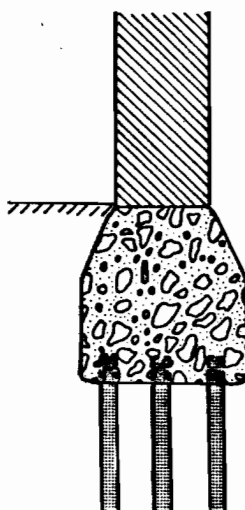
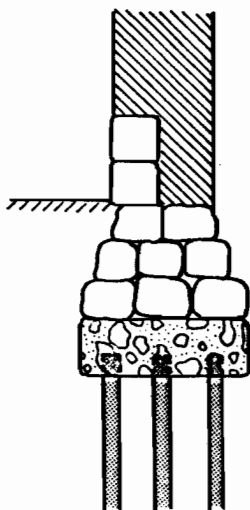
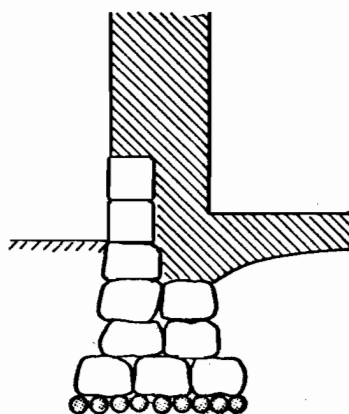
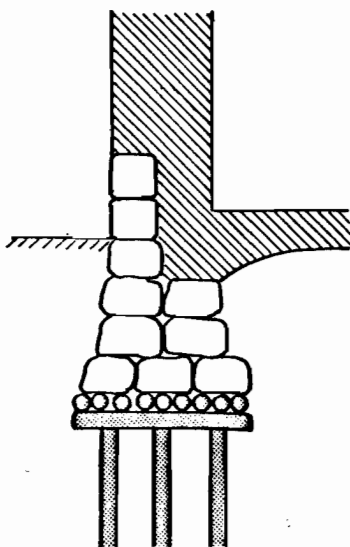


HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO



Pekka Raudasmaa

PUISET PERUSTUSRAKENTEET

Geoteknillisen toimiston
tiedote 12 20. 1. 1979

ALKUSANAT

Tämä kirjoitus on laadittu geoteknillisessä toimistossa vuoden 1978 loppupuolella. Kirjoitus pohjautuu historialliseen aineistoon, geoteknillisen toimiston arkistotietoihin ja eräisiin ulkolaisiin puun lahoamista koskeviin tutkimuksiin. Kirjoituksen on laatinut geologi Pekka Raudasmaa.

Geoteknillinen toimisto aloitti pohjavesitarkkailun Helsingin keskustassa metron toimesta vuonna 1972. Vuosina 1972-1977 oli pohjavesitarkkailun pääpaino pohjavedenpinnan korkeuden ja maanpinnan painumien tarkkailussa. Vuonna 1976 voimaan astuneet pohjarakentamista koskevat Sisäasiainministeriön määräykset ja Helsingin kaupunginhallituksen vuonna 1977 tekemät päätökset pohjavesitarkkailusta ovat muuttaneet pohjavesitarkkailun luonnetta siten, että entistä enemmän on kiinnitetty huomiota rakennusten perustamistavoista, -tasosta ja puuperustusten kunnosta saatavien tietojen kokoamiseen.

Puun käytöstä perustusrakenteissa ja puun kestävydestä vedessä on kirjoitettu vähän ja rakentajien keskuudessa on asiasta hyvin vähän tietoa.

Kun vanhojen talojen saneeraustoiminta tulee lisääntymään, tulisi myöskin vanhojen talojen perustusten kuntoon ja kantavuuteen liittyviä tutkimuksia tehdä nykyistä enemmän.

Helsingissä 10.1.1979

Geoteknillinen asiantuntija


Usko Anttikoski

Fil.maist. Pekka R a u d a s m a a

P U I S E T P E R U S T U S R A K E N T E E T

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
1. JOHDANTO	1
2. VANHOJEN RAKENNUSTEN PERUSTUKSET SAVIALUEILLA	2
2.1 <u>Milloin puupaaluja ja puuarinaa on käytetty ?</u>	2
2.2 <u>Puupaalut</u>	3
2.3 <u>Puuarinat ja perusmuurit</u>	6
2.4 <u>Kosteuden ja pohjaveden eristäminen</u>	7
3. PUUN RAKENTEESTA JA OMINAISUUKSISTA	9
3.1 <u>Puulajeista</u>	9
3.2 <u>Kemiallinen koostumus</u>	9
3.3 <u>Puun mikroskooppinen rakenne</u>	10
3.4 <u>Sydän- ja pintapuun ero</u>	12
3.5 <u>Puussa oleva vesi</u>	12
3.6 <u>Puun lujuus</u>	13
4. PUUN LAHOAMINEN	22
4.1 <u>Yleistä</u>	22
4.3 <u>Lahoamistapahtuma</u>	22
4.3 <u>Havaintoja Helsingin keskustan puuperustuksista</u>	23
4.4 <u>STEGA-ryhmän tutkimukset puun mikrobiologises-</u> <u>ta hajaantumisesta</u>	28
5. OSITTAIN LAHONNEIDEN PUUPERUSTUSTEN VARMUUDESTA	36
5.1 <u>Yleistä</u>	36
5.2 <u>Kuormitukset</u>	36
5.3 <u>Paalun varmuus</u>	37
5.4 <u>Arinarakenteen varmuus</u>	39
6. YHTEENVETO	40
SAMMANDRAG	41
SUMMARY	42
KIRJALLISUUSLUETTELO	43

1. JOHDANTO

Helsingin keskustassa on noin 50 puupaaluille rakennettua taloa. Näiden lisäksi on Vallilassa Päsilan konepajan rakennukset lähes kokonaan perustettu puupaaluilla. Näiden rakennusten puuperustusten vaihtaminen betonipaaluperustuksiksi maksaisi arviolta 200 milj. mk.

Helsingin kaupunki on ryhtynyt tarkkailemaan keskustassa pohjavedenpintaa metron rakentamisen alkaessa vuonna 1972. Vuonna 1978 on luotu kaavoitus- ja rakennusvalvontaviranomaisten kanssa lupajärjestelmä, jonka perusteella pohjavedenpinnan alapuoliset rakennustyöt on suoritettava ilman haitallista pohjavedenpinnan alentamista.

Vuoden 1978 aikana on geoteknillinen toimisto aloittanut yksityiskohtaisen, kortteleittain tehtävän pohjarakennustapaselvitysten laadinnan. Selvityksissä inventoidaan perustamistavat, -tasot ja perustusten kunto sekä pohjaveden pumppaukset. Työ tehdään arkistotietojen pohjalta, jolloin siihen jää aukkokohtia. Nämä kohdat pyritään täyttämään mm. kehottamalla kiinteistöjä teettämään tarvittavat tutkimukset esim. puupaalujen yläpäiden tasosta ja paalujen kunnosta. Inventointityön tietojen pohjalta voidaan suunnitella pohjavesitilannetta parantavat toimenpiteet ja suunnitella ja valvoa maanalaista rakentamista.

Eräissä yhteyksissä on esitetty mielipiteitä, että pohjavesitarkkailu ei ole kannattavaa, koska puuperustukset on piakkoin korvattava kuitenkin betonipaaluilla. Kun puuperustuksista ja paalujen lahoamiskysymyksistä on varsin vähän tietoa saatavissa, ovat puupaaluilla perustettujen rakennusten omistajat usein varsin epätietoisia perustusten todellisesta kunnosta tai vahvistustarpeesta. Seuraavassa kirjoituksessa on pyritty yleistajuisesti kertomaan puisten perustusten rakentamistavoista, puusta perustusmateriaalina ja puun lahoamisesta. Kotimaista perustutkimusta ei paalujen lahoamisesta ole suoritettu, joten kirjoituksessa on laajahkosti selostettu eräiden ulkolaisten tutkimusten tuloksia.

2.

VANHOJEN RAKENNUSTEN PERUSTUKSET SAVIALUEILLA

2.1

Milloin puupaaluja ja puuarinaa on käytetty ?

Puupaaluilla on Helsingin keskustassa perustettu kerrostaloja vielä 1950-luvulla. Viimeisin keskustan puupaaluilla perustetuista taloista lie-
nee Elannon tavaratalo Aleksanterinkadulla, joka valmistui v. 1952.

Betonin käyttö yleistyi Suomessa tämän vuosisadan alussa. Teräsbetonipaaluja on Helsingissä käytetty ensimmäisen kerran vuonna 1911 Vakuutusyhtiö Kalevan uudisrakennuksella Mannerheimintien ja Kaivokadun kulmassa (kuva 1).

RAKENNUSTAITO 1911

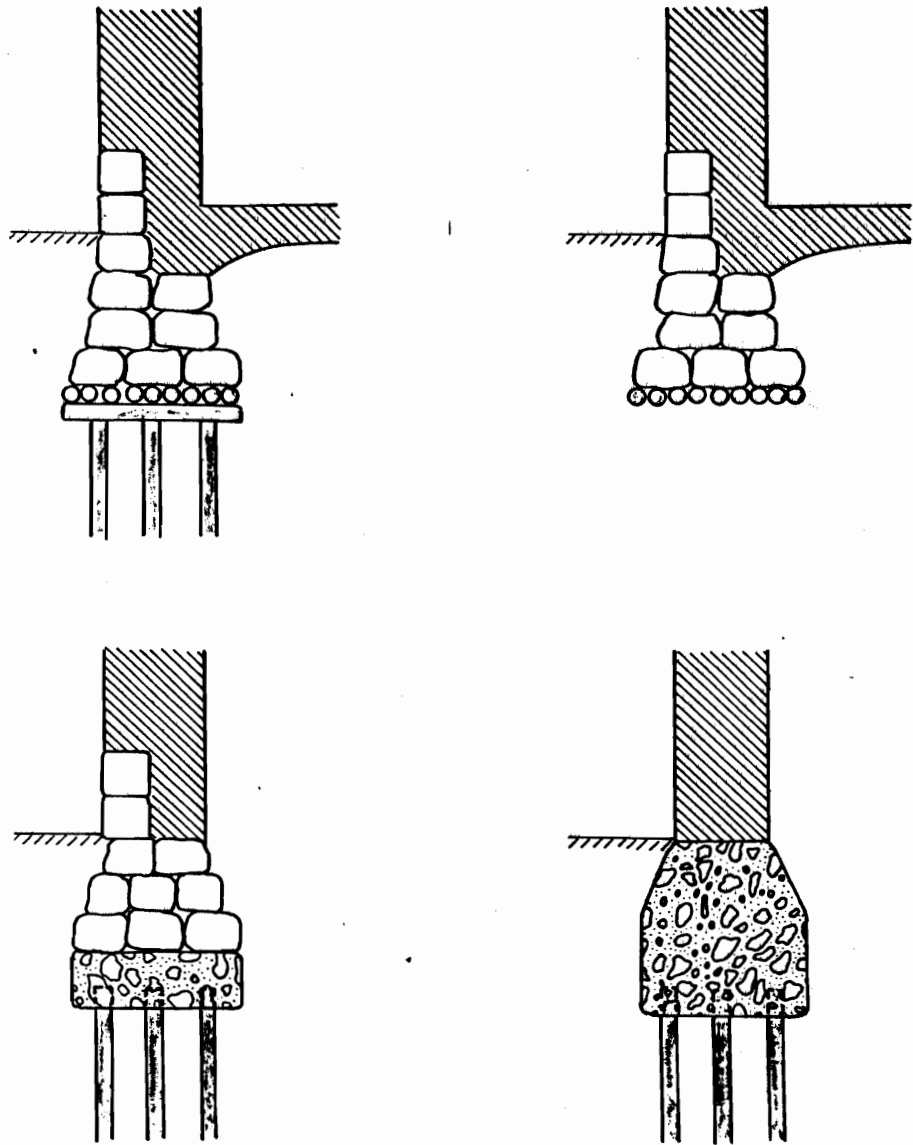
Uutisia.

Betonipaaluja Helsingissä. Vakuutusosakeyhtiö Kalevan uutisrakennuksella, Itä-Heikin-
katu 11, tullaan perustusta vahvistamaan betoni-
paalujen avulla. Kun paaluja on vasta kokeiluja
varten valmistettu ja kun varsinaiseen paalutus-
työhön ryhdyttäneen vasta noin kuukauden kulut-
tua, emme ole niistä vielä tilaisuudessa tarkem-
min kertomaan. Paalujen konstrueeraaja, insi-
nööri Jalmar Castrén, on niistä luvannut tuon-
nempänä tarkempia tietoja.

Kuva 1.

Puupaalujen päälle on aiemmin rakennettu hirsis-
tä vaakasuora alusrakenne, jota nykyään kutsu-
taan arinaksi ja aikaisemmin on kutsuttu rustik-
si. Betonin käyttöönotto syrjäytti puuarinan vuo-
sisadan vaihteessa ja viimeistään 1910-luvulla,
jolloin paalujen päälle valettiin betoninen pe-
rusmuuri.

Kuvassa 2 on esitetty vanhoja perustuksia, jotka
ovat osittain puusta rakennettuja.



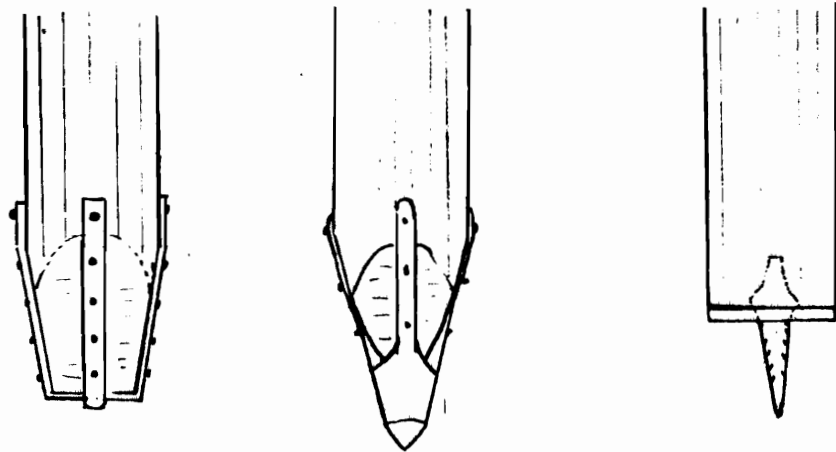
Kuva 2. Vanhoja perustusrakenteita.

2.2

Puupaalut

Puupaaluina on käytetty suoria mäntyjä, jonkin verran myös kuusia. Vaativiin paalutuksiin tiedetään tuoduksi kangaspetäjiä rautateitse Salpausselältä asti. Paalut on juntattu tuoreina maahan, koska näin niiden on arvioitu säilyvän paremmin. Paalut on kuorittu ennen maahan lyömistä, jottei kuori toimisi kitkaa alentavana tuppena. Paalujen yläpäässä on lyönnin aikana käytetty rautarengasta pään hajoamista estämässä.

Runko on lyöty latvapää edellä maahan. Latva on veistetty teräväksi ja kärjen yli on lyöty lat-taraudat (kuva 3) neljälle sivulle. Myös sepän takomia järeämpiä paalukärkiä on käytetty. Eräis-sä tapauksissa paalun kärkeä ei ole lainkaan rau-doitettu, koska se on koepaalutuksessa havaittu tarpeettomaksi.



Kuva 3. Puupaaluissa käytettyjä paalukärkiä.

Nykyään pidetään puupaalujen latvaläpimitan mini-minä 6-8". Vuosisadan vaihteen paalutustöissä lienee pyritty samaan, sillä rautatieaseman (1904) paaluissa latvaläpimitta oli 8" ja mm. Mariankatu 14 (1910) paalutuskartassa on läpimitaksi mainitu 7" (kuva 4). Tilastoa paalujen paksuuksista aukikaivetuissa perustuksissa ei valitettavasti ole laadittu.

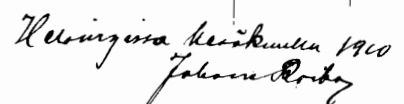
Paaluille on em. kohteista säilyneiden tietojen mukaan sallittu kuormaa enimmillään 5 MN/m^2 . Kuormitusta on paalupituuden kasvaessa vähennetty. Kuormituskysymyksiä ja paalujen varmuutta on käsitelty kohdassa 5.

Paaluja on tarvittaessa myös jatkettu, koska paalutussyvyys on paikoin ollut jopa 25 m. Tavallisin liitos on ollut tappiliitos (kuva 5). Rautatieaseman paalutuksessa on käytetty jatkoksena putkiliitosta (nk. Mannesmannin putkea).

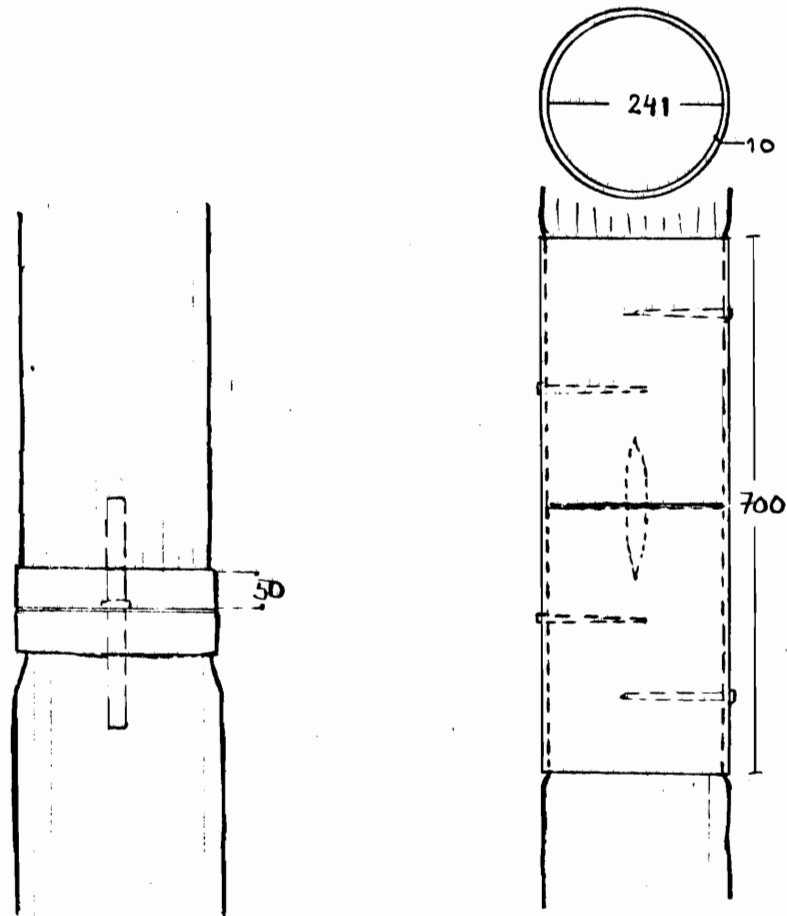
Laalutuskaartta uudisrakennuksesta varten Louheva N^o 4
Kauhan kadun varrella, Kortesissa N^o 11. "Pörs"
Helsingissä.

Nilakava 1:100.

~~min.~~
65 ton 10-90 m pasture. 90 ton 60-40 m. pasture.
70 " 80-80 " " 140 " 40-30 " "
80 " 80-60 " " " " "



Kuva 4. Mariankatu 14 paalutuskartta.



Kuva 5. Puupaalujen liitoksia. Vasemmalla tappiliitos ja oikealla Mannesmannin putkiliitos (Ikäläinen-Similä).

Viime vuosisadalla ja osittain tämän vuosisadan puolellakin on paalujen juntaaminen maahan tapahtunut miesvoimalla toimivalla paaluraanalla. Vuosisadan vaihteen tienoilla on Helsingissä ollut käytössä jo höyryvoimallakin toimivia paaluraanoja. Ensimmäisiä työmaita, joissa höyryvoimalla toimivia paaluraanoja on käytetty, on ollut Kansallisteatterin (valm. 1902) paalutustyömaa. Heijarin paino on yleensä ollut 300-900 kg ja pudotuskorkeus 1,5 - 10 m raanatyypistä riippuen.

2.3

Puuarinat ja perusmuurit

Puuarinaa paalutuksen päällä on käytetty vuosisadan vaihteeseen asti. Varmemmin tiedetään puuarina korvatuksi betonisella anturalla vasta 1910-luvulla. Vuosisadan alussa oli kuitenkin jo kokemuksia arinarakenteiden lahoamisesta ja pettämisestä. Niistä on yritetty päästä eroon ja betonin

puuttuessa on rakennettu kivilatomuksia myös suoraan paalujen päiden varaan.

Puuarinoita on tehty usealla eri tavalla ja ne on aina rakennettu "alimman perusvesipinnan" alapuolelle. Tavallisimmin paalut on juntattu riveittäin seinän pituus- ja poikkisuunnassa, jolloin arina on tehty lyömällä paalujen päihin ensin poikittaiset niskahirret ja näiden varaan pitkittäisruutuinen hirsipeti. Siirryttäessä käyttämään betonia paaluarinana on paalujen järjestys voitu valita vapaammin. Betoniantura on valettu niin, että paalujen päät ovat jääneet osittain betonin sisään.

Puuarinaa on käytetty jossain määrin myös kiinteälle pohjalle perustettaessa. (Mm. Pohj. Esplanadi 19, Helenank. 3). Vetisissä kaivanto-olosuhteissa on kivilatomuksen rakentaminen 'lujaksi' onnistunut paremmin hirsiarinan päälle. Pohjavedenpinnan alenemisesta kitkamaa-alueellakin saattaa siten aiheutua vahinkoja hirsiarinoiden lahotessa.

Arinan tai paalujen päälle rakennettu luonnonkivinen perusmuuri on ulotettu lähes maanpintaan. Kivilatomus on tehty huomattavasti kivijalkaa ja seinää leveämmäksi niin, että se kapenee ylöspäin. Käytetyt kivet ovat olleet kookkaita ja ne on ladottu limittäin. Kivilatomus on tehty ns. kylmänä muurina, jolloin saumoja ei ole täytetty laastilla.

Perusmuurin päälle tulevan kivijalan eli sokkelin ulkoreuna valmistettiin 1930-luvulle asti myös luonnonkivistä. Sisäosa muurattiin tiilestä, jolloin varsinaiset seinät ovat osaksi kivijalan ja osaksi tiilimuurin varassa.

2.4

Kosteuden ja pohjaveden eristäminen

Maakosteus on eristetty seinistä asfalttitervauksella. Käytettäessä luonnonkivisiä kivijalkoja on kivijalan yläpinta ensin tasattu pienillä kiilakivillä ja laastilla, myöhemmin betonilla. Tämän jälkeen pinta on sivelty asfalttipielä, joka on toiminut eristävänä kerroksena kivijalan ja tiiliseinän välissä.

Asfalttia käyttäen on tehty myös pohjavedenpinnan alapuolelle ulottuvia vesipaine-eristettyjä kellaritiloja. Tällöin on sisämuuraus tehty ko-

konaan asfalttia laastina käyttäen, jolloin tiilet ovat kauttaaltaan asfaltin ympäröimiä. Kellareiden lattioita on tehty samalla menetelmällä, vuorottaisilla asfaltti- ja tiili-kerroksilla. Vuosisadan alussa on betonin käyttöönotto muuttanut kellarin lattiarakenteen nykyisen tyyppiseksi, jolloin ensin valetaan alempi betonikerros, sen päälle lasketaan eristysaine ja päällimmäiseksi valetaan raudoitettu betoni.

Vuosisadan alusta alkaen on asfalttitervauksen ohella käytetty muitakin eristämistapoja. Tällainen on ollut mm. bitumiemulsioon sekoittaminen kellarin seinien rappauslaastiin. Vähitellen on siirrytty käyttämään eristys-tyshuopia, joita on ensimmäisen maailmansodan aikoihin ollut käytössä ainakin kolmea eri laatua.

Pohjaa vedenpainetta vastaan eristettäessä on pohjavedenpinta pidetty työn ajan huomattavasti kellarin lattian alapuolella. Ennen lattian rakentamista pohja on salaojitettu huolellisesti ja ojat johdettu rakennuksen ulkopuolella olevaan pumppauskaivoon, josta vesi on pumpattu viemäriin. Kellareiden valmistuttua on pumppaus lopetettu, mutta eräissä tapauksissa vesipaine-eristysten pettäessä pumppaus on aloitettu uudelleen.

3.

PUUN RAKENTEESTA JA OMINAISUUKSISTA

3.1

Puulajeista

Puun maailmankaupassa jaotellaan puulajit usein kahteen ryhmään teknillisten ominaisuuksiensa perusteella. Toiseen ryhmään kuuluvat lauhkean vyöhykkeen havupuut, joiden puusolukko on tiheää, mutta pehmeäköä. Toisen ryhmän muodostavat lähes kaikkialla maapallolla kasvavat lehti-puulajit, esim. tammi ja saarni. Näiden puulajien puuaines on tavallisesti raskaampaa ja kovempaa kuin havupuiden puuaines. Eroja kovuudessa (kulutuskestävyydessä) kuvaa mm. Brinell-kovuus, joka on syiden suunnassa esim. männyllä noin 4 kp/mm² ja tammella 6-7 kp/mm².

Paalumateriaalina on Pohjoismaissa käytetty havupuita, pääasiassa mäntyä (*Pinus sylvestris*). Euroopan puupaaluille rakennetut kaupungit, Venetsia ja Leningrad, on puolestaan perustettu tammi-paaluilla (*Quercus*-lajit). Tässä kirjoituksessa on soveltuvien osin pyritty kiinnittämään huomiota männyn ja tammen ominaisuuksiin ja niiden eroavaisuuksiin.

3.2

Kemiallinen koostumus

Puussa on noin 50 % hiiltä, 6 % vetyä, 43 % happea ja enimmäkseen noin 0,25 % typpeä. Nämä perusalkuaineet muodostavat puun yhdisteet, joita esim. havupuussa on seuraavasti:

selluloosa	noin 60 %	muodostavat puun
hemiselluloosa	12-15 %	solukon rungon

ligniini	26-38 %	toimii sideaineena
----------	---------	--------------------

Lisärakennusaineet, kuten hartsi, rasvat, öljyt, parkkiaineet, fenoli- ja kivennäisaineet	2 -3 %	vaikuttavat puun eräisiin ominaisuuksiin, kuten väriin, hajuun, lahonkestävyyteen jne.
---	--------	--

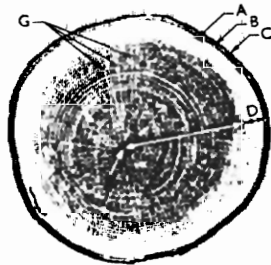
Havupuiden pihka sisältää terpeeneihin (hiilivetyryhmä) liuennutta hartsia. Pihka-aine liukenee hitaasti kylmään veteen ja vanhoissa puupaaluissa sitä ei enää tavata. Selluloosa on veteen liukenematonta, samoin ligniini.

Eräissä puulajeissa (esim. tammen sydänpuussa) runsaasti esiintyvillä parkkiaineilla on merkittävä vaikutus puun lahonkestävyyteen. Parkkiaineiden vaikutuksesta valkuaisaineet saostuvat. Tämä estää lahottajasienten toiminnan, koska lahottajasienet eivät tällöin pysty entsyymeillään (valkuaisainetta) hajoittamaan selluloosaa.

3.3

Puun makroskooppinen rakenne

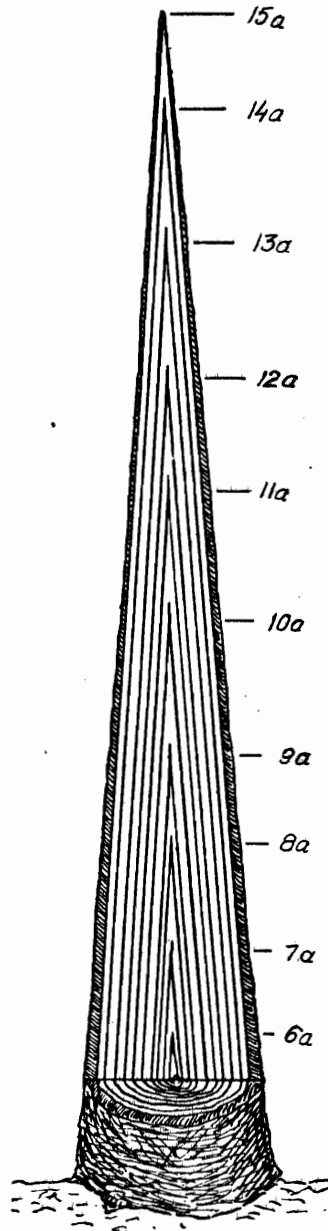
Täysikasvuisen puun poikkileikkauksessa erotetaan seuraavat pääosat: rungon keskustassa on hohkaista kudosta oleva ydin, joka tavallisesti erottuu ympäristöstään tummempana. Ydintä ympäröi puuosa, jonka sisäosa vanhassa rungossa on sydänpuuta ja ulkokehä pintapuuta. Pintapuu on monissa lajeissa vaaleampaa kuin sydänpuu. Puuosaa ympäröi jälsi- eli kambiumkerros, joka on yhden solukerroksen vahvuinen ja johon puuaineksen muodostuminen on keskittynyt. Jälsikerroksen ulkopuolella on kuoriosaa, jossa värin perusteella erotetaan elävä sisäkuori eli nila ja kuollut tumma ulkokuori eli kaarna (kuva 6).



Kuva 6. Rungon poikkileikkaus A = jälsi, B = nila, C = kaarna, D = pintapuu, E = sydänpuu, F = ydin, G = ydinsäteet.

Lauhkean vyöhykkeen puissa voidaan erottaa puun poikkileikkauksessa vuosirenkaat. Renkaan vaaleampi osa on kevätpuuta ja tummempi osa kesä- eli myöhäispuuta. Kesäpuussa solut ovat paksuseinäisiä (vrt. kuva 19 s. 29) ja kesäpuu onkin kevätpuuhun verrattuna mekaanisesti kestävämpää. "Kovemmissa" puulajeissa, esim. tammessa, kevätpuun osuus jää vähäiseksi, koska pääosan kasvukaudesta tammi kasvattaa kesäpuuta eli paksuseinäisiä puusolukkoa. Männyssä on kesäpuun osuus noin 25 %.

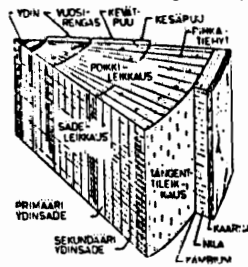
Vuosirenkaiden määrä puussa vähenee latvaan päin. Kevät- ja kesäpuu muodostavat rungossa (kuva 7) tuppeja, jolloin eniten vuosirenkaita löytyy puun tyvestä.



Kuva 7. Kaaviokuva 15-vuotiaan männyn rakenteesta (Henderson).

Vuosirenkaiden lisäksi puun poikkileikkauksessa voidaan nähdä kuoresta ytimeen tai johonkin välikerrokseen ulottuvia ydinsäteitä sekä pystysuoria pihkatiehyitä (havupuut).

Puun rakennetta tutkittaessa käytetään poikkileikkaustason ja sädeleikkaustason lisäksi tangenttileikkausta. Kuvassa 8 on esitetty kaavakuva 4-vuotiaan männyn rungosta, josta ilmenevät kaikki kolme pääleikkaustasoa.



Kuva 8. Kaavio 4-vuotiaan männyn rungonkappaleesta (Rakennustekniikan käsikirja).

Suurin osa puun soluista on järjestynyt rungon ja oksien pituussuuntaan, jota kutsutaan syysuunnaksi. Soluja esiintyy myös säteen suunnassa, pääasiassa ydinsäde- ja pihkatiehytmuodostumissa. Pihkatiehyitä on vain havupuissa.

3.4

Sydän- ja pintapuun ero

Puun sydänosa koostuu kuolleista puusoluista, jotka muodostavat tavallisesti pintapuuta tummemman, lujemman ja lahonkestävämmän sydänpuun.

Solujen kuoleminen tapahtuu niiden ikäännyttyä ja jäädessä vaille huoltoa. Etäisyys puun kasvuun ohjaavaan jälteen kasvaa vähitellen, toimivat pystysuonet kuten pihkatiehyet, jäävät kauemmaksi pintapuuhun. Myös hapen saanti vaikeutuu.

Ennen kuolemistaan solut käyttävät loppuun varavintoaineensa, tärkkelyksen, sokerin jne. Soluissa olevat reiät ja huokoset sulkeutuvat, solut muuttavat väriään ja selluloosakennojen liima-aine ligniini kovettuu. Ennen solujen kuolemista tapahtuu lehtipuissa solukon umpeenkasvamista. Havupuilla tapahtuu hartsi-, rasva- ym. lisärakennusaineiden rikastumista sydänpuuhun. Tammella sydänpuuhun kerääntyy huomattavassa määrin parkkihappoa, tanniinia.

Sydänpuun osuus puussa vaihtelee mm. puulajin, puun iän, kasvunopeuden ja rungon osan mukaan. Etelä-Suomessa alkaa männyssä muodostua sydänpuuta vasta kun puu on noin 50-vuotias. Vanhassa männyssä saattaa sydänpuuta olla 25-50 % läpimitasta eli 10-25 % pinta-alasta.

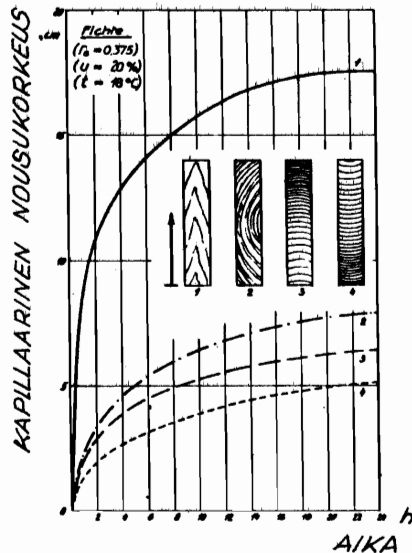
3.5

Puussa oleva vesi

Tuoreessa puussa ovat soluseinämät ja osaksi myös soluontelot veden peitossa. Tällöin voi vesipitoisuus olla havupuun sydänpuussa 30-40 % ja pintapuussa yli 200 % kuivapainosta. Pidettäessä puu-

ta ilmassa, jonka suhteellinen kosteus on 100 %, asettuu puun kosteus noin 27-33 %:iin.

Haller (1942) on tehnyt kokeita (kuva 9) veden kapillaarisesta noususta saksankuusesta sahatuis-
sa laudoissa. Kokeen mukaan olisi syiden suunnas-
sa kapillaarinen nousukorkeus 150-200 mm ja muis-
sa suunnissa noin 50-100 mm.



Kuva 9. Veden kapillaarinen nousukorkeus kuusesta eri suunnissa (Haller).

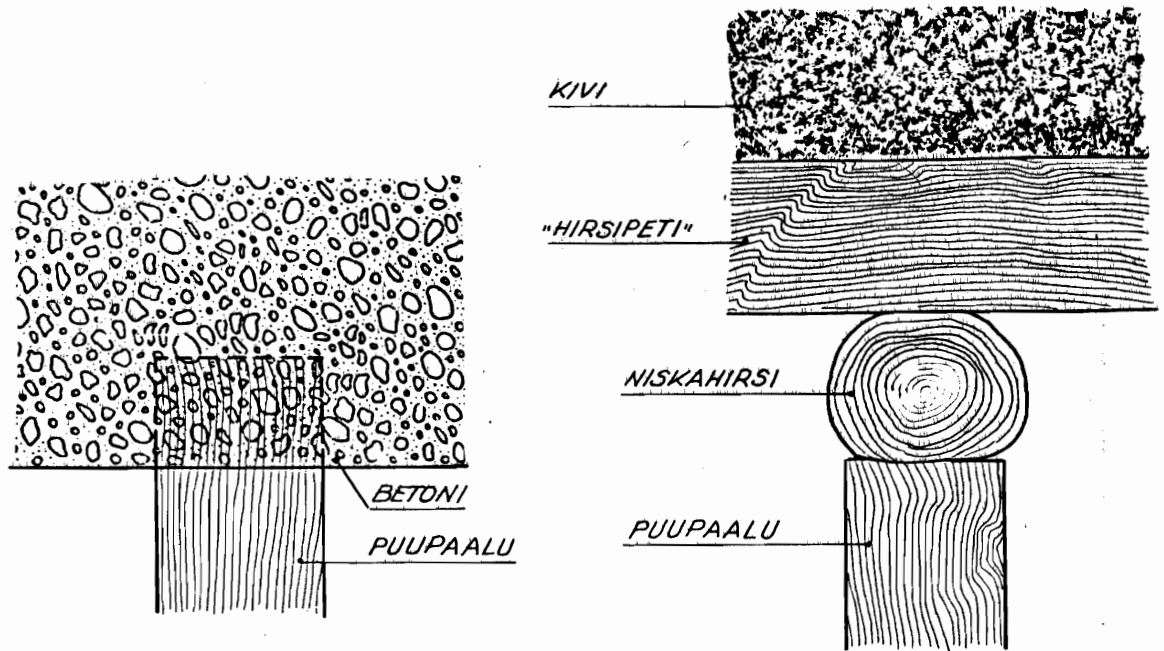
3.6

Lujuus

Puun kuormitustavat perustusrakenteissa

Puun lujuusominaisuudet vaihtelevat mm. vaikuttavan voiman ja syysuunnan välisen kulman mukaan. Puisissa perustusrakenteissa esiintyy syysuuntaan nähden lähinnä kaksi kuormitustapausta: puristusjännitys paaluissa syiden suunnassa ja puristusjännitys arinarakenteissa säteen suunnassa (kuva 10). Eräissä tapauksissa on tosin rakennettu levennettyjä arinarakenteita, joissa puu saa myös taivutusjännityksiä. Tässä esityksessä rajoitetaan tarkastelemaan vain kahta ensinmainittua kuormitustapausta.

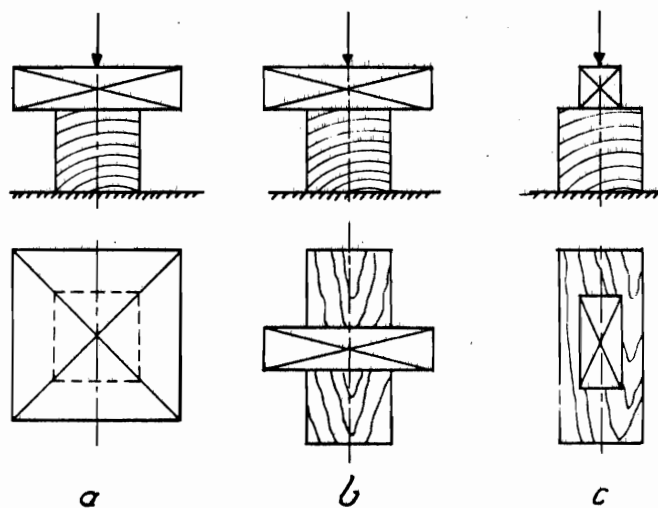
Arinarakenteessa vaihtelee vaikuttavan voiman suunta verrattuna syyn suuntaan poikkileikkauksen eri osissa. Puuaineksen puristuslujuuden mitaustulokset perustuvat laboratoriokokeisiin, joissa on kuormitettu pieniä koekappaleita. Tällaisia koekappaleita käytettäessä on syyn ja pu-



Kuva 10. Kuormitustapauksia perustusrakenteissa.

ristusjännityksen suunta voitu valita tarkasti, jolloin lujuustuloksetkin on ilmoitettu syysuunnan funktiona. Pyöreän puun puristuslujuus poikileikkaussuunnassa on ilmeisesti samaa suuruusluokkaa kuin laboratoriokokeiden tulokset säteen tai tangentin suunnassa.

Syitä vastaan kohtisuora puristus voi rasittaa puuta eri tavoin (kuva 11). Arinarakenteissa on puristustavan muotona lähinnä kiskopuristus.



Kuva 11. Syitä vastaan kohtisuoran puristuksen eri muodot a) kokonaispuristus, b) kiskopuristus, c) leimapuristus (Siimes-Liiri).

Puuaineksen lujuus laboratoriotutkimusten mukaan

Puuaineksen lujuusominaisuudet vaihtelevat mm. puulajin, puun iän, rungon osan, vikaisuuden ja kosteuden mukaan. Kuten edellä todettiin, lujuus riippuu edelleen puuhun vaikuttavan voiman ja puun syiden välisestä kulmasta. Suurin lujuus saavutetaan voiman vaikuttaessa syiden suunnassa.

Puu on kuivana varsin luja materiaali. Jos verrataan puun ja muiden rakennusmateriaalien, kuten teräksen, alumiinin ja betonin lujuusominaisuuksia ottamalla huomioon tilavuuspainoerot, voidaan todeta, että puulla on esim. suurin taivutuslujuus. Vetolujuudessa puulla ja metalleilla on suunnilleen samat arvot, mutta leikkaus- ja puristuslujuudessa puu jää muita mainittuja aineita huonommaksi.

Laboratoriotutkimuksia suomalaisen männyn lujuudesta laajalla aineistolla ovat suorittaneet F.E. Siimes ja Osmo Liiri (VTT tiedotus 103, 1952). Seuraavassa esitettävät lujuustiedot perustuvat heidän tutkimusaineistoonsa, josta yhteenveto on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Laboratoriotutkimukset antavat lyhytaikaisten kuormitusten mukaisia lujuusarvoja, eikä niitä sellaisenaan voida käyttää rakenteiden lujuuslaskelmissa.

Kuvassa 12 on esitetty etelä-suomalaisen männyn murtolujuuksia puuta syiden suunnassa kuormitettaessa. Puun solukon tiiveys vaikuttaa tilavuuspainoon ja edelleen lujuuteen. Suurin osa murtolujuuksista (93 %) on yli 30 MN/m^2 . Murtolujuuden keskiarvo on 39 MN/m^2 . Puun kosteus on kokeissa ollut 15 % kuivapainosta.

Syyn suuntainen puristuslujuus pienenee voimakkaasti vesipitoisuuden kasvaessa muutamasta %:sta 30 %:iin (kuva 13). Vesipitoisuuden noustessa ns. kyllästyspisteen yläpuolelle, ei lujuus enää vähene.

Puuta syitä vastaan kohtisuoraan puristettaessa ei voida puhua murtolujuudesta ja maksimijännityksestä. Kuormitusta voidaan jatkuvasti lisätä puun puristuessa kokoon. Yleensä annetaankin tässä kuormitustapauksessa vain jännityksen arvo suhteellisuusrajalla ja kimmomodulin arvo.

Taulukko 1. Eri lujuusominaisuuksien keskiarvot
(Siimes-Liiri).

Lujuusominaisuus	Murtolujuus (σ_{max}) MN/m ²			Jännitys suht. rajalla (σ_{st}) MN/m ²			Kimmomoduli (E) MN/m ²		
	Etelä-Suomi	Pohj.-Suomi	Koko Suomi	Etelä-Suomi	Pohj.-Suomi	Koko Suomi	Etelä-Suomi	Pohj.-Suomi	Koko Suomi
Veto "	76.5	78.0	76.9						
Puristus "	39.0	37.3	38.5						
Puristus I				4.0	4.2	4.1	383.0	392.0	385.0
Taivutus	71.5	65.7	70.0	40.3	36.9	39.5	12300.0	10700.0	11900.0
Leikkaus	9.0	9.3	9.1						
Kovuus R	25.0	23.1	24.4						
" T	28.8	25.4	27.8						
" P	32.2	31.7	32.0						

" = syiden suuntaan

I = kohtisuoraan syiden vastaan

D = vinosti vuosisuoihin nähden

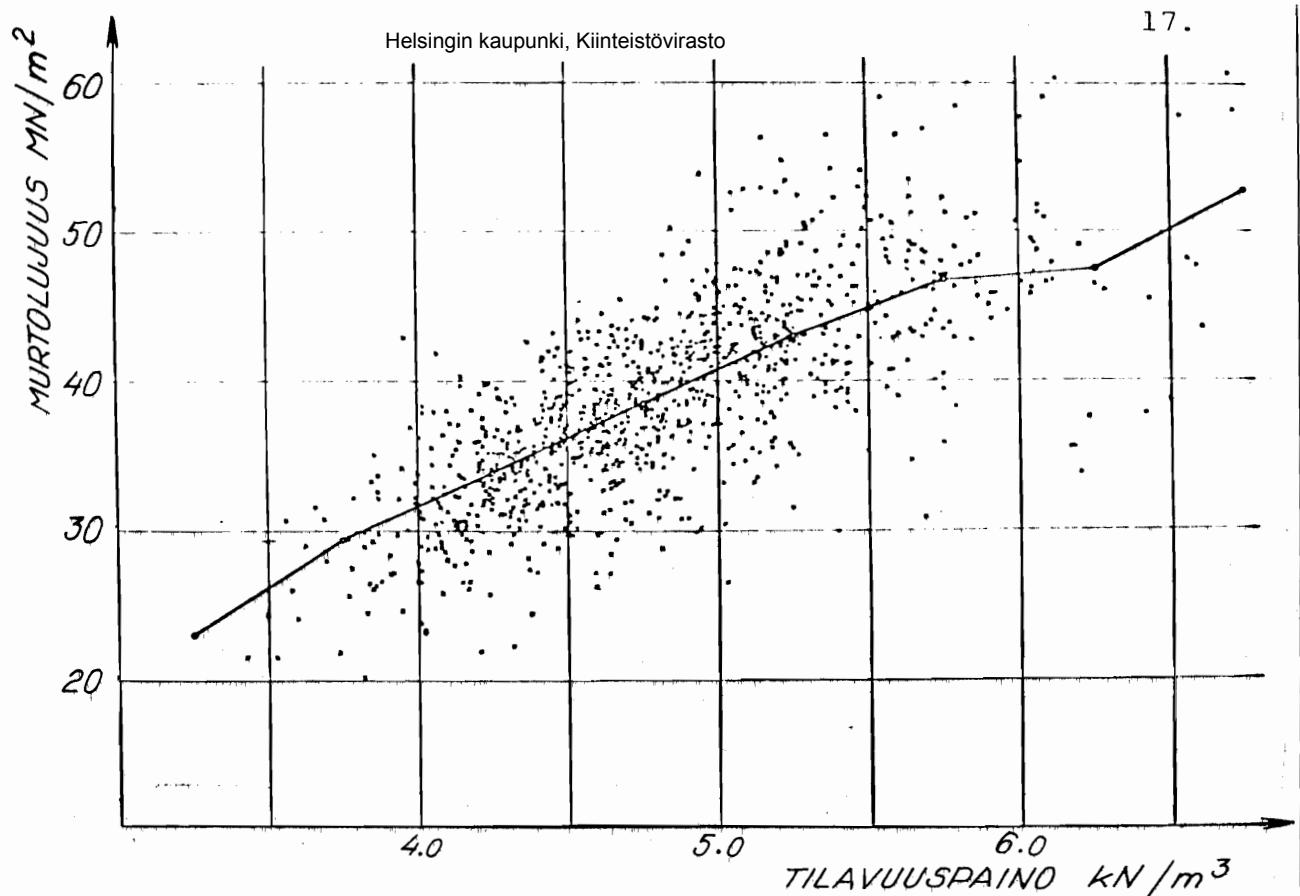
R = säteen suuntainen pinta

T = vuosisuon suuntainen pinta

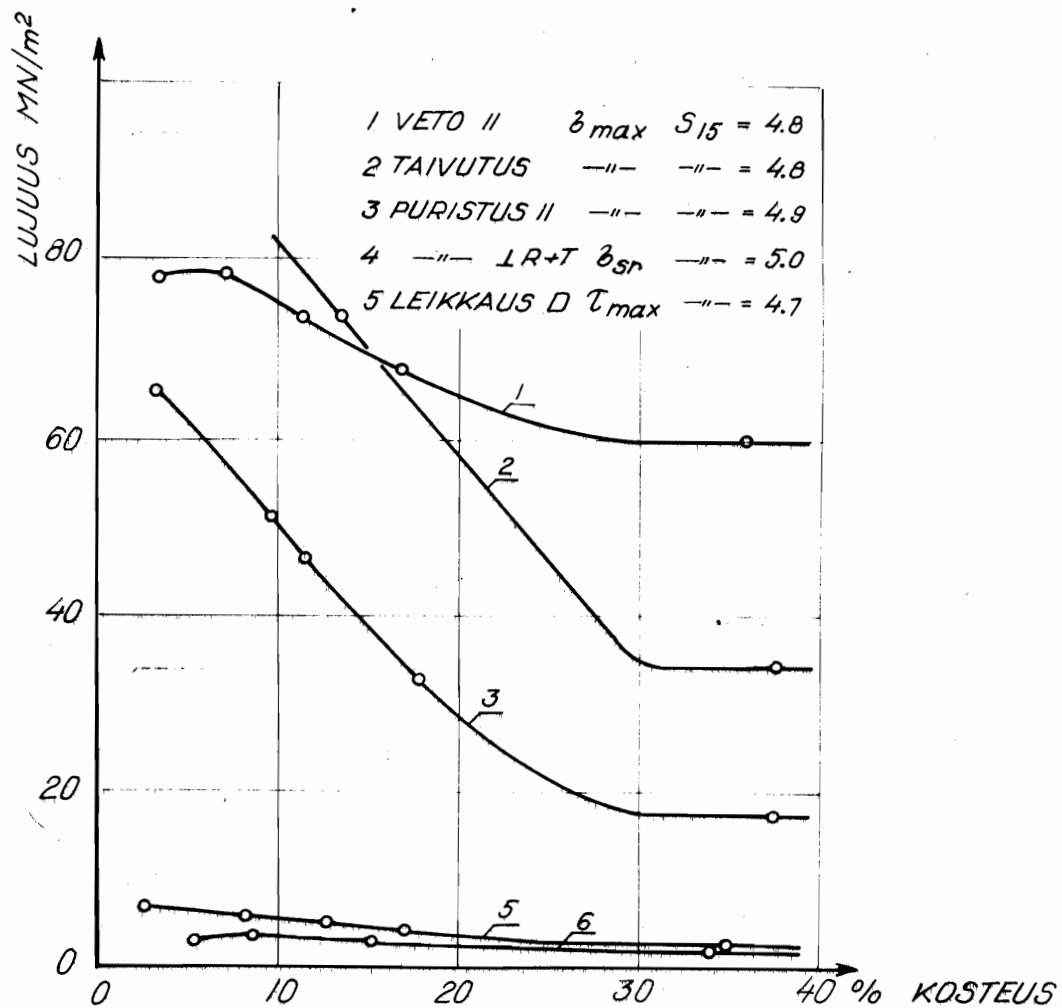
P = pinnipinta

Taulukko 2. Tilastolliset tunnusluvut eri lujuusominaisuuksien jakautumiselle. Koko Suomi (Siimes-Liiri).

Lujuusominaisuus	Murtolujuus MN/m ²				Jännitys suht. rajalla MN/m ²				Kimmomoduli MN/m ²			
	Keski-määr. poikk.	Hajonta	Virhe %	Keski-arvon keski-virhe	Keski-määr. poikk.	Hajonta	Virhe %	Keski-arvon keski-virhe	Keski-määr. poikk.	Hajonta	Virhe %	Keski-arvon keski-virhe
Veto	16.8	21.2	-0.19	0.70								
Puristus "	5.15	6.53	-1.08	0.18								
Puristus D					0.68	0.83	-0.11	0.04	83.2	108.0	-0.96	5.41
Taivutus	10.5	13.4	-0.27	0.38	7.64	9.51	-1.57	0.27	2160.0	2680.0	-0.31	75.9
Leikkaus R	1.21	1.52	-0.13	0.05								
Kovuus R+T	4.18	5.26	+0.23	0.19								
Kovuus P	3.57	4.95	+1.29	0.18								



Kuva 12. Männyn puristuslujuus syiden suunnassa. Koeaineisto Etelä-Suomesta, yhteensä 973 koetulosta. Vesipitoisuus 15 % (Siimes-Liiri).



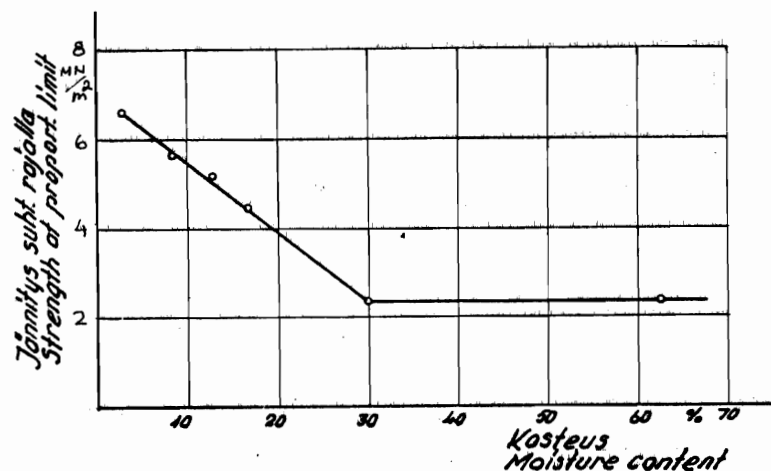
Kuva 13. Kosteuden vaikutus männyn lujuusominaisuuksiin (Siimes-Liiri).

Taulukossa 3 on annettu em. lujuusarvoja puristettaessa koekappaleita kiskopuristuksena poikkileikkauksen kolmessa suunnassa. Puristusjännitykset suhteellisuusrajalla ovat noin $3-4 \text{ MN/m}^2$.

Taulukko 3. Vuosilustojen suunnan vaikutus kiskopuristuslujuuteen. Kosteus 15 %.

Puristus-suunta	$\sigma_{sr} \text{ MN/m}^2$	$E \text{ MN/m}^2$	$s_{15} \text{ kN/m}^3$
Säteen suunta R	4.40	799.0	4.80
Vuosiluston suunta T	4.10	378.0	4.97
Vino suunta ($n. 45^\circ$ kulm.) D	2.80	226.0	4.99

Kuvassa 14 on esitetty kosteuden vaikutus kiskopuristuslujuuteen. Jännitys suhteellisuusrajalla laskee lähelle arvoa 2 MN/m^2 (Siimes-Liiri).



Kuva 14. Kosteuden vaikutus männyn kiskopuristuslujuuteen R + T. $s_{15} = 0,50$ (Siimes-Liiri).

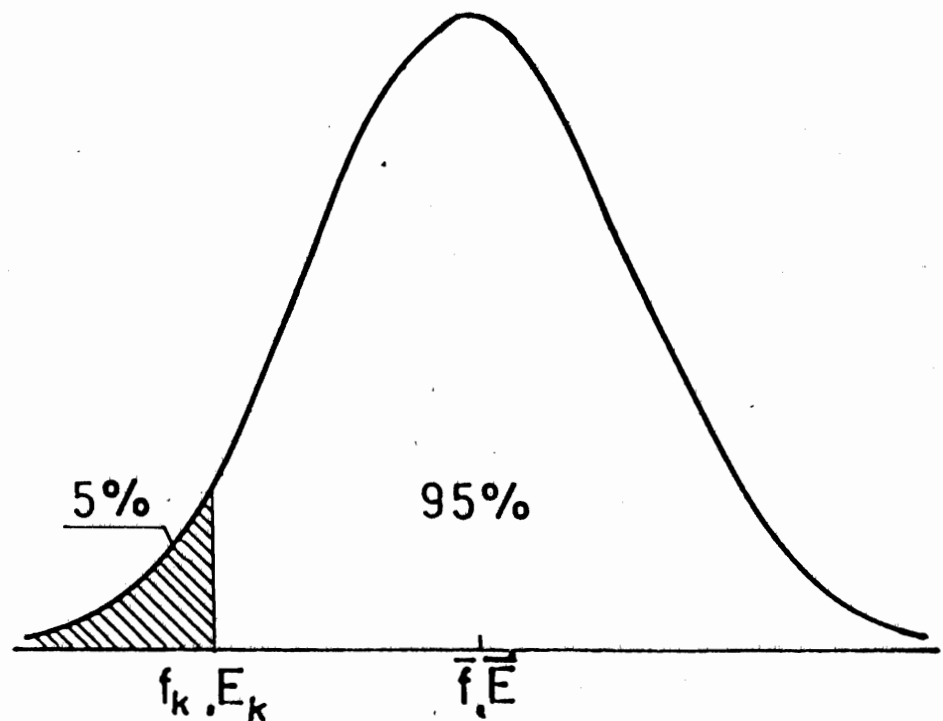
Yhteenvetona männyn puristuslujuudesta laboratorio-tutkimusten perusteella voidaan todeta, että a) vedessä olevan puun lujuus on kuivan puun lujuutta huomattavasti alhaisempi, b) puristuslujuus syiden suunnassa on märeille puulle noin $15-20 \text{ MN/m}^2$ ja c) säteen suunnassa puristusjännitys suhteellisuusrajalla on märeille puulle kiskopuristuksessa noin 2 MN/m^2 .

Puurakenteiden suunnitteluohjeet

Sisäasiainministeriön rakentamismääräyskokoelman osassa B 10 on annettu ohjeet kantavien rakenteiden suunnittelulle puusta tai puujalosteista (lastulevyt, vanerit jne.). Ohjeiden mukaan suunnittelussa on huomioitava ainakin puurakenteen käyttökohde, kuormitus aika ja kosteus.

Ohjeissa pyöreä puutavara kuuluu luokkaan T 30. Kuorman aikaluokka on perustusrakenteessa A eli pitkäaikainen. Kosteusluokka on 4 eli märkä (puu on veden välittömän vaikutuksen alaisena).

Rakenteen kantavuutta määritettäessä käytetään puuaineksen ominaislujuuksia ja ominaiskimmomoduleja. Ominaislujuudet ovat arvoja, jotka puumateriaali täyttää 95-prosenttisesti (kuva 15). Muodonmuutoksia laskettaessa käytetään kimmomoduulien keskiarvoja. Murtorajatilatarkastelua varten saadaan laskenta-arvot jakamalla ominaislujuudet ja -kimmomodulit puumateriaalin osavarmuuskertoimella 1.3.



Kuva 15. Ominaislujuuden (f_k) ja -kimmomoduulin (E_k) sekä keskimääräisen kimmomoduulin (E_k) määrittäminen teoreettisesta jakaumasta (Kortesmaa).

Taulukossa 4 on esitetty ominaislujuudet ja -kimmomodulit sahatavaralle ja taulukossa 5 tarvittavat korjauskertoimet. Taulukossa esiintyvä f_{ck} on ominaispuristuslujuus syyn suuntaan ja f_{ctk} ominaispuristuslujuus kohtisuoraan syyn suuntaa vastaan.

Taulukko 4. Sahatavaran ominaislujuudet ja -kimmomodulit sekä keskimääräiset kimmodulit aikaluokassa B ja kosteusluokassa 1. Yksikkö MN/m².

Lujuusluokka		T40	T30 (S 10)	T24 (S 8)	T18 (S 6)
<u>Lujuuksia laskettaessa</u>					
Taivutus	f_{bk}	29	22	18	13
Puristus	f_{ck}	28	21	17	12
Puristus	$f_{c\perp k}$	5	5	5	5
Veto	f_{tk}	19	14	12	6
Veto	$f_{t\perp k}$	0,4	0,4	0,4	0,4
Leikkaus	f_{vk}	2	2	2	2
Leikkaus	$f_{v\perp k}$	1	1	1	1
Kimmomoduli	E_k	7 000	5 500	4 500	3 300
Liukumoduuli	E_k $G_k = \frac{E_k}{20}$				
<u>Muodonmuutoksia laskettaessa</u>					
Kimmomoduli	$\bar{E}$	8 500	7 000	5 500	5 000
Kimmomoduli	$\bar{E}_\perp$	280	230	180	160
Liukumoduuli	$\bar{G}$	560	460	360	340

Taulukko 5. Korjauskertoimet eri aika- ja kosteusluokkayhdistelmille aikaluokan B ja kosteusluokan 1 suhteen.

Aika- luokka	Kosteus- luokka			Lujuuksia laskettaessa			
	1 ja 2	3	4	1	2	3	4
A	0,8	0,65	0,6	0,8	0,7	0,6	0,35
B	1	0,85	0,75	1	1	0,8	0,6
C	1,3	1	0,9	1,3	1,3	1	0,8

Taulukossa 4 on ominaispuristuslujuus pyöreälle puutavaralle (T 30) syiden suunnassa 21 MN/m². Käyttäen korjauskertoimena 0,6 (aikaluokka A, kosteusluokka 4) saadaan vedessä olevan pyöreän puun ominaispuristuslujuudeksi 12,6 MN/m². Laskenta-arvioksi saadaan 9,7 MN/m². Jos tarkastellaan rakenteellista lujuutta, on puristusjännitys 9,7 MN/m² täten maksimiarvo, joka puupaalulle sisäasiainministeriön ohjeiden mukaan voidaan sallia.

Ominaispuristuslujuudeksi (jännitys suhteellisuusrajalla) syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa

saadaan $1,8 \text{ MN/m}^2$ ja laskentalujuudeksi $1,3 \text{ MN/m}^2$.

Puurakenteiden suunnitteluohjeissa annetuissa ominaislujuuksista voidaan yhteenvetona todeta, että käytettäessä materiaalille varmuuskerrointa $1,3$ ovat ominaispuristuslujuuden laskentavot pystypaalulle $9,7 \text{ MN/m}^2$ ja arinahirrelle kiskopuristuksessa $1,3 \text{ MN/m}^2$. Nämä ovat samalla arvoja, joita laskentakuormien jännitykset eivät saa ylittää.

4.

PUUN LAHOAMINEN

4.1

Yleistä

Puun tai muun orgaanisen aineksen mikrobiologista hajoamista on tutkittu paljon. Kun on kuitenkin kyseessä maahan ja veteen upotettujen puupaalujen lahoaminen, on perustutkimustietoa vähän saatavissa. Suomalaista perustutkimusta ei tällä alueella ole suoritettu.

Helsingin keskustassa on useassa eri kohteessa tehty havaintoja puuperustuksista mm. perustusten vahvistustöiden yhteydessä. Samoin puuperustuksista on saatu tietoja koekuopista, joita on kaivettu paalujen tason ja kunnon selvittämistä varten. Näissä tutkimuksissa on lähes aina todettu ainakin vähäistä lahoamista paaluissa. Helsingissä tehdyistä havainnoista on kerrottu kohdassa 4.3.

Ruotsissa on pohjavesikysymyksiä selvitelty vuosina 1966-1973 tutkimusryhmä STEGA, jossa oli mm. rakennusteknillistä, geologista, hydrologista ja mikrobiologista asiantuntemusta. Ryhmän työstä on julkaistu raportti "Grundvatten och byggande". Ryhmä otti lahoamistutkimuksia varten näytteitä seitsemästä vaurioituneesta puuperustuksesta ja tutki erityisesti bakteerien osuutta paalujen hajoamiseen. Myös paaluja ympäröivän maan ja pohjaveden ominaisuuksia analysoitiin ympäristön vaikutuksen selvittämiseksi. Ruotsalaisten tutkimus lienee alallaan laajin ja sen tuloksia on selostettu kohdassa 4.4.

Venetsiassa ja Leningradissa on suuri joukko taloja säilynyt puupaaluilla satoja vuosia. Paalut ovat tammea, jolloin herää kysymys eri puulajien eroista lahonkestävyydessä. Sveitsiläinen Oskar Wälchli on tehnyt laboratoriossa eri puulajeilla lahoamiskokeita, joissa on tullut esiin tammen sydänpuun erinomainen lahonkestävyys. Näiden koekes-
keiden tuloksia on selostettu kohdassa 4.5.

4.2

Lahoamistapahtuma

Puun lahottajina toimivat lahottajasienet. Ne eivät ole lajina mitenkään yhtenäinen ryhmä, vaan

lahottajasieniä on kaikissa sienien alajaksoissa. Lahottajasienille on yhteistä vain elintapa. Ne ovat erikoistuneet kasvamaan puussa ja käyttämään ravinnokseen sen pääaineosia selluloosaa ja ligniiniä.

Sienet tuottavat itiöitä, jotka liikkuvat veden ja tuulen mukana ja niitä on käytännöllisesti katsoen kaikkialla. Itiöt voivat kestää tuhoutumatta ankarissakin olosuhteissa. Olosuhteiden parannuttua alkaa itiö toimia, solut jakautua ja sienirihmaston kasvaminen voi alkaa. Myös eräät rihmaston osat voivat säilyä ankarienkin olosuhteiden yli.

Sienirihmastot tarvitsevat happea kasvaakseen. Yleensä ne eivät voi käyttää hyväkseen veteen liuonnutta happea, ja rihmasto ei voi kasvaa veden alla.

Useimmilla lahottajasienillä on kyky kuljettaa vettä ja ravintoaineita rihmastossa pitkiäkin matkoja. Kuljetuskyky on todettu mm. merkkiainekoikeilla. Tarvitsemaansa vettä sieni saa myös hajottamalla puun selluloosaa. Puun ja myös muuta ulkopuolista ainetta sienet hajottavat erittämällä entsyymeillä.

Sienillä on myös eri tapoja edetä puussa sitä lahottaessaan. Esim. kätkolahottajasieni etenee syvällekin puuhun säteen suunnassa ja sitten vuosienkaan suunnassa.

Bakteerien osuus puun lahoamisessa on epäselvä. Tässä yhteydessä voidaan viitata vain ruotsalaisiin tutkimustuloksiin (kohta 4.4).

4.3

Havaintoja Helsingin keskustan puuperustuksista

Useimmissa Helsingin keskustan puupaalutetuissa rakennuksissa ovat paalut päässeet osittain tai kokonaan lahoamaan ajoittain alhaalla olleen pohjavedenpinnan johdosta. Pohjavedenpinta on aina työnaikaisesti alentunut uusia taloja rakennettaessa jo viime vuosisadalta lähtien (vrt. kohta 2.4). Vasta viime vuosina on Helsingissä rakennettu pohjavedenpinnan havaintoverkosto ja estetty avonainen pohjaveden pumppaus kallereiden rakennustöiden yhteydessä.

Perustusten vahvistus- tai kuntotutkimusten yhteydessä on puun kuntoa tutkittu tavallisesti otta-

malla puusta näytteitä kasvunäytekairalla ja tutkimalla näytteitä silmävaraisesti. Parin viime vuoden aikana on näytteitä tutkittu mikroskooppisesti VTT:n puutavaralaboratorion puunsuojausjaostolla.

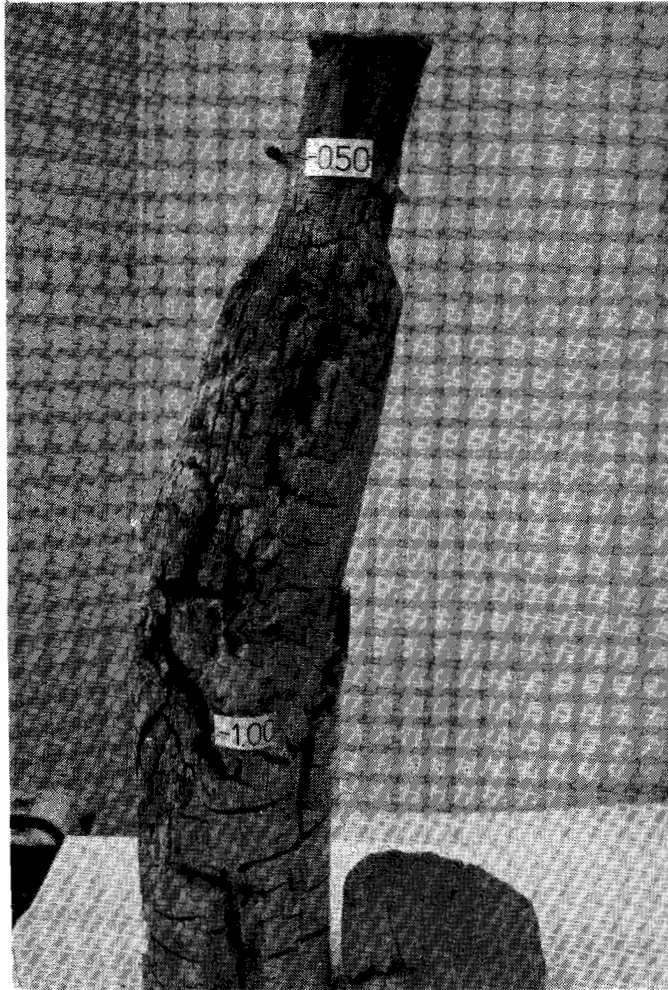
Lahoamistutkimusten perusteella voidaan hahmotella kuva paalujen kunnosta Kluuvin lahden alueella. Alueella maanpinta on noin 2 - 4 m merenpintaa ylempänä ja pohjavesi lähellä merivedenpinnan tasoa. Huonoimmassa kunnossa ovat vanhimpien lahden reunoille rakennettujen talojen perustukset, jotka on jätetty usein lähelle 0-tasoa. Lahden keskelle myöhemmin rakennetuissa taloissa paalut ovat paremmassa kunnossa, koska niiden yläpäätt ovat syvemmällä tasossa -1 - -2.

Kuvassa 16 on erään Hallituskadun rakennuksen perustuksista kaivettu paalun pää. Rakennus oli pahoin painunut ennen perustusten vahvistamista v. 1978. Paalussa on yläosa noin tasolla -0,6 lahonnut niin, että vain sydänpuu on jäljellä. Tasovälillä 0,6 - -1,0 on paalu suurimmaksi osaksi lahonnut. Tason -1 alapuolelta on suurin osa paalusta vielä kantavaa.

Kuvassa 17 on graafisesti esitetty paalujen lahonneisuusaste kolmen rakennuksen perustuksista tehtyjen tutkimusten mukaan. Rakennukset ovat Hallituskadun ja Aleksanterinkadun varrella. Mustattu alue merkitsee lahonneen puun osuutta poikkipinta-alasta prosentteina. Vuonna 1903 rakennetussa talossa on lahoamatonta paalua jäljellä enintään 40 % poikkipinta-alasta. Vuonna 1907 rakennetussa talossa on paalujen poikkipinta-alasta lahoamatonta puuta 60-70 %. Vuonna 1911 rakennetussa talossa on lahoamatonta paalua vähintään 60 % poikkipinta-alasta, keskimäärin ehkä 70-80 %.

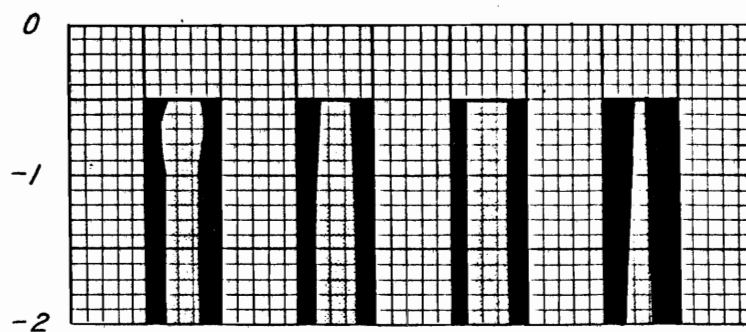
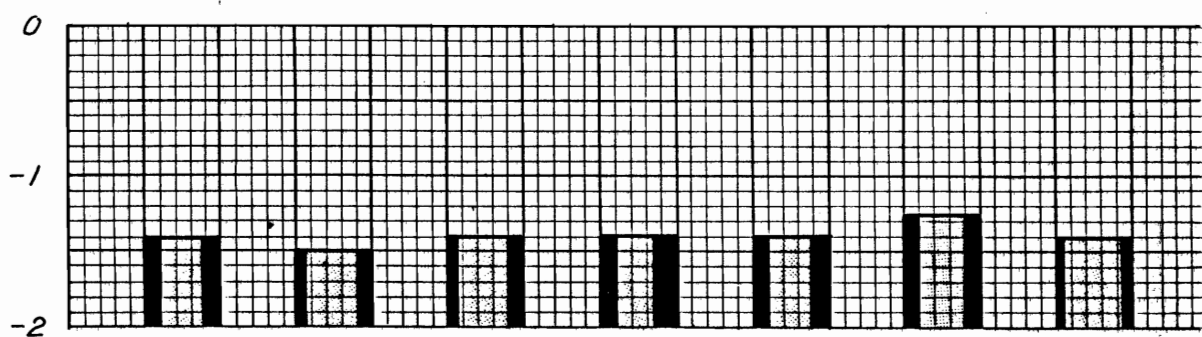
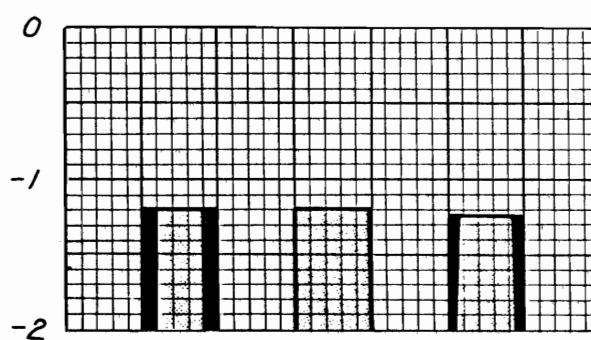
Kaivokadun-Kaisaniemenkadun pohjoispuolella ovat paalut säilyneet paremmassa kunnossa kuin Aleksanterinkadulla. Kuvassa 18 on esitetty erään rautatien varrella olevan rakennuksen paalun pää lahonneisuusluokkiin jaettuna mikroskooppitutkimusten perusteella.

VTT:n tutkimuksissa on lahotyyppin perusteella voitu todeta eräissä tapauksissa lahoamisen olleen tyyppiltään katkolahoa. Lahonneesta puusta on tavattu sienirihmastoja ja lähes poikkeuksetta puun pintaosasta myös runsaasti bakteereita. Esim. kuvan 18 paalussa puun pintaosan solut olivat syöpyneet ta-

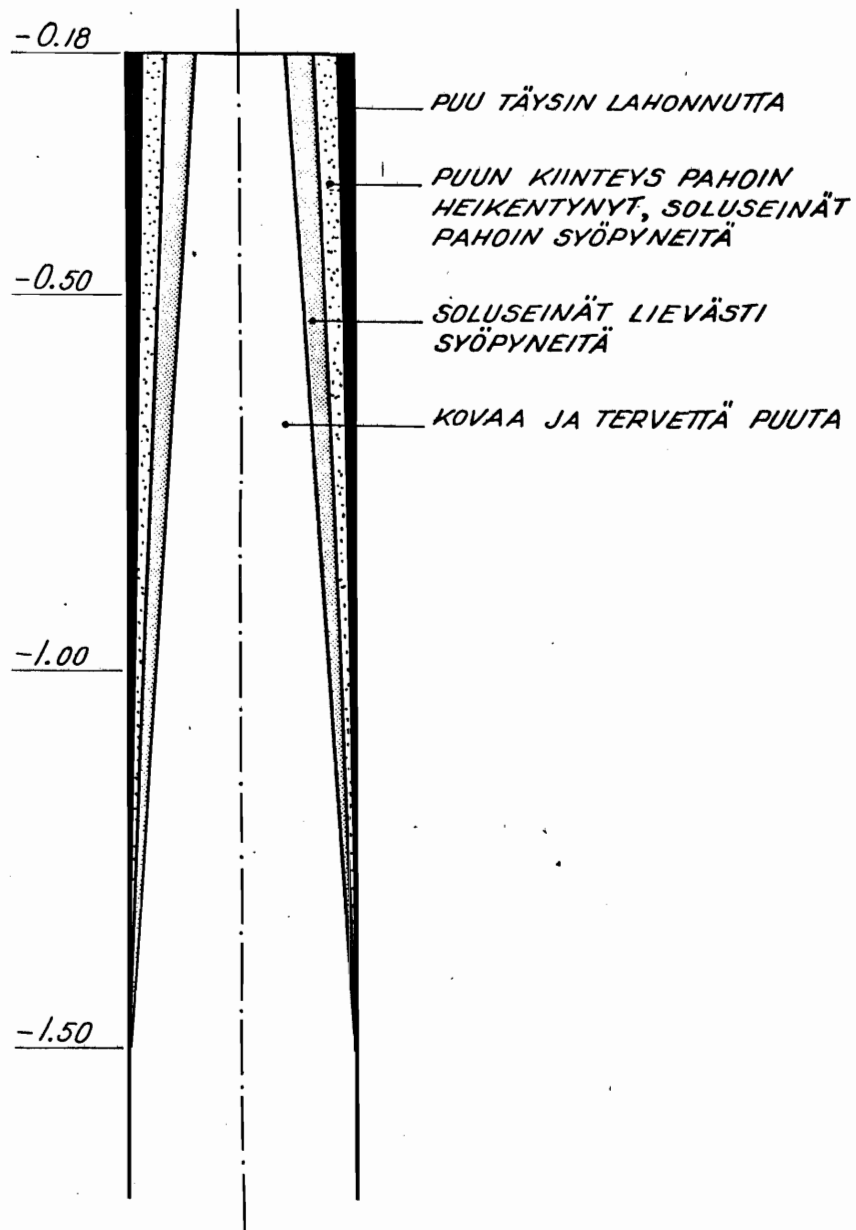


Kuva 16. Lahonnut paalun pää.

soväliltä -2,2 - -2,5 voimakkaasti 20 mm:n syvyyteen ja lievemmin 40 mm:n syvyyteen, mutta bakteereita tavattiin vielä 70 mm:n syvyydestä.

*HALLITUSKATU**RAK. v. 1903**ALEKSANTERINKATU**RAK. v. 1907**HALLITUSKATU**RAK. v. 1911*

Kuva 17. Lahonneen puun osuus paalun poikkipinta-alasta (mustattuna).



Kuva 18. Leikkauskuva eri asteisen lahonneisuuden etenemisestä paaluissa.

4.4

STEGA-ryhmän tutkimukset puun mikrobiologisesta hajaantumisestaTutkimuksen tarkoitus

Ryhmä halusi etsiä vastausta kysymykseen, voivatko puuperustukset hajota myös pohjavedenpinnan alla. Tähän oli viitannut mm. se, että puututkimusten mukaan Tukholmassa valtiopäivätalon ja Oopperan rakennusten puupaalujen lujuus oli heikentynyt, vaikka niiden (meren rannalla) on täytynyt olla rakennusten valmistumisesta lähtien veden alla. Koska lahoattajasienet eivät elä vedessä, haluttiin tutkia bakteerien kykyä hajottaa puuta. Bakteereista osa (anaerobiset) elää myös vedessä.

Tutkimuksessa haluttiin selvittää myös paaluja ympäröivän maaperän ja pohjaveden laadun vaikutusta lahoamiseen. Tätä tarkoitusta varten tutkittiin puun lisäksi kemiallisesti ja mikrobiologisesti myös joukko maa- ja pohjavesinäytteitä.

Tutkimuskohteet

Ryhmä keräsi näytteitä seitsemästä vaurioituneesta puuperustuksesta Tukholmasta ja Göteborgista. Tutkitut näytteet olivat näytteenottohetkellä pohjavedenpinnan alapuolella. Näytteitä koskevia tietoja on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Puunäytteiden ottokohteet
(Lindskoug-Nilsson).

Koodi	Paikka	Syvyys m ¹⁾	Perustus- tyyppi	Puu- laji	Halkaisija m	Ikä v. noin	Maa- tyyppi
G 1	Göteborg (Vasaplatsen)	0,4	arina	kuusi	0,14	70	savi
G 2	Göteborg (Nordhemsg- Plantageg.)	0,6	paalu	mänty	0,20	70	savi
G 3	Göteborg (Östra Hamng.)	noin 1,1	paalu	mänty	0,28	noin 40 tai 50	savi
G 4	Göteborg (Nils Eric- sonsg.)	4-8	paalu	kuusi	noin 0,2	70	savi
S 1	Stockholm (Sigtunag.)	0,6	paalu	mänty	noin 0,2	70	savi ja täytemaa
S 2	Stockholm (Skeppsbron)	0,6 ²⁾	arina	mänty	0,12	300	täytemaa
S 3	Stockholm (Tegelbacken)	noin 0,7	paalu	mänty	noin 0,2-0,3	70	täytemaa

1) Syvyytenä on pidetty etäisyyttä pohjavedenpinnasta näytteenottohetkellä

2) 0,2 m alle alimman mitatun merivedenpinnan tason

Tutkimukset

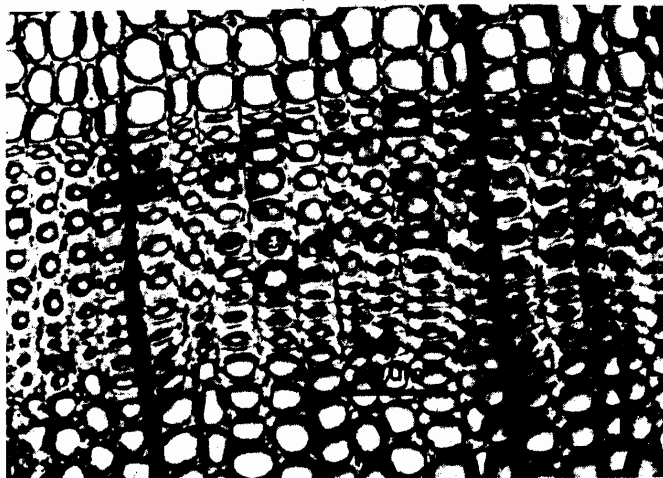
Puu-, maa- ja vesinäytteistä tehtiin lisäksi lujuus- ja tiheysmääritykset, silmävaraiset havainnot ja joukko mikroskooppisia ja mikrobiologisia tutkimuksia.

Näytteiden kunto silmävaraisesti arvioituna

Kaikissa näytteissä oli puun pintaosa tummunut ja heikentynyt 5-40 mm matkalta. Sydänpuussa ei näkynyt heikentymistä.

Mikroskooppiset tutkimukset

Tummuneista ja maansekaisista puiden pintaosista tavattiin eri sienilajeja. Mikroskoopissa voitiin todeta puun hajoamista tapahtuneen erityisesti kesäpuussa (vuosirenkaan tumma osa) ja ydinsäteiden kohdalla (kuva 19).



Kuva 19. Mikroskooppikuva puunäytteestä poikkileikkaustasossa. Lahoaminen on edennyt voimakkaammin soluseinämien syöpymisenä ydinsäteiden suunnassa ja pienilokeroissa syyspuussa (Sigtunagatan 4, S 1).

Elektronimikroskooppiset tutkimukset

Elektronimikroskooppisia tutkimuksia varten eristettiin näytepuusta bakteerikantoja ja istutettiin niitä steriileihin mäntynäytteisiin. Näytteet olivat suljetussa tilassa vuoden, jolloin kammioissa oli 90 % typpeä ja 10 % hiilidioksidia.

Vuoden jälkeen tehdyissä mikroskooppitutkimuksissa todettiin, että huokoskalvot olivat hajoanneita. Varmuudella ei kuitenkaan voitu todeta hajoamista soluseinämissä.

Mikrobiologiset tutkimukset

Mikrobiologisissa tutkimuksissa eristettiin puunäytteistä mikro-organismeja ja tehtiin niiden lajimääritykset. Näytteestä G 4, joka oli otettu savesta ylös vedetystä paalusta, löytyi mikro-organismeja vain paalun pinnalta joidenkin millimetrien syvyydeltä. Muista näytteistä bakteereja tavattiin syvemmältä, ei kuitenkaan sydänpuusta. Kuvassa 20 on esitetty kolmesta puunäytteestä tavatut mikro-organismit.

Lujuustutkimukset

Keskimääräiset puristuslujuudet syiden suunnassa olivat kahdessa huonoimmassa näytteessä 3,9 ja 9,3 MN/m² sekä kahdessa paremmassa näytteessä 16,0 ja 17,4 MN/m².

Ympäristöanalyysit

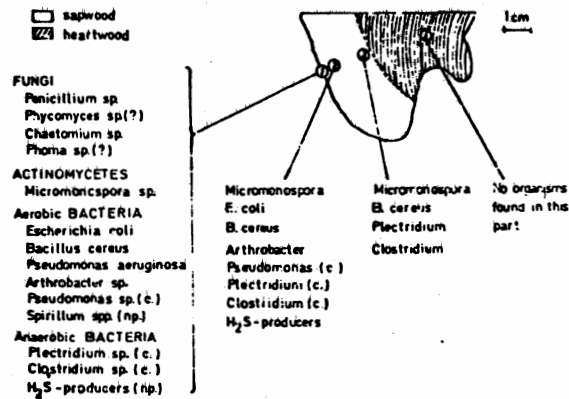
Suhteellisen korkeat tyyppi- ja fosforipitoisuudet sekä kolibakteerien suuri määrä osoitti, että pohjavesi yleensä oli saastunutta. Puunäytteissä tyyppi- ja fosforipitoisuus oli suurin pintaosassa ja väheni asteittain pinta- ja sydänpuun rajalle.

Johtopäätöksiä

Puun hajoaminen tutkituissa näytteissä on tapahtunut useista syistä. Pintaosissa on lahoamisen aiheuttanut homesieni ja syvemmällä puun heikentymisen puuta hajottavat bakteerit. Ilmeistä on, että pohjavedenpinta on useassa tapauksessa ollut tutkittujen näytteiden kohdalla ajoittain nykyistä alempana ja pintaosien lahoaminen paaluissa on tulkittava 'normaaliksi' lahoamiseksi.

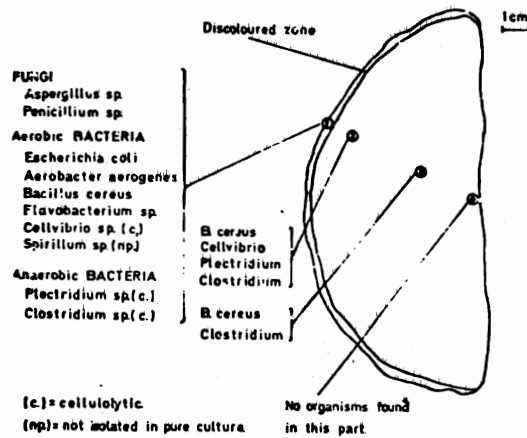
Tutkimustulosten perusteella ei voida löytää selvää yhteyttä kemiallisten ympäristötekijöiden ja lahoamisen välille. Odotettavissa on, että typen ja fosforin lisääntyminen sekä yleensä pohjaveden likaantuminen edistävät mikrobiologista hajoamista. Saven sisässä puun todettiin säilyvän paremmin kuin huokoisessa täytemaassa.

Bakteeriviljelmillä voitiin todeta solukalvon hajoamista vain pintapuussa, mutta voidaan olettaa, että hajoamista tapahtuisi pitkällä aikavälillä myös soluseinämissä.



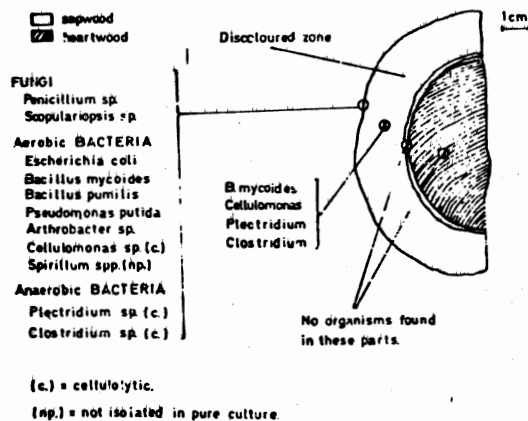
(c.) = cellulolytic.

(np.) = not isolated in pure culture.



(c.) = cellulolytic.

(np.) = not isolated in pure culture.



(c.) = cellulolytic.

(np.) = not isolated in pure culture.

Kuva 20. Mikro-organismien esiintyminen paalu-näytteissä. Ottokohteet ylhäältä alas-päin S2, G2, ja G1 (Lindskoug-Nilsson).

Tutkimukset suosta nostetusta puusta

Tutkimusryhmä teki vielä koesarjan suosta nostetun mäntytukin puuaineksesta sekä puuta ympäröineestä maasta ja vedestä. Radiohiiliajoituksella saatiin tukin iäksi 6300 vuotta. Lapin metsärajan siirtymistä koskevilla tutkimuksilla on Suomessakin nostettu soista puita (kuva 21), joista on tehty runsaasti ikämäärityksiä. Suomessa tehtyihin tutkimuksiin ei ole sisältynyt lahoamisselvityksiä.



Kuva 21. Vallijärvestä (Enontekiö) nostettuja tukkeja. Ylemmän ikä on noin 4900 vuotta ja alemman ikä noin 6600 vuotta. (Kuvat Matti Erosen).

Ruotsalaisessa tutkimuksessa selitetään säilymisen suossa johtuneen siellä vallitsevista kemiallisista olosuhteista. Verrattuna paaluperustuksia ympäröivään maaperään on suossa alhaisempi pH, runsaasti humushappoja ja korkea rautapitoisuus. Suos-
sa ei todettu orgaanisen typen ja fosforin muuttumista nitraateiksi, nitriiteiksi, ammoniumtypeksi ja fosfaateiksi.

Suosta nostettu puu oli osittain pehmentynyt. Mikroskoppisissa tutkimuksissa todettiin materiaalis-
sa sienirihmastoja, selluloosaa hajottavia bakteereita ja sädesieniä. Suurimman osan puun heikentymisestä arveltiin kuitenkin aiheutuneen puhtaasta kemiallisesta hajoamisesta.

4.5

Erot lahoamisessa puulajeittain

Vuonna 1973 on Wälchli julkaissut tulokset tutkimuksesta, jossa lattiasienen (*Serpula lacrymans*) oli annettu lahottaa laboratorio-olosuhteissa kolmea havu- ja yhdeksäätoista lehtipuunäytettä. Taulukkoon 7 on poimittu tulokset meillä paremmin tunnettujen puulajien käyttäytymisestä lahoamiskokeessa. Kokeessa puunäytteet punnittiin 6, 12 ja 18 viikon jälkeen ja laskettiin lahoaminen painohäviönä prosentteina. Tutkimuksessa ei ollut systemaattisesti näytteitä kunkin puulajin pinta- ja sydänpuusta.

Taulukko 7. Eräiden puulajien lahoaminen lattiasienen (*Serpula lacrymans*) vaikutuksesta. Luvut merkitsevät lahonneen puun määrää ko. ajankohtana ja painoprosentteina (Wälchli).

Puulaji	Pintapuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehtikuusi	x	19,1	42,9	60,2
mänty	x	12,7	36,5	60,0
haapa		19,9	45,9	56,8
lehmus		2,2	30,8	51,0
tervaleppä		7,6	32,6	48,0
jalava	x	0	7,1	32,4
Puulaji	Sydänpuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehtikuusi	x	9,7	28,3	40,6
mänty	x	2,5	11,6	31,5
marjakuusi	x	0,2	1,5	
tammi	x	0,2	1,4	1,8
jalava	x	0	0	0,8
teak		0	0	0

Tammen ja jalavan sydänpuun sekä teak'in todettiin kokeessa kestävän hyvin lattiasienen vaikutusta. Myös männyn sydänpuu näytti aluksi vastustavan hyvin lahoamista.

Vuonna 1976 on Wälchli julkaissut kirjoituksen uusista kokeista, jotka hän oli tällä kertaa tehnyt 25:lle eri puulajille kellarisienellä (*Coniophora puteana*) ja saunasienellä (*Gloeophyllum trabeum*). Erityisesti kellarisieni on tunnettu maata vasten olevan puun lahottajana. Taulukoihin 8 ja 9 on poimittu tulokset eräiden puulajien lahoamisesta.

Näissäkin kokeissa voitiin selvästi todeta, että useimmissa puulajeissa sydänpuu on lahoamiselle vastustuskykyisempää kuin pintapuu. Männyn sydänpuulla todettiin korkea vastustuskyky saunasientä vastaan. Tammen pintapuu näyttää lahoavan nopeasti, mutta sydänpuu on erittäin lahonkestävää.

Taulukko 8. Eräiden puulajien lahoaminen kellarisienen (*Coniophora puteana*) vaikutuksesta (Wälchli).

Puulaji	Pintapuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehmus		24,4	41,8	55,6
lehtikuusi	x	29,2	38,4	53,9
haapa		24,8	37,9	46,6
tervaleppä		23	35	47
rauduskoivu		22	36	45
saarni		15	30	40
mänty	x	22	29	37
tammi	x	16	27	34
jalava	x	11	22	33
Puulaji	Sydänpuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehtikuusi	x	9	22	29
jalava	x	15	20	21,5
tammi	x	0	0	0

Taulukko 9. Eräiden puulajien lahoaminen saunasienen
(Gloeophyllum trabeum) vaikutuksesta (Wälchli).

Puulaji	Pintapuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehmus		15	35	43
mänty	x	18	32	40
rauduskoivu		14	36	38
haapa		15	24	36
lehtikuusi	x	13	26	36
tervaleppä		13	20	33
jalava	x	9	17	30
tammi	x	8	23	28

Puulaji	Sydänpuu	6 vko	12 vko	18 vko
lehtikuusi	x	3	8	14
jalava	x	2	4	8
mänty	x	1	2	2
tammi	x	0	0	0,2

5.

OSITTAIN LAHONNEIDEN PUUPERUSTUSTEN VARMUUDESTA

5.1

Yleistä

Vanhojen rakennusten puuperustusten kantavuutta ja sen heikkenemistä arvioitaessa on pääasiassa kysymys puuaineksen lujuudesta ja sen pienentymisestä. Poikkeustapauksissa saattaa paalu pettää myös maapohjan murtuessa päalukärjen alla tai paalun nurjahahtaessa kuormitusmuutosten johdosta. Tässä yhteydessä käsitellään kantavuutta yksinomaan puuaineksen lujuuskysymyksenä.

Tiedot paaluille tulevista kuormituksista perustuvat niihin suunnittelukuormituksiin, joita on esitetty vuosisadan vaihteen paalutuskartoissa. Säilyneiden paalutuskarttojen, rakenteiden vahvuuksien ja muuttuvien kuormien perusteella olisi useiden rakennusten osalta tehtävissä laskelmat todellisistakin kuormituksista.

5.2

Kuormitukset

Ikäläinen ja Similä (1910) ovat antaneet taulukossa 10 esitetyt kuormitukset kantavalla pohjalla seisovalle, jatkamattomalle paalulle. Sallittu kuormitus vaihtelee paalun halkaisijan D ja pituuden L mukaan.

Taulukko 10. Ikäläisen-Similän ohjeet paalulle sallittavista kuormituksista.

Kun D/L on	1/6,	niin kuormitus saa olla	50 kg/cm ²
" -	1/12,	" -	40 "
" -	1/24,	" -	30 "
" -	1/36,	" -	20 "
" -	1/48,	" -	10 "

Paalulle tulevaa kuormitusta on siis vähennetty paalupituuden kasvaessa, mikä on ilmeisesti tehty nurjahduksen estämiseksi, sillä nurjahdusvaara Kluuvilahden liejuissa on viime vuosisadan puolella ja vuosisadan vaihteessa ollut nykyistä suurempi. Jos oletetaan, että paalun kärjen halkaisija on 8" (203 mm A = 0,0324 m²), saadaan taulukon 10 pohjalta taulukon 11 kuormitukset.

Taulukko 11. Eri pituisille paaluille sallitut kuormitukset latvan halkaisijan ollessa 8".

L (m)	Kuormitus (MN/m ²)	Kuormitus paalua kohden (MN)	Kuormitus paalua kohden (ton)
1,2	5	0,162	16,2
2,4	4	0,130	13,0
4,9	3	0,097	9,7
7,3	2	0,065	6,5
9,8	1	0,032	3,2

Mariankatu 14 paalutuskartassa (kuva 4) on annettu taulukossa 12 esitetyt suunnittelukuormitukset latvastaan 7" läpimittaisille paaluille.

Taulukko 12. Mariankatu 14 paalutuskartassa annetut suunnittelukuormitukset

L (m)	Kuormitus paalua kohden		Kuormitus
	ton	MN	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

Näissä kahdessa esimerkkitapauksessa on paaluille sallittu enintään 5 MN/m² kuormitus eli sama kuormitus kuin vuoden 1964 pohjarakennusnormeissakin. Tällainen paalukuormien mitoistustapa lienee saanut alkunsa noin v. 1880-1890, jolloin Suomessa oli jo jonkin aikaa ollut käynnissä rakennusmestareiden ja -insinöörien koulutus.

5.3

Paalun varmuus

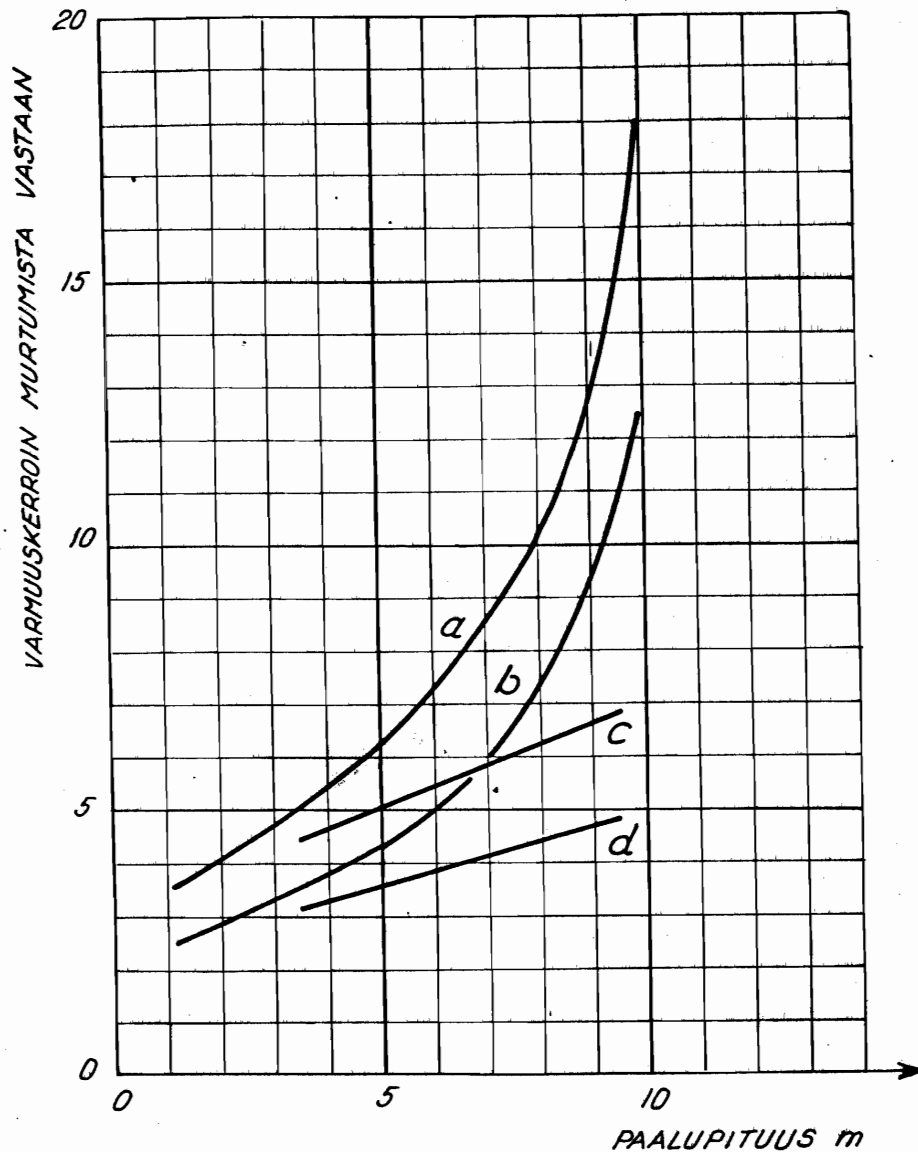
Seuraavassa tarkastellaan paalun rakenteellista varmuutta, kun sille on sallittu edellisessä kohdassa esitettyjä kuormituksia.

Kohdassa 3.6 esitettiin männyn lujuudesta tehtyjä laboratoriotutkimusten tuloksia. Näiden tulosten mukaan männyn puristuslujuuden keskiarvo syiden suunnassa oli 39 MN/m² 15 %:n kosteudessa. Vedessä olevan männyn puristuslujuus aleni tästä noin puoleen eli arvoon 18 MN/m².

Puurakenteiden suunnitteluohjeissa on määrän pyöreän puun ominaispuristuslujuudeksi syiden suunnassa annettu 12,6 MN/m².

Kuvassa 22 on esitetty paaluille varmuuskerroin murtumista vastaan em. kuormitus- ja lujuustietojen poh-

jalta. Varmuuskerroin vaihtelee välillä 2,5 - 18 paalupituuden mukaan. Paalupituuden ollessa esim. 9 - 10 m, on varmuuskerroin vähintään 4.



Kuva 22. Paalun varmuus murtumista vastaan kun
 a) puuaineksen lujuus 18 MN/m^2 ,
 kuormitus Ikäläisen-Similän mukaan
 b) puuaineksen lujuus $12,6 \text{ MN/m}^2$,
 kuormitus Ikäläisen-Similän mukaan
 c) puuaineksen lujuus 18 MN/m^2 ,
 kuormitus Mariankatu 14 paalukartan mukaan
 d) puuaineksen lujuus $12,6 \text{ MN/m}^2$,
 kuormitus Mariankatu 14 paalukartan mukaan.

Kuvan 22 varmuuskerrointarkastelu selittää osittain tilannetta keskustan eräiden rakennusten puuperustusten osalta. Vaikka paalujen yläpäiden poikkipinta-alasta on suuri osa lahonnut, ei rakennuksessa ole todettavissa painumista ja perustusten pettämistä. Niissä rakennuksissa, jotka ovat painuneet, ovat paalut yleensä olleet lähes läpikotaisin lahonneita.

Paalujen kantavuutta arvioitaessa on myös huomattava, että mitoituslaskelmat on tehty käyttäen paalun poikkipinta-alana latvan poikkipinta-alaa. Paalun yläpään (tyvipään) ollessa osittain lahonnut on jäljellä olevaa kantavaa poikkileikkaus-alaa verrattava latvan poikkileikkausalaan. Havupuun hoikkenema on noin 1 cm metriä kohden, jolloin esim. 10 metrin pituisen paalun latvaosan poikkileikkausala on vain 44 % tyven poikkileikkausala.

5.4

Arinarakenteen varmuus

Arinarakenteessa tulee puuristikolle sama kuormitus kuin paalulle. Ristikon kosketusala on tavallisesti pienempi kuin paalun pään poikkileikkausala ja kuormitus (kiskopaine) on pinta-alayksikköä kohden suurempi (vrt. kuva 10).

Laboratoriotutkimusten mukaan on männyn puristusjännitys suhteellisuusrajalla poikkileikkaussuunnassa kohdan 3.6 mukaan noin 2 MN/m^2 . Puurakenteiden suunnitteluohjeissa on ominaispuristuslujuudeksi samassa suunnassa annettu $1,8 \text{ MN/m}^2$.

Kiskopaine arinarakenteessa on useassa tapauksessa ainakin 5 MN/m^2 . Puun suhteellisuusrajan puristusjännitys on tällöin ylitetty. Laboratoriotutkimukset eivät kuitenkaan kerro, miten märkä puu (hirsi) käyttäytyy suhteellisuusrajan ylittyessä. Puu kokoonpuristuu voimakkaasti, mutta ei murru, joten varmuutta murtumista vastaan ei voida määritellä.

Voimakkaasti kokoonpuristunut arinarakenteen puu ei siedä vähäisintäkään lahoamista ilman kokoonpuristumisen kiihtymistä. Eräät lahottajasienet, kuten katkolahottaja, etenevät vuorottain säteen ja vuorottain vuosirenkaan suunnassa, jolloin arina menettää nopeasti lopunkin lujuutensa.

6. YHTEENVETO

Helsingin keskustassa on noin 50 taloa perustettu puupaaluilla. Vielä vuonna 1952 käytettiin puupaaluja keskustassa olevan tavaratalon perustamisessa.

Viime vuosisadan puolella tehtiin paalujen päälle vaakasuora puurakenne, puuarina. Arina on puuperustusten heikoin kohta, koska puun lujuusominaisuudet ovat paljon huonommat poikkileikkaussuunnassa kuin rungon suunnassa. Vuosisadan vaihteessa ryhdyttiin käyttämään betonisia paaluanturoita, jolloin perustuksista saatiin huomattavasti vahvempia. Eräissä keskustan vanhimmissa taloissa on kitkamaa-alueella-kin käytetty hirsiarinaa kivilatomuksen alla.

Puun säilymisestä vedessä kymmenien tai satojen vuosien aikana on vähän perustutkimustietoja saatavissa. Venetsiassa ja Leningradissa on käytetty tammipaaluja, joiden sydänpuun korkea parkkiainepitoisuus tekee puupaalusta varsin lahonkestävän esim. mäntyyn verrattuna.

Vanhojen rakennusten paalutuksesta säilyneiden paalutuskarttojen perusteella voidaan päätellä, että paaluille on sallittu enintään 5 MN/m^2 kuormitus. Pidemmillä paaluilla on kuormitus saattanut olla noin 1 MN/m^2 . Näiden tietojen pohjalta voidaan arvioida, että puuarinattomissa rakennuksissa on varmuuskerroin puun murtumista vastaan alunperin ollut 3-20. Osittain lahonneiden paaluperustusten vahvistamiselta voidaan useassa tapauksessa ilmeisesti välttyä, mikäli huolehditaan niiden pysymisestä veden alla.

SAMMANDRAG

Fundament av trä

I Helsingfors centrum finns det ung. 50 hus grundlagda på träpålar. Ännu år 1950 användes träpålar vid grundläggningen av ett varuhus i centrum.

I mitten av förra århundradet byggdes en horisontell träkonstruktion på pålarna en sk. rustbädd. Rustbädden är den svagaste delen av fundamenten enär träets hållfasthetsegenskaper är betydligt sämre vertikalt mot stammen än i stammens riktning. Vid sekelskiftet började man använda pålplattor av betong vilket medförde betydligt gedignare grundkonstruktioner.

Även vid grundläggning på friktionsjordar har man i vissa hus i centrum använt en stockbädd under stenfundamenten.

Grundforskningsuppgifterna angående hur träet reglerar vid en förvaring i vatten under årtionden eller århundraden är mycket knappa. I Venedig och Leningrad har man använt ekpålar vars kärnträds höga tanninhalt gör ekpålen relativt beständig mot röta jämfört t.ex. med tallpålen.

På basen av de pålkartor som bevarats från pålningen av gamla hus kan man dra den slutsatsen, att den högsta tillåtna belastningen varit 5 MN/m^2 . Vid längre pålar har belastningen kunnat uppgå till ung. 1 MN/m^2 . Med kännedom om detta kan man i byggnader utan rustbädd uppskatta att säkerhetsfaktorn mot träets knäckning ursprungligen varit 3-20. I många fall kan man uppenbarligen undvika en förstärkning av pålfundament som endast delvis angripits av röta genom att försäkra sig om att fundamenten hålls täckta av vatten.

SUMMARY

Wooden foundation construction

In the city of Helsinki there are about 50 multi-storey buildings founded on wooden piles. As late as in 1952 timber pile foundations were used for department store in the city.

In the middle of the last century a horizontal timber construction, a timber grid, was constructed on the top of the piles. This grid is the weakest part of the foundation because the strength of the timber is much less perpendicular to the fibres than in the direction of these. Even on friction soil areas a timber grid has sometimes been used under the stone set construction in some of the oldest houses in the city. At the beginning of the 20th century the use of concrete pile slabs became more common which made the foundation constructions considerable firmer.

There is little basic information available how timber will maintain in water for tenth's or hundreds of years. In Vienna and Leningrad oak piles have been used. The high tannine content of the oak heart gives a good resistance against decaying. On the basis of preserved piling maps of old houses we find that the highest allowable load has generally been less than 5 MPa for pile points. Because of buckling danger the allowable load of long piles was often decreased. It could be at lowest 1 MPa.

Taking these values into account we find the structural safety factor of the timber piles. For piling without a timber grid it has after construction been from 3 to 20. So in many cases it seems to be possible to avoid reconstruction of a partly decayed pile foundation by keeping the foundation constantly under the water table.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Anttikoski, U.:
Perustusten saneeraus.
Rakennustekniikka 7:1977.

Eronen, M.:
Cl⁴ - ajoitettuja subfossiilisia mäntyjä Pohjois-Lapista.
Geologi-lehti 9-10:1977.

Haller, P.:
Diskussion-Ber. Nr.139 d. EMPA Zürich.
Zürich 1942.

Henderson, F.Y.:
Timber, its properties, pests and preservation.
London 1939.

Ikäläinen E. ja Similä, Y.:
Rakennusperustusten paaluttaminen nykyaikana.
Rakennustaito 22:1910.

Juhola M.O.:
Perustusten vahvistustöitä Kluuvien alueella.
Rakennustaito 12-12:1961.

Korttesmaa, M.:
Uudet puurakenteiden suunnitteluohjeet.
Rakennusteollisuus 6:1978.

Kärkkäinen, M.:
Puu, sen rakenne ja ominaisuudet.
Helsinki 1977.

Lahti, M.:
Kuinka Helsinkiä on rakennettu.
Helsinki 1960.

Lindskoug N-E. & Nilsson, L-Y.:
Grundvatten och byggande.
Byggeforskningen R 20:1974.
Stockholm 1974.

Puurakenteet.
Suomen rakentamismääräyskokoelma, B 10.
Helsinki 1978.

Rakennustekniikan käsikirja.
III osa. Rakennusaineet ja -tarvikkeet.
Helsinki 1970.

Rissanen, P.:
Perustusten vahvistaminen megapaaluilla.
Rakennustekniikka 3:1969.

Siimes, F.E. ja Liiri, O.:
Puun lujuustutkimuksia I.
VTT, tiedotus 103.
Helsinki 1952.

Vorreiter, L.:
Holztechnologisches handbuch. Band II.
Wien und München 1958.

Woxen R. och Heimbürger, G.:
Träets egenskaper och förädling.
Stockholm 1940.

Wälchli, O.:
Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen
Angriffe durch Coniophora puteana und Gloeophyllum trabeum.
Holz als Roch- und Werkstoff 34/1976.

Wälchli, O.:
Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe
durch den echten Hausschwamm (Merulius lacrymans).
Holz als Roh- und Werkstoff 31/1973.