - h = \Delta h$ , sekä oletetaan, että  $k$  ja  $d$  ovat vakioita, jolloin yhtälö 24 sievenee muotoon:

$$\frac{\partial^2(\Delta h)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta h)}{\partial y^2} - \frac{1}{\lambda^2} \Delta h = 0 \quad (25)$$

$\lambda = \sqrt{\frac{kd'd}{k'}}$  on ns. vuotokerroin /27/.

Osamäärä  $\frac{d'}{k'}$  on maakerroksen virtausvastus, josta käytetään merkintää  $c$ , jolloin voidaan kirjoittaa:

$$\lambda = \sqrt{kcd} \quad (26)$$



Kuva 17. suoraviivainen virtaus puoliläpäisevässä pohjaveden johtomuodostumassa /27/.

Suoraviivaisen virtauksen vallitessa puoliläpäisevässä pohjaveden johtomuodostumassa painekorkeus noudattaa vaimenevaa eksponentiaalista funktiota, joka on muotoa  $e^{-x/\lambda}$  /27/.

Kuvan 17 esittämässä yksiulotteisessa tapauksessa supistuu kaava (24) muotoon:

$$\frac{d^2(\Delta h)}{dx^2} - \frac{kd}{c} \Delta h = 0 \quad (27)$$

Yhtälön ratkaisu on:

$$h = h_1 - \Delta h_1 e^{-x/\lambda} \quad (28)$$

$\Delta h_1 = h_1 - h_2$ , kuva 17.

Tässä työssä ratkaistaan differentiaaliyhtälö (24) elementtimenetelmällä. Laskelmissa käytetään verkon reunoilla ehtoa  $h = h_1$ . Oletetaan siis, että painekorkeus elementtiverkon reunoilla pysyy muuttumattomana. Tästä syntynyttä virhettä pyritään korjaamaan em. virtausvastuksen avulla. Kaavasta (28) voidaan havaita, että kun puoliläpäisevän kerroksen virtausvastus  $c$  kasvaa, jyrkkenee pohjaveden aleneman märkäviiva, kuva 17, ts. aleneman vaikutusetäisyys lyhenee.

### 5.32 Elementtimenetelmäyhtälöt

Differentiaaliyhtälön (24) approksimoimiseksi elementtimenetelmällä kirjoitetaan se ensin muotoon:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( kd \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kd \frac{\partial h}{\partial y} \right) + P^* = 0 \quad (29)$$

$$P^* = \frac{1}{c} (h_1 - h) \quad (30)$$

Yhtälö kuvaa kaksidimensioista stationääristä suotovirtausta homogeenisessa, isotrooppisessa vettäjohtavassa kerroksessa, jota yläpinnasta rajoittaa puoliläpäisevä maakerros. Aallon /1/ ja Zienkiewiczin /29/ mukaan voidaan yhtälö (29) kirjoittaa matriisimuotoon:

$$\tilde{K}^* \tilde{H} = \tilde{R}^* \quad (31)$$

$$\tilde{K}^* = \int_A kd (\nabla \tilde{\psi})^T \nabla \tilde{\psi} dA \quad (32)$$

$$\tilde{R}^* = \int_A P^* \tilde{\psi} dA = \int_A \frac{1}{c} \tilde{\psi} H dA \quad (33)$$

$\nabla$  on operaattorimatriisi

$\tilde{\psi}$  muotofunktio matriisi

Sijoittamalla matriisit  $K^*$  ja  $R^*$  yhtälöön (31) saadaan differentiaaliyhtälöä (29) approksimoiva yhtälöryhmä, eli

$$\tilde{K}H = \tilde{R} \quad (34)$$

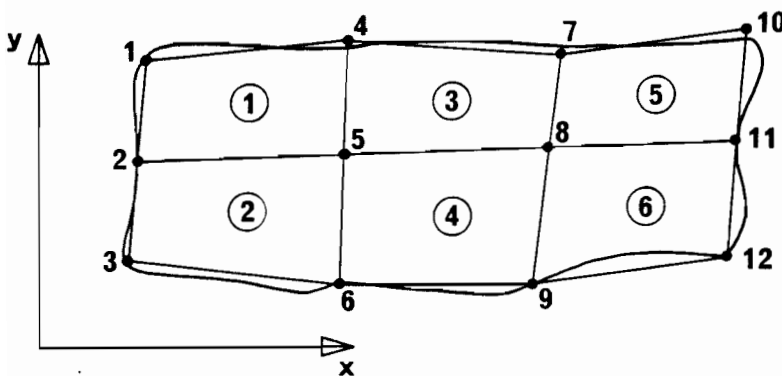
$$\tilde{K} = \int_A k d(\nabla \tilde{\psi})^T \nabla \tilde{\psi} dA + \int_A \frac{1}{c} \tilde{\psi}^T \tilde{\psi} dA \quad (35)$$

$$\tilde{R} = \int_A \frac{1}{c} \tilde{\psi}^T h_1 dA \quad (36)$$

### 5.33 Elementtiverkon laatiminen

Laskelmaa valmisteltaessa muodostetaan karttapohjalle suorien viivojen avulla elementtiverkko. Kussakin elementissä on neljä solmupistettä. Solmupisteet numeroidaan juoksevasti siten, että kunkin elementin solmupisteiden numeroiden suurin erotus on mahdollisimman pieni, kuva 18. Solmupisteille määritetään x- ja y-koordinaatit joko yksitellen tai generoimalla suurempia määriä. Vettä johtavan kerroksen paksuus eli z-koordinaatti annetaan kussakin solmupisteessä.

**ELEMENTTIEN LUKUMÄÄRÄ 6**  
**SOLMUPISTEIDEN LUKUMÄÄRÄ 12**  
**NAUHALEVEYS 5**



Kuva 18. Elementtiverkko.

Kuten kohdassa 5.31 todetaan, käytetään kaikkialla verkon reunoilla ehtoa  $h = 0$ . Stationäärisessä suotovirtauksessa voidaan merkäviivan asema sovittaa havaintotuloksiin sopivaksi esim. seuraavilla tavoilla:

- a) Haetaan kokeilemalla sen muotoinen ja kokoinen verkko, joka toteuttaa havaintotulokset parhaiten.
- b) Laaditaan niin suuri verkko, että sen reunoilla varmasti pätee ehto  $h = 0$ , liite 2, ja otetaan käyttöön kuviteltu puoliläpäisevä kerros, jonka virtausvastusta  $c$  muuttamalla sovitetaan laskentatulokset havaittuihin.

Maan keskimääräinen vedenläpäisevyys määritetään laskemalla havaittujen ja arvolla  $k = 1$  laskettujen alenemien neliösumma, jonka minimi toteutuu keskimääräisen vedenläpäisevyyden arvolla, eli

$$s = \sum_{i=1}^n (\Delta h_i^{\text{hav}} - \frac{1}{k} \Delta h_i^{\text{lask}})^2 = \min \quad (37)$$

$$\frac{ds}{d(\frac{1}{k})} = \sum_{i=1}^n 2(\Delta h_i^{\text{hav}} - \frac{1}{k} \Delta h_i^{\text{lask}}) \Delta h_i^{\text{lask}} = 0$$

$$\Rightarrow k = \frac{\sum (\Delta h_i^{\text{lask}})^2}{\sum \Delta h_i^{\text{hav}} \Delta h_i^{\text{lask}}} \quad (38)$$

$s$  on neliösumma

$\Delta h_i^{\text{hav}}$  pumppauksen aikana havaittu painetason muutos pisteessä 1

$\Delta h_i^{\text{lask}}$  arvolla  $k = 1$  m/s laskettu painetason muutos havaintopisteessä  $i$

$k$  keskimääräinen vedenläpäisevyys, m/s

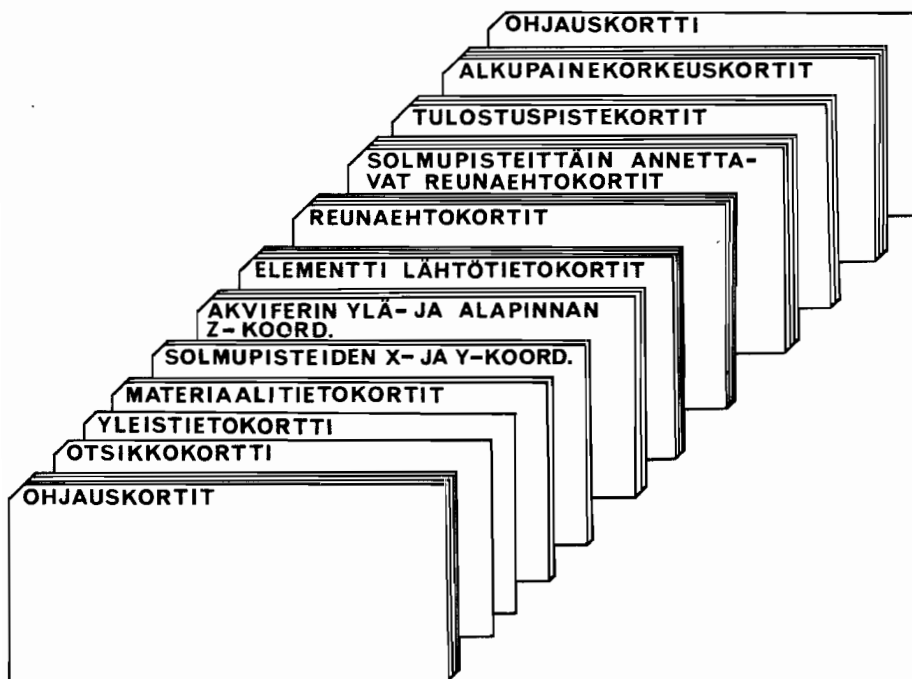
Laskelmasta saadaan keskimääräinen vedenläpäisevyys  $k$ , joka toteuttaa havaitut painetason muutokset pienimmän neliösumman mielessä parhaiten. Tällä tavoin määritetty vedenläpäisevyys on karkea keskiarvo alueen todellisista vedenläpäisevyysominaisuuksista.

Tietokonelaskelma suoritetaan siis kahdesti: ensin määritetään keskimääräinen vedenläpäisevyys, jota käyttäen laskelma suoritetaan uudestaan.



### 5.34 Tietokone- ja piirtämisohjelma

Laskelmia varten kehitettiin UNIVAC 1108 tietokoneelle FORTRAN V kielinen ohjelma probleeman ratkaisemiseksi. Se saatiin aikaan pienin muutoksin DI Jukka Aallon tekemästä ohjelmasta /1/. Ohjelma ratkaisee stationäärista suotovirtausta kuvaavan differentiaaliyhtälön (29) elementtimenetelmällä käyttäen laskentayhtälöinä yhtälöryhmää (34).



Kuva 19. Ajopakan rakenne.

Ohjelman lisätiedot syötetään reikäkorteilla, kuva 19. Lähtötietojen tarkka sisältö on esitetty lähteessä /1/. Ohjelma tulostaa rivikirjoittimelle ajon otsikon, lukumäärätiedot, materiaalitiedot, solmupisteiden x- ja y-koordinaatit, vettäjohtavan kerroksen paksuuden solmupisteittäin, elementtiedot, reunaehdot, tulostussolmut, solmupaine korkeudet, solmuvirrat sekä paine korkeudet tulostuspisteissä.

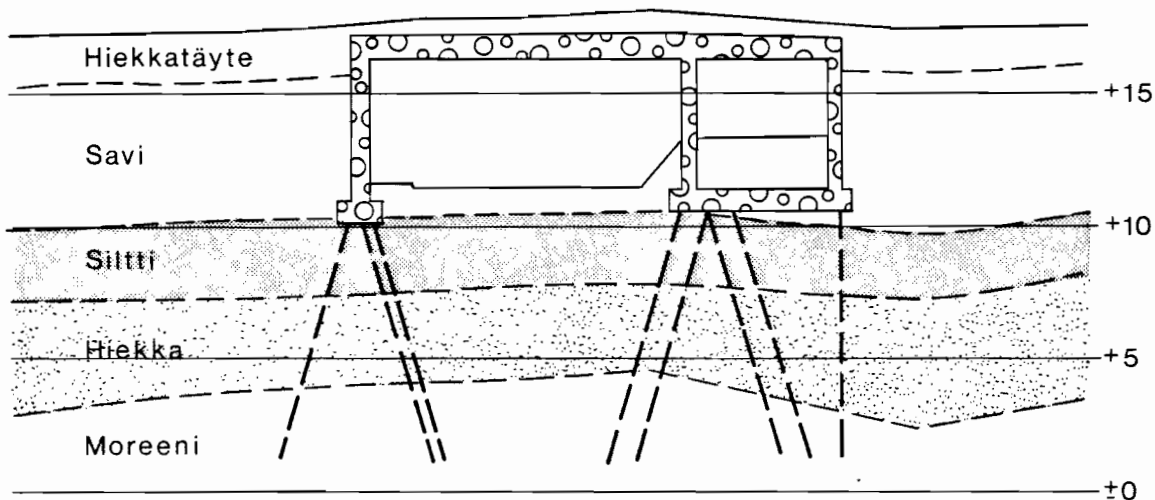
Graafinen tulostus suoritettiin TKK:n mekaniikan laitoksella kehitetyllä elementtipiirturiohjelmalla /19/. Ohjelmaa käytetään osituskäytössä näyttöpäätteen ja piirturin avulla. Ohjelmalla voidaan piirtää solmupisteet, elementit, pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät sekä vettäjohtavan kerroksen paksuuskäyrät.

Piirturin piirtämästä kuvasta voidaan tarkistaa lähtötiedot sekä löytää tulostuksen mahdolliset virheet helpommin kuin rivikirjoittimen listauksesta.

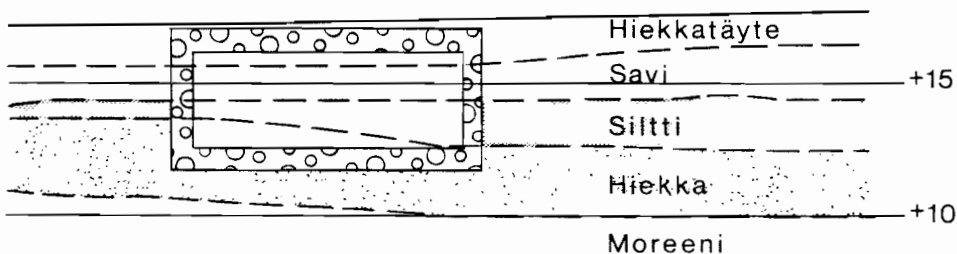
6. KOKEMUKSIA POHJAVEDENPINNAN ALENEMISESTA KAHDEN  
ALIKULKUTUNNELIN RAKENTAMISEN YHTEYDESSÄ

6.1 Kohteen toteuttamistapa ja alueen pohjasuhteet

Helsingin Puistolan rautatieaseman lähiympäristö on tyypilistä, pääasiassa 1960-luvulla savialueelle rakennettua pientaloaluetta. Asemanseudun liikenneyhteyksien parantamiseksi päätettiin rakentaa pääradan alitukset Puistolan aseman ja Suuntimotien kohdalle, LIITTEET 1 ja 2. Koska tuolloin (v. 1974 - 1975) pohjavettä alentamattomat rakenneratkaisut arvioitiin 4.15...5.45 milj. markkaa kalliimmaksi, päätettiin alikulkutunnelit toteuttaa pohjavettä alentavina ratkaisuksina, kuvat 20 ja 21.



Kuva 20. Puistola. Leikkaus Suuntimotien alikulkutunnelista.

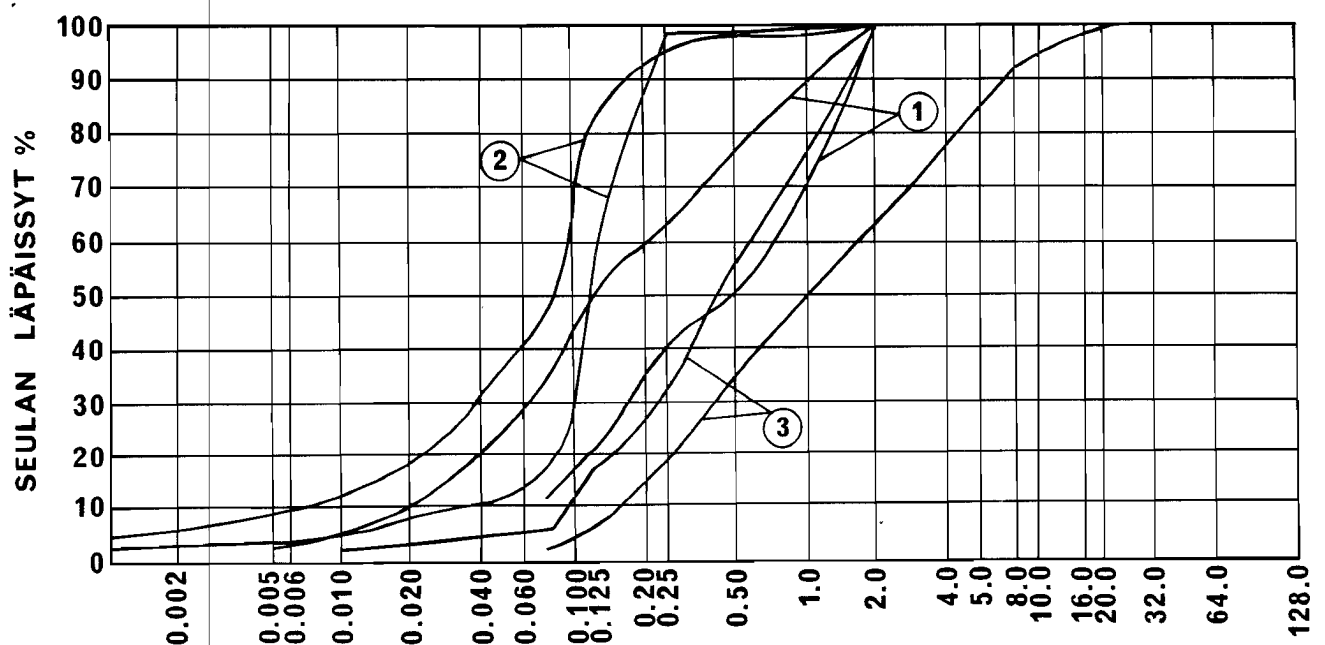


Kuva 21. Puistola. Leikkaus asematunnelista.

Kaupunginhallitus edellytti kuitenkin pohjavedenpinnan laskun sekä sen alueen ympäristölle ja kiinteistöille aiheuttamien vaurioiden seurantatarkkailua rakennustyön aikana ja sen jälkeen.

Suuntimotien alikulkutunnelin kuivatustaso on n. 4.5 m alkuperäistä pohjavedenpintaa alempana. Kuivatusjärjestelmä rajoittuu alapuolella noin 2 m paksuun silttikerrokseen. Asema-tunnelin kuivatustaso on noin 3.5 m alkuperäisen pohjavedenpinnan alapuolella. Kuivatus tapahtuu hyvin vettäläpäisevästä hiekkakerroksesta.

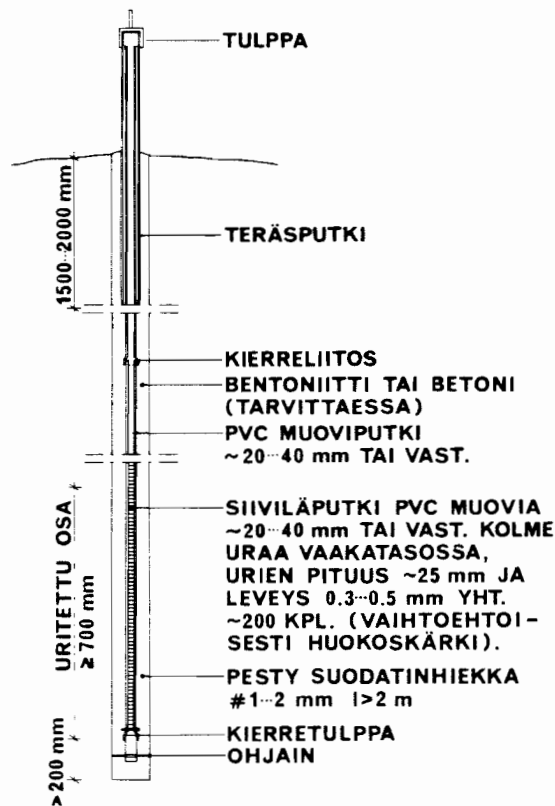
Alikulkutunnelien rakentamisen vaikutusalueella on noin 0.3 ... 0.5 m paksu humusmaakerros. Alla on savikerros, jonka paksuus vaihtelee rajoissa 2...7 m. Saven vesipitoisuus on välillä 40...115 % ja siipikairalla mitattu leikkauslujuus  $7.5...20 \text{ kN/m}^2$ . Saven alla on 1...4 m paksu silttikerros, jossa esiintyy ohuita vettäjohtavia hiekkakerroksia. Siltin alla on hiekkakerros, jonka paksuus vaihtelee 0...3 m. Liitteessä 1 esitetyjen koepumppausasemien A1, A2 ja A3 kohdilta otettujen maanäytteiden rakeisuuskäyrät esitetään kuvassa 22.



Kuva 22. Puistola. Vettäjohtavasta kerroksesta määritetyt rakeisuuskäyrät. Näytteet on otettu pumppausasemien A1, A2 ja A3 kohdilta.

## 6.2 Pohjavedenpinnan tarkkailujärjestelmä

Helsingin kaupungin geotekninen osasto on vuosina 1973...1975 rakentanut Suuntimotien ja Puistolän asematunnelin ympäristöön 23 pohjavesihavaintoputkea. Pohjaveden painetason tarkkailuun käytetään pieniläpimittaisia havaintoputkia 19...33 mm, joissa on siivilä- tai huokoskärki, kuva 23. Pääosa havaintoputkista asennettiin vuonna 1975 koepumppauksen yhteydessä. Havaintoputkien sijainnit esitetään liitteessä 1.

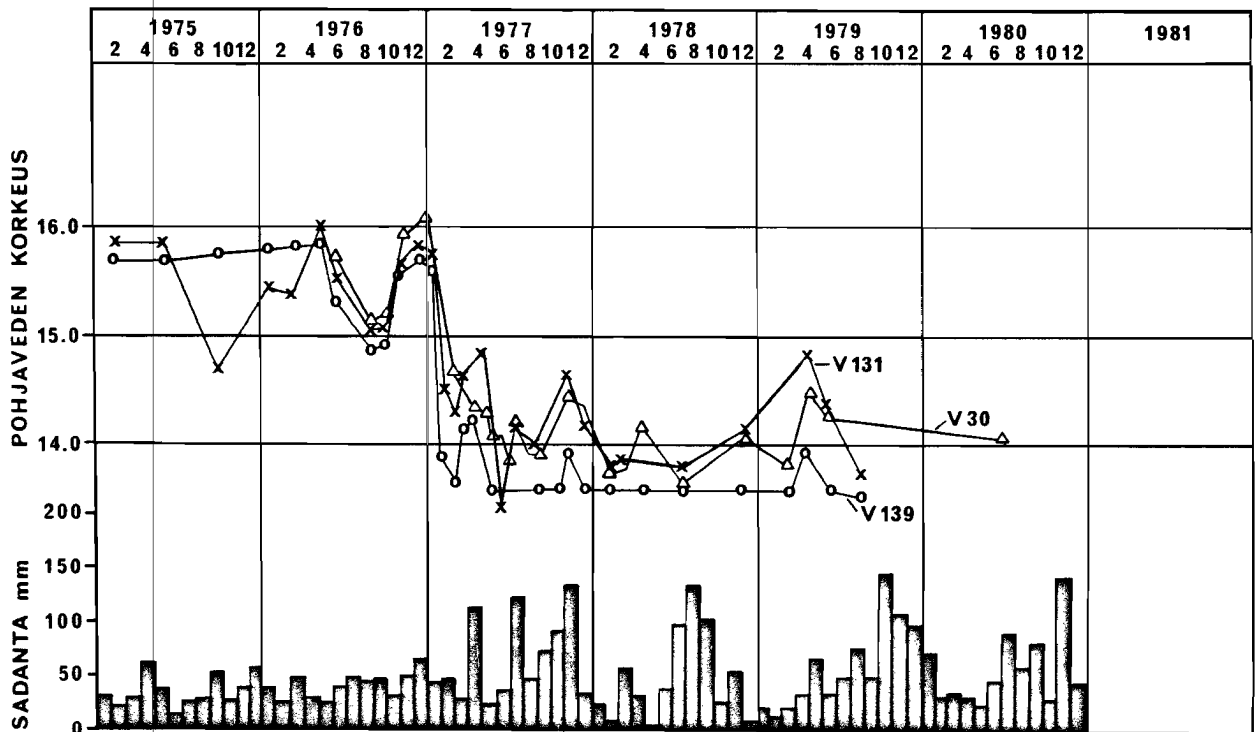


Kuva 23. Pohjaveden havaintoputki pitkäaikaista tarkkailua varten /20/.

Koepumppauksen aikana suoritettiin mittaukset kolmasti viikossa. Lopullista tilannetta silmälläpitäen suoritettiin vesihavainnot rakennustöiden aikana sekä jonkin aikaa niiden jälkeen kahdesti kuukaudessa. Havainnot on tallennettu Geoteknisen osaston pienoistietokoneen levymuistiin.

## 6.3 Painetasen kehitys tarkkailun aikana

Pohjaveden painetasen vaihtelu kolmessa havaintopisteessä on esitetty kuvassa 24.



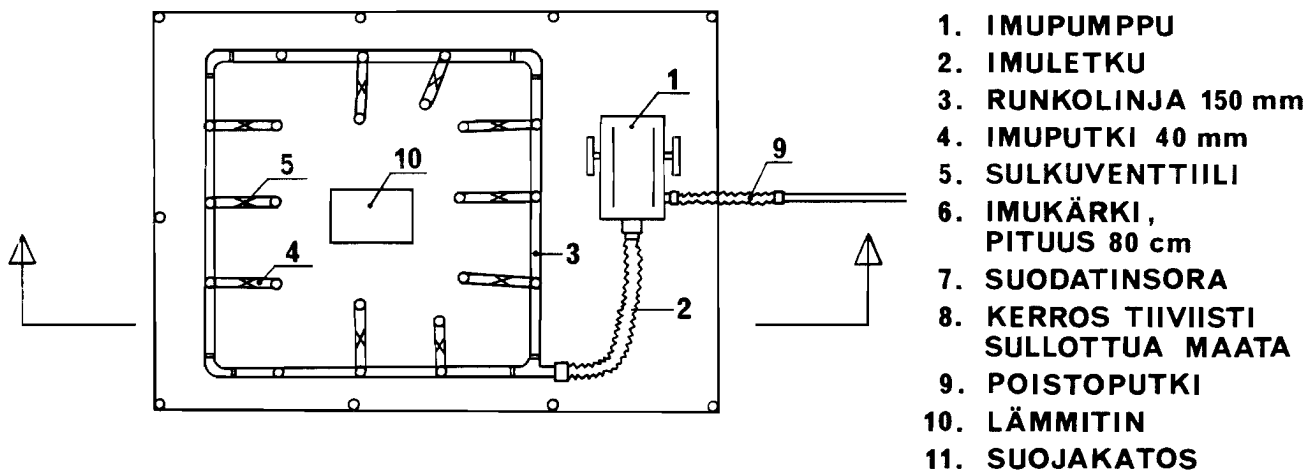
Kuva 24. Puistolán asemanseudun pohjavesihavaintojen tulokset 1973...1980. Sademäärä on mitattu Malmin säähavainto-  
asemalla.

Sateiden ja vuodenaikojen aiheuttamat vaihtelut painetasossa ovat selvästi havaittavissa. Vuosien 1976 ja 1977 vaihteessa on pohjavedenpinta laskenut. Alikulkujen rakentamisen lisäksi on painetasoon vaikuttanut kaksi huomattavan vähäsateista vuotta.

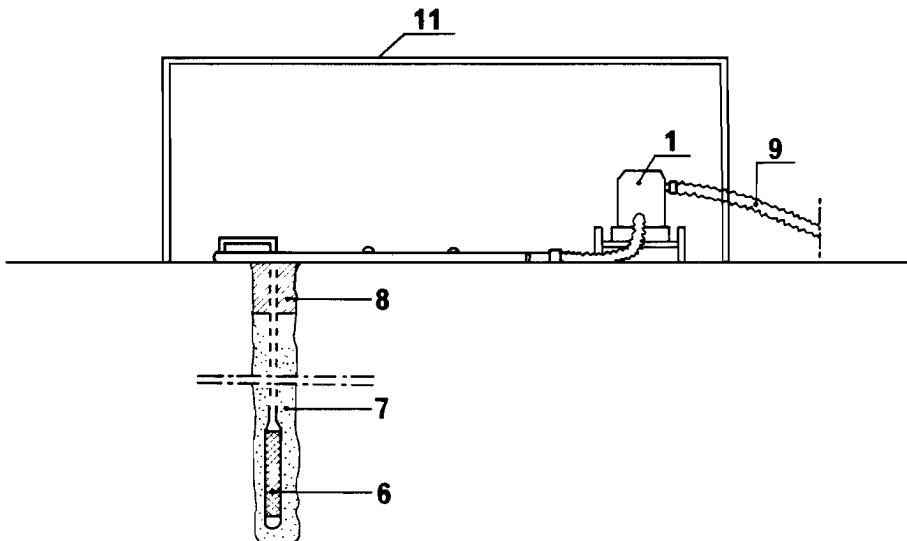
## 6.4 Koepumppauksiin perustuvat ratkaisut

## 6.41 Koepumppaukset

Koepumppaukset suoritettiin sekä Puistolán asematunnelin että Suuntimotien alikulun kohdalla yhteensä 3 pisteessä 24.2.1975 ja 26.3.1975 välisenä aikana (Liite 1). Pumppauskalustona käytettiin dieselkäyttöistä Millar Wellpoint kalustoa. Periaatekuva pumppausasemasta esitetään kuvassa 25.



### LEIKKAUS



Kuva 25. Puistolän asemanseudun pohjavesiselvitykseen käytetty pumppauskalusto.

Käytettyjen siiviläkärkien sisähalkaisija oli  $\varnothing$  50 mm ja siiviläosan pituus 0.80 m. Pumppauksessa käytetty alipaine vaihteli välillä 8...9 kPa.

Asemalla 1 aloitettiin pumppaus 24.2.1975. Huonon vedentulon vuoksi asemalle lisättiin 14.3.1975 viisi imukärkeä. Pumppu pysäytettiin 23.3.1975. Vuorokauden tauon jälkeen pumppausta jatkettiin 26.3.1975 asti.

Asemalla 2 alkoi pumppaus 27.2.1975. Pumppauksessa pidettiin tauko 20.3.1975...24.3.1975. Pumppaus lopetettiin 26.3.1975.

Asema 3 käynnistettiin 6.3.1975 ja pysäytettiin seuraavan ker-  
ran 20.3.1975. Pumppausta jatkettiin 24.3.1975 ja se lopetet-  
tiin 26.3.1975.

Pumppausasemien virtaama mitattiin 200 l tynnyrin täyttymi-  
seen kuluvana aikana. Vesimäärämittaukset suoritettiin välit-  
tömästi pumpun käynnistyttyä sekä sen jälkeen kolmesti vii-  
kossa.

Pohjavedenpinnan korkeushavainnot suoritettiin sähköisellä  
paristokäyttöisellä mittanaturilla, jolla saavutettava tark-  
kuus on  $\pm 10$  mm. Pohjaveden korkeushavainnot tehtiin kolmesti  
viikossa.

Taulukoissa 2 ja 3 esitetään koepumppaustulokset.

Taulukko 2. Puistola. Virtaamamittaustulokset koepumppaus-  
asemilla (l/min).

| Päivä-<br>määrä | Pumppausasemat |       |       |
|-----------------|----------------|-------|-------|
|                 | A1             | A2    | A3    |
| 24.2            | 17.39          | -     | -     |
| 25.2            | 17.39          | -     | -     |
| 26.2            | 19.05          | -     | -     |
| 27.2            | 20.00          | 40.00 | -     |
| 28.2            | 20.00          | 33.33 | -     |
| 1.3             | 22.22          | -     | -     |
| 4.3             | 18.40          | 50.66 | -     |
| 6.3             | 18.18          | 50.00 | 50.66 |
| 8.3             | 18.69          | 41.67 | 57.14 |
| 11.3            | 17.94          | 25.01 | 41.55 |
| 12.3            | 16.26          | 24.10 | 37.04 |
| 13.3            | 20.02          | 41.61 | 32.80 |
| 15.3            | 28.07          | 46.51 | 32.26 |
| 18.3            | 27.03          | 45.81 | 40.90 |
| 20.3            | 25.97          | 51.28 | 37.74 |
| 25.3            | 30.41          | 54.05 | 33.90 |
| 26.3            | 27.40          | 52.63 | 35.09 |

← Pysäytetty mittauk-  
sen jälkeen



Taulukko 3. Puistola. Pohjavedenpinnan painetaso havaintopisteissä  
koepumppauksen aikana.

| Havaintoputki<br>no | 24.2  | 26.2  | 28.2  | 3.3   | 5.3   | 7.3   | 10.3  | 12.3  | 14.3  | 17.3  | 19.3  | 20.3  | 21.3  | 22.3  | 24.3  | 25.3  | 26.3  | 1.4   |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V 32                | 16.07 | 16.07 | 15.51 | 15.83 | 15.33 | 15.28 | 15.65 | 15.65 | 15.36 | 15.38 | 15.32 | 15.21 | 15.99 | 16.01 | 16.06 | 15.24 | 15.14 | 16.24 |
| V 34                | 16.16 | 16.15 | 15.92 | -     | 15.73 | 15.79 | 16.06 | 16.07 | 15.92 | 15.99 | 15.90 | 15.86 | 16.15 | 16.16 | 16.18 | 15.83 | 15.78 | 16.34 |
| V 42                | 16.19 | 16.19 | 15.96 | 16.10 | 15.80 | 15.82 | 16.05 | 16.06 | 15.92 | 16.01 | 15.92 | 15.85 | 16.16 | 16.20 | 16.21 | 15.86 | 15.82 | 16.38 |
| V 43                | -     | -     | -     | 15.99 | 14.28 | 14.05 | 14.99 | 15.09 | 14.37 | 14.26 | 14.23 | 14.10 | 15.92 | 16.01 | 16.03 | 14.20 | 14.11 | 16.16 |
| V 44                | 16.08 | 16.08 | 15.28 | 15.93 | 15.06 | 15.13 | 15.58 | 15.62 | 15.23 | 15.22 | 15.14 | 15.03 | 16.04 | 16.06 | 16.09 | 15.08 | 15.03 | 16.23 |
| V 45                | 16.11 | 16.10 | 15.52 | 16.03 | 15.39 | 15.45 | 15.78 | 15.82 | 15.55 | 15.56 | 15.51 | 15.43 | 16.03 | 16.09 | 16.13 | 15.47 | 15.42 | 16.27 |
| V 46                | -     | 15.83 | 15.14 | 15.75 | 14.49 | 14.41 | 14.87 | 14.95 | 14.45 | 14.39 | 14.34 | 14.25 | 15.53 | 15.64 | 15.68 | 14.29 | 14.19 | 15.80 |
| V 332               | -     | -     | -     | -     | 15.37 | 14.99 | 15.08 | 15.03 | 14.81 | 14.92 | 14.50 | 14.57 | 15.08 | 15.13 | 15.00 | 14.50 | 14.45 | 15.18 |
| V 333               | -     | -     | 15.03 | -     | 14.92 | 13.97 | 14.34 | 14.19 | 13.84 | 13.92 | 13.82 | 13.76 | 15.32 | 15.38 | 15.39 | 13.89 | 13.84 | 15.54 |
| V 337               | -     | -     | -     | -     | 15.36 | 15.29 | 15.46 | 15.41 | 15.25 | 15.43 | 15.31 | 15.25 | 15.46 | 15.44 | 15.35 | 15.15 | 15.11 | 15.61 |
| V 341               | -     | -     | 15.23 | -     | 15.18 | 15.03 | 15.17 | 15.13 | 15.02 | 15.12 | 15.03 | 14.98 | 15.31 | 15.35 | 15.33 | 15.01 | 14.97 | 15.49 |
| V 331               | -     | -     | 15.31 | -     | 15.24 | 13.73 | 13.97 | 13.84 | 13.52 | 13.61 | 13.44 | 13.48 | 15.40 | 15.43 | 15.40 | 13.55 | 13.51 | 15.58 |
| V 330               | 15.64 | 15.63 | 15.28 | -     | 15.53 | 13.40 | 13.49 | 13.04 | 12.70 | 12.82 | 12.69 | 12.69 | 15.34 | 15.45 | 15.45 | 12.88 | 12.78 | 15.67 |
| V 131               | 15.87 | 15.80 | 15.60 | 15.72 | 15.44 | 15.45 | 15.66 | 15.73 | 15.50 | 15.50 | 15.20 | 15.16 | 15.69 | 15.75 | 15.76 | 15.27 | 15.17 | 15.88 |
| V 132               | 15.66 | 15.64 | 15.52 | 15.55 | 15.38 | 15.40 | 15.52 | 15.60 | 15.39 | 15.38 | 15.10 | 15.10 | 15.51 | 15.56 | 15.55 | 15.06 | 14.98 | 15.67 |
| V 130               | 16.03 | 15.99 | 15.59 | 15.93 | -     | 15.44 | 15.76 | 15.71 | 15.57 | 15.58 | 15.49 | 15.40 | 15.95 | 16.00 | 16.04 | 15.47 | 15.37 | 16.12 |
| V 133               | 15.55 | 15.49 | 15.41 | 15.40 | 15.27 | 15.28 | 15.39 | 15.51 | 15.24 | 15.21 | 14.86 | 14.90 | 15.38 | 15.43 | 15.41 | 14.80 | 14.74 | 15.55 |
| V 134               | 15.31 | 15.17 | 15.11 | 15.05 | 14.98 | 15.00 | 15.13 | 15.33 | 14.97 | 14.84 | 14.40 | 14.38 | 15.27 | 15.29 | 15.27 | 14.21 | 14.18 | 15.37 |
| V 135               | -     | -     | -     | -     | 15.45 | 15.48 | 15.41 | 15.42 | 15.11 | 15.33 | 14.39 | 14.69 | 14.83 | 14.82 | 14.73 | 14.42 | 14.33 | 14.84 |
| V 137               | -     | -     | -     | -     | 15.59 | 15.75 | 15.50 | 15.46 | 15.20 | 15.35 | 14.52 | 14.78 | 14.93 | 14.92 | 14.83 | 14.57 | 14.47 | 14.89 |
| V 139               | 15.69 | 15.59 | 15.52 | 15.51 | 15.38 | 15.39 | 15.57 | 15.66 | 15.42 | 15.41 | 15.14 | 15.10 | 15.53 | 15.55 | 15.56 | 15.06 | 14.98 | 15.69 |
| V 140               | -     | -     | -     | -     | -     | 15.88 | 16.04 | 16.05 | 15.94 | 15.99 | 15.84 | 15.75 | 15.92 | 15.95 | 15.95 | 15.67 | 15.56 | 16.10 |
| V 230               | 15.57 | 15.48 | 15.44 | 15.41 | 15.32 | 15.33 | 15.38 | 15.43 | 15.21 | 15.25 | 14.62 | 14.73 | 15.04 | 15.07 | 15.04 | 14.64 | 14.56 | 15.15 |
| V 231               | 15.56 | 15.46 | 15.44 | 15.39 | 15.34 | 15.37 | 15.36 | 15.36 | 15.10 | 15.27 | 14.07 | 14.47 | 14.61 | 14.61 | 14.50 | 14.19 | 14.09 | 14.63 |

Koepumppaustulosten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- a) Etenkin pumppauksen alkuvaiheessa tulisi painetasojen havainnointi tehdä huomattavasti tiheämmin, eli vähintään kahden tunnin välein. Ensimmäisen vuorokauden jälkeen tulisi mittaukset suorittaa 1 - 2 kertaa vuorokaudessa /2/.
- b) Pumppausta ei myöskään tulisi lopettaa ennen kuin on saavutettu tasapainotila, jolloin painetaso havaintoputkissa ei enää muutu.

Koska suoritettu koepumppaus ei kaikilta osin täytä em. vaatimuksia, on laskelmiin tehty seuraavat yksinkertaistukset ja olettamukset:

- 1<sup>o</sup> Oletetaan, että koepumppaus alkaa samanaikaisesti kaikilla asemilla.
- 2<sup>o</sup> Oletetaan, että 20.3.1975 mitattu pohjavedenpinta vastaa tasapainotilaa.
- 3<sup>o</sup> Laskelmissa ei huomioida ajan vaikutusta.

Laskelmissa käytetyt pohjavedenpinnan havaitut alenemat ovat keskimääräisiä. Havaituista painetasojen arvoista ennen koepumppausta on laskettu aritmeettinen keskiarvo. Tästä arvosta on vähennetty 20.3.1975 havaittu pohjaveden painetaso, taulukko 4.

#### 6.42 Analyttinen ratkaisu

Laskelmissa sovelletaan kohdassa 5.2 esitettyjä kaavoja. Merkitään puolilogaritmiseen  $\ln \bar{r} - \Delta h$  koordinaatistoon havaitut pohjaveden alenemat. Piirretään regressiosuora (16), josta määritetään vaikutussäde R sekä keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin  $k_{\text{kesk}}$ . Vettä läpäisevän kerroksen paksuudeksi valitaan  $d = 3$  m. Koepumppausasemien antoisuudet ovat:

|                    |                                                 |
|--------------------|-------------------------------------------------|
| Asema A1 antoisuus | $Q_1 = 3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Asema A2 antoisuus | $Q_2 = 7.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Asema A3 antoisuus | $Q_3 = 6.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ |

Taulukko 4. Puistola. Pohjavedenpinnan alenema havaintopisteissä koepumppauksen aikana.

| Havaintopiste | Pv:n pinta ennen pumpp. | Pv:n pinta pumpp. jälkeen | Keskim. alenema (m) |
|---------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| V 32          | +16.1                   | +15.2                     | 0.9                 |
| V 34          | +16.2                   | +15.9                     | 0.3                 |
| V 42          | +16.2                   | +15.9                     | 0.3                 |
| V 43          | +16.0                   | +14.1                     | 1.9                 |
| V 44          | +16.1                   | +15.0                     | 1.1                 |
| V 45          | +16.1                   | +15.4                     | 0.7                 |
| V 46          | +15.5                   | +14.3                     | 1.2                 |
| V 332         | +15.4                   | +14.6                     | 0.8                 |
| V 333         | +15.0                   | +13.8                     | 1.2                 |
| V 337         | +15.4                   | +15.3                     | 0.1                 |
| V 341         | +15.2                   | +15.0                     | 0.2                 |
| V 331         | +15.3                   | +13.5                     | 1.8                 |
| V 330         | +15.6                   | +12.7                     | 2.9                 |
| V 131         | +15.9                   | +15.3                     | 0.6                 |
| V 132         | +15.7                   | +15.1                     | 0.6                 |
| V 130         | +16.0                   | +15.4                     | 0.6                 |
| V 133         | +16.0                   | +14.9                     | 1.1                 |
| V 134         | +15.3                   | +14.4                     | 0.9                 |
| V 135         | +14.9                   | +14.7                     | 0.2                 |
| V 137         | +15.4                   | +14.8                     | 0.6                 |
| V 139         | +15.7                   | +15.1                     | 0.6                 |
| V 140         | +16.0                   | +15.8                     | 0.2                 |
| V 230         | +15.6                   | +14.7                     | 0.9                 |
| V 231         | +15.6                   | +14.5                     | 1.1                 |

Taulukko 5. Puistola.  $\ln \bar{r}$ :n laskeminen koepumppauksen vaikutussäteen R graafista määrittämistä varten.

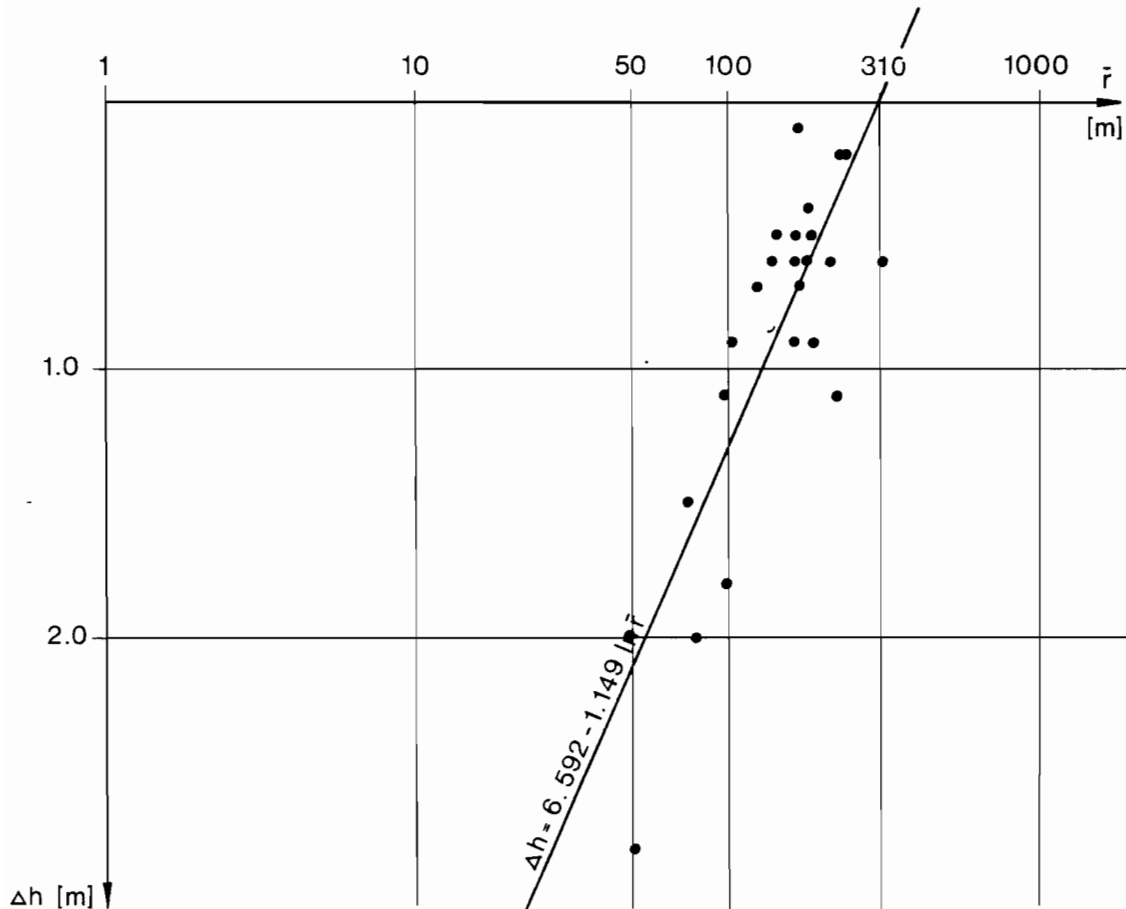
| Havain-<br>topiste<br>no | $\Delta h$<br>(m) | $r_1$<br>(m) | $r_2$<br>(m) | $r_3$<br>(m) | $\ln \bar{r}$ |
|--------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| V 32                     | 0.9               | 340          | 60           | 98           | 4.63          |
| V 34                     | 0.3               | 335          | 124          | 190          | 5.19          |
| V 42                     | 0.3               | 415          | 135          | 170          | 5.22          |
| V 43                     | 1.9               | 284          | 12           | 80           | 3.86          |
| V 44                     | 1.1               | 292          | 48           | 116          | 4.58          |
| V 45                     | 0.7               | 292          | 72           | 140          | 4.82          |
| V 46                     | 1.2               | 244          | 40           | 78           | 4.31          |
| V 332                    | 0.8               | 285          | 152          | 88           | 4.94          |
| V 333                    | 1.2               | 344          | 92           | 54           | 4.58          |
| V 337                    | 0.1               | 374          | 170          | 108          | 5.12          |
| V 341                    | 0.2               | 408          | 150          | 116          | 5.11          |
| V 331                    | 1.8               | 278          | 96           | 32           | 4.35          |
| V 330                    | 2.9               | 276          | 70           | 14           | 3.90          |
| V 131                    | 0.6               | 112          | 174          | 186          | 5.10          |
| V 132                    | 0.6               | 66           | 220          | 232          | 5.17          |
| V 130                    | 0.6               | 150          | 135          | 148          | 4.96          |
| V 133                    | 1.1               | 34           | 250          | 256          | 5.13          |
| V 134                    | 0.9               | 14           | 294          | 302          | 5.08          |
| V 135                    | 0.2               | 60           | 340          | 348          | 5.49          |
| V 137                    | 0.6               | 116          | 398          | 406          | 5.75          |
| V 139                    | 0.6               | 62           | 280          | 300          | 5.36          |
| V 140                    | 0.2               | 108          | 254          | 298          | 5.43          |
| V 230                    | 0.9               | 56           | 256          | 252          | 5.23          |
| V 231                    | 1.1               | 102          | 284          | 264          | 5.41          |

Taulukon 5 arvopareille  $\Delta h - \ln \bar{r}$  määritetty regressiosuora on, kuva 26:

$$\Delta h = 6.59 - 1.15 \ln \bar{r} \quad (39)$$

mistä saadaan vaikutussäteeksi

$$R = F = e^{6.59/1.15} = 310 \text{ m}$$



Kuva 26. Regressiosuora vaikutussäteen  $R$  määrittämistä varten.

Vettäläpäisevän maakerroksen keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin  $k$  voidaan määrittää kaavalla (17)

$$k = \frac{Q_{\text{kok}}}{2\pi \times 1.15 \times d} = 1.20 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

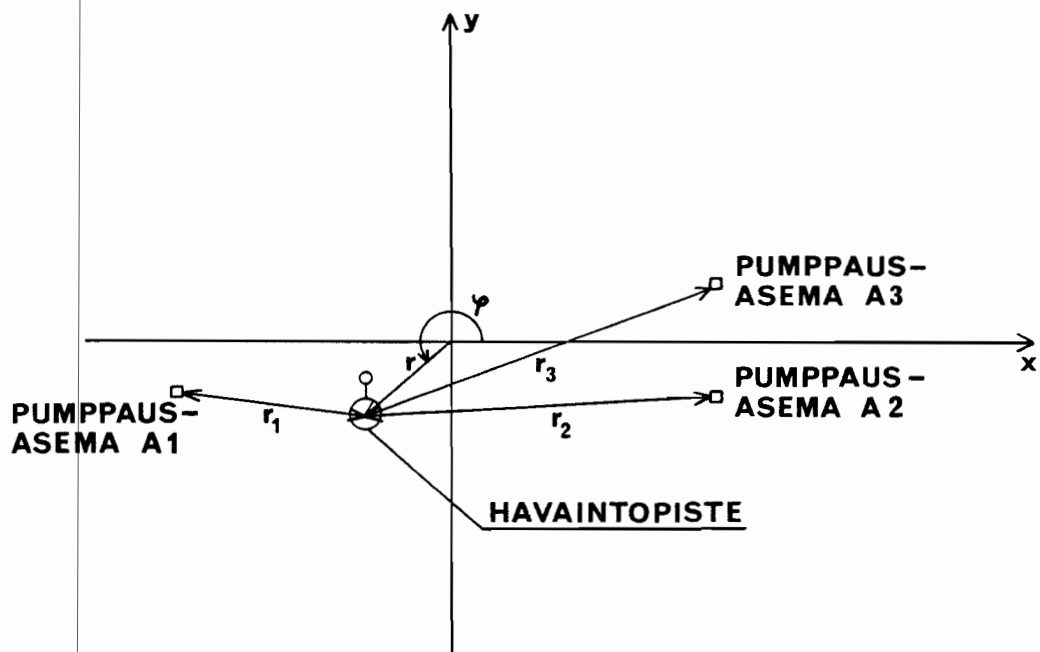
Kaavalla (12) voidaan tämän jälkeen laskea pumppausasemien A1, A2 ja A3 aiheuttama alenema, kuva 27:

$$\Delta h = \left( \sum_{i=1}^3 Q_i \ln \frac{R}{r_i} \right) / 2\pi k d \quad (40)$$

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (41)$$

$$x = r \cos \phi \quad (42)$$

$$y = r \sin \phi \quad (43)$$



Kuva 27. Puistola. Pumppausasemien A1, A2 ja A3 aiheuttaman aleneman laskeminen havaintopisteessä (x, y).

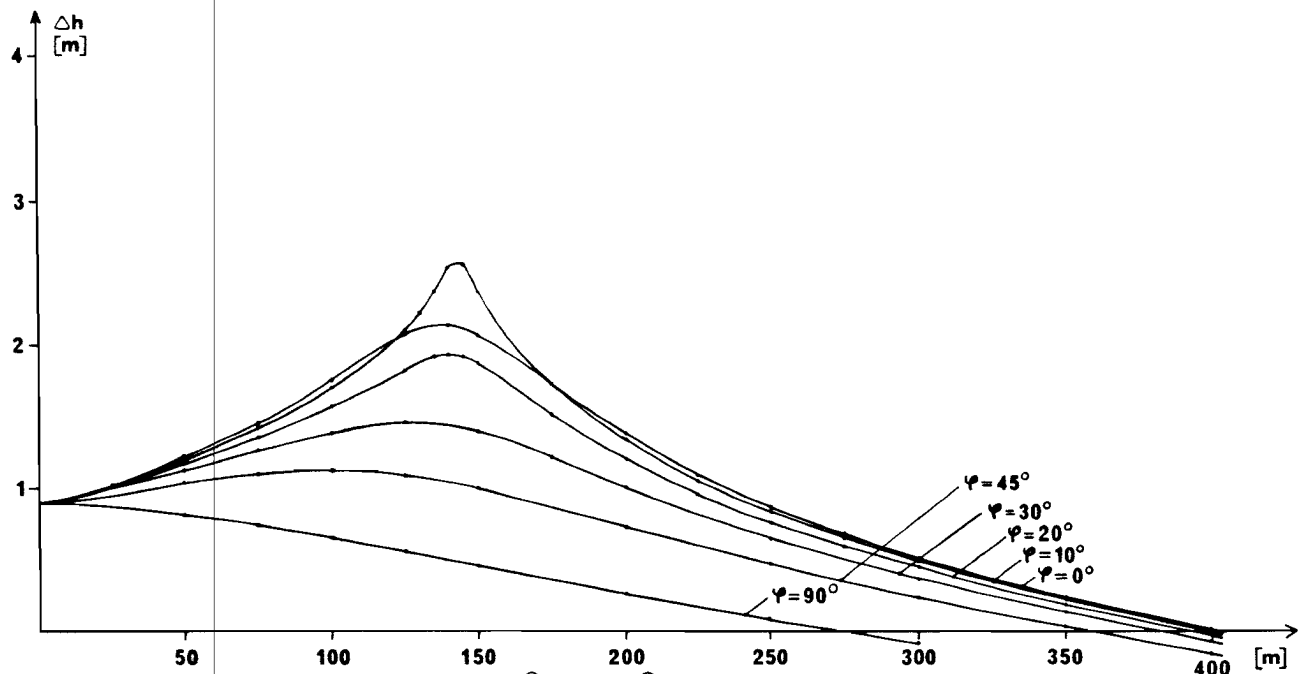
Taulukkoon 6 on koottu analyttisesti lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä.

Kaavan (12) avulla voidaan myös laskea pohjavedenpinnan tasa-arvokäyrät. Piirretään ensin eri kulman  $\phi$ -arvoille kuvaajat  $\Delta h(r)$ , kuva 28. Kuvaajista voidaan graafisesti määrittää tasa-arvokäyrien etäisyys origosta.

Taulukko 6. Puistola. Analyttisellä laskentamenetelmällä määritetyt pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä.

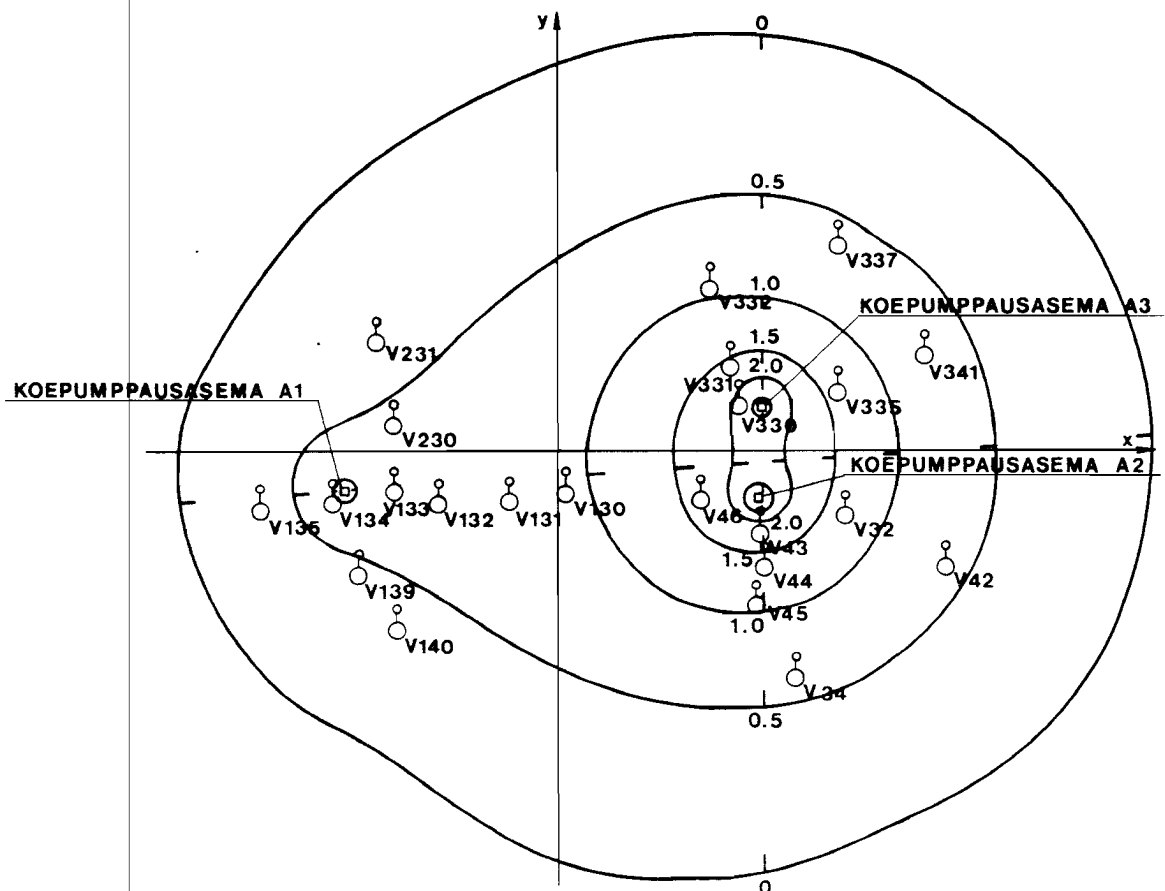
| Havaintopiste<br>no | r<br>(m) | $\phi$<br>(o) | $\Delta h$<br>(havaittu) | $\Delta h$<br>(las-<br>kettu) | erotus |
|---------------------|----------|---------------|--------------------------|-------------------------------|--------|
| V 32                | 202.1    | - 12.9        | 0.90                     | 1.27                          | -0.37  |
| V 34                | 226.3    | - 44.3        | 0.30                     | 0.62                          | -0.32  |
| V 42                | 278.4    | - 17.1        | 0.30                     | 0.59                          | -0.29  |
| V 43                | 146.1    | - 19.2        | 1.90                     | 2.03                          | -0.13  |
| V 44                | 163.1    | - 30.5        | 1.10                     | 1.32                          | -0.22  |
| V 45                | 172.9    | - 38.7        | 0.70                     | 1.04                          | -0.34  |
| V 46                | 103.7    | - 19.1        | 1.20                     | 1.66                          | -0.46  |
| V 332               | 153.6    | 47.4          | 0.80                     | 0.92                          | -0.12  |
| V 333               | 196.1    | 11.8          | 1.20                     | 1.35                          | -0.15  |
| V 337               | 233.6    | 32.1          | 0.10                     | 0.71                          | -0.61  |
| V 341               | 260.5    | 14.7          | 0.20                     | 0.71                          | -0.51  |
| V 331               | 131.5    | 26.2          | 1.80                     | 1.58                          | 0.22   |
| V 330               | 129.0    | 14.4          | 2.90                     | 2.12                          | 0.78   |
| V 131               | 48.8     | -132.5        | 0.60                     | 0.75                          | -0.15  |
| V 132               | 89.1     | -155.4        | 0.60                     | 0.66                          | -0.06  |
| V 130               | 29.4     | - 80.2        | 0.60                     | 0.90                          | -0.60  |
| V 133               | 114.5    | -165.8        | 1.10                     | 0.70                          | 0.40   |
| V 134               | 158.2    | -166.8        | 0.90                     | 0.78                          | 0.12   |
| V 135               | 207.3    | -168.3        | 0.20                     | 0.28                          | -0.08  |
| V 137               | 264.4    | -167.3        | 0.60                     | 0.00                          | 0.60   |
| V 139               | 161.4    | -147.4        | 0.60                     | 0.44                          | 0.16   |
| V 140               | 167.3    | -131.1        | 0.20                     | 0.35                          | -0.15  |
| V 230               | 113.4    | 170.9         | 0.90                     | 0.58                          | 0.32   |
| V 231               | 144.4    | 149.2         | 1.10                     | 0.37                          | 0.73   |

neliösumma 3.65



Kuva 28. Kulman  $\phi$  ( $=0^\circ \dots 90^\circ$ ) arvoilla lasketut aleneman  $\Delta h$  arvot etäisyyden  $r$  funktiona.  $\phi$  on origon ja x-akselin välinen kulma.

Puistolan asemanseudun koepumppausten perusteella lasketut tasa-arvokäyrät esitetään kuvassa 29.



Kuva 29. Puistola, koepumppaus. Analyttisesti lasketut pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät ja havaintoputkien sijainnit.



## 6.43 Numeeriset ratkaisut

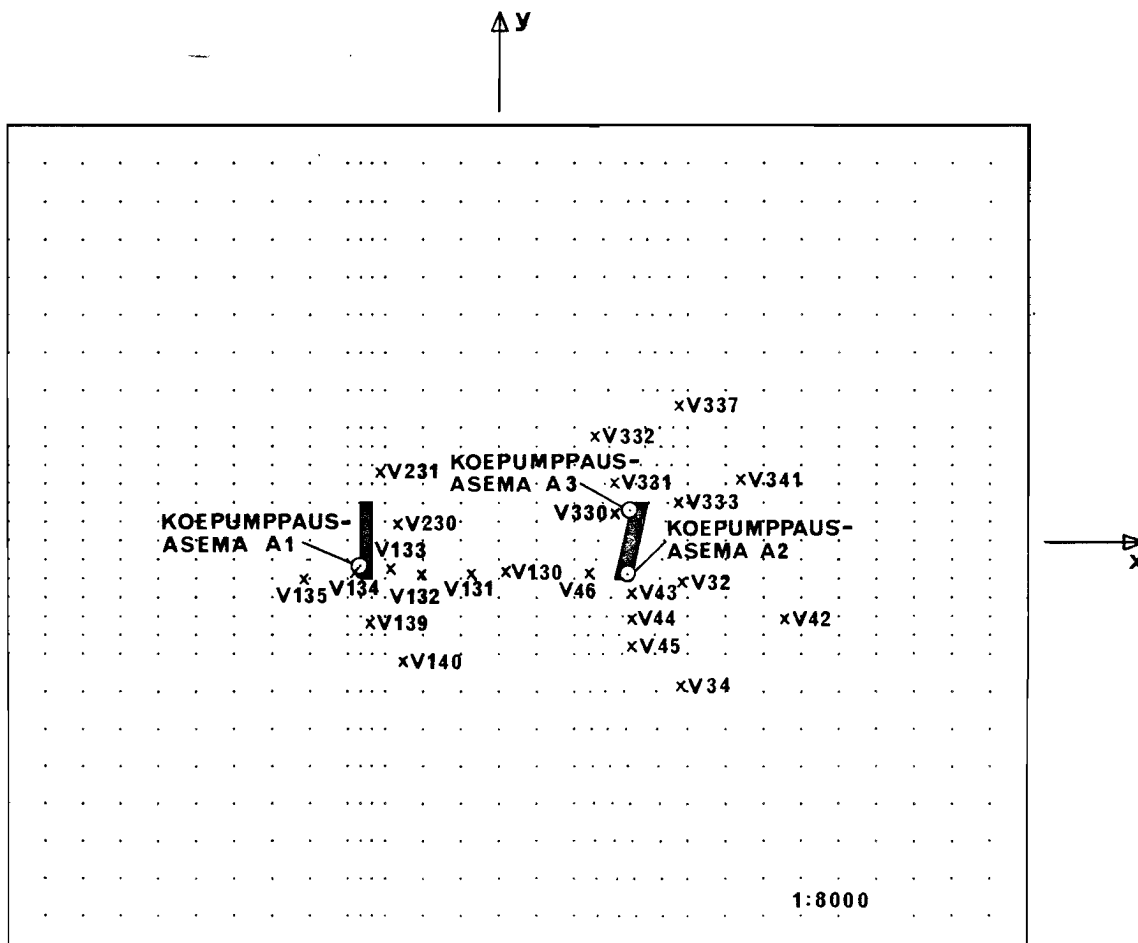
## 6.431 Ratkaisu elementtiverkon kokoa muuttamalla

Laskelmat suoritettiin kohdassa 5.3 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Asetettiin aluksi differentiaaliyhtälöön (29) viimeinen termi  $P^* = 0$ , joten elementtimenetelmällä ratkaistiin tässä tapauksessa yhtälö:

$$\frac{\partial}{\partial x}(kd \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(kd \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \quad (44)$$

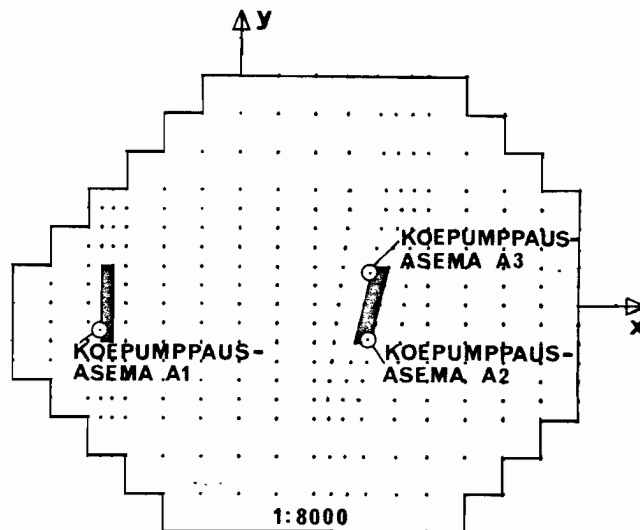
Laskelmissa oletettiin, että vettäläpäisevän maakerroksen paksuus on vakio.

Lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä sovitettiin havaittuihin arvoihin elementtiverkon kokoa ja muotoa muuttamalla. Jokaiselle verkolle määritettiin ensin vettäläpäisevän kerroksen keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin  $k$ , jota käyttäen pohjavedenpinnan alenemat  $\Delta h$  laskettiin.

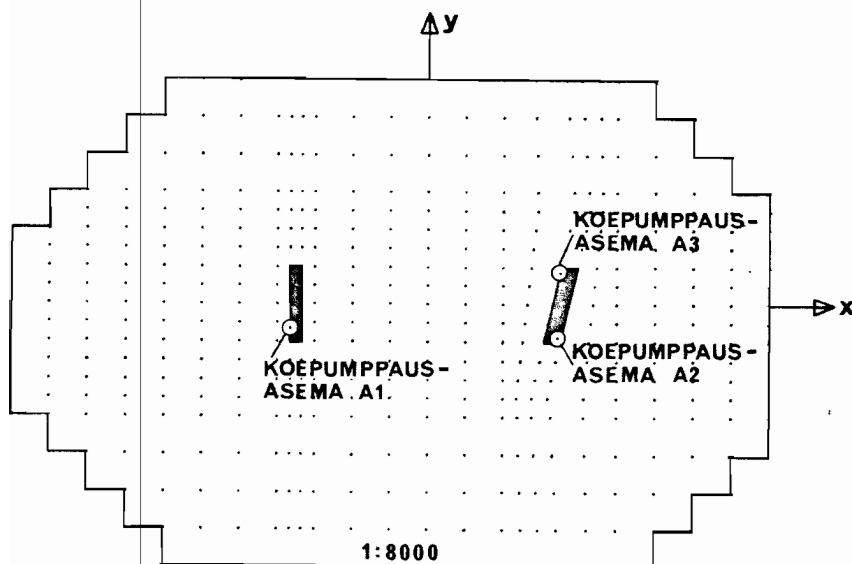


Kuva 30. Puistolän asemanseutu. Elementtiverkko I. Havaintopisteiden sijainnit solmupisteverkossa.

Laskelmat suoritettiin ensin kolmella eri kokoisella elementti-verkolla, kuvat 30, 31 ja 32, joiden antamien tulosten perusteella pystyttiin laatimaan sen kokoinen ja muotoinen verkko, joka antoi pienimmän neliösumman (kohta 5.33) mielessä parhaan tuloksen. Kaikissa tapauksissa käytettiin rajaehtona verkon reunoilla  $\Delta h = 0$ . Koepumppausasemien kohdille asetettiin solmupisteet, joissa asemien antoisuudet oli annettu.



Kuva 31. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkko II.



Kuva 32. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkko III.

Elementtiverkoilla I, II ja III lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä on esitetty taulukossa 7.

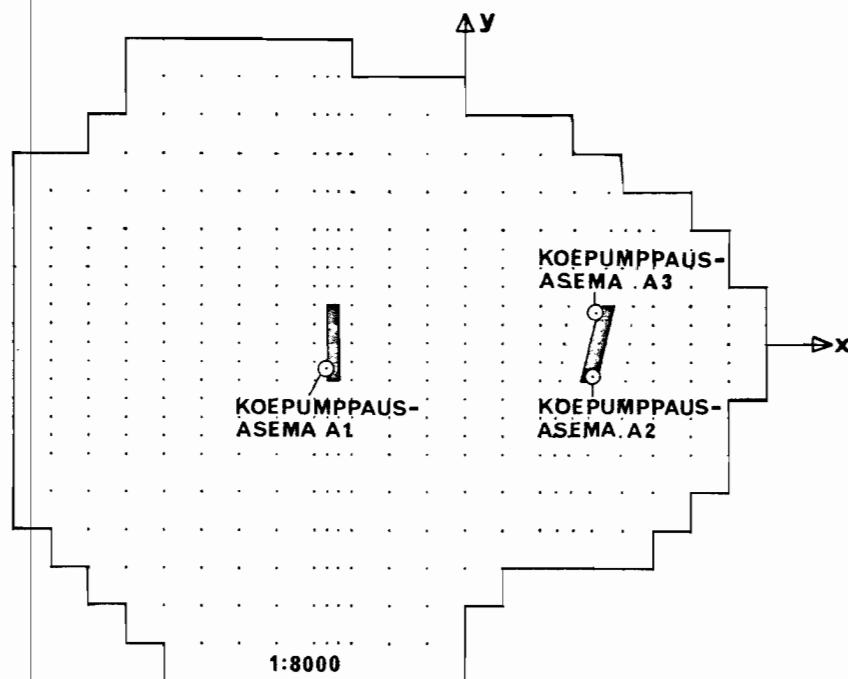
Taulukko 7. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkoilla I, II ja III lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä.

| Havaintopiste<br>no | $\Delta h$<br>(hav.)<br>(m) | Elementtiverkko I<br>$k = 1.94 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |        | Elementtiverkko II<br>$k = 1.14 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |        | Elementtiverkko III<br>$k = 1.18 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |        |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------|--------|
|                     |                             | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)                               | erotus | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)                                | erotus | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)                                 | erotus |
| V 32                | 0.90                        | 1.14                                                       | -0.24  | 1.14                                                        | -0.24  | 1.09                                                         | -0.19  |
| V 34                | 0.30                        | 0.89                                                       | -0.59  | 0.71                                                        | -0.41  | 0.78                                                         | -0.48  |
| V 42                | 0.30                        | 0.72                                                       | -0.42  | 0.43                                                        | -0.13  | 0.44                                                         | -0.14  |
| V 43                | 1.90                        | 1.86                                                       | 0.04   | 2.36                                                        | -0.46  | 2.33                                                         | -0.43  |
| V 44                | 1.10                        | 1.14                                                       | -0.04  | 1.13                                                        | -0.03  | 1.17                                                         | -0.07  |
| V 45                | 0.70                        | 0.99                                                       | -0.29  | 0.88                                                        | -0.18  | 0.95                                                         | -0.25  |
| V 46                | 1.20                        | 1.37                                                       | -0.17  | 1.53                                                        | -0.33  | 1.56                                                         | -0.36  |
| V 332               | 0.80                        | 0.92                                                       | -0.12  | 0.78                                                        | 0.02   | 0.76                                                         | 0.04   |
| V 333               | 1.20                        | 1.19                                                       | 0.01   | 1.23                                                        | -0.03  | 1.03                                                         | 0.17   |
| V 337               | 0.10                        | 0.79                                                       | -0.69  | 0.56                                                        | -0.46  | 0.44                                                         | -0.34  |
| V 341               | 0.20                        | 0.79                                                       | -0.59  | 0.55                                                        | -0.35  | 0.11                                                         | 0.09   |
| V 331               | 1.80                        | 1.36                                                       | 0.44   | 1.51                                                        | 0.29   | 1.47                                                         | 0.33   |
| V 330               | 2.90                        | 1.70                                                       | 1.20   | 2.08                                                        | 0.82   | 2.02                                                         | 0.88   |
| V 131               | 0.60                        | 0.84                                                       | -0.24  | 0.59                                                        | 0.01   | 0.80                                                         | -0.20  |
| V 132               | 0.60                        | 0.83                                                       | -0.23  | 0.55                                                        | 0.05   | 0.85                                                         | -0.25  |
| V 130               | 0.60                        | 0.93                                                       | -0.33  | 0.76                                                        | -0.16  | 0.91                                                         | -0.31  |
| V 133               | 1.10                        | 0.85                                                       | 0.25   | 0.59                                                        | 0.51   | 0.94                                                         | 0.16   |
| V 134               | 0.90                        | 0.58                                                       | 0.32   | 0.15                                                        | 0.75   | 0.54                                                         | 0.36   |
| V 135               | 0.20                        | 0.11                                                       | 0.09   | 0.00                                                        | 0.20   | 0.00                                                         | 0.20   |
| V 139               | 0.60                        | 0.60                                                       | 0.00   | 0.16                                                        | 0.44   | 0.49                                                         | 0.11   |
| V 140               | 0.20                        | 0.38                                                       | -0.18  | 0.00                                                        | 0.20   | 0.15                                                         | 0.05   |
| V 230               | 0.90                        | 0.75                                                       | 0.15   | 0.42                                                        | 0.48   | 0.72                                                         | 0.18   |
| V 231               | 1.10                        | 0.62                                                       | 0.48   | 0.18                                                        | 0.92   | 0.51                                                         | 0.59   |
| Neliösumma          |                             |                                                            | 3.85   | 3.89                                                        |        | 2.49                                                         |        |

Pienimmän neliösumman mielessä antaa verkko III parhaan tuloksen. Laskettujen ja havaittujen arvojen erotuksista voidaan kuitenkin päätellä seuraavaa:

- Suuntimotien ympäristössä ovat lasketut alenemat hieman toteutuneita suurempia. Tämä voidaan korjata pienentämällä verkkoa näiltä osin.
- Aseman alikulun ympäristössä ovat lasketut arvot toteutuneita pienempiä. Tämä edellyttää verkon laajentamista.

Laaditaan neljäs elementtiverkko ylläolevan perusteella, jolloin verkosta saadaan kuvassa 33 esitetyn muotoinen.



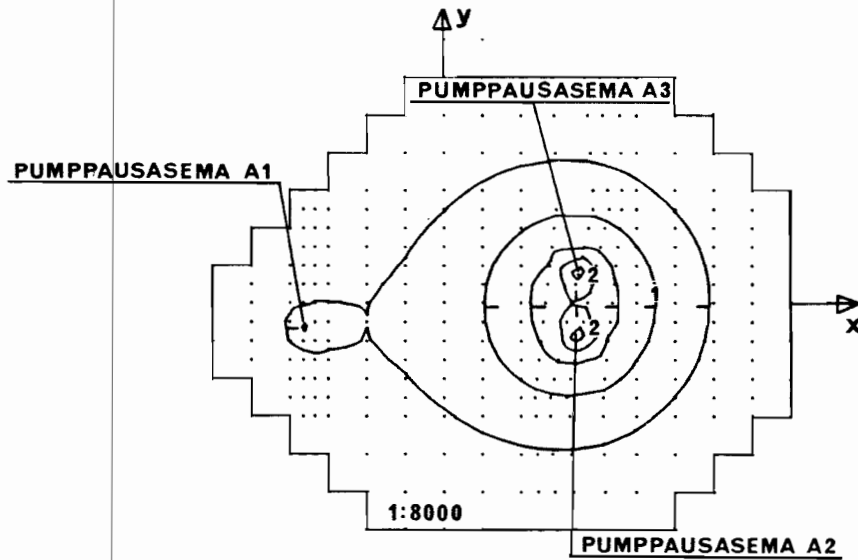
Kuva 33. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkko IV.

Elementtiverkolla IV lasketut alenemat havaintopisteissä on koottu taulukkoon 8.

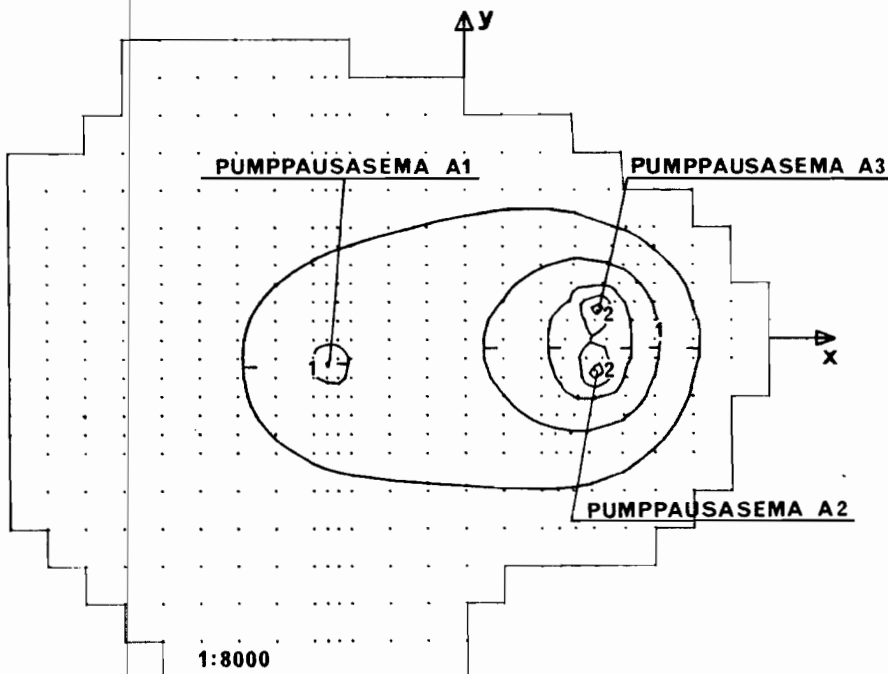
Taulukko 8. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkolla IV lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä.

|                     |                      | Elementtiverkko IV<br>$k = 1.10 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |        |
|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| Havaintopiste<br>no | $\Delta h$<br>(hav.) | $\Delta h$<br>(lask.)                                       | erotus |
| V 32                | 0.90                 | 1.01                                                        | -0.11  |
| V 34                | 0.30                 | 0.65                                                        | -0.35  |
| V 42                | 0.30                 | 0.15                                                        | 0.15   |
| V 43                | 1.90                 | 2.37                                                        | -0.47  |
| V 44                | 1.10                 | 1.11                                                        | -0.01  |
| V 45                | 0.70                 | 0.86                                                        | -0.16  |
| V 46                | 1.20                 | 1.56                                                        | -0.36  |
| V 332               | 0.80                 | 0.69                                                        | 0.11   |
| V 333               | 1.20                 | 1.07                                                        | 0.13   |
| V 337               | 0.10                 | 0.29                                                        | -0.19  |
| V 341               | 0.20                 | 0.26                                                        | -0.06  |
| V 331               | 1.80                 | 1.47                                                        | 0.33   |
| V 330               | 2.90                 | 2.07                                                        | 0.83   |
| V 131               | 0.60                 | 0.83                                                        | -0.23  |
| V 132               | 0.60                 | 0.93                                                        | -0.33  |
| V 130               | 0.60                 | 0.93                                                        | -0.33  |
| V 133               | 1.10                 | 1.05                                                        | 0.05   |
| V 134               | 0.90                 | 0.63                                                        | 0.27   |
| V 135               | 0.20                 | 0.00                                                        | 0.20   |
| V 139               | 0.60                 | 0.56                                                        | 0.04   |
| V 140               | 0.20                 | 0.25                                                        | -0.05  |
| V 230               | 0.90                 | 0.80                                                        | 0.10   |
| V 231               | 1.10                 | 0.58                                                        | 0.52   |
| Neliösumma          |                      |                                                             | 2.07   |

Verkon muodon ja koon vaikutus laskentatuloksiin ilmenee kuvista 34 ja 35. Pohjaveden aleneman synnyttämää suppiloa voidaan siis tarpeen mukaan suurentaa ja pienentää.



Kuva 34. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkolla II määritetyt pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät.



Kuva 35. Puistola, koepumppaus. Elementtiverkolla III määritetyt pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät.

#### 6.432 Ratkaisu virtausvastusta käyttäen

Koska kohdassa 6.431 suoritettu laskelma on käytännössä hankala suorittaa, pyrittiin lasketun märkävirran muotoon vaihtamaan muulla tavoin kuin verkon kokoa muuttamalla. Otettiin käyttöön kohdassa 5.31 esitetty maan virtausvastus, jonka määritelmä on:

$$c = \frac{d'}{k'} \quad (45)$$

$d'$  osittain läpäisevän kerroksen paksuus

$k'$  osittain läpäisevän kerroksen vedenläpäisevyys (kuva 16)

Suoritetuissa laskelmissa ei  $d'$ :llä ja  $k'$ :lla ole tässä tapauksessa suoranaista fysikaalista merkitystä, vaan ne ovat kuvitellun puoliläpäisevän kerroksen suureita. Virtausvastusta  $c$  on siis käytetty ainoastaan apumuuttujana sovittaessa laskentatuloksia havaintoihin. Laskelmat suoritettiin käyttäen elementtiverkkoa I, kuva 30 ja LIITE 2.

Laskelmat suoritettiin olettaen ensin vettäläpäisevä maakerros paksuudeltaan vakioksi. Koska lähtötilanteessa oli kaksi tuntematonta, vedenläpäisevyyskerroin  $k$  ja virtausvastus  $c$ , meneteltiin seuraavasti:

##### 1. Määriteltiin kerroin $a$

$$a = \frac{1}{k \cdot c} \quad (46)$$

Tässä työssä  $a$ :sta käytetään nimitystä vuototekijä.

##### 2. Ratkaistiin yhtälöryhmä (34) arvoilla $k = 1$ ja $c = \frac{1}{a}$ .

##### 3. Saatiin tulokseksi vettäläpäisevän maakerroksen keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin, joka pienimmän neliösumman mielessä toteuttaa havaitut painetasen muutokset parhaiten.

##### 4. Ratkaistiin yhtälöryhmä (34) uudestaan arvoilla $k = 1 \cdot k$ ja $c = \frac{1}{k \cdot a}$ .

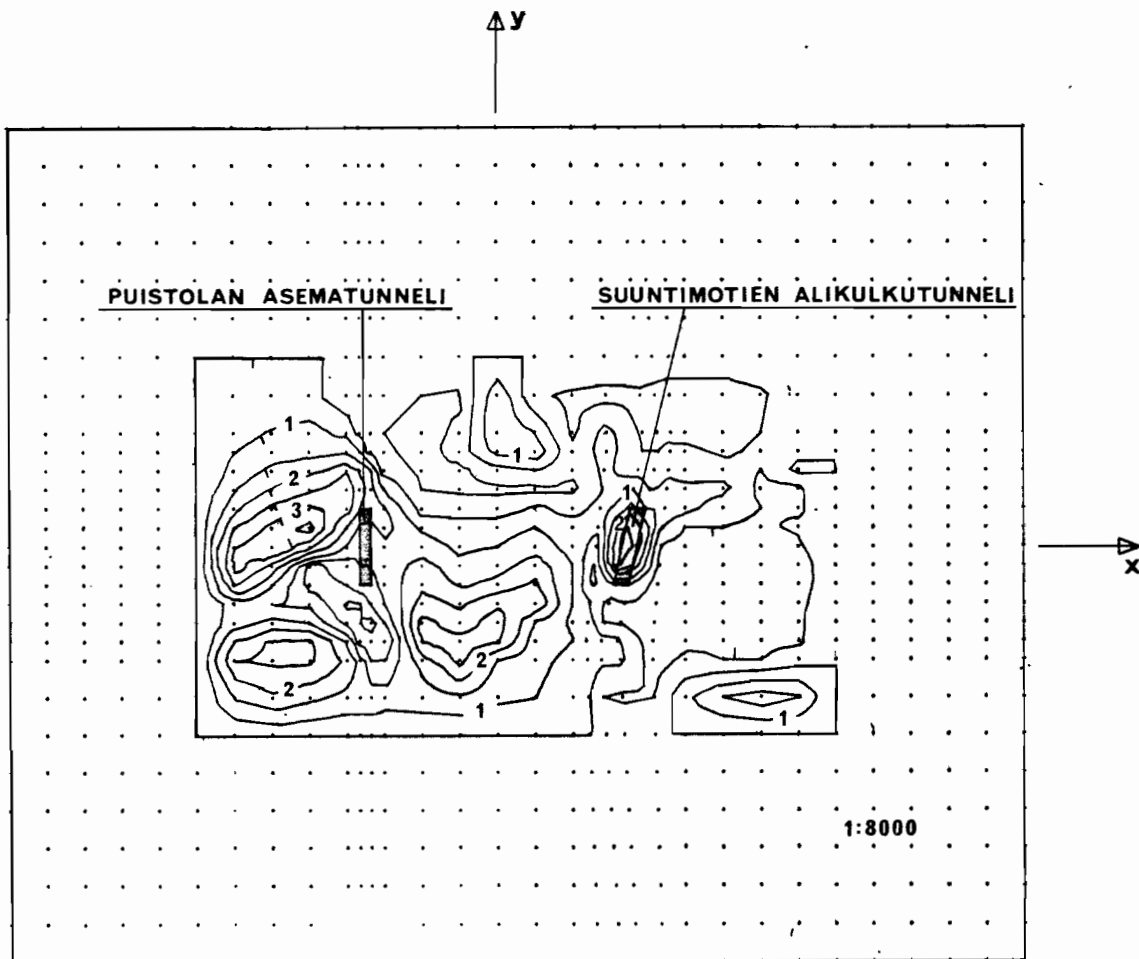
Taulukossa 9 on esitetty neljällä vuototekijän ja niitä vastaavien vedenläpäisevyyskertoimien avulla lasketut painetason alenemat havaintopisteissä.

Taulukko 9. Puistola, koepumppaus. Vuototekijän  $a$  avulla numeerisesti lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä. Vettäjohtavan maakerroksen paksuus on vakio,  $d = 3$  m.

|                  | $a = 0.00005$                     |                              |               | $a = 0.00010$                     |               | $a = 0.00015$                     |               | $a = 0.00020$                     |               |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
|                  | $k = 0.878 \times 10^{-4}$<br>m/s |                              |               | $k = 0.699 \times 10^{-4}$<br>m/s |               | $k = 0.600 \times 10^{-4}$<br>m/s |               | $k = 0.536 \times 10^{-4}$<br>m/s |               |
| Havaintopiste no | $\Delta h$<br>(hav.)<br>(m)       | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m) | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)      | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)      | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)      | erotus<br>(m) |
| V 32             | 0.90                              | 1.13                         | -0.23         | 1.11                              | -0.21         | 1.08                              | -0.18         | 1.05                              | -0.15         |
| V 34             | 0.30                              | 0.80                         | -0.50         | 0.74                              | -0.44         | 0.68                              | -0.38         | 0.63                              | -0.33         |
| V 42             | 0.30                              | 0.62                         | -0.32         | 0.54                              | -0.24         | 0.48                              | -0.18         | 0.43                              | -0.13         |
| V 43             | 1.90                              | 2.14                         | -0.24         | 2.35                              | -0.45         | 2.50                              | -0.60         | 2.62                              | -0.72         |
| V 44             | 1.10                              | 1.12                         | -0.02         | 1.10                              | 0.00          | 1.07                              | 0.03          | 1.04                              | 0.06          |
| V 45             | 0.70                              | 0.92                         | -0.22         | 0.87                              | -0.17         | 0.82                              | -0.12         | 0.78                              | -0.18         |
| V 46             | 1.20                              | 1.41                         | -0.21         | 1.44                              | -0.24         | 1.44                              | -0.24         | 1.43                              | -0.23         |
| V 332            | 0.80                              | 0.83                         | -0.03         | 0.77                              | 0.03          | 0.71                              | 0.09          | 0.66                              | 0.14          |
| V 333            | 1.20                              | 1.20                         | 0.00          | 1.20                              | 0.00          | 1.18                              | 0.02          | 1.16                              | 0.04          |
| V 337            | 0.10                              | 0.70                         | -0.60         | 0.63                              | -0.53         | 0.57                              | -0.47         | 0.52                              | -0.42         |
| V 341            | 0.20                              | 0.70                         | -0.50         | 0.63                              | -0.43         | 0.57                              | -0.37         | 0.52                              | -0.32         |
| V 331            | 1.80                              | 1.41                         | 0.39          | 1.45                              | 0.35          | 1.46                              | 0.34          | 1.46                              | 0.34          |
| V 330            | 2.90                              | 1.90                         | 1.00          | 2.04                              | 0.86          | 2.14                              | 0.76          | 2.21                              | 0.69          |
| V 131            | 0.60                              | 0.70                         | -0.10         | 0.61                              | -0.01         | 0.53                              | 0.07          | 0.47                              | 0.13          |
| V 132            | 0.60                              | 0.74                         | -0.14         | 0.70                              | -0.10         | 0.67                              | -0.07         | 0.65                              | -0.05         |
| V 130            | 0.60                              | 0.80                         | -0.20         | 0.72                              | -0.12         | 0.64                              | -0.04         | 0.58                              | 0.02          |
| V 133            | 1.10                              | 0.69                         | 0.41          | 0.62                              | 0.48          | 0.57                              | 0.53          | 0.53                              | 0.57          |
| V 134            | 0.90                              | 0.80                         | 0.10          | 0.80                              | 0.10          | 0.80                              | 0.10          | 0.81                              | 0.09          |
| V 135            | 0.20                              | 0.48                         | -0.28         | 0.43                              | -0.23         | 0.40                              | -0.20         | 0.38                              | -0.18         |
| V 139            | 0.60                              | 0.56                         | 0.04          | 0.50                              | 0.10          | 0.45                              | 0.15          | 0.42                              | 0.18          |
| V 140            | 0.20                              | 0.47                         | -0.27         | 0.39                              | -0.19         | 0.33                              | -0.13         | 0.29                              | -0.09         |
| V 230            | 0.90                              | 0.64                         | 0.26          | 0.57                              | 0.33          | 0.52                              | 0.38          | 0.49                              | 0.41          |
| V 231            | 1.10                              | 0.48                         | 0.62          | 0.40                              | 0.70          | 0.34                              | 0.76          | 0.30                              | 0.80          |
| Neliösumma       |                                   |                              | 3.17          |                                   | 2.88          |                                   | 2.81          |                                   | 2.88          |



Vastaavat laskelmat suoritettiin myös tapauksessa, jossa huomioitiin vettäläpäisevän maakerroksen paksuusvaihtelut havaintoalueella, kuva 36.



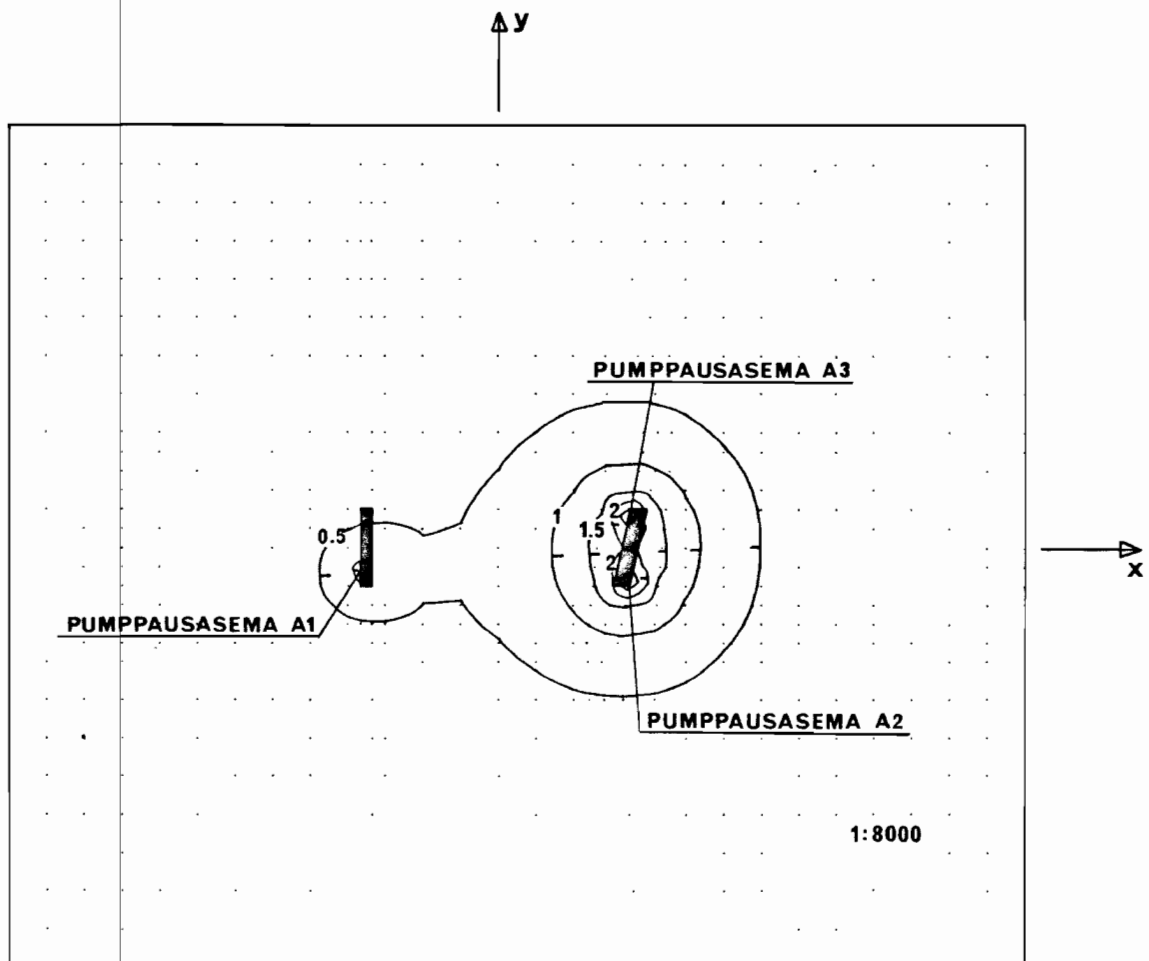
Kuva 36. Puistola. Saven alla olevan vettäjohtavan maakerroksen paksuuskäyrästä.

Keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin laskettiin kuudelle vuototekijän  $a$  arvolle, taulukko 10. Taulukkoon on myös vertailun vuoksi koottu vedenläpäisevyyskertoimilla lasketujen ja havaittujen painetasojen erotusten neliösummat.

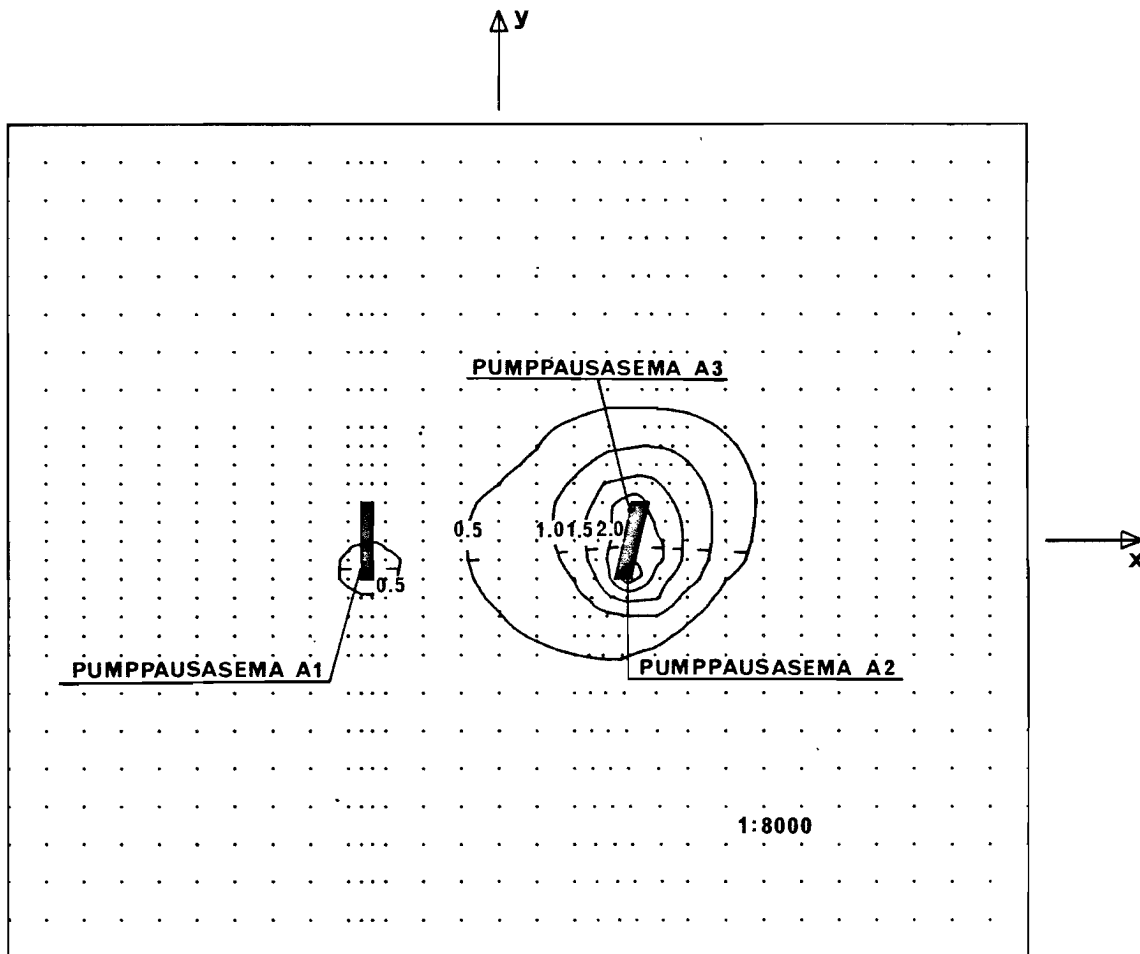
Kuvissa 37 ja 38 on esitetty lasketut pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät tapauksille, joista toisessa saven alla olevan vettäjohtavan maakerroksen paksuus on oletettu vakioksi ja toisessa huomioitu sen paksuuden vaihtelu.

Taulukko 10. Puistola, koepumppaus. Eri vuototekijän  $a$  arvoilla lasketut keskimääräiset vedenläpäisevyydet, kun vettäjohtavan maakerroksen paksuusvaihtelu on huomioitu.

| Vuototekijä<br>$a = \frac{1}{k \cdot c}$ | $k$<br>(m/s)           | Painetasojen<br>erotusten<br>neliösumma |
|------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| 0.00020                                  | $1.067 \times 10^{-4}$ | 4.77                                    |
| 0.00015                                  | $1.205 \times 10^{-4}$ | 4.26                                    |
| 0.00010                                  | $1.424 \times 10^{-4}$ | 3.78                                    |
| 0.00005                                  | $1.844 \times 10^{-4}$ | 3.45                                    |
| 0.00002                                  | $2.363 \times 10^{-4}$ | 3.45                                    |
| 0.00001                                  | $2.648 \times 10^{-4}$ | 3.51                                    |



Kuva 37. Puistola, koepumppaus. Lasketut pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät. Vettäjohtavan maakerroksen paksuus on vakio.  $a = 0.00015$ ;  $k = 0.60 \times 10^{-4}$  m/s.



Kuva 38. Puistola, koepumppaus. Lasketut pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät. Vettäjohtavan maakerroksen paksuus vaihtelee.  $a = 0.00005$ ;  $k = 1.84 \times 10^{-4}$  m/s.

Pienimmän neliösumman perusteella antaa vakiopaksumisella maakerroksella ( $d = 3$  m) laskettu tapaus tarkimman lopputuloksen. Tämä johtuu siitä, että vettäläpäisevän maakerroksen paksuuden määrittäminen suurelta alueelta on suoritettu pääasiassa painokairaustulosten perusteella, joten tulos on likimääräinen.

Taulukossa 11 on esitetty lasketut painetasot havaintopisteissä kahdella tarkimman tuloksen antaneella vedenläpäisevyyskertojen arvolla.

Taulukko 11. Puistola, koepumppaus. Vuototekijän  $a$  avulla lasketut pohjavedenpinnan alenemat havaintopisteissä. Vettäjohtavan maakerroksen paksuus vaihtelee.

| Havaintopiste<br>no | $\Delta h$<br>(hav.)<br>(m) | Vuototekijä<br>$a = 0.00005$           |               | Vuototekijä<br>$a = 0.00002$           |               |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------------|---------------|----------------------------------------|---------------|
|                     |                             | $k = 1.844 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |               | $k = 2.363 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |               |
|                     |                             | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)           | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m)           | erotus<br>(m) |
| V 32                | 0.90                        | 1.19                                   | -0.29         | 1.29                                   | -0.39         |
| V 34                | 0.30                        | 0.42                                   | -0.12         | 0.50                                   | -0.20         |
| V 42                | 0.30                        | 0.18                                   | 0.12          | 0.26                                   | 0.04          |
| V 43                | 1.90                        | 2.57                                   | -0.67         | 2.36                                   | -0.46         |
| V 44                | 1.10                        | 0.88                                   | 0.22          | 0.95                                   | 0.15          |
| V 45                | 0.70                        | 0.61                                   | 0.09          | 0.68                                   | 0.02          |
| V 46                | 1.20                        | 1.44                                   | -0.24         | 1.44                                   | -0.24         |
| V 332               | 0.80                        | 0.73                                   | 0.07          | 0.82                                   | -0.02         |
| V 333               | 1.20                        | 1.41                                   | -0.21         | 1.45                                   | -0.25         |
| V 337               | 0.10                        | 0.64                                   | -0.54         | 0.74                                   | -0.64         |
| V 341               | 0.20                        | 0.64                                   | -0.44         | 0.74                                   | -0.54         |
| V 331               | 1.80                        | 1.60                                   | 0.20          | 1.58                                   | 0.22          |
| V 330               | 2.90                        | 2.08                                   | 0.82          | 1.98                                   | 0.92          |
| V 131               | 0.60                        | 0.49                                   | 0.11          | 0.57                                   | 0.03          |
| V 132               | 0.60                        | 0.51                                   | 0.09          | 0.55                                   | 0.05          |
| V 130               | 0.60                        | 0.61                                   | -0.01         | 0.69                                   | -0.09         |
| V 133               | 1.10                        | 0.46                                   | 0.64          | 0.52                                   | 0.58          |
| V 134               | 0.90                        | 0.60                                   | 0.30          | 0.59                                   | 0.31          |
| V 135               | 0.20                        | 0.24                                   | -0.04         | 0.28                                   | -0.08         |
| V 139               | 0.60                        | 0.32                                   | 0.28          | 0.37                                   | 0.23          |
| V 140               | 0.20                        | 0.26                                   | -0.06         | 0.32                                   | -0.12         |
| V 230               | 0.90                        | 0.41                                   | 0.49          | 0.46                                   | 0.44          |
| V 231               | 1.10                        | 0.27                                   | 0.83          | 0.33                                   | 0.77          |
| Neliösumma          |                             | 3.45                                   |               | 3.45                                   |               |

- 6.5           Lopulliseen, alikulkutunnelien rakentamisen  
              jälkeiseen, tilanteeseen perustuva ratkaisu
- 6.51          Reunaehdot

Suuntimotien alikulkutunnelin kuivatusjärjestelmä on suunnitelmien mukaan tasolla +11.0 eli n. 4.5 m normaalia pohjavedenpintaa alempana. Kuivatusjärjestelmän ja hyvin vettäjohtavan hiekkakerroksen välissä on n. 2 m paksu silttikerros, joka estää pohjaveden virtausta kuivatusjärjestelmään.

Asematunnelin rakennuspaikan kuivatus alentaa pohjavedenpintaa alkuperäisestä tasosta noin 3.5 m. Kuivatusjärjestelmä sijaitsee hyvin vettäjohtavassa hiekkakerroksessa.

Painetason muutokset havaintopisteissä laskettiin kahdelle tapaukselle:

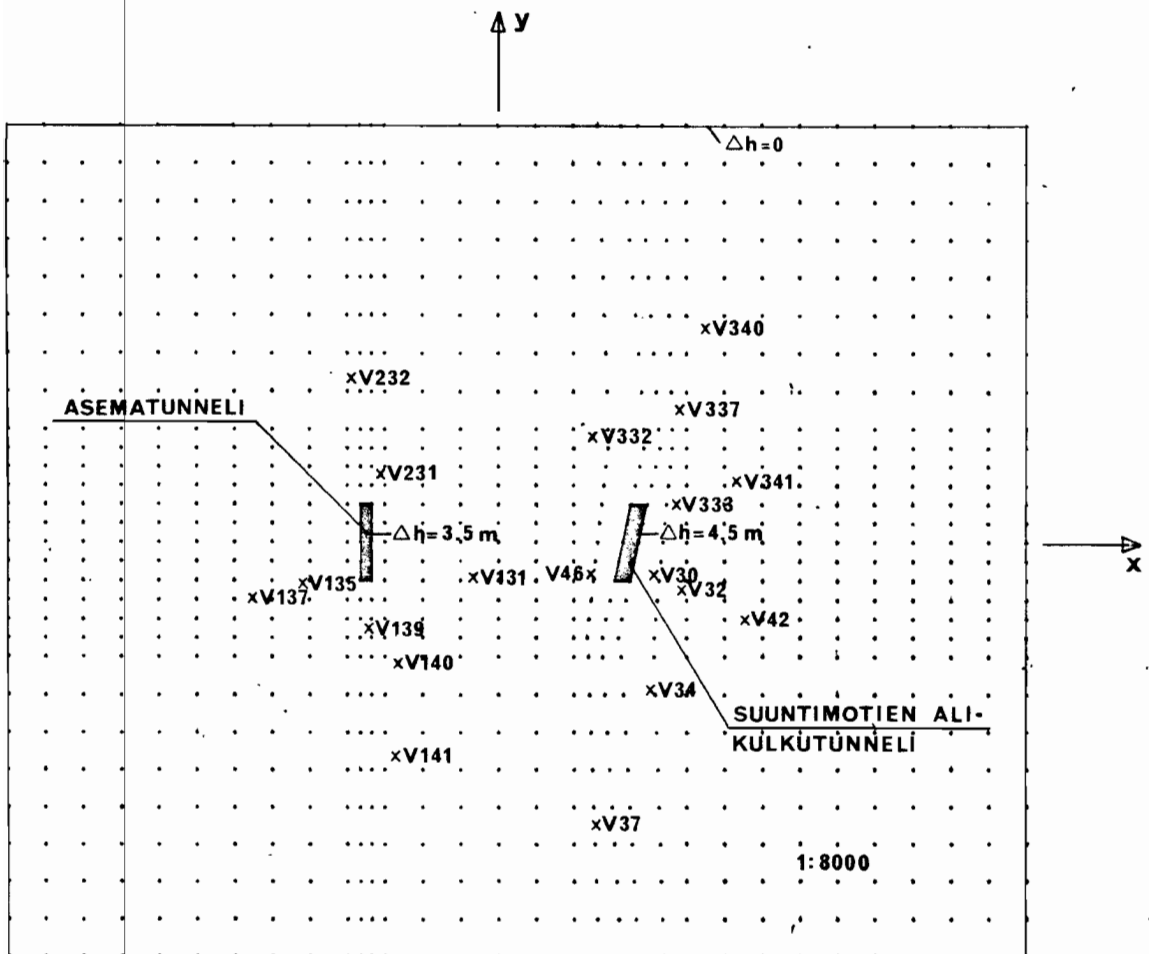
- 1<sup>o</sup>   Suuntimotien silttikerroksen vaikutusta pohjaveden virtaukseen ei otettu huomioon.
- 2<sup>o</sup>   Silttikerroksen vaikutus huomioitiin olettaen se puoliläpäiseväksi kerrokseksi, jonka läpi pohjavesi suotautuu kuivatusjärjestelmään.

Differentiaaliyhtälö (29) ratkaistiin tapaukselle, jossa reunaehtona verkon reunalla on edelleen  $\Delta h = 0$ . Alikulkujen kohdilla asetettiin reunaehdoiksi painetason alenemat 3.5 m ja 4.5 m, kuva 39.

Laskelmat suoritettiin käyttäen koepumppaustuloksista saatua vuototekijän  $a$  arvoa. Lisäksi haettiin vuototekijälle sellainen arvo, joka antoi pitkäaikaisiin havaintoihin nähdyn parhaan tuloksen.

- 6.52          Laskelmat, joissa Suuntimotien silttikerrosta ei  
              huomioida

Painetasojen muutokset havaintopisteissä laskettiin ensin sillä vuototekijän arvolla, joka määritettiin koepumppaustuloksista, kun vettäläpäisevän maakerroksen paksuus on vakio.



Kuva 39. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikat. Reunaehdot ja pohjavesihavaintopisteiden sijainti solmupisteverkossa lopullista tilannetta laskettaessa.

Taulukon 12 tuloksista havaitaan, että laskelma antaa liian suuria arvoja pohjaveden alenemalle. Suuntimotien alikulun ympäristössä olevissa havaintopisteissä lasketut alenemat ovat keskimäärin 0.56 m suurempia kuin havaitut. Vastaava keskiarvo asematunnelin ympäristössä on 0.1 m. Taulukossa 12 on lisäksi tulokset laskelmasta, jossa on huomioitu vettä-läpäisevän maakerroksen paksuusvaihtelu (koepumppaustuloksista  $a = 0.00005$ , taulukko 10). Laskentatulokset muuttuvat siten, että Suuntimotien ympäristön havaintopisteissä lasketut alenemat ovat keskimäärin 0.51 m ja asematunnelin ympäristössä 0.20 m liian suuria.

Taulukko 12. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikka.  
Lasketut pohjavedenpinnan alenemat havainto-  
pisteissä tapauksille, kun vettäjohtavan maa-  
kerroksen paksuus on vakio ja kun se vaihtelee.  
Vuototekijä  $a$  on määritetty koepumppausten pe-  
rusteella.

|                          |                             | d on vakio<br>$a = 0.00015$  |               | d vaihtelee<br>$a = 0.00005$ |               |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| Havain-<br>topiste<br>no | $\Delta h$<br>(Hav.)<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m) | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m) | erotus<br>(m) |
| V 30                     | 1.60                        | 3.30                         | -1.70         | 3.81                         | -2.21         |
| V 32                     | 1.50                        | 2.25                         | -0.75         | 2.42                         | -0.12         |
| V 34                     | 1.10                        | 1.00                         | 0.10          | 0.50                         | 0.60          |
| V 37                     | 0.20                        | 0.30                         | -0.10         | 0.25                         | -0.05         |
| V 42                     | 1.10                        | 1.01                         | 0.09          | 0.39                         | 0.71          |
| V 46                     | 1.60                        | 3.09                         | -1.49         | 3.05                         | -1.45         |
| V 332                    | 0.90                        | 1.57                         | -0.67         | 1.65                         | -0.75         |
| V 333                    | 2.10                        | 2.65                         | -0.55         | 3.06                         | -0.96         |
| V 337                    | 1.00                        | 1.09                         | -0.09         | 0.94                         | 0.06          |
| V 340                    | 0.10                        | 0.46                         | -0.36         | 0.23                         | -0.13         |
| V 341                    | 0.90                        | 1.26                         | -0.36         | 1.40                         | -0.50         |
| V 131                    | 1.40                        | 1.66                         | -0.26         | 1.76                         | -0.36         |
| V 135                    | 1.00                        | 1.64                         | -0.64         | 1.48                         | -0.48         |
| V 137                    | 0.90                        | 0.90                         | 0.00          | 0.89                         | 0.01          |
| V 139                    | 1.80                        | 1.71                         | 0.09          | 1.54                         | 0.26          |
| V 140                    | 1.60                        | 1.16                         | 0.44          | 1.08                         | 0.52          |
| V 141                    | 0.00                        | 0.52                         | -0.52         | 0.53                         | -0.53         |
| V 231                    | 1.20                        | 1.98                         | -0.78         | 2.39                         | -1.19         |
| V 232                    | 0.80                        | 0.72                         | 0.08          | 0.66                         | 0.14          |
| Neliösumma               |                             |                              | 8.28          | 12.87                        |               |

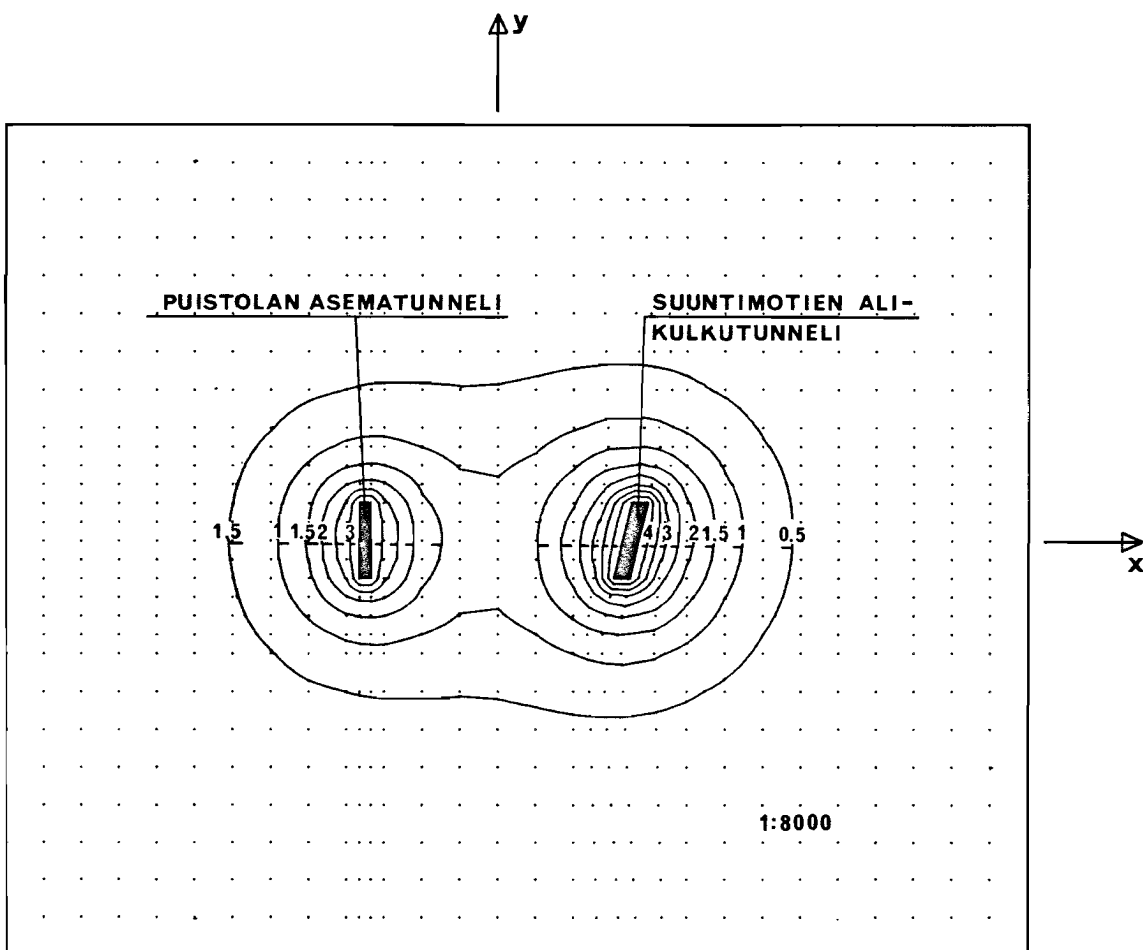
Molemmille tapauksille haettiin vielä kokeilemalla sellainen vuototekijän  $a$  arvo, joka pienimmän neliösumman mielessä antaa parhaan tuloksen, taulukko 13, jolloin vuototekijäksi saatiin 0.00040 ja 0.00030.

Taulukko 13. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikka.  
Lasketut pohjavedenpinnan alenemat havainto-  
pisteissä tapauksille, kun vettäjohtavan maa-  
kerroksen paksuus on vakio ja kun se vaihtelee.  
Vuototekijälle on etsitty sopiva arvo kokeile-  
malla.

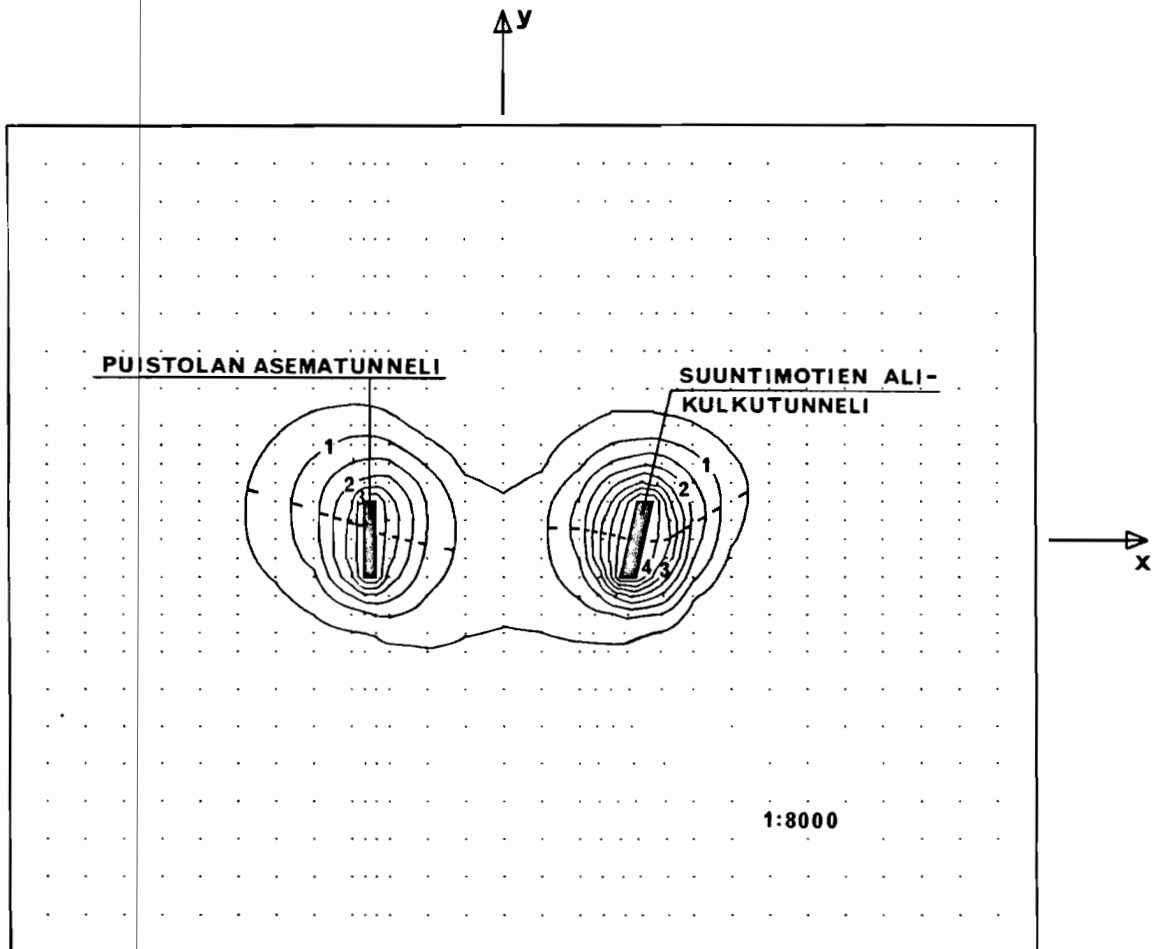
| Havain-<br>topiste<br>no | $\Delta h$<br>(hav.)<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m) | erotus<br>(m) | $\Delta h$<br>(lask.)<br>(m) | erotus<br>(m) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| V 30                     | 1.60                        | 2.97                         | -1.37         | 3.15                         | -1.55         |
| V 32                     | 1.50                        | 1.75                         | -0.25         | 1.18                         | 0.32          |
| V 34                     | 1.10                        | 0.53                         | 0.57          | 0.09                         | 1.01          |
| V 37                     | 0.20                        | 0.09                         | 0.11          | 0.03                         | 0.17          |
| V 42                     | 1.10                        | 0.56                         | 0.54          | 0.04                         | 1.06          |
| V 46                     | 1.60                        | 2.64                         | -1.04         | 2.25                         | -0.65         |
| V 332                    | 0.90                        | 0.99                         | -0.09         | 0.71                         | 0.19          |
| V 333                    | 2.10                        | 2.21                         | -0.11         | 2.19                         | -0.09         |
| V 337                    | 1.00                        | 0.62                         | 0.38          | 0.30                         | 0.70          |
| V 340                    | 0.10                        | 0.17                         | -0.07         | 0.03                         | 0.07          |
| V 341                    | 0.90                        | 0.77                         | 0.13          | 0.53                         | 0.37          |
| V 131                    | 1.40                        | 0.99                         | 0.41          | 0.75                         | 0.65          |
| V 135                    | 1.00                        | 1.23                         | -0.23         | 0.85                         | 0.15          |
| V 137                    | 0.90                        | 0.52                         | 0.38          | 0.37                         | 0.53          |
| V 139                    | 1.80                        | 1.27                         | 0.53          | 0.85                         | 0.95          |
| V 140                    | 1.60                        | 0.68                         | 0.92          | 0.40                         | 1.20          |
| V 141                    | 0.00                        | 0.20                         | -0.20         | 0.11                         | -0.11         |
| V 231                    | 1.20                        | 1.55                         | -0.35         | 1.77                         | -0.57         |
| V 232                    | 0.80                        | 0.35                         | 0.45          | 0.22                         | 0.58          |
| Neliösumma               |                             |                              | 5.69          |                              | 9.52          |



Erotusten keskiarvoksi, kun  $d$  on vakio, saatiin  $+0.06$ . Kun  $d$  vaihtelee, saatiin keskiarvoksi  $+0.26$ . Suuntimotien välittömässä läheisyydessä olevissa havaintopisteissä V 30, V 34 ja V 42 on havaittujen ja laskettujen arvojen erotus suuri. Pisteissä havaittu suhteellisen pieni alenema on ilmeisesti seurausta Suuntimotien alikulun kuivatustason alla olevan silttikerroksen patoavasta vaikutuksesta. Laskettujen pohjavedenpinnan alenemien tasa-arvokäyrät esitetään kuvissa 40 ja 41.



Kuva 40. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikat. Lasketut pohjavedenpinnan alenemien tasa-arvokäyrät, kun vettäjohtavan maakerroksen paksuus on vakio.



Kuva 41. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikat. Lasketut pohjavedenpinnan alenemien tasa-arvokäyrät, kun vettäjohtavan maakerroksen paksuus vaihtelee.

#### 6.53 Laskelmat, joissa huomioidaan Suuntimotien silttikerros

Silttikerroksen keskimääräinen paksuus alikulun alla on noin 2 m. Laskelmissa kerros oletettiin puoliläpäiseväksi. Kerroksen vaikutus pohjavesitilanteeseen huomioitiin laskelmissa kuvan 6.24 osoittamalla tavalla. Alikulun ulkopuolella on pystysuora virtaamanopeus

$$q = -a_1(h - h_1) \quad (47)$$

$a_1$  on kuvitellun puoliläpäisevän maakerroksen vuotokerroin alikulkutunnelin ulkopuolella

$h_1$  pohjaveden alkuperäinen painetaso alikulkutunnelin ulkopuolella

Alikulikutunnelin kohdalla saadaan virtaamanopeudeksi  $q$   
kuvan 42 mukaan:

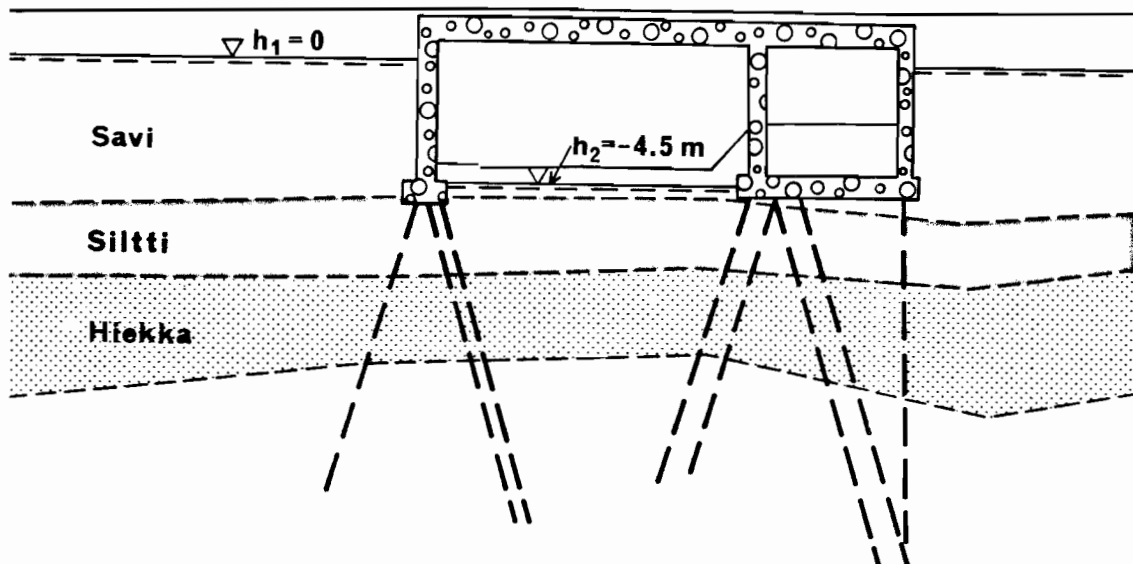
$$q = -a_2(h - h_2) \quad (48)$$

$a_2$  on silttikerroksen vuotokerroin alikulun alla  
 $h_2$  alikulun kuivatustaso

Silttikerroksen vuotokerroin  $a_2$  voidaan määrittää kaavalla:

$$a_2 = \frac{k'}{d' \cdot k} \quad (49)$$

$k'$  on siltin vedenläpäisevyys m/s  
 $d'$  silttikerroksen paksuus



Kuva 42. Puistola, Suuntimotien alikulkutunnelin rakennuspaikka. Kuivatusjärjestelmän ja vettäjohtavan maakerroksen välissä olevan silttikerroksen huomioonottaminen laskelmissa.

Laskelmissa käytettiin vuototekijälle  $a_1$  koepumppausten perusteella määritettyä arvoa 0.00005 (taulukko 10) sekä vedenläpäisevyydelle arvoa 1. Silttikerrokselle etsittiin kokeilemalla sellainen vuototekijän arvo, joka parhaiten toteuttaa havaitut painetasen muutokset havaintopisteissä. Taulukossa 14 on esitetty kolmella eri vuototekijän  $a_2$  arvolla lasketut painetasen muutokset havaintopisteissä.

Taulukko 14. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikat. Laskettu pohjavedenpinnan alenema havaintopisteissä, kun Suuntimotien silttikerros on huomioitu ja vettäjohtavan maakerroksen paksuus vaihtelee.

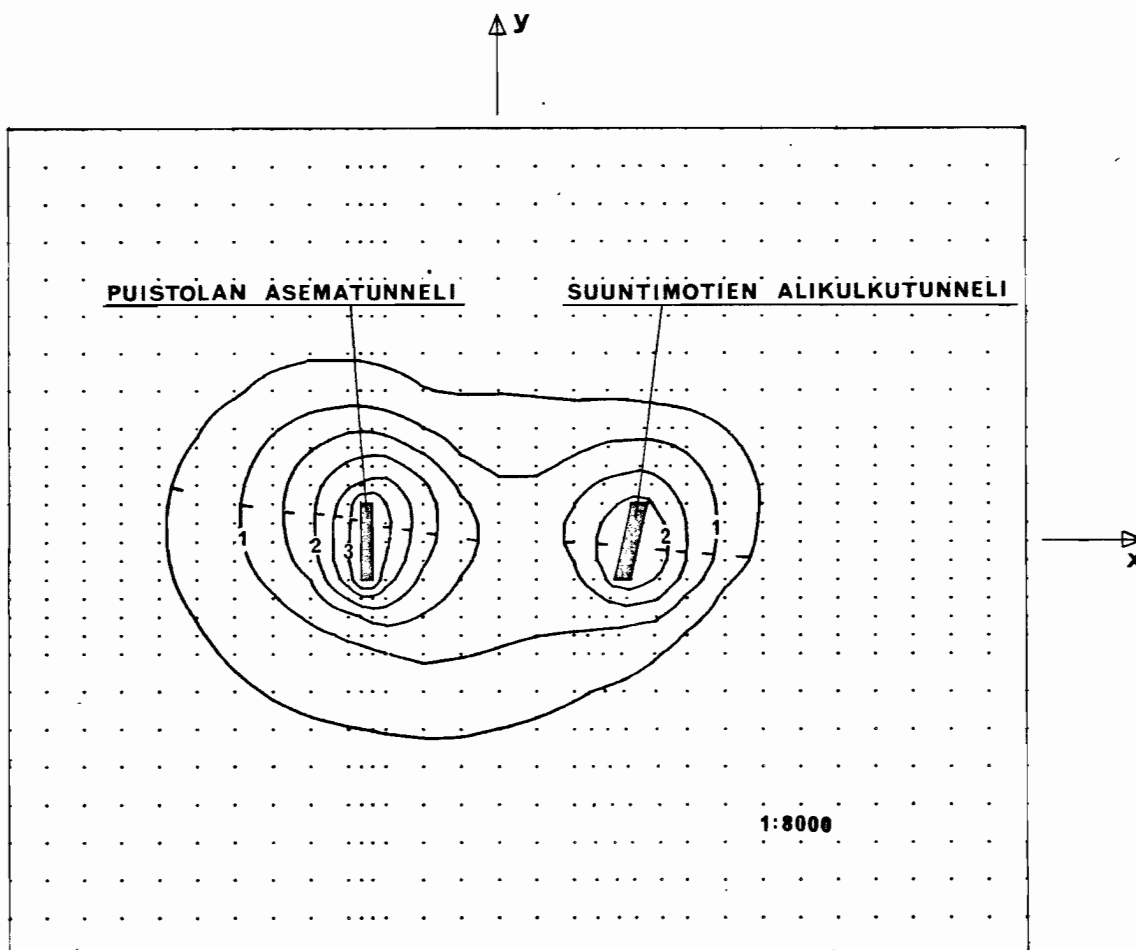
| Havaintopiste no | $\Delta h$ (hav.) (m) | $\Delta h$ (lask.) (m) | erotus (m) | $\Delta h$ (lask.) (m) | erotus (m) | $\Delta h$ (lask.) (m) | erotus (m) |
|------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|
| V 30             | 1.60                  | 1.46                   | 0.14       | 2.05                   | -0.45      | 2.40                   | -0.80      |
| V 32             | 1.50                  | 0.92                   | 0.58       | 1.29                   | 0.21       | 1.51                   | -0.01      |
| V 34             | 1.10                  | 0.26                   | 0.84       | 0.32                   | 0.78       | 0.35                   | 0.75       |
| V 37             | 0.20                  | 0.16                   | 0.04       | 0.18                   | 0.02       | 0.19                   | 0.01       |
| V 42             | 1.10                  | 0.16                   | 0.94       | 0.22                   | 0.88       | 0.25                   | 0.85       |
| V 46             | 1.60                  | 1.29                   | 0.31       | 1.71                   | -0.09      | 1.96                   | -0.36      |
| V 332            | 0.90                  | 0.68                   | 0.22       | 0.89                   | 0.01       | 1.02                   | -0.12      |
| V 333            | 2.10                  | 1.08                   | 1.02       | 1.52                   | 0.58       | 1.78                   | 0.32       |
| V 337            | 1.00                  | 0.35                   | 0.65       | 0.48                   | 0.52       | 0.56                   | 0.44       |
| V 340            | 0.10                  | 0.11                   | -0.01      | 0.14                   | -0.04      | 0.15                   | -0.05      |
| V 341            | 0.90                  | 0.50                   | 0.40       | 0.70                   | 0.20       | 0.82                   | 0.08       |
| V 131            | 1.40                  | 1.36                   | 0.04       | 1.46                   | -0.06      | 1.52                   | -0.12      |
| V 135            | 1.00                  | 1.45                   | -0.45      | 1.46                   | -0.46      | 1.46                   | -0.46      |
| V 137            | 0.90                  | 0.87                   | 0.03       | 0.88                   | 0.02       | 0.88                   | 0.02       |
| V 139            | 1.80                  | 1.44                   | 0.36       | 1.46                   | 0.34       | 1.48                   | 0.32       |
| V 140            | 1.60                  | 0.93                   | 0.67       | 0.97                   | 0.63       | 0.99                   | 0.61       |
| V 141            | 0.00                  | 0.44                   | -0.44      | 0.46                   | -0.46      | 0.47                   | -0.47      |
| V 231            | 1.20                  | 2.35                   | -1.15      | 2.36                   | -1.16      | 2.37                   | -1.17      |
| V 232            | 0.80                  | 0.62                   | 0.18       | 0.63                   | 0.17       | 0.64                   | 0.16       |
| Neliösumma       |                       |                        | 6.05       |                        | 4.60       |                        | 4.69       |

Paras tulos saatiin vuotokertoimen  $a_2$  arvolla 0.002, jolloin erotusten keskiarvoksi saatiin +0.09. Silttikerroksen vedenläpäisevyyskerroin pystysuoralle virtaukselle voidaan määrittää kaavan (49) avulla:

$$k' = a_2 \cdot d' \cdot k = 7.36 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

$$k = 1.84 \times 10^{-4} \text{ m/s (kts taulukko 6.9)}$$

Pohjavedenpinnan painetason aleneman tasa-arvokäyrät on esitetty kuvassa 43. Silttikerroksen vaikutus näkyy aikaisempiin tuloksiin verrattuna pienempänä pohjavedenpinnan alenemisena Suuntimotien alikulun ympäristössä (vrt kuva 41).



Kuva 43. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikat. Lasketun pohjavedenpinnan aleneman tasa-arvokäyrät, kun Suuntimotien alikulkutunnelin alla oleva silttikerros on huomioitu ja vettäjohtavan maakerroksen paksuus vaihtelee.  $a_1 = 0.00005$ ;  $a_2 = 0.002$ .

Sekä Puistolan asematunnelin että Suuntimotien alikulkutunnelin pumppaamoiden pumppaamat vesimäärät on mitattu 4.10.1970 - 27.12.1978 välisenä aikana. Taulukkoon 15 on laskettu alikulkutunneleiden kuivatusjärjestelmiin vuorokaudessa virranneet vesimäärät, kun Suuntimotien silttikerros on huomioitu ja kun se on jätetty huomioimatta. Vesimäärät laskettiin

kertomalla koepumppaustuloksista määritetyllä vedenläpäisevyyden arvolla alikulkujen elementtisolmuissa laskettujen solmuvirtojen summa.

Taulukko 15. Puistola. Lasketut ja mitatut Suuntimotien alikulkutunnelin ja asematunnelin kuivatusjärjestelmistä pumpattavat vesimäärät.

|              | Vesimäärä ( $\frac{m^3}{vrk}$ )     |                                  |         |
|--------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------|
|              | Laskettu                            |                                  | Mitattu |
|              | Silttiker-<br>rosta ei<br>huomioitu | Silttiker-<br>ros huo-<br>mioitu |         |
| Suuntimotie  | 231                                 | 109                              | 76      |
| Asematunneli | 279                                 | 290                              | 123     |

- 7. POHJAVEDENPINNAN ALENEMISESTA AIHEUTUNEET  
RAKENTEIDEN PAINUMAT
- 7.1 Esimerkkirakennukset

Helsingin kaupungin geotekninen osasto on asentanut Puistolán aseman lähiympäristössä kahteenkymmeneenseitsemään rakennukseen yhteensä 83 painumatarkkailupulttia. Tässä työssä tarkastellaan kahden omakotirakennuksen (liite 1) painumista. Painumalaskelmat perustuvat kohdassa 6.53 laskettuun pohjavesitilanteeseen.

Rakennus A sijaitsee noin 100 m:n päässä Suuntimotien alikulkutunnelista koilliseen. Rakennuksen B Betäisyys Puistolán asematunnelista on noin 50 m.

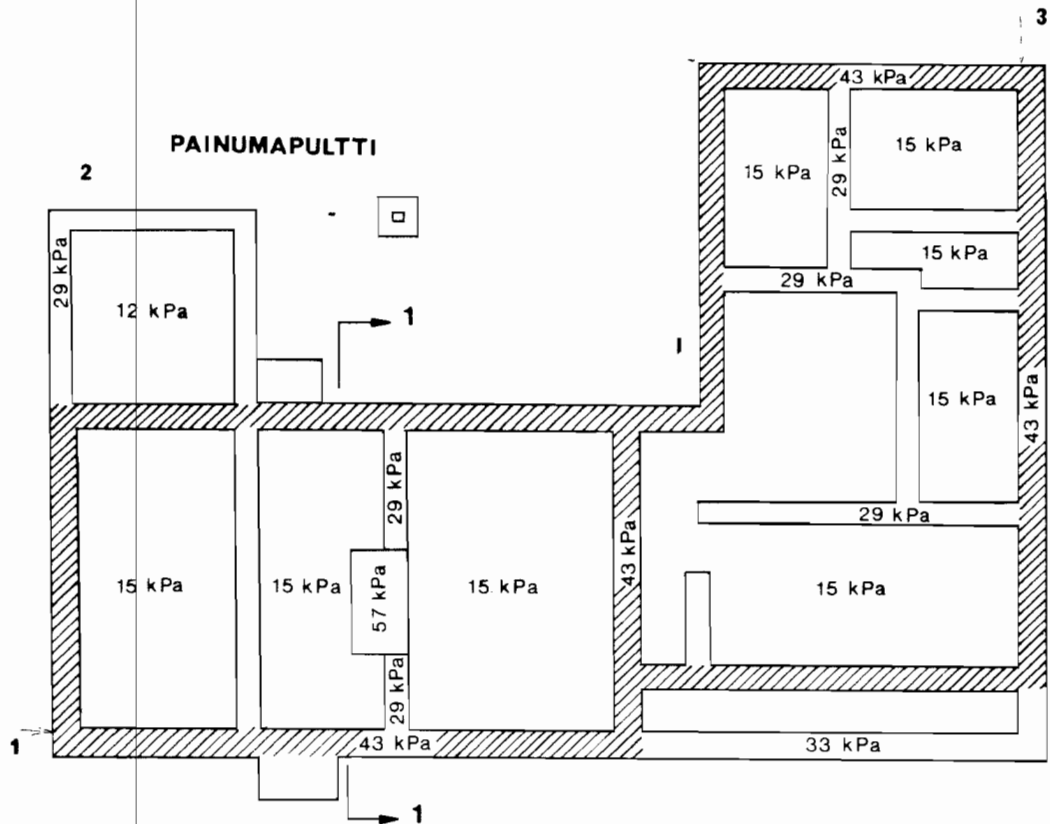
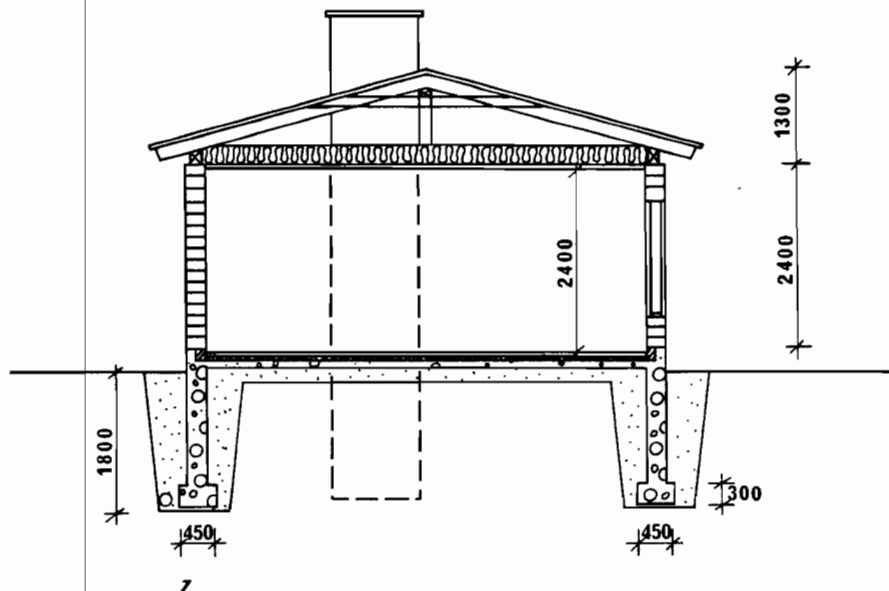
- 7.2 Rakennus A
- 7.21 Rakennus- ja perustamistapa

Rakennus on yksikerroksinen kellariton omakotitalo, kuva 44 ja liite 1. Se on rakennettu keväällä 1964 ja vuonna 1969 on rakennuksen länsisivulle rakennettu lisäsiipi kylmävarastoksi. Rakennuksen ala on  $145 \text{ m}^2$ .

Talo on perustettu anturoilla saven varaan. Ulkoseinälinjoilla on anturoiden leveys 0.45 m ja kantavien väliseinien kohdalla 0.40 m. Lattia on maanvarainen betonilaatta. Seinärakenne on muurattua kevytbetonitiiltä, paksuus 0.25 m, molemminpuolisella rappauksella.

Kaivussyvyyden pienentämiseksi on rakennuspaikalle tehty noin 0.5 m paksu täyttö.

Kuvassa 44 on esitetty rakenteista perustuksille tulevat kuormat. Lattiakuormassa on huomioitu laatan alla oleva täyttö.

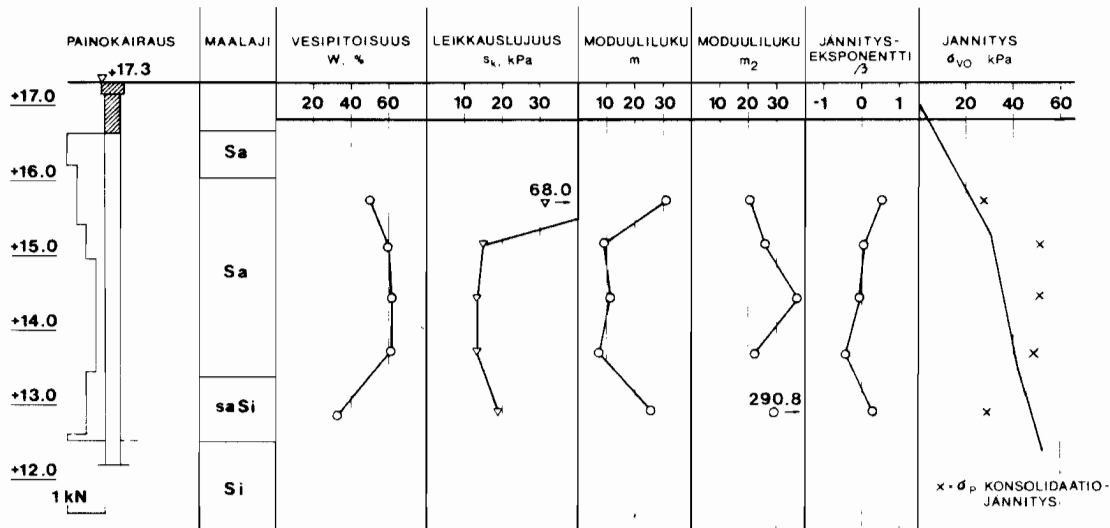
**LEIKKAUS 1-1**

Kuva 44. Rakennus A. Pohjapiirros ja leikkaus. Rakennuksesta aiheutuvat kuormat maapohjalle. Painumapulttien sijainnit perusmuurissa.



## 7.22 Pohjasuhteet

Luonnollisen maanpinnan taso vaihtelee rajoissa +16.9...+17.2. Maalaji rakennuspaikalla on savea, jonka paksuus on 4.0...4.5 m. Saven alla ovat siltti-, hiekka- ja hiekkamoreenikerrokset. Rakennuspohjan geotekniset ominaisuudet on esitetty kuvassa 45.

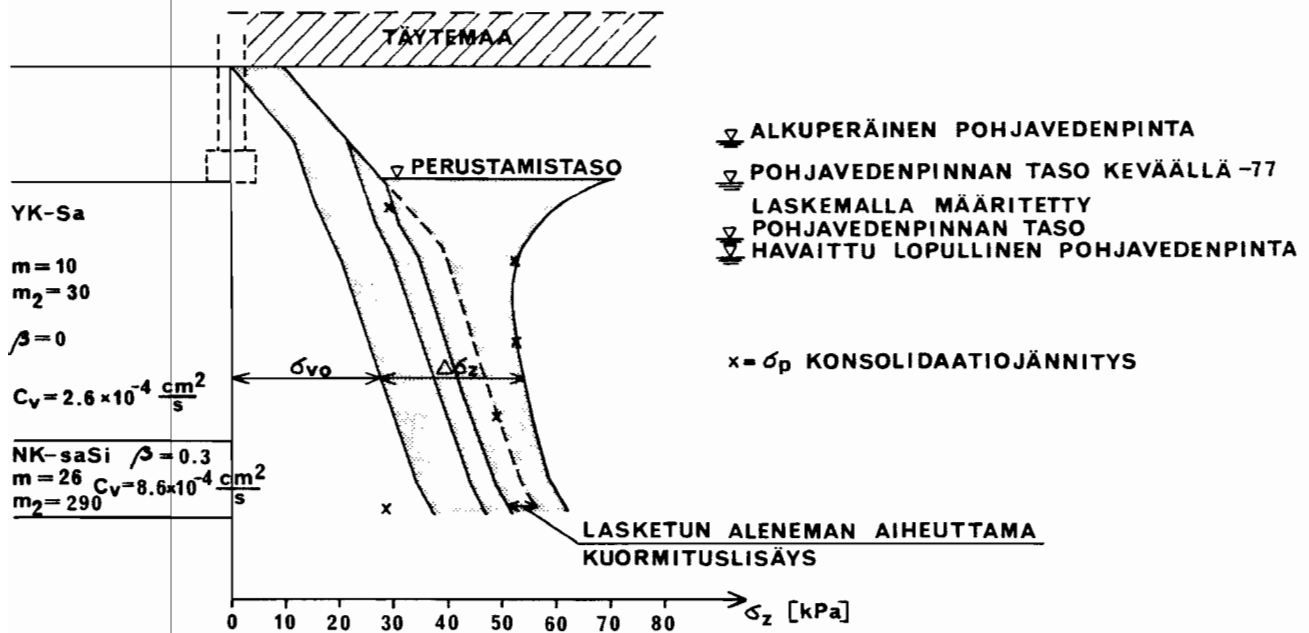


Kuva 45. Näytepiste 1. Maapohjan geotekniset ominaisuudet rakennuksen A kohdalla.

Ödometrikokeiden perusteella on savi syvyysvälillä 1.5...3.5 m ylikonsolidoitunut. Saven kuivapainosta mitattu vesipitoisuus on välillä 49...61 %.

On huomattava, että näytteenottopaikka oli noin 5 m painokairauspisteen vieressä, missä ei ollut kairausdiagrammissa näkyvää täytekerrosta. Ylikonsolidoituminen ei täten ole yli-pengerryksen aiheuttama.

Savikerros on geoteknisten ominaisuuksien perusteella jaettu kahteen kerrokseen. Ylempi kerros, syvyysvälillä 1.0...3.0 m, käsiteltiin ylikonsolidoituneena kerroksena ja alempi, syvyysvälillä 3.0...4.0 m normaalikonsolidoituneena, kuva 46.



Kuva 46. Rakennus A. Jännitys jakauma ulkoseinäanturan alla. Kokoonpuristuvuusparametrit.

Moduuliluvut  $m$  ja  $m_2$  sekä jännityseksponentti  $\beta$  on määritetty Vähäahon /28/ esittämällä korrelaatioteorian pohjalta kehitetyllä menetelmällä.

#### 7.23 Lasketut ja havaitut painumat

Rakennuksen omasta painosta aiheutuneet painumat laskettiin erikseen siipirakennukselle ja päärakennukselle. Jännitys-jakauma päärakennuksen ulkoseinäanturan alla on esitetty kuvassa 46. Kuvassa esitetty rakennuksen perustamissyvyys on arvio, joka perustuu arkkitehti- ja rakennepiirustuksiin.

Normaalikonsolidoituneella alueella on painuma laskettu käyttäen kaavaa: /14/

$$\epsilon = \frac{1}{m\beta} \left[ \left( \frac{\sigma_z}{\sigma_v} \right)^\beta - \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_v} \right)^\beta \right] \quad (50)$$

$\sigma_z$  on kokonaisjännitys syvyydessä  $z$

$\sigma_p$  konsolidaatiojännitys

$\sigma_v$  vertailujännitys (= 100 kPa)

$\beta$  jännityseksponentti

$m$  normaalikonsolidoituneen osan moduuliluku

Ylikonsolidoituneella alueella on oletettu että  $\beta = 0$ , jolloin kokoonpuristuman lauseke on:

$$\epsilon = \frac{1}{m_2} \ln \frac{\sigma_z}{\sigma_{v0}} \quad (51)$$

$m_2$  on ylikonsolidoituneen osan moduuliluku

$\sigma_z$  kokonaisjännitys syvyydessä  $z$

$\sigma_{v0}$  yläpuolella olevien maamassojen aiheuttama vertikaalijännitys

Kokoonpuristuvien maakerrosten konsolidaatiokertoimet on määritetty Casagranden menetelmällä kuormitusvälille 50... 100 kPa, kuva 46.

Koko painuvan maakerroksen konsolidaatiokerroin on kerrospaksuuksien suhteessa painotettu keskiarvo

$$\bar{C}_v = \frac{H_I C_{vI} + H_{II} C_{vII}}{H_I + H_{II}} \quad (52)$$

$H_I$  on kerroksen I paksuus, m

$H_{II}$  kerroksen II paksuus, m

$C_{vI}$  kerroksen I konsolidaatiokerroin,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$C_{vII}$  kerroksen II konsolidaatiokerroin,  $\text{cm}^2/\text{s}$

Saven ylikonsolidoitumisen johdosta voidaan rakennuksen omasta painosta aiheutuneet painumat katsoa tapahtuneen hyvin nopeasti.

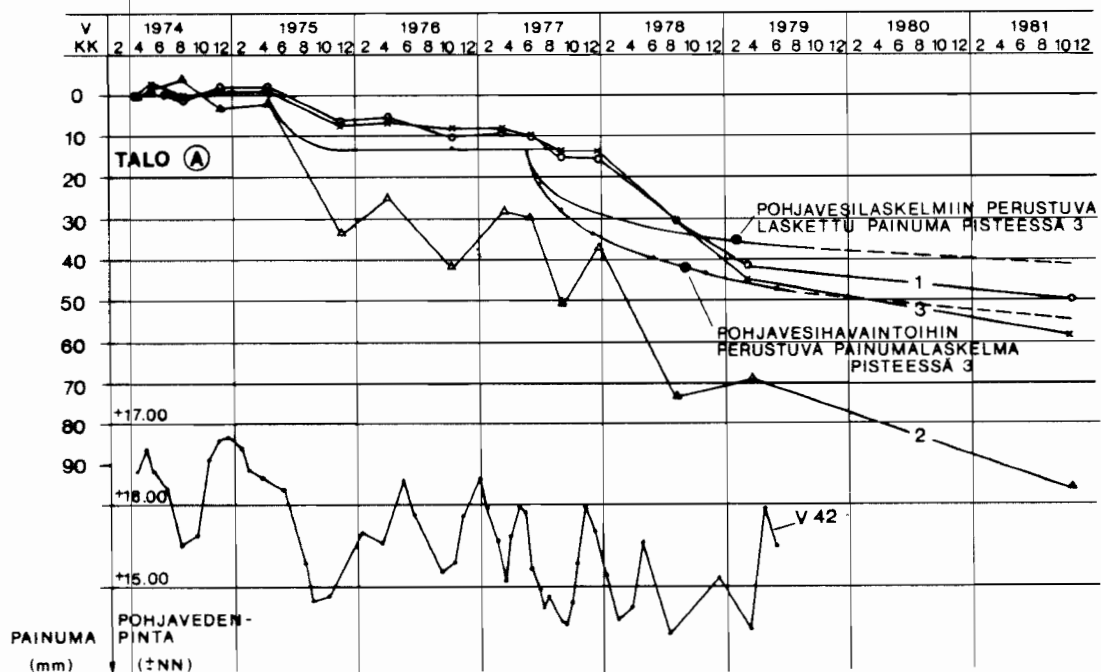
Rakennuksen painumatarkkailu aloitettiin vuonna 1974. Samanaikaisesti aloitettiin pohjaveden painetason havainnointi. Kuvasta 47 nähdään, että keskimääräinen pohjavedenpinta on vähitellen laskenut vuodesta 1975 lähtien. Aikavälillä huhtikuu 1975 ja toukokuu 1977 on vedenpinta laskenut noin 0.5 m. Vastaavana aikana on rakennus painunut noin 11 mm (pultit 1 ja 3). On ilmeistä, että siipirakennuksen perustusten alla on (pultti 2) maapohja routinut, mikä on aiheuttanut rakenteiden nousumisen ja laskemisen. Alikulkutunnelien rakennustöiden alettua vuonna 1977 on pohjavesi edelleen laskenut noin 0.5 m. Tästä aiheutuneet painumat olivat lokakuuhun 1981 mennessä pultin 1 kohdalla 40 mm ja pultin 3 kohdalla 48 mm. Havainnot viittaavat siihen, että vasta jälkimmäinen pohjavedenpinnan aleneminen

on aiheuttanut sen, että kokonaisjännitys  $\sigma_z$  ulkoseinänturan alla on ylittänyt konsolidaatiojännityksen, jolloin painuminen on kiihtynyt.

Laskelmissa on tilannetta tarkasteltu vuodesta 1975 eteenpäin. Vuosien 1975 ja 1977 välillä tapahtunut rakennuksen painuminen on laskettu pohjavedenpinnan havaintoihin perustuen. Koska kokonaisjännitys on pienempi kuin konsolidaatiojännitys kerroksessa I, kuva 46, on oletettu, että painuma-aikaan vaikuttaa ainoastaan kerros II. Vuoden 1977 keväästä eteenpäin, jolloin Suuntimotien alikulun vaikutus on alkanut, on rakennuksen painuma laskettu kohdan 6.53 laskentatuloksiin perustuen, kuva 47.

Laskettu painuma on noin 15 mm pienempi kuin pulteissa 1 ja 3 havaittu. Laskelmat suoritettiin käyttäen Suuntimotien alikulun aiheuttamana pohjaveden alenemana 0.5 m. Havaintojen mukaan alenema on kuitenkin hieman suurempi eli noin 0.7 m.

Vertailun vuoksi laskettiin myös havaitun pohjavedenpinnan aleneman aiheuttama rakennuksen painuma, kuva 47.

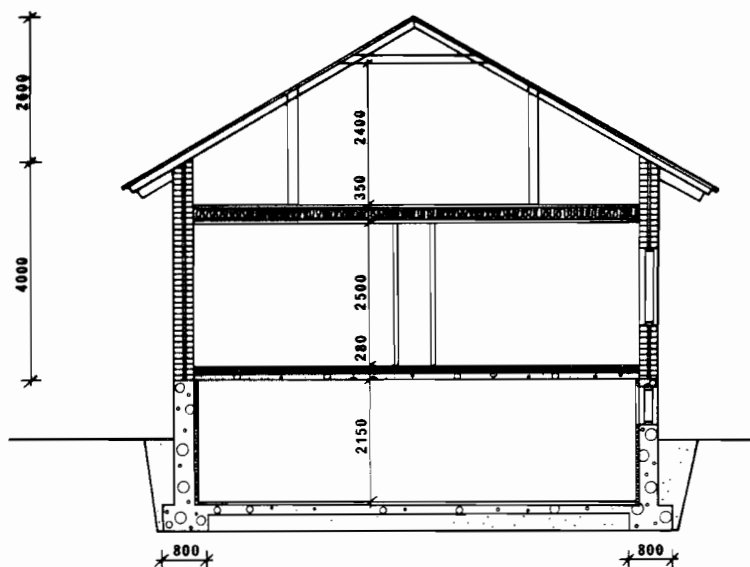


Kuva 47. Rakennuksen A havaitut painumat. Pohjavedenpinnan alenemisen aiheuttama, laskettu painuma. Pohjavedenpinnan painetason kehitys havaintopisteessä V 42.

7.3 Rakennus B

7.31 Rakennus- ja perustamistapa

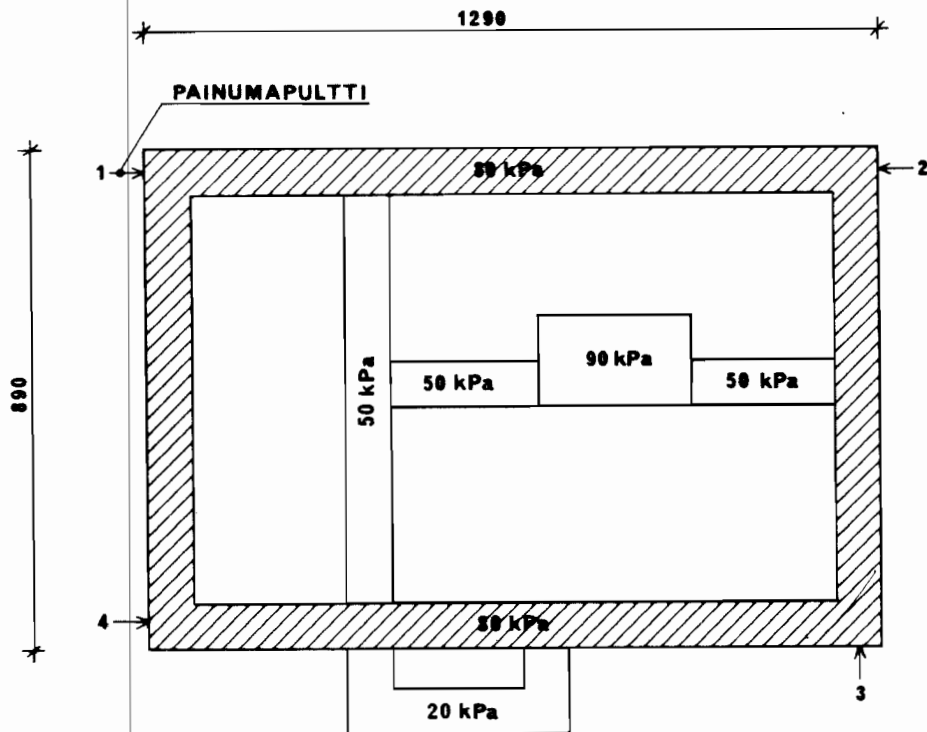
Rakennus on kaksikerroksinen tiilirakenteinen asuintalo, jossa on kellari, kuva 48 ja liite 1. Rakennus on valmistunut joulukuussa 1962 ja sen ala on noin 106 m<sup>2</sup>.



Kuva 48. Rakennus B.

Rakennus on perustettu anturoilla saven varaan. Anturoiden leveys on 0.8 m. Kellarin alapohja on maanvarainen betoni-laatta, jonka paksuus on 70 mm. Seinärakenne on kaksinker-tainen tiilimuuraus, joka on ulkopuolelta rapattu.

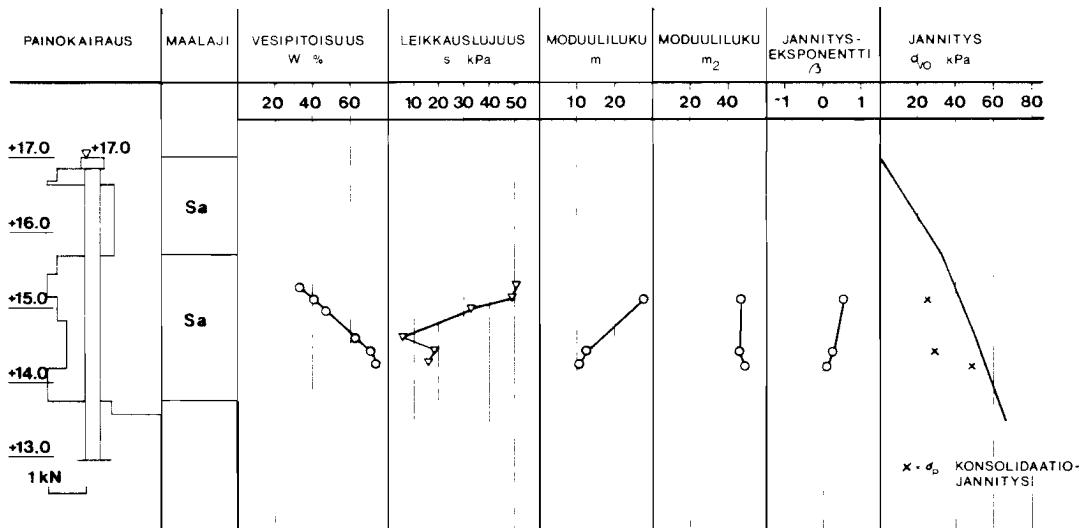
Rakennuksen ympärillä on noin 0.60 m paksu täyterkerros. Ra-kennuksen maapohjalle aiheuttamat kuormat on esitetty kuvas-sa 49. Lattiakuormissa on huomioitu alus-sorastuksesta ai-heutuva kuorma.



Kuva 49. Rakennus B. Rakennuksesta aiheutuvat kuormat maa-pohjalle. Painumapulttien sijainnit perusmuurissa.

### 7.32 Pohjasuhteet

Maanpinnan taso vaihtelee rakennuksen läheisyydessä välillä +16.6...+17.5. Päällimmäisenä kerroksena on rakennuksen ympärille tehty pihatäyttö, paksuudeltaan keskimäärin 0.6 m. Täytön alla on savikerrostuma, jonka paksuus on 3 m. Saven alla ovat siltti-, hiekka- ja moreenikerrostumat. Rakennus-pohjan geotekniset ominaisuudet on esitetty kuvassa 50.



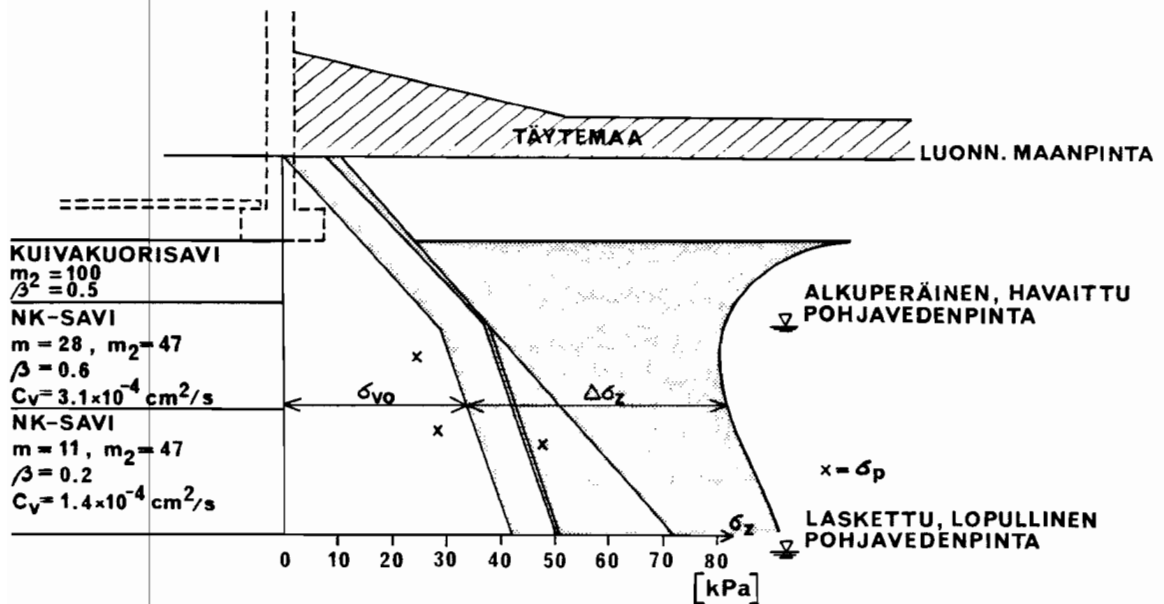
Kuva 50. Näytepiste 2. Maapohjan geotekniset ominaisuudet rakennuksen B kohdalla.

Ödometrikokeiden perusteella on savi paksua kuivakuorikerrosta lukuunottamatta normaalikonsolidoitunut. Vesipitoisuus vaihtelee 33...74 %:n välillä. Näytteenotto tapahtui kesällä 1981, jolloin pohjavedenpinta on ollut alhaalla jo useita vuosia. Vallitseva pystysuora jännitys oli kuitenkin vielä konsolidaatiojännitystä suurempi.

### 7.33 Lasketut ja havaitut painumat

Laskelmissa huomioitiin ensin pelkästään rakennuksen omasta painosta aiheutuva painuma. Rakennuksen aiheuttamaksi painumakuormitukseksi on ulkoseinäanturoiden alla arvioitu 68 kPa ja kantavien väliseinien alla 38 kPa. Maanvarainen lattia ei aiheuta maapohjalle lisäkuormitusta kevennysleikkauksen takia. Pihamaalle levitetty täytemaa aiheuttaa noin 10 kPa:n lisäkuormituksen.

Pohjavedenpinnan aleneminen huomioitiin kohdan 6.53 mukaan. Alenema talon B kohdalla on laskelman mukaan noin 2.2 m, josta aiheutuu 22 kPa:n lisäkuormitus, kuva 51.



Kuva 51. Rakennus B. Jännitysjakama ulkoseinäanturan alla. Kokoonpuristuvuusparametrit.

Kuivakuorisaven kokoonpuristuvuusparametreinä on käytetty lähteessä /18/ esitettyjä arvoja. Kaava (50) on tällöin muotoa:

$$\epsilon = \frac{2}{m_2} \left[ \sqrt{\frac{\sigma_z}{\sigma_v}} - \sqrt{\frac{\sigma_o}{\sigma_v}} \right] \quad (53)$$

Maakerrosten konsolidaatiokertoimet on määritetty Casagranden menetelmällä kuormitusvälille 50...100 kPa. Koko painuvaa kerrosta kuvaava keskimääräinen konsolidaatiokerroin on laskettu kaavalla (52). Kohteessa oletettiin vallitsevan kaksisuuntainen kuivatus, jolloin rakennuksen omasta painosta aiheutuvan primaarisen konsolidaation kestoksi saatiin n. 2 v.

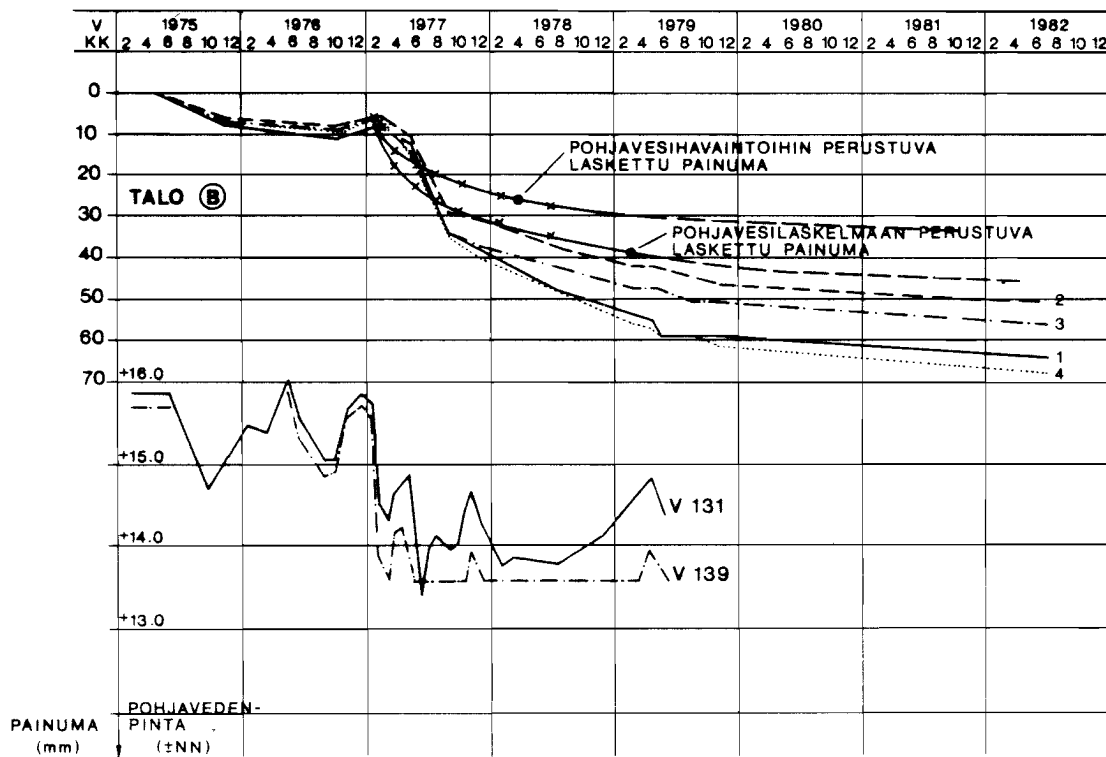
Taulukko 16. Rakennuksen B oman painon aiheuttama laskettu primaarinen konsolidaatiopainuma painumapulttien kohdalla.

| Painumapultti       | 1    | 2    | 3    | 4    |
|---------------------|------|------|------|------|
| Laskettu painuma mm | 55.3 | 56.5 | 57.2 | 56.5 |



Vuoden 1977 alussa aleni pohjavedenpinta tasolta +15.5 tasolle noin +13.7 eli 1.8 m. Samanaikaisesti voitiin rakennuksen neljästä painumapultista havaita painuma, jonka nopeus oli noin 30 mm/vuosi vuoden 1977 aikana.

Pohjavesilaskelma (kohta 6.53) antoi tulokseksi 2.2 m:n pohjaveden aleneman rakennuksen kohdalla. Tämän aiheuttama laskettu rakennuksen painuminen on esitetty kuvassa 52. Laskelmissa on oletettu, että rakennuksen omasta painosta aiheutunut konsolidaatiopainuma on kokonaisuudessaan tapahtunut, joten vuoden 1977 alussa alkanut painuminen on ainoastaan pohjaveden alenemisen aiheuttama. Kuvassa 52 on myös esitetty painumapulteista havaitut painumat sekä pohjavedenpinnan painetaso kahdessa havaintoputkessa. Vuosien 1975 ja 1977 välillä tapahtuneet painumat ovat ilmeisesti koepumppauksen aiheuttamia. Vuoden 1975 koepumppauksen vaikutus pohjavedenpintaan näkyy selvästi havaintoputken V 131 tuloksista.



Kuva 52. Rakennuksen B havaitut painumat. Pohjavedenpinnan alenemisen aiheuttama laskettu painuma. Pohjavedenpinnan painetason kehitys havaintopisteissä V 131 ja V 139.

Savikolle sopimattomasta perustamistavasta huolimatta ei rakennuksessa ole havaittu suuria painumaeroja. Tähän on ilmeisesti vaikuttanut rakennuspaikan paksu kuivakuorikerros ja talon perusrakenteiden jäykkyys.

Painumaa laskettaessa ei huomioitu saven alla olevan silttikerroksen kokoonpuristumista, joten laskettu painuma on todellista hieman pienempi.

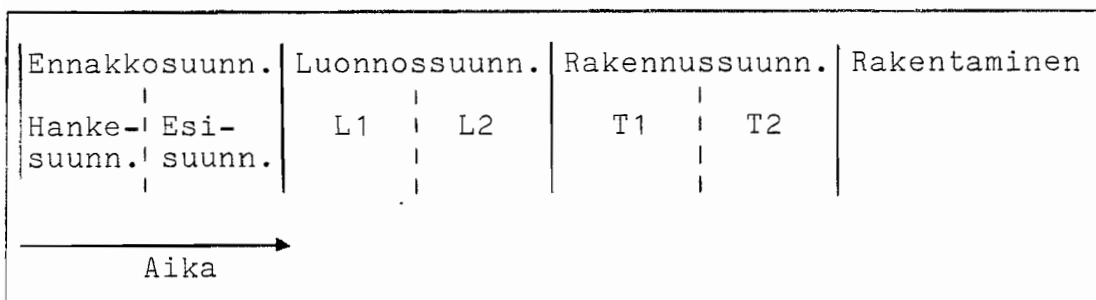
Vertailun vuoksi laskettiin myös pisteessä V 139 havaitun pohjavedenpinnan aleneman mukainen painuma, kuva 52.

## 8. POHJAVESITILANTEEN SUUNNITTELU SYVÄRAKENTAMISEN OSANA PEHMEIKKÖALUEILLA

### 8.1 Pohjavesitilanteen suunnittelun tarve

Pohjarakennusohjeissa 1979 /22/ annetaan seuraavat ohjeet pohjaveden huomioonottamiseksi syvärakentamisen yhteydessä. "Syviä, pohjavedenpinnan alapuolelle sijoitettavia, tiloja suunniteltaessa on selvitettävä niiden aiheuttamat ympäristöhaitat sekä rakennustyön aikana että rakennuksen käyttöaikana. Kaikissa riskialttiissa kohteissa on pohjarakennussuunnitelmaan sisällytettävä pohjavesitilanteen suunnittelu, johon itse rakennuskohteen pohjavesiratkaisujen suunnitelman lisäksi sisältyvät mm. riskialueen laajuuden ja riskien suuruuden selvitys sekä vahinkojen ehkäisemiseksi tarvittavien toimenpiteiden ja tarkkailutoimenpiteiden suunnittelu."

Pohjavesitilanteen suunnittelu aloitetaan jo rakennuskohteen ennakkosuunnitteluvaiheessa, kuva 53. Tällöin voidaan luonnossuunnitteluvaiheessa huomioida pohjavesitilanne vaihtoehtoja vertailtaessa.



Kuva 53. Rakennussuunnittelun vaihejako /21/.

### 8.2 Pohjavesitilanteen huomioiminen ennakkosuunnitteluvaiheessa

Pohjavesitilanteen selvittäminen ennakkosuunnitteluvaiheessa vaatii kohteesta seuraavat tiedot:

- alueen geologia
- vallitseva pohjavesitilanne
- alueen rakennukset ja rakenteet.

Alueen geologia selvitetään karkeasti käyttäen alueella aikaisemmin tehtyjä pohjatutkimuksia. Rajataan pohjavesiallas ja määritetään pohjaveden johtomuodostuman tyyppi.

Vallitsevan pohjavesitilanteen selvittämisen tavoitteena on kartoittaa pohjavedenpinnan keskimääräinen korkeus sekä karkeasti arvioida virtaussuunnat. Pohjavedenpinnan mittaaminen tapahtuu SGY:n kairausopas IV:ssä /21/ esitetyillä menetelmillä. Tarkkailuverkosto suunnitellaan pitkäaikaista havainnointia silmälläpitäen siten, että tarkkailua voidaan jatkaa rakennushankkeen myöhemmissä vaiheissa ja tarvittaessa rakennustöiden jälkeenkin.

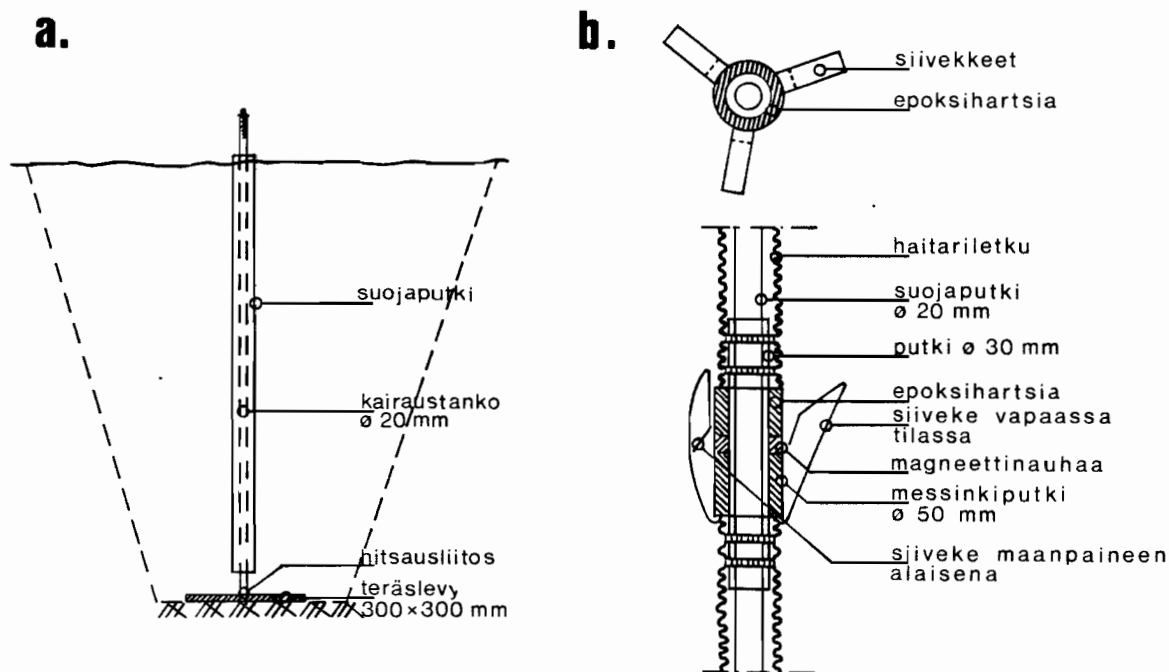
Alueen geologiasta ja pohjavesitilanteesta saatujen tietojen perusteella arvioidaan riskialueen rajat, joiden sisäpuolella olevien rakennusten ja rakenteiden perustamistavat ja kunto selvitetään. Erityisissä riskikohteissa voidaan lisäksi suorittaa tarvittavia lisätutkimuksia.

### 8.3 Pohjavesitilanteen huomioiminen luonnos- ja rakennussuunnitteluvaiheissa

Alueen maaperätietoja täydennetään kairauksin ja näytteenotoin. Painuvista maakerroksista selvitetään painumisominaisuudet ja vettäjohtavista maakerroksista vedenläpäisevyydet ja rakeisuudet.

Vaikeimmissa ja ympäristövaikutuksiltaan herkimmissä kohteissa suoritetaan koepumppaus. Lahirakennuksiin, joissa pohjavedenpinnan aleneminen saattaa aiheuttaa painumia, asennetaan painumapultit ennen koepumppauksen alkamista. Koepumppaus suoritetaan lähteessä /15/ esitetyn periaatteen mukaisesti. Oleellista on, että saavutetaan tasapainotilanne, jossa pohjavedenpinnan taso havaintoputkissa ei enää sanottavasti muutu pumppauksen aikana. Havaintotulosten perusteella määritetään pohjavedenpinnan aleneman vaikutusalue.

Laskentatulosten pohjalta laajennetaan tarkkailuverkostoa rakennusten ja maapohjan painumien osalta. Maakerrosten painumien mittaaminen tapahtuu painumalevyjen ja haitariletkujen avulla, kuva 54.



Kuva 54. a) Painumalevy

b) Haitariletku

Sekä rakenteiden että maapohjan painumien tarkkailu aloitetaan jo ennakkosuunnitteluvaiheessa. Tällöin saadaan kuva painumakäyttäytymisestä hyvissä ajoin ennen rakennustoimenpiteitä.

Pohjavesihavainnot suoritetaan hankkeen suunnittelun aikana vähintään kerran kuukaudessa. Rakentamisen aikana tihennetään havaintoväliä tarpeen mukaan.

Painumahavainnot suoritetaan suunnittelun aikana 3...4 kk:n välein. Rakentamisen aikana tihennetään havainnointia 2 viikkoon...1 kuukauteen.

Luonnollisesti pohjaveden alentaminen työn aikana vaatii työmenetelmänä oman tarkkailunsa, joka esitetään erillisessä työsuunnitelmassa.

#### 8.4 Yhteenveto pohjasuunnittelun sisällöstä

Rakennetuilla pehmeikköalueilla tulee pohjavesitilanteen suunnittelu aloittaa syvärakentamiskohteen ennakkosuunnitteluvaiheessa. Taulukossa 17 esitetään pohjavesitilanteen suunnittelun sisältö rakennushankkeen eri vaiheissa.

Taulukko 17. Pohjavesitilanteen suunnittelun sisältö rakentamisen eri vaiheissa.

|                                                                  | Geologia ja geotekniikka                                                            | Hydrogeologia                                                                                             | Rakennukset                                    |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ennakko-suunnittelu                                              | pohjasuhteet<br>pohjavesi-<br>altaat                                                | vettäjohta-<br>vat kerrok-<br>set<br>riskialueen<br>rajaus<br>pohjavesi-<br>tarkkailu                     | perustamis-<br>tavat<br>riskiarviot            |
| luonnos-<br>suunnittelu<br>- - - - -<br>rakennus-<br>suunnittelu | pohjasuhde-<br>tietojen<br>tarkennus<br>maakerroksen<br>geotekniset<br>ominaisuudet | pohjavesi-<br>tarkkailu<br>pohjaveden<br>johtomuodos-<br>tuman raja-<br>rajaus<br>pohjavesi-<br>laskelmat | painuma-<br>tarkkailu<br>painuma-<br>laskelmat |
| rakentaminen<br><br>käyttö                                       |                                                                                     | pohjavesi-<br>tarkkailu                                                                                   | painuma-<br>tarkkailu                          |

## 9. YHTEENVETO

Helsingin Puistolan aseman ympäristöön on kahden alikulku-tunnelin rakentamisen yhteydessä asennettu Helsingin kaupungin geoteknisen osaston toimesta 24 pohjavedenpinnan havaintoputkea ja 27 rakennukseen yhteensä 83 painumatarkkailupulttia. Ali-kulkujen rakennuspaikoilla suoritettiin vuonna 1975 koepump-paukset, joista saatuja havaintotuloksia on käytetty määri-tettäessä rakentamisen aiheuttaman pohjavedenpinnan alenemisen laajuutta.

Koepumppausaineiston avulla määritettiin koko alueelle, kuvi-tellun puoliläpäisevän maakerroksen vuototekijä, jota vaihte-lemalla sovitettiin laskentatulokset havaintoihin. Parhaan tuloksen antanutta vuototekijää käytettiin arvioitaessa raken-nustöiden aiheuttamaa pysyvää pohjaveden alenemista. Tässä työssä vuototekijän nimellä käytetty kerroin, antoi havainto-tulosten kanssa suhteellisen hyvin korreloivia tuloksia, taulukko 18..

Taulukko 18. Puistola, alikulkutunnelien rakennuspaikka. Ha-vaittujen ja laskettujen pohjavedenpinnan alene-mien erotusten neliösumma, keskiarvo ja keski-hajonta.

|                                         | vuototekijä                      | neliösumma | keskiarvo | keskihajonta |
|-----------------------------------------|----------------------------------|------------|-----------|--------------|
| koe-pumppaus                            | $a_1 = 0.00005$                  | 3.45       | +0.07     | 0.39         |
| rakenta-misen jälkeinen, pysyvä tilanne | $a_1 = 0.00005$<br>$a_2 = 0.002$ | 4.60       | +0.09     | 0.49         |

Taulukossa 18 esiintyvä  $a_2$  on Suuntimotien alikulkutunnelin kuivatustason alla olevan silttikerroksen vuototekijä.

Pohjavedenpinnan aleneminen pehmeikköalueilla aiheuttaa maanvaraan perustettujen rakennusten painumisen. Suoritetun pohjavesilaskelman pohjalta tarkasteltiin kahden alikulkutunnelien läheisyydessä sijaitsevan pienrakennuksen, liite 1, painumista. Rakennusten lasketut ja havaitut painumat on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Rakennusten A ja B havaitut ja lasketut pohjaveden alenemisesta aiheutuneet painumat.

| rakennus | havaittu<br>keskimääräinen<br>painuma<br>(mm) | laskettu<br>painuma<br>(mm) | erotus<br>(mm) |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------------------|----------------|
| A        | 54                                            | 30                          | 24             |
| B        | 61                                            | 39                          | 22             |

Havaittuja pienempiin laskettuihin painumiin on vaikuttanut se, että näytteet laskelmia varten otettiin kesällä 1981, jolloin saven konsolidaatiotila pohjavedenpinnan alenemisen johdosta oli jo muuttunut.



#### KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Aalto, J., Geotekniikan numeeriset menetelmät, luentomoniste, TKK 1981.
2. Airaksinen, J. U., Maa- ja pohjavesihydrologia, kustannusosakeyhtiö Pohjoinen, 1978.
3. Airaksinen, J. U., Pohjaveden muodostuminen ja esiintyminen, INSKO, Pohjavesien hyväksikäyttö ja suojele, 1975.
4. Anttikoski, U., Maanalaisen rakentamisen vaikutus pohjaveteen kaupunkialueella, Vesitalous 1, 1974.
5. Bear, J., Hydraulics of groundwater, Mcgraw-Hill 1979.
6. Bear, J., Dynamics of fluids in porousmedia, Department of civil engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, American Elsevier Publishing Company inc., enviromental series, New York 1972.
7. Broms, B., Grundvattensänkning - ett geotekniskt problem, Väg och Vattenbyggaren 6, 1973.
8. Davis, S. N., De Wiest, R. J. M., Hydrogeology, John Wiley & sons inc., New York 1967.
9. Dupuit, J., Etudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux de Couverts et a Travers les terrains Permeables, 2nd edn, Dunod, Paris 1963.
10. Hansbo, S., Beräkning av portrycksminskning genom grundvattensänkning, Väg och Vattenbyggaren 2, 1973.

11. Hartikainen, J., Saraste, A., Kluuvin ruhjeen geologia, geoteknilliset selvitykset ja tarkkailumittaukset, eripainos Rakennustekniikka 4, 1978.
12. Helenelund, K. V., Pohjaveden alenemisesta aiheutuva huokospaineen muutos ja konsolidaatiopainuma, Rakennustekniikka 1, 1976.
13. Hyyppä, J., Pohjavedestä ja Suomen pohjavesigeologiasta olosuhteista, INSKO, Helsinki 1965.
14. Janbu, N., Grunnlag i geoteknikk, Tapir, Trondheim 1970.
15. Kezdi, A., Handbook of Soil Mechanics vol. 2, Soil Testing, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1980.
16. Knutsson, G., Morfeldt, C-O, Vatten i jord och berg, Ingenjörsförlaget Ab, Stockholm 1973.
17. Lindh, G., Falkenmark, M., Hydrologi, Studentlitteratur, Lund 1972.
18. Pylkkänen, J., Hienorakeisten maalajien painumisominaisuuksista, Otaniemi 1973, VTT geotekniikan laboratorio, tiedonanto 7.
19. Räsänen, S., Elementtimenetelmäpiirturiohjelma, Tietokonetekniikan erikoistyö, TKK F-osasto 1980.
20. Suomen geoteknillinen yhdistys r.y., Kairausopas IV, 1975.
21. Suomen geoteknillinen yhdistys r.y., Talonrakennuksen pohjatutkimusohjeet 1982, julkaistaan myöhemmin.
22. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 121, Pohjarakennusohjeet 1979.

23. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 92, Vesi-rakennus 1973.
24. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, RIL 95, Pohja-rakennus 1974.
25. Taylor, D. W., Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & sons, inc., London 1956.
26. Todd, D. K., Groundwater Hydrology, John Wiley & sons, inc., New York 1966.
27. Verruijt, A., Theory of Groundwater Flow, Macmillan & co. ltd. 1970.
28. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, tiedote 14, 1979.
29. Zienkiewicz, O. C., The Finite Element Method, Mcgraw-Hill 1977.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohdojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
11. Arkima, O., Kluuvien ruuhkeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannus selvitys. 1982. 50,-
28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 30,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-

2



