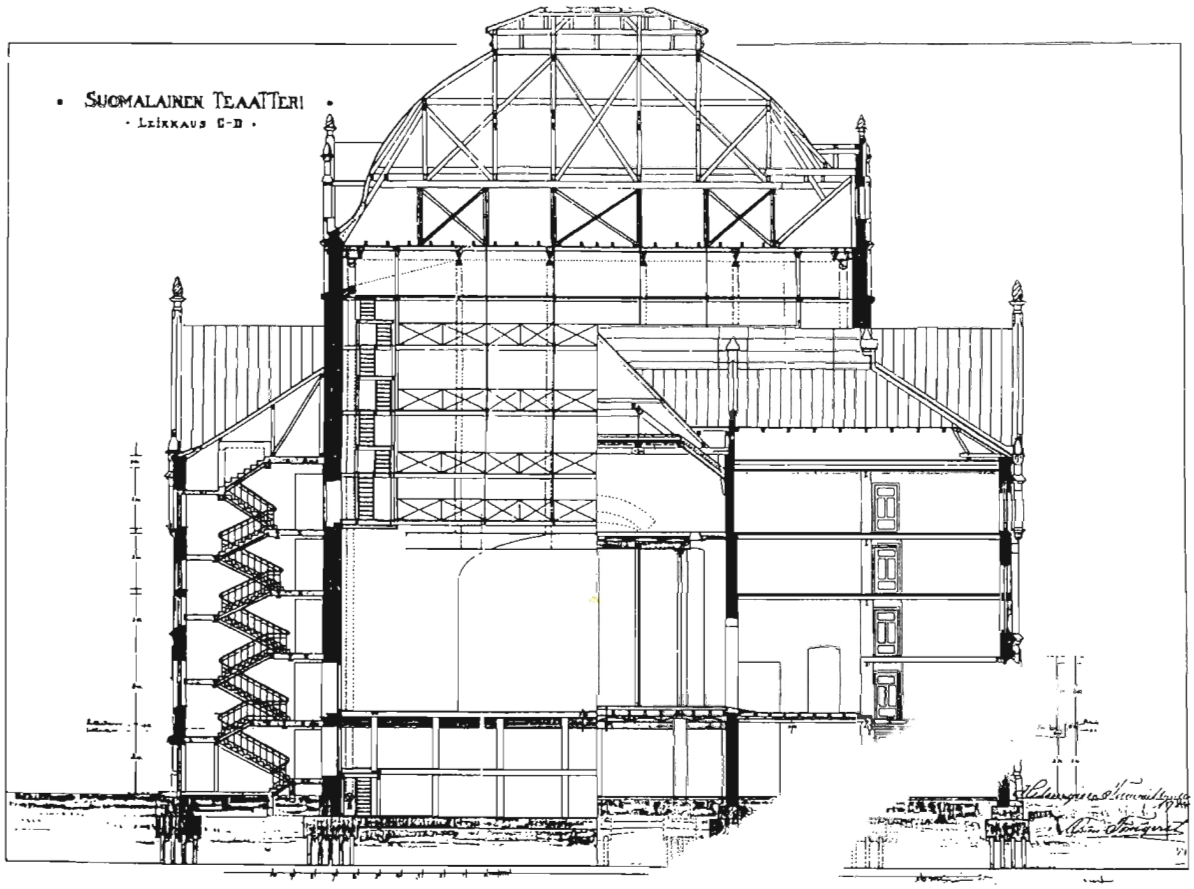
geotekniikka
KIINTEISTÖVIRASTO
HELSINGIN KAUPUNKI
Fastighetskontoret
Helsingfors stad

PUUPAALUJEN RAKENTEELLISEN KANTOKYVYN TARKASTAMINEN

Juha Pitkänen
Ilkka Vähäaho
Pekka Raudasmaa



Helsingin kaupungin
kiinteistöviraston
geoteknisen osaston
tiedote 79/1999

PUUPAALUJEN RAKENTEELLISEN KANTOKYVYN TARKASTAMINEN

Juha Pitkänen
Ilkka Vähäaho
Pekka Raudasmaa

TIIVISTELMÄ

Helsingin kantakaupungin alueella on noin 120 rakennusta, jotka on perustettu puupaaluilla. Näistä 17 sijaitsee liikekeskustassa. Turussa tiedettyjä puupaaluperustusten korjauskohteita on noin 30 kappaletta, minkä arvellaan olevan vain noin viidesosa todellisesta kiireellisestä korjaustarpeesta. Kaikkiaan Turun keskusta-alueella on noin 400 rakennusta puisilla perustuksilla.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa Suomen olosuhteisiin soveltuvia puupaaluperustusten tutkimusmenetelmiä, selvittää niiden kehittämistarpeita sekä saada lisäselvyyttä puupaalujen lahon etenemisen nopeuteen ja lahoamismekanismeihin orsi- tai pohjavedenpinnan alapuolella. Samassa yhteydessä tavoitteena oli esittää kotimainen puolueeton tutkimusjärjestelmä, jonka perusteella puupaaluperustusten kunto ja kunnostustarve on mahdollista arvioida. Tutkimusjärjestelmä tulisi toimimaan myös kustannusoptimoitujen korjauspäätösten perustana.

Eri tutkimusmenetelmiä ja puupaalujen lahoamisen aiheuttajia etsittiin kotimaisen ja ulkomaisen kirjallisuuden avulla. Tutkimukseen kuului myös neljä koekohdetta: Suomen Kansallisteatteri, Helsingin rautatieasema, Lauttasaaren ala-aste ja Sänkiniityn kohde Kehä III:lla. Koekohteista kolme oli rakennusten puupaaluperustuksia ja yksi tierakenteessa oleva pengerlaattaperustus. Tutkimuksen yhteydessä tutustuttiin myös Hollantilaiseen tapaan tarkastaa puupaaluperustusten kunto.

Koekohteista otettiin puu-, orsivesi- ja maanäytteitä, jotka tutkittiin TTKK:n geotekniikan laboratoriossa. Puupaalunäytteistä määritettiin puun puristuslujuus, vesipitoisuus ja tiheys, joiden perusteella puupaalujen kunto voitiin arvioida. Lahoisuustutkimukset ja mikrobiologiset analyysit tehtiin TTKK:n Vesi- ja ympäristötekniikan laboratoriossa.

Nykyisin puupaaluperustusten todellinen kunto saadaan selville vain koekuopista otettavien paalunäytteiden perusteella. Ainettarikkomattomat menetelmät eivät vielä ole tarpeeksi tarkkoja puupaalujen lahoisuuden määrittämiseen. Myöskään menetelmiä lahon etenemisnopeuden tarkkaan määrittämiseen ei ole olemassa, koska lahoamiseen vaikuttavien monien eri tekijöiden vaikutuksia ei tunneta. Ainoa keino tutkia lahoamisen etenemistä on suorittaa koekuoppatutkimuksia määrävälein. Tällöin puupaaluperustusten ympäristöolosuhteet on pyrittävä pitämään mahdollisimman samankaltaisina tai parannettava niitä esimerkiksi nostamalla orsi- tai pohjavedenpinnan tasoa.

Puupaaluperustusten kunnon tarkastaminen ja korjausmenetelmien valinta on Suomessa tällä hetkellä varsin kirjavaa, eikä viranomaisohjeita tai -suosituksia ole olemassa. Virheet tutkimuksissa ja niiden perusteella tehdyt hätäiset johtopäätökset voivat johtaa kalliisiin korjaustoimenpiteisiin, vaikka niihin ei vielä olisi tarvetta. Tässä tutkimuksessa esitetyssä puupaalujen tutkimusjärjestelmässä (luku 11, kuva *11.1*) pyritään ohjeistamaan puupaaluperustusten kunnon tarkastaminen ja antamaan paremmat valmiudet jatkotoimenpiteistä päättämiseen.

ABSTRACT

There are about 120 buildings founded on wooden piles in Helsinki. In business centre there are 17 buildings on timber piling. In Turku there are approximately 30 known timber pile foundations which must be repaired. It has been estimated that those 30 foundations are only one-fifth of the immediate reparation need in Turku. In all there are about 400 buildings in Turku founded on wooden piles.

The purpose of this study was to find out proper inspection methods for the wooden foundations in Finland and find out the mechanisms and speed of the so called biocorrosion that takes place in wood under water. One of the main interests was to develop a Finnish impartial investigation system for wooden piles that could be basis for decision-making of foundation strengthening. Also a Dutch system of investigation for wooden foundations is introduced in this study.

The existing inspection methods and knowledge of decay in wooden piles were studied from domestic and foreign literature. The study consisted also of four real targets on wooden pile foundations in Helsinki. Three of them were building foundations: National Theatre of Finland, Helsinki railway station and an elementary school in suburb of Helsinki and one of them was an embankment plate made of concrete which was founded on wooden piles on Ring road III.

Several test pits were made and numerous samples of wood, groundwater and soil were examined in Geotechnical and Water and Environmental laboratories of Tampere University of Technology. Examination consisted of decay analysis of wood, structural testing of wood samples and microbiological analyzes.

The real condition of wooden pile foundations is possible to find out only by taking wood samples from test pits. The nondestructive methods still are not reliable enough for estimation of the rate of decay in wooden piles. There are several unknown factors that can influence the decay process in wooden piles and it is very difficult to define the exact speed of the decay. The only way to examinate the speed of decay in wooden piles is to make test pits periodically. The circumstances near pileheads must stay at least similar between the test periods. Improving of the circumstances for example by raising the level of groundwater is advisable.

There are no standards about investigations of wooden foundations in Finland. Mistakes in investigations and miscalculations based on the incorrect data may lead to expensive renovations of foundations which could still be functional and retainable. The investigation system introduced in this study (chapter 11, picture *11.1*) trys to give some tools for proper estimations of wooden piles and for economical reconstruction decisions.

Alkusanat

Tämä tutkimus perustuu DI Juha Pitkäsen diplomityöhön, joka on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun Geotekniikan laboratoriossa. Tutkimuksen rahoittajina toimivat Helsingin kaupungin kiinteistöviraston Geotekninen osasto ja Tielaitoksen Uudenmaan tiepiiri. Tutkimukseen osallistuivat panoksellaan myös Oy VR-Rata Ab ja Suomen Kansallisteatteri. Koekohteina tutkimuksessa olivat Suomen Kansallisteatterin lisäksi Helsingin rautatieasema, Lauttasaaren ala-aste ja Sänkiniityn pengerlaatan puupaalutus Kehä III:lla.

Tutkimuksen ohjausryhmän muodostivat professori Jorma Hartikainen TTKK:n Geotekniikan laboratoriosta, osastopäällikkö Ilkka Vähäaho ja geologi Pekka Raudasmaa Helsingin kaupungin Geotekniseltä osastolta, DI Mikko Smura ja DI Petter Sandin Tielaitokselta, DI Jouko Suomalainen ja DI Juha Heinonen Oy VR-Rata Ab:stä sekä professori Tuula Tuhkanen TTKK:n vesi- ja ympäristötekniikan laitokselta.

Suomen IP-Tekniikka Oy:n toimialajohtaja Teemu Rahikainen on konsultoinut Suomen Kansallisteatterin tutkimuksissa ja näytteiden ottamisessa. Näyttämöpäällikkö Rauno Alakomi on ollut yhdyshenkilönä Suomen Kansallisteatterin koekohteessa. Parhaimmat kiitokset kaikille tutkimukseen osallistuneille.

Helsingissä marraskuun 11. päivänä 1999

Ilkka Vähäaho

1. JOHDANTO 7

2. PUUPAALUPERUSTUKSET 9

3. PUUPAALUJEN LAHOAMINEN 12

3.1 VEDENPINNAN VAIKUTUS 12
3.2 BIOLOGISET TEKIJÄT 16
3.2.1 BAKTEERIT 17
3.2.2 SIENET 21
3.2.3 YMPÄRISTÖTEKIJÄT 24
3.3 LAHOAMISVAURIOT 27

4. PUUPAALUJEN KUNNON SELVITTÄMINEN 29

4.1 LÄHTÖTIETOJEN HANKINTA 29
4.2 MAASTOTUTKIMUKSET 29
4.2.1 VAAITUKSET 29
4.2.2 POHJATUTKIMUKSET 30
4.2.3 KOEKUOPAT 31
4.3 LABORATORIOTUTKIMUKSET 36
4.4 AINETTARIKKOMATTOMAT MENETELMÄT 40

5. LAHONNEEN PUUMATERIAALIN LUJUUDEN ARVIOIMINEN 42

5.1 PURISTUSLUJUUS JA LAHOISUUS 42
5.2 TIHEYDEN JA VESIPITOISUUDEN VAIKUTUS 44

6. PUUPAALUN RAKENTEELLINEN JA GEOTEKNINEN KANTAVUUS 46

6.1 TERVEEN PAALUN KANTOKYKY 46
6.2 OSITTAIN LAHONNEEN PAALUN KANTOKYKY 50
6.3 VANHOJEN PUUPAALUJEN PITUUDEN MÄÄRITTÄMINEN 52

7. PUUPAALUJEN JÄLJELLÄ OLEVAN KÄYTTÖIÄN ARVIOINTI 55

8. LAHOAMISEN ESTÄMISMENETELMÄT 57

8.1 POHJAVEDENPINNAN KORKEUDEN SÄÄTELY 57
8.2 KYLLÄSTYSAINEET 60
8.2.1 WOLMANIT TS –PYLVÄSKÄÄRE 61
8.2.2 COBRA –MENETELMÄ 62
8.2.3 KYLLÄSTYSPATRUUNOILLA SUOJAAMINEN 63
8.2.4 PAIKALLISKYLLÄSTYSAINEIDEN KÄYTTÖ PAALUTUKSEN SUOJAAMISESSA 64
8.3 STERILOINTI 64
8.3.1 JERBOR –MENETELMÄ 65
8.4 INJEKTOINTI 66
8.4.1 TACSS -INJEKTOINTI 67
8.5 ORGAANINEN KAASU 68
8.6 LAHOAMISENESTOMENETELMÄN VALINTA 69

9. HOLLANTILAINEN PUUPAALUJEN TUTKIMUSJÄRJESTELMÄ 71

9.1 TUTKIMUSTEN KÄYNNISTÄMINEN 71
9.2 LAHOISUUSASTEEN MÄÄRITTÄMINEN 74
9.3 PUUPERUSTUSTEN KUNNON LUOKITTELU 75
9.4 HOLLANTILAINEN TUTKIMUSLAITTEISTO 76
9.5 VAAHTOBETONIN KÄYTTÖ PERUSTAMISTASON ALENTAMISESSA 77

10. KOEKOHTEITA 78

10.1 SUOMEN KANSALLISTEATTERI 78
10.1.1 TEHDYT TUTKIMUKSET 79
10.1.2 TUTKIMUSTULOKSIA 81
10.1.3 JOHTOPÄÄTÖKSET 83
10.1.4 JATKOTOIMENPITEET 84
10.2 HELSINGIN RAUTATIEASEMA 90
10.2.1 TEHDYT TUTKIMUKSET 91
10.2.2 TUTKIMUSTULOKSIA 91
10.2.3 JOHTOPÄÄTÖKSET 93
10.2.4 JATKOTOIMENPITEET 94
10.3 LAUTTASAAREN ALA-ASTE 95
10.3.1 TEHDYT TUTKIMUKSET 95
10.3.2 TUTKIMUSTULOKSIA 96
10.3.3 JOHTOPÄÄTÖKSET 98
10.3.4 JATKOTOIMENPITEET 99
10.4 SÄNKINIITTY, KEHÄ III 99
10.4.1 TEHDYT TUTKIMUKSET 100
10.4.2 TUTKIMUSTULOKSIA 101
10.4.3 JOHTOPÄÄTÖKSET 103

11. PUUPAALUJEN TUTKIMUSJÄRJESTELMÄ 106

11.1 TUTKIMUSPÄÄTÖS 106
11.2 LÄHTÖTIETOJEN HANKINTA JA POHJATUTKIMUSTEN OHJELMOINTI 106
11.3 KOEKUOPAT JA NÄYTTEENOTTO 107
11.4 NÄYTTEIDEN TUTKIMINEN 108
11.5 TULOSTEN ANALYSOINTI 108
11.6 KORJAAMISESTA PÄÄTTÄMINEN 109

12. JOHTOPÄÄTÖKSET 111

KIRJALLISUUSLUETTELO 115

LIITTEET

1. Johdanto

Suomessa on yhä runsaasti puupaaluilla perustettuja rakennuksia, joista osa on myös kulttuurihistoriallisesti arvokkaita. Pelkästään Helsingin liikekeskustassa on 17 puupaaluilla perustettua rakennusta kooltaan yhteensä noin 1,2 miljoonaa kuutiometriä ja koko kantakaupungissa noin 120 rakennusta kooltaan yhteensä 2...3 miljoonaa kuutiometriä /34/. Turun keskusta-alueella on kaikkiaan noin 400 rakennusta puisilla perustuksilla.

Helsingissä yksistään päärautatieaseman ja kansallisteatterin perustusten korjauskustannuksiksi on arvioitu 200 miljoonaa markkaa, jos niiden puupaalut pääsisivät lahoamaan ja ne jouduttaisiin paaluttamaan uudelleen. Turussa on arvioitu tiedettyjen noin kolmenkymmenen kohteen perustusten korjauskustannuksiksi runsaat 200 miljoonaa markkaa. Turussa yksittäisten kohteiden kustannusarviot vaihtelevat välillä 1...15 miljoonaa markkaa, mikä vastaa 1000...4000 mk/as-m^2 /33/. Näiden kolmenkymmenen kohteen arvellaan olevan vain noin viidesosan todellisesta kiireellisestä korjaustarpeesta. Tältä pohjalta arvioituna on selvää, että vanhojen perustusten säilyttämistä kannattaa tutkia ja harkita.

Puupaalujen kuntoa voidaan luotettavasti arvioida vain koekuoppien avulla ottamalla paaluista näytteitä silmämääräisiä ja laboratoriotutkimuksia varten. Yleensä näytteitä tarvitaan useista eri kohdista, koska vaurioitumistaso voi olla hyvinkin erilainen eripuolilla kohdetta. Tällöin tarvittavien koekuoppien määrä kasvaa suureksi. Ainetta rikkomattomat menetelmät taas soveltuvat vielä toistaiseksi huonosti puupaalujen kunnon arviointiin, koska ne on kehitetty lähinnä vielä elävien puiden lahon paikallistamista varten /15/.

Jo alkanutta lahoamista on vaikea pysäyttää, mutta lahoamisen hidastaminen on mahdollista jälkisuojausaineilla ja kemikaaleilla. Tällöin käsittely joudutaan yleensä uusimaan tietyn ajan jälkeen. Mutta mikäli vanhojen perustusten käyttöaikaa voidaan joillain toimenpiteillä riittävästi jatkaa, se tulee usein huomattavasti edullisemmaksi kuin työläs perustusten korjaaminen tai uusiminen. Useimmiten perustusten uusimisen

yhteydessä joudutaan jo tapahtuneiden painumien vuoksi lisäksi korjaamaan myös yläpuolisia rakenteita, mikä nostaa korjauskustannuksia huomattavasti. Siksi riittävän ajoissa suoritetut tutkimukset ja niiden perusteella tehtävät toimenpiteet ovat ensiarvoisen tärkeitä. Valitettavasti yleensä toimenpiteisiin ryhdytään vasta, kun peruuttamaton vahinko on jo tapahtunut.

Tällä hetkellä ei ole olemassa yleistä ohjeistoa, jonka mukaan puuperustusten kunnon arviointia voitaisiin tehdä, joten käytäntö rakenteiden tutkimuksissa ja korjauksissa on muodostunut hyvin kirjavaksi. Osa laboratoriotutkimuksista joudutaan suorittamaan Ruotsissa, jossa käytetyt menetelmät on patentoitu. Tästä johtuen on olemassa akuutti tarve kehittää Suomen olosuhteisiin soveltuva puolueeton ja luotettava tutkimus- ja arviointijärjestelmä. Tämän järjestelmän myötä olisi mahdollista ohjeistaa puupaaluperustusten kunnon selvittäminen, lahoisuusasteen tutkiminen ja tarvittavien kunnostustoimenpiteiden arviointi. Järjestelmä mahdollistaisi samalla turvallisten ja kustannusoptimoitujen perustusten korjauspäätösten tekemisen.

Rakennuksen omistajan näkökulmasta puuperustusten korjauspäätöksen tekeminen ja korjaus- tai säilytysmenetelmän valitseminen helpottuisi. Samalla mahdollisista riittämättömistä tutkimuksista tehtävät hätäiset johtopäätökset ja vääristä korjausmenetelmistä aiheutuvat haitat ja turhat kustannukset saataisiin eliminoitua.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on saada nykyistä varmemmin selville olemassa olevan puuperustuksen varmuus, syy mahdolliselle lahoamiselle sekä ennusteet lahoamisen jatkumisesta ja perustuksen pitkäaikaiskestävyydestä. Samalla sen tarkoituksena on toimia edellä mainitun tutkimusjärjestelmän esiselvityksenä. Lisäksi on olemassa tarve kehittää toimivia kunnostus- ja lahoamisenestomenetelmiä.

Tutkimuksessa kerätään jo olemassaoleva tieto puupaalujen lahoamisprosessista kotimaisista ja kansainvälisistä julkaisuista. Lisäksi kerätään aineistoa jo suoritetuista kenttä- ja laboratoriotutkimuksista, joista pyritään saamaan vertailutietoja lahoamisen kehittymisestä. Tutkimukseen sisältyy myös koekohteita.

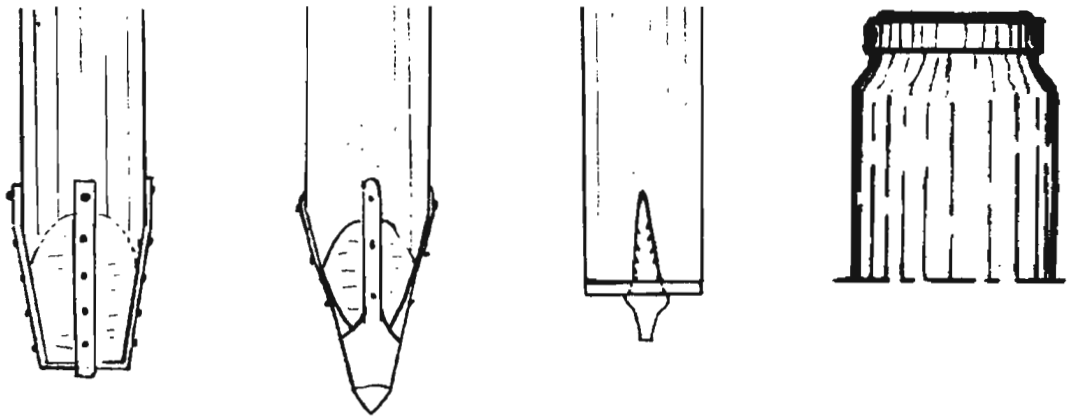
2. Puupaaluperustukset

Varhaisimpien Hollannista löydettyjen yksinkertaisten puupaaluperustusten iäksi on arvioitu noin 1000 vuotta. Kulttuurihistoriallisesti arvokkaita rakennuksia on Amsterdamissa perustettu leppäpaaluilla jo 1200-luvulla /36/. Venetsian vanhimmat paalutetut rakennukset ovat 1200-luvulta, kun taas Pietaria ryhdyttiin rakentamaan nykyiselle paikalleen vuonna 1712. Venetsian ja Pietarin vanhat kaupunginosat on perustettu tammipaaluilla /11/.

Suomessa puupaaluja on käytetty talonrakennuksessa Turussa 1960-luvun loppuun saakka ja Helsingin keskusta-alueella 1950 luvun puoliväliin asti (*kuva 2.1*). Tosin betonipaalut alkoivat syrjäyttää puun jo 1920-luvulta lähtien /9/. Tienrakennuksessa puupaaluja on käytetty yleisesti 1970-luvulle saakka ja käytetään yhä pienessä määrin /15/. Suotuisissa olosuhteissa puupaalut säilyvät vuosisatoja ja on tavattu jopa yli kolmesataa vuotta vanhoja yhä hyväkuntoisia paaluja /9/. Vaikka puupaaluja ei enää käytetä rakennusten perustamiseen, on niille perustettujen talojen määrä kuitenkin edelleen huomattava muun muassa Turussa ja Helsingissä.

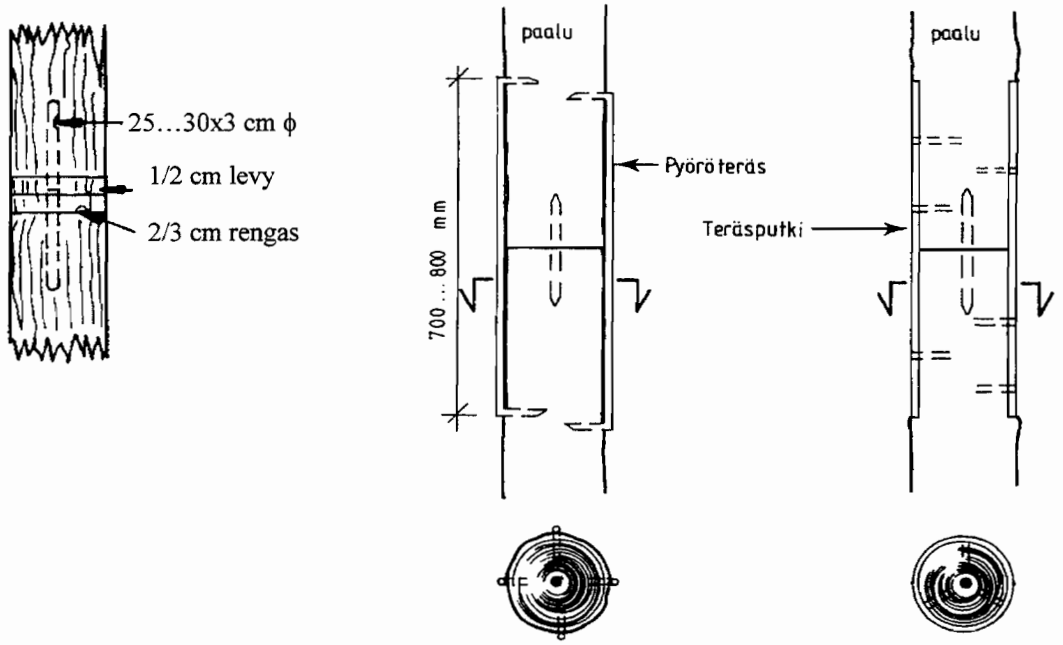
Kuva 2.1. Puupaaluilla perustetut rakennukset Helsingin keskusta-alueella /10/.

Puupaaluina on Suomessa käytetty pääasiassa suoria mäntyjä ja kuusia, jotka säilyvyyssyistä on lyöty tuoreina maahan. Paalut on kuorittu ennen maahanlyöntiä ja ne on lyöty maahan teroitettu latva edellä. Usein paalujen kärjessä on käytetty teräsvahviketta, elleivät olosuhteet ole sallineet paalutusta ilman sitä. Paalun yläpää suojattiin lyönnin aikana rauta- tai teräsrenkaalla pään hajoamisen estämiseksi (*kuva 2.2*). Paaluille on yleisesti sallittu kärkikantavuutta 5 MN/m^2 kovaan pohjaan lyötynä /24/. Sallittuja paalukuormia on vähennetty johtuen mahdollisista liitoksista ja pitkien paalujen nurjahdusvaarasta. Tällöin vuosisadan alussa on kriteerinä yleisesti käytetty paalun halkaisijan suhdetta sen pituuteen. Käytettäessä niin kutsuttuja *hankauspaaluja*, jotka nykyisin tunnetaan paremmin kitkapaaluina, sallittu paalukuorma määritettiin erityisillä laskentakaavoilla, jotka perustuivat tehtyihin koepaalutuksiin.



Kuva 2.2. Puupaaluissa käytettyjä paalukärkiä ja teräsrenkaalla suojattu paalun yläpää /24, 18/.

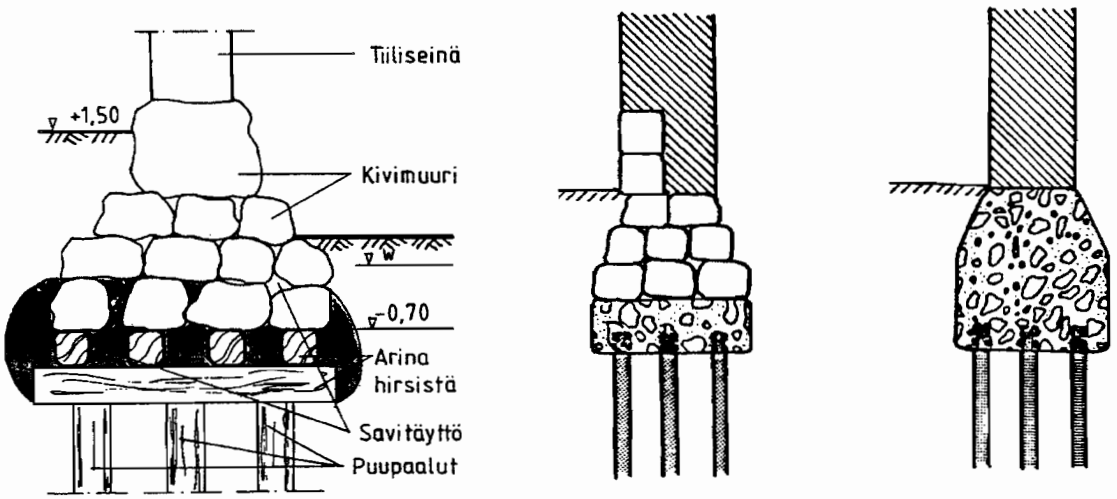
Tarvittaessa paaluja on jatkettu, jolloin tavallisimmat liitokset ovat olleet tappiliitos, hollihakaliitos ja Mannesmannin putkiliitos (*kuva 2.3*). Puupaalut on lyöty maahan yleensä miesvoimalla toimivalla paaluraanalla ja myöhemmin myös höyryvoimalla toimivalla raanalla. Tällöin riittävän paalutussyvyyden saavuttaminen ja kovan pohjan löytymisen varmistaminen on ollut vaikeaa ja riittävää paalun kantavuutta ei ehkä ole voitu saavuttaa. Vastaavasti on löydetty myös niin kutsuttuja uppopaaluja, jotka on lyöty niin syvään etteivät ne ulotu paaluanturaan asti.



Kuva 2.3. Yleisimmät puupaalujen jatkamistavat. Vasemmalta tappiliitos, hollihakaliitos ja Mannesmannin putkiliitos /31, 15/.

Paalurivien päälle on yleensä tehty hirsiarina. Paalujen päihin on ensin lyöty poikittaiset niskahirret ja näiden varaan hirsipeti tai lankutus. Tämän arinan päälle tehtiin kivilatomus, jonka varaan rakennuksen kivijalka rakennettiin. Arinan säilyminen riittävässä kosteudessa on pyritty varmistamaan ympäröimällä se tiiviillä savikerroksella (*kuva 2.4*). Myöhemmin betonin käytön yleistyttyä rakentamisessa paalujen päät upotettiin osittain anturan sisään.

Puupaalut on pyritty aina sijoittamaan siten, että niiden katkaisutaso on ollut pohja- tai orsiveden alapuolella. Ympäristön rakentamisesta tai meren rannikkoalueilla maan noususta johtuvista syistä pohjaveden pinnan korkeus on saattanut alentua huomattavastikin, jolloin paalujen yläpäät tai puurakenteiset arinat ovat jääneet hapen vaikutuksen alaisiksi ja alkaneet lahota. Samoin lisääntyvä kellaritilojen lämmittäminen on saattanut muuttaa puupaalujen alkuperäisiä ympäristöolosuhteita. Lisäksi maaperän ja pohjaveden saastuminen esimerkiksi vuotavien viemäriputkien takia on saattanut lisätä ravinnepitoisuutta lahottajasienille ja –bakteereille sopivaksi.



Kuva 2.4. Tyypillisiä puupaaluperustuksia /15, 24/.

3. Puupaalujen lahoaminen

3.1 Vedenpinnan vaikutus

Puulla on melko hyvä vastustuskyky monenlaisia sekä orgaanisia että epäorgaanisia vaikutuksia vastaan, jos sitä jatkuvasti pidetään orsi- tai pohjavedenpinnan alapuolella. Puhtaan veden alla sienet eivät juurikaan pääse vahingoittamaan puuta /23/. Poikkeuksena ovat voimakkaat virtauspaikat, kuten siltojen arkkuperustukset, joissa on havaittu hirsien lahoamista vaikka perustukset ovatkin kokonaisuudessaan veden alla. Esimerkiksi Joensuussa Pielisjoen arkkusillassa, joka on aina ollut vedenpinnan alapuolella, on havaittu hirsien lahoamista. Tämä ilmeisesti johtuu siitä, että virtaus lisää veden happipitoisuutta ja katkolahottajien on todettu toimivan tehokkaammin virtaavassa kuin seisovassa vedessä /9/.

Mikäli vedenpinta laskee ja paalujen päät joutuvat kosketuksiin ilman hapen kanssa, joutuvat paalut nopeasti mikro-organismien hyökkäyksen kohteeksi. Sienet vähentävät puun lujuutta suhteellisen nopeasti. Erittäin epäedullisissa olosuhteissa sienet saattavat tuhota paalut yhdessä vuodessa. Muutamissa paikoissa paalut ovat vedenpinnan

alenemisesta huolimatta kestäneet vuosia /23/. Tämä riippuu paljolti ympäristöolosuhteista, varsinkin maan vedenläpäisykyvystä ja kapillaarisuudesta.

Paalut voivat säilyä turvassa mikro-organismeilta hienorakeisen maaperän sisällä, vaikka pohja- tai orsivedenpinta laskisikin paalujen katkaisukorkeuden alapuolelle /34/. Tällöin veden kapillaarinen nousu riittää pitämään paaluja ympäröivän maan riittävän kosteana. Veden kapillaarinen nousu puussa ei yleensä riitä takaamaan puun kosteuden pysymistä kyllästyspisteessä vedenpinnan yläpuolella, vaikka onkin luokkaa 150…200 mm /24/.

Vaikka vedenpinta olisikin reilusti puuperustusten yläpinnan yläpuolella, ei paalujen säilyminen silti ole taattua. Lahonaiheuttajille suotuisissa olosuhteissa puu voi lahota myös veden alla 5…10 vuodessa /14/.

Mikäli puhtaan orsi- tai pohjaveden pinta on vähintään yli puoli metriä paaluperustuksen yläpuolella, ei paalujen merkittävää lahoamista ole yleensä odotettavissa. Vedenpintaa on kuitenkin seurattava jatkuvasti.

Vedenpinnan ollessa paalujen yläpinnan tasolla on perustusten tila kriittinen ja perustusten säilymisen varmistamiseksi on ryhdyttävä toimenpiteisiin. Tiiviissä koheesiomaassa perustukset saattavat veden kapillaarisen nousun takia säilyä pitkiäkin aikoja, mutta varmuutta säilymisestä tällaisissa olosuhteissa ei ole (*taulukko 3.1*).

Vedenpinnan tason vaihtelu paalujen katkaisutason molemmin puolin pienentää lahoamisvaaraa verrattuna paaluihin, joiden päät ovat jatkuvasti vedenpinnan yläpuolella (*taulukko 3.2*). Tällöin kuivien väliaikojen tulee olla kyllin lyhyitä riittävän kosteuden säilymiseksi.

Mikäli paalujen päät ovat jatkuvasti pohja- tai orsiveden yläpuolella on perustusten tila kriittinen ja suojaaviin toimenpiteisiin on ryhdyttävä välittömästi. Hyväkuntoisiinkin paaluihin mikro-organismit tarttuvat lyhyessä ajassa ja vaikka perustukset saataisiin takaisin vedenpinnan alapuolelle, vedenpinnan alentuessa mikro-organismit voivat jatkaa toimintaansa välittömästi.

Taulukko 3.1. Vedenpinnan tason vaikutus puuperustusten säilymiseen ja suositeltavat toimenpiteet /15/.

ORSIVEDEN / POHJAVEDEN PINNAN TASO	PAALUJEN TILA SÄILYMISEN SUHTEEN	TOIMENPITEET
Yli 1,0 m puuperustusten yläpinnan yläpuolella	Hyvä	Yleensä ei toimenpiteitä, mahdollisesti vedenpinnan tason seuranta.
0,5 - 1,0 m puuperustusten yläpuolella	Kohtalainen	Vedenpinnan tason ja mahdollisesti paalujen kunnon seuranta.
Likimain puuperustusten yläpinnan tasolla	Kriittinen	Vuotojen tukkiminen, lisäveden syöttö, paalujen kunnon ja vedenpinnan tason seuranta.
Puuperustusten yläpinnan alapuolella	Erittäin kriittinen	Paalujen kuntoarvio, mikro-organismien hävitys, vedenpinnan nosto.

Taulukko 3.2. Vedenpinnan tason vaihtelun vaikutus paalujen lahoamisen alkamiseen /15/.

PAALUJEN VEDENPINNAN YLÄPUOLELLA OLOAIKA	PAALUJEN VEDELLÄ KYLLÄSTYMINEN[1)]	SIENTEN VAIKUTUS	VAIKUTUS PAALUIHIN[2)]
Ei vedenpinnan yläpuolella	Täydellinen	Ei alkanut	Ei mitään
Hyvin lyhyt esim. vuorovesi	Täydellinen	Ei alkanut	Ei mitään
Viikoista	Melkein täydellinen	Vähäinen	Ei mitään
...	vähän pienentynyt	Alkaa	Ei mitään
Kuukausiin	Selvästi pienentynyt	Huomattava	Lahoamisen alkaminen
Yli puoli vuotta	Selvästi pienentynyt	Runsas	Lahoaminen

1) Riippuu maalajin ominaisuuksista.
2) Vaikutus eurooppalaisiin puulajeihin, joilla on pieni tai kohtalainen luonnollinen lahon vastustuskyky.

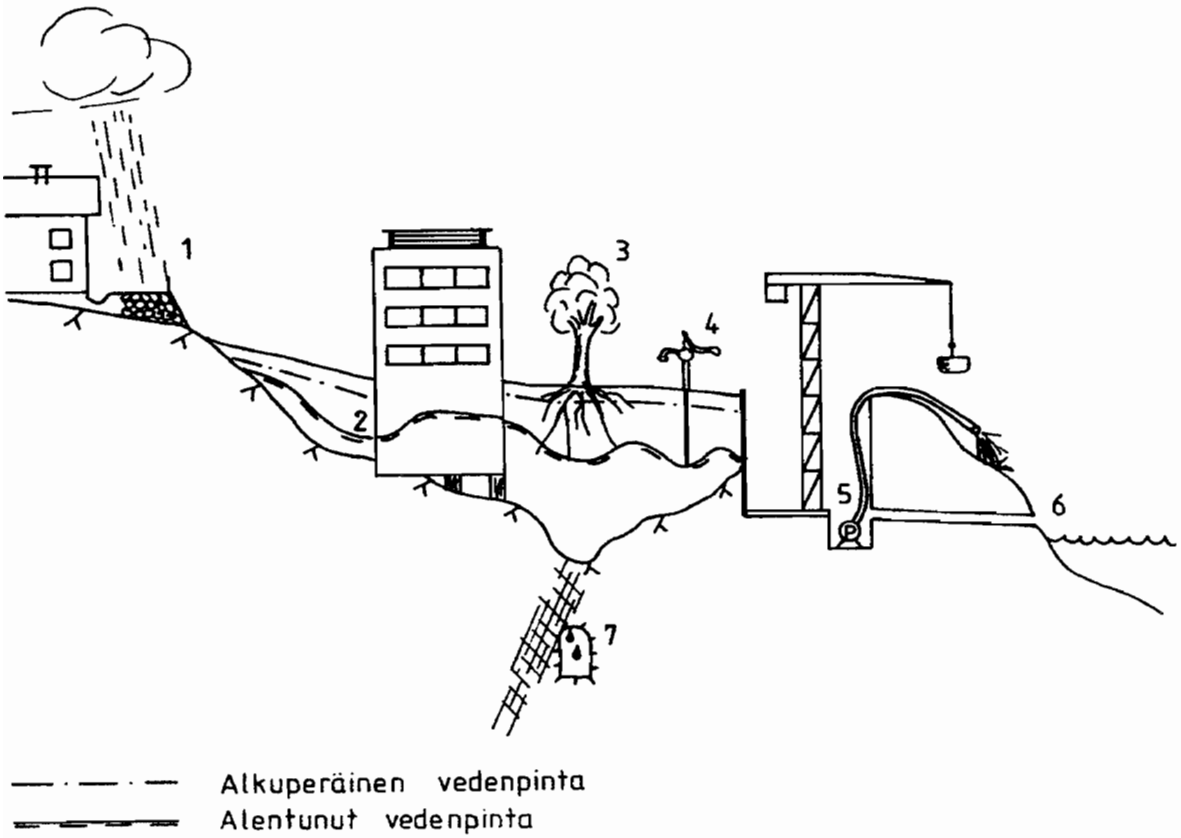
Havaintojen mukaan lahoaminen alkaa 1...2 kuukauden kuluttua siitä, kun paalut ovat jääneet kuiville. Tällöin vedenpinnan alennuksella esimerkiksi peruskaivannossa saattaa olla huomattava vaikutus läheisten puuperustusten kunnon heikentymiseen.

Pohjarakennusohjeiden mukaan pohjavedenpinnan korkeus tulee päätellä vertaamalla havaintoja vastaavissa olosuhteissa tehtyihin pitkäaikaishavaintoihin sekä ottamalla huomioon pohjaveden vuotuiset korkeusvaihtelut ja sadanta havaintojakson aikana. Mitoittavan vedenpinnan osavarmuuskerroin on 1,6, kun havaintojakso on lyhytaikainen, 1,4, kun havaintojakso on vähintään vuoden pituinen ja 1,2, kun havaintojakso on useamman vuoden pituinen /30/.

Vedenpinnan alenemiseen vaikuttavat sekä ihmisen toiminta, että luonnossa itsessään tapahtuvat muutokset. Luonnossa tapahtuvista muutoksista pohjaveden tasoa alentaa muun muassa maan kohoaminen Itämeren ja Pohjanlahden rannikoilla. Ihmisen toiminnasta johtuvat tekijät voidaan jakaa maahan imeytyvän vesimäärän vähenemiseen ja pohjavesivarojen vähenemiseen /15/.

Muun muassa päällystetyt kadut ja ympäristön sadevesiviemäröinti sekä putkikanavien kaivannot ja ympäristötäytöt, kuten myös talojen ja piharakenteiden kuivatus, vähentävät vesien pääsyä maaperään ja johtavat niitä pois (*kuva 3.1*). Kasvillisuuden vaikutus on myös huomioitava varsinkin päällystetyillä alueilla. Esimerkiksi suuret puut ja istutukset haihduttavat huomattavia määriä vettä. Teollisuus saattaa käyttää paikallisesti suuria määriä pohjavettä ja vettä otetaan myös talousvedeksi.

Syvien perustusten rakentaminen vaikuttaa pohja- ja orsiveden korkeuksiin, jos kaivannot pidetään pumppaamalla kuivina. Tällöin saatetaan aiheuttaa laajallakin alueella vahinkoa esimerkiksi paaluperustuksille. Suuret kaivantotyöt voivat vaikuttaa myös koko alueen pohjavedenpinnan tasoon alentaen sitä pysyvästi. Suuret perustustyöt tulisikin tehdä patoseiniä hyväksikäyttäen, jolloin pohjaveden korkeuden muutoksia ympäristössä voidaan rajoittaa. Myös tunnelien ja muiden kalliotilojen rakentaminen saattaa aiheuttaa suuriakin pohjavedenpinnan muutoksia.



1. Päällystetyt kadut, piha-alueet ja niiden kuivatus estävät sade- ja vajovesien pääsyn maaperään.
2. Putkikanavat, ympärystäytöt ja veden pumppaaminen kellareista alentavat orsiveden pintaa.
3. Kasvillisuuden haihduttava vaikutus voi olla huomattava.
4. Pohjaveden ottaminen teollisuus- ja talousvedeksi.
5. Rakennuskaivantojen kuivanapito pumppaamalla.
6. Maan kohoaminen rannikkoalueilla.
7. Tunnelien ja kalliotilojen rakentaminen.

Kuva 3.1. Pohja- ja orsivedenpinnan alenemista aiheuttavia tekijöitä /4/.

3.2 Biologiset tekijät

Materiaalien biologinen vaurioituminen on eliöiden, mikrobien, sienten ja hyönteisten aiheuttamia muutoksia materiaaleissa. Jos puu on kosteassa ja maakosketuksessa, siinä saattaa esiintyä monentyyppisiä eliöitä kuten bakteereja, home- ja sinistäjäsieniä, katko-, valko- ja ruskolahottajasieniä sekä joskus myös erilaisia alkueliöitä, hyönteisiä ja nilviäisiä /15/. Materiaalien biologinen vaurioituminen vaihtelee ympäristön, materiaalin itsensä ja eliöiden mukaan ajan funktiona ja lopputulos voi olla hyvin erilainen vaikuttavista tekijöistä riippuen.

3.2.1 Bakteerit

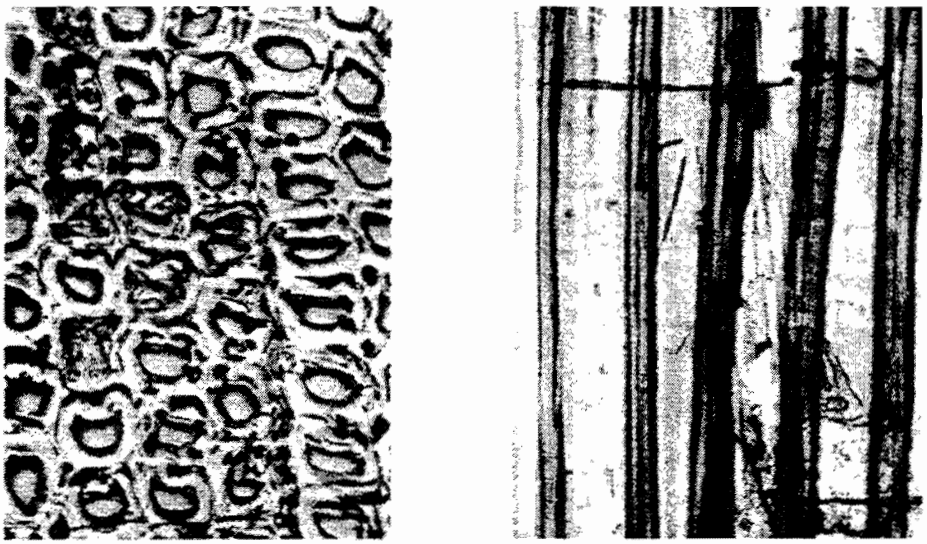
Bakteerit pystyvät elämään lajista riippuen hyvin monenlaisissa materiaaleissa ja olosuhteissa. Otollisissa olosuhteissa bakteerit pystyvät lisääntymään hyvin nopeasti ja ne ovat varsin sopeutuvia organismeja. Useimmat bakteerit tarvitsevat elintoimintoihinsa happea, mutta jotkut lajit voivat elää myös vähähappisissa tai lähes hapettomissa olosuhteissa. Hapen tarpeen mukaan bakteerit voidaankin luokitella aerobisiin, mikroaerofiilisiin eli vähän happea vaativiin ja anaerobisiin muotoihin /9/. Anaerobisiin bakteereihin hapen läsnäolo vaikuttaa myrkyn lailla, eivätkä ne pysty kasvamaan hapellisissa olosuhteissa.

Puupaaluissa bakteerit ovat usein pääasiallinen vaurioiden aiheuttaja katkolahottajasienten ohella. Varastoinnista, kuten muun muassa vesivarastoinnista, johtuen puupaalujen haitallinen bakteeritoiminta on saattanut alkaa jo ennen paalun maahanlyöntiä. Bakteerit aiheuttavat puun solujen seinämiin syöpymiä, jolloin puun lujuus heikkenee. Syöpymismalleina esitetään muun muassa tunnelit, ontelot ja eroosio (*kuva 3.2*) /20/. Tunnelibakteerit kaivautuvat soluseinän sisään aiheuttaen paikallisia syöpymiä soluseinän sisäpinnassa. Ontelo- eli kavitaatiobakteerit taas aiheuttavat syöpymiä solun pinnasta alkaen. Eroosiobakteerit syövyttävät soluontelon puoleisia kerroksia soluseinämästä.

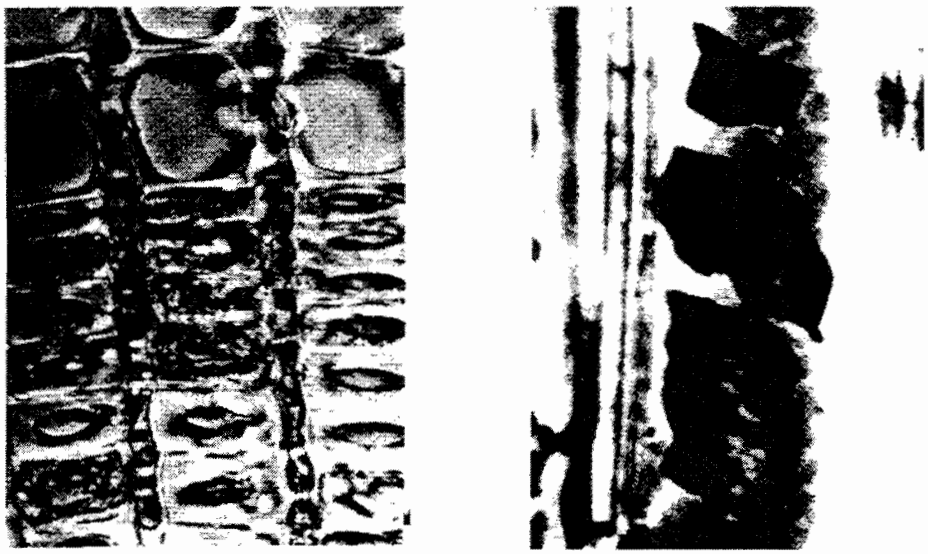
Vahingoittuminen tapahtuu yleensä hitaasti vuosikymmenien kuluessa. Bakteerien aiheuttamat muutokset näkyvät puun läpäisevyyden, kosteussisällön, tiheyden ja lujuuden muutoksina ja ovat havaittavissa valo- ja elektronimikroskooppisesti. Puupaaluissa bakteeritoiminta näkyy lähinnä paalun pinnan pehmenemisenä. Bakteerien syövyttämä puu säilyttää muotonsa kosteissa olosuhteissa, mutta kuivuessaan se kutistuu.

Kuva 3.2. Puussa havaittavia bakteerien aiheuttamia vauriotyyppejä /15/.

Yleensä bakteerit esiintyvät melkein yksinomaan pintapuussa, kun etenkin männyn vastustuskykyisempi sydänpuu pysyy terveenä (*kuva 3.3*). Bakteerit lahottavat puuta myös pohjaveden alla, mutta niiden aiheuttama vaurioituminen on vähäisempää ja hitaampaa kuin sienten aiheuttama lahoaminen (*kuva 3.4*). Koska katkolahottajille tyypillisiä onkaloita ei näissä olosuhteissa ole löydetty ja muut lahottajat eivät pysty toimimaan hapettomissa olosuhteissa, on puupaalujen mikrobiologisen hajoamisen todettu olevan bakteerien aikaansaamaa /11/.

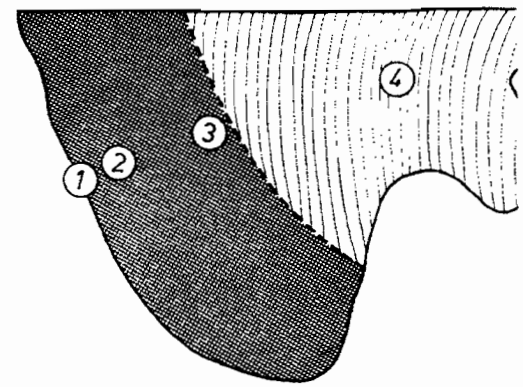


Kuva 3.3. Lahoa sydän- ja pintapuun rajapinnassa, poikki- ja pitkittäisleikkaukset /5/.



Kuva 3.4. Bakteerien aiheuttamaa lahoa. Leikkaukset kohtisuoraan syynsuuntaa vastaan ja syyn suuntaisesti /5/.

Anaerobiset bakteerit tunnetaan tehokkaina selluloosan hajottajina. Ligniiniä ne eivät sen sijaan pysty hajottamaan, jolloin sydänpuu, jonka huokosjärjestelmässä on runsaasti ligniiniä, jää koskemattomaksi /11/. Muun muassa Ruotsissa useita lajeja bakteereja on eristetty pohjaveden alla hapettomassa tilassa olevista puupaaluista /9/. Monet anaerobiset bakteerit vaativat muiden organismien läsnäoloa ja puun syöpyminen tapahtuukin usein bakteerien eri lajikkeiden sekä sienien yhteisvaikutuksesta. Onkin mahdollista, että katkolahottajat lisäävät bakteerien aiheuttamaa lahoamista. Puuhun suodattuvan veden happipitoisuus saattaa myös vaikuttaa bakteerien toimintaan, sillä samasta näytteestä on löydetty sekä aerobisia että anaerobisia bakteereja (*kuvat 3.5* ja *3.6*) /12, 5/.

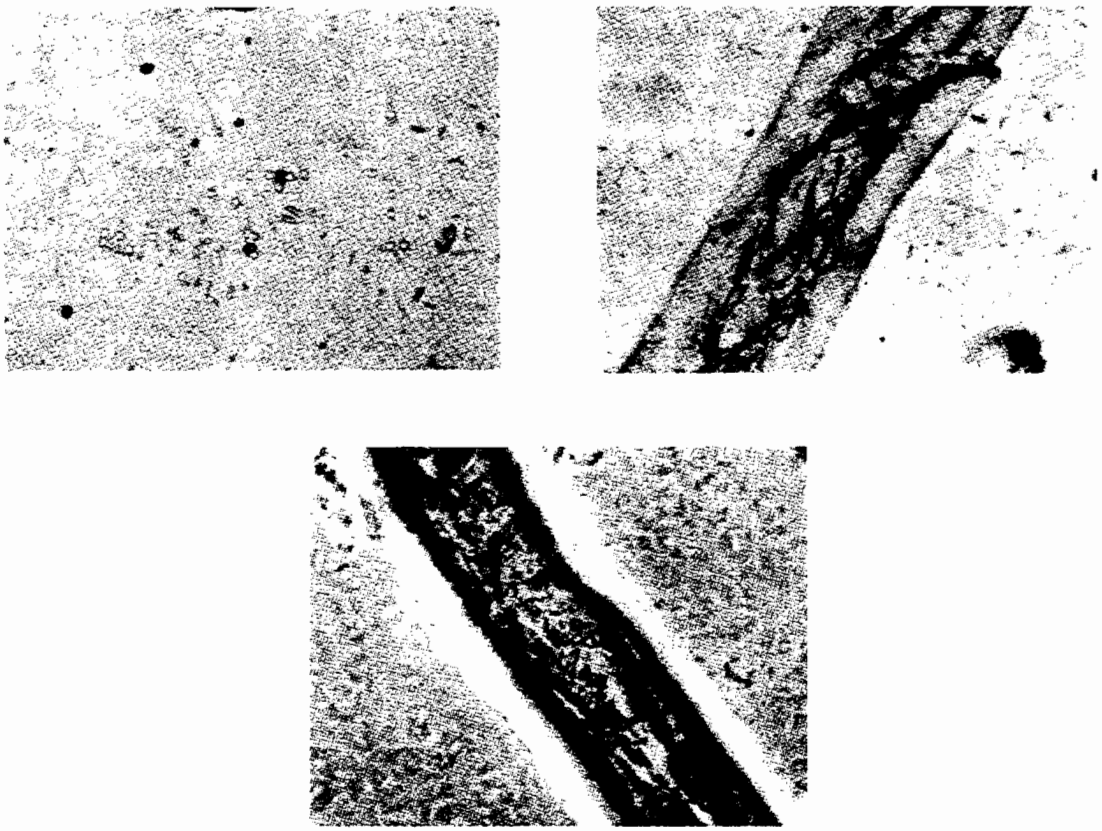


Pintapuu

Sydänpuu

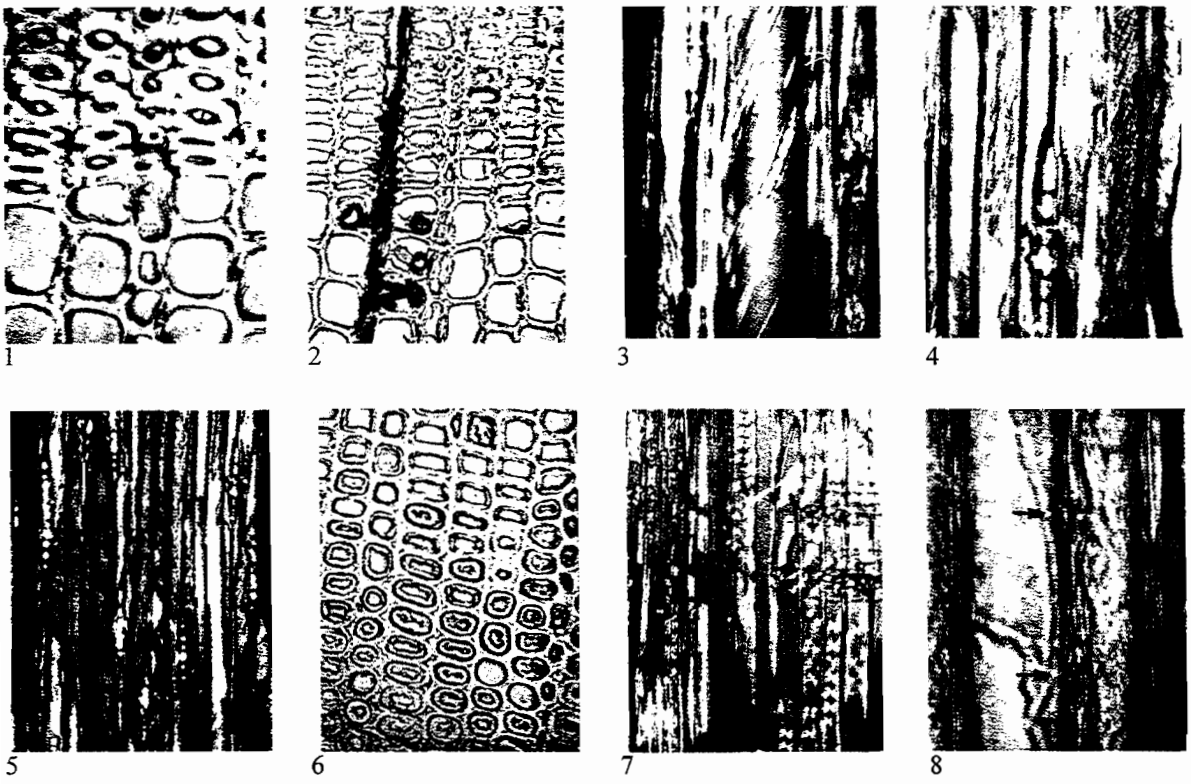
1. **Sienet**: Penicillium sp, Phycomyces sp (?), Chaetomium sp, Phoma sp (?)
   Actinomycetesit: Micromonospora sp
   Aerobiset bakteerit: Escherichia coli, Bacillus Cereus, Pseudomonas aeruginosa (?), Arthrobacter sp, Pseudomonas sp (selluloosaa pilkkova), Spirillum spp
   Anaerobiset bakteerit (selluloosaa pilkkovat): Plectridium- ja Clostridium –lajikkeita, rikkivetyä muodostavia
2. Micromonospora, Escherichia coli, Bacillus cereus, Arthrobacter sp, Speudomonas sp (selluloosaa pilkkova), Plectridium- ja Clostridium –lajikkeita, rikkivetyä muodostavia
3. Micromonospora, Bacillus cereus, Plectridium- ja Clostridium –lajikkeita
4. Ei mikro-organismeja

Kuva 3.5. Tukholmassa otetun paalunäytteen poikkileikkaus ja siitä löydetyt mikrobit /5/.



Kuva 3.6. Anaerobisia (yllä) ja aerobisia (alinna) selluloosaa pilkkovia bakteereita Tukholman Pythonin kaupunginosasta otetuista näytteistä /5/.

Lahoaminen hapettomissa olosuhteissa on hitaampaa kuin hapellisissa olosuhteissa, mutta anaerobiset bakteerit luovat toimintaedellytyksiä lahottajasienille pohjaveden laskiessa. Paalujen päiden päästessä kosketuksiin ilman hapen kanssa esimerkiksi orsivedenpinnan laskemisen seurauksena, lahoaminen kiihtyy aerobisten bakteerien ja sienien toiminnan johdosta. Kuvassa *3.7* on esitetty sienien ja bakteerien aiheuttamia lahovaurioita Tukholmassa otetuissa näytteissä /5/.

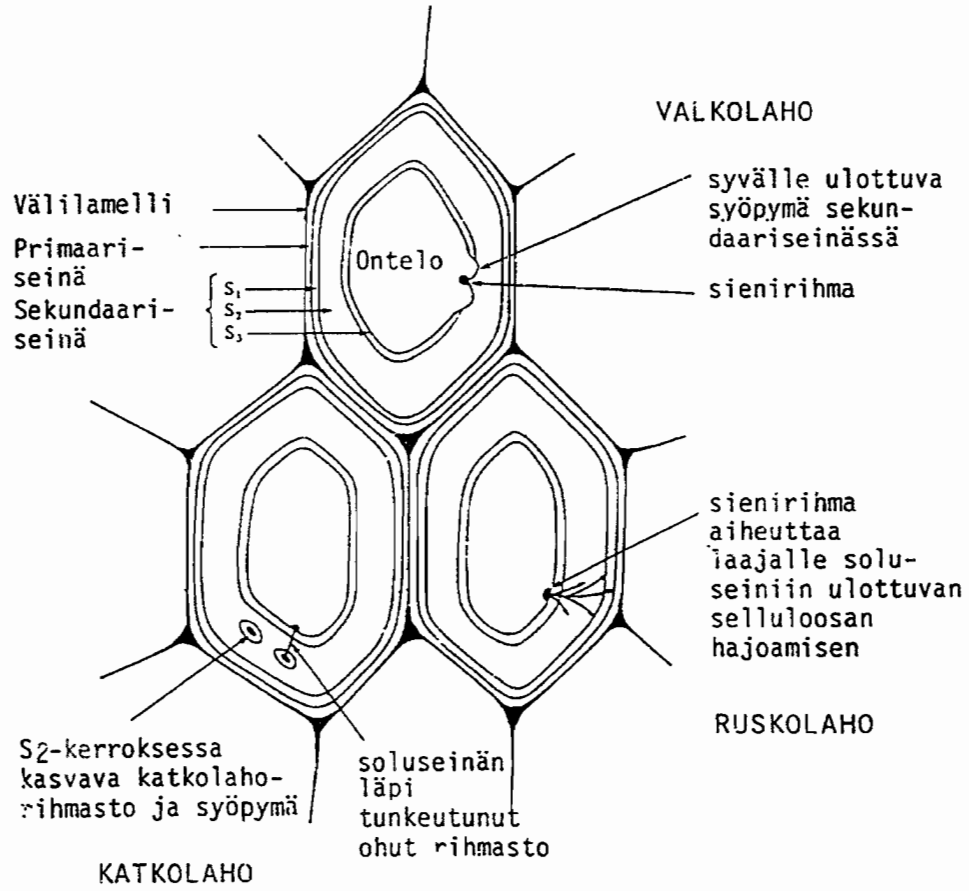


1. Poikkileikkaus kovasta puuaineksesta, läheltä tummunutta puun pintaosaa. Ei havaittavaa lahoa.
2. Poikkileikkaus puun tummuneesta pintaosasta, jossa sienirihmastoa. Voimakasta lahoa.
3. Pitkittäisleikkaus tummuneesta pintapuusta, jossa lahottajasienille tyypillisiä spiraalinmuotoisia onkaloita soluseinämässä. Joissakin onkaloista sienirihmastoa.
4. Eri muotoisia onkaloita. Toisessa kuidussa vasemmalta mahdollista bakteerien aiheuttamaa syöpymää.
5. Pitkittäisleikkaus tummuneesta pintapuusta, puun kuiduissa voimakasta lahoa.
6. Poikkileikkaus tummuneesta pintapuusta, selvästi erotettavaa lahoa solukossa.
7. Pitkittäisleikkaus tummuneen ja kovan puuaineksen rajakohdasta. Hieman sienirihmastoa. Kevätpuu lähes vahingoittumatonta. Kesäpuu voimakkaasti lahonnutta. Mahdollisesti bakteerien aiheuttamaa.
8. Tangentin suuntainen leikkaus tummuneesta puun osasta. Pistesyöpymiä huokosseinämissä. Mahdollisesti bakteerien aiheuttamaa.

Kuva 3.7. Sienien ja bakteerien aiheuttamia lahovaurioita Tukholmassa otetuissa näytteissä /5/.

3.2.2 Sienet

Sienet jaetaan puun kyseessä ollen home-, sinistäjä- ja lahottajasieniin. Home- ja sinistäjäsienet aiheuttavat lähinnä vain hajua ja värivikaa puuhun. Lahosienet taas pystyvät erittämillään entsyymeillä hajottamaan orgaanista materiaalia, kuten puun rakenneosia selluloosaa ja ligniiniä. Ne jaetaan kolmeen toiminnalliseen ryhmään: katko-, valko- ja ruskolahottajiin /37/ (*kuva 3.8*).

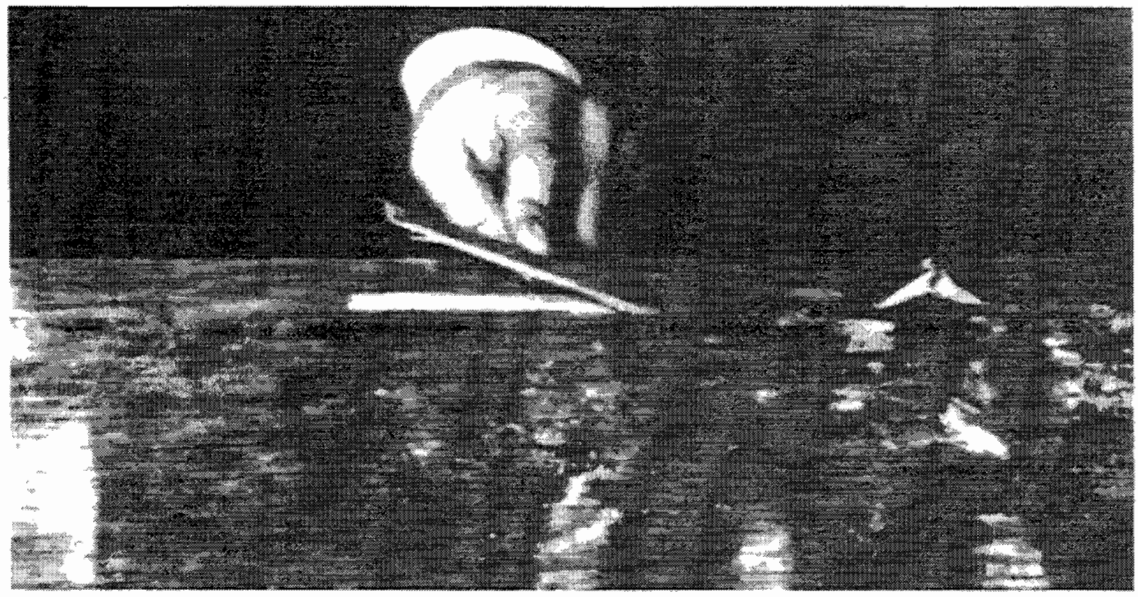


Kuva 3.8. Lahottajasienien kolme perustyyppiä: katko-, valko- ja ruskolaho sekä niiden toiminta puun solukossa /38/.

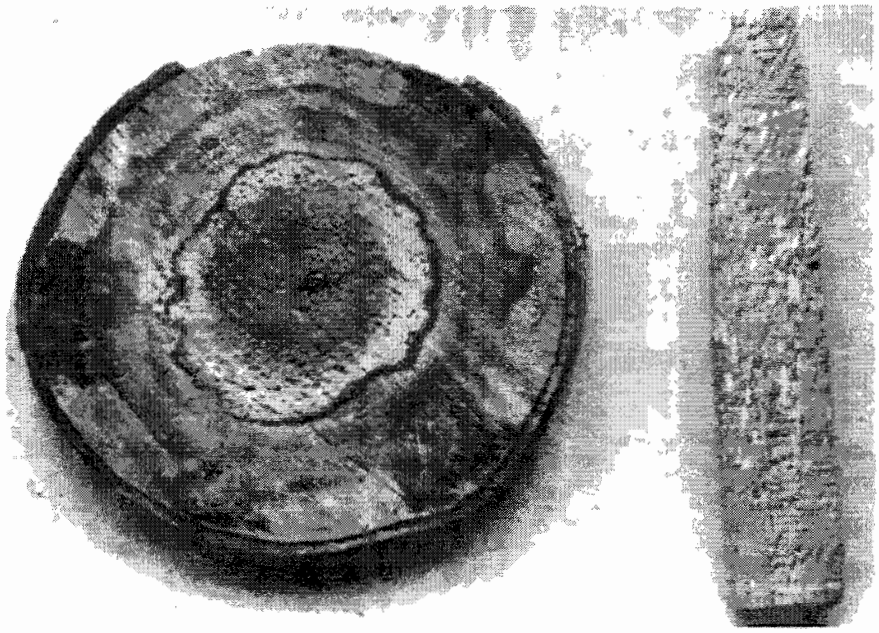
Katkolaho on puun solun sisäistä syöpymistä ja puun ulkonäkö ei muutu mitenkään ratkaisevasti (harmaantuu tai tummuu), mutta lujuus heikkenee selvästi. Katkolahottajat hajottavat enimmäkseen selluloosaa. Ne tulevat toimeen vähemmällä hapella ja kosteammissa olosuhteissa kuin muut lahottajasienet. Katkolahoa on havaittu ajoittain pohjavedenpinnan yläpuolella olleissa paaluissa, mutta myös pohjaveden pinnan alapuolisissa puuosissa. Katkolaho muistuttaa bakteerien aiheuttamaa syöpymää. Lahon puun ulkopinnalla on muutaman millimetrin syvyinen pehmennyt kerros, mutta puun sisäosa on kovaa. Puun paino alenee hitaasti, mutta sen lujuus heikkenee nopeasti aiheuttaen rasituksessa mahdollisen äkillisen katkeamisen. Katkeamispinta on sileä (*kuva 3.9*) /15, 37/.

Valkolahossa hajoavat sekä selluloosa että ligniini, joten puun väri ei sanottavasti muutu. Alkuvaiheessa lahoa on vaikea havaita, sillä puu säilyttää muotonsa ja lujuutensa. Lahon edetessä puu muuttuu keveäksi ja hauraaksi. Lopulta puu syöpyy niin, että jäljelle jää vain kuitumaista massaa. Syövytys- eli korroosiolaho on yksi valkolahon tyyppi. Siinä puuhun ilmestyy ryynimäisiä valkoisia laikkuja, joissa sieni kasvaa nopeammin kuin ympäristössä. Ligniinin hävitessä laikut syöpyvät vähitellen koloiksi (*kuva 3.10*). Valkolahoa on tavattu lähinnä sellaisten paalujen yläosissa, jotka ovat ainakin ajoittain pohjaveden pinnan yläpuolella. Pohjavedenpinnan alapuolella suurimman lahotustyön tekevät bakteerit ja katkolahottajat, mutta valkolahon seurauksena puun lujuuden häviö suurenee /15, 37/.

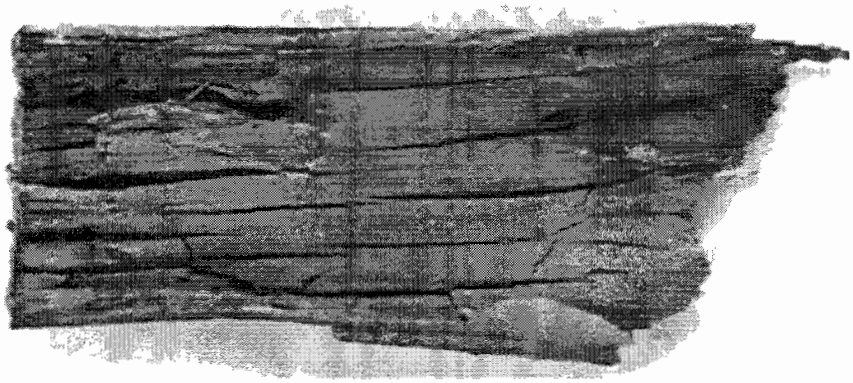
Ruskolahossa selluloosan häviämisen vuoksi puu kutistuu ja halkeilee pituus- ja poikkisuunnassa vaihtelevan suuruisiksi lohkoiksi sekä värjääntyy ruskeaksi ligniinin osuuden kasvaessa (*kuva 3.11*). Puun lujuus heikkenee nopeasti jo lahon alkuvaiheessa ja lopulta puu murenee ruskeaksi jauheeksi. Ruskolaho on pääasiallinen lahotyyppi rakennusvaurioissa, ja sen osuus paalujen vaurioista on pieni /15, 37/. Ruskolahoa ei esiinny märissä ja hapettomissa olosuhteissa.



Kuva 3.9. Katkolaho. Terve puu katkeaa pitkinä sälöinä, vasemmalla. Katkolahossa puu katkeaa helposti syiden poikkisuuntaan, oikealla /37/.



Kuva 3.10. Valkolaho ja syövytyslaho /37/.



Kuva 3.11. Ruskolaho /37/.

3.2.3 Ympäristötekijät

Erilaiset ympäristötekijät vaikuttavat puupaalujen heikentymiseen ja lahoamiseen sekä veden alla että vedenpinnan yläpuolella.

Vahvat happo- ja alkaliliuokset hydrolysoivat puun hiilihydraatteja. Yleensä puu on hyvin vastustuskykyinen, jos liuoksen pH on noin 7 tai vähän alle. Korkea pH lisää huomattavasti lujuuden vähentymistä liuottamalla kuitujen liima-ainetta ligniiniä. Puuta

lahottavista organismeista sienet pitävät happamammasta (pH 4...6) ympäristöstä kuin bakteerit.

Kemikaalit voivat yhdessä bakteerien kanssa vaikuttaa puun ominaisuuksiin. Näin on saattanut käydä muun muassa pääpostitalon perustusten puupaaluille Helsingissä, jossa runsas sulfaattipitoisuus on aiheuttanut paalujen pintaosien kemiallista syöpymistä /9/.

Puhtaalla kylmällä vedelläkin on puun ainesosia liuottava vaikutus ja puulajista riippuen sen painosta voi liueta kylmään veteen 1...13 %. Liukenevat ainesosat ovat puun vesiliukoisia kasvumehuja /29/.

Myös jotkin orgaaniset suolat, kuten kalsiumsuolat ja metallit, kuten rauta pehmentävät ja heikentävät puun rakennetta /9/.

Jätevesiviemärien vuodot edistävät lahoamista lisäämällä lahottajien tarvitsemien ravinteiden määrää. Useimmiten rakennus ja sen ympäristö painuvat eri tahtiin, eikä tätä ole huomioitu viemäreiden perustamisessa riittävästi. Tällöin viemäriputkien saumat saattavat rakoilla tai putkistossa esiintyy jopa murtumia. Viemäreiden kallistuskulmien muutokset voivat lisäksi aiheuttaa tukoksia viemärilinjoihin. Lisäksi viemärit lämmittävät ympäröivää maaperää ja siten edistävät mikrobitoimintaa.

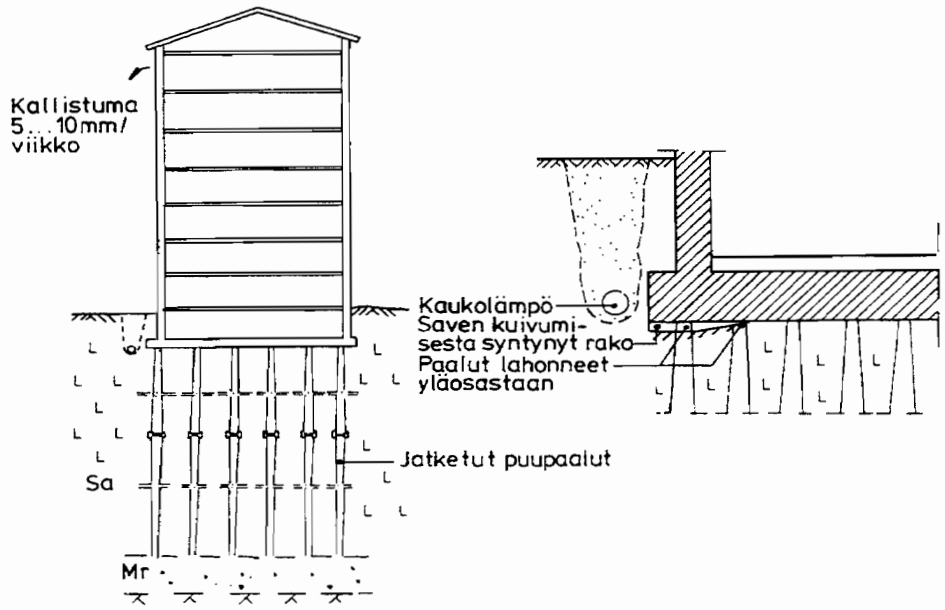
Yhteyttä happeen pidetään yhtenä tärkeimmistä tekijöistä puun biologisessa heikentymisessä. Esimerkiksi melkein kaikki sienilajit vaativat happea kehittymiseensä. Jos soluseinät ovat veden kyllästämät ja solutila on täynnä vettä, tulee hapen puutteesta lahottajasienien kasvua estävä tekijä. Männyn ja kuusen vesipitoisuus on tällöin yli 150 %. Mikrosienet sietävät kuitenkin hyvin kosteata ympäristöä ja kehittyvät vaikka puu on veden kyllästämä, mutta niiden aiheuttamat vauriot ovat tyypillisempiä hyvin happipitoisessa virtaavassa vedessä kuin vähähappisessa seisovassa vedessä /3/. Vähähappisessa ympäristössä bakteerit aiheuttavat enemmän vaurioita kuin sienet. Tietyt anaerobiset bakteerit tulevat toimeen hapettomissa olosuhteissa, mutta toisaalta puuta vaurioittavat lähinnä happea vaativat bakteerit.

Monien lahottajasienten kasvun ideaalilämpötila on 15...30 °C. Normaalisti lämpötila paalujen ympärillä maassa ja pohjavedessä on 5...10 °C, missä sienet ja bakteerit vielä

voivat elää mikäli muut kasvuedellytykset täyttyvät. Sienirihmaston kasvu voi alkaa lämpötilan ollessa yli 0 °C. Pakkasessa rihmaston kasvu pysähtyy ja se siirtyy lepotilaan. Sienien tai bakteerien toiminnan kannalta parasta lämpötilaa ei useinkaan tunneta luonnollisissa olosuhteissa, mutta oletettavasti pienikin lämpötilan nousu lisää biologista aktiivisuutta /15, 9/.

Kellaritilojen lämmitys lisää puupaalujen lahoamisriskiä. Tämä riski on mahdollinen otettaessa käyttöön vanhojen rakennusten aikaisemmin kylminä olleita kellaritiloja peruskorjauksen yhteydessä. Kellaritilan keskilämpöä vastaavia lämpötiloja on mitattu rakennuksen alla maaperässä jopa noin kolmen metrin syvyyteen. On myös havaittu, että puupaalujen päiden lahoamista tapahtuu nopeammin kellaritilojen alla kuin ulkoseinälinjalla /3/.

Jälkeenpäin rakennetut kaukolämpöputket saattavat kuivattaa paalujen yläpäätä suojaavaa savea, jolloin perustusten alle syntyy kiilamainen rako. Tällainen rako saattaa muodostua myös lämmitettävän kellaritilan lattian alle koko kellarin alueelle. Esimerkiksi Turussa eräs 7-kerroksinen talo alkoi kallistua paalun päiden lahottua kaukolämpöputken kuivattamassa raossa hapen päästyä kosketuksiin paalujen yläpäiden kanssa (*kuva 3.12*) /32/. Lisäksi kohde oli perustettu jatketuille paaluille, jolloin paalun rakenteellisen kantavuuden mitoittava ohuempi latvaosa oli ylöspäin eikä paalun poikkileikkauksella ollut paksumman tyvipään ylimääräistä varmuutta lahoamista vastaan.



Kuva 3.12. Kaukolämpöputken aiheuttama saven kutistumisrako perustuksissa /32/.

Tuki- ja kitkapaaluilla raon muodostuminen rakennuksen alle on aina mahdollista maan konsolidaatiopainumasta johtuen.

Puupaalujen lahoamisriski on suurempi karkearakeisessa maaperässä kuin hienorakeisissa maalajeissa. Karkearakeisissa maalajeissa happi pääsee helpommin kulkeutumaan paaluihin satunnaisen pohjaveden aleneman aikana kuin esimerkiksi tiiviissä savessa. Lisäksi karkearakeiset maalajit ovat usein täyttömaita, jotka itsessään saattavat sisältää lahoavia aineita ja ravinteita. Puurakenteissa, jotka ovat tiiviissä savessa ja pohjavedenpinnan alapuolella, on sydänpuu lähes aina vahingoittumatonta. Pintapuu on sen sijaan saattanut kärsiä huomattavia vaurioita näissäkin olosuhteissa /9/. Tämä johtuu anaerobisten bakteerien toiminnasta.

3.3 Lahoamisvauriot

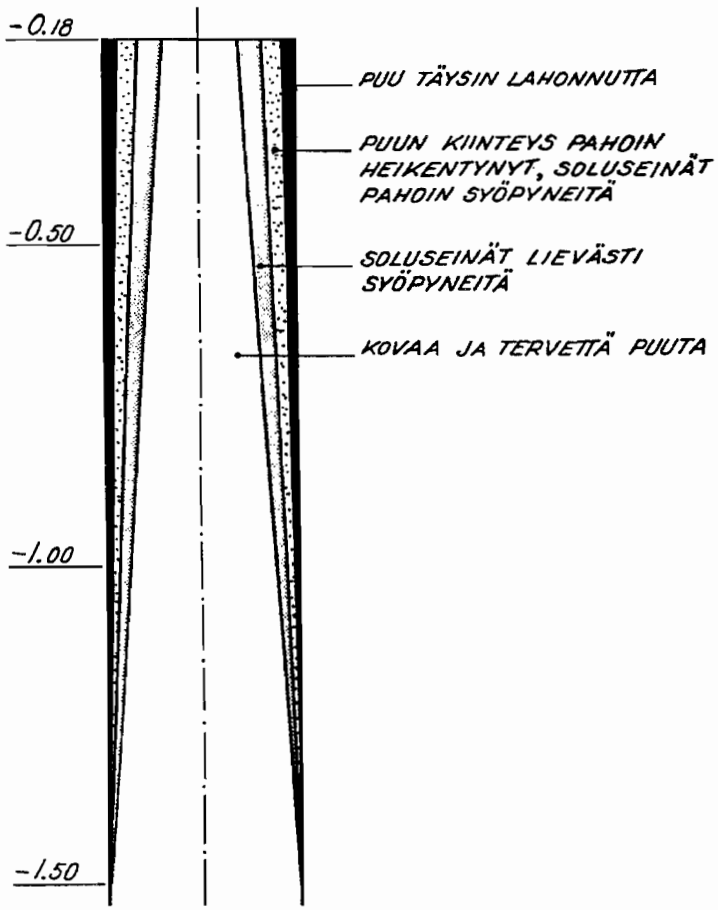
Pahimmat puuperustusten lahovauriot aiheutuvat pohjavedenpinnan alenemisesta. Paalujen katkaisutaso ja arinan ylin taso on valittu rakentamisajankohdan pohjavedenkorkeuden mukaan, eikä tällöin yleensä ole otettu riittävästi huomioon mahdollista pohjavedenpinnan alenemista, maan nousua tai edes pohjaveden mahdollisia vuosivaihteluita. Kun pohjaveden pinta laskee, paalujen päät kuivuvat ellei maan kapillaarinen nousukorkeus ole riittävän suuri. Lisääntynyt happipitoisuus antaa mahdollisuuden bakteerien ja sienien kasvulle ja lisääntymiselle.

Vasta pitkälle ehtinyt lahoaminen saa aikaan rakennuksen painumista. On havaittu, että vaikka paalujen yläpäiden poikkileikkauksen pinta-alasta suuri osa on lahonnut, ei rakennuksessa välttämättä esiinny perustusten pettämistä tai painumista.

Puupaalujen yläpäiden lahoaminen tapahtuu kartiomaisesti ylhäältä alaspäin alkaen puun pintakerroksista (*kuva 3.13*). Painuneissa rakennuksissa paalujen yläpäät ovat yleensä olleet läpeensä lahonneita. Puupaalujen lahotessa painumat ovat yleensä epätasaisia, mikä aiheuttaa perustusten yläpuolisissa rakenteissa kuormitusten uudelleen jakaantumista ja siitä johtuvia vetojännityksiä. Painumavauriot ilmenevät halkeamina ja kallistumina perustusrakenteissa, lattioissa ja seinissä ja saattavat ilmetä myös ikkunoiden ja ovien avaamisvaikeuksina. Myös viemärit voivat tukkeutua virtaussuunnan muuttuessa tai

viemärilinjojen katkeillessa. Pahimmillaan on mitattu jopa 10 mm:n painumia perustuksissa vuodessa, kun paalujen päät ovat olleet täysin lahonneet /15/.

Puupaalujen ollessa jo hyvin lahonneita ovat perustukset hyvin herkkiä eri häiriötekijöille, jolloin muun muassa lähistöllä suoritettavat kaivamis- tai räjäytystyöt tai perustusten korjaustyön yhteydessä lyötävät tai puristettavat uudet paalut voivat aiheuttaa lisäpainumia syntyneen tärinän tai maan syrjäytymisen takia.



Kuva 3.13. Lahon eteneminen puupaalun yläpäässä /24/.

4. Puupaalujen kunnon selvittäminen

4.1 Lähtötietojen hankinta

Kyseisestä kohteesta kerätään kunnon arviointia varten kaikki saatavilla oleva aineisto, kuten rakennus- ja perustuspiirustukset, geotekniset kartat, aikaisemmat pohjatutkimukset sekä mahdollisesti ympäröivien rakennusten perustuspiirustukset ja pohjaveden korkeuden tarkkailupöytäkirjat /15/. Arkistotietoja saadaan muun muassa:

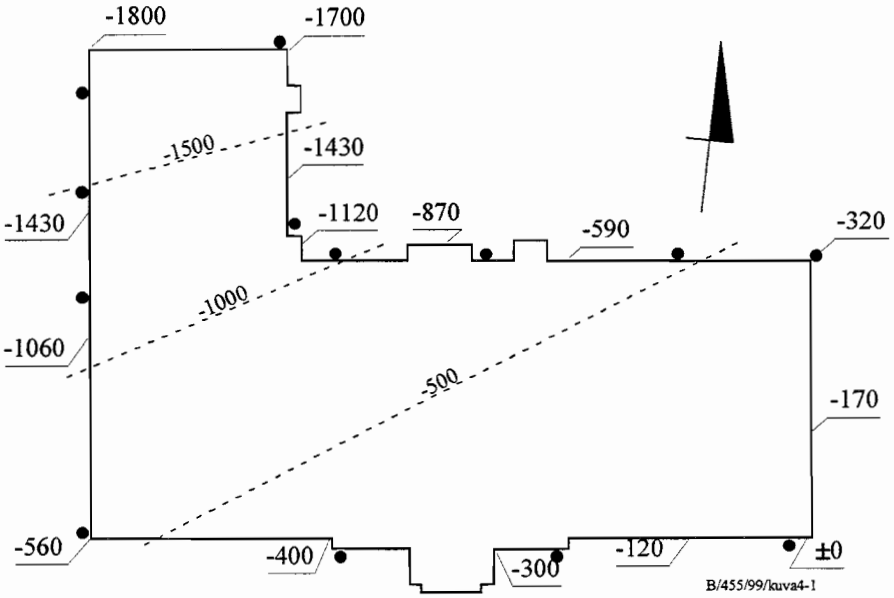
- rakennusvalvonnalta
- kunnan arkistoista
- maakunta-arkistoista
- rakennuttajalta
- vesi- ja viemärilaitosten arkistoista
- konsulttitoimistojen arkistoista

Vanhoista kartoista ja kaavoista voidaan saada tietoja aiemmin paikalla sijainneista rakennuksista ja rakenteista, alueen aikaisemmasta rakennuskannasta, täyttöalueista ja vanhoista rantaviivoista /31/.

4.2 Maastotutkimukset

4.2.1 Vaaitukset

Rakennuksen painumista seurataan tarkkavaaituksin erikseen asennettavista tarkkavaaituspulteista. Pultteina käytetään pallokantapultteja ja mittaustarkkuutena 0,1 mm. Seurannan aikajänteen tulisi olla ainakin 2…3 vuotta, jotta rakennuksen painumiskäyttäytyminen saataisiin selvitettyä /32/. Myös mahdollisia aikaisempia vaaitustietoja voidaan käyttää hyväksi. Havaintoja rakennuksen kallistumista saadaan myös vaaitsemalla räystäslinjoja, ikkunalistoja, sokkelin yläreunoja ja lattiatasoja (*kuva 4.1*). Lisäksi tarkkaillaan pintavaaituksin ympäristön ja rakennuksen painumaeroja. Jos läheisyydessä on muita rakennuksia suoritetaan mahdollisuuksien mukaan vaaitukset myös niiden perustuksista painumavertailujen saamiseksi.

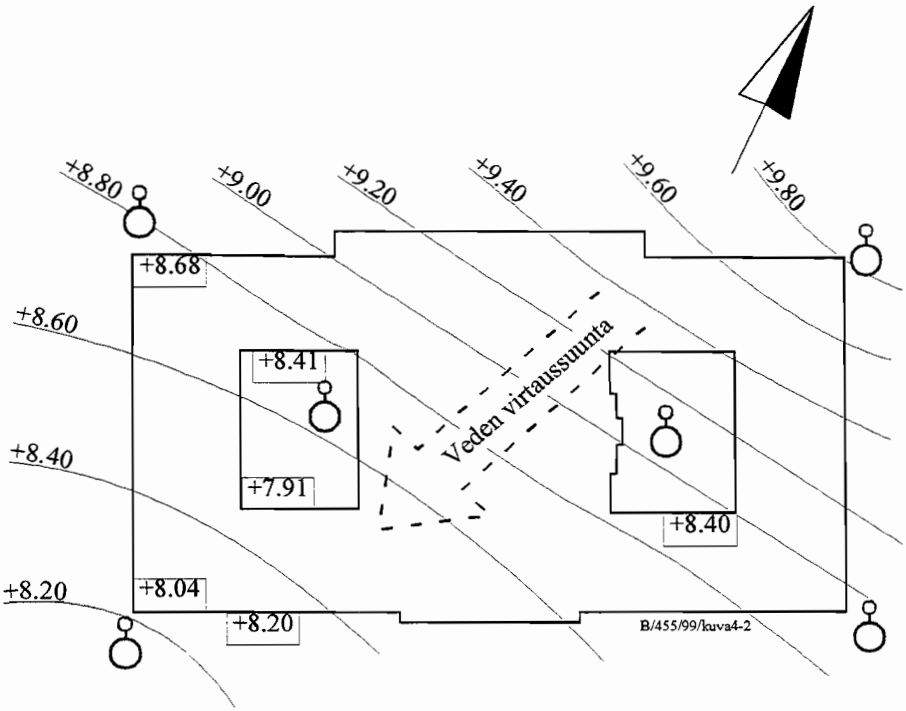


Kuva 4.1. Esimerkki tarkkavaaituspisteiden sijainnista ja julkisivun koristelistan korkeustason merkinnästä /32/.

4.2.2 Pohjatutkimukset

Pohjasuhdetietojen puuttuessa on tehtävä pohjatutkimus. Pohjatutkimusohjelmaa laadittaessa on hyvä käyttää apuna ylärakenteen vauriokartoitusta ja kohdentaa tutkimukset niin, että ne antavat tietoa myös vaurioiden mahdollisista syistä. Lisäksi tarvitaan tietoa ylärakenteiden mahdollisista muutostöistä, kuten kantavien rakenteiden poistoista tai siirroista, jotta voidaan arvioida kuormitusten uudelleenjakaantumisen vaikutusta perustusrakenteisiin.

Kairauksilla selvitetään maakerrosten paksuudet, rakenne ja tiiviys sekä kovan pohjan sijainti. Tarvittaessa maanäytteistä tutkitaan muun muassa rakeisuus, vesi- ja humuspitoisuus ja suljettu leikkauslujuus. Ellei alueella ole pohjavedenpinnan tason havaintoverkostoa, asennetaan orsi- ja pohjavedenpintojen tason selvittämiseksi riittävä määrä havaintoputkia /15/. Orsivedenpinnan vaihtelun selvittämiseksi tutkimusjakson pituuden tulisi olla riittävä. Olemassa olevaa havaintoverkostoa tihennetään tarpeen mukaan. Pohjaveden laadun tutkimiseksi vedestä otetaan näytteitä, joista määritetään lämpötila, pH, kemiallinen koostumus ja mikrobipitoisuudet. Lisäksi tutkitaan veden virtaussuunta ja mahdollisesti virtausnopeus (*kuva 4.2*).



Kuva 4.2. Ylemmän pohjaveden mittauspisteet ja veden virtaus tasopiirustuksessa /32/.

Mikäli perustusten kunnon tarkistamisen jälkeen päädytään perustusten korjaamiseen, on usein suoritettava lisätutkimuksia korjaus- tai suojausmenetelmän valinnan ja suunnittelun perustaksi.

4.2.3 Koekuopat

Pohjatutkimusten ja vauriokartoituksen perusteella arvioidaan tarvittavien koekuoppien määrä ja päätetään niiden sijainti. Kun rakennukseen ei ole ilmaantunut vaurioita, perustusten kunnon seurantaan riittää ainakin aluksi 2…3 koekuoppaa. Vaurioiden ilmaannuttua saatetaan joutua paalujen kunnon huomattavien vaihteluiden takia kaivamaan useita koekuoppia /15/. Koekuoppia pyritään tekemään sekä rakennuksen ulko- että sisäpuolelle.

Ennen näytteiden ottoa ja koekuopan kaivamista selvitetään kohdalla mahdollisesti olevien johtojen, putkien ja kaapelien sijainti.

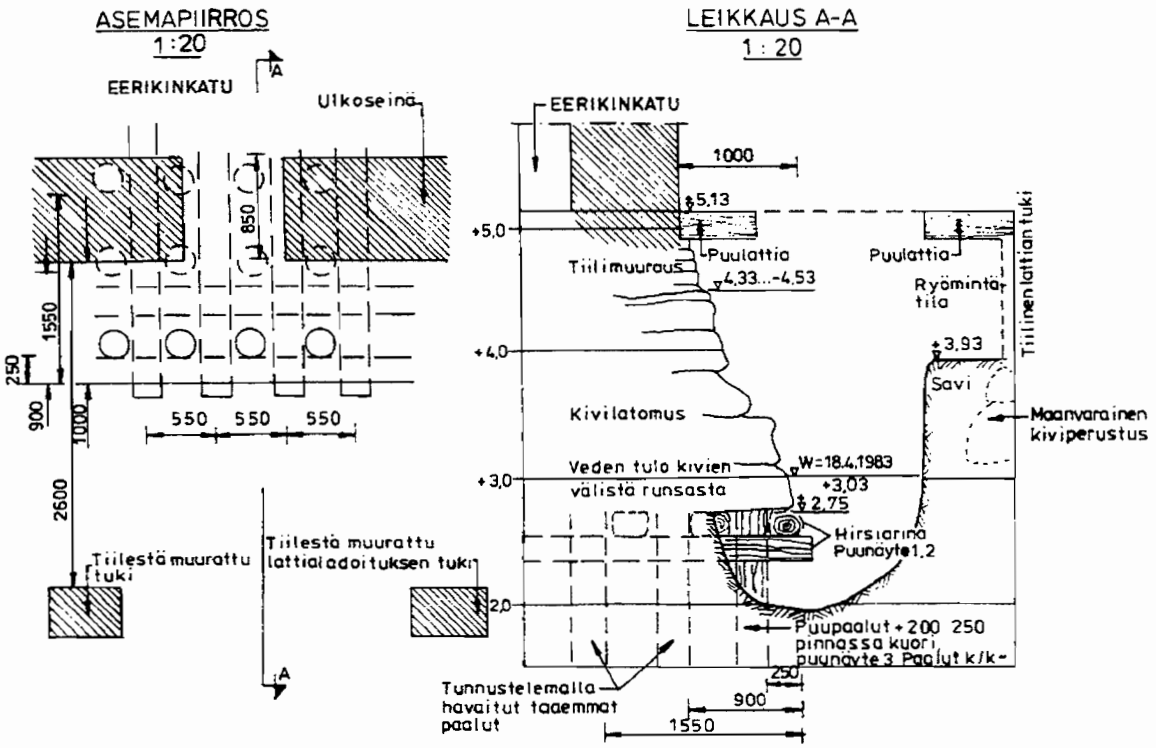
Koekuoppien sijainti riippuu mm. seuraavista tekijöistä /31/:

- rakennuksen sijainti ja arvioitu perustamistapa maastokatselmuksen ja arkistoselitysten perusteella
- rakennus ja sen historia, onko se tehty yhdessä vai useammassa vaiheessa sekä maanalaisten tilojen korkeustaso ja monimuotoisuus
- koekuopan tekemistä rajoittavat tekijät, kuten käytössä olevat tärkeät kellaritilat, ahtaat katu- tai piha-alueet, kaapeli/johtolinjat
- rakennukseen tehtävät muutostyöt esimerkiksi lisäkellari
- arvioitu perustusten vahvistamis- tai säilyttämismenetelmä

Erityisesti koekuopat olisi sijoitettava kohtiin, joissa kairausten tai lähtötietojen perusteella on oletettavissa, että rakennuksen perustamistavat ja –tasot vaihtelevat sekä paikkoihin, joissa olosuhteet, kuten lämmönjakohuoneet, pumppauskaivot tai viemärilinjat ovat saattaneet aiheuttaa perustuksille vaurioita /31/.

Koekuoppaa ei tule kaivaa liian aikaisin, etteivät paalujen päät joudu liian pitkäksi ajaksi kosketuksiin ilman hapen kanssa. Sopivin hetki kuopan avaamiseen on, kun näytteiden otto voidaan paaluista suorittaa välittömästi. Koekuopan pohja ulotetaan noin metrin syvyyteen anturan alapinnasta riittävän työskentelytilan saavuttamiseksi /15/. Konekaivua tulee välttää puolta metriä lähempänä paalujen tai arinan oletettua sijaintipaikkaa. Liian lähellä kaivaminen saattaa aiheuttaa tyhjätilan paaluanturan alle.

Koekuopasta tehdään tasopiirros, poikkileikkaus ja naamakuvaleikkaus (*kuva 4.3*). Lisäksi tehdään sijaintipiirustus, josta koekuopan sijainti voidaan todeta. Tutkimustuloksia on suositeltavaa täydentää valokuvin.



Kuva 4.3. Koekuoppapiirustus /31/.

Koekuoppapiirustuksesta tulee ilmetä seuraavat asiat /31, 15/:

- maanpinnan, lattian ja koekuopan pohjan korkeustasot
- maakerrosten rajat
- perustusten rakenne ja materiaalit
- perustamistapa
- perustamistaso ja perustuksen leveys, mikäli se voidaan mitata
- kivien koko, muoto ja väliaines
- hirsien ja paalujen koot, kaltevuudet ja keskinäiset etäisyydet
- paalujen katkaisutaso
- onko paalusta latva vai tyvi ylöspäin
- piikillä koettelemalla havaittu laho puurakenteissa
- perustusrakenteita ympäröivä maa-aines
- puupaaluja ympäröivän maa-aineksen lämpötila

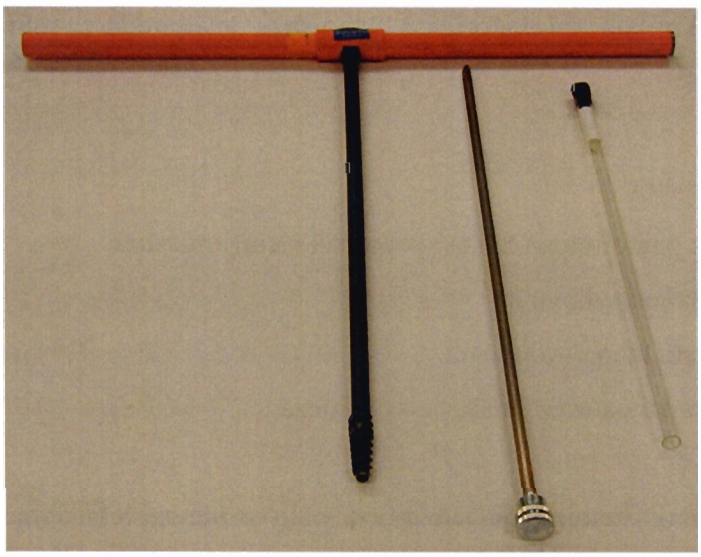
- tyhjätilat anturan tai lattian alla
- poraukset ja vinokairaukset perustusten alle ja läpi
- seinien koeporaukset ja todetut halkeamat seinissä
- havaittu vesipinta ja pumpattu vesimäärä (l/h)
- veden virtaussuunta
- tehdyt kairaukset
- näytteidenottopaikat
- puunäytteistä niiden laatu; kasvukairanäyte, palanäyte
- pohjavesiputken paikka
- tontin raja perustuksiin nähden
- lattiarakenne ja täytemaan laatu
- putkijohdot kuopan kohdalla
- sokkelivaaitus

Koekuopasta saatuja tietoja verrataan kerättyihin arkistotietoihin niiden luotettavuuden varmistamiseksi.

Paalujen kunnon ja kantavuuden arvioinnin kannalta on tärkeää tietää ovatko paalut kokonaan saven ympäröimiä vai onko maapohjassa tapahtunut painumista. Painumista on voinut aiheuttaa ympäristön tai rakennuksen alustäytöt, vedenpinnan aleneminen tai molemmat /15/.

Koekuopan kaivun yhteydessä otetaan maanäytteitä eri syvyyksistä. Maanäytteitä otetaan myös paaluja ympäröivästä maasta rakeisuus- ja mikrobiologisia tutkimuksia varten. Vesinäytteet orsi- tai pohjavesiputkista otetaan ennen koekuopan kaivamista, sillä pohjaveden laatu muuttuu kaivamisen yhteydessä /11/. Vesinäytteet otetaan myös koekuopasta heti sen avaamisen jälkeen ja mahdollisesta rakennuksen alta kuoppaan virtaavasta vedestä, jonka lämpötilasta ja mikrobimääristä saadaan tietoa rakennuksen sisäosissa olevien paalujen mahdollisesta heikommasta kunnosta verrattuna ulkoseinälinjalla oleviin paaluihin. Paaluja ympäröivän maan ja orsiveden lämpötilat mitataan ympäristöolosuhteiden selvittämiseksi.

Puupaalut tutkitaan aluksi silmämääräisesti ja esimerkiksi piikillä kokeilemalla tai vasaralla naputtelemalla mahdollisen lahon havaitsemiseksi. Puunäytteitä otetaan kasvukairalla (*kuva 4.4*) lahoisuusanalyysia sekä mahdollisesti noin 100 mm paksuinen kiekko prismapuristuskokeita varten. Tarvittaessa paalusta sahataan noin 0,5 m pituinen kappale täysmittakaavakokeita varten. Tehdyt havainnot, näytteenottopaikat ja niiden korkeustasot merkitään koekuoppapiirustukseen.



Kuva 4.4. Kasvukaira, näytteen ulosvedin ja lasinen näyteputki.

Tutkimuksen suorituksen jälkeen koekuopat täytetään huolellisesti pyrkien saamaan täyttö alkuperäiseen tiiviyteen. Täyttö tehdään alkuperäisillä kaivumassoilla niiden kerrosrakenteen mukaisesti. Puuosat pyritään ympäröimään savella ja mahdollinen anturan alla oleva rako täytetään /11, 15/. Tarvittaessa paalujen ympärille voidaan tuoda muualta uutta puhdasta savea.

Koekuoppatutkimukset saattavat vaikuttaa paikallisesti puupaalujen kuntoon. Mikäli puupaalujen ympärystää ei tiivistetä huolellisesti savella koekuopan täyttämisen yhteydessä, happipitoisuus paalujen ympärillä saattaa päästä kohoamaan normaalista ja aiheuttaa lahoamisen kiihtymisen. Tällaiseen ilmiöön on törmätty ainakin Washingtonissa, jossa eräs koekuoppa avattiin uudelleen seitsemän vuoden päästä ensimmäisestä tutkimuksesta ja havaittiin lahon edenneen huomattavasti verrattuna muihin koekuoppiin, joita ei ollut avattu edellisen tutkimuksen aikana /8/.

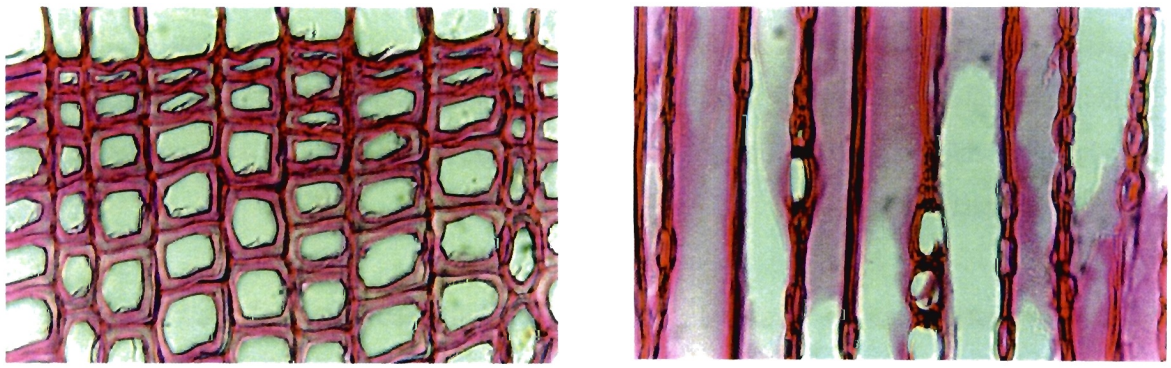
4.3 Laboratoriotutkimukset

Poraamalla esimerkiksi kasvukairalla tai onteloporalla puusta saadaan paikallinen näyte, josta laboratoriotutkimuksin voidaan selvittää puun kosteus, tiheys, puulaji ja puun vaurioituneisuus kuten lahoisuusaste sekä tarvittaessa vuosikasvaimen leveys ja kesäpuuprosentti.

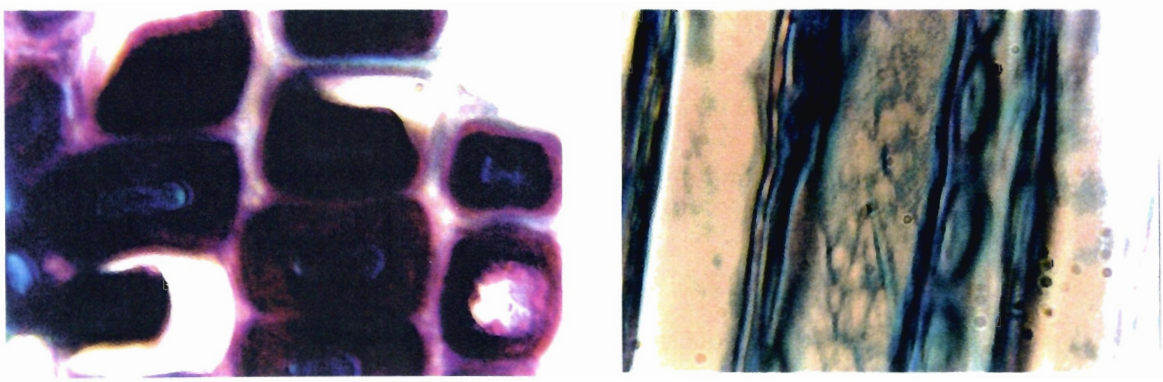
VTT:n Puutekniikan laboratoriossa lahoisuus määritetään vaurioluokituksen mukaan asteikolla 0...4:

0 puu tervettä
1 hieman paikoittaista lahoa/syöpymää/sienirihmastoa
2 lievää lahoa/syöpymää
3 melkoista lahoa/syöpymää
4 runsasta lahoa/syöpymää, puu pehmeää

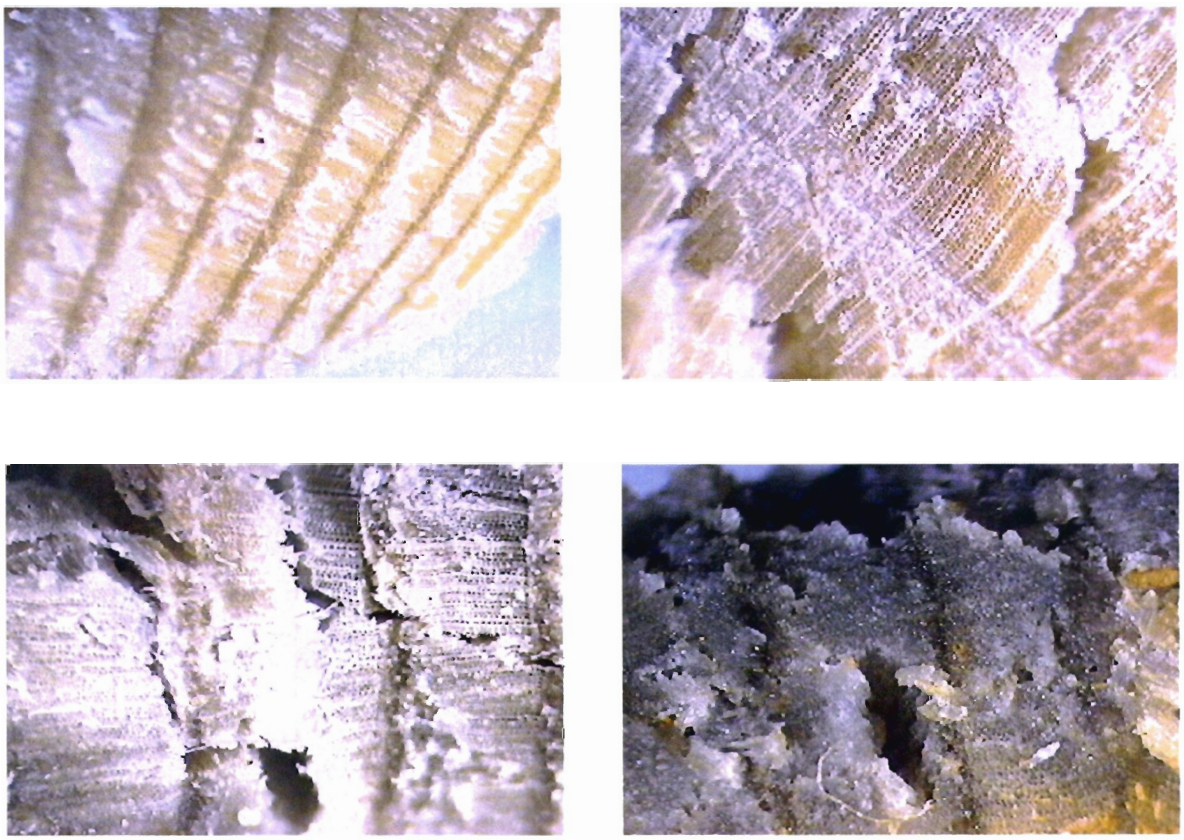
Mikroskooppitarkasteluin voidaan todeta puussa oleva sienirihmasto, bakteerit ja niiden laatu sekä määrä. Kuvissa *4.5...4.7* on esitetty mikroskooppikuvia puun solukosta ja Suomen Kansallisteatterin puupaaluista otetuista kasvukairanäytteistä.



Kuva 4.5. Tervettä männyn solukkoa, poikki- ja pitkittäisleikkaukset /6/.



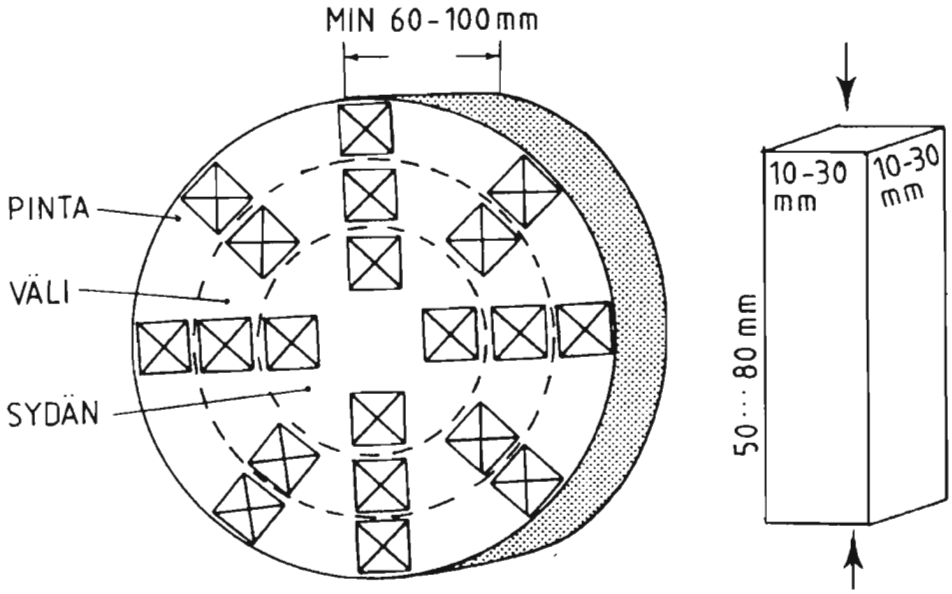
Kuva 4.6. Vaurioitunutta männyn solukkoa, poikki- ja pitkittäisleikkaukset /6/.



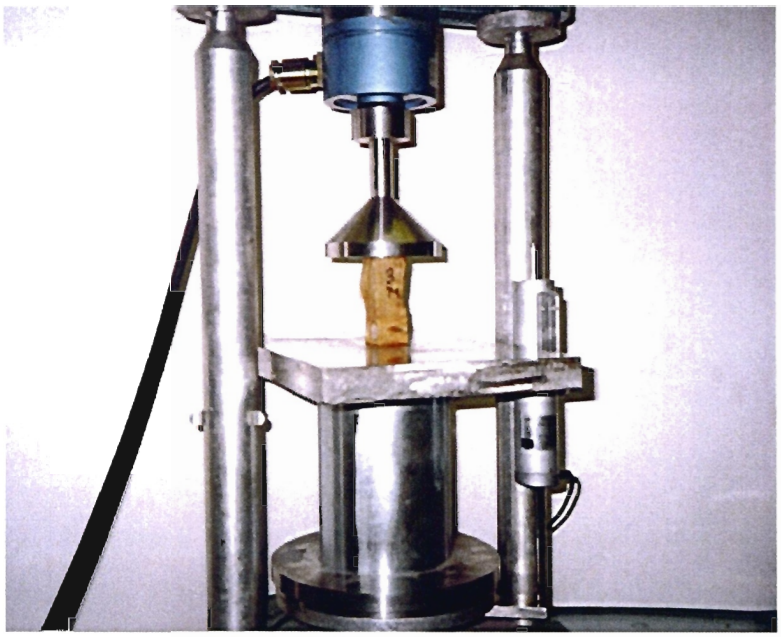
Kuva 4.7. Valomikroskooppikuvia kasvukairanäytteiden pinnasta. Vasemmalla ylhäällä tervettä lahoisuusluokan 0…1 puuta. Ylhäällä oikealla lahoisuusluokan 2 puuta. Alhaalla vasemmalla lahoisuusluokan 3 puuta. Alhaalla oikealla lahoisuusluokan 4 puuta, jossa nähtävissä rihmastoa.

Mikroskooppitarkastelujen lisäksi voidaan käyttää apuna kosteus- ja tiheysmäärityksiä sekä suuriin koepaloihin prismapuristuskokeita. Lujuusmäärityksiä varten paalusta tulisi saada vähintään pala- tai kiekkonäyte, joista tarvittavat koekappaleet voidaan laboratoriossa sahata (*kuva 4.8*) /15/. Näytteistä määritetään puun puristuslujuus syyn suuntaan ja vastaava kimmomoduuli. Kuvassa *4.9* on esitetty tässä tutkimuksessa käytetty prismapuristuskoelaitteisto.

Prismojen murtolujuus tulisi määrittää jokaisessa poikkileikkauksen prismassa samalla kokoonpuristuvuuden arvolla, jotta tulos vastaisi mahdollisimman tarkasti poikkileikkauksen toimintaa todellisessa kuormitustilanteessa. Toisaalta tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella ei ollut suurestikaan merkitystä otettiinko puristuslujuudeksi koko poikkileikkauksen puristuslujuutta määritettäessä prisman maksimimurtolujuus vai mitattiinko puristuslujuus kaikissa prismoissa samalla kokoonpuristuvuuden arvolla. Laskettaessa varmuuskerrointa murtoa vastaan, näiden kahden eri laskentatavan eroksi tuli noin yksi kymmenys.



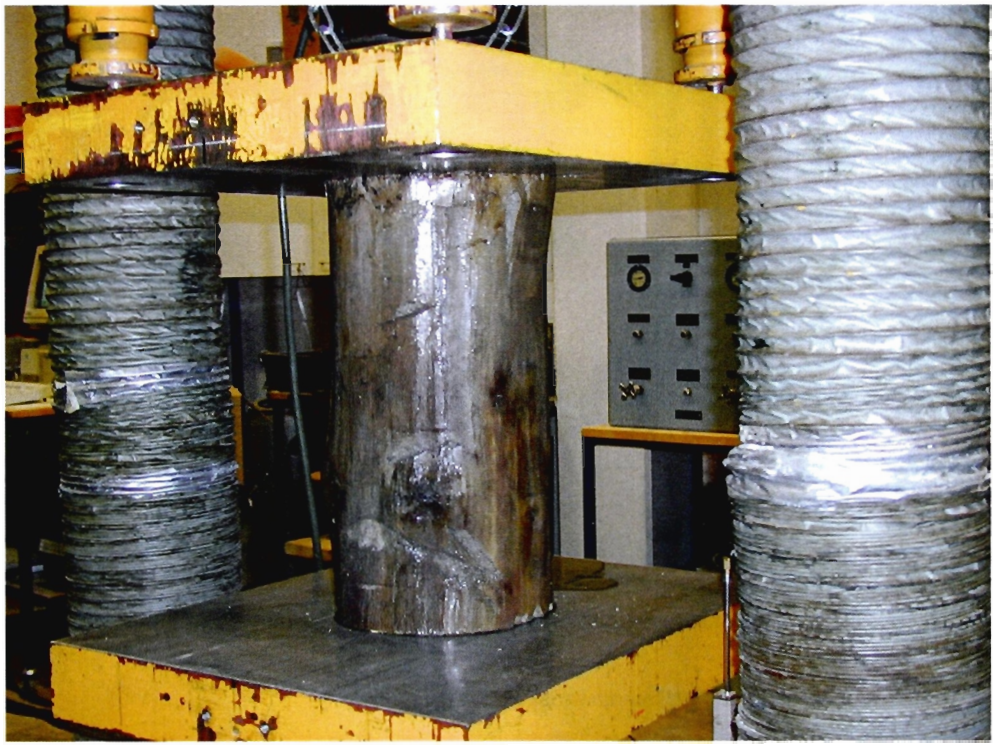
Kuva 4.8. Paalunäytteiden tutkimiseksi otettavat puristuslujuuskoekappaleet /15/.



Kuva 4.9. TTKK:n prismapuristuskoelaitteisto.

Erittäin vaativissa kohteissa pyritään aina täysmittakaavaisiin paalun puristuskokeisiin, jolloin voidaan varmistaa muilla menetelmillä määritettyjen paalun kantokykyjen paikkansapitävyys ja varmuustaso. Täysmittakaavaisessa puristuskokeessa käytettävän näytteen pituuden tulee olla vähintään 0,5 m ja korkeuden noin kaksi kertaa näytteen halkaisijan suuruinen. Yleensä näyte voidaan ottaa rakenteesta ilman ylimääräistä perustusten tukemista. Näytteen poistamisen jälkeen paalu korjataan kiilaamalla se esimerkiksi I-palkilla perustuksiin ja valamalla palkin ympärille betonikaulus /15/. Tässä tutkimuksessa käytetty puristuslaitteisto on esitetty kuvassa *4.10*.

Vesinäytteistä laboratoriossa tutkitaan pH, kemiallinen koostumus ja mikrobipitoisuus /31/.



Kuva 4.10. TTKK:n puristuskoelaitteisto kokonaisille paalunäytteille.

4.4 Ainettarikkomattomat menetelmät

Ainettarikkomattomilla menetelmillä, NDT-menetelmillä (nondestructive testing), tarkoitetaan menetelmiä, joilla saadaan selvitettyä puun vikojen kuten oksien ja lahon esiintyminen tutkittavan puun poikkileikkauksessa puuta rikkomatta. Ne perustuvat yleensä joko äänen, ultraäänen, mikroaaltojen, röntgenaaltojen tai neuronien käyttöön /15/.

Teknillisen korkeakoulun radiotekniikan laboratorion kehittämä puututka käyttää hyväkseen radioaaltoja. Laitteisto perustuu 900 MHz taajuudella toimivaan pulssitutkaan. Mitattaessa tutkan antennia kuljetetaan puun pintaa pitkin ja laitteisto havainnoi mahdollisen lahon ja terveen puun rajapinnan. Laitteiston tarkkuus ei vielä riitä puupaalujen tutkimiseen, eikä lahoamisen rajaa voida mahdollisesti selvittää, koska puupaalujen tasainen pinnasta tapahtuva lahoaminen ei aiheuta paaluun selvää rajapintaa. Mutta jatkossa laitteiston kehittyessä se voi tulla merkittäväksikin puuperustusten lahoisuuden tutkimisvälineeksi.

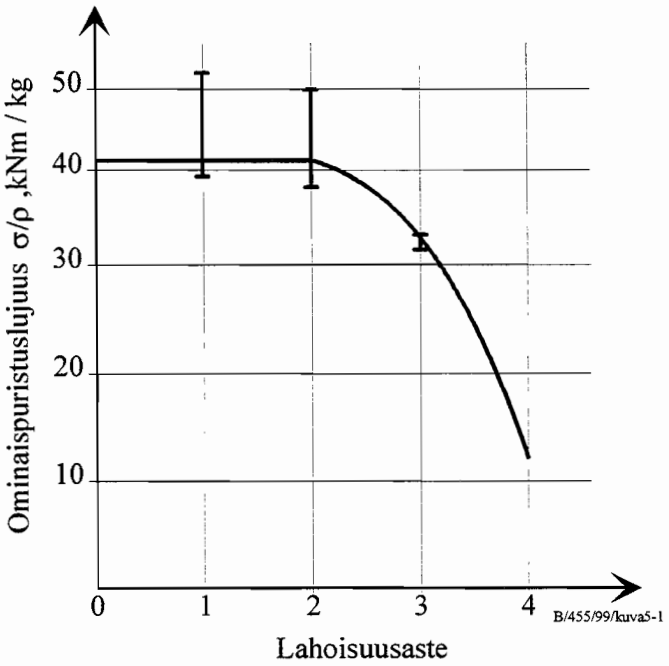
Ainettarikkomattomilla menetelmillä kyetään havaitsemaan lahon esiintyminen puussa. Esimerkiksi ultraäänimenetelmällä rusko- ja valkolahottajasienien aiheuttaman lahon esiintymistä on tutkimusten mukaan vaikea havaita kun taas katkolaho ja bakteerien aiheuttamat syöpymät kyettiin havaitsemaan.

Tällä hetkellä näyttää siltä, ettei ainetta rikkomattomien menetelmien soveltaminen puupaalujen lahoisuuden ja kantokyvyn arviointiin ole käytännössä vielä mahdollista. Pelkkä lahon havaitseminen ei puupaaluja tutkittaessa riitä, vaan tarvitaan tietoa myös lujuuksista ja paalun kantokyvystä. Mitä tahansa ainettarikkomatonta menetelmää käytettäessä tarvitaan suuri määrä vertailutietoa ja puupaaluista on mahdotonta saada selville terveen puun poikkileikkauksen vertailuarvoa, johon osittain lahonnutta poikkileikkausta voisi verrata. Menetelmien erottelukyky on vielä käytännössä heikko, eikä lahon rajapintaa saada riittävällä tarkkuudella näkyviin. Puupaaluissa lahoaminen tapahtuu pinnalta alkaen, eikä selvää lahon ja terveen puun rajaa ole yleensä havaittavissa. Lisäksi laitteiden hinnat ovat korkeita suhteellisen pieneen käyttömäärään verrattuna /15/.

5. Lahonneen puumateriaalin lujuuden arvioiminen

5.1 Puristuslujuus ja lahoisuus

Tutkimusten mukaan on havaittu, että lahoisuusasteilla 1 ja 2 puun ominaispuristuslujuus ei vielä ole alentunut. Lahoisuusasteella 3 ominaispuristuslujuus alenee noin 20 % alkuperäisestä ja lahoisuusasteella 4 se on enää noin 30 % alkuperäisestä (*kuva 5.1*) /9/.



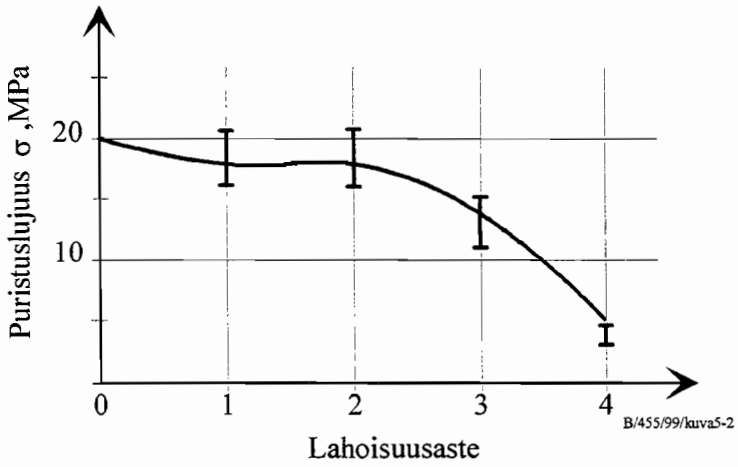
Kuva 5.1. Puun lahoisuusasteen ja ominaispuristuslujuuden välinen riippuvuus. Janat kuvaavat vaihteluväliä /9/.

Lähteessä /9/ käytetty ominaispuristuslujuus tarkoittaa puristuslujuuden ja tiheyden suhdetta σ/ρ (kNm/kg), jolla on pyritty eliminoimaan näytteiden tiheydestä johtuvaa vaihtelua. Tämä ominaispuristuslujuus ei tarkoita puun puristuslujuuden ominaisarvoa.

Puun lahoaminen alkaa pintapuusta ja puun sisäosien puristuslujuus säilyy vielä ennallaan. Lahoamisen edetessä puun toimiva leikkauspinta-ala pienenee, jolloin puupaalun rakenteellinen kantokyky heikkenee nopeasti. Lahoaminen on voimakkainta puupaalujen yläosassa ja se vähenee syvemmälle hapettomampiin olosuhteisiin mentäessä (vrt. *kuva*

3.13). Tällöin puristuslujuuden on havaittu kasvavan keskimäärin 3,2 MN/m^2 paalumetriä kohden, kunnes se saavuttaa tietyn vakioarvon /9/.

Lahoisuusasteen ja puristuslujuuden välistä riippuvuutta tutkittaessa on saatu vastaavia tuloksia. Eri lahoisuusasteita vastaavien puristuslujuuksien keskiarvojen perusteella puristuslujuuden alentuma lahoisuusasteilla 1 ja 2 on noin 10 % alkuperäisestä arvosta. Lahoisuusasteella 3 aleneminen on noin 30 % ja lahoisuusasteella 4 puristuslujuudesta on jäljellä enää noin 20 % (*kuva 5.2*) /9/.



Kuva 5.2. Lahoisuusasteen ja puristuslujuuden välinen riippuvuus. Janat kuvaavat vaihteluväliä /9/.

Ruotsalaisissa tutkimuksissa on havaittu, että lahoisuusasteen ja puristuslujuuden välistä yhteyttä on erittäin vaikea määritellä, eikä tällä hetkellä ole luokitusmenetelmiä, joita voitaisiin käyttää hyvänä pohjana lahoisuusasteen kuvaamiseen /19/.

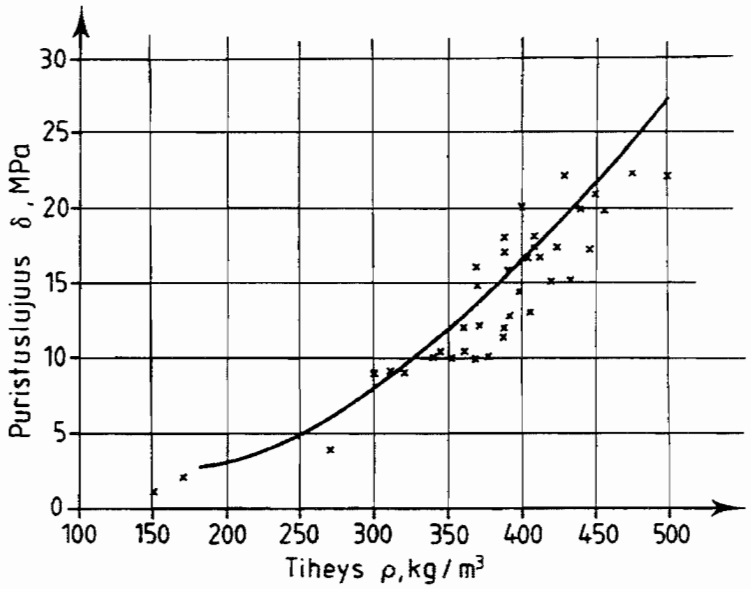
Paalujen vanheneminen itsessään ei näytä vaikuttavan paalujen lahoamiseen kovin merkittävästi, vaan pintapuun ulko-osa näyttäisi suojaavan sisempiä osia ja sydänpuuta. 1500-luvulta peräisin olevissa paaluissa on todettu sydänpuulla olevan yhtäläinen puristuslujuus kuin 1898 maahan lyödyillä paaluilla pintapuun ollessa eriasteisesti lahonnutta. Sydänpuu näyttäisi säilyvän melkein muuttumattomana lahosta. Myös puristuslujuuden ja vesipitoisuuden sekä tiheyden välinen vuorosuhde näyttää pysyvän muuttumattomana paalujen vanhenemisesta huolimatta /19/.

5.2 Tiheyden ja vesipitoisuuden vaikutus

Puun puristuslujuuden ja vesipitoisuuden sekä puristuslujuuden ja tiheyden välillä on havaittu selvä riippuvuus.

Ruotsissa on tutkittu pohjaveden alapuolella olevien paalujen materiaalin lujuutta. Tutkittu paalumateriaali oli mäntyä. Tutkimusaineistosta Lundström on saanut funktion (5.1), joka esittää paalujen puristuslujuuden ja tiheyden välistä riippuvuutta. Kuvassa *5.3* kuvaaja on esitetty havaintoaineistoon sovitettuna /19/.

$$\sigma = -1{,}11 - 0{,}0056 * \rho + 0{,}00012 * \rho^2 \qquad (5.1)$$



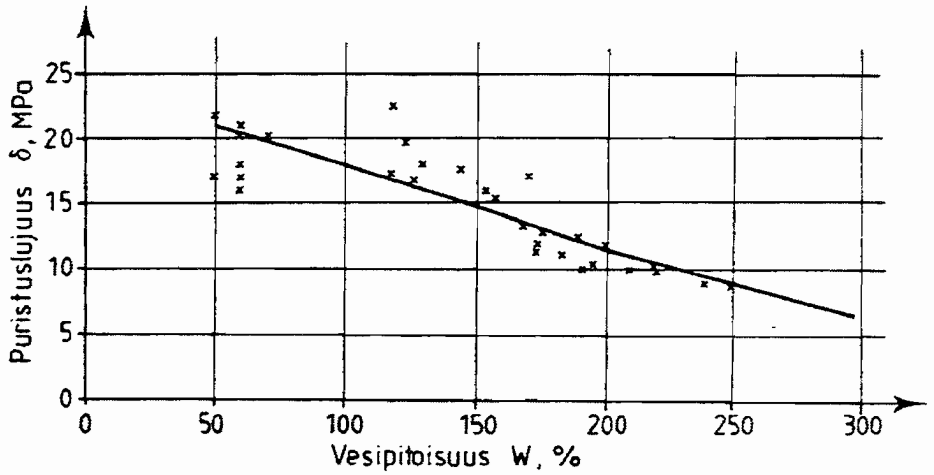
Kuva 5.3. Paalujen prismapuristuslujuuden ja tiheyden välinen vuorosuhde Lundströmin mukaan /19/.

Lähteen /22/ mukaan puristuslujuuden ja tiheyden normaaliarvot terveellä puulla sen kosteuspitoisuuden ollessa yli 35 % ovat männyllä 17…22…30 MN/m^2, kun tiheys on 400…500…600 kg/m^3 sekä kuusella 15…20…26 MN/m^2, kun tiheys on 320…450…500 kg/m^3.

Samassa yhteydessä Lundström on tutkinut myös puristuslujuuden riippuvuutta vesipitoisuudesta, jolloin kuvaajaksi on saatu funktio (5.2). Kuvaaja on esitetty kuvassa *5.4.*

$$\sigma = 100 / [4{,}5 + (w / 100)^2] , \qquad (5.2)$$

missä w on kosteuspitoisuus [%].



Kuva 5.4. Paalujen vesipitoisuuden ja puristuslujuuden välinen vuorosuhde Lundströmin mukaan /19/.

Myös vesipitoisuuden ja tiheyden välillä on puupaaluissa selvä riippuvuus, jota kuvaa Lundströmin yhtälö (5.3):

$$\rho = 458 - 0{,}539 * w \qquad (5.3)$$

6. Puupaalun rakenteellinen ja geotekninen kantavuus

6.1 Terveen paalun kantokyky

Vanhoille puupaaluille on sallittu talonrakennuksessa yleensä enintään 5 MN/m^2 kärkikantavuus. Kantavuutta on saatettu vähentää paalun pituuden kasvaessa nurjahduksen estämiseksi /24/. Nykyisten Pohjarakennusohjeiden mukaan puupaalujen rakenteellista kantavuutta laskettaessa noudatetaan voimassa olevia puuta ja puurakenteita koskevia määräyksiä ja ohjeita sekä Lyöntipaalutusohjeita /30/. Lyöntipaalutusohjeissa LPO-87 annettu sallittu geotekninen kantavuus puupaaluille paalutusluokassa III on 5 MN/m^2 /28/.

Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan B10 mukaiseksi pyöreän puutavaran ominaispuristuslujuudeksi puupaaluille tulevissa olosuhteissa saadaan 12,6 MN/m^2. Lujuuden osavarmuuskertoimen ollessa 1,3 saadaan lujuuden laskenta-arvoksi 9,7 MN/m^2. Pyöreä puutavara kuuluu luokkaan T30, jolloin sen ominaispuristuslujuus syiden suunnassa on 21 MN/m^2. Puupaaluille tulevan kuorman aikaluokka on A ja kosteusluokka 4 paalujen ollessa välittömästi veden vaikutuksen alaisena.

Männyn lujuudesta tehtyjen eräiden laboratoriotutkimusten perusteella männyn puristuslujuuden keskiarvoksi on saatu 39 MN/m^2 15 % kosteudessa ja 18 MN/m^2 vedessä olevalle puulle /24/.

Mikäli paalutuskarttoja, kuormitustietoja tai muita dokumentteja ei ole saatavilla, tietoa voi hakea tutkittavan rakennuksen aikakauden suunnitteluohjeista, artikkeleista tai muusta kirjallisuudesta. Myös vastaavana aikakautena rakennettujen muiden rakennusten suunnitelmista voi saada viitteitä muun muassa sallituista kuormituksista ja käytetyistä rakennetyypeistä.

Ikäläinen ja Similä (1910) ovat antaneet taulukon *6.1* mukaiset kuormitukset kantavalla pohjalla seisoville jatkamattomille paaluille. Siinä paalulle tulevaa kuormitusta on pienennetty paalupituuden kasvaessa ilmeisesti nurjahdusvaaran eliminoimiseksi.

Helsingin Mariankatu 14:n paalukartassa vuodelta 1910 (*kuva 6.1*) on esitetty taulukon *6.2* mukaiset suunnittelukuormitukset, jolloin paaluille on sallittu enintään 5 MN/m^2 kuormitus.

Kuvassa *6.2* on esitetty paalujen varmuuskerroin murtumista vastaan yllämainituissa tapauksissa. Varmuuskerroin vaihtelee välillä 2,5…18 paalupituuden mukaan.

Taulukko 6.1. Ikäläisen ja Similän ohjeet paalulle sallittavista kuormista vuodelta 1910 /13/.

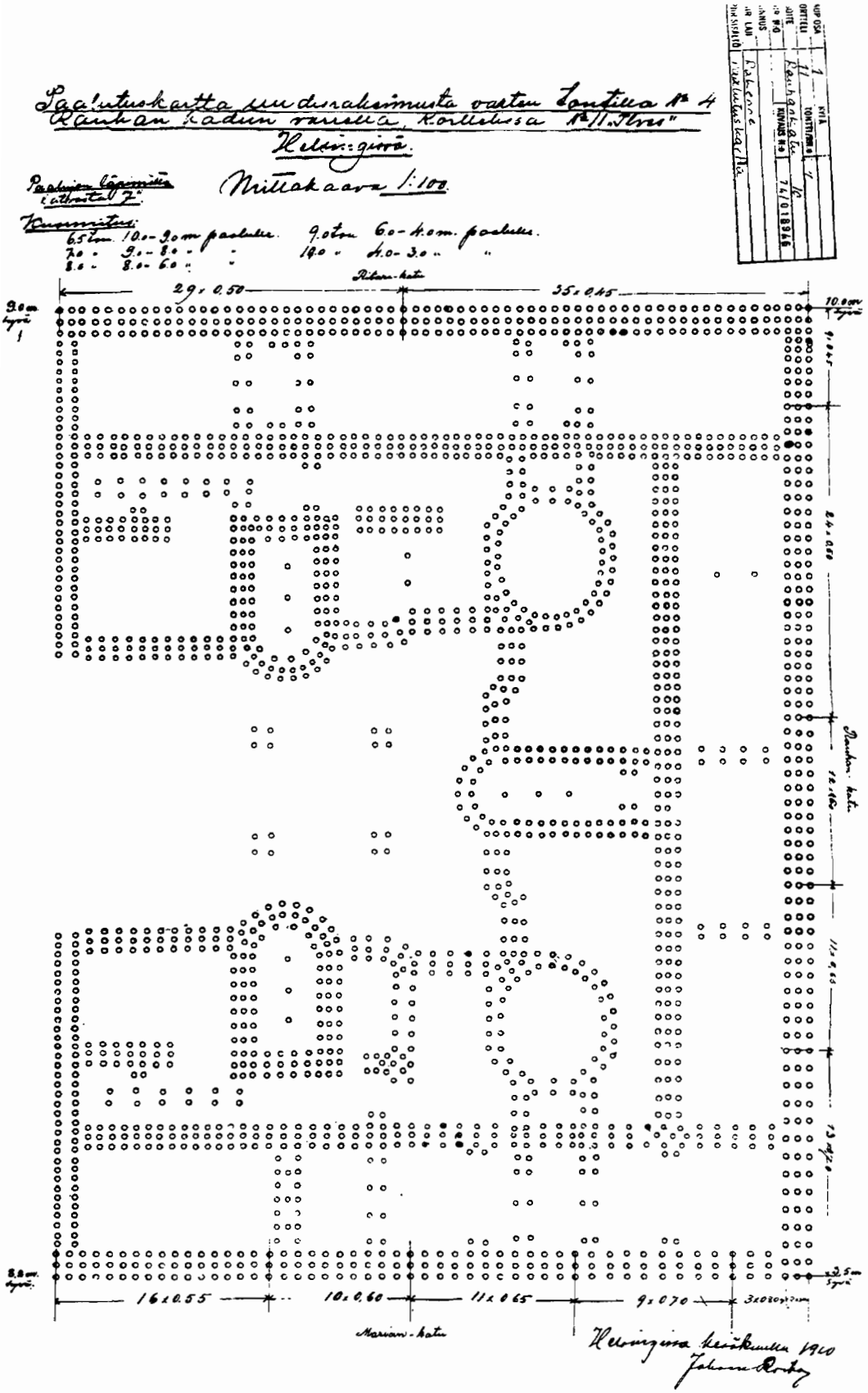
D/L	**Sallittu kuormitus** (kg/cm^2)
1/6	50
1/12	40
1/24	30
1/36	20
1/48	10

D = paalun halkaisija
L = paalun pituus

Taulukko 6.2. Mariankatu 14 paalutuskartassa annetut suunnittelukuormitukset /24/.

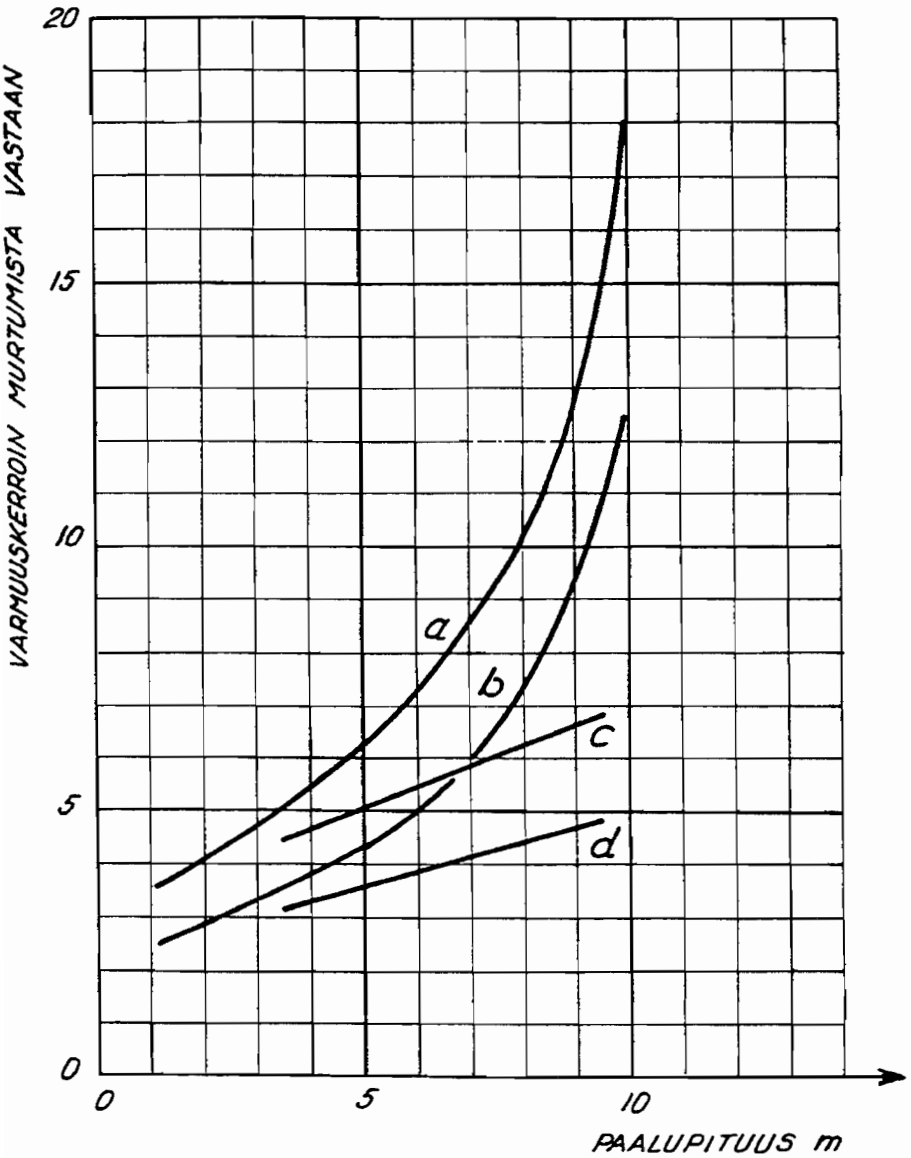
L (m)	**Kuormitus paalua kohden** (ton)	**Kuormitus paalua kohden** (MN)	**Kuormitus** (MN/m^2)
3 – 4	10,0	0,10	4,0
4 – 6	9,0	0,09	3,6
6 – 8	8,0	0,08	3,2
8 – 9	7,0	0,07	2,8
9 – 10	6,5	0,065	2,6

Käytännössä puupaaluille tulevat kuormat tulee aina tarkastaa ylärakenteen kuormien laskennan avulla.



Kuva 6.1. Mariankatu 14 paalutuskartta /24/.

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto



Kuva 6.2. Paalun varmuus murtumista vastaan, kun
a) puun puristuslujuus 18 MN/m^2, kuormitus Ikäläisen ja Similän mukaan
b) puun puristuslujuus 12,6 MN/m^2, kuormitus Ikäläisen ja Similän mukaan
c) puun puristuslujuus 18 MN/m^2, kuormitus Mariankatu 14 paalukartan mukaan
d) puun puristuslujuus 12,6 MN/m^2, kuormitus Mariankatu 14 paalukartan mukaan /24/.

6.2 Osittain lahonneen paalun kantokyky

Sydänpuun lahonkestävyys on noin kaksinkertainen verrattuna pintapuuhun /37/. Se säilyttää lujuutensa vaikka pintapuu on jo täysin lahoa. Jatkamattomat paalut on lyöty maahan latva alaspäin. Mitoituksen perustuessa latvaläpimittaan paalujen yläpäillä on ylimääräistä varmuutta lahoamista vastaan niiden ollessa poikkipinnaltaan latvaa huomattavasti suurempia.

Jatkettujen paalujen liitokset taas on yleensä tehty runkojen tyvipäät vastakkain, jolloin mitoittava latvaosa on jäänyt ylöspäin. Tässä tapauksessa paalun osittainenkin lahoaminen aiheuttaa kantokyvyn alenemisen.

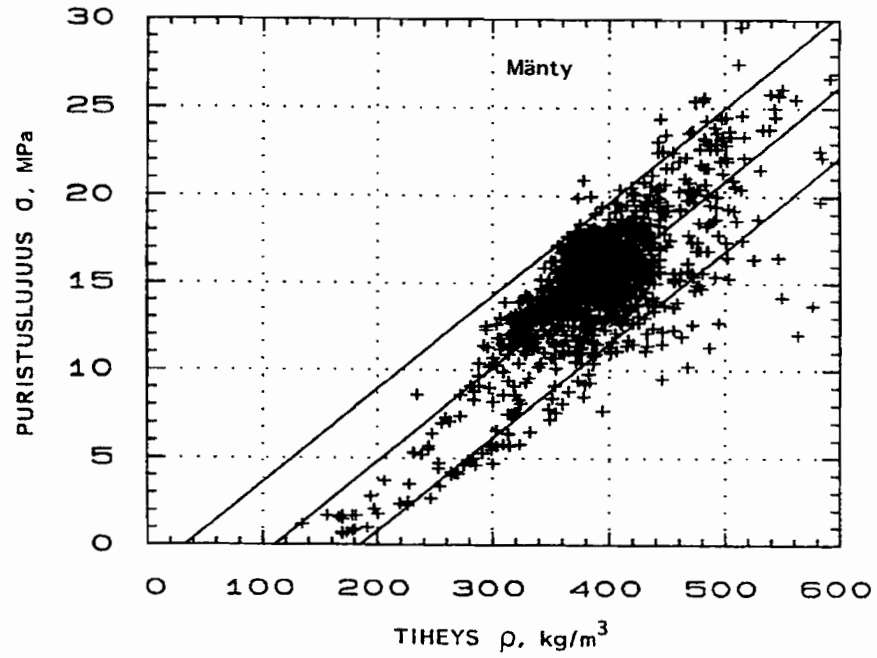
Useimmiten osittain yläpäästään lahonneet paalut kantavat yläpuolisista rakenteista aiheutuvat kuormat ilman painumia. Peruskorjauksen tai käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä paaluille tulevat kuormitukset saattavat lisääntyä, eikä osittain lahonneiden paalujen kantavuus enää riitä /9/.

Lahoisuusluokissa 0, 1 ja 2 lujuuden pieneneminen on vähäistä, joten arvioitaessa osittain lahonneen puupaalun kantavuutta voidaan voimakkaasti lahonneen, lahoisuusluokkien 3 ja 4, puun osuus poikkileikkauksesta jättää huomioimatta. Jäljelle jääneelle poikkileikkauspinnalle voidaan käyttää joko puun normaalia puristuslujuutta tai prismapuristuskokeista saatua puristuslujuuden arvoa /15/.

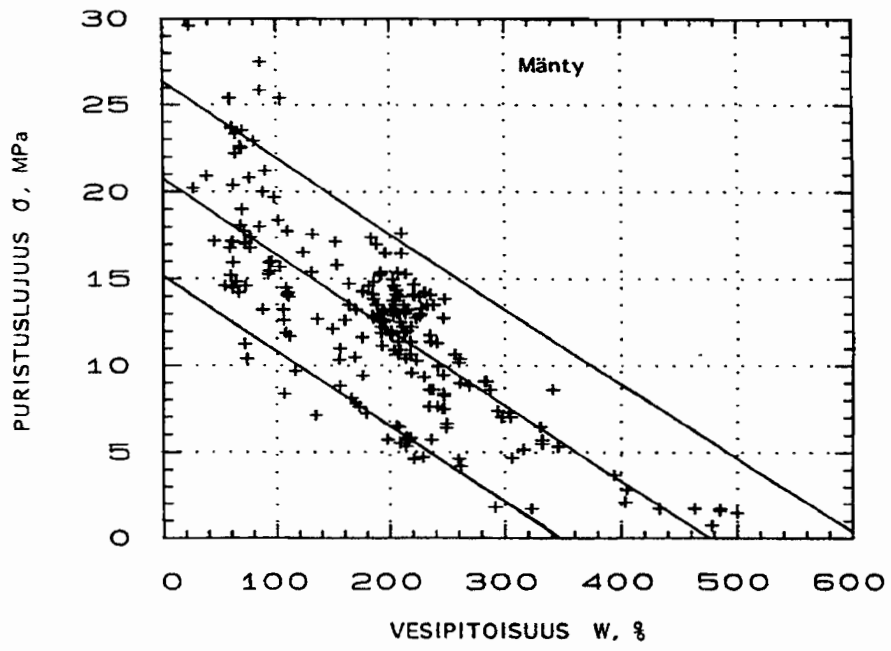
Jos puristuslujuutta ei ole määritetty, mutta vesipitoisuus tai tiheys on, voidaan käytännössä otaksua, että puulla on riittävän suuri puristuslujuus normaalikuormille, kun vesipitoisuus on alle 200 % ja tiheys yli 350 kg/m^3 /9, 19/.

Arvioitaessa osittain lahonneen puupaalun puristuslujuutta tiheys- ja vesipitoisuusmääritysten perusteella, voidaan käyttää kuvien *6.3* ja *6.4* männyn havaintoaineistoon perustuvia kuvaajia. Kuvaajissa on esitetty regressiosuoralle lasketut 90 % luottamusvälit, jolloin 95 % havainnoista sijoittuu luottamusvälin alarajan yläpuolelle.

Kuusen puristuslujuus samalla vesipitoisuuden ja tiheyden arvolla on useimmiten suurempi kuin männyllä, joten käytettäessä käyrästöjä myös kuusimateriaalille ovat saatavat puristuslujuuden arvot varmalla puolella /15/.



Kuva 6.3. Männyn havaintoaineiston 90 % luottamusvälit tiheyden ja puristuslujuuden suhteen /15/.



Kuva 6.4. Männyn havaintoaineiston 90 % luottamusvälit vesipitoisuuden ja puristuslujuuden suhteen /15/.

Jos vanhan puupaalun sallittua kuormitusta arvioidaan Puurakenteiden suunnitteluohjeiden RIL 120 /26/ mukaisesti, käyttäen siinä esitettyjä osavarmuuskertoimia ja aika- ja kosteusluokkien korjauskertoimia, johtaa arviointi mitä todennäköisimmin päällekkäiseen varmuuteen ja sitä kautta alhaisiin paalukuormiin. Materiaalin osavarmuuskerrointa ei kuitenkaan voida kokonaisuudessaan jättää pois, sillä sen avulla otetaan huomioon materiaaliominaisuuksissa esiintyvä hajonta, määritystavoissa ja laskentamenetelmissä esiintyvät virheet sekä henkilöturvallisuuteen vaikuttavat tekijät. Toisaalta esimerkiksi kuvien 6.3 ja 6.4 perusteella tehtävät määritykset perustuvat paaluista tehtyihin havaintoihin, jolloin materiaalin lujuudesta on jo olemassa todellinen käsitys. Prismapuristuskokeissa ja puristettaessa näyte kokonaisena näytteiden kosteus vastaa puupaalujen kosteutta todellisessa ympäristössä, joten kosteusluokan huomioon ottaminen materiaalin lujuutta heikentävänä tekijänä on tarpeetonta. Myös aikaluokan korjauskertoimella huomioon otettavat materiaalin lujuuden muutokset ovat todennäköisesti jo tapahtuneet puupaalujen oltua rakenteessa kuormitettuina yleensä kymmeniä vuosia /15/.

Vanhan puupaalun sallittua kuormitusta laskettaessa muutoin kuin puristuskokeiden perusteella lienee selvintä käyttää kokonaisvarmuuskerrointa, jolla paalulle arvioitu murtokuorma jaetaan. Varmuuskertoimen suuruutta määrättäessä tulee ottaa huomioon kohteen asettamat vaatimukset, paalun kantokyvyn määrittämistapa ja sen tarkkuus sekä etenkin kohteessa suoritettujen tutkimusten laajuus /15/. Lisäksi tulisi pyrkiä tekemään puristuskokeita kokonaisille paalunäytteille, jolloin paalujen rakenteellisesta kantokyvystä saadaan mahdollisimman todellinen kuva.

6.3 Vanhojen puupaalujen pituuden määrittäminen

Mikäli tutkittavassa kohteessa tullaan suorittamaan peruskorjaus, jonka yhteydessä kuormitukset puupaaluille lisääntyvät, täytyy puupaalujen rakenteellisen kantavuuden lisäksi tarkistaa myös niiden geotekninen kantavuus. Geotekninen kantavuus saatetaan joutua tarkistamaan myös, jos rakennuksessa tapahtuu painumia, jotka eivät johdu rakenteellisen kantavuuden heikentymisestä. Vanhoista puupaaluperustuksista ei useinkaan ole olemassa paalutuspöytäkirjoja, joista paalujen kärkien syvyydet saataisiin selvitettyä.

Tällöin on tärkeää saada tieto puupaalujen todellisista pituuksista ja verrata niitä pohjatutkimuksien antamiin tietoihin kovan pohjan sijainnista.

Vanhoilla pohjatutkimusmenetelmillä, mikäli pohjatutkimuksia ylipäätään on tehty, ei kovan pohjan sijaintia ole aina voitu riittävän tarkasti selvittää. Lisäksi käsivoimin tai höyrykoneella toimivalla paalutuskalustolla ei todennäköisesti aina ole pystytty lyömään paalua riittävän syvälle. Erityisesti iskuaallon vaimeneminen jatkettujen paalujen jatkoksissa on heikentänyt niiden tunkeutumista kantaviin maakerroksiin. Näin ollen puupaalulle sallitun geoteknisen kantavuuden mukaan laskettu paalukuorma saattaa olla liian suuri /15/.

Paalun pituus voidaan määrittää iskuaaltoteoriaa soveltavilla high strain tai low strain – menetelmillä. Näissä menetelmissä paalun päähän kohdistetaan lyönti, jonka aiheuttaman puristusaallon paalun yläpäästä sen kärkeen ja takaisin etenemiseen kulunut aika mitataan. Olemassa olevien perustusrakenteiden tutkimisessa high strain –menetelmä ei ole sovelias siinä tarvittavan suuren iskuenergian vuoksi. Low strain –menetelmässä iskuenergian ei tarvitse olla niin suuri. Low strain –menetelmää voidaan soveltaa PDA- ja tärinämittauksissa /15/.

Iskuaallon etenemisnopeuden määrittäminen osittain lahonneessa puupaalussa on vaikeaa. Luotettavasti se voidaan määrittää vain vetämällä tutkittavasta kohteesta paaluja ylös ja mittaamalla iskuaallon etenemisnopeus niissä /15/. Useinkaan tämä ei ole mahdollista ahtaissa työmaaolosuhteissa ja tutkittavien paalujen sijaitessa olemassa olevan rakenteen alla. Lisäksi paalujen mahdolliset jatkokset vaikeuttavat paalun todellisen pituuden mittaamista.

Tärinämittarin kiihtyvyysanturit ovat herkkiä lyönnin voimakkuuden vaihteluille ja liian koville lyönneille. Toisaalta herkillä antureilla on helppo havaita kärjestä heijastuva heikko impulssi. Laitteet ovat paristo- ja akkukäyttöisiä, jolloin yhden henkilön on mahdollista tehdä mittaus esimerkiksi koekuopassa /15/.

PDA:lla tehtävä mittaus ei ole yhtä herkkä lyönnin voimakkuuden vaihteluille kuin tärinämittarilla tehtävä mittaus. PDA-mittauksiin tarvittavan lyönnin aikaansaamiseksi on paalun pään yläpuolella oltava riittävästi tilaa ja paalu on katkaistava anturan alta.

Iskuaallon aiheuttamista puupaalun kylkeen vinosti lyödyn terästangon välityksellä on myös kokeiltu, mutta paaluun samalla syntyvä poikittainen värähtely häiritsee vastaanotettavaa signaalia /15/.

Molemmilla yllä esitetyillä menetelmillä saadaan määritetyksi iskuaallolta paalun kärkeen ja takaisin kulkemiseen kuluva aika. Iskuaallon etenemisnopeutena paalun pituutta laskettaessa joudutaan käyttämään keskimääräistä iskuaallon etenemisnopeutta 3600…4000 m/s tai arvioitava etenemisnopeus kohteittain ja paaluittain. Etenemisnopeuden arvioinnissa prosentuaalinen virhe aiheuttaa samansuuruisen suhteellisen virheen paalun pituudessa /15/.

7. Puupaalujen jäljellä olevan käyttöiän arviointi

Puupaalujen nykyhetken kunnon arvioinnin sisältäessä useita epävarmuustekijöitä, on paalujen jäljellä olevan käyttöiän arviointi käytännössä erittäin vaikeaa. Muun muassa puupaalujen alkuperäisiä lujuusominaisuuksia ei tunneta, jolloin vertailukohtaa lujuuden heikkenemiselle on vaikea määrittää. Mikäli olosuhteet, kuten orsi- tai pohjavedenpinnan korkeusvaihtelut ja maaperän saastuneisuus, tunnettaisiin paalujen maahanlyönnin ja tarkasteluajankohdan väliseltä ajalta tarkasti ja oletettaisiin olosuhteiden jatkossa pysyvän samanlaisina, olisi paalujen lahoamisnopeuden arviointi kohtuullisella tarkkuudella mahdollista.

Pitkällä aikavälillä tapahtuvaa lahoamista voidaan ennakoida tarkastamalla paalujen kunto noin 3...5 vuoden välein samalla seuraten myös ympäristöolosuhteiden kehitystä /15/. Tällöin tutkimukset kohdistetaan aiemmin tutkittuihin ja dokumentoituihin puupaaluihin. Lisäksi tutkimuksen yhteydessä kannattaa tehdä mahdollisuuksien mukaan myös uusia koekuoppia aikaisemmin tutkimattomiin paikkoihin vertailutietojen saamiseksi. Erityisen tärkeää on tehdä koekuoppia myös rakennuksen sisätiloihin, sillä rakennuksen alla lämpimissä olosuhteissa olevat paalut voivat olla huonommassa kunnossa kuin ulkoseinälinjan paalut. Mikäli ympäristöolosuhteet tarkasteluaikana pysyvät lähes muuttumattomina, voidaan paalujen kunnon kehitystä näissä olosuhteissa arvioida.

Merkittävä lahoaminen johtuu yleensä juuri ympäristöolosuhteiden muutoksista, joten niiden seuranta on tärkeää. Olosuhteiden muutoksia paikallisesti voivat aiheuttaa muun muassa viemärilinjojen vuodot ja aikaisemmin kylmänä tilana olleen kellarin käyttöönotto lämmitettäväksi tilaksi. Ympäristöolosuhteiden muutoksista saadaan tietoa säännöllisellä orsi- tai pohjavesitarkkailulla. Vedenkorkeuksien mittaamisen lisäksi veden laatua tulee tarkkailla laboratoriotutkimuksin.

Näytteitä puupaaluista tulee ottaa mahdollisimman kattavasti. Puupaalujen kunnon arvioinnissa eri tutkimusmenetelmät tukevat toisiaan, eikä jäljellä olevaa käyttöikää tulisi arvioida pelkästään yhteen määritystapaan pohjautuen. Kasvukairanäytteiden lisäksi on hyvä ottaa myös palanäytteitä prismapuristuskokeita varten ja puristettavaksi kokonaisena. Kasvukairanäytteitä tulisi ottaa useampia paalua kohden eri korkeustasoilta ja usein

samalta korkeustasolta kannattaa ottaa ristikkäisiä näytteitä, jotta puupaalun lahoisuudesta ja sen kehittymisestä saadaan mahdollisimman kattava kuva. Puun ominaisuuksien vaihtelu paalun poikkileikkauksessa saattaa olla huomattavaa.

Puupaalujen jäljellä olevan käyttöiän arviointiin vaikuttaa varmuus millä rakennuksen perustusten halutaan toimivan. Sallitaanko yläpuolisille rakenteille pieniä epätasaisesta painumisesta johtuvia halkeamia vai onko kyseessä mahdollisesti arvokas säilytettävä rakennus, jonka puupaalutus on korjattava ennen vaurioiden ilmenemistä. Korjausajankohtaan vaikuttaa myös rakennuksen muu kunto. Mikäli paalutuksen yläpuoliset rakenteet ovat tukevia ja ne tasaavat epätasaisesta painumisesta johtuvia kuormia vaurioitumatta, ei yksittäisen puupaalun kantavuuden heikkeneminen aiheuta vielä vaaraa koko rakennukselle. Mikäli tällöin havaitaan suurimman osan puupaaluista olevan ainakin kohtuullisessa kunnossa on korjauspäätöstä mahdollista lykätä sopivampaan ajankohtaan.

Puupaalujen käyttöikä tulisi arvioida siten, että korjaustoimenpiteet käyttöiän päättyessä ovat vielä mahdollisia. Perustusten korjaustöistä aiheutuu menetelmästä riippuen yleensä lisäkuormituksia perustusrakenteille ja puupaaluperustuksen tulisi olla vielä siinä kunnossa, ettei korjauksen aikana aiheuteta vaurioita yläpuolisille rakenteille.

Vanhojen puupaalujen säilyttämispäätöstä tehtäessä tulee puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn ja geoteknisen kantavuuden olla tarkasteluhetkellä riittäviä. Toiseksi paaluilla tulee olla riittävä lahoamisvara seuraavaan peruskorjaukseen tai rakennuksen käyttöajan päättymiseen. Lisäksi edellytetään, että paalut ovat riittävästi suojaavan vedenpinnan alapuolella tai että lahoaminen muuten estetään /15/.

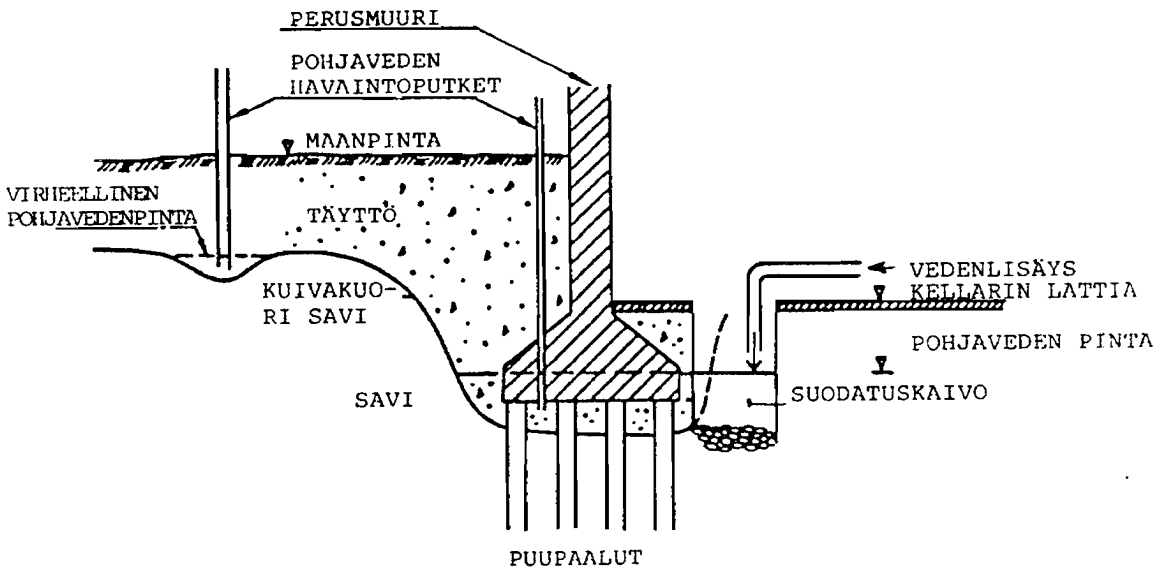
8. Lahoamisen estämismenetelmät

8.1 Pohjavedenpinnan korkeuden säätely

Pohjavesisäätelyllä tarkoitetaan vanhojen puuperustusten yhteydessä veden säännöllistä lisäämistä orsi- tai pohjavedenpinnan nostamiseksi paalujen ympärillä. Imeyttäminen käsittää tavallisesti paikallisen alueen, esimerkiksi yksi tai kaksi kiinteistöä /3/.

Pohjavesisäätely toteutetaan asentamalla puupaaluihin yhteydessä olevaan kaivantoon suodatuskaivo. Kaivo voidaan tehdä joko rakennuksen ulkopuolelle tai sen kellaritiloihin. Vettä lisätään kaivoon niin, että pohjavedenpinta pysyy halutulla tasolla, yleensä vähintään 0,5 m paalujen katkaisutason yläpuolella. Pohjavedenpinnan tarkkailua varten rakennuksen ympärille asennetaan havaintoputkia, joilla varmistetaan vedenpinnan nousu koko rakennuksen alueella. Putkien päiden on sijaittava paalujen päitä ympäröivässä maakerroksessa, jotta orsi- tai pohjaveden korkeudesta saadaan oikea kuva (*kuva 8.1*) /3/.

Aluksi veden lisääminen voidaan tehdä manuaalisesti ja mikäli vedenpinnan nosto näyttää onnistuvan, voidaan lisääminen automatisoida asentamalla kaivoon tasonilmaisin, joka laukaisee veden lisäyksen pohjavedenpinnan alennuttua alle minimitason. Veden pinnan noustua tavoitekorkeuteensa ilmaisin katkaisee vedensyötön /3/. Kaivoon asennetaan tarvittaessa ylivuotoputki, mikä estää vedenpinnan liiallisen kohoamisen esimerkiksi tasonilmaisimen mentyä epäkuntoon.



Kuva 8.1. Pohjavesisäätely puupaalujen suojaamiseksi /15/.

Kokemusten mukaan pohjavesisäätelyllä on pystytty nostamaan pohjaveden pintaa muutamista kymmenistä senttimetreistä metriin. Yleensä pohjavedenpinnan kohoaminen pysähtyy tietylle tasolle. Usein täksi niin kutsutuksi vuotokynnykseksi paljastuu esimerkiksi viemärijohdon pohjan korkeustaso. Tutkituissa kohteissa lisätty vesimäärä on vaihdellut 1...16 m^3 vuorokaudessa /3/.

Toistaiseksi ei vielä varmuudella ole tiedossa kuinka orsi- tai pohjavedensäätely ajan mittaan vaikuttaa puuperustuksiin. Virtaavan, mahdollisesti suolaisen veden vaikutus lahoamista aiheuttavien sienten ja bakteerien toimintaan on vielä epäselvä. Varmuutta ei ole myöskään siitä kuinka lahonneita paalut voivat olla, jotta pohjavesisäätelystä vielä on hyötyä /15/. Oletettavasti veden lisääminen kohottaa orsi- tai pohjaveden happipitoisuutta ainakin tilapäisesti ja paikallisesti ja sitä kautta mahdollistaa mikrobitoiminnan kiihtymisen. Toisaalta veden puhdistumisella ja jäähtymisellä voi olla päinvastaisia vaikutuksia.

Jotta pohjavesisäätelyllä voidaan päästä haluttuun lopputulokseen on ainakin seuraavien edellytysten täytyttävä /3/:

- Puuaineksen täytyy olla tarpeeksi lujaa imeytyksen alkaessa.
- Puuperustusten tulee olla pysyvästi vedessä ja pohjaveden pinnan vähintään 0,5 m ylimpien puuosien yläpuolella (vertaa taulukko *3.1*, s.14).
- Vedenpinnan säilyttäminen riittävällä korkeudella on tapahduttava kohtuullisella vedenkulutuksella.
- Pohjavedenpinnan alenemisen tulee olla vähäistä. Tällöin johtokaivoja joudutaan usein tiivistämään.
- Imeytysveden tulee olla viileää ja vähähappista, eikä se saa sisältää paljoa ravintoaineita.
- Viemärijohtojen tulee olla tiiviitä maaperän saastumisvaaran vähentämiseksi.
- Vedenlisäyksestä ei saa aiheutua kosteushaittoja muille rakenteille.

Imeytystä voidaan tehostaa rakennuksen ympärille tehtävällä tiiviillä pontti- tai bentoniittiseinällä. Lisättävä vesi voidaan ottaa paitsi vesijohtoverkosta, myös kellareiden pumppausvesistä tai salaojituksista kertyvästä vedestä. Tällöin rauta tai mangaanipitoinen vesi tulisi puhdistaa ennen imeyttämistä imeytyskaivojen tukkeutumisvaaran takia /15/.

Tämän hetkisen käsityksen mukaan katoilta tai päällystetyiltä alueilta kerättävien vesien käyttöä imeytysvetenä tulisi välttää niiden sisältämien ilman- ja ympäristönsaasteiden vuoksi, sillä saastuneen veden käyttö saattaa suojaamisen sijasta jopa edistää puuperustusten turmeltumista /15/. Toisaalta kerätty vesi saattaa olla kuitenkin puhtaampaa kuin puuperustusten ympärillä jo oleva vesi, eikä saasteiden vaikutusta varsinaiseen puun lahoamisprosessiin tunneta. Saasteiden kuten myös lisättävän veden hapellisuuden

vaikutus saattaa jäädä paikalliseksi ja olisi tällöin hallittavissa muun muassa veden imeytymispaikkojen oikealla valinnalla.

Esimerkiksi Helsingin rautatieaseman laiturin kattamisen yhteydessä on käyty keskustelua sadevesien imeyttämisestä orsivedenpinnan korkeuden säilyttämiseksi. Laajan alueen kattaminen vaikuttaa luontaiseen sade- ja valumavesien imeytymispinta-alaan. Mikäli sadevedet johdetaan sadevesiviemäreihin, voi alueella olla odotettavissa jopa orsivedenpinnan alenemista.

Suomessa imeytyskokeita on tehty muun muassa Helsingin keskustassa. Hallituskadulla sijoitettiin rakennuksen ulkopuolelle viisi imeytyskaivoa, jotka otettiin käyttöön vuonna 1976. Aluksi niiden kautta imeytettiin vettä maaperään 60...70 m^3/vrk, minkä seurauksena orsiveden pinta palasi ennalleen muutamassa kuukaudessa /11/.

8.2 Kyllästysaineet

Kyllästetyllä puulla tarkoitetaan teollisesti tai kemiallisesti suojattua puutavaraa, jossa suoja-aineet ovat tunkeutuneet syvälle puun sisään. Normaalisti tunkeutuma saadaan aikaan ylipaineen avulla, jolloin kyllästettyä puuta nimitetään painekyllästetyksi puuksi /15/.

Pohjarakennusohjeiden mukaan puupaalujen käyttöä pysyvien rakennusten ja rakenteiden perustamisessa on vältettävä, mikäli ei voida olla varmoja siitä, ettei pohjavedenpinnan alin taso putkijohtojen, muun rakentamisen tai maan kohoamisen seurauksena laske puupaalujen katkaisutason alapuolelle rakennuksen tai rakenteen käyttöaikana. Yleensä on käytettävä vähintään paalujen yläpinnan lahosuojausta. Puupaalujen käyttö ilman yläpään lahonsuojausta tulee kysymykseen vain erikoistapauksissa silloin, kun puupaalujen yläpäät jäävät pysyvästi vedenpinnan alapuolelle /30/.

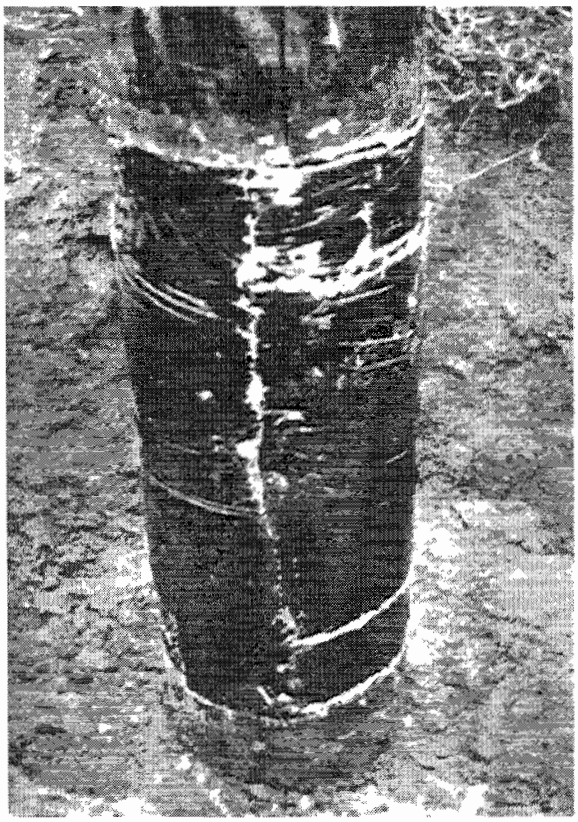
Olemassaolevien paalutusten lahon estämiseen ei painekyllästystä enää voida käyttää, mutta jälkikyllästys voidaan tietyin edellytyksin tehdä niin kutsutuilla paikalliskyllästysmenetelmillä, joita käytetään pääasiassa sähkö- ja lennätinverkkojen puupylväiden suojauksessa. Jälkikyllästyksen tehovaikutuksen on eri tutkimusten mukaan

arvioitu säilyvän ainakin 6...8 vuotta. Paikalliskyllästysmenetelmiä ovat muun muassa Wolmanit TS –pylväskääre ja Cobra –menetelmä /21/.

Kyllästysaineet sisältävät monia myrkyllisiä yhdisteitä, kuten kromi- ja arsenikkiyhdisteitä, jotka ovat ympäristölle ja terveydelle haitallisia /9/.

8.2.1 Wolmanit TS –pylväskääre

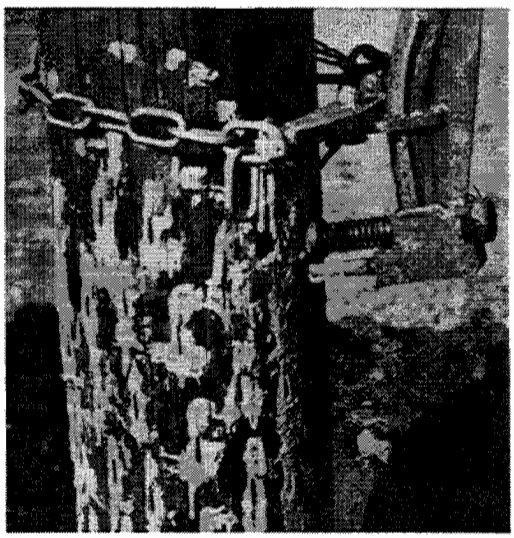
Menetelmässä pylvään maarajavyöhykkeeseen asetetaan suolakyllästeellä imeytetty 40 cm leveä vaahtomuovityyny, joka kääritään pylvään lahonaran maarajakohdan ympärille siten, että suolatyynyn yläreuna tulee 10 cm maanpinnan tason yläpuolelle (*kuva 8.2*). Kääreen uloimman osan muodostaa reunoistaan pylvääseen liimattava muovikelmu, joka estää kyllästeen liukenemisen maahan. Kääreessä oleva suola diffusoituu puun kosteuden vaikutuksesta vähitellen kääreestä pylvääseen. Tehoaineena käytetään fluori- ja kromisuolaseosta. Kääreen suolamäärä on noin 500 g /21/.



Kuva 8.2. Wolmanit TS -pylväskääre /27/.

8.2.2 Cobra –menetelmä

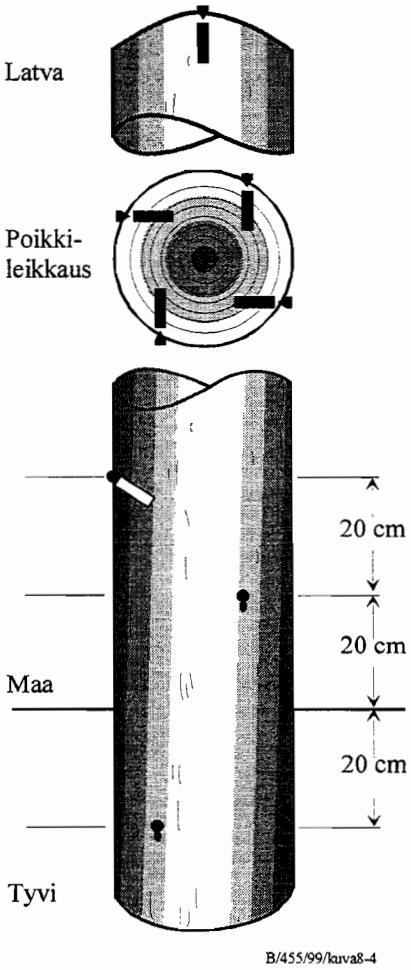
Cobra –menetelmässä Cobra –kyllästetahnaa puserretaan erityisen puserruslaitteen avulla pistoksin pylvään maarajavyöhykkeeseen noin 70 cm matkalle (*kuva 8.3*). Onton kyllästystahnaa sisältävän varren alapäässä oleva veitsi tunkeutuu noin 6 cm puun sisään. Syntyneeseen rakoon puristuu kyllästettä, joka liukenee kosteuden vaikutuksesta. Pistokset tehdään 5 cm välein pystysuunnassa ja 10 cm välein sivusuunnassa. Pylvääseen injektoitu suolamäärä on noin 250 g eli noin 1…12 kg/m^3 puuta. Injektointivaiheen jälkeen käsitelty pylväänosa sivellään kivihiilitervalla. Cobra –kyllästyssuolan tehoaineina ovat fluori, dinitrofenoli ja kuparisuola /15, 21/.



Kuva 8.3. Cobra –kyllästysmenetelmä ja siinä käytettävä kyllästysaineen puserruslaite /27/.

8.2.3 Kyllästyspatruunoilla suojaaminen

Kyllästyssuolasta voidaan valmistaa kooltaan 12 x 50 mm patruunoita, jotka sijoitetaan puuhun porattuihin reikiin (*kuva 8.4*). Reiät porataan maarajavyöhykkeeseen kierteisesti nousevasti, tangentin suuntaisesti alaviistoon. Patruunat asetetaan reikiin, jotka tukitaan tulpilla. Kyllästyspatruunan suola diffusoituu puun kosteuden vaikutuksesta suojattavalle alueelle /34, 15/. Patruunakyllästystä on käytetty myös siten, että puupaalun päähän on porattu noin 0,5 m syvyinen reikä, johon kyllästysaine on sijoitettu. Lisäksi suojaus on varmistettu ulkoisesti lahosuojaliuoksella sivelemällä.



Kuva 8.4. Puun kyllästäminen patruunoilla /9/.

8.2.4 Paikalliskyllästysaineiden käyttö paalutuksen suojaamisessa

Paikalliskyllästysmenetelmiä voidaan ajatella käytettävän kokonaan tai ajoittain vedenpinnan yläpuolelle jääneiden paalun päiden suojaamiseen. Jälkikyllästys vaatii kuitenkin suuren työpanoksen, jolloin suurien kohteiden käsittely ei ole taloudellista. Pienten paikallisten kohteiden suojaamisessa menetelmät voivat olla soveliaita. Ainakin alkanut lahoaminen saadaan näillä menetelmillä hidastumaan /15,9/. Ruotsissa Uppsalan yliopistossa tehdyissä tutkimuksissa havaittiin kuitenkin eräässä kokeessa, että bakteerit, jotka syövyttävät kyllästämättömän puun soluseinämiä voivat syövyttää myös kyllästettyä puuta /9/.

Orsi- tai pohjaveden läheisyys saattaa tuottaa paikalliskyllästyksessä ongelmia, koska vedenpinnan vaihtelut saattavat liuottaa käytettävät suoja-aineet pohjaveteen, jolloin suojaava vaikutus saattaa lakata nopeastikin. Toisaalta vaarallisia myrkkyjä voi joutua pohjaveteen. Jälkikyllästysmenetelmiä käytettäessä onkin varmistettava, ettei käytettäviä kyllästysaineita leviä vaarallisessa määrin ympäristöön /15/.

Puupylväiden korjaukseen on kehitetty menetelmä, joka on eräänlainen paikallissuojausmenetelmän ja korjausmenetelmän välimuoto. Tässä menetelmässä teräväkärkinen ruuvikierteinen metallikuori kierretään ruuvin tapaan maahan pylvään maarajakohdan ympärille. Metallikuoren ja pylvään väli täytetään hartsin ja betonin seoksella, joka muodostaa pylvään ympärille lahoamista estävän kerroksen. Pylvään käyttöiän on arvioitu pitenevän kymmeniä vuosia. Toisaalta puun kyllästys diffusoituvilla suoja-aineilla lisää kuoren sisään jääneen puun kestoikää. Puupaaluperustusten vahvistamisessa tämä menetelmä voisi tulla kyseeseen paalun katkaisutason alentamisen sijasta /15/.

8.3 Sterilointi

Puuperustuksissa esiintyviä lahonaiheuttajia voidaan tappaa erilaisilla myrkyillä. Myrkyt on sijoitettava ja annosteltava tarkkaan juuri kyseiseen kohteeseen, sillä osa näistä myrkyistä on ympäristölle hyvin vaarallisia ja niiden leviäminen annostelun aikana on estettävä.

Boori on alkuaine, jota esiintyy luonnostaan maaperässä ja se on pieninä määrinä kasveille välttämätön, mutta esimerkiksi mänty on hyvin herkkä boorin myrkkyvaikutuksille. Puunsuoja-aineissa booriyhdisteitä, booraksia ja boorihappoa, on käytetty 1930-luvulta lähtien /15/. Muun muassa lattiasienen torjunnassa booriyhdisteet ovat osoittautuneet tehokkaiksi /39/.

Ruotsissa on kehitetty menetelmä puuperustusten lahoamisen pysäyttämiseksi. Siinä boori- ja silikaattiliuoksia suodatetaan puuperustuksia ympäröivään veteen. Liuosten tarkoituksena on tappaa puussa olevat lahonaiheuttajat ja vahvistaa lahonnutta puuta. Tätä menetelmää kutsutaan Jerbor –menetelmäksi /15/.

8.3.1 Jerbor –menetelmä

Jerbor –menetelmässä puuperustuksissa esiintyvät sienet ja bakteerit tapetaan booria käyttäen. Tämä suoritetaan eristämällä kohde joko osittain tai kokonaan ympäristöstä bentoniittiseinällä. Puupaalujen steriloitavat osat kuivatetaan pumppaamalla vesi pois suojaseinien sisäpuolelta, minkä jälkeen boorisuolaliuosta suodatetaan paaluja ympäröivään maahan. Booriliuos, jolla on pienempi viskositeetti kuin pohjavedellä, tunkeutuu puuhun osmoosin ja kapillaarisuuden avulla /15, 14/.

Konsentraatiolla 1,5 kg boorisuolaa puukuutiometriä kohden saavutetaan täydellinen lahottajien eliminointi. Konsentraatiolla 0,5 kg boorisuolaa puukuutiometriä kohti voidaan estää lahottajien lisääntyminen /14/.

Boorikäsittelyllä pohjavedestä tulee steriiliä. Yhdysvalloissa suoritetut kokeet osoittavat, että vaikka boorin konsentraatio vedestä vuotojen takia katoaa, säilyy steriloiva vaikutus puussa jopa 20 vuotta. Tarvittaessa boorikäsittely voidaan uusia. Booriliuoksen vaikutusaikaa voidaan lisätä hyytelöimällä liuos, jolloin kohteen patoamistarve vähenee ja käsittelyn vaikutusaika pitenee /15, 7/.

Booriliuoksen maahansuodatus suojaseinän sisäpuolella suoritetaan injektointiputkien kautta. Aluksi injektointi suoritetaan joka toisesta putkesta ja väliputkista tarkkaillaan liuoksen leviämistä. Liuoksen leviämisen tarkkailu perustuu veden sähkönjohtokyvyn

muuttumiseen. Vertailutason saamiseksi pohjaveden sähkönjohtokyky mitataan ennen liuoksen suodatusta. Laboratoriokokeilla määritetään riittävää boorisuolakonsentraatiota vastaava veden sähkönjohtokyky /16/.

Lahonaiheuttajien tappamisen jälkeen voimakkaasti lahonneissa puuperustuksissa voidaan puun luonnollista kivettymistä jäljitellä suodattamalla maahan silikaatteja tai karbonaatteja. Näiden suodattaminen voidaan suorittaa kuten booriliuoksenkin suodattaminen. Puun annetaan pitkän ajan kuluessa imeä piihappoa tai kalsiumkarbonaattia, kunnes ne saostuvat ja sitovat puun kuituja yhteen. Piihapon käyttö on suositeltavampaa, koska se ei ole herkkä happamalle pohjavedelle. Pohjavesi happamoituu boorikäsittelyn yhteydessä /14/.

Alustavat kokeet osoittavat osittain lahonneiden paalujen restauroinnin onnistuvan tällä menetelmällä, tosin väärä annostus saattaa aiheuttaa vahvistusvaikutuksen menetyksen. Silikaattikyllästetyn ja alkuperäisen puun ero saattaa tulla niin suureksi ja kontakti niin heikoksi, että kyllästetty kerros liukuu kyllästämättömän puun suhteen /17/.

Ruotsissa Jerbor –menetelmää on käytetty yli 40 kohteessa. Suomessa ensimmäinen kohde, jossa käytettiin puupaaluperustusten boorisuojausta oli Turun Alueen Säästöpankin pääkonttori 1990 /35/. Tällä hetkellä ei ole vielä tiedossa tullaanko Suomessa boorin käyttöä puuperustusten steriloinnissa jatkossa hyväksymään sen mahdollisten myrkkyvaikutusten vuoksi.

8.4 Injektointi

Injektoinnilla tarkoitetaan työmenetelmää, jossa maan tai rakenteen raot täytetään injektointimassalla tiivistämis- ja vahvistamistarkoituksessa. Puuperustusten yhteydessä injektoinnilla tarkoitetaan niiden ympärille syntyneiden ilman ja veden täyttämien rakojen ja kolojen täyttämistä injektointiaineella niin, että hapen pääsy kosketuksiin puuosien kanssa estyy. Tällöin injektointiaineella ei välttämättä tarvitse olla maapohjaa tai rakennetta vahvistavaa vaikutusta /15/.

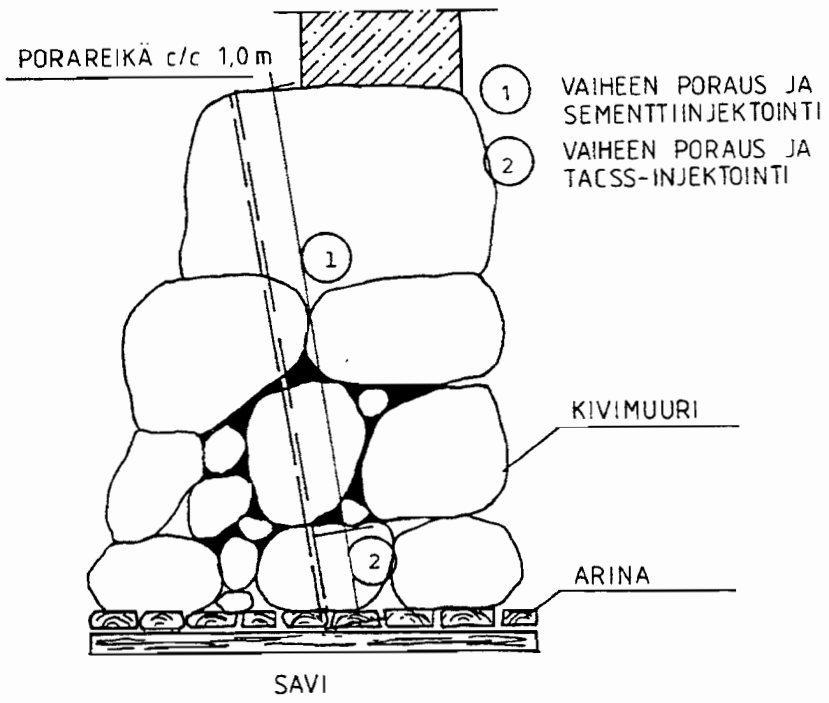
Puun lahoamista voidaan hidastaa estämällä ilman pääsy ylhäältäpäin kosketuksiin perustusten puuosien kanssa. Vedenpinnan on kuitenkin oltava tällöin lähellä puupaalujen

katkaisutasoa tai kapillaarisen nousukorkeuden maassa riittävän suuri, jotta lahottajien kasvuolosuhteet saadaan riittävän epäsuotuisiksi /15/.

8.4.1 TACSS -injektointi

TACSS –injektointi kehitettiin Japanissa 1960-luvulla maanvahvistustarkoituksiin. TACSS on yksikomponenttinen polyuretaanituote ja sen tunkeutuminen esimerkiksi saven ja paalun välisiin kuivumisesta johtuviin rakoihin on hyvä. Vaahto on myös vesitiivistä ja kapillaarisen nousun katkaisevaa ainetta /25/.

Injektointi voidaan suorittaa kivimuurin lävitse poraamalla injektointia varten reikiä noin metrin välein. Tätä ennen muuri on yleensä vahvistettava sementtipohjaisella injektointilaastilla, jonka riittävästi kovetuttua voidaan suorittaa varsinainen TACSS – injektointi (*kuva 8.5*). Täydellinen peittävyys voidaan varmistaa injektoimalla vaahto ensin vain joka toisesta poranreiästä ja sen jälkeen vielä käsittelemättömistä rei'istä /15/.



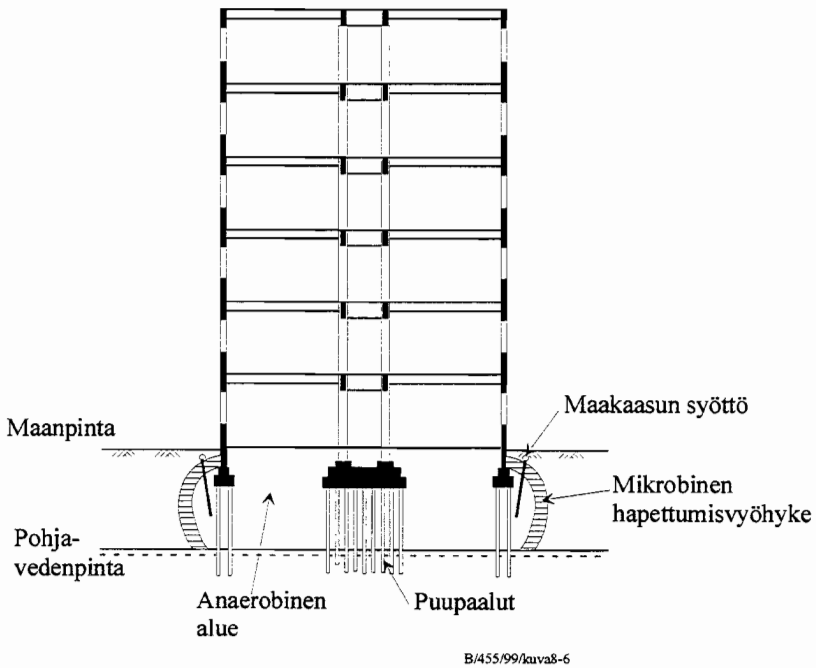
Kuva 8.5. Poraus ja injektointi kylmän muurin läpi TACSS –menetelmällä /15/.

Ruotsissa Köpingin Teater-Bion arinarakenteiden injektoinnin jälkeen koekuopista tehtyjen havaintojen perusteella on voitu todeta vaahdon tunkeutuneen puussa olleisiin kuivumishalkeamiin ja maakerrosten halkeamiin, muttei tiukasti savea vasten olevaan puuhun /15/.

Vielä ei ole tiedossa, ovatko vaahdon tiivistävät ja kapillaarisuuden katkaisevat ominaisuudet riittäviä luomaan tarpeeksi korkeata kosteuspitoisuutta puuperustuksien ympärille, että käynnissä oleva lahoaminen saataisiin pysäytettyä ja sen leviäminen estettyä /15/.

8.5 Orgaaninen kaasu

Orgaanisten kaasujen käyttö puupaalujen lahontorjunnassa poikkeaa Suomessa yleisesti käytössä olevista menetelmistä. Menetelmä perustuu anaerobisen vyöhykkeen muodostamiseen rakennuksen alle maakaasua mikrobisesti hapettamalla, jolloin lahoaminen saadaan pysäytettyä lahottajat tukahduttamalla (*kuva 8.6)*. Maakaasun asemasta voidaan käyttää muitakin orgaanisia kaasuja, kuten propaania. Räjähdysvaara eliminoidaan sekoittamalla kaasuun jalokaasuja, esimerkiksi typpeä metaaniin suhteessa 6:1 /9/.



Kuva 8.6. Orgaanisen kaasun käytöllä puupaalujen ympärille aikaansaatu anaerobinen vyöhyke /36/.

Eindhovenissa, Hollannissa, metaania vapautuu huomattavia määriä maaperästä. Tämä on todennäköisesti aiheuttanut maahan hapettomia alueita ja hidastanut puupaalujen lahoamista rakennusten alla. Eindhovenin keskustan lähellä sijaitsevilla Philipsin tehtailla orgaaniseen kaasuun perustuvaa menetelmää on käytetty hyvin tuloksin /36/.

8.6 Lahoamisenestomenetelmän valinta

Pohjaveden säätely vaatii usein kohteen ympäröimistä vettäläpäisemättömällä suojaseinällä, mutta alueen patoamiseen joudutaan monesti myös tavanomaisissa korjausmenetelmissä, koska nykyisin rakennustoimenpiteet eivät saa aiheuttaa pohjavedenpinnan alentumista ympäristössä työnaikaisestikaan. Tällöin patoseinän rakentaminen ei aiheuta lisäkustannuksia tai lisätyötä suhteessa muihin menetelmiin /15/.

Kohteen patoamisen ollessa välttämätöntä paalujen sterilointi- ja kivettämismenetelmissä, saattaa joissain tapauksissa olla aiheellista suorittaa ensin paalujen sterilointi ja sen jälkeen hoitaa suojaus pohjavesisäännöstelyllä. Varsinkin jos paalujen yläpäät ovat hyvin vettä läpäisevissä maakerroksissa /15/.

Kirjallisuuden mukaan sienten, itiöiden ja bakteerien myrkyttäminen olisi hyvä suorittaa myös muiden perustusten korjaustapojen, kuten paalujen katkaisutason alentamisen yhteydessä /2/. Tämä edellyttää, että boori- tai vastaavien valmisteiden käyttö puuperustusten korjausten yhteydessä tullaan sallimaan. Tiiviissä koheesiomaassa sterilointiliuoksen saaminen riittävästi kosketuksiin paalujen kanssa on epävarmaa ja saattaa onnistua rakennuksen alla olevien rakojen, onkaloiden ja tyhjätilojen kautta, mutta liuoksen tunkeutumisen varmistaminen tiiviin maan ympäröimänä olevaan lahonneeseen puuhun riittävän syvälle saattaa olla vaikeaa /15/.

Mikäli tyhjätilat rakennuksen alla ovat riittävän pieniä eikä pohjavesi ole liian syvällä, saattaa tällaisissa tapauksissa veden haihtumista estävä injektointi olla mahdollinen. Maaperän ollessa hyvin läpäisevää ja vedenpinnan ollessa hyvin alhaalla, pelkästään ylhäältä tapahtuvasta vaahtoinjektoinnista tuskin on hyötyä vaan yhteys ilmaan olisi tällöin suljettava myös sivuilta. Mikäli maan painumista edelleen on odotettavissa, jää

vaahtoinjektoinnin hyöty väliaikaiseksi /15/. Lisäksi ainakin tällä hetkellä menetelmä on kallis toteuttaa.

Paikalliskyllästysmenetelmät on luokiteltava lähinnä väliaikaisiksi suojausmenetelmiksi, vaikkakin niillä on mahdollista jatkaa perustusten toimivuutta sopivissa olosuhteissa pitkäänkin /15/.

Orgaanisen kaasun käyttö lahoamisen estossa rajoittuu alueille, joilla maakaasua on saatavissa. Suomessa ei tätä menetelmää ole koskaan käytetty, eikä sen soveltuvuudesta maaperäolosuhteisiimme ole kokemuksia.

Puuperustusten säilymistä edistävistä menetelmistä käytetyin ja teknisesti yksinkertaisin sekä menetelmänä luonnonmukaisin on pohjaveden säätely, joka alkuperäisen tilanteen palauttajana soveltuu useimpiin kohteisiin.

Puupaalujen säilyttämismenetelmän valinta on aina tehtävä tapauskohtaisesti. Kaikkiin tapauksiin ilman muuta parhaiten soveltuvaa menetelmää ei ole olemassa. Oikean suojaus- tai korjaustavan valinta vaatii asiantuntemusta, kokemusta ja kohteen olosuhteiden sekä puuperustusten kunnon tarkkaa tuntemista /15/.

9. Hollantilainen puupaalujen tutkimusjärjestelmä

Amsterdamissa paikallisen rakennusvalvonnan rooli puupaaluperustusten tutkimussysteemissä on huomattavasti Suomessa totuttua suurempi. Pelkästään Amsterdamin keskusta-alueella on paaluperustuksilla noin 12000 rakennusta, jotka on luokiteltavissa arvokkaiksi ja säilytettäviksi. Jotta tällaiset rakennushistoriallisesti tai muuten arvokkaat rakennukset voidaan säilyttää, täytyy niiden mahdollisesti vaurioituneet perustukset joko korjata tai uusia kokonaan. Tätä tarkoitusta varten kaupungin rakennusvalvonnalla on tarkastajia, jotka kiertävät kaupunkia arvioimassa rakennusten ja niiden perustusten kuntoa /6/.

9.1 Tutkimusten käynnistäminen

Amsterdamissa on viisi menettelytapaa, joiden perusteella puupaaluperustusten tutkiminen voidaan aloittaa /6/:

1. Puupaaluille perustetussa rakennuksessa havaitaan tarkastuskierroksella pahoja painumia, muodonmuutoksia tai halkeamia. Tässä tapauksessa tarkastajien täytyy todistaa omistajalle, että Hollannin rakennuslain mukaista minimikantavuutta ei enää voida saavuttaa nykyisellä paaluperustuksella.

2. Rakennus on merkitty osaksi kaupungin peruskorjausohjelmaa, jolloin tarkastajilla on valta suorittaa ne tutkimukset, jotka he katsovat tarpeellisiksi.

3. Jos rakennukselle haetaan rakennuslupaa, jossa sille esitetään tehtäväksi suuria muutoksia ja kuormien jakaantuminen paaluille mahdollisesti muuttuu, perustusten kunto on tutkittava.

4. Jos lähiympäristössä tehtävät rakennus- tai muut toimenpiteet voivat vaikuttaa puupaaluperustusten tilaan, perustukset tutkitaan mahdollisten suojaustoimenpiteiden kartoittamiseksi.

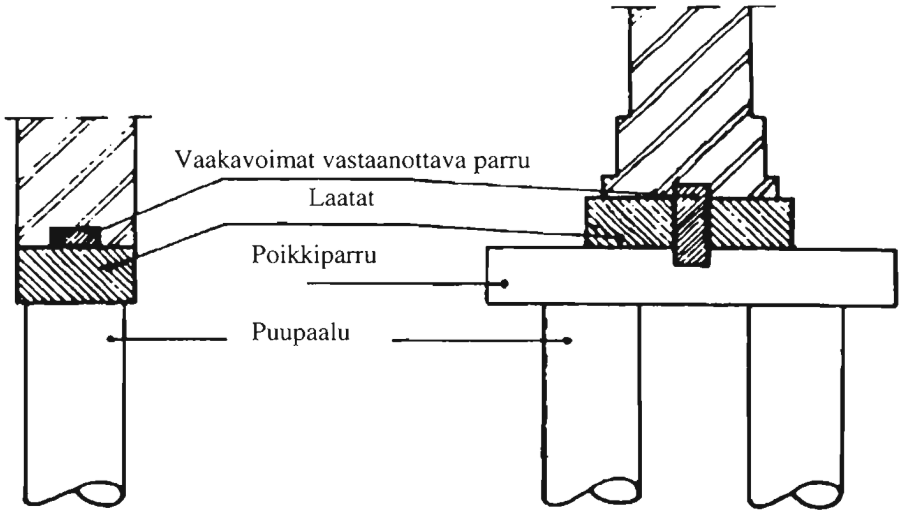
5. Tapauksessa, jossa rakennuksen omistaja haluaa jakaa rakennuksen useiksi erillisiksi huoneistoiksi on olemassa säännös, jonka mukaan hänen on todistettava, että perustukset uusien huoneistojen alla ovat uutta vastaavia.

Menettelytavoissa 1 ja 4 perustukset arvioidaan Hollannin rakennussäännösten mukaisesti "olemassaolevaksi rakenteeksi", jolle annetaan yhden vuoden toiminnallinen aika. Mikäli puuperustukselle tuleva kuorma ylittää sen kantokyvyn, kaupungilla on *lupa* pakottaa rakennuksen omistaja korjaustoimenpiteisiin. Mikäli kyseinen rakennus on asuinrakennus kaupunki on *velvollinen* pakottamaan rakennuksen omistaja korjaustoimenpiteisiin.

Menettelytavassa 2 perustus arvioidaan "uudeksi" perustukseksi, jolle kaupunki määrittelee sen jäljellä olevan toiminnallisen ajan. Amsterdamissa jäljellä olevaksi toiminnalliseksi ajaksi voidaan määritellä joko 15 tai 25 vuotta sen mukaan onko perustusten ylläpito vähäistä vai kiinnitetäänkö siihen enemmän huomiota. Näissä tapauksissa kaupunki antaa taloudellista apua, jotta ylläpitotyö saadaan varmasti suoritettua.

Menettelytavoissa 3 ja 5 perustusten arvioiminen perustuu täysin uusien perustusten standardeihin, jolloin perustusten toiminnallinen aika määritetään 50 vuodeksi.

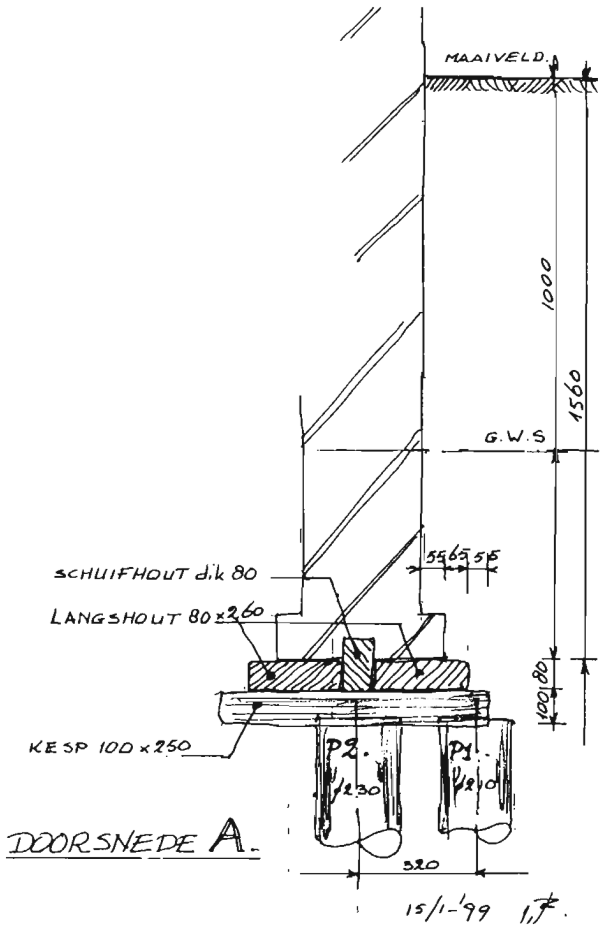
Tutkimukset suoritetaan koekuoppatutkimuksina. Lisäksi samassa yhteydessä arvioidaan myös perustusten yläpuolisten rakenteiden kuntoa. Hollantilaisia puupaaluperustustyyppejä on esitetty kuvissa *9.1* ja *9.2*. Kuvassa *9.3* on esitetty Amsterdamilaisesta koekuopasta löydetty vioittunut puupaalun yläosa. Näille perustuksille on hyvin tyypillistä, että paalut on lyöty vinoon.



Rotterdamissa käytetty perustustyyppi.

Amsterdamissa käytetty perustustyyppi.

Kuva 9.1. Hollantilaisia puupaaluperustustyyppejä /6/.



Kuva 9.2. Esimerkki staattisesti epästabiilista perustuksesta Amsterdamissa. Puupaalujen sijainti epäkeskeinen kuormitusresultanttiin nähden /6/.

Kuva 9.3. Tyypillinen Amsterdamilainen perustus, paalun päässä muodonmuutoksia ja halkeamia /6/.

9.2 Lahoisuusasteen määrittäminen

Puupaalujen lahoisuusasteen määrittely ei Hollannissa vielä ole vakiintunut. Jotkut asiantuntijoista laskevat terveen puun osuuden puupaalun poikkipinta-alasta ja arvioivat paalun kunnon sen perusteella. Mikäli tällöin puupaalun poikkipinta-alasta 75 % tai yli on tervettä puupaalun kunnon arvioidaan olevan hyvä. Jos taas terveen puun osuus on 50…75 % puupaalun kunto määritellään kohtuulliseksi, terveen puun osuuden ollessa 35…50 % kunto on välttävä ja kun tervettä puuta on vähemmän kuin 35 % puupaalun kunto on heikko /6/.

9.3 Puuperustusten kunnon luokittelu

Perustusten kunnon luokittelu perustuu Amsterdamissa neljään eri luokkaan /6/.

Luokassa 1 tutkitun perustuksen kunto on riittävän hyvä ja rakenteeltaan luja. Arvioinnissa käytetään Hollannin rakennusmääräysten antamia uuden rakenteen kriteereitä. Perustukselle annetaan 50 vuoden toiminnallinen aika.

Luokassa 2 perustusten toiminnallinen aika on 25 vuotta. Kuormakertoimia tarkistetaan olemassa olevan tilanteen mukaan ja kantavuuden laskemisessa käytettyjä varmuuskertoimia voidaan pienentää uusien rakenteiden määräyksissä esitetyistä. Säännöksissä tai määräyksissä ei ole annettu ohjeita varmuuksien pienennykselle tällaisissa tapauksissa. Varmuuskertoimien pienentäminen on kuitenkin perusteltua, sillä perustukset ovat usein kantaneet niille tulevat kuormitukset jo hyvinkin pitkään, eikä yläpuolisille rakenteille ole aiheutunut vaurioita vaikka nykyisten säädösten vaatimukset uusille rakenteille eivät täyty.

Luokkaan 3 kuuluvat perustukset arvioidaan samoin perustein kuin luokassa 2. Ainoastaan jäljellä olevaksi toiminnalliseksi ajaksi määritellään 15 vuotta. Varmuuskertoimia voidaan pienentää vielä lisää luokkaan 2 verrattuna, koska vaadittu luotettavuus on pienempi luokan 3 perustuksissa.

Luokan 4 perustuksella jäljellä oleva toiminnallinen aika on enää yksi vuosi. Puupaalun kantavuuden varmuuskerrointa ei tässä luokassa enää pienennetä.

Mikäli perustuksen todetaan olevan heikommassa kunnossa kuin luokka 4, on ryhdyttävä välittömiin korjaustoimenpiteisiin.

9.4 Hollantilainen tutkimuslaitteisto

Laboratoriotutkimuksien lisäksi Hollannissa on kehitetty paikanpäällä tehtäviä puun lujuuden määritysmenetelmiä. Yksi paljon käytetty tutkimusväline on niin kutsuttu penetrometri, joka on kehitetty Hollannissa noin 25 vuotta sitten (*kuva 9.4)*. Penetrometri on eräänlainen painevasara, jonka avulla painetaan staattisesti 100 N voimalla halkaisijaltaan 5 mm neulaa puuta vasten. Neulan tunkeutuma puupaaluun mitataan ja sen syvyyden perusteella arvioidaan paalun lujuutta. Jos neulan tunkeutuma puupaaluun on pienempi kuin 5,0 mm sen kunnon arvioidaan olevan hyvä. Jos tunkeutuma on 5,0...15,0 mm puupaalun kunto on kohtuullinen. Jos tunkeutuma on 15,0...30,0 mm, puupaalun kunto arvioidaan välttäväksi ja neulan upotessa enemmän kuin 30,0 mm, paalun kunto on heikko /6/.

Kuva 9.4. Hollannissa puuperustusten kunnon tutkimisessa käytettävä penetrometri /6/.

Toinen puuperustusten tutkimisessa käytettävä väline on Frank –vasara, jonka toimintaperiaate on vastaava kuin penetrometrissä. Frank –vasaralla tehtävässä tutkimuksessa vasaran teräspiikki lyödään dynaamisesti puuhun. Piikin tunkeutumasyvyys puuhun osoittaa sen kunnon /6/.

Uusin menetelmä on englantilaista alkuperää oleva Decay Detecting Drill (DDD) /1/. Se on kevyt käsikäyttöinen pora, jolla mitataan poran terän vastusta sen tunkeutuessa puuhun. Poran yhteydessä oleva piirturi piirtää porauksen aikana käyrää poran kärjen vastuksesta, josta sitten voidaan päätellä puun lahoisuus poikkileikkauksen eri syvyyksillä. Pora on kehitetty rakennuksen sisätiloissa tapahtuvaa lahon tutkimista varten, mutta siitä ollaan kehittämässä kestävämpää puupaalujen tutkimiseen soveltuvaa versiota.

9.5 Vaahtobetonin käyttö perustamistason alentamisessa

Uusia korjausmenetelmiä etsittäessä yksi mahdollisuus on Hollannissa usein käytetty menetelmä, jossa perustamistason alentaminen tehdään niin kutsutulla vaahtobetonilla. Tässä menetelmässä rakennuksen kellaritilojen lattiat avataan kokonaisuudessaan ja rakennuksen alta kaivetaan maata pois, kunnes suunniteltu perustamistaso saavutetaan. Pois kaivettu maa korvataan kevyellä vaahtobetonilla, joka siirtää kuormat puupaalujen lahonneiden yläpäiden ohi paalujen terveiden osien varaan. Vaahtobetoni on kevyempää kuin pois kuljetettu maa, mikä pienentää puupaaluille tulevaa kuormitusta. Esteeksi menetelmän käyttämiseen Suomessa saattaa kohota vaahtobetonin korkea hinta. Lisäksi vanhojen lattiarakenteiden rikkominen vesieristeineen saattaa rajata menetelmän käyttömahdollisuuksia.

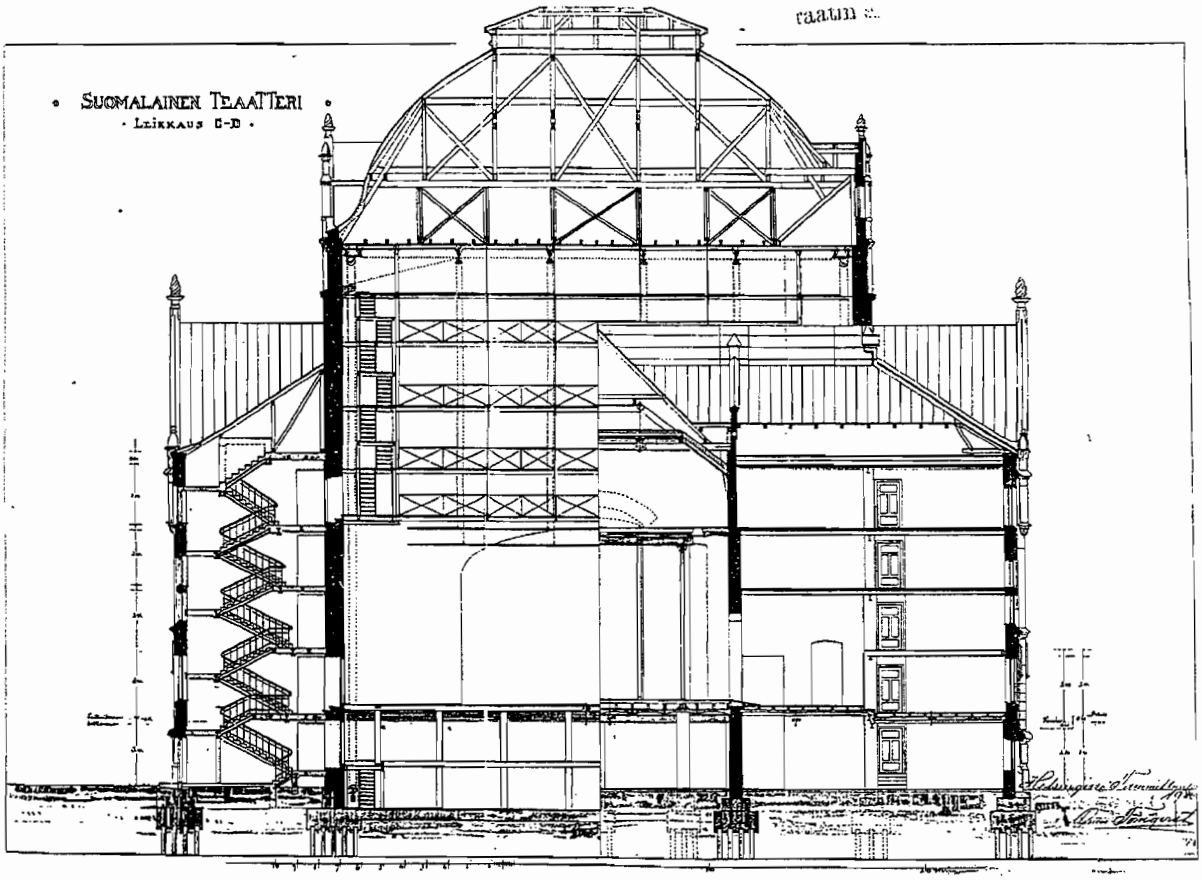
10. Koekohteita

Tutkimuksen yhteyteen kuului neljä koekohdetta, joista tutkittiin puupaaluperustusten kunto kasvukairanäytteistä tehtyjen lahoisuusanalyysien ja puristuskokeiden avulla. Puristuskokeita tehtiin sekä puupaaluista sahatuille prismoille että kokonaisille paalunäytteille. Osasta kohteita otettiin myös orsivesi- ja maanäytteitä, joille tehtiin mikrobiologisia tutkimuksia. Tarkoituksena oli saada lisäselvyyttä vedenpinnan alla tapahtuvan lahoamisen, niin kutsutun biokorroosion, etenemismekanismille ja -nopeudelle.

Koekohteita olivat Suomen Kansallisteatteri, Helsingin rautatieasema, Lauttasaaren ala-asteen koulurakennus Helsingissä ja Sänkiniityn kohde Kehä III:lla.

10.1 Suomen Kansallisteatteri

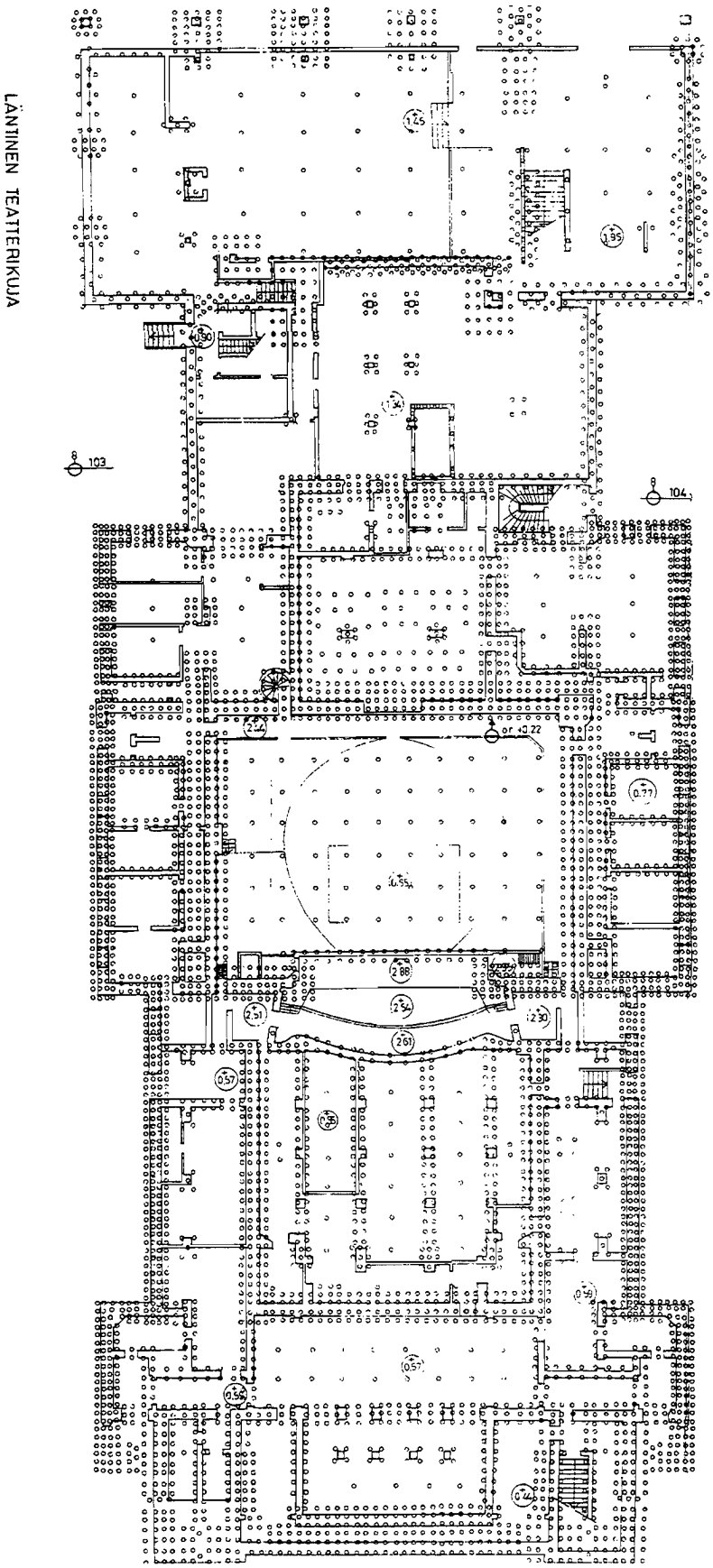
Suomen Kansallisteatteri on rakennettu kolmessa vaiheessa. Alkuperäinen osa teatteria rakennettiin 1900...1902 nimellä *Suomalainen Teaatteri* (*kuva 10.1*). Ensimmäinen laajennus tehtiin 1930 ja kolmas ja uusin osuus rakennuksesta rakennettiin vuosina 1953...1954. Kaikki kolme osaa on perustettu puupaalujen varaan. Puupaalujen sijoitus on nähtävissä kuvan *10.2* paalukartassa.



Kuva 10.1. Poikkileikkauspiirustus Suomen kansallisteatterin vanhasta osasta.

10.1.1 Tehdyt tutkimukset

Puupaalujen tutkimus suoritettiin kahdessa vaiheessa, joista ensimmäisessä avattiin kaksi koekuoppaa Läntiselle teatterikujalle rakennuksen ulkopuolelle. Kohteessa oli suoritettu puupaalujen lahoisuustutkimuksia edellisen kerran vuosina 1984 ja 1998. Avatuista kahdesta koekuopasta koekuopan 1 kohta on ollut mukana myös molemmissa aikaisemmissa tutkimuksissa. Koekuoppa 1 sijoittui vuonna 1930 rakennetulle osuudelle teatterirakennusta ja koekuoppa 2 vanhimmalle, vuosina 1900…1902 rakennetulle osalle. Ensimmäisen tutkimusvaiheen valmistuttua päätettiin avata vielä kaksi koekuoppaa, joista toinen, koekuoppa 3, sijoittui rakennuksen sisätiloihin. Koekuoppa 4 tehtiin Itäiselle teatterikujalle kohtaan, joka oli avattu vuoden 1984 tutkimuksessa (liite 1).



Kuva 10.2. Suomen kansallisteatterin paalukartta.

Tutkimuksen yhteydessä otettiin vesinäytteet teatteria ympäröivistä orsivesiputkista sekä koekuopista. Yksi vesinäyte saatiin myös päänäyttämön alla sijainneesta orsivesiputkesta. Lisäksi paaluja ympäröivästä maasta otettiin maanäytteitä.

Aluksi paljastuneet puupaalut tutkittiin silmämääräisesti ja puukolla kokeilemalla. Silmämääräisesti tarkasteltuna paalut näyttivät varsin hyväkuntoisilta, mutta puukolla kokeiltaessa puukon kärki upposi niihin noin 30 mm. Paaluista otettiin kasvukairanäytteitä kaikista esiinkaivetuista paaluista. Näytteitä otettiin sekä aivan anturan alareunan tasolta että noin 0,5 m alempaa. Jokaisesta koekuopasta otettiin lisäksi palanäyte, jolle tehtiin puristuskokeita. Puristuskokeita tehtiin sekä prismoille että kokonaisille paalunäytteille.

Kasvukairanäytteet otettiin kohtisuoraan paalua kohden ja kairaus ulotettiin koko poikkileikkauksen läpi. Otetuista näytteistä määritettiin puuaineksen lahoisuus sekä silmämääräisesti että stereomikroskoopilla 10 mm välein asteikolla 0...4, missä 0 vastaa täysin tervettä puuta ja 4 pahasti syöpynyttä tai lahonnutta puuta.

Puristuskokeissa mitattiin aikaa, puristumaa ja puristusvoimaa. Puristusnopeutena käytettiin prismapuristuskokeissa 0,3 mm/min ja puristettaessa kokonaista paalunäytettä 1,5 mm/min, jolloin murto kummassakin tapauksessa saavutettiin noin 5 minuutissa. Kokeet suoritettiin standardin European Standard EN 408 mukaisesti. Prismoista määritettiin puun murtolujuus, kimmomoduuli, kosteuspitoisuus ja tiheys. Kokonaista paalunäytettä puristettaessa määritettiin näytteen murtolujuus ja kimmomoduuli. Puun varmuuskerroin rakenteellista murtumista vastaan määritettiin tietyllä suunnittelukuormalla. Prismapuristuskokeissa varmuuskerroin määritettiin sekä painottamalla poikkileikkauksen eri osien pinta-aloja että suoraan koko poikkileikkauksen murtolujuuden keskiarvon mukaan.

10.1.2 Tutkimustuloksia

Suunnittelukuormana kohteen uusimmassa 1953...54 rakennetussa osassa on puupaaluille käytetty dokumenttien mukaan kuormitusta 40 kg/cm^2, mikä vastaa 9,5 t/paalu (noin 95 kN/paalu) mitoittavan paalun kärjen halkaisijan ollessa 7'' (noin 180 mm). Vanhempien osien suunnittelukuormaa ei saatavilla olleista asiakirjoista saatu selvitettyä, mutta niiden

puupaalutus oli huomattavasti tiheämpi kuin uusimman osan, joten käytetyllä suunnittelukuormalla oltiin varmalla puolella.

Puupaalujen kunto havaittiin heikoimmaksi Itäiselle teatterikujalle tehdyssä koekuopassa 4. Sisälle tehdyssä koekuopassa 3 tilanne oli hieman parempi ja kaikkein parhaimmassa kunnossa olivat Läntisen teatterikujan koekuoppien 1 ja 2 paalut. Erot eri koekuoppien välillä tosin olivat hyvin pieniä.

Tutkituissa paaluissa pintalahoa esiintyi kauttaaltaan keskimäärin 30 mm syvyydeltä. Enimmillään pehmeän pintapuun osuus oli noin 60 mm. Kasvukairanäytteiden perusteella joistakin paaluista löytyi jossain määrin syöpymää myös sydänpuun osuudella. Koekuopan 1 paalussa 5 sydänpuun alueella oli jopa luokan 4 lahoa, mikä tarkoittaa puun puristuslujuuden lähes täydellistä menettämistä poikkileikkauksen siltä osalta. Saman koekuopan muissa paaluissa ei vastaavaa sydänpuun lahoa ilmennyt. Yhden paalun yläpää oli pehmentynyt koko poikkileikkauksen matkalla noin 10 mm syvyydeltä. Tutkitut paalut oli lyöty tyvi ylöspäin, joten paalujen yläpäät ovat halkaisijaltaan huomattavasti suuremmat, kuin kantavuuden mitoittava latvamitta 7''. Tästä johtuen paalujen yläpäillä on ollut lisävarmuutta lahoamista vastaan.

Arvioitaessa paalun rakenteellista kantavuutta varmuuskertoimet olivat puristuskokeiden perusteella 2,2…7,3 verrattuna vuosina 1953…54 rakennetun osan suunnittelukuormaan. Tältä osin paalujen kantavuus todettiin vielä riittäväksi, eikä rakennuksessa esiinnykään perustusten painumien aiheuttamaa halkeilua. Puristusmurtolujuuden keskiarvoiksi saatiin 5,6…12,6 MN/m^2. Rakentamismääräyskokoelmassa annettu märän pyöreän puun aika- ja kosteusluokan kertoimilla korjattu T30 lujuusluokan ominaispuristuslujuus on 12,6 MN/m^2.

Kimmomoduulien arvot vaihtelivat välillä 565…2154 MN/m^2. Rakentamismääräyskokoelmassa annetun terveen puun T30 lujuusluokan aikaluokan A ja kosteusluokan 4 kertoimilla korjattuun moduulin arvo on 2100 MN/m^2.

Puun tiheyden keskiarvot vaihtelivat pintapuun noin 300 kg/m^3 sydänpuun jopa noin 500 kg/m^3. Männyn normaaliarvot ovat 400…500…600 kg/m^3, jolloin terveen puun

puristuslujuus on 17...22...30 MN/m² kosteuspitoisuuden ollessa yli 35 %. Terveemmän väli- ja sydänpuun osuuden tiheydet olivat lähellä normaaliarvoja.

Puun kosteuspitoisuus oli suurimmillaan pintapuussa yli 300 %. Kosteuspitoisuuksien keskiarvot olivat 124...193 %. Puulla voidaan olettaa olevan riittävä puristuslujuus tavallisille kuormille, jos sen vesipitoisuus on alle 200 % ja puun tiheys yli 350 kg/m³.

Vesinäytteiden perusteella orsivesi on paikka paikoin varsin likaantunutta. Rakennuksen alta virtasi ulkopuolelle tehtyihin koekuoppiin runsaasti vettä. Vesi oli varsin puhdasta, mutta hyvin lämmintä. Veden lämpötila vaihteli ulkokuoppien +17...+21∘C rakennuksen sisäosiin tehdyn koekuopan +23∘C. Rakennuksen sisäpuolella sijainneen koekuopan 3 bakteerien kokonaispesäkeluku oli kertaluokkaa pienempi verrattuna rakennuksen ulkopuolella sijainneisiin koekuoppiin. Koekuopan 3 orsiveden lämpötila +23∘C oli odotetunkin korkea, sillä koekuoppa sijaitsi rakennuksen lämpimimmässä paikassa lämmönjakohuoneen kohdalla. Maanäytteiden bakteerien kokonaispesäkeluvut vaihtelivat välillä 3,9...8 milj.kpl/g.

10.1.3 Johtopäätökset

Vuonna 1984 tehdyssä tutkimuksessa pintapuun syöpymän todettiin olevan luokkaa 20...30 mm, josta täysin syöpynyt osa 20 mm. Syöpymän aiheuttajaksi silloin todettiin katkolaho. Nyt 15 vuotta myöhemmin syöpymää esiintyi kasvukairanäytteiden perusteella syvyydellä 20...50 mm, josta lähes täysin syöpynyt osuus (lahoisuusluokat 3 ja 4) oli keskimäärin 30 mm. Sienirihmastoja ei enää ollut juurikaan havaittavissa ja syöpymän aiheuttajaksi epäilläänkin nyt bakteeritoimintaa. Pahoin syöpyneen puun osuus näyttäisi 15 vuodessa lisääntyneen keskimäärin 10 mm.

Mikäli jatkossa oletetaan lahoamisen etenevän tasaista nopeutta, olosuhteiden paalujen ympärillä täytyy pysyä muuttumattomina, mieluummin jopa parantua, ja orsivedenpinnan on pysyttävä jatkuvasti paalujen päiden yläpuolella. Alimmillaan orsivesi on käynyt anturan alapinnan tasolla, noin tasolla –0,38, pisteessä 104O vuonna 1996. Muuten vedenpinta on pysytellyt keskimäärin 400...500 mm paalun päiden yläpuolella vuodesta 1984 lähtien.

Mikrobitoiminnan kannalta tilanne perustusten ympärillä on otollinen. Ravinnemäärät ja veden pieni happipitoisuus mahdollistavat vähän happea vaativien ja anaerobisten bakteerien toiminnan veden alla. Rakennuksen alla vesi on lisäksi niin lämmintä, että olosuhteet ovat siellä jopa suotuisat bakteeritoiminnalle.

Myöskään paalun puristusmurtolujuudessa ei saa tapahtua heikentymistä väli- ja sydänpuun osalla. Kasvukairanäytteiden ja prismapuristuskokeiden perusteella tällainen näyttäisi kuitenkin olevan mahdollista ja alkavaa syöpymistä havaittiin myös sydänpuun alueella. Yleensä bakteerien aiheuttama syöpyminen hidastuu, mitä pidemmälle pinnasta se etenee, mutta paalun sisäinen tai paalun päästä syyn suunnassa etenevä syöpymä voi edetessään muuttaa tilannetta.

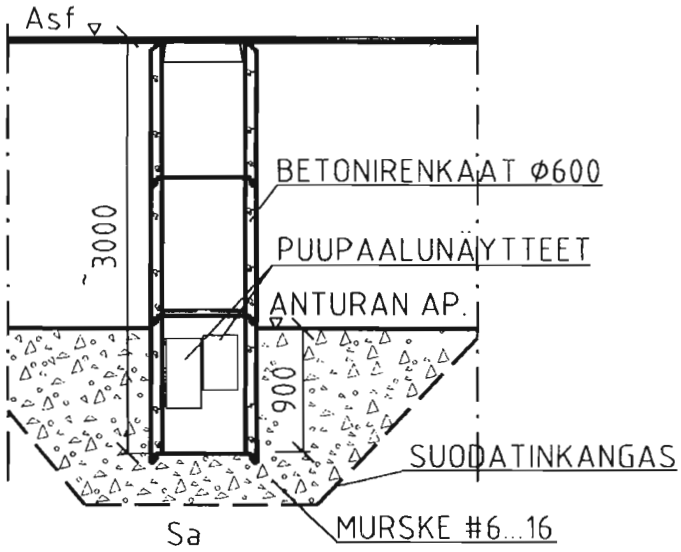
Koekuopan 1 paalussa 4 havaittu paalun pään pehmeneminen noin 10 mm matkalta voi useissa paaluissa samankaltaisena esiintyessään aiheuttaa rakennukselle painumia. Tähän saakka mitattu vuotuinen painuma on ollut luokkaa 1,5 mm, joka todennäköisesti johtuu muista seikoista kuten koko paaluryhmän hitaasta painumisesta maahan, johon se on lyöty, kuin paalujen rakenteellisen kantavuuden heikentymisestä.

10.1.4 Jatkotoimenpiteet

Tehtyjen tutkimusten perusteella todettiin, ettei välitöntä perustusten korjaustarvetta ole. Puupaaluperustuksen elinkaareksi ennustettiin noin 15...20 vuotta, minkä jälkeen korjaustoimenpiteisiin olisi ryhdyttävä. Vanhan perustuksen säilyttäminen edellyttää jatkuvaa puupaalujen kunnon tarkkailua ja koekuoppatarkastelujen väliksi ehdotettiin noin 5 vuotta. Koekuoppia tulisi tehdä sekä nyt tehtyjen koekuoppien kohdalle, että myös uusiin ennen tutkimattomiin paikkoihin sekä rakennuksen ulko- että sisäpuolelle. Koekuopan 1 kohdalle tehtiin orsivesikaivo, johon sijoitettiin kaksi paalunäytettä. Orsivesikaivon periaatekuva on esitetty kuvassa *10.3*. Näytteistä voidaan seurata lahoamisen etenemistä lyhyemmällä aikavälillä kaivamatta perustuksia auki, vaikka kaivon olosuhteet eivät täysin vastaakaan maan ympäröimien puupaalujen olosuhteita.

Rakennuksen vaaituksia tulee jatkaa vuosittain painumamuutosten havaitsemiseksi riittävän ajoissa. Orsivedessä olevien jätevesiviitteiden takia ehdotettiin kiinteistön omien

sekä rakennusta ympäröivien kaupungin jätevesiviemärien tarkistamista vuotojen varalta. Sen jälkeen orsiveden laatua voitaisiin parantaa esimerkiksi syöttämällä puhdasta vettä rakennuksen alle.



Kuva 10.3. Periaatekuva orsivesikaivosta, johon voidaan sijoittaa puupaalunäytteitä (Suomen IP-Tekniikka Oy).

Kuvissa *10.4...10.13* on esitetty koekuoppatutkimusten yhteydessä otettuja valokuvia. Tutkimustuloksia on kerätty liitteeseen 1.

Kuva 10.4. Suomen kansallisteatterin puupaalututkimusten koekuoppa 1 Läntisellä teatterikujalla. Kuopan tyhjennys vedestä käynnissä.

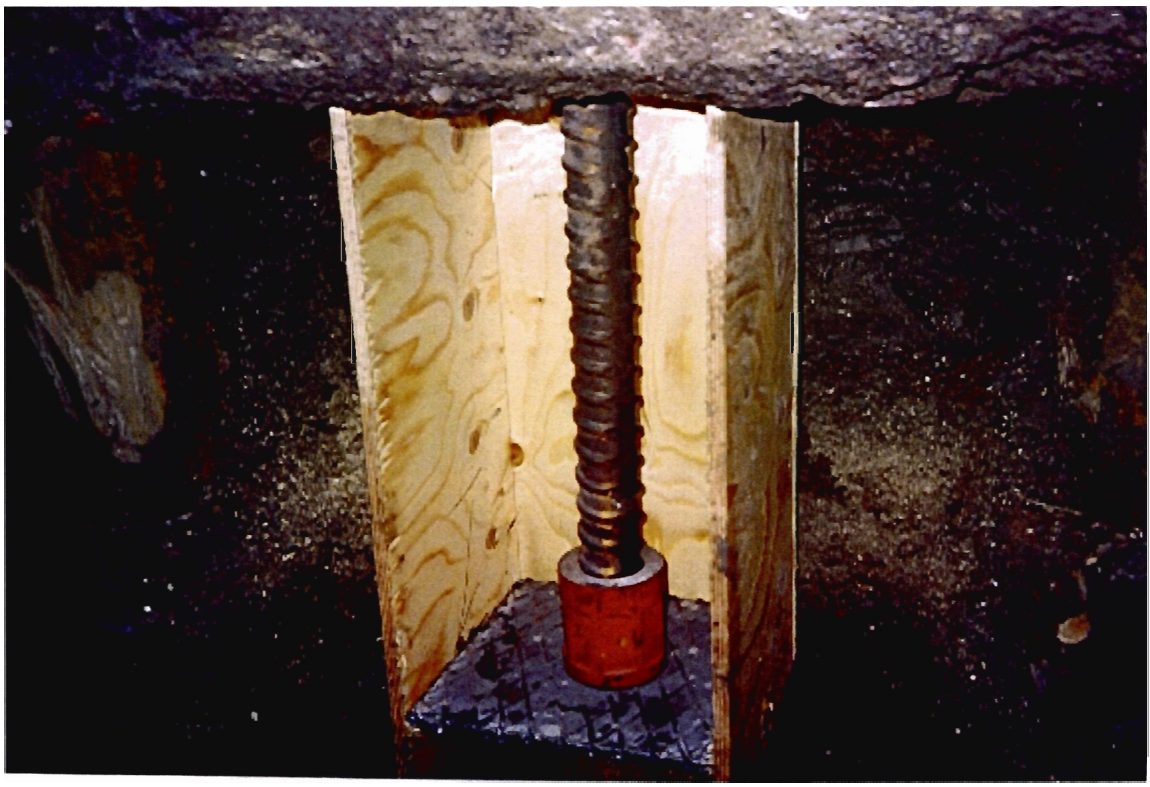
Kuva 10.5. Suomen kansallisteatterin koekuopasta 1 paljastunut puupaalu.

Kuva 10.6. Suomen kansallisteatteri, koekuoppa 2 Läntisellä teatterikujalla.

Kuva 10.7. Suomen kansallisteatteri, koekuopan 2 paaluja.

Kuva 10.8. Suomen kansallisteatteri, koekuopasta 2 löytynyt paalujatkos.

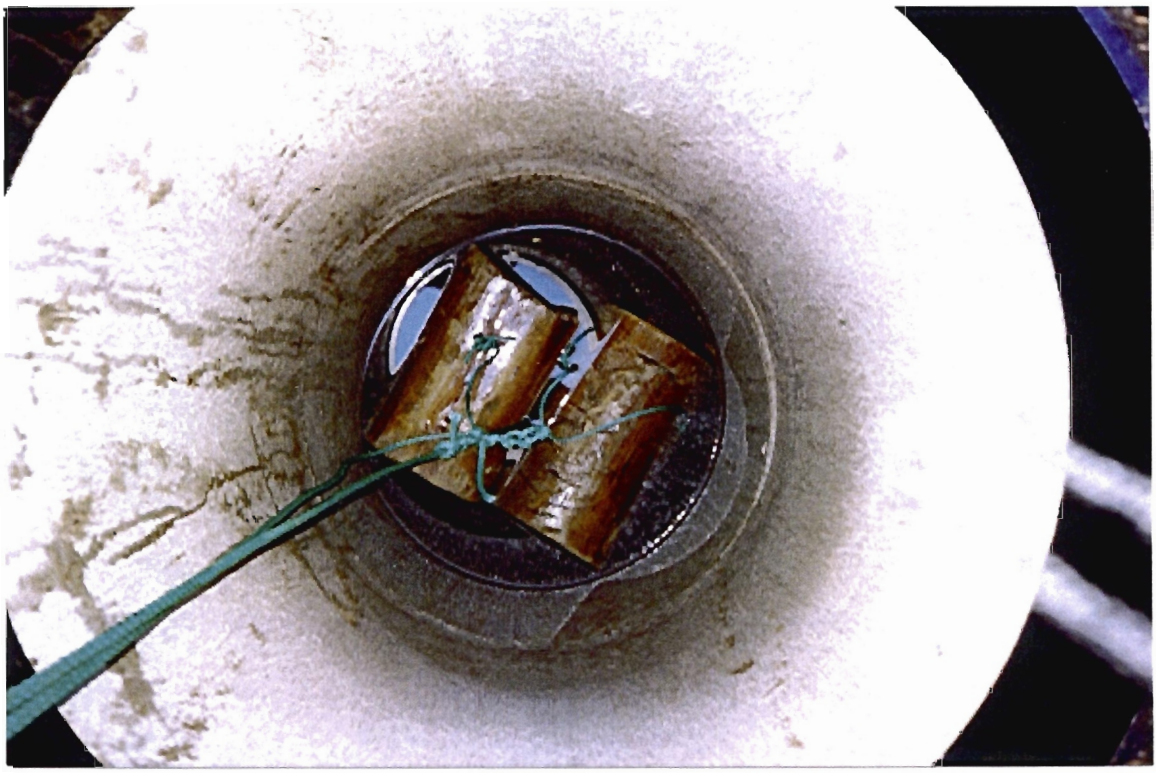
Kuva 10.9. Suomen kansallisteatteri, koekuopasta 2 sahattu paalunäyte.



Kuva 10.10. Suomen kansallisteatteri, koekuopasta 2 katkaistun paalun korjausmenetelmä. Erikoisteräksen kantavuus noin 10 tonnia. Muotti täytetään betonilla.

Kuva 10.11. Suomen kansallisteatteri, rakennuksen sisäosiin tehty koekuoppa 3.

Kuva 10.12. Suomen kansallisteatteri, koekuoppa 4 Itäisellä teatterikujalla.



Kuva 10.13. Suomen kansallisteatteri, orsivesikaivoon lahoamisen etenemisen tutkimista varten upotetut paalunäytteet.

10.2 Helsingin rautatieasema

Helsingin rautatieaseman paalutustyöt aloitettiin koepaalutuksella vuoden 1904 syksyllä. Asemarakennus ja länsisiipi ovat valmistuneet 1919, itäsiipi 1909 ja sen laajennus vuonna 1936. Kohteessa on tehty puupaalujen lahoisuustutkimuksia vuosina 1983…84, 1989…90 ja 1996. Näytteet on tutkittu VTT:n Puulaboratoriossa. Näytteitä otettiin seitsemästä Elielin aukion rakentamisen yhteydessä käytöstä poistettavasta paalusta aseman länsisiiven päätyseinälinjalta. Näytteistä kolme tutkittiin TTKK:n Geotekniikan laboratoriossa ja loppujen näytteiden tutkimisesta huolehti VTT.

10.2.1 Tehdyt tutkimukset

TTKK:lle toimitettiin otetuista näytteistä kolme. Näytteet olivat paalujen yläpäästä katkaistuja kappaleita. Näytteiden pituudet olivat 570, 470 ja 390 mm. Näytteiden yläpäät olivat vaurioituneet mekaanisesti joko kaivutyön, tai paalujen anturasta irrottamisen yhteydessä. Näytteet olivat geotekniikan laboratorioon saapuessaan melko kuivia.

Paaluissa ei ollut puukolla kokeilemalla juurikaan havaittavissa lahoa pintakerrosta, toisin kuin naapurirakennuksen, Suomen kansallisteatterin, paaluissa (vertaa 10.1.1).

Pisin näytteistä puristettiin kokonaisena. Kahdesta muusta näytteestä sahattiin kiekot prismapuristuskokeita varten. Prismapuristuskokeita tehtiin yksi sarja kummastakin näytteestä. Jokaisesta paalunäytteestä otettiin lisäksi kaksi kasvukairanäytettä, yksi näytteen yläosasta ja yksi näytteen alaosasta. Kasvukairanäytteille suoritettiin lahoisuustutkimus TTKK:n Vesi- ja ympäristötekniikan laboratoriossa. Puristuskokeet suoritettiin kuten kohdassa 10.1.1 on selvitetty.

10.2.2 Tutkimustuloksia

Vanhojen dokumenttien mukaan puupaalujen suunnittelukuormana kohteessa on käytetty kuormitusta 8 t/paalu (noin 80 kN/paalu) mitoittavan paalun kärjen halkaisijan ollessa 8'' (noin 200 mm).

Kokonaispuristuskokeen murtokuormaksi saatiin 294 kN, jolloin varmuuskertoimeksi suunnittelukuormaa vastaavalle kuormalle tulee 3,7. Puun puristusmurtolujuudeksi tuli 10,9 MN/m^2 ja kimmomoduuliksi 1108 MN/m^2. Näytteen halkaisija oli keskimäärin 185 mm.

Toisen näytteen yläpäästä tehdyt prismapuristuskokeet antoivat koko poikkileikkauksen varmuuskertoimeksi murtumista vastaan 4,2 puristusmurtolujuuden ollessa 10,7 MN/m^2. Kun murtokuorma laskettiin sydän-, väli- ja pintapuun pinta-alojen painotettujen keskiarvojen mukaan varmuuskertoimeksi saatiin 4,4. Kimmomoduuliksi saatiin keskimäärin 893 MN/m^2. Kosteuspitoisuus oli keskimäärin 77 % ja tiheys 434 kg/m^3.

Kolmannen näytteen alapäästä tehdyt prismapuristuskokeet antoivat koko poikkileikkauksen varmuuskertoimeksi murtumista vastaan 6,3 puristusmurtolujuuden ollessa 10,7 MN/m^2. Kun murtokuorma laskettiin sydän-, väli- ja pintapuun pinta-alojen painotettujen keskiarvojen mukaan, varmuuskertoimeksi saatiin 6,4. Kimmomoduuliksi saatiin keskimäärin 1296 MN/m^2. Kosteuspitoisuus oli keskimäärin 61 % ja tiheys 451 kg/m^3.

Kasvukairanäytteiden perusteella kahdesta paalusta löytyi jossain määrin syöpymää sydänpuun osuudella. Pintapuussa ei ollut puukolla kokeiltaessa havaittavissa selkeää pehmentynyttä osaa. Kahden paalunäytteen halkaisija oli noin 200 mm, mikä vastaa vuoden 1904 koepaalutuksessa käytettyä latvaläpimittaa 8''. Tämän perusteella ne voivat olla jatkettuja paaluja, jotka on lyöty latva ylöspäin. Yhden paalunäytteen halkaisija taas oli 245 mm, joten ilmeisesti se on lyöty maahan tyvi ylöspäin. Tällöin paalulla on lisävarmuutta lahoamista vastaan, kun paalun yläpää on halkaisijaltaan huomattavasti suurempi kuin kantavuuden mitoittava latvamitta.

Arvioitaessa paalun rakenteellista kantavuutta varmuuskertoimet olivat puristuskokeiden perusteella luokkaa 4...6 verrattuna alkuperäiseen suunnittelukuormaan. Tältä osin paalujen kantavuus on riittävä. Puristusmurtolujuudelle saadut keskiarvot 10,7...10,9 MN/m^2 ovat vain hieman alle rakentamismääräyskokoelman märän pyöreän puun aika- ja kosteusluokan kertoimilla korjattua T30 lujuusluokan ominaispuristuslujuutta 12,6 MN/m^2.

Paalunäytteiden kimmomoduulien arvot 893...1296 MN/m^2 ovat pienempiä kuin Rakennusmääräyskokoelmassa annetun terveen puun T30 lujuusluokan aikaluokan A ja kosteusluokan 4 kertoimilla korjattuun moduulin arvo 2100 MN/m^2.

Puun tiheyden keskiarvot kahdessa tutkitussa paalussa vastaavat männyn normaaliarvoja 400...500...600 kg/m^3, jolloin terveen puun puristuslujuus on 17...22...30 MN/m^2 kosteuspitoisuuden ollessa yli 35 %.

Puun kosteuspitoisuus osoittautui hyvin alhaiseksi sen ollessa korkeimmillaan hieman yli 100 %. Kosteuspitoisuuksien keskiarvot olivat 77 % ja 61 %. Puulla oletetaan olevan riittävä puristuslujuus tavallisille kuormille, jos sen vesipitoisuus on alle 200 % ja puun tiheys yli 350 kg/m^3. Tällä perusteella paalunäytteiden kunto voidaan todeta hyväksi.

Kasvukairanäytteiden perusteella kahden paalunäytteen sisäosissa esiintyi paikoitellen luokan 3 syöpymää ja näytteissä oli havaittavissa sinistymää. Luokan 4 syöpymän esiintyminen hieman sisemmässä osassa puuta selittyy todennäköisesti näytteenotossa tapahtuneesta näytteen osien sekoittumisesta, sillä kasvukairanäytteitä otettaessa osa näytteistä tarttui kiinni kairaan, eikä niitä saatu sieltä ehjänä ulos.

VTT:n tutkimustulokset neljästä muusta paalunäytteestä olivat samankaltaisia kuin tässä tutkimuksessa saadut tulokset (VTT Rakennustekniikka, tutkimusselostus nro RTE2062/99). Myös näistä näytteistä löytyi luokan 2...3 lahoa poikkileikkauksen sisäosista. Soluseinien syöpymisen todettiin johtuneen pääasiassa bakteeritoiminnasta, eikä katkolahottajille tyypillisiä kavernimuodostumia havaittu.

10.2.3 Johtopäätökset

Verrattuna VTT:n vuonna 1996 tekemiin lahoisuus- ja lujuustutkimuksiin nyt saadut tulokset ovat hyvin samankaltaisia (VTT Rakennustekniikka, tutkimusselostus nro RTE30628/96). Vuoden 1996 tutkimuksessa lahoisuusluokkien 3 tai 4 puuta ulottui 10...60 mm syvyydelle puun pinnasta. Nyt saatujen tulosten mukaan luokan 3 lahoisuutta ulottui 20...60 mm syvyydelle, yhdessä näytteessä 90 mm syvyydelle. Paaluista 5 ja 6 löytyi lisäksi puun sisäosista luokan 3 lahoa. Puristusmurtolujuuksien osalta vuoden 1996 tutkimuksessa saatiin suurimmalta osin korkeampia lujuuden arvoja. Toisaalta tuloksia ei voi suoraan verrata toisiinsa, sillä tutkimukset on tehty eri kohdista rakennusta. Sienirihmastoja ei enää ole ollut juurikaan havaittavissa ja syöpymän aiheuttajaksi epäilläänkin bakteeritoimintaa.

Puristuslujuuksien osalta nyt saatuihin tuloksiin saattaa vaikuttaa se, että näytteiden päät olivat mekaanisesti vaurioituneita ja näytteissä esiintyi ilmeisesti tästä johtuvia halkeamia. Näytteet vaikuttivat saapuessaan melko kuivilta, mitä seikkaa prismojen melko alhaiset kosteuspitoisuudet tukevat. Ilmeisesti myös näytteiden tarttuminen kasvukairaan niitä otettaessa johtuu puun kuivuudesta. Pehmeän pinnan puuttuminen piikillä koetellessa saattaa myöskin johtua kuivahtamisesta, mutta toisaalta lahoisuusluokan 4 puuainesta ei lahoisuustutkimuksissa näytteen pinnasta juurikaan löytynyt.

Paalun 5 näytteen puristusmurtolujuus ja kimmomoduuli olivat tavallisuudesta poiketen suurempia pintapuussa kuin väli- tai sydänpuussa, mikä ei kasvukairanäytteiden perusteella vaikuttaisi todennäköiseltä. Muutoin eri näytteiden puristusmurtolujuudet olivat lähes yhtäsuuria sekä prismapuristuskokeissa että näytteessä, joka puristettiin kokonaisena. Tästä johtuen varmuuskertoimien muutokset ovat suhteessa paalun halkaisijaan.

Kohteen paalut ovat vielä kohtuullisen hyväkuntoisia ja ne kantavat niille tulevat kuormat riittävällä varmuudella. Jatkossa olosuhteiden paalujen ympärillä on pysyttävä muuttumattomina ja orsivedenpinnan pysyttävä jatkuvasti paalujen päiden yläpuolella, jotta paalujen käyttöikää voidaan jatkaa. Alimmillaan orsivesi on käynyt pisteessä 9, mikä sijaitsee lähinnä nyt tutkittuja paaluja, vuosien 1993…1997 aikana noin tasolla +0,45. Tämä tapahtui maaliskuussa vuonna 1996. Hälytysrajana pisteessä on taso +0,35. Nyt tutkittujen paalujen päät ovat olleet korkeimmillaan tasolla –0,90, joten orsivedenpinta on pysytellyt yli metrin paalun päiden yläpuolella. Lähteen /15/ mukaan puupaalujen säilyvyys on hyvä vedenpinnan pysytellessä yli metrin paalun päiden yläpuolella. Elielin aukion ja alikulkutunnelin rakentamisen vaikutuksia orsivedenpinnan tasoon rakentamisen aikana ei ole tarkkaan tiedossa.

Nyt tehdyt tutkimukset perustuvat hyvin pieneen aineistoon. Siten puun syöpymisen kehittymistä ei ole mahdollista ennustaa koko rakennuksen alueella ja nyt tehty tutkimus antaa vain viitteitä koko perustuksen tilasta.

10.2.4 Jatkotoimenpiteet

Tämän tutkimuksen perusteella pikaista perustusten korjaustarvetta ei ole. Rakennuksen muilla osilla ja erityisesti keskellä lämpimissä olosuhteissa olevat paalut voivat kuitenkin olla huonommassa kunnossa kuin nyt tutkitut ulkoseinän alla olevat paalut, joten niiden kunnon tutkiminen on suositeltavaa.

Koska lahon etenemisnopeutta on vaikeaa ellei mahdotonta ennustaa hyväksyttävällä tarkkuudella, tulee perustusten kuntoa seurata tasaisin väliajoin. Koekuoppatutkimuksia tulee tehdä tasaisesti 5…10 vuoden välein lahoamisen etenemisen kartoittamiseksi. Tällöin

näytteitä olisi otettava sekä aiemmin tutkituista, että aiemmin tutkimattomassa kohdassa sijaitsevista paaluista sekä rakennuksen ulko- että sisäpuolelta.

Rakennuksen vaaituksia tulee jatkaa vuosittain painumien havaitsemiseksi. Painumamittausten avulla voidaan myös kohdentaa mahdolliset jatkotutkimukset, mikäli epätasaista painumista tapahtuu.

Elielin aukion ja alikulkutunnelin rakentamisen vaikutusta orsivedenpinnan tasoon on seurattava jatkamalla orsivedenpinnan tarkkailua olemassaolevista tarkkailuputkista.

Tutkimustuloksia on koottu liitteeseen 2.

10.3 Lauttasaaren ala-aste

Tutkimuksen kohteena oli Lauttasaaren ala-asteen puupaaluperustus. Kohde on rakennettu vuonna 1953. Rakennus on perustettu osittain kallion varaan, osittain teräsbetonipaaluille tai –pilareille ja osittain puupaalutuksen varaan. Aikaisemmin perustuksia on tutkittu nyt tehdyn koekuopan 1 kohdalta. Silloin runsaan vedentulon vuoksi otettiin puunäytteitä vain anturan vieressä sijainneesta parrusta (VTT Rakennustekniikka, tutkimusselostus nro RTE 668/99).

10.3.1 Tehdyt tutkimukset

Kohteeseen tehtiin kaksi koekuoppaa. Koekuoppa 2 avattiin 20.7. ja koekuoppa 1 21.7.1999. Orsivesinäytteet otettiin koekuoppiin rakennuksen alta virranneesta vedestä kuoppien kaivamisen jälkeen. Näytteissä oli hienoinen mädäntyneen tuoksu. Vesinäytteistä tutkittiin paikanpäällä lämpötila, sähkönjohtavuus ja happipitoisuus. Veden lämpötila molemmissa näytteissä oli noin +16∘C. Maa paalujen ympärillä oli hiekkaista silttiä, joka voimakkaan veden virtauksen johdosta valui koekuoppaan vaikeuttaen näytteenottamista varsinkin koekuopassa 2.

Koekuopasta 1 saatiin esiin kuusi paalua, joista yhdestä otettiin noin 700 mm näytekappale ja neljästä paalusta yhteensä seitsemän kasvukairanäytettä. Rakennuksen alta virtaavasta vedestä otettiin yksi vesinäyte, jonka lämpötilaksi mitattiin +16.0◦C. Koekuopasta 2 saatiin esiin kolme paalua, joista kahdesta otettiin yhteensä kolme kasvukairanäytettä. Näytteenottoa haittasi orsiveden kova virtaus, joka kuljetti maata kaivannon pohjalle. Tästä johtuen kaivua ei saatu ulotettua riittävän syvälle, jotta paalunäyte kokonaismittakaavaista puristuskoetta varten olisi saatu otettua. Rakennuksen alta virtaavasta vedestä otettiin vesinäyte, jonka lämpötilaksi mitattiin +16.4◦C. Paaluissa ei ollut juurikaan havaittavissa pehmeätä puuta puukolla kokeiltaessa. Anturan alla ei ollut havaittavissa ilmarakoa.

Katkaistun paalunosan tilalle asennettiin teräspilari HE 171*180, jonka päihin oli hitsattu pyöreät teräslevyt. Teräspilari kiilattiin puukiiloilla anturaa vasten.

Koekuopat täytettiin heti näytteidenottamisen jälkeen. Paaluja ympäröinyt siltti painettiin kaivinkoneella anturan alle, minkä jälkeen kuopat täytettiin kaivumassoilla.

Koekuopasta 1 otettiin palanäyte prisma- ja kokonaispuristuskokeita varten. Kasvukairanäytteistä TTKK:n Vesi- ja ympäristötekniikan laboratorio suoritti lahoisuustutkimuksen. Prismapuristuskokeita tehtiin yksi sarja paalunäytteen yläpäästä ja jäljelle jäänyt osa puristettiin kokonaisena. Yksi prismoista valittiin poikkileikkauksesta löytyneen sinistyneen osan alueelta. Kokonaisena puristetun kappaleen korkeus oli 485 mm ja halkaisija keskimäärin 260 mm. Puristuskokeet suoritettiin kuten kohdassa 10.1.1 on selvitetty.

Otetut vesinäytteet tutkittiin TTKK:n Vesi- ja ympäristötekniikan laboratoriossa. Vesinäytteitä otettiin lisäksi kaksi kappaletta rakennuksen kellaritilassa olleesta vapaasta vedestä.

10.3.2 Tutkimustuloksia

Suunnittelukuormana kohteen puupaaluille on käytetty dokumenttien mukaan kuormitusta 10 tonnia/paalu (100 kN/paalu) mitoittavan paalun kärjen halkaisijan ollessa 7'' (noin 180 mm).

Koekuopan 1 paalunäytteen murtokuormaksi puristettaessa kokonaisena saatiin 711 kN, jolloin varmuuskertoimeksi suunnittelukuormaa vastaavalle kuormalle tulee 7,1. Puun puristusmurtolujuudeksi tuli 14,5 MN/m^2 ja kimmomoduuliksi saatiin 2071 MN/m^2. Näytteen halkaisija oli noin 260 mm. Paalun yläpäästä tehdyt prismapuristuskokeet antoivat koko poikkileikkauksen varmuuskertoimeksi murtumista vastaan 6,0 puristusmurtolujuuden ollessa 10,9 MN/m^2. Mikäli murtokuorma laskettiin sydän-, väli- ja pintapuun pinta-aloja painottaen varmuuskertoimeksi saatiin 5,7. Kimmomoduuliksi saatiin keskimäärin 1621 MN/m^2. Kosteuspitoisuus oli keskimäärin 143 % ja tiheys 381 kg/m^3.

Nyt tutkitut paalut olivat hyväkuntoisia. Lahoisuusluokkien 3 ja 4 syöpymää esiintyi pintapuussa ainoastaan 5…10 mm matkalla. Kokonaisessa palanäytteessä oli havaittavissa pienellä poikkileikkauksen alalla näytteen yläpäässä sinistymää. Sydänpuun sinistymää oli havaittavissa myös kasvukairanäytteissä koekuoppa 1, näyte 7 ja koekuoppa 2, näyte 3. Tutkitut paalut on lyöty tyvi ylöspäin, joten paalujen yläpäät ovat halkaisijaltaan huomattavasti suuremmat, kuin kantavuuden mitoittava latvamitta 7''. Tästä johtuen paalujen yläpäillä on ollut lisävarmuutta lahoamista vastaan.

Arvioitaessa paalun rakenteellista kantavuutta varmuuskertoimet olivat puristuskokeiden perusteella luokkaa 6…7 verrattuna suunnittelukuormaan. Tältä osin paalujen kantavuus on hyvällä varmuudella riittävä. Puristusmurtolujuudelle saadut keskiarvot vastaavat rakentamismääräyskokoelman märän pyöreän puun aika- ja kosteusluokan kertoimilla korjattua T30 lujuusluokan ominaispuristuslujuutta 12,6 MN/m^2.

Kimmomoduulin arvot 1621 MN/m^2 prismapuristuskokeista saatuna ja 2071 MN/m^2 kokonaispuristuskokeesta saatuna osoittaa paalun puuaineksen olevan vielä hyvässä kunnossa, jos sitä verrataan Rakennusmääräyskokoelmassa annetun terveen puun T30 lujuusluokan aikaluokan A ja kosteusluokan 4 kertoimilla korjattuun moduulin arvoon 2100 MN/m^2.

Puun tiheyden keskiarvot vastaavat männyn normaaliarvoja 400…500…600 kg/m^3, jolloin terveen puun puristuslujuus on 17…22…30 MN/m^2 kosteuspitoisuuden ollessa yli 35 %.

Puun kosteuspitoisuus oli suurimmillaan 280 % sinistyneestä pintapuun kohdasta sahatun prisman kohdalla. Kosteuspitoisuuksien keskiarvo oli 143 %. Puulla oletetaan olevan riittävä puristuslujuus tavallisille kuormille, jos sen vesipitoisuus on alle 200 % ja puun tiheys yli 350 kg/m^3. Tälläkin perusteella voidaan poikkileikkauksen katsoa olevan hyvässä kunnossa.

Kasvukairanäytteet osoittivat kahdessa näytteessä sydänpuun alueella olevan sinistymää. Vallitsevin lahoisuusluokka näytteissä oli 1 ja näytteistä löytyi myös täysin tervettä puuta. Vesinäytteiden perusteella orsivesi on puhdasta. Koekuoppaan rakennuksen alta virrannut vesi oli melko lämmintä (noin +16°C), mikä mahdollistaa mikrobitoiminnan veden alla. Veden happipitoisuus, noin 3 mg/l, on riittävä vähän happea vaativien mikrobien toiminnalle.

10.3.3 Johtopäätökset

Kaikkiaan kohteen puupaalut vaikuttavat olevan hyvässä kunnossa. Joissakin näytteissä oli näkyvissä sinistymää puun sisäosissa, joten jonkinasteista syöpymää, ilmeisesti bakteerien aiheuttamaa, on tapahtumassa. Bakteerien aiheuttama puupaalujen syöpyminen veden alla on kuitenkin yleensä hyvin hidasta ja hidastuu vielä mitä syvemmälle puun pinnasta se etenee. Sienirihmastoja ei ollut juurikaan havaittavissa.

Orsivesitilanne kohteessa on hyvä ja paalujen päät ovat reilusti, noin 1m, orsivedenpinnan alapuolella. Mikäli tilanne säilyy tällaisena, voidaan paalujen säilyvyyden olettaa olevan hyvä jatkossakin.

Kaikkiaan tutkimukset perustuvat varsin pieneen aineistoon. Siten puun syöpymisen kehittymistä ei ole mahdollista ennustaa koko puupaalutuksen alueella ja nyt tehty tutkimus antaa vain viitteitä koko perustuksen tilasta.

10.3.4 Jatkotoimenpiteet

Tämän tutkimuksen perusteella perustusten korjaustarvetta ei ole. Rakennuksen keskellä lämpimissä olosuhteissa olevat paalut voivat olla huonommassa kunnossa kuin ulkoseinien alla olevat paalut, joten niiden kunnon tutkiminen viimeistään seuraavan tutkimuksen yhteydessä on suositeltavaa. Koska lahon etenemisnopeutta on vaikeaa ellei mahdotonta ennustaa hyväksyttävällä tarkkuudella, tulee perustusten kuntoa seurata tasaisin väliajoin. Seuraava koekuoppatutkimus tulisi tehdä viimeistään 10 vuoden kuluttua. Tällöin näytteitä tulee ottaa sekä nyt tutkituista, että aiemmin tutkimattomassa kohdassa sijaitsevista paaluista. Tällöin lahoamisen mahdollista etenemistä voidaan verrata nyt saatuihin tutkimustuloksiin. Ainakin yksi koekuopista on suositeltavaa tehdä rakennuksen kellaritiloihin.

10.4 Sänkiniitty, Kehä III

Tutkimuksen kohteena oli pengerlaatan paalutus Kehä III:lla Sänkiniityn kohteessa Vantaalla. Pengerlaattana on yhtenäinen 250 mm betonilaatta, joka tukeutuu puupaalujen varaan. Paalujen keskiöetäisyys on suunnitelmien mukaan 1,7 m. Vuonna 1974 tehdyssä kohteen korjauksessa on edellytetty käytettäväksi paaluja, joiden latvan halkaisija on vähintään 7'' (noin 180 mm). Paalut ovat mäntyä tai kuusta ja niiden yläpäät on lahosuojattu paalujen lyönnin yhteydessä patruunakyllästysmenetelmällä käyttäen kaksinkertaista kyllästysainemäärää normaaliin verrattuna. Lisäksi suojaus on varmistettu ulkoisella lahosuojaliuoskäsittelyllä 500 mm matkalla paalun yläpäässä. Pengerlaatan alla on yhtenäinen 200...300 mm korkea tyhjätila, joka reunimmaisten paalujen kohdalla on luokkaa 500 mm.

Kohteessa on suoritettu lahoisuustutkimuksia vuosina 1988 ja 1991. Nyt pyrkimyksenä oli löytää samat paalut, joista aikaisemmat tutkimukset on tehty ja vertailla lahoamisen kehittymistä 11 vuoden aikajänteellä.

10.4.1 Tehdyt tutkimukset

Koekuoppia kaivettiin kaksi kappaletta paaluluvuille 92+95 (KK1) ja 93+93 (KK2). Kummastakin koekuopasta otettiin palanäytteet TTKK:n Geotekniikan laboratoriossa tehtäviä prisma- ja kokonaispuristuskokeita varten. Näytteet sahattiin pengerlaatan ulkopuolella sen välittömässä läheisyydessä sijainneista paaluista. Lisäksi VTT otti kasvukairanäytteitä laatan alla sijaitsevista paaluista, joista osasta oli otettu vastaavat näytteet jo aikaisemmin vuosina 1988 ja 1991 tehdyissä kahdessa tutkimuksessa. Näistä näytteistä VTT on laatinut raportin Tutkimusselostus n:o YKI 433/99.

Koekuopasta 1 sahattiin noin 600 mm mittainen kappale paalun päästä. Näyte puristettiin kokonaisena päiden tasaamisen jälkeen. Koekuopasta 2 sahattiin yhdestä paalusta kaksi erillistä noin 600 ja 400 mm mittaista kappaletta, joitten kummankin alapäästä sahattiin noin 100 mm kiekot prismapuristuskokeita varten. Lisäksi paalun yläpää puristettiin kokonaisena päiden tasaamisen jälkeen.

Koekuopista otettiin vesinäytteet kuoppien avaamisen jälkeen pohjaveden tultua esiin. Pohjavedenpinta sijaitsi molemmissa kuopissa kuopan pohjan tasolla noin 1 m pengerlaatan alapinnan tason alapuolella. Laatan alapinnan tasoksi on vuonna 1991 mitattu koekuopassa 1 +20.51 ja koekuopassa 2 +20.54. Vedenpinnan korkeustasoksi on mitattu 10.6.1991 koekuopan 1 kohdalla +19.05 ja koekuopan 2 kohdalla +19.29 (VTT:n raportti TGL1806/91).

Koekuopasta 2 kahdessa osassa otettu paalunäyte jaettiin alustavasti viiteen eri tasoon, joista kiekot prismojen tekoa varten voitaisiin valita. Tarkoituksena oli tutkia puun puristuslujuutta syvyyden suhteen. Silmämääräisen tarkastelun ja kiekon 3 tutkimisen jälkeen päädyttiin tekemään kokeet kahdesta kiekosta, kiekoista 3 ja 5. Kiekko 3 edustaa maan rajapinnassa kovimmassa lahoamisrasituksessa olevaa näytettä, kun taas kiekko 5 sijaitsee maan sisällä kosteissa olosuhteissa kapillaarisen vedennousun alueella ja ainakin osan ajasta vedenpinnan alapuolella.

Koekuopan 1 näyte puristettiin kokonaisena päiden tasaamisen jälkeen. Näytteen yläpäästä jouduttiin sahaamaan noin 150 mm pyöristynyt osa pois. Puristetun kappaleen korkeus oli 490 mm ja halkaisija 175 mm. Koekuopan 2 näytteestä puristettiin 450 mm mittainen

prismapuristuskokeiden ja pään tasauksen jälkeen jäljelle jäänyt osa. Kappaleen halkaisija oli 200 mm.

Puristuskokeet suoritettiin kuten kohdassa 10.1.1 on selvitetty.

10.4.2 Tutkimustuloksia

Suunnittelukuormana kohteessa on käytetty 186 kN/paalu paalun kärjen halkaisijan ollessa 7'' eli noin 180 mm (VTT:n raportti TGL1806/91).

Koekuopan 1 paalun murtokuormaksi kokonaispuristuskokeessa saatiin 366 kN, jolloin varmuuskertoimeksi suunnittelukuormaa vastaavalle kuormalle tulee noin 2,0. Koekuopassa 2 kokonaisena puristetun paalun yläpää edusti myös paalun heikointa osaa. Paalun murtokuormaksi saatiin 215 kN, jolloin varmuuskerroin edellämainitulle suunnittelukuormalle on noin 1,2. Näytteen halkaisija oli 200 mm. Maan rajapinnassa olevan puun lujuutta kuvaavan kiekon 3 prismapuristuskokeet antoivat koko poikkileikkauksen puristusmurtolujuuden keskiarvon mukaan varmuuskertoimeksi murtumista vastaan 1,3. Mikäli murtokuorma laskettiin sydän-, väli- ja pintapuun pinta-aloja painottaen, varmuuskertoimeksi saatiin 1,2. Kiekon 5 vastaavat prismapuristuskokeiden antamat varmuuskertoimet olivat 2,4 ja 2,2.

Koekuopan 1 kokonaispuristuskokeen kimmomoduuliksi saatiin 2272 MN/m^2. Koekuopassa 2 prismapuristuskokeiden kimmomoduulien arvot vaihtelivat kiekossa 3 välillä 179...2007 MN/m^2 (keskiarvo 1157 MN/m^2) ja kiekossa 5 välillä 680...3648 MN/m^2 (keskiarvo 2089 MN/m^2). Kokonaispuristuskokeessa kimmomoduuliksi saatiin 1449 MN/m^2.

Puun kosteuspitoisuuden keskiarvoksi saatiin kiekolle 3 180 % ja kiekolle 5 119 % kosteuspitoisuuden kasvaessa säteittäisesti pintaa kohti ja ollessa enimmillään pintapuussa 220...240 %. Puun tiheys kiekossa 3 oli keskimäärin 444 kg/m^3 ja kiekossa 5 keskimäärin 433 kg/m^3.

Koekuopan 1 näyte oli paalun pyöristynyttä yläpäätä lukuun ottamatta varsin hyväkuntoista puuta. Näytteen halkaisija oli 175 mm eli suunnitelmissa määrätty latvan minimihalkaisija, joten kyseessä on ilmeisesti jatkettu paalu, jolloin jatkos on tehty tyvet vastakkain. Paalun käyttötarkoitus ei ole aivan varma, koska molemmista koekuopista otetut näytteet ovat paaluista, jotka sijaitsevat pengerlaatan ulkopuolella. Koekuopan 1 kokonaispuristuskokeen varmuuskerroin 2,0 osoittaa puun olevan vielä varsin hyväkuntoista.

Koekuopassa 2 paalun yläpää oli odotusten mukaan heikoin ja paalun lujuus kasvoi alaspäin mentäessä. Varmuuskerroin kokonaisena puristetussa paalunosassa oli 1,2. Tällöin paalun kuorma on jo lähellä murtokuormaa. Toisaalta tässä tapauksessa paalun pään olosuhteet poikkeavat pengerlaatan alla olevista paaluista sikäli, että paalu sijaitsee laatan vieressä ja on pengertäytön ympäröimänä, kun taas pengerlaatan alla olevien paalujen päät ovat laatan alla sijaitsevassa tyhjätilassa. Jatkuva maakosketus ja kosteusolosuhteiden muutokset saattavat nopeuttaa huomattavastikin lahoamisen kehittymistä. Koko poikkileikkauksen murtopuristuslujuuksien keskiarvon mukaan laskettuna varmuuskertoimeksi saatiin kiekon 3 alueella 1,3. Tämän voi katsoa vastaavan paalujen lujuutta maan ja pengerlaatan alaisessa tyhjätilassa maan pinnan tasolla. Jo noin 300 mm alempana kiekossa 5 varmuus oli 2,4, joten maan sisässä märissä olosuhteissa lahoaminen vaikuttaa olevan huomattavasti hitaampaa.

Koekuopan 1 kokonaispuristuskokeessa saatu kimmomoduulin arvo 2272 MN/m^2 osoittaa paalun puuaineksen olevan vielä hyvässä kunnossa, jos sitä verrataan Rakentamismääräyskokoelmassa annetun terveen puun T30 lujuusluokan aikaluokan A ja kosteusluokan 4 kertoimilla korjattuun moduulin arvoon 2100 MN/m^2. Sen sijaan koekuopan 2 paalun yläpään kohdalla kimmomoduulien keskimääräiset arvot 1157…2089 MN/m^2 prisma- ja kokonaispuristuskokeissa osoittavat puun lujuuden heikenneen.

Puun tiheyden keskiarvot vastaavat kuusen normaaliarvoja 320…450…500 kg/m^3, jolloin terveen puun puristuslujuus on 15…20…26 MN/m^2 kosteuspitoisuuden ollessa yli 35 %. Puun kosteuspitoisuus oli suurimmillaan pintapuussa yli 200 %. Kosteuspitoisuuksien keskiarvot olivat 180 % ja 119 %. Puulla on yleensä riittävä puristuslujuus tavallisille kuormille, jos sen vesipitoisuus on alle 200 % ja puun tiheys yli 350 kg/m^3. Tälläkin

perusteella voidaan pintapuun katsoa osittain menettäneen kantavuuttaan. Tutkituissa näytteissä ei havaittu merkkejä kyllästysaineista.

Vesinäytteiden perusteella pohjavesi on suhteellisen puhdasta. Ainoastaan kloridipitoisuudet ovat kohonneet, mikä ilmeisesti johtuu tien suolauksesta talvisin. Esimerkiksi saastuneisuutta osoittavat COD_{Cr} –pitoisuudet 33 ja 48 mg/l ovat jopa lähellä juomakelpoisen veden arvoja.

10.4.3 Johtopäätökset

Koko poikkileikkaukselle varmuuskerrointa laskettaessa on huomioitava lahon pintapuun osuus ja tarvittaessa poistettava se poikkileikkauspinta-alasta, kuten koekuopan 2 kiekossa 3 on tehty. Suurimmat varmuuskertoimet tässä tutkimuksessa saatiin laskettaessa kerroin prismapuristuskokeissa saadun koko poikkileikkauksen puristusmurtolujuuksien keskiarvon mukaan. Kaikkein edustavin tulos saadaan puristettaessa näyte kokonaisena, jolloin poikkileikkauksen käyttäytymisestä kuormituksessa saadaan oikea kuva.

Vuoden 1991 tutkimuksessa varmuuskertoimiksi oli pengerlaatan alta otetuista näytteistä arvioitu 1,3…1,9 (VTT:n raportti TGL1806/91). Arviot perustuvat kasvukairanäytteiden perusteella tehtyyn lahoisuusluokitukseen, kun terveen puun ominaispuristuslujuutena on käytetty Rakentamismääräyskokoelman märän pyöreän puun aika- ja kosteusluokan kertoimilla korjattua T30 lujuusluokan ominaispuristuslujuutta 12,6 MN/m^2. Kertoimet vastaavat hyvin nyt puristuskokeissa saatuja varmuuksia lukuun ottamatta koekuopan 2 paalun yläpäätä, jossa kerroin oli nyt pienempi.

Vuoden 1991 tutkimuksessa oli todettu, ettei lahoisuus ollut merkittävästi edennyt vuonna 1988 tehtyyn tutkimukseen verrattuna kuin joissakin yksittäisissä paaluissa. Nyt tehtyjen puristuskokeiden valossa paalujen kunnossa ei vaikuttaisi tapahtuneen suuria muutoksia vuodesta 1988 lähtien. Tosin kahden tutkitun paalun perusteella ei ole mahdollista arvioida koko rakenteen paalujen tilaa.

Myöskään VTT:n raportin Tutkimusselostus n:o YKI 433/99 mukaan ei paalujen pinnassa ole tapahtunut merkittävää lahoisuuden etenemistä vuoden 1991 tilanteeseen verrattuna.

Koekuopassa 3 lahoisuusluokkaan 2 kuuluvan puun osuus oli lisääntynyt ja koekuopan paaluissa oleva sisälaho pahentunut. Sisälahoa oli ilmaantunut myös yhteen paaluun, jossa sitä ei aikaisemmin ollut havaittu. Sisälahosta johtuen näiden paalujen rakenteellinen kantokyky on heikentynyt vuoden 1991 ennustetta nopeammin. Tällöin on olemassa riski yksittäisten paalujen rakenteellisen kantokyvyn merkittävästä alenemisesta tai jopa katoamisesta. Muutoin, jos lahon oletetaan etenevän tasaisesti, saatiin pienempiä lahon etenemisnopeuksia kuin vuoden 1991 tutkimuksessa. Lahoisuuden keskimääräisiä tunkeutumissyvyyksiä vertailtaessa lahoisuusluokkien 3 ja 4 osuus oli jopa pienentynyt. Tämä johtunee siitä, ettei näytteiden ottamista voida kohdentaa juuri samaan kohtaan paalua kuin edellisellä kerralla, jolloin lahon epätasainen eteneminen eri paalunosissa aiheuttaa tuloksiin vaihtelua.

Kuvissa *10.14...10.16* on esitetty koekuoppatutkimuksen yhteydessä otettuja valokuvia.

Kuva 10.14. Sänkiniityn kohteen puupaalujen varassa oleva teräsbetoninen pengerlaatta Kehä III:lla.

Kuva 10.15. Sänkiniityn kohteen pengerlaatan alla olevaa tyhjätilaa.

Kuva 10.16. Sänkiniityn kohde, Kehä III. Huonokuntoinen puupaalu.

11. Puupaalujen tutkimusjärjestelmä

11.1 Tutkimuspäätös

Puupaaluperustusten tutkiminen aloitetaan usein, kun rakennuksessa on jo ilmennyt vaurioita kuten perustusten epätasaisesta painumisesta johtuvia halkeamia ja muodonmuutoksia. Silloin ollaan yleensä jo liian myöhässä ja perustukset joudutaan korjaamaan. Tutkimukset tuleekin ajoittaa niin, että puupaaluperustusten säilyttäminen on vielä mahdollista, eikä kalliisiin korjaustoimenpiteisiin välttämättä ole tarvetta. Mikäli rakennus tiedetään perustetun puupaalujen varaan, paalujen kunnon seurannan tulee kuulua rakennuksen ylläpitoon. Ensimmäinen varmistettava asia on puupaalujen päiden pysyminen orsi- tai pohjavedenpinnan alapuolella. Sitä varten rakennuksen ympärillä tulisi olla useita orsi- tai pohjaveden tarkkailuputkia, joista vedenpinnan korkeutta tarkkaillaan säännöllisesti. Vesinäytteiden perusteella saadaan tietoa puupaaluja ympäröivistä olosuhteista ja orsi- tai pohjaveden saastuneisuudesta. Yleensä puupaalujen varaan rakennetut rakennukset ovat varsin iäkkäitä, joten jo perustusten ikä antaa perusteen rakenteiden kunnon tarkemmalle tutkimiselle. Ympäristössä tapahtuva rakentaminen aiheuttaa myös mahdollisesti olosuhteiden muutoksia, jolloin tarkemmat tutkimukset on syytä aloittaa. Jos rakennuksessa tullaan tekemään muutoksia, jotka lisäävät perustusten kuormituksia tai aiheuttavat kuormien uudelleen jakaantumisen, puupaalujen kunto ja kyky kantaa uudet kuormat riittävällä varmuudella on aina tarkistettava.

11.2 Lähtötietojen hankinta ja pohjatutkimusten ohjelmointi

Puupaaluperustuksen tutkimisen aloittamispäätöksen jälkeen hankitaan kaikki mahdollinen saatavilla oleva tieto rakennuksesta. Tietoa saadaan paitsi rakennuksen piirustuksista ja muista asiakirjoista, myös rakentamisaikakauden kirjallisuudesta ja ohjeista.

Ellei aikaisemmin tehtyjä pohjatutkimustietoja ole saatavilla on rakennuksen pohjasuhteet selvitettävä. Samassa yhteydessä voidaan asentaa orsi- tai pohjaveden tarkkailuputket, mikäli niitä ei entuudestaan jo ole olemassa. Rakennuksen vaaituksen lisäksi vaaitaan myös rakennuksen ympäristö siinä tapahtuvien muutosten havaitsemiseksi. Rakennus

vaaitaan pallokantapulteista 0,1 mm tarkkuudella. Vaaituksia tulee jatkaa vuosittain painumanopeuksien vertailuarvojen saamiseksi.

Yleensä viimeistään tässä vaiheessa valitaan tutkimuksen suorittava konsultti, mikäli sellaista ei löydy rakennuttajan omasta organisaatiosta. Konsultti tekee lopullisen päätöksen tutkimusohjelmasta yhdessä rakennuttajan kanssa. Hän organisoi myös näytteiden oton ja laboratoriotutkimukset. Tässä vaiheessa joko hyväksytään mahdollisesti jo tehty tutkimusohjelma, tarkennetaan sitä tai konsultti antaa oman esityksensä tutkimusohjelmaksi. Konsultiksi on syytä valita vastaavista tutkimuksista jo kokemusta omaava henkilö ja yritys, jonka tiedetään kykenevän tehtävään.

Tehdyt pohjatutkimukset dokumentoidaan tarkasti, jotta niitä voidaan käyttää jatkossa tehtävien päätösten perustana.

11.3 Koekuopat ja näytteenotto

Puupaaluperustusten todellinen kunto saadaan selville vain koekuoppatutkimuksin. Aluksi koekuoppia tehdään 2...3 kappaletta lähtö- ja pohjatutkimustietojen osoittamiin kriittisiin kohtiin. Koekuopista paljastetaan mahdollisimman monta, vähintään 3...4, puupaalua. Koekuoppa tehdään niin syväksi, että paaluja saadaan esiin 0,5...1 m matkalta. Paalujen kunto tarkastetaan ensin silmämääräisesti ja kokeilemalla pintalahon esiintyminen esimerkiksi piikillä. Kasvukairanäytteitä otetaan jokaisesta esiin kaivetusta paalusta. Kasvukairanäytteitä otetaan paalun eri tasoilta ja ristikkäisistä suunnista 3...4 kappaletta paalua kohti. Näytteenotto ulotetaan läpi paalun poikkileikkauksen. Koekuopista otetaan lisäksi maanäytteitä paaluja ympäröivästä maasta sekä vesinäytteitä. Mikäli puupaaluissa havaitaan olevan lahoa, otetaan yhdestä tai kahdesta paalusta palanäytteet prismapuristuskokeita varten ja puristettavaksi kokonaisena. Kokonaisena puristettavan puupaalunäytteen pituuden tulee olla vähintään 0,5 m.

Koekuopista tehdään tarkat piirustukset, joissa esitetään maakerrokset, rakenteet ja paalujen sijainnit. Koekuoppien tekemisestä ja dokumentoinnista on kerrottu tarkemmin kohdassa 4.2.3. Myös kasvukaira- ja maanäytteiden ottopaikat merkitään koekuoppapiirustuksiin.

11.4 Näytteiden tutkiminen

Kasvukairanäytteille tehdään lahoisuustutkimus, jossa määritellään lahon esiintyminen paalun poikkileikkauksessa. Vesi- ja maanäytteille tehdään mikrobiologinen analyysi, jossa tutkitaan niiden saastuneisuus ja bakteeripitoisuudet. Tarvittaessa mikrobiologinen analyysi voidaan suorittaa myös puunäytteille, jolloin saadaan tietoa puun sisältämien hajottajamikrobien laadusta ja määrästä.

Prismapuristuskokein saadaan tietoa puun lujuusparametreistä, kuten puristuslujuudesta ja kimmomoduulista. Prismoista tutkitaan lisäksi tiheys ja kosteus. Tiheys ja kosteus on mahdollista tutkia myös kasvukairanäytteistä. Parhaiten puupaalun rakenteellinen lujuus saadaan selville puristettaessa paalunäyte kokonaisena. Tämä tuleekin tehdä aina, jos epäillään puupaalujen varmuuden murtumista vastaan olevan selvästi heikentynyt esimerkiksi voimakkaan pintalahon takia. Muilla tavoilla saatuja puun lujuusarvoja voidaan sitten vertailla kokonaisena puristettujen puupaalunäytteiden arvoihin.

11.5 Tulosten analysointi

Laboratoriotutkimusten jälkeen saadut tulokset analysoidaan ja raportoidaan. Kaikki tutkimuksen dokumentit kootaan tässä vaiheessa yhteen ja arkistoidaan. Jos näyttää siltä, että korjaustoimenpiteisiin on aihetta, tehdään päätös tarvitaanko vielä lisätutkimuksia vai aloitetaanko korjaustyöt jo näiden tutkimusten perusteella. Mikäli lisätutkimukset katsotaan tarpeellisiksi, tehdään lisää koekuoppia ja viimeistään tässä vaiheessa tutkitaan myös rakennuksen sisäosien puupaalujen kunto.

Jos korjaustarvetta ei vielä katsota olevan, mutta puuperustukset eivät myöskään ole täysin kunnossa, tehdään seurantasuunnitelma. Seurannalla varmistetaan, että puupaalutus kykenee kantamaan sille tulevat kuormat riittävällä varmuudella niiden arvioidun jäljellä olevan eliniän. Seurannan avulla voidaan myös kohdentaa tulevan korjauksen taloudellisin ajankohta. Seurannan yhteydessä puuperustusten elinikää on mahdollista jatkaa erilaisilla lahoamisen estämismenetelmillä kuten pohjavedenpinnan korkeussäätelyllä. Jos puuperustusten kunto on vielä hyvä, arvioidaan ajankohta, jolloin seuraava tutkimus on

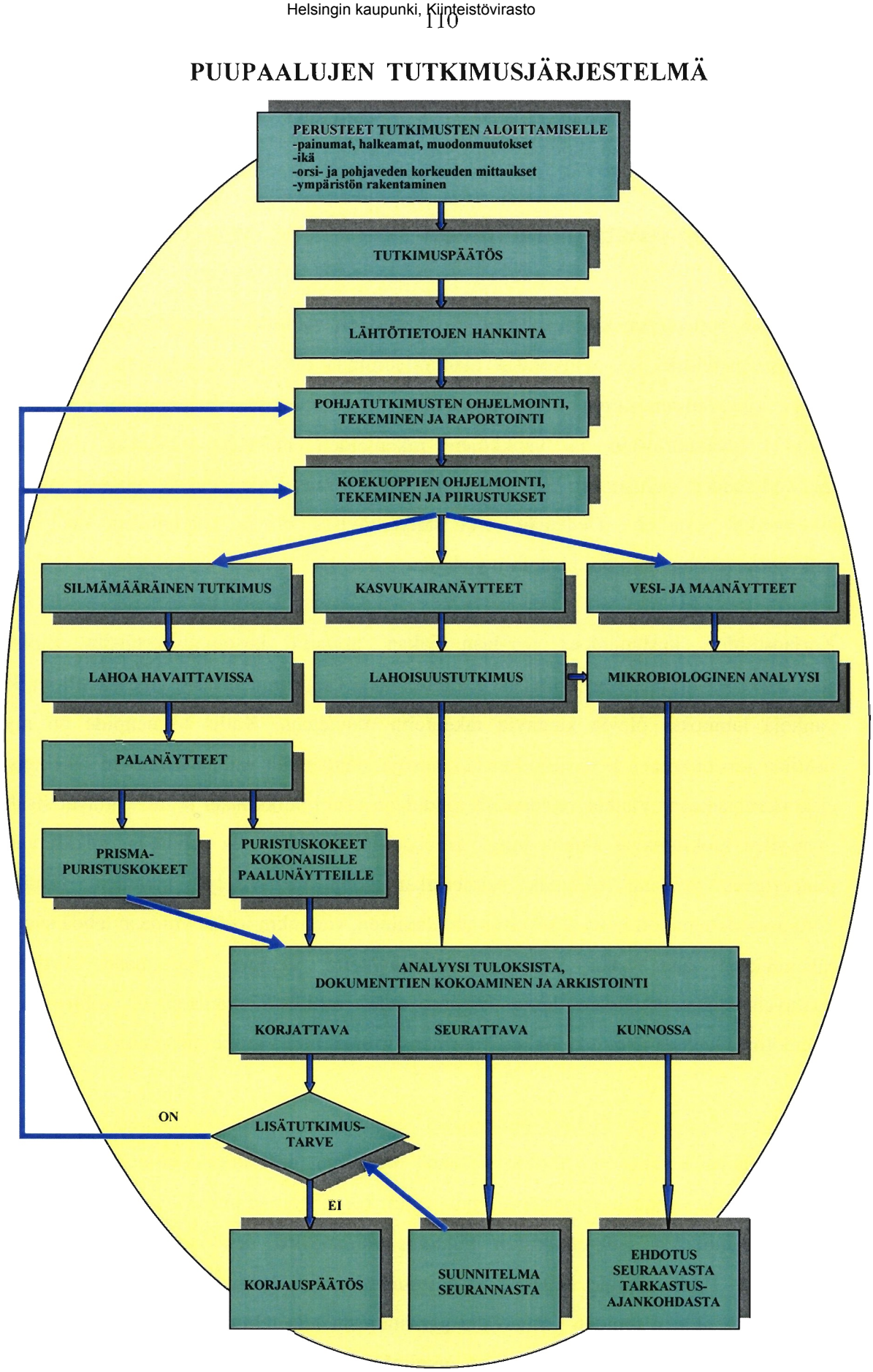
aiheellista tehdä. Yleensä seuraava tutkimus tulisi tehdä viimeistään kymmenen vuoden kuluttua.

11.6 Korjaamisesta päättäminen

Lopullisen perustusten korjauspäätöksen tekemiseen vaikuttaa monta asiaa, tärkeimpänä korjausmenetelmän ja –ajankohdan mahdollisimman taloudellinen valinta. Yksi tärkeä seikka rakennuksen säilyttämisen kannalta on sen perustusten yläpuolisten rakenteiden kunto. Hyväkuntoisten ja vankkojen rakenteiden holvaava vaikutus voi antaa mahdollisuuden perustusten korjaamiseen, vaikka puiset perustukset olisivat päässeet huonoonkin kuntoon. Tiedetään, että säilytettävissä olevia rakennuksia on purettu pelkästään lahonneisiin puupaaluihin vedoten.

Korjaustöiden kustannukset voidaan jakaa useisiin kustannusportaisiin riippuen suoritettavista korjaustoimenpiteistä. Kalleimmaksi korjaaminen tulee yleensä silloin, kun vanhoja kunnossa olevia kantavia rakenteita muutetaan. Kallis toimenpide on myös lisätilan rakentaminen kellaritiloihin lattiatasoja alentamalla vaikka kantaviin rakenteisiin ei koskettaisikaan. Vanhat vesieristeet joudutaan usein purkamaan ja ne saattavat sisältää myrkyiksi luokiteltavia aineita kuten kreosoottia. Halvimmalla selvitään, mikäli vanha puuperustus voidaan säilyttää esimerkiksi pohjavedensäätelyä käyttäen. Edullisin korjausmenetelmä on perustamistason alentaminen, varsinkin jos se voidaan tehdä suoraan rakennuksen alta, eikä vanhoja lattiarakenteita jouduta purkamaan. Erilaisten paaluvahvistusmenetelmien hinta riippuu siitä, millaista menetelmää kohteessa on mahdollista käyttää ja kuinka paljon kuormansiirtorakenteita kukin menetelmä vaatii.

Ellei tarve ole aivan akuutti, perustusten korjaaminen kannattaa ajoittaa ajankohtaan, jolloin rakennuksessa on tarkoitus tehdä muitakin peruskorjaustoimenpiteitä. Tässä yhteydessä on otettava huomioon myös, että korjaustoimenpiteillä saatetaan vaikuttaa naapurirakennusten puuperustusten kuntoon esimerkiksi orsi- tai pohjaveden tason alentuessa. Paras tilanne olisikin, että puuperustusten korjauspäätös voitaisiin tehdä yhteistyössä alueen muiden vastaavalla perustamistavalla tehtyjen kiinteistöjen kanssa ja sitä kautta ajoittaa korjaukset samaan ajankohtaan. Puupaalujen tutkimusjärjestelmä on esitetty kaaviomuodossa kuvassa *11.1*.



Kuva 11.1 Puupaalujen tutkimusjärjestelmä.

12. Johtopäätökset

Suomesta puuttuu puupaaluperustusten tutkimusjärjestelmä (luku 11, *kuva 11.1*), jonka avulla perustusten kunnon arviointi olisi ohjeistettavissa. Tätä nykyä tapoja tehdä tutkimus on yhtä monta kuin tutkimuksen suorittajiakin. Esimerkiksi tutkimusten dokumentointi on hyvin kirjavaa ja useinkaan sitä ei tehdä riittävällä tarkkuudella. Näytteitä otettaessa ei otanta useinkaan ole riittävä, jotta lahoamisen aste voitaisiin määritellä kattavasti. Koekuoppien kaivamisen yhteydessä saatetaan tehdä virheitä, jotka jatkossa edesauttavat lahoamisen etenemistä. Koekuopat saatetaan täyttää väärässä järjestyksessä, jolloin aiheutetaan muutoksia puupaalujen päiden ympäristön olosuhteille. Työturvallisuudesta koekuoppien tekemisessä saatetaan tinkiä ja koekuoppien tuennat jäävät tekemättä, vaikka kaivannot saattavat ulottua usean metrin syvyyteen hyvinkin ahtaissa tiloissa (luku 4.2.3). Lisäksi kiireessä tehty suunnittelematon tutkimus saattaa kohdistua paikkoihin ja asioihin, jotka eivät ole tutkimuskohteen kannalta kriittisiä.

Puuperustusten tutkimisen aloittaminen on nykyisin täysin rakennuksen omistajan vastuulla ja usein tutkimustarve saattaa tulla yllätyksenä jonkin ympäristössä tapahtuvan, esimerkiksi orsi- tai pohjavedenpinnan korkeutta alentavan, toimenpiteen seurauksena. Jatkossa rakennusvalvonnan rooli voisi olla Suomessakin hollantilaisen tutkimusjärjestelmän tapaan suurempi (luku 9). Tällä voitaisiin varmistaa, että rakennushistoriallisesti tai muuten arvokkaat rakennukset tulevat säilymään jatkossakin.

Puuperustusten kunnon tarkastamismenetelmissä on vielä paljon kehittämistä. Tällä hetkellä ainoa keino puuperustusten todellisen kunnon tutkimiseksi on koekuopista tapahtuva näytteiden otto, jolloin olemassa olevia rakenteita joudutaan rikkomaan. Ainetta rikkomattomat menetelmät eivät vielä ole tarpeeksi kehittyneitä, jotta niitä voitaisiin käyttää puupaalujen lahoisuuden määrittämiseen (luku 4.4). Jatkossa mahdollisia hellävaraisempia menetelmiä saattavat olla muun muassa Hollannissa käytetty penetrometri tai englantilaista alkuperää oleva kevyt käsikäyttöinen pora (Decay Detecting Drill). Näiden menetelmien käyttöönottaminen edellyttää niiden soveltuvuuden tutkimista suomalaiseen puuainekseen ja vertailua muilla menetelmillä saatuihin tuloksiin.

Lahoisuusluokittelussa tulosta saattaisi tarkentaa puun rakenteen sidosaineiden, ligniinin ja selluloosan, hajoamisasteen määrittäminen mikroskooppitutkimusten rinnalla. Tällä voitaisiin päästä lähemmäksi puun lujuusarvojen tarkkaa määrittämistä kasvukairanäytteistä. Prismapuristuskokeiden perusteella saaduissa lujuusarvoissa esiintyi tässä tutkimuksessa jossain määrin hajontaa verrattuna kokonaisena puristettuihin koekappaleisiin. Prismapuristuskokeita varten puupaalunäytteestä sahattavan kiekon sijainnin lisäksi prismojen paikkoihin poikkileikkauksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota. Laskettaessa puristuslujuutta ja kimmomoduulia koko poikkileikkaukselle prismapuristuskokeiden perusteella, pinta-, väli- ja sydänpuun pinta-alojen valinnalla on suuri merkitys lopputulokseen. Parhaiten puupaalun rakenteellinen lujuus ja kimmomoduulin arvo saadaan selville puristamalla paalunäyte kokonaisena (luku 4.3).

Puun lujuuden määrityksessä voidaan käyttää useita eri menetelmiä. Paras tulos saadaan yleensä vertaamalla eri menetelmillä saatuja arvoja keskenään. Kasvukairanäytteiden perusteella voidaan puun poikkileikkauksesta määritellä lahon esiintyminen. Lahoisuusluokissa 0...2 ei puun lujuudessa ole vielä tapahtunut merkittävää alenemista. Sen sijaan lahoisuusluokissa 3 ja 4 puun lujuusominaisuudet heikkenevät voimakkaasti (vertaa luku 5.1). Vesipitoisuuden ja tiheyden suhteen voidaan puulla käytännössä otaksua olevan riittävä puristuslujuus normaalikuormille, kun vesipitoisuus on alle 200 % ja tiheys yli 350 kg/m^3 /19/. Puristuskokeissa saatujen puristuslujuuksien on oltava suuremmat kuin suunnitelmissa annetut puupaalujen sallitut kuormat. Jos osittain lahonneen puupaalun varmuus sille tuleville kuormille on noin kaksi, voidaan paalua pitää vielä kohtuukuntoisena. Todelliset puupaaluille tulevat kuormat on usein syytä tarkistaa uusilla laskelmilla. Kimmomoduulin arvon pienentyessä puoleen terveen puun moduulista, puun kantavuus on enää noin 15 % terveeseen puuhun verrattuna. Kimmomoduulin arvon pienentyminen osoittaa, että puun sidosaineiden, selluloosan ja ligniinin, määrä on pienentynyt ja puun kuitujen välinen vetolujuus heikentynyt.

Tyvi ylöspäin lyödyillä puupaaluilla on ollut lahoamisen suhteen moninkertainen (5...10) rakenteellinen varmuus suunnittelukuormille, kun puupaalun geotekninen kantokyky on laskettu pienemmän latvaläpimitan mukaan. Tällöin useankaan senttimetrin pintalaho ei välttämättä aiheuta puupaalun kantokyvyn heikkenemistä, mikäli paalun sisäosien puu on vielä tervettä. Yksittäisen puupaalun kantokyvyn menettäminen esimerkiksi sydänpuulahon takia ei välttämättä johda rakenteiden painumiin ja halkeiluun, jos

perustusten yläpuoliset rakenteet ovat vahvat ja hyvässä kunnossa ja rakenteiden holvaava vaikutus siirtää kuormituksia terveemmille puupaaluille.

Lahoamisen eteneminen niin kutsuttuna biokorroosiona orsi- tai pohjaveden pinnan alapuolella vaikuttaa olevan melko hidasta. Esimerkiksi Suomen Kansallisteatterin puupaaluissa syöpymä oli edennyt vajaassa sadassa vuodessa keskimäärin 30...40 mm paalujen pinnasta (luku 10.1). Kansallisteatterin alkuvuosikymmenien orsivedenpinnan korkeuksista ei ole olemassa minkäänlaisia havaintoja, joten on täysin mahdollista, että orsivedenpinta on ollut jossain vaiheessa puupaalujen päiden alapuolella niin kauan, että lahoaminen on voinut alkaa lahottajasienten vaikutuksesta. Tällöin lahoaminen on voinut olla alussa hyvinkin nopeaa ja suurin osa nyt havaitusta syöpymästä on saattanut tapahtua varsin lyhyen ajan sisällä.

Tutkittujen koekohteiden perusteella rakennusten alla olevat olosuhteet saattavat olla mikrobitoiminnalle hyvinkin edullisia. Maaperä rakennuksen alla on usein huomattavan lämmintä. Esimerkiksi Suomen Kansallisteatterin alta mitattiin orsiveden lämpötilaksi yli +20oC. Tällaisessa tilanteessa on mahdollista, että rakennuksen sisäosien puupaalut lahoavat huomattavasti nopeammin kuin ulkoseinälinjan alla sijaitsevat puupaalut. Suomen Kansallisteatterin tapauksessa tällaista ei kylläkään havaittu tapahtuneen, mutta Turussa on ollut kohteita, joissa ulkoseinälinjan alla olleet puupaalut olivat hyvässä kunnossa, kun taas rakennuksen sisäpuolisten puupaalujen päät olivat täysin lahonneet.

Lisäksi rakennuksia ympäröivä maa yleensä painuu ja aiheuttaa rakennuksen lähellä oleviin viemärilinjoihin vuotoja, jolloin ravinteiden määrä puupaalujen ympäristössä lisääntyy. Viemärilinjojen kunnossapitoon pitääkin kiinnittää nykyistä enemmän huomiota puuperustusten läheisyydessä. Koekohteiden orsivesistä mitattiin pieniä happipitoisuuksia, jotka saattavat riittää vähän happea tarvitsevien mikrobien toimintaan. Orsi- tai pohjavedenpinnan tason säilyttäminen puuperustusten yläpuolella onkin ensiarvoisen tärkeää, sillä kerran alkanut laho ilmeisesti jatkaa etenemistään välittömästi päästyään taas hapen kanssa kosketuksiin (luku 3.1, taulukot *3.1* ja *3.2*).

Tämän tutkimuksen perusteella pelkistä maaperän ja orsi- tai pohjaveden bakteerien kokonaismääristä ei voida tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä puuperustusten lahoamisesta orsi- tai pohjavedenpinnan alapuolella. Bakteerien runsas määrä osoittaa

ympäristössä olevan ravinteita ja happimäärä on ilmeisesti kohonnut normaalitilanteesta. Tämä antaa hyvät olosuhteet bakteerien kasvulle, mutta itsessään runsas bakteerimäärä ei aiheuta puun lahoamista elleivät bakteerit ole selluloosaa tai ligniiniä pilkkovia, mitä esimerkiksi normaalissa jätevedessä esiintyvät bakteerit eivät ole. Eri bakteerilajien mahdollista keskinäistä yhteistoimintaa lahoamisprosessissa ei kuitenkaan vielä tarkoin tunneta ja joka tapauksessa puhtaat ja mikrobittomat ympäristöolosuhteet ovat puuperustuksille eduksi.

Uusi ja tällä hetkellä vielä selittämätön ilmiö oli syöpymän esiintyminen joissakin puupaaluissa myös sydänpuun alueella. Tähän mennessä syöpymän on oletettu alkavan puun pinnasta ja etenevän tasaisesti lahoa kestävämpää sydänpuuta kohden. Koekohteista löydettiin kuitenkin paaluja, joissa lahonneen pinta- ja sydänpuun välissä oli terveempää puuta. Hollantilaisissa tutkimuksissa puupaaluista on löydetty sydänpuulahoa jopa useiden metrien matkalta pohjavedenpinnan alapuolelta.

Tämän tutkimuksen perusteella ei vielä ole olemassa keinoja, joilla lahoamisen etenemistä voitaisiin ennustaa tarkasti, joten jatkotutkimuksen tarve tältä osin on olemassa. Puuperustustutkimukseen ollaankin hakemassa rahoitusta EU:n viidennestä puiteohjelmasta yhteistyössä Hollannin, Venetsian ja Ruotsin kanssa. Viides puiteohjelma koskee kulttuuriperinnön säilyttämistä Euroopassa, johon puuperustusten säilyttäminen kulttuurillisesti arvokkaissa rakennuksissa läheisesti liittyy. Vetovastuussa oleva hollantilainen osapuoli on lähestymässä ongelmaa pääasiassa mikrobiologian näkökulmasta, joten lisätietoa lahoamisprosessista sekä sen etenemismekanismeista ja -nopeudesta lienee luvassa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. BAKKER, M. Sondering van houtconstructies. BouwWereld nr. 9 (28 april 1995). S. 58 – 59.

2. BALKERUD, J.-O. et al. Skien Kyrka i Norge – grundförstärkning. Väg- och vattenbyggaren 1986:7 – 8. S. 32 – 36.

3. BERGMAN, G. et al, Kontrollerad bevattning för bevarande av träpålar och rustbäddar. Stockholm 1979. Byggforskningen. Rapport R62:1979. 63 s.

4. BOHM, H. & PRAMBORG, B. Foundation Documentation for Conservation Planning. Proc. of the X ICSMFE, Stockholm 1981. Rotterdam 1981. A.A. Balkema. s. 37 – 42.

5. BYGGFORSKNINGEN. Grundvattenproblem i tätorter. Bakterieangrepp på träpålar. Stega. Artiklar ur tidskriften Byggmästaren nr 6 och 8, 1970. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R6:1971. 48 s.

6. DE VRIES, A. Wooden pile foundations. Investigations and classification. Luentoaineisto, vierailuluento Tampereen teknillinen korkeakoulu 1999. 19 s.

7. DELFS, W. Varför köpa nya pålar när dom gamla duger. Byggindustrin 1985:5, s. 25-26.

8. GREFSHEIM, F. D. Timber pile study. Existing structure. Symposium on Deep Foundation. Proceedings of a symposium at the ASCE. National Convention, Atlanta, GA, Oct., 1979. s. 166 - 181.

9. HAIMELIN, T. Perustusten lahoaminen ja lahon vaikutus puun lujuuteen. Helsinki 1982. Helsingin Teknillinen Korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Diplomityö. 134 s.

10. HELSINGIN KAUPUNKI, KIINTEISTÖVIRASTO, GEOTEKNINEN OSASTO. Helsingin geotekninen tietokanta. 1999.

11. HOLMBERG, H. Vanhojen rakennusten perustusten korjaaminen ja vahvistaminen. Espoo 1982. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio. Tiedotteita 88. 139 s.

12. HOLT, D.M. & GARETH JONES, E.B. Material u. Organismen 13, 1978.

13. IKÄLÄINEN, E. & SIMILÄ, Y. 1910. Rakennusperustusten paaluttaminen nykyaikana. Rakennustaito. 5. vuosikerta n:o 22. s. 257 – 268.

14. JERBO, A. Konservering med borsalt räddar rötangripen träpåle. Byggmästaren 1983:6. S. 41 – 42.

15. JUVANKOSKI, M. & VIITANEN, H. Vanhojen puupaalujen kunnon ja kantokyvyn arviointi. Espoo 1989. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio & puulaboratorio. Tiedotteita 968. 142 s.

16. KJESSLER & MANNERSTRÅLE AB. Slutrapport avseende projekt Nordhemsgatan 19 Göteborg, sterilisering och petrificering av trä i untergrund. 30.1.1985. STU 83-4417B.

17. KJESSLER & MANNERSTRÅLE AB. Sterilisering och petrificering av trä i untergrund. 25.8.1985. STU 83-4417.

18. LEHTOLA, K. F. Perustustyöt, III osa. Tampere 1954. Tampereen teknillisen oppilaitoksen monistustoimisto. 266 s.

19. LUNDSTRÖM, R. B. The Quality of the Wood in Timber Piles. Proc. of the X ICSMFE, Stockholm 1981. s. 131 - 132.

20. NILSSON, T. Cavitation bacteria. Stockholm 1984, The International Research Group of Wood Preservation, Document No: IRG/WP/1235. 6 s.

21. NURMI, A. Puupylväiden jälkisuojaus. Kirjallisuustutkimus. Espoo 1978. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, puutavaralaboratorio. Tiedonanto 22. 53 s.

22. PAAJANEN, L. & VIITANEN, H. Microbiological degration of wooden piles in building foundations. Stockholm 1988. The International Research Group on Wood Preservation. Document N:o IRG/WP/1370. 11 s.

23. PEEK, R.-D. & WILLEITNER, H. Behaviour of Wooden Pilings in Long Time Service. Proc. of the X ICSMFE, Stockholm 1981. Rotterdam 1981. A.A. Balkema. s. 147 – 152.

24. RAUDASMAA, P. Puiset perustusrakenteet. Helsinki 1979. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 12. 44 s.

25. RUIN, E. & BORCHARHT, P. Japansk jordförstärkning provad i Köping. Bygg & Teknik 1986:8. S. 51 – 53.

26. SFS 4188. Puurakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki 1980. Suomen rakennusinsinöörien liitto, RIL 120. 127 s.

27. SUOLAHTI, O. Laho ja sen torjunta. Porvoo 1961. WSOY. 125 s.

28. SUOMEN GEOTEKNILLINEN YHDISTYS R.Y. LPO-87, Lyöntipaalutusohjeet. Helsinki 1987. Rakentajain Kustannus Oy. 135 s.

29. SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO. RIL 106, Puurakenteet. Helsinki 1975. 366 s.

30. SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO. RIL 121-1988, Pohjarakennusohjeet 1988. Helsinki 1988. 92 s.

31. SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO. RIL 174-5 Korjausrakentaminen V, Perustukset - pohjarakenteet. Helsinki 1991. 277 s.

32. SUOMEN RAKENNUSINSINÖÖRIEN LIITTO. RIL K116-1989, Korjausrakentamisen täydennyskoulutusohjelma I – VI, Osa II, Perustusten korjaus ja parantaminen. Helsinki 1989. 145 s.

33. TAMMINEN, E. EU-rahaa paalukorjauksiin. Turku 1998. Turun Sanomat 14.12.1998. Lehtiartikkeli.

34. TIKKANEN, H. Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. Helsinki 1978. Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. Tiedote 10. 128 s.

35. TORIKKA, H. Boorivesi estää perustusten lahoamista. Rakennuslehti 30.8.1990 / nro 48. s. 8.

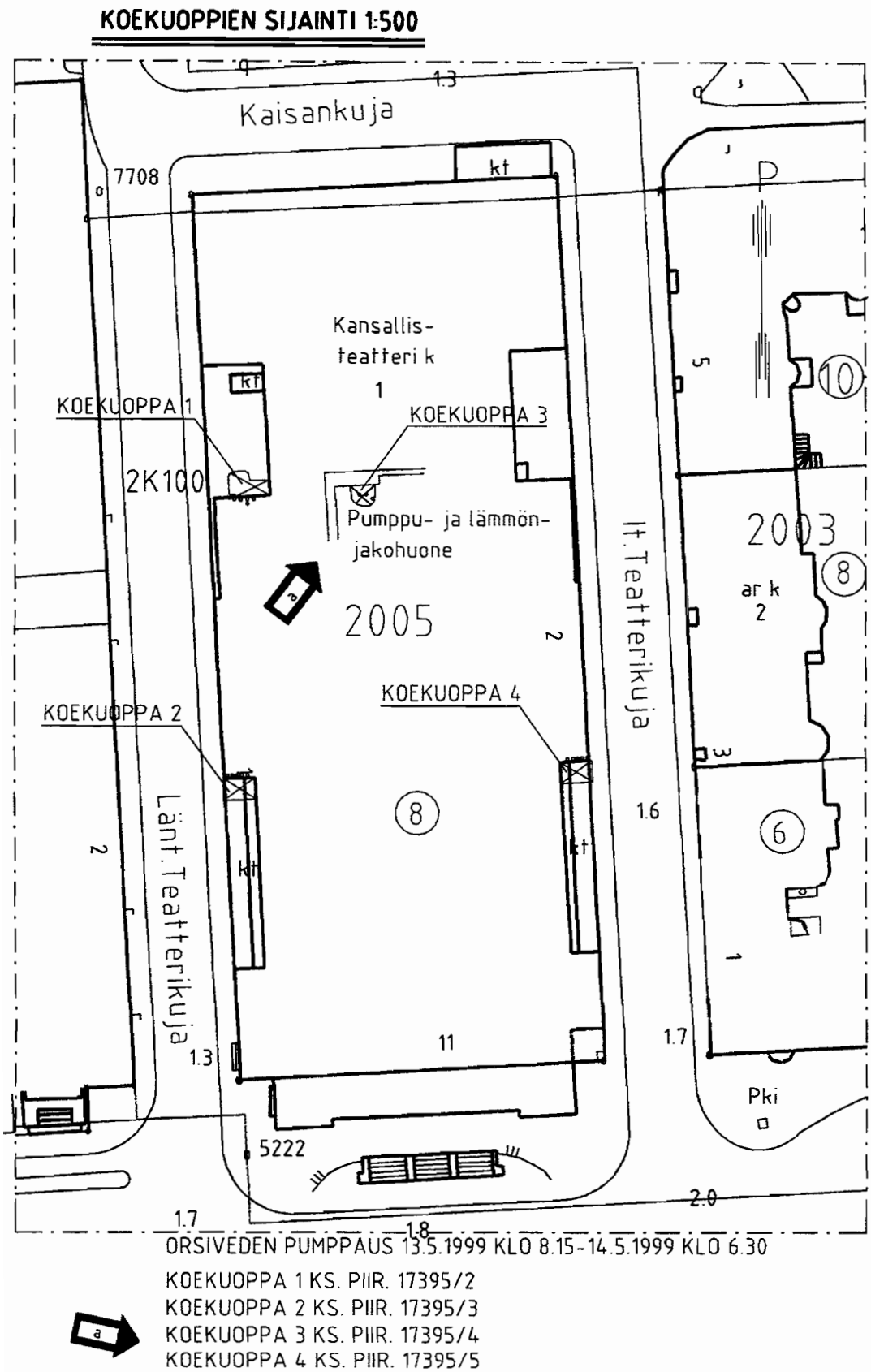
36. UCHELEN, H. van. The preservation of timber piles under building by the use of organic gases. De Ingenieur 85 (1973) 19, s. 385 – 392.

37. VIHAVAINEN, T. Puurakenteiden lahontorjunta. Helsinki 1980. Rakentajain Kustannus Oy. 63 s.

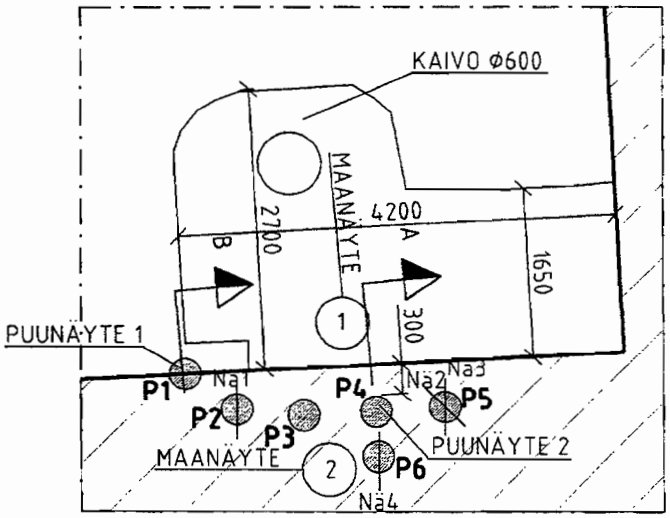
38. VIITANEN, H. & ELSINEN, S. Puurakenteiden lahoisuuden määrittäminen. Espoo 1988. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, puulaboratorio. Tiedotteita 881. 78 s.

39. VÄISÄLÄ, L., VIHAVAINEN, T. Lattiasieni ja sen torjunta. Laboratoriokokeita. Espoo 1979. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, puutavaralaboratorio. Tiedonanto 27. 48 s.

Suomen Kansallisteatteriin tehdyt koekuopat. Suomen IP-Tekniikka Oy.



KOEKUOPPA 1

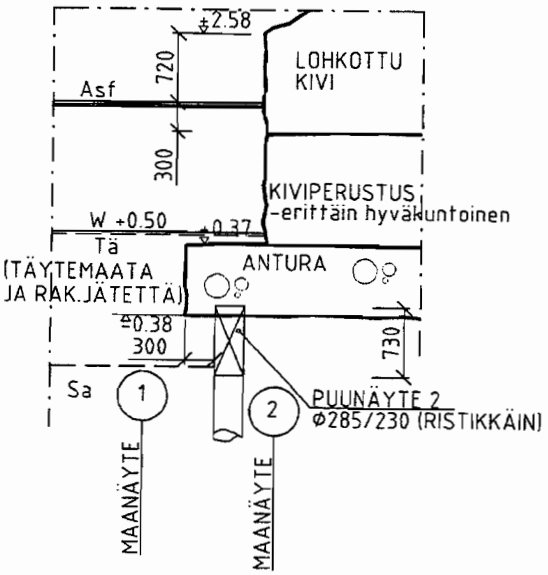


Nä1=PAALUSTA 2 OTETTU NÄYTE
Nä2=PAALUSTA 5 VIISTOON OIKEALTA
OTETTU NÄYTE
Nä3=PAALUSTA 5 KESKELTÄ
OTETTU NÄYTE
Nä4=PAALUSTA 6 OTETTU NÄYTE

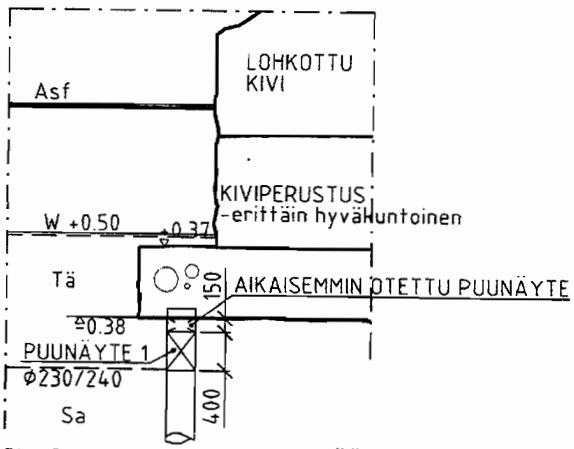
-VESINÄYTTEET KLO 13.20
LÄMPÖTILA 10°C,
PUMPPAUKSEN JÄLKEEN
LÄMPÖTILA 17°C

-PUUNÄYTE 1 JA 2 OVAT KOKONAISIA PAALUNÄYTTEITÄ
-NÄYTTEET Nä1-Nä4 OVAT KASVUKAIRANÄYTTEITÄ

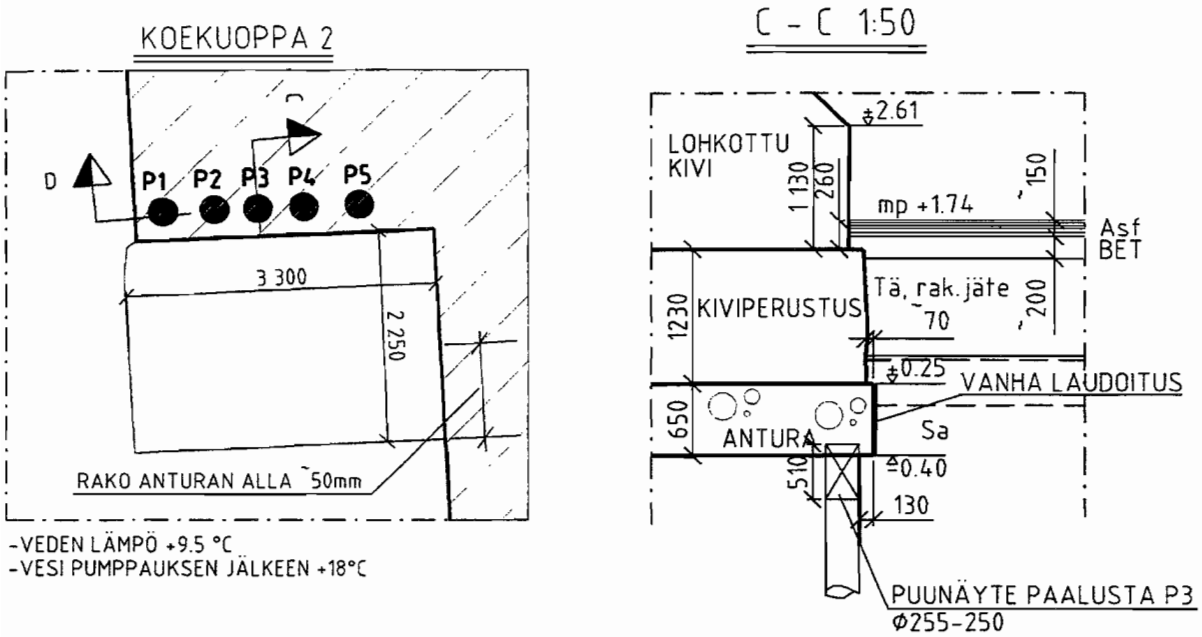
A - A 1:50

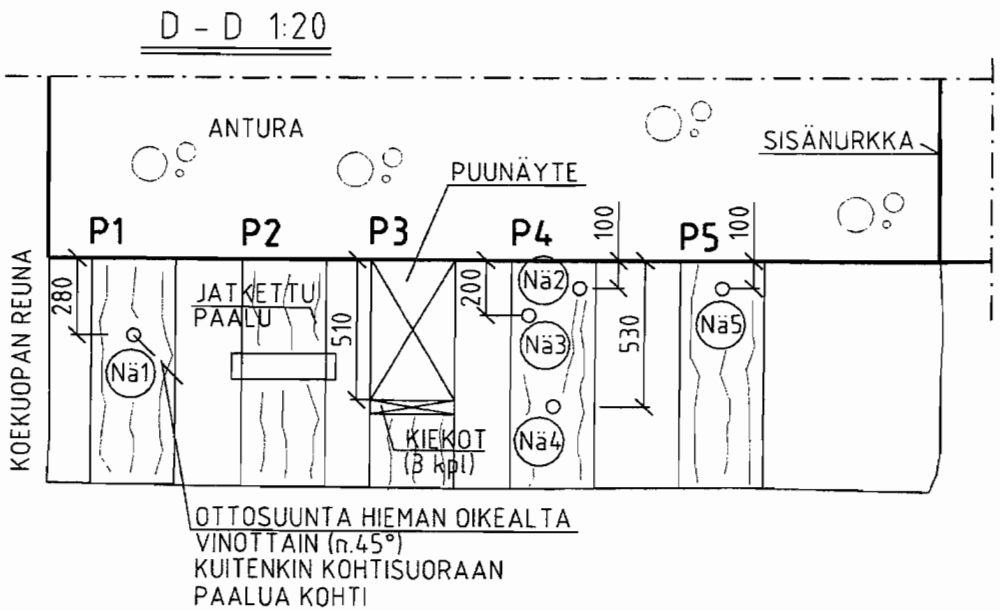


B - B 1:50

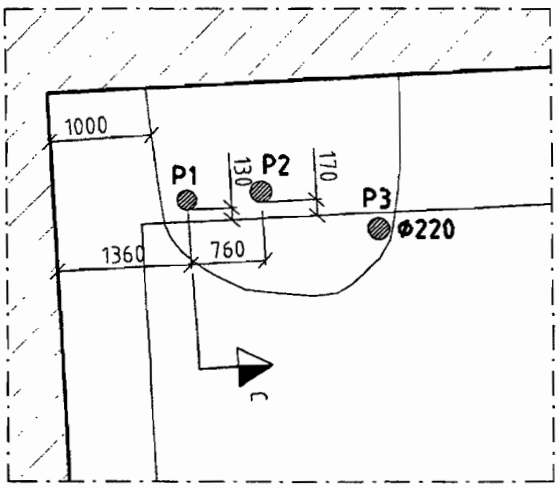


-PUU PINTAKERROKSESTA PEHMEÄÄ, PUUKKO
UPPOAA 20-30 mm
-PAALUT P1-P5 SAMANLAISIA, P6 HIEMAN PAREMPI


KOEKUOPPA 2
P1
P2
P3
P4
P5
3 300
2 250
RAKO ANTURAN ALLA ~50mm
-VEDEN LÄMPÖ +9.5 °C
-VESI PUMPPAUKSEN JÄLKEEN +18°C
C - C 1:50
±2.61
LOHKOTTU KIVI
1 130
260
~150
mp +1.74
Asf BET
1230
KIVIPERUSTUS
Tä, rak. jäte
~70
~200
±0.25
VANHA LAUDOITUS
650
ANTURA
Sa
≙0.40
510
130
PUUNÄYTE PAALUSTA P3
Φ255-250


D - D 1:20
ANTURA
SISÄNURKKA
PUUNÄYTE
P1
P2
P3
P4
P5
100
100
KOEKUOPAN REUNA
280
JATKETTU PAALU
510
200
530
Nä1
Nä2
Nä3
Nä4
Nä5
KIEKOT (3 kpl)
OTTOSUUNTA HIEMAN OIKEALTA VINOTTAIN (n.45°) KUITENKIN KOHTISUORAAN PAALUA KOHTI

KOEKUOPPA 3



P1. Ø210

NÄ1 - 50mm YLÄREUNASTA
NÄ2 - 400mm YLÄREUNASTA

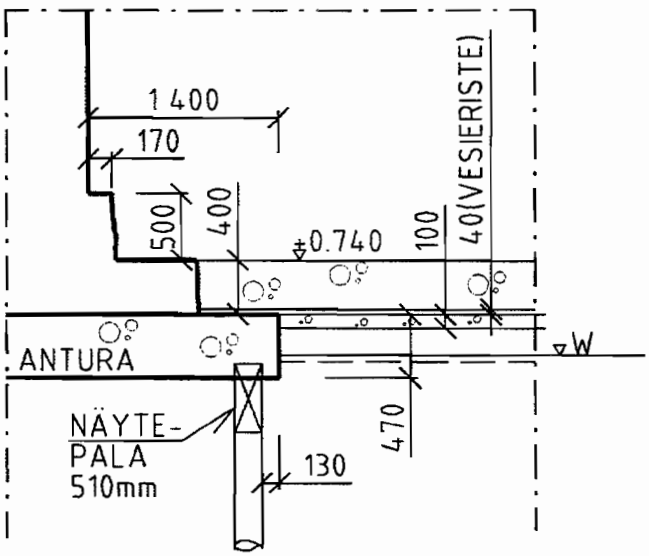
P2. Ø220

NÄ3 - 40mm YLÄREUNASTA
NA4 - 350mm YLÄREUNASTA

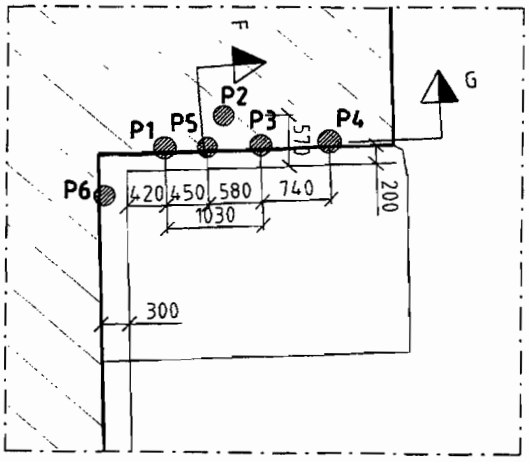
NÄ = KASVUKAIRANÄYTE

-ANTURAN ALLA n.20mm RAKO
-VEDEN LÄMPÖ +23 °C
-HAPPIPITOISUUS 2mg/l
-ORSIVEDEN PUMPPAUS 4.8.1999, KLO. 9.00-14.00
-ORSIVEDEN PUMPPAUS 6.8.1999, KLO. 10.00-16.00

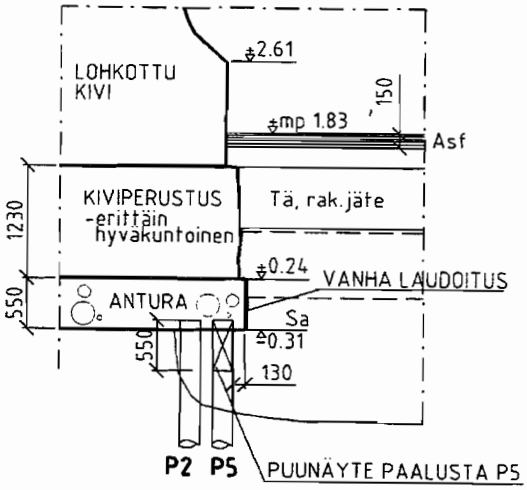
E - E 1:50



KOEKUOPPA 4



F - F 1:50

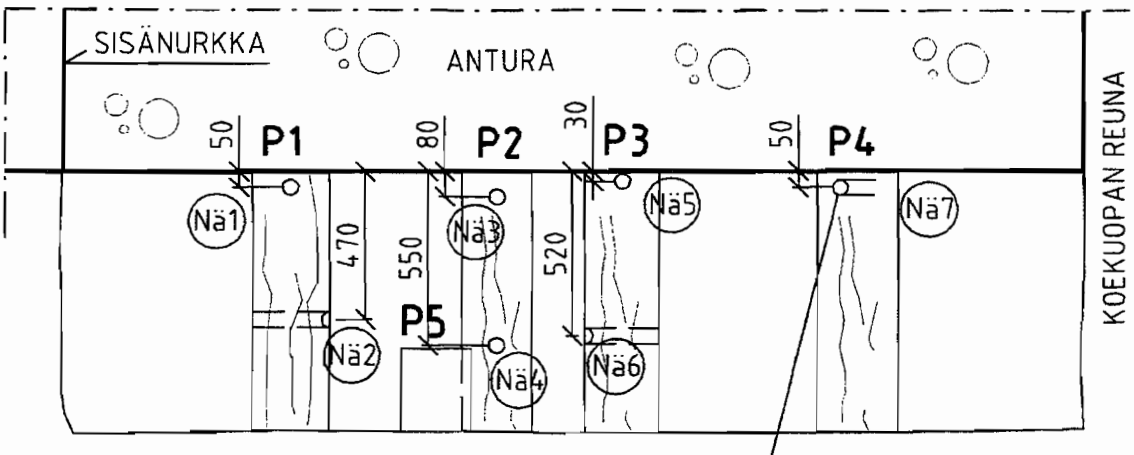


P1	ø240	P4	ø250
P2	ø220	P5	ø220
P3	ø230	P6	ø220

-ANTURAN ALLA EI HAVAITTAVISSA RAKOA
-VEDEN LÄMPÖ +21 °C (11.7.1999)

-ORSIVEDEN PUMPPAUS 9.8.1999, KLO. 10.00-16.00
-ORSIVEDEN PUMPPAUS 10.8.1999, KLO. 8.00-14.00

G - G 1:20



OTTOSUUNTA VINOTTAIN (n.45°)
KUITENKIN KOHTISUORAAN
PAALUA KOHTI

NÄ = KASVUKAIRANÄYTE

Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

7.7.1999

KOKONAISPURISTUSKOKEET

Asiakas: Kansallisteatteri
Kohde: Taso -0.50

Koe-kuoppa	Paalu	Halkaisija (mm)	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
KK1	P4	265	12,6	2154	694,9	7,3

Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

2.10.1999

KOKONAISPURISTUSKOKEET

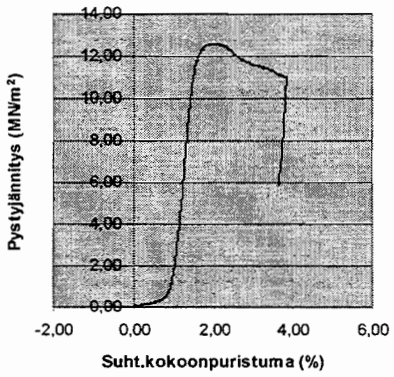
Asiakas: Suomen Kansallisteatteri
Kohde:

Koe-kuoppa	Paalu	Halkaisija (mm)	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
3	1	210	8,4	1617	291,2	3,1
4	5	220	5,6	1508	211,4	2,2

Suunnittelukuorma (kN)
95

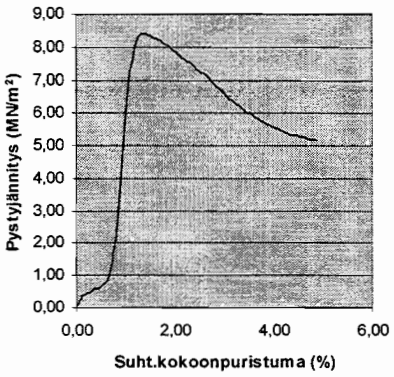
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

KOKONAISPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, paalu 4



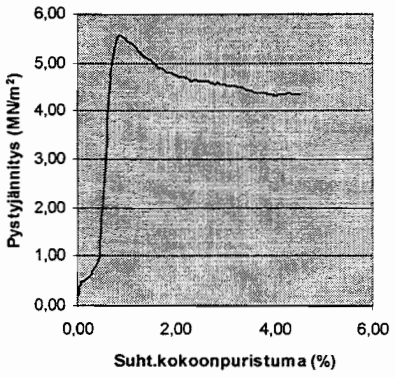
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

KOKONAISPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
Koekuoppa 3, paalu 1



Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

KOKONAISPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
Koekuoppa 4, paalu 5



Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

7.7.1999

PRISMAPURISTUSKOKEET

Asiakas: Kansallisteatteri
Kohde: Koekuoppa 1, paalu 4, taso -0.38

Prisma	Kohta pl:ssa	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Kosteuspitoisuus (paino-%)	Tiheys (kg/m^3)
24	S	8,5	393	139	407
30	S	10,5	137	96	360
32	S	9,6	97	121	373
38	S	13,6	1537	63	408
18	V	10,6	149	121	339
29	V	14,0	1513	75	433
33	V	8,2	690	100	393
45	V	15,2	1544	82	500
2	P	0,9	73	386	255
9	P	2,1	313	378	247
54	P	0,7	67	493	222
59	P	6,8	269	260	369
Keskiarvo		8,4	565	193	359
KA sydän		10,6	541	105	387
KA väli		12,0	974	94	416
KA pinta		2,6	181	379	273

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Paalun halkaisija (mm)	Suunnittelukuorma (kN)
275	95

Poikkileikkauksen osa	Pinta-ala (mm^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
Sydänpuu	6362	67,2	
Välipuu	28274	338,9	
Pintapuu	24760	64,6	
Yhteensä		470,7	5,0
Koko poikkileikkaus	59396	498,0	5,2

Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

7.7.1999

PRISMAPURISTUSKOKEET

Asiakas: Kansallisteatteri
Kohde: Koekuoppa 2, paalu 3, taso -0.40

Prisma	Kohta pl:ssa	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Kosteuspitoisuus (paino-%)	Tiheys (kg/m^3)
16	S	18,1	3032	52	504
22	S	16,4	2327	56	541
24	S	15,5	2250	83	436
30	S	15,3	2465	87	469
9	V	19,8	2197	55	573
21	V	13,3	1471	88	529
25	V	10,5	1422	65	496
36	V	18,8	3104	41	511
5	P	0,6	105	266	296
20	P	1,6	316	265	302
44	P	1,6	350	239	314
45	P	4,8	386	189	389
Keskiarvo		11,4	1619	124	447
KA sydän		16,3	2519	70	488
KA väli		15,6	2049	62	527
KA pinta		2,2	289	240	325

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Paalun halkaisija (mm)	Suunnittelukuorma (kN)
245	95

Poikkileikkauksen osa	Pinta-ala (mm^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
Sydänpuu	6362	103,9	
Välipuu	20519	320,2	
Pintapuu	20263	43,7	
Yhteensä		467,8	4,9
Koko poikkileikkaus	47144	535,8	5,6

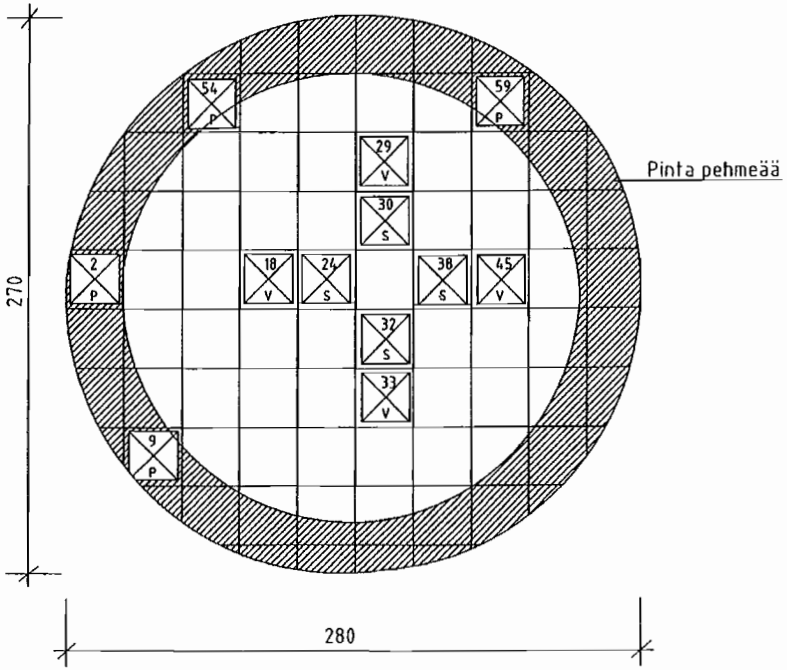
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

17.6.1999

PURISTETUT PRISMAT

KANSALLISTEATTERI

KOEKUOPPA 1
PAALU 4



Prisman koko 25 x 25 mm²

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

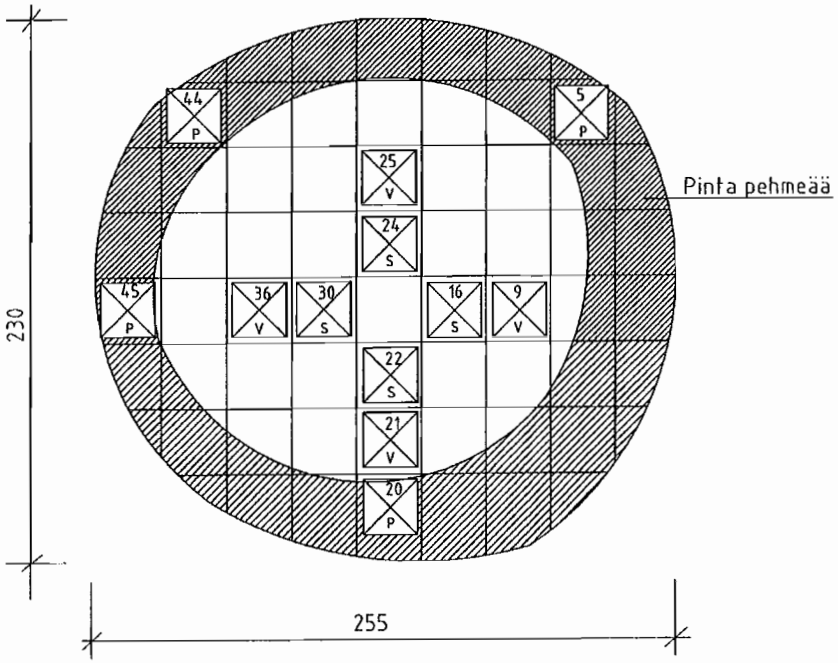
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

17.6.1999

PURISTETUT PRISMAT

KANSALLISTEATTERI

KOEKUOPPA 2
PAALU 3



Prisman koko 25 x 25 mm²

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Geotekninen osasto julkaisu 79

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

13.8.1999

PRISMAPURISTUSKOKEET

Asiakas: Suomen Kansallisteatteri
Kohde: Koekuoppa 4, paalu 5, taso -0.80

Prisma	Kohta pl:ssa	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Kosteuspitoisuus (paino-%)	Tiheys (kg/m^3)
12	S	9,8	939	49	357
18	S	8,5	847	66	374
20	S	7,9	1049	45	353
26	S	9,1	1572	49	390
6	V	7,4	969	97	366
17	V	9,1	1430	101	391
21	V	7,7	1170	79	393
33	V	9,5	1079	95	421
2	P	1,4	217	336	226
16	P	2,4	358	248	306
22	P	6,5	1064	226	345
38	P	4,0	488	284	279
Keskiarvo		6,9	932	140	350
KA sydän		8,8	1102	52	369
KA väli		8,4	1162	93	393
KA pinta		3,6	532	273	289

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Paalun halkaisija (mm)	Suunnittelukuorma (kN)
220	95

Poikkileikkauksen osa	Pinta-ala (mm^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
Sydänpuu	6362	56,2	
Välipuu	11310	95,1	
Pintapuu	20342	72,8	
Yhteensä		224,1	2,4
Koko poikkileikkaus	38013	263,8	2,8

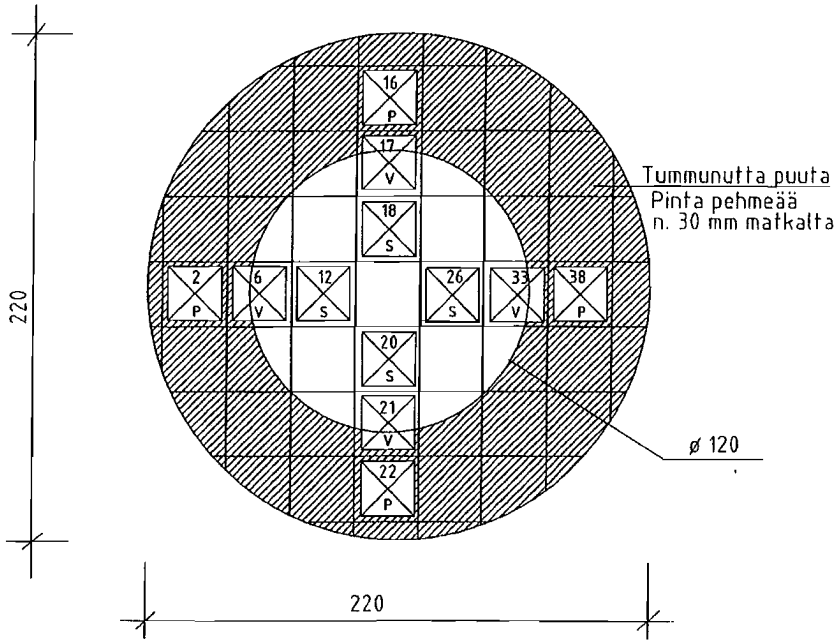
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

13.8.1999

PURISTETUT PRISMAT

SUOMEN KANSALLISTEATTERI

KOEKUOPPA 4
PAALU 5

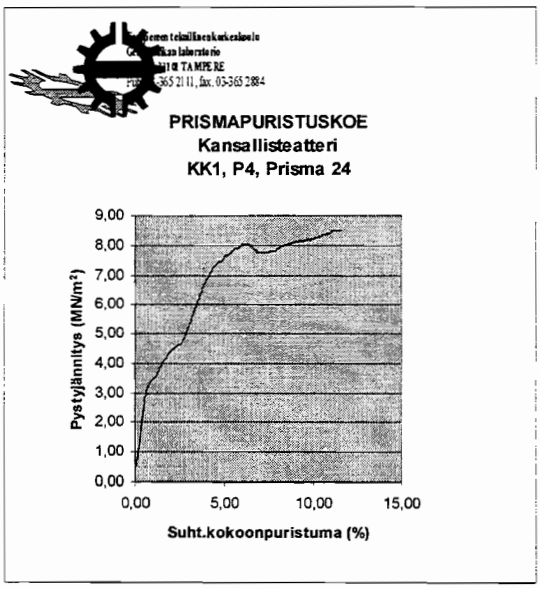


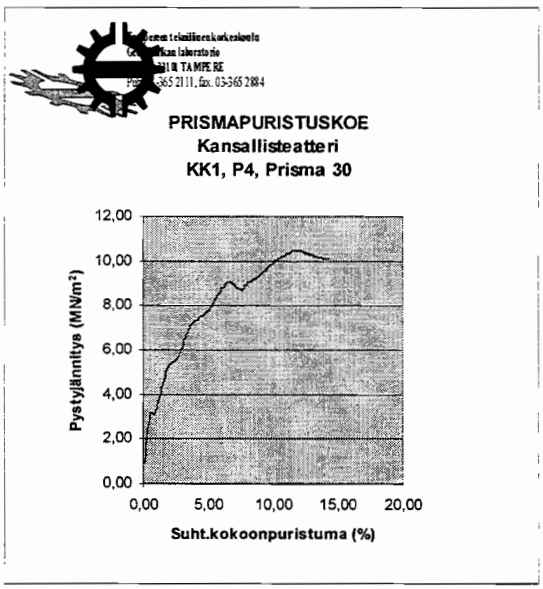
Prisman koko 25 x 25 mm^2

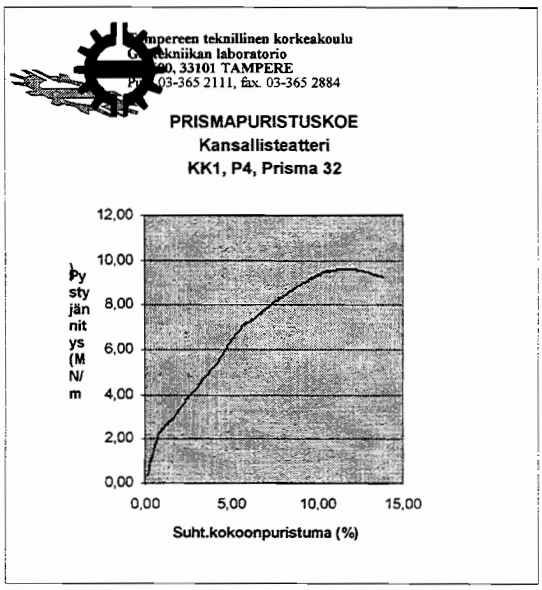
S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

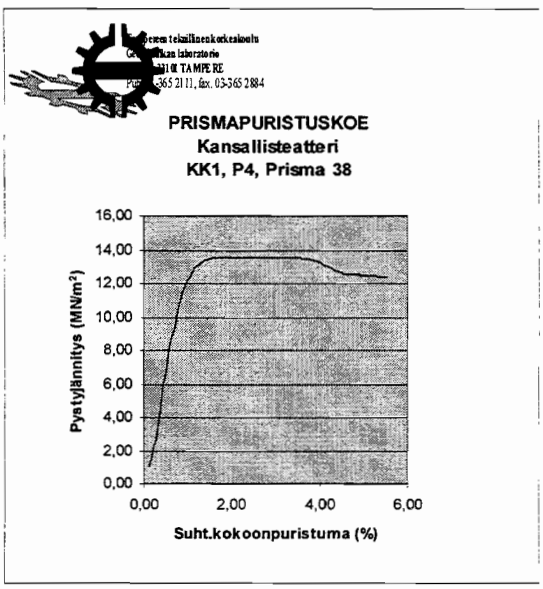
Geotekninen osasto julkaisu 79

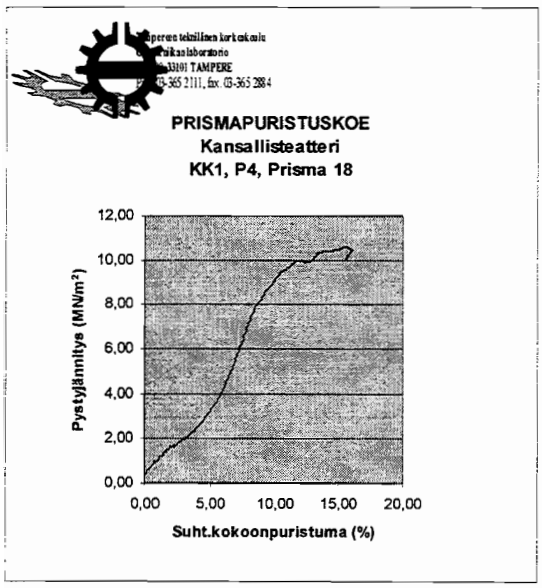
Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

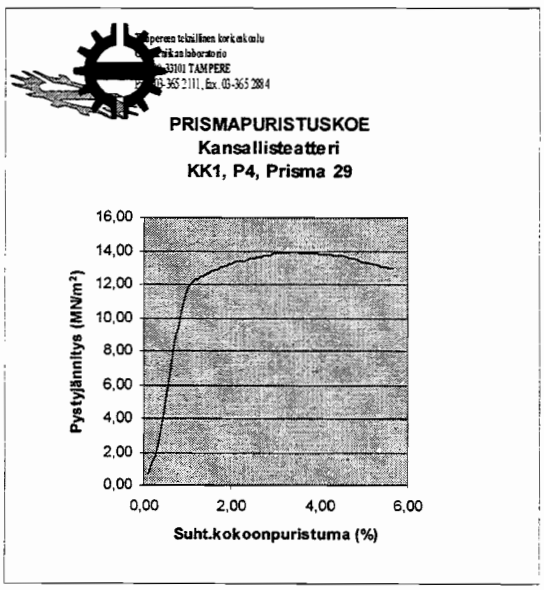

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 24
Pystyjännitys (MN/m²)
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 30
Pystyjännitys (MN/m²)
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 32
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
Suht.kokoonpuristuma (%)

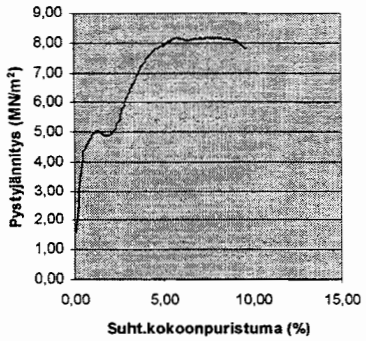

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 38
Pystyjännitys (MN/m²)
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 18
Pystyjännitys (MN/m²)
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
0,00
5,00
10,00
15,00
20,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 29
Pystyjännitys (MN/m²)
16,00
14,00
12,00
10,00
8,00
6,00
4,00
2,00
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
Suht.kokoonpuristuma (%)

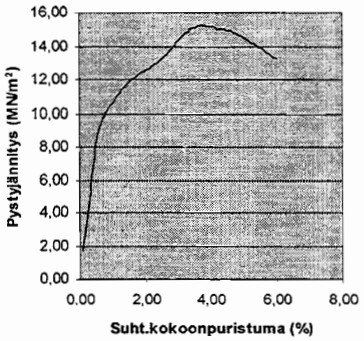
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 33



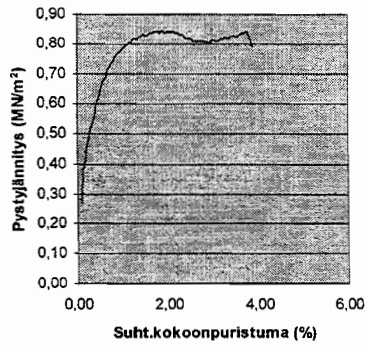
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 45



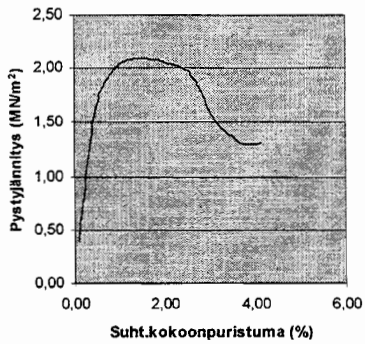
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 2



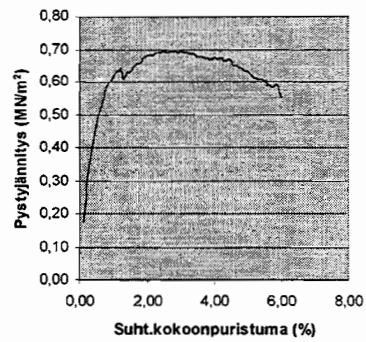
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 9



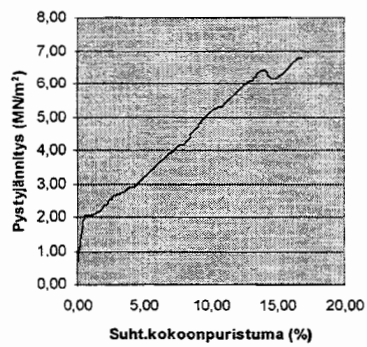
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 54



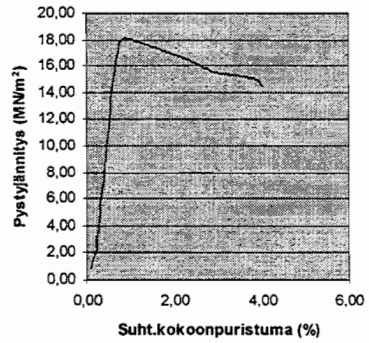
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527, 33101 TAMPERE
puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK1, P4, Prisma 59



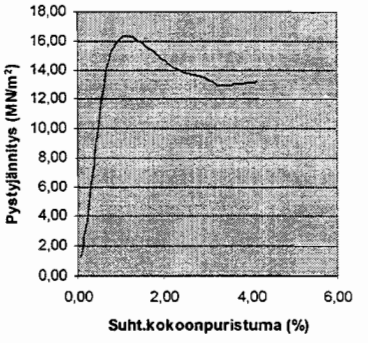
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 16



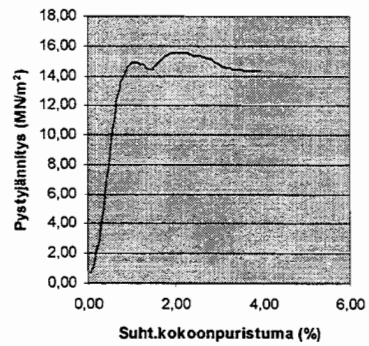
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 22



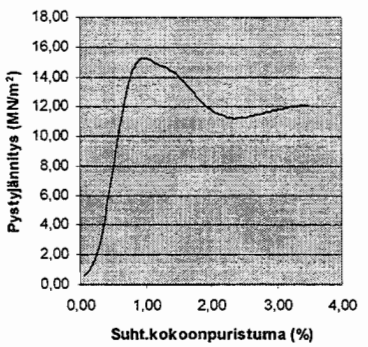
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 24



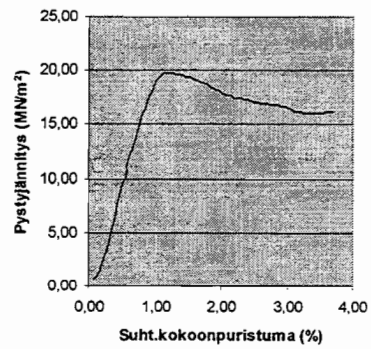
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 30



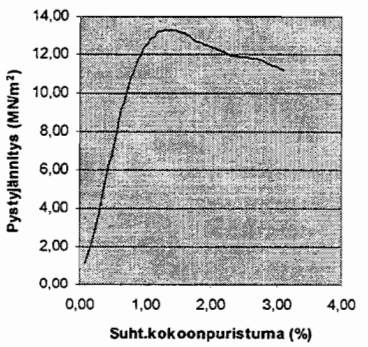
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 9

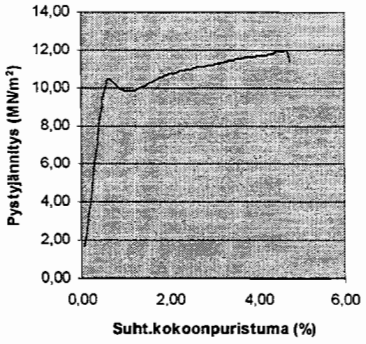


Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 527 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

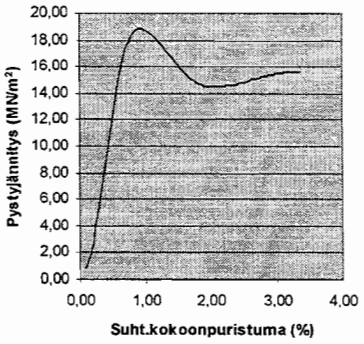
PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 21



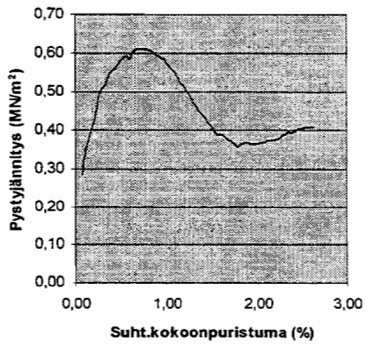
PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 25



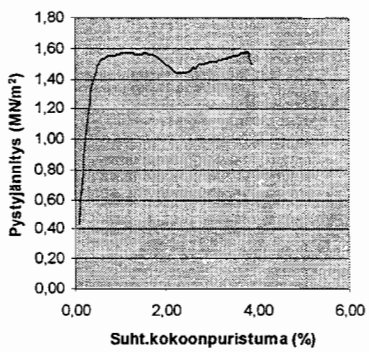
PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 36



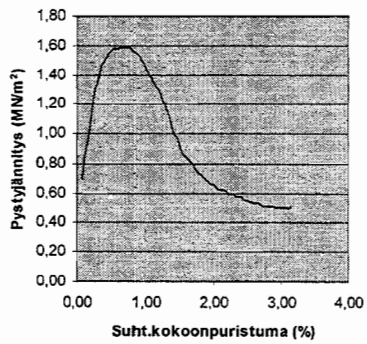
PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 5



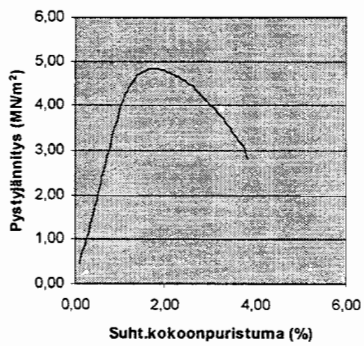
PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 20



PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 44

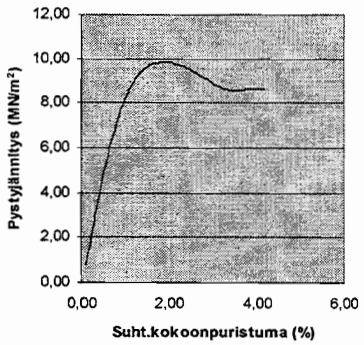


PRISMAPURISTUSKOE
Kansallisteatteri
KK2, P3, Prisma 45



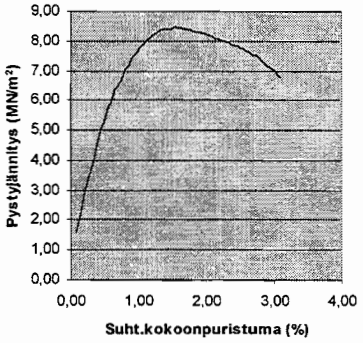
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 12



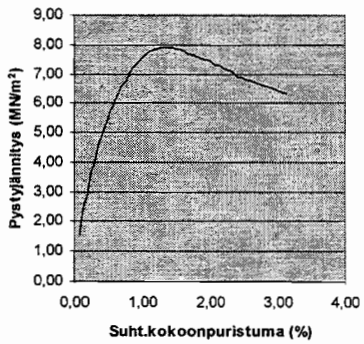
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 18



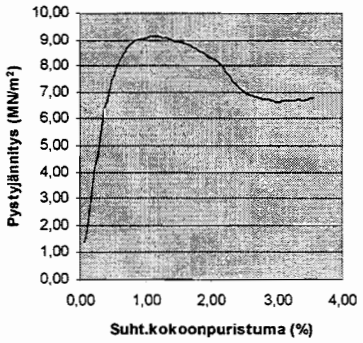
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 20



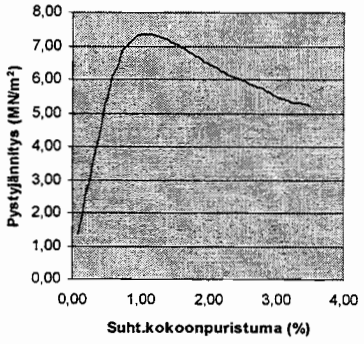
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 26



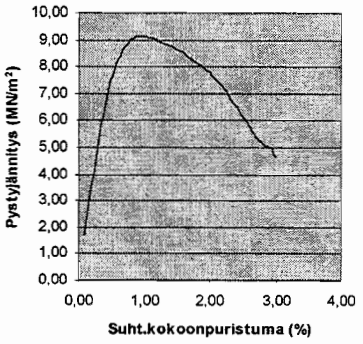
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

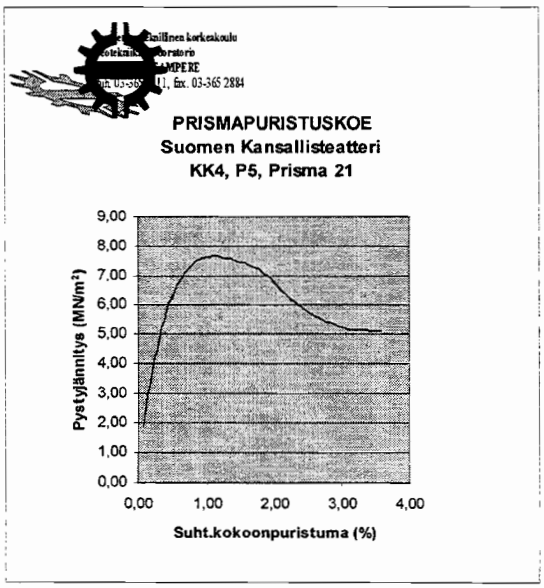
PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 6

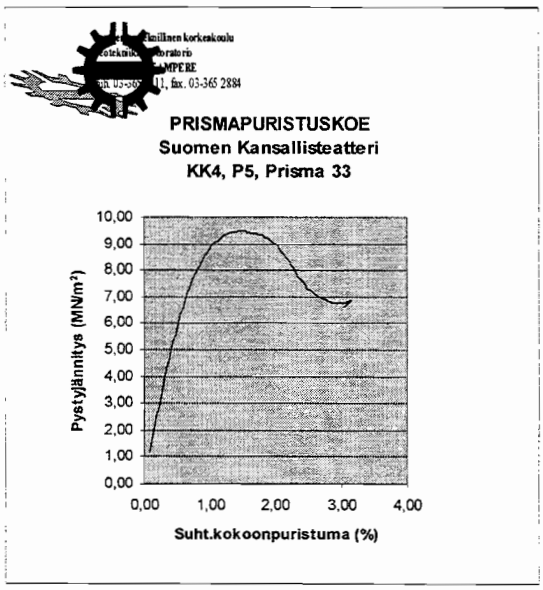


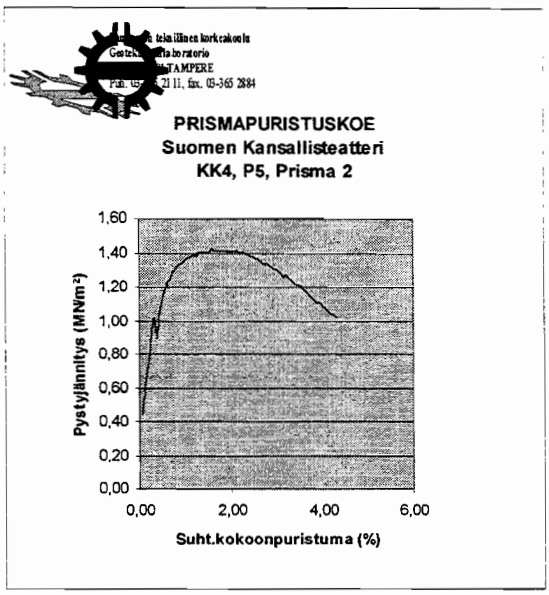
Teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
TAMPERE
Puh. 03-365 2811, fax. 03-365 2884

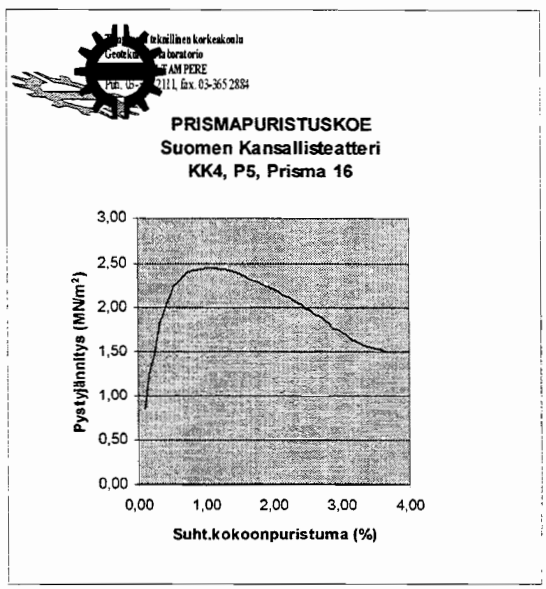
PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 17

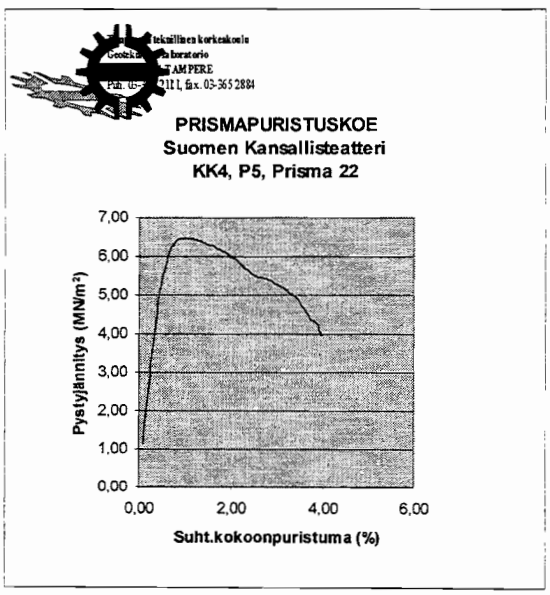


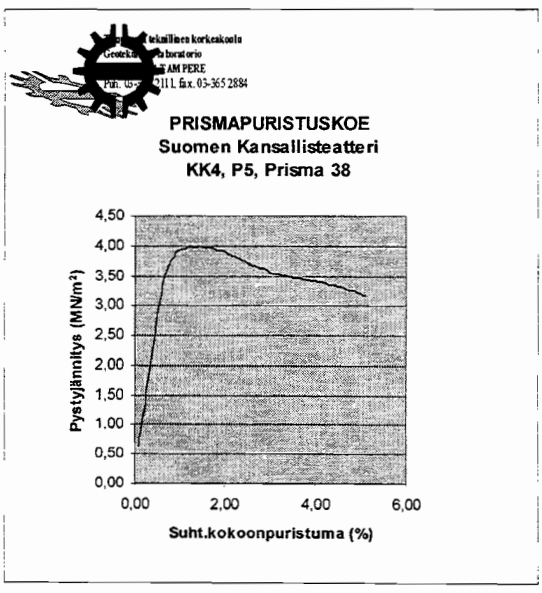

PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 21
Pystyjännitys (MN/m²)
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,00
1,00
2,00
3,00
4,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 33
Pystyjännitys (MN/m²)
10,00
9,00
8,00
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,00
1,00
2,00
3,00
4,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 2
Pystyjännitys (MN/m²)
1,60
1,40
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 16
Pystyjännitys (MN/m²)
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
0,00
1,00
2,00
3,00
4,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 22
Pystyjännitys (MN/m²)
7,00
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
Suht.kokoonpuristuma (%)


PRISMAPURISTUSKOE
Suomen Kansallisteatteri
KK4, P5, Prisma 38
Pystyjännitys (MN/m²)
4,50
4,00
3,50
3,00
2,50
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
0,00
2,00
4,00
6,00
Suht.kokoonpuristuma (%)

Kasvukairanäytteet, lahoisuusluokat

Koekuoppa 1

Paalu 2, -200 mm anturasta, Näyte 1, keskeltä, näytteen pituus 23 cm, sydänpuu 12 cm pinnasta *
Näytteenottosuunta -> ; tulokset ilmoitettu cm välein näytteen pinnasta

4	3	3	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	4		
											*													

Paalu 5, Näyte 2, anturasta –200 mm,näyte otettu oik., näytteen pituus 21cm, sydänpuu 14 cm pinnasta *

4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3	2	2	2	2				
												*												

Paalu 5, Näyte 3, -200 mm, näyte otettu suoraan, näytteen pituus 22 cm, sydänpuu 8-9 cm pinnasta *

2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3	4	3	3	4	4			
								*																

Paalu 6, Näyte 4, -200 mm, näytteen pituus 22 cm, sydänpuu 10-11 pinnasta *

4	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4			
									*															

Paalu 1, 300 yläpäästä, pituus 24 cm

4	4	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	4	4	4	

Paalu 1, 500 mm yläpäästä, 22 cm

4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3			

Koekuoppa 2

Paalu 1, - 280 mm, Näyte 1, näytteen pituus 23 cm, sydänpuu 12 cm pinnasta *

3	3	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	3	3			
											*													

Paalu 4, -100 mm, Näyte 2, näytteen pituus 21 cm, sydänpuu 11 cm pinnasta

3	3	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	1	1	2	2	2	3	3	3					
											*													

Paalu 4, - 210 mm, Näyte 3, näytteen pituus 23, sydänpuu 13,5 cm pinnasta

4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3		
												*												

Paalu 4, -530 mm, Näyte 4, näytteen pituus 23 cm,

4	4	4	4	4	3	2	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3			
											*													

Paalu 5, 100, Näyte 5, näytteen pituus 21 cm, sydänpuussa syöpymää

4	4	4	4	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3				

Näytteenottosuunta -> ; tulokset ilmoitettu cm välein näytteen pinnasta
Näyte 1, syvyys –50 mm, näytteen pituus 19 cm, sydänpuu 10 cm pinnasta *
Näytteen ensimmäiset 3-5 cm olivat hyvin maansekaista puuta. Lahoisuus kuitenkin selvä.

4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4						
									*															

Näyte 2, syvyys –400 mm, näytteen pituus 17 cm, sydänpuu 10 cm pinnasta *
Näytteen ensimmäiset 3-4 cm maansekaista puuta, näyte sinistynyt

4	4	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4								
									*															

Näyte 3, - 40 mm, näytteen pituus 20 cm, sydänpuu 11 cm pinnasta *

4	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4					
										*														

Näyte 4, -350 mm, näytteen pituus 16 cm, sydänpuu 10-11 pinnasta *

3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3									
									*															

Koekuoppa 4

Näytteenottosuunta ->
Paalu 1, näyte 1, -50, näytteen pituus 24 cm

3	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	3		

Paalu 1, näyte 2, -470, näytteen pituus 21 cm

4	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1					

Paalu 2, näyte 3, - 80, näytteen pituus 23 cm

4	3	4	3	2	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1			

Paalu 2, näyte 4, -550, näytteen pituus 18 cm

4	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1							

Paalu 3, näyte 5, -30, näytteen pituus 24 cm

3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4		

Paalu 4, näyte 6, - 520, näytteen pituus 20 cm

4	4	4	4	2	2	2	2	2	3	3	4	3	3	2	2	2	2	2	2					

Paalu 4, näyte 7, -50, näytteen pituus 24 cm
Näytteen alkupäässä rihmastoa

4	4	4	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	3	2	3		

Paalu 5, näyte 1, syvyys –50 mm yläpäästä, näytteen pituus 18 cm,

4	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3							

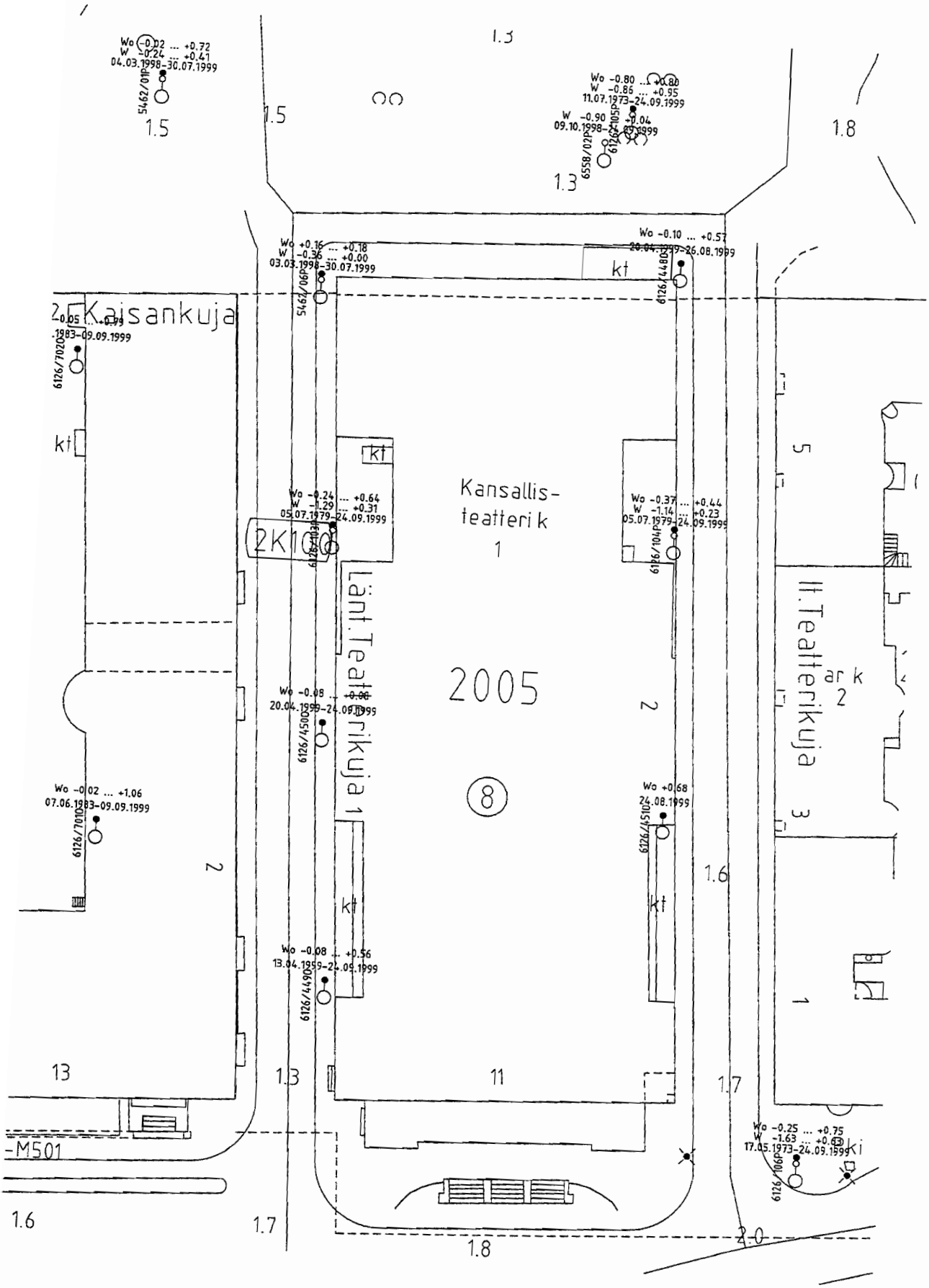
Paalu 5, näyte 2, syvyys – 230 mm, näytteen pituus 19 cm,
Näyte otettu muihin nähden ristiin

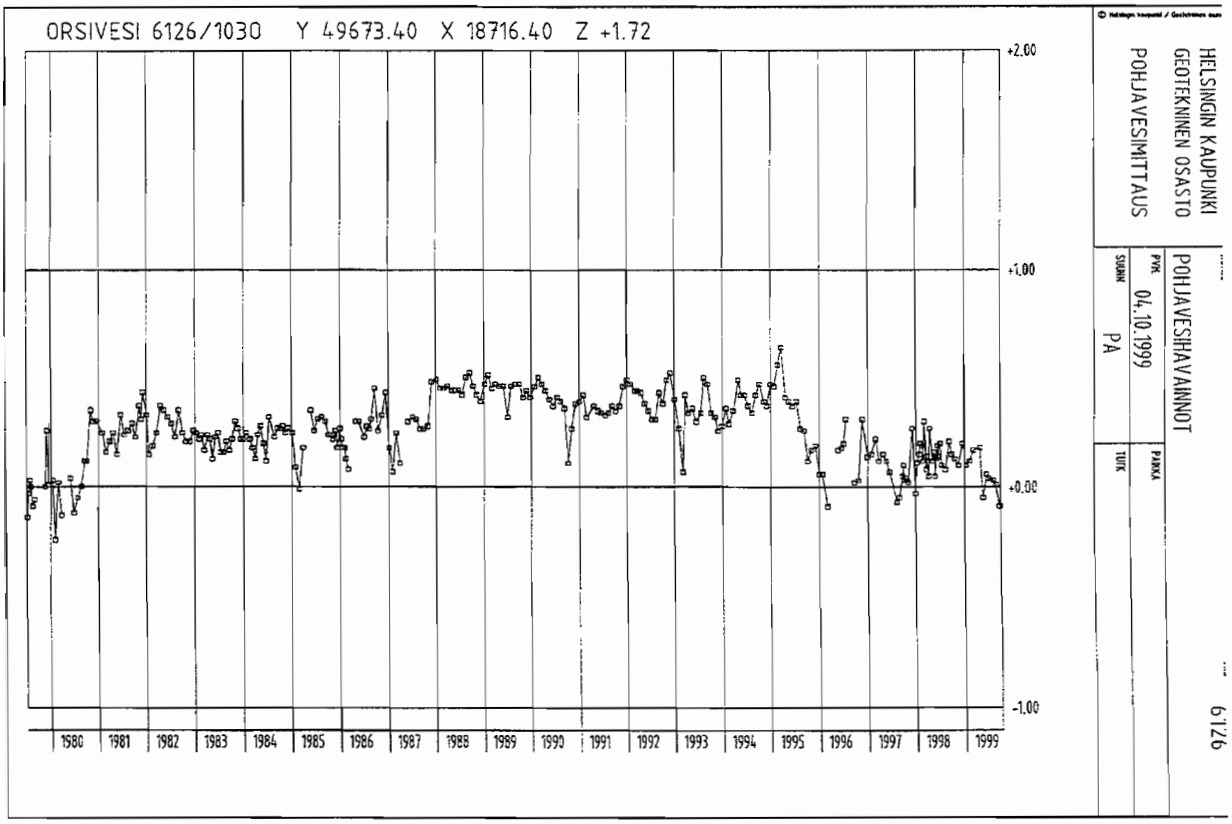
4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4						

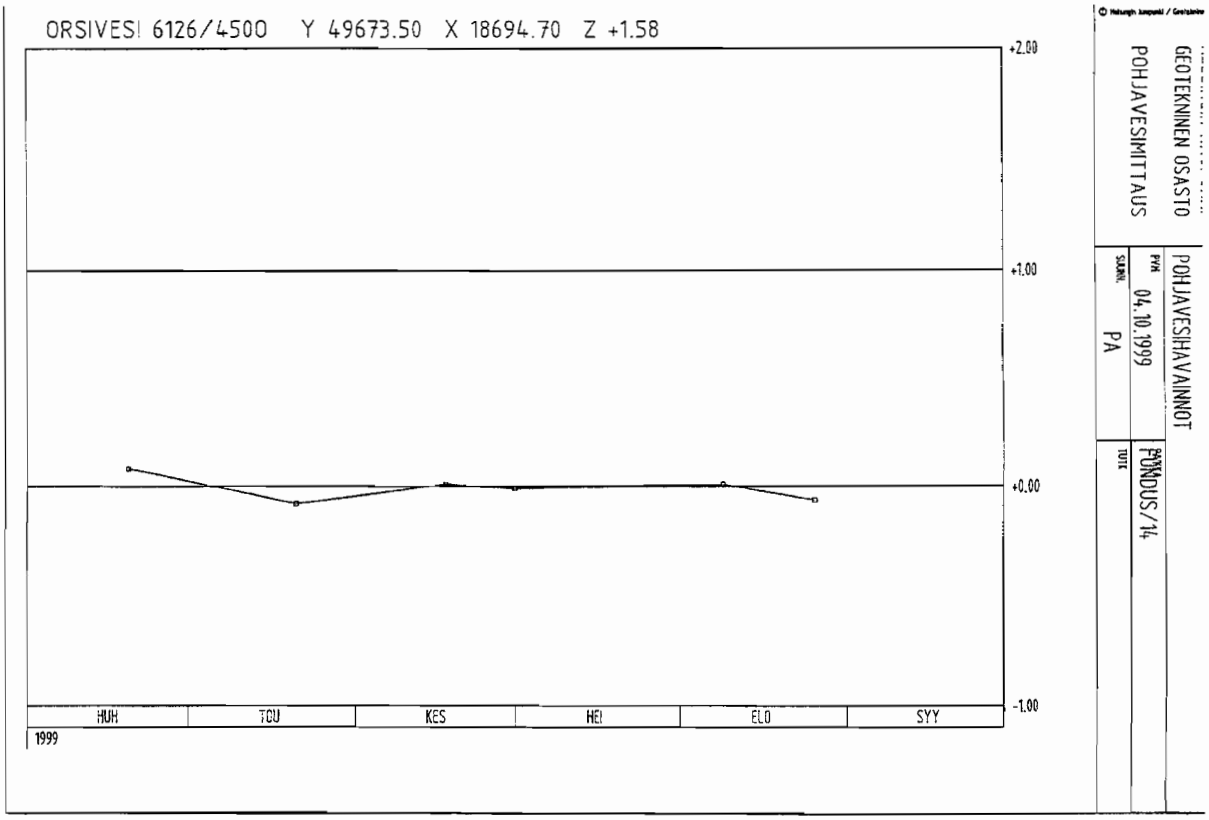
Paalu 5, näyte 3, - 420 mm yläpäästä, , näytteen pituus 19 cm,

4	4	4	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	2						

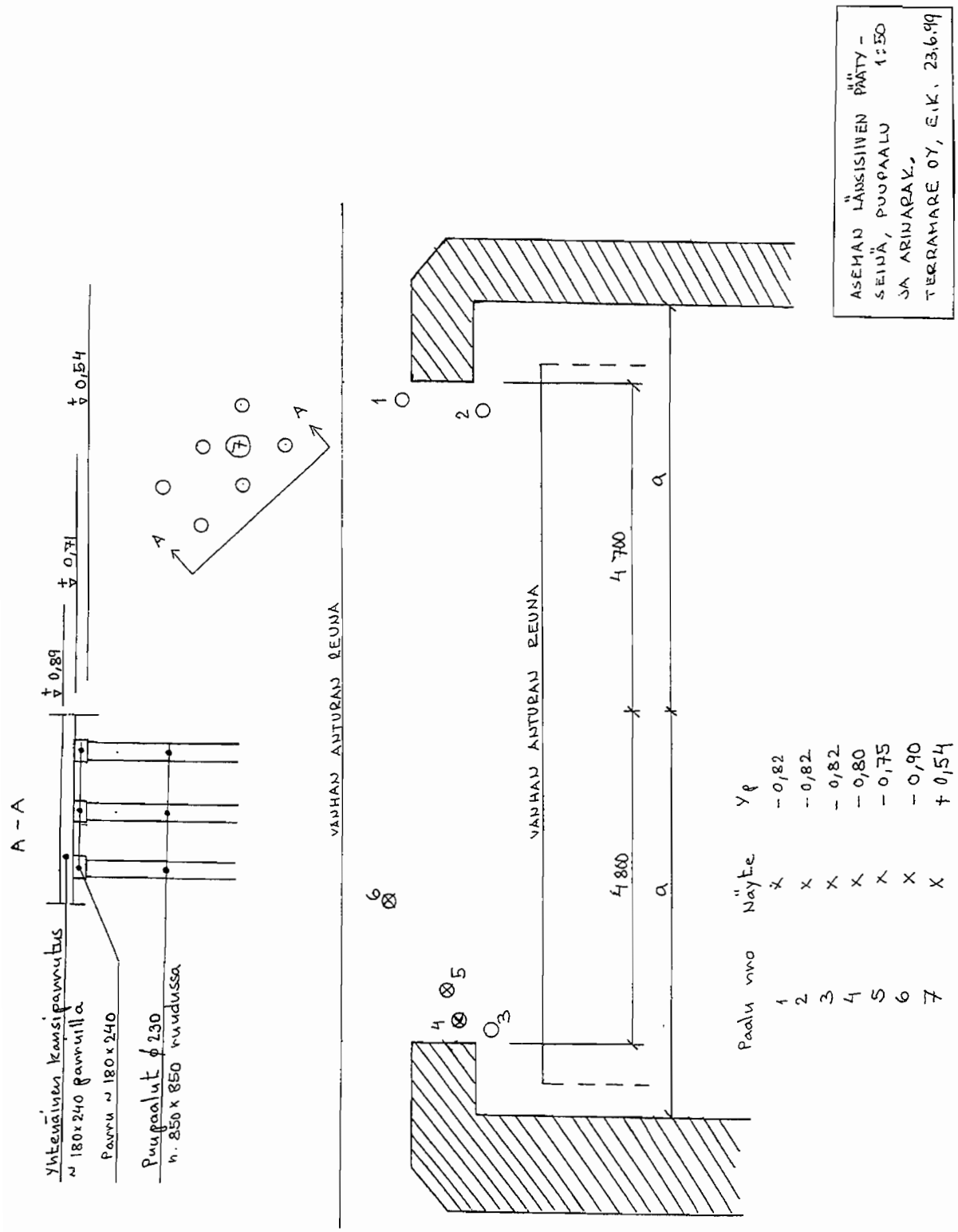
Suomen Kansallisteatteri, orsi- ja pohjavesiputkien sijainti




ORSIVESI 6126/1030 Y 49673.40 X 18716.40 Z +1.72
+2.00
+1.00
+0.00
-1.00
1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999
HELSINGIN KAUPUNKI
GEOTEKNINEN OSASTO
POHJAVESIMITTAUS
POHJAVESIHAVAINNOT
PVM 04.10.1999
SUUNN PA
TUTK
PAIKKA
6126


ORSIVESI 6126/4500 Y 49673.50 X 18694.70 Z +1.58
+2.00
+1.00
+0.00
-1.00
HUH TOU KES HEI ELO SYY
1999
GEOTEKNINEN OSASTO
POHJAVESIMITTAUS
POHJAVESIHAVAINNOT
PVM 04.10.1999
SUUNN PA
TUTK
PAIKKA FORNDUS/14

Helsingin rautatieaseman tutkimukset.



Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

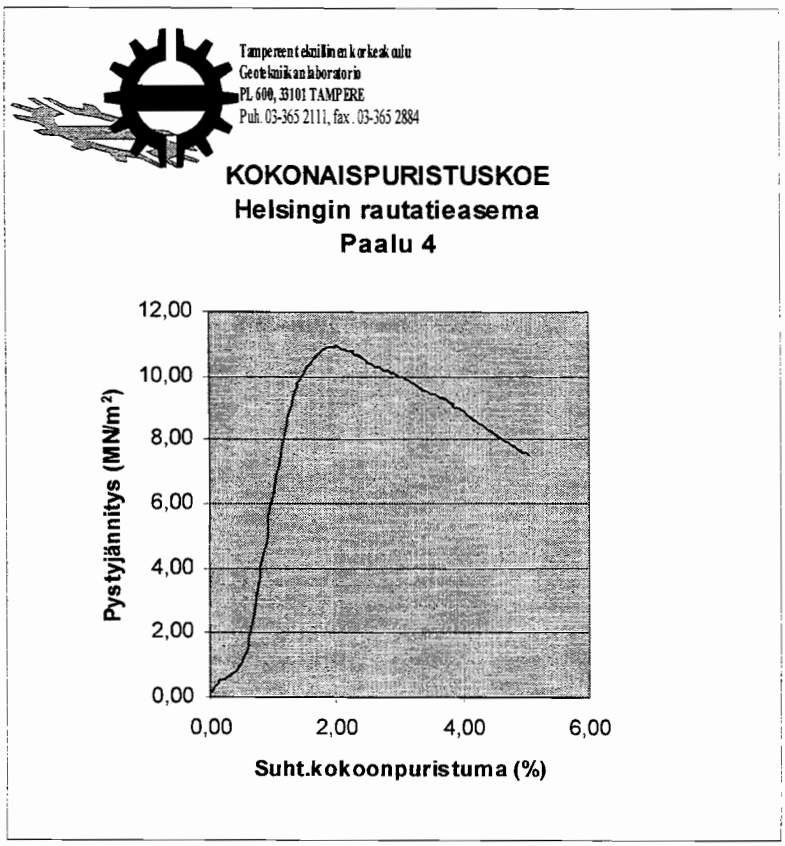
2.8.1999

KOKONAISPURISTUSKOKEET

Asiakas: VR-Rata
Kohde: Helsingin rautatieasema, paalu 4, taso -0,8

Koe-kuoppa	Paalu	Halkaisija (mm)	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
	4	185	10,9	1108	294,0	3,7

Suunnittelukuorma (kN)
80



Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

28.7.1999

PRISMAPURISTUSKOKEET

Asiakas: VR-Rata
Kohde: Helsingin rautatieasema, paalu 5, taso -0,75

Prisma	Kohta pl:ssa	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Kosteuspitoisuus (paino-%)	Tiheys (kg/m^3)
11	S	8,0	1213	83	417
16	S	8,6	158	74	387
18	S	9,8	920	78	405
23	S	9,9	475	89	390
6	V	14,5	1034	68	431
15	V	11,6	868	63	416
19	V	5,4	491	59	392
28	V	10,8	108	71	411
2	P	12,5	1800	97	518
8	P	14,7	1590	71	459
14	P	11,6	1319	87	511
31	P	10,7	742	81	473
Keskiarvo		10,7	893	77	434
KA sydän		9,1	692	81	400
KA väli		10,6	625	65	412
KA pinta		12,4	1363	84	490

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Paalun halkaisija (mm)	Suunnittelukuorma (kN)
200	80

Poikkileikkauksen osa	Pinta-ala (mm^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
Sydänpuu	5027	45,6	
Välipuu	10367	109,5	
Pintapuu	16022	198,3	
Yhteensä		353,3	4,4
Koko poikkileikkaus	31416	335,1	4,2

Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

29.7.1999

PRISMAPURISTUSKOKEET

Asiakas: VR-Rata
Kohde: Helsingin rautatieasema, paalu 6, taso -1,3

Prisma	Kohta pl:ssa	Murtolujuus (MN/m^2)	Kimmomoduuli (MN/m^2)	Kosteuspitoisuus (paino-%)	Tiheys (kg/m^3)
6	S	9,4	1226	73	414
14	S	9,6	1174	109	413
21	S	11,1	1644	81	437
35	S	11,6	1170	43	407
3	V	7,1	868	46	491
7	V	12,3	1545	41	511
12	V	11,9	1614	36	468
15	V	10,1	1165	113	466
9	P	11,5	1021	38	442
10	P	12,0	1502	40	476
16	P	10,3	1307	75	440
29	P	11,2	1313	38	451
Keskiarvo		10,7	1296	61	451
KA sydän		10,4	1304	76	418
KA väli		10,4	1298	59	484
KA pinta		11,2	1286	48	452

S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Paalun halkaisija (mm)	Suunnittelukuorma (kN)
245	80

Poikkileikkauksen osa	Pinta-ala (mm^2)	Murtokuorma (kN)	Varmuuskerroin murtoa vastaan
Sydänpuu	6362	66,3	
Välipuu	19085	197,7	
Pintapuu	21697	244,0	
Yhteensä		508,0	6,4
Koko poikkileikkaus	47144	503,4	6,3

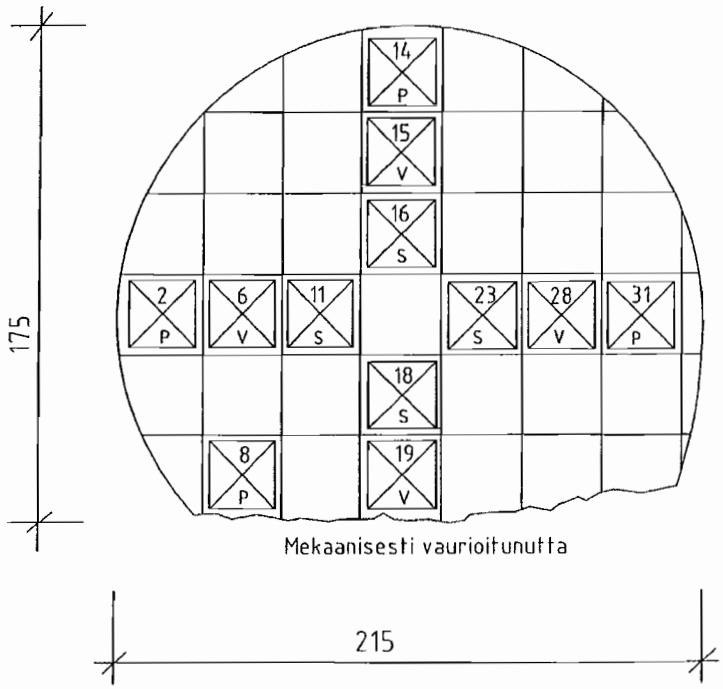
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

26.7.1999

PURISTETUT PRISMAT

HELSINGIN RAUTATIEASEMA

PAALU 5



Prisman koko 25 x 25 mm²

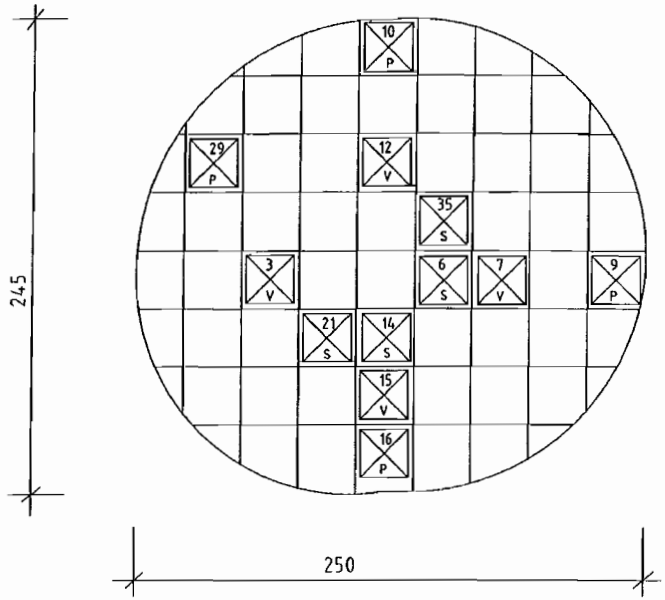
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

27.7.1999

PURISTETUT PRISMAT

HELSINGIN RAUTATIEASEMA

PAALU 6



Prisman koko 25 x 25 mm²

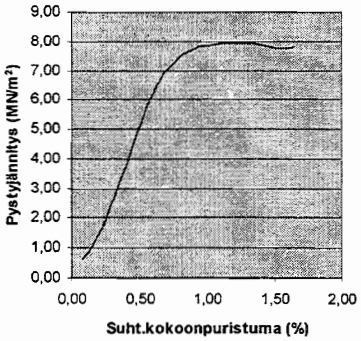
S = sydänpuu
V = välipuu
P = pintapuu

Geotekninen osasto julkaisu 79

Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto

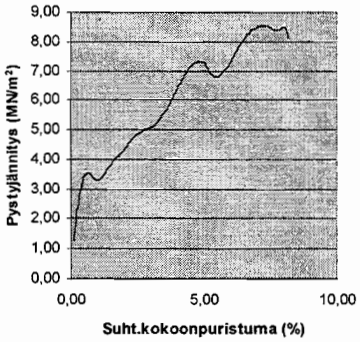
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 11s



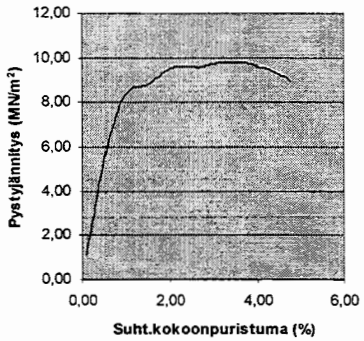
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 16s



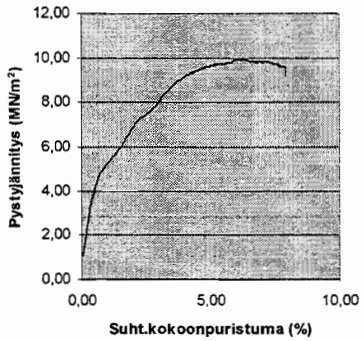
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 18s



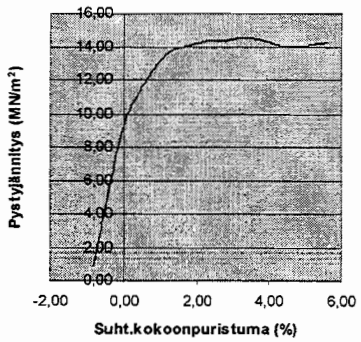
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 23s



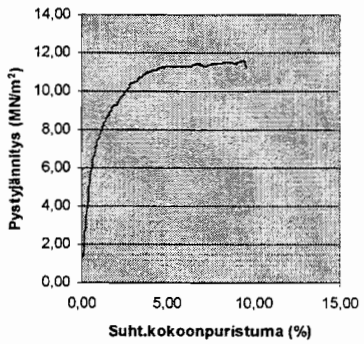
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 6v



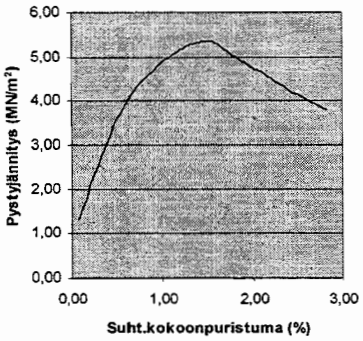
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 15v



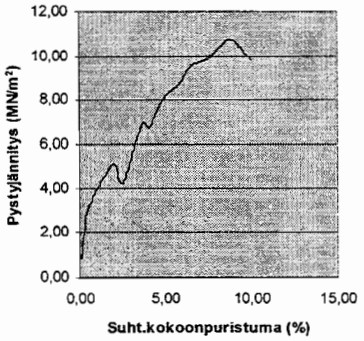
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 19v



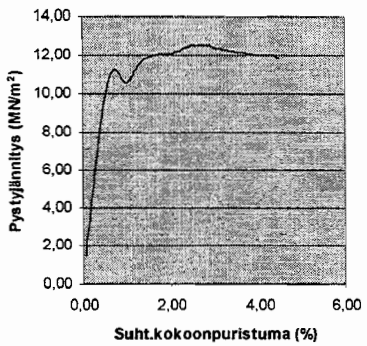
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 28v



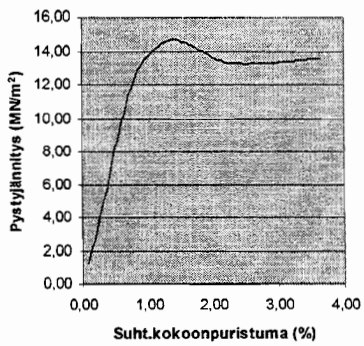
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 2p



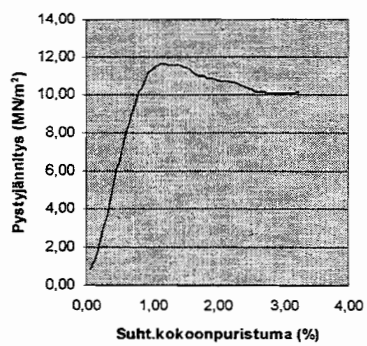
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 8p



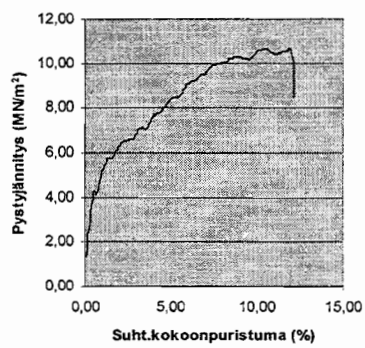
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 14p



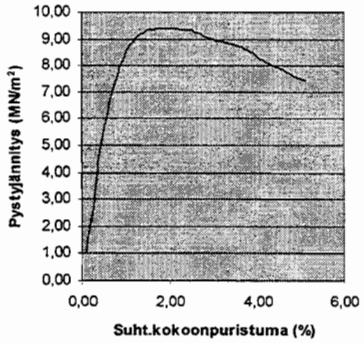
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekninen laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 5, prisma 31p



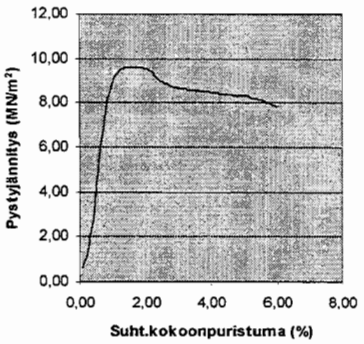
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 6s



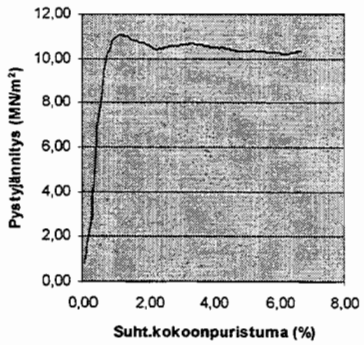
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 14s



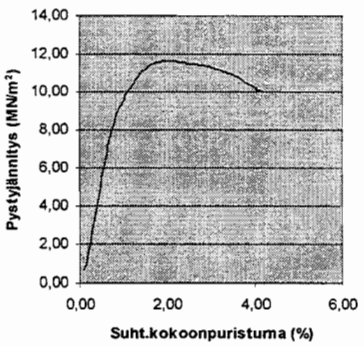
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 21s



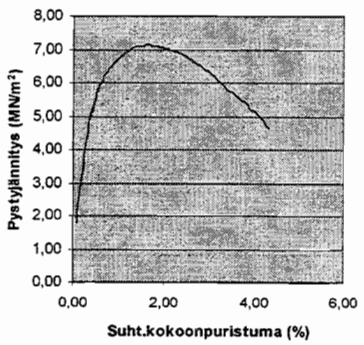
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 35s



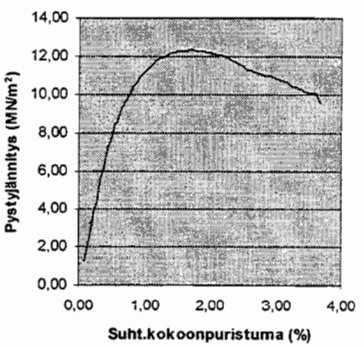
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 3v



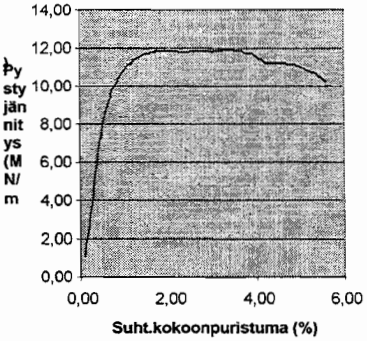
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 7v



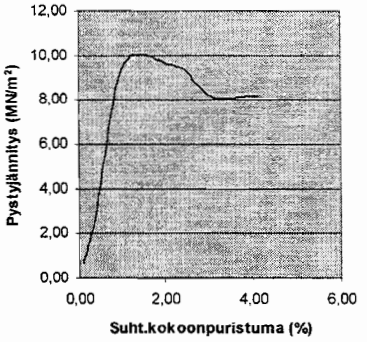
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 12v



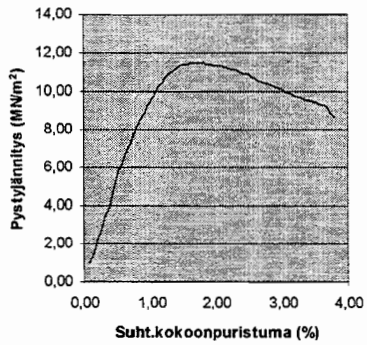
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 15v



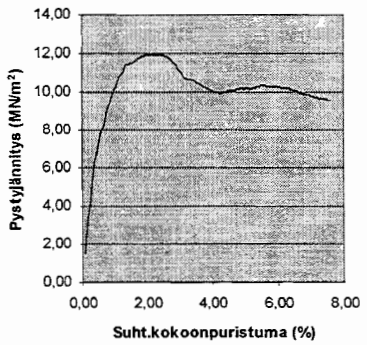
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 9p



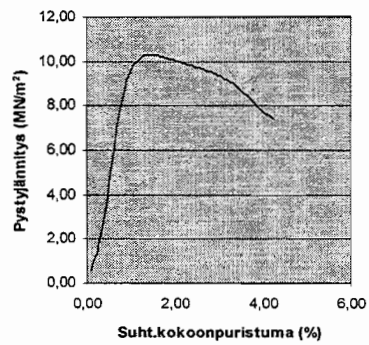
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 10p



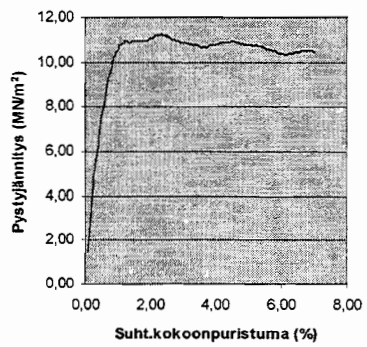
Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 16p



Tampereen teknillinen korkeakoulu
Geotekniikan laboratorio
PL 600, 33101 TAMPERE
Puh. 03-365 2111, fax. 03-365 2884

PRISMAPURISTUSKOE
Helsingin rautatieasema
Paalu 6, prisma 29p



Kasvukairanäytteet

Rautatieasema 22.7.99
Näytteenottosuunta ->

Näyte 4.1. -50 mm paalun päästä, näytteen pituus 21 cm

3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	3	2	2	2	3	3	3			

Näyte 4.2. –500 mm, näytteen pituus 18 cm

3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3						

Näyte 5.1. –100 mm paalun päästä, näytteen pituus 19 cm, kairanäytteen kappaleet sekaisin
Näyte pahoin tummunut/ katkeillut

4	3	3	3	3	4	3	3	3	2	1	2	3	3	2	2	2	3	4					

Näyte 5.2. – 410 mm , näytteen pituus 19,5 cm

4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	3	4			

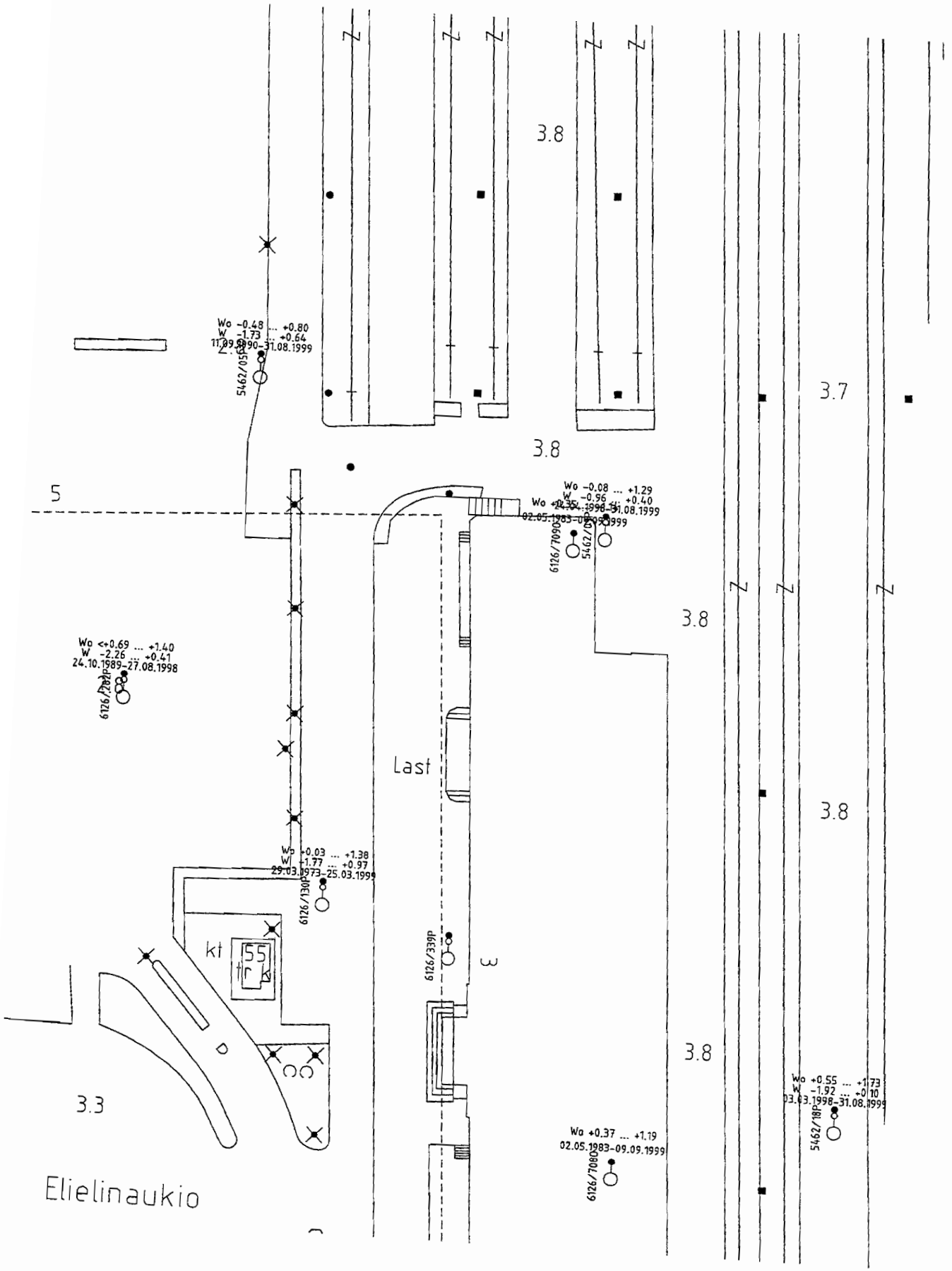
Näyte 6.1. –50 mm, näytteen pituus 24 cm

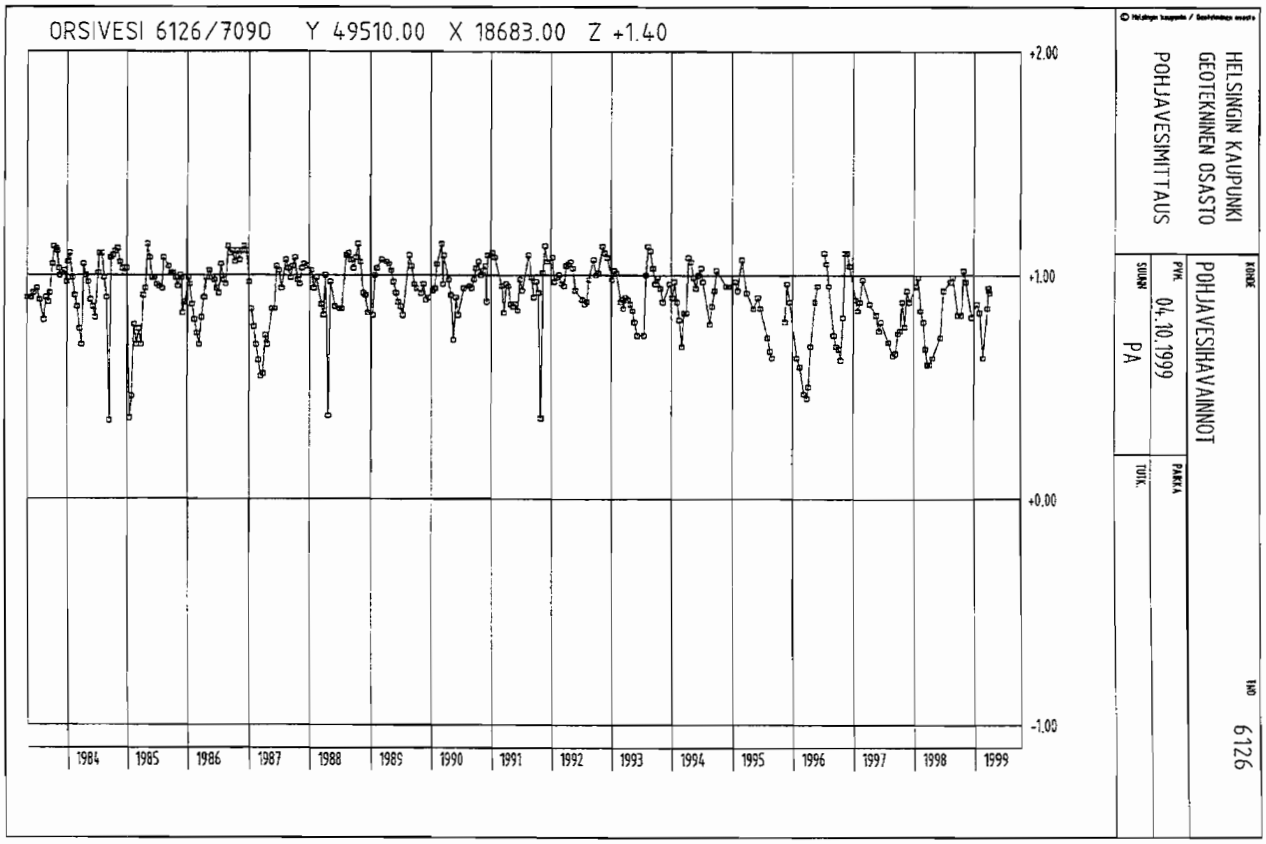
4	3	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	4	4		

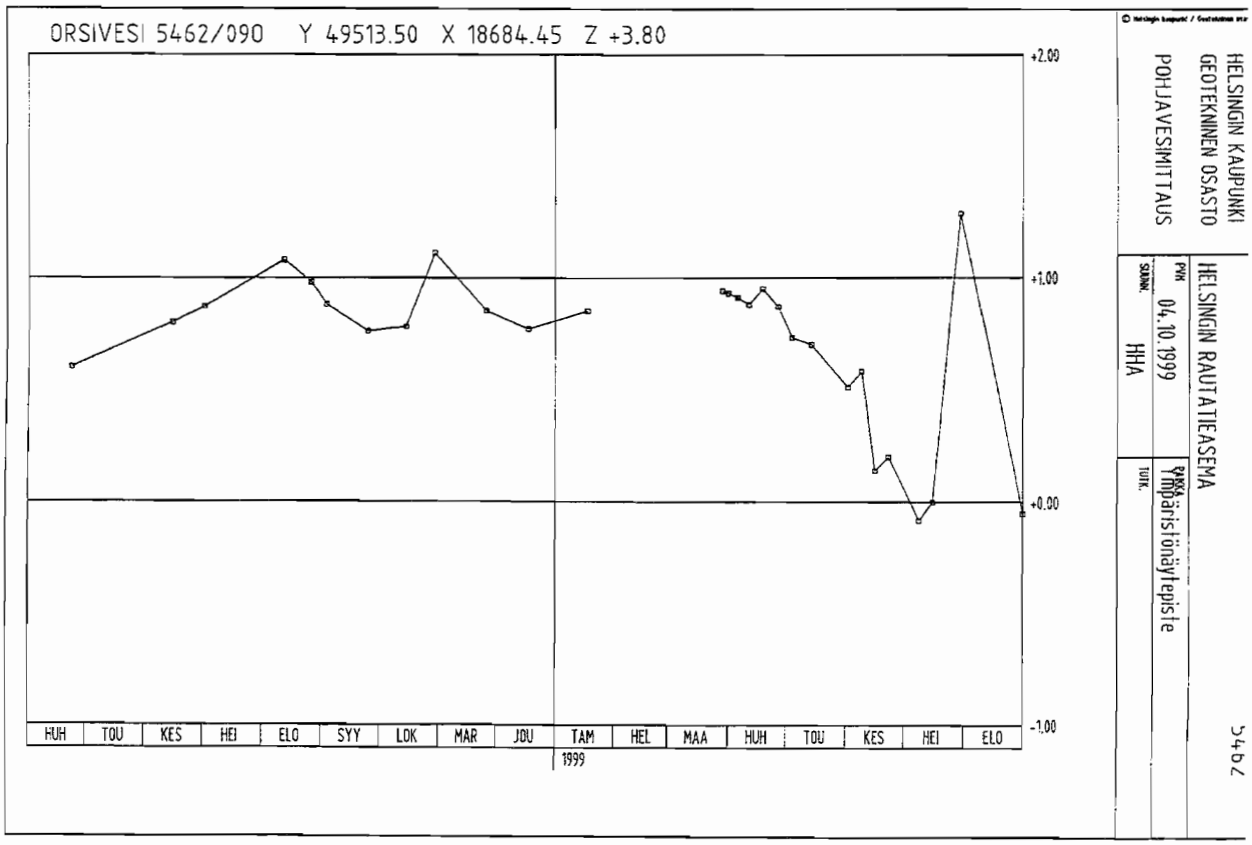
Näyte 6.2. –330 mm, näytteen pituus 22 cm, palat eivät oikeassa järjestyksessä

3	3	3	4	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	4	3	3	3	3	4			

Helsingin rautatieasema, orsi- ja pohjavesiputkien sijainti




ORSIVESI 6126/7090 Y 49510.00 X 18683.00 Z +1.40
+2.00
+1.00
+0.00
-1.00
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
HELSINGIN KAUPUNKI
GEOTEKNINEN OSASTO
POHJAVESIMITTAUS
POHJAVESIHAVAINNOT
PVM 04.10.1999
SUUNN PA
TUTK.
PAIKKA
TNO 6126


ORSIVESI 5462/090 Y 49513.50 X 18684.45 Z +3.80
+2.00
+1.00
+0.00
-1.00
HUH
TOU
KES
HEI
ELO
SYY
LOK
MAR
JOU
TAM
HEL
MAA
HUH
TOU
KES
HEI
ELO
1999
HELSINGIN KAUPUNKI
GEOTEKNINEN OSASTO
POHJAVESIMITTAUS
HELSINGIN RAUTATIEASEMA
PVM 04.10.1999
SUUNN HHA
TUTK.
PAIKKA Ympäristönäytepiste
5467

Julkaisija	Julkaisusarja, numero ja julkaisuaika
HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO **GEOTEKNINEN OSASTO** MALMIN ASEMATIE 3 A 00700 HELSINKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 http://www.kv.hel.fi/geo	Geoteknisen osaston tiedotteet 79/1999 Marraskuu 1999
	Projektinumero(t) 6586

Tekijä(t)	Julkaisija
Juha Pitkänen Ilkka Vähäaho Pekka Raudasmaa	HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO **GEOTEKNINEN OSASTO**

Nimike

PUUPAALUJEN RAKENTEELLISEN KANTOKYVYN TARKASTAMINEN

Tiivistelmä

Helsingin kantakaupungin alueella on noin 120 rakennusta, jotka on perustettu puupaaluilla. Näistä 17 sijaitsee liikekeskustassa. Turussa tiedettyjä puupaaluperustusten korjauskohteita on noin 30 kappaletta, minkä arvellaan olevan vain noin viidesosa todellisesta kiireellisestä korjaustarpeesta. Kaikkiaan Turun keskusta-alueella on noin 400 rakennusta puisilla perustuksilla.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa Suomen olosuhteisiin soveltuvia puupaaluperustusten tutkimusmenetelmiä, selvittää niiden kehittämistarpeita sekä saada lisäselvyyttä puupaalujen lahon etenemisen nopeuteen ja lahoamismekanismeihin orsi- tai pohjavedenpinnan alapuolella. Samassa yhteydessä tavoitteena oli esittää kotimainen puolueeton tutkimusjärjestelmä, jonka perusteella puupaaluperustusten kunto ja kunnostustarve on mahdollista arvioida. Tutkimusjärjestelmä tulisi toimimaan myös kustannusoptimoitujen korjauspäätösten perustana.

Eri tutkimusmenetelmiä ja puupaalujen lahoamisen aiheuttajia etsittiin kotimaisen ja ulkomaisen kirjallisuuden avulla. Tutkimukseen kuului myös neljä koekohdetta: Suomen Kansallisteatteri, Helsingin rautatieasema, Lauttasaaren ala-aste ja Sänkiniityn kohde Kehä III:lla. Koekohteista kolme oli rakennusten puupaaluperustuksia ja yksi tierakenteessa oleva pengerlaattaperustus. Tutkimuksen yhteydessä tutustuttiin myös Hollantilaiseen tapaan tarkastaa puupaaluperustusten kunto.

Koekohteista otettiin puu-, orsivesi- ja maanäytteitä, jotka tutkittiin TTKK:n geotekniikan laboratoriossa. Puupaalunäytteistä määritettiin puun puristuslujuus, vesipitoisuus ja tiheys, joiden perusteella puupaalujen kunto voitiin arvioida. Lahoisuustutkimukset ja mikrobiologiset analyysit tehtiin TTKK:n Vesi- ja ympäristötekniikan laboratoriossa.

Nykyisin puupaaluperustusten todellinen kunto saadaan selville vain koekuopista otettavien paalunäytteiden perusteella. Ainettarikkomattomat menetelmät eivät vielä ole tarpeeksi tarkkoja puupaalujen lahoisuuden määrittämiseen. Myöskään menetelmiä lahon etenemisnopeuden tarkkaan määrittämiseen ei ole olemassa, koska lahoamiseen vaikuttavien monien eri tekijöiden vaikutuksia ei tunneta. Ainoa keino tutkia lahoamisen etenemistä on suorittaa koekuoppatutkimuksia määrävälein. Tällöin puupaaluperustusten ympäristöolosuhteet on pyrittävä pitämään mahdollisimman samankaltaisina tai parannettava niitä esimerkiksi nostamalla orsi- tai pohjavedenpinnan tasoa.

Puupaaluperustusten kunnon tarkastaminen ja korjausmenetelmien valinta on Suomessa tällä hetkellä varsin kirjavaa, eikä viranomaisohjeita tai -suosituksia ole olemassa. Virheet tutkimuksissa ja niiden perusteella tehdyt hätäiset johtopäätökset voivat johtaa kalliisiin korjaustoimenpiteisiin, vaikka niihin ei vielä olisi tarvetta. Tässä tutkimuksessa esitetyssä puupaalujen tutkimusjärjestelmässä pyritään ohjeistamaan puupaaluperustusten kunnon tarkastaminen ja antamaan paremmat valmiudet jatkotoimenpiteistä päättämiseen.

Avainsanat

biokorroosio, lahoaminen, puupaalu, rakenteellinen kantokyky

ISSN	ISBN	Luokitus (UDK)
0788-6209	951-718-354-2	628

Kieli	Sivuja
suomi, engl. tiivistelmä	117 s. + liitt. 31 s.

Published by
HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT
GEOTECHNICAL DIVISION
MALMIN ASEMATIE 3 A FIN-00700 HELSINKI
PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555
http://www.kv.hel.fi/geo

Series title, number and date
Geoteknisen osaston tiedotteet 79/1999
November 1999

Project number(s)
6586

Author(s)
Juha Pitkänen
Ilkka Vähäaho
Pekka Raudasmaa

Commissioned by
HELSINKI CITY
REAL ESTATE DEPARTMENT
GEOTECHNICAL DEPARTMENT

Title
INSPECTION OF STRUCTURAL BEARING CAPACITY OF WOODEN PILES

Abstract

There are about 120 buildings founded on wooden piles in Helsinki. In business centre there are 17 buildings on timber piling. In Turku there are approximately 30 known timber pile foundations which must be repaired. It has been estimated that those 30 foundations are only one-fifth of the immediate reparation need in Turku. In all there are about 400 buildings in Turku founded on wooden piles.

The purpose of this study was to find out proper inspection methods for the wooden foundations in Finland and find out the mechanisms and speed of the so called biocorrosion that takes place in wood under water. One of the main interests was to develop a Finnish impartial investigation system for wooden piles that could be basis for decision-making of foundation strengthening. Also a Dutch system of investigation for wooden foundations is introduced in this study.

The existing inspection methods and knowledge of decay in wooden piles were studied from domestic and foreign literature. The study consisted also of four real targets on wooden pile foundations in Helsinki. Three of them were building foundations: National Theatre of Finland, Helsinki railway station and an elementary school in suburb of Helsinki and one of them was an embankment plate made of concrete which was founded on wooden piles on Ring road III.

Several test pits were made and numerous samples of wood, groundwater and soil were examined in Geotechnical and Water and Environmental laboratories of Tampere University of Technology. Examination consisted of decay analysis of wood, structural testing of wood samples and microbiological analyzes.

The real condition of wooden pile foundations is possible to find out only by taking wood samples from test pits. The nondestructive methods still are not reliable enough for estimation of the rate of decay in wooden piles. There are several unknown factors that can influence the decay process in wooden piles and it is very difficult to define the exact speed of the decay. The only way to examinate the speed of decay in wooden piles is to make test pits periodically. The circumstances near pileheads must stay at least similar between the test periods. Improving of the circumstances for example by raising the level of groundwater is advisable.

There are no standards about investigations of wooden foundations in Finland. Mistakes in investigations and miscalculations based on the incorrect data may lead to expensive renovations of foundations which could still be functional and retainable. The investigation system introduced in this study trys to give some tools for proper estimations of wooden piles and for economical reconstruction decisions.

Keywords
biocorrosion, decay, structural bearing capacity, timber piles, wooden piles

ISSN	ISBN	Class (UDC)
0788-6209	951-718-354-2	628

Language	Pages
Finnish, Engl. Abstr.	117 p. + app. 31 p.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET 1(2)

15.11.1999

1	*Anttikoski, Usko*	Geotekniliset kartat ja niiden käyttäminen	1973	*
2	*Anttikoski, Usko*	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1973	*
3	*Anttikoski, Usko*	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1974	*
4	*Mäkinen, Reino*	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	1974	*
5	*Saarelma, Matti*	Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys	1974	*
6	*Hartikainen, Jorma*	Kitkapaalujen kantavuus	1976	
7	*Petäjä, Jouko*	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	1977	
8	*Raudasmaa, Pekka*	Metrotunneleiden injektointi	1977	*
9	*Anttikoski, Usko*	Kalliotunneleiden käyttö varastointiin	1977	*
10	*Tikkanen, Heikki*	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	1978	
11	*Arkima, Olli*	Kluuvin ruhjeen jäädytys	1978	*
12	*Raudasmaa, Pekka*	Puiset perustusrakenteet	1979	
13	*Havukainen, Jorma*	Voimalalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	1979	
14	*Vähäaho, Ilkka*	Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen	1979	*
15	*Raudasmaa, Pekka*	Pohjavesitarkkailu -80	1980	*
16	*Anttikoski, Usko*	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	1979	*
17	*Roinisto, Jarmo*	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin	1981	
18	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	1981	*
19	*Roinisto, Jarmo*	Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys	1981	
20	*Vuola, Pekka*	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	1981	
21	*Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo*	Tonttialueiden maarakenteet	1981	
22	*Havukainen, Jorma*	Esimerkkejä jätteiden hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	1981	
23	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	1982	
24	*Latvala, Ahti*	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	1982	
25	*Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti*	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	1982	
26	*Halkola, Hannu*	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torpparinmäessä	1982	*
27	*Paavola , Pertti*	Kunnallisteknisten tunneleiden louhintakustannusselvitys	1982	
28	*Vähäaho, Ilkka*	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	1982	*
29	*Gulin, Kai*	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Pulstolassa	1982	
30	*Halkola, Hannu*	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	1982	
31	*Havukainen, Jorma*	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	1983	
32	*Havukainen, Jorma*	Användning av stenkolsaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	1983	
33	*Havukainen, Jorma*	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	1983	
34	*Salmelainen , Juha*	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	1983	
35	*Havukainen, Jorma*	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	1983	
36	*Hytti, Pekka*	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa	1984	
37	*Leinonen, Jukka*	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	1984	
38	*Pirinen, Jussi*	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	1984	*
39	*Latvala, Ahti*	Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti	1984	*
40	*Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael*	Jäykkien liitosjohtojen pohjarakennusselvitys (Jäli-selvitys)	1984	
41	*Lahtinen, Eeva-Riitta*	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	1985	
42	*Korpi, Juha*	In Situ -kuormituskoe painumien määrittämiseksi	1985	
43	*Havukainen, Jorma*	Esirakentamisen kehittäminen	1985	
44	*Vähäaho, Ilkka*	Jäähdytysmenetelmän käyttö	1987	
45	*Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti*	Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	1987	*
46	*Julkunen, Arto*	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	1987	
47	*Hutri, Kaisa-Leena*	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	1988	
48	*Melander, Kari*	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	1989	
49	*Leppänen, Mikko*	Vahvisinkankaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	1989	
50	*Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu*	Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa	1989	
51	*Vähäaho, Ilkka*	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	1989	
52	*Koskela, Pekka*	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	1989	
53	*Saari, Mauri & Korhonen, Osmo*	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	1990	
54	*Saari, Mauri & Volanen, Niilo*	Ruoholahden koepaalutus	1990	
55	*Yrjänä, Jouni & Korhonen, Osmo*	Pystyojitus Pikku-Huopalahdessa	1991	
56	*Niinimäki, Risto & Raudasmaa, Pekka*	Viikinmäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	1992	
57	*Nieminen, Jarmo & Johansson, Erik & Holopainen, Pekka*	Viikinmäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	1992	

58	*Ahola, Jukka & Viitala, Raimo*	Lujitus- ja tiivistysmäärät Helsingin pientunneleissa	1992
59	*Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo*	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	1992
60	*Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo*	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	1992
61	*Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu*	Ylijäämäsavien massastabilointi	1993
62	*Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko*	Maankäytön geotekninen suunnittelu	1993
63	*Anttikoski,Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo*	Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti)	1993 *
64	*Rekonen, Rita & Halkola, Hannu*	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	1994
65	*Ulmala, Ola & Halkola, Hannu*	Puristin-porakonekairaus	1994
66	*Havukainen, Jorma*	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus)	1995
67	*Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko*	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	1996
68	*Puumalainen Niina & Havukainen Jorma*	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	1996
69	*Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo*	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	1998
70	*Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko*	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	1996
71	*Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko*	Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96	1996
72	*Wegelius, Arto & Viitala, Raimo*	Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	1996
73	*Vähäaho, Ilkka*	Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset	1996
74	*Rantala, Kalle & Halkola, Hannu*	Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla	1997
75	*Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka*	Paisuvat kalliosavet	1997
76	*Leivo, Pekka & Halkola, Hannu*	Maa- ja kallioperätietojen tulkinta porakonekairauksen rekisteröintituloksista	1998
77	*Nauska, Jari & Havukainen, Jorma*	Esirakentaminen 1998	1998
78	*Svanström, Terhi & Raudasmaa, Pekka*	Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojelu ja vaikutus rakentamiseen	1998
79	*Pitkänen, Juha & Vähäaho, Ilkka & Raudasmaa, Pekka*	Puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn tarkastaminen	1999

GEO 10 K	Kallioperäkartta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1978
GEO 10 M	Maaperäkartta - Jordmånskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10.000, Helsinki - Helsingf	1989

*) painos loppuunmyyty

Hinnat

tiedotteet	1 kpl 90 mk, 2-3 kpl 80 mk, 4-6 kpl 70 mk, 7- kpl 65 mk (sis. alv)
karttakirjat	450 mk/kpl (sis. alv)

Tilauslomake http://www.kv.hel.fi/geo/tilaus.html

Helsingin kaupunki
Kiinteistövirasto/geotekninen osasto
Malmin asematie 3 A 00700 Helsinki
puhelin 09-1691 fax 09-169 4555
Email geo@kv.hel.fi
http://www.kv.hel.fi/geo