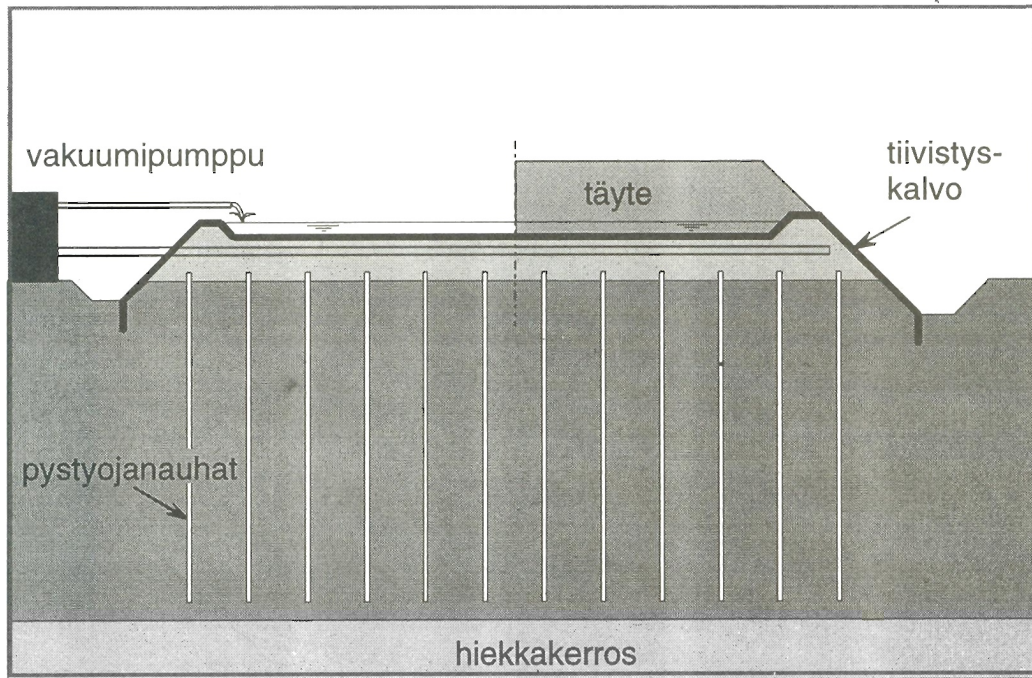




VAKUUMIKONSOLIDOINTIKOE HELSINGIN TORPPARINMÄESSÄ

Niina Puumalainen • Jorma Havukainen



HELSINGIN KAUPUNKI

KIINTEISTÖVIRASTO

G E O T E K N I N E N O S A S T O

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä esitellään Helsingin kaupungin, Kaitos Oy:n ja Teknillisen korkeakoulun yhteistyössä toteuttama vakuumikonsolidointiprojekti. Projektin tarkoituksena oli selvittää vakuumikonsolidoinnin soveltumista pääkaupunkiseudun savikoiden parantamiseen. Helsingin Torpparinmäkeen rakennettiin koekohde, jonka avulla hankittiin käytännön kokemusta vakuumikonsolidoinnin suunnittelusta, rakentamisesta ja alipainepumppauksen toteutuksesta.

Vakuumikonsolidointi perustuu esikuormituspenkereen korvaamiseen alipaineella. Tiiviiksi saumatun kalvon ja nauhapystyöjituksen avulla maaperään muodostetaan tyhjö, jota ylläpidetään alipainepumpun avulla. Käytännössä saavutettu alipaine on ollut 70-90 kPa, joka vastaa 4-5 metrin esikuormituspengertä.

Torpparinmäen koekentällä 1.5-2 m paksun kuivakuorisavikerroksen alapuolella oli noin 10-12 m pehmeää savea ja sen alapuolella siltti ja hiekkakerroksia. Pohjavesi sijaitsi noin 1.5-2 m maanpinnan alapuolella.

Koekohteen suunnittelussa käytettiin hyväksi kansainvälisiä tutkimusjulkaisuja. Vakuumikonsolidoitavan alueen pystyöjavälin mitoitus ja alustava loppupainuma-arvio tehtiin klassisten mitoitusmenetelmien avulla. Mitoitusparametrit määritettiin ödometrikokeiden tuloksista. Vaadittu konsolidointiaika oli 3 kk. Saven huonon vedenläpäisevyyden vuoksi pystyöjaväli oli vain 0.85 m. Pystyöjakentän päälle rakennettiin vaakasuora kuivatusputkisto ja kenttä peitettiin tiivistyskalvolla. Kuivatusputkisto liitettiin alipainepumppuun.

Painuman, huokosvedenpaineen ja alipaineen kehittymisen mittaamiseksi kentälle asennettiin 13 painumalevyä, kaksi kierrekairankärkeä painuman mittaamiseksi syvemmällä maapohjassa, kaksi huokosvedenpaineanturia ja alipainemittari.

Alipainepumppaus aloitettiin 28.8.1995 ja lopetettiin 23.11.1995. Kenttää konsolidoitiin

aluksi 50 kPa:n ja myöhemmin 80 kPa:n alipaineella. Rakenteen tiivistystyö oli onnistunut ja kentän painuma kasvoi tasaisesti. 23.11.1995 kentän keskiosa oli painunut 0.59 m. Pumppauksen loputtua kentän painumasta palautui noin 10-20 mm. Saavutettu painuma ylitti selvästi kokeen alussa asetetun 0.5 m painumatavoitteen.

Kokeen aikana painuman kehittymistä arvioitiin analyyttisten ja numeeristen menetelmien avulla. Z_Soil-ohjelmalla laskettu painumisnopeus vastasi hyvin mitattuja tuloksia.

Koekentältä otettiin laboratorionäytteitä ennen konsolidointia ja sen jälkeen. Näytteiden perusteella kentän vesipitoisuus pieneni ja leikkauslujuus kasvoi vakuumikonsolidoinnin vaikutuksesta. Myös siipikairaustulokset osoittivat saven lujuuden kasvaneen.

Vakuumikonsolidoinnin toteutuskustannuksia verrattiin pystyjoituksen ja ylipenkereen sekä syvästabiloinnin toteutuskustannuksiin teoreettisten esimerkkikohteiden avulla.

Koekohteen tulosten ja teoreettisen kustannusvertailun perusteella vakuumikonsolidointi on nopea ja tehokas sekä kustannuksiltaan kilpailukykyinen pohjanvahvistusmenetelmä, joka soveltuu hyvin pääkaupunkiseudun olosuhteisiin.

ABSTRACT

This paper describes a vacuum preloading project which was carried out by the City of Helsinki, Kaitos Oy Ltd and Helsinki University of Technology. The aim of the project was to study the suitability of vacuum loading techniques to the Finnish conditions. A test field was constructed to Torpparinmäki region in Helsinki in order to gain practical experience of the designing and execution of vacuum consolidation.

In vacuum consolidation the surcharge load is replaced with atmospheric pressure. A vertically drained site is covered with an air-tight membrane and vacuum is created underneath it by using a vacuum pump. In practice under-pressure of 70 to 90 kPa, which equals a surcharge layer of 4 to 5 meters, has been achieved.

The Torpparinmäki test area comprised a dry crust of 1.5-2 m, underlain by 10-12 m of soft clay and followed by silt and sand layers. The ground water lied 1.5-2 m below the surface level.

International research articles were used in the designing of the test field. Classical methods were utilized both in the designing of the vertical drain spacing and in the rough settlement estimations. The designing parameters were defined from oedometer test results. The desired preconsolidation time was three months. Due to the poor water permeability of the clay the vertical drain spacing was narrow, only 0.85 m. The test area was provided with a horizontal drainage system and covered with an airtight membrane. The drainage system was connected to a vacuum pump.

The test site was instrumented with 13 settlement plates, two auger-type pits to measure the settlements deeper in the soil, two pore pressure transducers and one under-pressure gauge.

The vacuum consolidation started 28th August 1995 and the vacuum pump was turned off 23th November 1995. The under-pressure was adjusted first to 50 kPa and later to

80 kPa. The sealing of the membrane had succeeded and the settlement increased steadily. By 23th November the maximum settlement in the center of the area was 0.59 m. When the pumping was finished the surface level rised 10...20 mm. The settlement target (0.5 m) was well exceeded.

During the test the settlement behaviour was studied with analytical and numerical methods. The numerical modelling was made by the program Z_Soil v 3.0 and a good correspondence was found between the calculated and measured settlements.

Soil samples were taken from the test field before and after vacuum preloading. Laboratory test results and vane shear tests showed that the water content had decreased and the shear strength increased due to vacuum consolidation.

The expencies of vacuum consolidation were compared to the expencies of deep stabilization and vertical drains with surcharge. The cost estimation was done with theoretical examples.

By the results of the Torpparinmäki test field and the theoretical cost estimation vacuum consolidation is an effective, time saving and economically viable ground improvement method - a feasible alternative also in the Helsinki region.

ALKULAUSE

Pääkaupunkiseudulla uudisrakentamista tehdään usein pehmeikköalueille, missä rakentaminen edellyttää maan laadun parantamista. Esirakentamisessa käytettäviä pohjanvahvistustekniikoita kehitetään jatkuvasti entistä varmemmiksi, nopeammiksi ja taloudellisimmiksi.

Helsingin kaupungin, Kaitos Oy:n ja Teknillisen korkeakoulun yhteistyönä selvitettiin vakuumikonsolidointitekniikan soveltumista pääkaupunkiseudun savikoiden parantamiseen. Pohjois-Helsinkiin Torpparinmäen asuntoalueelle rakennettiin koekenttä, joka konsolidoitiin vakuumitekniikan avulla syksyn 1995 aikana.

"Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä"-tiedote on laadittu koekohteesta saadun tutkimustiedon ja kansainvälisen julkaisu- ja tutkimustiedon pohjalta. Tiedote liittyy DI Niina Puumalaisen tekeillä olevaan lisensiaatintyöhön. Työn valvojana on professori Eero Slunga Teknillisestä korkeakoulusta.

Kokeilun toteutuksesta vastanneeseen projektiryhmään kuuluivat edellämainittujen lisäksi DI Jorma Havukainen Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekniseltä osastolta, DI Raimo Kuokkanen Helsingin kaupungin rakennusviraston katurakennusosastolta, DI Timo Laitinen Helsingin kaupungin kaupunginkanslian kehittämistoimistosta, DI Anton Palolahti Kaitos Oy:stä ja tontinhaltija arkkitehti Esko Ryhänen.

Helsingissä helmikuussa 1996



Usko Anttikoski

osastopäällikkö

MERKINNÄT

A	pinta-ala, m ²
D	pystyajan vaikutusalueen halkaisija, m
F	hienousluku, %
H	näyteputken korkeus, m
H	painuvan kerroksen paksuus, m
H _k	hehkutushäviö, %
H _u	humuspitoisuus, %
I _p	plastisuusluku, %
S _p	primaarinen konsolidaatiopainuma, m
S _i	sensitiivisyys, -
Sa-%	savipitoisuus, %
T _h	aikatekijä, -
U	konsolidaatioaste, %
a	nauhapystyajan paksuus, m
b	nauhapystyajan leveys, m
c _h	vaakasuora konsolidaatiokerroin, m ² /a
c _v	pystysuora konsolidaatiokerroin, m ² /a
d	pystyajan halkaisija, m
d _{ekv}	pystyajan ekvivalentti halkaisija, m
d _Δ	pystyajanväli kolmioverkossa, m
d _□	pystyajanväli neliöverkossa, m
e ₀	huokosluku ennen konsolidointia, -
h	pystysuora virtausmatka, m
k _c	maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s
l	pystyajan pituus, m
m	moduuliluku, -
q _w	pystyajan virtauskapasiteetti, m ³ /s
s _k	leikkauslujuus (kartiokoe), kPa

10

s_u	suljettu leikkauslujuus, kPa
t	aika, d
u_w	huokosvedenpaine, kPa
Δu_w	huokosveden ylipaine, kPa
w	vesipitoisuus, %
w_L	juoksuraja, %
w_P	plastisuusraja, %
z	syvyys, m
β	jännitysekspONENTTI, -
γ	maan tilavuuspaino, kN/m ³
ε_z	suhteellinen primaarinen muodonmuutos pystysuunnassa, -
ρ_s	kiintotiheys, g/cm ³
σ_p	esikonsolidaatiojännitys, kPa
$\sigma_{p \text{ red}}$	reduoitu esikonsolidaatiojännitys, kPa
σ_v	vertailujännitys, 100 kPa
σ'_{v0}	vallitseva tehokas jännitys, kPa
σ_z	lisäjännitys syvyydellä z , kPa
CPR	Constant Pressure Ratio, vakiohuokospainesuhde(ödometri)koe
CRS	Constant Rate of Strain, vakiomuodonmuutosnopeus(ödometri)koe
CPE	klorinoitu polyeteeni
HDPE	high density polyethylene, polyeteeni
PVC	polyvinyylikloridi
VLDC	very low density polyethylene, polyeteeni

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKULAUSE	7
MERKINNÄT	9
SISÄLLYSLUETTELO	11
 1. JOHDANTO	 13
 2. MENETELMÄKUVAUS	 15
2.1 Toimintaperiaate	15
2.2 Menetelmän edut	19
2.3 Onnistumiseen vaikuttavat tekijät	20
2.3.1 Pohjasuhteet	20
2.3.2 Toimiva rakenne	21
 3. TORPPARINMÄEN KOEKOHDDE	 26
3.1 Koekohteen sijainti	26
3.2 Pohjatutkimukset	27
3.2.1 Kairaukset ja näytteenotto	27
3.2.2 Laboratoriotutkimukset	30
3.3 Mitoitus	34
3.3.1 Kokeen kesto aika	34
3.3.2 Reunaojien tilantarve	34
3.3.3 Pystyöjat	35
3.3.4 Painuma	41
3.4 Toteutettava rakenne	46
3.4.1 Rakennerratkaisu ja materiaalivalinnat	46
3.4.2 Instrumentointi	51
3.5 Rakentaminen	54
3.6 Pumppaus ja painumahavainnot	60
3.6.1 Pumppaus ja alipaine	60

12

3.6.2 Poistunut vesimäärä	63
3.6.3 Huokosvedenylipaine	64
3.6.4 Painumat	64
3.6.5 Havaintotulokset	67
3.7 Purkuvaihe	69
3.7.1 Painuman palautuminen	69
3.7.2 Purkutyöt	69
3.7.3 Pumppauksen jälkeinen instrumentointi	70
3.7.4 Näytteenotto ja kairaukset	71
4. TULOSTEN TARKASTELU	76
5. KUSTANNUKSET	78
5.1 Torpparinmäen koekohteen kustannukset	78
5.2 Teoreettinen kustannusvertailu	78
5.2.1 Laskennan perusteet	78
5.2.2 Vertailun tulokset	81
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	87
KIRJALLISUUS	91
Liite 1 Koekohteen kairaustulokset, 3 sivua	
Liite 2 Koekohteen luokituskokeiden tulokset, 5 sivua	
Liite 3 Koekohteen ödometrikokeiden tulokset, 3 sivua	
Liite 4 Teoreettisen kustannusvertailun PlanMan-ohjelman aikataulut, 9 sivua	
Liite 5 Koekohteen rakennepiirustukset, mittakaava 1:100, 3 sivua	

1. JOHDANTO

Ensimmäisenä idean alipaineen ja (pahvisten) nauhapystyöjen hyödyntämisestä haitallisten painumien poistamiseksi ja maan lujittamiseksi esitti ruotsalainen Kjellman jo 1950-luvulla [Woo et al. 1989].

1960- ja -70-luvuilla vakuumikonsolidointia kokeiltiin eri puolilla maailmaa. Silloisten muovituotteiden heikko kestävyys, vakuumikentän rakentamiseen ja ylläpitoon liittyvät vaikeudet sekä menetelmän kalleus muun muassa perinteiseen ylipenkereeseen verrattuna rajoittivat kuitenkin vakuumikonsolidoinnin laajempaa käyttöä. Menetelmää kehitettiin silti edelleen esimerkiksi amerikkalaisten Haltonin (1965) ja Holtzin (1975) toimesta [Cognon et Thevanayagam 1994].

Suomessa kokeiltiin tyhjiömenetelmää ja liuskapystyöjä savipohjan vahvistamisessa ensimmäisen kerran Helsingin Itäkeskuksen koekentällä talvella 1974-1975. Samanaikaisesti testattiin myös muita pystyöjitusmenetelmiä. Tyhjiökuormitusalueella ei tuolloin saatu syntymään toivottua alipainetta. Todennäköinen syy epäonnistumiseen oli, että pumpattu vesi virtasi pääasiassa alueen ulkopuolelta vettä paremmin johtavia silttikerroksia pitkin tai pystyöjen kautta savikerrostuman alapuolisista karkeammista kerrostumista [Leminen et Rathmayer 1979]. Pumppausyrityksistä luovuttiin pian ja vakuumi korvattiin pengerkuormalla.

1980-luvun aikana synteettisten tuotteiden laatu kehittyi voimakkaasti samalla kun niiden hinta putosi. Nauhapystyöjat korvasivat yleisesti hiekkapystyöjat. Myös kalvojen saumaus- ja asennustekniikat paranivat. Samanaikaisesti sopivien pengermateriaalien saatavuus heikkeni ja kuljetusmatkat kasvoivat. Vakuumikonsolidoinnista tuli taloudellisesti ja teknisesti kilpailukykyinen vaihtoehto perinteisiin menetelmiin nähden.

1980-luvun alusta lähtien vakuumikonsolidointia on sovellettu hyvin tuloksin muun muassa Kiinassa [Tang et Gao 1989, Woo et al. 1989], Ranskassa [Cognon et Thevanayagam 1994, Magnan 1994], Yhdysvalloissa [Jacob et al. 1994] ja Ruotsissa

[Torstensson 1984]. Näistä maista menetelmän käyttö on levinnyt esimerkiksi Hollantiin, Saksaan, Japaniin, Taiwaniin, Singaporeen ja Malesiaan. Vakuumikonsolidoinnin ja pystyjoituksen yhdistelmä on nykyisin tehokas pohjanvahvistusmenetelmä ja sen käyttö lisääntyy jatkuvasti.

Vakuumityömaiden koko vaihtelee pienistä koekohteista kymmenien-tuhansien neliömetrien laajuisiin suurkenttiin. Eräs suuri ja merkittävä kohde oli Kanaalin tunnelin terminaalialueella, jossa vakuumikonsolidoitiin yhteensä 57 000 m² suuruinen kenttä [Cognon et Thevanayagam 1994].

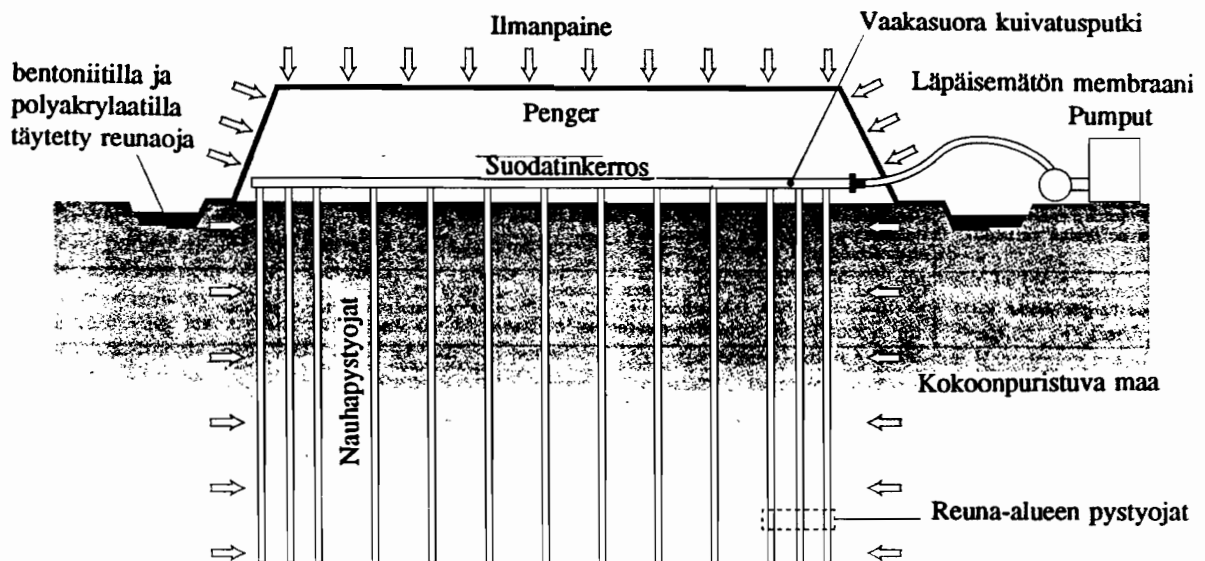
Muissa maissa saatujen hyvien kokemusten rohkaisemana toteutettiin Suomessa Helsingin Torpparinmäen asuntoalueella vakuumikonsolidointikokeilu kesän ja syksyn 1995 aikana. Kokeiluun osallistuivat Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Helsingin kaupungin rakennusvirasto, Helsingin kaupungin kaupunginkanslian kehittämistoimisto, Kaitos Oy sekä Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio.

Tässä työssä esitetään Torpparinmäen vakuumikonsolidointikokeilun toteutus ja tulokset. Raportin alussa käydään lisäksi lyhyesti läpi vakuumikonsolidoinnin periaate, menetelmän tarjoamat edut ja onnistumisen edellytykset. Luvussa 5 on vertailtu toisiinsa eri pohjanvahvistusmenetelmien kustannuksia ja kokonaiskestoja.

2. MENETELMÄKUVAUS

2.1 Toimintaperiaate

Vakuumikonsolidoinnin teho perustuu liuskapystyöjien ja alipaineen yhteisvaikutukseen. Maasta imetään ilmaa ja vettä, jolloin se tiivistyy ja lujittuu. Menetelmän avulla maata voidaan kuormittaa alipaineella, joka vastaa jopa viidestä kuuteen metrin korkuista ylipengertä.

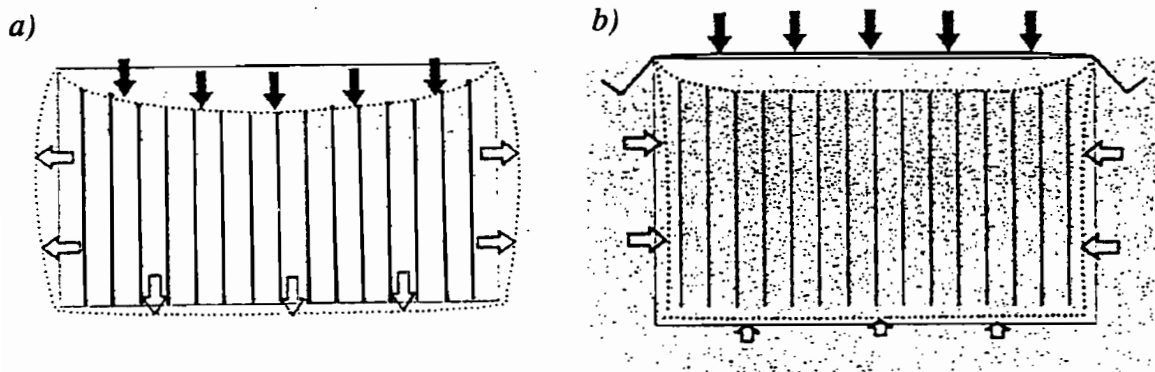


Kuva 2.1. Vakuumikonsolidointi. Rakenteen poikkileikkaus [Magnan 1994].

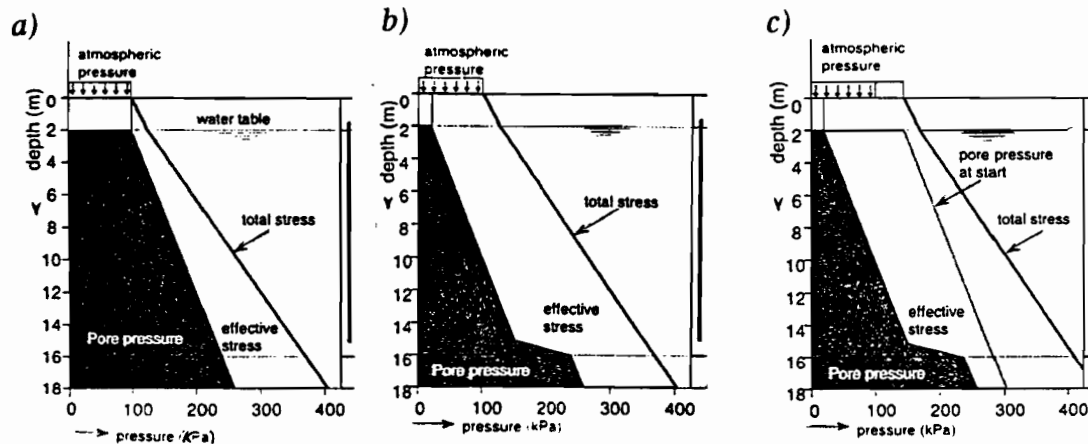
Kuvassa 2.1. on esitetty vakuumirakenteen poikkileikkaus. Alipaineen ylläpitämiseksi pystyöjitettu kenttä peitetään tiivistekalvolla. Nauhapystyöjien avulla alipainepumpun imuvaikutus ulotetaan ojien alapään tasolle asti. Ilman pystyöjia alipainekuormalla ei olisi merkittävää vaikutusta paksuihin läpäisemättömiin kerroksiin. Pumppauksen aikana huokosvesi nousee imun vaikutuksesta pystyöjitetulla alueella tiivistekalvon tasolle. Tiivistekalvon alle rakennetusta suodatinkerroksesta vesi kerätään kokoojaputkistoon, josta se kulkeutuu kalvon ulkopuolelle alipainepumppuun.

Vakuumikonsolidointi muistuttaa ylipenkereen ja liuskapystyöjien avulla tapahtuvaa pohjanvahvistamista. Menetelmien välillä on kuitenkin eräitä merkittäviä eroja. Ylipengertä käytettäessä mekaaninen kuormitus kasvattaa maan kokonaisjännitystä. Penkereen alla oleva maa painuu, mutta samalla se myös pullistuu sivusuunnassa ulospäin synnyttäen vaakasiirtymiä. Vakuumikonsolidoinnissa huokosvedenpaine pienenee pystyojitetulla alueella alipaineen vaikutuksesta. Tehokas jännitys kasvaa, mutta kokonaisjännitys ei muutu. Pehmeä maa puristuu kasaan ja sen lujuus kasvaa. Pystyojitetun alueen reunoilla maa imeytyy oja kohti sen sijaan että se liikkuisi niistä pois. Sivusiirtymät ovat olemattoman pieniä.

Kuva 2.2. havainnollistaa vakuumikonsolidoinnin ja perinteisen ylipenkereen synnyttämien muodonmuutosten väliset erot. Pelkän alipaineen vaikutus sekä alipaineen ja mekaanisen kuorman yhteisvaikutus maan jännitysjaakumaan on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.2. a) Ylipenkereen ja pystyojituksen sekä b) vakuumikonsolidoinnin vaikutuksesta syntyneet muodonmuutokset [Geotechnics Holland BV].



Kuva 2.3. Vakuumikonsolidointi: kokonaisjännitys-, huokosvedenpaine- ja tehokasjännitysjaakaumat a) ennen konsolidointia ja b) konsolidoinnin lopussa. c) Ylipenkereen avulla tehostettu vakuumikonsolidointi: jännitysjaakaumat konsolidoinnin lopussa [Cortlever].

Korkean ylipenkereen rakentaminen on työlästä. Usein se on maan vakavuussyistä jopa mahdotonta. Pienempää pengertä käytettäessä esikuormitus aika kasvaa. Suuria kuormia tarvittaessa turvaututaan usein vaiheittainrakentamiseen, mutta tähänkin kuluu aikaa. Vakuumikonsolidointi ei aiheuta stabiliteettiongelmia. Alipainekuorma on korkea heti pumppauksen alusta lähtien, vastaten 3-6 metrin esikuormituspengertä. Esirakennusaika lyhenee merkittävästi. Tarvittava aika on tavallisesti vain muutamia kuukausia.

Vakuumikonsolidoinnilla aikaan saadut painumat jäävät saman suuruista kuormaa vastaavan ylipenkereen aiheuttamia painumia pienemmiksi. Tämä johtuu siitä, että ylipenkereen vaikutus ulottuu pystyjojen alapäästä syvemmälle, jolloin myös alemmat kerrokset painuvat.

Koekohteissa eri puolilla maailmaa on vertailtu keskenään vakuumikonsolidoinnin ja vastaavan suuruisen ylipenkereen aiheuttamia painumia [Choa 1989, Sehested et Seng 1989]. Vakuumikonsolidoinnin aiheuttamat painumat ovat jääneet ylipenkereen painumia vähäisemmiksi myös siitä syystä, että alipaine on ollut suunniteltua pienempi.

Tavallisesti kalvon alle muodostunut alipaine on ollut noin 75-80 % tavoitellusta. Alipaineen putoaminen johtuu useimmiten tiivistyskalvon saumojen, reunojen, läpivientien tai kalvoon syntyneiden reikien kautta tapahtuvasta vuodosta. Myös alipainepumpun toimintahäiriöt pienentävät tehokkuutta.

Kaasunmuodostuminen rajoittaa vakuumikonsolidoinnin tehoa. Vesi kavitoi eli muodostaa kaasukuplia, kun maksimialipaineen, ympäröivän ilmanpaineen ja hydrostaattisen paineen summa on alle nesteen höyrystymispaineen. Alipaineen suuruudesta ja lämpötilasta riippuen erilainen määrä pohjaveteen sitoutunutta kaasua vapautuu vakuumikonsolidoinnin aikana. Kaasun muodostuminen heikentää maan vedenläpäisevyyttä. Tästä syystä vakuumikonsolidoinnissa maksimi alipaine kentällä, jossa pohjavedenpinta on maanpinnan tasossa, on -1 ilmakehän paineessa noin 100 kPa. Ilma-vesirajapinnan sijainti vaikuttaa merkittävästi menetelmän tehokkuuteen.

Alipainetta voidaan lisätä yli 100 kPa:n, jos käytetään vedenalaista pumppausta (off-shore kohteet). Maalla kaasukuplien muodostumista voidaan vähentää käyttämällä vakuumikonsolidoinnin lisäksi pientä ylipengertä tai lisäämällä alipainetta asteittain [Technique Geosystems / Cofra JV 1995]. Kaasun muodostumisen vuoksi vakuumpumpun kapasiteetin on oltava suurempi kuin sen teoreettisen vesimäärän, jonka olisi poistuttava maasta tietyn konsolidaatioasteen saavuttamiseksi. Pumpun on kyettävä pumppaamaan sekä ilmaa että vettä.

Usein käytetään myös vakuumikonsolidoinnin, pystyjoituksen ja ylipenkereen yhdistelmää, jolloin maahan kohdistuvia kuormia voidaan entisestään kasvattaa. Käytettäessä tällaista alipaineen ja mekaanisen kuormituksen yhdistelmää pieni ylipenger voidaan koota tiivistekalvon päälle jo rakennusaikana. Useita metrejä korkeaa pengertä käytettäessä maapohjaa on kuitenkin ensin lujitettava vakuumin avulla muutaman päivän ajan ennen kuin ylipenger kootaan täyteen korkeuteensa. Korkeaa suodatinkerrosta tai ylipengertä käytettäessä pystyjojaväliä pienennetään koalueen reunoilla vakavuuden kasvattamiseksi.

2.2 Menetelmän edut

Merkittävin vakuumikonsolidoinnilla saavutettavista eduista on lyhyt konsolidointiaika. Pelkkää ylipengertä käytettäessä tarvittava käsittely vie vuosia. Ylipenkereen ja liuskapystyöjien yhdistelmällä käsittelyaika lyhenee, mutta tavallisesti aikaa kuluu silti vielä noin yhdestä kahteen vuotta. Keskimääräinen vakuumikonsolidointiaika on yleensä 3-6 kuukautta, optimiajan ollessa noin neljä kuukautta [Magnan 1994].

Suuren kuormituksen mahdollistava vakuumikonsolidointi on osoittautunut käyttökelpoiseksi tiivistysmenetelmäksi kohteissa, joissa sekundaaripainumat ovat suuria. Perinteisellä pystyöjituksella ja ylipenkereellä ei sekundaaripainumiin ole juuri voitu vaikuttaa.

Alueilla, joilla on pulaa ylipenkereeksi sopivista materiaaleista, voi vakuumikonsolidointi olla edullinen ratkaisu.

Vakuumikonsolidointiin ei liity maan vakavuusongelmia. Tästä syystä menetelmän avulla voidaan käsitellä myös sellaisia erittäin pehmeitä maapohjia, joille pienenkin ylipenkereen rakentaminen olisi ongelmallista.

Suuret ylipenkereet synnyttävät toisinaan merkittäviä sivusiirtymiä, jotka voivat vaurioittaa käsiteltävän alueen vieressä sijaitsevia rakenteita. Vakuumikonsolidoinnissa maa kutistuu kokoon, sivusiirtymät ovat pieniä ja niiden suunta on sisäänpäin kohti ojitetun alueen keskustaa. Vakuumikonsolidointi sopii hyvin kohteisiin, joissa käsiteltävä alue on tarkoin rajattu.

Taulukossa 2.1 on esitetty tapauksia, joissa vakuumikonsolidointia on edullista käyttää.

Taulukko 2.1. Esimerkkejä kohteista, joissa vakuumikonsolidoinnin käyttö on kannattavaa [Cortlever].

- Kohteet, joissa sekä primaari- että sekundaaripainuma voivat aiheuttaa ongelmia. Vakuumikonsolidointia käytetään mm. siltojen kohdalla sekä erilaisten maarakenteiden, kuten esimerkiksi penkereiden ja paaluille perustettujen rakenteiden välissä.
- Kohteet, joissa käytettävissä oleva rakennusaika on hyvin lyhyt ja joissa pohjamaan vakavuus on rajoittava tekijä.
- Tielevennykset, haluttaessa välttää painumaeroja.
- Muta- ja liejualtaat, joissa lujuuden parantaminen edellyttää liejun vesipitoisuuden pienentämistä.
- Säiliöpohjien esikuormitus.

2.3 Onnistumiseen vaikuttavat tekijät

2.3.1 Pohjasuhteet

Vakuumikonsolidoinnin onnistumismahdollisuudet määräytyvät suureksi osaksi toteutettavan työkohteen maalajin, kerrosrajojen (stratigrafia) ja pohjavesisuhteiden perusteella [Jacob et al. 1994]. Tämän vuoksi toteutustapojen välillä voi olla huomattavia eroja kohteesta riippuen.

Hyvinvettäjohtavat kerrokset

Vaakasuorat hyvinvettäjohtavat maalinssit voivat joko pienentää tai lisätä vakuumikonsolidoinnin tehoa. Vaikutus riippuu siitä, miten pitkälle linssi vaakasuunnassa ulottuu ja miten syvällä maassa se sijaitsee. Jos linssi ulottuu tiivistyskalvon reunan ulkopuolelle, se voi johtaa vettä ja ilmaa käsiteltävän alueen ympäriltä. Jos vakuumikonsolidoinnin tehon ei haluta laskevan, pumppauskapasiteettia on lisättävä, jolloin energian kulutus kasvaa.

Epäjatkovat tai tiivistyskalvon reunojen sisäpuolella sijaitsevat hyvinvettäjohtavat kerrokset ovat systeemin toiminnan kannalta edullisia. Ne lisäävät konsolidaationopeutta saaden aikaan sekä vertikaalista että radiaalista konsolidaatiota [Jacob et al. 1994]. Tällöin pystyjovaliä voidaan kasvattaa ja vakuumikonsolidointiaika lyhenee.

Pohjaveden sijainti

Tiiviin rakenteen aikaansaamiseksi käsiteltävää aluetta peittävän tiivistekalvon reunat on ulotettava pohjavedenpinnan alapuolelle. Syvällä sijaitseva pohjavesi lisää tiivistämiskuluja sekä vähentää vakuumikonsolidoinnin tehoa ja voi sen vuoksi oleellisesti heikentää vakuumikonsolidoinnin taloudellisuutta. Pohjavedenpinnan sijaintisyvyyden kasvaessa alipainekuorman vaikutus vähenee. Jacob et al. [1994] ovat esittäneet, että jos pohjavedenpinta sijaitsee yli kymmenen metrin syvyydessä ei alipaineella ole käytännössä enää mitään vaikutusta huokosvedenpaineeseen.

2.3.2 Toimiva rakenne

Vakuumikonsolidoinnin onnistumisen kannalta on tärkeää, että seuraaviin seikkoihin kiinnitetään suunnittelu- ja rakennusvaiheessa huomiota [Technique Geosystems / Cofra JV 1995]:

- laadukkaat ja toimivat pystyajat,
- pystyajat eivät ulotu tiivistettävän materiaalin alapuolisiin hiekkakerrokseen,
- korkealaatuinen tiivistyskalvo yhdistettynä vuodonilmaisujärjestelmään,
- kalvon ympärillä käytetään suojamateriaalia,
- tiivis reunarakenne (itsetiivistyvä),
- luotettavat alipainepumput ja varajärjestelmä sekä
- koko projektin ajan jatkuva laadunvalvonta.

Pystyajat

Pystyajien on oltava sellaisia, että ne säilyttävät vedenjohtavuusominaisuutensa suurienkin painumien syntyessä. Ojat eivät saa tukkeutua eivätkä katkeilla. Tavallisesti vakuumikonsolidoinnin yhteydessä ei tarvitse ottaa huomioon pystyajien kantavuutta.

Maa pystyajitetaan vain tiivistettävien kerrosten syvyydeltä. Ojat eivät saa ulottua tiivistettävän materiaalin alapuolisiin hyvin vettäläpäiseviin kerrokseen. Ojat ankkuroidaan niin, että niiden alapään ja karkean materiaalin väliin jää ainakin 0.5 m savea. Pystyajitus tehdään mieluiten kesäaikaan.

Tiivistekalvo

Suodatinkerroksen päälle levitettävä tiivistekalvo on vakuumikonsolidoinnin onnistumisen kannalta kriittisin osa. Kalvon saumaus ja reunojen ja läpivientien tiivistys on tehtävä erittäin huolellisesti vuotojen välttämiseksi. Kalvoon syntyneet reiät on paikattava. Tiivistystyötä auttaa se seikka, että alipainepumppauksen aikana vakuumikonsolidointirakenne tiivistää myös itse itseään. Alipaine imee tiivistekalvoa sisäänpäin, jolloin maan ja kalvon väliset aukot sulkeutuvat.

Tavallisesti kalvona käytetään HDPE- (high density polyethylene) tai VLDC- (conductive very low density) kalvoja. Toisinaan on käytetty myös PVC- (polyvinyylikloridi) ja CPE- (klorinoitu polyeteeni) kalvoja, joiden läpäisykestävyys on hieman parempi kuin HDPE-kalvon [Jacob et al. 1994]. HDPE-kalvo saumataan hitsaamalla ja PVC- ja CPE-kalvot liimaamalla.

Vakuumikonsolidoinnissa HDPE-kalvon on oltava vähintään 1.5 mm [Technique Geosystems / Cofra JV 1995] ja VLDC-kalvon vähintään 1 mm [Cortlever 1994] paksu. Liitossaumoista tulee tiiviit, kun käytetään 12 mm kaksoishitsiä. Liitosten tiiviys ja lujuus on testattava ilmanpaineen avulla ennen pumppauksen aloittamista. Läpivientien määrä on pidettävä mahdollisimman pienenä. Läpivientien tiivistämisessä voidaan käyttää muunmuassa itseliimautuvaa kalvoa.

Kalvon reunat tiivistetään upottamalla ne reunaojiin vähintään 0.5 m pohjavedenpinnan alapuolelle [Technique Geosystems / Cofra JV 1995]. Mikäli pohjavedenpinnan alapuolella lähellä maanpintaa on rakenteen tiiviiden kannalta haitallisia siltti- tai hiekkalinssejä, on kalvon reunat syytä ulottaa näiden linssien alapuolelle. Toisinaan riittävän tiiviiden aikaansaamiseksi on käytettävä korkeita muovisia tiivisteseiniä [Jacob et al. 1994].

Kalvon reunat tiivistetään reunaojia vasten bentoniitilla (bentoniitti-polyakrylaattilietteellä). Ojiin johdetaan vettä bentoniittilietteen päälle tiivistysvaikutuksen tehostamiseksi [Cognon et Thevanayagam 1994]. Suomalaisissa olosuhteissa bentoniitti on voitu korvata märällä tiiviillä savella.

Pienellä koekentällä reunavuodoilla on suhteellisen suuri vaikutus. Pinta-alan kasvaessa reunahävikin osuus pienenee suhteessa poistuneen veden kokonaismäärään ja systeemin tehokkuus kasvaa.

Kalvon suojaus

Tiivistekalvon vaurioituminen estetään ympäröimällä se molemmiin puolin suoja-materiaalilla. Kalvon alle karkearakeisen suodatinkerroksen päälle levitetään ainakin 0.2 m # 0-5 mm hiekkaa [Technique Geosystems / Cofra JV 1995]. Suojahiekan sijasta kalvoa on suojattu myös kuitukankailla [Sehested et Seng 1989]. Suojahiekan levitys kalvon päälle on tehtävä välittömästi kalvon asentamisen jälkeen.

Kalvon pintaa voidaan suojata myös johtamalla maasta pumpattu vesi kalvon päälle [Jacob et al. 1994]. Tämä on halpa menetelmä ja kalvoon syntyvät vuodot on veden ansiosta helppo havaita. Kalvon päällä vesi toimii samalla myös lisäkuormana. Toisaalta veden käyttö saattaa rajoittaa instrumentointia ja liikkumista kalvon päällä. Vesi estää ylipenkereen rakentamisen membraanin päälle.

Kalvon kuljetuksen, varastoinnin ja asennuksen sekä asennetun kalvon päälle tehtävän täytön levityksen yhteydessä syntyy usein vaurioita. Vuodonilmaisujärjestelmä on kalvon alle suojahiekkakerrokseen asennettu elektroninen systeemi, joka pystyy havaitsemaan kalvossa olevat vuodot 150 mm marginaalilla. Järjestelmän on kestettävä suuriakin painumia ja sen on oltava toiminnassa koko prosessin ajan. Vuodonilmaisimia tarvitaan lähinnä vain silloin, kun kentän päälle rakennetaan välittömästi kalvon asennuksen jälkeen visuaaliset tarkastukset estävä ylipenger [Technique Geosystems / Cofra JV 1995].

Alipainepumppu

Alipainepumpun on oltava riittävän tehokas, jotta sen avulla saadaan aikaan halutun suuruinen alipaine käsiteltävään maahan. Pumpun on kyettävä pumppaamaan sekä ilmaa että vettä. Eräiden artikkelien [Technique Geosystems / Cofra JV. 1994] mukaan pumppauskapasiteetin tarve on suurin heti vakuumikonsolidoinnin alussa.

Alipainepumpun sijainti vaikuttaa suuresti systeemin tehokkuuteen. Mitä pienempi on pumpun imukorkeus, sitä tehokkaammin systeemi toimii. Tästä syystä pumppu olisi pyrittävä sijoittamaan niin alas kuin mahdollista. Maanpinnan painuessa pumppauksen aikana vakuumikonsolidoinnin teho laskee hieman, mikäli pumppu itse ei painu. Jos painumat ovat suuria, voi olla edullista käyttää pumpun ja kalvon välillä muoviputkien sijasta ohuita teräsputkia [Sehested et Seng 1989]. Suuret painumat rasittavat myös putkiliitoksia niin, että ne saattavat aueta

Pumpun on oltava kestävä. Pumpun rikkoutuminen tai tehon aleneminen pidentävät konsolidointiaikaa, jolloin tehokkuus kärsii.

Vakuumikonsolidoinnissa tarvittavan pumppauskapasiteetin määrä vaihtelee kohde kohtaisesti. Yhdellä 90 kPa:n alipainepumpulla käsiteltävän alueen maksimikoko voi vaihdella välillä 1000...10 000 m² [Cortlever 1996].

Reuna-alueet

Painumat ovat suurimpia vakuumikentän keskellä. Alipaineen vaikutus hiekkenee konsolidoitavan alueen reunoilla, jolloin myös syntyneet painumat ovat pienempiä. Erityistä huomiota on kiinnitettävä eri tavoin käsiteltyjen alueiden välisiin rajavyöhykkeisiin; painumaerot on pidettävä mahdollisimman pieninä. Painumaeroja tasataan reuna-alueille koottujen ylipenkereiden avulla [Choa 1989].

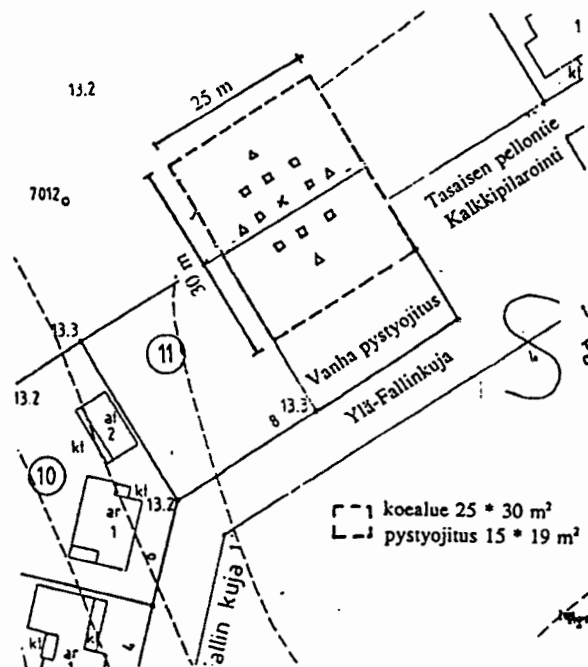
3. TORPPARINMÄEN KOEKOHDE

3.1 Koekohteen sijainti

Kesällä 1995 Kaitos Oy, Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto, rakennusviraston katuosasto ja kaupunginkanslian kehittämistoimisto käynnistivät yhteistyössä Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion kanssa kokeilun, jonka tarkoituksena oli tutkia vakuumikonsolidointimenetelmän soveltumista pääkaupunkiseudun savikoille. Koekohteen avulla haluttiin hankkia käytännön kokemusta vakuumikonsolidoinnin suunnittelusta, rakentamisesta ja pumppausvaiheen järjestelyistä.

Koekohde pyrittiin valitsemaan siten, että sen alueella pohjamaa (savi) olisi mahdollisimman homogeenista. Sijaintipaikaksi valittiin Torpparinmäen asuntoalue Pohjois-Helsingissä. Koekohteen läheisyydessä oli aiemmin tehty konsolidointi sekä pelkällä ylipenkereellä että ylipenkereellä ja liuskapystyöjillä, joten alueelta oli saatavissa vertailuaineistoa vakuumikokeen tulosten arviointia varten.

Valittu paikka, Ylä-Fallinkujan tontti numero 35128/6 on kaupungin vuokratontti, jonne tontinhaltija aloittaa omakotitalon rakentamisen keväällä 1996. Alunperin koekentän koko suunniteltiin sellaiseksi, että se olisi mahtunut kokonaisuudessaan kyseiselle tontille. Suunnitteluvaiheessa kuitenkin paljastui, että noin puolet tontista oli jo esirakennettu. Jotta koekentän koko ei olisi kutistunut liian pieneksi Helsingin kaupungin puisto-osastolta anottiin lupa laajentaa kokeilua tontin viereiselle puistoalueelle. Koekentän pinta-alaksi tuli näin 750 m². Koekohteen sijainti on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Torpparinmäen koekohteen sijainti ja koko.

3.2 Pohjatutkimukset

3.2.1 Kairaukset ja näytteenotto

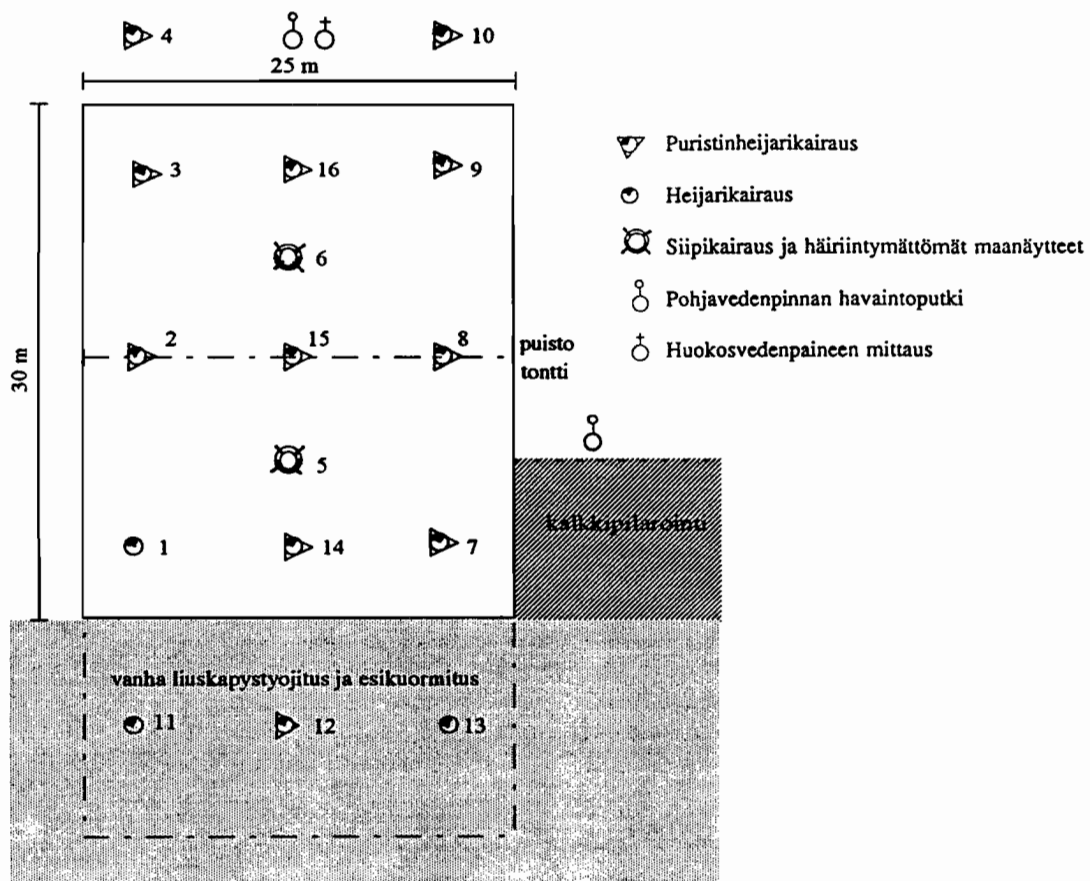
Koepaikalla maanpinta oli suhteellisen tasainen ja noin tasolla +13.2 m. Koekentän viereen asennettiin kaksi pohjavedenhavaintoputkea. Pohjavedenpinta sijaitsi tasolta +11.1...+11.4 m.

Kairauksia tehtiin kentän pinta-alaan nähden paljon. Puristin-, heijari- ja siipikairauspisteiden sijainti on esitetty kuvassa 3.2.

Kairausten perusteella koalueella on humusmaan alla noin 1.5-2 metrin kuivakuorisavikerros ja sen jälkeen noin 10-12 m pehmeää savea. Saven alapuolella on

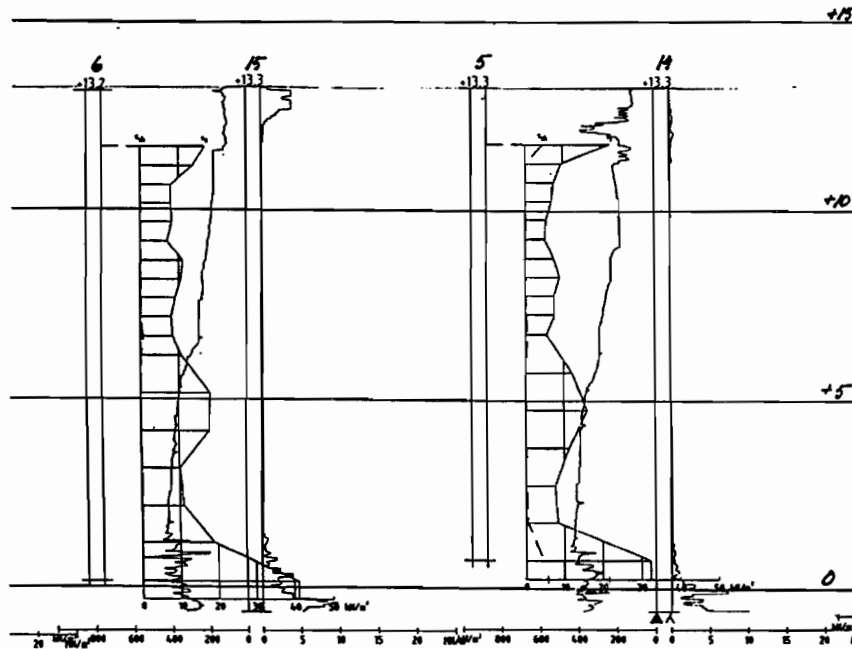
karkeampia siltti- ja hiekkakerroksia. Saven häiriintymätön leikkauslujuus oli vaihdellen 6...21 kN/m². Kuvassa 3.3 on esitetty siipikairausdiagrammit koalueen keskeltä. Loput kairautulokset on esitetty liitteessä 1.

Kentän läheisyydessä oli aiemmin tehty erilaisia kairauksia. Viidenkymmenen metrin päässä koalueesta savikerrosten paksuus oli selvästi ohuempi.



Kuva 3.2. Pohjatutkimuspisteiden sijainti.

Koekentän keskeltä otettiin häiriintymättömiä savinäytteitä kahdesta pisteestä. Näytepisteiden sijainti ilmenee kuvasta 3.2. Näytteitä otettiin noin 1.5 metrin välein. Kuivakuorisavesta otettiin häiriintyneitä näytteitä tilavuuspainon määrittämiseksi.



Kuva 3.3. Siipikairaustulokset ja näytteenotto.

Koealueen vierestä mitattiin huokosvedenpaine 2, 4, 6 ja 8 metrin syvyydeltä (kuva 3.2). Varsinkin lähellä maanpintaa oli ylipainetta. Mitatut arvot on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1. Koekentän ulkopuolelta määritetyt huokosvedenpaineet.

Syvyys (m)	2	4	6	8
huokosvedenpaine (m / H ₂ O)	1,46	3,44	4,90	6,55
ylipaine (kPa)	5,4	14,4	9,0	5,5

3.2.2 Laboratoriotutkimukset

Puolet häiriintymättömistä savinäytteistä toimitettiin Helsingin kaupungin geoteknisen osaston laboratorioon ja puolet Teknilliseen korkeakouluun Pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion tutkittavaksi. Kuivakuorinäytteet tutkittiin kaikki TKK:lla.

Molemmissa laboratorioissa määritettiin materiaalin luokitusominaisuudet sekä tehtiin useita jatkuvapuristeisia ödometrikokeita. Teknillisessä korkeakoulussa tehtiin lisäksi portaittaisia ödometrikokeita sekä muutamia kolmiaksaalikokeita. Yhteenveto suoritetuista tutkimuksista on esitetty taulukossa 3.2.

Laboratoriokokeiden perusteella maapohja jaettiin kahdeksaan kerrokseen. Näytetutkimuksissa paljastui, että koealueella oli noin 6-7 metriä maanpinnan alapuolella hyvinvettäjohtava siltikerros. Tätä kerrosta ei voitu lainkaan havaita kairaustuloksista. Koska molemmat näytepisteet sijaitsivat koekentän keskellä, ei suunnitteluvaiheessa ollut tietoa siitä, oliko kyseessä linssimäinen siltimuodostuma vai koealueen läpi ulottuva vyöhyke.

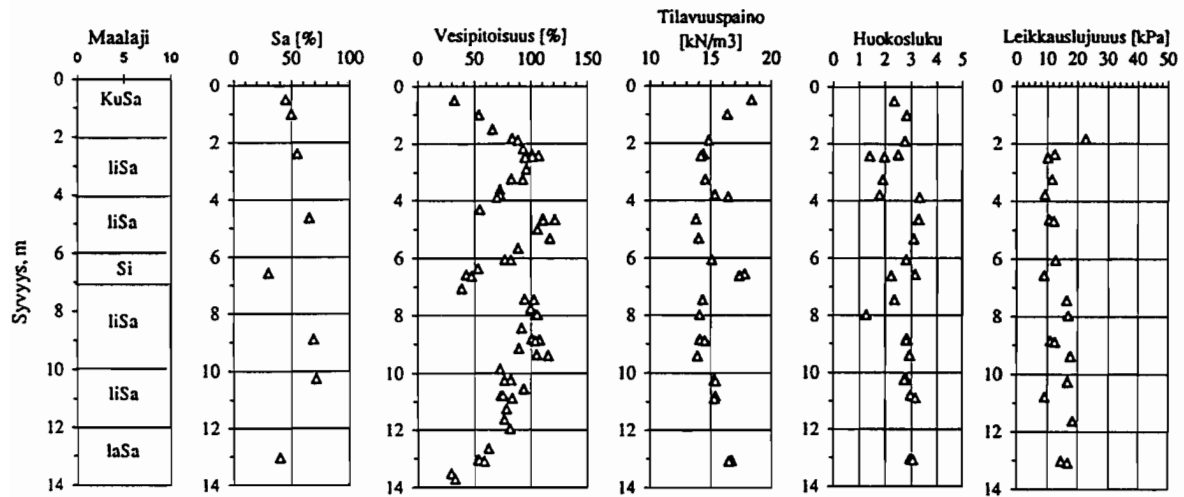
Luokituskokeiden avulla määritetyt kerrokset ja niiden parametrit on esitetty kuvissa 3.4 ja 3.5. Näytekohtaiset tarkat arvot on koottu liitteeseen 2. Ödometrikokeita tehtiin kaikista kerroksista. Kokeet pyrittiin tekemään siten, että kuormitukset vastaisivat suunniteltua vakuumikuormaa. Koetulokset on koottu liitteeseen 3.

Jatkuvapuristeisista ödometrikokeista osa tehtiin pareittain, niin että samalta syvyydeltä oli sekä vaakasuoraan että pystysuoraan kuormitettu näyte. Vaakasuorilla kokeilla selvitettiin konsolidaatiokerroin horisontaalisuunnassa. Eri kerroksissa jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden avulla määritettyjen vaaka- ja pystysuuntaisten konsolidaatiokertoimien suhteita verrattiin toisiinsa, mutta mitään yhtenäistä linjaa ei voitu havaita. Portaittaisten ödometrikokeiden pystysuorat konsolidaatiokertoimet olivat selvästi pienempiä kuin CRS- ja CPR-kokeiden arvot. Määritetyt konsolidaatiokertoimet on esitetty kuvassa 3.6.

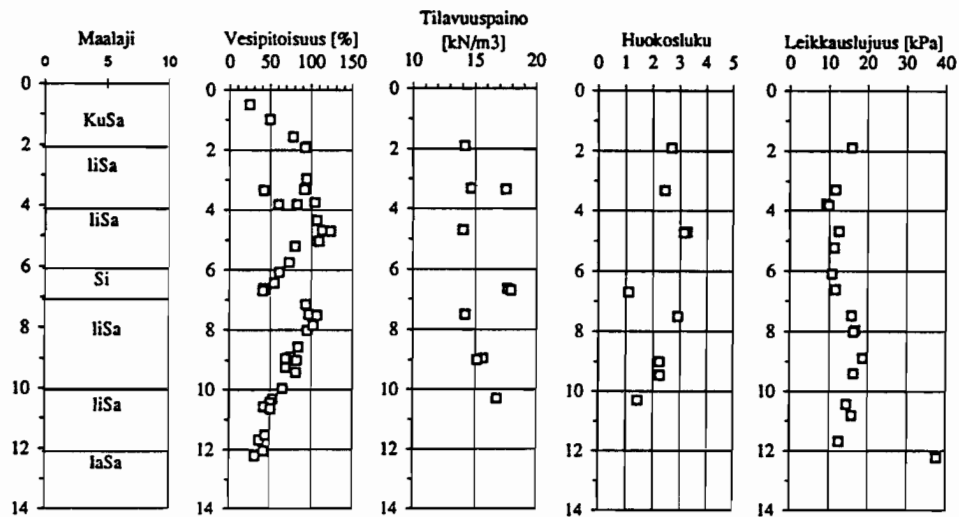
Taulukko 3.2. Vakuumikonsolidointikokeen suunnitteluvaiheessa tehdyt laboratoriotutkimukset.

NÄYTTEET		
Häiriintymättömät näytteet (ST II, Ø60 mm, H = 17 cm)		
piste 5: z = 1.84...13.74 m	9 sarjaa 1.4 m välein = 36 näyteputkea	
piste 6: z = 1.90...12.40 m	<u>8 sarjaa 1.4 m välein = 31 näyteputkea</u>	
	yht.67 näyteputkea (TKK:lle puolet)	
Häiriintyneet näytteet (KuSa)		
piste 5: z = 0.3...0.7 m, 0.7...1.3 m		
piste 6: z = 0.3...0.7 m, 0.7...1.2 m		
LUOKITUSKOKEET		
Kaikista putkista s_k , w , γ ja e_0 . Lisäksi TKK:lla kuudesta näytteestä ρ_s , H_k , H_u , F , w_L , w_p , I_p , S_r , S_a -% ja maalaji.		
Häiriintyneistä näytteistä ρ_s , H_k , H_u , w , γ , S_a -% ja maalaji Suojahiekan tilavuuspaino volymetrikokeiden avulla		
PORTAITTAISET ÖDOMETRIKOKEET		
Tehtiin kaikki TKK:lla		
piste 5: 17 kpl, joista yksi vaakasuora		
piste 6: 9 kpl		
JATKUVAPURISTEISET ÖDOMETRIKOKEET		
	TKK	HK/GEO
CRS	piste 5: 15 pysty- ja 5 vaakasuoraa	4 pysty- ja 4 vaakasuoraa
	piste 6: 4 pysty- ja 3 vaakasuoraa	
CPR	piste 5:	3 pysty- ja 2 vaakasuoraa
	piste 6: 2 pystysuoraa	
KOLMIAKSIAALIKOKEET		
pisteestä 6: 4 tavallista sekä imu-pystykuormitusvertailu => yhteensä 6		

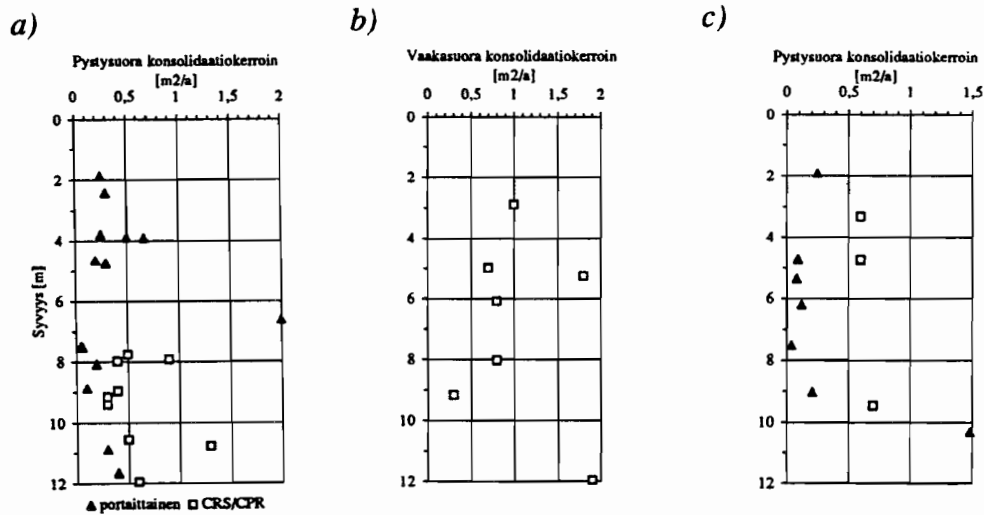
Pohjavedenpinnan sijainnin avulla laskettiin koealueen vallitsevat jännitykset. Ödometrikokeista määritetyt esikonsolidaatiojännitykset jäävät monin paikoin vallitsevaa jännitystä alhaisemmiksi. Jos otetaan huomioon huokosvedenylipaine eri syvyyksillä, on savi normaalikonsolidoitunutta kuivakuorta lukuunottamatta. Piste 5 esikonsolidaatiojännitykset ja vallitsevat tehokkaat jännitykset on esitetty kuvassa 3.7.



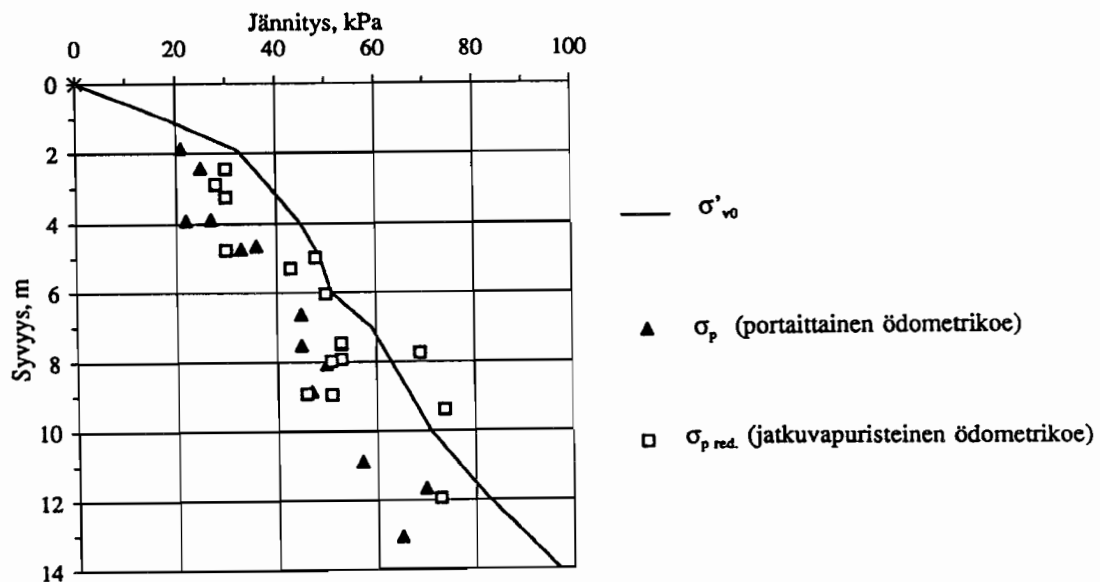
Kuva 3.4. Torpparinmäki, piste 5. Luokituskokeiden avulla määritetyt maalaji, savipitoisuus, vesipitoisuus, tilavuuspaino, huokosluku ja leikkauslujuus.



Kuva 3.5. Torpparinmäki, piste 6. Luokituskokeiden avulla määritetyt vesipitoisuus, tilavuuspaino, huokosluku ja leikkauslujuus. Maalajit on määritetty pisteen 5 näytteistä.



Kuva 3.6. Portaittaisten ja jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden avulla määritetyt pystysuorat ja vaakasuorat konsolidaatiokertoimet. a) ja b) piste 5, c) piste 6.



Kuva 3.7. Pisteen 5 näytteistä ödometrikokeiden avulla määritetyt esikonsolidaatiojännitykset (σ_p) ja vallitseva tehokasjännitys (σ'_{p0}).

3.3 Mitoitus

3.3.1 Kokeen kesto aika

Kansainvälisten julkaisujen perusteella käytetyt pumppausajat vaihtelevat vakuumikonsolidoinnissa kahdesta kuukaudesta yli vuoteen kohteen koon, maan ominaisuuksien, pehmeikön paksuuden, pystyjavälin ja pumppaustehon mukaan. Magnanin [1994] mielestä optimaalinen konsolidointiaika on noin neljä kuukautta. Pumppausajan pidentämisen sijasta on usein taloudellisempaa kasvattaa pystyjen lukumäärää.

Torpparinmäen koekohteen suunnittelu aloitettiin kesäkuun 1995 lopussa. Aikataulu oli kireä. Kokeilun takarajaksi asetettiin joulukuun loppu. Suunnittelulle ja rakentamiselle varattiin pari kuukautta aikaa. Mitoituksessa huomioitiin kohteen purkamisen vaatima aika sekä mahdolliset pumppaukseen liittyvät seisokit ja muut viiveet. Käytettävissä olevaksi konsolidointiajaksi muodostui siten kolme kuukautta (90 vuorokautta).

3.3.2 Reunaojen tilantarve

Riittävän tiiviyn varmistamiseksi tiivistyskalvon reunat upotetaan yleensä käsiteltävän alueen ympärille kaivettuun reunaajaan, vähintään puoli metriä pohjavedenpinnan alapuolelle.

Torpparinmäen koekentällä pohjavesi sijaitsi noin kahden metrin syvyydessä. Sortumien välttämiseksi reunaajan luiskakaltevuudeksi valittiin 1:1 ja pohjan leveydeksi 0.5 m. Maanpinnalla ojan leveys oli 4-5 metriä. Koealueen koko oli tarkoin rajattu, joten reunaajan vaikutuksesta pystyjitettava alue kutistui $21 \times 15 \text{ m}^2$ kokoiseksi.

3.3.3 Pystyojat

Cognon et Thevanayagam [1994] mukaan vakuumikonsolidoinnissa käytetyn pystyjavälin suunnittelussa voidaan soveltaa tavanomaisen ylipenkereen ja pystyojien mitoittamiseen tarkoitettuja geoteknisiä menetelmiä.

Torpparinmäen koekohteen pystyjaväli mitoitettiin kolmella eri menetelmällä: Mebra-mitoitusohjelmalla [Mebra V2.02 1993], Hansbon menetelmällä [Hansbo 1981] ja diagrammimenetelmällä [Geotechnics Holland BV 1980]. Kaikissa näissä menetelmissä maapohja oletetaan yhdeksi kerrokseksi, toisin sanoen mitoituksessa käytetään keskimääräisiä vaakasuoran ja pystysuoran konsolidaatiokertoimen arvoja.

Suunnitteluajataulun kireyden vuoksi ei mitoitusohjelmalla ollut käytettävissä kuin muutamia CRS-koetuloksia. Portaittaisten ödometrikokeiden valmistuttua havaittiin niiden antavan CRS-kokeita selvästi pienempiä pystysuoran konsolidaatiokertoimen arvoja. Samoin havaittiin vedenläpäisevyydessä merkittäviä eroja eri syvyyksillä. Tämä ei kuitenkaan ollut tiedossa pystyjoja mitoittaessa, vaan saven oletettiin päinvastoin olevan varsin homogeenista.

Tavallisesti vaakasuora konsolidaatiokerroin on noin 2-4-kertainen pystysuoraan konsolidaatiokertoimeen nähden. Torpparinmäen saven jatkuvapuristeisista ödometrikokeista ei saatu selvää suhdetta vaakasuorien ja pystysuorien konsolidaatiokertoimien välille. Koetulosten ja muilta Helsingin alueilta saatujen kokemuseräisten tietojen [Yrjänä et Korhonen 1991] perusteella vaakasuora konsolidaatiokerroin arvioitiin ojaväliä mitoittaessa kaksinkertaiseksi pystysuoraan konsolidaatiokertoimeen nähden.

Pystyojat olivat Mebra-Drain MD 7407 nauhapystyjoja. Ojan nimellisleveys oli 100 mm ja nimellispaksuus 3.0 mm. Pystyojien ankkurointitaso valittiin siten, että ojat olivat kaikkialla samanpituisia. Savikerroksen paksuus oli pienin koealueen puistonpuoleisessa päässä ja ojitussyvyys määräytyi tämän perusteella. Nauhaojan alapään ja saven alapuolisen läpäisevän silttikerroksen väliin jätettiin noin metrin paksuinen

suojavyöhyke. Ojapituudeksi tuli siten noin 10 metriä.

Koekentällä pystyöjitus päätettiin tehdä neliöverkkoon. Tämä helpotti vaakasuorien kuivatusputkien asentamista ja instrumentointia.

Mebra Version 2.02 - pystyöjien mitoitusohjelma

Mebra Version 2.02 on Geotechnics Hollandin kehittämä MSDOS-pohjainen laskentaohjelma. Ohjelmalla voidaan laskea taloudellisin ojaväli Barronin teoriaan perustuen [Mebra V 2.02 1993]. Tuloksena saadaan myös pysty- tai vaakasuorat keskimääräiset konsolidaatioasteet sekä Carrillon (1942) teorian mukaan laskettu yhdistetty konsolidaatioaste.

Käyttäjä syöttää ohjelmaan pystysuoran (c_v) sekä vaakasuoran (c_h) konsolidaatiokertoimen arvot, pystysuoran virtausmatkan (h), vaaditun konsolidaatioasteen (U), käytettävissä olevan konsolidointiajan (t), ojan ekvivalentin halkaisijan (d_{ekv}) ja ojittettavan alueen pinta-alan (A). Ojaväli määräytyy konsolidointiajan, konsolidaatioasteen ja vaakasuoran konsolidaatiokertoimen perusteella.

Laskentatuloksina saadaan: pystyöjan vaikutusalueen halkaisija (D), ojaväli kolmio- (d_Δ) ja neliöverkoilla ($d_\square$), ojamäärä neliömetriä kohti (kpl/m^2) sekä ojien kokonaismäärä (yht). Lisäksi saadaan konsolidaatio-aikakuvaajat 1) huokosveden horisontaalivirtaukselle pystyöjitetussa tapauksessa, 2) huokosveden pystyvirtaukselle ilman ojia ja 3) yhdistetylle tapaukselle. Pystyöjamitoituksessa käytetyt lähtötiedot ja saadut tulokset on esitetty taulukossa 3.3.

Ohjelman tekijöiden mukaan myös vakuumikonsolidoinnissa huokosvesi virtaa ylös- ja alaspäin, joten virtausmatka on puolet konsolidoitavan kerroksen paksuudesta. Ojavälin mitoituksen kannalta pystysuoran virtausmatkan pituudella ei ole merkitystä.

Taulukko 3.3. Pystyojamotoitus Mebra-ohjelmalla.

A m ²	h m	t d	U %	c _v m ² /a	c _h m ² /a	d _{ekv}	D m	d _□ m	d _Δ m	kpl /m ²	yht.
300	5	90	80	0,5	1,0	0,065	0,82	0,78	0,72	1,91	573
300	5	90	70	0,5	1,0	0,065	0,92	0,87	0,81	1,52	456
300	5	90	80	0,5	1,5	0,065	0,96	0,92	0,85	1,37	412

d_{ekv} - liuskapystyojan ekvivalenttihalkaisija

d_□ - ojaväli neliöverkolla

d_Δ - ojaväli kolmioverkolla

Hansbon menetelmä

Pystyojaväli mitoitettiin myös käsi-laskennalla Hansbon menetelmää käyttäen [Hansbo 1981 / Tiel. 1994]. Mitoituksessa ei otettu huomioon ojien asentamisen yhteydessä tapahtuvaa maan häiriintymistä.

Laskennassa käytettiin seuraavia yhtälöitä [Tiel. 1994]:

$$U = 1 - e^{-\frac{8T}{F(n)}} \quad (3.1)$$

$$T_h = \frac{c_h t}{D^2} \quad (3.2)$$

$$F(n) = \ln(n) - 0.75 \quad (3.3)$$

$$n = \frac{D}{d} \quad (3.4)$$

$$d = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (3.5)$$

U on vaadittu konsolidaatioaste

T aikatekijä

t esikuormitusaika

D pystyajan vaikutusalueen halkaisija

d pystyajan ekvivalenttihakaisija

b ojanauhan leveys

a ojanauhan paksuus

Mitoitus tehtiin takaisinpäinlaskennalla arvaamalla ensin ojaväli ja tarkistamalla sitten sillä kolmessa kuukaudessa saavutettu konsolidaatioaste. Tulokset on koottu taulukkoon 3.4.

Taulukko 3.4. Torpparinmäen koekohteen lähtötiedot ja saadut tulokset.

d m	c_h m ² /a	t d	U %	D m	$d_{\square}$ m
0,0656	1,0	90	80	0,85	0,75
0,0656	1,0	90	70	0,90	0,80

$d_{\square}$ pystyajan neliöverkossa

Graafinen menetelmä

Kolmanneksi ojaväli mitoitettiin Geotechnics Hollandin [1980] mitoitusdiagrammin avulla. Mitoitusdiagrammi soveltuu Mebra-Drain nauhapystyöjille. Mitoitus perustuu Hansbon yhtälöstä muokattuun kaavaan. Syvyydellä $z = 0,4 * l$ keskimääräinen vaakasuora konsolidaatiokerroin lasketaan seuraavasti (3.6):

$$c_h = \frac{D^2}{8t} \left[\ln\left(\frac{D}{d}\right) - \frac{3}{4} + \pi \cdot 0,64 \cdot l^2 \cdot \frac{k_c}{q_w} \right] \ln \frac{1}{1-\bar{U}} \quad (3.6)$$

c_h on keskimääräinen vaakasuora konsolidaatiokerroin, m^2/s

t aika, kk

D ojan vaikutusväli, m

d ojan halkaisija, m

l ojan pituus yksisuuntaisessa virtauksessa, m
(puolikas pituus kaksisuuntaisessa virtauksessa)

k_c maan vedenläpäisevyyskerroin, m/s

q_w ojan virtauskapasiteetti, m^3/s

U konsolidaatioaste, %

z syvyys, m

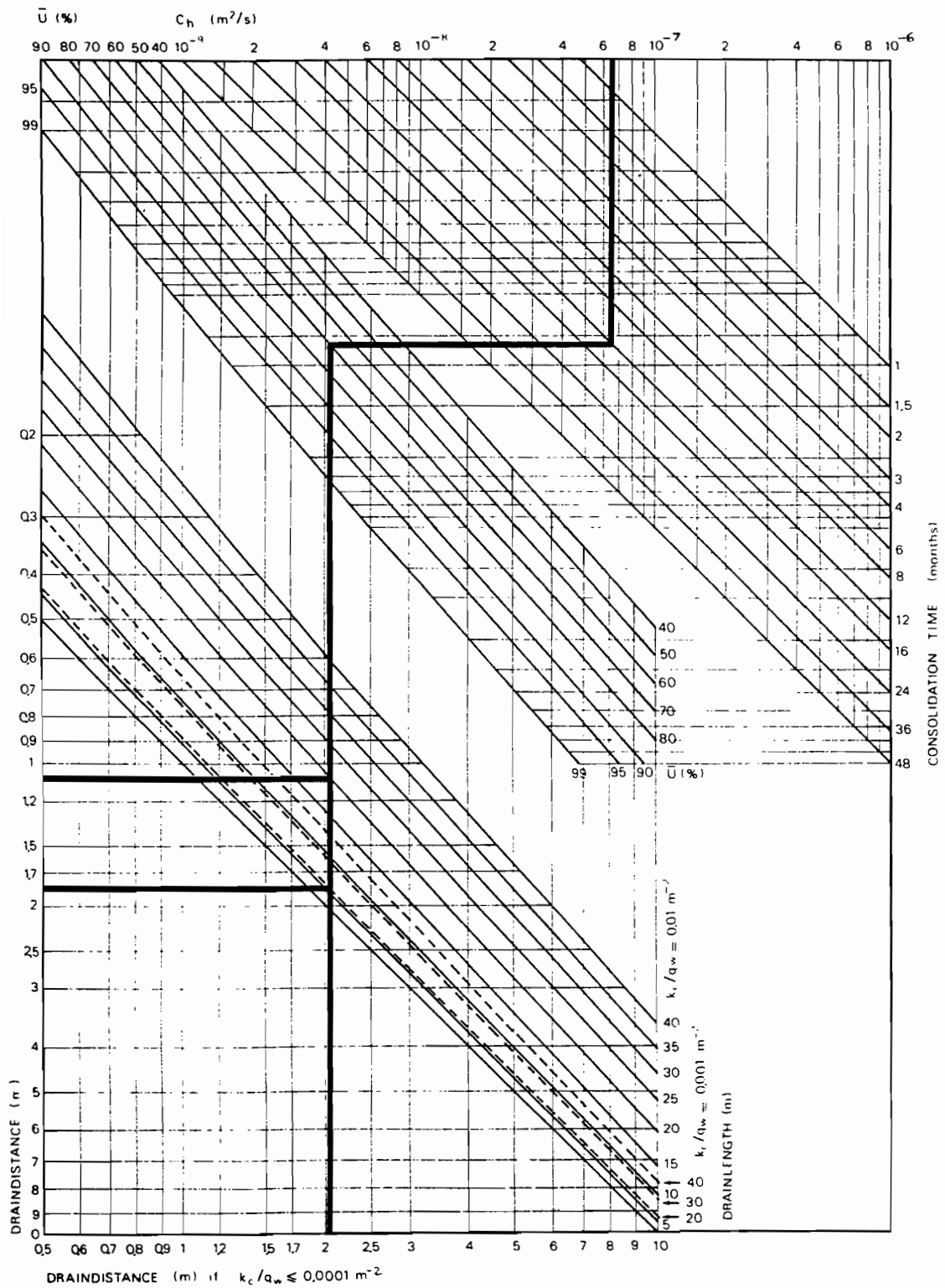
Mikäli tiedetään maapohjan keskimääräinen vaakasuora konsolidaatiokerroin, käytettävissä oleva aika, haluttu konsolidaatioaste, kuivatettavan kerroksen paksuus (ojien pituus), maan vedenläpäisevyys ja ojan läpäisykapasiteetti, voidaan ojaväli määrittää kuvan 3.8 diagrammin avulla.

Taulukossa 3.5 on esitetty Torpparinmäen koekohteen lähtötiedot sekä kuvan 3.8 mitoitusdiagrammin avulla määritetyt pystyojavälit.

Taulukko 3.5. Mebra-Drain pystyojamitoitus.

U %	t kk	c_h m^2/s	l m	k_c/q_w m^2	D m	$d_{\square}$ m
80	3	$3,1e^{-8}$	10	$10^{-4} \dots 10^{-5}$	0,76	0,67
70	3	$3,1e^{-8}$	10	$10^{-4} \dots 10^{-5}$	0,86	0,76

$d_{\square}$ pystyojaväli neliöverkossa



Kuva 3.8. Mebra-Drain pystyosien mitoitusdiagrammi [Geotechnics Holland BV 1980]

Valitut arvot

Alunperin mitoituksessa pyrittiin vähintään 80 % konsolidaatioasteen saavuttamiseen. Torpparinmäen savi oli kuitenkin niin huonosti läpäisevää, käsiteltävä kerros sen verran paksu ja käytettävissä oleva konsolidointiaika niin lyhyt, että pystyöjaväli olisi tuolloin jäänyt todella pieneksi. Pienellä ojavälillä maan häiriintymisen merkitys kasvaa. Toiminnallisten seikkojen lisäksi kustannukset olisivat nousseet, sillä pystyöjien määrä olisi ylittänyt selvästi arvioidun tarpeen.

Pumppausaikaa ei voitu pidentää, joten konsolidaatioaste tingittiin noin 70 prosenttiin. Mitoitusmenetelmien perusteella sopiva ojaväli olisi ollut 0.75-0.8 m. Ojaväliä haluttiin kuitenkin hieman kasvattaa ja liuskapystyöjat päätettiin asentaa neliöverkkoon 0.85 metrin välein.

3.3.4 Painuma

Pumppausteho

Vakuumikonsolidoinnissa alipaineen teoreettinen maksimi on 100 kPa. Alipainepumppu on teholtaan tavallisesti noin 90 kPa. Mikäli konsolidointi tehdään alhaisemmalla alipaineella, voidaan käyttää myös pienempitehoista pumppua. Koska pumppausaika on tavallisesti 3-6 kk, pystyöjaväli ja pumppausteho määräävät käytännössä sen, millainen painuma tässä ajassa saavutetaan.

Torpparinmäen koekohteen läheisyydessä aiemmin tehdyissä esirakennustöissä oli käytetty 1.5 metrin ylipengertä. Vakuumikonsolidoinnissa suunnittelupaineeksi valittiin 50 kPa, mikä vastasi noin kolmen metrin pengerkuormaa. Pumppua valittaessa varauduttiin rakenteeseen mahdollisesti syntyviin vuotoihin tai muihin syihin, joiden vuoksi pumppaustehoa olisi työn aikana kyettävä nostamaan. Valitun pumpun maksimiteho oli noin 90 kPa. Kyseessä oli sähkökäyttöinen pumpputyyppi, joka kykeni

pumppaamaan sekä vettä että ilmaa $110 \text{ m}^3/\text{h}$. Geotechnics Hollandin antamien ohjeiden mukaan [Cortlever / Palolahti 1995] sallittu vähimmäiskapasiteetti olisi ollut $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

Painuman laskenta klassisella tangenttimoduulimenetelmällä

Koekohteessa maapohja voitiin jakaa yhteensä kahdeksaan erilaiseen kerrokseen. Kerroksellisen maan painumisnopeuden laskeminen onnistuu parhaiten elementtimenetelmiin perustuvilla laskentaohjelmilla. Suunnitteluvaiheessa ei kuitenkaan ollut riittävästi aikaa erilaisiin mallikokeiluihin. Tässä vaiheessa tyydyttiin primaaripainuman loppuarvon arviointiin klassisten menetelmien avulla.

Ulkomaisten lähteiden [Technique Geosystems / Cofra JV 1995, Ye et al. 1991] mukaan painuma voidaan laskea Terzaghin, Taylorin ja Biotin konsolidaatiomallien mukaan käsittelemällä alipainetta vastaavan suuruisena pengerkuormana. Alipaineen korvaamisessa pengerkuormalla on se ongelma, että pengerkuorman vaikutus ulottuu myös pystyjojen alapään alapuolelle. Todellisuudessa alipaineen vaikutus ulottuu vain pystyjojen syvyydelle. Alipaineen teho on suurin maan pinnalla ja se pienenee syvyyden kasvaessa. Pengerkuormankin vaikutus pienenee syvyyden mukana, mutta huomattavasti hitaammin kuin alipaineen. Tässäkin mielessä alipaineen korvaaminen pengerkuormalla vääristää tulosta.

Koekentän alustavassa painumatarkastelussa primaaripainuma laskettiin klassisella tangenttimoduulimenetelmällä. Laskennassa huomioitiin vain ne kerrokset, joiden läpi pystyjojat kulkivat. Laskentaparametrit määritettiin ödometrikokeiden tuloksista. Käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 3.7. Kerroksellisen maapohjan primaariset muodonmuutokset laskettiin muodonmuutosyhtälöllä (3.7) [Janbu 1970, Korhonen 1985] ja kunkin kerroksen yksisuuntaisen muodonmuutostilan primaarinen konsolidaatiopainuma yhtälöllä (3.8) [Korhonen 1985]:

$$\epsilon_z = \frac{1}{m\beta} \left[\left(\frac{\sigma'_{v0} + \sigma_z}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma_v} \right)^\beta \right] \quad (3.8)$$

$$S_p = \int_0^H \epsilon_z dz \quad (3.7)$$

ϵ_z on suhteellinen primaarinen muodonmuutos pystysuunnassa

σ_z lisäjännitys syvyydellä z

σ'_{v0} tehokas vallitseva jännitys

σ_v vertailujännitys (= 100 kPa)

m moduuliluku

β jännitysekspONENTTI

S_p primaarinen konsolidaatiopainuma

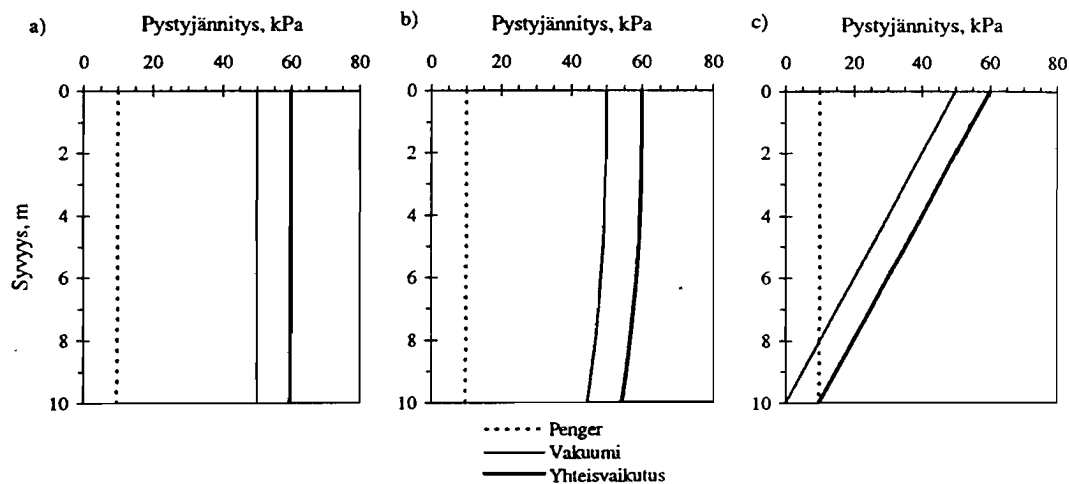
Käytetty laskentakuorma oli maanpinnalla 60 kPa. Tästä alipaineen osuus oli 50 kPa ja pengerkuorman (suodatinkerros ja suojahiekka) 10 kPa. Kuorman jakautumista maapohjassa mallinnettiin kolmella tavalla:

- 1) Alipaine kuorma oletettiin tasanjakautuneeksi koko maapohjassa (kuva 3.9 a).
- 2) Alipaineen jännitys jakauma approksimoitiin suorakaiteen muotoisen tasaisesti kuormitetun taipuisan laatan kaavojen avulla (kuva 3.9 b) [Näätänen 1990].
- 3) Lineaarisesti syvyyden mukana pienenevä kolmionmuotoinen jännitys jakauma. Alipaine oli maanpinnassa 50 kPa ja kymmenen metrin syvyydessä 0 kPa (kuva 3.9 c).

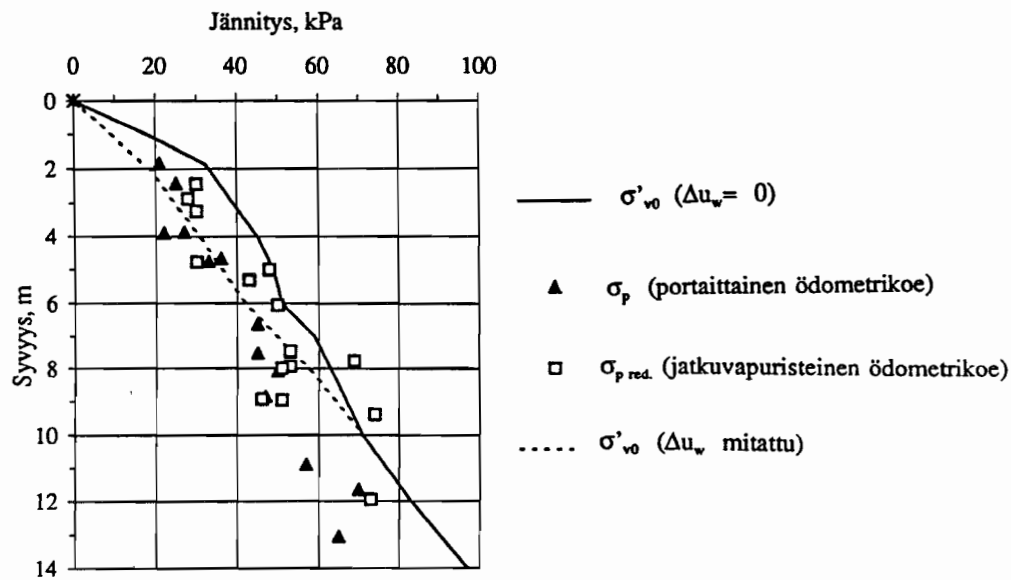
Pengerkuorman jännitys jakauma arvioitiin taipuisan laatan kaavojen avulla. Alipaineen ja pengerkuorman yhteisvaikutus laskettiin superpositioperiaatteella.

Huokospainekärkien mukaan koepaikalla oli maassa huokosvedenylipainetta. Alustavassa tarkastelussa päätettiin laskea sekä ylipaineen huomioonottavat tapaukset että normaalipaineiset ($\Delta u_w = 0$) tapaukset. Normaalipaineisessa tapauksessa vallitseva tehokas jännitys laskettiin pohjavedenpinnan syvyyden ja maan tilavuuspainon avulla. Huokosveden ylipaineen huomioon ottavassa tapauksessa jännitys jakauma arvioitiin käyttämällä hyväksi mitattuja huokosvedenpaineen arvoja sekä portaittaisten ödometrikokeiden esikonsolidaatiojännityksiä. Käytetyt jännitysjaumat on esitetty kuvassa 3.10.

Koealueen läheisyydessä oli puolentoistametrin ylipenkereen ja liuskapystyöjien (ojaväli 1.2 m) avulla saavutettu puolessatoista vuodessa noin 0.3 m painuma. Ylipenkereen alla oleva savikko oli kuitenkin selvästi ohuempi kuin vakuumin konsolidoitavassa kohteessa, eikä tuloksia sen vuoksi voitu käyttää hyväksi primaaripainuman arvioinnissa. Tämän vuoksi laskettiin vielä tangentialmoduulimenetelmää käyttäen primaaripainumat tapauksessa, jossa koekenttää kuormitti 1,5 metrin korkuinen pengeri. Eri menetelmiä käyttäen saadut tulokset on koottu taulukkoon 3.6.



Kuva 3.9. Alipaineen ja pengerkuorman aiheuttamat jännitykset maapohjassa. a) tasanjakautunut alipaine, b) taipuisan laatan kaavat, c) lineaarisesti pienenevä alipaineen jännitysjauma.



Kuva 3.10. Vallitseva jännitys. Yhtenäinen viiva kuvaa vallitsevaa tehokasta jännitystä, kun huokosveden ylipainetta ei oteta huomioon. Katkoviivalla merkityssä jännitysjakauksessa kentältä mitattu huokosveden ylipaine on otettu huomioon tehokasta vallitsevaa jännitystä määritettäessä.

Taulukko 3.6. Tangenttimoduulimenetelmällä lasketut primaaripainumat.

Vallitseva jännitys	Pintakuorma	Lisäkuorman jännitysjakauksa	Primaaripainuma
VAKUUMIKONSOLIDOINTI			
Ylipaine otettu huomioon	60 kPa	Tasainen jännitysjakauksa	1.43 m
Ylipaine otettu huomioon	60 kPa	Taipuisan laatan kaavat	1.41 m
Ylipaine otettu huomioon	60 kPa	Lineaarisesti pienenevä	0.95 m
Ei ylipainetta	60 kPa	Tasainen jännitysjakauksa	1.12 m
Ei ylipainetta	60 kPa	Taipuisan laatan kaavat	1.10 m
Ei ylipainetta	60 kPa	Lineaarisesti pienenevä	0.70 m
YLIPINGER			
Ylipaine otettu huomioon	27 kPa	Taipuisan laatan kaavat	0.88 m
Ei ylipainetta	27 kPa	Taipuisan laatan kaavat	0.66 m

Laskelmat paljastivat, että suunniteltu 50 kPa:n alipaine aiheuttaisi merkittäviä painumia. Menetelmästä riippuen tulokset vaihtelivat varsin paljon.

Painumatavoite

Pystyojien mitoituksessa käytetty 70 prosentin konsolidaatioastevaatimus olisi em. laskelmien mukaan johtanut pahimmillaan lähes metrin painumiin. Tällainen painuma olisi aiheuttanut hankaluuksia koekentän tulevalle käytölle. Koska tontille myöhemmin tulevat kuormat jäisivät joka tapauksessa 50 kPa alhaisemmiksi, haluttiin painumat rajoittaa 'siedettävälle' tasolle. Vakuumikonsolidoinnin painumatavoitteeksi asetettiin 0.5 m. Yli metrin suuruisiin primaaripainumiin verrattuna konsolidaatioaste olisi tuolloin alhainen, mutta 1.5 metrin ylipengertä käytettäessä se vastaisi jo 60 - 80 % konsolidaatioastetta.

3.4 Toteutettava rakenne

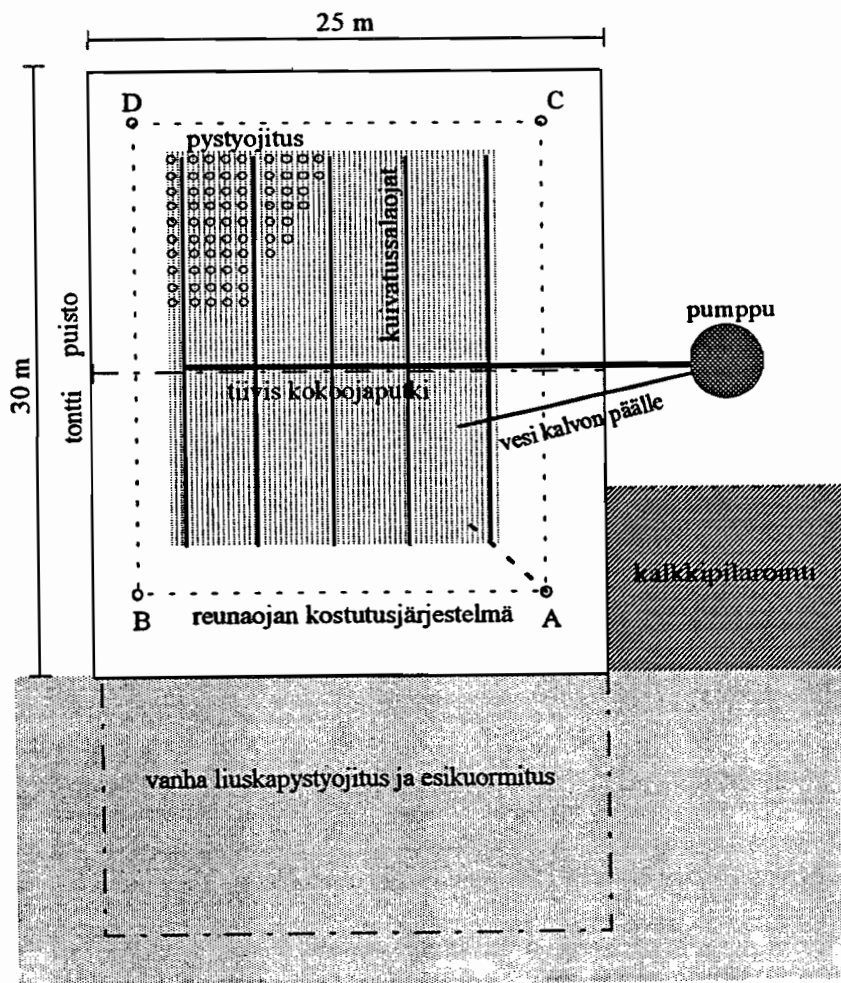
3.4.1 Rakennerratkaisu ja materiaalivalinnat

Torpparinmäen koekohteen suunnittelussa käytettiin mahdollisuuksien mukaan apuna ulkomaisia vakuumikonsolidointia käsitteleviä julkaisuja. Eräiden rakenneosien kuten pystyjavälin ja reunaojien syvyyden suunnittelemiseksi niistä löytyikin hyödyllisiä tietoja, kun taas joidenkin rakenneosien olemassaolo selvisi lähinnä vain dimensiottomista kuvista.

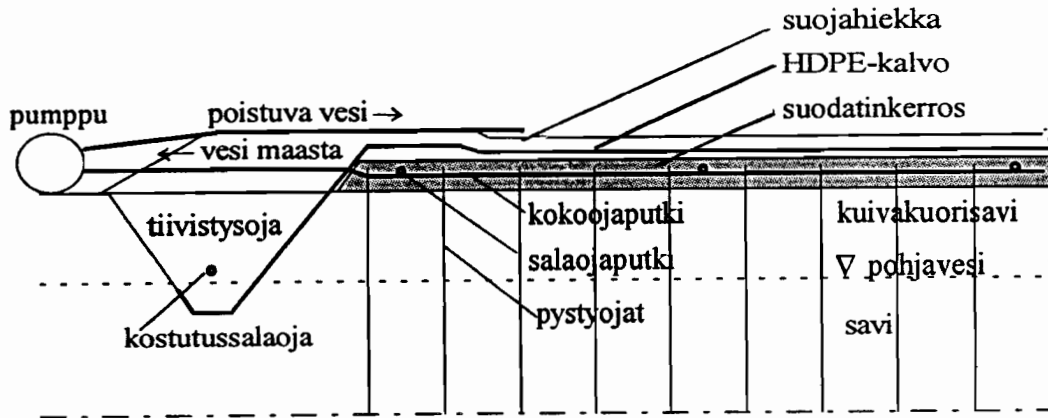
Torpparinmäen koekohde oli pieni. Tiivistyminen haluttiin saada aikaan pelkän alipaineen ja pystyojien avulla. Pieni lisäkuorma syntyi kuitenkin suodatinkerroksesta ja siitä, että maasta imetty vesi päätettiin pumpata koekentän päälle suojaamaan kalvoa vaurioitumiselta. Veden pysyminen kalvon päällä varmistettiin muotoilemalla koekenttä hiekan avulla allasmaiseksi. Suodatinkerroksessa käytettiin suodatinhiekan tai

luonnosoran sijasta mursketta. Kuivatussalaojaväli valittiin varmuuden vuoksi varsin tiheäksi. Kalvon reunojen tiivistyksessä maata vasten käytettiin pehmeää savea.

Seuraavissa kohdissa käydään tarkemmin läpi Torpparinmäen koekohteen rakenneratkaisu ja materiaalivalinnat. Kuvat 3.11 ja 3.12 esittävät koekohteen tasokuvaa ja poikkileikkausta. Kuvat eivät ole mittakaavassa. Varsinaiset työpiirustukset ovat liitteessä 5.



Kuva 3.11. Torpparinmäen koekenttä: tasopiirustus (ei mittakaavassa).



Kuva 3.12. Koekentän rakenneleikkaus (ei mittakaavassa).

Pystyojat

Pystyöjitus suunniteltiin 15 m * 21 m kokoiselle alueelle. Pystyöjina käytettiin Mebra Drain MD 7407 liuskapystyöjia. Ojat suunniteltiin neliöverkkoon. Ojaväliksi valittiin kohdan 3.4.3 perusteella 0.85 m. Ojapituus oli murskekerroksen yläpinnasta mitattuna noin 10.3 m. Ojien yhteismäärä oli 456 kappaletta.

Suodatinkerros ja kuivatusputkisto

Vakuumikonsolidoinnin aikana pystyöjista nouseva vesi kerääntyy suodatinkerrokseen, mistä se imetään vaakasuorien putkien kautta kalvon ulkopuolelle. Suodatinkerroksen materiaalin on oltava hyvin vettäläpäisevää. Ulkomaisissa artikkeleissa suodatin-kerroksen paksuus on tavallisesti noin puoli metriä. Suodatinkerros muodostuu karkeasta materiaalista ja sen päälle levitetystä ohuesta hiekkakerroksesta. Hiekka toimii suojakerroksena murskeen ja muovikalvon välissä.

Koekohteen suodatinkerroksen paksuudeksi valittiin 0.5. Tästä 0.4 m oli hyvin vettäläpäisevää # 0-30 mm mursketta ja sen päälle tuotiin myöhemmin 0.1 m kivetöntä hiekkaa. Murske levitettiin koekentälle ennen pystyöjitusta ja se toimi työskentelyalustana pystyöjien asennuksen aikana.

Murskekerrokseen pystyöjien väliin suunniteltiin vaakasuuntainen kuivatusputkisto. Putkiston mitoituksesta löytyi niukasti tietoa. Design aspects of vacuum consolidation-raportin [Geotechnics Holland BV] mukaan pituussuuntaisten (aallotettujen) kuivatussalaojaputkien halkaisija on 50-100 mm ja putkien keskinäinen etäisyys 5-8 m. Tiiviin kokoojaputken on oltava suuriläpimittainen.

Torpparimäen vaakasuora kuivatusputkisto koostui viidestä kentän pituussuuntaisesta salaojaputkesta ja yhdestä kentän poikki kulkevasta tiiviistä kokoojaputkesta. Vaakaputkia varten kaivettiin murskekerrokseen urat, joiden syvyys oli putkiston latvoilla 0.2 ja kaato 0.5 % (kuva 3.12). Muovisten salaojaputkien halkaisijaksi valittiin 80 mm. Ojaväli oli 3.4 m. Putket ympäröitiin salaojasoralla. Salaojat liitettiin 80/110 muoviliittimillä tiiviiseen PEH Ø 110 mm kokoojaputkeen. Poikittaissuuntainen ura täytettiin kokoojaputken asennuksen jälkeen murskesoralla.

Pystyöjitetun kentän reunoille suunniteltiin suojahiekasta noin metrin levyinen reunavalli, jonka yläpinta oli 0.1 m korkeammalla kuin vallin rajaaman altaan.

Tiivistekalvo ja reunaajat

Läpäisemättömäksi tiivistekalvoksi valittiin 2 mm paksuinen työmaalla hitsaamalla saumattava HDPE-kalvo (high density polyethylene). Kalvon läpivientejä pyrittiin välttämään. Niitä tarvittiin ainoastaan kaksi kappaletta: toinen pumppuun johtavaa tiivistä kokoojaputkea varten ja toinen alipainemittaria varten. Kokoojaputki tuli johtaa suodatinkerroksesta tiivistekalvon läpi hieman pystyasennossa, jotta läpiviennin hitsaaminen kalvoon onnistuisi mahdollisimman hyvin.

Kalvon reunojen tiivistämiseksi pystyöjitetun alueen ympärille suunniteltiin reunaoja. Koealueella pohjavesi sijaitsi varsin syvällä noin kahden metrin syvyydessä. Paitsi että ojat veivät paljon tilaa, kaivaminen ja kalvon asentaminen näin syvälle oli ongelmallista. Syvyysvaatimuksesta tingittiin siten, että ojan pohjan tuli ulottua vähintään 0.30 m kuivakuorikerroksen läpi pehmeään savikerrokseen. Kaivuteknisistä syistä tiivistysojan reunakaltevuus oli 1:1 lukuunottamatta tontin poikki kulkevaa osaa, jossa vanhojen pystyöjien vuoksi ojan toinen sivu suunniteltiin jyrkemmäksi (liite 4). Ojan pohja suunniteltiin 0.5 m leveäksi.

HDPE-kalvon reunat ulotettiin tiivistysojan pohjalle, jossa ne muodostivat kaukalon ojan sisäluiskaa ja pohjaa vasten. Reunaosat täytettiin 0.3 metrin paksuudelta märällä savella. Savi sullottiin tiivistyskalvoa ja ojan reunoja vasten. Ojan yläosa täytettiin kerroksittain tiivistettävällä plastisella kuivakuorisavella. Kerralla tiivistettävä kerros sai olla korkeintaan 0.2 m. Tiivistys suunniteltiin tehtäväksi Talonrakennuksen maatoiden työselityksen (RIL 132) mukaisesti kaivinkoneen kauhaan tulevan tärylevyn tai muun vastaavan menetelmän avulla.

Reunaojaan suunniteltiin kostutusjärjestelmä ojan pohjalle sullotun märän saven kuivumisen estämiseksi. Kostutukseen käytettiin maasta pois imettyä vettä. Vesi pumpattiin ensin koekentälle kalvon päälle, mistä se johdettiin tiivistysojan pohjalle. Tiivistysojan kulmakohtiin asennettiin pohjalliset tarkastuskaivot A, B, C (Ø 300 mm) ja D (Ø 600 mm). Koekentän tontin puoleiseen kulmaan asennettiin ylivuotoputki (PEH Ø 110 mm) kalvon muodostaman altaan ja tarkastuskaivon A välille (kuva 3.11). Kaivon A pohjan tuli olla 0.2 m ylempänä kuin kaivon D pohjan. Tarkastuskaivot yhdistettiin 80 mm salaojilla. Salaojaputket sijoitettiin noin puoli metriä HDPE-kalvon yläpuolelle, siten että niillä oli 0.5 % kaato kaivoa D kohti. Tarkastuskaivoon D kulkeutunut vesi pumpattiin uppopumpun avulla pellolle vähintään 20 metrin päähän koealueen reunasta.

Kalvon yläpuoliset kerrokset

Tiivistyskalvon päälle levitettiin ensin suodatinkangas ja sen päälle 0.20 m kerros kivetöntä hiekkaa suojaamaan kalvon pintaa vaurioitumiselta.

Tontin poikki kulkeva reuna-osa sijaitsi kiusallisesti tontin keskellä. Reuna-osa suunniteltiin mahdollisimman kapeaksi, mutta sen leveys maan pinnalla oli siltikin yli neljä metriä. Tiivistymättömän vyöhykkeen syntymistä vanhan pystyjakentän ja vakuumikonsolidointialueen välille haluttiin välttää. Siksi kalvon päälle levitettävä suojahiekkakerros ulotettiin tontin alueella tiivistysosan päälle, jonne muodostui näin 0.7 m korkuinen ylipenger (kuva 3.12). Kuivakuorisaven ja hiekan sekoittuminen estettiin levittämällä niiden väliin suodatinkangasta.

Alipainepumppu

Alipainepumppu sijoitettiin puistoon. Vakuumikalvon alta tuleva Ø 110 mm kokoojaputki kytkettiin muhviiliitoksella alipainepumppuun johtavaan Ø 100 mm muoviputkeen. Pumpusta lähti muovinen Ø 100 mm vedenpoistoputki koekentälle suojahiekan päälle. Pumpauksen ääntä vaimennettiin rakentamalla pumpun ympärille äänieristetty suojakoppi.

3.4.2 Instrumentointi

Ulkomaisia vakuumikonsolidointikohteita esittelevissä artikkeleissa oli käsitelty myös instrumentointia. Tavallisesti instrumentointi käsitti myös pienissä kohteissa ainakin painumalevyjä, huokovedenpainanturit ja alipainemittarin. Choan [1989] mukaan painumamittaustulokset ovat huokosvedenpainemittauksia luotettavampi keino maan tiivistymistä arvioitaessa. Vakuumikonsolidointikentillä oli saatettu edellä mainittujen mittausten lisäksi seurata pohjavedenkorkeutta, poistuvan veden määrää, sivusiirtymiä

esimerkiksi inklinometrien avulla sekä painumia eri syvyyksissä. Joissakin kohteissa oli myös kalvon alle asennettu vuodonilmaisujärjestelmä [Technique Geosystems / Cofra JV 1995].

Torpparinmäen koekentän instrumentointi pyrittiin tekemään mahdollisimman kattavaksi, mutta kustannukset ja työmäärä eivät saaneet nousta kohtuuttomiksi. Koekentän instrumentointi on esitetty mittakaavattomassa kuvassa 3.13 ja tarkkailumittaussuunnitelma taulukossa 3.7.

Painumien seuraamiseksi kentälle tuotiin yhteensä 13 painumalevyä. Suojahiekkaan kaivettiin käsin kuopat painumalevyjen kohdalle. Painumalevyt asennettiin muovikalvon päälle siten, että kalvon ja levyn väliin jäi ohut kerros suojahiekkaa. Levyjä sijoitettiin symmetrisesti eri puolille koekenttää. Etukäteen arvioitiin, että alipaineen vaikutus olisi suurin noin viiden metrin säteellä kentän keskipisteestä, joten suurin osa levyistä asennettiin tälle alueelle. Painumalevyjen korkeudet vaaittiin ennen pumppauksen käynnistämistä ja sen jälkeen säännöllisesti koko kokeen ajan.

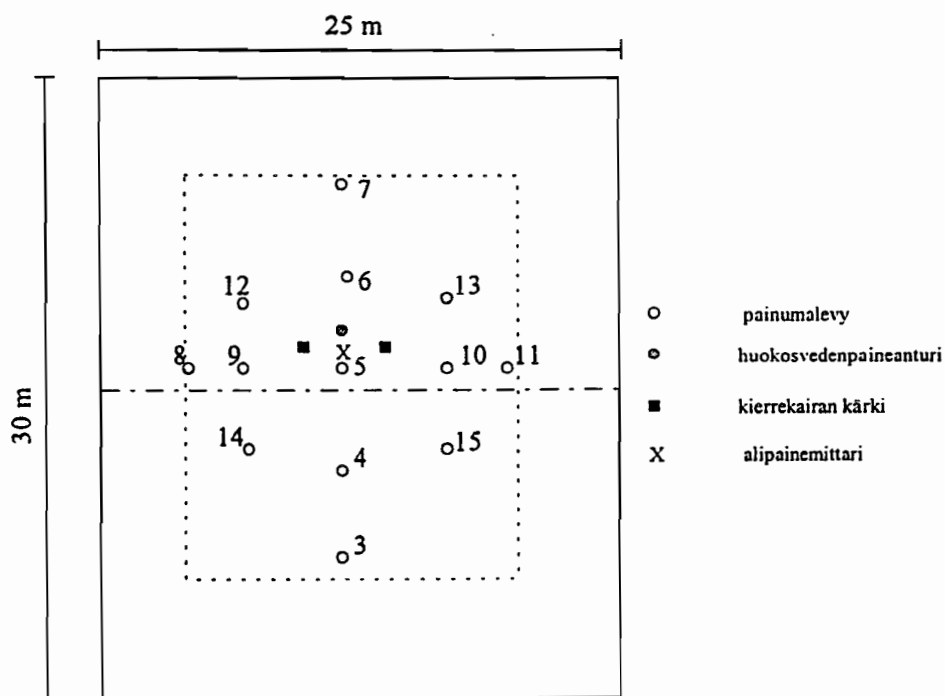
Painumalevyjen avulla saadaan tietoa vain kokonaispainumasta. Painuman suuruutta eri syvyyksillä pyrittiin määrittämään kahden maahan asennetun kierrekairan kärjen avulla. Kärkien tarkka sijainti määritettiin vaaitsemalla juuri ennen alipainepumppauksen käynnistämistä ja heti kokeen päätyttyä. Kärkien asennus tehtiin heti pystyjoituksen jälkeen. Toinen kärjistä kairattiin 4.0 metrin ja toinen 6.0 metrin syvyyteen murskeen pinnalta mitattuna. Syvyydet valittiin sen perusteella, että niillä kohdin oli luokituskokeiden mukaan selvästihavaittava kerrosraja. Kairaustankojen päät jätettiin murskekerrokseen ja suojattiin suojahylsillä niin, etteivät ne rikkoisi vakuumikalvoa kokeen aikana.

Koealueen välittömään läheisyyteen oli jo hyvissä ajoin asennettu kaksi pohjavedenhavaintoputkea. Toinen näistä tuhoutui kuitenkin reunaojaa kaivettaessa, joten se tilalle asennettiin myöhemmin uusi putki. Ennen kokeen alkua tehtyjen huokosvedenpainemittausten tulokset on esitetty edellä kohdassa 3.2.1. Kokeen aikana

huokosvedenpaineen kehitystä seurattiin sähköisten antureiden avulla. Anturit asennettiin ennen HDPE-kalvon asennusta 4.0 ja 8.0 metrin syvyyteen. Sähköjohdot kuljivat kalvon alapuolella koekentän pintaa ja reunaojien pohjaa pitkin koalueen ulkopuolelle, joten läpivienneiltä välttyttiin.

Pumppauksen aikana seurattiin alipaineen kehitystä kalvon alla. Alipainemittarin mittauspätkää varten HDPE-kalvoon oli tehtävä läpivienti. Mittari sijaitsi kentän keskellä. Se suojattiin veden ja pakkasen vaikutuksilta eristerakenteen avulla. Alipainepumpun ja kentällä sijaitsevan mittarin lukemia verrattiin toisiinsa mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi.

Myös pumppauksen aikana maasta poistuneen veden määrää seurattiin. Mikäli poistuva vesimäärä olisi ollut epäilyttävän suuri suhteessa syntyneisiin painumiin, olisi ollut todennäköistä, että ainakin osa vedestä olisi ollut peräisin käsiteltävän alueen ulkopuolelta. Vesimäärää uskottiin voitavan tarkkailla mittaamalla keräilyastiaan tietyssä ajassa tulleen veden määrä.



Kuva 3.13. Koekentän instrumentointi.

Taulukko 3.7. Koekentän tarkkailumittaussuunnitelma.

alipaine kalvon alla	2 */ vrk, pumppauksen alussa useammin		
vesimäärä	1*/ vrk, pumppauksen alussa useammin		
painumat	1. viikko päivittäin	2. viikko 2 kertaa	3-12. viikko kerran viikossa
huokospaine	kerran viikossa		

3.5 Rakentaminen

Päävastuu rakentamisesta oli Helsingin kaupungin rakennusviraston katurakennusosaston pohjoisella aluetoimistolla. Pystyöjituksen teki Maanrakennusliike E M Pekkinen Oy. Tiivistyskalvon asensi ja saumat hitsasi Taretek Oy kaupungin katuosaston avustamana.

Kaikki koneelliset kaivu ja levitystyöt hoidettiin hydraulisella kuokkakauhakoneella KKH 14 P. Reunaojien kaivu- ja tiivistysvaiheessa työmaalla oli lisäksi yksi 8 m³ kuorma-auto. Rakennusmiehiä oli paikalla tehtävästä riippuen 2-3.

Torpparinmäen koekentän raivaus aloitettiin heinäkuun lopussa viikolla 30. Koealueelta poistettiin kaikki sellainen, mikä olisi voinut vahingoittaa vakuumikalvoa konsolidoinnin aikana. Pintahumus (noin 0.30 m) kaivettiin pois ja alusta tasattiin. Humusmaa kuljetettiin pois koealueelta. Tämän jälkeen pystyöjitettavalle alueelle levitettiin 0.4 m korkuinen suodatinkerros soramurskeesta.

Liuskapystyöjat asennettiin 31.7.-2.8.1995. Alunperin ojitus oli tarkoitus tehdä 21*15 m² kokoiselle alueelle. Suodatinkerroksen levittämisen jälkeen kuitenkin havaittiin, että koekentän viereen aiemmin tehty liuskapystyöjitus ulottui suunnittelijan saamia tietoja laajemmalle alueelle. Osa vanhoista pystyöjista osui suunnitelmassa reunaojia varten varatulle alueelle. Mikäli tätä alkuperäistä suunnitelmaa olisi noudatettu, olisi reunaojien

tiiviyys ollut kyseenalainen. Ylä-Fallinkujan vastaista reunaojaa päätettiin siirtää muutaman metrin tiestä pois päin. Tästä syystä pystyöjitettava alue pieneni 19*15 m² kokoiseksi.

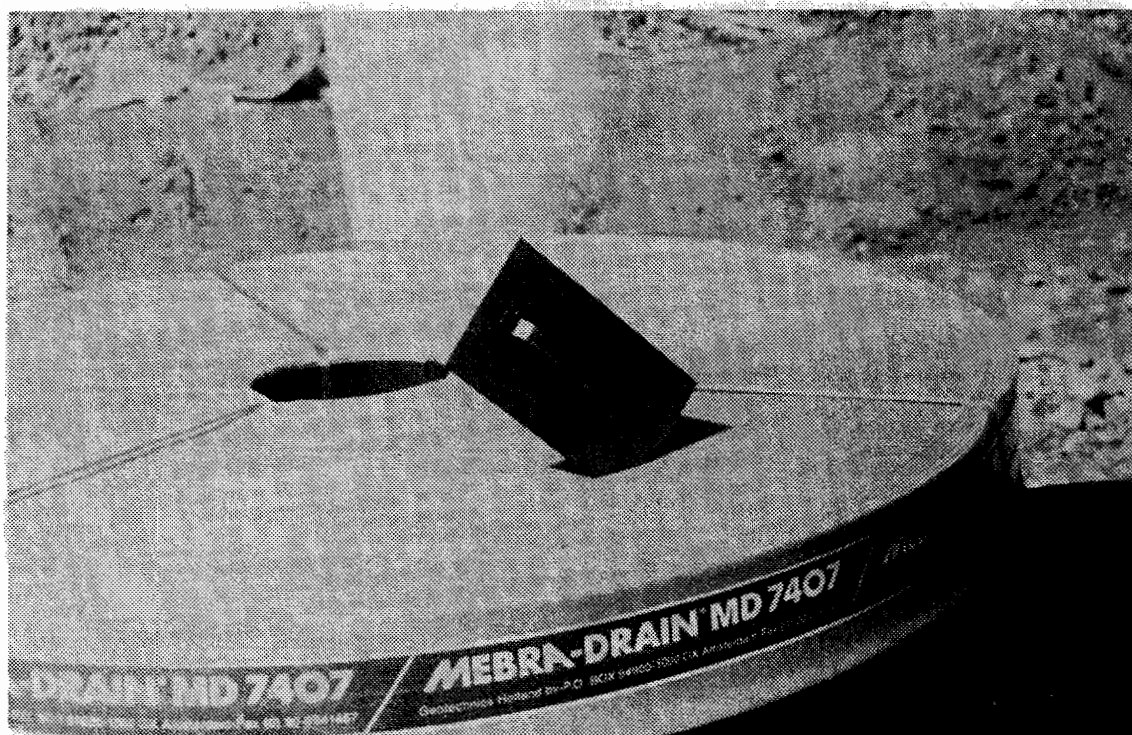
Pystyöjitus sujui muilta osin suunnitelmien mukaisesti. Liuskapystyöjien yläpäät katkaistiin käsin murskekerroksen yläpinnan tasoon ojien asennuksen jälkeen. Kuvat 3.14 ja 3.15 esittävät pystyöjan suorakaiteenmuotoista ankkurointilevyjä ja valmista pystyöjakenttää.

Vaakasuorat kuivatussalaojat asennettiin 3.-7.8.1995. Työ tehtiin käsinkaivuna. Putkiurista poiskaivettu murske leviteltiin tasaisesti koekentälle. Asennusvaiheessa havaittiin, että tiivis kokoojaputki oli uritettua muovia. Kestävän hitsin tekeminen uritettuun muoviin on hankalaa. Tästä syystä kalvon läpiviennin kohdalla tiivistysputki vaihdettiin samankokoiseen, mutta sileäpintaiseen PEH-putkeen.

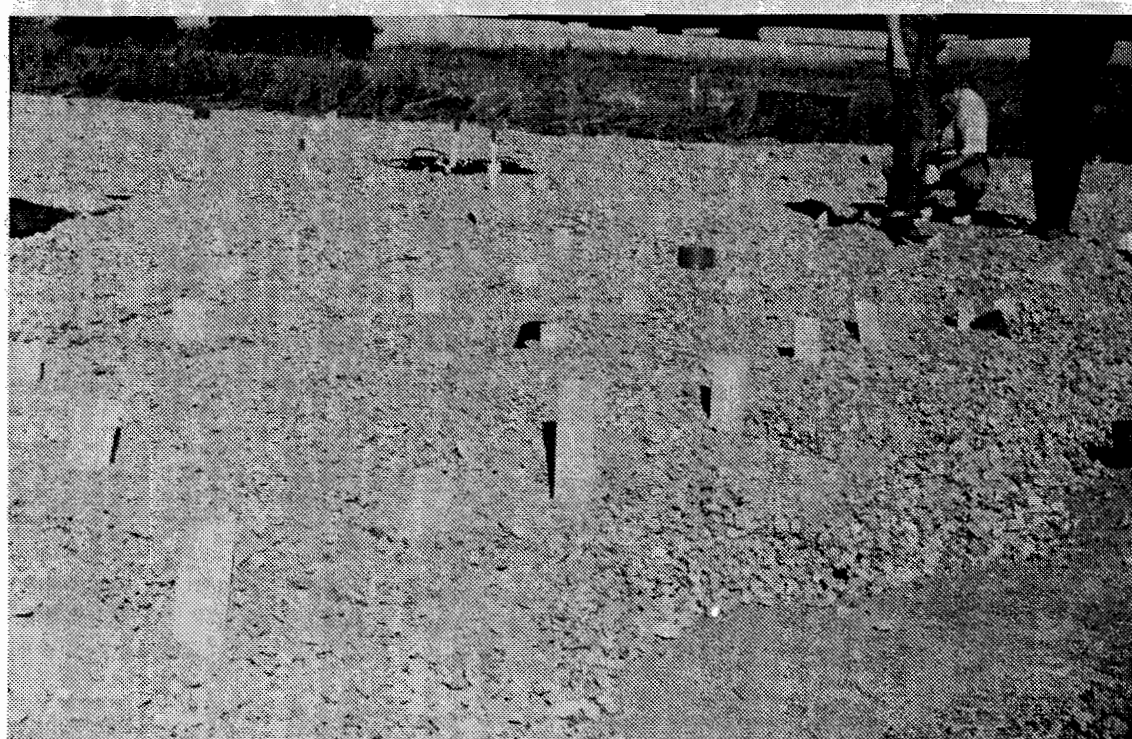
Huokosvedenpaineanturit ja kierrekairan kärjet asennettiin 4.8.1995.

Kalvon alapuolinen suojahiekka levitettiin 7.8.1995. Suojahiekasta muotoiltiin samalla metrin levyiset reunavallit. Levitys, muotoilu ja taseus tehtiin käsin jotteivät vaakaputket olisi vaurioituneet. Kuvassa 3.16 on esitetty koekenttä suojahiekan levityksen jälkeen.

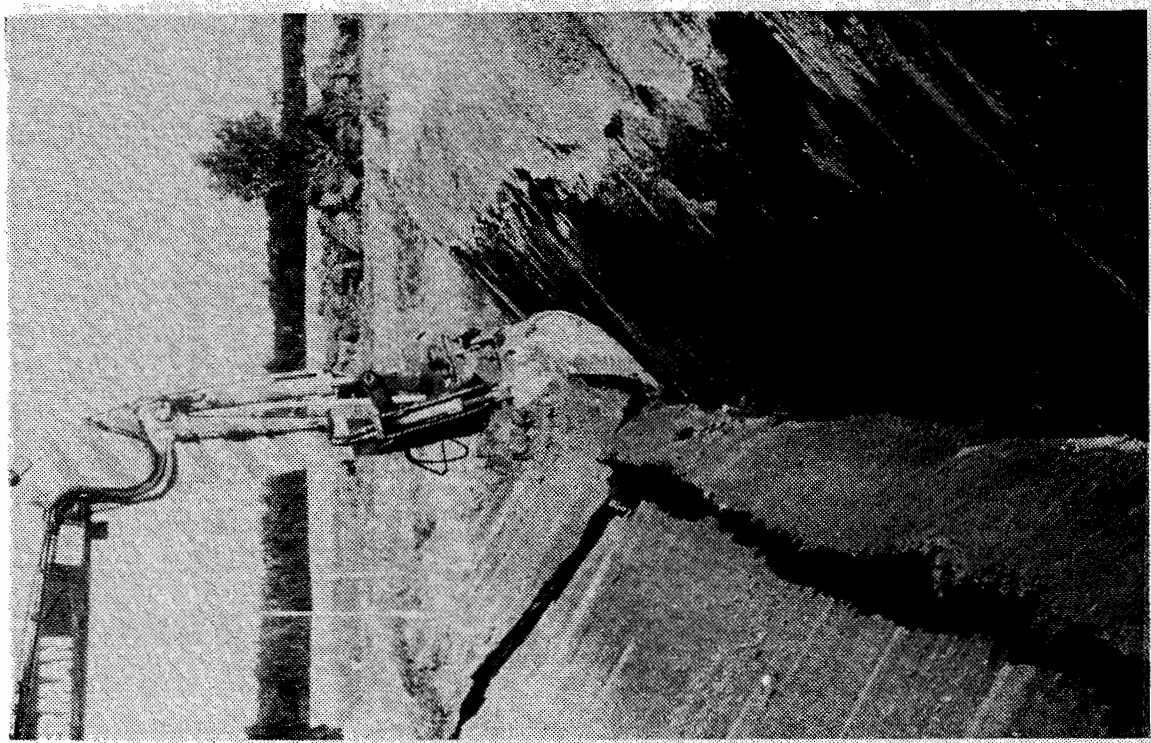
Reunaajat kaivettiin 8.-9.8.1995. Tiivistystyö oli tarkoitus tehdä ojista poiskaivettuja maamassoja hyväksi käyttäen. Kuivakuorisavi ja sen alta kaivettu pehmeä savi läjitettiin puistoalueelle noin 20 metrin päähän koekentästä. Maankaivu paljasti, että märän saven pinta sijaitsi hieman lähempänä maanpintaa, kuin mitä pohjatutkimusten perusteella oli arveltu. Kaivannot päätettiin tämän vuoksi ulottaa vaaditun 0.3 m sijasta 0.5 m märän saven yläreunan alapuolelle. Kaivutyö onnistui erittäin hyvin. Kuva 3.17 esittää reunaojien kaivua.



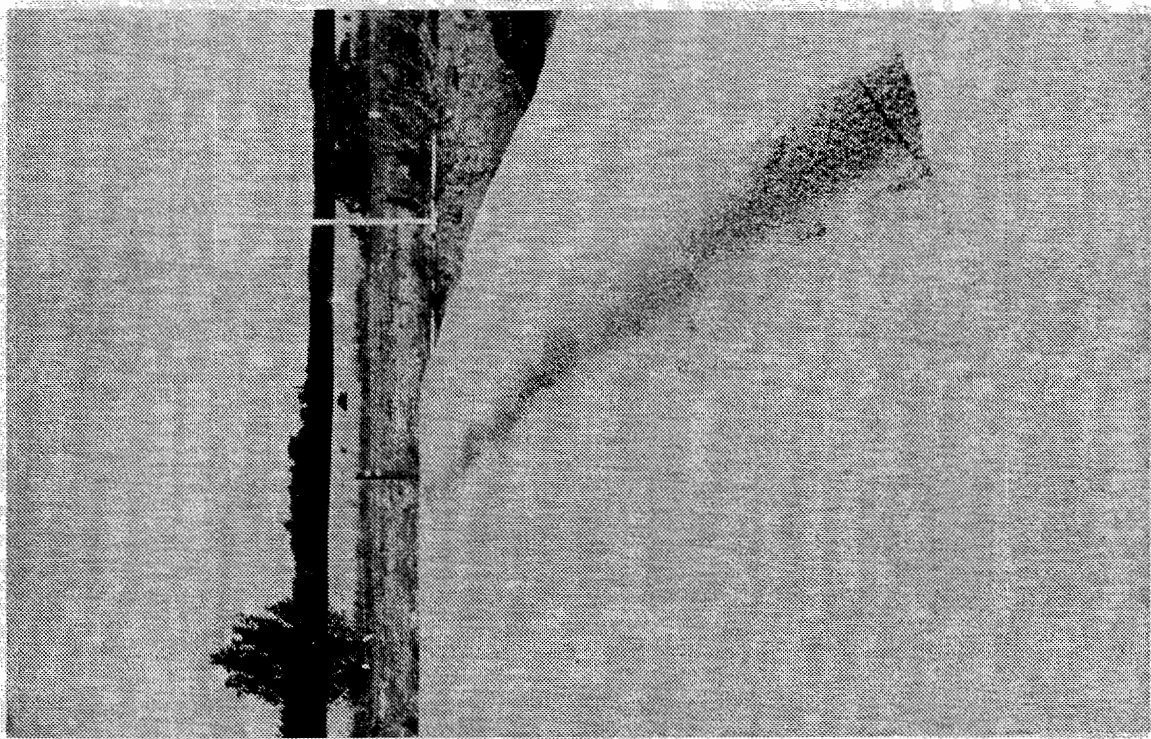
Kuva 3.14. Suorakaiteen muotoinen metallinen ankkurilevy.



Kuva 3.15. Valmis pystyjakenttä.



Kuva 3.17. Reunaojien kaivu



Kuva 3.16. Kalvon alle levitettävä suojahiekka muotoiltiin allasmaiseksi.

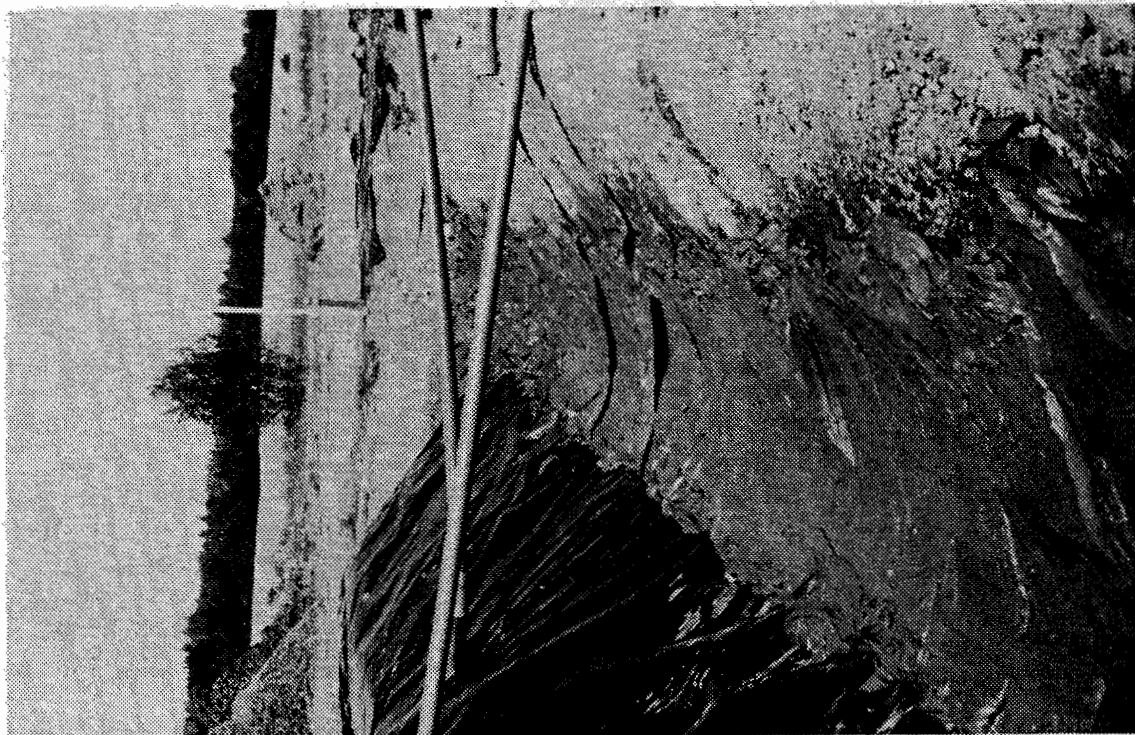
Tiivistyskalvon asennus ja saumaus aloitettiin heti reunaojien kaivun jälkeen 10.8.1995. Työ tehtiin yhdessä päivässä. Hitsausvaiheessa kävi ilmi, että suunnitellun 2 mm sijasta käytössä oli 1 mm paksuinen HDPE-kalvo. Kalvoon tehtiin läpiviennit tiivistä kokoojaputkea sekä alipainemittarin mittaputkea varten. Läpivientien kohdat tiivistettiin itseliimautuvan kalvon avulla. Hitsaustyö sujui hyvin jyrkistä reunaojista huolimatta. Asennuksen jälkeen kalvon pinta tarkastettiin silmämääräisesti. Tarkastuksessa löydettiin muutamia reikiä, jotka paikattiin. Kuva 3.18 esittää kalvonasennusvaihetta.

Kalvon asennuksen aikana sää oli aurinkoinen ja lämmin. Vaikka asennustyö vei vain päivän, ehti tiivistykseen tarkoitettu märkä savi kuivua läjityspaikalla käyttökelvottomaksi. Ongelma ratkaistiin kaivamalla tilalle puiston puolelta pehmeää savea tiivistystyön etenemisen tahdissa. Puistoon syntyneet kaivannot täytettiin kovettuneella savella. Pehmeän saven levitys tehtiin päivässä (11.8.1995). Muovikalvon reunat tasattiin leikkaamalla siten, ettei ojan pohjalle muodostetun kaukalon korkeus ylittänyt puolta metriä. Levitystyön jälkeen ojan pohjalle tuotiin säiliöautolla vettä. Näin varmistettiin, ettei savitäyttö päässyt kuivumaan tiivistystyön väliin osuneen viikonlopun aikana. Kuvassa 3.19 pehmeää savea on sullottu ojan pohjalle kalvon reunoja vasten.

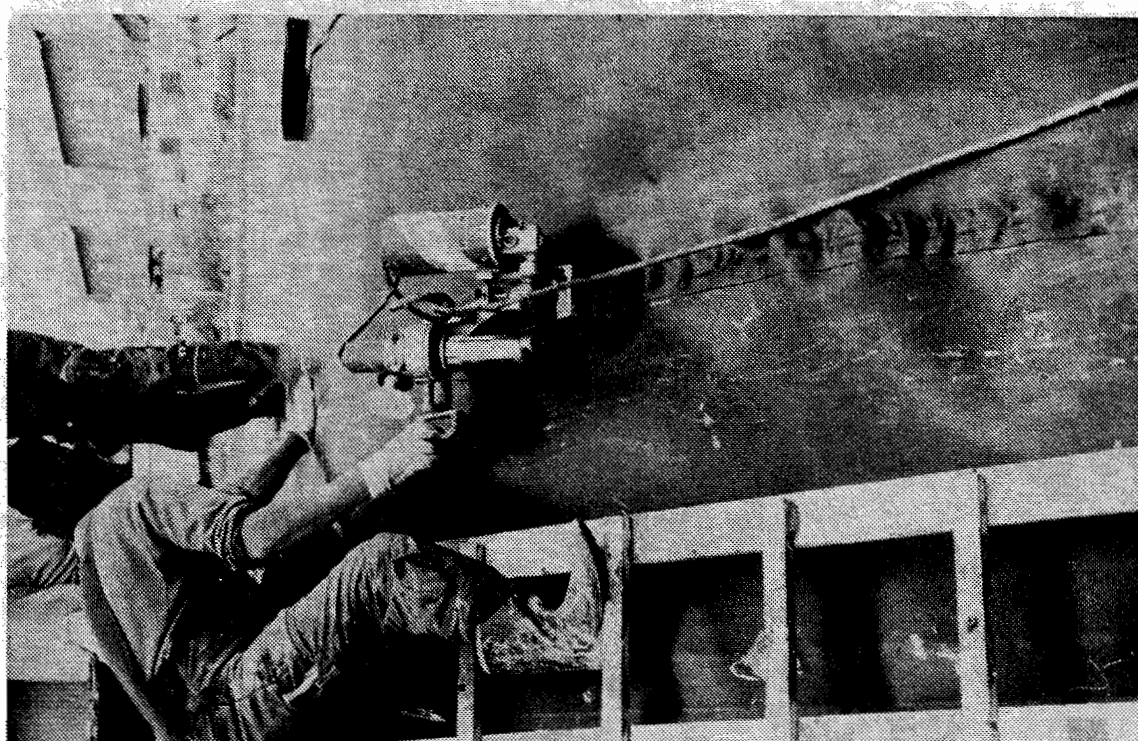
Tiivistystyön kostutusjärjestelmän salaojaputket ja tarkastuskaivot asennettiin 14.8.1995. Tämän jälkeen ojat täytettiin suunnitelman mukaisesti kuivakuorisavella.

Tiivistystyön jälkeen kalvon päälle levitettiin ensin suodatinkangas ja tämän jälkeen 0.2 m kivetöntä hiekkaa. Suodatinkangasta levitettiin myös reunaojien päälle. Kustannusten säästämiseksi ojien päälle levitettiin hiekan sijasta 0.7 m soramoreenia.

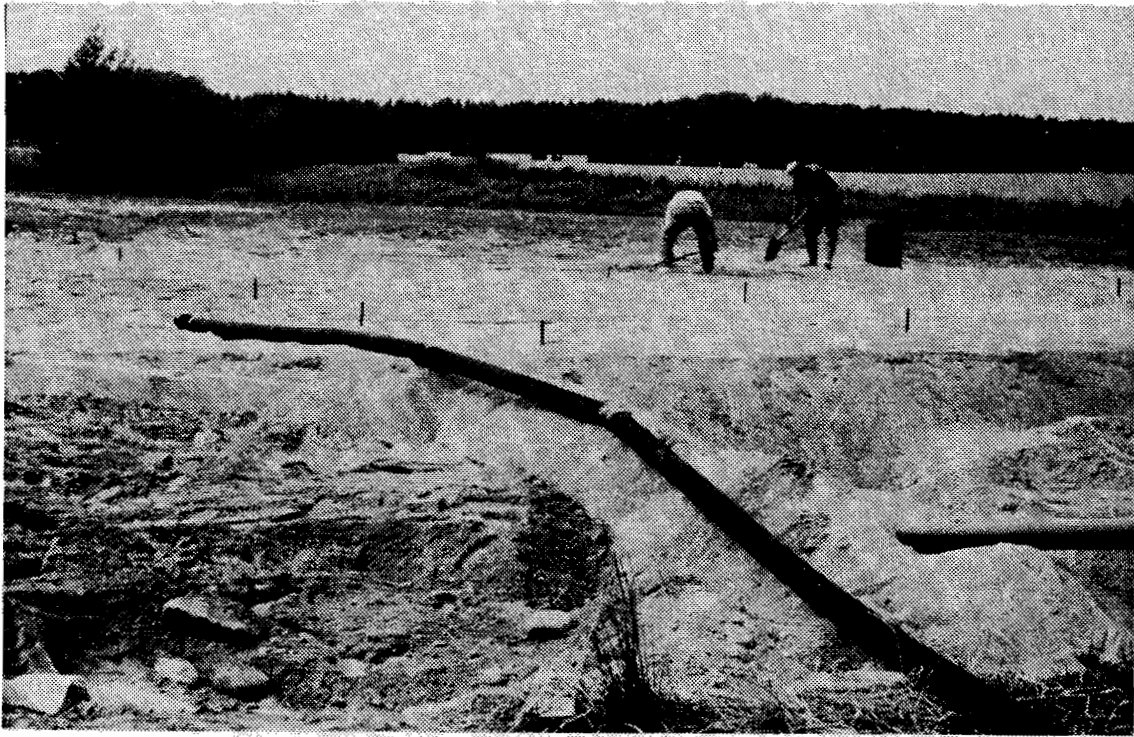
Painumalevyt asennettiin koekentälle käsin kaivamalla, jottei muovikalvo olisi vaurioitunut (kuva 3.20). Kalvon alta tuleva tiivis kokoojaputki liitettiin alipainepumppuun johtavaan Ø 100 mm muoviputkeen. Liitoskohta sijaitsi reunaojan kohdalla, joten muhvi-liitos peitettiin soramoreenilla. Myös pumpusta vettä koekentän päälle tuova poistoputki kulki soramoreenitäytön läpi. Rakennustyöt saatiin valmiiksi 17.8.1995. Äänieristyskoppi rakennettiin pumppauksen käynnistyttyä 28.8.1995.



Kuva 3.19. Pehmeän savitiöityön tekovaihe



Kuva 3.18. Muovikalvo saumattiin hitsaamalla. Kestävä liitos saatiin käyttämällä kaksoishitsiä.



Kuva 3.20. Painumalevyjen asennus.

3.6 Pumppaus ja painumahavainnot

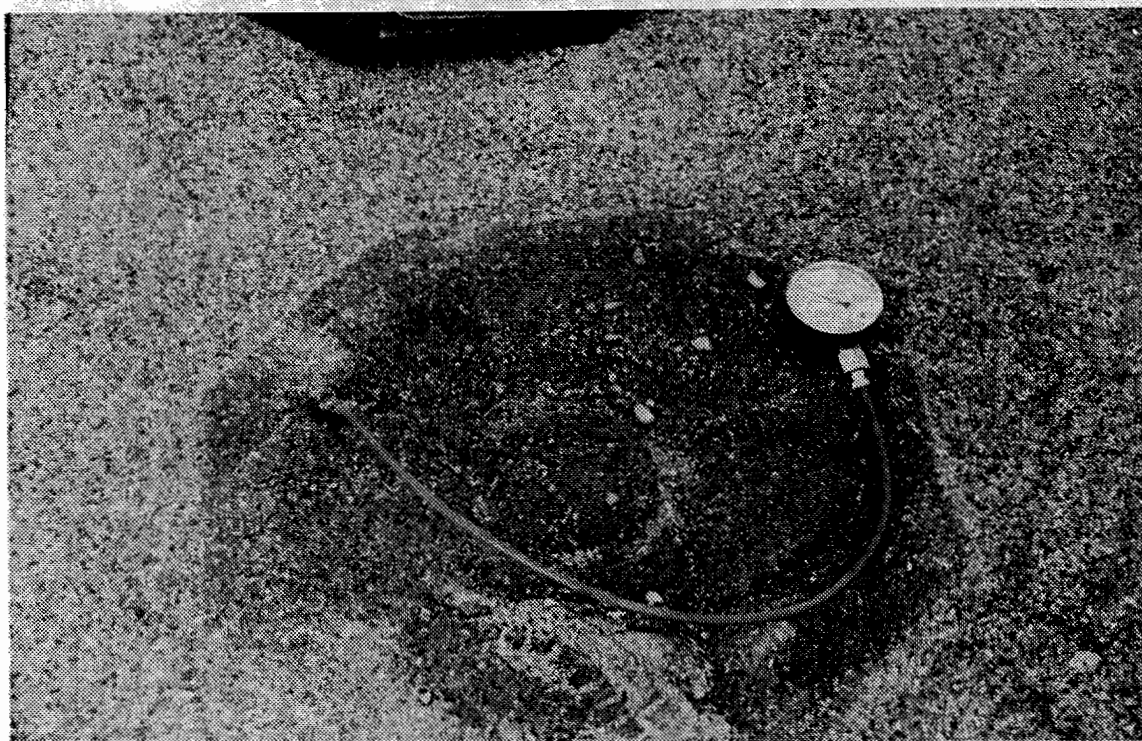
3.6.1 Pumppaus ja alipaine

Alipainepumppu käynnistettiin 28.8.1995. Alipainemittari osoitti, että paine alkoi välittömästi nousta kalvon alla. Pumppu on esitetty kuvassa 3.19 ja alipainemittari kuvassa 3.20. Ensimmäisen vuorokauden aikana pumppaustehoa ei säädetty millään tavoin ja alipaineen annettiin nousta noin 80 kPa:iin. Seuraavana päivänä alipaine laskettiin suunnitellulle tasolle 50 kPa:iin.

Paineen säätö tapahtui kiertämällä alipainepumpun ilmanottoventtiiliä. Venttiilin ollessa kiinnikierrretty oli paine maksimissaan. Haluttu painetaso saavutettiin kiertämällä venttiiliä auki vähän kerrallaan ja seuraamalla pumpun ja koekentän mittareista alipaineen kehittymistä.



Kuva 3.19 Torpparinmäen vakuumikonsolidointikokeilussa käytetty 90 kPa:n alipainepumppu.



Kuva 3.20. Alipainemittarin avulla tarkkailtiin alipaineen kehitystä tiivistekalvon alla vakuumikonsolidoinnin aikana.

Pumpun toimintaa tarkkailtiin päivittäin. Alipainehavainnoista ja pumpun toiminnasta pidettiin pöytäkirjaa. Kalvon alta mitatut alipaineen arvot vastasivat hyvin vakuumpumpun mittarin lukemia. Kalvon saumaus ja tiivistys olivat onnistuneet ja paine pysyi säädetyllä tasolla.

Alipainepumpun jäähdytysjärjestelmä perustui pumpatun veden kiertoon pumpun läpi. Pumppauksen alussa, jolloin maasta nousi pelkästään ilmaa, pumpun jäähdytysvettä jouduttiin ylikuumenemisen ja haihtumisen vuoksi lisäämään. Tätä varten koepaikalle tuotiin säiliöautolla vettä. Vesi juoksutettiin tiivistysosien kastelujärjestelmään, mistä sitä siirrettiin uppopumpun avulla alipainepumpun säiliöön.

Vettä alkoi nousta maasta reilun viikon kuluttua pumppauksen käynnistämisestä. Veden tulo oli epäsäännöllistä; ajoittain hyvin runsasta ja toisinaan lähes olematonta. Jonkin ajan kuluttua alipainetta nostettiin ensin 65 kPa:iin ja myöhemmin 80 kPa:iin, koska suuremmalla paineella pumpun todettiin toimivan tasaisemmin. Alipainetta nostamalla veden tulo pyrittiin vakauttamaan.

Maasta pumpattu vesi johdettiin koekentän päälle suojaamaan kalvoa vaurioitumiselta. Kentältä tarkastuskaivoon johtava ylivuotoputki oli liian korkealla, joten vettä ei missään vaiheessa siirtynyt sen kautta kastelujärjestelmään. Vettä valui kuitenkin muuta kautta kalvon päältä tiivistysojiin, joten kalvon reunojen tiivistyksessä käytetty pehmeä savi pysyi kosteana. Salaojiin kertynyttä vettä siirrettiin uppopumpun avulla viereiselle pellolle.

8.11.1995 alipaine kalvon alla putosi noin 80 kPa:sta 30 kPa:iin. Alipainetta ei saatu nousemaan, vaikka pumpun teho säädettiin maksimiin. Vakuumikalvon oletettiin vuotavan jostakin. Vuodon arveltiin sijaitsevan jommankumman läpiviennin kohdalla. 13.11.1995 havaittiin, että tehon lasku johtui imuputken muhviiliitoksen aukeamisesta. Syy muoviputkien välisen muhviiliitoksen aukeamiseen oli kentän painuminen. Muhviiliitos tiivistettiin ja alipaine nousi nopeasti takaisin 80 kPa:iin.

Korjauksen jälkeen pumppausta jatkettiin viikon ajan 80 kPa:n alipaineella. Painumanopeus palautui paineen pudotusta edeltäneelle tasolle. Tämän jälkeen pumpun teho nostettiin maksimiin ja alipaine kohosi 90 kPa:iin.

Koemielessä alipainekalvoon tehtiin 22.11.1995 kaksi reikää, joiden kummankin halkaisija oli 70 mm. Reikien vaikutuksesta alipaine laski nopeasti 90 kPa:sta 70 kPa:iin. Seuraavana päivänä alipaine oli jälleen 90 kPa, joten reiät ilmeisesti tukkeutuivat suojahiekan, jään ja veden vaikutuksesta. Alipainepumppaus lopetettiin 23.11.1995. Kokonaispumppausaika oli 86 vuorokautta. Alipaineen kehitys kokeen aikana on esitetty luvussa 3.6.5.

3.6.2 Poistunut vesimäärä

Vesimäärän mittaaminen oli arvoitua hankalampaa. Vettä tuli epäsäännöllisesti sykäyksittäin. Tämä johtui siitä, että pumppu tyhjensi koko vesisäiliönsä sisällön yhdellä kertaa. 6.9.1995 alipaine oli 60 kPa ja tyhjennyssykäysten väliksi mitattiin noin 20 minuuttia. Vettä poistui noin 480 litraa tunnissa. Samallakaan alipaineella ei sykäysten väli kuitenkaan pysynyt vakiona. Kun alipainetta lisättiin, vesisäiliön tyhjentyminen oli tasaisempaa ja sykäysten väli tiheni. Koska koekenttä painui tasaisesti ja vettä tuli jatkuvasti, päätettiin vesimäärien mittauksista luopua.

Koekentän päällä olevan veden määrä vaihteli. Osa pumpatusta vedestä valui reunaajiin ja osa haihtui. Kentälle kertyi myös sadevettä. Kuvassa 3.21 näkyy koekenttä pumppauksen aikana. Marraskuussa pumppauksen loppuvaiheessa kentällä oleva vesi jäättyi. Koekentälle satoi myös jonkin verran lunta. Maasta nousi edelleen vettä, joten pumpun poistoputki pysyi sulana. Lumen ja jään ei havaittu aiheuttaneen vaurioita tai häirinneen pumppausta.



Kuva 3.21. Vakuumikonsolidontikenttä veden peittämänä.

3.6.3 Huokosvedenylipaine

Huokosvedenpaine mitattiin kerran viikossa. Ensimmäinen mittaus tehtiin pari viikkoa ennen pumppauksen käynnistämistä. Pumpun käynnistys näkyi mittaustuloksissa ylipaineen kasvuna. Pumppauksen edetessä huokosveden ylipaine pieneni sekä neljän että kahdeksan metrin syvyydessä. Lokakuun puolivälissä kahdeksannella pumppausviikolla huokosvedenpaineanturit vaurioituivat eikä lukemia enää saatu. Huokospaineen mittaustulokset on esitetty luvussa 3.6.5.

3.5.4 Painumat

Kokeen alku

Painumalevyt asennettiin kymmenen päivää ennen pumppauksen aloittamista. Kymmenen päivän aikana koekentän pinta painui suodatinkerroksen painosta

keskimäärin 7 mm. Kun alipainepumppaus aloitettiin, painumanopeus kasvoi huomattavasti, vaikkei maasta heti poistunutkaan vettä. Suurimmat painumat mitattiin kentän keskeltä. Tontin vastainen reuna painui selvästi hitaammin kuin muut osat. Todennäköisesti maa oli tässä kohdin viereisen vanhan pystyjitituksen johdosta tiiviimpää.

Alipaineen vaihtelut eivät näy selvästi painumamittaustuloksissa. Kahden ensimmäisen kuukauden ajan painuma kasvoi tasaisesti.

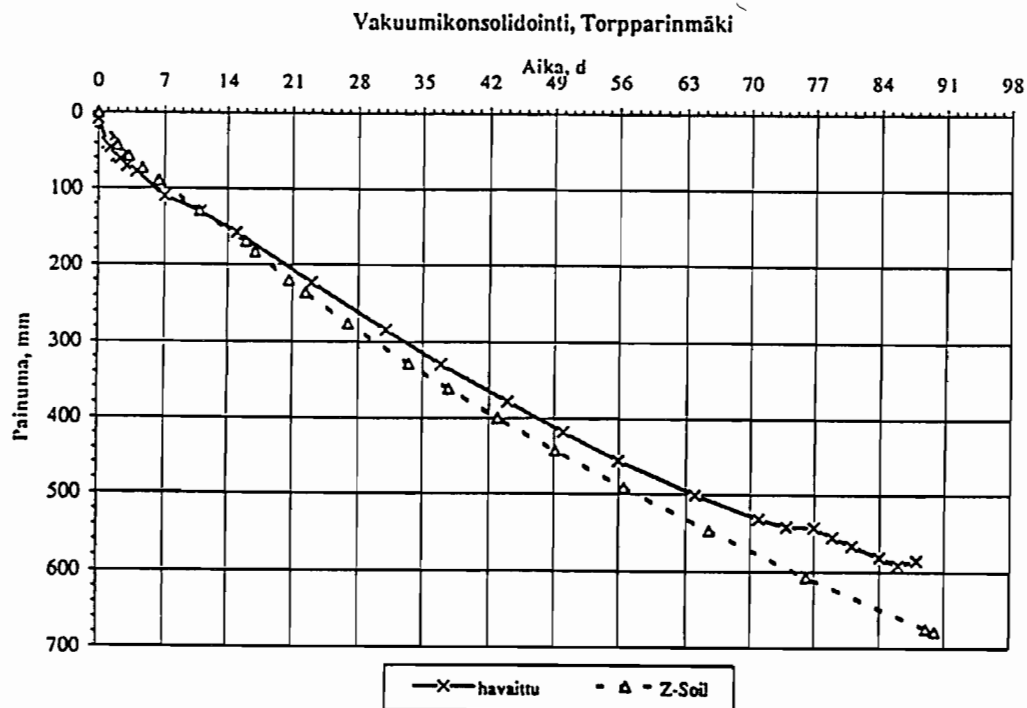
Pumppauksen aikaiset painumalaskelmat

Sitä mukaa, kun koekohteesta saatiin painumahavaintoja, tarkistettiin myös loppupainuma-arviota. Vertailulaskelmia tehtiin Asaokan menetelmällä [Tiel. 1994], hyperbolisella menetelmällä [Barden 1965 / Korhonen 1977] ja Z-Soil laskentaohjelmalla [Z-Soil.PC 1995].

Torpparinmäen koekentän primaaripainuman loppuarvo ja kerrosten keskimääräinen konsolidaatiokerroin laskettiin kentän keskeltä mitattujen painumien avulla. Asaokan menetelmällä loppupainuman arvoksi saatiin 0.9 m ja konsolidaatiokertoimeksi 1.56 m²/a. Hyperbeli sovitettuna 0 ... 31 vuorokauden havaintoihin antaa loppupainuman $S_f=1.30$ m. Asaokan menetelmän ja hyperbolisen menetelmän luotettavuus kuitenkin kärsi siitä, että alipaine muuttui kokeen aikana useaan kertaan, eikä tarkasteltava maapohja todellisuudessa ollut homogeeninen.

Parhaiten loppupainuman arviointi onnistuu elementtimentelmään perustuvien laskentaohjelmien avulla. Torpparinmäen vakuumikonsolidointikohteen muodonmuutoksia mallinnettiin sveitsiläisen Z-Soil-ohjelman [Z-Soil.PC 1995] avulla. Mallissa tarkasteltiin yksittäistä koealueen keskellä sijaitsevaa pystyjojaa ja sen vaikutusaluetta. Laskentaparametrit määritettiin portaittaisten ödometrikokeiden avulla. Kuormat jaettiin kahteen osaan: suodatinkerrokseen aiheuttamaan kuormitukseen ja pumppauksen synnyttämään imuun.

Kuvassa 3.22 on verrattu toisiinsa kentältä mitattuja painumia ja Z_Soil-ohjelman avulla laskettuja arvoja. Lasketut ja mitatut arvot vastasivat varsin hyvin toisiaan.



Kuva 3.22 Z_Soil-ohjelmalla laskettu painuma ja koekentältä mitatut painumat.

Kokeen aloitusvaiheessa oli asetettu tavoitteeksi 0.5 m painuman saavuttaminen. Koekentän keskiosaa saavutti 0.5 m painuman 30.10.1995. Reunoilla painuma oli hieman pienempi. Koetta päätettiin kuitenkin jatkaa marraskuun loppuun saakka, sillä painumanopeus ei vielä lokakuussa ollut juuri lainkaan hidastunut.

Pumppauksen lopetus

Marraskuussa painumanopeus alkoi hidastua kentän reunoilla. 9.11.1995 alipaine putosi 30 kPa:iin. Alipaine oli alhainen vajaan viikon ajan kunnes vuotokohta, auennut muhviiliitos, tiivistettiin. Paineen pieneneminen näkyi painumakäyrissä selvästi.

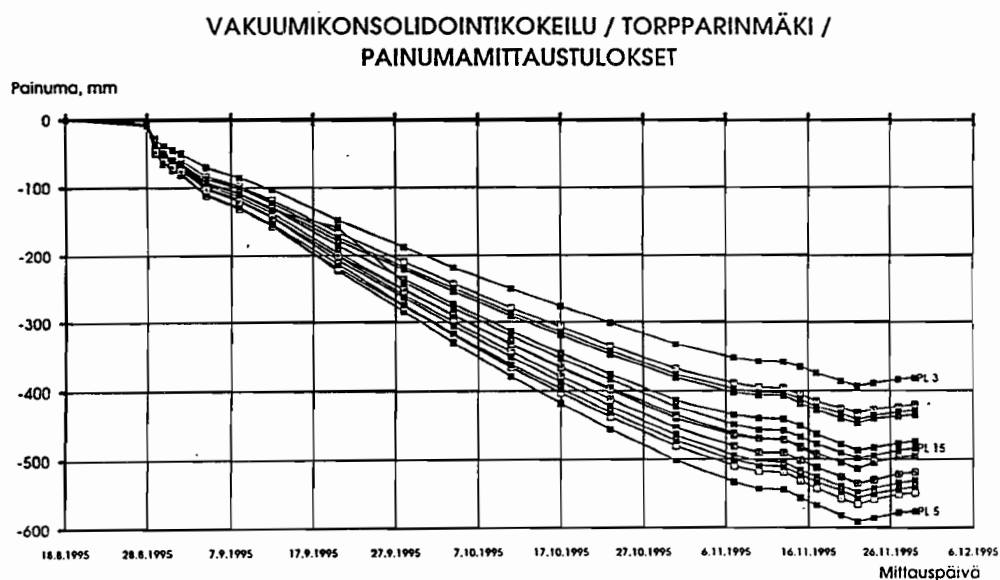
Todennäköisesti liitos oli vuotanut jo jonkin verran ennen lopullista aukeamistaan ja hidastanut painumanopeutta pikkuhiljaa. Paikkauksen jälkeen pumppausteho nostettiin maksimiin ja painumanopeus kasvoi nopeasti vuotoa edeltäneelle tasolle.

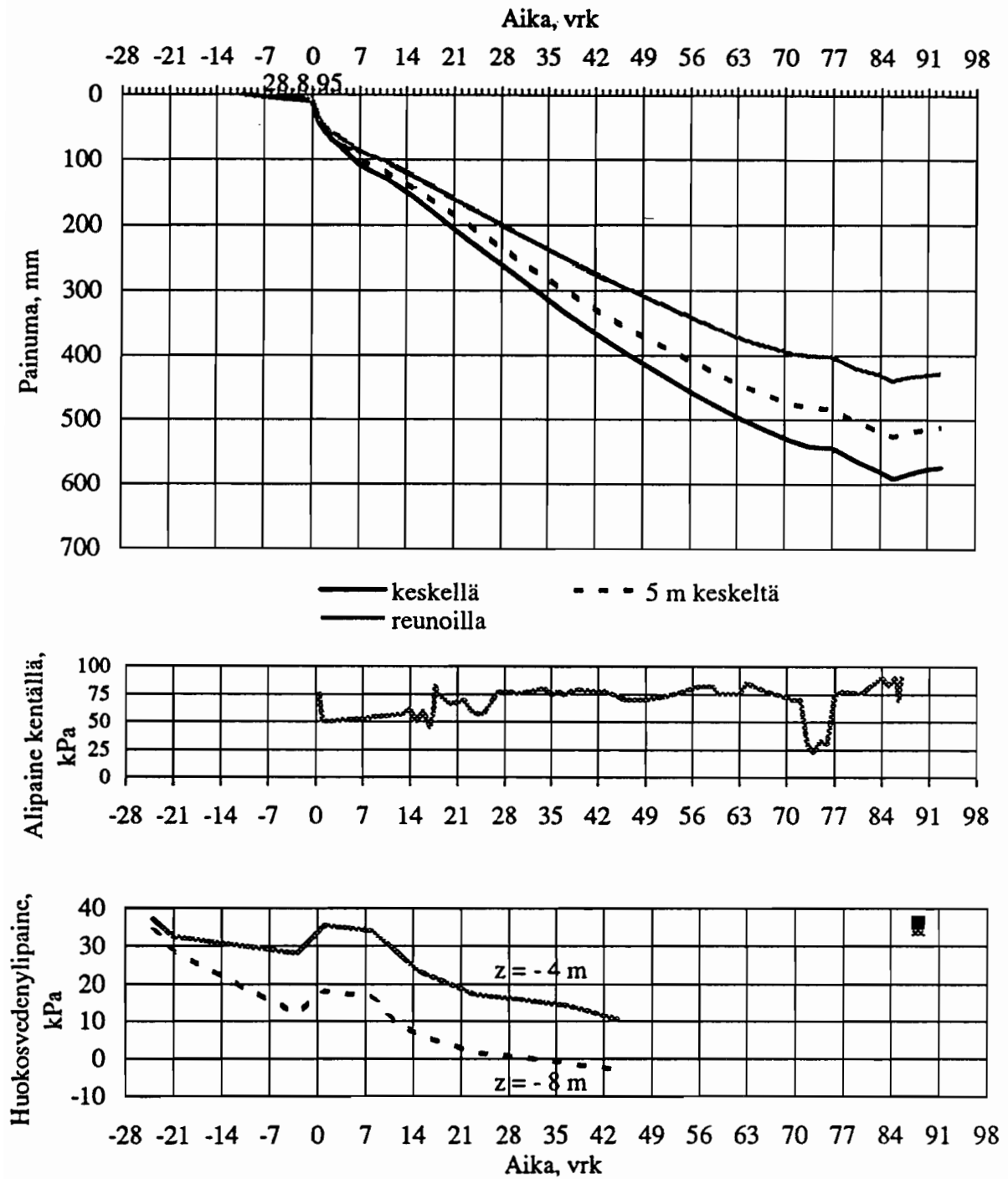
Alipainepumppaus pysäytettiin 28.11.1995. Kentän keskikohta oli tuolloin painunut 0.59 m. Painuman kehitys kokeen aikana on esitetty luvussa 3.5.5.

3.6.5 Havaintotulokset

Kuvassa 3.23 esitetään erikseen kunkin levyn painuma erikseen. Kuvaan 3.24 on koottu koekentältä konsolidoinnin aikana mitatut huokosvedenpaineet, keskimääräiset painumat kentän eri osissa sekä alipaine tiivistyskalvon alla.

Kokeen jälkeen kierrekairan kärjet vaaittiin painuman syvyysuuntaisen jakautumisen selvittämiseksi. Neljän metrin syvyyteen asennettu kärki oli painunut 0.51 m. Tämä vastasi hyvin Z-Soil-ohjelmalla ennustettua arvoa. Kuuden metrin syvyyteen asennetun kairan sijainnin mittauksessa oli ilmeisesti tehty virhe, sillä tulos ei ollut realistinen.





Kuva 3.24. Koekentältä konsolidoinnin aikana mitatut huokosvedenpaineet, keskimääräiset painumat kentän eri osissa sekä alipaine kalvon alla.

3.7 Purkuvaihe

3.6.1 Painuman palautuminen

Magnanin [1994] mukaan alipainepumpun pysäyttämisen jälkeen kentän pinta nousee muutaman senttimetrin parin ensimmäisen vuorokauden aikana. Torpparinmäen koekentän annettiin pumppauksen lopettamisen jälkeen tasaantua viikon ajan ennen vakuimirakenteen purkamista. Viikon aikana painumalevyt vaaittiin kolmesti. Kentän pinta nousi hieman, keskimääräinen palautuma oli 13 mm. Mittaustulokset on koottu taulukkoon 3.8.

Taulukko 3.8. Painuman kehitys alipainepumpun pysäyttämisen jälkeen 23.-29.11.1995.

Nousu 23.-24.11. mm	Nousu 24.-27.11. mm	Nousu 27.-29.11. mm	Yhteensä mm
6-9	4-8	2-4	11-18

Viimeisen kahden päivän aikana nousu oli keskimäärin vain 3 mm. On epätodennäköistä, että maanpinta olisi tämän jälkeen enää noussut merkittävästi.

3.7.2 Purkutyöt

Purku aloitettiin 30.12.1995. Koekentän pinnan jäätyminen vaikeutti purkutyötä. Pinta ei kuitenkaan ollut täysin jäässä, vaan kentällä oli myös sulaa vettä. Muovikalvon yläpuoliset lumi, jää ja suojahiekka poistettiin kaivinkoneen avulla varovasti niin, ettei kalvo vaurioitunut. Myös painumalevyt poistettiin tässä vaiheessa. Esiinkaivettu tiivistyskalvo todettiin niin hyväkuntoiseksi, että sitä olisi voitu käyttää uudelleen jossakin muussa kohteessa. Tätä ennen kalvo olisi kuitenkin pitänyt puhdistaa.

Pakkassäässä raskaan ja jäykän kalvon peseminen ja kuivaaminen katsottiin kuitenkin sen verran työlääksi, että kierrätysajatuksista luovuttiin. Kalvo poistettiin kentältä leikkaamalla se pienempiin osiin.

Suodatinkerroksen kuivatusputket poistettiin viikolla 49. Kierrekairan kärjet vaaittiin 4.12.1995. Tämän jälkeen alue tasattiin siten, että maanpinta oli koekentällä ja tontin aiemmin pystyöjitetulla osuudella samassa tasossa. Tasausta varten kentälle ei tuotu lisää maata. Työn aikana liikkuneet tontin rajapyykit merkittiin uudelleen ja kentän pinta vaaittiin. Tasauksen jälkeen maanpinta oli tasossa +13.35 m.

3.7.3. Pumppauksen jälkeinen instrumentointi

Jo kokeen alussa oli sovittu, että painuma- ja huokosvedenpainemittauksia jatketaan pumppauksen päättymisen jälkeen kolmen vuoden ajan. Jälkiseurantamittaukset jaettiin kahteen vaiheeseen: ennen pientalon rakentamista ja rakentamisen käynnistymisen jälkeen tehtävät mittaukset.

Tontin haltija arvioi aloittavansa kaivutyöt tontilla maaliskuussa 1996. Joulukuussa kokeen päättymisen jälkeen asennetut painumalevyt ja huokos-paineanturit saavat olla paikoillaan tähän asti. Rakentamisen käynnistymisen jälkeen mittauslaitteiden sijoitus mietitään uudelleen.

Pumppauksen aikana rikkoutuneiden huokospaineanturien tilalle asennettiin uudet anturit jo ennen kalvon purkamista 24.11.1995. Anturit asennettiin 4 ja 8 metrin syvyyteen.

Tulosten vertailun helpottamiseksi painumalevyt pyrittiin sijoittamaan samalla tavoin kuin pumppauksen aikana. Kentän pintakerroksen ennustettiin routivan talven aikana. Tämän vuoksi kolme painumalevyä (levyt numero 5, 9 ja 10) routasuojattiin. Levyt asennettiin 7.12.1995.

Painumamittauksia ja huokosvedenpainehavaintoja jatkettiin taulukon 3.9 ohjelman mukaisesti.

Taulukko 3.9. Torpparinmäen koekohteen jälkiseuranta.

Painuma	13 painumalevyä	2-3 viikon ajan mittaus kerran viikossa, tämän jälkeen harvemmin
Huokosvedenpaine	anturit -4 ja -6 m	
Pohjavesi	2 pohjavesiputkea	

7.12.1995-3.1.1996 välillä painumalevyt vaaittiin viisi kertaa. Kentän pinnan korko ei ollut muuttunut juuri lainkaan. Osa levyistä oli vuoroin noussut ja vuoroin painunut 1-2 mm. Keskimäärin kenttä oli painunut yhden millimetrin.

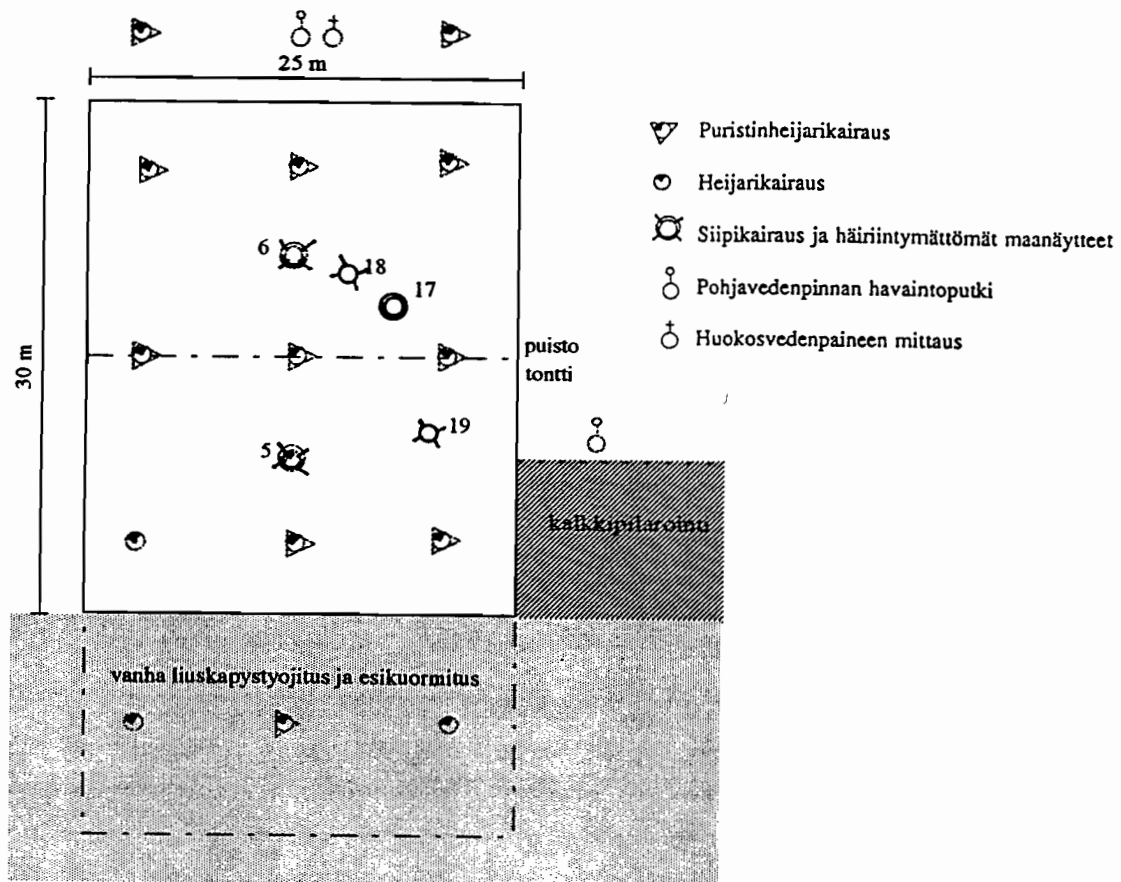
Neljän metrin syvyydellä oli marraskuun lopussa 3.5 kPa ja tammikuun alussa noin 5 kPa ylipainetta. Kahdeksan metrin syvyydellä huokosveden paine oli marraskuun lopussa -3.5 kPa ja joulukuun puolessa välissä noin -1 kPa, minkä jälkeen paine on laskenut. Tammikuun alussa huokosvedenpaine kahdeksan metrin syvyydellä oli -2 kPa.

Pohjaveden pinta on vaihdellut elokuun ja tammikuun välisenä aikana tasojen +11.27 m ja +11.40 m välillä.

3.7.4 Näytteenotto ja kairaukset

Näytteet

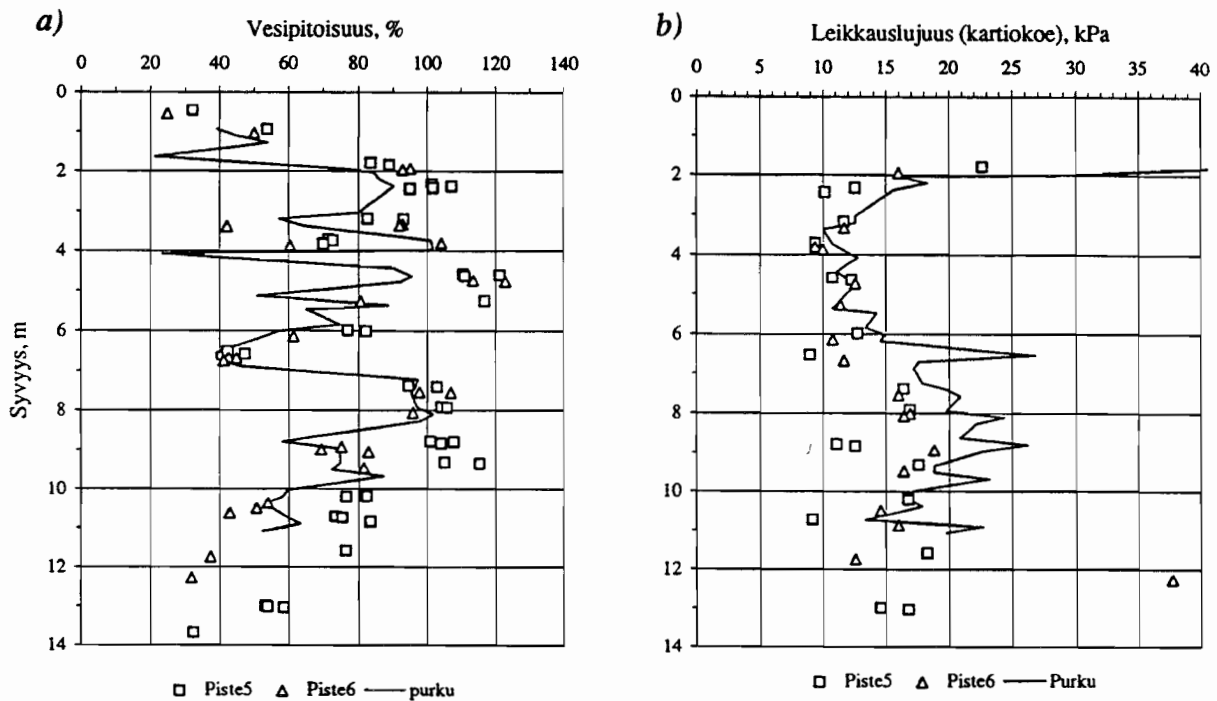
Kaikki purkuvaiheessa otetut näytteet tutkittiin Teknillisessä korkeakoulussa. Kentän keskeltä otettiin häiriintymättömiä näytteitä samoilta syvyyksiltä kuin ennen koetta (kuva 3.25). Näytepistettä jouduttiin vaihtamaan kesken kairauksen näytteenottimen osuttua nauhapystyjojaan.



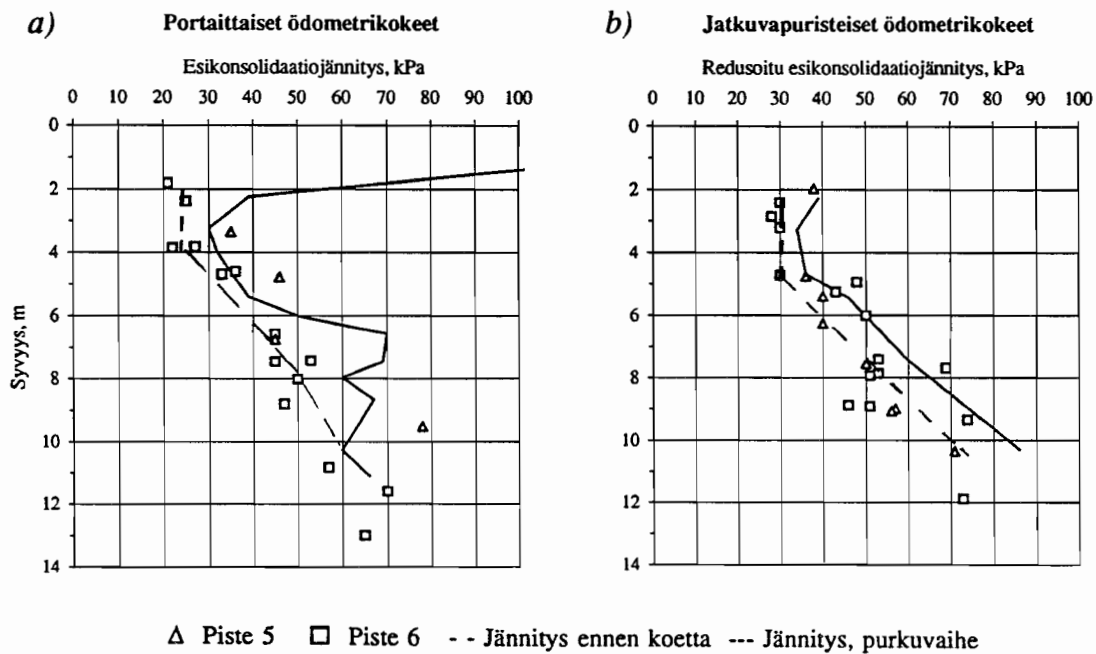
Kuva 3.25. Purkuvaiheen näytepisteen (piste 17) ja siipikairauspisteiden (pisteet 18 ja 19) sijainti ennen konsolidointia tehtyihin siipikairauspisteisiin (pisteet 5 ja 6) verrattuna.

Kartiokokeen ja ödometrikokeiden avulla selvitettiin, miten maan vesipitoisuus, leikkauslujuus ja esikonsolidaatiojännitys olivat muuttuneet konsolidoinnin seurauksena.

Ennen konsolidointia tehdyissä kairauksissa maanpinta oli tasossa +13.2. Kokeen jälkeen näytteet otettiin suodatinkerroksen päältä (taso + 13.35). Seuraavissa kuvissa tulokset on korjattu samaan tasoon (taso +13.2) Vertailussa ei ole otettu huomioon kokoonpuristumisen aiheuttamaa tutkittavan kerroksen sijainnin muutosta, jonka vaikutus suurimmillaan on 0.5 m.



Kuva 3.26. Laboratoriossa määritetty saven a) vesipitoisuus ja b) leikkauslujuus ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen.



Kuva 3.27. Esikonsolidaatiojännitys ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen: a) portaittaiset ödometrikokeet ja b) jatkuvapuristeiset ödometrikokeet.

Kuvassa 3.26 on vertailtu keskenään vesipitoisuuksia ja leikkauslujuuksia ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen. Tulosten perusteella vesipitoisuus pieneni ja leikkauslujuus kasvoi kaikissa syvyyksissä. Saadut tulokset ovat hieman ristiriitaisia, sillä vesipitoisuus pieneni eniten, noin 25 prosenttiyksikköä, 4-6 metrin syvyydessä, missä leikkauslujuuden kasvu oli varsin pieni. Leikkauslujuus puolestaan kasvoi eniten noin 5-10 kPa 7-10 metrin syvyydessä, missä vesipitoisuuden pieneneminen oli ylempiä kerroksia vähäisempää. Tulosten hajonta saattoi johtua siitä, että ylempien kerrosten näytteet oli otettu hieman eri kohdasta kuin alempien. Pystyöjien alapuolella muutokset ovat vähäisiä.

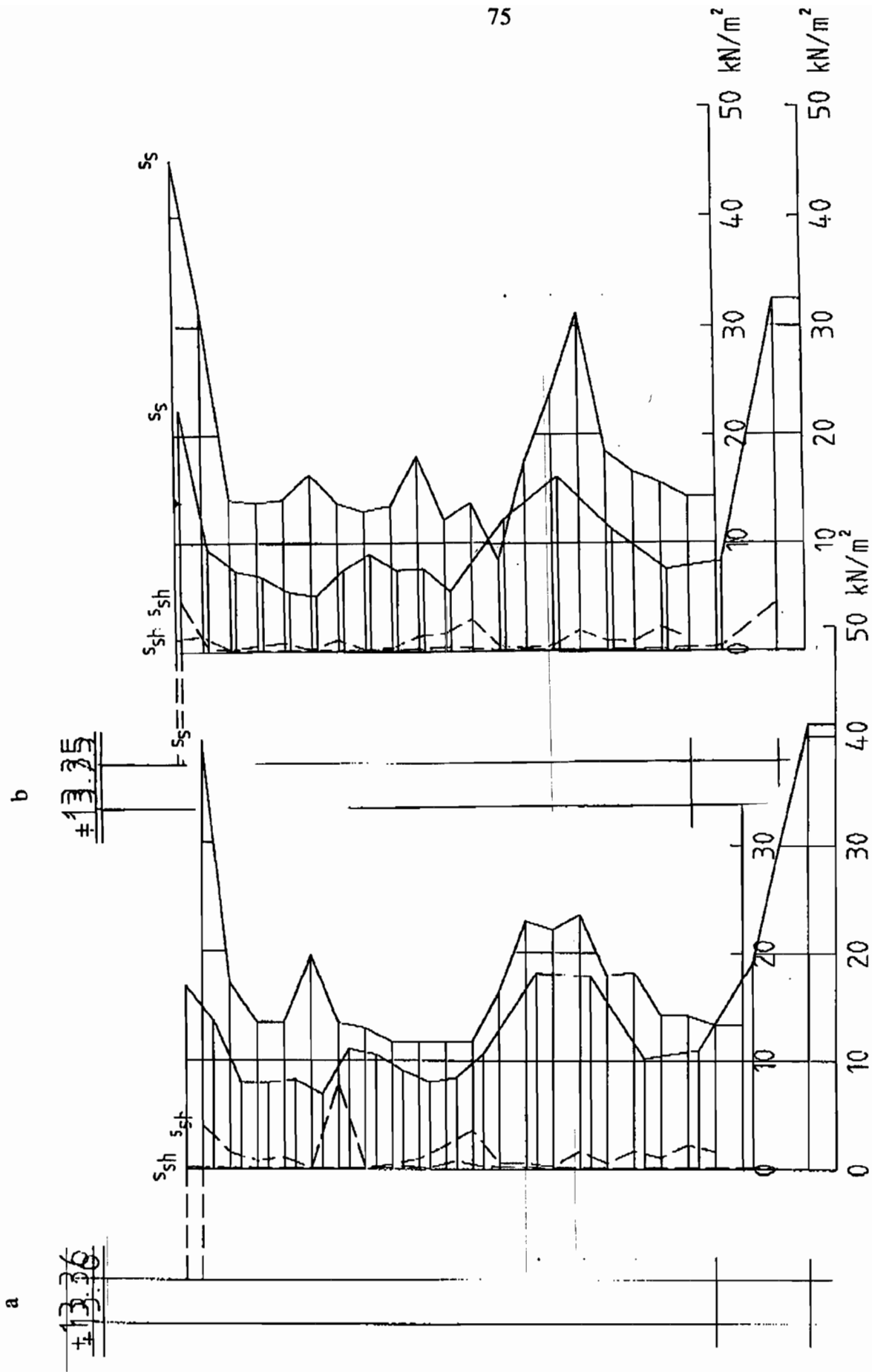
Kuvassa 3.27 on esitetty ödometrikokeiden avulla määritetyt esikonsolidaatiojännitykset ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen. Portaittaisten ödometrikokeiden mukaan esikonsolidaatiojännitys kasvoi 5-20 kPa. Jatkuvapuristeisten ödometrikokeiden tulosten perusteella redusoitu esikonsolidaatiojännitys kasvoi 5-15 kPa.

Suljetun leikkauslujuuden kasvu voidaan laskea esikonsolidaatiojännityksen kasvun avulla käyttämällä kokeellista kerrointa: $\Delta s_v = 0.22 * \Delta \sigma_p$. Konsolidaatiojännityksen arvo riippuu kuitenkin monista tekijöistä, kuten esimerkiksi maan alkuperäisestä konsolidaatitilasta. Myös näytepisteen etäisyys pystyöjiin vaikuttaa tuloksiin. Tässä yhteydessä leikkauslujuuden kasvun arviointia esikonsolidaatiojännityksen kasvun avulla ei pidetty luotettavana menetelmänä, eikä määritystä näin ollen tehty.

Siipikairaukset

Koekentän saven leikkauslujuuden muutokset selvitettiin myös kahden siipikairauksen avulla. Kairauspisteiden sijainti on esitetty edellä kuvassa 3.25.

Myös siipikairausten perusteella maan leikkauslujuus oli parantunut kaikissa syvyyksissä. Siipikairausten leikkauslujuus oli kokeen jälkeen hieman parempi kuin kartiokokeiden antama lujuus. Kuvassa 3.28 on verrattu keskenään ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen tehtyjen siipikairausten tuloksia.



Kuva 3.28. Siipikairautulokset ennen vakuumikonsolidointia ja sen jälkeen: a) pisteet 5 ja 19, b) pisteet 6 ja 18. Mittakaava 1:100.

4. TULOSTEN TARKASTELU

Torpparinmäen vakuumikonsolidointikokeilu täytti sille asetetut tavoitteet. Menetelmä todettiin tehokkaaksi. Kolmen kuukauden aikana koekenttä painui keskimäärin 0.5 m. Alueen keskellä painuma oli suurin, lähes 0.6 m. Kokeen päätyttyä painumasta palautui vajaat pari senttimetriä.

Kohteen avulla saatiin kaivattua kokemusta vakuumikonsolidoinnin suunnittelusta ja rakentamisesta. Suunnittelu-aikataulu oli tiukka. Kireän aikataulun vuoksi mitoitus tehtiin osin puutteellisten pohjatutkimustulosten avulla. Pystyjojaväli oli poikkeuksellisen pieni, mutta mitoitus perustui kuitenkin kolmeen eri menetelmään, joiden perusteella ojavälin olisi pitänyt olla tätäkin pienempi. Kuivatussalaojaputkien etäisyydet mitoitettiin varmuuden vuoksi varsin varovaisesti. Todennäköisesti rakenne olisi toiminut yhtä hyvin vaikka putkiväli olisi kasvatettu 5 metriin.

Painumatuloksia oli alunperin tarkoitus verrata koealueen läheisyydessä aiemmin pystyjoituksen ja 1.5 metrin ylipenkereen avulla tehdyn pohjanvahvistuksen havaintotuloksiin. Vertailukenttä oli 1.5 vuoden aikana painunut 0.3 m. Vertailukohteessa savikon paksuus oli kuitenkin ohuempi kuin vakuumikonsolidoidulla alueella, joten tuloksia ei voitu suoraan verrata toisiinsa.

Tangettimoduulimentelmän avulla oli etukäteen laskettu, että 1.5 metrin ylipenkereen vaikutuksesta Torpparinmäen koekenttä painuisi 0.66...0.88 m. Vakuumikonsolidoinnin avulla saavutettu primaaripainuma vastasi siis tämän mukaan 67...89 % konsolidaatioastetta.

Kentän painumisnopeuden mallintaminen onnistui parhaiten elementtimenetelmään perustuvan Z_Soil-ohjelman avulla. Z_Soil-ohjelman avulla ennustettiin, että koekentän keskiosa painuisi 86 vuorokaudessa 50-70 kPa:n alipaineella yhteensä 0.66 m. Mitattu painuma jäi 0.59 metriksi, mutta painumaa pienensi muhviilitoksen aukeaminen, jonka johdosta alipaine oli viiden vuorokauden ajan vain 30 kPa. Ennen paineen putoamista

Z_Soil-ohjelmalla lasketut ja kentältä mitatut painumat vastasivat toisiaan erittäin hyvin, eroa oli vain muutama senttimetri.

Z_Soil-ohjelmalla laskettiin myös kentän primaaripainuma 1.5 metrin ylipenkereen ja 0.85 m välein asennettujen liuskapystyöjien vaikutuksesta. Laskettu loppupainuma oli 0.55 m ja sen kehittymiseen olisi kulunut aikaa 1000 vuorokautta eli lähes 3 vuotta. Vakuumikonsolidoinnin 0.59 m primaaripainumaa ei ylipenkereen ja pystyöjien avulla olisi siis voitu edes saavuttaa, ja pienemmänkin painuman aikaansaaminen olisi vienyt vuosia.

Ennen konsolidointia 1.5 metriä korkeamman (>30 kPa) ylipenkereen kokoaminen koekentän päälle olisi aiheuttanut vakavuusongelmia. Vakuumikonsolidoinnin ansiosta koekohteessa maan leikkauslujuus kasvoi ja vesipitoisuus pieneni kaikissa syvyyksissä. Vesipitoisuus pieneni noin 5...20 prosenttiyksikköä. Siipikairausten perusteella leikkauslujuus kasvoi 30...50 % (5...15 kPa) ja kartiokokeiden perusteella 10...30 % (5...10 kPa). Esikonsolidaatiojännitys kasvoi 20... 30 % (5...15 kPa).

Saavutetun painuman suuruus, leikkauslujuuden kasvu ja vesipitoisuuden pieneneminen riippuvat käsiteltävän maan ominaisuuksista. Kansainvälisten julkaisujen mukaan vakuumikonsolidoinnin vaikutus leikkauslujuuteen ja vesipitoisuuteen on suurin erittäin pehmeässä maassa. Vakuumikonsolidoinnin ansiosta vedenläpäisevyydeltään Torpparinmäen savea muistuttavan Bangkokin saven vesipitoisuus pieneni 100 vuorokaudessa 120 prosentista 90...100 prosenttiin, painuma oli 1.1 m [Woo et al. 1989]. Ruotsissa 9 metrin savikerroksen leikkauslujuus parani 10...15 % vakuumikonsolidoinnin ansiosta [Torstensson 1984]. Myös kansainvälisesti Torpparinmäen tuloksia voidaan pitää edustavina.

Useissa ulkomaisissa kohteissa alipaine ei saavuttanut tavoitetasoa joko ilma- ja vesivuotojen tai pumpun toimintahäiriöiden vuoksi. Tästä syystä myös painumat jäivät suunniteltua alhaisemmiksi. Torpparinmäen koekentän tiivistys onnistui erittäin hyvin. Kalvon alle saatiin pumpun maksimitehoa vastaava 90 kPa:n alipaine.

5. KUSTANNUKSET

5.1 Torpparinmäen koekohteen kustannukset

Torpparinmäen vakuumikonsolidointikokeen budjetti oli noin 300 000 markkaa. Todelliset kustannukset olivat kuitenkin suuremmat. Kustannuksia nosti muunmuassa koepaikan arvioitua paksumpi savikko. Pystyöjituskustannukset lisääntyivät paitsi kasvaneen ojasyvyyden ja -määrän myös arvioitua suurempien kaluston hankintamenojen vuoksi. Vakuumikonsolidointiin liittyi myös eräitä työvaiheita ja kustannuseriä, joihin ei oltu osattu varautua budjettia laadittaessa. Esimerkiksi koekohteen pohjatutkimukset ja instrumentointi tulivat ennakoitua kalliimmiksi.

5.2 Teoreettinen kustannusvertailu

5.2.1 Laskennan perusteet

Vakuumikonsolidoinnin kustannusten arviointi pienen koekohteen perusteella antaa virheellisen kuvan menetelmän hinnasta suhteessa perinteisiin pohjanvahvistusmenetelmiin. Paremman käsityksen saamiseksi päädyttiin vertailulaskentaan teoreettisten esimerkkien avulla.

Vertailun pohjaksi valittiin kolme eri kokoista aluetta. Kaikkien kolmen alueen kustannukset laskettiin vakuumikonsolidointimentelmää, pystyöjia ja 1.5 metrin ylipengertä sekä syvästabilointia (kalkki-sementti) käyttäen. Kohteiden maaperäolosuhteet vastasivat Torpparinmäen olosuhteita.

Alueiden koot valittiin tarvittavan pumppauskapasiteetin perusteella. Yhden 90 kPa alipainepumpun arvioitiin riittävän 2500 m² suuruisen kentän käsittelyyn, joten pienimmän kohteen kooksi valittiin 2500 m² (= 50*50 m²). Toisessa kohteessa käytettiin kahta 90 kPa pumppua ja kentän koko oli 5000 m² (50*100 m²). Kolmas kohde oli

10000 m² (100*100 m²) ja se konsolidoitiin neljän alipainepumpun avulla.

Kustannukset laskettiin Tielaitoksen Ressu-kustannuslaskentaohjelman [Ressu 1995] avulla. Työmenekkien ja materiaalien hinnan määrittelyssä käytettiin apuna Jylhän [1992] diplomityön liitteinä olevia viitehinnastoja ja panostiedostoja sekä Helsingin kaupungin, Kaitos Oy:n, Taretek Oy:n, Lemminkäinen Oy:n, Maa- ja vesirakentajien keskusliiton, Maarakennusliike Pekkinen E M Oy:n ja YTV jätehuoltoneuvonnan ilmoittamia tietoja. Vakuumikonsolidoinnin osalta eräiden työtehtävien suoritusta arvioitiin myös koekohteen kokemusten perusteella.

Ressu-ohjelma tulostaa laskelmat resurssisuunnitelmataulukkoina. Kunkin esimerkkikohteen rakentaminen koottiin lisäksi PlanMan Linear v 3.0-ohjelman [PlanMan 1994] avulla jana-aikatauluksi. PlanMan-ohjelmaan syötetään rakentamisen aloituspäivämäärä. Tämän jälkeen ohjelma muodostaa aikataulun siten, että viikonloppuisin ja rakennusajalle osuvien yleisten juhlapyhien aikana ei tehdä töitä.

Vakuumikonsolidointiesimerkit

Vakuumirakenteen oletettiin olevan pääosin samanlainen kuin Torpparinmäen koekohteen rakenteen. Pystyjaväli oli 1.0 m, yhden ojan pituus 10 m ja pohjavedenpinnan syvyys 1.5 m. Vaakasuorien kuivatussalaojaputkien etäisyydet harvennettiin viiteen metriin eikä reunaojiin sijoitettu kastelujärjestelmää. Kalvon reunat tiivistettiin pehmeän saven ja sen päälle sullotun kuivakuorisaven avulla. Maasta pois pumpattu vesi johdettiin muovikalvon päälle. Kalvon suojana oli veden lisäksi suodatinkangas, suojahiekkaa käytettiin vain kalvon alla. Reunaojien päällä oli 0.7 metrin ylipenkereet painumaeroja pienentämässä. Instrumentoinnin ja mittausten määrät pienennettiin minimiin.

Kentän koon kasvaessa rakenne pysyi muuttumattomana. Kahden ja neljän pumpun systeemeissä pumput sijoitettiin eri puolille kenttää, joten jokaista pumppua varten

tarvittiin oma kokoojaputki ja läpivienti. Reunaojen vuoksi todellinen tilantarve oli 2500 m² kentällä 60 m*60 m, 5000 m² kentällä 60 m*110 m ja 10000 m² suuruisella kentällä 110 m*110 m.

Suodatinkerroksen murske, salaojasora ja suojahiekka ostettiin. Materiaalien hintaan sisältyi kuljetus pääkaupunkiseudun alueella. Ylipengermassat saatiin kuljetuskustannusten hinnalla. Muoviputkien ja tiivistyskalvon kustannuksissa ei otettu huomioon materiaalien jäännösarvoa.

Vakuumikonsolidoinnin pumppausaika oli kolme kuukautta 80 kPa alipaineella (nettokuorma noin 72 kPa). Kenttä painui konsolidoinnin vaikutuksesta noin 0.5 m.

Pystyjoitus- ja ylipengeresimerkit

Pystyjojat ulotettiin saven alapuoliseen silttikerrokseen, joten pystyjojat olivat noin metrin pidempiä kuin vakuumikonsolidointiesimerkissä. Ojaväli oli 1.0 m.

Humuksen poisto, suodatinkerroksen levittäminen pystyjoituksen työskentelyalustaksi ja varsinainen pystyjoitus tehtiin samalla tavalla kuin vakuumikonsolidoinnissa. Humusta tosin poistettiin ainoastaan pystyjoitettavalta alueelta.

Penkereen rakennusvaiheen kustannukset muodostuivat maan levitystyöstä, materiaalin hinnasta ja kuljetuskustannuksista. Ylipengermassat kuljetettiin työmaalle 20 kilometrin päästä. Ylipengerkentällä oli sama määrä painumalevyjä ja huokosvedenpaineantureita kuin vakuumikonsolidointikentällä. Vaadituksi konsolidointiajaksi oletettiin 1.5 vuotta. 18 kuukauden kuluttua penger purettiin ja pengermateriaali vietiin pois alueelta, jolloin kustannuksia syntyi purkutyöstä, kuljetuksista ja ylijäämämaamassojen täyttöalueen (esim. Vuosaaren täyttöalue) perimistä maksuista.

Syvästabilointiesimerkit

Syvästabiloinnissa pilariväli ja -koko valittiin sellaisiksi, että kentän kantavuus vastasi vakuumikonsolidoinnilla saavutettua lujuutta. Pilariväli oli 1.2 m. Kalkki-sementtipilarin pituus oli 13.5 m ja halkaisija 0.5 m. Pilarointi tehtiin 0.4 m paksun murskekerroksen päältä. Pilaroinnin jälkeen käsitelty alue lujittui 2 kuukautta.

5.2.2 Vertailun tulokset

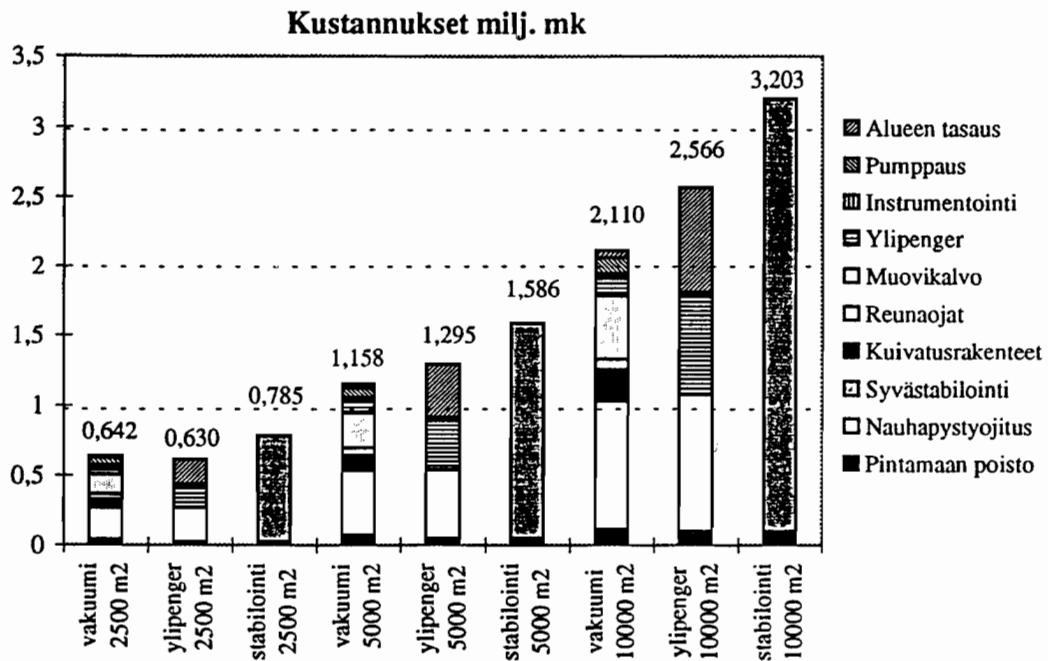
Kokonaiskustannukset

Esimerkkitapausten Ressu-ohjelmalla [Ressu 1995] lasketut kokonaiskustannukset ja eri työvaiheiden markkamääräiset osuudet on koottu kuvaan 5.1. Niiden perusteella 2500 m²:n kokoisen esimerkkialueen pohjanvahvistus on edullisinta ylipengertä ja pystyjoja käyttäen, tosin vakuumikonsolidointi on lähes saman hintaista. 5000 m²:n ja 10000 m²:n kohteissa vakuumikonsolidointi on halvin vaihtoehto.

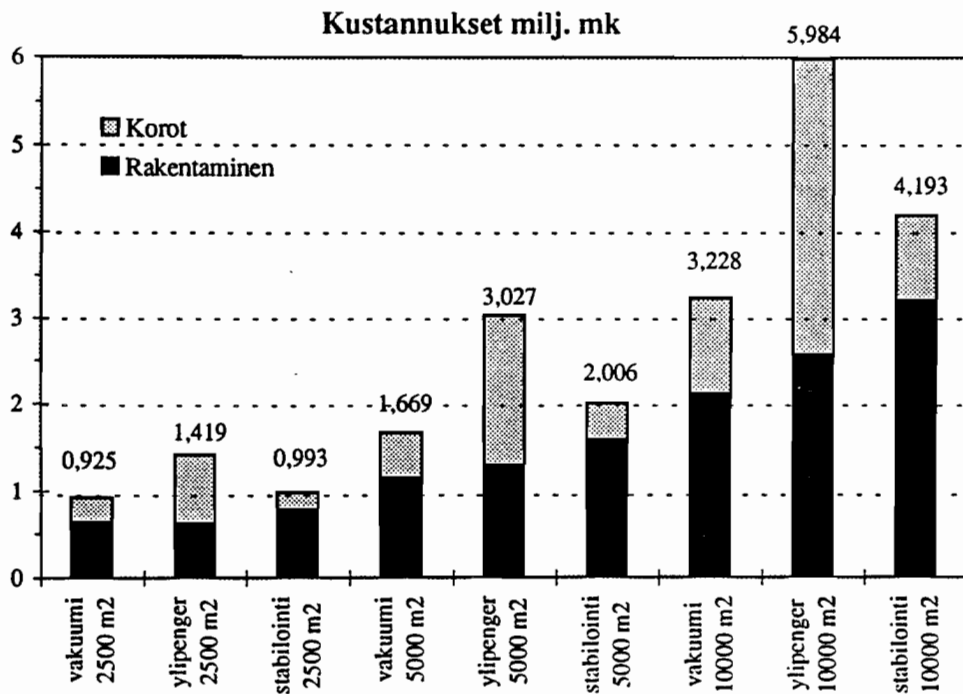
Mikäli reunaojien päällä käytetään painumaeroja tasaavaa ylipengertä, vakuumikonsolidoinnissa käsitellään itse asiassa varsinaista pystyjoitettua aluetta suurempi alue. Jos neliöhinta lasketaan alueen kokonaispinta-alan mukaan vakuumikonsolidoinnin hinta laskee taulukon 5.1 mukaisesti.

Taulukko 5.1. Pinta-alan vaikutus vakuumikonsolidoinnin neliökustannuksiin.

A _{vakuumi} m ²	Hinta mk/m ²	A _{vakuumi + reunaajat} m ²	Hinta mk/m ²
2500	257	3600	178
5000	232	6600	175
10000	211	12100	174



Kuva 5.1. Vakuumikonsolidoinnin, pystyöjituksen ja 1.5 m ylpenkeroon sekä syvästabiloinnin teoreettinen kustannusvertailu kolmen eri kokoisen alueen avulla.



Kuva 5.2 Odotusajan korkokustannusten vaikutus vakuumikonsolidoinnin, pystyöjituksen ja ylpenkeroon sekä syvästabiloinnin kokonaiskustannuksiin.

Vakuumikonsolidoinnin kustannukset

Kustannustarkastelu osoittaa, että vakuumikonsolidoinnin hintaan vaikuttavat eniten nauhapystyöjitus ja tiivistyskalvo. Pumppauksen aikana huoltokulut ovat pienessä kohteessa yllättävän suuret.

Suunnittelijan valitsema ojaväli ja ojitussyvyys vaikuttavat herkästi pystyöjituksen kokonaishintaan. Ojavälin kasvattaminen kymmenellä senttimetrillä voi pienentää ojien yhteismäärää parikymmentä prosenttia. Tässä vertailussa nauhapystyöjituksen kustannukset laskettiin olettamalla asennuksen ja materiaalin hinnan pysyvän samana alueen koosta riippumatta. Todellisuudessa hinta laskee pinta-alan kasvaessa. Mobilisointikustannusten osuus on suuri, varsinkin pienissä kohteissa ja tapauksissa, joissa kalusto joudutaan tuomaan pääkaupunkiseudun ulkopuolelta.

Tiivistyskalvokustannuksia voidaan pienentää käyttämällä samaa tiivistyskalvoa useaan kertaan. Vakuumikonsolidoinnissa osa kalvosta jää kuitenkin aina rakenteeseen. Alipainepumppauksen onnistumisen edellytyksenä on tiivis rakenne, joten kalvon on oltava ehjä. Käytännössä käytetyn kalvon irrotus vakuumikentältä, pakkaaminen ja kuljetus siten, että se täyttäisi myös seuraavassa kohteessa vakuumikonsolidoinnin laatuvaatimukset voi olla hankalaa. Vakuumirakenteesta purettua kalvoa voisikin ajatella käytettäväksi johonkin muuhun vähemmän vaativaan tarkoitukseen.

Pystyöjituksen ja ylipenkereen kustannukset

Myös ylipengertä ja pystyöjia käytettäessä pystyöjitus on kallein työvaihe, mutta lisäksi kuljetuskustannuksilla on suuri vaikutus.

Ylipenkereen hinta riippuu pääasiassa materiaalin saatavuudesta. Mikäli tarvittavat maamassat saadaan muutaman kilometrin päästä pelkkien kuljetuskustannusten hinnalla, on ylipenkereen käyttö edullista. Kuljetuskustannusten kasvaessa kuutiohintaa nousee

tasaisesti. Jos materiaalin laadulle asetetaan vaatimuksia, ei sitä enää saada ilmaiseksi. Konsolidoinnin jälkeen ylimääräiset maamassat kuljetetaan pois työmaalta. Kaatopaikat eivät peri materiaalista läjitysmaksua, mikäli niillä on pulaa täyttömaasta. Muussa tapauksessa maamassat on edullisempaa viedä kaupunkien ylijäämämassojen täyttöalueille, missä kuutioveloitus on halvempi. Kuljetusmatkan pituus on kuitenkin läjitysmaksua merkittävämpi kustannustekijä.

Syvästabiloinnin kustannukset

Syvästabiloinnissa pääosa kustannuksista muodostuu itse stabiloinnista. Stabilointityössä materiaalikustannusten osuus on noin 65 % ja stabilointilaitteen noin 30 %; miestyön osuus on pieni [Jylhä, 1992]. Kustannukset riippuvat stabiloitavan kerroksen paksuudesta, pilarivälistä ja pilarin halkaisijasta.

Odotusajan korkokustannusten vaikutus

Kustannusvertailussa päätettiin tarkastella myös korkokustannusten vaikutusta pohjanvahvistusmenetelmien kokonaiskustannuksiin. Syvästabilointi ja vakuumin konsolidointi voidaan tehdä vain muutamia kuukausia ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista, mutta ylipengertä ja pystyöjitusta käytettäessä pohjanvahvistustyöt on aloitettava lähes kaksi vuotta aiemmin.

Kuvassa 5.2 on esitetty korkokustannusten osuus esimerkkikohteissa, kun vuotuinen korko on 6 %. Laskenta on tehty määrittämällä rakennuskustannusten muodostumisen ajallinen painopiste kussakin tapauksessa ja laskemalla korkoa tuosta hetkestä pohjanvahvistustyön valmistumishetkeen saakka. Ylipengeresimerkeissä korko on määritetty erikseen rakennus- ja purkuvaiheen kustannuksille.

Kuvan 5.2 perusteella nähdään, että jos odotusajalle lasketaan korkoa, ei ylipenkereen

ja pystyöjien käyttö ole kannattavaa, sillä korkomenot ovat huomattavan suuret. Syvästabiloinnissa korkokustannusten osuus on suhteellisesti pienin, mutta menetelmän suuret rakennuskustannukset pitävät kokonaishinnan korkeana. Tässä tarkastelussa vakuumikonsolidoinnin edut, lyhyt rakennusaika ja kohtuulliset rakennuskustannukset, tulevat selvästi esille. Kohteen koon kasvaessa ero vakuumikonsolidoinnin ja vertailtavien menetelmien välillä kasvaa merkittävästi vakuumikonsolidoinnin hyväksi.

Aikataulu

Pumppausaika oli kaikissa vakuumikonsolidointiesimerkeissä kolme kuukautta. Pystyöjitus ja ylipenger-kohteissa konsolidointiaika oli 18 kuukautta. Syvästabiloinnissa paalujen lujuuden kehittyminen vei kaksi kuukautta. Taulukossa 5.2 on esitetty kokonaisajat rakennusaika ja purku mukaanlukien. Tarkemmin aikataulut on esitetty liitteessä 4. 10 000 m² kohteissa rakennusaikaa on lyhennetty lisäämällä eräiden töiden kone- ja työntekijämääriä.

Vertailussa vakuumikonsolidointi oli selvästi ylipenkereen ja pystyöjituksen käyttöä nopeampi menetelmä. Esimerkkilaskelmissa vakuumikonsolidointi oli kokonaiskestoltaan 2-3 kuukautta syvästabilointia hitaampi menetelmä. Varsinainen konsolidointiaika on vakuumikonsolidoinnissa lyhyt, mutta kohteen koon kasvaessa rakentamiseen ja purkuun käytetty aika kasvaa merkittävästi.

Esimerkissä työtehtäviä ei ole limitetty millään tavoin. Töiden tahdistaminen lyhentää kokonaisrakennusaikaa. Rakennusaikaa voidaan nopeuttaa myös urakatyöllä tai lisäämällä työntekijöiden ja kaluston määrää, mikä yleensä nostaa kustannuksia.

Ylipenkereen ja pystyöjien tarvitsemaa konsolidointiaikaa voidaan lyhentää käyttämällä korkeampaa pengertä. Esimerkkikohteissa kolmen metrin korkuinen penger (noin 50 kPa) olisi tullut kustannuksiltaan vakuumikonsolidointia kalliimmaksi ja käytetty aika olisi edelleenkin ollut vakuumikonsolidoinnin vaatimaa aikaa pidempi. Huomautettakoon

vielä, että tarkasteltujen kohteiden heikko maapohja ei tällaista pengertä olisi edes kestänyt.

Taulukko 5.2 Esimerkkikohteiden kokonaiskestot.

A m ²	Rakennusaika kk	Konsolidointi / Kovettuminen kk	Purku kk	Kokonaisaika kk
VAKUUMIKONSOLIDOINTI (Nettokuorma 72 kPa)				
2500	2	3	0.5	5.5
5000	3	3	0.5	6.5
10000	4.5	3	1.7	9.2
PYSTYOJITUS JA 1.5 M YLIPENGER (Nettokuorma 27 kPa)				
2500	1.5	18	0.5	20
5000	2.7	18	1.3	22
1000	3.5	18	1.5	23
SYVÄSTABILOINTI				
2500	1.6	2	-	3.6
5000	1.7	2	-	3.7
10000	3.5	2	-	4.5

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Torpparinmäen koerakenne suunniteltiin kirjallisuustietojen perusteella. Kokeilu onnistui hyvin ja asetettu painumatavoite saavutettiin. Koekohteen kokemusten perusteella vakuumikonsolidointi soveltuu hyvin pääkaupunkiseudun olosuhteisiin. Menetelmä on nopea ja tehokas. Torpparinmäen koekentän 10-metrinen savikko painui alipaineen vaikutuksesta vajaassa kolmessa kuukaudessa keskimäärin 0.5 m. Myös kentän kantavuus parani huomattavasti. Lisäksi koekohteen avulla saatiin käytännön kokemusta vakuumikonsolidointihankkeen toteutuksesta.

Vaakumikonsolidoitavan alueen suunnittelussa on otettava huomioon kalvon tiivistämiseen tarvittavan reunaosan vaatima tila. Torpparinmäen koekohteessa syvällä oleva pohjavesi ja kuivakuorikerroksen paksuus kasvatti reunaosien kokoa ja varsinaisen konsolidoitavan alueen koko kutistui suunniteltua pienemmäksi.

Häiriintymättömiä näytteitä on otettava joka puolelta koealuetta, myös käsiteltävän alueen reunoilta, ja kussakin pisteessä näytteenottovälin on oltava varsin tiheä, jotta mahdolliset hyvinvettäläpäisevät ohuet siltti- tai hiekkakerrokset havaitaan jo suunnitteluvaiheessa. Torpparinmäen koekohde osoitti, että tällaiset linssit eivät välttämättä näy kairausdiagrammeissa.

Tavanomaiset ylipenkereen ja pystyjojen mitoitusten menetelmät soveltuvat myös vakuumikonsolidointikentän pystyjojavälin mitoittamiseen. Primaaripainuman suuruus voidaan karkeasti arvioida klassisten menetelmien avulla. Loppupainuman ja painumanopeuden mallintaminen onnistuu parhaiten elementtimenetelmään perustuvilla tietokoneohjelmilla, joiden avulla voidaan ottaa huomioon maan kerroksellisuus ja alipaineen muutokset pumppauksen aikana. Torpparinmäessä hyviä tuloksia saatiin Z_Soil-ohjelman avulla.

Koekohteessa kuivatussalaojen asennus ja kalvon suojahiekan levitys tehtiin käsityönä. Suurissa kohteissa tämä on hidasta ja kallista. Työssä voisi käyttää apuna kevyitä

koneita tai vaihtoehtoisesti rakennusjärjestys on suunniteltava sellaiseksi, että kauhakuormaajaa voidaan hyödyntää ilman, että vaurioitetaan jo tehtyjä rakenteita.

Koekohteessa kalvon reunat tiivistettiin bentoniitin sijasta märällä savella. Reunaojiin sijoitettiin kostutusputkisto. Työ tehtiin huolellisesti eikä rakenteen tiivistys vuotanut pumppauksen aikana. Todennäköisesti riittävä tiiviys olisi saavutettu myös ilman kostutusjärjestelmää.

Alipaineen vaikutus on suurin vakuumikentän keskellä. Reunoilla painumat jäävät pienemmiksi. Painumaeroja voidaan tasoittaa kentän reunoille ja reunaojien päälle kasattujen matalien ylipenkereiden avulla.

Teoreettisten esimerkkikohteiden avulla lasketussa kustannusvertailussa vakuumikonsolidointi oli kustannuksiltaan selvästi syvästabilointia edullisempi pohjanvahvistusmenetelmä. Käsiteltävän alueen koon kasvaessa sen käyttö tuli myös perinteistä pystyjoitus- ja ylipengerratkaisua halvemmaksi.

Lyhyestä konsolidointiajasta huolimatta vakuumikonsolidointi on jonkin verran syvästabilointia hitaampi menetelmä. Suurissa kohteissa vakuumikonsolidoinnin rakentamiseen ja purkuun kuluva aika on pidempi kuin varsinainen konsolidointiaika. Teoreettisessa vertailussa vakuumikonsolidoinnin käyttäminen ylipenkereen ja pystyjoituksen sijasta lyhensi esirakentamiseen tarvittavaa aikaa yli vuodella.

Esimerkkilaskelmien perusteella voidaan todeta, että vakuumikonsolidoinnin käyttö kannattaa silloin, kun käytettävissä oleva aika on lyhyt, poistettavat painumat suuria tai maapohja ei kestä tarvittavan ylipenkereen painoa. Vakuumikonsolidointi kannattaa myös, jos ylipengermassojen hankintakustannukset ovat korkeat. Vakuumikonsolidoinnin hintaan vaikuttavat eniten nauhapystyjoitus ja tiivistyskalvon asennus.

Harkittaessa vakuumikonsolidoinnin käyttöä jonkun muun menetelmän, kuten esimerkiksi pystyjoituksen ja ylipenkereen sijasta, on vertailussa syytä ottaa huomioon

seuraavat seikat :

- molempien menetelmien vaatimat toteutuskustannukset,
- asennusaika,
- käytettävissä oleva konsolidointiaika,
- lopullisen kuorman ja vakuumikuorman välinen suhde,
- maapohjan kantavuus,
- sivusiirtymien aiheuttamat ongelmat sekä
- kokoonpuristuvien kerrosten paksuus.

KIRJALLISUUS

Barden, L. 1965. Consolidation of clay with non-linear viscosity. Géotechnique, Volume XV, Number 4, December 1965. The Institution of Civil Engineers. London. s. 345-362.

Choa, V. 1989. Drains and vacuum preloading pilot test. Proceeding of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 13-18 August 1989. Volume 2. A. A. Balkema, Rotterdam. s. 1347-1350.

Cognon, J. M., Thevanayagam, S. 1994. Vacuum Consolidation Technology - Principles and Field Experience. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Geotechnical Special Publication No. 40, ASCE, New York. s. 1237-1248.

Cortlever, N. G. The Mebradrain System, Vertical Drainage. Geotechnics Holland BV. Amsterdam. 32 s.

Cortlever, N. 1995. Telefax A. Palolahdelle 20.7.1995 .

Cortlever, N. 1996. Telefax N. Puumalaiselle 11.1.1996.

Geotechnics Holland BV. Design aspects of vacuum consolidation. Amsterdam. 9 s.

Geotechnics Holland BV. 1980. Designing with the Mebra-Drain system. Bulletin 80/2. Holland.

Hansbo, S. 1981. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Tenth International Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 1981. A. A. Balkema. Rotterdam. s. 677-682.

Jacob, A., Thevanayagam, S., Kavazanjian, E. 1994. Vacuum-assisted consolidation of a hydraulic landfill. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Geotechnical Special Publication No. 40, ASCE, New York. s. 1249-1261.

Janbu, N. 1970. Grunnlag i geoteknikk. Trondheim. 426 s.

Jylhä, J. 1992. Tienrakennuksen kustannustiedosto. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 93 s.

Korhonen, K-H. 1977. Heikosti kantavan maapohjan konsolidoituminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Julkaisu 19. Espoo. 72 s.

Korhonen, K-H. 1985. Muodonmuutosominaisuudet, Rakenteiden painuminen. RIL 157-1, Geomekaniikka I. Käsikirja. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki. s. 259-309, 363-409.

Leminen, K., Rathmayer, H. 1979. Heikosti kantavan hienorakeisen maapohjan parantaminen pystyjoituksen ja syvästabiloinnin avulla. Kenttäkokeet Helsingin Itäkeskuksessa. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, Tiedonanto 39. Espoo. 74 s.

Magnan, J-P. 1994. Maîtrise des amplitudes et vitesses de tassement des remblais sur argiles molles. Évolution récentes. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. N° 194, Novembre-Décembre 1994. s. 27- 40.

Mebra V 2.02, 1993. Mebra, Program for vertical drains, Version 2.02, User's Guide 19930206. Geotechnics Holland BV. Amsterdam, Holland. 16 s.

Näätänen, A. 1990. Pehmeikölle rakennettavien tiepenkereiden geotekniset laskelmat. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 81 s.

PlanMan Oy. 1994. PlanMan aikatauluohjelma. PlanMan Oy Tampere.

Ressu 1995. Ressu-kustannuslaskentaohjelma, Versio 2.6 (15.9.1995). Tielaitos et Microcomp Oy/ Laasonen K. Helsinki.

Sehested, K. G., Seng, Y. T. 1989. Soil Improvement Using Vertical Band Drains and Vacuum Preloading at Section 6/7. International Symposium On Trial Embankments On Malaysian Marine Clays. November 6-8, 1989. Kuala Lumpur. s. 25/1-13.

Tang, Y., Gao, Z. 1989. Experimental study and application of vacuum preloading for consolidating soft soil foundation. Proceeding of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 13-18 August 1989. Volume 2. A. A. Balkema, Rotterdam. s. 1423-1426.

Technique Geosystems / Cofra JV. 1995. Design and proposal for the execution of: Vacuum Consolidation Shah Alam Expressway Package A, Selangor, Malaysia. Amsterdam. 25 s.

TIEL. 1994. Geotekniikan informaatiojulkaisuja. Nauhapystyöjitus. Tielaitoksen selvityksiä 42/1994. Helsinki. 69 s.

Torstensson, B-A. 1984. Konsolidering av lera medelst kontsgjord grund vattensänkning och / eller vakuummetoden i kombination med vertikaldränering. BFR-projekt nr 791221-8. Stockholm. 75 s.

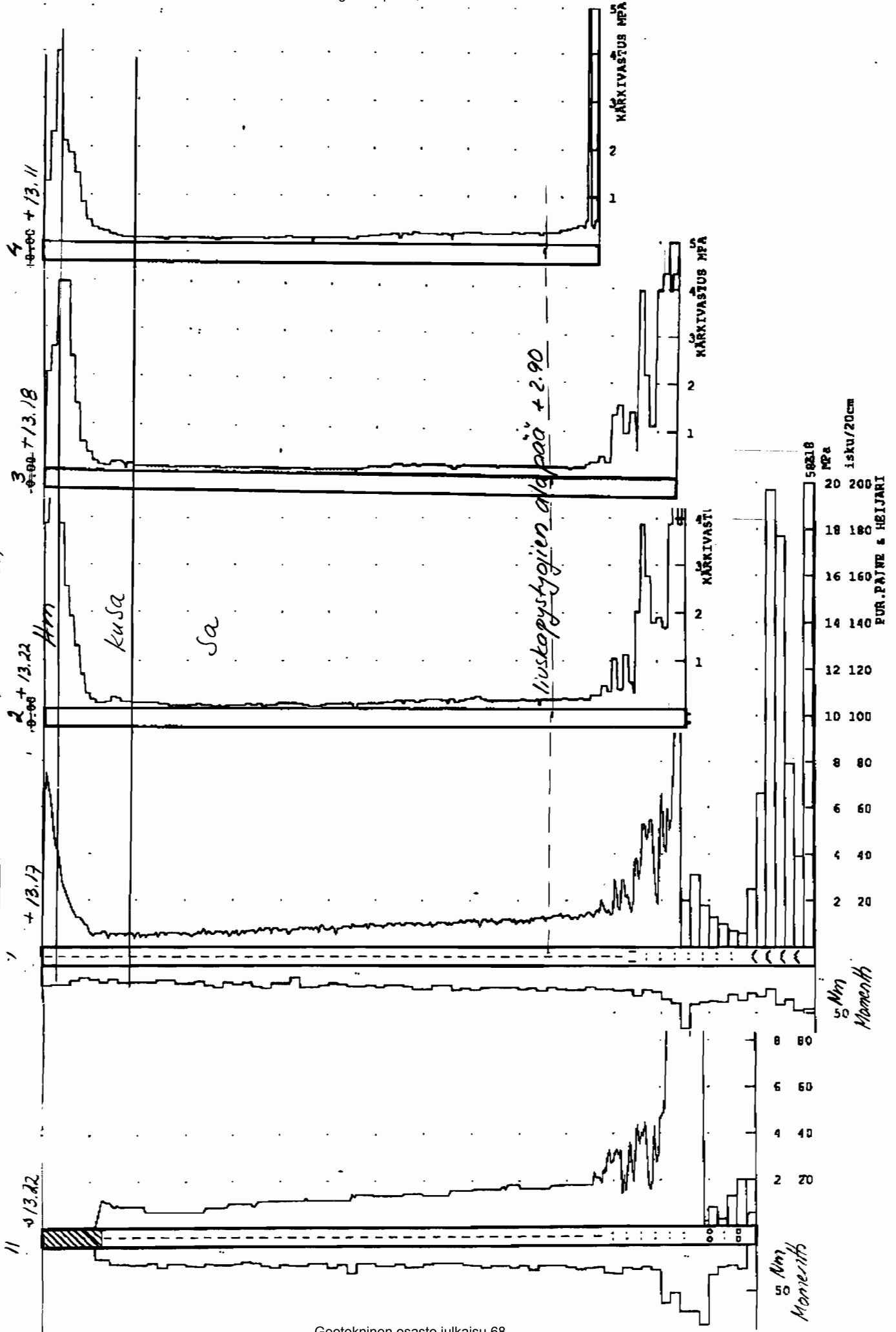
Woo, S. M., Weele, A. F., Chotivittayathanin, R., Trangkarahart, T. 1989. Preconsolidation of soft Bangkok clay with vacuum loading combined with non-displacement sand drains. Proceeding of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 13-18 August 1989. Volume 2. A. A. Balkema, Rotterdam. s. 1431-1434.

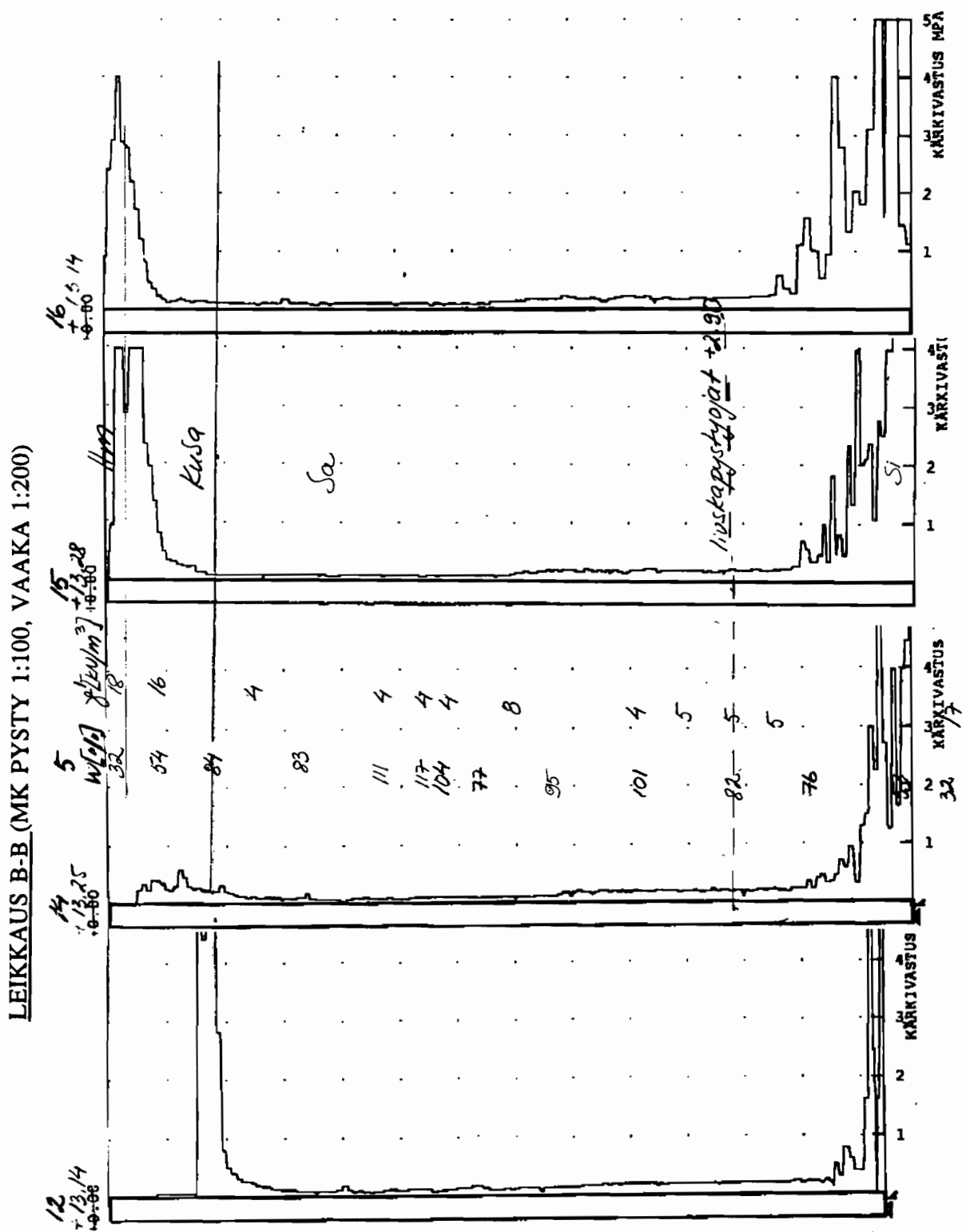
KAIRAUSTULOKSET

Helsingin kaupunki, Kalliovirasto

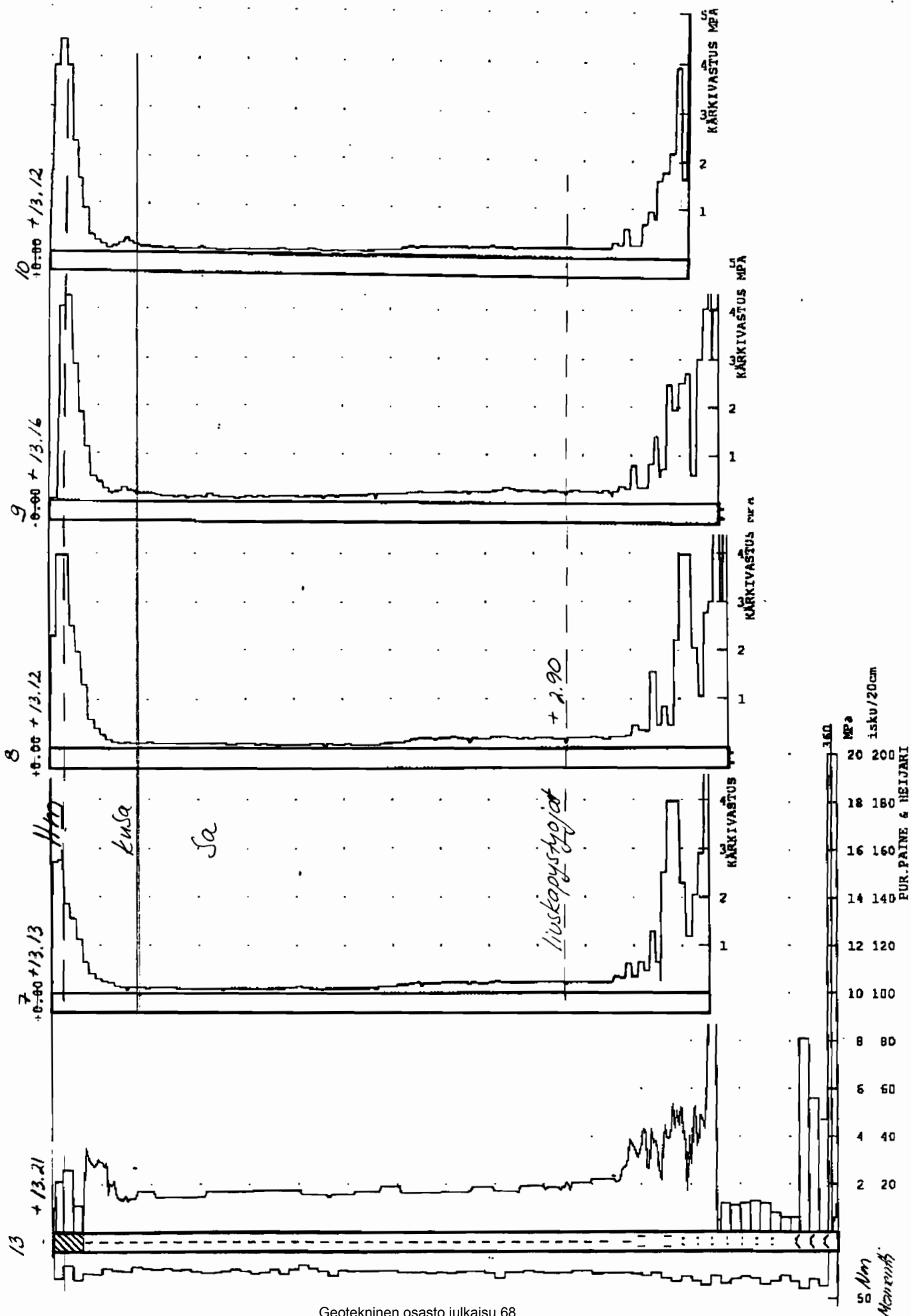
Liite 1a)

LEIKKAUS A-A (MK PYSTY 1:100, VAAKA 1:200)





LEIKKAUS C-C (MK PYSTY 1:100, VAAKA 1:200)



LUOKITUSKOKEIDEN TULOKSET

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki

Taulukko 1a. Luokituskokeet. Paalu 5.

z m	ρ_s t/m ³	H_k %	H_u %	s_k kPa	F %	w_L %	w_p %	I_p %	S_t	w %	γ kN/m ³	e_0	Sa- %	maa- laji	öd. n:o
0,3- 0,7	2,61	9,29	6,96							32,3	18,4		45	saLj	
0,7- 1,3	2,63	5,30	2,55							53,9	16,4		50	ljSa	
1,84- 1,87				22,7						83,6					
1,87- 1,90										(83,6)	14,9				1506P
1,90- 1,93										88,9 (85,0)	14,8	2,36			CRS 670
2,37- 2,43	2,69	4,47	1,67	12,6	78,0	86,4	30,1	56,3	36,42	101,4	14,4		55	liSa	
2,43- 2,46										107,3 (99,3)	14,2	2,84			1494
2,46- 2,49										101,8 (97,7)	14,2	2,76			CRS 669
2,49- 2,54				10,2						95,0					
3,24- 3,28				11,7						82,7					
3,26- 3,29										93,1 (89,3)	14,6	2,50			CRS 661
3,29- 3,35										50,8 (54,5)	16,5	1,41			CRS 662v
3,77- 3,79				9,4						71,5					
3,79- 3,82										72,8 (70,8)	15,4	1,97			1502 epäon.
3,82- 3,88										70,5 (69,6)	15,5	1,91			1500v
3,88- 3,91										70,0 (59,0)	16,5	1,79			1502B
3,91- 3,94										(58,48)	16,1				1515
4,64- 4,66	2,75	4,66	1,51	10,8						110,7			65	liSa	
4,66- 4,69										121,4 (117,0)	13,8	3,33			1492
4,69- 4,75	2,75	4,66		12,3	-	102,3	28,0	74,3	24,63	111,2					
4,75- 4,78										120,7 (111,5)	13,9	3,30			1503P
4,78- 4,81											14,1				CRS 680

v on vaakasuuntainen näyte

ödometrikokeen vesipitoisuus: ilman sulkuja = vesipitoisuus kokeen alussa, sulut = vesipit.näytteen ympäriltä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki

Taulukko 1b. Luokituskokeet. Paalu 5.

z m	ρ_s t/m ³	H_k %	H_u %	s_k kPa	F %	w_L %	w_P %	I_P %	S_t	w %	γ kN/m ³	e_0	Sa- %	maa- laji	öd. n:o
5,17- 5,20										(107,7)	13,9				1512
5,26- 5,31										104,0 (104,9)	14,4	2,82			CRS 656v
5,31- 5,34										117,0 (112,5)	14,0	3,17			CRS 655
6,04- 6,06				12,8						77,1					
6,06- 6,09										82,3 (80,4)	15,1	2,24			CRS 667
6,09- 6,15										86,3 (83,3)	14,9	2,35			CRS 668v
6,57- 6,63	2,74	1,91	0	9,0	38,0	36,6	22,1	14,5	8,60	42,4	17,8		30	Si	
6,63- 6,66										47,3 (43,9)	17,4	1,28			1495
7,44- 7,46				16,4						94,6					
7,46- 7,49										102,9 (95,2)	14,4	2,81			CRS 671
7,49- 7,52										(91,53)	14,3				1509
7,52- 7,55										(91,02)	14,3				1510
7,97- 7,99				16,9						104,2					
7,99- 8,02										105,9 (106,3)	14,1	2,94			CRS 659
8,02- 8,08										102,3 (99,8)	14,3	2,81			CRS 660v
8,08- 8,11										101,7 (98,0)	14,5	2,74			1505P
8,84- 8,86				11,1						101,0	14,1				
8,86- 8,89										107,8 (106,1)	14,1	2,97			1493
8,89- 8,94	2,75	4,33	1,03	12,6	84	98,5	28,3	70,2	12,19	104,2	14,5		69	liSa	
8,94- 8,97										(109,7)	14,1				CRS 678
8,97- 9,00										(104,4)	14,3				CRS 679

v on vaakasuuntainen näyte

ödometrikokeen vesipitoisuus: ilman sulkuja = vesipitoisuus kokeen alussa, sulut = vesipit. näytteen ympäriltä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki

Taulukko 1c. Luokituskokeet. Paalu 5.

z m	ρ_s t/m ³	H _k %	H _u %	S _k kPa	F %	w _L %	w _p %	I _p %	S _t	w %	γ kN/m ³	e ₀	Sa- %	maa- laji	öd. n:o
9,37- 9,40				17,6						105,2					
9,40- 9,43										115,4 (113,4)	13,9	3,17			CRS 672
9,43- 9,46										107,6 (100,3)	14,2	2,96			CRS 673*
9,46- 9,49										103,4 (103,3)	14,0	3,08			CRS 674*
9,49- 9,52										107,6 (101,8)	14,1	2,97			CRS 676*
10,24- 10,26	2,73	3,78	0,63	16,8						82,4	15,3		71	liSa	
10,26- 10,32	2,73	3,78		16,8	73,5	76,4	26,7	49,7	11,88	76,6	15,4				
10,77- 10,79				9,22						73,5					
10,79- 10,82										75,5 (76,5)	15,4	2,06			CRS 657
10,82- 10,88										76,1 (76,6)	15,3	2,08			CRS 658v
10,89- 10,92										83,5 (79,1)	15,3	2,21			1496
11,64- 11,66				18,3						76,4					
11,66- 11,69										85,0 (82,5)	15,0	2,29			1511
13,04- 13,06	2,73	2,10	0	14,6						53,2			40	laSa	
13,06- 13,09										53,9 (44,4)	16,7	1,47			1497
13,09- 13,15	2,73	2,10		16,8	55,8	55,8	25,2	30,6	12,46	58,6	16,5				
13,72- 13,74				79,4						32,4					

v on vaakasuuntainen näyte

ödometrikokeen vesipitoisuus: ilman sulkuja = vesipitoisuus kokeen alussa, sulut = vesipit. näytteen ympäriltä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Pohjarakennus ja maamekaniikka
Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki.

Taulukko 2a. Luokituskokeet. Paalu 6.

z m	ρ_t t/m ³	H _k %	H _a %	s _k kPa	F %	w _L %	w _p %	I _p %	S _i	w %	γ kN/m ³	e ₀	Sa- %	maa- laji	öd. n:o
0,3- 0,7	2,67	7,85	5,05							24,8			50	ljSa	
0,7- 1,2	2,65	4,93	2,08							50,0			54	ljSa	
1,90- 1,92				16,0						95,0					
1,92- 1,95										98,5 (92,8)	14,2	2,70			1498
3,30- 3,32				11,7						92,9					
3,32- 3,35										92,0 (90,5)	14,7	2,45			CRS 663
3,35- 3,41										42,1 (43,2)	17,5	1,14			CRS 664v
3,77- 3,79				9,35						71,5					
3,83- 3,85				10,0						60,4					
4,70- 4,72				12,6						113,5					
4,72- 4,75										122,9 (114,6)	14,1	3,28			1499
4,75- 4,78										115,5 (115,0)	14,0	3,15			CPR 681
5,23- 5,25				11,4						80,7					
5,36- 5,39										(74,1)	15,2				1519

v on vaakasuuntainen näyte

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Pohjarakennus ja maamekaniikka
Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki.

Taulukko 2b. Luokituskokeet. Paalu 6.

z m	ρ_s t/m ³	H _k %	H _u %	s _k kPa	F %	w _L %	w _p %	I _p %	S _i	w %	γ kN/m ³	Sa- %	e ₀	maa- laji	öd. n:o
6,10- 6,12				10,8						61,5					
6,12- 6,15															CRS 667
6,15- 6,21															CRS 668v
6,21- 6,24										(65,9)	15,6				1513
6,63- 6,65				11,7						42,5					
6,65- 6,71										44,8 (41,8)	17,7		1,20		CRS 666v
6,71- 6,74										41,2 (26,9)	17,9		1,12		CRS 665
7,50- 7,52				16,0						97,8					
7,52- 7,55	2,75									106,9 (104,2)	14,2		2,93		1501
7,97- 7,99				16,9						104,2					
8,03- 8,05				16,4						95,8					
8,90- 8,92				18,8						75,2					
8,92- 8,95															1507
8,96- 9,02										69,3 (72,71)	15,7		1,92		1508v
9,02- 9,05										82,9 (78,0)	15,2		2,25		1507
9,43- 9,45				16,4						81,6					
9,45- 9,48										83,0 (79,5)	15,2		2,25		CRS 675
9,48- 9,51										82,7 (81,1)	15,1		2,27		CPR 677
10,32- 10,35										53,8 (44,8)	16,8		1,45		1504
10,45- 10,47				14,6						50,6					
10,83- 10,85				16,0						42,8					
11,70- 11,72				12,6						37,3					
12,23- 12,25				37,7						31,8					

v on vaakasuuntainen näyte

ÖDOMETRIKOKEIDEN TULOKSET

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Matti Lojander / Niina Puumalainen 23.8.1995

Vakuuikonsolidointikoe, Torpparinmäki

Taulukko 3. Ödometrikokeiden tulokset.

Koe No	z m	σ'_{v0} kPa	σ_p kPa	m_i	β_i	c_v m ² /a (σ_1) (kPa)	ϵ_α % (σ_1) (kPa)
Paalu 5							
1506P	1,87-1,90	31	21	9,7	0	0,25 (100)	1,38 (100)
1494	2,43-2,46	33	23	7,0	-0,5	0,7 (100)	1,59 (100)
1502 epäonn.	3,79-3,82	35					
1500v	3,82-3,88	40	21	11,1	-0,5	0,48 (100) 0,32 (50)	
1502B	3,88-3,91	41	27	10,6	-0,5	0,22 (50) 0,50 (100)	1,28 (50) 0,83 (100)
1515	3,91-3,94	41	22	10,9	-0,5	0,67 (100)	0,68 (100)
1492	4,66-4,69	39	36	6,5	-1	0,2 (140)	1,12 (140)
1503P	4,75-4,78	45	33	6,7	-1	0,25 (120)	1,3 (120)
(1512	5,17-5,20	46	56	4,3	-1,9	0,06 (100)	1,00 (100)
1495	6,63-6,69	49	45	11,3	-0,5	2,0 (150)	0,42 (150)
1509	7,49-7,52	59	53	4,4	-1	0,05 (80)	1,89 (80)
1510	7,52-7,55	59	45	5,6	-0,5	0,06 (100)	1,05 (100)
1505P	8,08-8,11	61	50	5,0	-1	0,21 (140)	1,22 (140)
1493	8,86-8,89	65	48	5,1	-1	0,1 (100)	0,71 (100)
1496	10,89-10,92	75	57	5,6	-0,5	0,3 (120)	1,47 (120)
1511	11,66-11,69	80	70	5,0	-0,5	0,4 (120)	1,00 (120)
1497	13,06-13,09	81	55	13,9	0	3,1 (160)	0,42 (160)
Paalu 6							
1498	1,92-1,95	27	38	6,3	-0,5	0,25 (100)	1,80 (100)
1499	4,72-4,75	40	36	6,4	-1	0,09 (70)	1,58 (70)
1519	5,36-5,39	45	40	7,5	-0,5	0,08 (80)	0,68 (80)
1513	6,21-6,24	52	40	8,4	-0,5	0,12 (100)	0,64 (100)
1501	7,52-7,55	59	50	4,8	-1	0,04 (100)	1,64 (100)
1508v	8,96-9,02	68	57	8,9	0	0,21 (120)	1,26 (120)
1507	9,02-9,05	68	56	5,2	-0,5	0,94 (120)	1,50 (120)
1504	10,32-10,35	77	71	9,3	-0,5	1,48 (120)	0,70 (120)

v on vaakasuuntainen näyte

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Matti Lojander / Niina Puumalainen 28.8.1995

Vakuumikonsolidointikokeilu, Torpparinmäki

Taulukko 4. Jatkuvapuristeiset ödometrikokeet. Redusoimattomat parametrit. $\varepsilon_1^0 = 0,75 \% / h$.

Koe No	z m	σ'_{vo} kPa	σ_p kPa	m_1	β_1	C	m_2 $\beta_2 = 1$	c_v m ² /a	σ'_p kPa
Paalu 5									
CRS 670	1,90-1,93	31	61	7,5	0	0,155	55	0,5	46
CRS 669	2,46-2,49	33	36	6,5	-1,00	0,567	68	0,6	30
HGeo CRS	2,90	35	32	6,7	-0,37		49 ($\beta_2 = 0,43$)	0,7	28
HGeo CRS v	2,90	-	31	7,8	-0,24		61 ($\beta_2 = 1,93$)	1,0	-
CRS 661	3,26-3,29	37	34	7,1	-0,74	0,472	75	0,6	30
CRS 662v	3,29-3,35	-	22	15,4	0,00	0,146	156	8*	häir.
CRS 680	4,78-4,81	44	36	7,1	-1,00	0,438	79	0,6	30
HGeo CPR	5,00	45	42 52	3,8 9,6	0,00 -3,35		47 47 ($\beta_2 = 1,36$)	1,5	48
HGeo CPR v	5,00	-	50	5,9	-0,77		55 ($\beta_2 = 0,20$)	0,7*	-
CRS 656v	5,255-5,31	-	37	6,5	-0,49	0,562	81	1,8*	-
CRS 655	5,31-5,34	46	45	5,3	-1,00	0,469	68	0,7	42
CRS 667	6,06-6,09	51	58	6,2	-0,5	0,464	64	1,1	40-50
CRS 668v	6,09-6,15	-	53	6,6	0	0,826	62	0,8*	42
HGeo CRS	6,36	53	59	16,8	-0,07		78 ($\beta_2 = 1,05$)	11	häir.
CRS 671	7,46-7,49	59	68	3,7	-2	0,364	58	0,4	55
HGeo CPR	7,76	60	77	3,1	-3,73		40 ($\beta_2 = 11,4$)	0,5	69
HGeo CRS	7,93	61	63	4,6	-0,40		54	0,9	
CRS 659	7,99-8,02	61	63	3,9	-1,00	0,460	62	0,4	51
CRS 660v	8,02-8,08	61	53	5,5	-0,51	0,546	79	0,8*	-
CRS 678	8,94-8,97	65	60	5,3	-0,68	0,515	71	0,4	46-50
CPR 679	8,97-9,00	65	58	5,6	-0,67	0,499	70	0,4	51
HGeo CRS v	9,16	-	67	7,5	0,00		61 ($\beta_2 = 0,881$)	0,3*	-
HGeo CRS	9,16	66	64	5,2	-0,85		53	0,3	
CRS 672	9,40-9,43	67	84	1,8	-2,81	0,365	52	0,3	74
HGeo CRS	10,56	73	88	8,3	-0,33		57 ($\beta_2 = 0,561$)	0,5	-
HGeo CRS	10,56v	-	90	9,4	-0,26		60 ($\beta_2 = 0,371$)	0,6	-
CRS 657	10,79-10,82	75	87	7,7	-0,50	0,452	74	1,3	häir.
CRS 658y	10,82-10,88	-	70	8,5	-0,16	0,893	81	>10*	häir.
HGeo CPR	11,96	83	87	3,9	-0,95		45 ($\beta_2 = 1,228$)	0,6	73
HGeo CPR	11,96v	-	92	6,2	-0,33		70 ($\beta_2 = 2,270$)	1,9	
Paalu 6									
CRS 663	3,32-3,35	30	35	7,1	-0,86	0,452	75	0,6	29
CRS 664v	3,35-3,41	-	25	26	0,00	0,086	171	400*	häir.
CPR 681	4,75-4,78	36	46	5,3	-1,33	0,430	76	0,6	48
CRS 666v	6,65-6,71	51	40	17	0,00	0,113	125	13	-
CRS 665	6,71-6,74	52	45	19	0,09	-0,497	111	7,5	-
CPR 677	9,48-9,51	67	78	4,7	-0,76	0,397	63	0,7	69

v - vaakasuuntainen näyte, ' - redusoitu, häir. - näyte on todennäköisesti häiriintynyt, * - c_b [m²/a]

AIKATAULU											
1996											
Ri	Selite	Kesto	Huhti	Touko	Kesa	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
1	VAKUUMIKONSOLIDOINTI 2500 m2	114	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2	Pintamaan poisto	2									
3	Nauhapystyjoja, murske	1									
4	Nauhapystyjoja	6									
5	Kuivatusrakenteet, putket	3									
6	Kuivatusrakenteet, hiekka	7									
7	Reunaojat	4									
8	Muovikalvo	5									
9	Tiivistystyöntö	5									
10	Ylipenkereet, rak. mat.	3									
11	Pumppaus, asennus	2									
12	Pumppaus ja mittaukset	65									
13	Purkutytöt, pumppu	1									
14	Purkutytöt, kalvo	1									
15	Purkutytöt, putket	2									
16	Alueen tasaus	1									
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto											
Leadittu 10/01/1996											
PlanMan Linear 3.00											
A:\KOE1:05.02.96											
PlanMan 00											

AIKATAULU												Ressu	
1996													
Ri	Selitte	Kesto	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu		
1	VAKUUMIKONSOLIDOINTI 5000 m2	140	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
2	Pintamaan poisto	4	3										
3	Nauhapystyöja, murske	2	4										
4	Nauhapystyöja	12	5										
5	Kuivatusrakenteet, putket	6	6										
6	Kuivatusrakenteet, hiekka	13	6										
7	Reunaojat	6	7										
8	Muovikalvo	7	8										
9	Tiivistystyttö	7	9										
10	Ylipenkereet, rak. mat.	5	10										
11	Pumppaus,asennus	2	11										
12	Pumppaus ja mittaukset	65	12										
13	Purkutytöt,pumppu	1	13										
14	Purkutytöt,kalvo	4	14										
15	Purkutytöt,putket	4	15										
16	Alueen tasaus	2	16										
Laadittu 11.01.1996													
PlanMan Linear 3.00													
A:\KOE2:05.02.96													
PlanMan Oy													

AIKATAULU										Ressu									
1996										1997									
Huhti	Touko	Kesa	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	Tam	Huhti	Touko	Kesa	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	Tam
R1	Selitte	Kesto																	
1	UAKUUMIKONSOLIDOINTI 10000 m2	191																	
2	Pintamaan poisto	7																	
3	Nauhapystyöja, murske	4																	
4	Nauhapystyöja	24																	
5	Kuivatusrakenteet, putket	8																	
6	Kuivatusrakenteet, hiekka	12																	
7	Reunaojat	8																	
8	Muovikalvo	11																	
9	Tiivistystäyttö	9																	
10	Ylipenkereet, rak. mat.	8																	
11	Pumppaus, asennus	2																	
12	Pumppaus ja mittaukset	66																	
13	Purkutyöt, pumppu	1																	
14	Purkutyöt, kalvo	8																	
15	Purkutyöt, putket	8																	
16	Alueen taseaus	4																	

Geotekninen osasto julkaisu 68

Geotekninen osasto julkaisu 68

		AIKATAULU												Ressu											
		1996						1997						1998											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Ri	Selitte	Kesto																							
1	Pystyöjitus ja ylipenger	10000	476																						
2	Pintamaan poisto		7																						
3	Nauhapystyöja, murske		4																						
4	Nauhapystyöja		28																						
5	Ylipenkereet, rak. mat.		28																						
6	Instrumentointi		1																						
7	Kuormitus ja mittaukset		380																						
8	Alueen tasaus		28																						

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Laadittu 11.01.1996
PlanMan Linear 3.00
A:\KOE6\05.02.96
PlanMan 00

AIKATAULU													Resu
1996													
		Huhti	Touko	Kesa	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu			
Ri Selite	Kesto	14	18	12	21	22	24	25	26	27	28	29	30
1 Syvästabilointi 2500m2	74												
2 Pintamaan poisto	2												
3 Murskekerros	1												
4 Syvästabilointi	28												
5 Kovettuminen	43		5										
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto													
		14	18	12	21	22	24	25	26	27	28	29	30
Laadittu 05.02.1996													
planMan Linear 3.00													
A:\KOE7:05.02.96											planMan 00		

AIKATAULU												1996		Ressu			

[illegible]

[illegible]

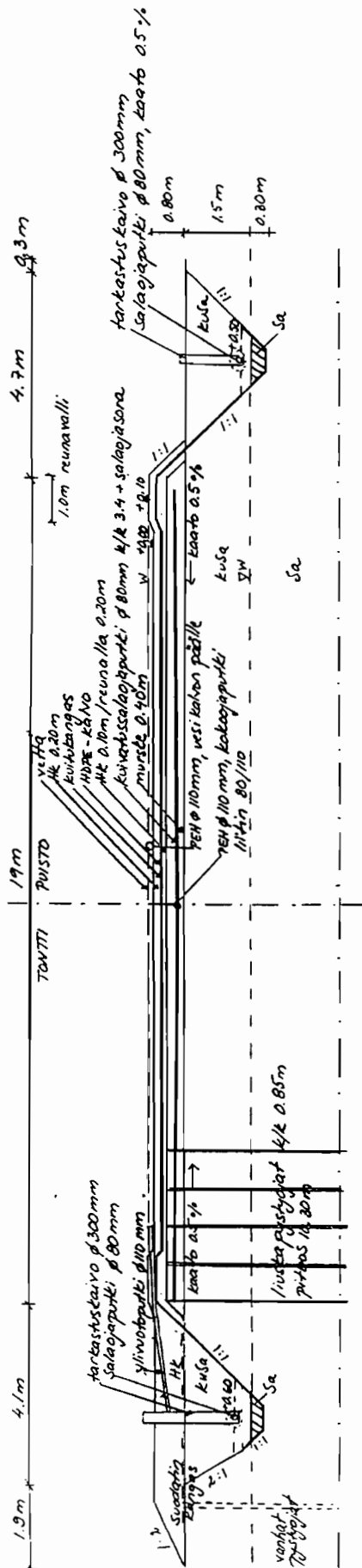
Vaakasuurtaiset vakuumiputket: putkien kaato 0.5% (kuivatussalaajaputkista kohti kakoojaputkea, kakoojaputkesta pumppuun). Korkeusmerkintä (-0.20) tarkoittaa etäisyyttä putken virtauspinnan ja murskeen pinnan välillä.

Reunavalli ja allas: suojatiehen avulla tehdään reunavalli, jotta kalvon päälle pumpattu vesi ei valjotse pois. Reunavalli on 0.10 m korkeammalla (+0.10/+0.00) kuin allas. Altaan tontinpuoleisesta kulmasta vesi kulkee ylivuotoputkea pitkin tarkastustarvaan A

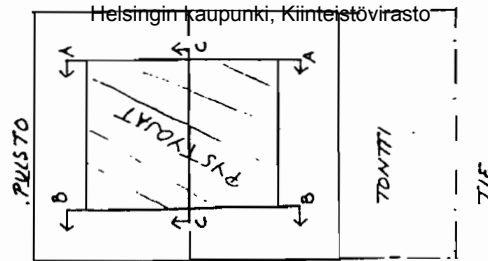
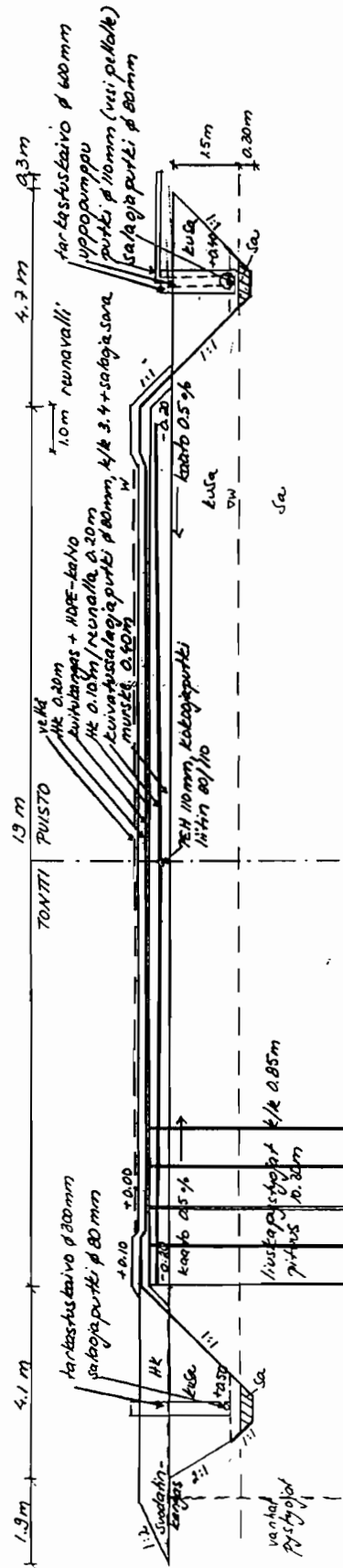
TKK
Pohja:
Vakuu

TKK 3.8.95
Pohjarak. ja maamek.
Vakuumikonsolidaatio
Torpparinmäki

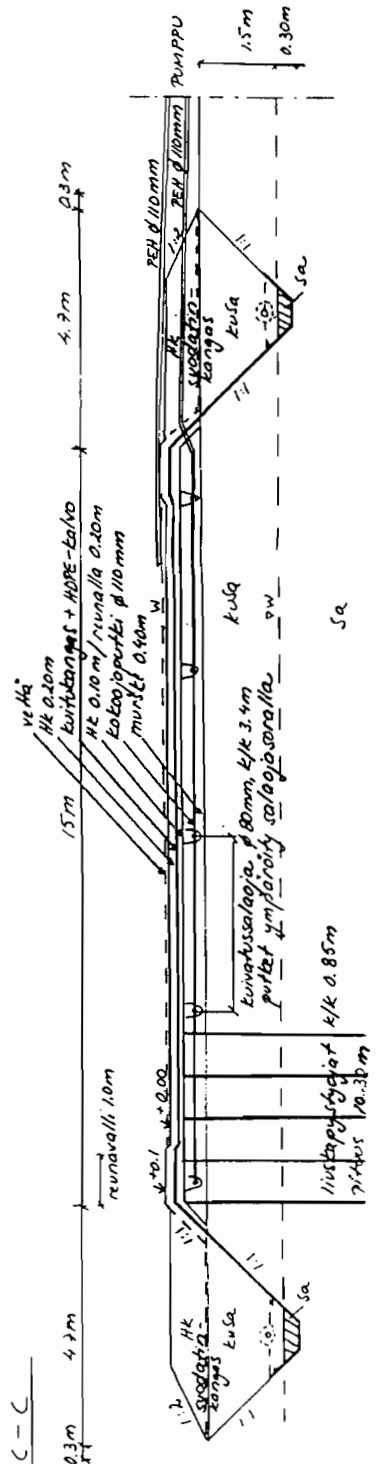
A-A VAKUUMIKONSOLIDOINTIKUDE - TORPPARINMÄKI, KITEUSPIIRUSTUKSET 1:150, NP 3.8.95



B-B



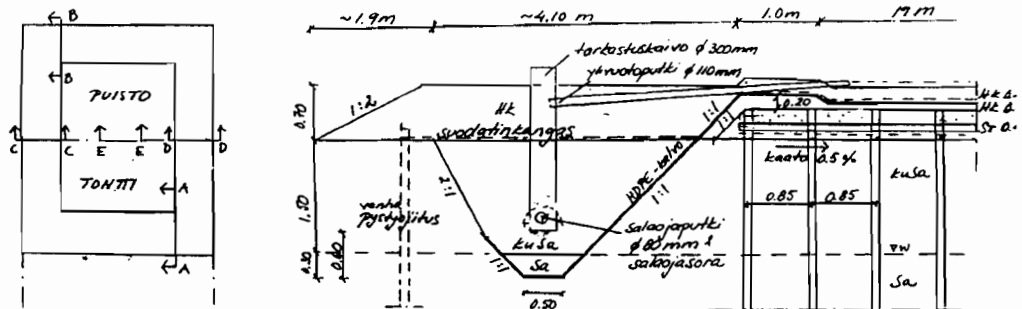
C-C



TKK 3.8.95
Pohjarak. ja maamek.
Vakuumikonsolidaatio
Torpparinmäki

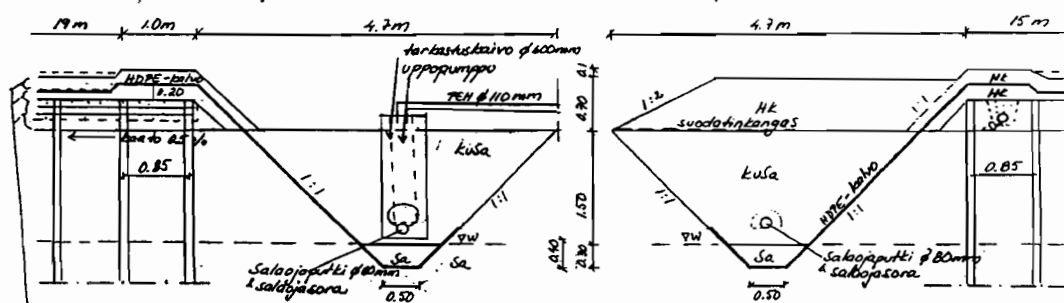
VAKUUMIKONSOLIDOINTITEKOE - TORPPARINMÄKI, detailipöytäsuunnitelat

A-A (1:100)

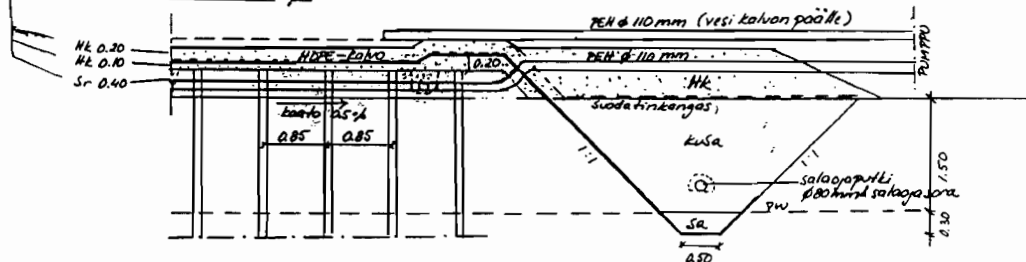


B-B (1:100)

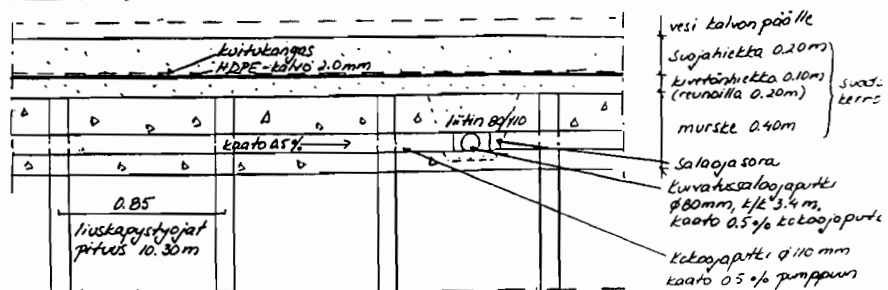
C-C (1:100)



D-D (1:100)



E-E (1:40)



TKK 3.8.95
Pohjarak. ja maamek.
Vakuumikonsolidaatio
Torpparinmäki

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

7.3.1996

1	Anttikoski, U.	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	Suomi	1973
2	Anttikoski, U.	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1973 *
3	Anttikoski, U.	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	Suomi	1974 *
4	Mäkinen, R.	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	Suomi	1974 *
5	Saarela, M.	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	Suomi	1974 *
6	Saarela, M.	Kitkapaalujen kantavuus	Suomi	1976
7	Petäjä, J.	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	Suomi	1977
8	Raudasmaa, P.	Metrotunnelien injektointi	Suomi	1977 *
9	Anttikoski, U.	Kalliotunnelien käyttö varastointiin	Suomi	1977 *
10	Tikkanen, H.	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	Suomi	1978
11	Arkima, O.	Kluuvien ruuhkeen jäädytys	Suomi	1978 *
12	Raudasmaa, P.	Puiset perustusrakenteet	Suomi	1979
13	Havukainen, J.	Voimalalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	Suomi	1979
14	Vähäaho, I.	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	Suomi	1979 *
15	Raudasmaa, P.	Pohjavesitarkkailu -80	Suomi	1980
16	Anttikoski, U.	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	Suomi	1979 *
17	Roinisto, J.	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	Suomi	1981
18	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	Suomi	1981 *
19	Roinisto, J.	Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys	Suomi	1981
20	Vuola, P.	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	Suomi	1981
21	Havukainen, J. & Korhonen, O.	Tonttialueiden maarakenteet	Suomi	1981
22	Havukainen, J.	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	Suomi	1981
23	Havukainen, J.	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	Suomi	1982
24	Latvala, A.	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	Suomi	1982
25	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Sulamäki, A.	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	Suomi	1982
26	Halkola, H.	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä	Suomi	1982 *
27	Paavola, P.	Kunnallisteknisten tunnelien louhintakustannus selvitys	Suomi	1982
28	Vähäaho, I.	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	Suomi	1982 *
29	Gulin, K.	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	Suomi	1982
30	Halkola, H.	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	Suomi	1982
31	Havukainen, J.	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	Suomi	1983
32	Havukainen, J.	Användning av stenkolaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	Svenska	1983
33	Havukainen, J.	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	English	1983
34	Salmelainen, J.	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	Suomi	1983
35	Havukainen, J.	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	Suomi	1983
36	Hytti, P.	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	Suomi	1984
37	Leinonen, J.	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	Suomi	1984
38	Pirinen, J.	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	Suomi	1984 *
39	Latvala, A.	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	Suomi	1984
40	Korpela, J. & Schuller, M.	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennusselvitys (Jäli-selvitys)	Suomi	1984
41	Lahtinen, E.-R.	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	Suomi	1985
42	Korpi, J.	In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi	Suomi	1985
43	Havukainen, J.	Esirakentamisen kehittäminen	Suomi	1985
44	Vähäaho, I.	Jäähdytysmenetelmän käyttö	Suomi	1987
45	Havukainen, J. & Hämäläinen, A. & Latvala, A.	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	Suomi	1987
46	Julkunen, A.	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	Suomi	1987
47	Hutri, K.-L.	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	Suomi	1988
48	Melander, K.	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	Suomi	1989
49	Leppänen, M.	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	Suomi	1989
50	Vähäaho, I. & Ryhänen, H.	Sulamiskondolidaation vaikutukset savessa	Suomi	1989
51	Vähäaho, I.	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	English	1989
52	Koskela, P.	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	Suomi	1989
53	Saari, M. & Korhonen, O.	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	Suomi	1990
54	Saari, M. & Volanen, N.	Ruoholahden koepaalutus	Suomi	1990
55	Yrjänä, J. & Korhonen, O.	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	Suomi	1991
56	Niinimäki, R. & Raudasmaa, P.	Viikinkmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	Suomi	1992

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET JATKUU

7.3.1996

57	Nieminen, J. & Johansson, E. & Holopainen, P.	Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	Suomi	1992
58	Ahola, J. & Viitala, R.	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	Suomi	1992
59	Ravea, T. & Korhonen, O.	Helsingin tulvapaidon rakentamisen edellytykset	Suomi	1992
60	Taipale, H. & Korhonen, O.	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	Suomi	1992
61	Karlstedt, P. & Halkola, H.	Ylijäämäsavien massastabilointi	Suomi	1993
62	Leiskallio, A. & Lehtonen, J.	Maankäytön geotekninen suunnittelu	Suomi	1993
63	Anttikoski, U. & Kumar, S. & Saarelainen, S.	Kalliokaivanto jätehuollossa Esiraportti	Suomi	1993
64	Rekonen, Rita & Halkola, Hannu	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	Suomi	1994
65	Ulmala, Ola & Halkola, Hannu	Puristinporakonekairaus	Suomi	1994
66	Havukainen, J.	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa Matkakertomus	Suomi	1995
67	Korkeakoski, P. & Lehtonen, J.	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	Suomi	1996
68	Puumalainen, N. & Havukainen, J.	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	Suomi	1996

*) painos loppuunmyyty

Hinnat: 1 kpl, 80 mk, 2-3 kpl 70 mk, 4-6 kpl 60 mk, 7- kpl 55 mk **

**) arvonlisävero 12 %