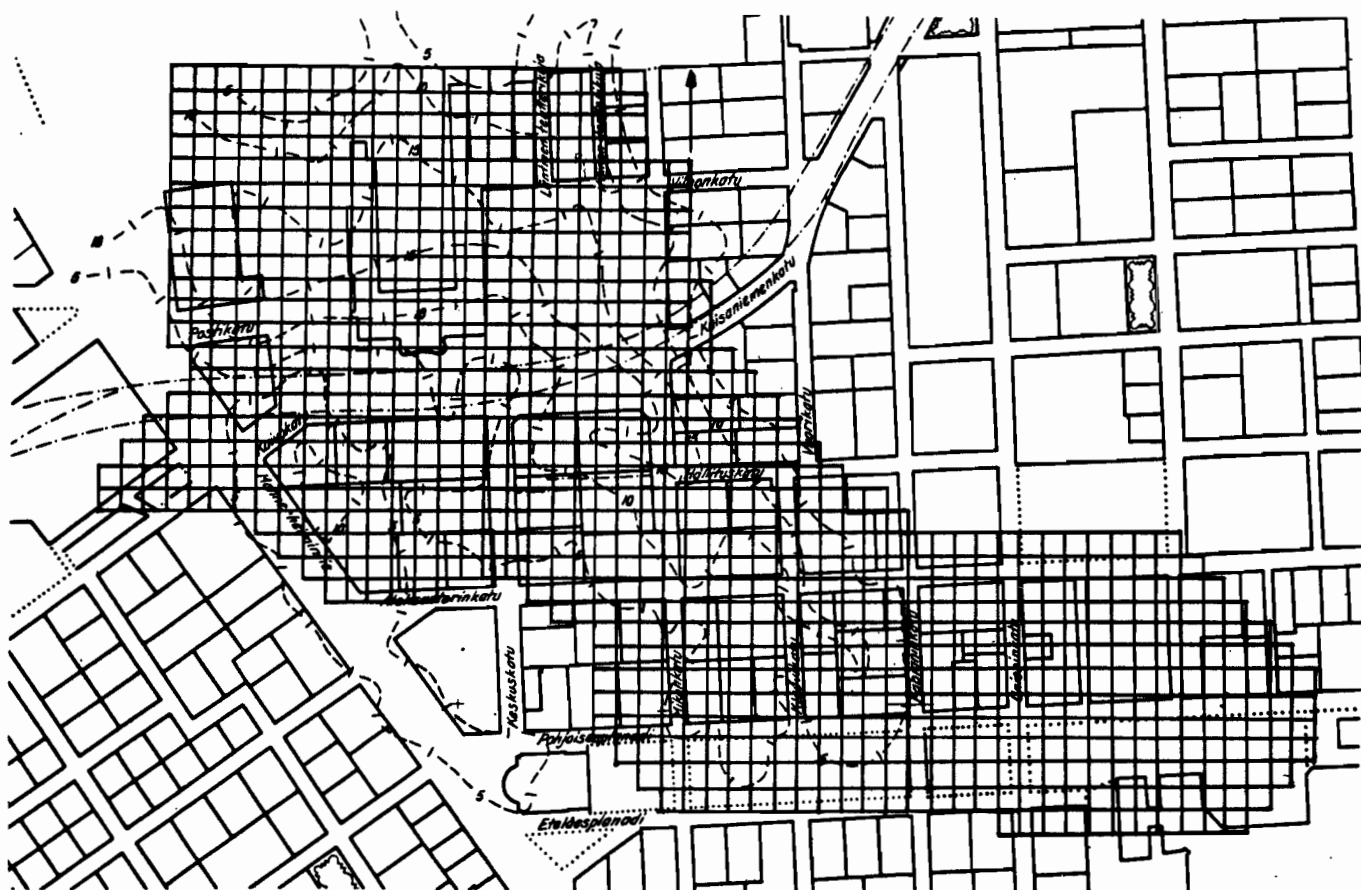


HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO



RAKENTAMISEN VAIKUTUS POHJAVETEEN HELSINGIN KESKUSTASSA

Geoteknillisen toimiston tiedote 10 10.10. 1978

RAKENTAMISEN VAIKUTUS POHJAVETEEN
HELSINGIN KESKUSTASSA

Tämä selvitys on tehty geoteknillisen toimiston omasta aloitteesta aikavälinä 1.6.1977... 10.10.1978 geoteknillisessä toimistossa. Selvitys perustuu dipl.ins. Heikki Tikkasen tekemään tutkimustyöhön.

Sisällysluettelo:

1.	JOHDANTO	1
2.	MAA- JA KALLIOPERÄ SEKÄ POHJAVESI	5
2.1	<u>Suoritetut pohjatutkimukset</u>	5
2.2	<u>Pohjasuhteet</u>	7
2.3	<u>Maan painumisominaisuudet</u>	11
2.4	<u>Pohjavesikerrokset ja maan vedenläpäisevyys</u>	12
3.	RAKENNUKSET	16
3.1	<u>Rakennussuojelu</u>	16
3.2	<u>Perustukset</u>	20
3.21	Perustamistavat	20
3.22	Perustusten heikkoudet	23
3.23	Perustusten saneeraus	24
3.24	Tietojen tarkentaminen	26
4.	POHJAVESITARKKAILU	30
4.1	<u>Pohjaveden painetason tarkkailu</u>	30
4.11	Tarkkailujärjestelmän rakenne	30
4.12	Pohjaveden painetason kehitys ennen tarkkailujärjestelmää	35
4.13	Pohjaveden painetason kehitys tarkkailujärjestelmän aikana	36
4.2	<u>Maanalaisiin tiloihin vuotavan pohjaveden mittaus</u> ..	38
4.21	Vuodot kellaritiloihin	38
4.22	Vuodot metron tiloihin	41
4.3	<u>Painumien tarkkailu</u>	42
4.31	Painumalevyt	42
4.32	Rakennusten painumat	45
5.	POHJAVEDEN VIRTAAUS NYKYISIN	46
5.1	<u>Pohjaveden kulutus</u>	46
5.2	<u>Kulutetun pohjaveden korvautuminen</u>	47
5.3	<u>Pohjaveden syöttö</u>	49

6.	POHJAVEDEN VIRTAAUSLASKELMAT	51
6.1	<u>Laskentamenetelmän valinta</u>	51
6.2	<u>Elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä.</u>	56
6.21	Menetelmän periaatteet	56
6.22	Tietokoneohjelman käyttö	57
6.23	Piirtämisohjelma	60
6.3	<u>Elementtimallin tekeminen</u>	60
6.31	Alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyysarvon määritys Kluuvin ruhjeen koepumppauksen perus- teella	60
6.32	Suuren elementtiverkon muodostaminen	66
6.33	Reunaehtojen määrittäminen	69
6.34	Mallin muokkaus ja virhetarkastelu	70
6.35	Kellaritilojen vuotojen vaikutus alemman pohja- vesikerroksen painetasoon	77
6.36	Metron vuotojen vaikutus alemman pohjavesiker- roksen painetasoon	84
7.	POHJARAKENNUSTYÖT	93
7.1	<u>Rakennustöiden vaikutus pohjaveteen</u>	93
7.2	<u>Tietojen saanti vanhoista rakennustöistä</u>	93
7.3	<u>Alempaan pohjavesikerrokseen vaikuttaneet raken- nustyöt</u>	94
7.31	Töiden määrä	94
7.32	Suomen Yhdyspankin kiinteistöjen yhdystunnelin rakennustyö	96
7.33	Muut alempaan pohjavesikerrokseen vaikuttaneet rakennustyöt	105
7.4	<u>Pohjaveteen vaikuttavat rakennustyöt tulevai- suudessa</u>	115
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET	116
9.	YHTEENVETO	123
	ENGLISH SUMMARY	125
	KIRJALLISUUS	126

LIITTEET

Liite 1: Vanhoja kairauksia, joiden yhteydessä on tehty pohjavesihavainto

Liite 2: Kluuvin ruhjeen koepumppauksen yhteydessä tehdyn kemiallisen vesianalyysin tulokset

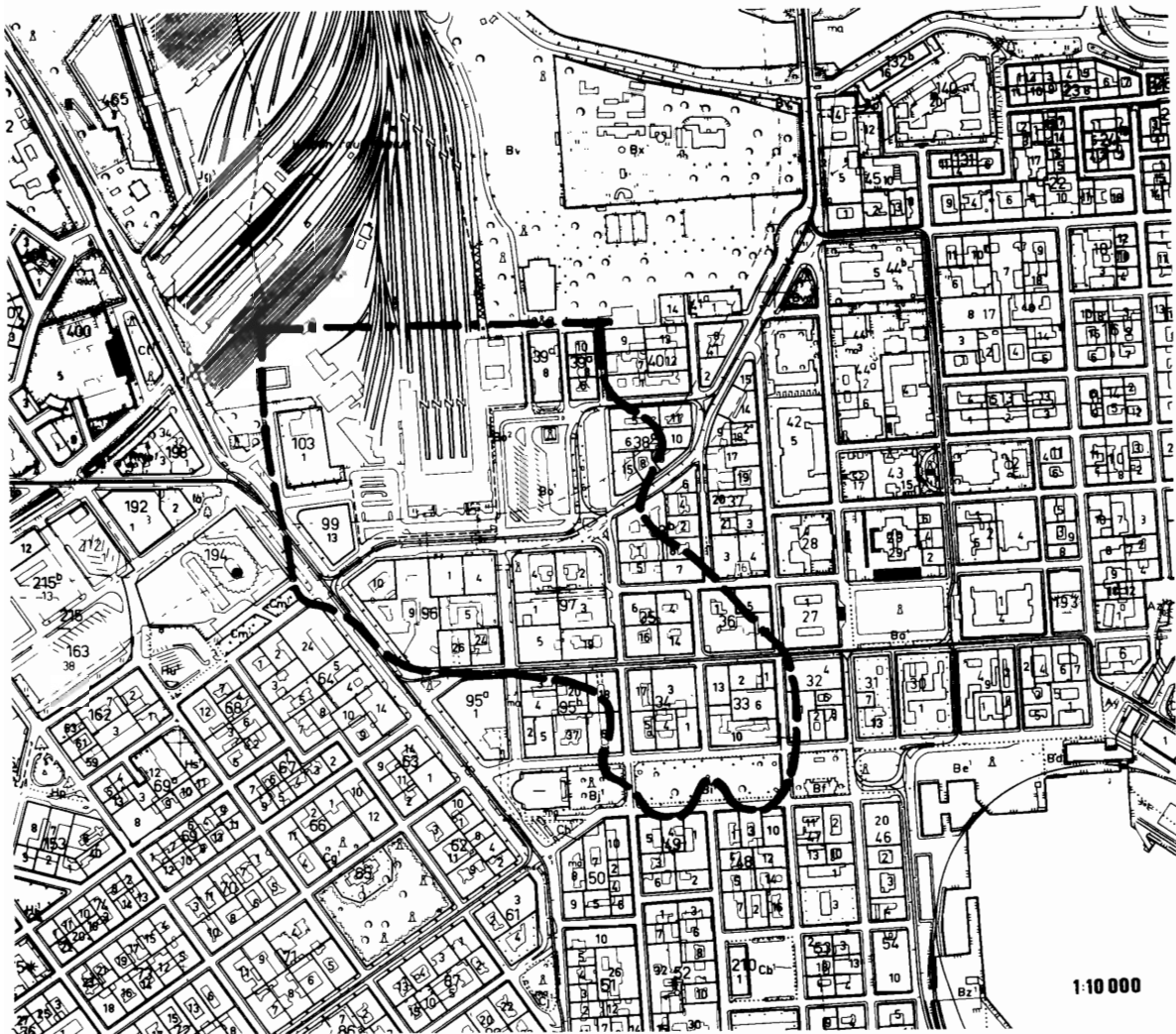
Liite 3: Laskentaohjelman lähtötietokorttien rakenne

Liite 4: Piirtämisohjelman käyttö

1. JOHDANTO

Pohjaveden pinta alenee yleensä rakentamisen seurauksena. Tästä aiheutuu rakennuksille helposti vaurioita, koska puupaalut lahoavat nopeasti pohjaveden pinnan yläpuolella. Lisäksi hienorakeiset maalajit kokoonpuristuvat pohjaveden alenemisen aiheuttaman suuren lisäkuorman vuoksi, jolloin maan painuminen aiheuttaa katujen, pihojen, johtolinjojen ja muiden rakenteiden rikkoontumisia.

Helsingin maa-alasta on 35 % savialuetta. Tässä esityksessä käsitellään Helsingin keskustan savialueen pohjavesiallasta, joka on pääosin entisen Kluuvinlahden kohdalla (kuva 1). Pohjaveden pinta on laskenut

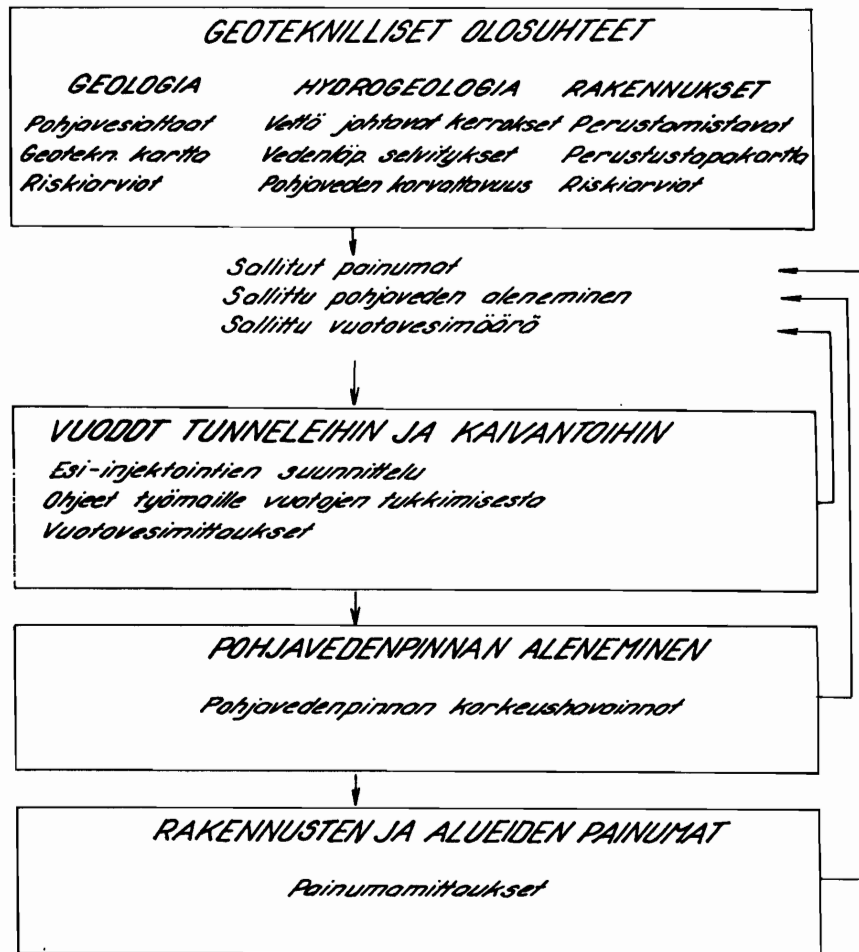


Kuva 1. Käsiteltävä alue.

alueella 1800- ja 1900-luvulla useita metrejä kellareiden, viemäreiden ja kalliotunneleiden vuotojen, rakennusaikaisten kaivantojen kuivanapidon, sateen imeytymisalan pienenemisen sekä maannousun vuoksi. Alueella on kaksi päällekkäistä, savikerroksen erottamaa pohjavesikerrosta: alempi pohjavesikerros ja orsivesikerros. Orsiveden pinta on nykyisin yleensä 1,5...3,0 m syvyydellä ja alemman pohjaveden painetaso 2,5...5,0 m syvyydellä maan pinnasta. Orsiveden pinnan alentumisen seurauksena rakennusten puuperustukset ovat joutuneet kuiville, ja molempien pohjavesikerrosten painetason alentumisen seurauksena hienorakeiset maakerrokset koonpuristuvat jatkuvasti.

Rakentamisen vaikutusta pohjaveteen on seurattu alueella säännöllisesti vasta 1970-luvulla, jolloin metron rakentamisen pelättiin aiheuttavan huomattavaa pohjaveden alenemista. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknillinen toimisto on suorittanut alueella säännöllistä pohjaveden painekorkeuden tarkkailua vuoden 1972 syyskuusta lähtien ja yhteistoiminnassa kaupunkimittaosaston kanssa maan pinnan painumien tarkkailua vuoden 1974 toukokuusta lähtien (kuva 2). Noin kaksi kertaa vuodessa geoteknillinen toimisto on laatinut pohjavesitilanteesta väliselostuksen, jossa on käsitelty pohjavesitarkkailuun kuuluvia asioita.

Sisäasiainministeriön määräykset pohjarakentamisesta astuivat voimaan 1.7.1976. Pohjaveteen liittyviä kohtia on määräyksissä rakennuspohjan laadun selvittämisestä, pohjarakennussuunnitelmasta ja pohjarakennustöiden suorituksesta. Määräysten noudattaminen pohjaveteen liittyviltä osiltaan vaatii koko ympäristön pohjavesivirtauksen, pohjasuhteiden ja rakennusten huomioon ottamista.



Kuva 2. Pohjaveden tarkkailujärjestelmän rakenne /13/.

Helsingin kaupunginhallitus tehosti määräysten noudattamisen valvontaa 7.3.1977 päättämällä:

- kehottaa rakennustarkastusvirastoa huolehtimaan siitä, että kaikista pohjaveden alapuolelle ulottuvista rakennushankkeista joko rakennus- tai muuta lupaa myönnettäessä tai rakennustyön aikana tarvittaessa vaaditaan yksityiskohtainen selvitys pohjavesitilanteen pysyvistä hoitamisesta sekä selvitys työn suorittamisesta niin, että rakennustyönaikaisen pohjaveden mahdollisesti tapahtuvan alentamisen haittavaikutukset voidaan minimoida,
- määrätä pohjavesitarkkailun edellyttämät toimenpiteet kiinteistöviraston geoteknillisen toimiston tehtäväksi, sekä

- kehottaa rakennustarkastusvirastoa olemaan kiinteistöviraston geoteknillisen toimiston kanssa jatkuvassa yhteistoiminnassa keskustan pohjavesitilanteen hallitsemiseksi.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää entisen Kluuvinlahden pohjavesialtaan pohjasuhteita, rakennuksia ja rakentamista pohjaveteen liittyviltä osilta ja siten antaa geoteknilliselle toimistolle sekä muille pohjaveteen vaikuttavaa suunnittelua ja valvontaa suorittaville elimille lisää tietoa päätösten ja suunnitelmien tueksi.

Alueen pohjasuhteet on esitetty pohjaveteen liittyviltä osilta. Pohjaveden alenemisen aiheuttamien vahinkojen arvioimiseksi on käsitelty suojeltavia rakennuksia, perustamistapatietoja ja perustusten saneeraamista. Pohjaveden tarkkailujärjestelmän rakenne sekä pohjaveden painetason, vuotojen ja painumien kehitys on esitetty.

Pohjaveden virtauksen tutkimiseen on kehitetty elementtimenetelmään perustuva laskentamalli ja tietokonepiirituriohjelma. Laskentamallilla on tutkittu pohjaveden vuotojen, tiivistysten ja syötön vaikutusta alemman pohjavesikerroksen painetasoon. Vanhojen rakennustöiden vaikutuksesta pohjaveteen on kerätty tietoja, ja rakennusaikaisia pohjavesitilanteita on tutkittu laskentamallilla.

2. MAA- JA KALLIOPERÄ SEKÄ POHJAVESI

2.1 Suoritetut pohjatutkimukset

Geoteknillinen toimisto on suorittanut tarkasteltavalla alueella eri toimeksiantojen yhteydessä runsaasti pohjatutkimuksia. Sadoista pisteistä on käytettävissä erilaisten kenttätutkimusten ja laboratoriokokeiden tuloksia.

Geoteknillisen toimiston suorittamat pohjatutkimukset täydennettyinä muiden organisaatioiden suorittamalla pohjatutkimuksilla on piirretty geoteknisen toimiston julkaisemille kartoille (kuva 3). Pohjatutkimuksista yhteenvetona on piirretty kallion pinnan korkeuskäyrät sekä saven alapinnan syvyys- ja korkeuskäyrät mittakaavoihin 1:10000, 1:2000 ja 1:500.

Geoteknillisen toimiston suorittamien tutkimusten tulokset, niiden perusteella tehdyt selostukset, eräät Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen ja yksityisten konsulttien tekemät selvitykset ovat olleet käytettävissä tätä esitystä laadittaessa.



Kuva 3. Geoteknillinen kartta 1:2000, jolle on piirretty kairausmerkinnät ja saven alapinnan syvyyskäyrät.

Alueen pohjasuhteet ovat vaihtelevat (kuva 5). Maan pinnan korkeus vaihtelee välillä + 1,3... + 9,3 m (NN). Alueen reunoilla, lukuun ottamatta ruhjelaakson suuntaa, maasto nousee useita metrejä korkeammalle. Maan pinta on miltei kokonaan talojen tai tiiviiden kestopäällysteiden peitossa.

Katu- ja piha-alueilla päällysteen alla on täytemaakerros, jonka paksuus on suurimmillaan noin 5 m. Kerros on epähomogeeninen. Eri aikoina tehty täyttö on yleensä karkearakeista maata, jonka seassa on hienorakeisia maalajeja, kiviä, lohkareita ja puujätteitä.

Täytemaakerroksen alla on alueen reunoilla paikoitellen hiekkakerros. Kerroksen paksuus on suurimmillaan noin 7 m.

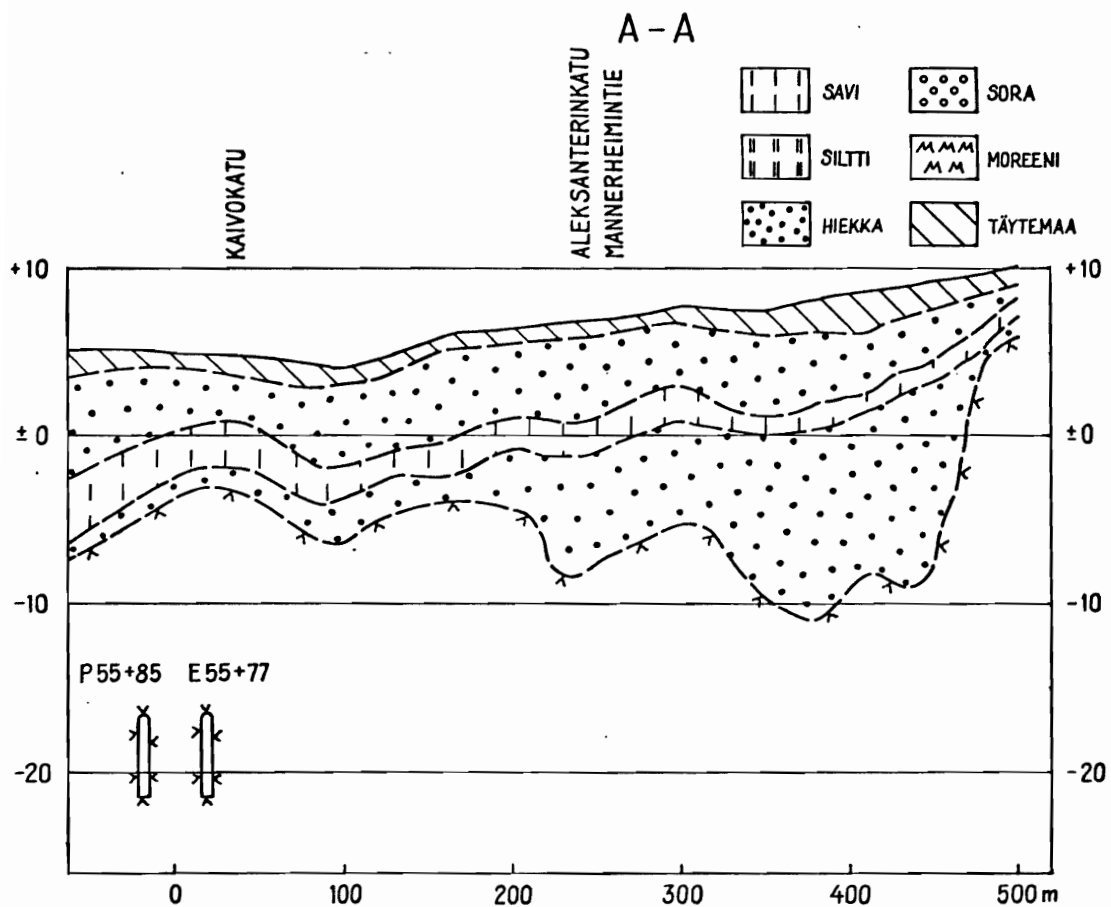
Hiekkakerroksen alla ja alueen keskeisissä osissa heti täytemaakerroksen alla sekä paikoitellen välittömästi paaluille perustettujen rakenteiden alla on lieju-, savi- ja silttikerros. Tämän hienorakeisen kerroksen paksuus on suurimmillaan Rautatientorin kohdalla, missä se on noin 15 m.

Hienorakeisen kerroksen alla on hiekka- ja moreenikerrostumia, joiden yhteenlaskettu paksuus on paikoitellen jopa 15 m.

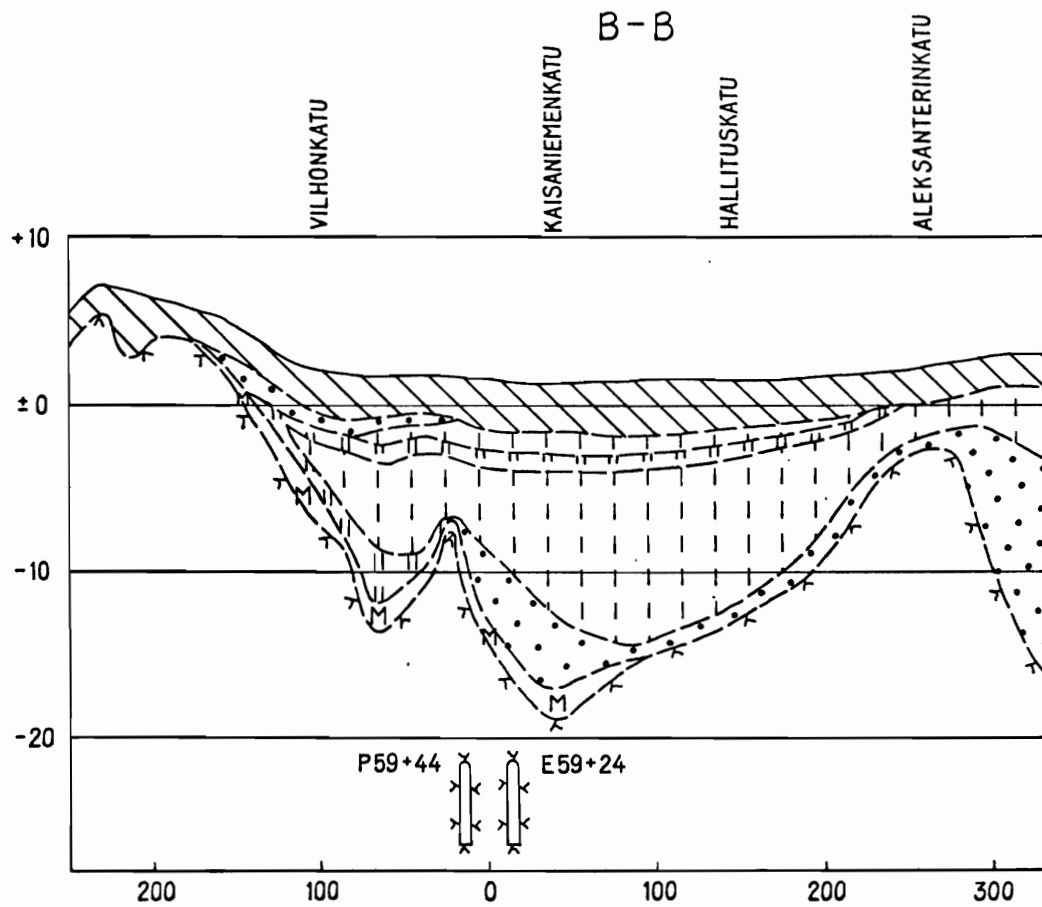
Kallion pinnan korkeus vaihtelee runsaasti, ja syvimmillään kallion pinta on tasolla - 30 m. Kallio on runsasrakoista erityisesti Kluuvin ruhjelaakson keskustassa.



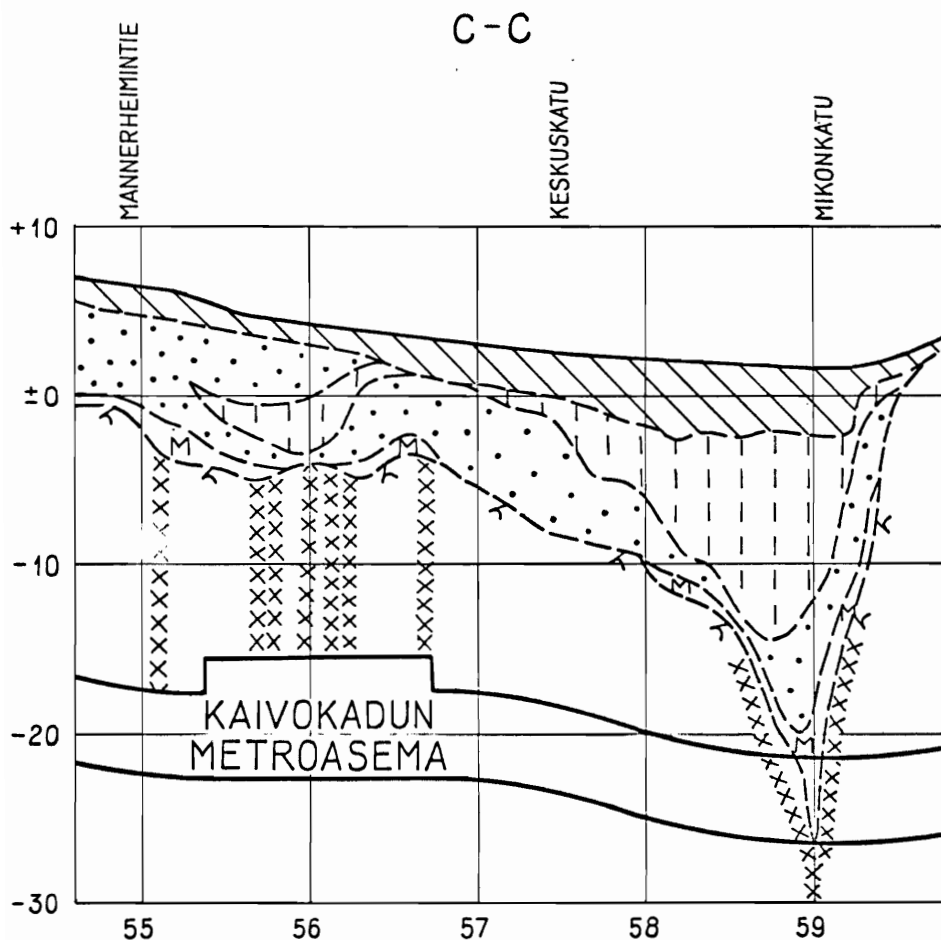
Kuva 5. Pohjasuhteet. Kuva 5a. Leikkausten paikat, saven alapinnan syvyyskäyrät.



Kuva 5b. Leikkaus A - A. Geotekninen osasto julkaisu 10



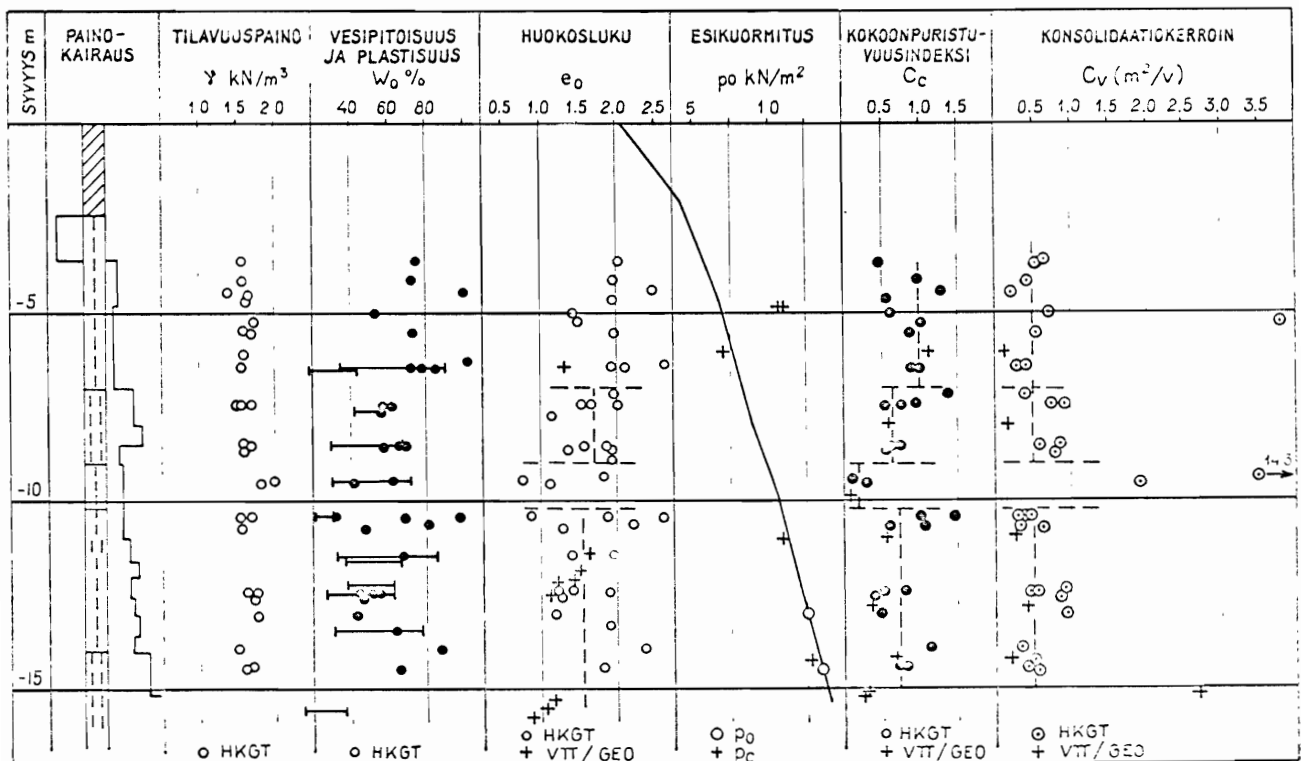
Kuva 5c. Leikkaus B - B.



Kuva 5d. Leikkaus C - C.

2.3 Maan painumisominaisuudet

Alueen maapohjan painumisominaisuuksia on käsitelty useissa eri selostuksissa. Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratorio on tarkastellut maapohjan painumisominaisuuksia kolmessa tutkimusselostuksessa (N:o Geo /100/ 74, N:o Geo /101/ 74 ja N:o Geo /192/ 74). Painumisominaisuuksien määrittämiseksi on suoritettu ödometri- ja kolmiakσιαalikokeita, ja maakerrosten muut ominaisuudet on selvitetty useissa kohdissa (kuva 6). Metrotunneleiden Kluuvin ruhjeen läpäisytyön yhteydessä suoritettiin mm. huokospainemittauksia ja muodonmuutosten mittausta haitariletikumittauksina /21/. Lisäksi on tarkkailtu maan pinnan painumia (kohta 4.3).



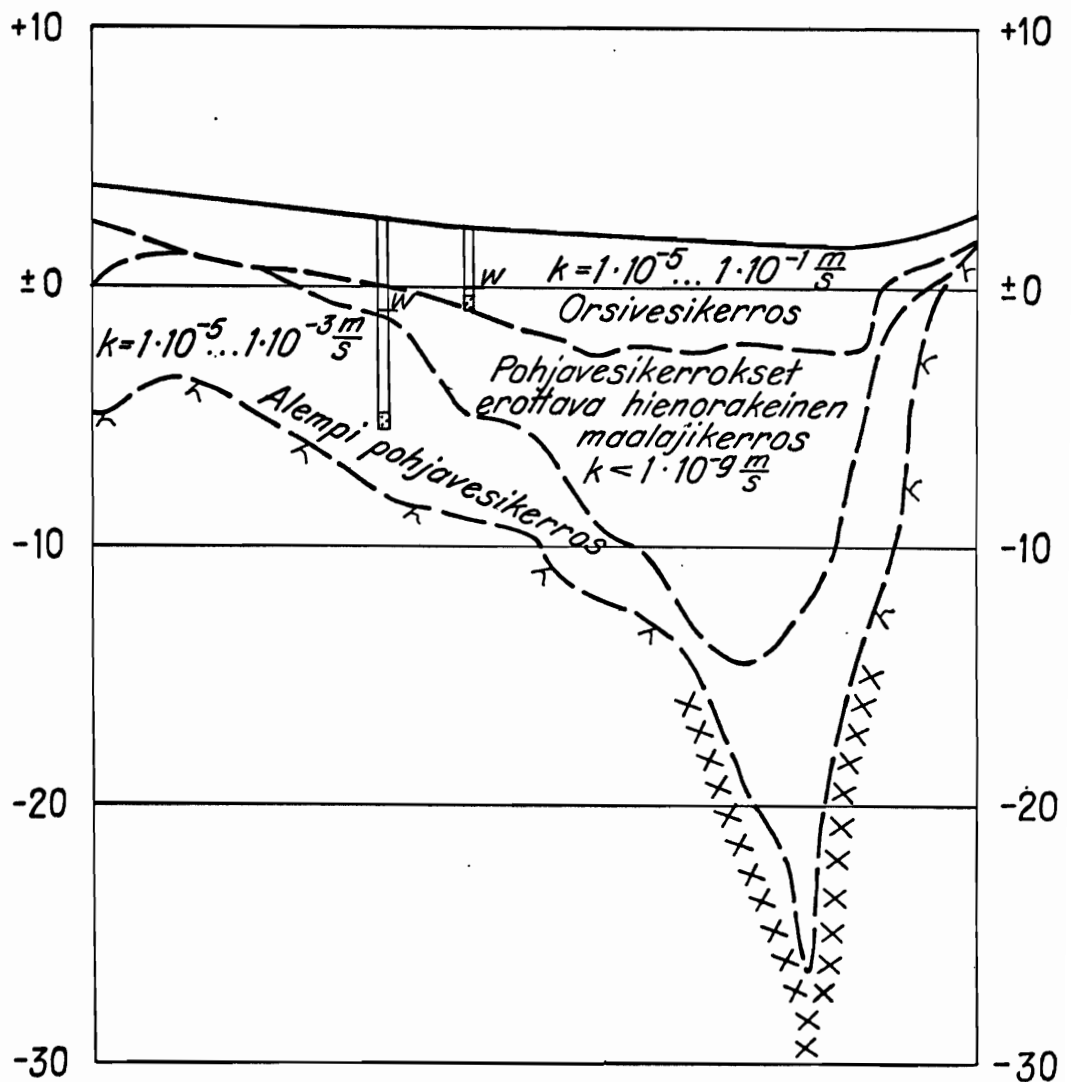
Kuva 6. Savikerroksen geoteknisiä ominaisuuksia Rautatientorilla.

2.4 Pohjavesikerrokset ja maan vedenläpäisevyys

Geotekninen osasto julkaisu 10

yleensä useita metrejä alemman vettä hyvin läpäisevän kerroksen yläpuolella. Alempi pohjavesi on siis paineellista.

Kuvassa 8 on esitetty pohjavesikerrokset ja vedenläpäisevyysarvojen suuruusluokka. Eri maakerrosten vedenläpäisevyys vaihtelee huomattavasti.



Kuva 8. Pohjavesikerrokset ja vedenläpäisevyysarvojen suuruusluokka.

Täyttemaakerroksen vedenläpäisevyys on yleensä suuri ($k = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ m/s). Kerroksessa olevat huonosti vettä läpäisevät muodostumat tekevät kerroksen vedenläpäisevyysominaisuudet kuitenkin erittäin vaihteleviksi. Täyttemaasta ei muodostu orsivedelle yhtä koko alueen kattavaa allasta, vaan vedenläpäisevyydeltään ja korkeudeltaan vaihtelevat kynnykset jakavat orsivesikerroksen pienempiin altaisiin. Orsiveden virtaus riippuu orsiveden pinnan korkeudesta ja siitä, pääseekö vesi virtaamaan kynnysten yli.

Täyttemaakerroksen alla paikoitellen olevan hiekkakerroksen vedenläpäisevyys on täyttemaakerroksen vedenläpäisevyyden suuruusluokkaa ($k = 1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-1}$ m/s).

Edellä kuvatun orsivesikerroksen alla olevan savikerroksen vedenläpäisevyys on hyvin pieni ($k < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s), joten kerroksessa liikkuvat vesimäärät ovat mitättömän pieniä muissa kerroksissa virtaaviin vesimääriin verrattuna. Savikerros erottaa orsivesikerroksen ja alemman pohjavesikerroksen toisistaan.

Savikerroksen alla olevien siltti-, hiekka- ja moreenikerrosten vedenläpäisevyyden selvittämiseksi on tehty erillisiä tutkimuksia. Metrotunneleiden läheisyydessä Kluuvin ruhjeessa olevien maalajien vedenläpäisevyys on määritetty vuosina 1967...1973 tehdyillä rakeisuusmäärityksillä, vedenläpäisevyyskokeilla laboratoriossa ja kentällä sekä koepumppauksilla (taulukko 1).

Alempaan pohjavesikerrokseen kuuluu myös kallio. Koska kallio on osittain runsaasti rakoillutta, kallion vedenläpäisevyys on paikoitellen suuri.

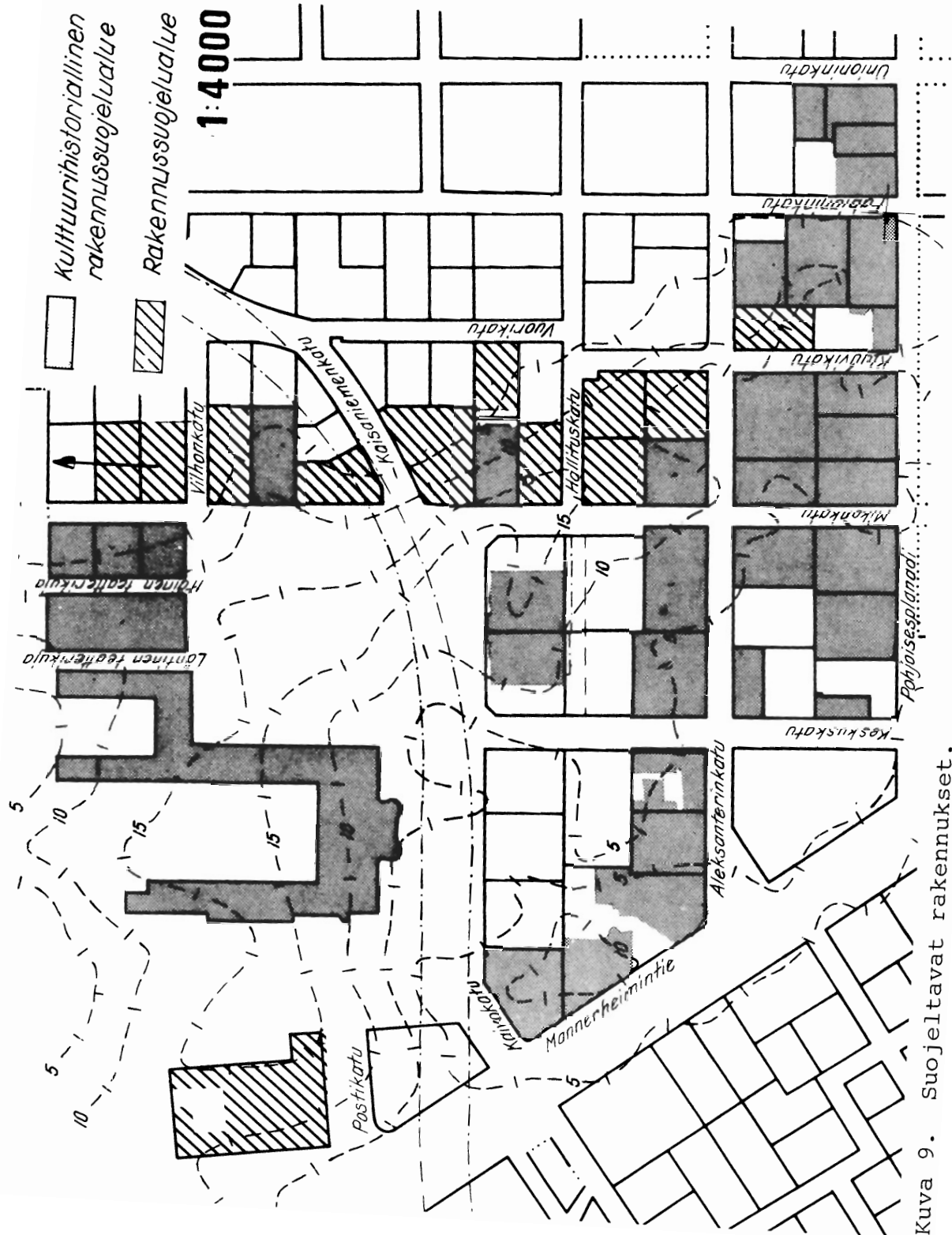
Taulukko 1. Vedenläpäisevyysarvo k (m/s) eri menetelmien mukaan määritettynä (suluissa määrityskertojen lukumäärä).

Määrittystapa	Määrittäjä	Siltti	Hiekka	Moreeni
Rakeisuus	Geoteknillinen toimisto	$1,6 \cdot 10^{-6}$ (11)	$4,2 \cdot 10^{-5}$ (11)	$5,0 \cdot 10^{-4}$ (15)
	Vesi-Hydro Oy	$1,8 \cdot 10^{-6}$ (5)	$5,3 \cdot 10^{-5}$ (12)	$3,7 \cdot 10^{-4}$ (10)
	VTT	$8,7 \cdot 10^{-7}$ (7)	$5,6 \cdot 10^{-5}$ (5)	$3,3 \cdot 10^{-5}$ (7)
Laboratorio- koe	Geoteknillinen toimisto	-	-	$2,0 \cdot 10^{-7}$ (4)
	Vesi-Hydro Oy	-	-	$9,8 \cdot 10^{-7}$ (4)
	VTT	$2,3 \cdot 10^{-7}$ (2)	-	$3,7 \cdot 10^{-7}$ (6)
In situ -koe	Geoteknillinen toimisto	$5,6 \cdot 10^{-8}$ (3)	$1,9 \cdot 10^{-6}$ (2)	-
	Vesi-Hydro Oy	$3,3 \cdot 10^{-6}$ (2)	$9,4 \cdot 10^{-5}$ (1)	-
	VTT	-	-	-
Koepumppaus	Vesi-Hydro Oy	-	-	$1,5 \cdot 10^{-4}$...
				$7,6 \cdot 10^{-5}$

3. RAKENNUKSET

3.1 Rakennussuojelu

Suurin osa alueen rakennuksista on historiallisesti tai rakennustaiteellisesti arvokkaita rakennuksia, jotka halutaan säilyttää (kuva 9). Taulukossa 2 on esitetty alueen rakennukset, jotka on mainittu kaupunkisuunnitteluviraston esittämässä, 23.6.1976 tarkistetussa luettelossa "Helsingin kantakaupungin kulttuurihistoriallisesti arvokkaat rakennukset 1.10.1973". Lisäksi kantakaupungin yleiskaavaehdotuksen mukaan arvokkaiksi on katsottu taulukossa 3 esitetyt rakennukset, jotka kuuluvat rakennussuojelualueeseen.



Kuva 9. Suojeltavat rakennukset.

Taulukko 2. Alueen kulttuurihistoriallisesti arvokkaat rakennukset.

- 1 Korttelin numero
 2 Tontin numero
 3 Katuosoite
 4 Talon nimi
 5 Pääsuunnittelija
 6 Alkuperäisten piirustusten tai talon pystyttämisen vuosikymmen

1	2	3	4	5	6
32	6	Unioninkatu 30		H. Gesellius	1900
33	10	Pohjoisesplanadi 25 - 27	Grönqvistin talo	T. Höijer	1880
33	6	Fabianinkatu 14	Börs	L. Sonck	1910
33	2	Aleksanterinkatu 36b		G. Nyström	1890
34	1	Pohjoisesplanadi 29, Kluuvikatu 2	Kämp	Pernaja & Sandell	1960
34	4	Pohjoisesplanadi 31	Catanin talo	T. Höijer	1880
34	5	Pohjoisesplanadi 33, Mikonk. 1	Mercurius	S.A. Lindqvist	1890
34	3	Aleksanterinkatu 42	KOP:n talo	O.A. Törnqvist	1890
34	17	Aleksanterinkatu 44, Mikonk. 3	Pohjolan talo	Gesellius, Lindgren & Saarinen	1900
35	16	Aleksanterinkatu 13, Mikonk. 5	Lundqvistin talo	S.A. Lindqvist	1890
36	1	Aleksanterinkatu 7b	Elanto	S.A. Lindqvist	1900
38a	6	Mikonkatu 17	Fennia	Grahn, Hedman & Wasastjerna	1900
38b	1	Mikonkatu 11	Lackmannin talo	Palmqvist & Sjöström	1910
39a	6,8, 10	Vilhonkatu 11, Mikonkatu 18 - 22, Itäinen teatterikuja 1 - 5		Nyström, Petrelius, Penttilä, Aarnio	1900
39c	8	Vilhonkatu 11	Kansallisteatteri	O.A. Tarjanne	1900
95b	6	Pohjoisesplanadi 35, Mikonk. 2	Vanha kauppakuja (vanhempi osa)	K.A. Wrede	1880
95b	37	Pohjoisesplanadi 37	Affärscentral	Kiseleff & Heikel, Borg, Siren, Åberg	1890 1920
95b	2	Keskuskatu 1b	Käsiteollisuuspankki	E. Saarinen	1920
95b	3	Aleksanterinkatu 50, Keskusk. 3b	Domus Litonii	J. Westerlund	1880
95b	18	Aleksanterinkatu 46, Mikonk. 4	Vanha kauppakuja (uudempi osa)	K.A. Wrede	1890
96	9	Aleksanterinkatu 23	Vanha ylioppilastalo	H. Dalström	1870
96	9	Mannerheimintie 3 - 5	Uusi ylioppilastalo	Lindgren, Lönn	1910
96	10	Mannerheimintie 7, Kaivokatu 12		A. Lindgren	1910
96	24	Aleksanterinkatu 19, Keskusk. 4	Hermes	Grahn, Hedman & Wasastjerna	1890
96	26	Aleksanterinkatu 21		Michailoff, Heikel	1890
97	19	Aleksanterinkatu 15, Mikonk. 6	Salaman talo	Nyström, Tarjanne	1890
97	24	Kaivokatu 2 - 4, Keskuskatu 9, Mikonkatu 10	Ateneum	T. Höijer	1880
97	5	Aleksanterinkatu 17, Keskusk. 7		P.E. Blomstedt	1920
		Keskuskatu 8	Rautatieasema	E. Saarinen	1910

Taulukko 3. Rakennussuojelualueella olevat rakennukset.

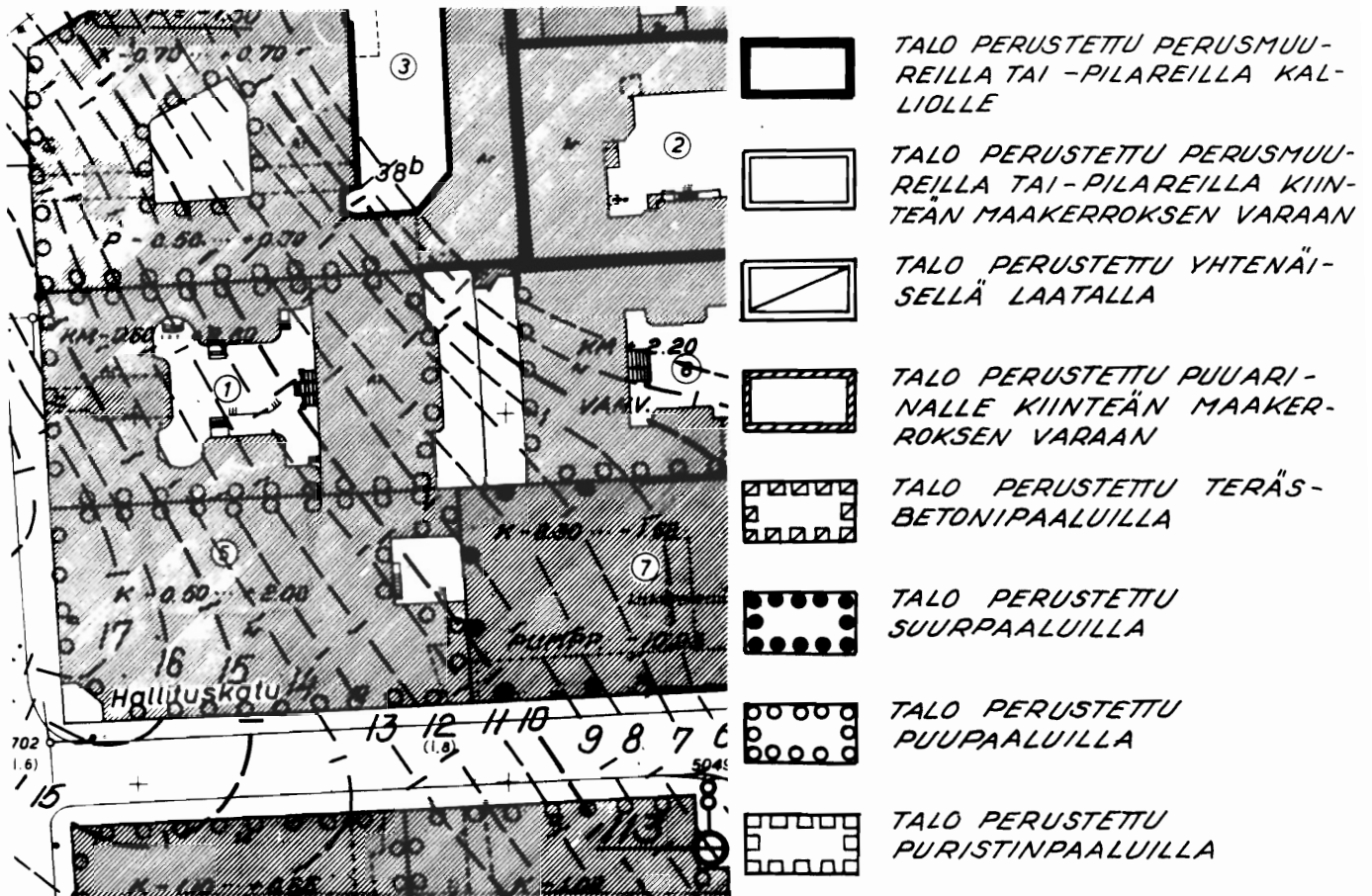
- 1 Korttelin numero
 2 Tontin numero
 3 Katuosoite
 4 Alkuperäisten piirustusten tai talon pystyttämisen vuosikymmen

1	2	3	4
33	13	Aleksanterinkatu 38, Kluuvikatu 3	1920
35	4	Hallituskatu 12, Kluuvikatu 8	1930
35	6	Mikonkatu 7, Hallituskatu 14	1940
35	14	Kluuvikatu 6, Aleksanterinkatu 11	1900
36	18	Fabianinkatu 18, Aleksanterinkatu 7a	1930
38a	5	Mikonkatu 19, Vilhonkatu 6	1880
38a	15	Mikonkatu 15, Kaisaniemenkatu 2a	1940
38b	3	Mikonkatu 13, Kaisaniemenkatu 1	1920
38b	5	Hallituskatu 17, Mikonkatu 9	1920
38b	8	Vuorikatu 4	1880
103	1	Mannerheimintie 11, Postikatu 1	1930

3.2 Perustukset

3.21 Perustamistavat

Geoteknillinen toimisto on piirtänyt metrotöiden yhteydessä hankitun aineiston perusteella rakennusten perustamistapakartan, josta pieni osa on esitetty kuvassa 10.

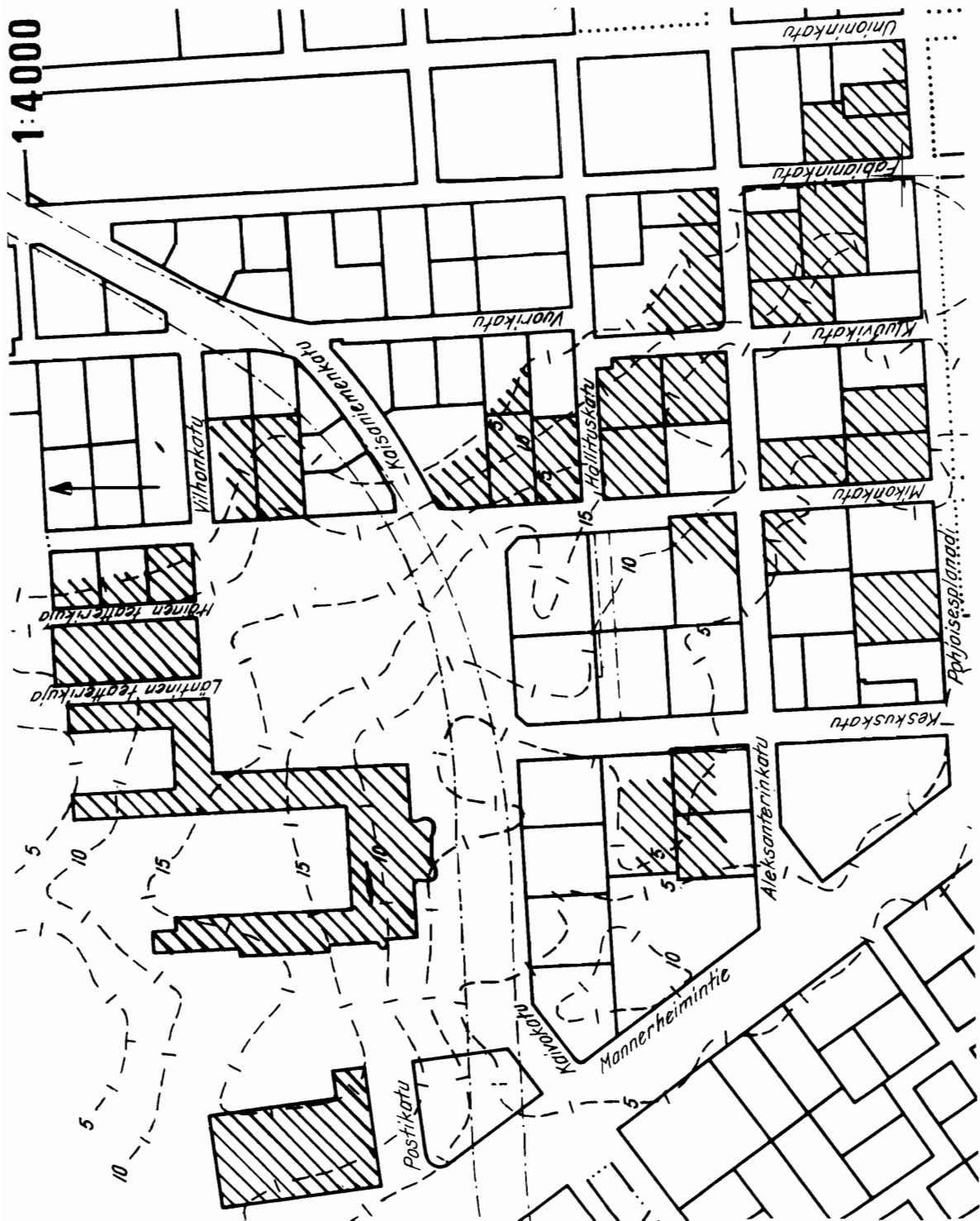


Kuva 10. Perustamistapakartta.

Kartassa on esitetty rakennusten perustamistapa, alimpien kellareiden latttioiden korkeustasoja ja joistakin

taloista likimääräinen puupaalujen yläpäiden korkeustaso. Kartta on toistaiseksi vielä epätäydellinen ja joiltakin osin virheellinen, eikä siinä ole esitetty esimerkiksi putkijohtojen perustamistapoja, mutta karttaa täydennetään jatkuvasti.

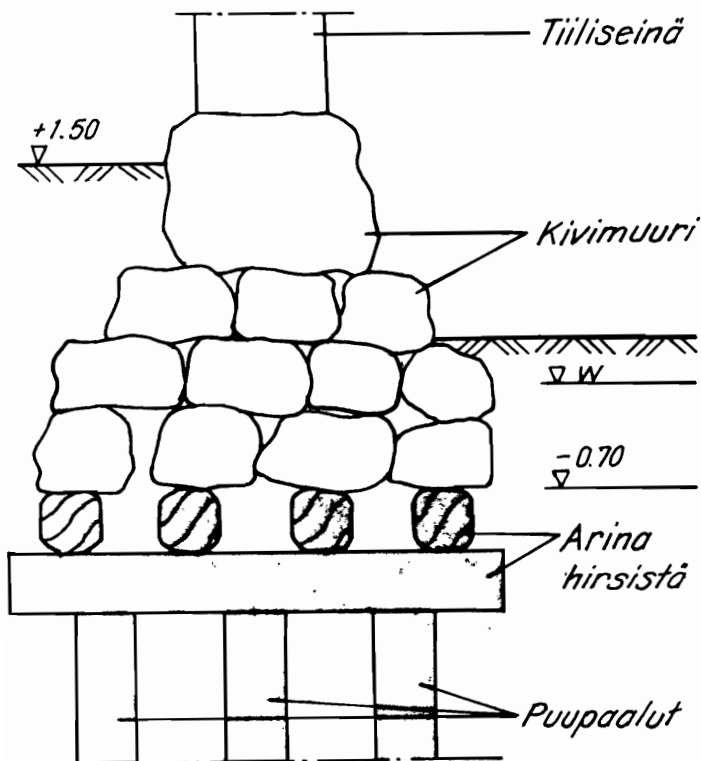
Useimmat vanhat rakennukset on perustettu puupaaluilla. Vielä nykyisin alueella on yli 30 osittain tai kokonaan puupaaluilla perustettua rakennusta (kuva 11).



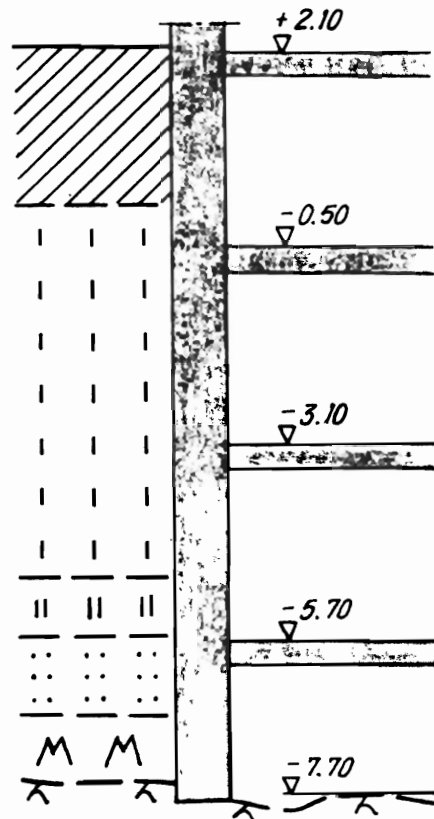
Kuva 11. Puupaaluilla perustetut rakennukset.

Vanhojen rakennustapojen mukaan puupaalut juntattiin kevyehköllä paalutuskalustolla saven alapuolella oleviin siltti- ja hiekkakerroksiin. Paalujen päät on tiettävästi katkaistu lahoamisvaaran vuoksi rakennusaikaisen orsiveden pinnan alapuolelta. Paalujen päälle on rakennettu hirsistä arina, jonka varaan on laadottu kivistä kylmäkivimuuri (kuva 12). Talojen seinät ovat paksuja tiiliseiniä.

1950-luvulta lähtien uudisrakennukset on perustettu teräsbetonisilla lyöntipaaluilla, suurpaaluilla, kallioon ulottuvilla perusmuureilla ja patoseinillä (kuva 13).



Kuva 12. Vanha puuperustus.



Kuva 13. Monet uudet talot on perustettu patoseinillä.

3.22 Perustusten heikkoudet

Vanhojen paalujen suunnittelujännitykset ovat olleet nykyisin käytettyjä suunnittelujännityksiä pienemmät. Vanhat perustukset ovat kuitenkin saaneet rakennusajankansa jälkeen runsaasti lisäkuormia myöhemmin rakennetuista lisäkerroksista, hyötykuormien lisäyksistä, katujen ja pihojen korotuksista, liikennekuormista ja pohjaveden alenemisesta. Koska paalut ovat jääneet osittain löyhiin maakerrokseen, lisäkuormista on joissakin tapauksissa aiheutunut rakennusten painumia.

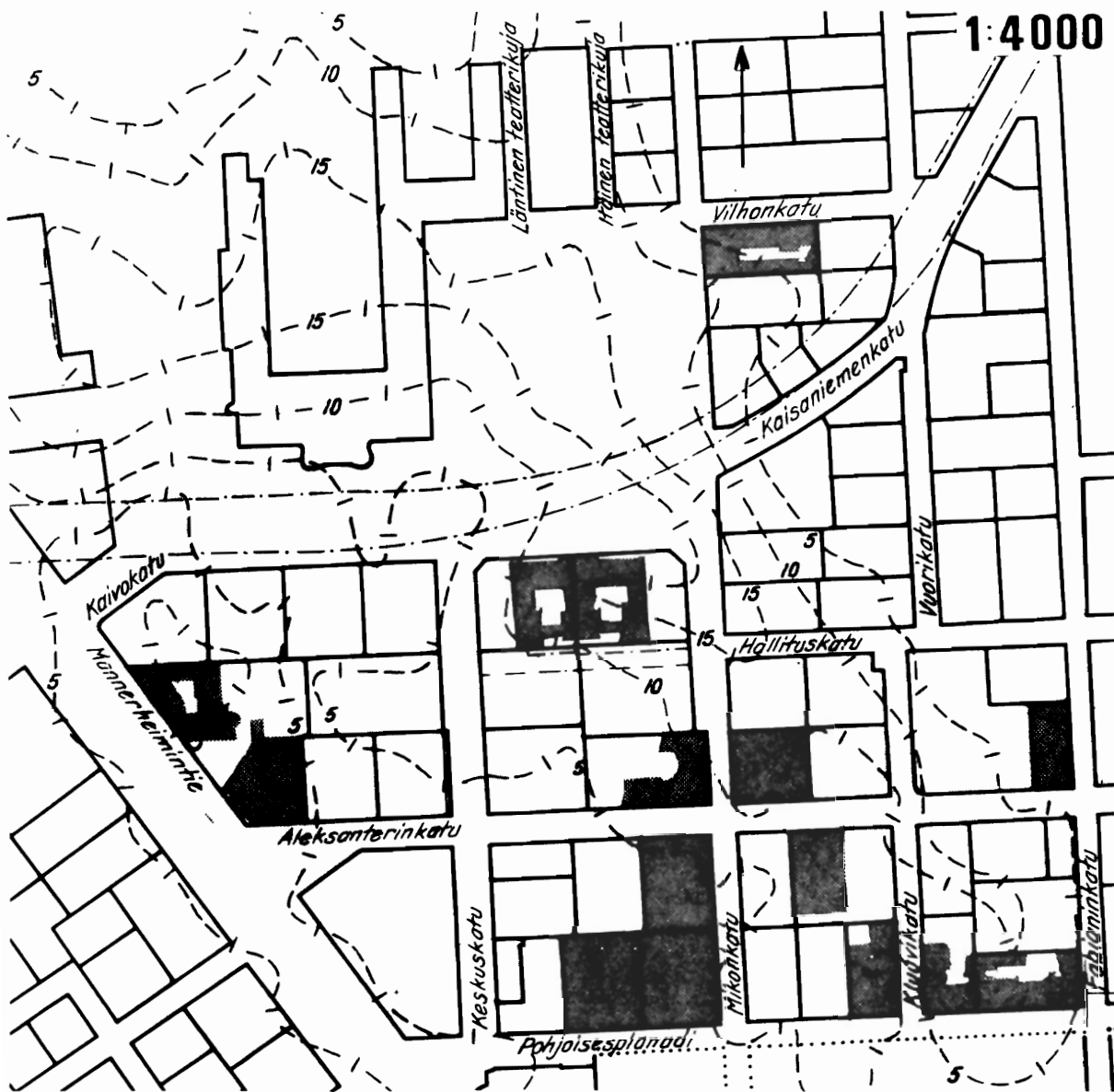
Suurinta vahinkoa on kuitenkin tuottanut ja tuottaa jatkuvasti perustusten lahoaminen. Kun orsiveden pinta laskee ja puuperustukset joutuvat yhteyteen ilman kanssa, aerobiset, nopeasti puuta tuhoavat lahottajasienet pääsevät toimimaan. Alueen lähes kaikkien puuperustusten yläosa on ollut ajoittain orsiveden pinnan yläpuolella, ja joissakin taloissa puupaalujen yläpäät ovat jatkuvasti kuivina. Lahottajasienelle alttiina ollessaan puurakenteet tuhoutuvat nopeasti (kuva 14), ja kallis perustusten saneeraustyö on edessä.



Kuva 14. Lahonnut puuperustuksen osa Aleksanterinkatu 11:n alla.

3.23 Perustusten saneeraus

Kuvassa 15 on esitetty alueen perustuksiltaan saneeratut rakennukset.



Kuva 15. Perustuksiltaan saneeratut rakennukset.

Eräissä saneerauskohteissa paalujen lahonneet yläpäät, arinarakenteet ja kylmäkivimuurit on korvattu betonirakenteilla, jolloin paalujen alemmat osat ovat jääneet

kantamaan. Samalla rakennukseen on joissakin tapauksissa tehty uusi kellarikerros. Usein on käytetty myös teräsbetonisia puristuspaaluja, joilla puupaalut on korvattu osittain tai kokonaan (kuva 16) /30/. Sopivissa kohdissa on tehty kallioon ulottuvia perusmuureja.



Kuva 16. Vanhat puupaalut korvataan Mega-paaluilla Aleksanterinkatu 13:n perustuksissa.

Perustusten saneeraus on kallista. Tukholman keskustan saneerausselvityksessä /35/ on käytetty 1.1.1976 hintatason mukaan mm. taulukossa 4 esitettyjä kustannuksia. Saman selvityksen mukaan tavallisen viisikerroksisen rakennusalueen 440 m² suuruisen kerrostalon perustusten vahvistamiskustannukset ovat noin 900.000 Rkr. Puupaa-
luilla perustetun suurehkon kerrostalon perustusten uusiminen maksaa keskusta-alueella noin 2 milj. Rkr. Lisäksi painumavaurioiden korjaaminen maksaa vaikeissa tapauksissa kerrosneliömetriä kohden 250...400 Rkr /4/.

Taulukko 4. Perustusten saneeraustöiden kustannuksia Tukholmassa 1.1.1976 hintatason mukaan /35/.

Saneeraustyö	Kustannus Rkr/m ² (rakennusala)
Pohjaveden jatkuva lisäys	500
Puupaalujen katkaisu- tason alentaminen	1700
Puristuspaalut perus- muurin alle	2300
Puristuspaalut perus- muurin viereen	2700
Porattavat teräs- paalut	3800
Lyötävät teräs- paalut	4400
(Uudisrakennuksen pe- rustus)	850

Eräiden Suomessa suoritettujen perustusten saneeraustöiden perusteella on arvioitu puupaalujen korvaamisen puristuspaaluilla maksavan rakennuksen tilavuutta kohden noin 100 mk/m³. Entisen Kluuvilahden alueen puuperusteisten rakennusten yhteenlaskettu tilavuus on noin 1,2 milj. m³. Perustusten uusimistyön hinta olisi täten noin 120 milj. mk.

3.24 Tietojen tarkentaminen

Puuperustusten yläpään kunnon ja korkeusaseman tarkka selvittäminen on tarpeen, jotta kyettäisiin arvioimaan riittävän tarkasti, kuinka suuria vahinkoja alentuneesta orsiveden pinnasta aiheutuu, ja osattaisiin ryhtyä toimiin vahinkojen ennakointiin.

Perustuksista tehdyt piirustukset ovat puutteellisia. Rakennusvalvontaviraston arkistossa säilytetään rakennuslupaa vaatineiden uudisrakennus-, korjaus- ja muutostöiden piirustuksia. Alueen puuperustusten rakentamisen aikaan perustukset on kuitenkin ollut tapana piirtää vain ylimalkaisesti, jos niitä yleensä on piirretty. Vanhoista piirustuksista selviää yleensä vain kellareiden lattiatasoja, joista puuperustusten yläpäiden korkeustasoa voidaan karkeasti arvioida.

Myös tiedot perustusten saneeraustöistä ovat puutteellisia. Rakennuksen perustusten osia on saatettu vahvistaa erilaisilla menetelmillä, jotka on osittain ratkaistu vasta työn suorituksen aikana. Suunnitelmat ovat olleet niin yleispiirteisiä, ettei niistä yleensä selviä esimerkiksi kantamaan jääneiden puupaalujen korkeusasema perustusten eri osissa.

Puupaalujen päiden korkeusaseman tarkka selvittäminen ei ole välttämättä kaikissa tapauksissa tarpeen. Puurakenteet saattavat nimittäin säilyä hienorakeisen maan sisässä turvassa lahottajasieneltä, vaikka orsi-veden pinta laskisikin ympäristössä paalujen päiden tason alapuolelle (kuva 17).

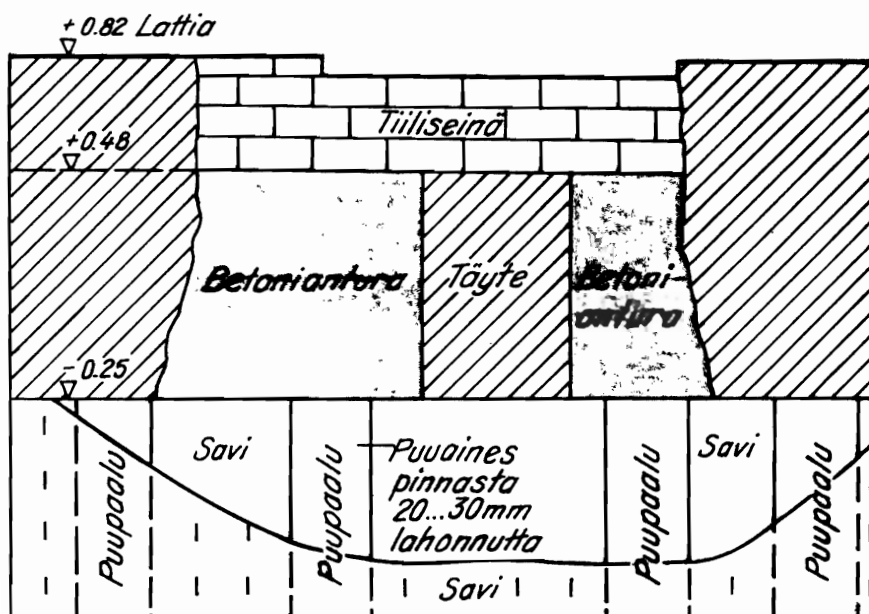


Kuva 17. Saven ympäröiminä olleet paalun osat ovat säilyneet terveinä.

Paalujen yläpäät eivät kuitenkaan ole yleensä hienorakeisen maan ympäröimiä, koska rakennuspaikalle on tehty karkearakeisesta maasta työalusta. Lisäksi Ruotsissa on todettu huomattavia puupaalujen vaurioita myös tapauksissa, joissa puupaalut ovat olleet "turvallisen" syvällä pohjaveden pinnan alapuolella tai tiiviissä, vedellä kyllästetyssä savessa, jolloin on epäilty anaerobisten bakteerien kykenevän tuhoamaan puuta melko nopeasti /23/.

Joissakin tapauksissa puupaalut saattavat tuhoutua yllättävän nopeasti. Esimerkiksi uusista lattialämmitysjärjestelmistä tai kaukolämpöjohdoista saattaa maahan siirtyä niin paljon lämpöä, että lahoamisprosessi kiihtyy erittäin nopeaksi. Tällöin puurakenteiden on todettu tuhoutuneen parissa vuodessa /18/.

Koska puuperustusten yläpään korkeusasemaa, orsiveden korkeuden kehitystä, puun lahoamisnopeutta ja muita perustusten säilymiseen vaikuttavia tekijöitä ei tunneta tarkasti, ainoa keino perustusten kunnon selvittämiseksi on koekuoppien teko ja puurakenteiden kunnon analysointi kairausnäytteistä (kuva 18).



Kuva 18. Perustusten tutkimiskuoppa Fennian talossa.

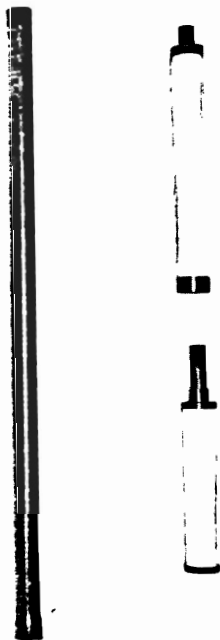
Metrotoimisto on teettänyt paalujen kuntotutkimuksen kolmessa metrolinjan läheisyydessä olevassa rakennuksessa. Lisäksi useat kiinteistöjen omistajat ovat teettäneet vastaavia tutkimuksia. Geoteknillinen toimisto pyrkii kokoamaan tutkimustietoja.

4. POHJAVESITARKKAILU

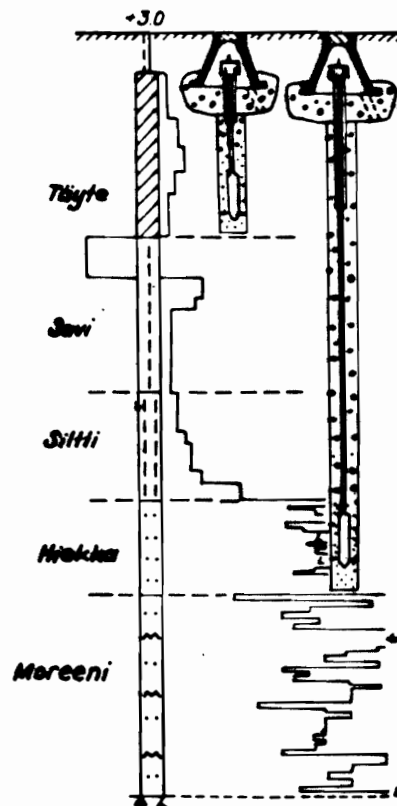
4.1 Pohjaveden painetason tarkkailu

4.11 Tarkkailujärjestelmän rakenne

Pohjaveden painetason tarkkailuun käytetään pieniläpimittaisia havaintoputkia. Maan pinnalle tulevan putken halkaisija on 19...33 mm. Suodatinkärjet ovat erilaisia siivilä- ja huokoskärkiä (kuva 19). Orsiveden ja alemman pohjaveden havaintoputket on yleensä asennettu vierekkäin painokairauksen perusteella määritettyihin syvyyksiin (kuva 20).



Kuva 19. Pohjaveden havaintoputkissa käytettyjä siivilä- ja huokoskärkiä.



Kuva 20. Tyypillinen pohjaveden havaintopiste.

Suodatinkärkien kunto tarkastetaan ajoittain. Tarkastuksessa määritetään tarkkailuputkien tasaantumisviive T_{90} /12/ , jonka perusteella suodattimen kunto arvostellaan (taulukko 5). Tukkeutuneet suodatinputket huuhdellaan tai vaihdetaan uusiin.

Taulukko 5. Tarkkailuputkien kunnon arvostelu.

Tasaantumisviive T_{90}	Arviointi
<10 min	Erittäin nopea
10 min...2 h	Nopea
2 h...1 d	Hidas
>1 d	Erittäin hidas

Havaintoputkessa olevan pohjaveden pinnan korkeus mitataan sähköisellä mittaluodilla noin 10 mm tarkkuudella yleensä kerran viikossa ja eräiden rakennustyöväi-
heiden aikana kaksi kertaa viikossa (kuva 21).



Kuva 21. Pohjaveden korkeuden mittaus.

Tehdyt havainnot tallennetaan geoteknillisen toimiston pienoistietokoneen levymuistiin. Vuodesta 1976 lähtien havainnot on tulostettu tietokonelistauksena, jossa esitetään tehdyt havainnot (NN), erot edellisistä havainnoista, erot vertailuarvoista, erot ilmoitusrajoista, painekorkeuden muutokset, muutosnopeudet viimeisen kuukauden aikana pienimmän neliösumman avulla ja huomautukset. Vertailuarvo on ennen metron rakentamista vallinnut, arvioitu painetason keskiarvo. Ilmoitusraja on geoteknillisen toimiston lokakuussa 1976 ilmoittama painekorkeuden arvo, joka on pyritty asettamaan orsiveden osalta 0,2...0,3 m puuperustusten yläpäiden tasoa korkeammalle ja alemman pohjaveden osalta alueen keskeisissä osissa noin tasoon - 1,50. Alueen tarkkailuputkien vertailuarvot ja ilmoitusrajat on esitetty taulukossa 6 ja sijainti kuvassa 22. Pohjaveden painetason kehitymisestä ajan funktiona on piirretty tietokonepiirturilla käyrät, jotka on esitetty geoteknillisen toimiston pohjavesitarkkailun väliraporteissa.

Taulukko 6. Alueen pohjaveden havaintoputkien vertailuarvot, ilmoitusrajat ja havaintotasot (NN).

Putken nimi	Vertailuarvo	Ilmoitusraja	Havaintotaso
105	+ 0,31	- 0,50	+ 1,55
105M	+ 0,21	0,00	+ 1,55
106	- 0,30	- 1,00	+ 1,97
106M	+ 0,20	+ 0,10	+ 1,97
108	- 0,85	- 0,70	+ 1,63
108M	- 0,28	- 0,20	+ 1,63
109	- 1,12	- 1,20	+ 1,48
109M	- 0,86	- 0,20	+ 1,48
110	- 1,00	- 1,40	+ 1,90
110M	- 0,60		+ 1,90
111	- 0,18	- 0,80	+ 3,20
111M	0,00	- 0,10	+ 3,20
112	- 0,19		+ 5,55
113	- 0,83	- 0,80	+ 2,60
113M	- 0,13	- 0,20	+ 2,60
114	- 0,81	- 1,30	+ 1,90
114M	- 0,21	- 0,20	+ 1,90
115	- 0,58	- 0,80	+ 2,86
115M	+ 0,19	- 0,20	+ 2,86
116	- 0,53	- 1,10	+ 1,90
116M	+ 0,60	0,00	+ 1,90
117	- 1,20	- 1,50	+ 2,06
117M	+ 0,34	- 0,50	+ 2,06
118	- 1,82	- 1,50	+ 2,07
118M	+ 0,22	- 0,20	+ 2,10
119	- 1,33	- 1,50	+ 3,20
119M	0,00		+ 3,20
120	- 0,20		+ 6,77
121	- 0,10		+ 8,23
123	- 0,72	- 1,30	+ 4,95
123M	+ 1,73	- 0,30	+ 5,30
124	- 0,93	- 1,00	+ 5,41
125	- 0,70	- 1,50	+ 7,84
126	- 1,16	- 1,20	+ 5,54
128	- 0,82	- 1,50	+ 3,40
128M	+ 0,64	- 0,50	+ 3,50
129	- 1,19	- 1,50	+ 2,38
129M	- 0,25	- 0,50	+ 2,38
130	+ 0,49	- 1,00	+ 3,00
130M	+ 1,03	- 0,30	+ 3,00
131	- 0,44	- 1,50	+ 1,89
131M	+ 0,35	- 0,30	+ 1,89
132	- 0,82	- 1,30	+ 2,03
132M	+ 0,30	- 0,20	+ 2,07
133	- 0,48	- 1,20	+ 1,90
133M	+ 0,17	0,00	+ 1,90
134	- 1,80	- 1,50	+ 2,36
134M	- 1,80	- 1,50	+ 2,36
135	- 0,27	- 1,50	+ 1,92
135M	+ 0,28	0,30	+ 1,92
136	- 0,96	- 0,70	+ 1,55
136M	- 0,54	- 0,20	+ 1,55

Putken nimi	Vertailuarvo	Ilmoitusraja	Havaintotaso
137	- 0,56	- 1,30	+ 1,77
137M	+ 0,22	- 0,20	+ 1,77
138	- 0,75	- 1,20	+ 1,75
139	- 1,48	- 1,50	+ 3,40
139M	+ 0,29	- 0,50	+ 3,40
141	- 1,72	- 1,50	+ 3,81
141M	0,00	- 0,40	+ 3,81
143	- 0,06	- 1,00	+ 3,22
143M	+ 0,76	- 0,30	+ 3,22
146	- 0,50	- 1,00	+ 6,22
146M	- 0,20	- 0,40	+ 6,26
147	- 0,20	- 1,50	+ 8,39
148	- 0,20	- 0,90	+ 3,03
149	- 0,30	- 1,00	+ 2,50
149M	- 0,20	- 0,30	+ 2,50
150	- 0,50	- 1,20	+ 2,36
150M	- 0,20	- 0,30	+ 2,35
151	- 0,90	- 1,40	+ 1,47
151M	- 0,50	- 0,20	+ 1,44
152	- 1,20	- 1,50	+ 1,28
152K	- 1,20	- 1,50	+ 1,28
152M	+ 0,01	- 0,50	+ 1,28
153	- 0,12	- 1,50	+ 1,27
153M	+ 0,01	- 0,50	+ 1,27
154	0,00	- 1,50	+ 1,78
154M	0,00	- 0,40	+ 1,78
155	0,00	- 1,50	+ 2,07
155M	0,00	- 0,40	+ 2,06
156	0,00	- 1,10	+ 1,69
156M	0,00	- 0,20	+ 1,71
157M	0,00	0,00	+ 2,04
158	0,00	- 1,50	+ 3,65
158M	0,00	- 0,30	+ 3,65
159	0,00	- 1,50	+ 3,78
159M	0,00	- 0,30	+ 3,78
160M	0,00	0,00	+ 2,84
161M	0,00	0,00	+ 3,05
162M	0,00	0,00	+ 4,28
163	0,00	- 1,50	+ 3,41
163M	0,00	- 0,50	+ 3,39
164	0,00	- 1,50	+ 3,28
164M	0,00	- 0,50	+ 3,27
166M	0,00	0,00	+ 0,78
167M	0,00	0,00	+ 0,78
168M	0,00	0,00	+ 1,94
169M	0,00	0,00	+ 1,46
170	0,00	0,00	+ 4,13
171	0,00	- 0,75	+ 2,63
172	0,00	0,00	+ 2,11
173	0,00	0,00	+ 2,25
176	0,00	0,00	+ 6,92
177	0,00	0,00	+ 4,44
K1	- 0,40	- 1,50	+ 1,93
K2	- 0,40	- 1,50	+ 1,92
K3	- 0,10	1,50	+ 3,24



Kuva 22. Pohjaveden havaintoputkien sijainti.

4.12 Pohjaveden painetason kehitys ennen tarkkailujärjestelmää

Orsiveden pinta lienee ollut 1800-luvulla lähellä maan pintaa. Vanhan ylioppilastalon rakentamisen aikoihin 1868 orsiveden pinta on ollut rakennuksen perustamistavasta päätellen suunnilleen tasolla + 2,5 m (NN). Ylioppilastalon perustuksia korjattaessa orsiveden pinta oli vuonna 1929 tasolla + 1,0 m (NN) /17/. Orsiveden pinta oli 15.6.1978 ylioppilastalojen välisellä aukiolla tarkkailupisteessä 146 tasolla - 0,34 m (NN)

ja alemman pohjaveden pinta tasolla - 1,19 m (NN). Painetaso on siis laskenut runsaan sadan vuoden aikana noin kolme metriä.

Ennen tarkkailujärjestelmää tehdyt pohjaveden painetason havainnot ovat harvinaisia. Eräiden geoteknillisen toimiston suorittamien kairausten yhteydessä on tosin tehty pohjavesihavaintoja (liite 1). Muissa yhteyksissä tehtyjä havaintoja ei ole tallennettu tai niitä ei ole ainakaan tässä tutkimuksessa onnistuttu löytämään, joten pohjaveden painetason kehitystä ennen tarkkailujärjestelmää ei onnistuttu selvittämään tarkasti.

4.13 Pohjaveden painetason kehitys tarkkailujärjestelmän aikana

Pohjaveden painetason kehitys neljässä alemman pohjaveden ja kahdessa orsiveden tarkkailupisteessä on esitetty kuvassa 23.

Sateiden on todettu vaikuttavan pohjaveden painetasoon:

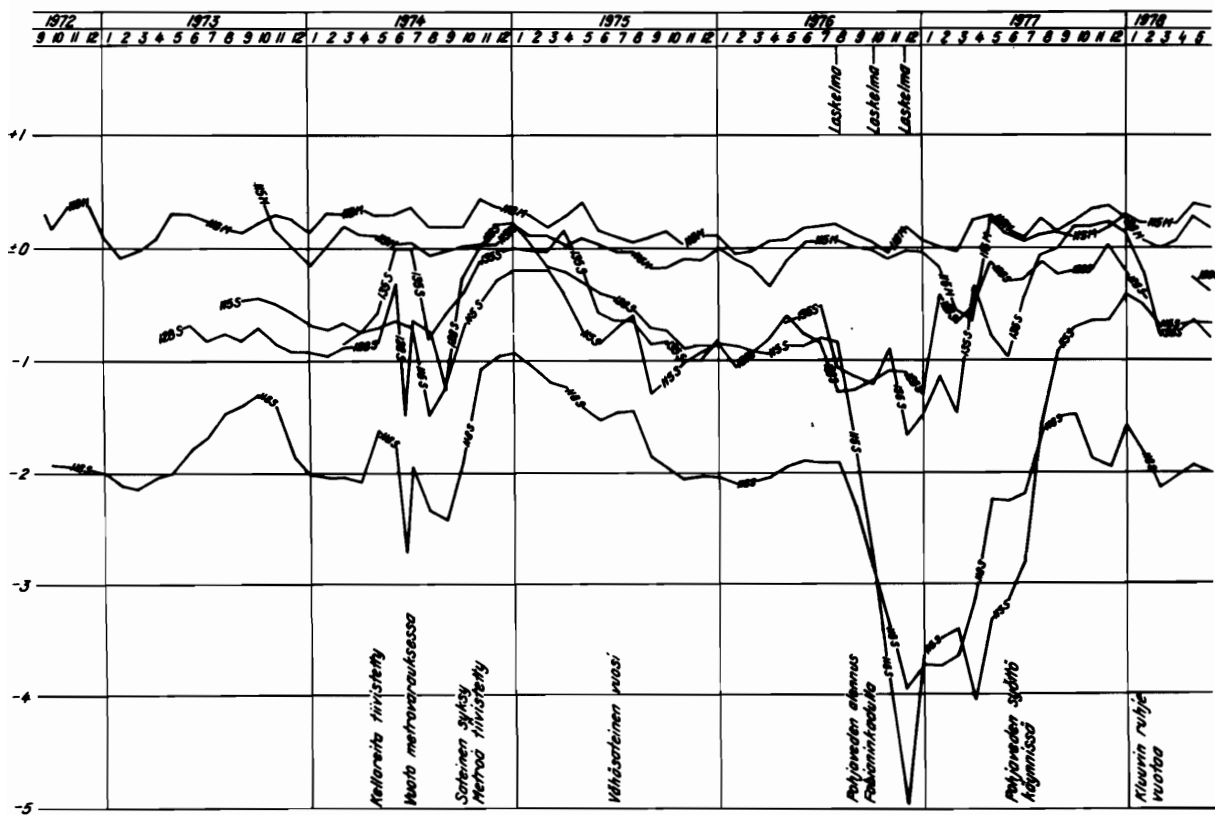
- Vuoden 1974 syksy oli sateinen, jolloin pohjaveden painetaso nousi selvästi.
- Vuosi 1975 oli vähäsateinen, jolloin pohjaveden painetaso laski.

Monet rakennustyöt ovat vaikuttaneet pohjaveden painetasoon:

- Keskustan syviä kellaritiloja on tiivistetty vuosien 1973 ja 1974 aikana, jonka ansiosta alemman pohjaveden painetaso nousi eräissä havaintopisteissä jopa noin metrin.
- Metron rakentaminen eteni alueelle vuoden 1974 aikana. Metrossa on tämän jälkeen suoritettu louhinta- ja tiivistystöitä, Kaivokadun aseman ja lippuhallin rakentamista ym. Eri työvaiheiden vaikutus on näkynyt pohjavesihavainnoissa.
- Yliopiston hallintorakennuksen syvän kaivannon vaikutus havaittiin vuosien 1975 ja 1976 aikana.

- Eduskuntatalon väestösuojan rakennustyön vaikutus havaittiin vuoden 1976 aikana.
- Fabianinkadulla suoritettiin vuosien 1976 ja 1977 aikana voimakas pohjaveden alennus.

Pohjaveden virtausta sekä 1.8.1976 havaittua pohjavesi-tilannetta ja sitä seurannutta pohjaveden alennusta on analysoitu laskelmilla (kohdat 6.3 ja 7.3).



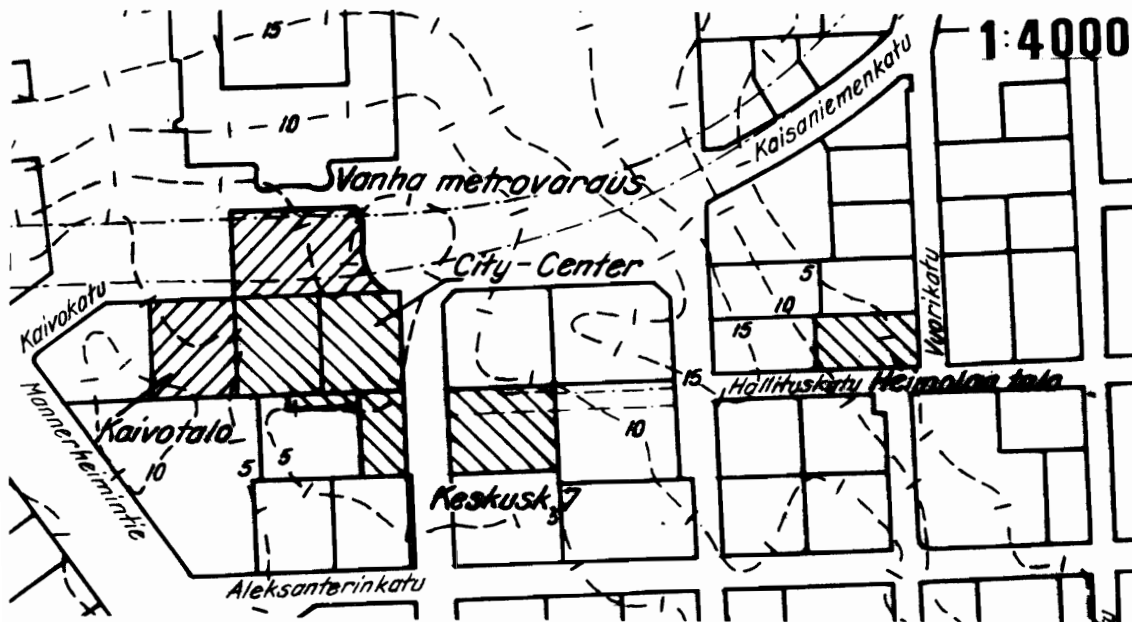
Kuva 23. Pohjaveden painetasen kehitys neljässä alemman pohjaveden ja kahdessa orsiveden havaintopisteessä.

4.2 Maanalaisiin tiloihin vuotavan pohjaveden mittaus

4.2.1 Vuodot kellaritiloihin

Geoteknillinen toimisto on valvonut metrotoimiston toimiksiannosta vuoden 1974 heinäkuusta lähtien viiden syvän maanalaisen tilan pohjavesipumpun toimintaa. Nämä tilat ovat (kuva 24):

- City-Centerin kellarit, Kaivokatu 6 ja 8,
- Kaivotalon kellarit, Kaivokatu 10,
- Asematunnelin alla oleva vanha metrovaraus,
- Helsingin-Osake-Pankin kellarit, Keskuskatu 7 ja
- Heimolan talon kellarit, Hallituskatu 15.



Kuva 24. Vuotovesitarkkailuun kuuluvat kellaritilat.

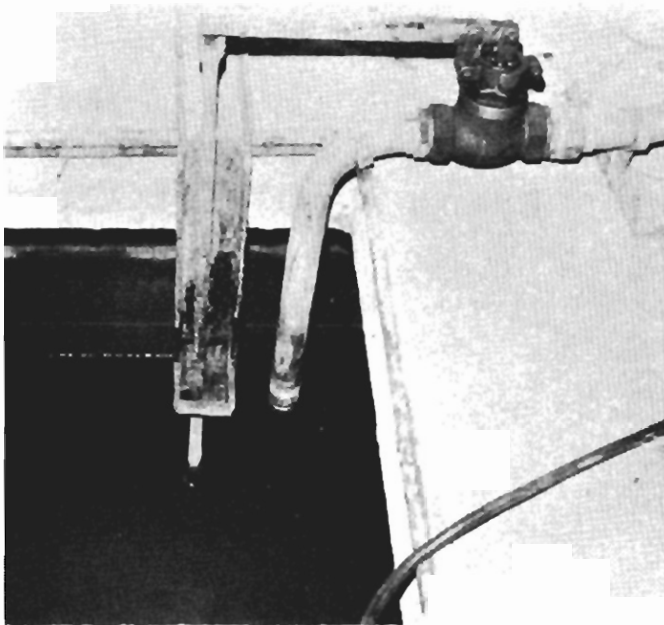
Näitä kellaritiloja ei ole rakennettu vesitiiviiksi, joten pohjavettä pääsee virtaamaan kalliopinnoista, seinistä ja lattiaista sisätiloihin (kuva 25). Tilat pidetään kuivina pohjavesipumpuilla (kuva 26), joihin on kytketty käyttötuntimittari (kuva 27). Geoteknillinen toimisto käy merkitsemässä muistiin käyttötuntimittarin lukeman kerran viikossa. Pumpujen likimäärin tiedetyn tehon ja käyttöajan perusteella on saatu viikottaiset arvot tiloihin vuotavalle pohjavesimäärälle. Tilat ovat vuotaneet vuoden

1974 heinäkuun ja vuoden 1976 maaliskuun välisenä aikana $50...80 \text{ m}^3/\text{d}$ ja sen jälkeen $30...70 \text{ m}^3/\text{d}$. Ai-noastaan Heimolan talon pohjavesipumppujen teho on mitattu; muiden pumppujen tehoina on käytetty jotakin pumpun valmistajan ilmoittamaa tehoa.

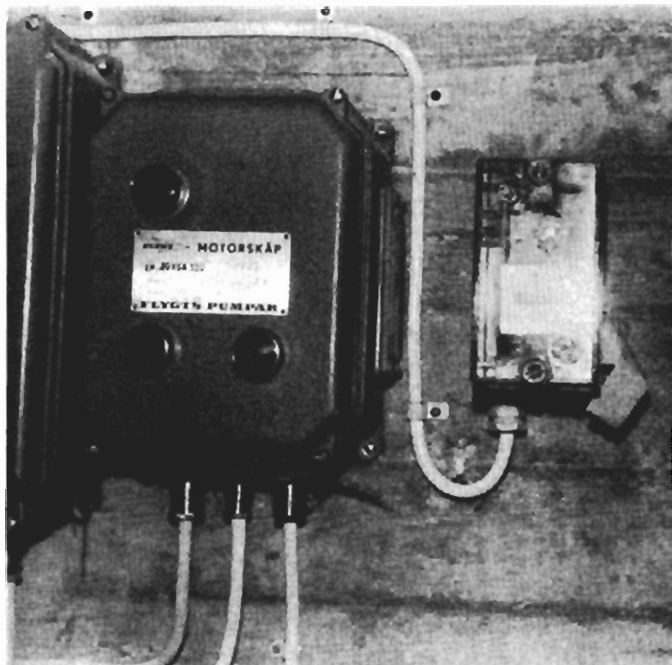
Tässä selvityksessä on oletettu, että kellaritiloihin vuotavat vesimäärät tulisivat kokonaan kallioista ja saven alapuolisista maakerroksista eli alemmasta pohjavesikerroksesta. Tähän johtopäätökseen on päästy, koska alemman pohjaveden painetaso on havaintojen mukaan kellaritilojen läheisyydessä ympäristöä alempana ja koska kellaritilojen kallioon rajoittuvissa osissa on silmin havaittavia vuotokohtia.



Kuva 25. Vettä vuotava halkeama vanhan metrovarauksen seinässä.



Kuva 26. Pohjavesikaivo ja pumpun katkaisija City-Centerin kellarissa.

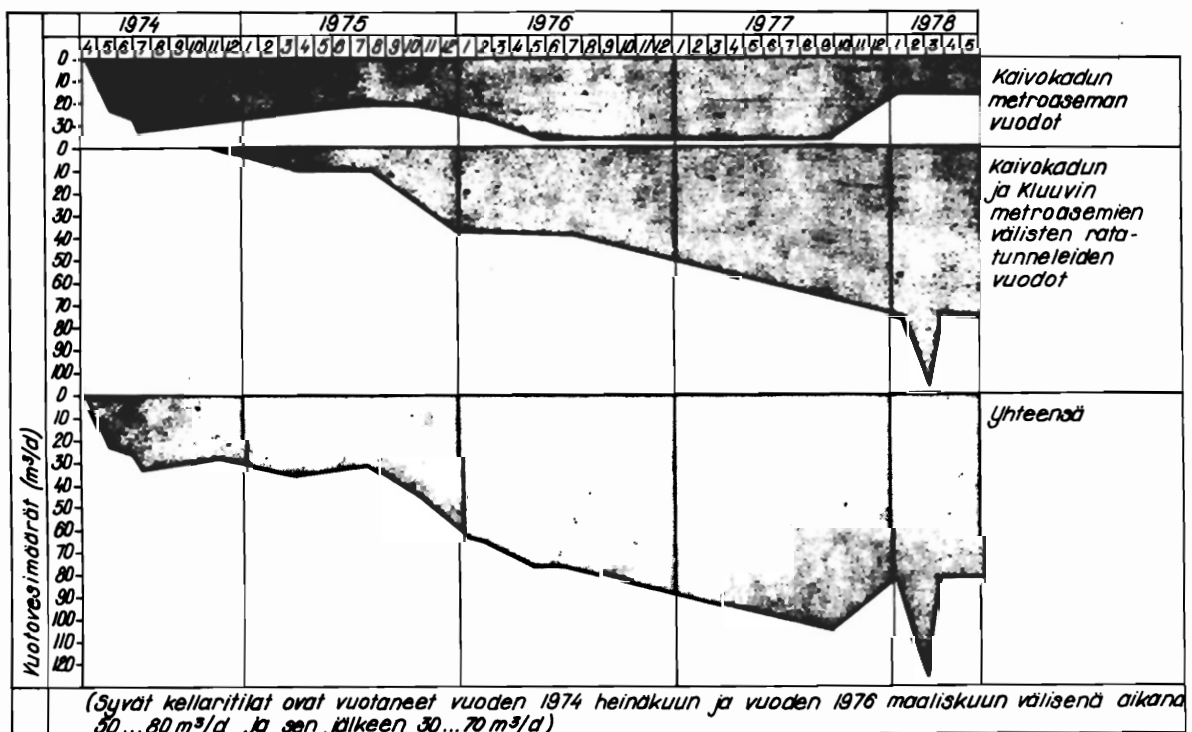


Kuva 27. Pohjavesipumpun käyttötuntimittari.

4.22 Vuodot metron tiloihin

Metron tilojen vuotojen mittauksen ovat hoitaneet metrotuomiston valvojat. Rakennustyöt ovat häirinneet mittauksia monin tavoin. Joissakin työvaiheissa, esimerkiksi porausten yhteydessä, metrotunneliin on tullut runsaasti vesijohtovettä. Maan pinnalle johtavista kuiluista ja työtunneleista on valunut sisään sade- ja sulamisvettä. Osa pois pumpatusta vedestä on valunut takaisin. Mittaukset ovat keskeytyneet, kun tiloihin on tehty vettä kerääviä syvennyksiä tai muut työvaiheet ovat estäneet mittausten suorituksen. Muutaman mittapadon on todettu myös vuotavan.

Kuvassa 28 on esitetty geoteknillisen toimiston saama käsitys metron vuotojen kehittymisestä.

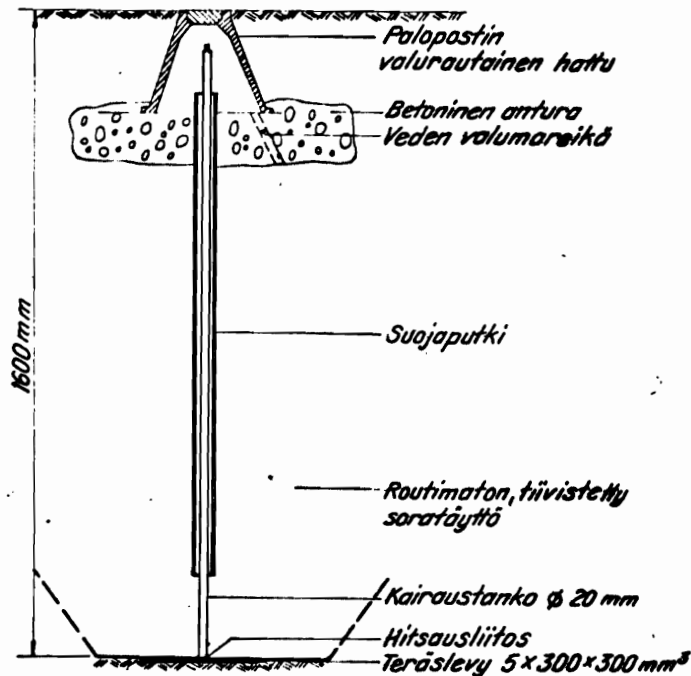


Kuva 28. Metron vuotojen kehitys.

4.3 Painumien tarkkailu

4.3.1 Painumalevyt

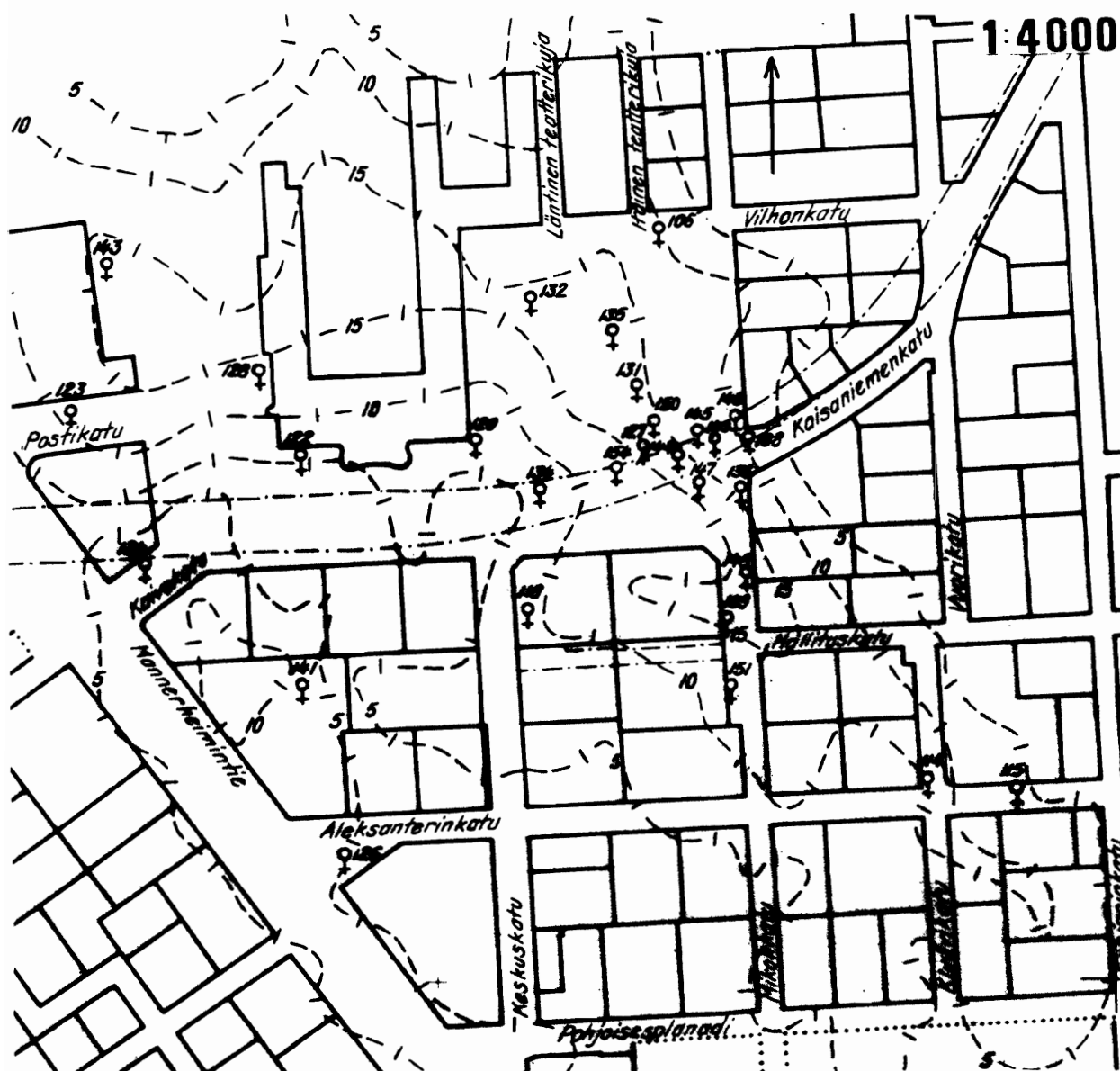
Keskusta-alueen täyttöjen ja osittain pohjaveden painetason alenemisen aiheuttaman hienorakeisen maan konsolidaation seurauksena maan pinta painuu jatkuvasti. Geoteknillinen toimisto ja kaupunkimittausosasto ovat seuranneet vuodesta 1974 lähtien painumien kehitystä painumalevyjen (kuva 29) avulla.



Kuva 29. Painumalevy.

Alueella oli vuoden 1978 alussa 27 painumalevyä (kuva 30). Kaikkien levyjen keskimääräinen painumisnopeus on ollut 13,6 mm/a, mihin on suuresti vaikuttanut metrotunneleiden Kluuvin ruhjeen läpäisytyö. Jos 13 Kluuvin ruhjeessa metrotunneleiden kohdalla olevaa painumalevyä jätetään huomioon ottamatta, muiden levyjen keskimääräinen painumisnopeus on ollut 3,4 mm/a (taulukko 7). Painumien kehitystä Suomen Yhdyspankin

kiinteistöjen yhdystunnelin rakentamisen yhteydessä suoritetun pohjaveden alennuksen aikana on esitetty kohdassa 7.32.



Kuva 30. Painumalevyjen sijainti.

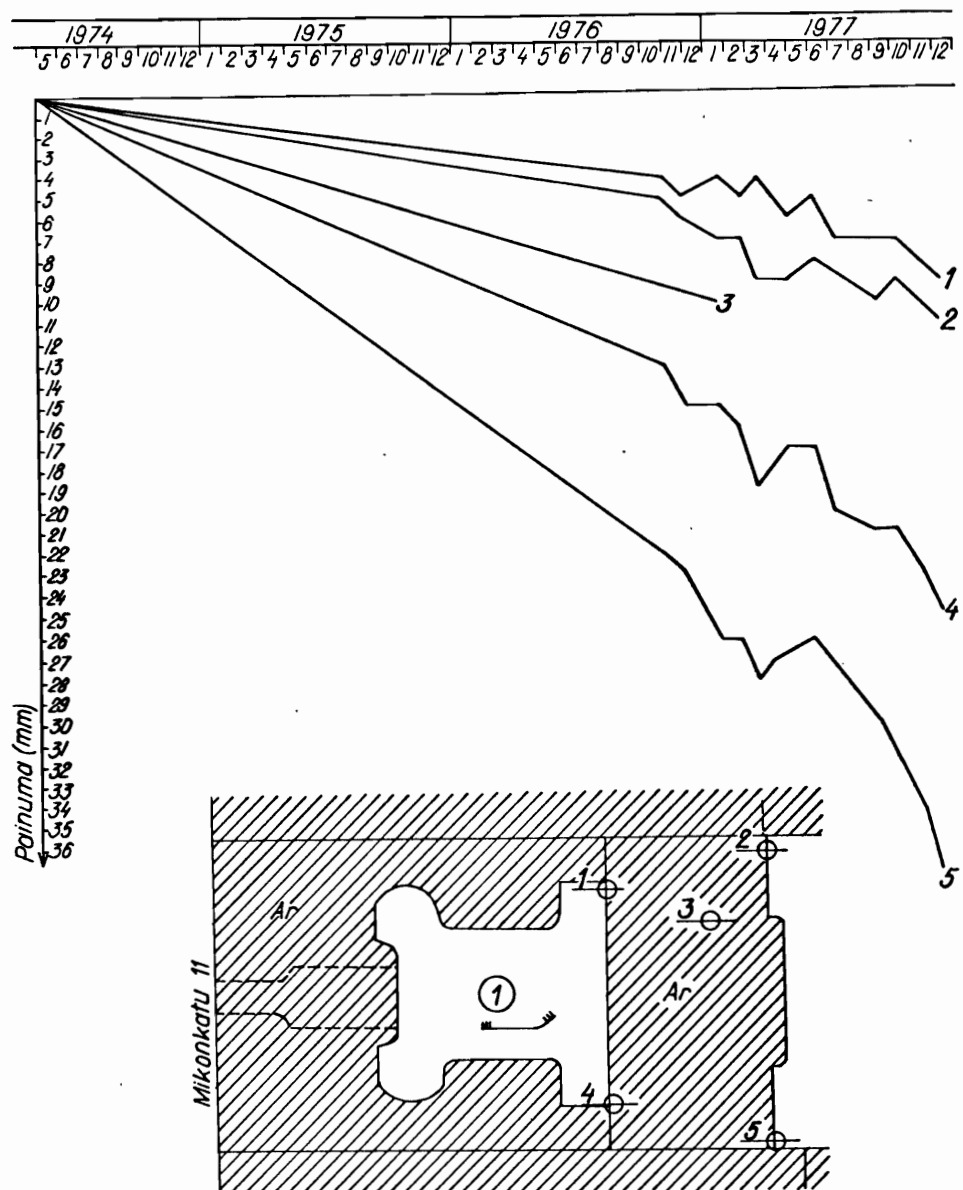
Taulukko 7. Painumalevyjen painumia.

Painuma- levy	Ensimmäisen havainnon päiväys	Viimeisen havainnon päiväys	Painuma mm	Painumis- nopeus mm/a
106	1.5.1974	20.5.1978	11	2,7
108 R	1.5.1974	20.5.1978	53	13,1
109 R	1.5.1974	20.5.1978	26	6,4
114	1.5.1974	20.5.1978	13	3,2
115	14.3.1977	20.5.1978	2	1,8
118	1.5.1974	20.5.1978	19	4,7
122	1.5.1974	31.8.1976	4	1,7
123	1.5.1974	20.5.1978	19	4,7
124	1.5.1974	20.5.1978	13	3,2
126	1.5.1974	20.5.1978	5	1,2
127 R	1.5.1974	20.5.1978	82	20,2
128	1.5.1974	20.5.1978	17	4,2
129	1.5.1974	14.6.1977	4	1,3
131 R	8.11.1976	2.12.1977	15	14,1
132	23.8.1974	20.5.1978	30	8,0
134	23.8.1974	20.5.1978	11	2,9
135	1.5.1974	20.5.1978	19	4,7
136 R	23.8.1974	20.5.1978	24	6,4
141	1.5.1974	20.5.1974	4	1,0
143	1.5.1974	20.5.1978	24	5,9
144 R	8.11.1976	20.5.1978	174	116,6
145 R	8.11.1976	17.5.1978	58	38,1
146 R	8.11.1976	20.5.1978	13	8,5
147 R	8.11.1976	20.5.1978	97	63,3
148 R	14.3.1977	20.5.1978	0	0
149 R	25.4.1977	17.5.1978	35	23,0
150 R	25.4.1977	17.5.1978	34	22,3
151	14.3.1977	20.5.1978	3	2,7
154 R	8.11.1976	20.5.1978	18	11,8
Kaikkien levyjen keskiarvo				13,6 mm/a
Ilman R - merkkiä olevien levyjen keskiarvo				3,4 mm/a

R metrotunneleiden Kluuvlin ruhjeen läpäisytyön vaikutusalueella olevat levyt

4.32 Rakennusten painumat

Rakennusten painumia on seurattu metrolinjan läheisyydessä kortteleissa 38a, 38b, 39a, 39c, 97, 99 ja 103. Lisäksi on vaa'ittu rautatieaseman painumapultteja. Rakennusten painumista tapahtuu ainakin korttelin 38b tontilla 1, jossa eräät tarkkailupulttit ovat painuneet 10...36 mm vuoden 1974 toukokuun ja vuoden 1977 joulukuun välisenä aikana (kuva 31).



Kuva 31. Piharakennuksen painumahavainnot korttelin 38b tontilla 1.

5. POHJAVEDEN VIRTAAUS NYKYISIN

5.1 Pohjaveden kulutus

Syvien maanalaisten tilojen mitatut vuodot (kohta 4.2) vaikuttavat ensisijaisesti alemmaan pohjavesikerrokseen. Vuotovesitarkkailuun kuulumattomien, alemmaan pohjavesikerrokseen ulottuvien maanalaisten tilojen vuotoja ei ole toistaiseksi seurattu säännöllisten mittauksien avulla, koska nämä vuodot on arvioitu pieniksi.

Ensisijaisesti orsivettä kuluttavia vuotovesipumppuja on monissa vanhemmissa taloissa. Näille pumppuille on tyypillistä, että ne toimivat vain ajoittain orsiveden ollessa korkealla. Useat niistä eivät toimi enää ollenkaan, koska orsiveden pinta on jatkuvasti matalalla tasolla. Jotkut vuotovesipumpput pumppaavat myös kellarikerrosten saniteettivesiä. Ajoittain toimivia, ensisijaisesti orsivettä kuluttavia pumppuja on esimerkiksi Ateneumin (Kaivokatu 2 - 4), Aleksanterinkatu 48:n, Elannon (Aleksanterinkatu 9) ja Kansallisteatterin (Vilhonkatu 11) kellareissa. Myös ainakin Mikonlinnan (Mikonkatu 15), postitalon (Mannerheimintie 11) ja Renlundin (Mikonkatu 7) kellareissa on vuotovesipumppu.

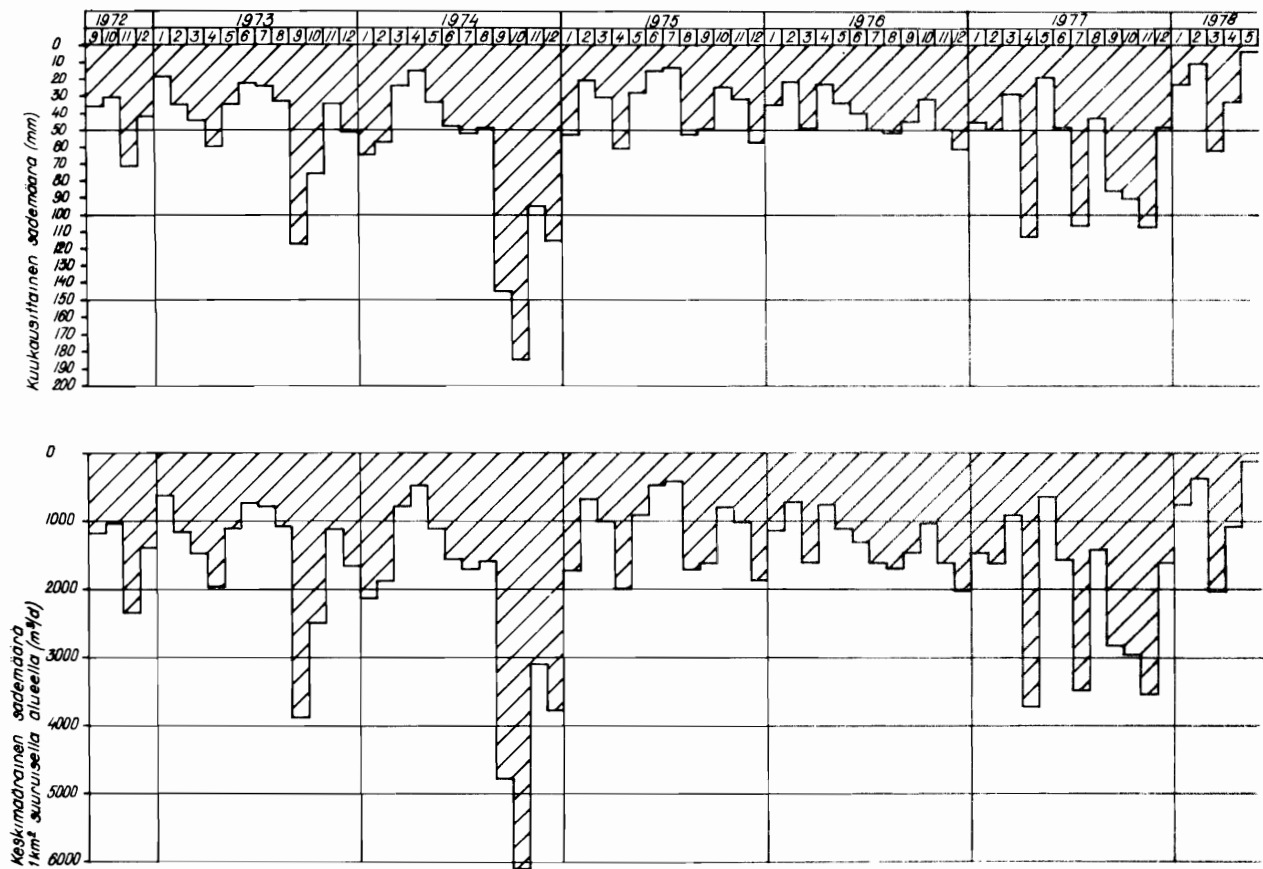
Tiedot orsiveden pumppauksista ovat karkeita arvioita. Esimerkiksi Ateneumin pohjavesipumppujen on arvioitu 12.12.1973 pumppaavan alle $0,15 \text{ m}^3/\text{d}$. Kuitenkin vuoden 1978 huhti- ja toukokuussa pumppauksen on mitattu olevan noin $130 \text{ m}^3/\text{d}$. Muita orsiveden kulutuksen mittauksia ei ole tietyvästi tehty.

Vuotavat viemäriputket kuluttavat vuotovesipumppujen lisäksi orsivettä, jolloin orsiveden pinta laskee viemäreiden tasolle. Alueen viemärit ovat osittain vanhoja ja huonokuntoisia.

5.2 Kulutetun pohjaveden korvautuminen

Suoritettujen mittausten mukaan (kohta 4.2) alueella kulutetaan 110...170 m³/d vettä alemmasta pohjavesikerroksesta. Orsivesikerroksesta kulutettavaa vesimäärää ei tunneta. Koska pohjaveden painetaso ei laske jatkuvasti, kulutettu vesimäärä korvautuu.

Normaalisti pohjavesi syntyy maahan imeytyvästä sadevedestä. Kaisaniemessä mitattuja sademääriä on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Kuukausittaiset sademäärät Kaisaniemessä.

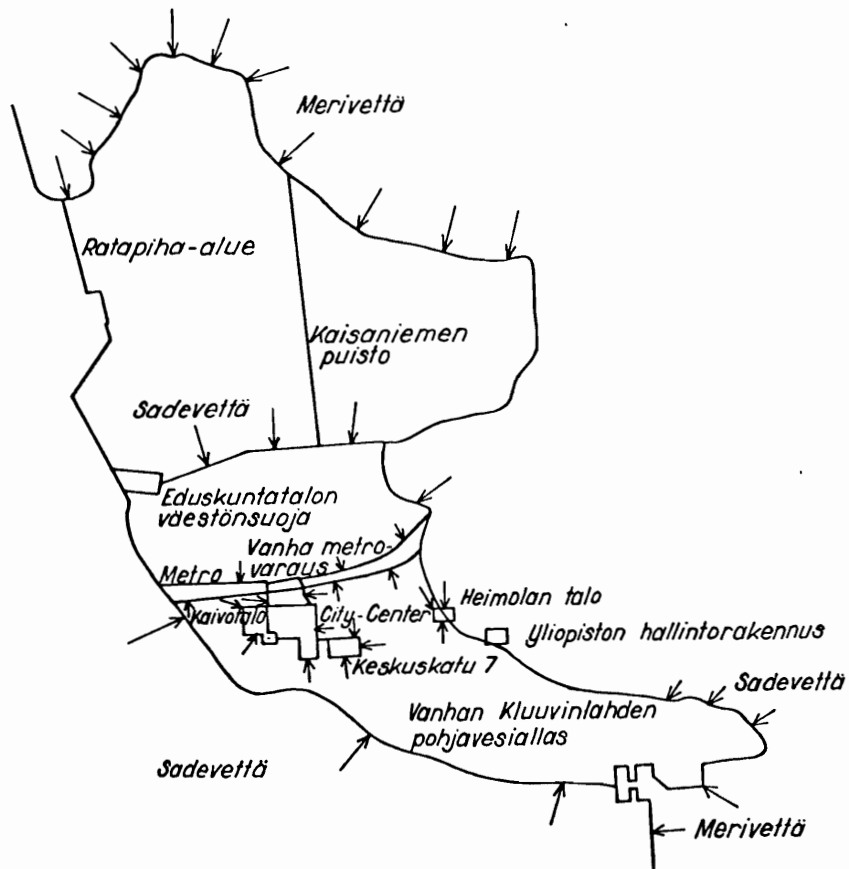
Sadevettä pääsee imeytymään suoraan maakerrokseen ratapiha-alueella, Kaisaniemen ja Esplanadin puistoissa ja joillakin pienillä pihoilla. Sadevettä voi siirtyä maahan myös vuotavien viemäreiden kautta. Varsinkin kovilla sateilla, jolloin viemäriputket ovat

täynnä ja myös putken yläosassa olevat raot vuotavat, maahan siirtyvät vesimäärät saattavat olla suuria. Sadevettä kerääntyy varsinaiseen pohjavesialtaaseen myös ympäristöstä maakerroksia, kallion pintoja ja rakoja pitkin. Altaan sadealue on runsaan neliökilometrin suuruinen.

Alueella on joitakin suihkulähteitä ja lammikoita. Kaisaniemen puiston vesiallas vuotaa runsaasti. Altaaseen johdetaan vesijohtovettä toukokuun puolen välin ja syyskuun lopun välisenä aikana noin 34000 m^3 eli keskimäärin noin $250 \text{ m}^3/\text{d}$. Veden kulutuksen on havaittu lisääntyvän, kun meriveden pinta on matalalla. Orsiveden pinnan on havaittu nousevan läheisissä havaintopisteissä, kun lammikko keväisin täytetään.

Pohjavesi on muinoin virrannut alueelta mereen. Meriveden korkeustaso vaihtelee välillä $-0,9 \dots +1,1 \text{ m (NN) /17/}$. Alemman pohjavesikerroksen painetaso on nykyisin useissa tarkkailupisteissä yleensä meren pinnan tasoa alempana, jolloin virtausta saattaa tapahtua merestä pohjavesikerrokseen. Töölönlahdesta johtaa paksut, rautateiden rakentamisen aikaan tehdyt täyte- maakerrokset rautatieasemalle saakka. Myös Kauppatorin rannan ja entisen Kluuvinlahden alueen välillä on kitkamaakerroksia, jotka saattavat olla osittain hyvin vettä läpäiseviä.

Pohjaveden alkuperää ei ole saatu selville muutamista kohdista otetuille vesinäytteille suoritettujen kemiallisten analyysien avulla (liite 2). Merkkiaineiden avulla suoritettavia virtaustutkimuksia ei ole tehty. Kuvassa 33 on esitetty veden virtausta alemmassa pohjavesikerroksessa.



Kuva 33. Pohjaveden virtaus alemmassa pohjavesi-kerroksessa.

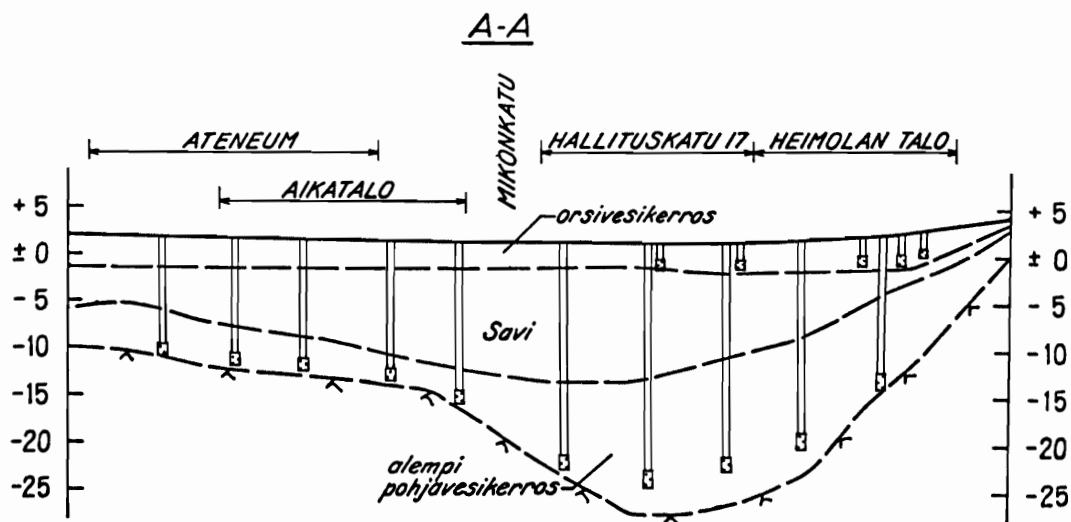
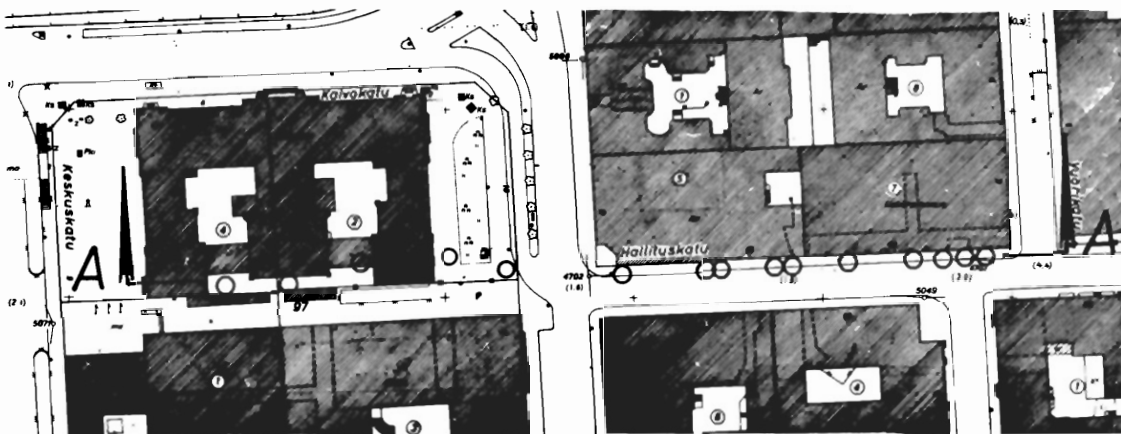
5.3 Pohjaveden syöttö

Alemman pohjavesikerroksen alentunutta painetasoa ja orsiveden alentunutta pintaa voidaan nostaa pumppaamalla vesijohtovettä maahan syöttökaivojen kautta.

Vuonna 1976 rakennettiin Ateneumin takaa Heimolan talolle ulottuva, 5 orsivesikaivoa ja 10 alemman pohjaveden kaivoa käsittävä syöttöjärjestelmä (kuva 34). Pohjaveden painekorkeudet olivat alentuneet Fabianinkadun varrella suoritetun pumppauksen seurauksena. Orsivesikaivoista syötettiin yhteensä $60...70 \text{ m}^3/\text{d}$ ja alemman pohjaveden kaivoista yhteensä $130...220 \text{ m}^3/\text{d}$. Muutamassa kuukaudessa pohjavesitilanne palasi ennalleen (kohta 7.32).

Orsivettä on syötetty lyhytaikaisesti mm. Kämpin talon, Keskuskatu 7:n ja Kaivokadun metroaseman lippuhallin rakennustöiden yhteydessä.

Pysyviä orsiveden syöttökaivoja on korttelissa 34, Fennian talossa ja rautatieaseman kellarissa. Näistä syötetään ajoittain vettä, jotta orsiveden pinta pysyisi puisten perustusten yläpuolella.



Kuva 34. Pohjaveden syöttöjärjestelmä.

6. POHJAVEDEN VIRTAUSLASKELMAT

6.1 Laskentamenetelmän valinta

Pohjavesivirtauksen perusyhtälönä käytetään yleensä ranskalaisen Henry Darcyn 1860-luvulla esittämää lakia. Darcyn laki voidaan ilmaista kuvassa 35 esitetyssä tapauksessa seuraavasti /33/ :

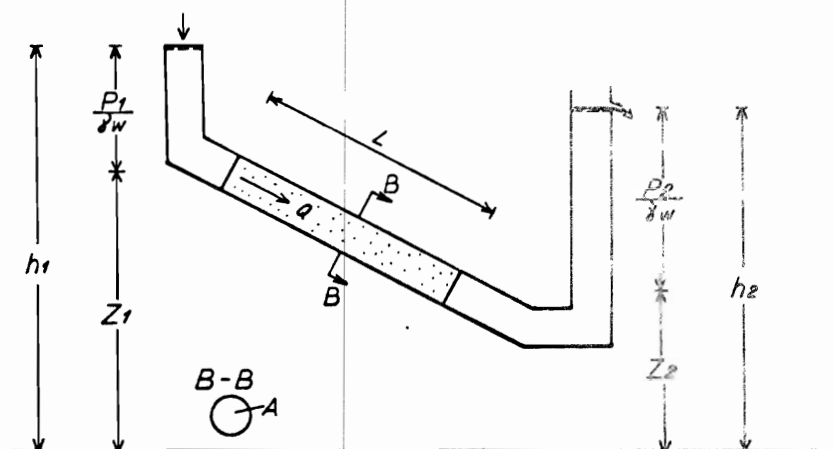
$$Q = k \cdot A (h_1 - h_2)/L, \quad (1)$$

$$q = k (h_1 - h_2)/L, \quad (2)$$

$$h_1 = z_1 + p_1 / \gamma_w, \quad (3)$$

joissa

Q	virtaama (m^3/s)
k	vedenläpäisevyysarvo (m/s)
A	virtausputken poikkipinta-ala (m^2)
h_1, h_2	painekorkeudet putken päissä (m)
L	hiekkasynterin pituus (m)
q	näennäinen virtaamisnopeus (m/s)
z_1, z_2	hiekkasynterin keskipisteen korkeus vertailutasosta laskettuna (m)
p_1, p_2	veden aiheuttama paine (N/m^2)
γ_w	veden tilavuuspaino (N/m^3)



Kuva 35. Darcyn lakia noudattava virtaus.

Jotta Darcyn lakia voitaisiin käyttää luonnossa, maaperän vedenläpäisevyys on saatava selville. Taulukossa 8 on lueteltu erilaisia mahdollisuuksia vedenläpäisevyyden määrittämiseksi. Kuten kohdan 2.4 taulukosta 1 havaitaan, vedenläpäisevyys vaihtelee eri menetelmillä määritettynä Kluuvin ruhjeessa runsaasti. Pohjaveden virtauslaskelmien teko suoritettujen vedenläpäisevyyskertoimien määrittäykseen perustuen on vaikeaa.

Taulukko 8. Vedenläpäisevyyden määrittäystapoja.

Määrittäystapa	Lähdeviittauksia
Maalajiluokitus	/7, 14, 16, 19, 20, 22, 25, 31, 33/
Rakeisuus (Hazen)	/16, 29, 31/
Rakeisuus (W.Seelheim)	/15/
Rakeisuus (Beskow)	/16/
Rakeisuus (Terzaghi)	/20/
Rakeisuus ja tiiveys (Fair ja Hatch)	/20, 32/
Tiiveys	/25, 29/
Laboratoriokokeet	/16, 25, 31, 32/
Kenttäkokeet	/10, 16, 20, 32/

Kun tarkastellaan pohjaveden virtausta kaivoon, pohjaveden virtauslakien yksinkertaistamiseksi joudutaan yleisesti käytetyissä matemaattisissa laskentatavoissa

tekemään seuraavat olettamukset /2/ :

- a. Vettä johtava kerros ulottuu horisontaalisuunnissa äärettömiin.
- b. Vettä johtava kerros on homogeeninen ja isotrooppinen.
- c. Virtaus on stationaarista ja laminaarista.
- d. Kaivo ulottuu vettä johtavan kerroksen pohjaan saakka.
- e. Kaivon suodatin- ja siiviläosien putoushäviöt ovat merkityksettömiä.

Lukuisilla yksinkertaistuksilla tai kokeellisesti on saatu runsaasti erilaisia kaavoja kaivoon virtaavalle pohjavedelle (taulukko 9). Myös kaivantoon virtaavia vesimääriä voidaan arvioida vastaavilla kaavoilla (taulukko 10). Taulukoissa ei ole esitetty kaavoja yksityiskohtaisesti, koska merkinnät ovat erilaisia eri lähteissä ja koska kaavoja ei ole käytetty tässä tutkimuksessa.

Taulukko 9. Luettelo kaivoon virtaavan pohjaveden kaavoista.

Kaavan sisältö	Lähdeviittauksia
Pohjaveden stationaariset virtausyhtälöt yksittäisille ja useille täydellisille kaivoille vapaan ja paineellisen pohjaveden tapauksissa. (Täydellinen kaivo ulottuu vettä johtavan kerroksen pohjaan.)	/5, 7, 8, 9, 15, 16, 20, 27, 32, 33/
Pohjaveden alennuksen ulottuvuus stationaarisessa tapauksessa yksittäiselle kaivolle (Sichardt).	/5, 20, 26/
Pohjaveden alennuksen ulottuvuus ajan funktiona.	/5, 26/
Pohjaveden alennuksen ulottuvuus Weberin mukaan monille kaivoille.	/11, 26/
Pohjaveden stationaarinen virtausyhtälö yksittäiselle epätäydelliselle kaivolle. (Epätäydellinen kaivo ei ulotu vettä johtavan kerroksen pohjaan.)	
a. Forcheimerin mukaan	/29/
b. Koženyn mukaan	/20/
c. Borelin mukaan	/22/
Pohjaveden virtaus alennuskaivon ja korvauskaivon välillä.	/9, 15/
Avoiden tai vettä läpäisemättömän seinän korvaaminen laskelmissa kuvituilla pumppauskaivoilla.	/9, 10, 32, 33/
Pohjaveden stationaariset virtausyhtälöt yksittäiselle täydelliselle ja epätäydelliselle kaivolle vesistön rannan läheisyydessä.	/5, 6, 20, 29/
Pohjaveden stationaarinen virtausyhtälö kaivannon vieressä olevalle kaivolle (Széchy).	/29/
Theisin ja Jacobin ajasta riippuvat laskentamenetelmät yksittäiselle kaivolle.	/9, 10, 15, 32/

Taulukko 10. Luettelo kaivantoon virtaavan pohjaveden kaavoista.

Kaavan sisältö	Lähdeviittauksia
Kaivannon seinistä ja pohjasta virtaavan pohjaveden yhtälöt.	/11/
Pohjaveden virtaus ponttiseinän tai laatan ali.	/8, 27/
Kaivantoon virtaavan vesimäärän pieneminen ponttiseinän juntauussyvyyden kasvaessa Weberin mukaan.	/11/
Neuvostoliittolainen mitoitus tapa kaivantoon virtaavalle pohjavesimäärälle.	/20/

Tarkasteltavan alueen pohjavesivirtaus on erittäin monimutkainen. Esitettyjen yksinkertaisten laskentakavojen soveltaminen altaan pohjavesivirtauksen ratkaisemiseen ei ole mielekäästä. Pohjavesivirtauksen ratkaisu voidaan suorittaa analogiamalleilla tai numeerisilla ratkaisumenetelmillä.

Eri analogiamallien ja numeeristen mallien keskinäisiä eroavuuksia ei selvitetty tässä yhteydessä, vaan ratkaisumenetelmäksi valittiin elementtimenetelmä, johon perustuen dipl.ins. Jukka Aalto laati paineellisen pohjaveden virtauksen ratkaisuun soveltuvan tietokoneohjelman.

Orsiveden virtauksen laskennallisesta selvittämisestä luovuttiin, koska orsiveden kulutus ja syntyminen sekä orsivesikerroksen vedenläpäisevyysominaisuuksien vaihtelu tunnetaan virtauslaskelmaa varten liian huonosti.

6.2 Elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä

6.21 Menetelmän periaatteet

Menetelmässä tarkastellaan kaksidimensioista, paineellista pohjavesivirtausta epähomogeenisessa, vettä johtavassa kerroksessa (kuva 36). Elementtimenetelmällä /34/ ratkaistaan pohjavesivirtauksen yleinen kaksidimensioinen differentiaaliyhtälö:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + P \quad (4)$$

missä

$$T = k \cdot d \quad (5)$$

k kerroksen keskimääräinen vedenläpäisevyysarvo (m/s)

d vettä johtavan kerroksen paksuus (m)

h pietsometrinen painekorkeus (m)

x' ja y' vettä johtavan kerroksen keskipinnan tangentin suuntaiset koordinaatit (m)

t aika (s)

S varastokerroin (yksikötön)

P vettä johtavan kerroksen ulkopuolelta tuleva tai siitä pois lähtevä vesimäärä pinta-alayksikköä ja aikayksikköä kohden ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$)

Yhtälö ratkaistaan käyttäen reunaehtona

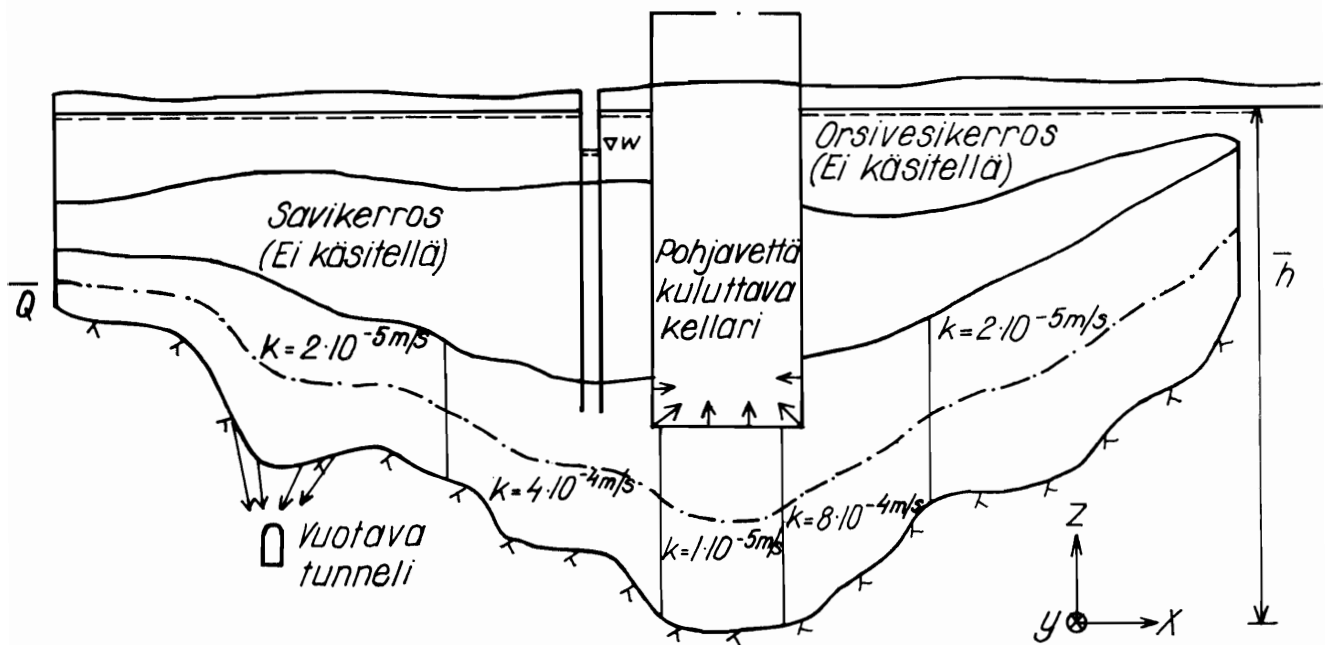
$$T \left(\sin \alpha \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \bar{q}, \quad (6)$$

tai

$$h = \bar{h}, \quad (7)$$

missä

- α elementtiverkon reunan ulkopuolisen normaalivektorin ja x' -akselin välinen kulma
 $\bar{q}$ annettu virtaama reunan pituusyksikköä kohden ($\frac{\text{m}^3}{\text{s m}}$)
 $\bar{h}$ annettu painekorkeus (m)



Kuva 36. Laskentamenetelmän käsittelemä pohjavesivirtaus.

Menetelmän periaatteet esitetään yksityiskohtaisemmin lähteessä 1.

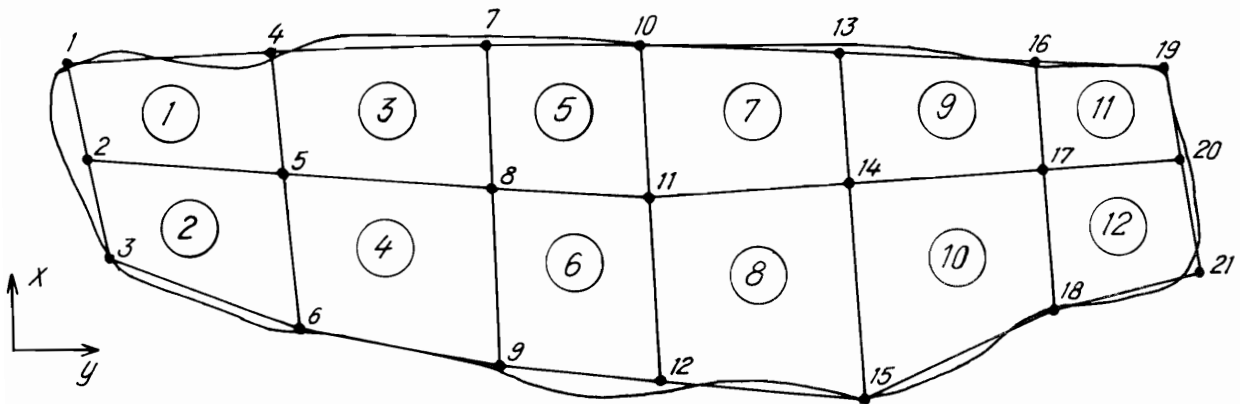
6.22 Tietokoneohjelman käyttö

Dipl.ins. J.Aalto on laatinut edellä esitettyä laskentamenetelmää soveltavan Fortran V -kielisen ohjelman Univac 1108 -tietokoneelle.

Laskentaa valmisteltaessa laskenta-alueesta muodostetaan aluksi suorien viivojen avulla karttapohjalle elementtiverkko. Kussakin elementissä on neljä solmu-

pistettä. Elementit ja solmupisteet numeroidaan juoksevasti alkaen ykkösestä. Solmupisteiden numeroinnissa on pyrittävä saamaan kunkin elementin solmupisteiden numeroiden suurin erotus mahdollisimman pieneksi, jotta kerroinmatriisin nauhanleveys saataisiin tietokoneen muistissa pieneksi (kuva 37).

Elementtien lukumäärä 12
Solmupisteiden lukumäärä 21
Nauhanleveys 5



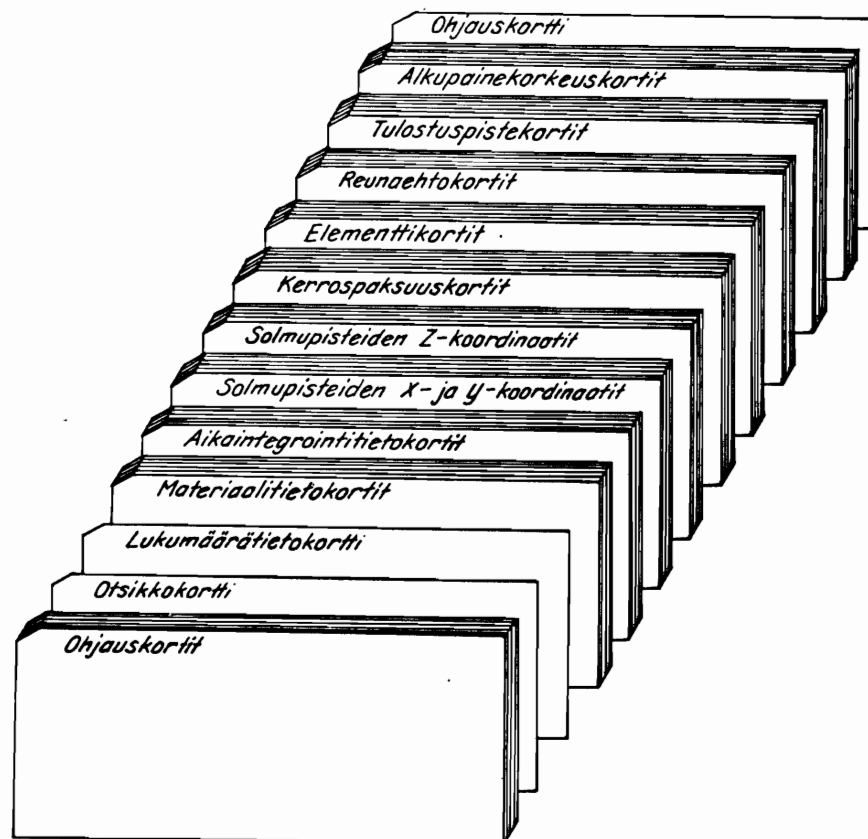
Kuva 37. Elementtiverkon muodostaminen.

Elementeistä muodostetaan ryhmiä, joissa vedenläpäisevyysominaisuudet ovat vakioita.

Solmupisteille määritetään x- ja y-koordinaatit, jotka voidaan antaa laskentaohjelmalle yksitellen tai generoimalla suurempia määriä kerrallaan käyttämällä isoparametrisiä viiva- ja tasoelementtejä. Koordinaatit muodostetaan suorakulmaiseen, oikeakätiseen koordinaatistoon, jossa z-akseli on pystysuora. Z-koordinaatit ja vettäjohtavan kerroksen paksuus annetaan kussakin solmupisteessä.

Elementtiverkon reunoilla oleville solmupisteille on laskelmissa annettava etukäteen vakiona pysyvä painekorkeus $\bar{h}$ (m) tai solmupisteestä aikayksikössä verkkoon tuleva₃ tai solmupisteestä verkosta lähtevä vesimäärä $\bar{Q}$ ($\frac{m^3}{s}$). Jos reunan solmupisteelle ei anneta reunaehtoa, reuna käsitellään laskelmassa vettä läpäisemättömänä.

Ohjelman lähtötiedot syötetään reikäkorteilla (kuva 38). Lähtötietojen sisältö on esitetty tarkemmin liitteessä 3.



Kuva 38. Ajopakan rakenne.

Ohjelmalla voidaan laskea stationaarinen laskelma tai ajasta riippuva, muuttumattomia aika-askelia käyttävä laskelma.

Ohjelma tulostaa rivikirjoittimelle ajon otsikon, lukumäärätiedot, materiaalitiedot, mahdolliset aikalaskentatiedot, solmupisteiden x-, y- ja z-koordinaatit, vettä johtavan kerroksen paksuudet solmupisteittäin, elementtitiedot, reunaehdot, tulostuspisteet, mahdolliset alkupainekorkeudet sekä lopuksi laskennan tuloksena painekorkeudet solmupisteittäin ja virtaamat niissä pisteissä, joiden painekorkeudet on annettu reunaehtona.

6.23 Piirtämisohjelma

Laskelman graafiseen tulostamiseen dipl.ins. Aalto on kehittänyt Fortran V -kielisen piirtämisohjelman. Ohjelmaa on käytetty osituskäytössä Univac 1108 -tietokoneella, kuvanäyttöpäätteen ja piirturin Hewlett-Packard 7202 A avulla. Ohjelmalla voidaan piirtää solmupisteet, elementtiverkko sekä solmupisteistä interpoloidut vettä johtavan kerroksen paksuuskäyrät, kerroksen keskipinnan korkeuskäyrät ja pohjaveden painekorkeuskäyrät.

Piirtämällä saadaan helposti tarkastetuksi lähtötiedot ja havaitaan tulosten suurimmat virheet, mikä olisi erittäin työlästä rivikirjoittimen listauksen avulla.

Ohjelman käyttöä on esitetty liitteessä 4.

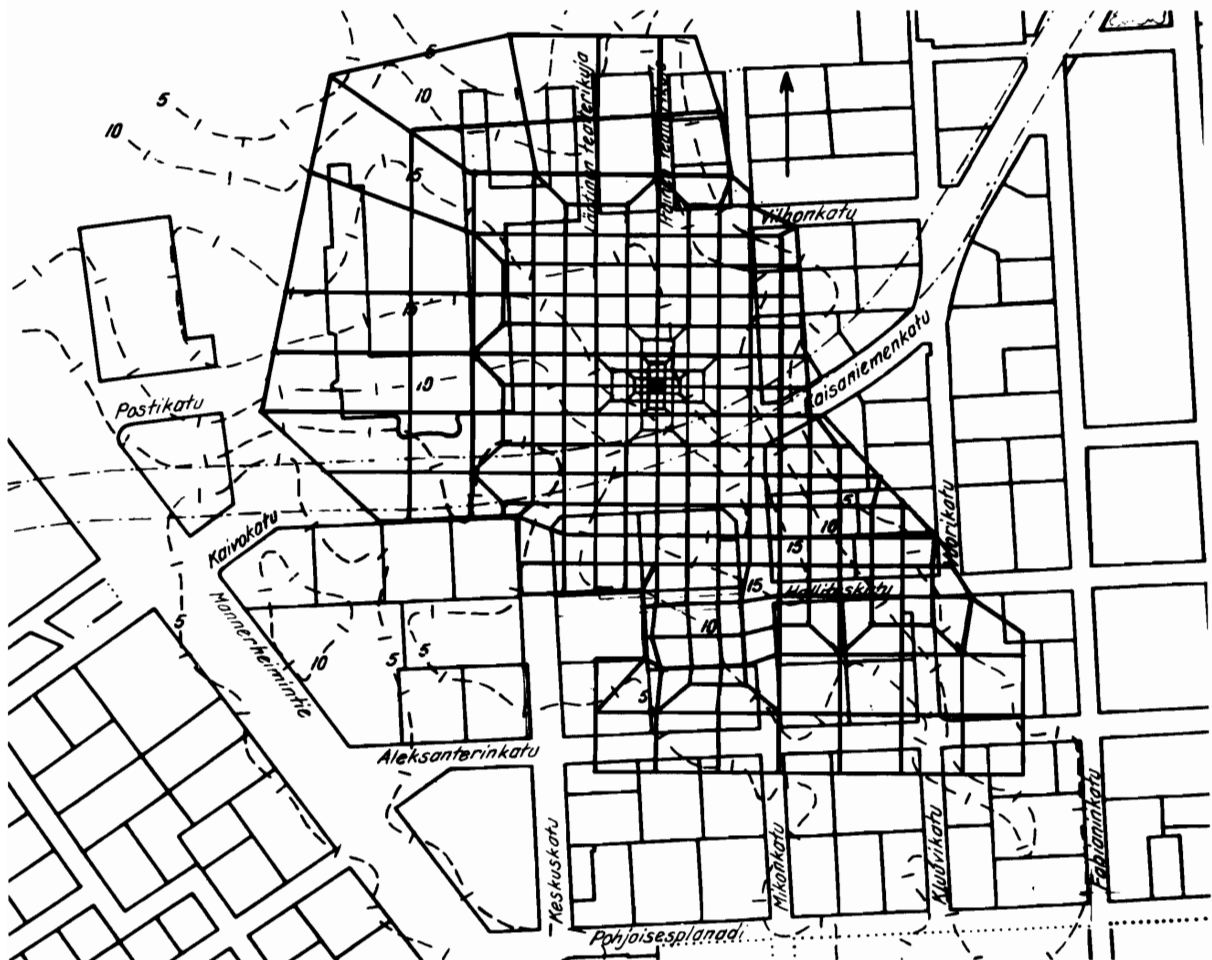
6.3 Elementtimallin tekeminen

6.31 Alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyysarvon määrittäminen Kluuvien ruuhkeen koepumppauksen perusteella

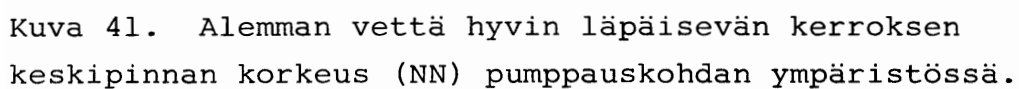
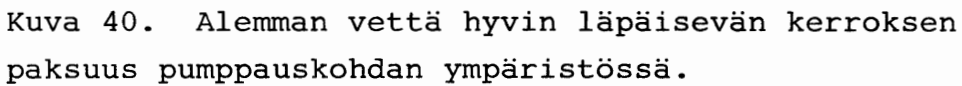
Rautatientorilla suoritettiin vuonna 1973 useita pohjaveden koepumppauksia. 15.10.1973...25.10.1973 suoritetussa pumppauksessa pohjaveden painetaso asettui ympäristön alemman pohjaveden tarkkailuputkissa välittömästi tai viimeistään kahden vuorokauden kuluttua pumppauksen alkamisesta alentuneille, jokseenkin vakioina pysyville korkeustasoille. Orsiveden painetasoon pumppaus

ei vaikuttanut. Maasta pumpattu vesimäärä pysyi tasaisena, ja keskimäärin pumpattiin $32,7 \text{ m}^3/\text{d} = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Pohjavesivirtauksen analysoimiseksi laskentamallilla pumppauskohdan ympärille rakennettiin elementtiverkko (kuva 39). Geoteknillisen toimiston piirtämistä kallion pinnan ja saven alapinnan korkeuskäyristä saatiin alemmalle pohjavesikerrokselle verkon solmupisteissä paksuus (kuva 40) ja keskipinnan korkeusasma (kuva 41).



Kuva 39. Pumppauskohdan ympärille rakennettu elementtiverkko.



Pumppauskohdan ympäristön vedenläpäisevyysarvon määrittämiseksi suoritettiin stationaarinen laskelma, jossa verkon reunoilla oleville solmupisteille annettiin reunaehtona painekorkeus $\bar{h} = 0$ ja pumppauskohdassa olevalle solmupisteelle vakio pumppausvirtaama $\bar{Q} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. Koko verkon vedenläpäisevyyskertoisuudeksi annettiin $k = 1 \text{ m/s}$.

Laskelman tuloksena solmupisteissä saadut painekorkeudet interpoloitiin yhteentoista havaintopisteeseen. Laskentatuloksille haettiin kerroin λ , jolla kerrottuna laskentatulokset toteuttavat pumppauksen aikana havaitut painetason muutokset pienimmän neliösumman mielessä parhaiten:

$$s = \sum_{i=1}^{11} (\Delta H_i - \lambda \cdot \Delta h_i)^2 = \min. \quad (8)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{\sum_{i=1}^{11} (\Delta H_i \cdot \Delta h_i)}{\sum_{i=1}^{11} (\Delta h_i)^2} \quad (9)$$

missä

s	neliösumma
$\Delta H_i \text{ (} i = 1 \dots 11 \text{)}$	pumppauksen aikana havaittu painetason muutos (m)
$\Delta h_i \text{ (} i = 1 \dots 11 \text{)}$	arvoilla $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ja $k = 1 \text{ m/s}$ laskettu painetason muutos (m)
λ	korjauskerroin

Korjauskertoimeksi saatiin $\lambda = 8,12$.

Koska laskentamalli on lineaarinen, laskelmasta saadaan keskimääräinen alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyyskerroin k , jolla laskentamalli toteuttaa havaitun pumppausvirtaaman $Q = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ja pumppauksen aikana havaitut painetason muutokset pienimmän neliösumman mielessä parhaiten:

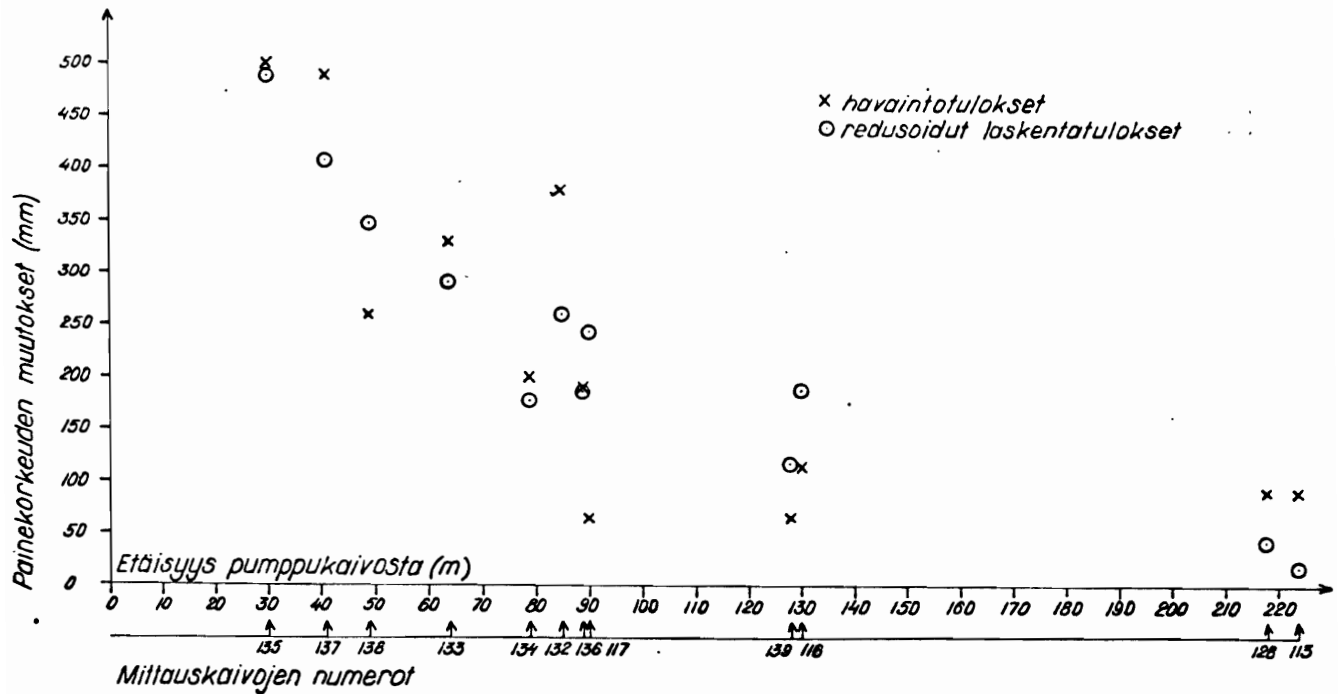
$$k = \frac{Q}{\lambda} = \frac{3,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{8,12} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Koepumppauksen analysoinneissa on aikaisemmin saatu vedenläpäisevyysarvo $k = 7,6 \cdot 10^{-5} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Kohdissa 6.34...6.36 ja 7.32...7.33 esitetyissä laskelmissa pumppauskohdan ympäristössä on käytetty arvoja $k = 3 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

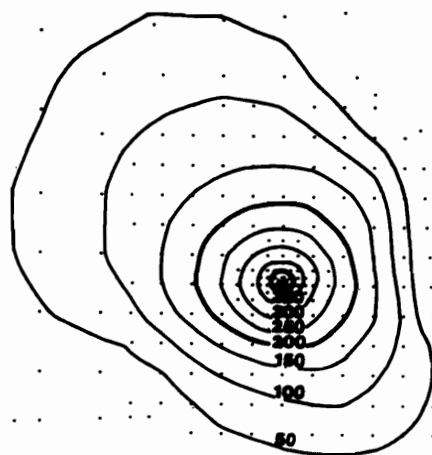
Kuvasta 42 havaitaan, että laskelma on toteuttanut eräät havainnot huonosti. Tämä johtuu osittain pumppauksen aikana esiintyneistä muista pohjaveden liikkeistä. Vaihtelemalla reunaehtoja ja vedenläpäisevyyskertoimia eri elementeissä laskentamallilla olisi voitu etsiä havainnot paremmin toteuttava yhdistelmä.

Koepumppauslaskelman yhteydessä kokeiltiin myös vettä johtavan kerroksen keskipinnan korkeusaseman vaihtelun vaikutusta laskelman tulokseen. Korkeusaseman vaihtelun todettiin olevan tässä tapauksessa merkityksetön, koska tulostkäyrät eivät muuttuneet juuri lainkaan, vaikka vettä johtavan kerroksen keskipinta asetettiin vaakasuoraksi tasoksi. Samanlaisia tuloksia saatiin myös joissakin muissa laskelmissa.

Kuvassa 42 on esitetty havaintotulokset ja tulokset laskelmasta, jossa on käytetty pumppausvirtaamana $\bar{Q} = 3,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ja vedenläpäisevyysarvona $k = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Laskelman tulokset on esitetty painekorkeuden tasa-arvokäyrinä kuvassa 43.



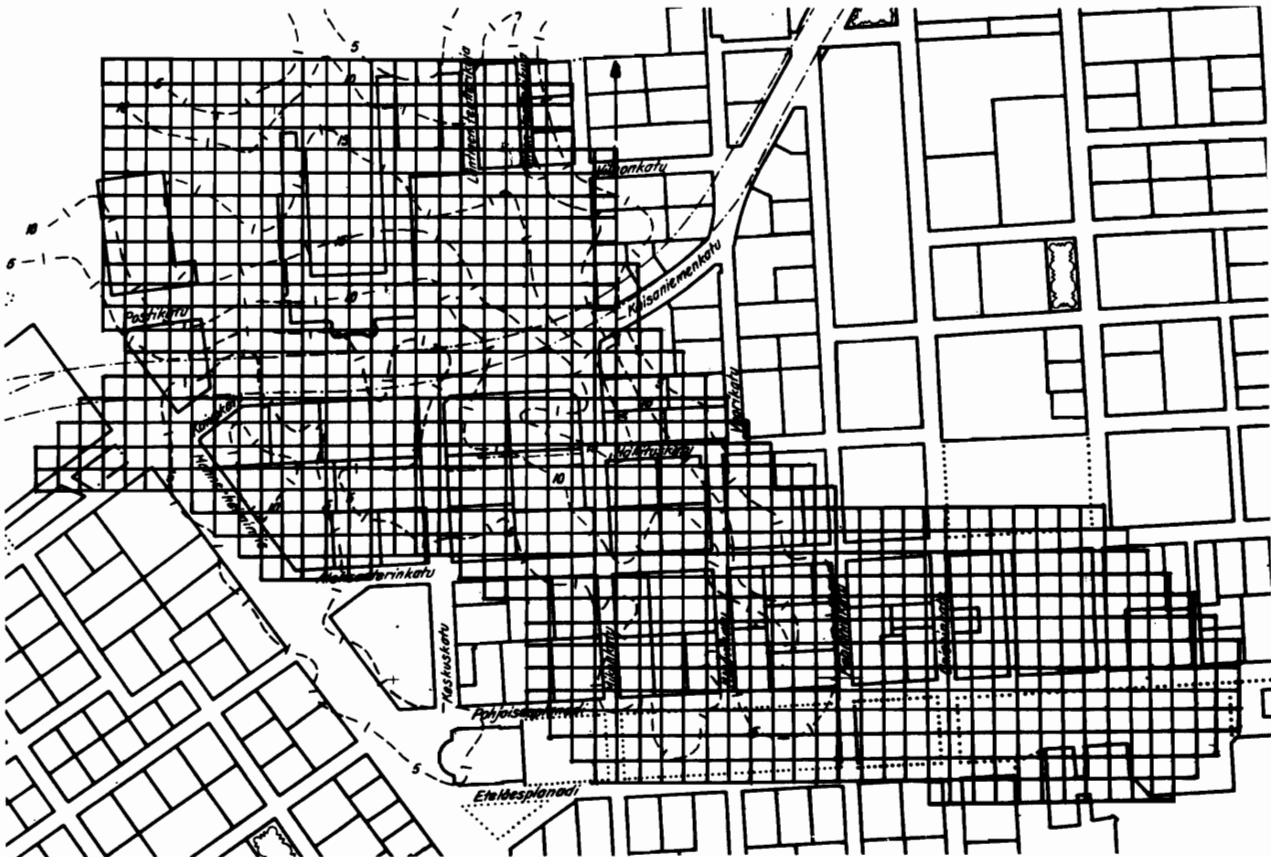
Kuva 42. Koepumppauksen havaintotulokset ja redusoidut laskentatulokset.



Kuva 43. Redusoidun laskelman painekorkeuden muutoksen tasa-arvokäyrät (mm).

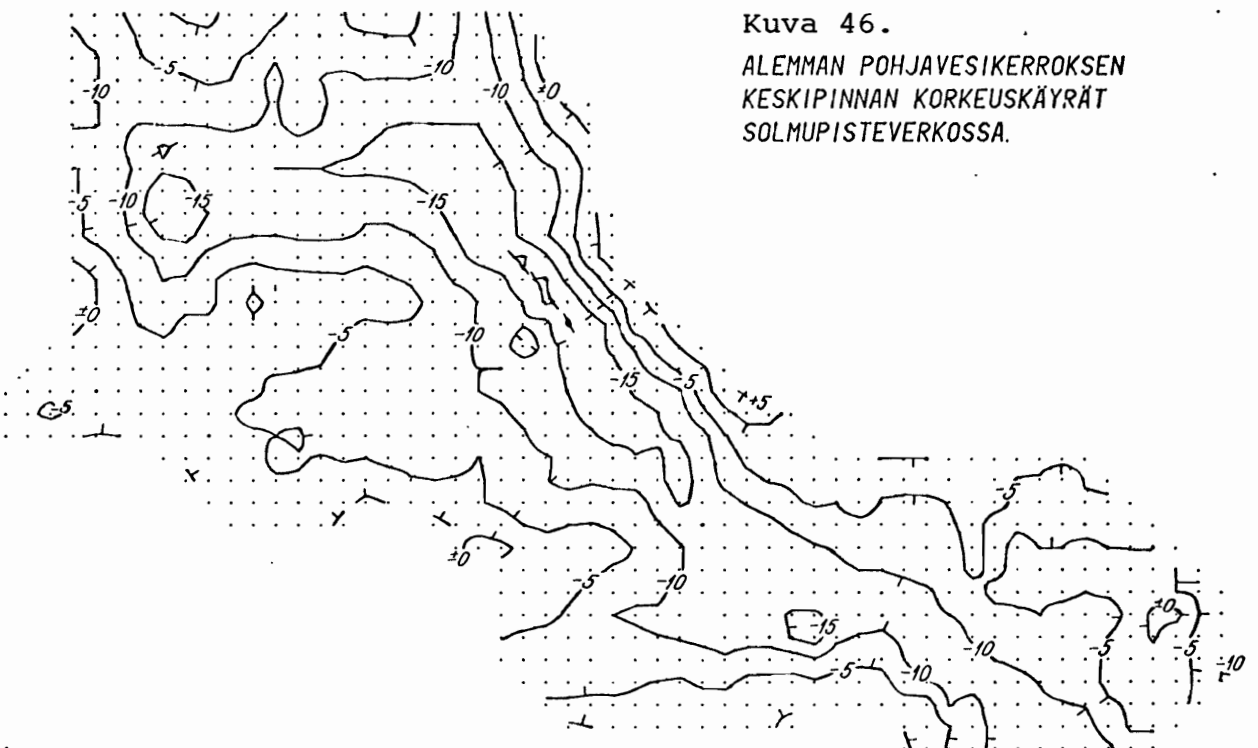
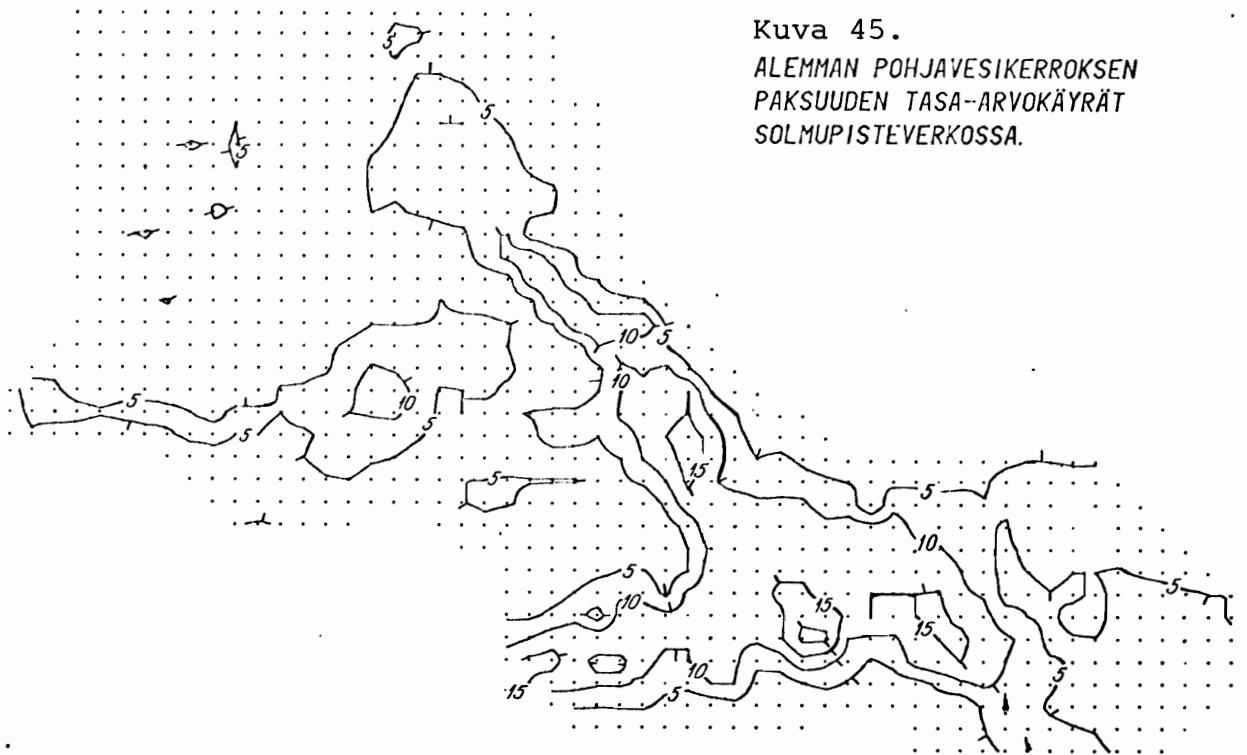
6.32 Suuren elementtiverkon muodostaminen

Pohjavesialtaan alue jaettiin neliön muotoisiin, 400 m² suuruisiin elementteihin (kuva 44). Sekä solmupisteet että elementit numeroitiin vasemmalta lähtien, rivi kerrallaan ja ylhäältä alaspäin. Verkossa on 900 elementtiä ja 991 solmupistettä, joista 180 solmupistettä on verkon reunalla. Kerroinmatriisin nauhanleveys on 33.



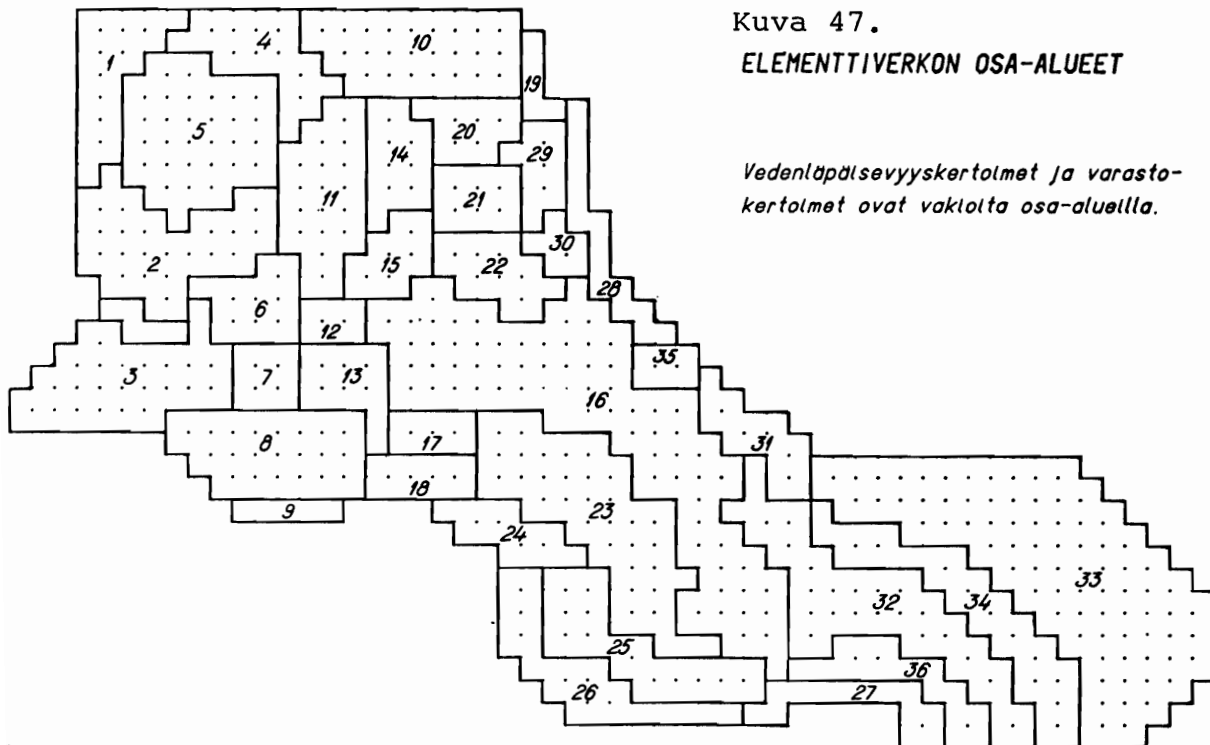
Kuva 44. Suuri elementtiverkko.

Kuhunkin 991 solmupisteeseen määritettiin geoteknillisen toimiston 1:500 mittakaavaan piirretyistä kallion pinnan ja saven alapinnan korkeuskäyristä pintojen väliin jäävän, alemman vettä hyvin läpäisevän kerroksen paksuus (kuva 45) ja keskipinnan korkeusasema (kuva 46).



Niissä solmupisteissä, joissa näin määritetty alempi vettä hyvin läpäisevä kerros nousi nollatason yläpuolelle, kerroksen paksuus määritettiin nollaksi. Joissakin solmupisteissä kerroksen paksuus jouduttiin arvioimaan ympäristön mukaan.

Elementtiverkko jaettiin 37 osa-alueeseen (kuva 47), joiden sisällä vettä johtavalla kerroksella oletetaan olevan yhtäsuuret keskimääräiset vedenläpäisevyysominaisuudet: k-arvo ja varastokerroin. Jako pyrittiin tekemään niin pieniin osiin, ettei osa-alueiden sisällä olisi vuodesta 1972 lähtien tehdyistä painetason havainnoista päätellen voimakkaita kerroksen keskimääräisten vedenläpäisevyysominaisuuksien muutoksia.



6.33 Reunaehtojen määrittäminen

Elementtiverkon reunoilla oleville solmupisteille on annettava kussakin laskelmassa etukäteen reunaehtona painekorkeus tai virtaama. Mallia rakennettaessa tavoitteena oli elementtiverkon ulottaminen niin pitkälle, etteivät normaalit pohjaveden pumppausmäärien muutokset olisi aiheuttaneet reuna-alueilla painetason muutoksia, jolloin reunoilla olisi voitu määrätä painekorkeus laskelmissa vakioiksi. Pohjavesiallas rajoittuu kuitenkin osittain kallioon ja muihin tässä yhteydessä tiiviiksi katsottuihin, pohjaveden painetason yläpuolelle kohoaviin muodostumiin, joilta osin verkkoa ei ole voitu ulottaa kauemmaksi. Tällaiset reunat muodostuvat laskelmissa ongelmallisiksi, koska reunalta on ainakin ajoittain saatavissa alempaan pohjavesikerrokseen tulevaa korvausvettä esimerkiksi kallion raoista tai orsivedestä. Kuitenkin nämä korvausvesimäärät ovat yleensä rajoitettuja. Jos reunalta tapahtuu hiljaista virtausta keskustaa kohti, reunan painekorkeus saattaa pysyä vakiona, mutta kun virtaus ylittää reuna-alueen korvausvesikapasiteetin, painekorkeus laskee. Täten mallin reuna-alueidenkin painekorkeudet riippuvat yleisestä pohjaveden kulutuksesta.

Kauppatorin rantaan rajoittuvalla reunalla ja pohjois-reunalla on asetettu laskelmiin vakio painekorkeus. Koillis - itäreuna on oletettu vettä läpäisemättömäksi. Muut reunat vaihtelevat jonkin verran eri laskelmissa. Mallissa oletetaan, ettei alempaan pohjaveteen tule orsivedestä täydennystä muualta kuin verkon reunoilta.

Mallissa voidaan soveltaa superpositioperiaatetta. Eri pumppausvirtaamien vaikutusta voidaan tutkia yksitellen laskelmissa, joissa painekorkeus määrätään nolllaksi niillä reunoilla, millä tapahtuu pohjaveden virtausta ja millä painetason oletetaan pysyvän vakiona.

Kokeilevien laskelmien perusteella saadut reunaehdot on esitetty kohdassa 6.34.

6.34 Mallin muokkaus ja virhetarkastelu

Laskentamalli pyrittiin muokkaamaan sellaiseksi, että se toteuttaisi 1.8.1976 havaitut alemman pohjaveden painekorkeudet virtaustilanteessa, jossa vuotovesivirtaamiksi on annettu vuotovesimittausten ja eräiden arviointien perusteella saadut laskenta-arvot. Lisäksi malliin reunoilta tulevien virtaamien jakauma pyrittiin saamaan järkeväksi.

Syvien kellaritilojen vuotovesivirtaamien laskenta-arvot (taulukko 11) jaettiin kellareiden seinien lähellä oleville solmupisteille reuna-arvoiksi. Kaivotalon eteläreunalle asetettiin kuitenkin kahteen solmupisteeseen yhteensä virtaama $3,6 \text{ m}^3/\text{d}$ ja kolmeen solmupisteeseen painekorkeus - 1,3 m (NN), koska Kaivotalon salaojitus pitää havaintojen mukaan pohjaveden pinnan tämän tason alapuolella. Kellaritilojen sisällä olevien elementtien vedenläpäisevyysarvot asetettiin mitättömän pieniksi, jottei kellareiden läpi tapahtuisi mallissa virtausta.

Taulukko 11. Kellaritilojen vuotovesivirtaamien vuoden 1976 jälkipuoliskon keskiarvo, suurin ja pienin arvo sekä laskenta-arvo.

Kellaritila	Keski- arvo	Suurin arvo	Pienin arvo	Laskenta- arvo
	m^3/d	m^3/d	m^3/d	m^3/d
City-Center	15,5	22,7	8,1	13,70
Heimola	1,5	4,2	1,1	1,44
HOP (Keskusk.7)	6,0	6,2	5,8	6,04
Vanha metro- varaus	8,4	12,2	6,0	9,36
Yhteensä	38,5			30,54

Yliopiston hallintorakennuksen syvään rakennuskuoppaan (Hallituskatu 8) vuotaneelle pohjavedelle on annettu laskenta-arvo $4 \text{ m}^3/\text{d}$.

Mallin luoteiskulmassa on viidelle solmupisteelle annettu painekorkeus - 2,1 m, millä pyritään ottamaan huomioon eduskuntatalon väestösuojan postitalon puoleisen sisäänkäynnin rakennustyömaan pohjavettä alentanut vaikutus.

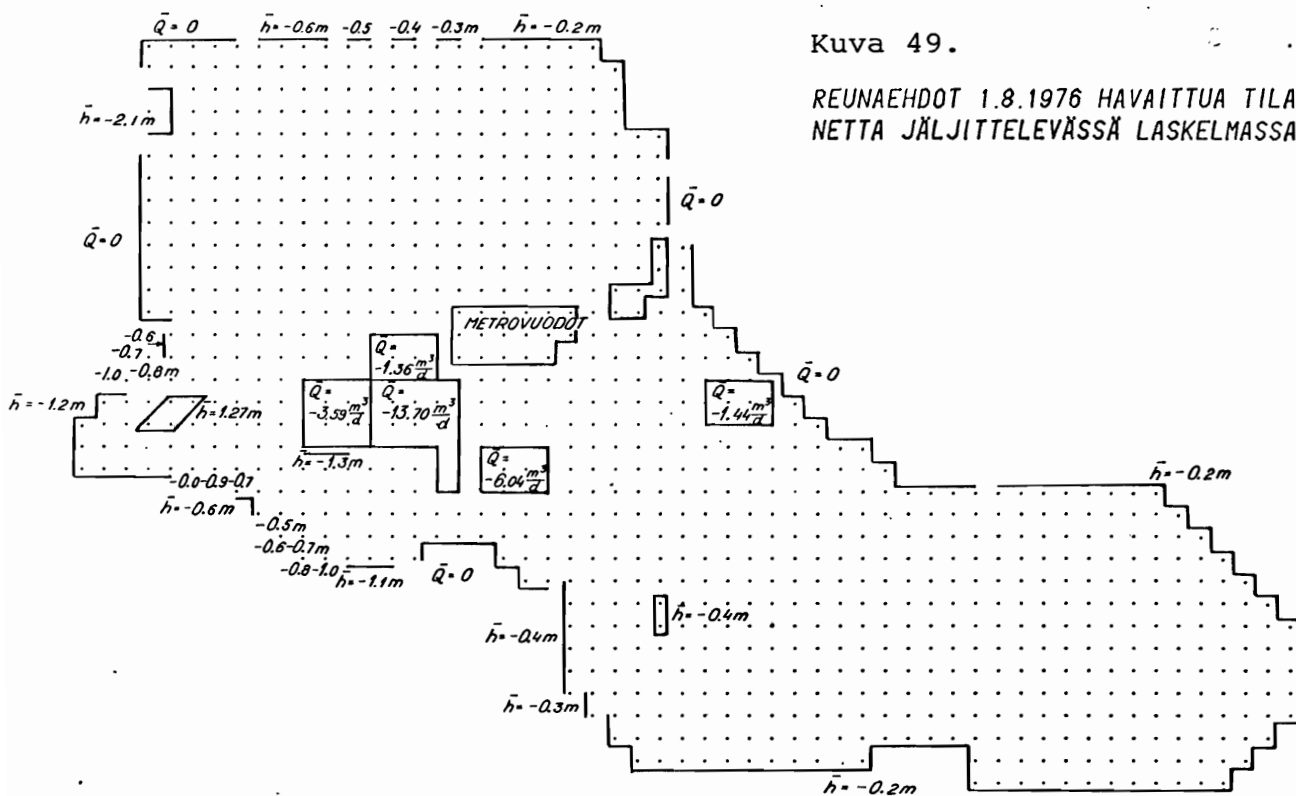
Metrotunneleihin rautatieaseman pääsisäänkäynnin edessä olevan Kaivokadun metroaseman itäreunan ja Kluuvin ruheen itäreunan väliseen osaan on mitattu virtaavan pohjavettä $30...49 \text{ m}^3/\text{d}$. Tältä vaihteluväliltä valittiin laskenta-arvot $33,8 \text{ m}^3/\text{d}$ ja $42,6 \text{ m}^3/\text{d}$.

Kaivokadun metroaseman itäreunan länsipuolella oleviin metron tiloihin vuotavia pohjavesimääriä ei ole otettu mallissa huomioon. Alemmalla pohjavesikerroksella on näillä alueilla hyvä hydraulinen yhteys orsivesikerrokseen, ja metroaseman ympäristöön johtaa lännestä vettä hyvin läpäisevä hiekkakerros, minkä vuoksi Kaivokadun metroaseman vuodot eivät ole aiheuttaneet selvästi havaittavaa alemman pohjavesikerroksen painetason laskua mallin keskeisissä osissa. Mallin länsireunan läheisyydessä asetettiin neljään solmupisteeseen havaintopisteen 125 viereen tosin vakio painekorkeus kuvaamaan metrovuotojen vaikutusta, mutta koska laskelmassa näin syntyvä vuotovesi virtaa suoraan läheiseltä elementtiverkon reunalta, tuloksella ei ole merkitystä vuotovesilaskelmissa.

Korttelissa 34 annettiin kahdelle solmupisteelle reunaehtona havaintotulosten perusteella painekorkeus. Tällä pyritään kuvaamaan korttelissa tapahtuvaa orsiveden syöttöä, joka nostaa myös alemman pohjaveden painetasoa.

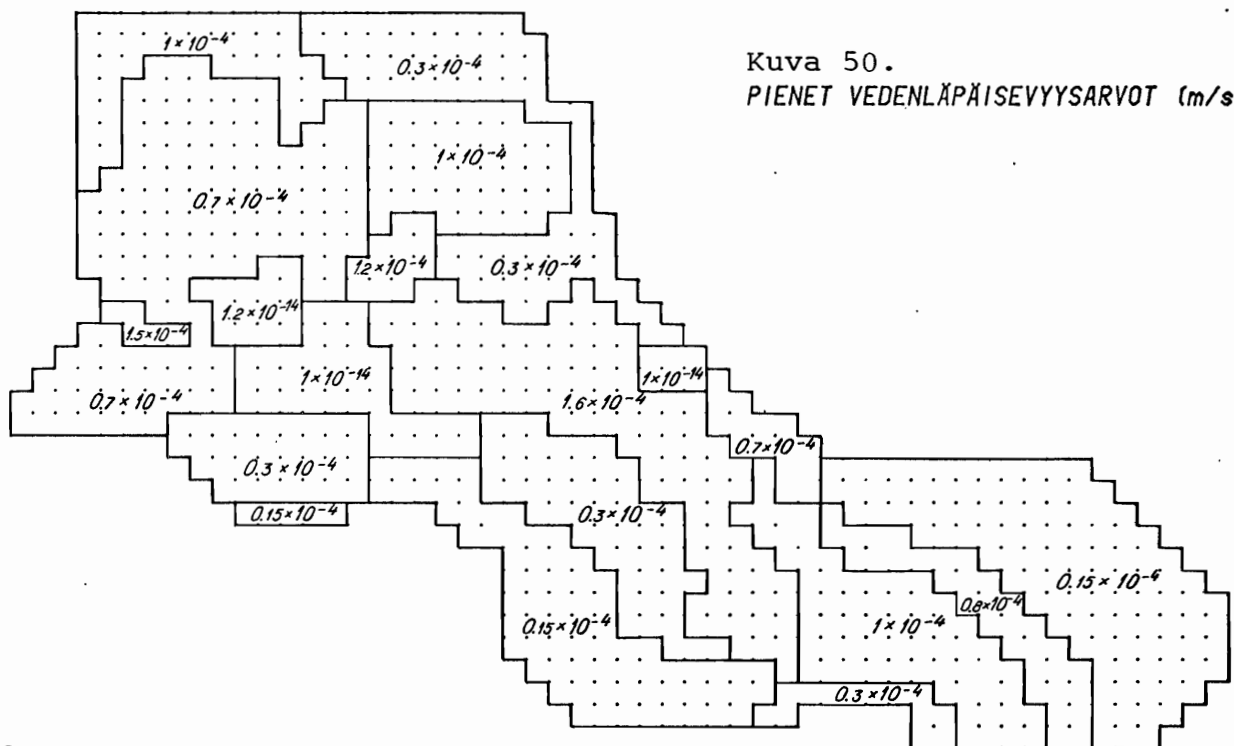
Lukuisien kokeilevien, stationaaristen laskelmien jälkeen edellä kuvattujen laskenta-arvojen muodostamalle virtaustilanteelle saatiin sopivat reunaehdot (kuva 49)

ja vedenläpäisevyysarvot (kuvat 50 ja 51). Vedenläpäisevyysarvot on pyritty muokkaamaan sellaisiksi, että laskelman antamat painekorkeudet olisivat yhtäsuuret kuin havaitut alemman pohjavesikerroksen painekorkeudet. Koska metrolle valittiin kaksi vuotovesivirtaaman laskenta-arvoa, vedenläpäisevyyskertoimia saatiin myös kaksi yhdistelmää: pienet ja suuret vedenläpäisevyysarvot.

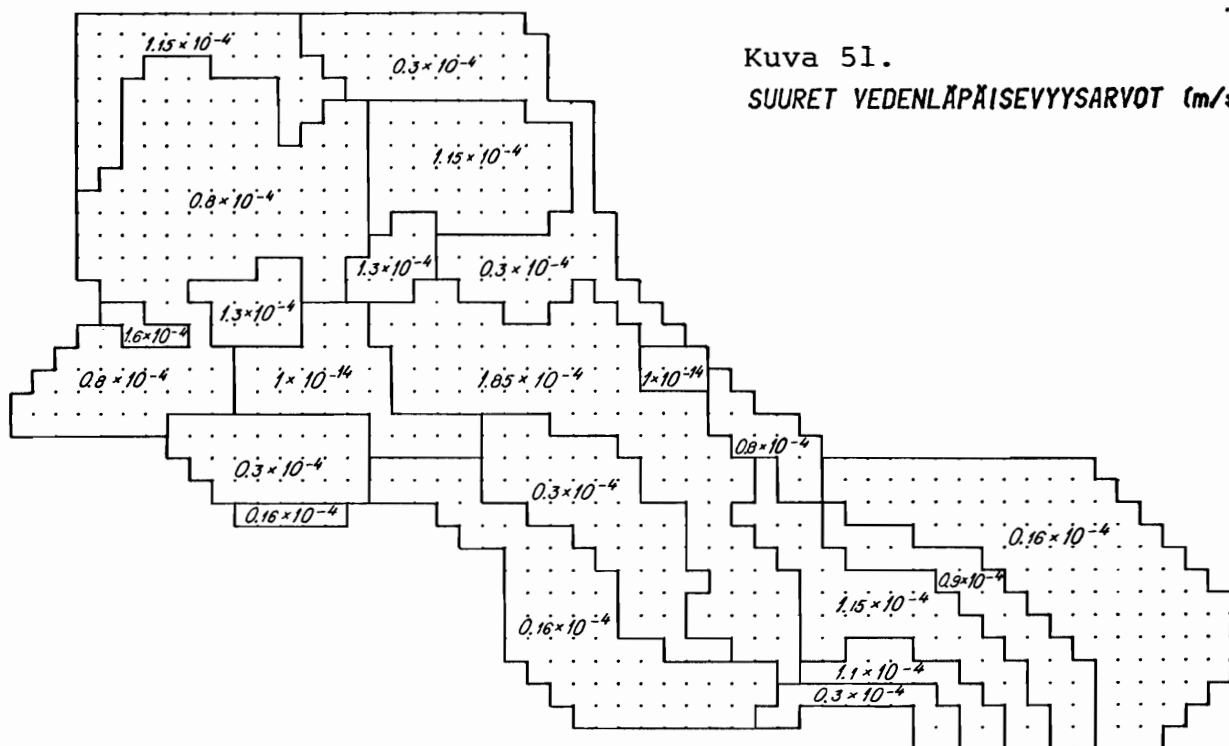


Kuva 49.

REUNAEDOT 1.8.1976 HAVAITTUA TILAN-
NETTA JÄLJITTELEVÄSSÄ LASKELMASSA

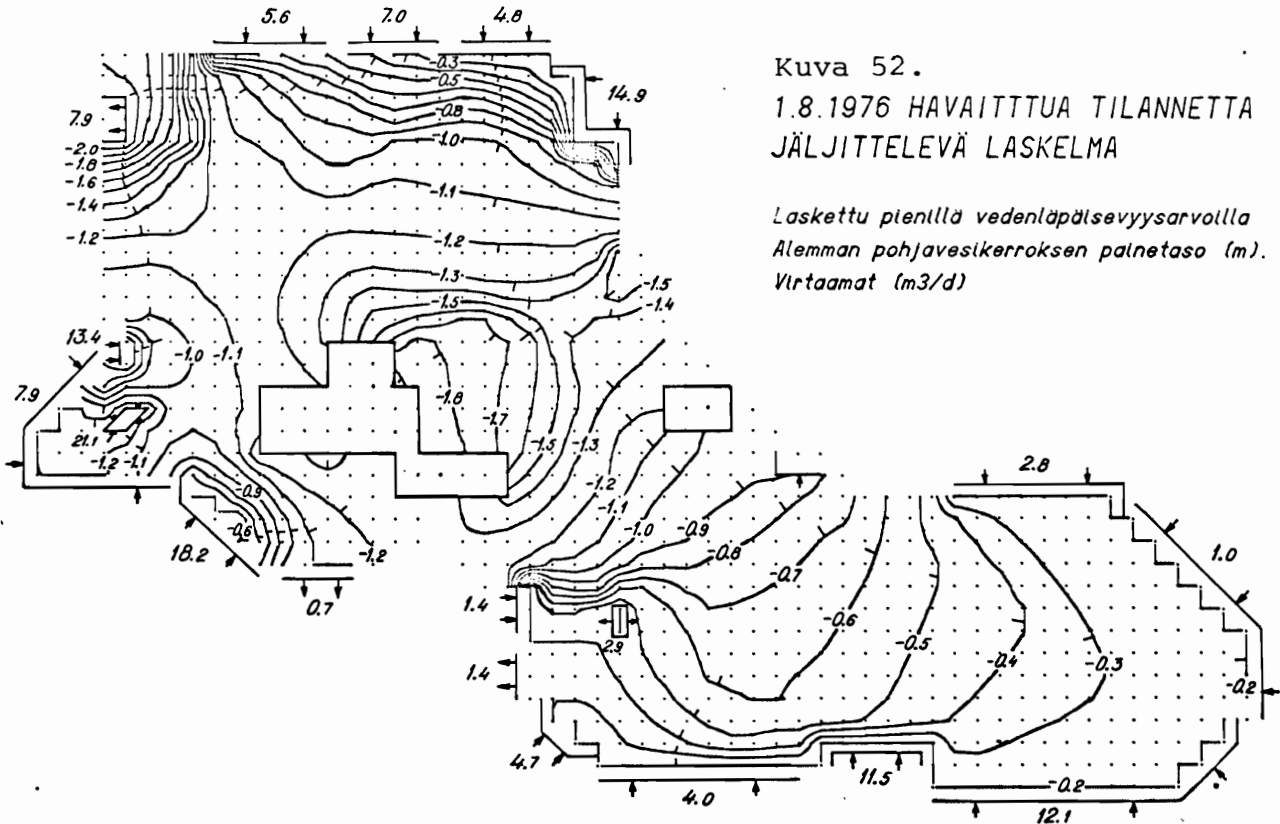


Kuva 50.
PIENET VEDENLÄPÄISEVYYSSARVOT (m/s)



Kuva 51.
SUURET VEDENLÄPÄISEVYYSSARVOT (m/s)

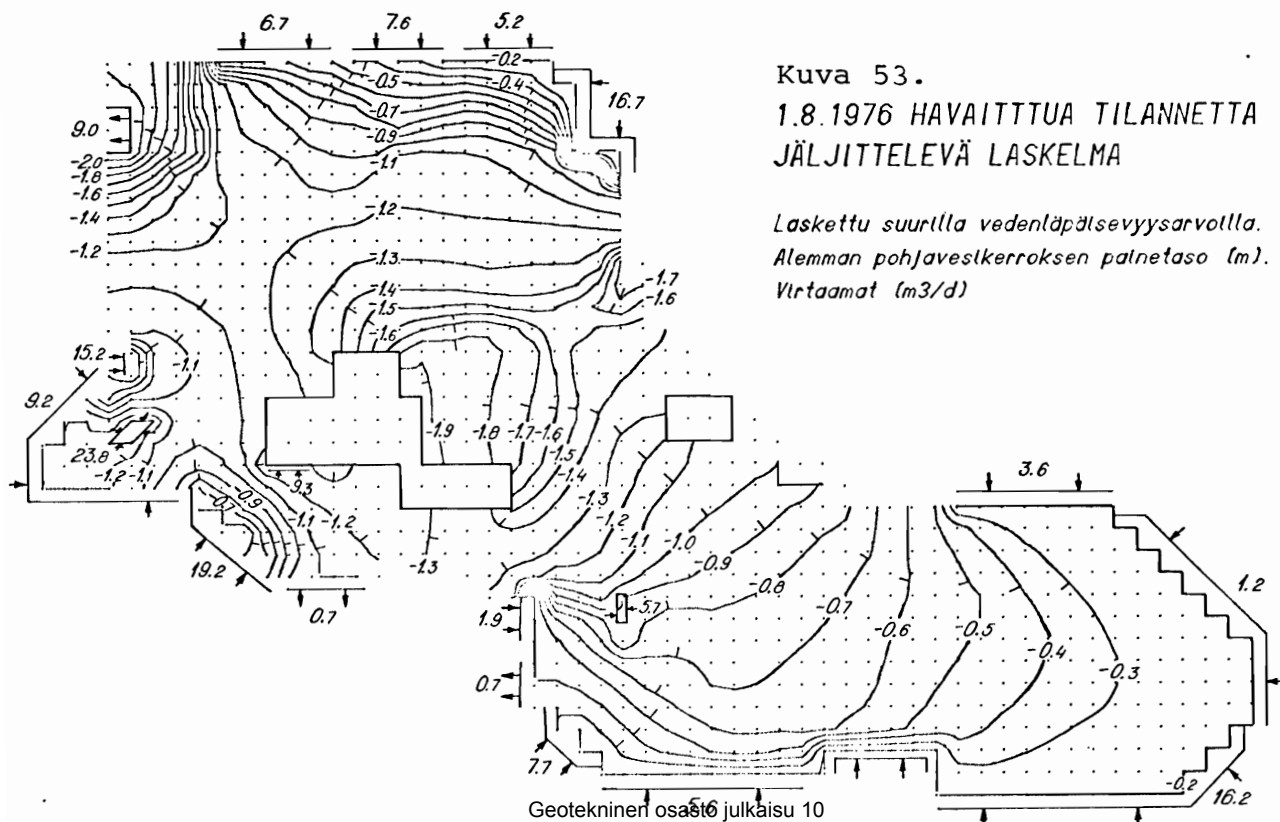
Kuvissa 52 ja 53 on esitetty laskelmien graafiset tulokset.



Kuva 52.

1.8.1976 HAVAITTUA TILANNETTA
JÄLJITTELEVÄ LASKELMA

Laskettu pienillä vedenläpäisevyyssarvoilla
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d)



Kuva 53.

1.8.1976 HAVAITTUA TILANNETTA
JÄLJITTELEVÄ LASKELMA

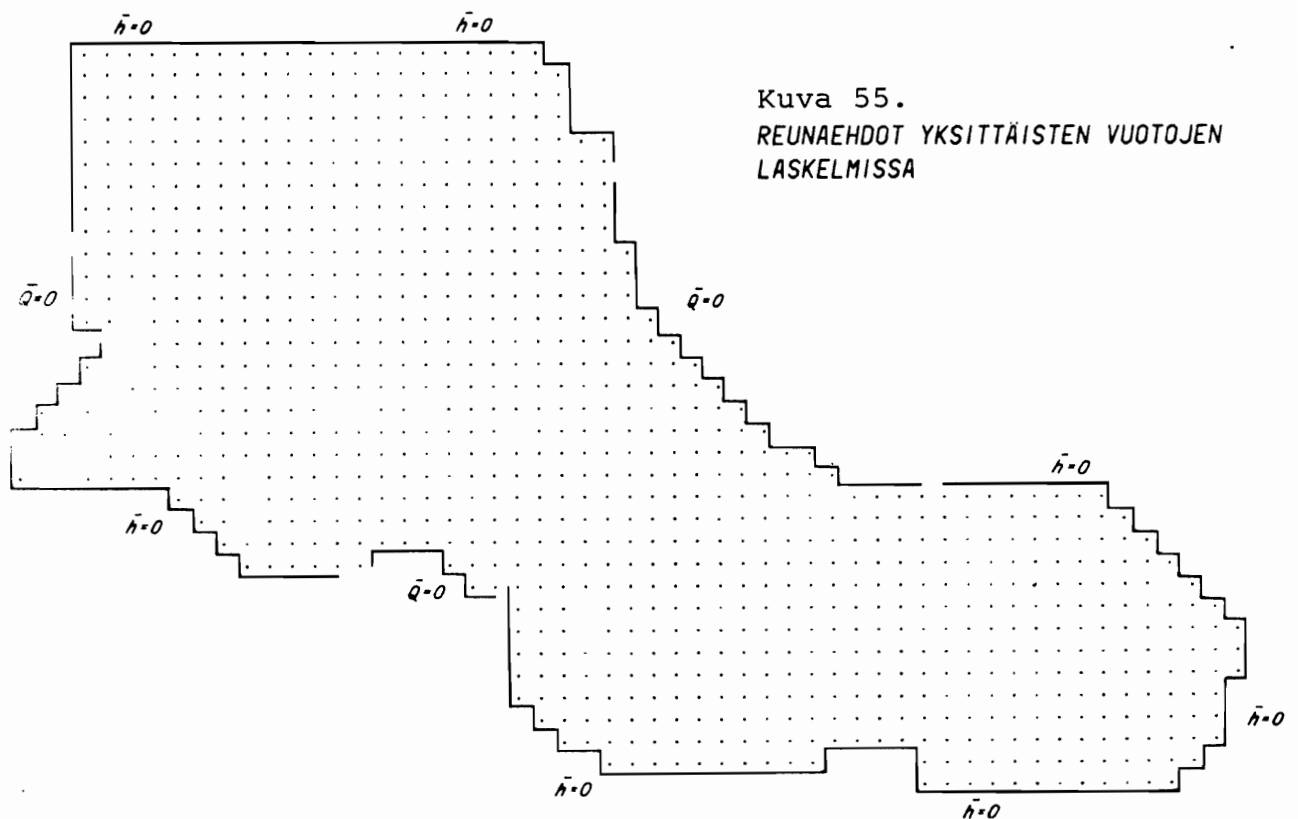
Laskettu suurilla vedenläpäisevyyssarvoilla.
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d)

Taulukko 12. Alemman pohjavesikerroksen painetason havainnot 1.8.1976, kahden tilannetta jäljittävän laskelman tulokset sekä laskentatulosten ja havaintojen erotukset.

Havainto-putki	Havainto	Laskettu pienillä k - arvoilla		Laskettu suurilla k - arvoilla	
		Laskettu arvo	Erotus	Laskettu arvo	Erotus
	m (NN)	m (NN)	m	m (NN)	m
106	- 0,94	- 0,976	- 0,036	- 1,055	- 0,115
108	- 1,10	- 1,460	- 0,360	- 1,582	- 0,482
109	- 1,45	- 1,402	+ 0,048	- 1,482	- 0,035
110	- 1,22	- 1,059	+ 0,161	- 1,160	- 0,060
111	- 0,39	- 0,426	- 0,036	- 0,617	- 0,227
112	- 0,40	- 0,325	+ 0,075	- 0,372	+ 0,028
113	- 0,96	- 0,988	- 0,028	- 1,070	- 0,110
114	- 1,02	- 0,868	+ 0,152	- 0,949	+ 0,071
115	- 0,85	- 0,706	+ 0,144	- 0,781	+ 0,069
116	- 1,03	- 1,106	- 0,076	- 1,176	- 0,146
117	- 1,32	- 1,287	+ 0,033	- 1,350	- 0,030
118	- 1,92	- 1,805	+ 0,115	- 1,865	+ 0,055
119	- 1,20	- 1,290	- 0,090	- 1,338	- 0,138
123	- 1,33	- 1,066	+ 0,264	- 1,081	+ 0,249
124	- 0,68	- 1,017	- 0,337	- 1,028	- 0,348
125	- 1,27	- 1,244	+ 0,026	- 1,244	+ 0,026
128	- 1,35	- 1,190	+ 0,160	- 1,216	+ 0,134
129	- 1,35	- 1,516	- 0,166	- 1,579	- 0,229
130	- 0,98	- 1,128	- 0,148	- 1,149	- 0,169
131	- 0,90	- 1,342	- 0,442	- 1,426	- 0,526
134	- 1,63	- 1,758	- 0,128	- 1,831	- 0,201
135	- 1,16	- 1,226	- 0,066	- 1,298	- 0,138
136	- 1,07	- 1,361	- 0,291	- 1,450	- 0,380
137	- 1,04	- 1,209	- 0,169	- 1,549	- 0,509
141	- 1,31	- 1,291	+ 0,019	- 1,292	+ 0,018
143	- 1,50	- 1,275	+ 0,225	- 1,292	+ 0,208
145	- 1,29	- 1,113	+ 0,177	- 1,126	+ 0,164
146	- 0,68	- 1,023	- 0,343	- 1,024	- 0,344
148	- 0,70	- 0,560	+ 0,140	- 0,631	+ 0,069
149	- 0,82	- 0,596	+ 0,224	- 0,665	+ 0,155
150	- 0,90	- 0,684	+ 0,216	- 0,767	+ 0,133
151	- 1,41	- 1,274	+ 0,136	- 1,352	+ 0,058
155	- 1,22	- 1,626	- 0,406	- 1,714	- 0,494
164	- 1,12	- 1,514	- 0,394	- 1,568	- 0,448
Keskiarvo			- 0,04		- 0,11
Keskihajonta			0,21		0,22

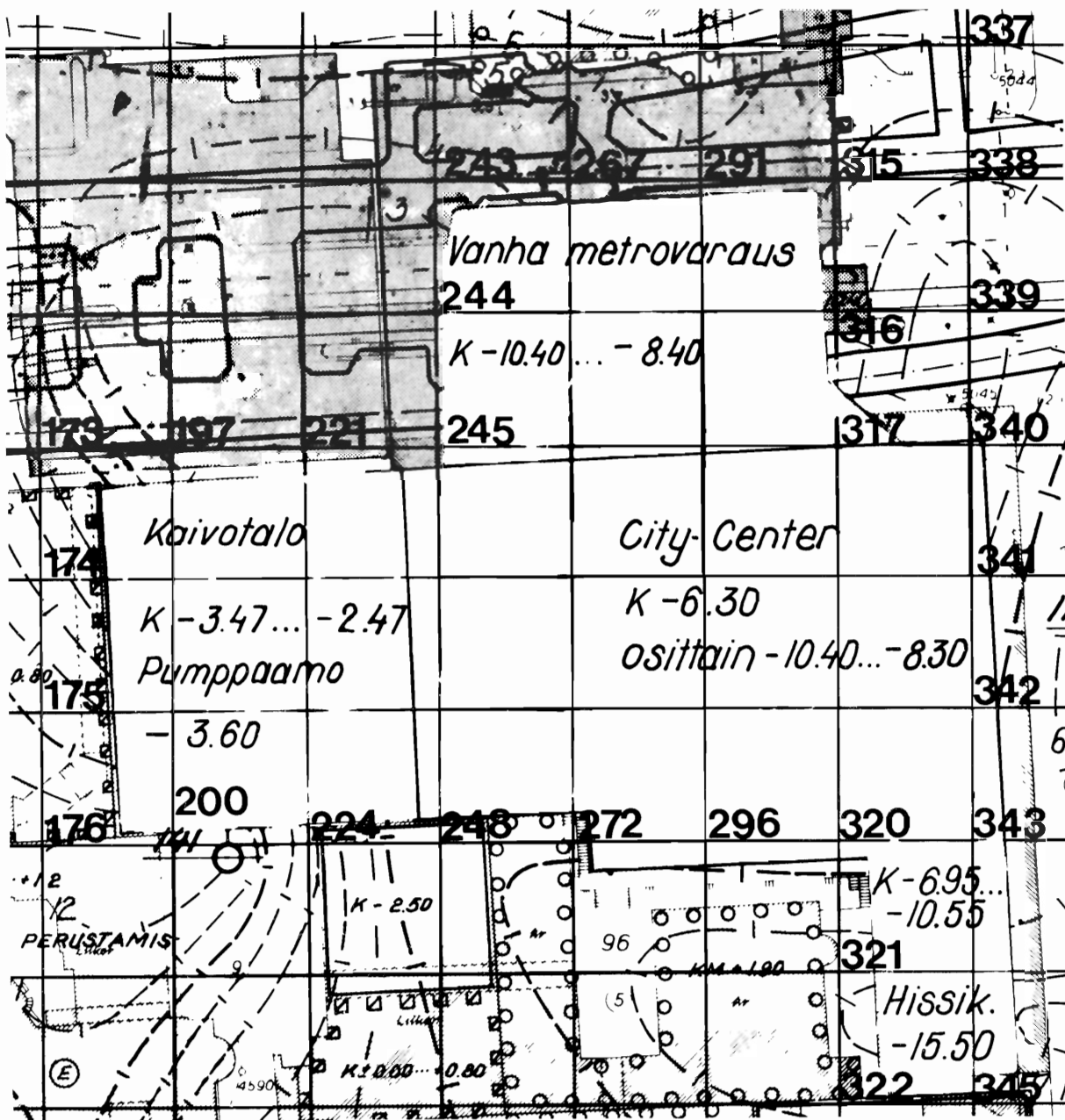
6.35 Kellaritilojen vuotojen vaikutus alemman pohjavesikerroksen painetasoon

Laskentatilanteen vuotovesivirtaamien valinta on esitetty kohdassa 6.34. Tässä kohdassa esitetään kunkin kellaritilan pohjavettä alentava vaikutus 1.8.1976 havaittua tilannetta jäljittelevässä laskelmassa. Kunkin vuodon laskemiseen käytetyt reunaehdot on esitetty kuvassa 55. Laskelmat on tehty suurilla vedenläpäisevyysarvoilla.



Koska malli on lineaarinen, esitettyjen yksittäisten vuotokohteiden laskelmista saadaan helposti jakaumaltaan samanlaisen, erisuuren vuodon vaikutuksen laskelma, jos reunaehdot pysyvät vakiona. Laskelman tuloksena saatujen painekäyrien ja virtaamien arvot on vain kerrottava halutun vuotovesivirtaaman ja laskelmissa käytetyn virtaaman suhteella.

Kuvassa 56 ja taulukoissa 13 ja 14 on esitetty vanhan metrovarauksen sekä City-Centerin, kuvassa 57 ja taulukossa 15 Keskuskatu 7:n sekä kuvassa 58 ja taulukoissa 16 ja 17 Heimolan talon sekä yliopiston hallintorakennuksen vuotojen laskenta-arvojen jakautuminen solmupisteisiin. Vuotojen vaikutuksen laskelmat on esitetty kuvissa 59, 60, 61, 62 ja 63. Kaivotalon vuodot vaihtelevat eri laskelmissa, koska Kaivotalon vuodoille ei ole annettu laskenta-arvoa vaan vuotojen vaikutus on käsitelty antamalla painekorkeus (kuva 56 ja taulukko 18).



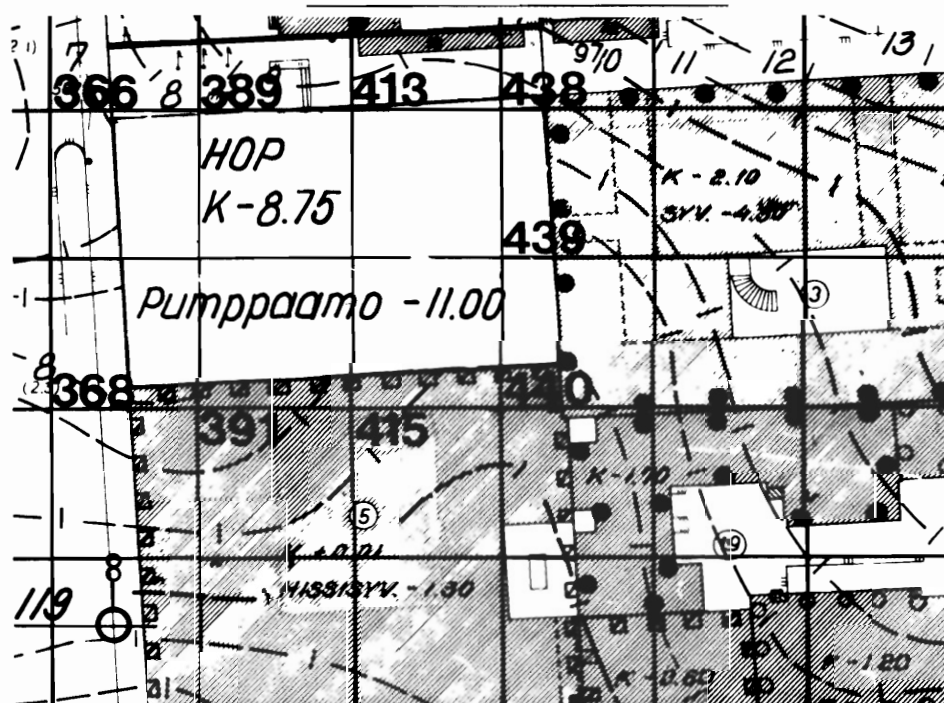
Kuva 56. Elementtiverkon solmupisteet, joihin on asetettu vanhan metrovarauksen, City-Centerin ja Kaivotalon vuodot.

Taulukko 13. City-Centerin vuotojen jakautuminen solmupisteisiin.

Solmupiste	Virtaama $\bar{Q}$ m^3/d
340	2,68
341	3,22
342	3,98
343	3,82
Yhteensä	13,70

Taulukko 14. Vanhan metrovarauksen vuotojen jakautuminen solmupisteisiin.

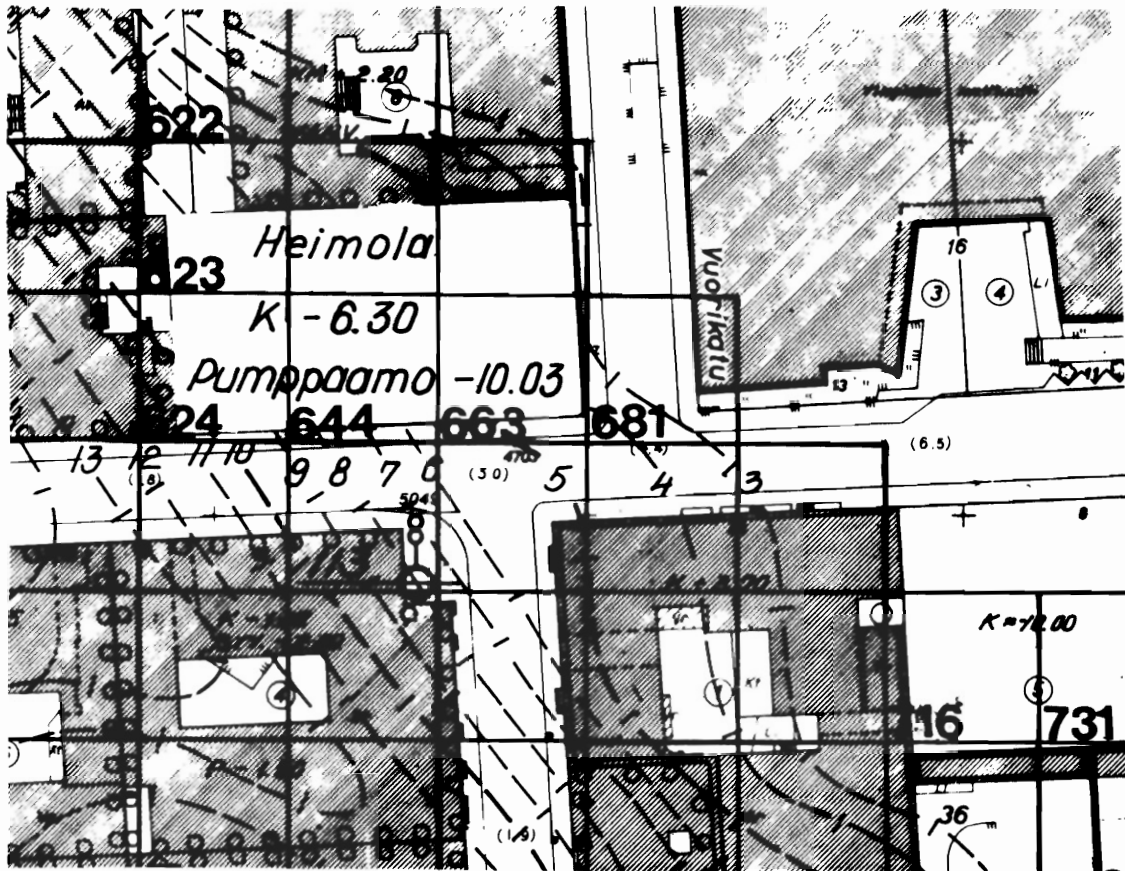
Solmupiste	Virtaama $\bar{Q}$ m^3/d
291	1,68
315	0,72
316	2,61
317	4,35
Yhteensä	9,36



Kuva 57. Elementtiverkon solmupisteet, joihin on asetettu HOP:n talon (Keskuskatu 7) vuodot.

Taulukko 15. HOP:n talon (Keskuskatu 7) vuotojen jakautuminen solmupisteisiin.

Solmupiste	Virtaama $\bar{Q}$ m^3/d
389	1,23
413	1,47
438	0,94
439	1,17
440	1,23
<u>Yhteensä</u>	<u>6,04</u>



Kuva 58. Elementtiverkon solmupisteet, joihin on asetettu Heimolan talon ja yliopiston hallintorakennuksen vuodot.

Taulukko 16. Heimolan talon vuotojen jakautuminen solmupisteisiin.

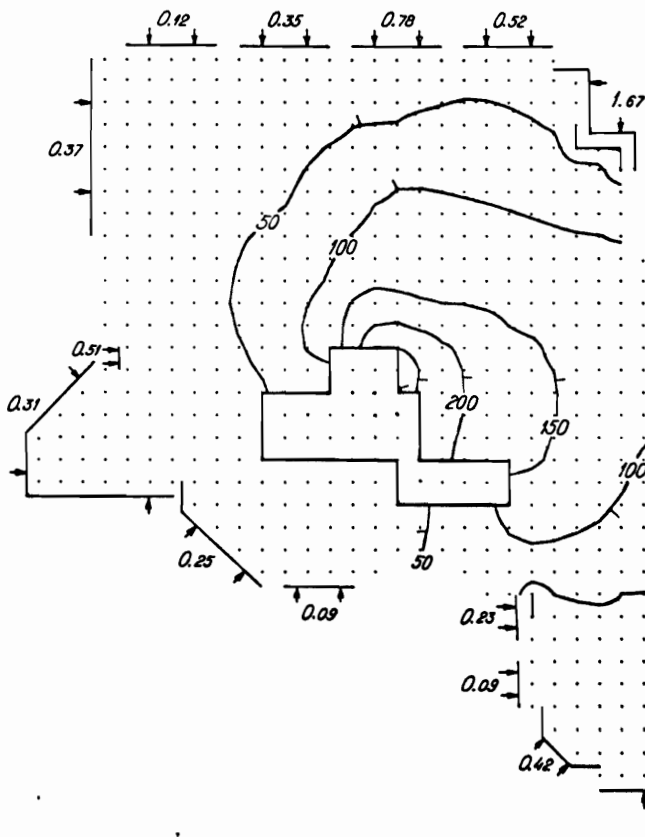
Solmupiste	Virtaama $\bar{Q}$ m^3/d
623	0,28
624	0,33
644	0,39
663	0,44
Yhteensä	1,44

Taulukko 17. Yliopiston hallintorakennuksen vuotojen jakautuminen solmupisteisiin.

Solmupiste	Virtaama $\bar{Q}$ m^3/d
716	2,00
731	2,00
Yhteensä	4,00

Taulukko 18. Kaivotalon vuotojen jäljittely laskennoissa.

Solmupiste	Reunaehto
175	$\bar{Q} = 1,10 \text{ m}^3/\text{s}$
248	$\bar{Q} = 2,49 \text{ m}^3/\text{s}$
176	$\bar{h} = -1,6 \text{ m}$
200	$\bar{h} = -1,6 \text{ m}$
224	$\bar{h} = -1,6 \text{ m}$



Kuva 59.

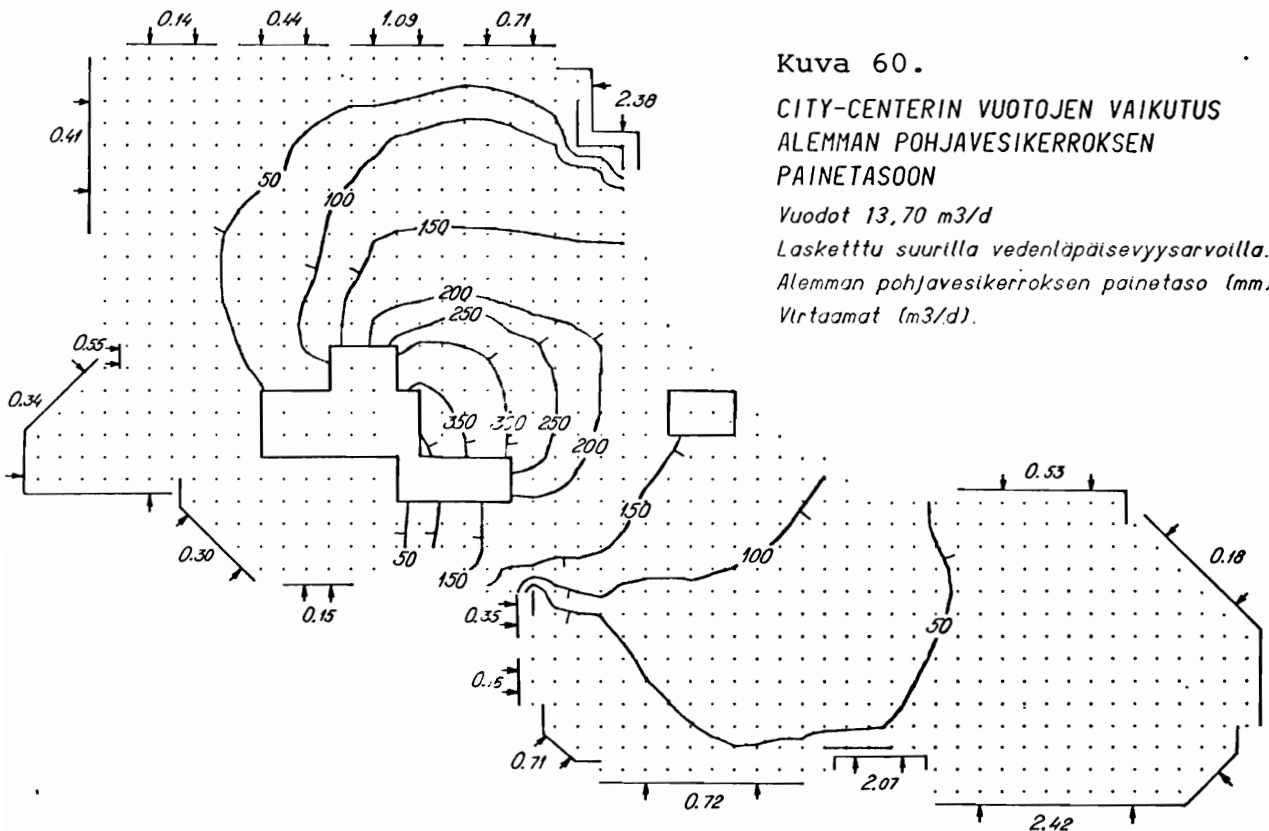
VANHAN METROVARAUKSEN VUOTOJEN
VAIKUTUS ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETASOON

Vuodot 9,36 m³/d.

Laskettu suurilla vedenläpäisevyyksarvoilla.

Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm)

Virtaamat (m³/d).



Kuva 60.

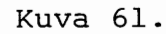
CITY-CENTERIN VUOTOJEN VAIKUTUS
ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETASOON

Vuodot 13,70 m³/d

Laskettu suurilla vedenläpäisevyyksarvoilla.

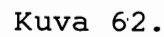
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm).

Virtaamat (m³/d).



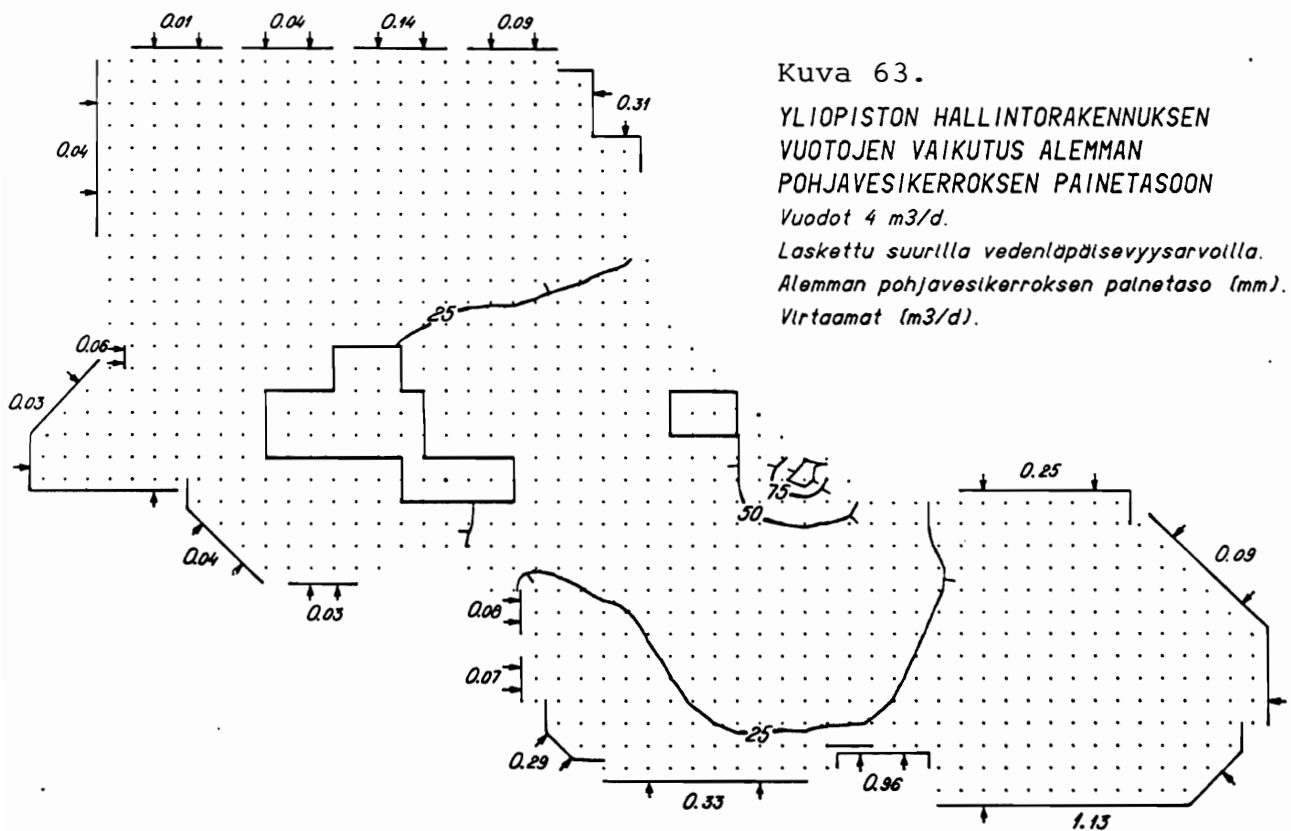
Vuodot 6.04 m³/d.

Laskettu suurilla vedenläpäisevyyksiarvoilla
 Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm).
 Virtaamat (m³/d).



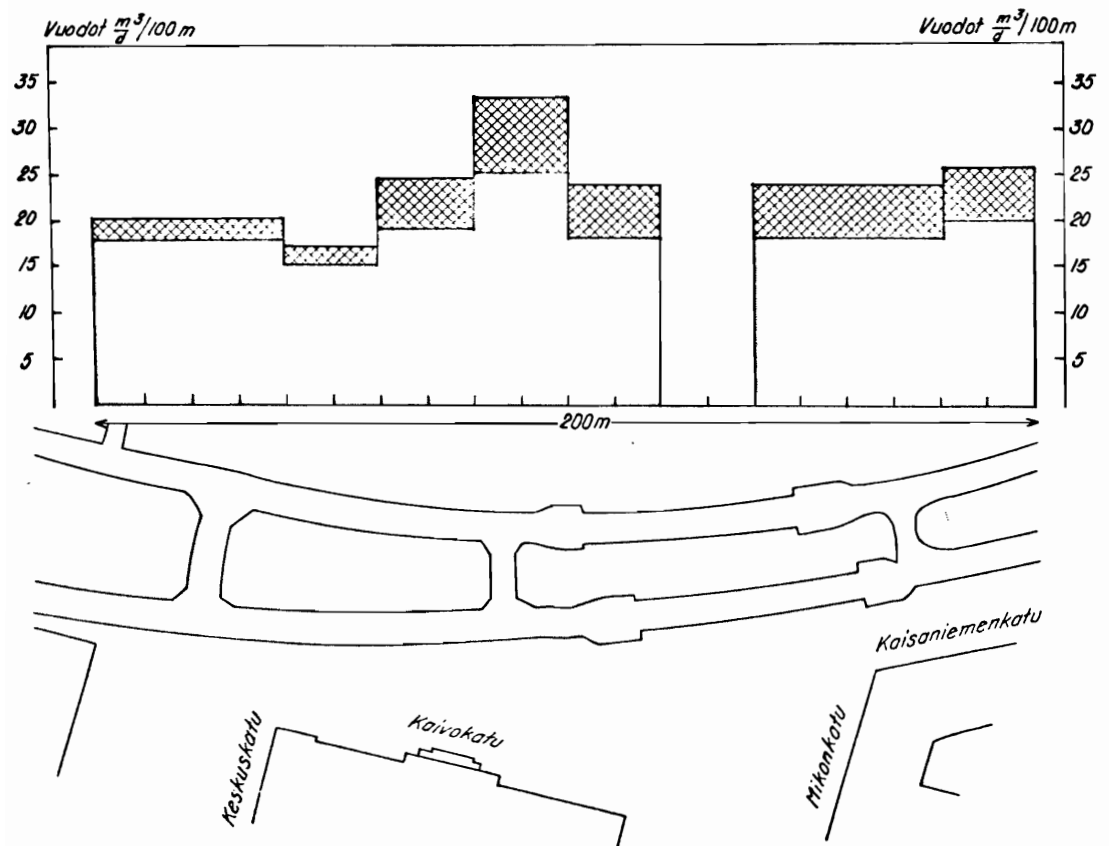
Vuodot 1,44 m³/d.

Laskettu suurilla vedenläpäisevyysarvoilla
 Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm).
 Virtaamat (m³/d)



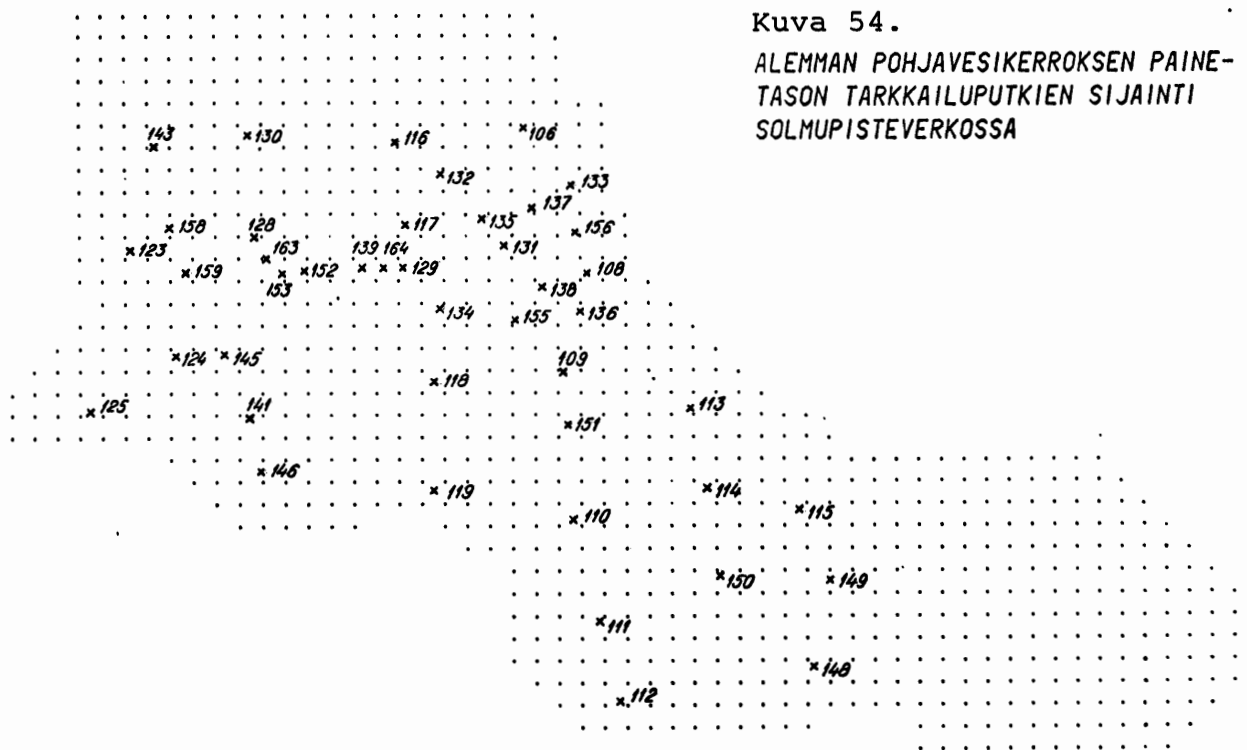
6.36 Metron vuotojen vaikutus alemman pohjavesikerroksen painetasoon

Laskennoissa käytettyjen metrovuotojen laskenta-arvojen jakautuminen metrolinjalle on esitetty kuvassa 64 ja jakautuminen solmupisteisiin taulukossa 19 sekä kyseiset solmupisteet kuvassa 65. Vuotovesivirtaamien pienempien laskenta-arvojen vaikutus alemman pohjavesikerroksen painetasoon pienillä vedenläpäisevyysarvoilla laskettuna on esitetty kuvassa 66 ja suurempien laskenta-arvojen vaikutus suurilla vedenläpäisevyysarvoilla laskettuna kuvassa 67.



Kuva 64. Metrovuotojen laskenta-arvojen jakautuminen metrolinjalle.

Kuvissa on esitetty laskennalla saadut alemman pohjavesikerroksen painetason tasa-arvokäyrät (NN) ja virtaamat mallin reunoilla. Taulukossa 12 on esitetty 1.8.1976 saadut havaintotulokset, laskentatulokset ja näiden erotukset. Havaintotulosten ja laskentatulosten erotuksille saatiin pienillä vedenläpäisevyysarvoilla keskiarvoksi - 0,04 m, keskihajonnaksi 0,21 m ja suurilla vedenläpäisevyysarvoilla keskiarvoksi - 0,11 m sekä keskihajonnaksi 0,22 m. Kuvassa 54 on esitetty havaintopisteiden paikat solmupisteverkossa.



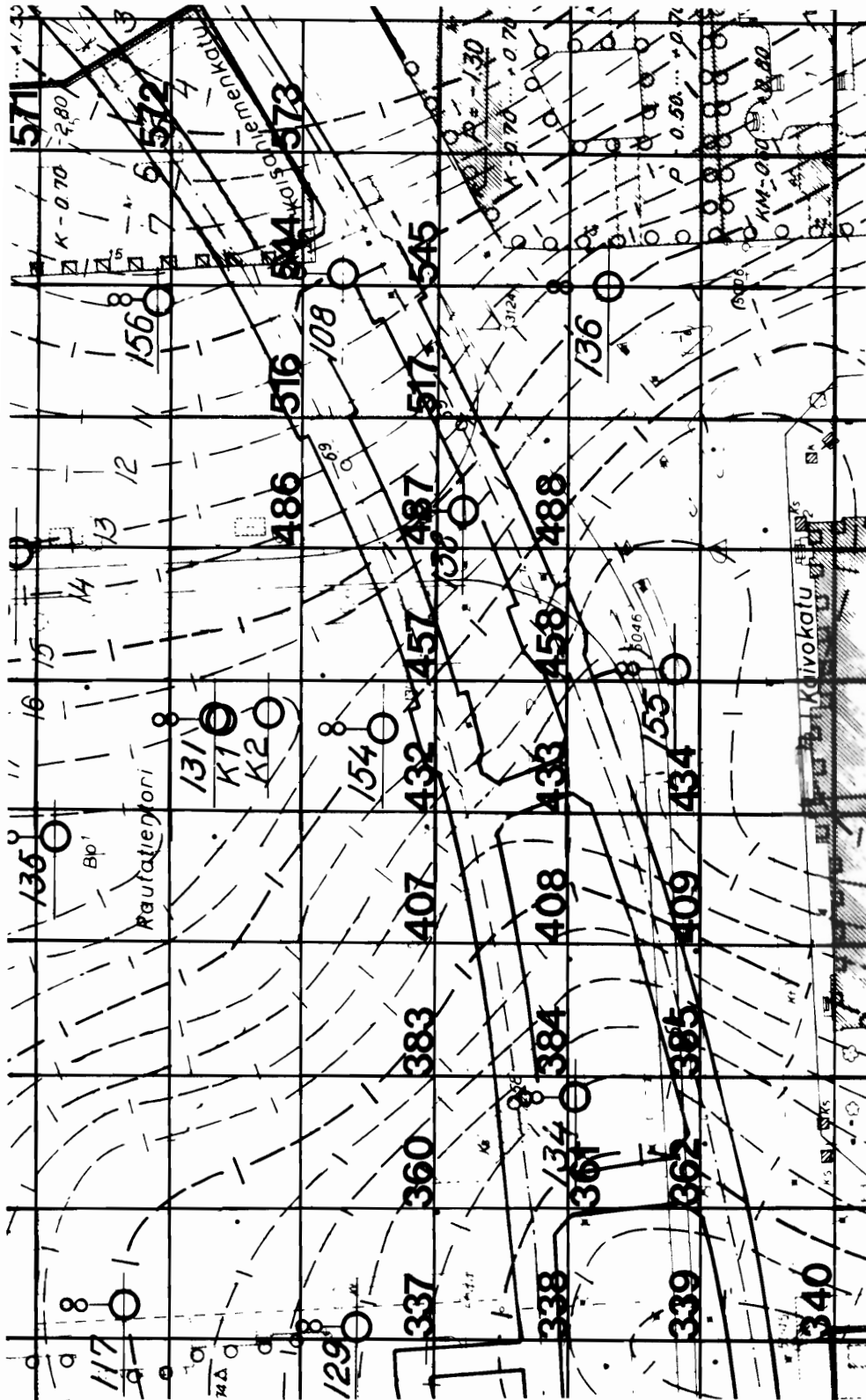
Kuva 54.

ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN PAINETASON TARKKAILUPUTKIEK SIJAINI
SOLMUPISTEVERKOSSA

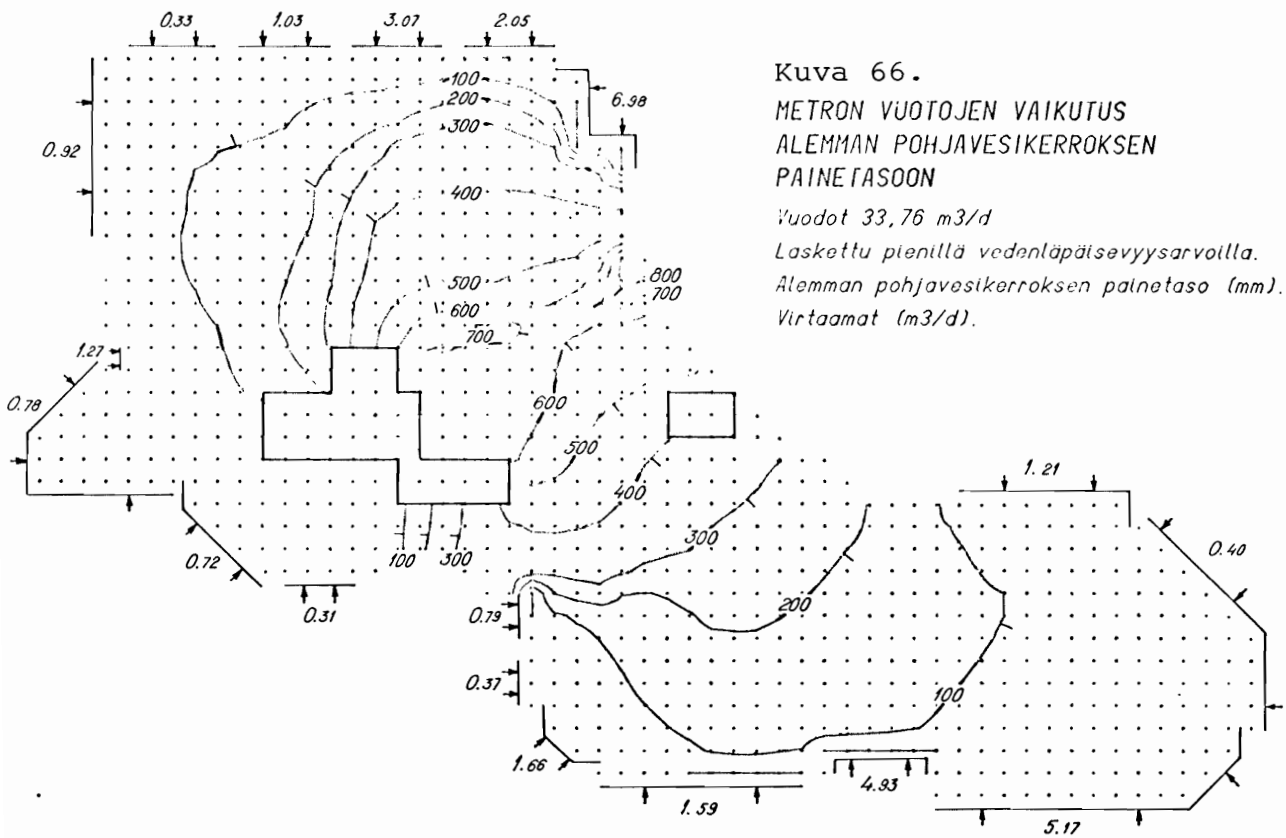
Vedenläpäisevyysarvoja ja reunaehdoja kokeiltaessa seurattiin myös pohjaveden alennustilanteen stationaarisen laskelman kehittymistä alkuarvojen muuttuessa. Lopullisen laskelman tulokset on esitetty kohdassa 7.32.

Taulukko 19. Metron vuotojen laskenta-arvojen jakautuminen solmupisteisiin.

Solmupiste	Pienet laskenta- arvot	Suuret laskenta- arvot
	m ³ /d	m ³ /d
337	1,36	1,52
338	1,36	1,52
339	0,84	0,96
360	1,36	1,52
361	1,36	1,52
362	0,84	0,96
383	1,36	1,52
384	0,84	0,96
385	0,84	0,96
407	1,36	1,52
408	1,20	1,68
409	1,20	1,68
432	2,16	2,88
433	1,44	1,92
434	1,44	1,92
457	2,16	2,88
458	1,44	1,92
486	0	0
487	0	0
488	0	0
516	2,16	2,88
517	1,44	1,92
544	2,16	2,88
545	1,44	1,92
571	1,28	1,60
572	1,28	1,60
573	1,44	1,92
Yhteensä	33,76	Yhteensä 42,56



Kuva 65. Elementtiverkon solmupisteet, joihin on asetettu metron vuodot.



Kuva 66.

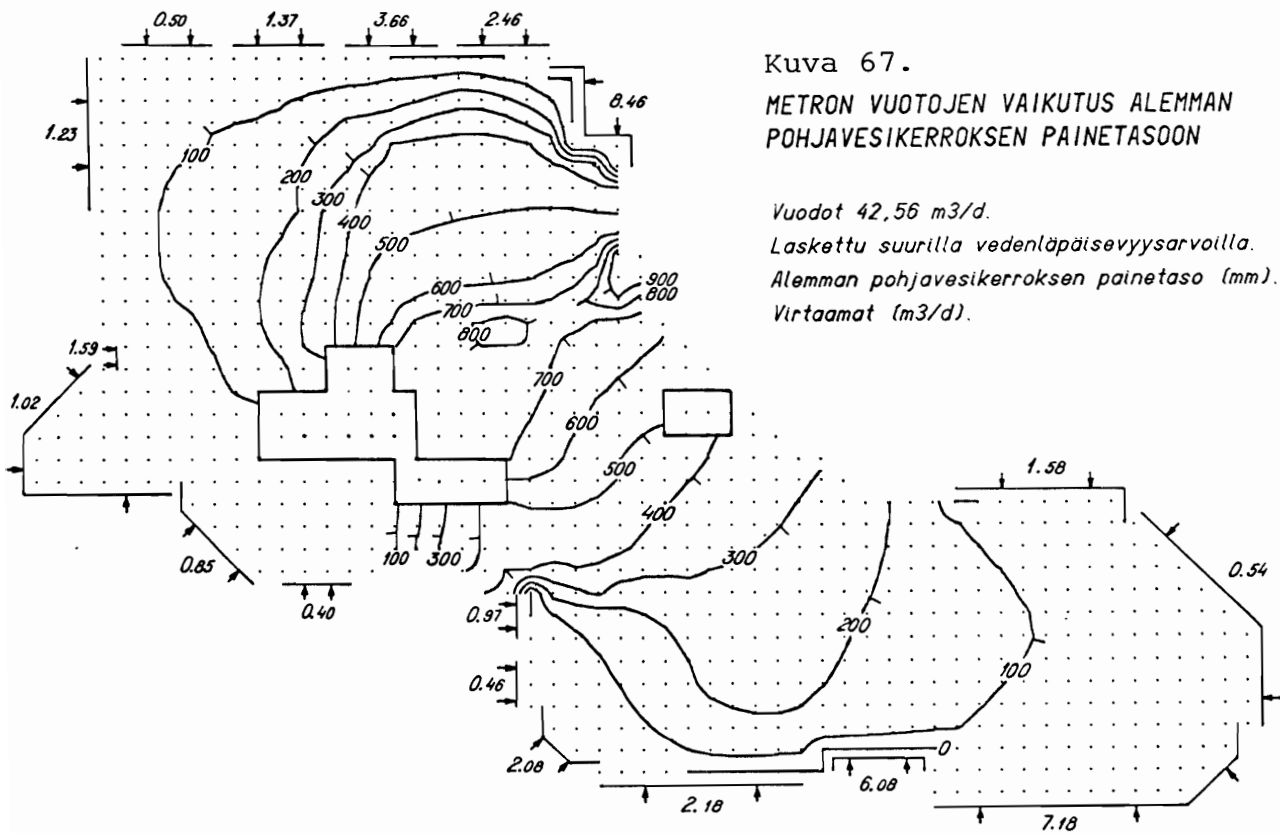
**METRON VUOTOJEN VAIKUTUS
ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETASOON**

Vuodot 33,76 m³/d

Laskettu pienillä vedenläpäisevyysarvoilla.

Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm).

Virtaamat (m³/d).



Kuva 67.

**METRON VUOTOJEN VAIKUTUS ALEMMAN
POHJAVESIKERROKSEN PAINETASOON**

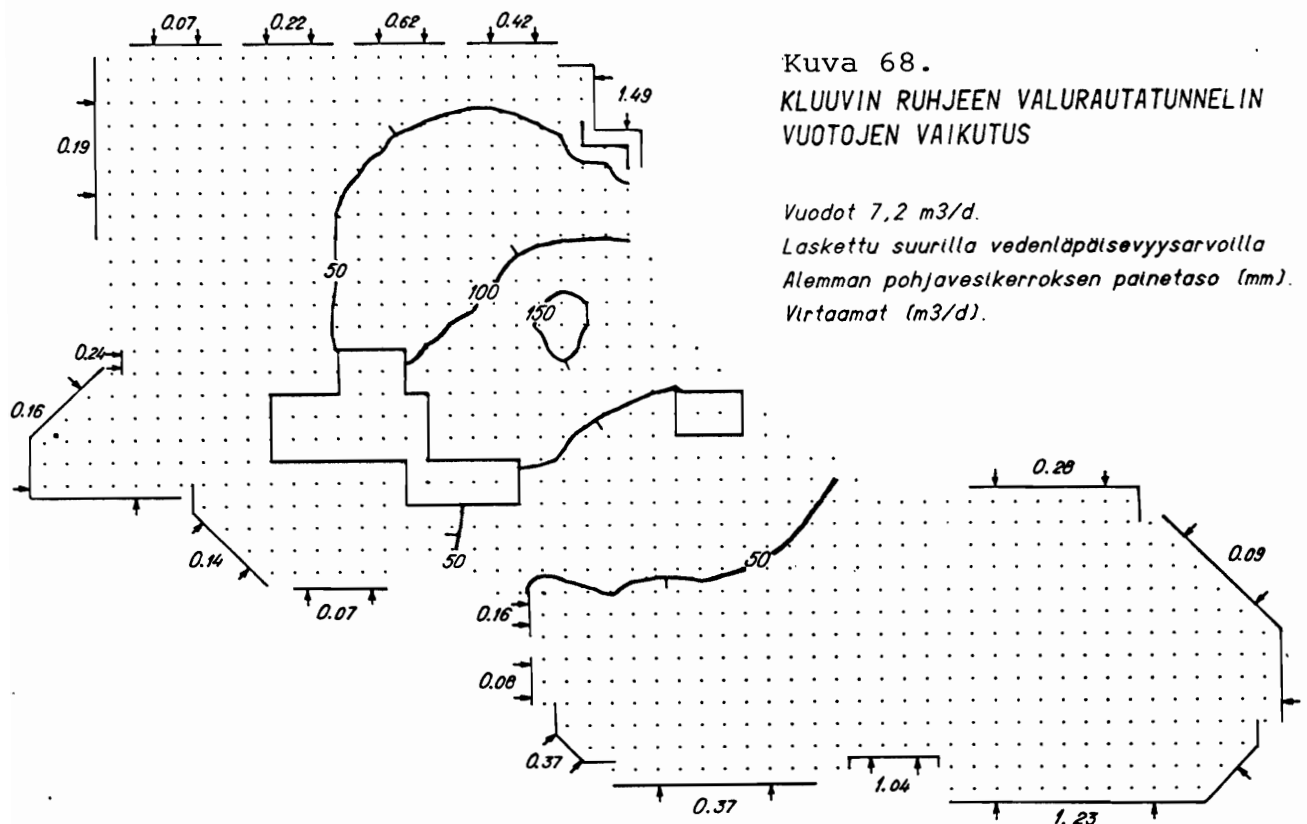
Vuodot 42,56 m³/d.

Laskettu suurilla vedenläpäisevyysarvoilla.

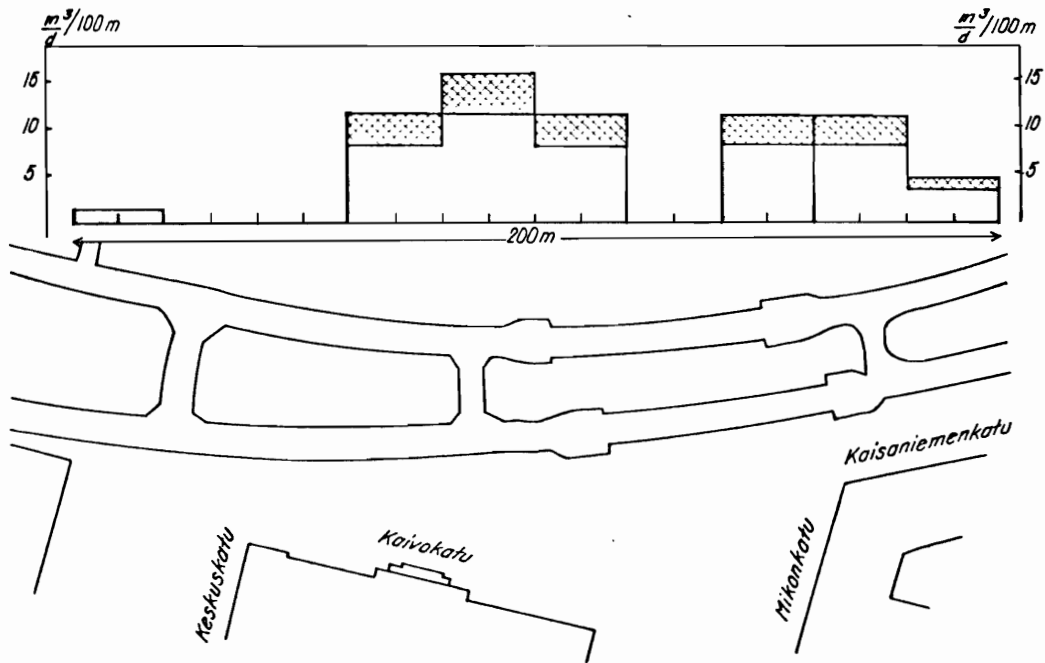
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (mm).

Virtaamat (m³/d).

Kluuvin ruhjeen valurautatunnelin vuotojen vaikutuksesta tehtiin ennakkolaskelma, jossa kuvassa 61 esitettyihin solmupisteisiin 486, 487 ja 488 annettiin yhteensä $7,2 \text{ m}^3/\text{d}$ suuruinen vuotovesivirtaama. Laskelman tulos on esitetty kuvassa 68. Valurautatunnelin myöhemmin vuotaessa mallin todettiin antaneen hyvän arvion vuotojen vaikutuksesta.



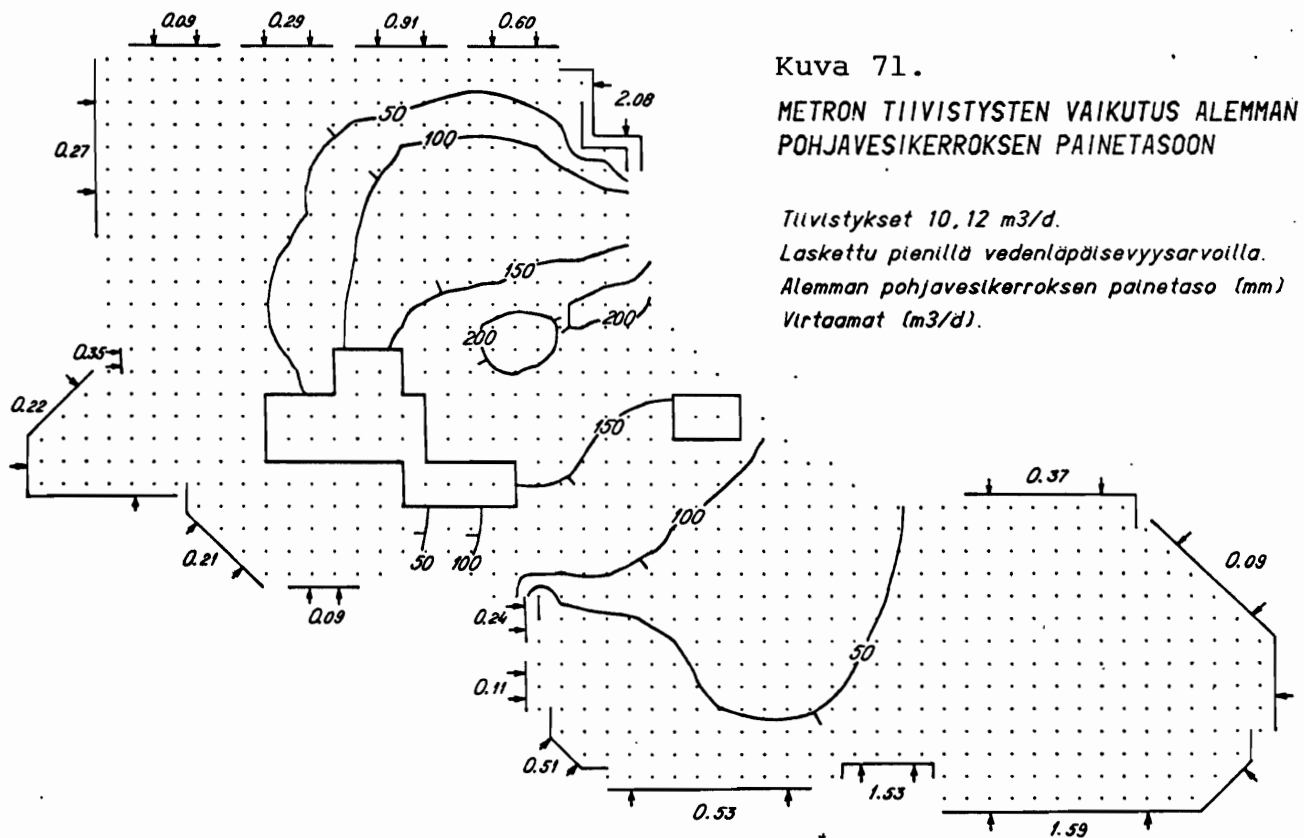
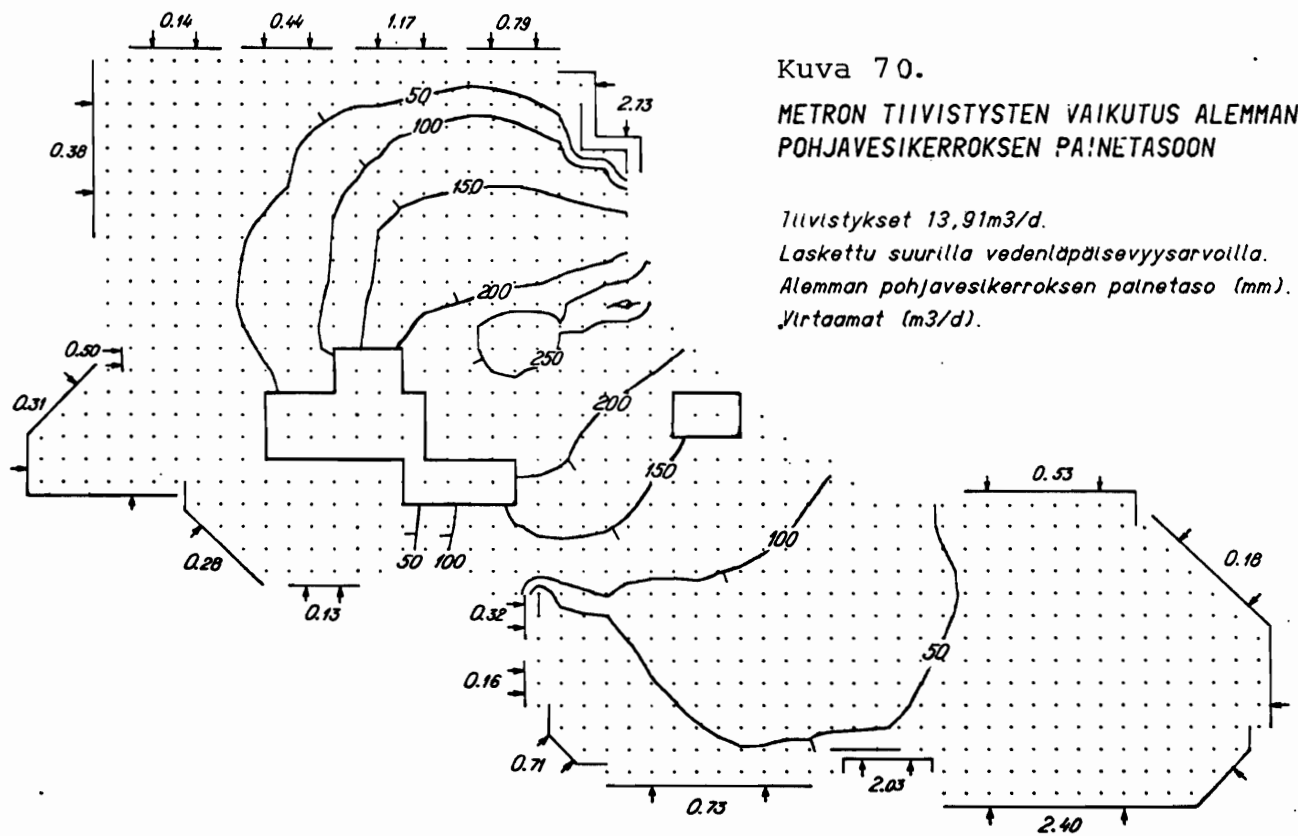
Laskelmilla ennustettiin myös metrotunneleiden tiivistämisen vaikutusta pohjaveden painetasoon. Tiivistysten vaikutuksen jakautuminen metrolinjalle on esitetty kuvassa 69 ja jakautuminen solmupisteisiin taulukossa 20. Kuvissa 70, 71 ja 72 on esitetty, kuinka tiivistystyöt nostaisivat alemman pohjavesikerroksen painetasoa, jos vuotovesivirtaama pienenesi $13,91 \text{ m}^3/\text{d}$ suurilla vedenläpäisevyysarvoilla laskettuna ja $10,12 \text{ m}^3/\text{d}$ sekä pienillä että suurilla vedenläpäisevyysarvoilla laskettuna.

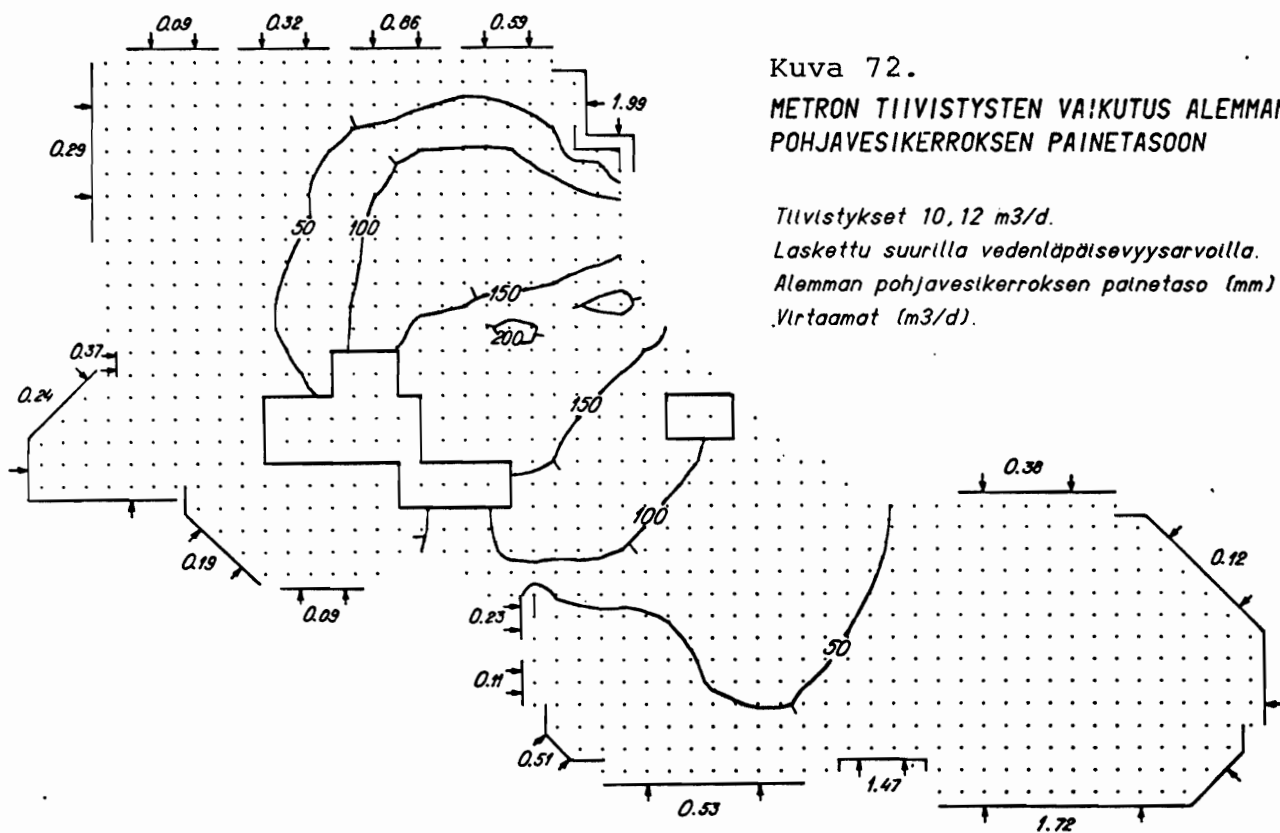


Kuva 69. Tiivistysten jakautuminen metrolinjalle.

Taulukko 20. Metrotunneleiden ennakoidun tiivistyksen vaikutuksen jakautuminen solmupisteisiin.

Solmupiste	1.Yhdistelmä	2.Yhdistelmä
	Tiivistys m^3/d	Tiivistys m^3/d
337	0,50	0,48
407	0,66	1,03
408	0,50	0,68
409	0,50	0,68
432	1,00	1,38
433	0,66	0,92
434	0,66	0,92
457	1,00	1,38
458	0,66	0,92
516	1,00	1,38
517	0,66	0,92
544	1,00	1,38
545	0,66	0,92
573	0,66	0,92
Yhteensä	10,12	Yhteensä 13,91





7. POHJARAKENNUSTYÖT

7.1 Rakennustöiden vaikutus pohjaveteen

Jo alueen vanhimpia rakennuksia perustettaessa perustusrakenteet haluttiin saada lahoamisvaaran vuoksi pohjaveden pinnan alapuolelle ja rakennuspaikalla jouduttiin tekemään työn ajaksi pohjaveden alennus. Pohjavettä on alennettu alueen lähes kaikkien pohjarakennustöiden yhteydessä, ja miltei koko ajan on altaan alueella ollut käynnissä muutamia rakennusaikaisia pumppauksia.

Rakennustyön vaikutuksen pohjaveteen määräävät monet yksityiskohdat. Rakennuskuoppa voidaan pitää kuivana pumppaamalla vesi pois kaivannon syvimmästä kohdasta tai maa voidaan kuivattaa pohjaveden alennuskalustolla. Kaivanto voidaan tukea vesitiiviillä tukiseinillä, ja kaivannon pohja ja tukiseinien tausta voidaan tiivistää injektoinneilla. Myös pohjaveden alennusta vaativien töiden nopealla suorituksella ja välttämällä syvien maanalaisten tilojen rakentamista sekä pohjaveden syötöllä voidaan vähentää rakennustöiden pohjavesitilanteelle aiheuttamaa haittaa.

7.2 Tietojen saanti vanhoista rakennustöistä

Tämän selvityksen yhteydessä tutkittiin myös pohjavesialtaan alueella menneinä vuosikymmeninä suoritettujen rakennustöiden rakennusaikaista vaikutusta pohjaveteen. Tietoja hankittiin rakennustarkastusviraston ja maistraatin arkistoista. Myös Oy Kreuto Ab ja Pohjavahvistus Oy luovuttivat tietoja tekemistään pohjarakennustöistä.

Rakennustarkastusviraston ja maistraatin arkistoissa ei ollut tietoja vanhempien rakennustöiden suorituksista. Rakennustarkastusvirastosta ja maistraatista saadut tiedot sisälsivät vain pysyvien rakenteiden piirustuksia. Pohjaveden alenemisen kannalta tärkeät aika-aulut, kaivantojen syvyydet, työmenetelmät ja muut olennaiset seikat jäivät selvittämättä.

Oy Kreuto Ab ja Pohjavahvistus luovuttivat muutamista pohjarakennustöistä tarkempia tietoja. Saatujen tietojen perusteella ei voida kuitenkaan selvittää tarkasti edes näiden töiden vaikutusta pohjaveteen. Rakennustöiden aikana tehtyjä pohjavesihavaintoja ei ole talletettu muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta.

Tietojen keräys vanhojen rakennustöiden vaikutuksesta pohjaveteen epäonnistui. Muutamista töistä saatujen tietojen ja alueen perustamistapakartan perusteella on kuitenkin pystytty käsittelemään alempaan pohjavesikerrokseen ulottuneita töitä.

7.3 Alempaan pohjavesikerrokseen ulottuneet rakennustyöt

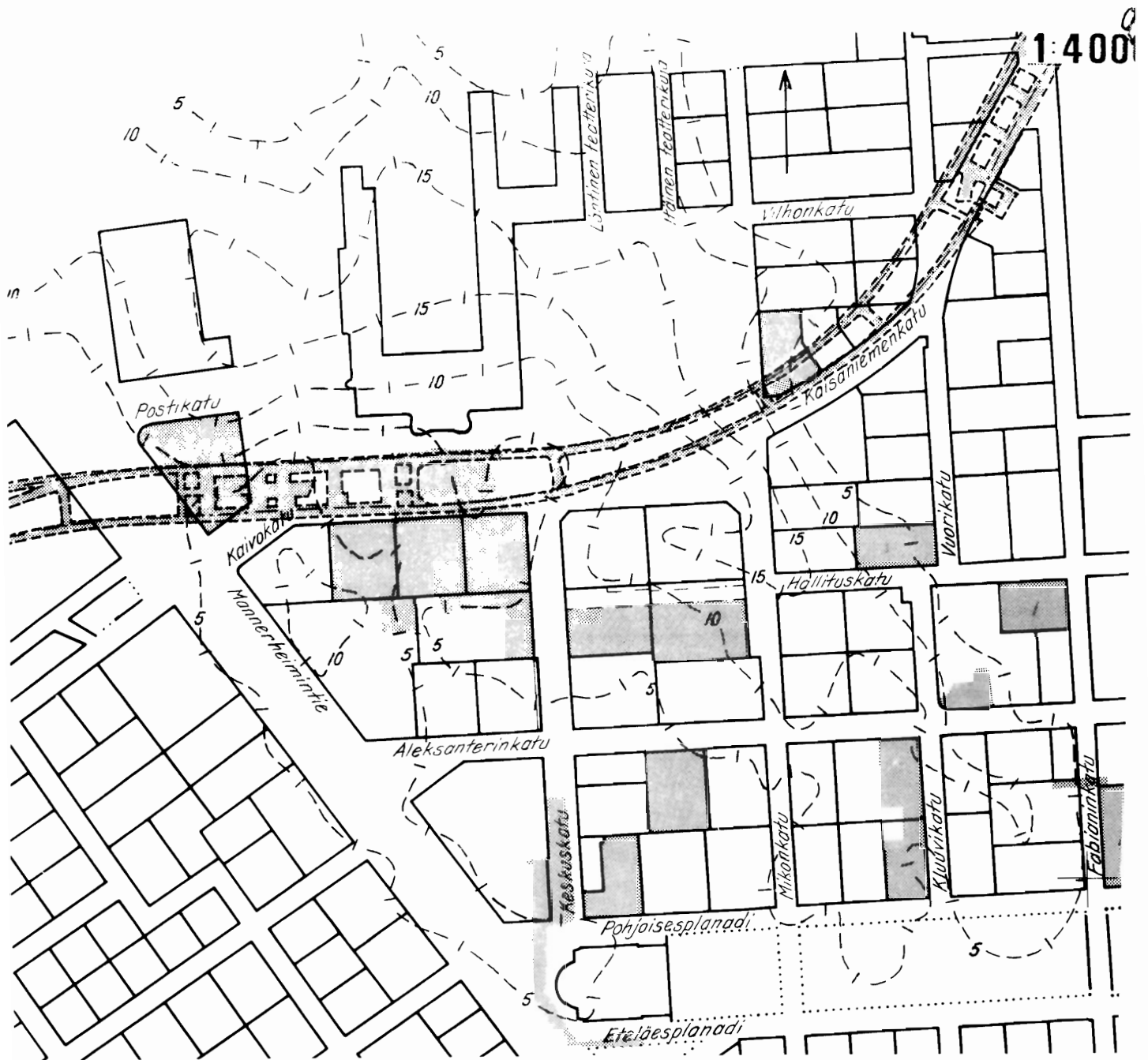
7.31 Töiden määrä

Yleispiirteisen pohjasuhteiden ja rakennustöiden selvityksen perusteella on arvioitu 18 rakennustyön alentaneen alemman pohjavesikerroksen painetasoa. Nämä rakennustyöt on esitetty taulukossa 21 ja kuvassa 73.

Taulukko 21. Alempaan pohjavesikerrokseen ulottuneet rakennustyöt. (Orsiveteen ulottuneita rakennustöitä on ollut huomattavasti enemmän.)

- 1 Korttelin numero
 2 Tontin numero
 3 Katuosoite ja kohteen nimi
 4 Rakentamisen vuosikymmen
 5 Alin lattiataso (NN) (esim. hissikuilun pohja tai pannuhuone)

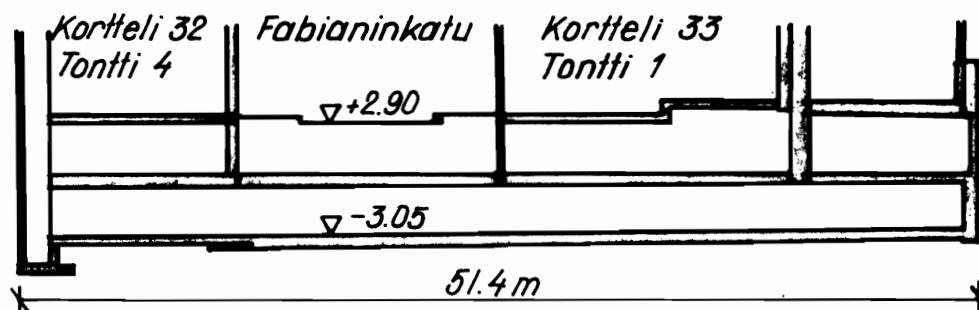
1	2	3	4	5
99	1	Mannerheimintie 9, Kaivokatu 3 Sokos	1930	- 3,70
38a	15	Mikonkatu 15, Kaisaniemenkatu 2a Mikonlinna	1940	- 2,80
36	1	Aleksanterinkatu 9, Elanto	1950	- 1,85
96	9	Kaivokatu 10, Kaivotalo	1950	- 3,47
97	3	Mikonkatu 8, Aikatalo	1950	- 4,30
95b	20	Aleksanterinkatu 48	1950	- 2,90
34	1, 3	Kluuvikatu 2 - 4	1950	- 6,00
32	1	Fabianinkatu 27 - 29	1960	- 3,20
96	1, 4	Kaivokatu 6 - 8	1960	- 3,20
		Vanha metrovaraus	1960	- 10,40
97	1	Keskuskatu 7	1960	- 11,00
38b	7	Hallituskatu 15, Heimolan talo	1960	- 10,03
95b	5	Pohjoisesplanadi 39	1960	- 10,15
95a	1	Paikoitustunneli	1960	
		Metro	1970	- 30,00
36	5	Hallituskatu 8	1970	- 10,00
		Eduskuntatalon väestösuoja	1970	
33	1	Fabianinkatu 31 ja 16	1970	- 5,80
32	4			



Kuva 73. Alempaan pohjavesikerrokseen ulottuneet rakennustyöt.

7.32 Suomen Yhdyspankin kiinteistöjen yhdystunnelin rakennustyö

Suomen Yhdyspankin korttelissa 33 tontilla 1 ja korttelissa 32 tontilla 4 olevien kiinteistöjen saneeraustöiden yhteydessä kiinteistöt yhdistettiin kadun alitse kulkevalla tunnelilla (kuva 74). Pohjaveden painetaso alennettiin tunnelin rakennustyön ajaksi.



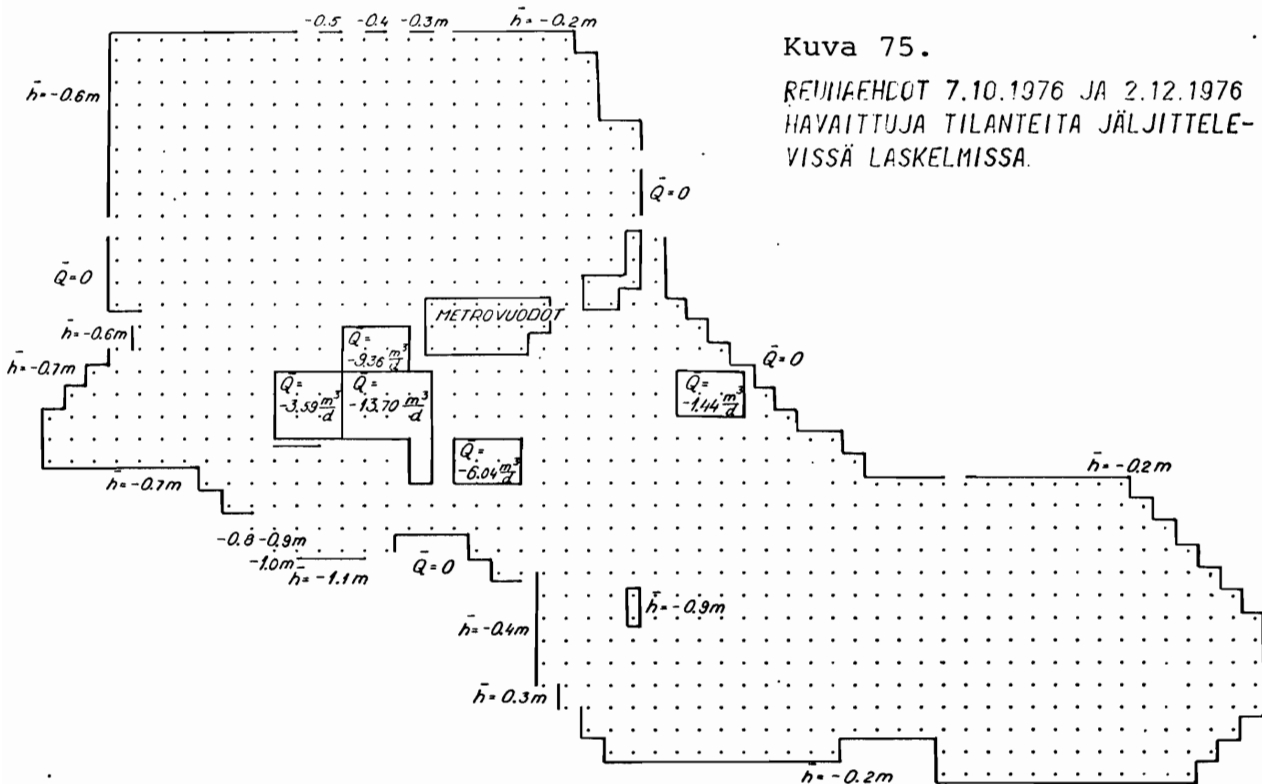
Kuva 74. Fabianinkadun ali kulkeva yhdystunneli.

Pohjaveden alennus aloitettiin elokuun alkupäivinä vuonna 1976. Pohjaveden alennusputket ylsivät tällöin noin tasoon $-4,2$ m (NN). Pumppausmäärä oli tiettävästi elokuussa suunnilleen $220 \text{ m}^3/\text{d}$. Noin kahden kuukauden kuluttua pumppauksen alkamisesta pumppaustaso alennettiin hissikuilun rakentamisen vuoksi suunnilleen tasoon $-6,0$ m (NN). Marraskuussa on arvioitu pumpatun noin $580 \text{ m}^3/\text{d}$. Joulukuun alussa pumppaustaso nostettiin korkeudelle $-4,5$... $-3,0$ m (NN), ja pumppaus lopetettiin kokonaan 1.7.1977.

Pohjaveden painetasoa nostettiin korvaamalla pohjavettä Hallituskadulle rakennetulla syöttökaivojärjestelmällä (kohta 5.3) ja kortteleiden 32, 34 ja 36 orsiveden syöttöjärjestelmillä. Pohjaveden syöttö alkoi Ateneumin takana 15.3.1977, Hallituskadulla 31.3.1977 ja päättyi 1.10.1977, kun orsiveden ja alemman pohjaveden painetasojen todettiin palautuneen ennalleen. Yhteensä pohjavettä syötettiin noin 23000 m^3 .

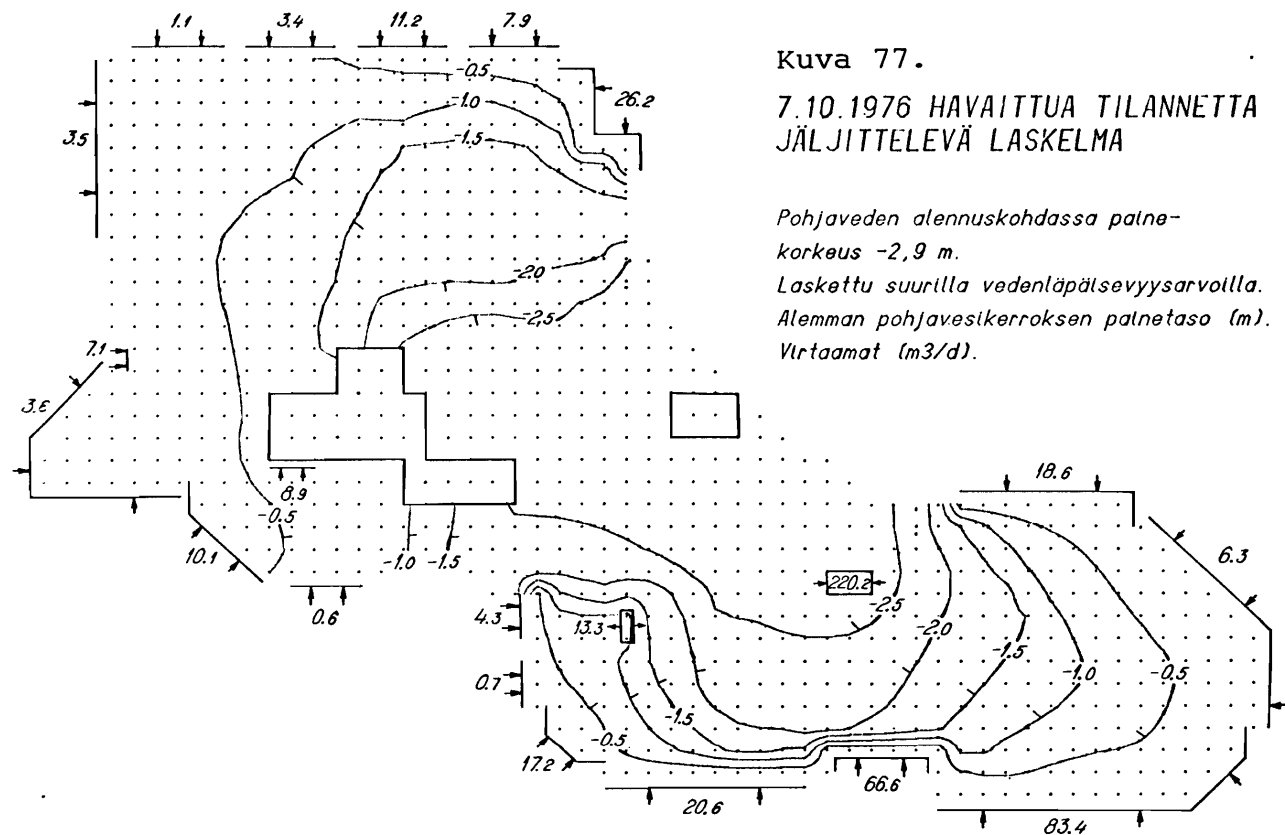
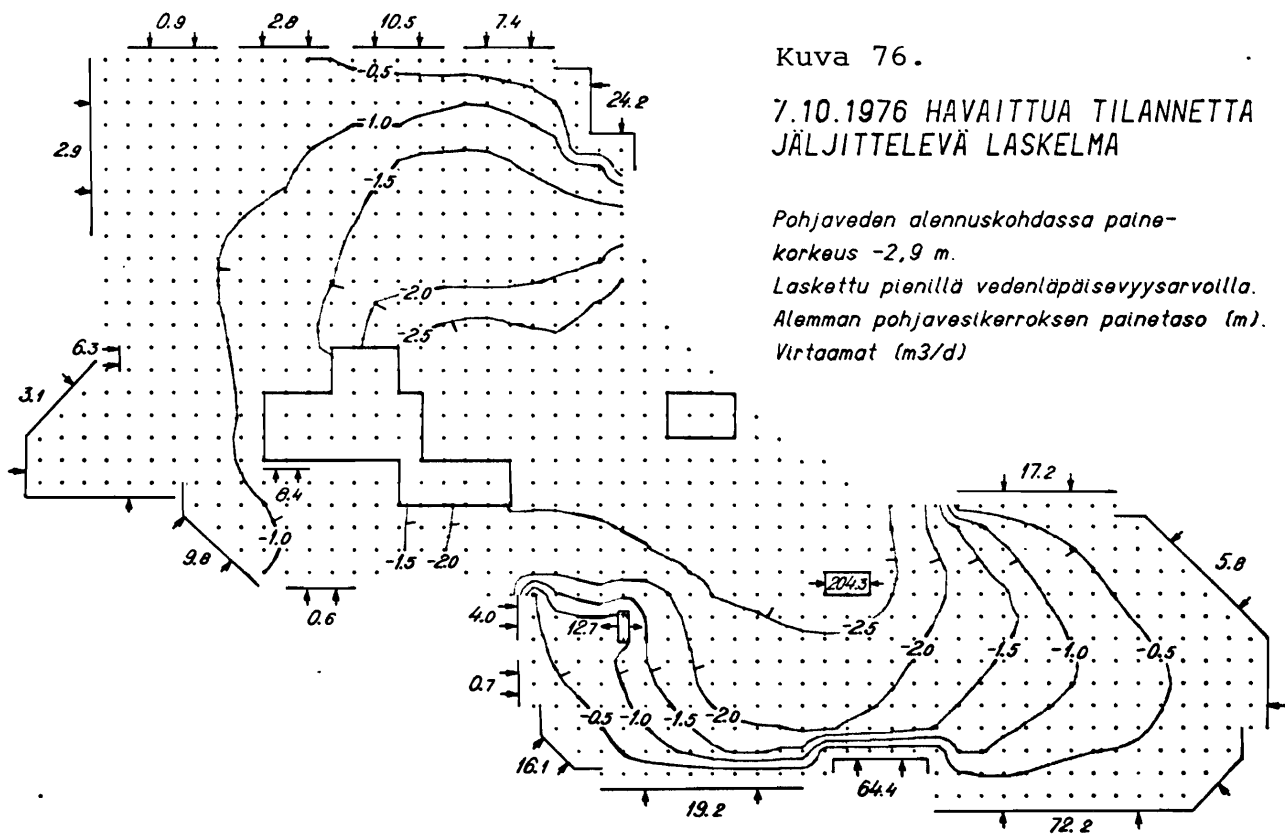
Alennustilannetta jäljitellen suoritettiin laskentamallilla stationaarinen laskelma, jossa Fabianinkadun pumppauskohdalle annettiin kuuteen solmupisteesseen painetaso $-2,9$ m (NN). Muut reunaehdot on

esitetty kuvassa 75. Laskelma suoritettiin sekä pienillä että suurilla vedenläpäisevyysarvoilla. Graafiset tulokset on esitetty kuvissa 76 ja 77. Tuloksia on verrattu 7.10.1976 tehtyihin alemman pohjavesikerroksen painetason havaintoihin (taulukko 22).

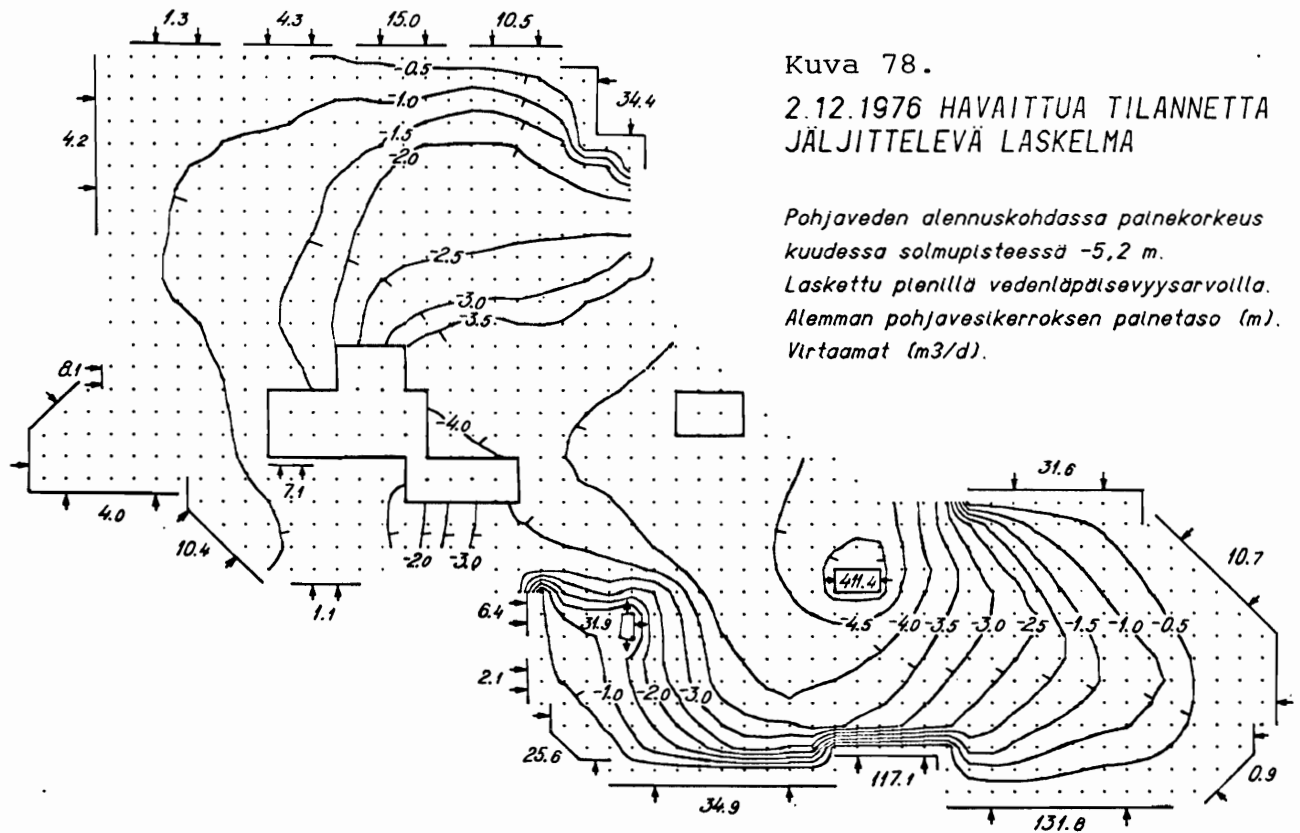


Taukukko 22. Alemman pohjavesikerroksen painetason havainnot 7.10.1976, kahden tilannetta jäljittävän laskelman tulokset sekä laskentatulosten ja havaintojen erotukset.

Havainto- putki	Etäisyys pumppaus- kohdasta	Laskettu pienillä k - arvoilla		Laskettu suurilla k - arvoilla	
		Havainto	Laskettu arvo	Erotus	Laskettu arvo
	m	m (NN)	m (NN)	m	m (NN)
115	36	- 2,30	- 2,783	- 0,483	- 2,794
149	38	- 2,75	- 2,599	- 0,151	- 2,614
150	105	- 2,26	- 2,455	- 0,195	- 2,490
114	118	- 2,44	- 2,616	- 0,176	- 2,663
148	119	- 2,29	- 2,146	+ 0,144	- 2,195
113	169	- 2,40	- 2,612	- 0,032	- 2,657
111	221	- 0,60	- 1,076	- 0,476	- 1,075
110	230	- 2,19	- 2,028	+ 0,162	- 2,238
112	240	- 0,53	- 0,742	- 0,212	- 0,745
151	252	- 2,58	- 2,635	- 0,055	- 2,694
109	280	- 2,62	- 2,672	- 0,052	- 2,740
136	301	- 2,35	- 2,620	- 0,270	- 2,699
108	321	- 2,17	- 2,562	- 0,392	- 2,673
155	341	- 2,64	- 2,732	- 0,092	- 2,811
156	355	- 2,01	- 2,248	- 0,238	- 2,344
119	356	- 1,59	- 2,037	- 0,447	- 2,059
118	379	- 2,93	- 2,861	- 0,069	- 2,915
131	390	- 1,28	- 2,125	- 0,845	- 2,193
133	391	- 1,47	- 1,776	- 0,306	- 1,847
137	397	- 1,38	- 1,879	- 0,499	- 1,943
134	403	- 2,50	- 2,749	- 0,249	- 2,818
135	421	- 1,26	- 1,877	- 0,617	- 1,937
129	451	- 1,55	- 2,228	- 0,678	- 2,286
106	458	- 1,07	- 1,454	- 0,384	- 1,538
164	465	- 1,49	- 2,173	- 0,683	- 2,221
117	470	- 1,49	- 1,892	- 0,402	- 1,948
132	475	- 1,33	- 1,686	- 0,356	- 1,754
139	482	- 1,47	- 2,096	- 0,626	- 2,135
146	511	- 0,61	- 1,106	- 0,496	- 1,107
116	524	- 1,13	- 1,610	- 0,480	- 1,680
152	525	- 1,36	- 1,571	- 0,211	- 1,606
141	527	- 1,31	- 1,295	+ 0,015	- 1,297
153	542	- 1,40	- 1,424	- 0,024	- 1,450
163	560	- 1,34	- 1,284	- 0,056	- 1,303
128	578	- 1,25	- 1,205	- 0,045	- 1,225
124	604	- 0,64	- 0,847	- 0,207	- 0,853
159	620	- 1,17	- 0,951	+ 0,219	- 0,961
130	630	- 0,76	- 0,973	- 0,213	- 0,991
158	649	- 0,78	- 0,953	- 0,173	- 0,966
125	668	- 0,91	- 0,712	+ 0,198	- 0,713
123	672	- 1,08	- 0,871	+ 0,209	- 0,881
143	695	- 0,85	- 0,886	- 0,036	- 0,898
		Keskiarvo		- 0,23	- 0,27
		Keskihajonta		0,26	0,28

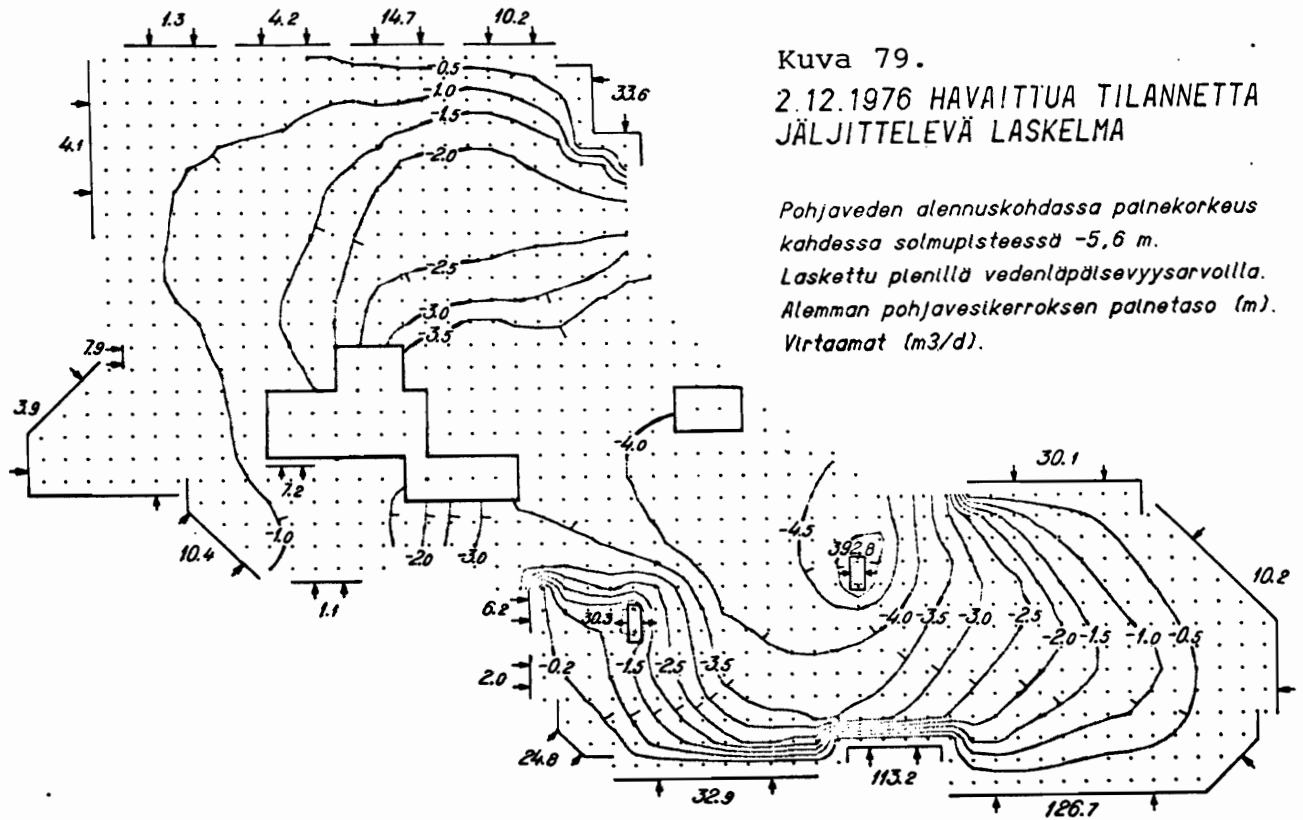


Alennuspumppauksen myöhempää vaihetta on jäljitelty stationaarisella laskelmalla, jossa mainittuun kuuteen solmupisteeseen asetettiin painekorkeus - 5,2 m (NN) (kuva 78) ja laskelmalla, jossa vain kahteen keskimmäiseen solmupisteeseen asennettiin painekorkeus - 5,6 m (NN) (kuva 79). Laskelmat tehtiin pienillä vedenläpäisevyysarvoilla. Muut reunaehdot on esitetty kuvassa 75. Tuloksia on vertailtu 2.12.1976 tehtyihin alemman pohjavesikerroksen painetaso havaintoihin (taulukko 23).

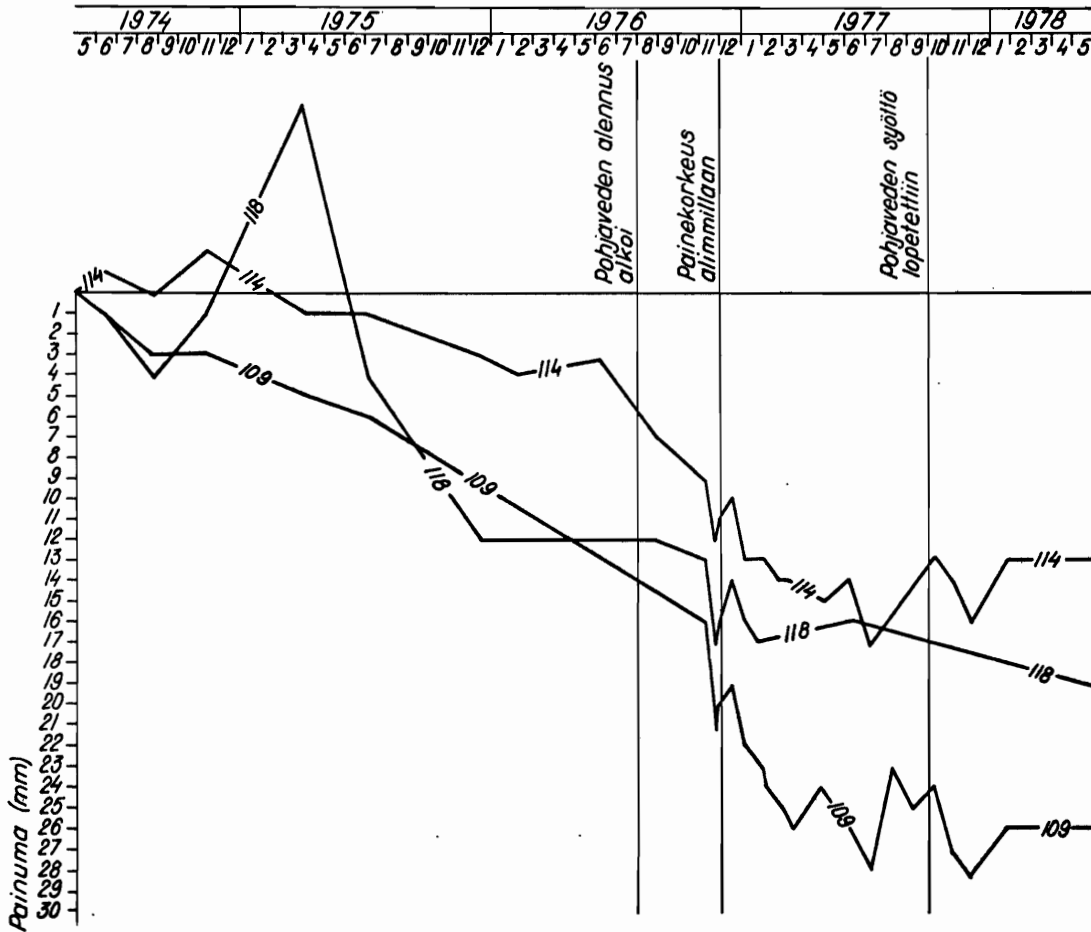


Taulukko 23. Alemman pohjavesikerroksen painetason havainnot 2.12.1976, kahden tilannetta jäljittävän laskelman tulokset sekä laskentatulosten ja havaintojen erotukset.

Havainto-putki	Etäisyys pumppauskohdasta	$\bar{h} = 5,2 \text{ m (NN)}$			$\bar{h} = 5,6 \text{ m (NN)}$		
		Havainto	Laskettu arvo	Erotus	Laskettu arvo	Erotus	
	m	m (NN)	m (NN)	m	m (NN)	m	
115	36	- 5,00	- 4,919	+ 0,081	- 4,788	+ 0,212	
149	38	- 4,93	- 4,623	+ 0,307	- 4,485	+ 0,445	
150	105	- 3,81	- 4,253	- 0,443	- 4,102	- 0,292	
114	118	- 3,81	- 4,375	- 0,565	- 4,233	- 0,423	
148	119	- 4,16	- 3,725	+ 0,435	- 3,619	+ 0,541	
113	169	- 3,70	- 4,293	- 0,593	- 4,160	- 0,460	
111	221	- 0,87	- 1,565	- 0,695	- 1,524	- 0,654	
110	230	- 3,10	- 3,366	- 0,266	- 3,274	- 0,174	
112	240	- 0,85	- 1,130	- 0,280	- 1,098	- 0,248	
151	252	- 3,73	- 4,054	- 0,324	- 9,942	- 0,212	
109	280	- 3,70	- 4,002	- 0,302	- 3,896	- 0,196	
136	301	- 3,45	- 3,937	- 0,487	- 3,834	- 0,384	
108	321	- 3,20	- 3,722	- 0,522	- 3,630	- 0,430	
155	341	- 3,53	- 3,902	- 0,372	- 3,809	- 0,279	
138	341	- 3,05	- 3,629	- 0,858	- 3,540	- 0,490	
156	355	- 2,36	- 3,185	- 0,825	- 3,098	- 0,738	
119	356	- 1,85	- 2,799	- 0,949	- 2,738	- 0,888	
118	379	- 3,93	- 3,987	- 0,057	- 3,898	+ 0,032	
131	390	- 1,73	- 2,971	- 1,241	- 2,904	- 1,174	
133	391	- 1,19	- 2,456	- 0,556	- 2,402	- 0,502	
137	397	- 1,81	- 2,610	- 0,800	- 2,552	- 0,742	
134	403	- 3,26	- 3,810	- 0,550	- 3,726	- 0,466	
135	421	- 1,65	- 2,594	- 0,944	- 2,538	- 0,888	
129	451	- 1,90	- 3,027	- 1,127	- 2,964	- 1,064	
106	458	- 1,33	- 1,984	- 0,654	- 1,942	- 0,622	
164	465	- 1,82	- 2,932	- 1,112	- 2,872	- 1,052	
117	470	- 1,79	- 2,579	- 0,789	- 2,524	- 0,734	
132	475	- 1,51	- 2,303	- 0,793	- 2,255	- 0,745	
139	482	- 1,78	- 2,809	- 1,029	- 2,753	- 0,973	
146	511	- 0,70	- 1,125	- 0,425	- 1,124	- 0,424	
116	524	- 1,42	- 2,188	- 0,768	- 2,142	- 0,722	
152	525	- 0,20	- 2,022		- 1,987		
141	527	- 1,31	- 1,297	+ 0,013	- 1,297	+ 0,013	
153	542	+ 0,32	- 1,802		- 1,772		
163	560	+ 0,74	- 1,594		- 1,570		
128	578	- 0,88	- 1,485	- 0,605	- 1,463	- 0,583	
124	604	- 0,67	- 0,909	- 0,239	- 0,904	- 0,234	
130	630	- 0,70	- 1,161	- 0,461	- 1,146	- 0,446	
158	649	- 0,75	- 1,108	- 0,358	- 1,096	- 0,346	
125	668	- 0,96	- 0,718	+ 0,242	- 0,718	+ 0,242	
123	672	- 1,00	- 0,984	+ 0,016	- 0,975	+ 0,025	
143	695	- 0,75	- 1,022	- 0,272	- 1,012	- 0,262	
		Keskiarvo		- 0,49			- 0,42
		Keskihajonta		0,40			0,40



Kuvassa 80 ja taulukossa 24 on esitetty kolmen tarkkailupisteen painumamittaustulokset. Painumalevyn 118 painumisnopeus pieneni pohjaveden alennustilanteen aikana. Painumalevyille 109 ja 114 pohjaveden alennus aiheutti mahdollisesti 1...3 mm lisäpainuman. Painumalevyjen sijainti on esitetty kuvassa 30.



Kuva 80. Kolmen tarkkailupisteen painumamittaustulokset.

Taulukko 24. Pohjaveden alennustilanteen (1.8.1977...1.10.1978) vaikutus painumiin.

Painumat ennen pohjaveden alennusta

Painumalevy	109	114	118	
1. havainnon päiväys	1.5.-74	1.5.-74	1.5.-74	
2. havainnon päiväys	8.11.-76	31.8.-76	31.8.-76	Keskimäärin
Painumaero (mm)	16	7	12	12
Painumisnopeus (mm/a)	7,0	3,0	5,1	5

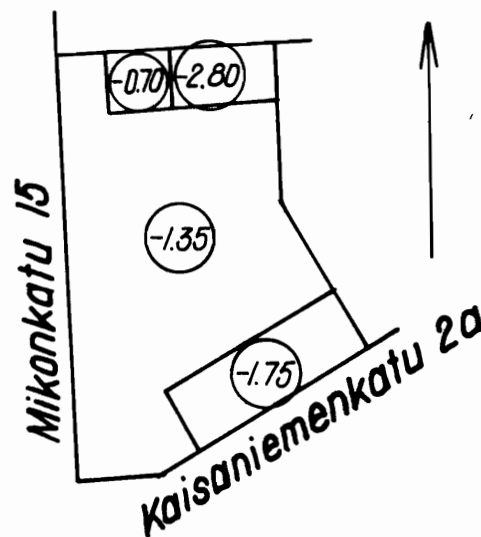
Painumat pohjaveden alennustilanteen aikana

Painumalevy	109	114	118	
1. havainnon päiväys	8.11.-76	31.8.-76	31.8.-76	
2. havainnon päiväys	7.10.-77	7.10.-77	14.6.-77	Keskimäärin
Painumaero (mm)	8	6	4	6
Painumisnopeus (mm/a)	8,7	5,4	3,9	6
Savikerroksen paksuus (m)	12	7	5	
Pohjaveden suurin alenema (m)	2,3	2,8	2,2	

7.33 Muut alempaan pohjavesikerrokseen vaikuttaneet rakennustyöt

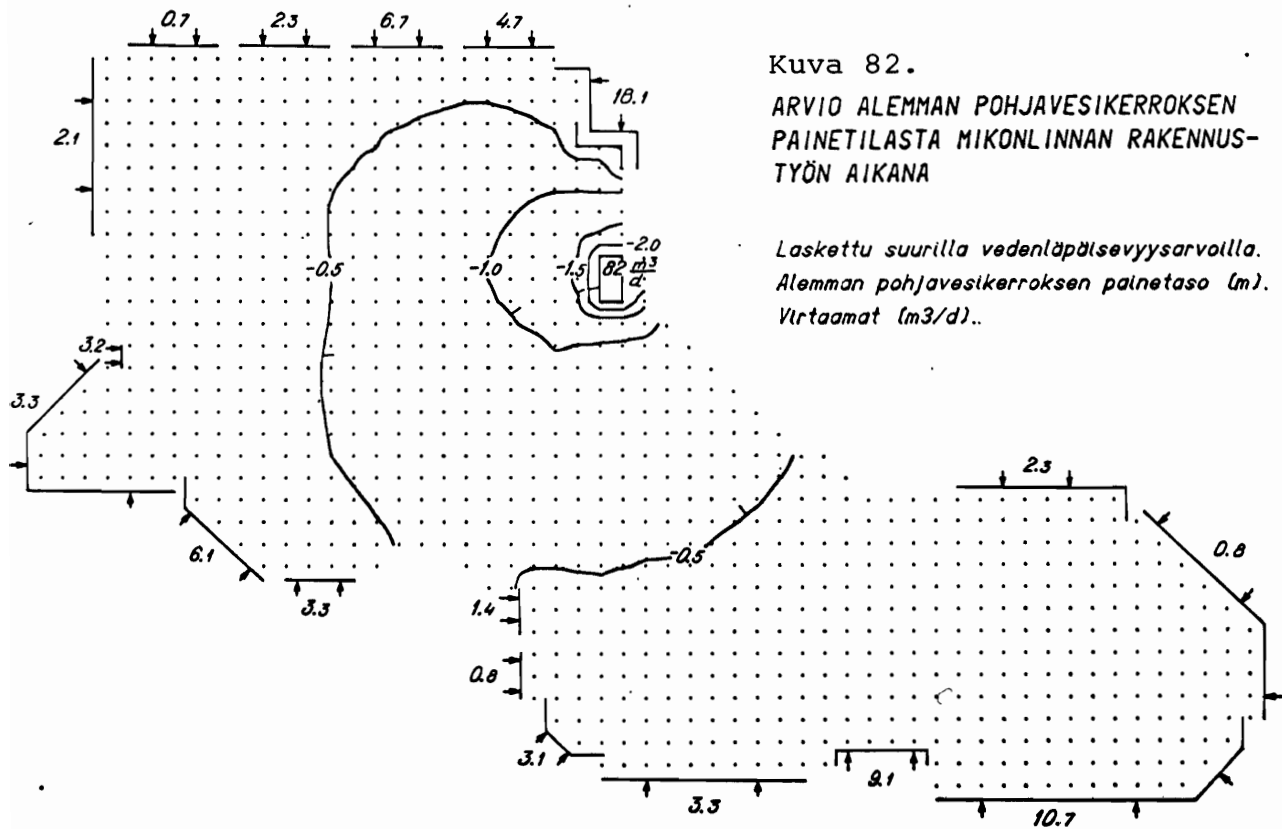
Vanhojen rakennustöiden vaikutusta alempaan pohjavesikerrokseen on arvioitu seitsemässä tapauksessa laskentamallilla. Laskelmissa käytetyt reunaehdot on esitetty kuvassa 55. Malliin on annettu käsiteltyjä rakennustöitä myöhemmin rakennettujen kellaritilojen kohdalla oleviin elementteihin vedenläpäisevyysarvo $k = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Muissa elementeissä on käytetty suuria vedenläpäisevyysarvoja.

Mikonkatu 15:ssä sijaitsevaa Mikonlinnaa rakennettiin 1930- ja 1940 -lukujen vaihteessa (kuva 81).



Kuva 81. Mikonlinnan alin kellarikerros.

Rakennusaikaisen pohjavesitilanteen stationaarisessa laskelmassa kuuteen solmupisteeseen on annettu painekorkeus - 2,5 m (NN) (kuva 82).

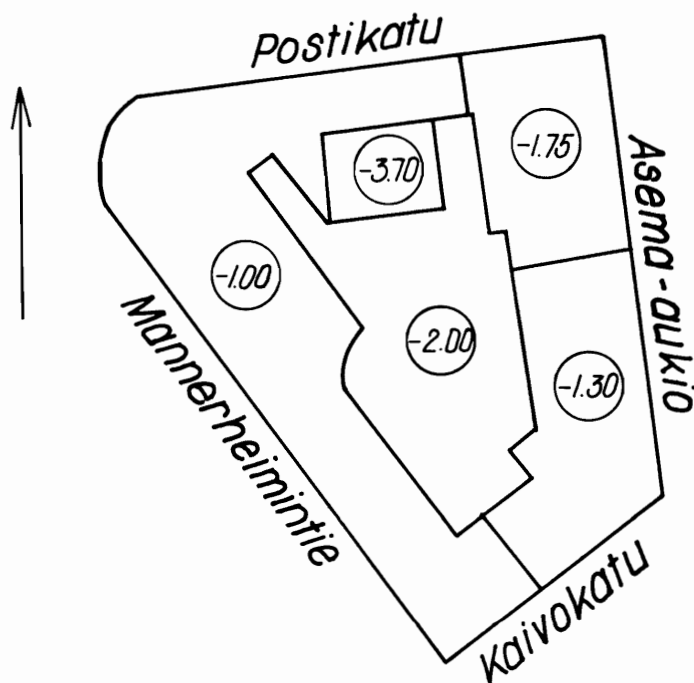


Kuva 82.

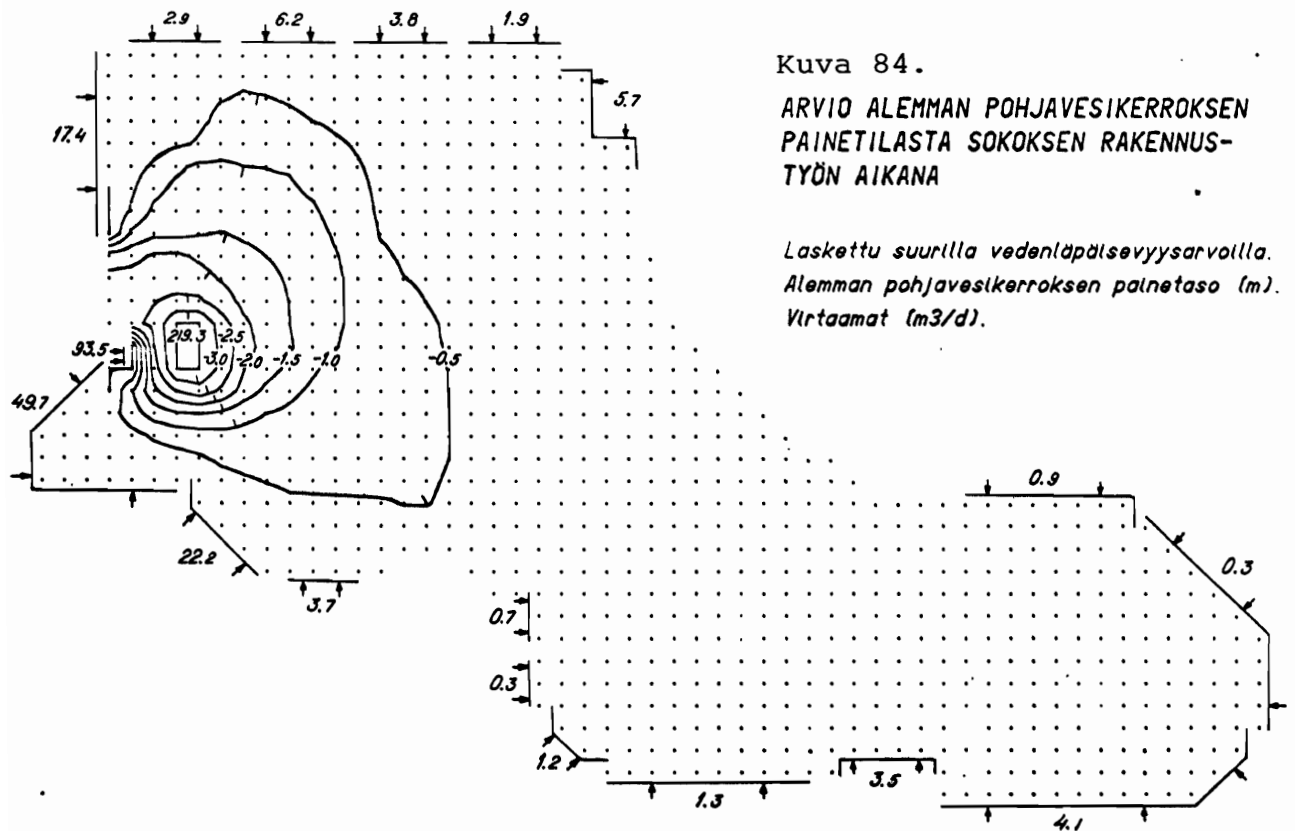
ARVIO ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETILASTA MIKONLINNAN RAKENNUS-
TYÖN AIKANA

Laskettu suurilla vedenläpäisevyyksarvoilla.
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d)..

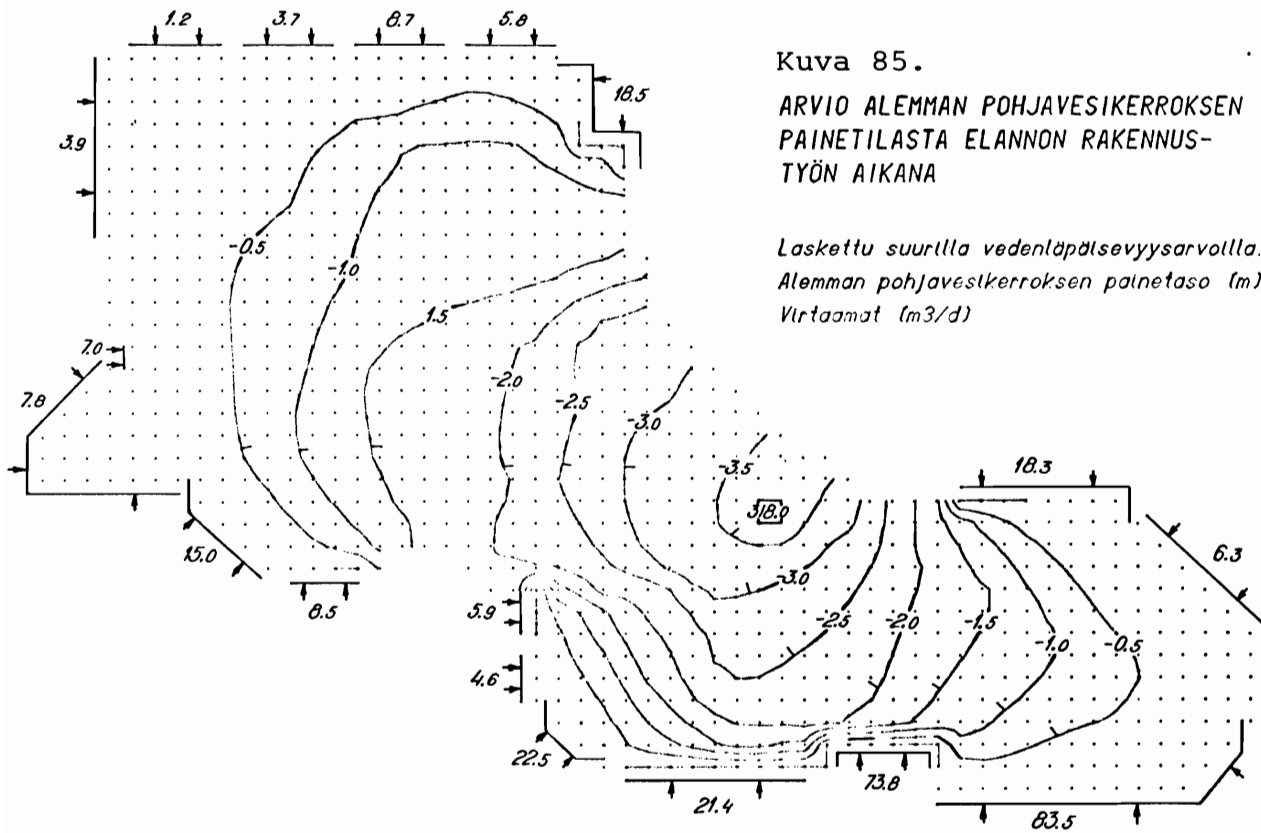
Sokoksen (kuva 83) rakennustyöt aloitettiin vuonna 1939. Pohjavesilaskelmassa kuuteen solmupisteeseen on annettu painekorkeus - 3,5 m (NN) (kuva 84).



Kuva 83. Sokoksen alin kellarikerros.



Elannon tavarataloa rakennettiin 1950-luvun alussa. Rakennuspaikalla suoritettiin porrashuoneen kohdalla pohjaveden alennus puusuodatinputkilla vuonna 1952. Arvio työn vaikutuksesta ympäristöön on esitetty kuvassa 85. Rakennuspaikan neljään solmupisteeseen on annettu painekorkeus - 4,0 m (NN).

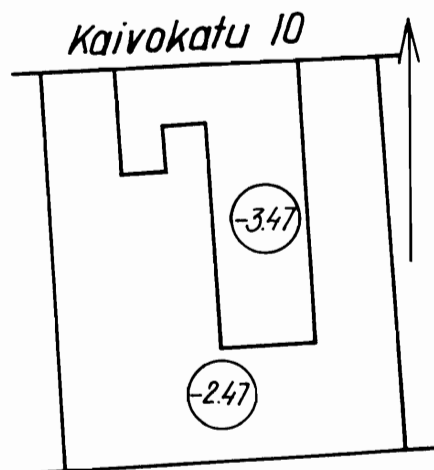


Kuva 85.

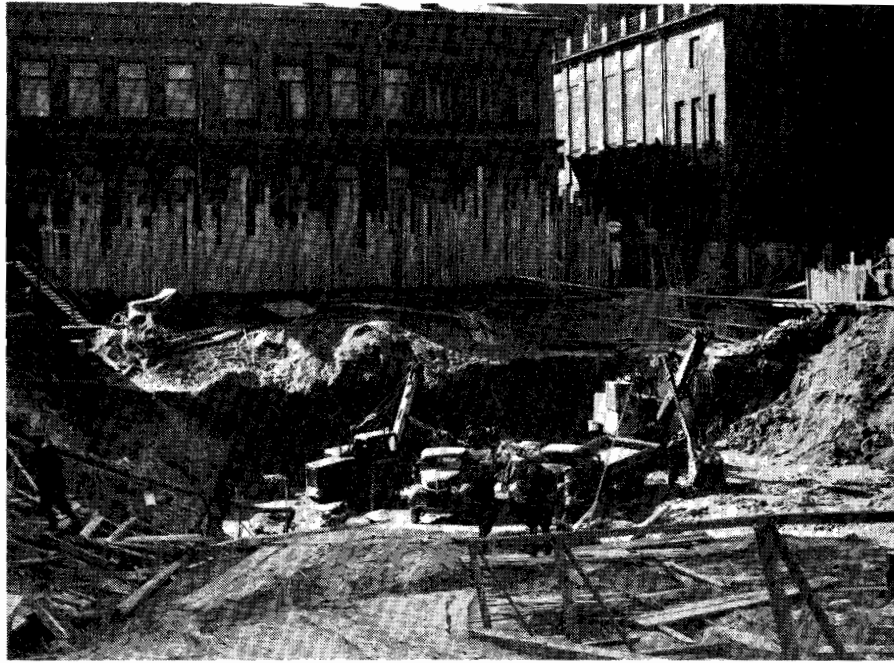
ARVIO ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETILASTA ELÄNNÖN RAKENNUS-
TYÖN AIKANA

Laskettu suurilla vedenläpäisevyyksarvoilla.
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d)

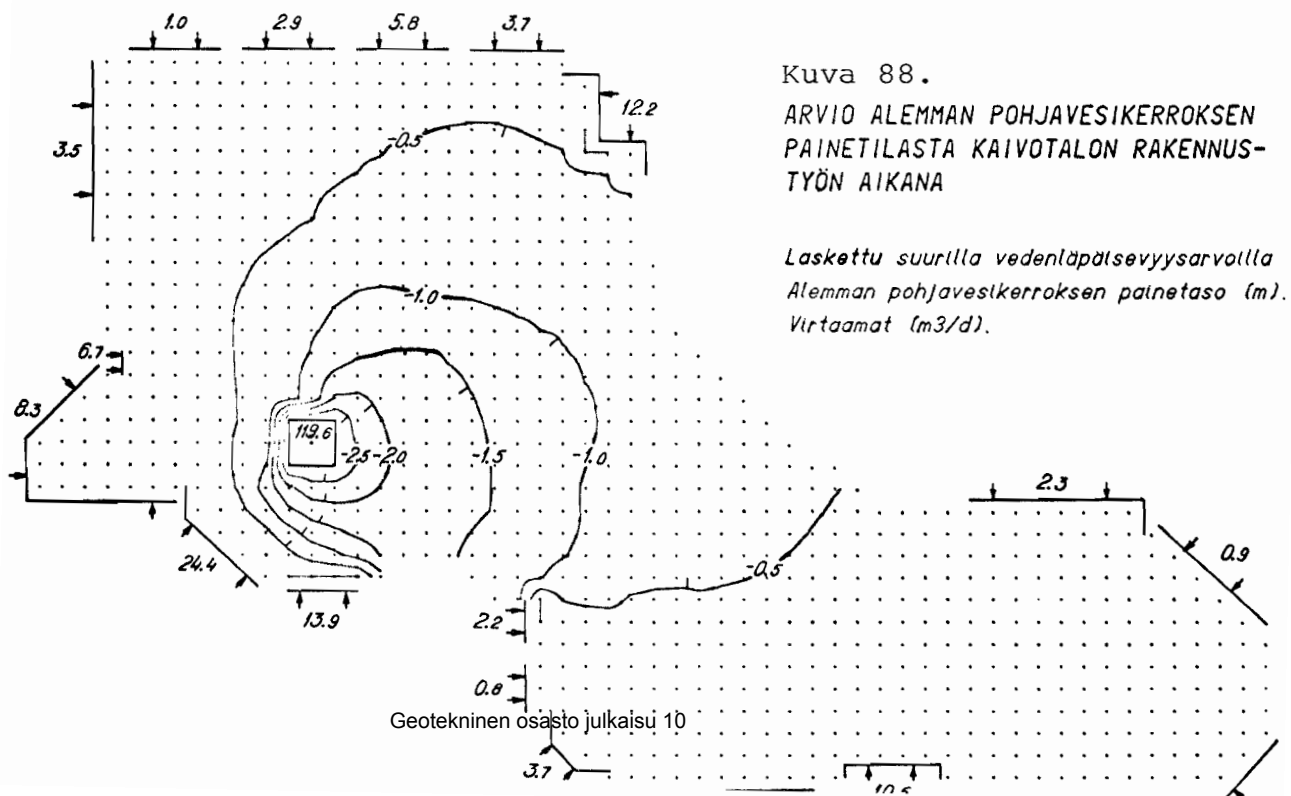
Kaivotalon (kuva 86) perustuksia tehtiin vuosina
1953 ja 1954 (kuva 87). Pohjavesilaskelmassa on
annettu kahdeksaan solmupisteeseen painekorkeus
- 4,0 m (NN) (kuva 88).



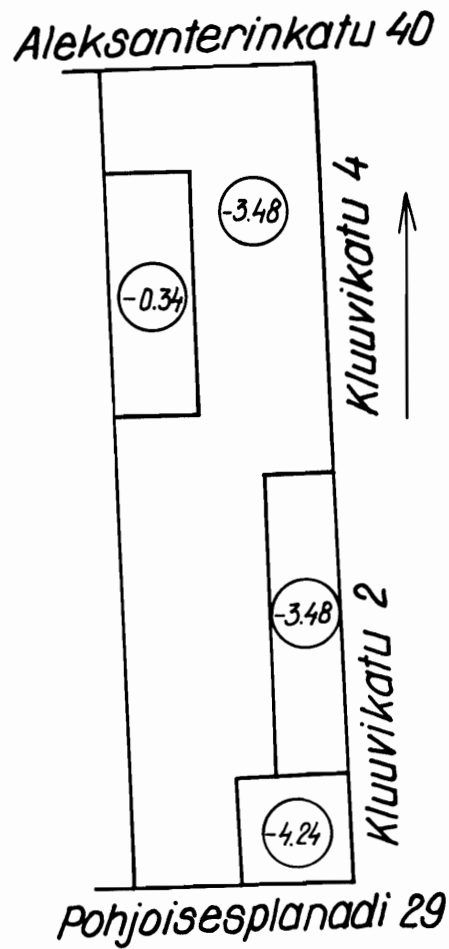
Kuva 86. Kaivotalon alin kellarikerros.



Kuva 87. Kaivotaloa rakennetaan (Helsingin kaupunginmuseon kuvakokoelmat).



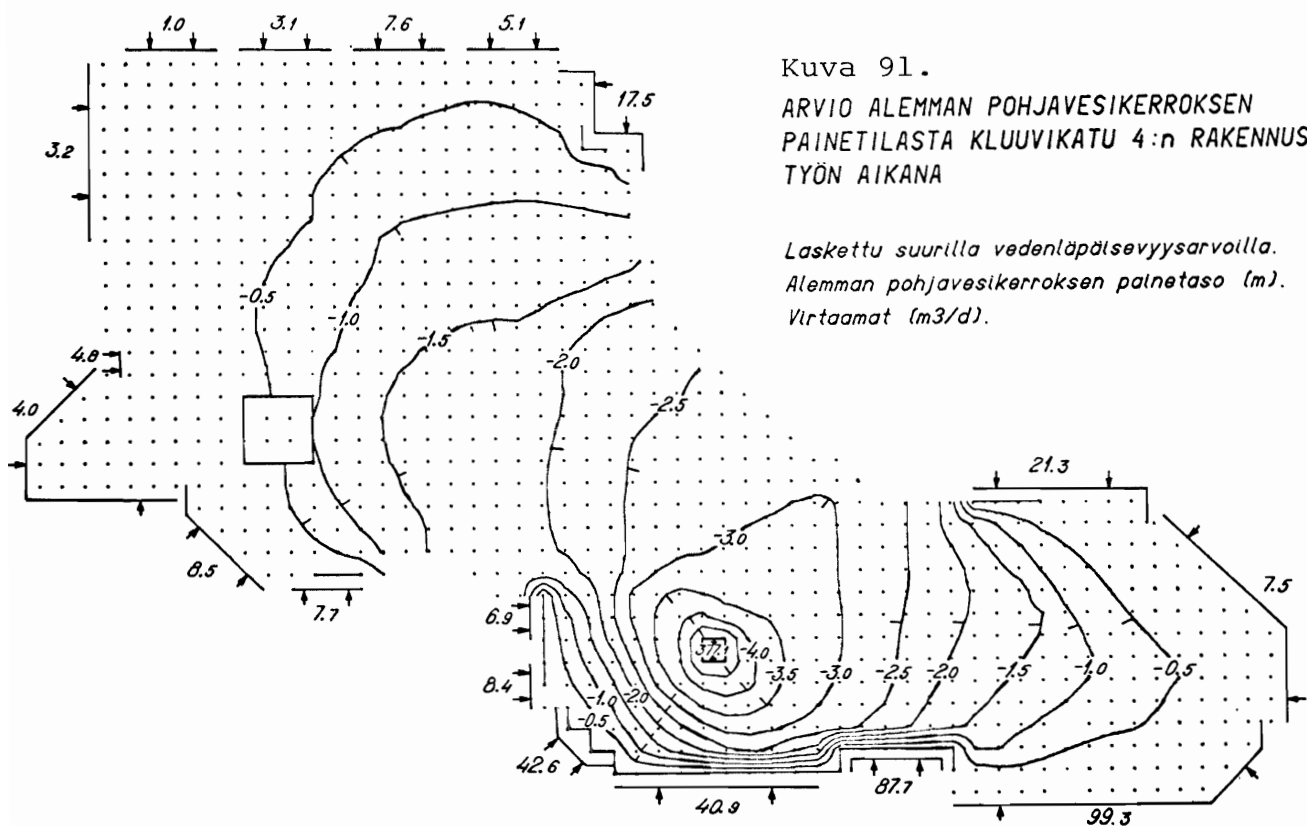
Kansallis-Osake-Pankin tonteilla. (kuva 89) on tehty useita syvälle ulottuneita rakennustöitä (kuva 90). Vuoden 1958 loppupuolella suoritettun pohjaveden alennuksen vaikutusta on arvioitu laskelmalla (kuva 91). Neljässä solmupisteessä on annettu painekorkeus - 5 m (NN).



Kuva 89. Kluuvikatu 2 - 4:n alin kellarikerros.



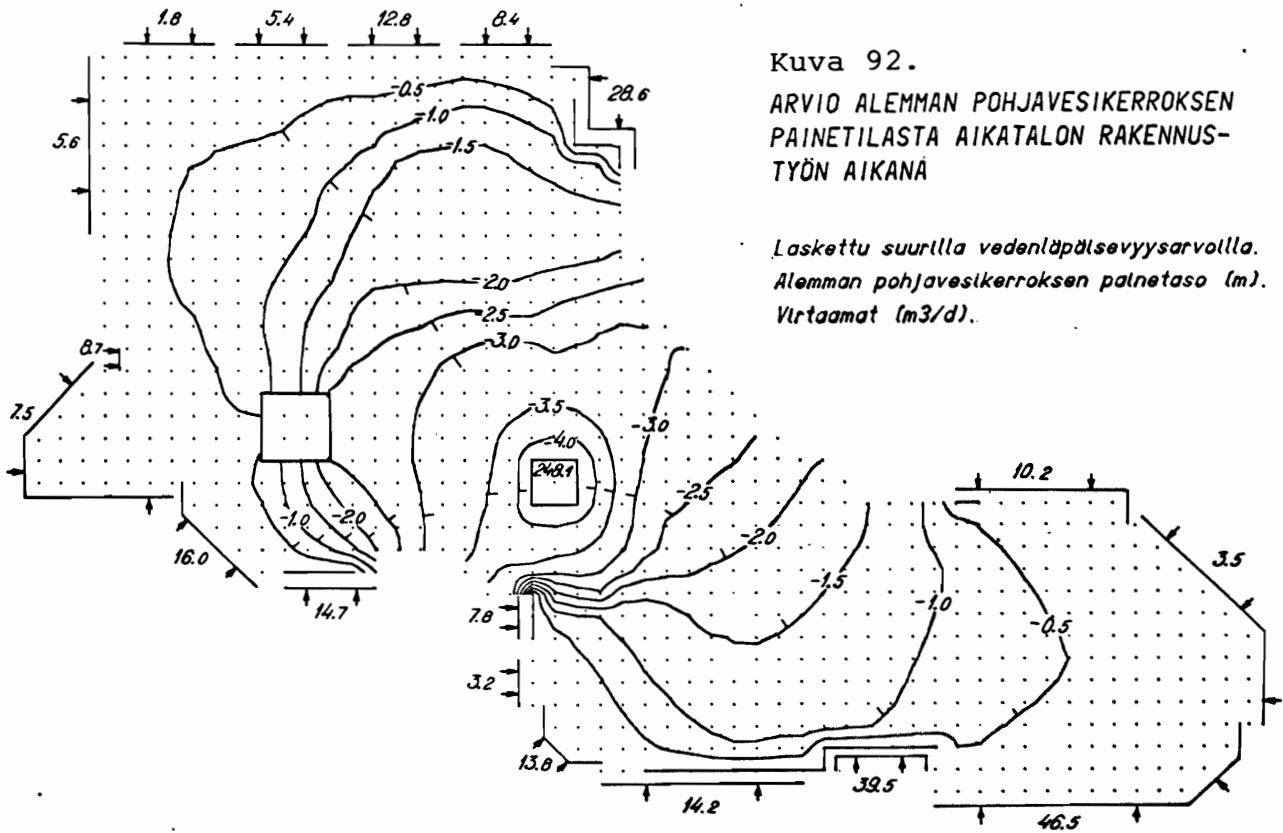
Kuva 90. Ponttiseinä 18.11.1958 rakennustyömaalla Kluuvikatu 4 (Helsingin kaupunginmuseon kuvakokoelmat).



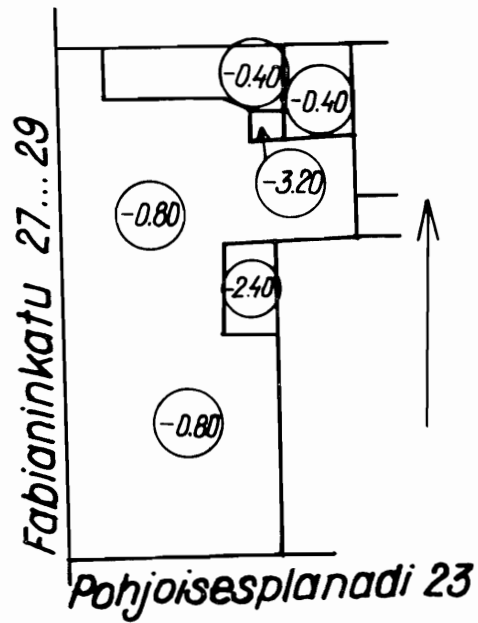
Kuva 91.
ARVIO ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETILASTA KLUUVIKATU 4:n RAKENNUS-
TYÖN AIKANA

*Laskettu suurilla vedenläpäisevyysarvoilla.
Alempaan pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d).*

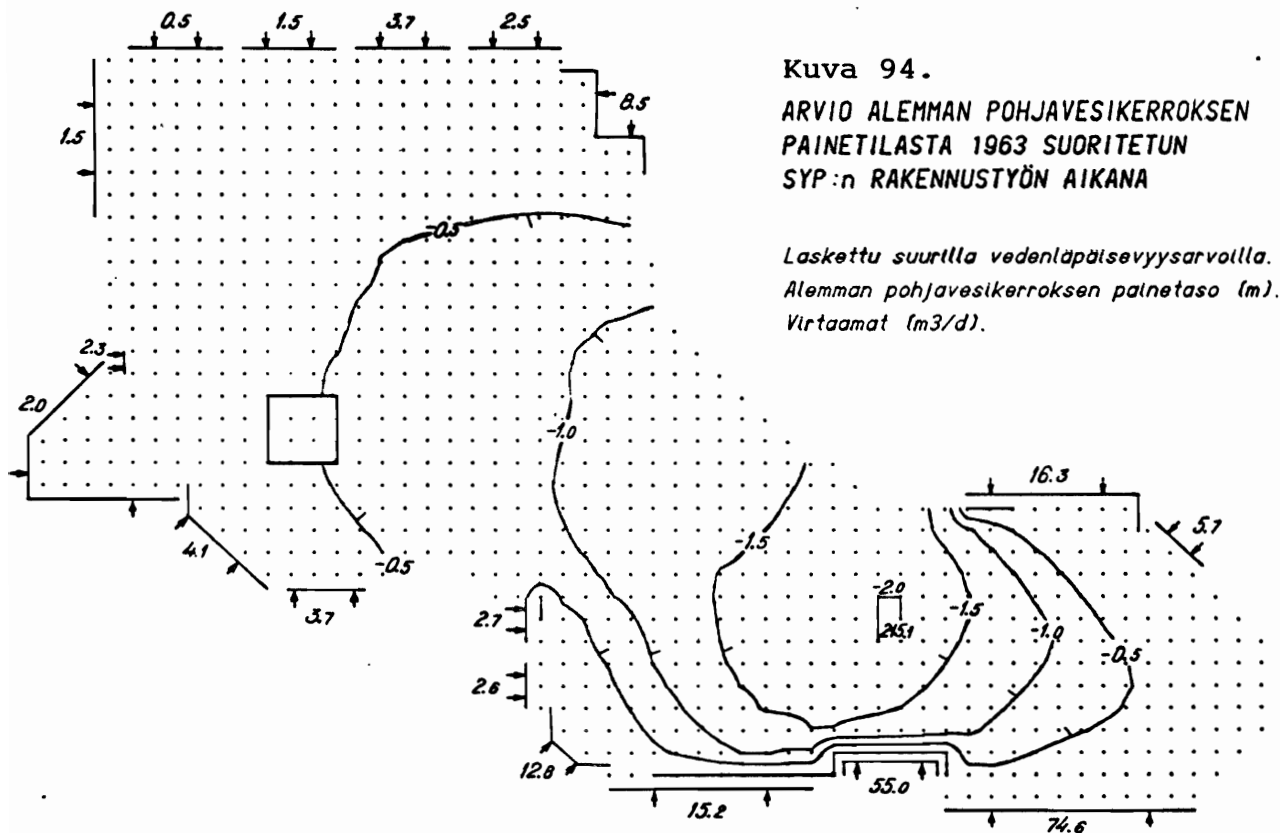
Aikatalon vuonna 1959 suoritetun pohjarakennustyön vaikutusta laskettaessa annettiin kahdeksaan solmupisteeseen painekorkeus - 4,5 m (NN) (kuva 92).



Suomen Yhdyspankin työmaalla (kuva 93) vuoden 1963 alkupuolella suoritetun pohjaveden pumppauksen vaikutuksen laskelmassa on annettu viiteen solmupisteeseen painekorkeus - 2,0 m (NN) (kuva 94).



Kuva 93. Fabianinkatu 27 - 29:n alin kellarikerros.



Kuva 94.

ARVIO ALEMMAN POHJAVESIKERROKSEN
PAINETILASTA 1963 SUORITETUN
SYP:n RAKENNUSTYÖN AIKANA

Laskettu suurilla vedenläpäisevyysarvoilla.
Alemman pohjavesikerroksen painetaso (m).
Virtaamat (m³/d).

Myös Aleksanterinkatu 48:n rakennustyö lieenee vaikuttanut 1950-luvun alussa alempaan pohjavesikerrokseen. Rakennuksen pannuhuoneen lattiataso on - 2,90 m (NN).

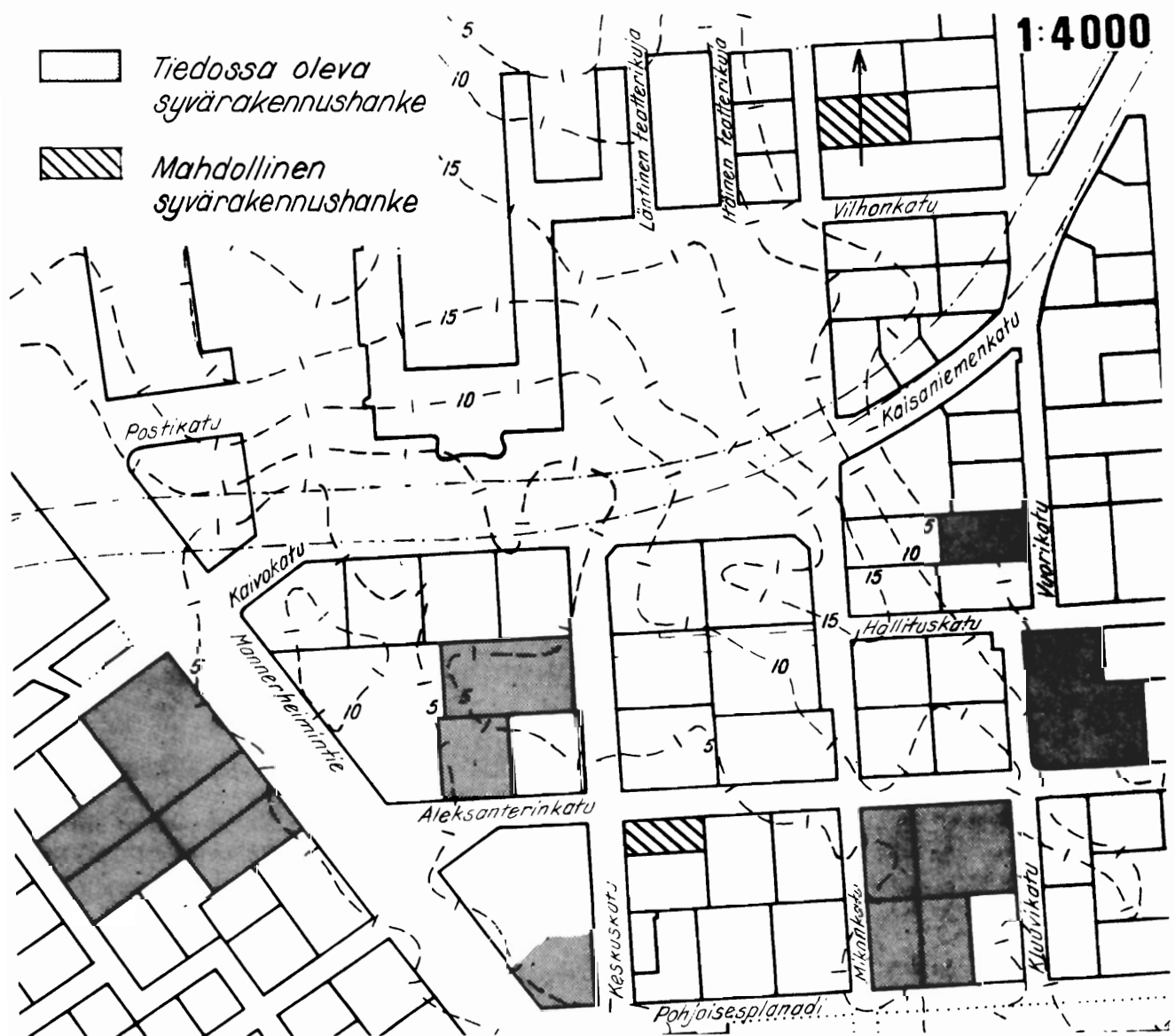
1960- ja 1970 -luvuilla on rakennettu useita syviä kallioon ulottuvia tai kallioon louhittuja kellareita. Kellaritilojen rakentaminen on toteutettu patoseinillä (kuva 95). Kaivannot ovat saattaneet vuotaa runsaasti patoseinien raoista ja kallion raoista. Tähän viittaavat muutamat geoteknillisen toimiston tekemät, hyvin matalat pohjaveden painetason havainnot (liite 1).



Kuva 95. City-Centerin rakennustyö.

7.4 Pohjaveteen vaikuttavat rakennustyöt tulevaisuudessa

Keskustan alueella on suunnitteilla lukuisia syvä-
kennushankkeita, jotka on esitetty kuvassa 96. Muita
suunnitteilla olevia pohjaveteen vaikuttavia rakennus-
hankkeita ovat mm. Rautatien torin alle tuleva paikoit-
ustila, osittain maan alla kulkeva keskustan kehä-
väylä ja sateen imeytymisalaa pienentävä Terassitori.



Kuva 96. Syvärakennushankkeet.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Pohjaveden pinta on laskenut entisen Kluuvilahden alueella viimeksi kuluneen sadan vuoden aikana 2...4 m. Pohjaveden painetasoa on tarkkailtu säännöllisesti vasta vuoden 1972 syyskuusta lähtien. Vuonna 1978 orsiveden ja alemman pohjaveden pinnan korkeutta mitattiin alueella 105 havaintoputken avulla säännöllisesti.

Orsiveden pinnan alenemisen vuoksi kymmenien rakennusten puuperustusten yläpäävät ovat joutuneet kuiville, ja nopea puun lahoaminen on päässyt käyntiin. Noin 15 rakennuksen perustukset on jouduttu saneeraamaan. Osa jäljellä olevista puuperustuksista on erittäin huonossa kunnossa, ja perustusten tuhoutumista tapahtuu koko ajan. Alueella on vielä yli 30 puupaaluilla osittain tai kokonaan perustettua rakennusta, joiden yhteenlaskettu tilavuus on noin 1,2 milj. m³. Näiden perustusten saneeraamisen hinnaksi on arvioitu 120 milj. mk.

Lähes kaikki alueen puuperusteiset rakennukset on katsottu kantakaupungin yleiskaavaehdotuksessa suojelukohteiksi. Monet suojeltaviksi katsotut rakennukset painuvat kuitenkin perustusten huonon kunnon vuoksi jatkuvasti, mistä aiheutuu erilaisia ulkonäkö- ja käyttöhaittoja ja jopa rakennusten turvallisuuden vaarantumista. Eräiden suojelukohteiden omistajat eivät olekaan halukkaita säilyttämään rakennuksia vaan suunnittelevat omistamiensa rakennusten purkamista ja uusien, tehokkaiden, syvälle ulottuvien rakennusten pystyttämistä. Alueella on voimassa rakennuskielto ja rakentaminen tapahtuu poikkeusluvilla. Uutta asemakaavaa suunnitellaan julkaistavaksi vuonna 1980. On ilmeistä, että lähitulevaisuudessa osa puuperusteisista taloista puretaan ja monien talojen perustukset joudutaan saneeraamaan. Säilytettävien rakennusten perustusten saneeraus- töihin olisi ryhdyttävä ajoissa, jotta painumat eivät pääsisivät rikkomaan rakennuksia korjauskelvottomiksi.

Pohjaveden aleneminen aiheuttaa myös maan painumista, mutta pohjavesitilanteen aiheuttamien painumien erottaminen muista syistä aiheutuvista painumista on vaikeaa. Vuoden 1974 toukokuusta alkaen asennettujen 29 painumalevyn keskimääräinen painumisnopeus on ollut 13,6 mm/a. Keskimääräisen painumisnopeuden suuruuden on aiheuttanut metrotunneleiden Kluuvin ruhjeen läpäisytyö, jonka vaikutusalueen ulkopuolella keskimääräinen painumisnopeus on ollut vain 3,4 mm/a. Painumat jatkuvat tulevaisuudessakin huomattavina, koska täytöistä, maanvaraisista rakenteista, liikennekuormista ja pohjaveden alenemisesta nykyiselle tasolleen aiheutuvat konsolidaatio- ja jälkipainumat eivät ole vielä ehtineet tapahtua loppuun, joten katujen viemäreiden, vesi-, kaasuja lämpöjohtojen sekä muiden rakenteiden vaurioita on odotettavissa.

Metron ja sen läheisyydessä sijaitsevien syvien maanalaisten tilojen vuodot on mitattu vuoden 1974 heinäkuusta lähtien. Kyseiset kellaritilat ovat vuotaneet ennen metron rakentamista tiettävästi huomattavasti enemmän, mutta metron rakentamisen alkuvaiheissa kellareita tiivistettiin, jolloin pohjaveden painetaso nousi lyhytaikaisesti jopa noin metrin. Metron rakentamisen edistyesä ja metron vuotojen kasvaessa pohjaveden painetaso las-ki ennalleen, mutta kellaritilojen ja metron tiivistämi-sen vuoksi pohjavesitilanteessa ei siis tapahtunut etukä-teen pelättyä painetason laskua aikaisempaa alemmaksi. Tässä tutkimuksessa ei onnistuttu selvittämään pohjave-den painetason ja vuotojen kehitystä ennen tarkkailujär-jestelmää. Eräät kairausten yhteydessä tehdyt pohjavesi-havainnot viittaavat kuitenkin siihen, että pohjaveden painetaso on ollut 1950- ja 1960-luvulla jopa huomatta-vasti nykyistä alempana kellareiden suurten vuotojen ja rakennusaikaisten pohjavesipumppausten vuoksi.

Erilaisten vuotojen ja pumppausten vaikutusta alempaan pohjavesikerrokseen on selvitetty elementtimenetelmään

perustuvalla laskentamallilla. Mallissa ei tarvitse tehdä yleisissä matemaattisissa laskentatavoissa tehtyjä yksinkertaistuksia. Vettä läpäisevän kerroksen pak-suutta voidaan muunnella kussakin solmupisteessä, ja kussakin elementissä voidaan muunnella vedenläpäisevyysarvoa. Myös pohjavesialtaan muoto ja laajuus voidaan valita pohjatutkimustietoja vastaaviksi. Edelleen mallissa voidaan tutkia halutulla tavalla yhdistellen erilaisten vuotojen, tiivistysten ja syöttöpumppausten vaikutusta pohjavesialtaaseen.

Laskelmien aluksi rakennettiin Kluuvin ruhjeen kohdalla sijaitsevan koepumppauspaikan ympärille erillinen elementtiverkko. Koepumppaustulosten perusteella laskettiin elementeille vedenläpäisevyysarvot. Alemmalle pohjavesikerrokselle saatiin täten melko suuri vedenläpäisevyys ($k = 4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s). Vedenläpäisevyysarvon suuruusluokka pysyi samana myös koko pohjavesialtaan alueella rakennetussa suuressa elementtiverkossa. Suuren elementtiverkon vedenläpäisevyysarvot haettiin siten, että vuotokohtiin annettiin aluksi pohjavesitarkkailussa mitatut vuodot. Vedenläpäisevyysarvoja muuntelemalla pyrittiin pohjaveden painetaso mallissa saamaan luonnossa havaitulle tasolle. Täten määritetyt vedenläpäisevyysarvot vaihtelevat elementeissä välillä $3 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyys on ilmeisesti mallin alueella kauttaaltaan näin suuri. Alueen maakerrosten vedenläpäisevyys on arvioitu tutkimuksissa usein pienemmäksi. Alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyys muodostuu näin suureksi ilmeisesti kallion rakoisuuden ja lähellä kallion pintaa sijaitsevien, pohjatutkimuksissa helposti piiloon jäävien, vettä hyvin läpäisevien kerrosten vuoksi.

Kellaritilojen ja metron vuodot aiheuttavat pohjaveden painetason alentumista koko pohjavesialtaan alueella. Alen-

tumista on verrattu laskentamallin reunoilla annettuun tasoon -0,6 ... -0,2 m (NN), jolle painetason on katsottu alentuneen sateen imeytymisalan pienenemisen ja orsi-vesivuotojen vuoksi. Laskelmissa on analysoitu viiden kellaritilan ja metron vuotojen vaikutusta alempaan pohjavesikerrokseen. Yksittäisen kellaritilan vuotojen alemman pohjavesikerroksen painetasoa alentavaksi vaikutukseksi saatiin 20 ... 400 mm vuotokohtien läheisyydessä. Yhteenlaskettuna nämä kellaritilat aiheuttavat 400 ... 650 mm suuruisen painetason aleneman metrolinjan kohdalla. Metron vuotojen vaikutukseksi saatiin metrolinjan kohdalla 700 ... 900 mm.

Laskentamallin reunaehdoja määrättäessä pyrittiin ottamaan huomioon, millä alueilla pohjavettä pääsee syntymään. Eräät reunan osat on arvioitu vettä läpäisemättömiksi, jotta näiltä reunoilta ei virtaa mallin alueelle lainkaan korvausvettä. Suurin osa altaan korvausvedestä virtaa malliin pohjoisreunalta, jossa pohjavettä syntyy merestä, ratapiha-alueen ja Kaisaniemen puiston sadealueelta sekä eteläreunalta, jossa pohjavettä on oletettu syntyvän merivedestä.

Mallilla arvioitiin myös metron tiivistysten vaikutusta. Eräiden metron vuotokohtien läheisyydessä sijaitseviin solmupisteisiin annettiin laskelmissa yhteensä 10 ... 14 m³/d vuodot. Jos nämä vuodot saataisiin injektoinneilla lakkaamaan, ulottuisi tiivistystyön pohjavettä nostava vaikutus laajalle altaan alueella ja olisi metrolinjan kohdalla laskelmien mukaan noin 200 ... 300 mm.

Koska vanhoista syvälle ulottuneista pohjarakennustoista ja niiden vaikutuksesta pohjaveteen saatiin kerätyksi vain erittäin vähän tietoja, pyrittiin pohjaveden painetason historiaa arvioimaan laskelmilla. Eräiden vanhojen rakennuskuoppien kohdalle annettiin mallissa painetaso, jolle pohjaveden arvioitiin laskeneen rakennuskuopan vä-

littömässä läheisyydessä. Laskelmilla saatiin arvio, kuinka pohjavesi olisi alentunut koko pohjavesialtaan alueella. Laskelmista saatiin tulokseksi myös, kuinka paljon kuoppaan olisi tällöin virrannut vettä alemmasta pohjavesikerroksesta ja miten vuotovesi olisi korvautunut mallin reunoilla. Laskelmien mukaan painetaso on ollut useiden rakennustöiden aikana huomattavan alhaalla. Vaikka nämä laskelmat eivät ole tarkkoja lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi, voidaan todeta, että pohjaveden painetaso on laskenut menneinä vuosikymmeninä useaan kertaan huomattavan alas alueella suoritettujen 18 syvälle ulottuneen rakennustyön aikana. Näissä 18 rakennustyössä on monissa ollut useita pohjavettä alentaneita rakennusvaiheita.

Laskentamallilla saatavia alemman pohjavesikerroksen virtausta selvittäviä tuloksia voidaan tarkentaa useilla keinoilla:

- a. Pohjaveden kuluttajia voi löytyä lisää, ja vuotovesimittauksia voidaan tarkentaa.
- b. Pohjaveden korvautuvuutta voidaan selvittää merkkiaineiden avulla suoritettavilla virtaustutkimuksilla ja analysoimalla pohjaveden painetasossa tapahtuvia muutoksia sekä sateiden, lumen sulamisen, meriveden korkeuden ja pumppausten vaikutusta jatkuvasti.
- c. Mallilla voidaan suorittaa myös ajasta riippuvia laskelmia. Ajasta riippuvien laskelmien teko edellyttää kuitenkin varastokertoimen määrittystä elementteihin ja useita ajasta riippuvia, tarkasti havainnoituja pumppauksia, joiden perusteella malli saadaan kokeilevilla laskelmilla antamaan tarkkoja ennusteita myös ajasta riippuvista pumppauksista.
- d. Kehittämällä muistitilaa säästäviä ratkaisumenetelmiä saataisiin tietokoneeseen sopimaan myös tiheämpi elementtiverkko, jolloin tulokset paranisivat varsinkin vuotokohtien välittömässä läheisyydessä. Myös pienillä

tietokoneilla voidaan tehdä vastaavia laskelmia, jos käytetään esimerkiksi eksplisiittistä diffrenssimennetelmää /28/.

Pohjaveden painetaso laskenee tulevaisuudessa sateen imeytymisalan pienentyessä ja uusien syvärakennushankkeiden toteutuessa. Mikäli kiinteistöjen omistajat eivät ryhdy entistä laajempiin toimiin puuperustusten suojelemiseksi syöttämällä orsivettä vesijohtovedellä, merivedellä tai sadevedellä /6/, useita rakennuksia, joiden puuperustukset ovat tällä hetkellä riittävän syvällä, joudutaan purkamaan tai ainakin useiden rakennusten perustukset joudutaan rakentamaan uudelleen tulevaisuudessa. Koko altaan orsiveden pinnan nostamisen esteenä on vuotojen ja vuoto-kohtien huomattava lisääntyminen orsiveden pinnan noustessa. Rakennuksen perustusten kohdalla orsiveden pintaa voidaan nostaa paikallisesti huomattavasti pienemmillä vesimäärillä.

Uusien rakennustöiden aiheuttamiin rakennusaikaisiin ja pysyviin vuotoihin on syytä kiinnittää erityistä huomiota. Vaikka rakennustyön vaatima pohjaveden alennus kestäisi mahdollisimman lyhyen ajan ja paalujen kuivillaoloaika muodostuisi täten lahoamisen kannalta mitättömän lyhyeksi, aiheuttaa pohjaveden alennus aina kuormitusta maakerroksille, jolloin maan pinta ja monien talojen maanvaraiset lattiat sekä paalujen lahoamisen vuoksi lähes maanvaraiset perustukset saavat herkästi suuria vahinkoja aiheuttavia painumia. Ennen kutakin pohjaveden alennusta tulisi selvittää pohjaveden alentamisen aiheuttamat vaaratekijät. Vahingonvaara tulisi minimoida työn nopealla suorituksella ja pohjaveden syötöllä. Pohjaveden alentamisesta mahdollisesti aiheutuvat vahingot tulisi selvittää tarkkailu- ja katselustoimilla. Kunkin rakentamisen osapuolen vastuu pohjaveden alentamisesta todennäköisesti ja mahdollisesti aiheutuvista vahingoista tulisi selvittää jo ennen rakentamiseen ryhtymistä. Pohjaveden lyhytaikaisestakin alentamisesta tu-

lisi luopua, jos vahingot todennäköisesti muodostuisivat suuriksi. Tarkoilla suunnitelmilla ja rakennustyön huolellisella toteutuksella on mahdollista saada uudet syvälle ulottuvat tilat erittäin tiiviiksi. Tiiveyden aikaansaamiseksi on varauduttava kuitenkin huomattaviin lisäkustannuksiin. Uuteen, vuonna 1980 julkaistavaan alueen asemakaavaan on suunniteltu määräyksiä myös rakennusaikaisista ja pysyvistä vuodoista.

Alueen pohjasuhteet ovat erittäin vaihtelevat, ja syvärakennushankkeen sijainnilla on suuri merkitys arvioitaessa pohjavesitilanteelle aiheutuvia rakennusaikaisia ja pysyviä haittoja. Myös viereisten rakennusten perustamistapa aiheuttaa rajoituksia. Jatkuvalle hyvin hoidetulla pohjavesitarkkailulla opitaan tuntemaan pohjavesialtaan ominaisuuksia yhä tarkemmin, minkä seurauksena pystytään estämään todella vaaralliset hankkeet ja pystytään saavuttamaan suuria säästöjä sallimalla pohjaveden alennuksia, joiden aiheuttama vahingonvaara voidaan arvioida pieneksi.

9. YHTEENVETO

Entisen Kluuvinlahden pohjavesialtaassa on kaksi savikerroksen erottamaa pohjavesikerrosta: orsivesi-kerros ja alempi pohjavesikerros. Alueen pohjasuhteet, painumisominaisuudet ja vedenläpäisevyysominaisuudet tunnetaan melko hyvin eri rakennustöiden yhteydessä tehtyjen pohjatutkimusten perusteella.

Orsiveden pinta ja alemman pohjavesikerroksen painetaso ovat laskeneet alueella 2...4 m viimeksi kuluneen sadan vuoden aikana. Tästä on aiheutunut ja aiheutuu jatkuvasti huomattavia vahinkoja. Noin viidentoista rakennuksen perustukset on jouduttu saneeraamaan. Alueella on vielä yli 30 puupaaluilla osittain tai kokonaan perustettua rakennusta, joiden yhteenlaskettu tilavuus on noin 1,2 milj. m³. Paalut ovat osittain huonokuntoisia ja lahoamista tapahtuu koko ajan. Pohjaveden aleneminen aiheuttaa myös maan kokoonpuristumista, jonka seurauksena maanvaraiset rakenteet saavat muodonmuutoksia ja rikkoontuvat.

Vuonna 1972 alueella aloitettiin säännöllinen pohjavesitarkkailu. Alueella oli vuoden 1978 alussa yhteensä 105 pohjaveden havaintoputkea, 27 painumalevyä, 8 painumatarkkailukorttelia ja 6 vuotovesitarkkailuun kuuluvaa maanalaista tilaa.

Erilaisten vuotojen, tiivistysten ja syöttöpumppausten vaikutuksen selvittämiseksi on tutkittu alemmassa pohjavesikerroksessa tapahtuvaa virtausta elementtimenetelmään perustuvalla laskentaohjelmalla. Vuotovesimittauksiin perustuen alueelle on haettu laskennallisesti alemman pohjavesikerroksen vedenläpäisevyysarvot. Mallin muokkaustilanteen vuotojen yksittäisistä vaikutuksista on tehty eritellyt laskelmat. Myös metron tiivistämisen vaikutusta on arvioitu.

Rakennusaikaiset pohjaveden pumppaukset ovat alenta-

neet orsiveden pintaa ja alemman pohjavesikerroksen painetasoa huomattavasti. Orsiveteen vaikuttaneita rakennustöitä on ollut lähes jatkuvasti käynnissä. Kahdeksantoista rakennustyön on arvioitu alentaneen myös alemman pohjavesikerroksen painetasoa. Koska pohjaveden painetason kehityksestä menneinä vuosikymmeninä saatiin kootuksi vain erittäin vähän tietoja, arvioitiin eräiden vanhojen pohjarakennustöiden aikaista alemman pohjavesikerroksen painetasoa laskentamallin avulla. On ilmeistä, että pohjaveden painetaso on ollut huomattavan alhaalla useiden rakennustöiden aikana.

ENGLISH SUMMARY

In the very Centre of the City of Helsinki there are two aquifers separated by a bed of clay, viz. the water table aquifer and the artesian aquifer. The piezometric head in both aquifers has lowered 2...4 metres in approximately one hundred years. The lowering has caused a lot of damage. Standing above the piezometric head of the water table aquifer, the upper parts of timber piles beneath many old houses are decaying very rapidly. The foundations have been strengthened in about fifteen buildings now; there are, however, still thirty or more buildings on timber piles.

Ever since the year 1972 the groundwater level has been observed regularly. The observation system of the Centre consists of 105 observation tubes, 27 settlement plates, eight quarters provided with settlement observation points and the water-meters of six leakage pumps.

The pumping of groundwater during underground constructions has lowered the piezometric head considerably. The head of the water table aquifer has been lowered by continuous construction activities, as well as by many leakage pumps. It has been estimated that also the head of the artesian aquifer has been lowered during eighteen underground construction projects.

The groundwater flow has been calculated by a finite element aquifer model. On the basis of the leakage measurements and the piezometric head observations a search has been made for permeability coefficient in different parts of the artesian aquifer. The influence exerted by separated leaking points upon the piezometric head has been calculated.

KIRJALLISUUS

- 1 Aalto J., A Finite Element Aquifer Model, which takes into Account Elevation Changes of the Aquifer. Nordic Hydrology 3 (1978).
- 2 Airaksinen J., Pohjaveden virtaus kaivoon. Insinööri-järjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 125 - 75. Helsinki 1975.
- 3 Anttikoski U., Hartikainen J., Saarelainen S., Metro-byggets inverkan på grundvattnet inom Helsingfors innerstadsområde. Nordisk geoteknikermøde i København 22...24.5.1975. Polyteknisk Forlag 1975.
- 4 Anttikoski U., Perustusten saneeraus. Rakennustekniikka 7 (1977) s. 471...474.
- 5 Bieske E., Handbuch des Brunnenbaus. Berlin-Konradshöhe, Verlag Rudolf Schmidt. Band I 1960, 42 s. Band II 1965, 1279 s. Band III 1958, 336 s.
- 6 Cederwall K., Eriksson A., Dimensionering av infiltrationsmagasin enligt regnenvelopemetoden. Väg- och vattenbyggaren 4 (1977) s. 19...23.
- 7 Cederwall K., Larssen P., Hydraulik för väg- och vattenbyggare. Lund, LiberLäromedel, 1976.
- 8 Dachler R., Grundwasserströmung. Wien, Verlag von Julius Springer, 1936. 141 s.
- 9 Davis S.N., DeWiest R.J.M., Hydrogeology. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1966. 463 s.
- 10 Ferris J.G., Knowles D.B., Brown R.H., Stallman R.W., Theory of Aquifer Tests. Geological Survey Water-Supply Paper 1536 - E (1962).
- 11 Fuchs E., Baugrube und Wasserhaltung. Berlin, Verlag für Bauwesen. 1967. 231 s.
- 12 Hanna T.H., Foundation Instrumentation. 1. painos. TransTech S.A. 1973. 372 s.
- 13 Hartikainen J., Helsingin metron pohjavesitarkkailujärjestelmä. Vesitalous 1 (1974).
- 14 Harr M.E., Groundwater and Seepage. New York, Mc-Graw-Hill, 1962. 315 s.
- 15 Heath R.C., Trainer F.W., Introduction to Ground-Water Hydrology. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1968. 284 s.
- 16 Helenelund K.V., Maarakennusmekaniikka. 4. painos. Otaniemi 1974. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta/Otapaino. Moniste 137. 277 s.

- 17 Juhola M.O., Raveala T., De nya grunderna under det gamla Helsingfors: Tekniskt forum 4 (1961) s. 80...86.
- 18 Juhola M.O., Yllättäviä vaurioita perustuksissa. Rakennustaito 17(1977) s. 6...14.
- 19 Kauranne L.K., Gardemeister R., Korpela K., Mälkki E., Rakennusgeologia II. Otaniemi 1972. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta/Otapaino. Moniste 304. 503 s.
- 20 Kézdi A., Markó I., Erdbauten, Standsicherheit und Entwässerung. 1. painos. Düsseldorf, Werner- Verlag, 1969. 403 s.
- 21 Kluuvin ruhjeen jäädytystyön vaikutus ympäristön maa- kerroksiin. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto. Geoteknillinen toimisto.
- 22 Lehtipuu E., Teiden kuivatus. Otaniemi 1976. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Kurssimoniste T 5, tietekniikka. 215 s.
- 23 Lindskoug N.-E., Nilsson L.-Y., Grundvatten och byggande. Tukholma. Rapport R 20: 1974. 164 s.
- 24 Lisitzin E., The Frequency distribution of the sea-level heights along the Finnish coast. Merentutkimuslaitoksen julkaisu 190. Helsinki 1959. 37 s.
- 25 Permeabilitet och kapillaritet. Förslag till geotekniska laboratorieanvisningar, del 8. Byggeforskningens informationsblad B 7: 1972. 44 s.
- 26 Pohjarakennus. Suomen Rakennusinsinöörien liitto, RIL 95. Helsinki 1974. 459 s.
- 27 Polubarina - Kochina P., Theory of Ground Water Movement. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1962. 613 s.
- 28 Prickett T.A., Lonquist C.G., Aquifer simulation Model for Use on Disk Supported Small Computer Systems. Illinois State Water Survey. Urbana 1973. 21 s.
- 29 Rakennustekniikan käsikirja. Helsinki, Tammi. Osa I 1969, Osa II 1970. 1279 s.
- 30 Rissanen P., Perustusten vahvistaminen Mega-paaluilla. Rakennustekniikka 3 (1969) s. 122...125.
- 31 Soveri U., Kauranne L.K., Rakennusgeologia I, Suomen rakennusgeologia. 3. painos. Otaniemi 1972. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta/Otapaino. Moniste 272. 194 s.
- 32 Todd D.K., Ground Water Hydrology. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1959. 336 s.

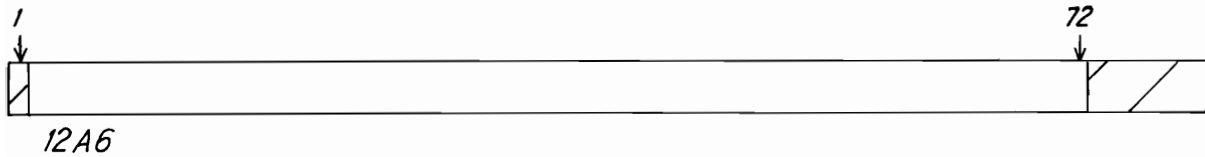
- 33 Verruijt A., Theory of Groundwater Flow. London, MacMillan and Co. Ltd., 1970. 190 s.
- 34 Zienkiewicz O.C., The Finite Element Method in Engineering Science, London, Mc Graw - Hill, 1971. 521 s.
- 35 Översiktlig utredning om grundläggningsförhållandena för innerstaden. Stockholms Fastighetskontor, Sanningsavdelningen. Julkaisematon raportti, Tukholma 1976.
- 36 Tikkanen H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Espoo 1978.

Liite 2. Kluuvin ruhjeen koepumppauksen yhteydessä tehdyn kemiallisen vesianalyysin tulokset.

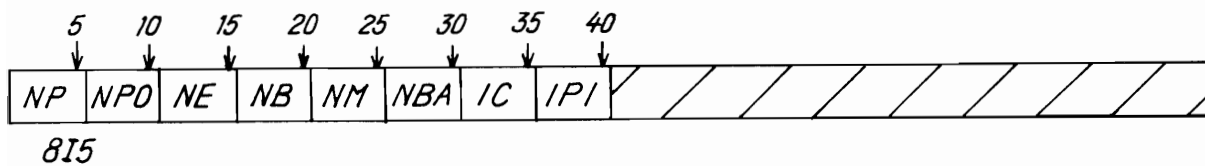
Piste	x = 18512, y = 49757		x = 18528, y = 49730					
Näyte- syvyys	1,70 m	18,25 m	1,70 m	15,95 m				
Ottoaika	1.11.1972	2.11.1972	5.12.1972	7.12.1972				
Yksikkö	mg/l	mval/ml	mg/l	mval/ml	d°	mg/l	mval/ml	d°
pH	7,2		7,4		7,3		7,6	
Kovuus			4,5(Ca ²⁺)12,7		4,4(Ca ²⁺)12,5			
HCO ₃			591,7 9,7		27,2 341,6 5,6		15,7	
CO ₂			24,0 0,55		23,8 0,54			
SO ₄ ²⁻	1,65	15,4	26,4	1,7(S ⁶⁻)	22,8	1,4(S ⁶⁻)		
Fe ²⁺	0,64	0,09	20	0,71	0,10	0,003		
Ca ²⁺	141	78	92	4,6	86	4,3		
Cl ⁻	308	210	81	2,3	122	3,4		
Mg ²⁺			30	2,4	25	2,0		
Na ⁺			215	8,9	130	5,7		
K ⁺			38	0,98	14	0,36		
Mn ²⁺	0,68	1,80	0,95	0,03	2,1	0,077		
Alkalini- teetti	1,06	0,53						
Haihdutus- jäännös	1110	816	1019	638				

Liite 3. Laskentaohjelman lähtötietokorttien rakenne

1 OTSIKKOKORTTI



2 LUKUMÄÄRÄTIETOKORTTI



NP solmupisteiden lukumäärä

NPO tulostussolmupisteiden lukumäärä

NE elementtien lukumäärä

NB reunaehtosolmupisteiden lukumäärä

NM materiaalien lukumäärä

NBA nauhanleveys

$$NBA = N_d + 1$$

missä

$$N_d$$
 elementtiverkossa esiintyvä suurin elementin solmupisteiden numeroiden erotus

IC laskentatyyppi:

IC = 0 lasketaan vain stationaarinen ratkaisu

IC = 1 lasketaan ajasta riippuva laskenta, jonka lähtötilanteeksi lasketaan stationaarinen ratkaisu

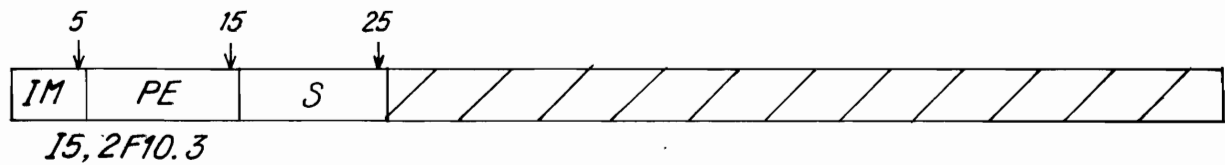
IC = 2 lasketaan ajasta riippuva laskenta, jonka lähtötilanteeksi annetaan painekorkeudet solmupisteittäin

IPI piirtämistarve:

IPI = 0 laskennan lähtötietoja ja tuloksia ei tallenneta tietokoneen muistiin piirtämistä varten

IPI = 1 lähtötiedot ja tulokset tallennetaan muistiin

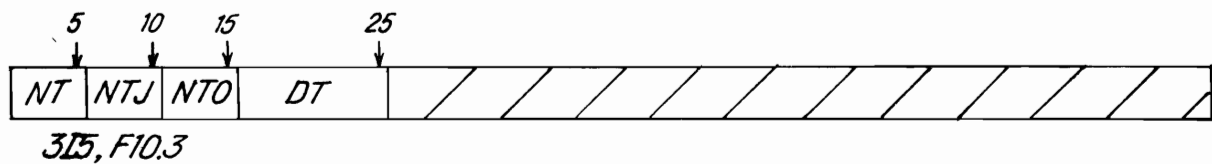
3 MATERIAALITIIETOKORTIT



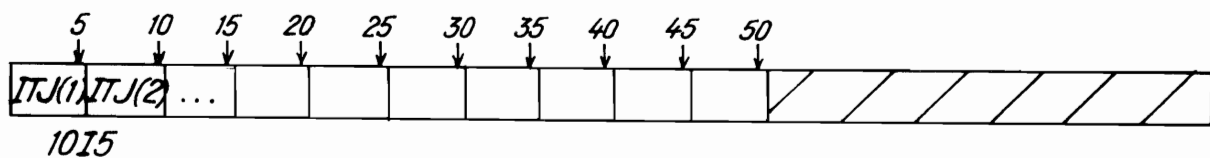
IM materiaalinumero
 PE vedenläpäisevyysarvo
 S varastokerroin

4 AIKAINTEGROINTITIIETOKORTIT

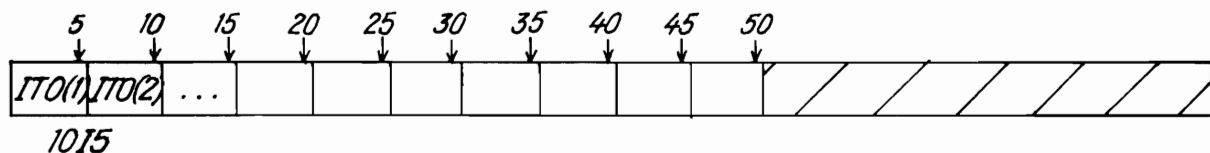
Annetaan, jos lukumäärätietokortissa IC $\neq$ 0 .



NT aika-askelien lukumäärä
 NTJ niiden hetkien lukumäärä, joina tapahtuu muutos reunaehdoissa
 NTO tulostushetkien lukumäärä
 DT aika-askeleen pituus



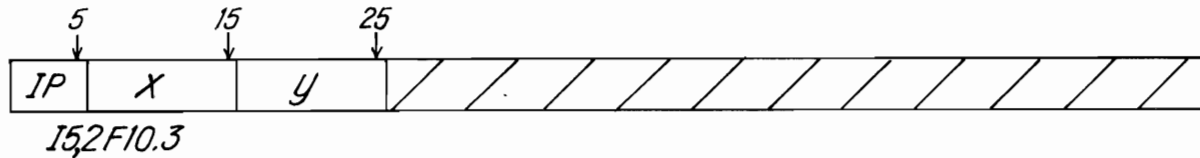
ITJ(i) ilmaisee, kuinka monen aika-askeleen päästä reunaehdoissa tapahtuu muutos i



ITO(i) ilmaisee, kuinka monen aika-askeleen päästä tapahtuu tulos i

5 SOLMUPISTEIDEN KOORDINAATIT

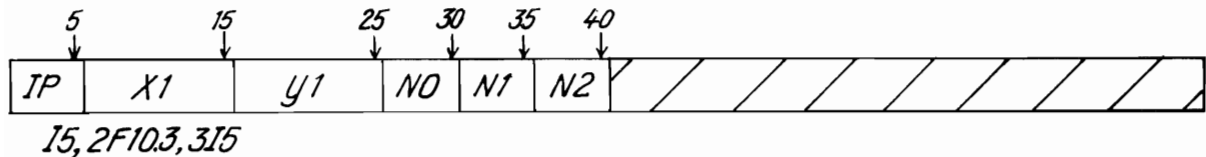
5.1 Solmupisteiden koordinaattien antaminen yksitellen



IP solmupisteen numero

X, Y solmupisteen koordinaatit vaakatasossa

5.2 Generointi viivaa pitkin



IP ensimmäisen generoitavan solmupisteen numero

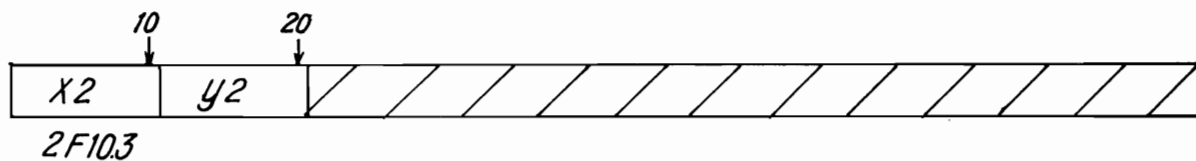
X1, Y1 ensimmäisen generoitavan solmupisteen koordinaatit

N0 generointialueen muotoa kuvaavien pisteiden lukumäärä
(2 tai 3)

N1 generoitavien solmupisteiden lukumäärä

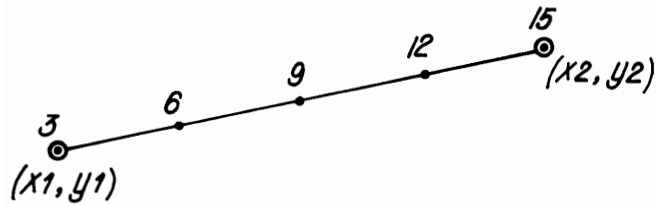
N2 solmupisteiden lisäys generoinnissa

Jos N0 = 2, seuraava kortti:



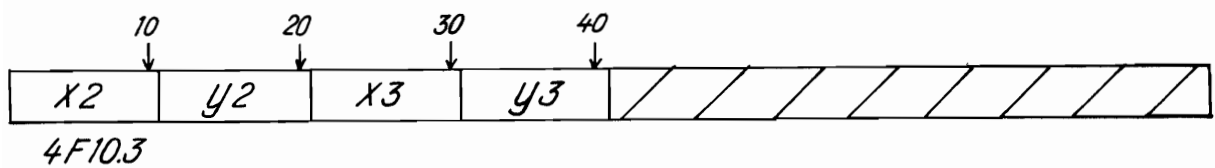
X2, Y2 viimeisen generoitavan solmupisteen koordinaatit

Esimerkki 1. IP = 3, N0 = 2, N1 = 5, N2 = 3 (kuva 1).



Kuva 1. Generointi viivaa pitkin.

Jos $N_0 = 3$, seuraava kortti:

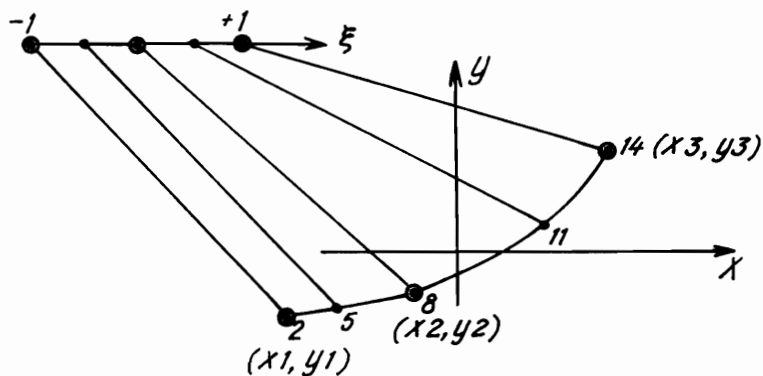


x_2, y_2 generointikäyrän keskipiste ξ -koordinaatistossa ilmaistuna x - y -koordinaatistossa

x_3, y_3 generointikäyrän päätepisteen koordinaatit x - y -koordinaatistossa

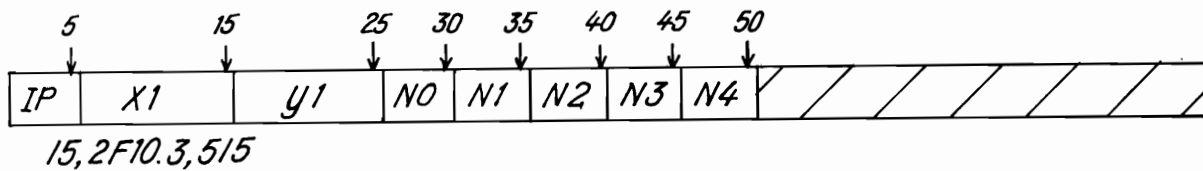
Muunnos x - y -koordinaatistoon suoritetaan kolmisolmuisen isoparametrisen viivaelementin muotofunktiota käyttäen

Esimerkki 2. $IP = 2$, $N_0 = 3$, $N_1 = 5$, $N_2 = 3$ (kuva 2).



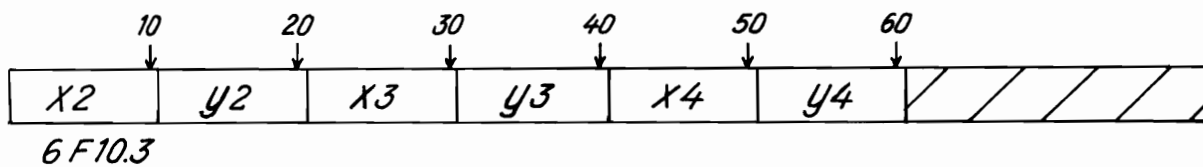
Kuva 2. Generointi kolmisolmuisen isoparametrisen viivaelementin avulla.

5.3 Generointi pintaa pitkin

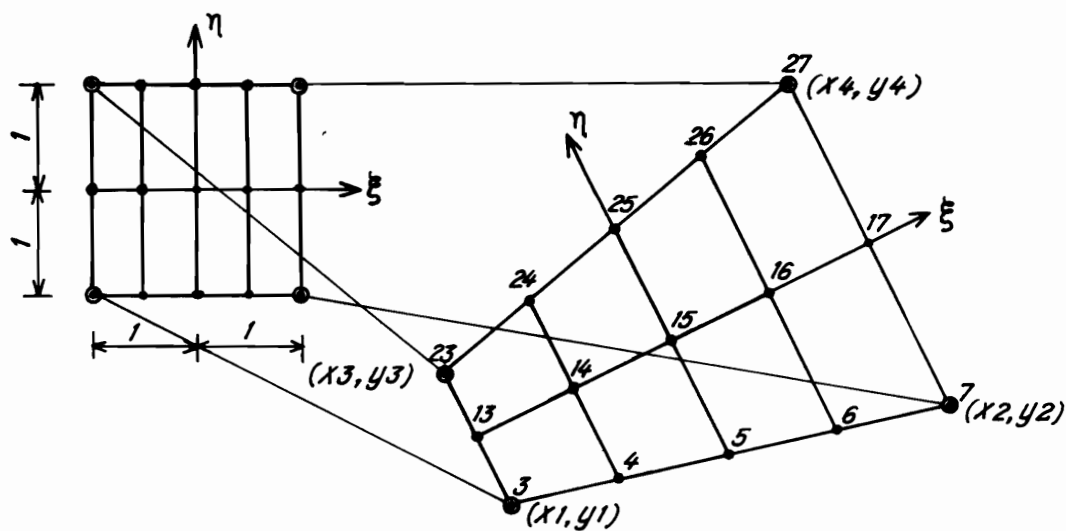


- IP ensimmäisen generoitavan solmupisteen numero
 N0 generointialueen muotoa kuvaavien pisteiden lukumäärä (4 tai 8)
 N1 generoitavien solmupisteiden lukumäärä ξ -suunnassa
 N2 generoitavien solmupisteiden lukumäärä η -suunnassa
 N3 solmupisteen numeron lisäys ξ -suunnassa
 N4 solmupisteen numeron lisäys η -suunnassa

Jos $N0 = 4$, seuraava kortti:

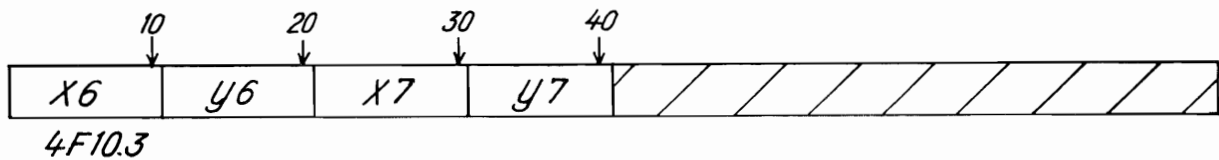
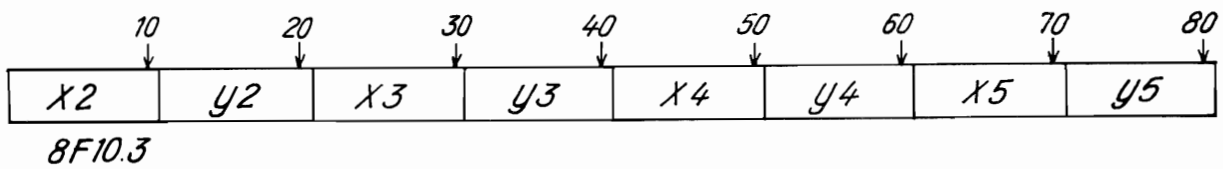


Esimerkki 3. $IP = 3$, $N0 = 4$, $N1 = 5$, $N2 = 3$, $N3 = 1$, $N4 = 10$
 (kuva 3).



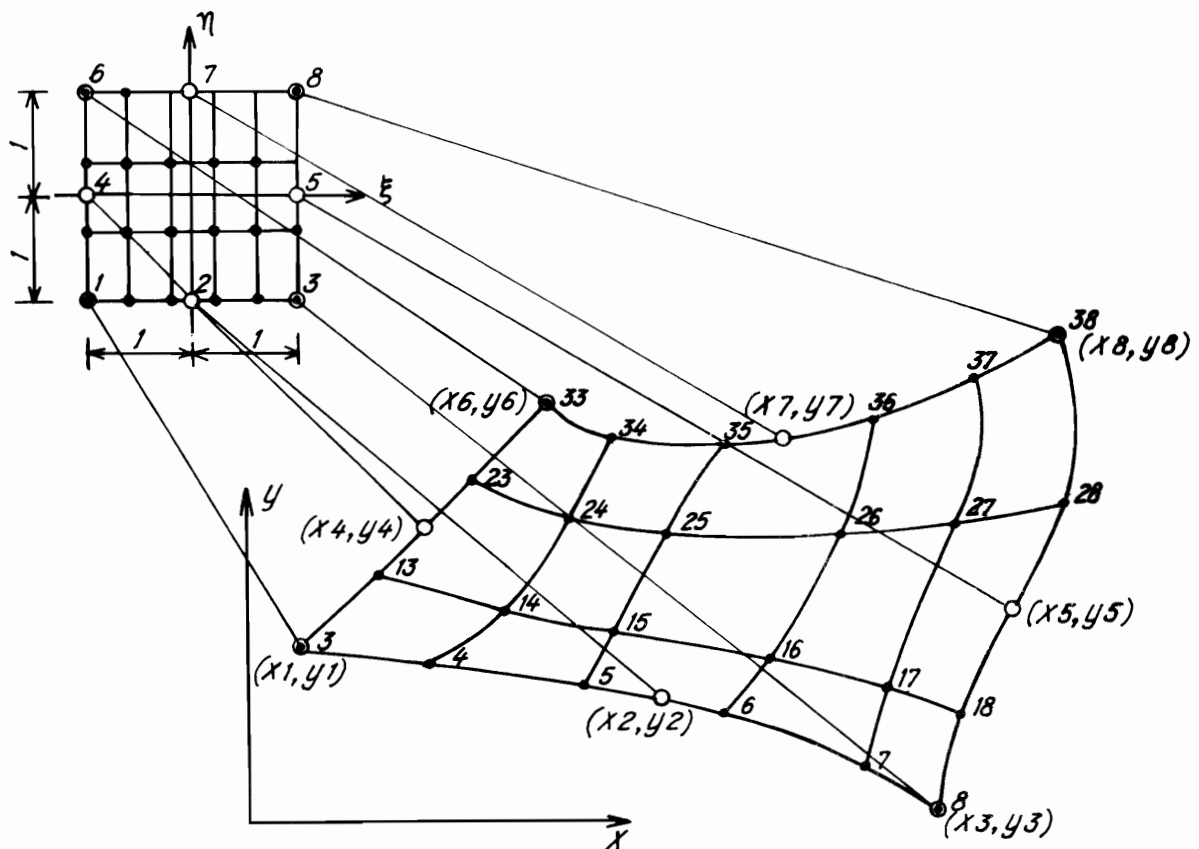
Kuva 3. Generointi nelisolmuisen isoparametrisen tasoelementin avulla.

Jos $N_0 = 8$, seuraavat kortit:



Generointi suoritetaan siten, että solmupisteet jaetaan tasavälein ξ -suunnassa ja η -suunnassa. Muunnos x - y -koordinaatistoon suoritetaan 8-solmuisen isoparametrisen nelikulmioelementin muotofunktiota käyttäen.

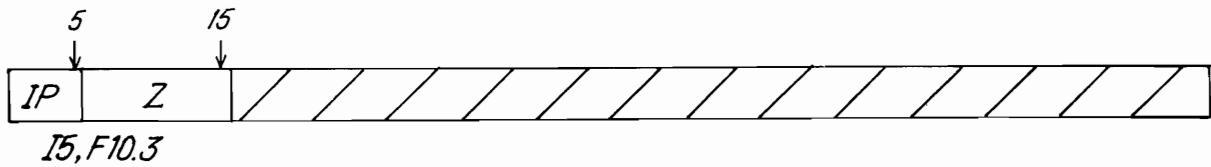
Esimerkki 4. $IP = 3$, $N_0 = 8$, $N_1 = 6$, $N_2 = 4$, $N_3 = 1$, $N_4 = 10$ (kuva 4).



Kuva 4. Generointi kahdeksansolmuisen isoparametrisen nelikulmioelementin avulla.

6 SOLMUPISTEIDEN Z-KOORDINAATIT

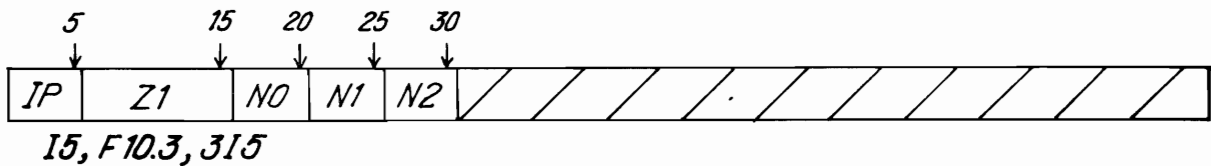
6.1 Solmupisteiden z-koordinaattien antaminen yksitellen



IP solmupisteen numero

Z vettä läpäisevän kerroksen keskipinnan korkeus

6.2 Generointi viivaa pitkin



IP ensimmäisen generoitavan solmupisteen numero

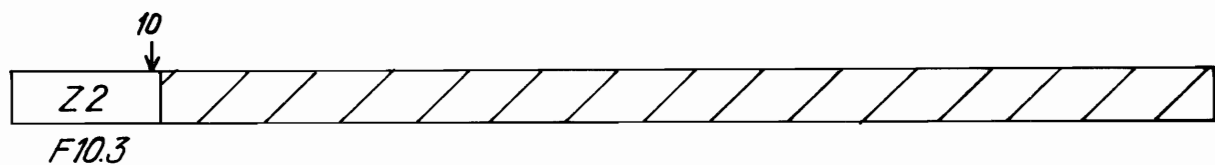
Z1 ensimmäisen generoitavan solmupisteen z-koordinaatti

N0 generointialueen muotoa kuvaavien pisteiden lukumäärä
(2 tai 3)

N1 generoitavien solmupisteiden lukumäärä

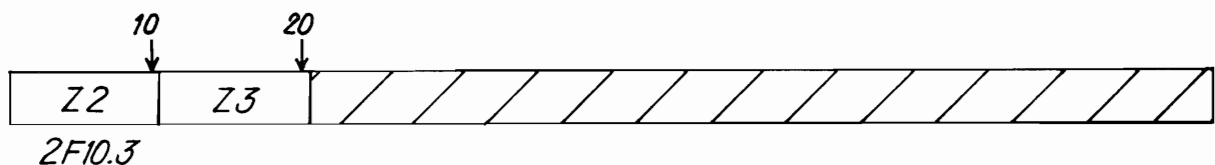
N2 solmupistenumeron lisäys generoinnissa

Jos N0 = 2, seuraava kortti:



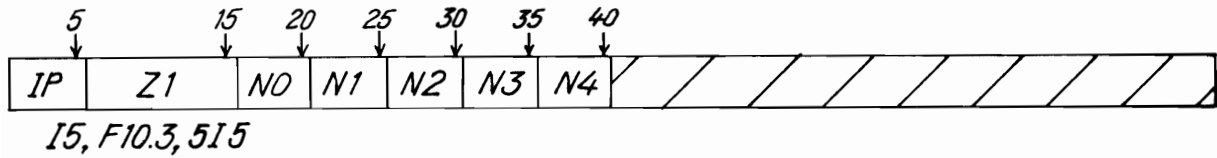
Z2 generointisuoran päätepisteen z-koordinaatti

Jos N0 = 3, seuraava kortti:



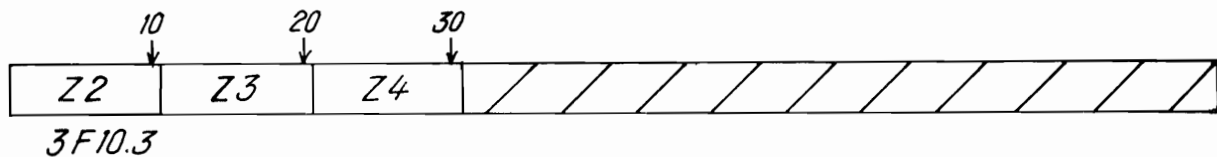
- Z2 generointikäyrän keskipiste isoparametrisessa ξ -koordinaatistossa ilmaistuna z-koordinaatistossa
- Z3 generointikäyrän päätepisteen z-koordinaatti

6.3 Generointi pintaa pitkin



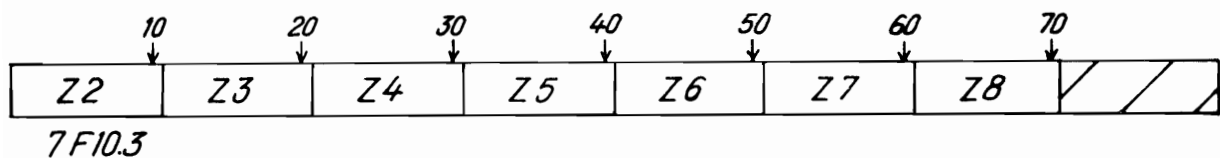
- Z1 ensimmäisen generoitavan solmupisteen z-koordinaatti
- Muut merkinnät samat kuin kohdassa 5.3.

Jos $N0 = 4$, seuraava kortti:



Z2, Z3, Z4 z-koordinaatit generointialueen nurkissa

Jos $N0 = 8$, seuraava kortti:

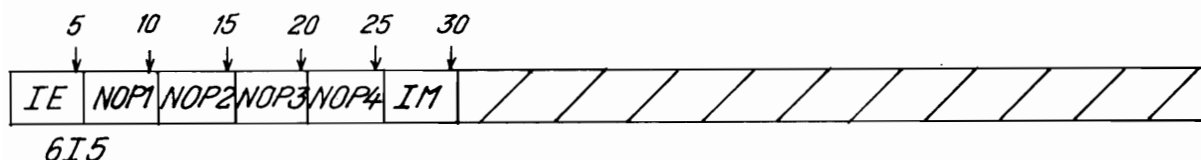


- Z3, Z6, Z8 z-koordinaatit generointialueen nurkissa
- Z2, Z4, Z5, Z7 z-koordinaatit isoparametrusten ξ - ja η -koordinaattien ja generointialueen rajojen leikkauspisteissä

7 VETTÄ JOHTAVAN KERROKSEN PAKSUUS

Vettä johtavan kerroksen paksuus annetaan kuten z-koordinaatit (kohta 6)

8 ELEMENTTITIEDOJEN ANTAMINEN

8.1 Elementtitietojen antaminen elementti kerrallaan

IE elementin numero

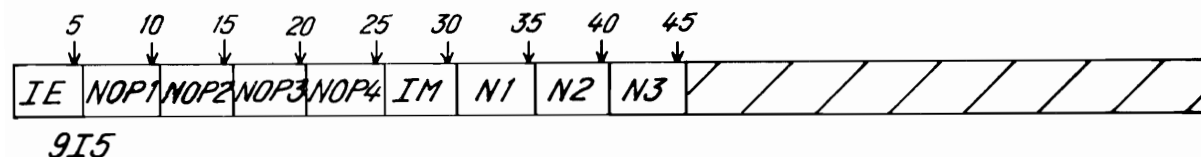
NOP1 elementin 1. solmupisteen numero

NOP2 elementin 2. solmupisteen numero

NOP3 elementin 3. solmupisteen numero

NOP4 elementin 4. solmupisteen numero

IM materiaalinumero

8.2 Generointi yhdessä suunnassa

IE ensimmäisen generoitavan elementin numero

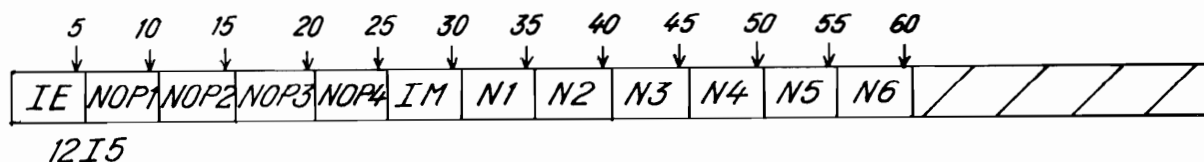
NOP1...NOP4 ensimmäisen generoitavan elementin solmupisteet

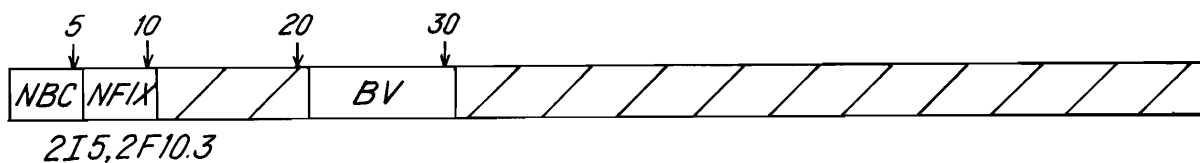
IM materiaalinumero

N1 generoitavien elementtien lukumäärä

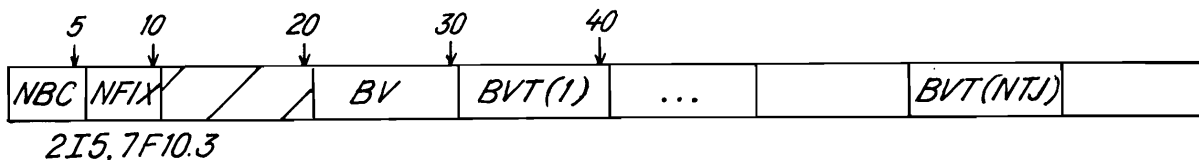
N2 elementtinumeron lisäys generoinnissa

N3 solmupistenumerojen lisäys generoinnissa

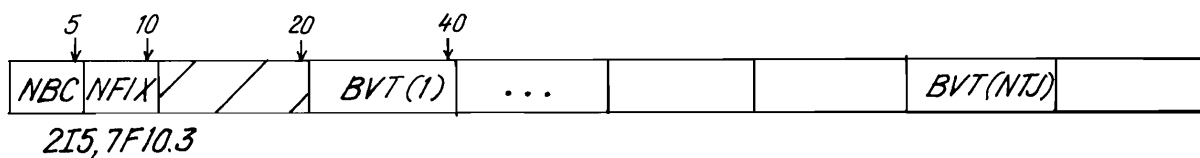
8.3 Generointi kahdessa suunnassa



Jos IC = 1, seuraava kortti:



Jos IC = 2, seuraava kortti:



NBC solmupisteen numero

NFI reunaehtotyyppi:

NFI = 0 reunaehto on virtaama

NFI = 1 reunaehto on painekorkeus

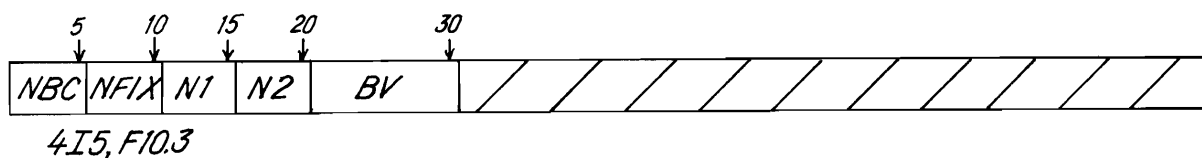
BV reunaehdon arvo stationaarisessa tilanteessa

BVT(i) reunaehdon arvo reunahtomuutoksen i jälkeen

9.2 Generointi yhdessä suunnassa

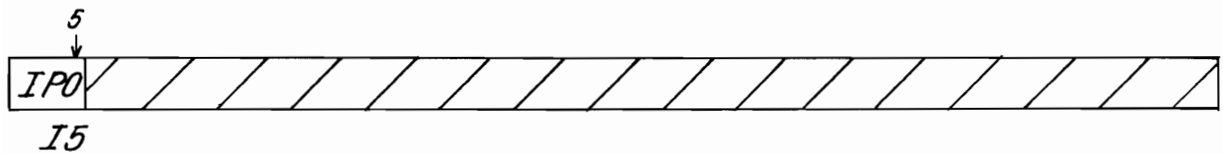
Kortit lävistetään muuten samoin kuin kohdassa 9.1, mutta sarakkeille 11...15 lävistetään N1 ja sarakkeille 16...20 N2, joista N1 on generoitavien solmupisteiden lukumäärä ja N2 solmupistenumeron lisäys generoinnissa.

Esimerkki 6. Jos IC = 0, niin:



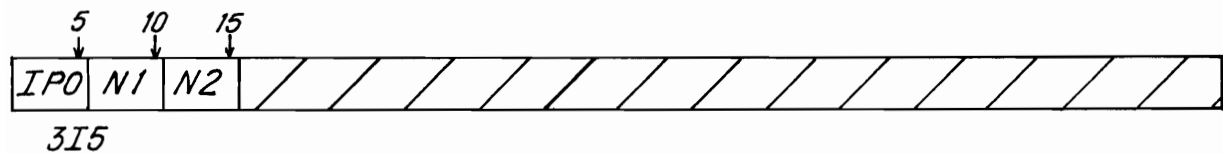
10 TULOSTUSPISTEET

10.1 Tulostuspisteiden antaminen solmupiste kerrallaan



IPO tulostuspisteen numero

10.2 Generointi yhdessä suunnassa

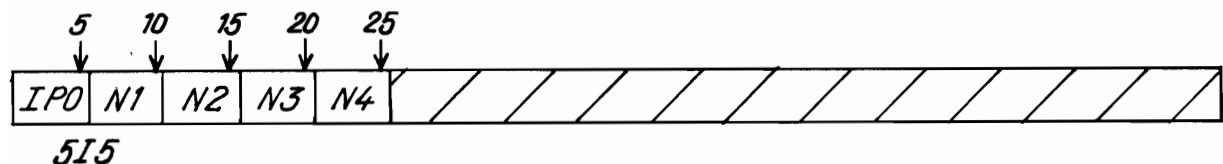


IPO ensimmäisen generoitavan solmupisteen numero

N1 generoitavien solmupisteiden lukumäärä

N2 solmupistenumeron lisäys generoinnissa

10.3 Generointi kahdessa suunnassa



IPO ensimmäisen generoitavan solmupisteen numero

N1 generoitavien solmupisteiden lukumäärä 1. suunnassa

N2 generoitavien solmupisteiden lukumäärä 2. suunnassa

N3 solmupisteiden numeroiden lisäys 1. suunnassa

N4 solmupisteiden numeroiden lisäys 2. suunnassa

11 ALKUPAINEKORKEUDET SOLMUPISTEISSÄ

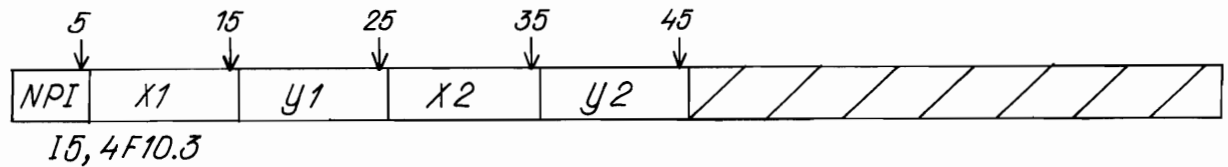
Annetaan vain, jos lukumäärätietokortissa IC = 2.

Annetaan kuten z-koordinaatit kohdassa 6.

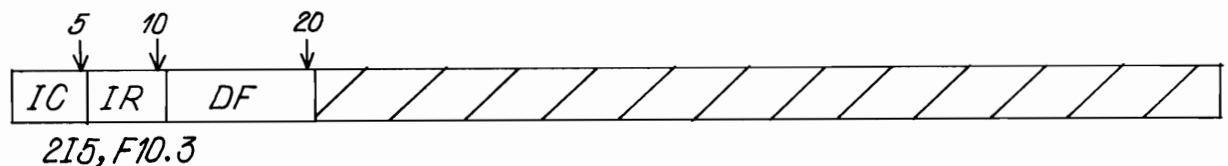
Liite 4. Piirtämisohjelman käyttö

1 PIIRTÄMISOHJELMALLE ANNETTAVAT DATARIVIT

Ohjelmalle annetaan osittaiskäytössä kaksi datariviä:



NPI Jako-osien lukumäärä tasa-arvokäyriä piirrettäessä
X1 pienin piirrettävä x-koordinaatti
Y1 pienin piirrettävä y-koordinaatti
X2 suurin piirrettävä x-koordinaatti
Y2 suurin piirrettävä y-koordinaatti



IC = 0 ajo lopetetaan
IC = 1 piirretään solmupisteet
IC = 2 piirretään elementit
IC = 3 piirretään tasa-arvokäyriä
IR = 1 piirretään z-koordinaattien tasa-arvokäyrät
IR = 2 piirretään vettä johtavan kerroksen paksuuden tasa-arvokäyrät

Stationaarisessa laskennassa:

IR = 3 piirretään painekorkeuksien tasa-arvokäyrät

Ajasta riippuvassa laskennassa:

IR = 3 piirretään alkupainekorkeuden tasa-arvokäyrät

IR = 4 piirretään tulostushetken 1 painekorkeuden tasa-arvokäyrät

IR = 3 + i piirretään tulostushetken i painekorkeuden tasa-arvokäyrät

IR = 4 + NTO piirretään stationaarinen lopputilanne
 DF tasa-arvokäyrien väli

2 AJOVIRTAESIMERKKI

Käyttäjän kirjoittamat rivit alleviivattu.

U

USI213

" RUN TKKHIT,TKKY052970,TKKR06019

" PSW

PSW= HIT

" ASG,AX PIIR.

" ASG,AX F20

" ASG,AX F21

" USE 20,F20

" USE 21,F21

" XQT PIIR.ABS

5 280. 90. 1360. 750.

1

3 3 0.2

0

" FIN

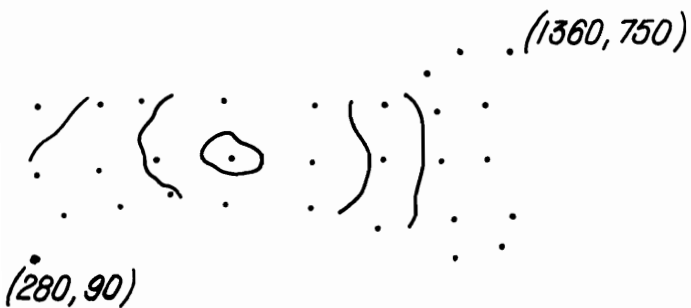
"" TERM

Piirtäminen keskeytetään haluttaessa seuraavasti:

BREAK

"" XX TIO

Yllä olevassa esimerkissä piirrettiin solmupisteet ja korkeuskäyrät (kuva 1).



Kuva 1. Piirtämisohjelman tulostus.

