VAATIVAA POHJARAKENTAMISTA PIETARISSA

Matti Hakulinen

Pietarin Paavalin linnoitus, josta Pietarin rakentaminen alkoi vuonna 1703 (kuva Ulitsky 2006).

SISÄLLYS

POHJARAKENTAMISTA PIETARI SUURESTA NYKYPÄIVIIN ……..…4

PIETARIN MAANKAMARA ……..……..….8

MAANKAMARAN VAIKUTUS RAKENTAMISEEN…… 20

PAALUPERUSTAMINEN PIETARISSA…….24

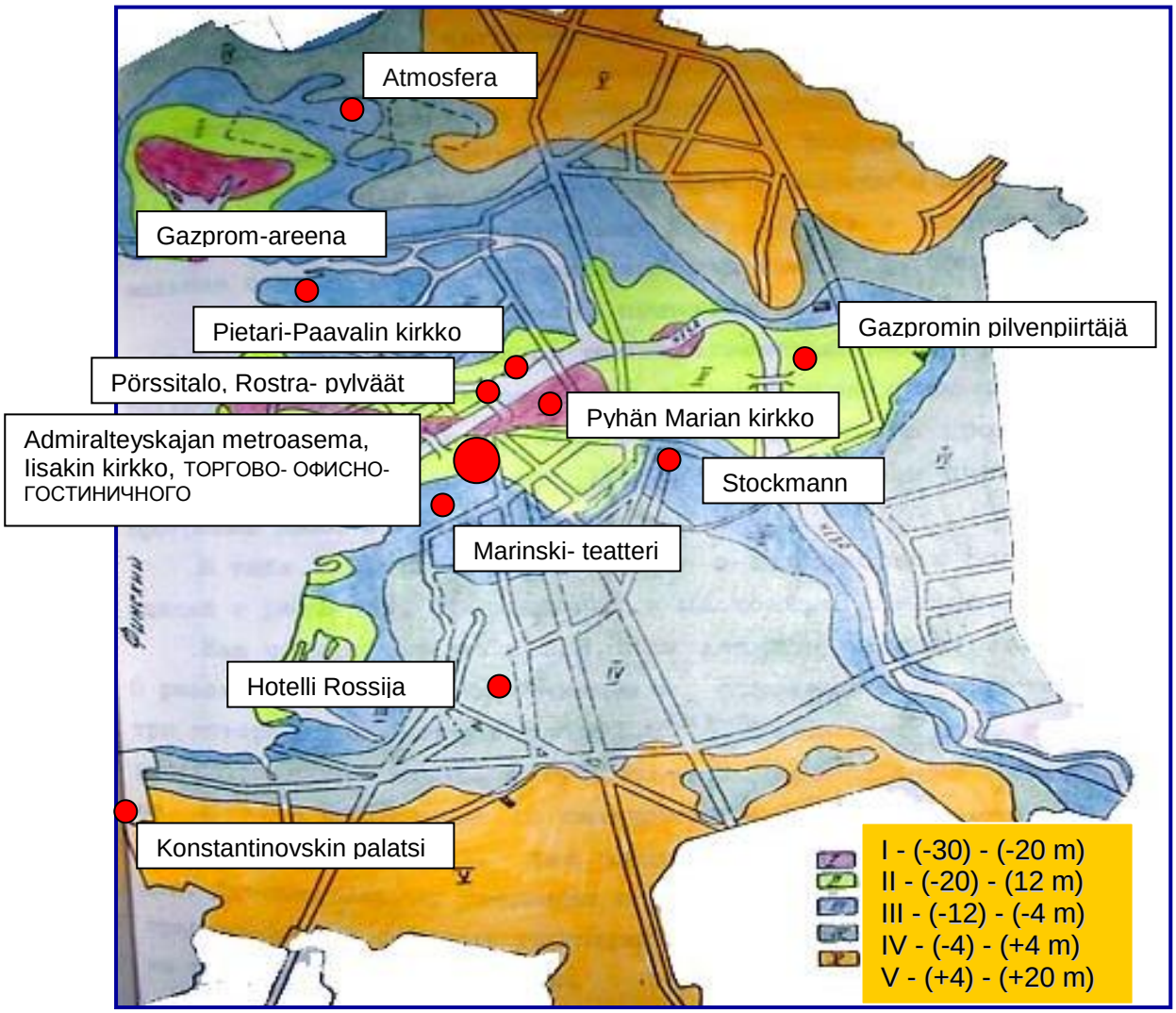
KAIVANNOT……48

HISTORIALLISTEN RAKENNUSTEN POHJARAKENTEITA…….68

METRO…….84

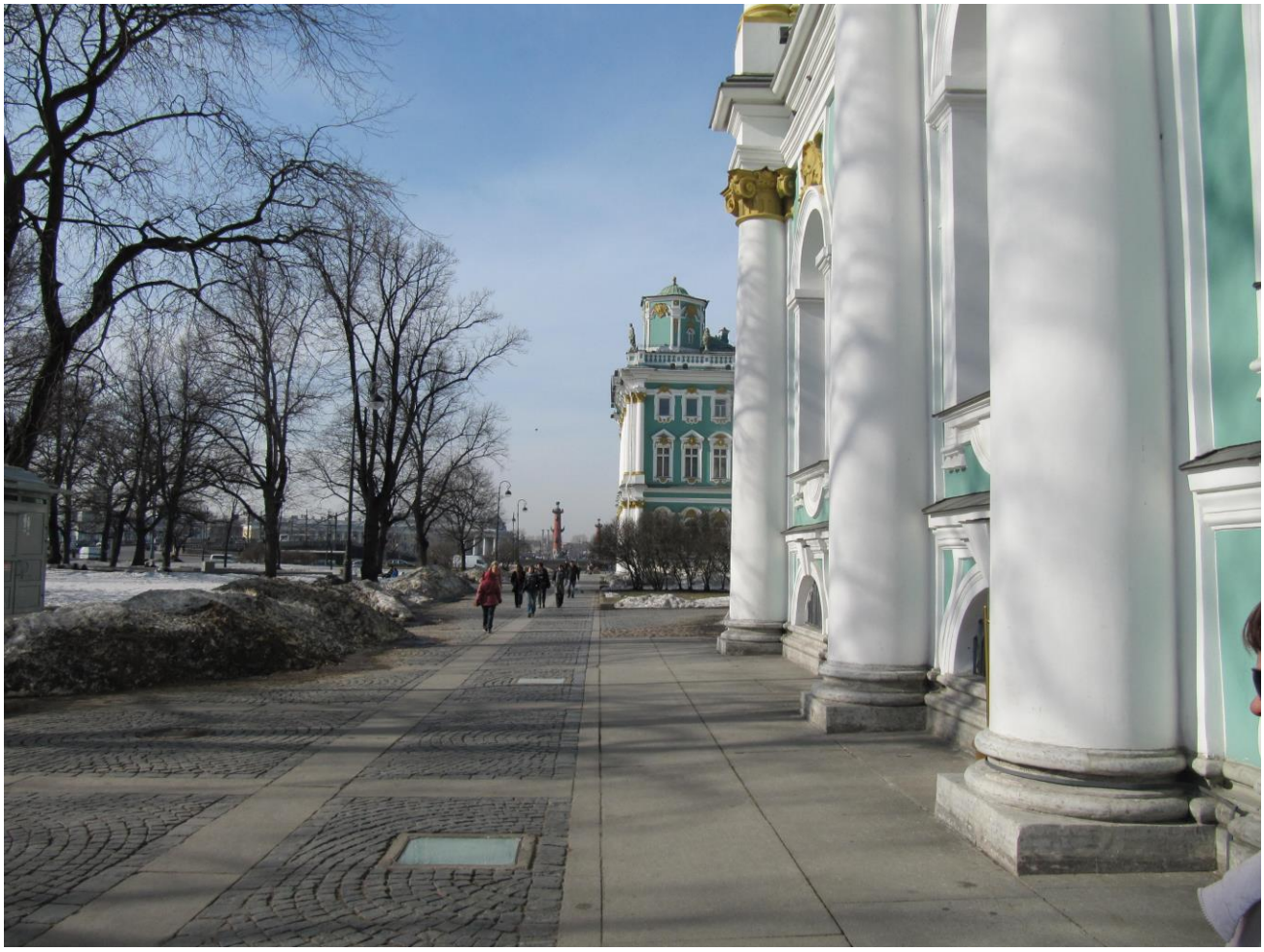
KIRJALLISUUS……...92

Kirjoituksessa kuvatut pohjarakennuskohteet



Pietarin historiallinen keskusta. Alueiden (I – V) korkeudet ovat pehmeiden maakerrosten alapintoja (kuva Mangushev 2010).

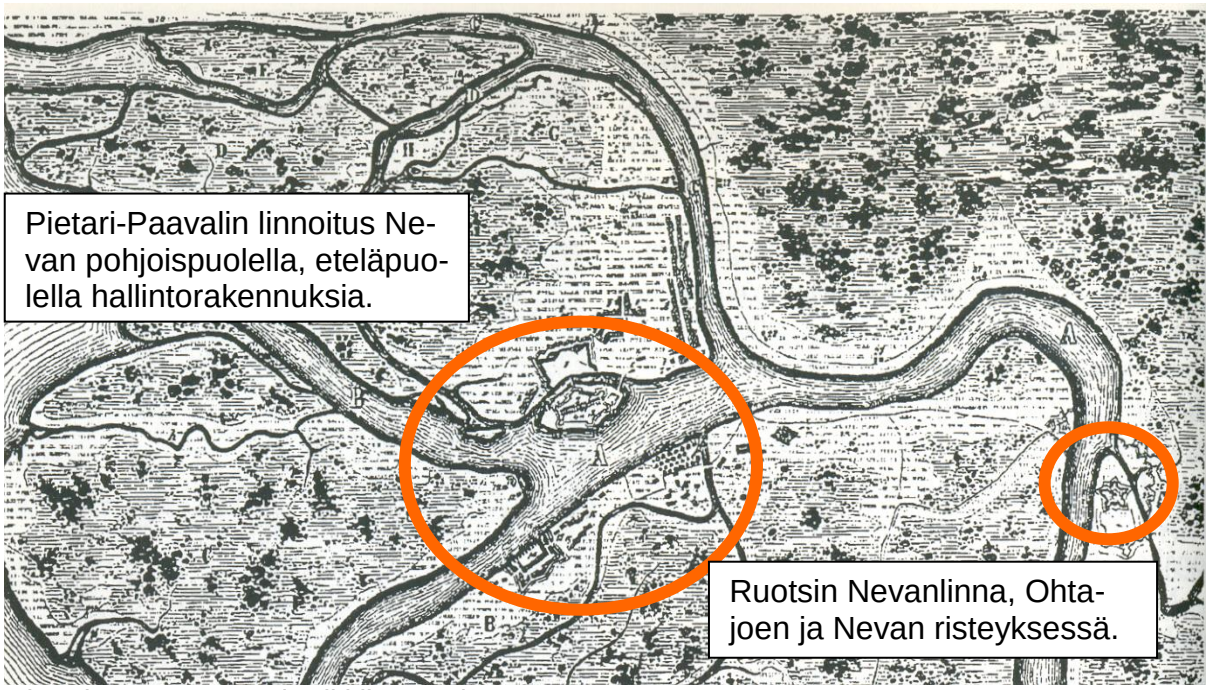
POHJARAKENTAMISTA PIETARI SUURESTA NYKYPÄIVIIN



Maanvaraan perustettu Eremitaasi (kuva Matti Hakulinen).

Suomenlahdelta Laatokalle ja edelleen sisä- Venäjälle Nevan kautta kulkevan vesireitin hallinta on viimeistään viikinkiajalta asti ollut tärkeää. Inkerinmaalla olevasta vesireitistä kilpailivat myöhemmin lähinnä ruotsalaiset ja venäläiset. Ruotsalaiset onnistuivat hallitsemaan aluetta lähes koko 1600 – luvun Suureen Pohjan sotaan asti, jonka alussa vuonna 1703 Pietari Suuri valloitti Nevan suiston. Välittömästi Pietari perusti suistoon Pietari-Paavalin linnoituksen valloituksensa turvaksi ja siirsi sinne pian myös pääkaupungin Moskovasta. Pääkaupungin siirtoa Nevan suistoon 1712 on usein pidetty myös Suomen historiaan eniten vaikuttavana tapahtumana.

Ennen kaupungin perustamista Pietari Suuri oli kääntänyt Venäjän kurssin jyrkästi länteen ja hänen aikanaan Venäjän merkitys kasvoi Euroopassa. Samalla hän vakiinnutti itsevaltiuden, maallisti kirkon sekä liitti kirkon ja aateliston osaksi hallintoaan.



Pietari vuonna 1705 (Heikkilä 1999).

Nevan suiston maapohja poikkeaa merkittävästi tyypillisestä pohjoismaisesta, mutta myös ympäristönsä maankamarasta. Lieneekö sattumaa vai ei, mutta Nevan suiston maankamara on samantapainen kuin Pietari Suuren ihailemassa Amsterdamissa. On jopa arveltu, että tämä olisi vaikuttanut uuden pääkaupungin rakentamispäätökseen. Vaihtoehtoisina kaupungin paikkoina olivat Viron Narva ja Paldiski. Tärkeintä Pietari Suurelle oli varmistaa pääsy Itämerelle.

Pietari Suuren päätös, että kaupunkiin ei saa rakentaa kirkkoja lukuun ottamatta Eremitaasia korkeampia rakennuksia, oli myös pohjarakentamisen kannalta perusteltu. Historiallisen keskustan maapohja kantaa vielä tämän suuruiset maanvaraan perustetut rakennukset yleensä ilman kohtuuttoman suuria painumia. Tästä päätöksestä on pidetty kiinni tähän päivään asti ja näyttää siltä, että periaatetta halutaan noudattaa myös tulevaisuudessa. Siitä on osoituksena kaasu-

yhtiö Gazpromin pääkonttorin pilvenpiirtäjän rakennusluvan epääminen vanhan Nevanlinnan alueella. Pilvenpiirtäjän uusi tontti on keskustasta noin yhdeksän kilometriä luoteeseen, Suomen suuntaan Suomenlahden rannalla.

1700-luvulla keisarit rakensivat hallintorakennuksia ja edustustiloja monine palatseineen. Tällöin aloitettiin myös Eremitaasin rakentaminen. Aikakausi 1770-luvulta 1850-luvulle oli kaupunkirakentamisen suurta aikaa. Tällöin rakennettiin uusklassismin maineikkaat rakennukset. 1850-luvun puolivälin ja I maailmansodan välisenä aikana, kulttuurin kultakautena, kaupunki kasvoi suurkaupungiksi. Neuvostovallan aikana rakentaminen jatkui keskustan ympäristössä ja lähiöissä, ja kaupungin väkiluku lisääntyi sotien aikaa lukuun ottamatta entisestään.

Neuvostoliiton kaaduttua on Suomenlahden meritien merkitys uudelleen korostumassa ja Pietari on rakentumassa monilta osin nykyaikaiseksi eurooppalaiseksi suurkaupungiksi. Tämä edellyttää myös keskustassa uutta rakentamista, joka on osittain jo alkanut. Rakennusten toiminta vaatii tällöin usein syvien maanalaisten tilojen ja kaivantojen rakentamista. Uudet rakennukset säännöllisesti paalutetaan, vaikka paalutuksesta tuli vasta 1960- ja 1970-luvuilla vallitsevaksi perustamistavaksi maanvaraisen perustamisen sijaan, kun korkeita elementtikerrostaloja alettiin rakentaa kaupungin reunoille. Tässä Pietari poikkeaa monista muista suurkaupungeista, joissa korkeat rakennukset ovat kaupungin keskustassa.

Pohjoismainen peruskallio painuu sedimenttikivien alle Karjalan kannaksella (Saarnisto 2003).

Pohjarakentamisratkaisuihin vaikuttavat kaikkialla ennen kaikkea paikallinen geologia, ilmasto, perinteet ja yhteiskunnan taso. Ne ovat myös vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Tämä kirjoitus keskittyy Pietarin geologisiin olosuhteisiin ja niiden vaikutuksiin pohjarakentamisessa. Tällöin on kiinnostavaa seurata

miten muualla Pietarin kaltaisissa olosuhteissa kuten esimerkiksi Hollannissa rakennetaan. Hyvin usein pohjarakentaminen Pietarissa mystisoidaan. On usein toistettu myytti, että Pietari on perustettu suolle.

Merkittävimmin Suomen ja Pietarin pohjarakentamiskäytäntöjen eroihin vaikuttaa, ehkä yllättävästi, ero kallioperässä. Siirryttäessä Suomesta Pietariin pohjasuhteet muuttuvat. Luja pohjoismainen peruskallio painuu maanpinnan alapuolelle Karjalan kannaksella ja se on Pietarin alueella jo parin sadan metrin syvyydessä. Pietarin alueella peruskallion päällä on kymmeniä metrejä paksu sedimenttikivikerrostuma.

Tämän sedimenttikivikerrostuman pinnassa on kambrisavea, joka on koostumukseltaan saven ja savikiven välimuoto. Pietari Suuren aikana ei tästä kerrostumasta tiedetty mitään. Ensimmäisenä kambrisaveen tunkeutuivat metron rakentajat 1950-luvulla. Myöhemmin metron tunneliporaustekniikoilla rakennettiin kokoojaviemäreitä. Nykyään ja yhä enemmän tulevaisuudessa sinne porautuvat raskaiden rakennusten paalut. Kambrisavikerroksen merkitys pohjarakentamisessa on kasvanut jatkuvasti ja kasvaa myös tulevaisuudessa. Ainakaan toistaiseksi ei Pietarin pohja- tai tunnelirakenteita ole ulotettu sedimenttikivien alapuoliseen peruskallioon, joka on parin sadan metrin syvyydessä.

Kirjoituksessa käsitellään vaativaa pohjarakentamista lähinnä Pietarin ydinkeskustan alueella. Yleispiirteinen kuvaus, joka keskittyy paalutukseen, kaivantoihin ja vanhojen rakenteiden pohjarakenteisiin on tarkoitettu paitsi asiantuntijoille myös muille kiinnostuneille. Rakennuskohteiden kuvat ja kuvaukset pohjautuvat paitsi kirjoittajan omiin otoksiin, kokemuksiin ja näkemyksiin myös monin osin venäläisten professoreiden Sotnikovin, Ulitskyn ja Mangushevin luentoihin ja kirjoituksiin. Myös Saimaan ammattikorkeakoulussa opiskelevien venäläisten kaksoistutkinto-opiskelijoiden seminaaritöitä on hyödynnetty työssä.

Kirjoitus on laadittu pääosin vuonna 2011 ja sitä on täydennetty vuonna 2015.

PIETARIN MAANKAMARA

Pietarin liikenneyliopistossa koekuormitettu kambrisavinäyte (kuva Matti Hakulinen).

Pietarin läheisestä sijainnista huolimatta, sen ja Suomen maankamara eroavat merkittävästi toisistaan. Syitä eroihin joudutaan etsimään huomattavan kaukaa satojen miljoonien vuosien takaa. Pietarin ja Suomen maaperägeologiset erotkin heijastuvat niiden erilaisesta kallioperästä.

Lähes koko Suomen ja Skandinavian prekambrikautiselle kallioperälle sopii nimitys peruskallio. Se on huomattavan vanhaa, noin 2...3,5 miljardia vuoden ikäistä. Nuoremmat alle 600 miljoonaa vuotta vanhat heikommat sedimenttikivet, jotka ovat yleisiä Virossa ja Pietarin alueella, ovat Suomesta kuluneet vuosimiljoonien kuluessa lähes kokonaan pois.

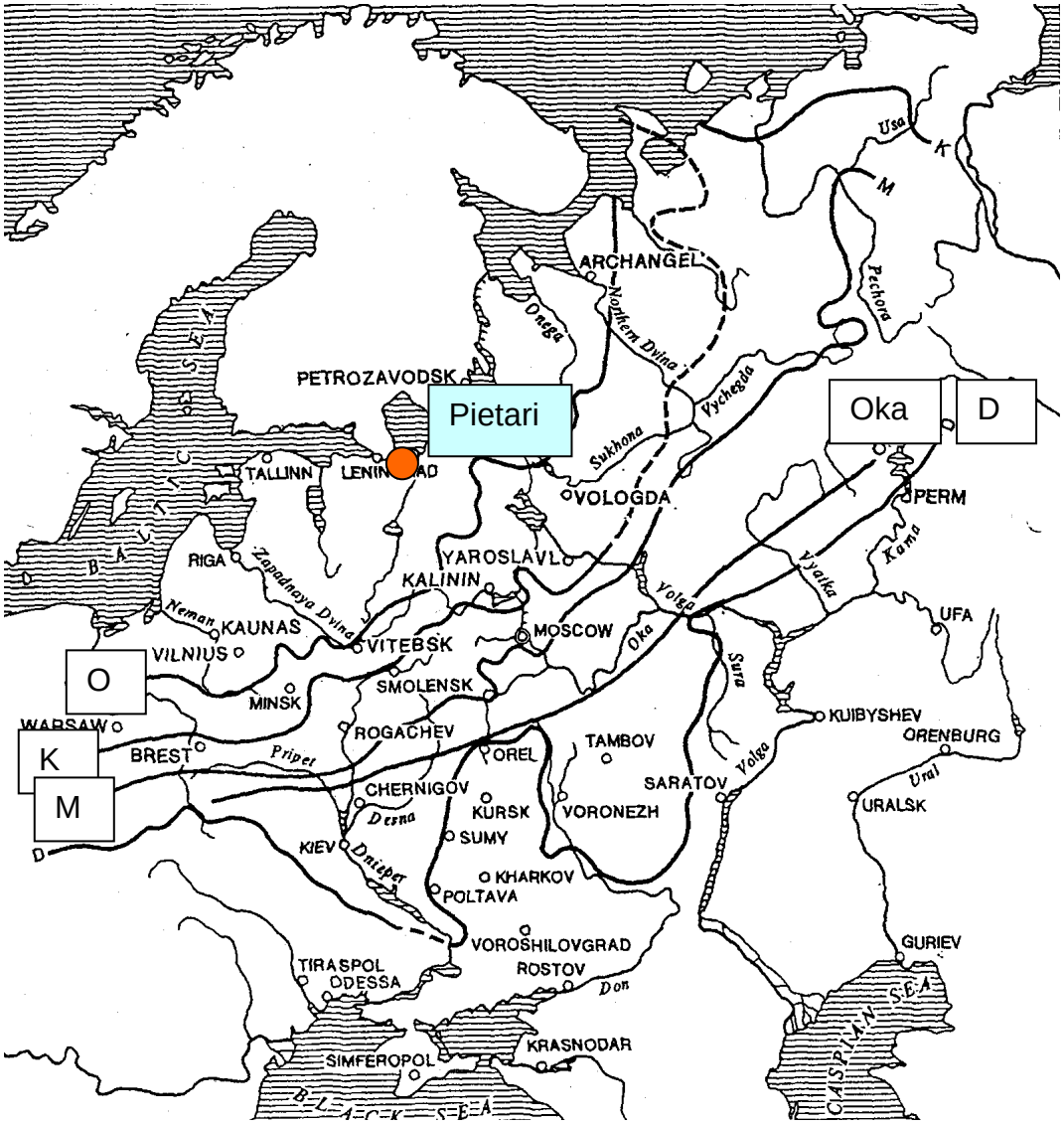
Siirryttäessä Suomesta sedimenttikivialueelle avokalliot katoavat ja jääkauden siirtämät peruskalliosta rapautuneet lohkareet pienevät. Pietaria lähestyttäessä ensin hiekkamuodostumat Terijoelle asti ja sen jälkeen hienorakeisemmat maa-ainekset ovat hallitsevia. Yksittäisiä jäätikön siirtämiä lohkareita löytyy sieltä täältä ja ne voivat olla hyvin ongelmallisia Pietarin kaivanto- tai paalutustyömailla. Eniten suurempia kiviä löytyy meren rannalta, jossa jää on kuljettanut niitä kauempaa ja vesi on huuhtonut hienomman aineksen pois. Pietarin rakentamisessa käytetyt kivet on tuotu suurella vaivalla lähes kokonaan peruskallioalueelta kaakkois- Suomesta tai Äänisen alueelta.

Maaperä

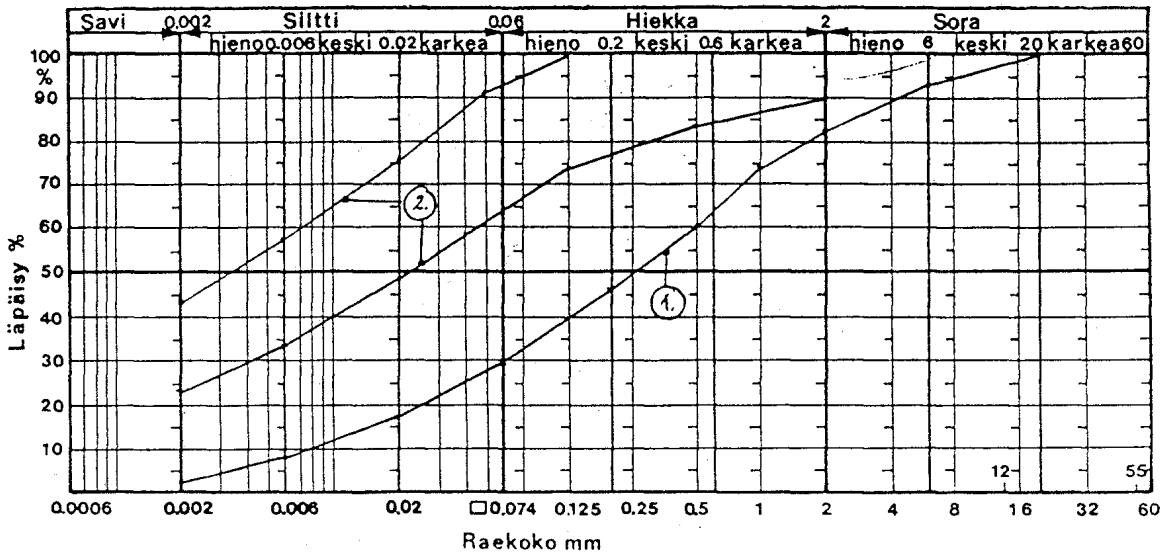
Pietarin alueella ovat maakerrosten muodostumiseen vaikuttaneet samat tekijät kuin Suomessakin, joskin jossain määrin eri tavalla. Suuri ja monesti ratkaiseva ero on maa-ainesten rapautuminen peruskalliota pehmeämmistä sedimenttikivilajeista, jolloin maakerroksissa on enemmän hienorakeista ainesta. Tällä on suuri vaikutus pohjarakentamisessa. Maakerrosten kerrosjärjestykseen ovat merkittävästi vaikuttaneet jääkaudet ja jäätiköiden sulamisen aikaiset tapahtumat sekä myöhemmin Nevan synty ja merivedenkorkeuden vaihtelut.

Viimeisen kahden miljoonan vuoden aikana – kvartääri- (**Q**) eli jääkausiaikana – ulottui mannerjää useita kertoja Pietarin alueelle. Suomessa jään vaikutus näkyy enemmän kuluttavana kuin Pietarin alueella, jossa jään reuna oli ohuempi ja jossa kulutuksen lisäksi on nähtävissä maa-aineksen kasautumista useammankin jääkauden ajalta. Näistä Kalinin jääkausi on nuorin.

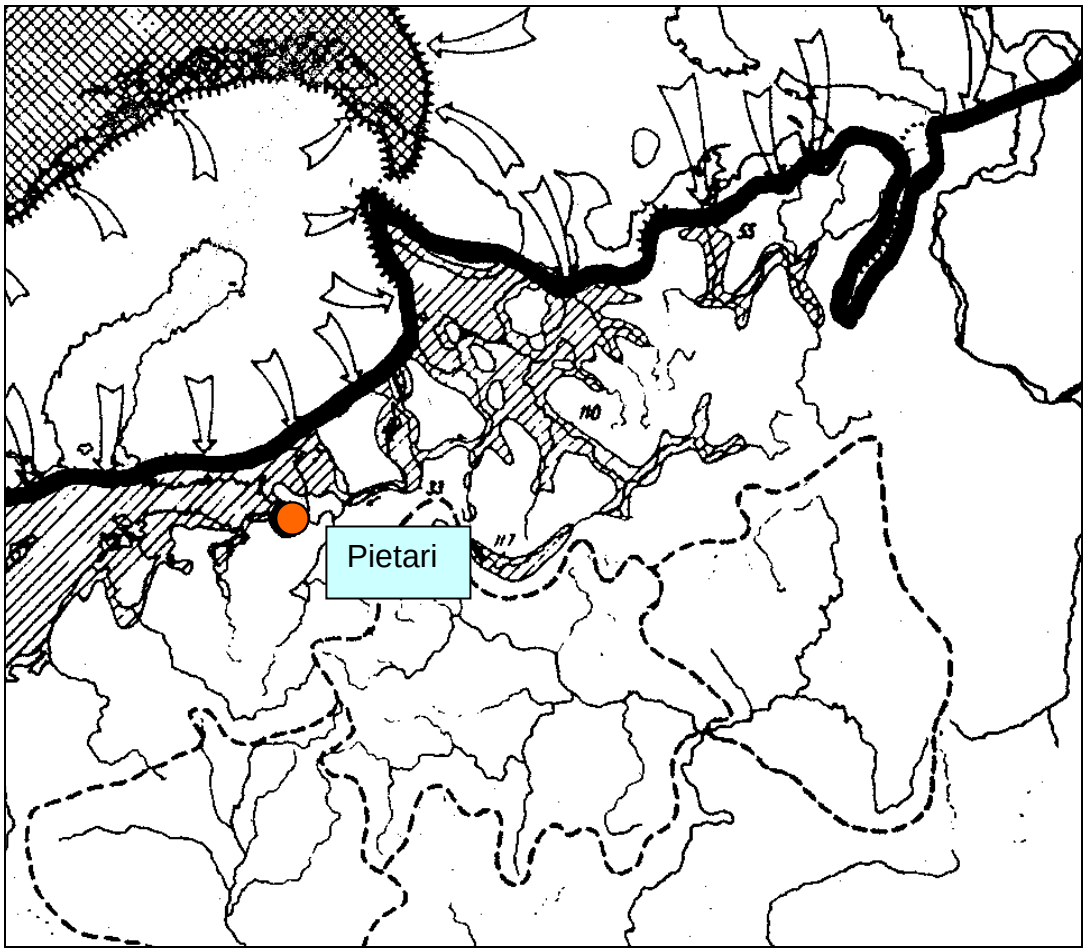
Etenevä ja sulava mannerjää muokkaisi Pietarin alueella aikaisemmista maa-aineksista eri-ikäisiä moreenikerroksia (glasiaaliset kerrostumat **gl**). Alimmat niistä kerrostuivat sedimenttikiven (**Cm**) päälle. Sedimenttikiven heikon lujuuden vuoksi moreenit sisältävät merkittävästi enemmän hienoainesta ja vähemmän kiviä ja lohkareita kuin moreenit Suomessa. Moreenikerrosten välissä on säilynyt jäätiköiden sulamisvesien kerrostamia hiekka- ja silttimuodostumia ((fluvioglasiaaliset kerrostumat **fgl**). Suomen alueella lähes säännöllisesti esiintyvät soraiset jäätikköjokimuodostumat harjut, puuttuvat Pietarin alueelta, koska sedimenttikivi on jauhautunut soraa hienommaksi ja harjujen muodostumiselle ei ole materiaalia.



Jääkausien laajuus Venäjällä. Ok-Oka (vanhin), D-Dniepr, M-Moskova ja K-Kalinin (nuorin) ,O-Ostashkovo on Kalinin jääkauden osavaihe (Vasiliev ym. 1981).



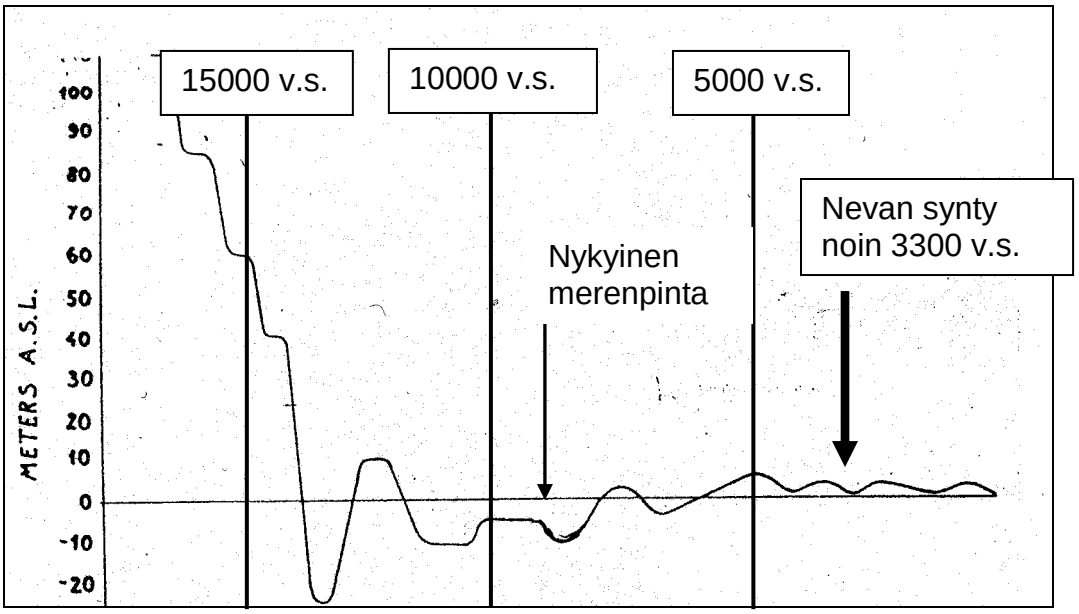
Rakeisuuskäyriä, 1. suomalainen moreeni. 2. sedimenttikivialueen moreeneja.



Jään reuna noin 11 500 vuotta sitten Baltian jääjärvivaiheessa (Kvasov).

Mannerjään sulaessa jäänreunan ja korkeamman kaakkoisen Valdain ylängön väliin muodostui laajoja jääjärviä. Nuorin niistä oli Baltian jääjärvi. Jäätiköltä sulamisvesien tuoma aines laskeutui näihin jääjärviin pääosin kerrallisina savina (lagustriset **lgl**). Ohut tumma jään alle laskeutunut talvikerros sisältää lähinnä savea ja paksumpi kesäkerros enimmäkseen runsaiden sulamisvesien kuljettamaa silttiä. Pietarin alueella on laajoja kerrallisen saven peittämiä alueita.

Jään reunan vetäydyttyä edelleen keski-Ruotsissa Billingenin ylängön pohjoispuolelle aleni Baltian jääjärven vedenpinta äkkiä noin 25...30 metriä Itämeren ja samalla myös Pietarin alueella. Alenemisen jälkeen vesi oli Itämeren alueella valtameren tasossa. Suuret vesimäärät olivat vielä sitoutuneena sulaviin jäätiköihin ja valtameren pinta oli noin 10...15 metriä nykyistä alempana.

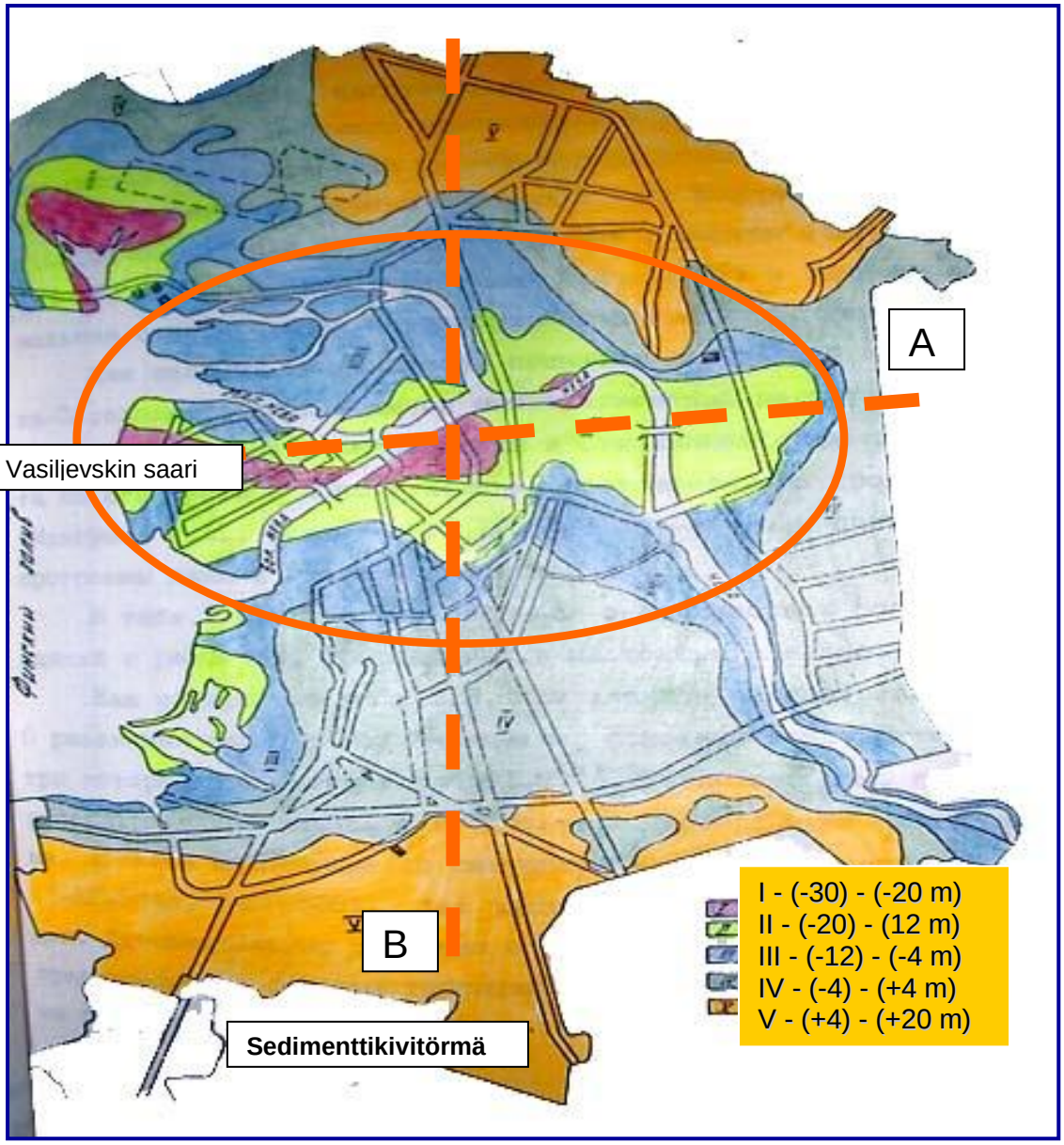


Merenpinnan korkeus jääkauden jälkeen Pietarin alueella (Dolukhanov). Vaaka-akselin maakerrokset kuvaavat niiden syntyaikaa ja – olosuhteita.

Merkittäviä maakerrosten muutoksia ei tuulikerrostumista lukuun ottamatta yleensä tapahdu vedenpinnan yläpuolella. Pietarin alueella on maankohoaminen ollut vähäistä ja on tällä hetkellä kokonaan pysähtynyt. Toisin kuin maankohoamisen alueella Suomessa on Pietarin alue ollut jääkauden jälkeen suuren osan aikaa vedenpinnan yläpuolella tai rantavyöhykkeen vaikutuspiirissä, jolloin syvään veteen laskeutuvia Suomen rannikkoseuduille tyypillisiä pehmeitä savikerrostumia (merikerrostumat, mariiniset **m**) ei ole muodostunut.

Jäätiköiden sulaessa nousi vesi valtamerissä ja ajoittain vedenpinta on myös Pietarin alueella ollut vähäisessä määrin nykyistä maanpintaa ylempänä. Rantavyöhykkeeseen on tällöin kasautunut lähinnä meren aaltojen kasaamia hiekkakerroksia ja jokien Pietarin suistoalueelle tuomaa ainesta: hiekkaa ja silttiä (alluviaaliset **al**). Merenpinnan tuntumassa suojaisilla alueilla on kasvanut myös orgaanista ainesta ohuina turvekerrostumina. Turpeet voivat esiintyä välikerroksi-

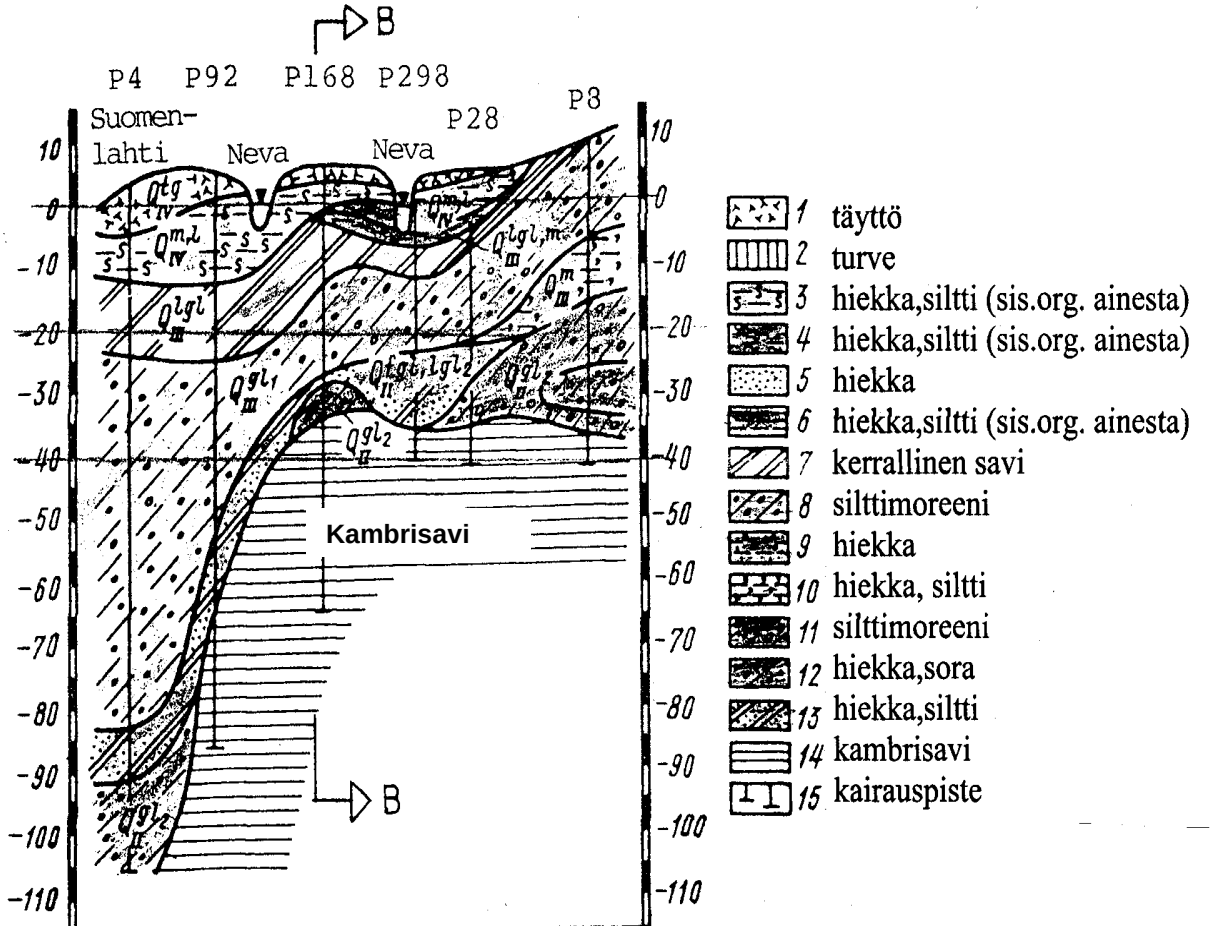
na maaperässä, erityisesti muinaisissa jokiuomissa ja rannoilla merenpinnantason läheisyydessä. Ongelmallisia ovat laajojen täyttökerrosten alapuoliset turvekerrokset, joita on etenkin Pietarin pohjoisilla reuna-alueilla.



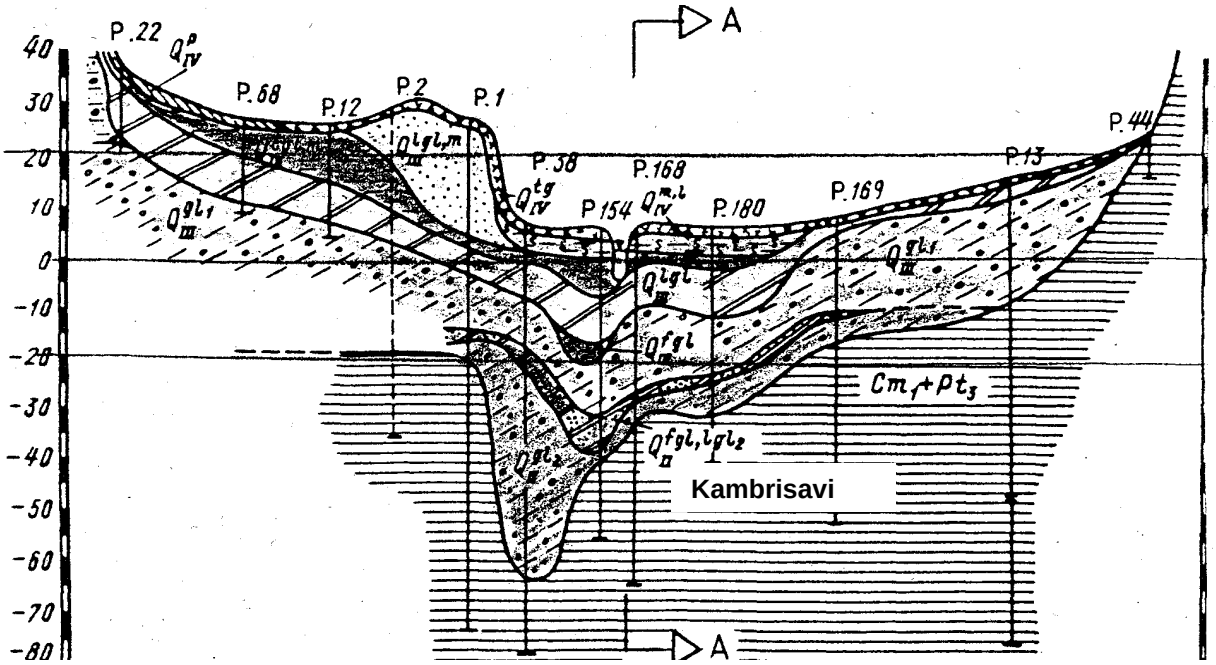
Pietarin historiallinen keskusta, kuvassa on esitetty seuraavissa kuvissa esitetyt geologiset leikkaukset A ja B. Alueiden (I – V) korkeudet ovat pehmeiden maakerrosten alapintoja. Ellipsin sisään jäävät syvimmät ja rakentamisen kannalta ongelmallisimmat maakerrokset. Tälle alueelle on pääosin rakennettu Pietarin historiallinen keskusta (kuva Mangushev 2010).

Kaupunkirakentamisen yhteydessä vanhoja joen uomia on täytetty ylijäämämailla ja pidetty myös kaatopaikkoina. Näitä pohjarakentamisessa haasteellisia alueita voi olla vaikea havaita ja rajata, usein ne sisältävät pilaantuneita maita jopa radioaktiivisesti säteilevää ainesta.

Pietarin historiallisen keskustan maapohjan viimeisteli Nevan puhkeaminen noin 3 300 vuotta sitten. Jääkauden jälkeen jatkunut Skandinavian kalliokilven epätasainen maankohoaminen aiheutti lopulta sen, että Laatokan kaakkoisosissa nouseva vedenpinta ylitti Porogin harjanteen Nykyisen Nevan keskivaiheilla ja Neva syntyi. Laatokan purkautumisvedet hakeutuivat muinaiseen ruhjeeseen ja siirsivät maa-ainesta Suomenlahden rannalle deltaksi jääkausien ja merivaiheiden muokkaaman maapohjan päälle. Tälle deltalle on rakennettu kaupungin historiallinen keskusta.

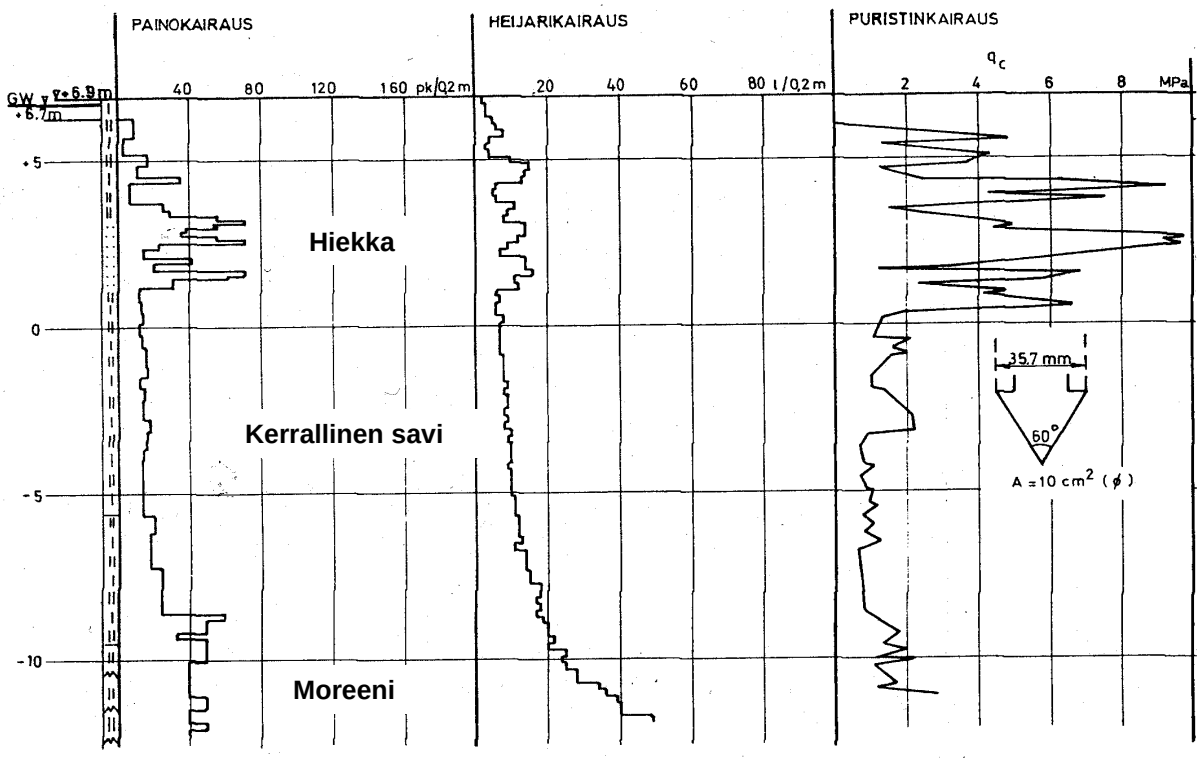


Geologinen leikkaus A-A, länsi - itäsuunnassa (Fursa 1975).



Geologinen leikkaus B-B, pohjois-eteläsuunnassa (Fursa 1975).

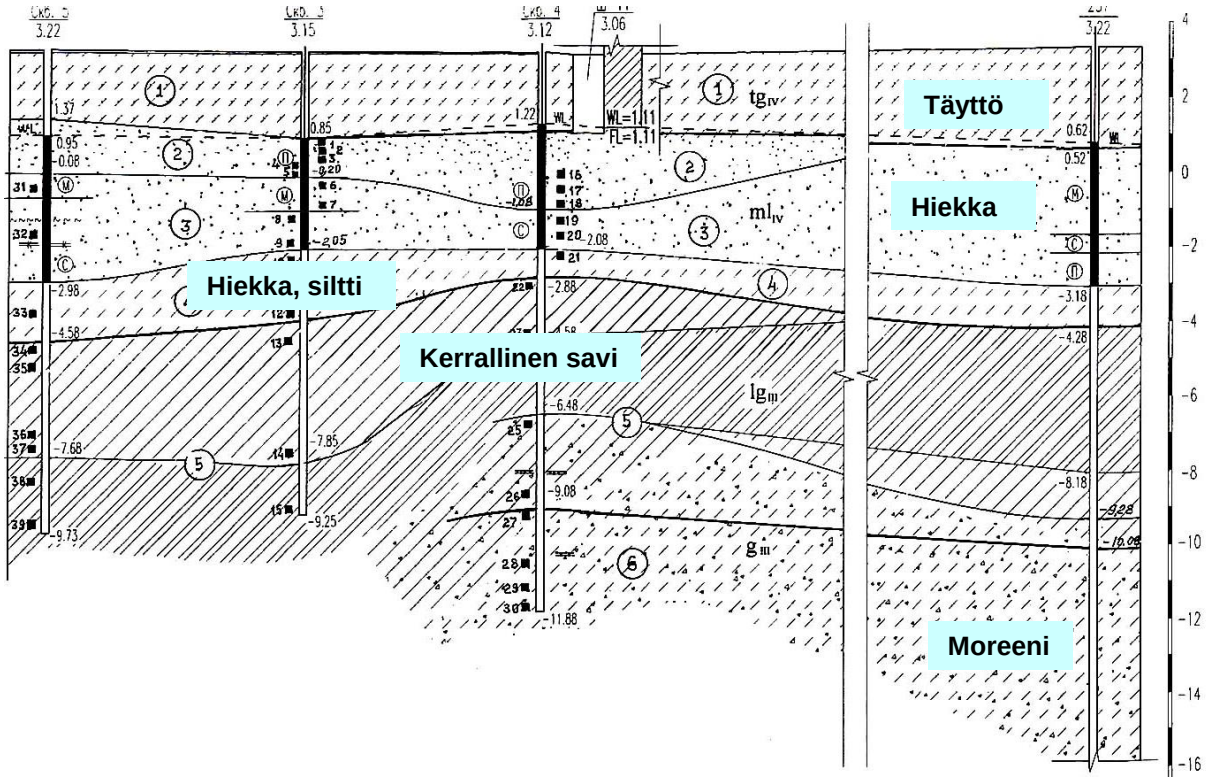
Seuraavissa kuvissa on yksityiskohtaisempia pohjatutkimustuloksia Pietarin keskustan alueelta ja keskustan ulkopuolelta Kolpinon alueelta.



Pohjatutkimustuloksia Vasiljevskin saari (Patjas ym 1982).

Vasiljevskin saaren tutkimuspisteessä on maanpinta tasolla +6.9. Lähinnä maanpintaa on silttiä, hiekkaa ja paikoin myös orgaanista aineista sisältävä joen suisto- ja rantakerrostuma, jolle suuri osa vanhoista rakennuksista on perustettu maanvaraisesti. Kerrostuma on tiiviydeltään löyhää - keskitiiviistä. Hiekka - silttikerrostuman alapuolella on jäätikön sulaessa jääjärveen laskeutunutta kerrallista savea. Kerrallisen saven vesipitoisuus on yleensä noin 40 %. Saven alapuolella on hienorakeisia moreenikerrostumia.

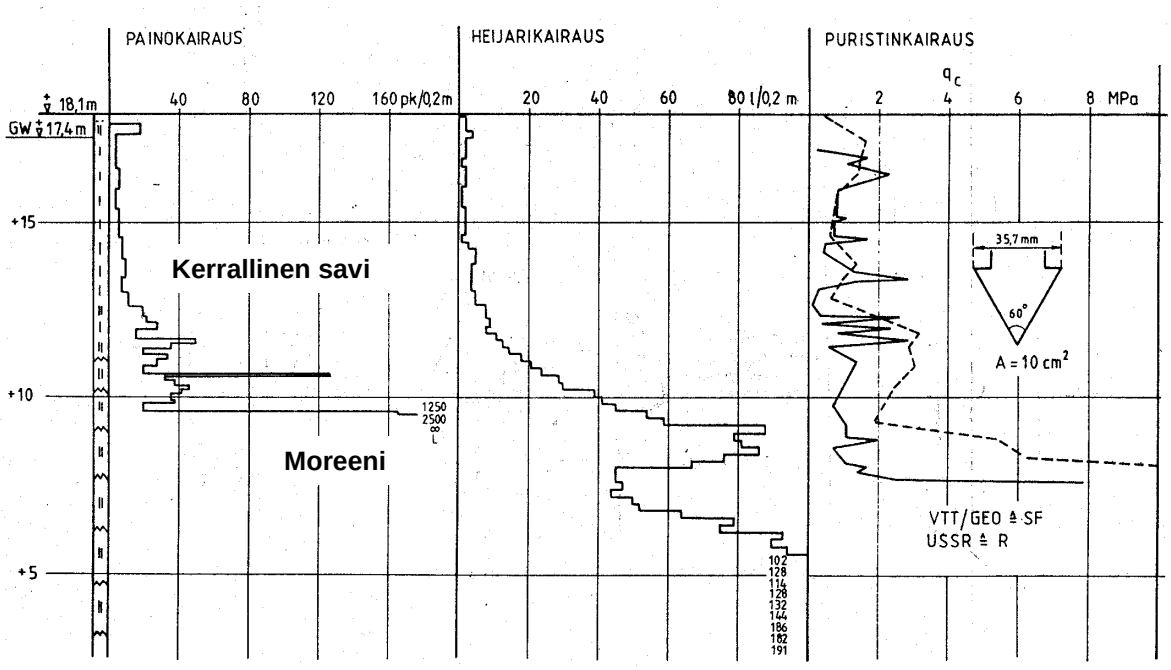
Kuvassa on tyypillinen venäläinen pohjatutkimusleikkaus Pietarin keskustan alueelta, jossa näkyvät pääpiirteissään samat maakerrostumat kuin edellisessäkin kuvassa.



Tyypillinen venäläinen pohjatutkimusleikkaus Pietarin keskusta-alueelta (Mangushev 2010).

Kolpinossa, noin 25 kilometriä keskustasta kaakkoon, on maanpinnan korkeus tutkimuspisteessä + 18.1. Koska maanpinta on korkealla, meri- ja jokikerrostumat puuttuvat. Lähinnä maanpintaa on muuallakin Pietarin alueella yleinen löyhä kerrallista savea sisältävä jääjärvikerrostuma. Kevyet rakennukset ja tiet, kadut voidaan usein perustaa tämän kerrostuman varaan maanvaraisesti. Raskaat ja painumille arat rakenteet on paalutettava alempiin moreenikerrostumiin, joiden yläpinta on noin tasolla + 10.

Pietarin keskustan maanpinta on lähes tasainen, tästä huolimatta pohjasuhteet voivat vaihdella huomattavasti lyhyelläkin matkalla. Pohjavedenpinta on erityisesti keskustassa lähellä maanpintaa.



Pohjatutkimustuloksia Kolpino (Patjas ym 1982).

Sedimenttikivikerrostumat

Sedimenttikivikallio (**Cm**) on Pietarissa yleensä noin 20 – 50 metrin syvyydessä. Keskusta-alueella on kallioruhje Nevan kohdalla, jossa sedimenttikivi painuu yli 60 metrin syvyyteen ja Suomenlahden kohdalla syvemmällekin.

Pietarhovi on rakennettu sedimenttikivitörmälle (Ulitsky 2006).

Pietarin keskustan eteläpuolella sedimenttikivitörmä, jonka päällä on usein nuorempia jäätikkösyntyisiä sedimenttejä, nousee paikoin maanpinnalle. Tälle törmälle ja sen reunalle on rakennettu lukuisia historiallisia rakennuksia, kuten esimerkiksi Pietarhovi ja Konstantinovskin palatsi.

Pohjatutkimusten mukaan on sedimenttikiven pintaosa yleensä rikkoutunut. Tämän rikkoutuneen kalliokerrostuman, jonka tarkkaa paksuutta ei ole tiedossa, lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet vastaavat pohjatutkimusten perusteella lähinnä suomalaista keskitiivistä moreenia.

Pietarin metrotunnelit on lähes kauttaaltaan porattu kiinteään kambrisaveen. Poraustyö on voitu tehdä pääosin kuivatyönä, mikä osoittaa aineksen veden läpäisemättömyyttä, tiiviyttä ja lujuutta.

Pohjatutkimuskäytäntö

Lähes kaikissa, myös länsimaisten yritysten rakentamissa kohteissa venäläinen organisaatio tekee pohjatutkimukset. Eri yliopistojen professorit ovat perustaneet yrityksiä, joiden kautta he tarjoavat geoteknisen alan palveluja. Pietarin arkkitehti- ja insinööriyliopiston lisäksi merkittävää alan osaamista on Rautatie- ja liikenneväyläyliopistossa, Vuori-instituutissa ja Pietarin yliopiston geoinstituutissa.

Arkkitehti- ja rakennusyliopisto. Tämäkin rakennus on perustettu maanvaraisesti (kuva Matti Hakulinen)

Paikallinen alan yritysrakenne on melko keskittynyt ja geotekniikassa toimitaan edelleen osin neuvostoliittolaisen toimintamallin mukaisesti. Venäläinen ja suo-

malainen pohjatutkimuskäytäntö eroavat selvästi toisistaan. Venäjällä lähestymistapa perustuu geologiseen tarkasteluun, jolloin maa- ja kalliokerrostumat kuvataan ja määritetään ensin syntytapansa ja iän perusteella. Tämä on suuressa maassa perusteltua, koska eripuolilla maata geologiset olosuhteet ja samalla maa- ja kallioperän ominaisuudet poikkeavat merkittävästi toisistaan. Lisäksi venäläisessä pohjatutkimuksissa otetaan huomattavasti enemmän näytteitä kuin Suomessa, osittain geologiapainotteisuuden vuoksi. Suomessa näytteenoton sijaan tehdään runsaammin kairauksia, joita venäläisessä pohjatutkimuksessa ei välttämättä ole lainkaan. Runsaasta näytteenotosta seuraa myös laajamittaiset laboratoriokokeet. Pääosin laboratoriokokeiden perusteella määritetään suunnitelmalaskelmissa tarvittavat maaparametrit.

Pietarin alueen yleisemmät maalajien syntytavat on esitetty seuraavassa taulukossa.

Maakerrosten syntytapa ja vastaava maalaji.

gl	glasiaalinen, jäätikkösyntyinen moreeni
al	alluviaalinen, jokisyntyinen hiekka, siltti
fgl	fluvioglasiaalinen, jäätikköjokimuodostuma, harju sora, hiekka
e	eolinen, tuulikerrostuma hiekka, siltti
lgl	lagustraalinen, jääjärvikerrostuma, kerrallinensavi, siltti, savi
m	mariininen, merikerrostumat, savi, siltti

Geologisen kerrostuman ikä esitetään isolla alkukirjaimella esim. Q on kvartääri-kausi, joka jatkuu nykyisinkin. Alaindeksillä tehdään tarkempi jaottelu esimerkiksi jääkausien ja niiden välisten sulamiskausien interglasiaalien välillä. Taulukoissa on esitetty geologisten kerrostumien jako Pietarin alueella iän perusteella. Taulukoissa esitettyjä tietoja voidaan käyttää hyväksi tulkittaessa venäläisiä pohjatutkimuksia. Esimerkiksi **lgl Q III $_2$** on viime jääkauden aikaisen jääjärven pohjaan kerrostunut maakerros. Kerroksen maalaji on todennäköisesti Suomessakin yleinen kerrallinen savi. Prekambriset muodostumat, jotka vastaavat suomalaista kallioperää ovat syvällä nuorempien kerrostumien alla.

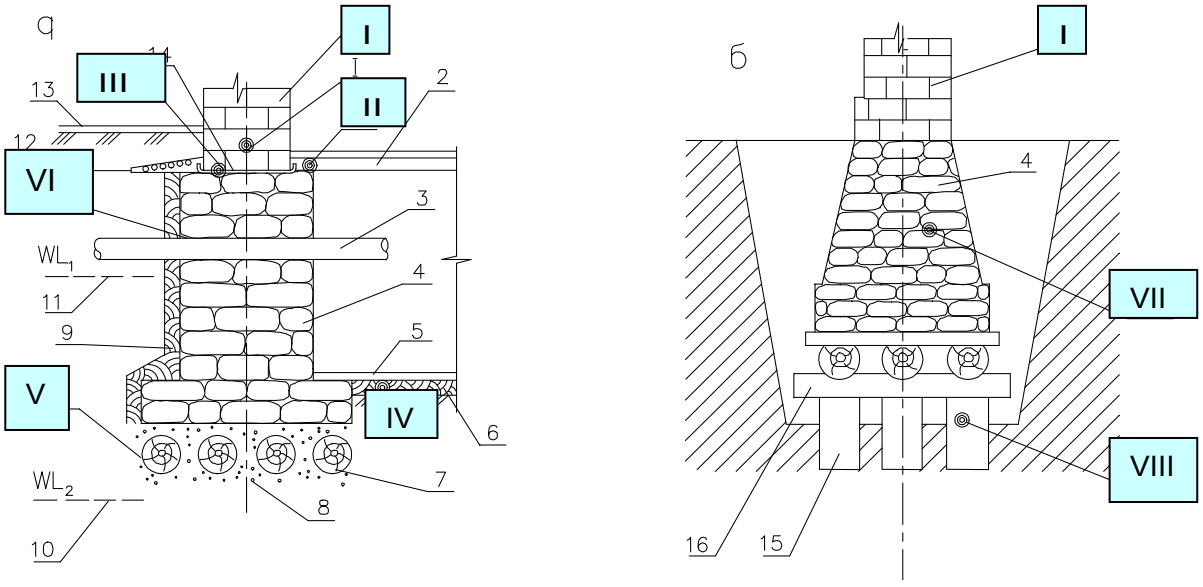
Geologisten kerrostumien jako iän perusteella.

Kvartääri	**Q IV**	jääkauden jälkeinen
	Q III $_{2,3,4}$	viime jääkausi (Kalinin)
	Q III $_1$	Kalinin jääkauden ja Moskova-jääkauden välinen aika
	Q II $_{2,3,4}$	Moskova-jääkausi
	Q II $_1$	Moskova- jääkauden ja Oka-jääkauden välinen aika
	Q I $_{1,2}$	Oka-jääkausi
Devoni	**D $_{1-3}$**	Devonikausi noin 320...400 miljoonaa vuotta sitten
Siluri	**S $_{1-2}$**	Silurikausi noin 400...420 vuotta sitten
Ordovikki	**O $_{1-3}$**	Ordovikkikausi noin 420...480 vuotta sitten
Kambri	**Cm $_{1-3}$**	Kambrikausi noin 480....570 miljoonaa vuotta sitten
Prekambri	**Pr**	Prekambrikausi yli 570 miljoonaa vuotta sitten

MAANKAMARAN VAIKUTUS RAKENTAMISEEN

Pietari Suuri, Vaskiratsastaja vuodelta 1782. Patsaan yhdestä graniittikappaleesta veistetty jalusta painaa 1 600 tonnia. Se on tuotu Suomen peruskallioalueelta.

Pietarin vanhoissa perustuksissa on usein rakenteellisia kantavuus- ja painuma-ongelmia. Osin ongelmat johtuvat rakennusten iästä ja maaperästä. Ongelmien syinä ovat puurakenteiden lahoaminen, koska pohjavedenpinta on alentunut ja maanvaraisten perustusten alimitoitus: ne ovat usein liian kapeita. Alimitoitukseen on johtanut rakennusajan puutteellinen tieto, on rakennettu käytännön nyrkkisääntöjen mukaan, jotka ovat sopineet kiinteämmälle maapohjalle kuten esimerkiksi Moskovaan, mutta eivät Pietarin maaperään. Alimitoitetut perustukset painuvat hitaasti jatkuvasti. Lisäksi koko keskusta alue painuu noin 2- 4 mm vuodessa, koska raskaat rakennukset ja pohjaveden aleneminen kokonaisuutena kuormittavat hienorakeisia maakerroksia ja ne konsolidoituvat.



	Vaurio	Vaurion syy
I	Tiiliseinän rapautuminen	Kostean tiilen jäätymis – sulamissykli, veden kapillaarinen nousu seinään,
II	Puurakenteiden lahoaminen, teräsrakenteiden korroosio	Liian suuri kosteusrasitus, puutteellinen tuuletus, vedeneristyksen puutteet
III	Kapillaarikatkon vauriot	Materiaalien vanhentuminen ja mekaaninen rasitus
IV	Lattian vesieristysvauriot	Mekaaninen rasitus, ertyityisesti korjaustöiden aikana
V	Puurakenteiden lahoaminen	Pohjavedenpinnan aleneminen, pohjaveden biologinen pilaantuminen
VI	Vedeneristyksen vauriot	
VII	Laastin rapautuminen	Agressiivinen pohjavesi, vanheneminen, eroosio
VIII	Puupaalujen päiden lahoaminen	Pohjavedenpinnan aleneminen, lämpötilan nousu, biologinen pilaantuminen

Vanhojen perustusten vaurioita ja niiden syitä (Ulitsky 2006).

Merkittävä rakenteiden kuivanapitoon liittyvä ongelma on maasta tai pohjavedestä rakenteisiin kapillaarisesti siirtyvä kosteus. Erityisen ongelmallista tämä on tiilirakenteissa, jotka ulottuvat maanpinnan alapuolelle tai lähelle maanpintaa. Kapillaarisen nousun katkaisu voidaan tehdä vanhoillekin rakenteille eri tekniikoilla, mutta kustannukset voivat nousta korkeiksi. Katkaisu voidaan tehdä esimerkiksi injektoimalla, sähköosmoosilla tai vaiheittain levymäisillä vettäläpäisemättömillä materiaaleilla, kuten metallileyillä.

Veden kapillaarisen siirtymisen katkaisu injektoinnilla (Mangushev 2010).

Suomenlahden poikki rakennettu tulvapato (Mangushev 2010).

Koska pohjavedenpinta on lähes maanpinnassa, tarvitaan usein vedenpaineeristyksiä, erityisesti kellaritiloissa. Tämä johtaa usein laattamaisiin alapohjarakenteisiin, jotka on tarvittaessa mitoitettava vedenpaineen aiheuttamaa nostetta silmälläpitäen. Voidaan arvioida, että Pietarissa kosteusvaurio-ongelmia on tulevaisuudessakin, kun yhä enemmän kiinnitetään huomiota myös vaurioiden sisäilmavaikutuksiin.

Kuivanapitongelmia korostavat usein toistuvat tulvat. Tulvien pääasiallinen syy on Suomenlahden pohjukan vedenpinnan suuri vaihtelu. Vaihtelun aiheuttavat tuuli, sateet ja ilmanpaine. Samanaikaisesti sattuva Nevan tulva pahentaa ongelmaa. Korkeimmillaan vedenpinta oli noin neljä metriä normaalitasoa ylempänä vuonna 1924. Tällöin vedenpinta kohosi lähes Laatokan tasolle. Tulvien hallitsemiseksi on Suomenlahden poikki rakennettu 25 kilometriä pitkä pato, jota pitkin Pietarin kehätie kulkee.

Pietarin hienoainesta sisältävät maa-ainekset ovat routivia, eroosioherkkiä ja häiriintyvät helposti veden vaikutuksesta. Kaivu on helppoa, kun pohjavesi ja pintavedet ovat hallinnassa. Louhintaa ei tarvita. Koska karkearakeista luonnonmateriaalia ei ole, on kiviaineista tuotava vaativiin maarakenteisiin muualta ja kuljetusmatkat voivat olla pitkiä. Kustannuksia voidaan vähentää stabiloinnein ja sivutuotteita käyttämällä.

Maanvaraisesti voidaan perustaa vain keveitä painuvia sietäviä lähinnä yksikerroksisia rakennuksia. Perustamisessa pohjapaine on tällöin alhainen noin 100 – 200 kPa. Raskaammat rakennukset paalutetaan nykyisin lähes aina.

Kaivantojen rakentamisessa on otettava huomioon hienorakeisten maakerrosten suuret maanpaineet ja pohjavedenpaine ja sen vaikutukset. Kaivannon maan- ja vedenpainekuormituksia ei yleensä voida siirtää kaivannon ympäristön maankamaraan maa- tai kallioankkurein, vaan ulkoiset vaakakuormat otetaan vastaan tukemalla kaivanto sisäänpäin. Yleensä tämä johtaa ns. top-down rakentamiseen, jossa ensimmäiseksi rakennetaan paalut ja niiden varaan ylin kellarikerros ja seuraavaksi toiseksi ylin kellarikerros ja vasta lopuksi alin kellari. Kellareiden välipohjilla otetaan vastaan ulkoiset maanpainekuormat.

Suomessa tutut pohjarakennuskäytännöt eivät aina sellaisenaan sovellu Pietarin olosuhteisiin. Toisaalta pohjarakenteiden käyttäytyminen ja mitoitus hallitaan teoreettisesti riittävän hyvin ja yleispätevästi, jolloin hyvä teoriaosaaminen yhdistettynä käytännön rakennusosaamiseen takaa Pietarinkin pohjaolosuhteissa toimivat pohjarakenneratkaisut.

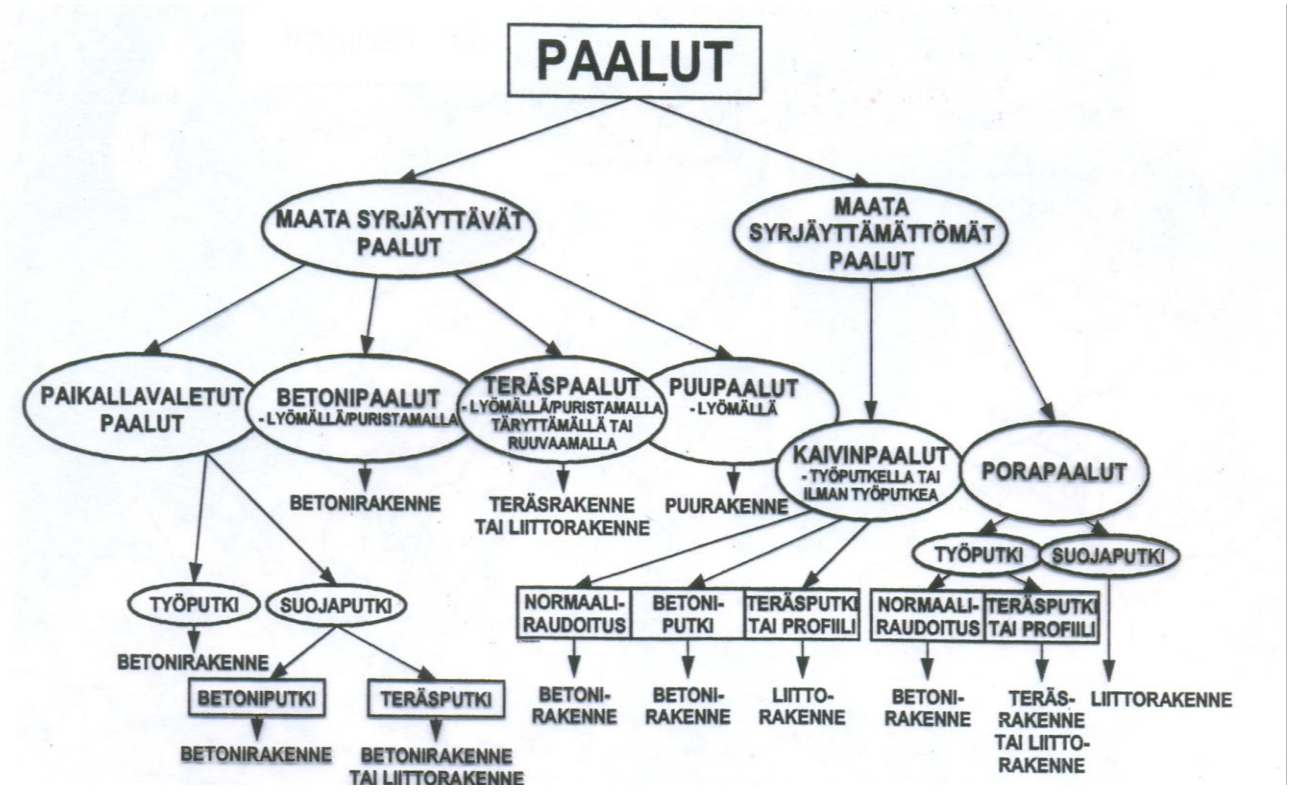
PAALUPERUSTAMINEN PIETARISSA

Kuva Matti Hakulinen.

Pietarin paalutuskäytännöt ovat uusiutuneet Neuvostoajan päättymisen jälkeen. Uusia paalutusmenetelmiä on tuotu Euroopasta aikaisempien käytettyjen menetelmien lisäksi. Suomalaisesta paalutuksen toimintaympäristöstä tarkastellen, jossa tukipaalut ovat vallitsevia ja erikoispaalujen valinnoille löytyvät selvät syyt ja suurpaalujen käyttö kitkapaaluina tuntuu uudelta, paalutyyppien valikoima ja niiden ominaisuudet tuovat mieleen Mendelejevin alkuaineiden taulukon. Ehkä paalutyypeistä puuttuu vielä joitain ja joidenkin menetelmien käyttö selkiytynee tulevaisuudessa. Sopivimmat menetelmät vallannevat markkinat ja paalutyyppien määrä tullee vähenemään.

Kuvassa on esitetty lähinnä suurpaalujen jaottelu suomalaisen käytännön mukaisesti. Jaottelussa painottuu paalujen rakenteellinen toiminta paalujen teon sijaan, joten paalujen tekotapojen kuvaus Pietarin olosuhteita silmälläpitäen on puutteellinen. Esimerkiksi Pietarissa yleisimmin käytetty Fundex- paalu on maata syrjäyttävän kiertämällä asennetun työputken avulla paikalla valaen tehty betonirakenne.

Kuvan jaottelu on Pietarin olosuhteisia lähinnä suuntaa-antava.



Suuriläpimittaisten paalutyyppien jaottelu (Hartikainen).

Keski-Euroopassa jonkin verran käytetyn paalujen ja yhtenäisen paalulaatan (Pile-Draft) yhteistoimintaan pohjautuva perustusmenetelmä ei liene Pietarissa yleensä käyttökelpoinen, koska suhteellisen tiiviin pintahiekkakerrostuman alla on pehmeämpää savea ja sen kyky ottaa vastaan kuormia ilman suuria muodonmuutoksia on vähäinen. Toisaalta jo 1800-luvulla tehdyt Iisakin kirkon perustukset ovat lähellä edellä mainittua Pile-Draft-perustusratkaisua.

Historiaa

Vain osa historiallisista rakennuksista on perustettu Pietarissa puupaalujen varaan. Suurin osa rakennuksista perustettiin maanvaraisesti hirsiarinalle. Vielä toisen maailmansodan jälkeen suuriakin rakennuksia perustettiin maanvaraisesti.

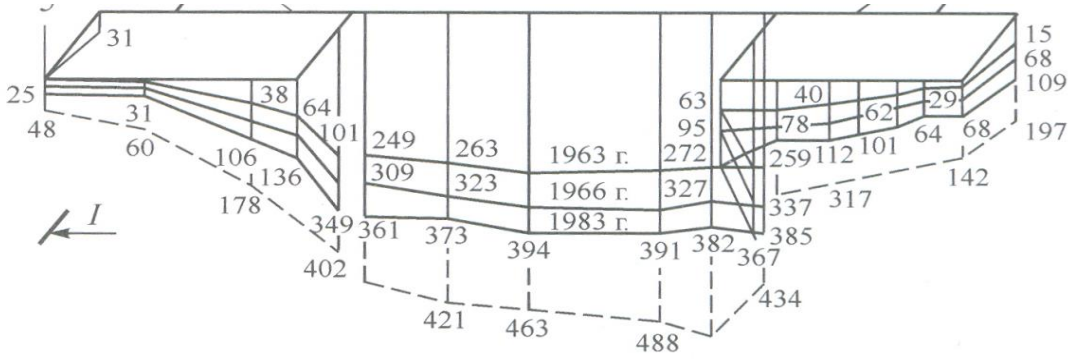
Paaluperustaminen yleistyi vasta 1960-luvulla. Tällöin tehtiin lähinnä lähiöihin korkeita asuinrakennuksia ja tuotantorakennuksia. Paaluina olivat yleensä teräsbetoniset lyöntipaalut, jotka siirsivät kuormia maapohjaan lähinnä vaippavastuksen välityksellä. Paalutuksen yleistymisestä huolimatta korkeitakin rakennuksia on perustettu vielä viime vuosiin asti maanvaraisesti. Tällaisten rakennusten painumat voivat olla kymmeniä senttimetrejä.

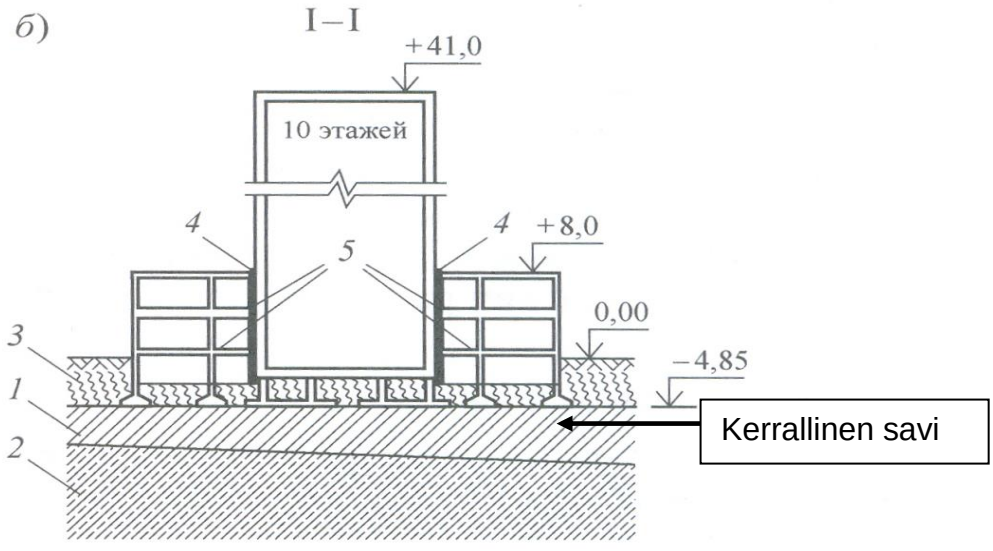
Raskaasti kuormitettujen rakennusten perustaminen maanvaraisesti ei ole nykyisin mahdollista Pietarin keskustan alueella, koska rakennusten sallitut painumat ja painumaerot ovat tiukentuneet ja tullevat rakennusten arvon ja laadun merkityksen kasvaessa tulevaisuudessa edelleen kiristymään. Tiukentuviin painumavaatimuksiin vaikuttavat erityisesti rakennusten vaipparakenteiden tiiviysvaatimukset, jotka määräytyvät ulkonäön, energiatalouden, terveellisyyden, käyttömukavuuden, rakenteiden elinkaaren ja kestävyyden ja kosteudenhallinnan perusteella. Nykyaikaisen rakennuksen vaipan olisi oltava mahdollisimman tiivis.

Keskusta-alueella rakennusten perustamisessa käytetään harvoin lyöntipaaluja. Lyötävien paalujen käyttöä rajoittaa tärinä, melu ja maan syrjäytyminen. Tärinäongelmaa lisää suhteellisen tiivis ja paksu hiekkakerros maanpinnan läheisyydessä. Tämä kerrostuma kasvattaa lyöntivastusta ja tärinää. Maan syrjäytymistä lisää puolestaan hiekan alla olevat paaluja lyötäessä tiivistymättömät kerralliset savet ja hienorakeiset moreenit. Tavanomainen 20 metriä pitkä lyömällä asennettava paalu 300 x 300 mm^2 syrjäyttää noin 2 m^3 maata.

Rakennukset, jotka tehdään riittävän kauaksi olemassa olevista rakennuksista, kuten Sokos Hotelli Olympia Garden, voidaan perustaa lyöntipaaluille. Edullisia lyötäviä teräsbetonipaaluja voidaan käyttää usein keskustan ulkopuolella.

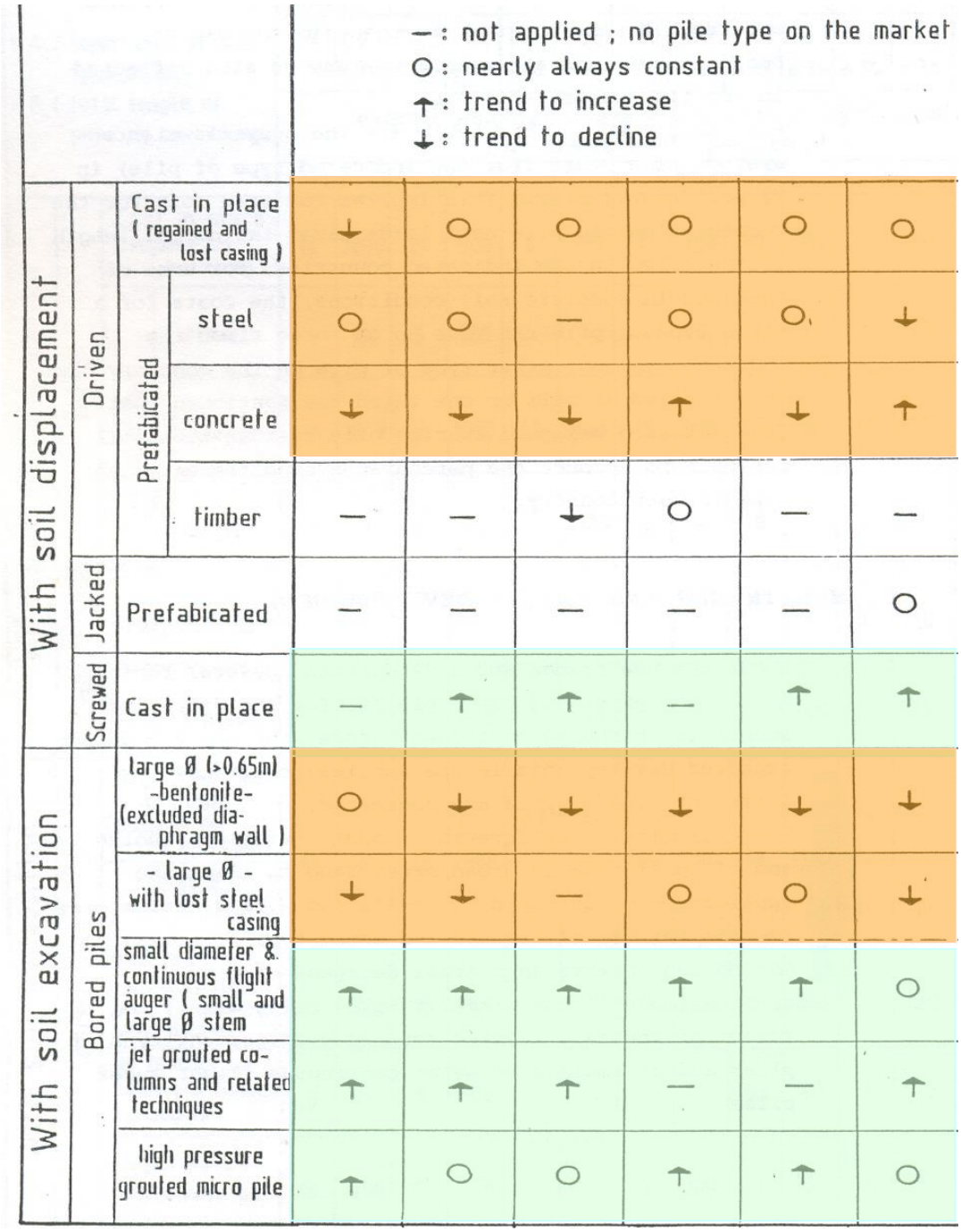
Vaihtelevan paksuisiin maakerroksiin tukeutuvat noin 10 - 20 metriä pitkät paalut ovat toimintatavaltaan sekalaisia kitka-, koheesiopaaluja. Nykyisin paalut ulotetaan usein maanpinnan lähellä olevien maakerrosten läpi kambrisaveen. Tällöin paalut lähestyvät toiminnaltaan tukipaaluja. Vaikka syvälle ulottuvat paalut toimivat lähes tukipaalujen tapaan, on myös paaluryhmän painumat tarkasteltava ja joskus myös paaluryhmän kantokyky. Kambrisaveen ulotettujen paaluryhmien kokonaispainuma voi olla kymmeniä millimetrejä. Pieniläpimittaiset paalut siirtävät kuormia lähinnä vaippavastuksen kautta, koska pienialaisen paalun kärkivastus on vähäinen tiiviimmässäkin kerrostumassa kuten kambrisavessa.





Vuonna 1963 rakennetun maanvaraisesti perustetun Rossija- hotellin painumat (mm) (Mangushev 2010, valokuva Matti Hakulinen).

Seuraavassa kuvassa on esitetty paalutustapojen käytön suuntauksia keski- Euroopan kaupunkiympäristöissä. Samat suuntaukset ovat nähtävissä myös Pietarissa, osin siitä syystä että monet paalutustavat ovat tulleet Pietarin keskieurooppalaisen kaltaisiin pohjasuhteisiin ulkomaalaisten urakoitsijoiden välityksellä.



Paalutusasennusmenetelmien kehityssuuntauksia (van Impe 1989).

Lyömällä asennettavat paalut ovat vähenemässä ja varovaisemmin asennettavat ruuvattavat ja porattavat paalut sekä suihkuinjektointi (jet grouting) lisääntymässä.

Vanhojen rakennusten peruskorjaamisessa paalut ovat usein pieniläpimittaisia injektoitavia porapaaluja ja uusien rakennusten paalut suuriläpimittaisia joko maata syrjäyttäviä tai syrjäyttämättömiä paikalla valettavia paaluja. Puristamalla asennettavien paalujen alhainen kantavuus rajoittaa menetelmän käyttöä.

Suuriläpimittaiset paalut

Suuriläpimittaisten paalujen käyttö alkoi Pietarissa suuremmassa määrin 1990-luvulla. Pietarissa on käytössä lukuisia paalutyyppejä. Tämä osoittaa, että paalutuskäytännöt eivät ole vielä vakiintuneet ja myös sitä, että maapohja ja rakennusten kuormitukset sekä sallitut painumat vaihtelevat.

Pietarissa talonrakennuksen yhteydessä käytettyjen paalujen kuormitus on pääosin pystysuuntaista. Suurpaalujen suurta taivutuskapasiteettia ei yleensä tarvita. Jäljempänä esitettyihin paalujen kapasiteetteihin on suhtauduttava varovaisesti, koska yleensä lähteissä ei mainita mitä kapasiteetilla tarkoitetaan. Onko se perinteinen sallittu kuorma, koekuormituksen murtokuorma, osavarmuuskertoimien kautta laskettu kestävyys vai jotain muuta?

Paalujen optimaalinen käyttö edellyttää, että paalun rakenteellinen ja geoteknillinen kantavuus ovat samaa suuruusluokkaa. Pietarissa paalutuksen ongelmana on usein paalun geoteknilllinen kantavuus. Kun raskaasti kuormitetut paalut (>1 MN) asennetaan kaivamalla, kiertämällä tai poraamalla riittävän suuren ja taloudellisen geoteknisen kantavuuden saavuttamiseksi paalun kärki ulotetaan yleensä maakerrosten läpi kambrisaveen. Tällöin paalupituudeksi tulee monin paikoin kaupungin keskusta-alueella 30 – 60 metriä. Suurehko paalun läpimitta on suurilla kuormituksilla usein edullinen, koska paalun kärjen kantavuus on yleensä verrannollinen paalun läpimitan neliöön. Vaippavastuksen kasvu on puolestaan suoraan verrannollinen paalun halkaisijaan. Kambrisaven kantavuutta rajoittaa sen pinnan rikkonaisuus.

Pietarin alueen kambrisaven lujuudesta ja rakenteesta ei ole tämän kirjoittajalla selvää käsitystä. On olettavaa, että saven lujuus on verrattain alhainen ja se on ainakin pintaosissaan lujuudeltaan lähempänä maata kuin heikkoa kalliota. Kambrisavessa on välikerroksina paikoin hiekkakiveä, joka voi olla saveakin heikompaa.

Paalutyypin kilpailukykyä parantavat paalun suuri sallittu kuorma ja kuormituksen aiheuttamat pienet muodonmuutokset sekä asennusmenetelmän mahdollisten esteiden läpäisykyky.

Pietarin olosuhteissa käytetään tällä hetkellä melko paljon maata syrjäyttämällä asennettavia porapaaluja. Tällöin maa tiivistyy ja maapohjan vaippavastus kasvaa ja syrjäyttäminenkin on hallitumpaa kuin lyöntipaaluissa. Syrjättävien paalujen teossa tarvitaan suojaputkea tai työputkea, joka parantaa työn laatua. Työnaikainen vaippaputki helpottaa maan-, veden- ja valupaineiden hallintaa. Syrjäyttäviä paaluja ovat esimerkiksi Fundex ja osin Atlas-paalu. Syrjäyttävien paalujen

läpimitta on yleensä suhteellisen vähäinen, yleensä alle 600 mm, jolloin niiden kantavuus on vähäisempi kuin syrjäyttämättömien suurempiläpimittaisten kaivinpaalujen. Syrjäyttävien paalujen kantavuutta rajoittaa usein myös paalupituus, joka suurimmillaankin on yleensä alle 40 metriä. Tällöin syrjäyttäviä paaluja ei voida aina asentaa Pietarissa syvään kambrisaveen.

Gazprom-Arenan paalutusta. Paalupituus 30 metriä ja halkaisija 520 mm (Khutornoi ja Popov 2010).

Taulukossa on esitetty suuntaa-antavasti yhteenveto tässä kirjoituksessa esiteltävistä suurpaalutyypeistä.

Yhteenveto suurpaaluista.

	Syrjäyttävä paalu	Kitka-paalu	Tuki-paalu	Vaippa-putki	Suuret kuormat	Suuri työ-saavutus
Fundex	x	x		x		x
Atlas	x	x		(x)		x
Double-Rotary		x		x		x
CFA		x				x
FDA		x				x
Kelly			(x)	x	x	
Barette			x	(x)	xx	

Syrjäyttämättömiä paaluja ovat esimerkiksi CFA-paalut, eri menetelmin tehtävät kaivinpaalut ja baretet. Syrjäyttämättömien paalujen suosio on pysynyt vakaana vaikeissa pohjaolosuhteissa. Vaikeissa pohjaolosuhteissa, joissa on pehmeitä maakerroksia ja pohjavedenpinta korkealla, käytetään yleensä työputkea työn laadun varmistamiseksi ja apuvälineitä kovan pohjan käsittelyssä.

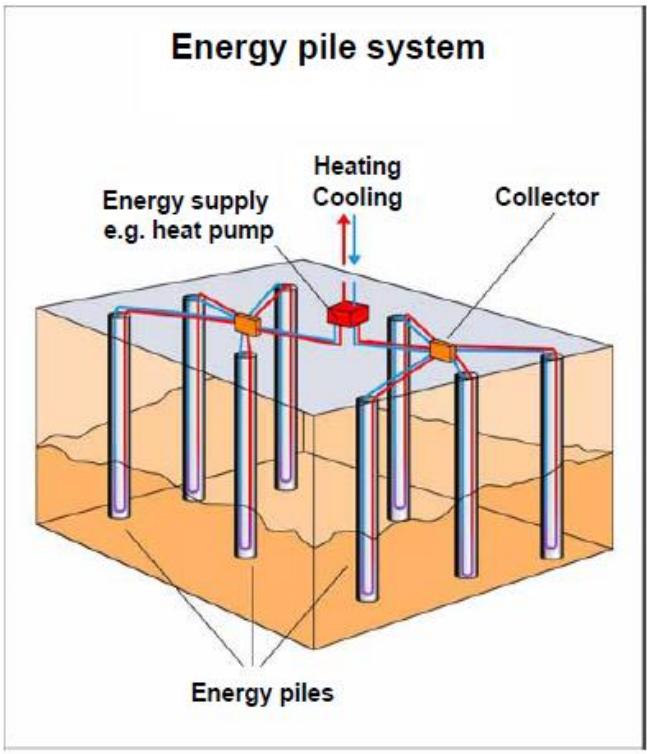
Paalujen etuina on laaja mahdollisuus vaihdella paalun läpimittaa kuormitusten perusteella ja suuri paalupituus. Paalujen läpimitat vaihtelevat noin 350 mm ja 1500 mm välillä. Asennuksessa voidaan läpäistä suhteellisen helposti tiiviitäkin kerrostumia. Asennusmenetelmä löyhdyttää maata paalun ympäristössä, jolloin vaippavastus on pienempi syrjäyttäviin paaluihin verrattuna. Syrjäyttämättömät kaivinpaalut ulotetaan yleensä tukipaaluiksi kambrisaveen.

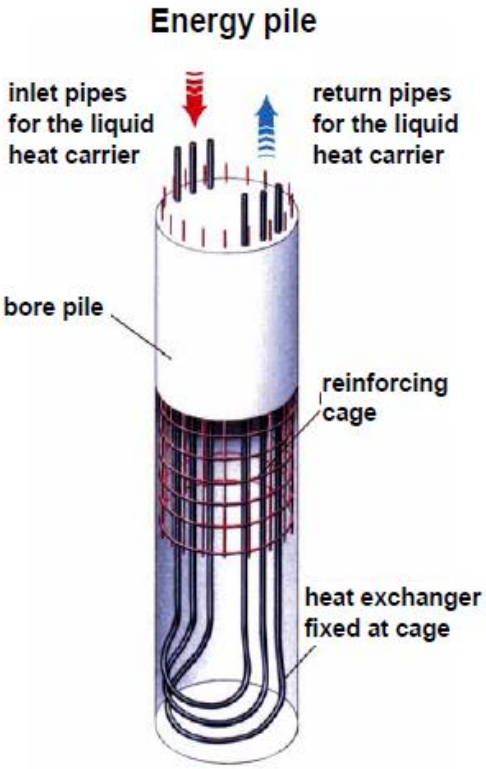
Tukipaalun tavoin käytettyjen kaivinpaalujen kapasiteetit ovat olleet yllättävänkin suuria. Halkaisijaltaan noin 800 mm kaivinpaalujen kapasiteetti on ollut noin 6 MN ja suurempien halkaisijaltaan 1500 mm paalujen jopa 15 MN. Nämä vastaavat suuruusluokaltaan Suomessa peruskallioon ulottuvien kaivinpaalujen sallittuja kuormituksia. Stockmannin tavaratalon suurimmat kaivinpaalut ovat halkaisijaltaan 1500 mm ja uuden Gazpromin pääkonttorin paalut jopa 2000 mm.

Suurpaaluja tai kaivantoseiniä (baretteja) käyttämällä voidaan tehdä rakennuksen kellarinseinät patoseininä, jolloin kaivannon tukemista työnaikaisin tukiseinin ei aina tarvita.

Suurpaalutus on joissakin rakennusprojekteissa aiheuttanut ympäristön rakenteille huomattavia siirtymiä. Rakennukset ovat voineet vaurioitua jopa korjauskelvottomiksi. Siirtymiä on aiheuttanut mm. asennustärinä, huolimaton työputken käsittely ja väärä työjärjestys sekä vaippaputken puuttuminen. Asennuksen aikana on valupaineen oltava selvästi maan- ja vedenpainetta suurempi. Tämän saavuttamiseksi on joskus kasvatettu vesi-sementti suhdetta. Tämä vaikuttaa kuitenkin haitallisesti betonin lujuuteen ja pitkäaikaiskestävyyteen. Toisaalta valupaine ei saa olla liian suuri, koska se voi aiheuttaa betonin siirtymistä maan sisään. Laadunvalvonnassa on otettu viime aikoina käyttöön reaaliaikaisia mittausmenetelmiä, joiden avulla voidaan monipuolisesti valvoa paalutuksen laatua.

Pietarissa paalut ovat pitkiä, jolloin olisi hyvät mahdollisuudet asentaa paaluihin lämmönkeräystä ja jäähdytystä varten putkistot. Energiankeräysputkisto kiinnitetään raudoitukseen ja asennetaan paalun teon yhteydessä.





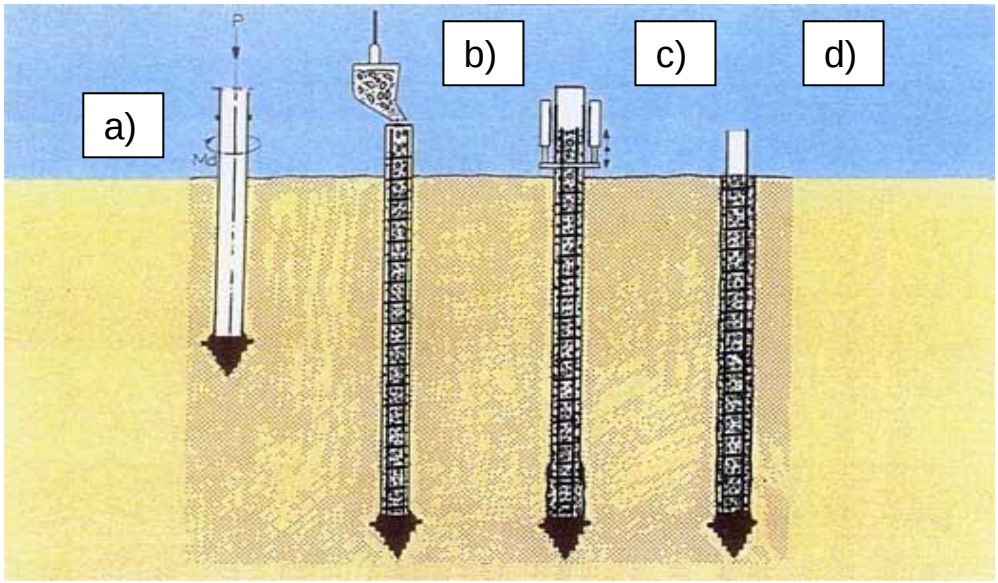
Energiapaalun periaate ja lämmönkeräysputkiston asennus raudoitukseen (Ebnöther 2008).

Fundex- paalu

Kiertämällä asennettavia maata syrjäyttäviä Fundex- paaluja on tehty Pietarissa kymmenen vuoden aikana yli 30 000 kappaletta, keskipituuden ollessa noin 20 m.

Fundex-paalun kärki ja vaippaputki (Mangushev 2010).

Paalun halkaisija voi olla 350, 450, 520 tai 630 mm ja ruuvattavan kärjen halkaisija jonkun verran tätä suurempi. Asennettaessa vääntömomentti on 120-500 kNm ja suurin paalupituus yleensä noin 35 m. Työsaavutus on noin 10 – 20 paalua työvuorossa. Paalun sallittu kuorma on yleensä suurimmillaan noin 2500 kN. Fundex-paalun asennus on tärinätön. Koska paalu syrjäyttää maata, asennus lisää vaippavastusta. Tiiviissä hiekassa paalun tunkeutumista voidaan edistää erikoisjärjestelyin vesihuuhtelulla.

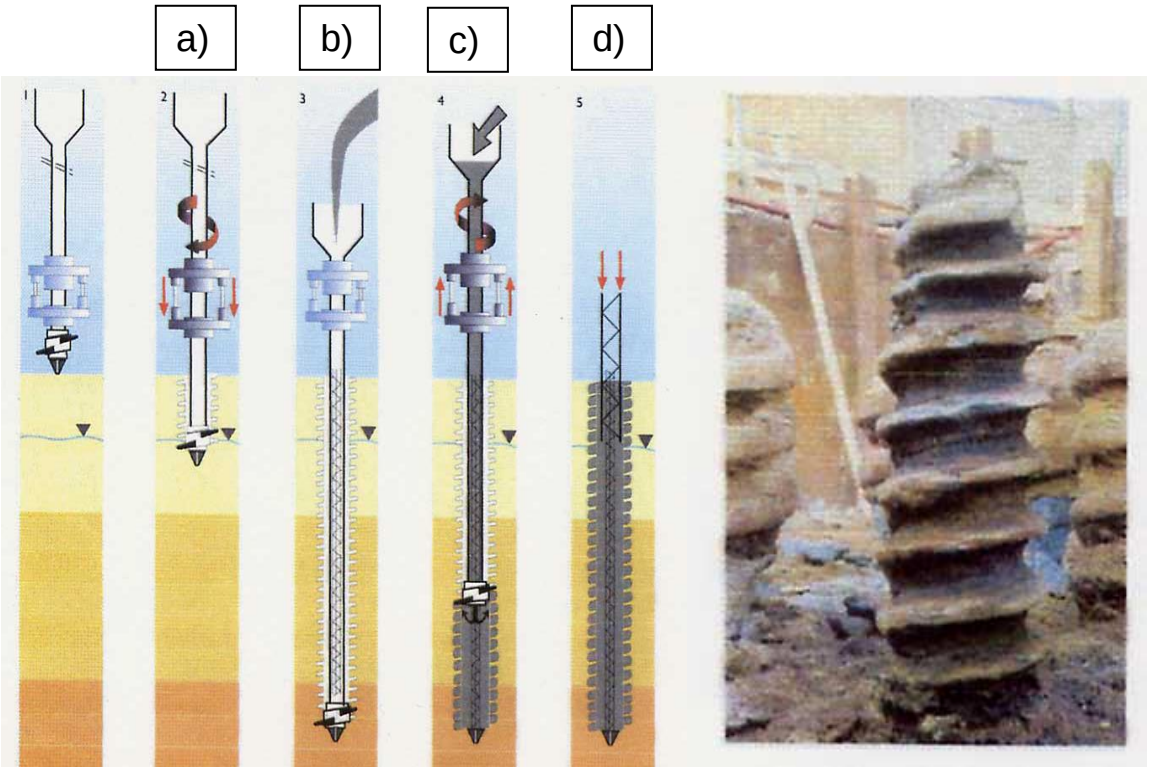


Fundex-paalun teko. a) Paalun vaippaputki kierretään maahan b) Paalun raudoitus ja betonointi. c) Paalun vaippaputki nostetaan valun yhteydessä (Mangushev 2010).

Atlas- paalu

Kiertämällä asennettavan maata syrjäyttävän Atlas paalujen nimellisläpimitat ovat: 360, 410, 460 ja 510 mm ja kärkikappaleen halkaisijat vastaavasti: 530, 610, 670 ja 720 mm. Työsaavutus on noin 15 paalua päivässä.

Atlas-paalun asennus alkaa kärkikappaleen ruuvauksella. Määräsyvyydessä asennetaan sisäraudoitus ja vedetään asennuskärki ylös. Samanaikaisesti tehdään betonointi valuputken kautta. Ulkopuolinen täydentävä raudoitus asennetaan valun jälkeen.



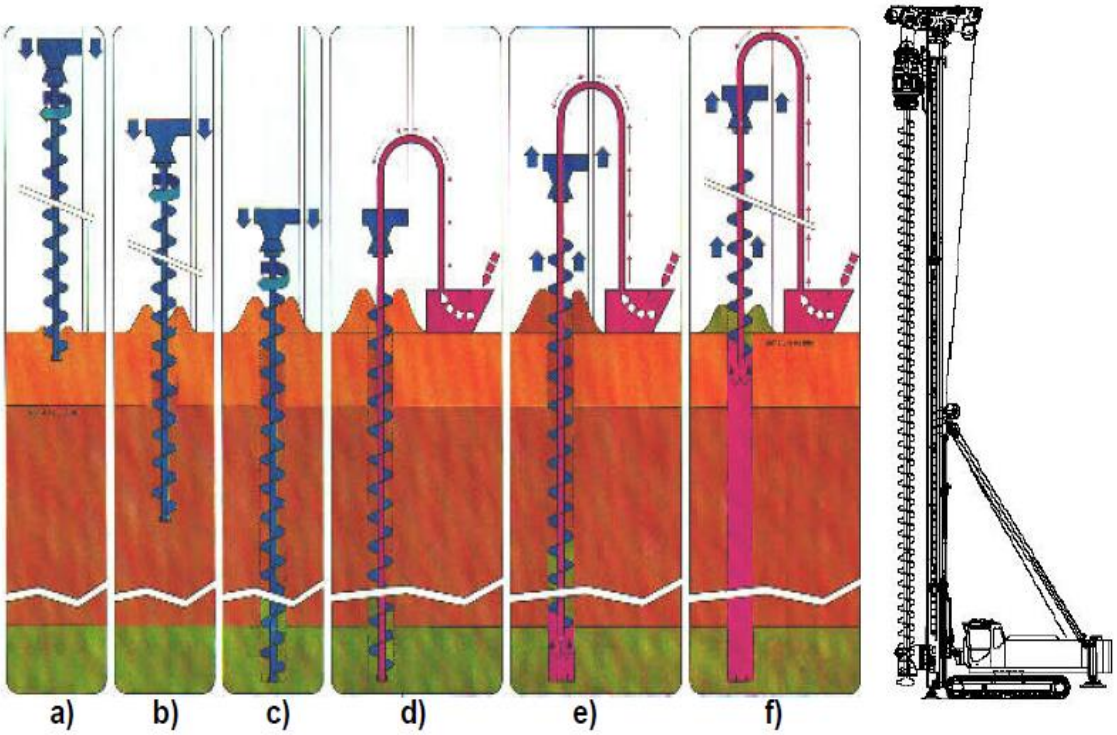
Atlas-paalun teko a) Ruuvaus b) sisäraudoituksen asennus c) valu ja kärkikappaleen nosto d) raudoitus (Mangushev 2010) .

Atlas-paalu on toimintatavaltaan samantapainen kuin Fundex- paalu. Eroja on kärkikappaleen ja työputken rakenteessa ja asennuksessa. Koska varsinaista vaippaputkea ei käytetä, on työn teossa otettava huomioon betonin valupaineen ja maan- sekä vedenpaineen vaikutukset. Atlas-paalu soveltuu hyvin vetopaaluksi, koska vaippakierre lisää kapasiteettia ylöspäin suuntautuvaa kuormitusta vastaan.

CFA- paalu

CFA-menetelmässä (Continuous Flight Auger) auger-kaira upotetaan määräsyvyyteen, jonka jälkeen sitä pyöritetään ja nostetaan tasaisesti ylös, jolloin maa nousee kairan mukana ylös ja tukee kaivantoa. Samanaikaisesti noston kanssa pumpataan kaivantoon kairan onton putken läpi betonia, jolloin paalun betonointi tapahtuu kairaa kaivannosta nostettaessa. Näin betoni tukee kaivantoa ja estää sitä sortumasta. Valun jälkeen betoniin asennetaan paalun raudoite.

Menetelmä on yleisesti käytössä muun muassa Keski-Euroopassa, jossa suotuisat pohjaolosuhteet mahdollistavat tekniikan tehokkaan käytön. Pietarin kaltaisissa olosuhteissa työsaavutus on noin 25-30 paalua viikossa. Yleisimmin käytetyt koot ovat 300, 450, 600 ja 750 mm ja suurin koko 1200 mm.



CFA-paalun teko, a-c paalun poraus määräsyvyyteen, d-f porauskaluston nost, samanaikaisesti paalun betonivalu valuputken kautta. Raudoitus asennetaan valun jälkeen (Asikainen 2009).

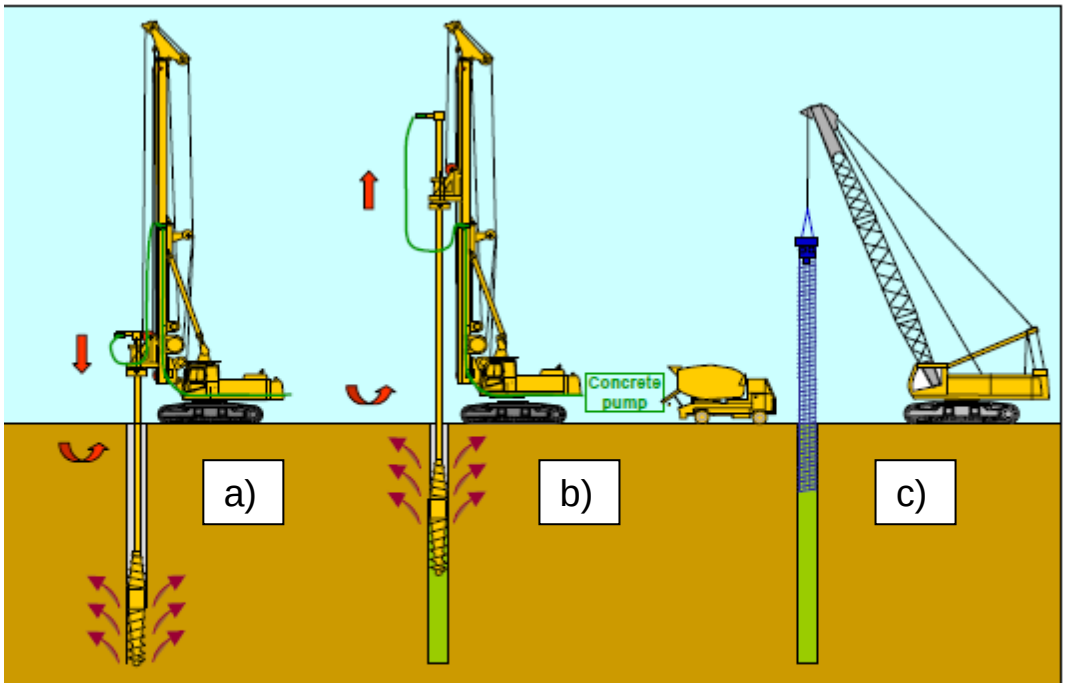
CFA-paalun asennus on tärinätön ja maata syrjäyttämätön. Koska työputkea ei käytetä, paalun teko on altis työvirheille. Paalu toimii lähinnä kitka- tai koheesiopaaluna, jolloin sen kapasiteetti on sen kokoon nähden pieni. Paalun asennus rikkoutuneeseen kambrisaveen on vaikeaa. Paalun vaippavastusta voidaan kasvattaa erityismenettelyin esimerkiksi korkeapaineinjektoinnilla.

Ruuvattava paalu, FDA- menetelmä

Paalun teko FDA-menetelmällä on samantapainen kuin CFA-paalun asennus. FDA-menetelmässä maata ei kuitenkaan kaiveta vaan se tiivistyy ruuvauksen ta-

voin paalun ympäristössä, jolloin vaippavastus kasvaa. Erillistä vaippaputkea ei käytetä, jolloin työn laaturiski Pietarin olosuhteissa kasvaa. Suurin paalun kapasiteetti on noin 1800 kN.

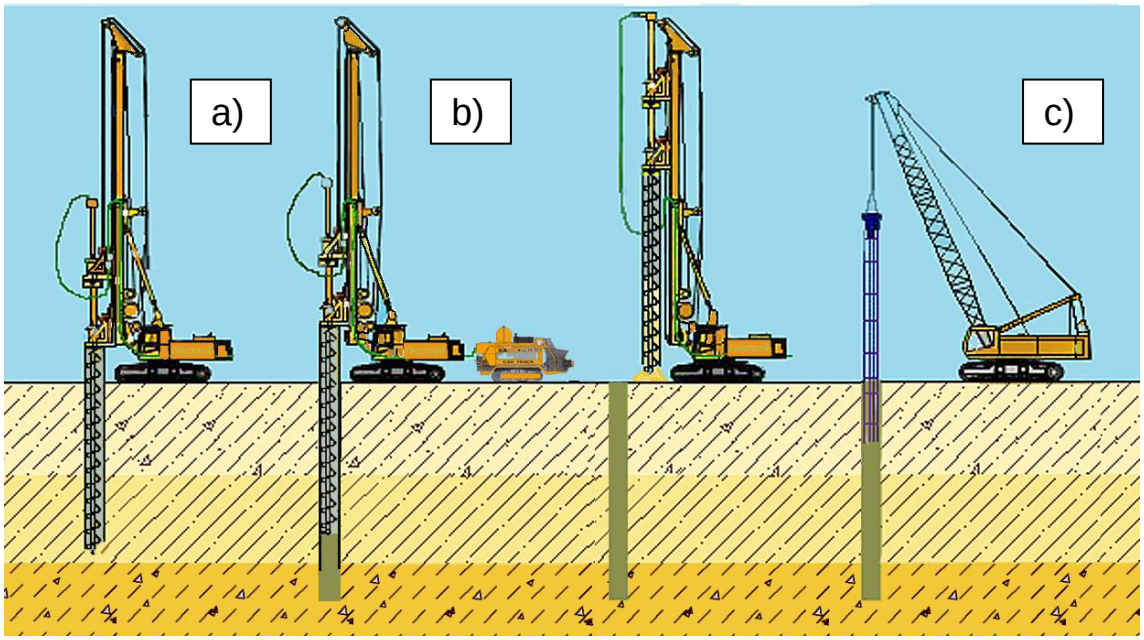
Ruuvattava paalu, FDA- menetelmä (Mangushev 2010).



Paalun teko FDA- menetelmällä a) Ruuvaus ja ympäröivän maan tiivistys, b) betonointi ja c) raudoitus (Mangushev 2010).

Kaivinpaalu, Double-rotary-menetelmä

Paalun teko on samantapainen kuin CFA-paalussa. Double rotary menetelmässä maahan asennetaan samanaikaisesti vaippaputki ja auger-kaira, pyörittämällä niitä vastakkaisiin suuntiin. Vaippaputken käyttö vähentää asennuksen riskejä. Kun paalu on määräsyvyydessä, aloitetaan betonivalu auger-kairan valuputken kautta ja samanaikaisesti nostetaan maa pois kairalla. Raudoitus asennetaan jälkikäteen.



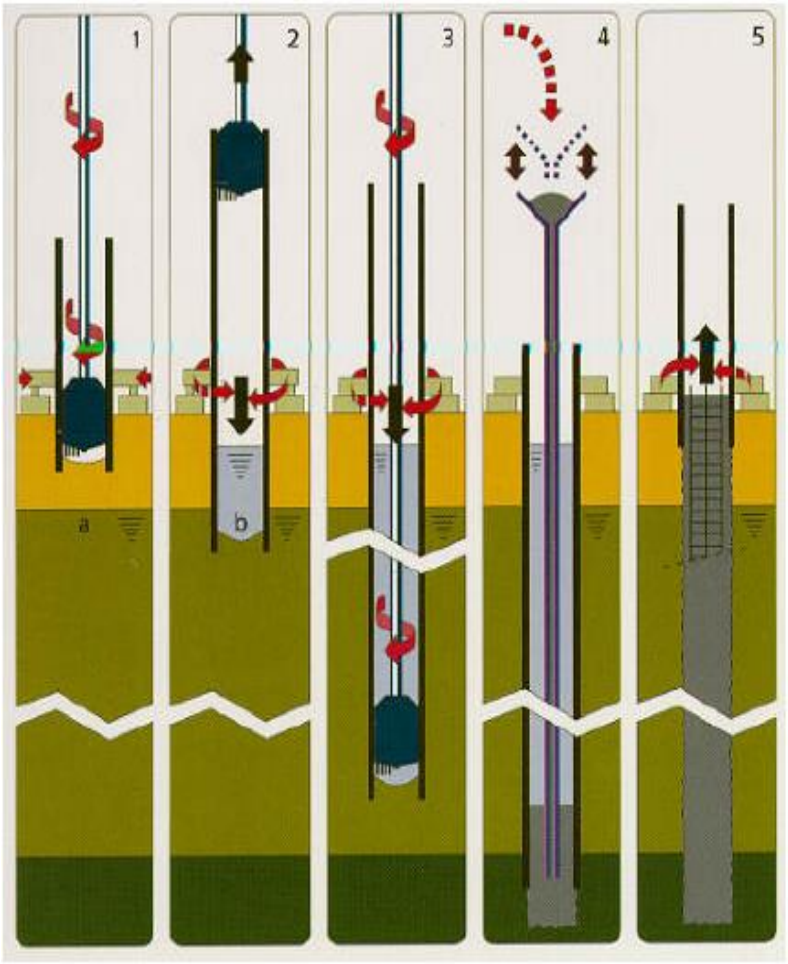
Paalun teko Double-rotary-menetelmällä a) Vaippaputken ja auger- kairan asennus, b) betonointi ja c) raudoitus (Mangushev 2010).

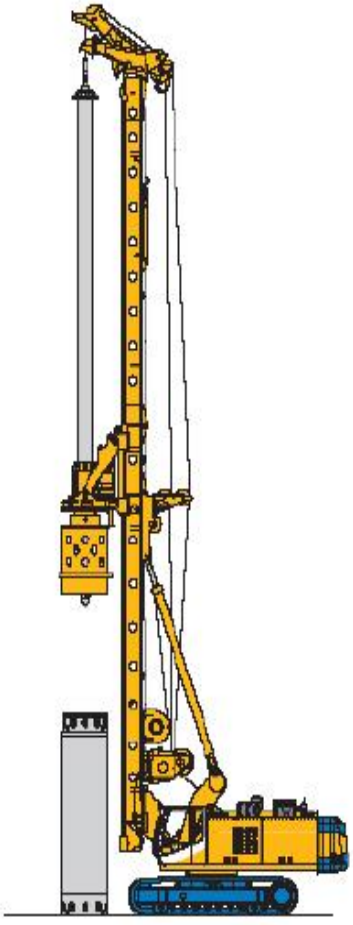
Kaivinpaalutus Kelly- menetelmällä

Kelly-menetelmässä työputki asennetaan koneen mastossa olevalla pyörittäjällä kiertäen ja painaen. Paalun halkaisija on tavallisesti 400 – 1200 mm.

Maa kaivetaan putkesta Kelly-tangon päässä olevalla työkalulla. Perustyökaluja ovat kannukairat, lyhyet auger-kairat ja sydänkairat. Kun työputki on tyhjennetty ja määräsyvyys saavutettu, pohja meislataan tasaiseksi kiertämällä ja painamalla.. Paalun pohjan tasauksen jälkeen paalu raudoitettaan ja betonoidaan. Pietarin kaltaisissa olosuhteissa työsaavutus on noin 5 – 15 paalua viikossa.

Pietarin olosuhteissa paalu voidaan tehdä kitkapaaluksi, jolloin vaippavastus siirtää pääosin kuormat ympäristön maapohjaan. Tällöin ei tarvita kallion käsittelyä ja paalu on edullisempi ja nopeampi tehdä, mutta kantavuus jää pienemmäksi. Kitkapaaluun voidaan tehdä anturalaajennus erikoistyökalulla

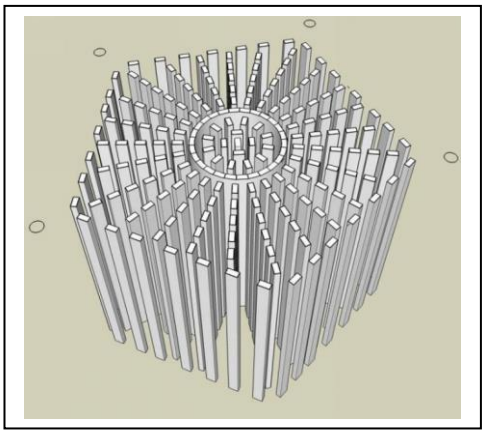




Kaivinpaalutus Kelly- menetelmällä (Asikainen 2009).

Kaivantoseinät, Baretet

Kaivantoseinät eivät varsinaisesti ole paaluja, mutta niitä voidaan käyttää myös paalujen tapaan siirtämään pystysuuntaisia keskitettyjä kuormia maapohjaan.



Gazpromin pilvenpiirtäjän barettejen rakentamista (Bakhtina ja Viunov 2010).

Barreteista kerrotaan tarkemmin kaivantojen yhteydessä. Gazpromin pilvenpiirtäjä, jolle ei myönnetty rakennuslupaa, suunniteltiin perustettavaksi barretteille. Koeperustukset ennätettiin tehdä. Barretet ovat 80 meriä pitkiä ja ne ulottuvat 30 metriä kambrisaveen. Kambrisaven yläosa on rikkonaista, jonka läpi rakenteet on ulotettu kiinteään kerrostumaan.

Barrettejen läpimitta on 3500 x 1500 mm ja niiden kapasiteetti pystykuormille on 80 MN. Rakennuksen kokonaispainumaksi, joka on pääosin paalun kimmoista ko-

koonpuristumaa, on laskettu noin 60 mm. Suuren taivutuskapasiteetin vuoksi barretet ottavat hyvin vastaan merkittävät tuulikuormat ilman suuria siirtymiä.

Kuva Matti Hakulinen.

Pieniläpimittaiset paalut

Pieniläpimittaisia paaluja käytetään pääasiassa perustusten vahvistamisessa.

Suomessa yleisesti käytettävien ohutläpimittaisten teräspaalujen taloudellisuus perustuu paitsi niiden vähäiseen tärinää ja lyötävyyteen ahtaissa tiloissa, teräkselle sallittuun suureen paalukuormaan. Suuri paalukuorma edellyttää paalun ulottamista yleensä kallioon. Pietarin pohjasuhteissa tämä ei ole mahdollista. Kambrisaven heikko lujuus rajoittaa pieniläpimittaisten tukipaalujen käyttöä. Tällöin on usein edullista jättää paalut kohtuullisesti kantaviin moreenikerroksiin.

Pietarissa pieniläpimittaiset paalut ovat yleensä olleet venäläisiä porapaaluja tai läpi-injektoitavia Titan-paaluja. Paalujen kantavuutta löyhissä maakerrostumissa on pyritty lisäämään kärjen laajennuksella. Laajennuksen tekemiseen on eri menetelmiä. Venäjällä on yleisesti käytetty laajennuskappaleen tekoon avarruslaitteella. Toisaalta laajennuskärjen tekeminen on erillinen lisätyövaihe, jonka tekeminen ei nykyisin useinkaan ole edullista.

Perinteisten pieniläpimittaisten paalujen kilpailukykyä on vähentänyt suihkuinjektoinnin hyvät käyttömahdollisuudet perustusten vahvistustöissä.

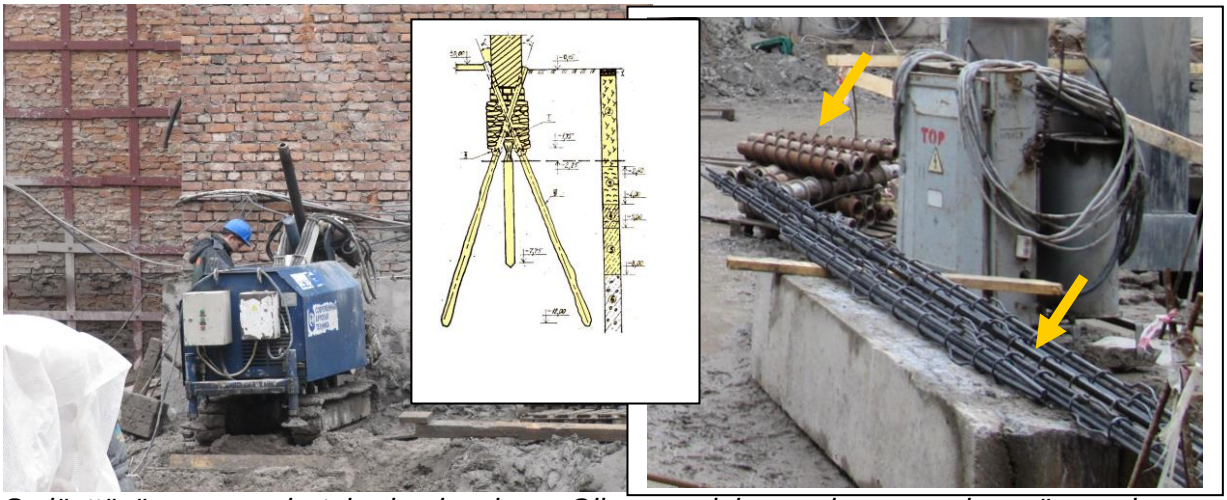
Pieniläpimittaisia paaluja (Mangushev 2010).

Koska paalut ovat harvoin ovat tukipaaluja, paaluperustukset painuvat. Painumaongelmat korostuvat, kun olemassa oleviin rakennuksiin tai niiden viereen tehdään uusia perustuksia, jolloin uudet ja vanhat rakenteet painuvat eri tavalla.

Venäläinen porapaalu

Perinteisesti porapaalu on kaivettu syrjäyttämättömänä bentonittilietteen tukemassa kaivannossa. Paalun kärki on laajennettu erillisellä avartimella. Kaivun jälkeen paalu raudoitetaan ja valetaan. Raudoitus määrittää paalun pienimmän sivumitan, joka on noin 200 mm. Koska työ on monivaiheinen ja vaatii huolellisuutta, on näiden porapaalujen käyttö vähentynyt.

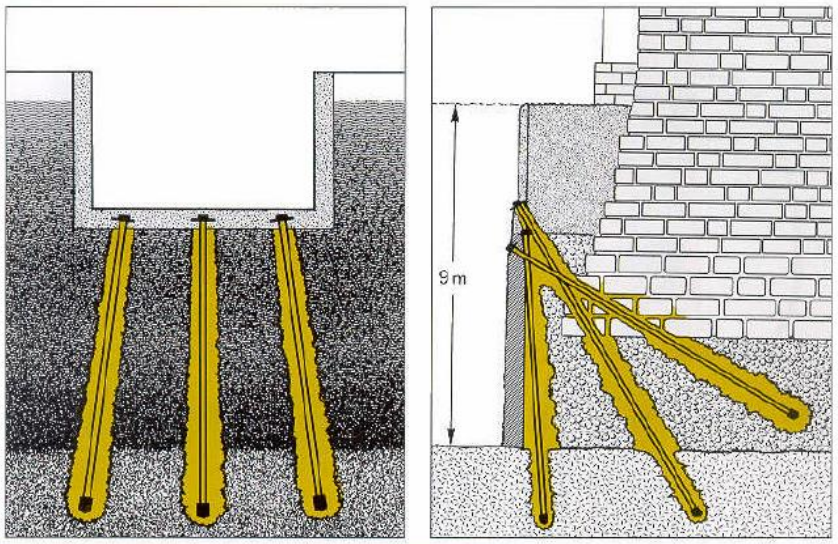
Uudemmassa kehittyneemmässä menetelmässä porapaalu tehdään Fundex-paalun tavoin syrjäyttävänä.



Syrjäyttävän porapaalu teko juuripaaluna. Oikeanpuoleisessa kuvassa ylemmän nuolen kohdalla ovat poraputket ja alemman nuolen kohdalla raudoitus (Kuva Matti Hakulinen).

Titan- paalu

Läpi-injektoitava Titan-paalu sopii hyvin Pietarin pohjasuhteisiin, jossa tarvitaan pieniläpimittaista vaipalla kantavaa paalua. Paksut pehmeät kerralliset savet voivat rajoittaa paalun käyttömahdollisuuksia.



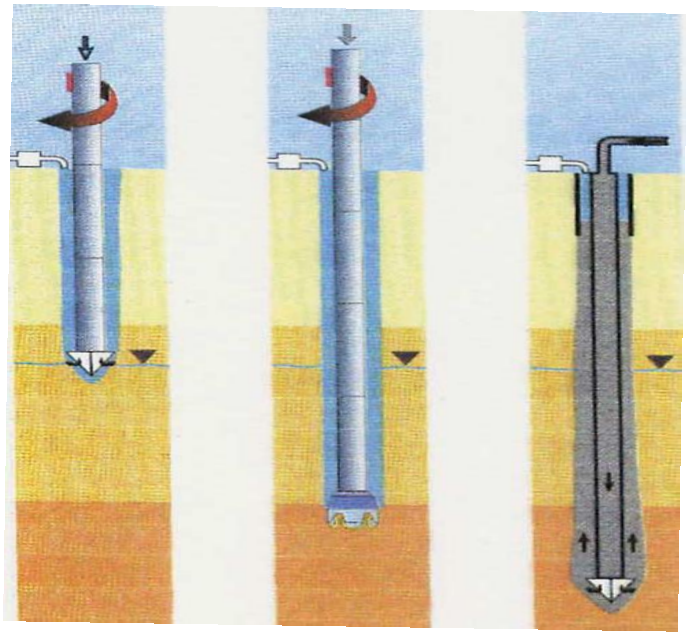
Titan-paalun käyttökohteita (de Neef of Finland, esite).

Titan- paalu koostuu kierteisestä kuormaa siirtävästä teräsputkesta sekä sen ympärillä olevasta sementtilaastivaipasta. Sementtilaastivaippa siirtää kuormat maahan. Vaippalaasti injektoidaan korkealla paineella profiloidun teräsputken kautta samalla putkea alaspäin painaen ja pyörittäen.

Titan paalun injektointi maanpinnan yläpuolella ja valmis maasta kaivettu paalu (de Neef of Finland, esite).

Titan-paalua voidaan käyttää suotuisissa olosuhteissa myös maa-ankkurina.

Injektoitu Franki-paalu



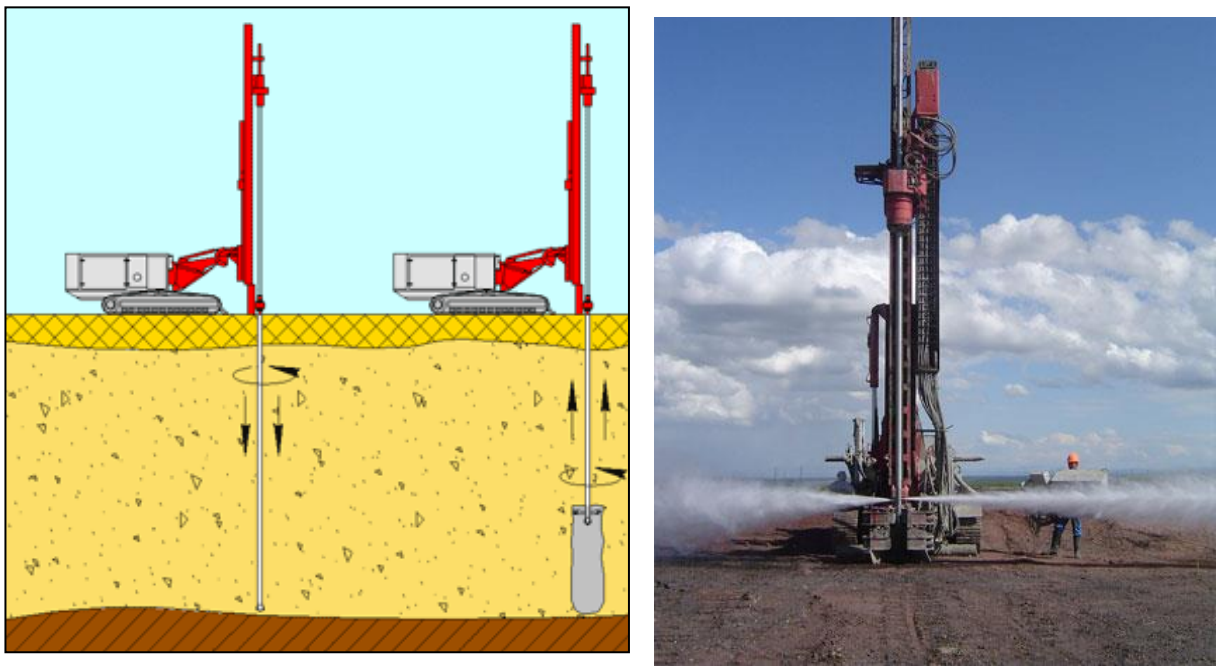
1. Paalun injektointiputken asennus poraamalla käyttäen vesihuuhtelua.

2. Injektointi.

Injektoidun Franki-paalun asennus. Paalun halkaisija on 150 – 180 mm (Mangushev 2010).

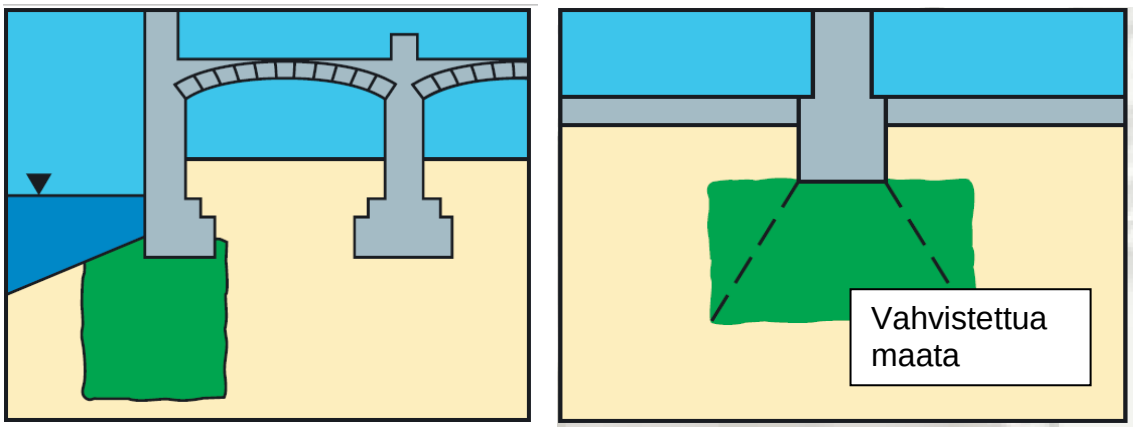
Suihku-injektointi

Suihkuinjektoinnin tuloksena ei synny paalua, vaikka injektoitu maa paalua muistuttaakin, vaan vahvistettua maata. Suihkuinjektointikalustolla voidaan läpäistä betoni- ja tiilirakenteita ja menetelmällä voidaan vahvistaa kaikenlaisia maapohjia, jolloin se soveltuu hyvin perustusten vahvistamiseen.



Suihkuinjektointirakenne ja kalusto (Mangushev 2010).

Työn aikana injektointiputki ulotetaan maahan haluttuun syvyyteen. Yleisessä menetelmässä putken päässä on ylempänä vesisuutin ja sen alapuolella sementtilaastisuutin. Injektoitaessa putkea pyöritetään ja samalla nostetaan ylöspäin sekä samanaikaisesti painetaan suurella paineella maahan vettä ja sementtiä. Lopputuloksena on paalumainen pilari, jonka halkaisijaa voidaan säätää ja on kooltaan noin 500 – 1000 mm. Suihkuinjektoinnilla on lukuisia käyttökohteita, joista perustusten vahvistaminen on yleinen.

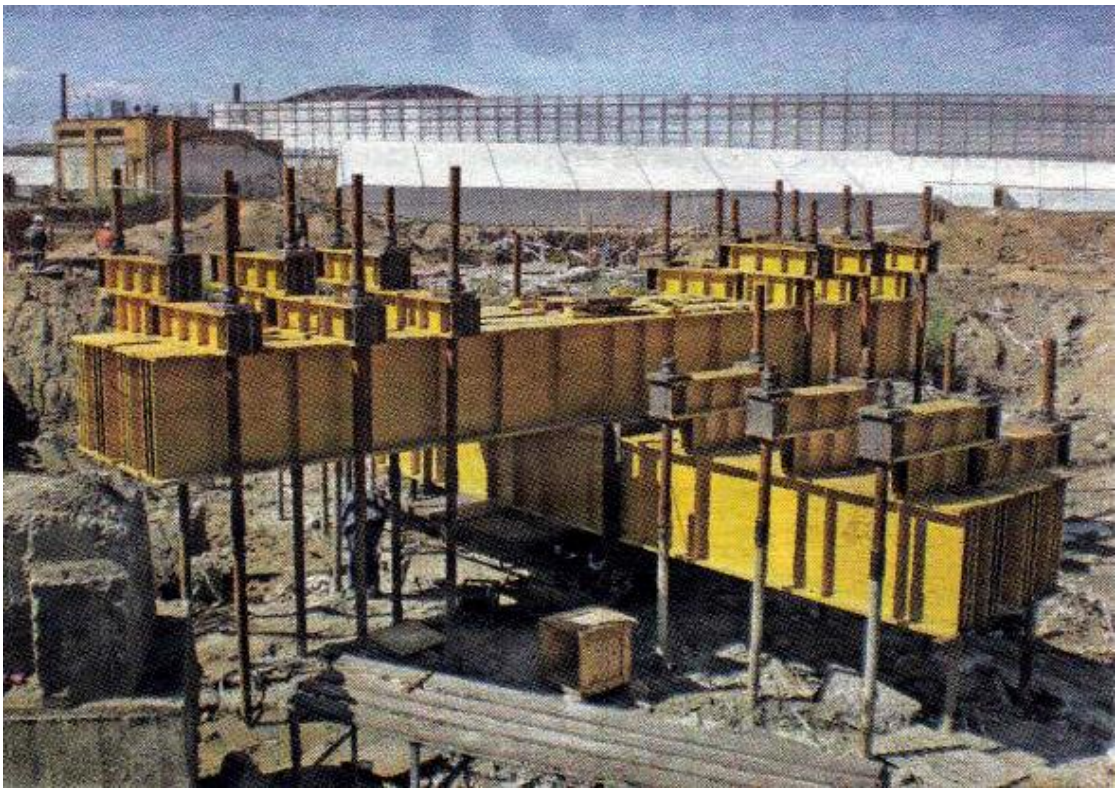


Suihkuinjektointi sopii hyvin perustusten vahvistamiseen (Mangushev 2010).

Paalujen laadunvalvonta

Paalujen laadunvalvontaan sisältyvät esimerkiksi geoteknillisen kantavuuden määritys sekä paalun ehjyyden ja rakenteen toiminnan varmistus.

Kitka- ja koheesiopaalun kantavuus on yleensä verrattain alhainen ja vaikeasti laskennallisesti määritettävissä. Venäläisen käytännön mukaan kantavuus voidaan määrittää SNiP-normin perusteella laskennallisesti tai koekuormituksin. Pietarin vaativissa olosuhteissa tehdään runsaasti staattisia koekuormituksia.



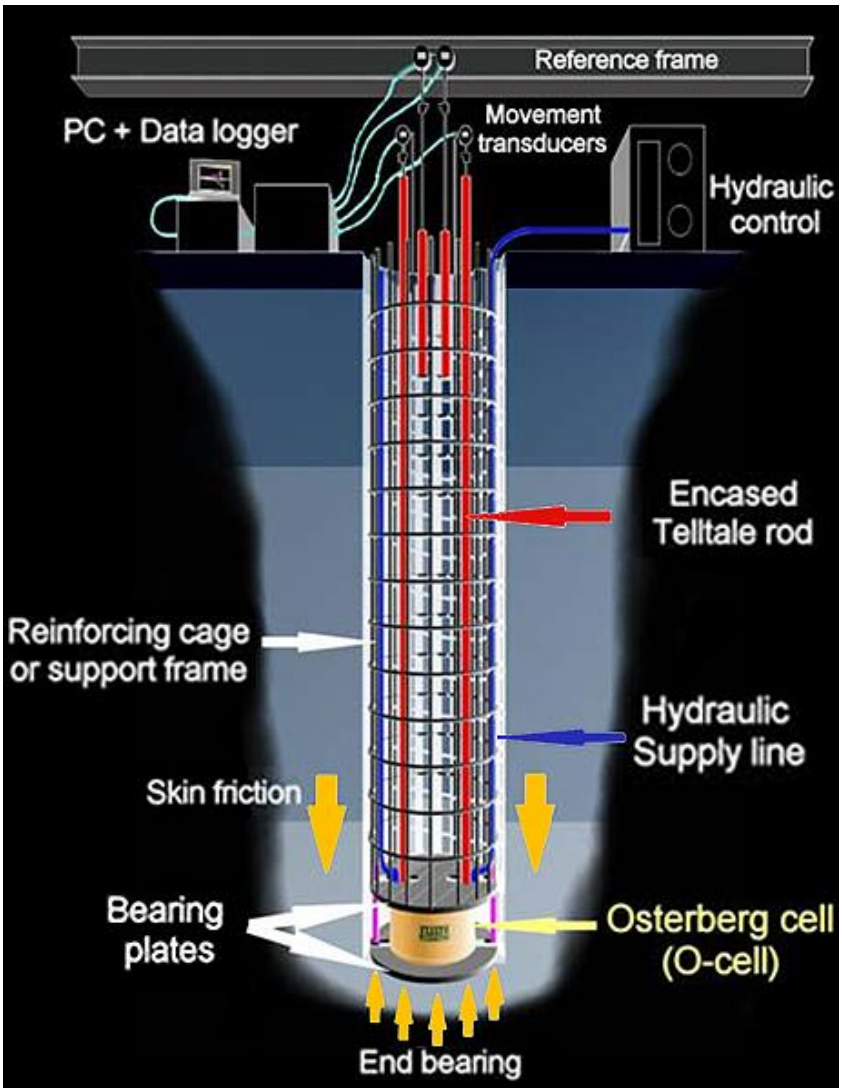
Suurpaalun staattinen koekuormitus Gazpromin pilvenpiirtäjän työmaalla (Bakhtina ja Viunov 2010).

Staattisten koekuormitusten kustannukset ovat suuret, koska kuormituksen vastavoima otetaan vastaan tavallisesti ankkureilla tai vetopaaluilla. Lisähaitta on menetelmän valmistelun vaatima pitkä aika.

Staattista koekuormitusta selvästi edullisemman dynaamisen koekuormituksen (PDA-mittaus) soveltaminen Pietarissa on vaativaa. Suurpaaluilla ongelmana on riittävän iskuenergian järjestäminen ja teräsbetonipaalujen iskun kestävyys. Lisäongelmana on se, että geoteknisen kapasiteetin määrittämisen edellyttämä iskuaallon heijastuminen, ei ole niin selväpiirteistä kuin suomalaisissa olosuhteissa, joissa iskuaalto yleensä heijastuu selvästi kovasta pohjasta.

Koekuormituksia järjestettäessä ja tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon, että kitka- ja koheesiopaalun kantavuus kasvaa merkittävästi ajan mukana. Suurin osa kantavuuden muutoksesta tapahtuu ensimmäisen kahden viikon aikana.

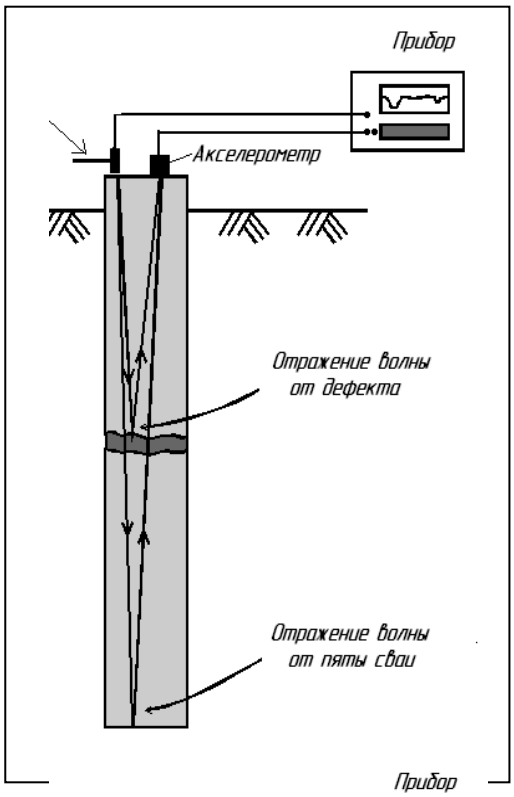
Staattisen koekuormituksen suuria kustannuksia voidaan vähentää kuormittamalla paalun kärkeen asennettua kuormituksen mittaavaa O-selliä. Menetelmällä voidaan selvittää erityisesti paalun kärjen kantavuus mittaamalla kuormituksen yhteydessä tapahtuva paalun kärjen painuma. Paalun vaippavastus toimii vastapainona, joten menettely edellyttää, että vaippavastus on kärkivastusta suurempi. Vaippavastuksen kantavuus arvioidaan välillisesti, koska ylöspäin suuntautuva kuormitus poikkeaa paalun alaspäin kohdistuvasta kuormituksesta.

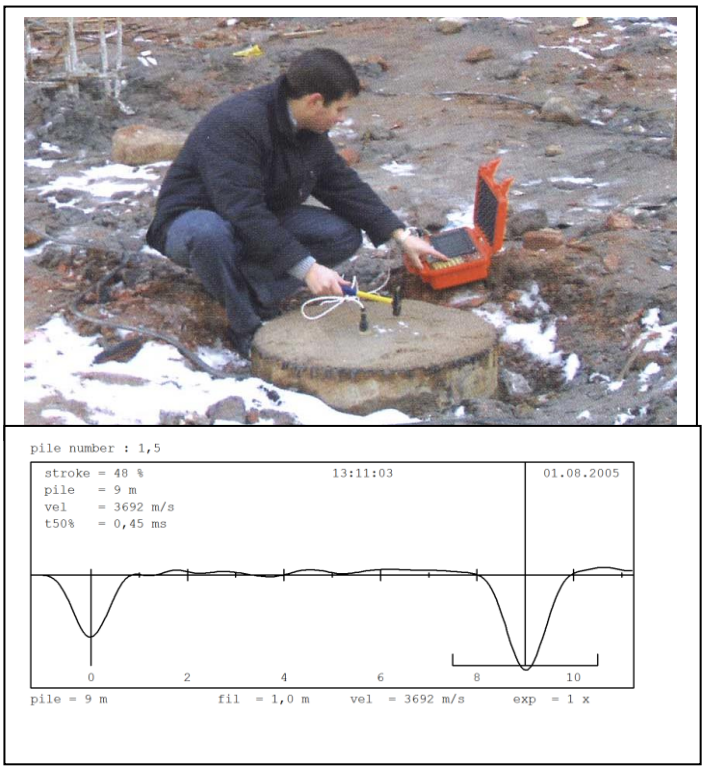


Paalun staattisen koekuormituksen mittaus O-sellillä (Fugro, esite).

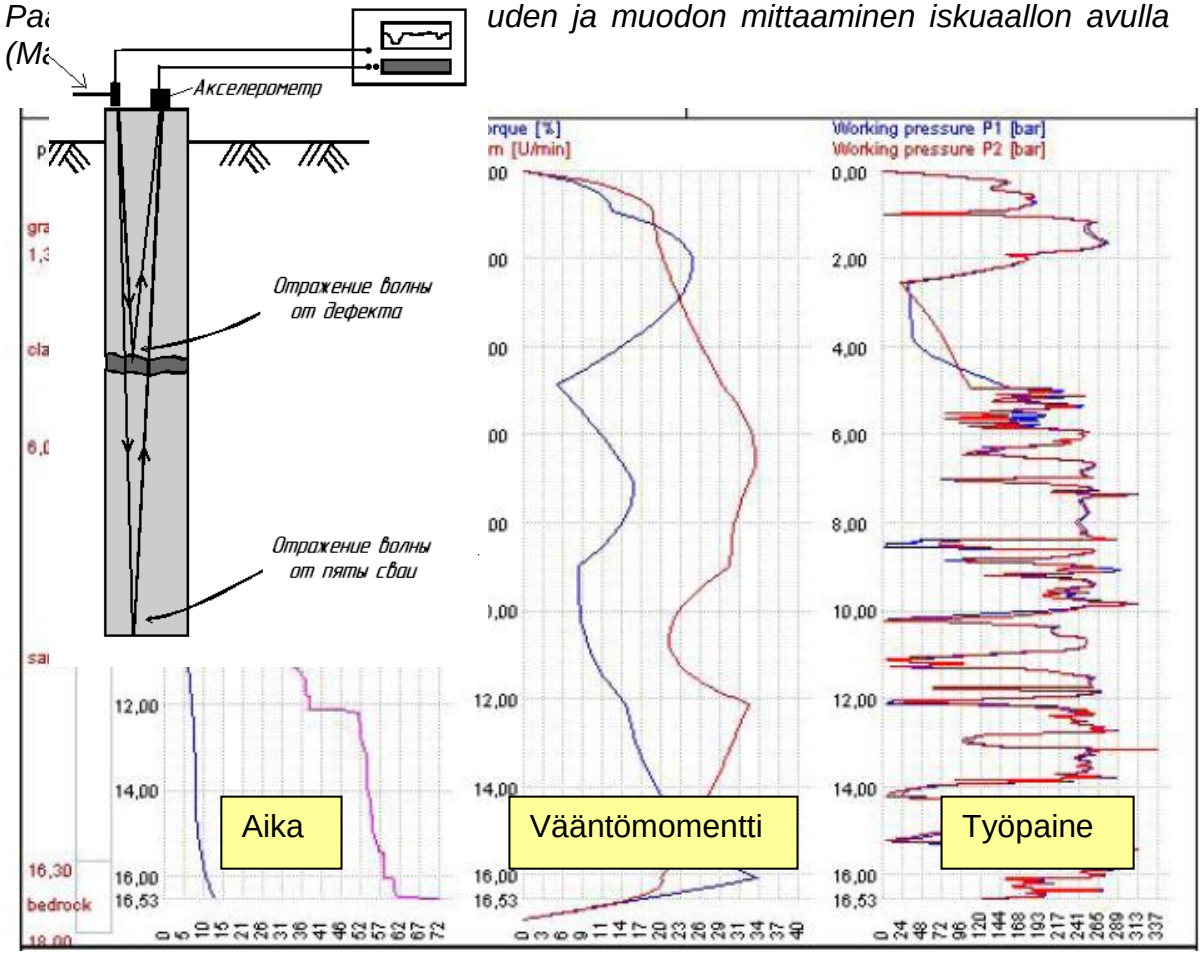
Erityisesti paikalla valettavien paalujen laadunvalvonnassa on tärkeää varmistaa paalun ehjyys, rakenne, pituus ja muoto, jotka voidaan mitata paalun valmistumisen jälkeen iskuaaltomittauksella.

Jo paalun asennusvaiheessa on mahdollista mitata asennuksen laatuun liittyviä parametrejä kuten esimerkiksi asennusaika, käytetty vääntömomentti ja työpaine. Monissa paalutuskoneissa on jatkuvaan seurantaan sopivat mittausjärjestelmät.





Paa uden ja muodon mittaaminen iskuaallon avulla (Ma



Kaivinpaalun asennuksen laadunvalvontaan liittyviä suureita (Bauer, esite).

KAIVANNOT

Atmosferan kaivanto (Mikhaylenko ja Sulina 2010).

Pietarin keskustassa ei Neuvostoliiton aikana tehty juurikaan syviä kaivantoja metron liukuporrasyhteyksien edellyttämiä kaivantoja lukuun ottamatta. Syvien kaivantojen tarvetta ovat lisänneet erityisesti kasvavan henkilöautoliikenteen pysäköintitarve. Pysäköinti- ja muita logistiikkatiloja voidaan sijoittaa syviin monikerroksisiin kellareihin. Liikenteellisesti on edullista rakentaa pysäköintitiloja metroasemien, julkisten rakennusten, hotellien ja tavaratalojen yhteyteen.

Pietarin keskustan pohjasuhteissa syvien kaivantojen tekeminen on vaativaa. Koska maapohja on pääosin hienorakeista ja pohjavedenpinta lähellä maanpintaa ovat maan- ja vedenpaineet suuria. Kaivantojen tukiseinien vaakakuormia ei voida siirtää maa-ankkureilla maapohjaan, koska ankkureiden kapasiteetit ovat alhaiset. Lähes aina kaivannot on tuettava sisäänpäin, jolloin rakentaminen tapahtuu usein ylhäältä alaspäin ns. top-down-menetelmällä. Top-down-menetelmässä kaivu ahtaissa tiloissa ja maamassojen siirto kaivannosta aiheuttaa lisäkustannuksia. Kaivua ja kuljetusta voi vaikeuttaa hienorakeisen maan häiriintyminen veden vaikutuksesta.

Syvien kaivantojen teko viereisten rakennusten läheisyydessä lisää edelleen työn vaativuutta. Kaivannon ulkopuolella tapahtuu aina maan siirtymiä. Siirtymiä voidaan vähentää rakenteiden valinnalla ja työmenetelmillä. Joissakin tapauksissa siirtymien vuoksi on Pietarissa jouduttu purkamaan kaivannon vaikutusalueella olevia rakennuksia.

Eräänä syynä suuriin siirtymiin on voinut olla tukiseinien riittämätön jäykkyys. Teräsponttiseinän asentaminen on Pietarissa helppoa, mutta sen jäykkyys on syvissä kaivannoissa usein riittämätön ilman lisätoimenpiteitä. Vaikka pontit ulotetaan yleensä moreenikerrostumiin, on siirtymäongelmia ollut esimerkiksi Moskovan aseman liikekeskuksen, Nevski Palace-hotellin ja Marinski-teatterin rakentamisen ympäristössä. Suihkuinjektointia on käytetty tukiseinien jäykkyyksien kasvattamisessa ja myös ns. maanalaisen tuen (”kannen”) rakentamiseen alimmaksi tukiseinän maan- ja vedenpaineita vastaanottavaksi rakenteeksi.

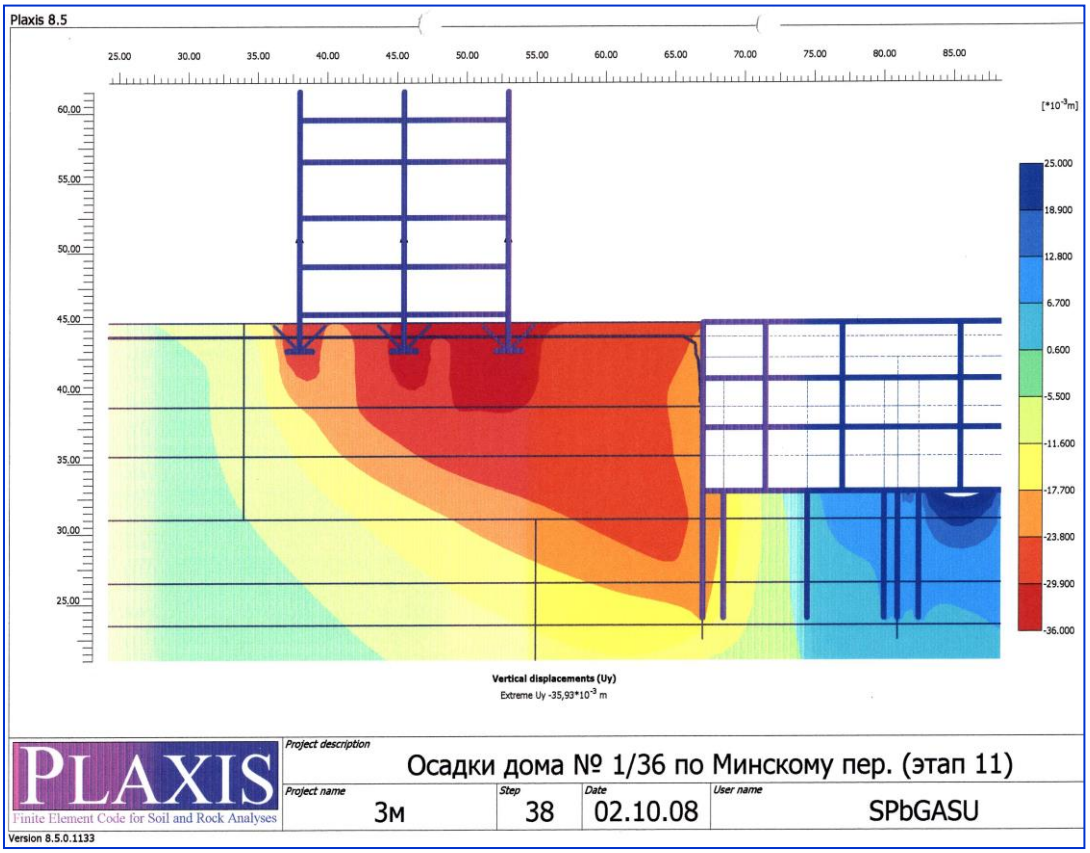
Matalammissa kaivannoissa voi olla edullista käyttää ponttiseiniä pelkästään pohjavedenhallintaan. Kun pontit ulotetaan maanpinnalla olevan silttisen hiekkakerroksen läpi kerralliseen saveen, on suotovirtaus kaivantoon vähäistä. Saveen ulottuvien ponttien rakentamisessa on otettava huomioon mahdollinen pohjannousu kaivantoon pontin alapään ympäri.

Pienemmät väliaikaiset kaivannot voidaan tehdä myös sisäänpäin tuettuna. Tällöin vaakatukien mitat voivat kasvaa varsin suuriksi nurjahduksen estämisen vuoksi.

Pienemmät kaivannot voidaan tehdä sisäänpäin tuettuna (Mangushev 2010).

Marinski-teatterin uudisrakennuksen maanalaisia rakenteita. Taustalla kanavan takana vanha teatteri (Mangushev 2010).

Rakennuksen kellaria kaivettaessa tulevat esiin myös paalujen teon ongelmat ja virheet (Mangushev 2010).



Kaivantojen rakenteita voidaan analysoida numeerisin menetelmin (Mangushev 2010).

Atmosfera, Komendantskaya aukion metroasema

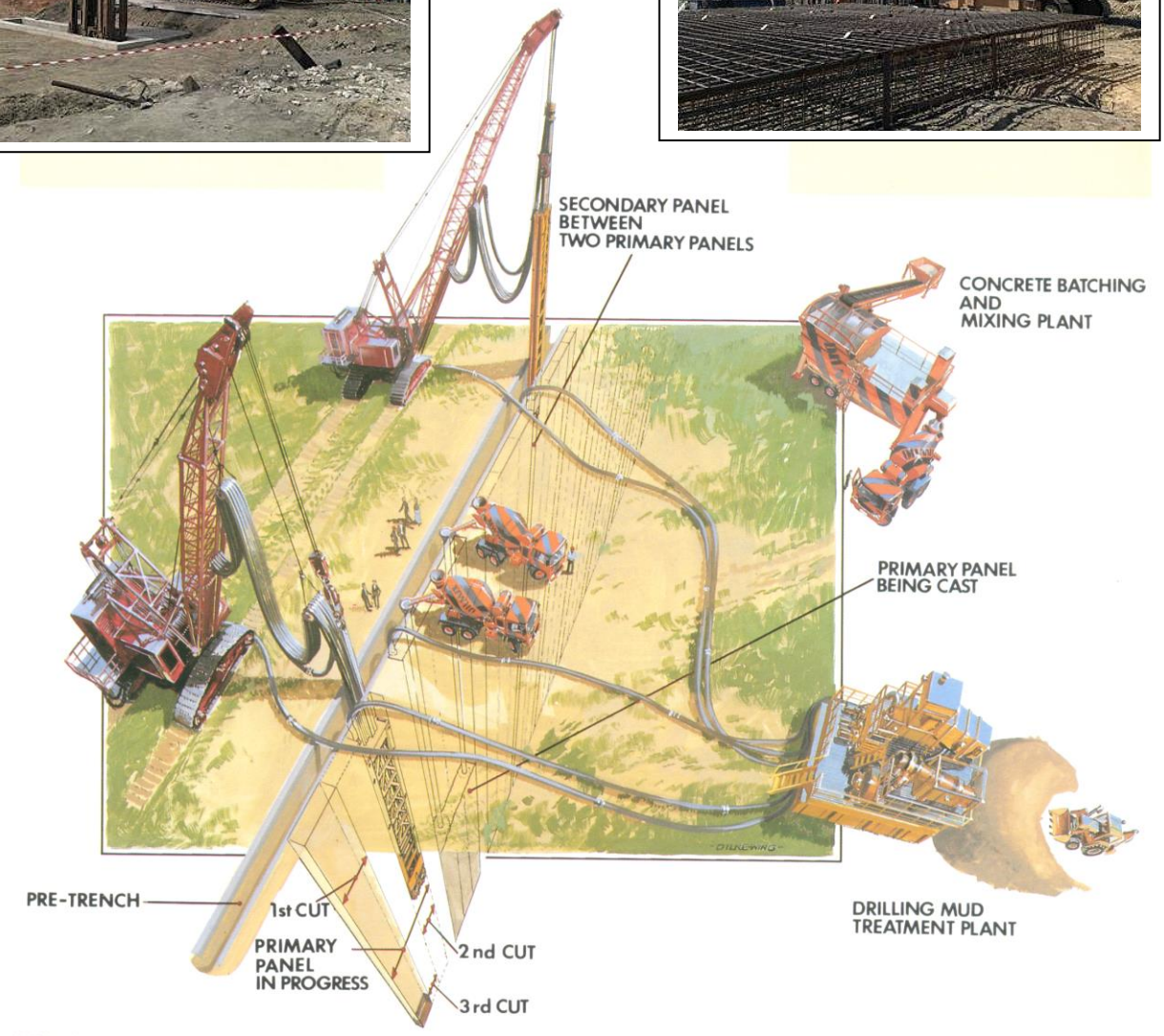
Atmosferan kaivanto (Mikhaylenko ja Sulina 2010).

Atmosferan maanpäällinen osa (Mikhaylenko ja Sulina 2010).

Vuonna 2006 valmistuneessa rakennuksessa on kuusi maanpäällistä kerrosta, joissa on lähinnä liiketiloja. Maanpinnan alapuolella on viisi pysäköintikerrosta.

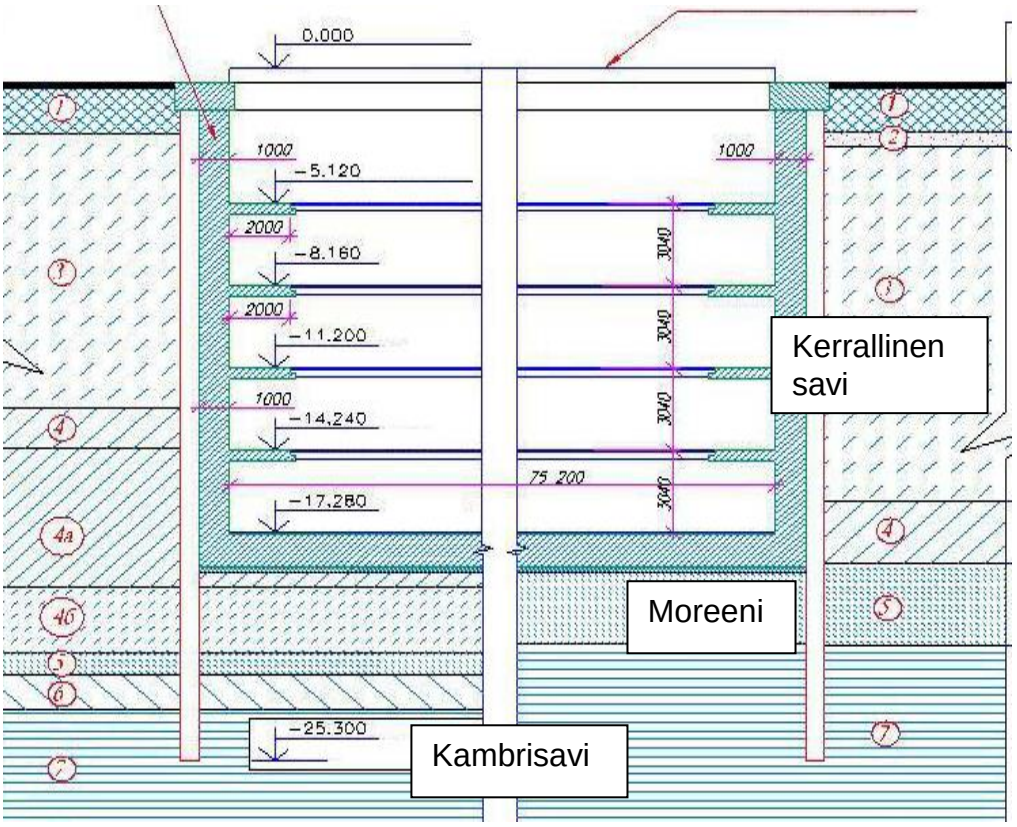
Maanalaisen osan uloin tukiseinä ja samalla lopullinen kellarin seinä tehtiin kaivantoseinämenetelmällä (diaghram wall). Kaivantoseinä on ulotettu suuriakin lohkareita sisältävän moreenikerrostuman läpi kambrisaveen 24 metrin syvyyteen. Seinä koostuu 3300 mm:n leveistä ja 800 mm:ä paksuista teräsbetonilamelleista. Lamellit kaivetaan yksi kerrallaan tavoitesyvyyteen erikoiskalustolla, jossa on alapäässä ns. leikkuri maa-aineksen leikkaamiseen. Kaivannon sortuminen kaivuvaiheessa estetään bentoniittisavilietteellä. Kun kaivu on määräsyvyydessä, rakenne raudoitetaan ja valetaan bentoniittilietteen sisällä vedenalaisen valun periaatteiden mukaisesti.

Kaivanto on muodoltaan pyöreä, sen läpimitta on 80 metriä. Pyöreän muodon vuoksi maan- ja vedenpaineet siirtyvät rakenteen sisäisiksi rasituksiksi ja varsinaista tuentaa ei tarvita. Kaivannon suurin syvyys oli 19,5 metriä.

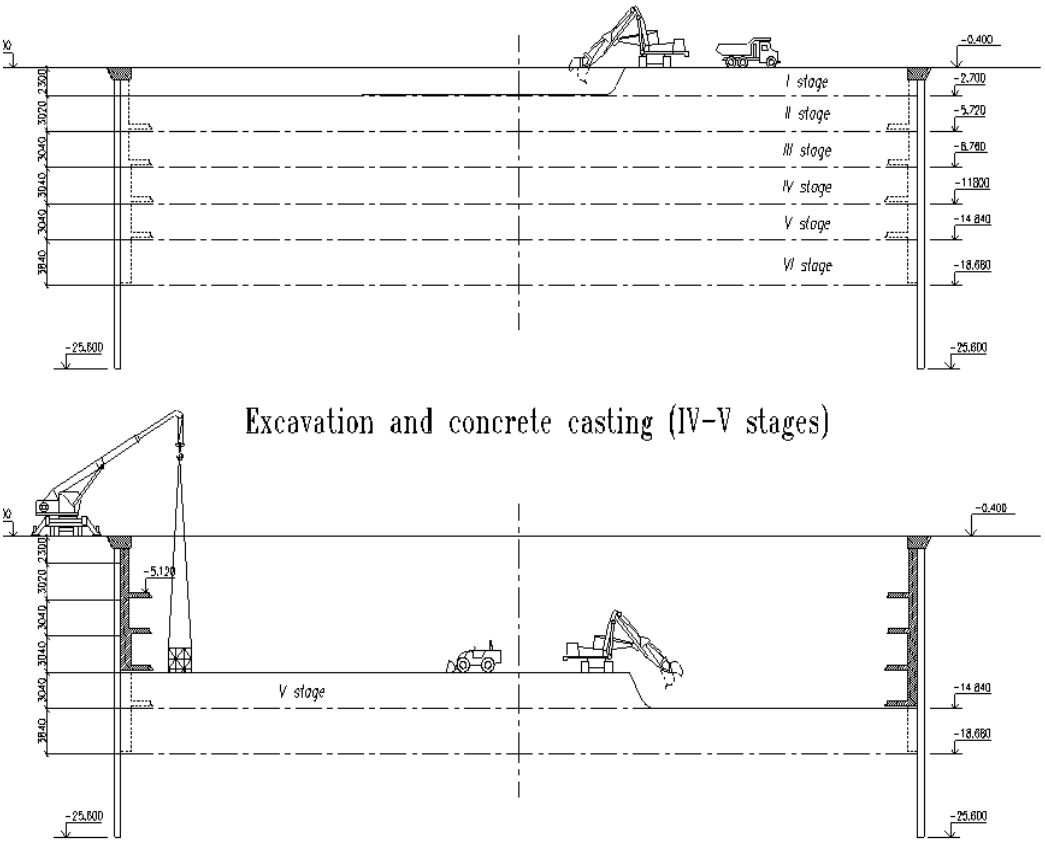


Kaivantoseinän rakentaminen (Soletanche, esite).

Seuraavassa kuvassa on esitetty kellarin sisemmän rakenteen teko vaiheittain. Pohjaveden aiheuttama nostekuormitus otetaan vastaan Atlas-vetopaaluilla. Paaluja ei ole esitetty kuvassa.



Kellarin yleispiirteinen rakenne ja pohjasuhteet (Mikhaylenko ja Sulina 2010).



Kellarin sisäkuoren teko vaiheittain kaivun edistyessä (Mikhaylenko ja Sulina 2010).

.
ТОРГОВО- ОФИСНО-ГОСТИНИЧНОГО

Kuva Matti Hakulinen.

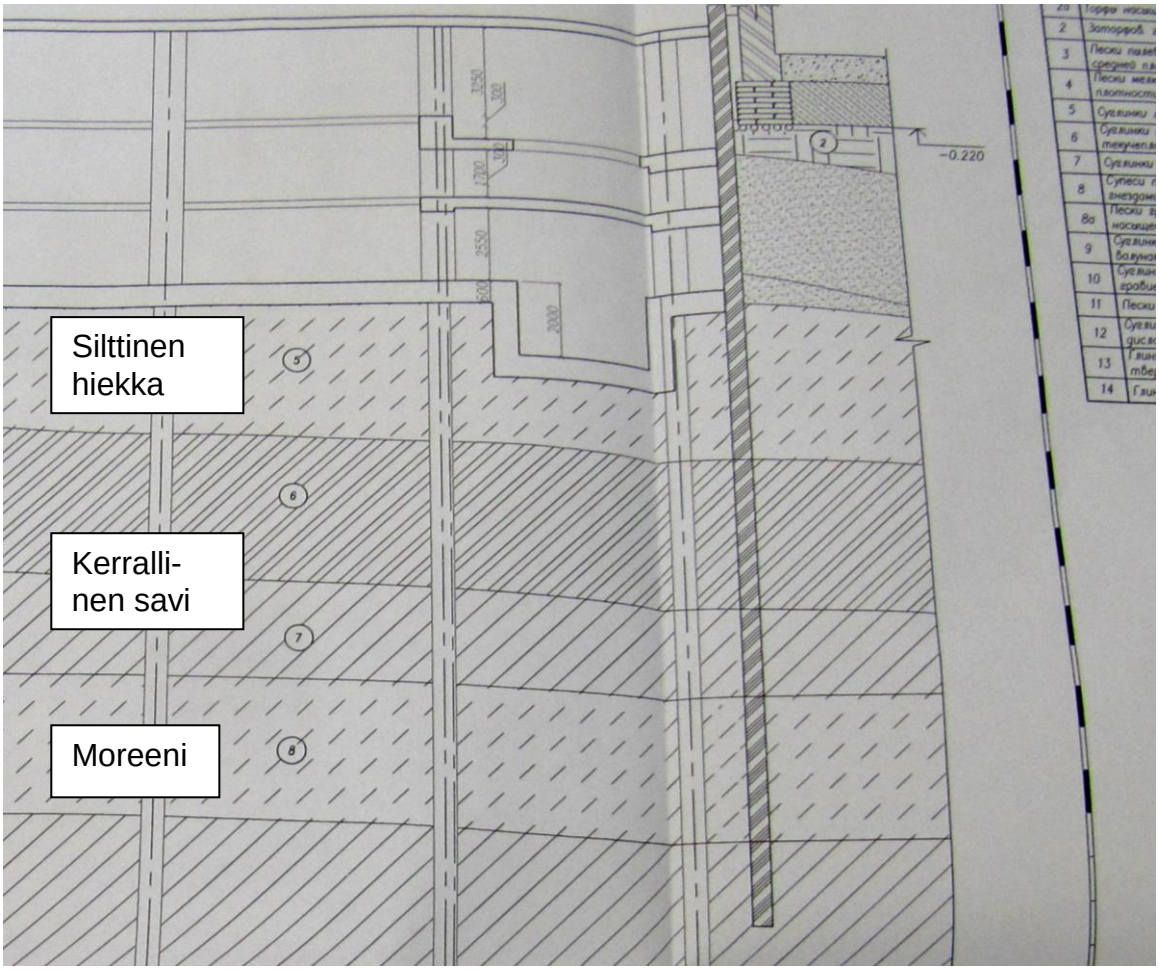
Uusi Liike-toimisto-hotellirakennus tehdään vanhan rakennuksen julkisivun taakse, julkisivu säilyttäen. Rakennuspaikka on ydinkeskustassa lähellä Iisakin kirkkoa. Rakennukseen tulee kolme pysäköintikerrosta kellariin ja kuusi maanpäällistä kerrosta. Alin kellarin lattia on noin kahdeksan metrin syvyydessä.

Halkaisijaltaan 600 mm kaivinpaalujen pituus on maanpinnalta noin 34 metriä. Ne on ulotettu 2 – 4 metriä kambrisaveen. Paalun kantavuus koekuormituksessa oli noin 4000 kN ja sille sallitaan noin 2500 kN kuorma. Paaluihin asennettiin kiinnitysvaraukset kellareiden välipohjien teräskonsoleille. Konsolit kiinnitetään paaluihin hitsaamalla.

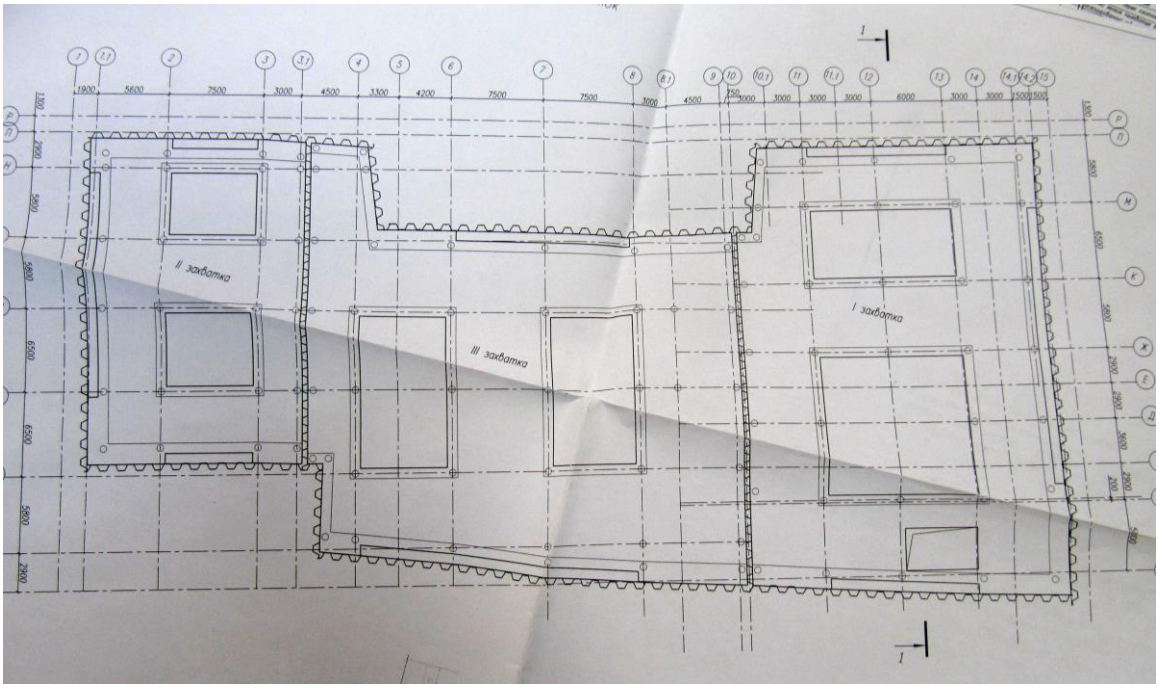
Kaivanto tehdään top-down- menetelmällä. Uloimmat tukiseinä ovat pysyviä teräksisiä ponttiseiniä. Noin 25 metriä pitkät pontit ulottuvat moreeniin. Maanpaineen aiheuttamia siirtymiä hallitaan tunkkausjärjestelyin. Seinien siirtymiä mitataan inkilinometreillä. Viereiset rakennukset on osittain perustettu uudelleen pieniläpimittaisilla paaluilla.

Kellarin toiseksi alimman välipohjan rakentamista (kuva Matti Hakulinen).

Kellarin pilareita, taustalla teräsponttiseinä (kuva Matti Hakulinen).



Pohjatutkimusleikkaus ja rakenteet yleispiirteisesti esitettynä (kuva Matti Hakulinen).



Ylin kellarikerros, pilarit, tukiseinä ja kuljetusaukot (kuva Matti Hakulinen).

Paaluihin liittyvien teräskonsoleiden hitsausta (kuva Matti Hakulinen).

Tukiseinien liikkeitä hallitaan tunkkaamalla (kuva Matti Hakulinen).

Marinski-teatteri

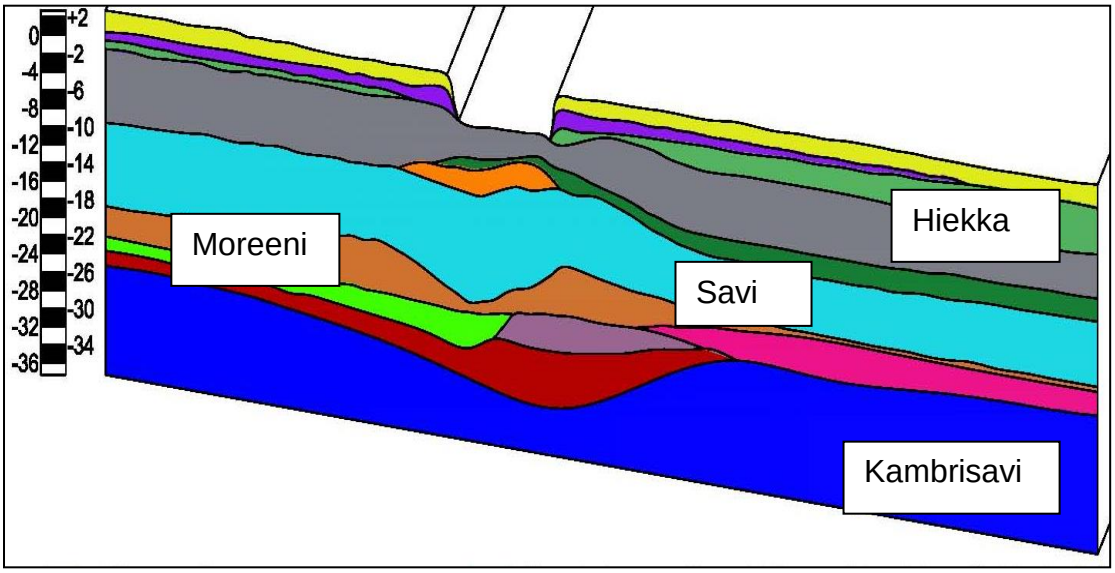
Kuva Matti Hakulinen.

Marinski-teatterin laajennus tehtiin vanhan teatterirakennuksen vieressä olevan kanaalin taakse. Rakennuksesta pidettiin arkkitehtikilpailu, jonka voittajaehdotusta ei kuitenkaan kustannussyistä toteutettu.

Rakennuksessa on teatterin vaatimat syvät kellaritilat. Kaivannon suurin syvyys maanpinnasta oli noin 12 metriä. Alin kellarin lattia on kerrallisessa savikerroksessa. Kellarit tehtiin top-down menetelmällä.

Rakennuskaivannon tekoa top-down menetelmällä (Mangushev 2010).

Rakennuspaikan pohjasuhteet ovat samantapaiset kuin muuallakin Pietarin ydinkeskustassa. Maanpinnalla on hiekkakerros, ja sen alapuolella kerrallista savea ja edelleen moreenia. Alimpana on kambrisavi.



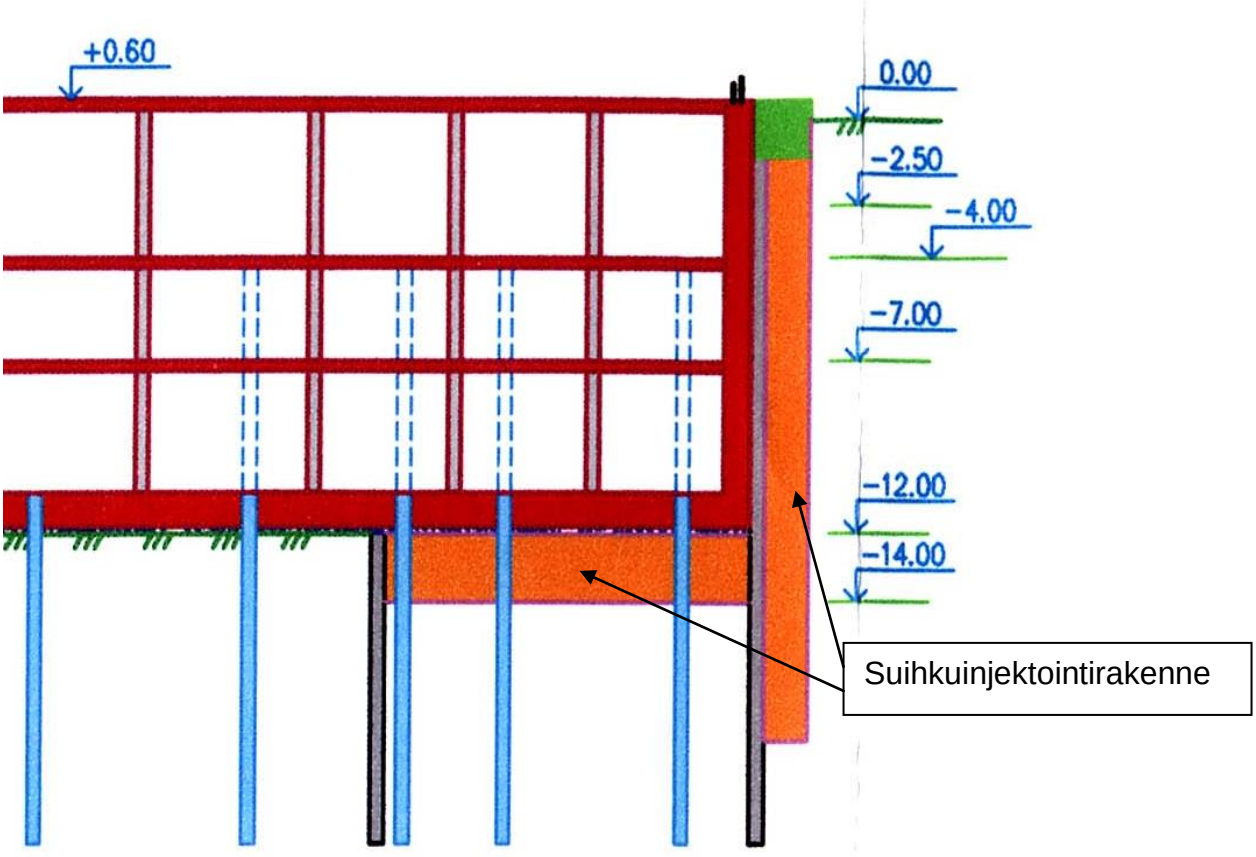
Rakennuspaikan pohjasuhteet (Golenkin ja Kravtsov 2009).

Kaivannon tukiseinät ja paalut on ulotettu kambrisaveen noin 30 metrin syvyyteen. Ennen rakentamista tehtiin sisäänpäin tuettu koekaivanto, jossa suurimmat tukiseinän vaakasiirtymät olivat noin 60 mm.

Koekaivanto (Mangushev 2010).

Kaivannon teräsponttiseinää (Mangushev 2010).

Kellarin kaivua jo rakennetun kannen alla (Mangushev 2010).



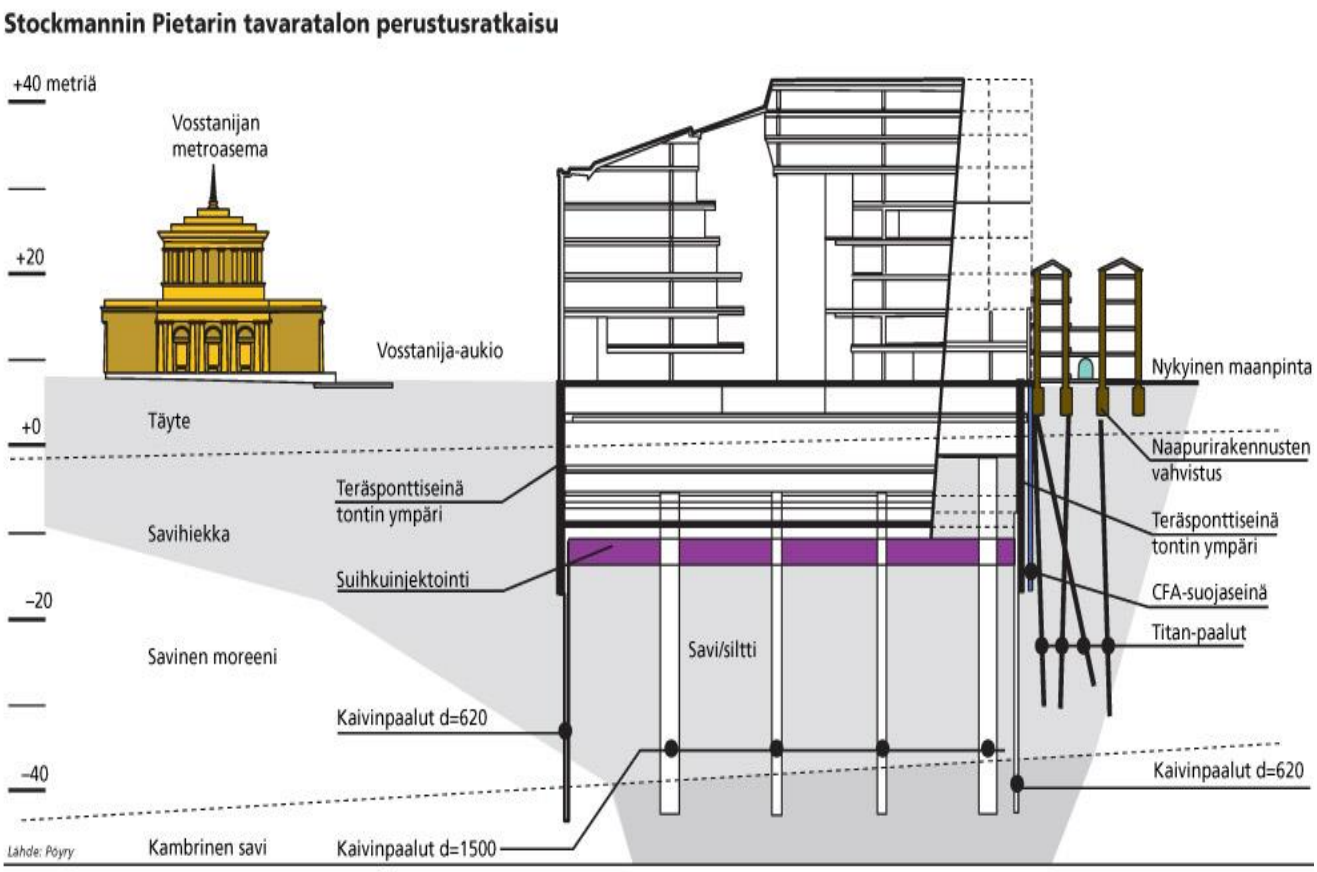
Poikkileikkaus kellarista. Suihkuinjektoinnilla jäykistettiin tukiseinää ja vähennettiin siirtymiä ympäristössä sekä tuettiin seinää sisäpuolelta alimman lattian alapuolelta. Suurimat viereisten rakennusten siirtymät olivat noin 30 – 60 mm (Golenkin ja Kravtsov 2009, Mangushev 2010).

Stockmannin tavaratalo

Kuva Matti Hakulinen.

Stockmannin tavaratalo on rakennettu keskustaan Vosstanijan metroaseman viereen. Rakennuksessa on neljä kellarikerrosta, jotka on rakennettu top-down menetelmällä. Kaivannon ympärillä on teräsponttiseinä, jonka pontit on asennettu hydraulitäryttimellä.

Vanhojen rakennusten viereen rakennettiin ennen pontitusta injektointiporapaaluseinä tärinäesteeksi. Alimman kerroksen alapuolella tehtiin suihkuinjektointirakenne massastabiloinnin tapaan. Injektoinnin tarkoituksena oli tukea seinää olemassa olevien rakennusten kohdalla. Ennen kaivannon rakentamista viereiset olemassa olevat rakennukset on perustettu Titan-paaluilla kaivannon aiheuttamien siirtymien vähentämiseksi. Rakennuksen pohjarakenteista on kerrottu myös paalutuksen yhteydessä.



Pietarin Stockmannin tavaratalo (Tekniikka ja talous 2008).

Kaivannon rakentamisen alkuvaihetta, taustalla Titan-paaluilla perustettuja rakennuksia (kuva Sami Kurkela).

Teräsponttiseinää, jonka jäykkyyttä on lisätty teräspalkeilla (kuva Sami Kurkela).

Ponttien asennuksen ohjauspalkisto, jonka avulla vähennetään asennuspoikkeamia (kuva Sami Kurkela).

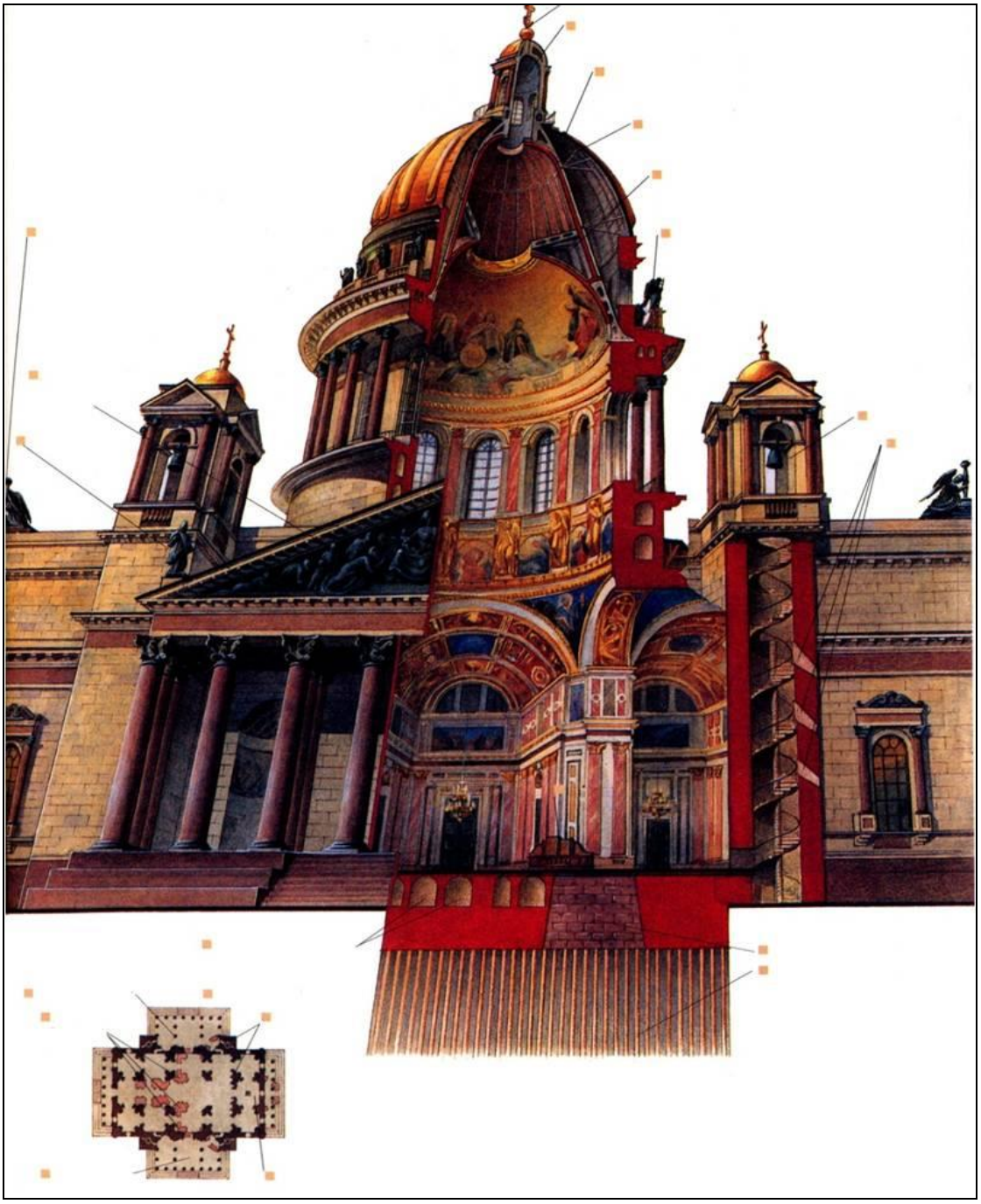
Ponttien asentamisessa käytetty hydraulitärytin (kuva Sami Kurkela).

HISTORIALLISTEN RAKENNUSTEN POHJARAKENTEITA

Iisakin kirkko (kuva Matti Hakulinen).

Iisakin kirkko (Auguste Monferrand 1818-1858)

Maailman suurimpiin katedraaleihin kuuluva Iisakin kirkko avattiin 1856, Kirkon kupolin korkeus, 101,5 metriä, on maailman neljänneksi korkein kupoli.



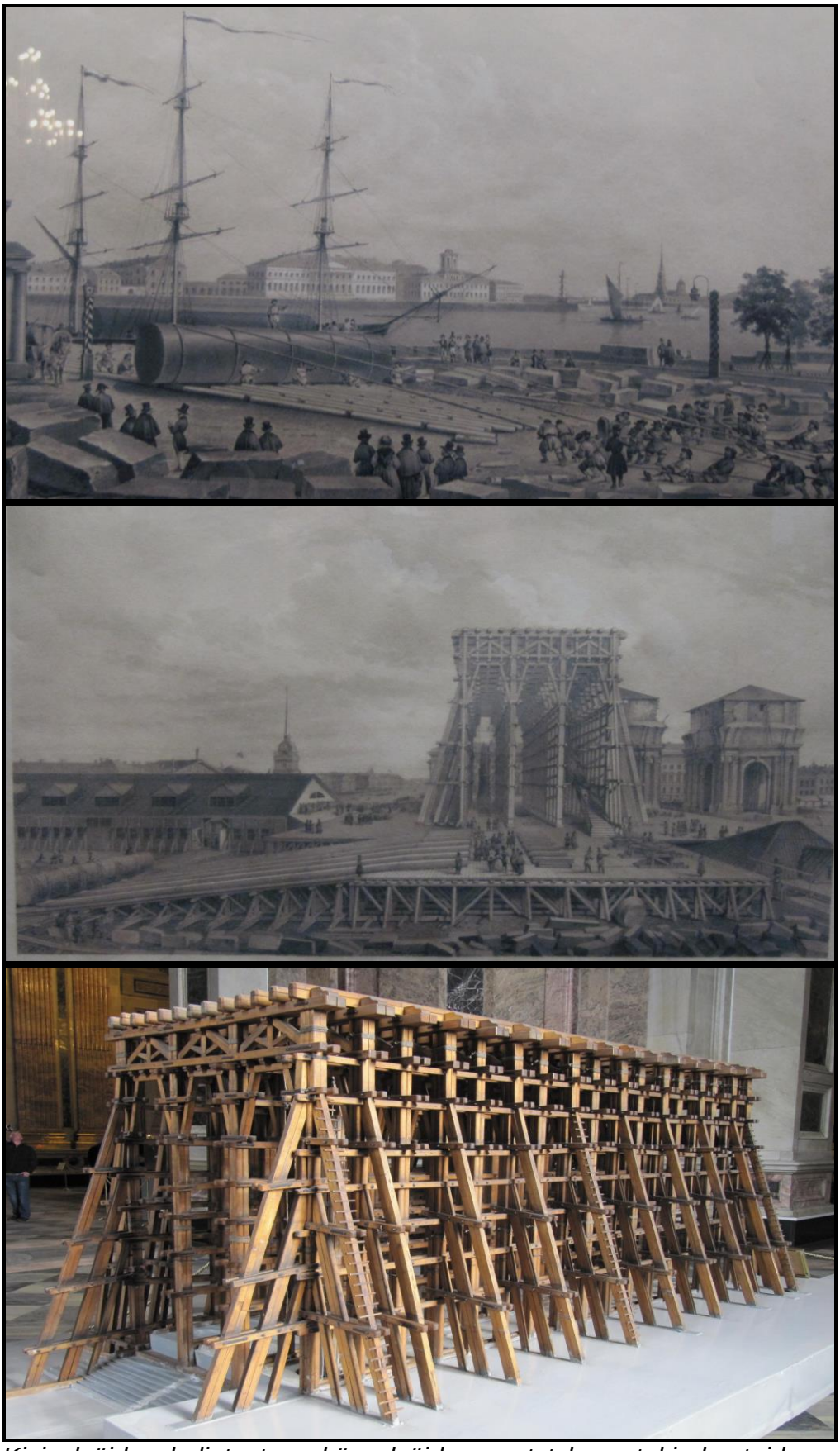
Iisakin kirkon perustukset,(Ulitsky 2006).

Kirkko on perustettu kuusi - kahdeksan metriä pitkille puupaaluille, joita on kaikkiaan 24 000 kappaletta. Yksittäisen paalun kuorma on siten keskimäärin 125 kN. Puupaalujen yläpuolella on noin seitsemän metriä korkea jäykkä kiviperustus, joka jakaa rakennuksen kuormat paaluille. Puupaalut ovat lyhyitä ja ne on lyöty maan-

pinnan läheisyydessä olevaan hiekkakerrostumaan ja osin hiekan läpi kerralliseen saveen. Saven paksuus paalujen kärjen alla on noin 10 metriä. Saven alla olevien hienorakeista moreeni- ja hiekkakerrosten paksuus on yli 30 metriä. Maakerrosten alapuolella on kambrisavi. Kirkon suurin painuma on lähes metri ja painumat jatkuvat edelleen.

Rakennukset kivipylväät on louhittu Virolahdelta. Ne ovat Viipurin rapakiveä. Kivet työstettiin louhimolla ja kuljetettiin vesitse Pietariin. Yksittäisen pylvään paino on noin 115 tonnia. Satamasta kivet siirrettiin rakennuspaikalle, jossa ne nostettiin pystyyn telineiden varaan kiinnitettyjen taljojen ja vinssien avulla.

Kivipylväiden valmistusta ja kuljetusta (kuvat Matti Hakulinen).



Kivipylväiden kuljetusta sekä pylväiden pystytyksen tukirakenteiden pienoismalli (kuvat Matti Hakulinen).

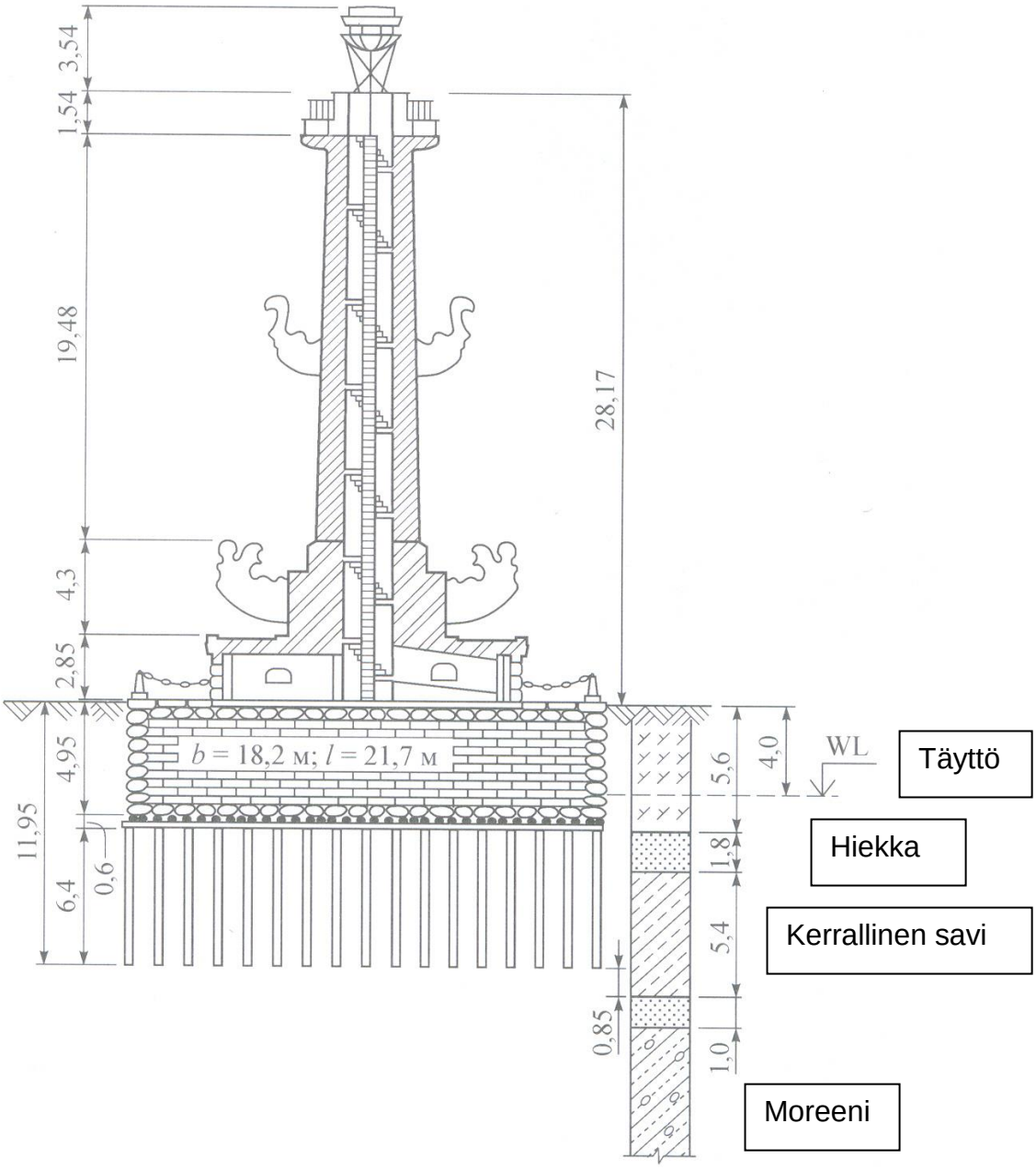
Rostra-pylväät (Thomas de Thomon 1810)

Kuva Matti Hakulinen.

Pörssitalon edustalle Nevan rantaan rakennetut 32 metriä korkeat Rostra-pylväät tehtiin alun perin majakoiksi.

Pylväät on perustettu 18 metriä leveille ja 21 metriä pitkille noin 5 metriä korkeille kiviperustuksille. Perustusten alla ovat puupaalut. Noin 6,5 metriä pitkä paalut ulottuvat kerralliseen saveen.

Perustukset ovat toisin kuin viereisen Pörssitalon perustukset hyväkuntoiset. Painumaksi on arvioitu noin 40 mm. Viereinen täyttömaa on painunut selvästi enemmän, noin 0,5 metriä.



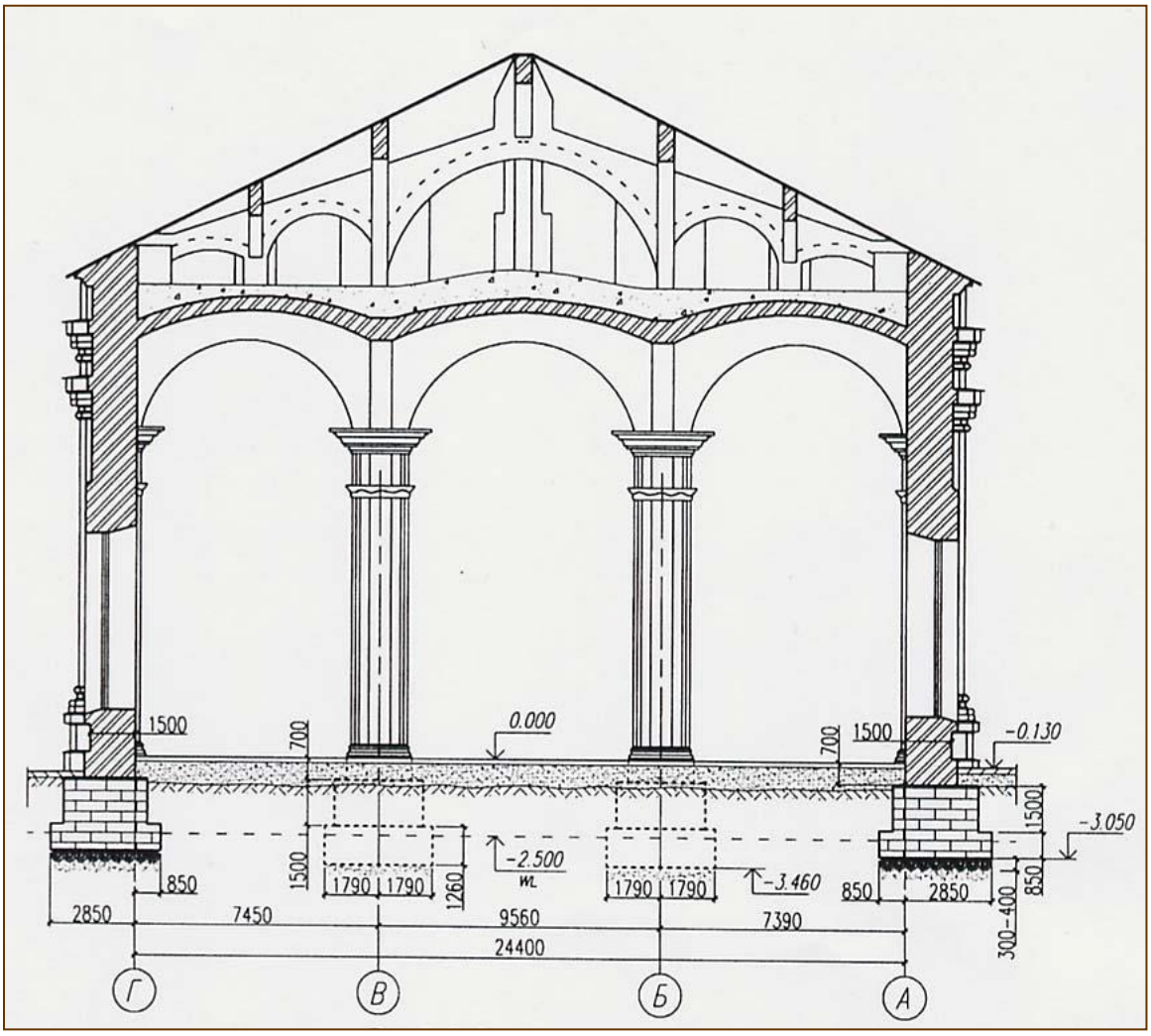
Rostra-pylväiden perustaminen (Mangushev 2010).

Pietari-Paavalin tuomiokirkko (Domenco Trezzini 1712 – 1733)

Kuva Matti Hakulinen.

Kuva Matti Hakulinen.

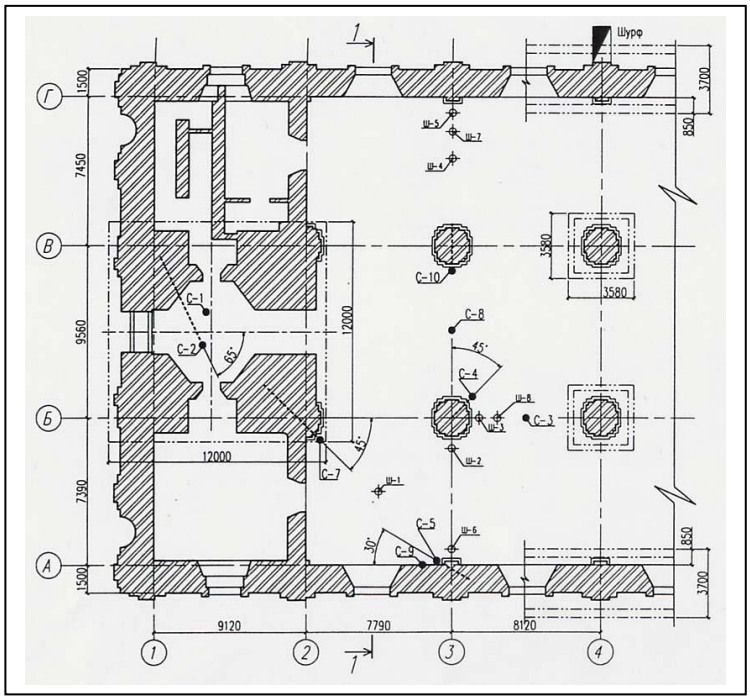
Pietari-Paavalin tuomiokirkko valmistui 1733. Kirkkoon on haudattu Romanovin hallitsijasuvun jäseniä Pietari Suuresta Nikolai II:een.



Pietari Paavali tuomiokirkon perustuksia (Mangushev 2010).

Kirkon kiviperustukset on rakennettu hirsiarinan välityksellä maanvaraisesti hiekan varaan noin 3,2 metrin syvyyteen. Hiekkakerrostuman paksuus on noin seitsemän metriä. Hiekan alla on kerrallista savea samoin noin seitsemän metriä ja tämän alapuolella moreenikerrostumat.

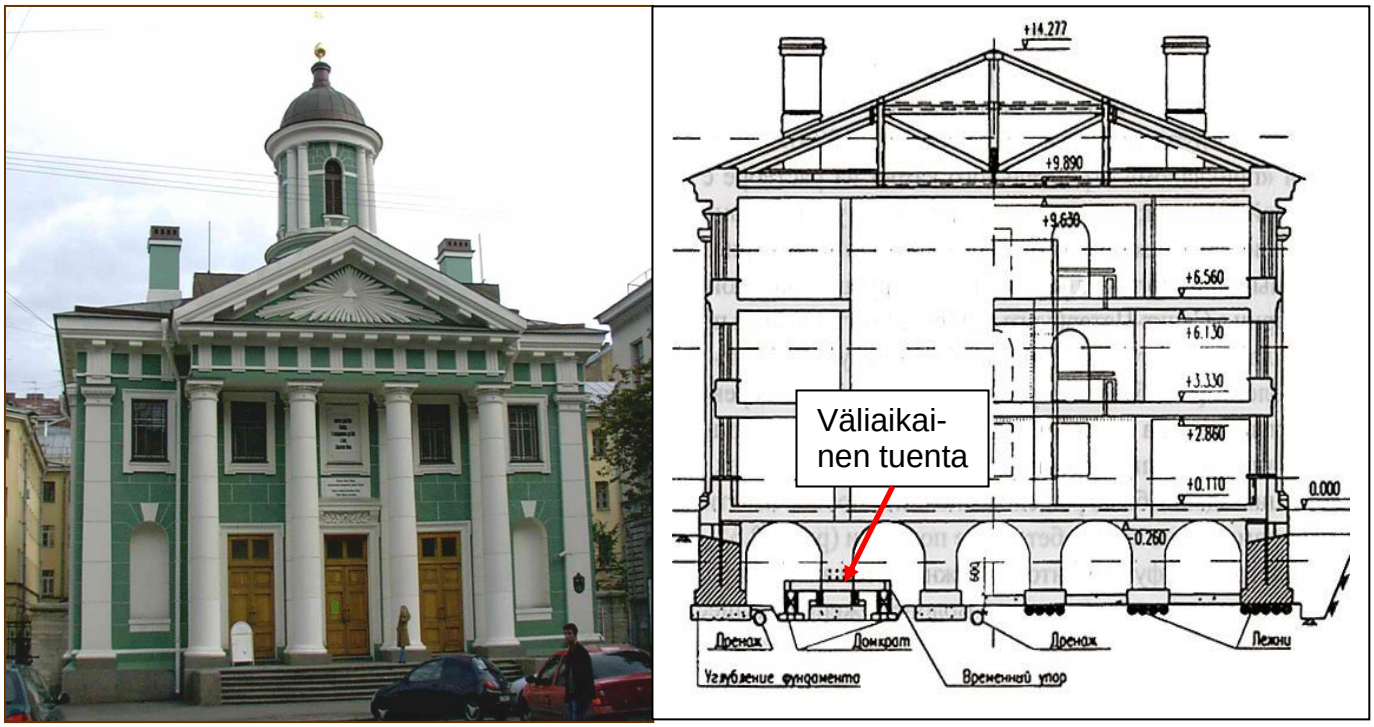
Vuoden 2002 kuntotutkimuksissa hirsiarinaa ei löydetty. Perustusten kunto oli tutkimuksen perusteella tyydyttävä.



Pyhän Marian kirkko (L. Benois 1803 – 1805)

Pyhän Marian suomalaisen seurakunnan kirkko on Pietarin ydinkeskustassa Bolsaja Konjushennaja-kadun varrella. Kirkko seurakuntineen oli 1800-luvulla lokakuun vallankumoukseen asti ja vielä vuoteen 1938 vahva suomalaiskeskus Pietarissa.

Kirkko palautui Pyhän Marian seurakunnalle vuonna 1994. Kirkon perustusten korjaus valmistui 2001.



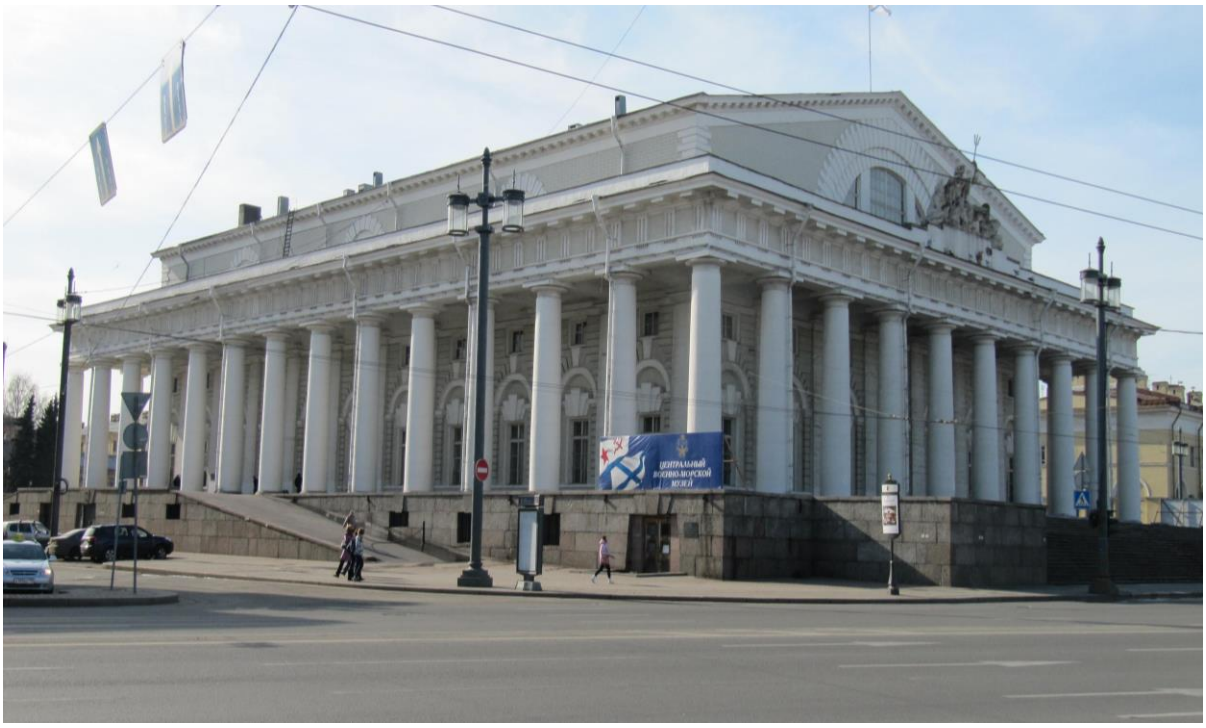
Kirkko ja sen perustusten korjaus (Mangushev 2010)

Kirkko rakennettiin alkujaan hirsiarinoita käyttäen hiekkakerroksen varaan. Hiekan paksuus rakennuksen kohdalla on noin kuusi metriä. Hiekan alla on kerrallinen savikerrostuma ja sen alla moreenikerrostumia. Noin 20 metrin syvyydessä on kambrisavi.

Ennen korjausta hirsiarinat olivat pohjaveden alenemisen vuoksi lahonneet. Perustusten painumat aiheuttivat ylärakenteisiin halkeamia,

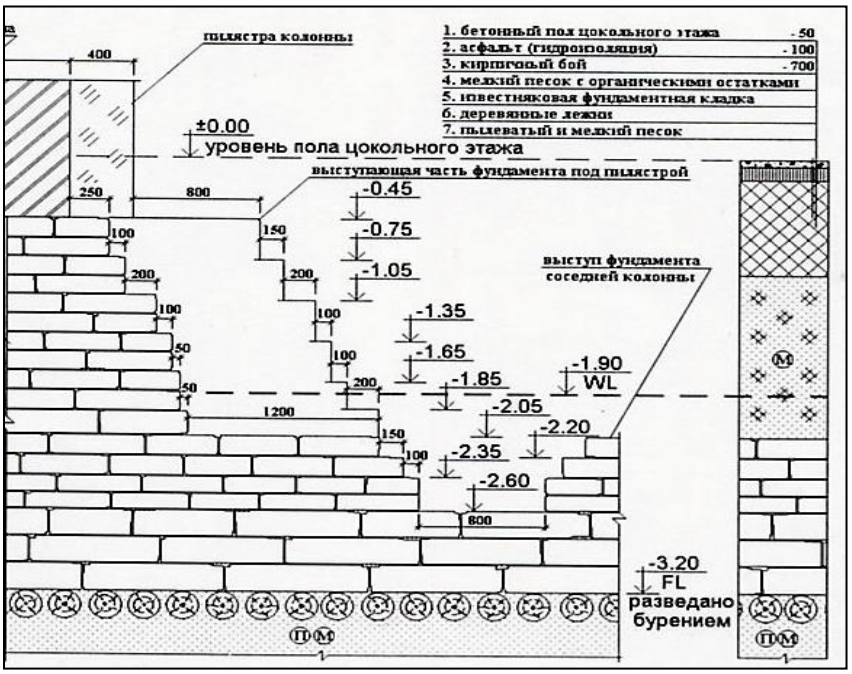
Hirsiarinat poistettiin ns. lamellimenetelmällä lyhyissä noin kahden metrin pituisissa osissa ja korvattiin teräsbetoniperustuksin. Syvät perustukset, jotka olivat pohjavedenpinnan alapuolella, vahvistettiin sementti-injektoinnilla. Kellareiden holvipilarit tuettiin väliaikaisesti työn teräspalkeilla ajaksi.

Pörssitalo (Tomas de Thomon 1805-1810)



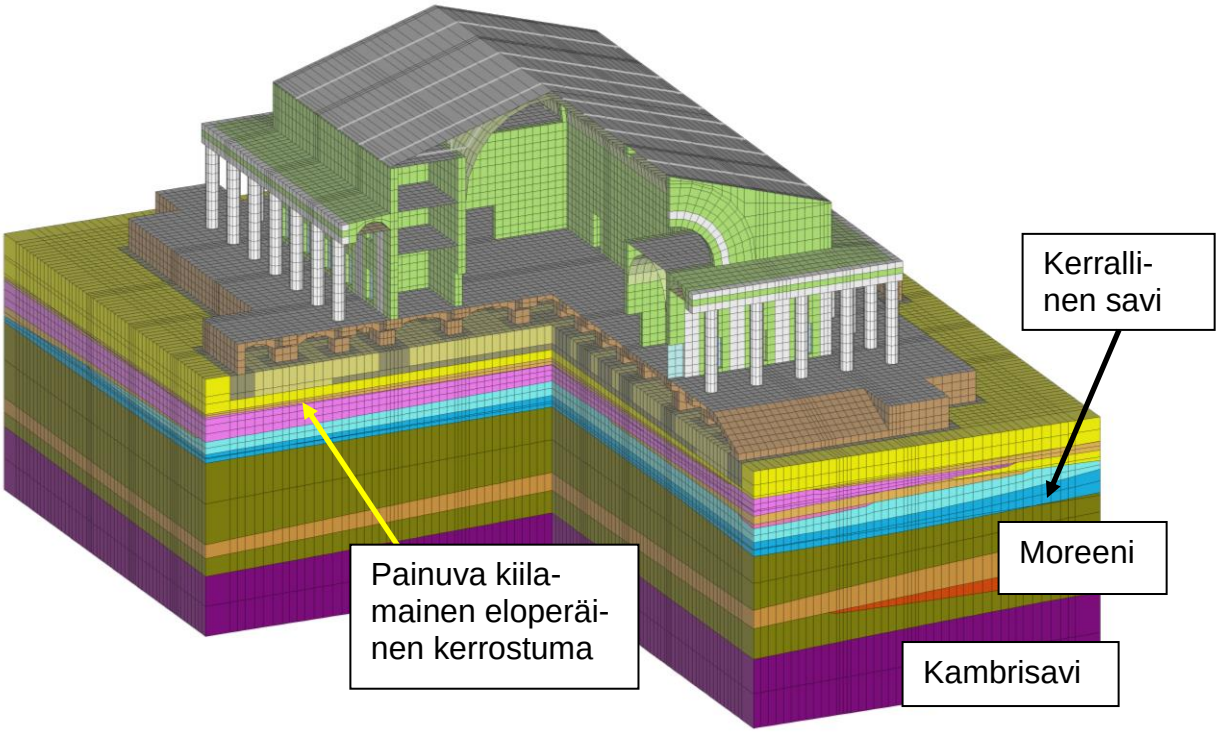
Kuva Matti Hakulinen.

Pörssitalon kantavien rakenteiden kuormat on siirretty kiviperustusten ja niiden alla olevien hirsiarinoiden välityksellä hiekkakerrostuman varaan. Rakennus on painunut enimmillään noin 500 mm. Painumat ovat epätasaisia ja painumaerot ovat suurimmillaan 140 mm. Painumat jatkuvat ja ovat noin 5 mm vuodessa.



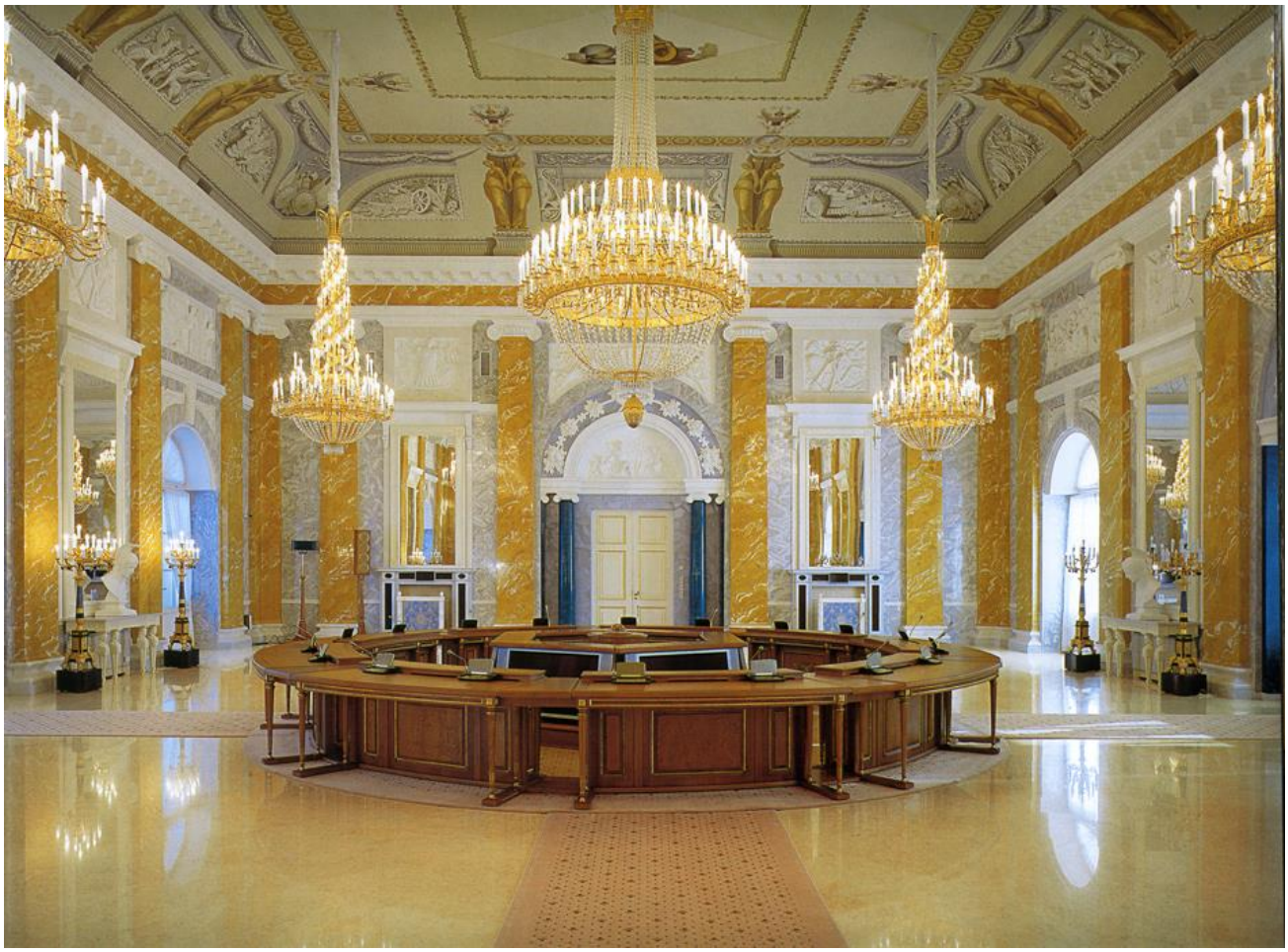
Pörssitalon perustuksia (Ulitsky 2006).

Painumat ovat aiheuttaneet ylärakenteissa halkeamia (Ulitsky 2006).



Pinnan hiekkakerroksen alapuolella on kiilamainen eloperäistä ainesta sisältävä kerrostuma. Sen alapuolella on kerrallista savea ja edelleen moreenikerrokset ja kambrisavi (Ulitsky 2006).

Konstantinovskin palatsi



Konstantinovskin palatsi (Ulitsky 2006).

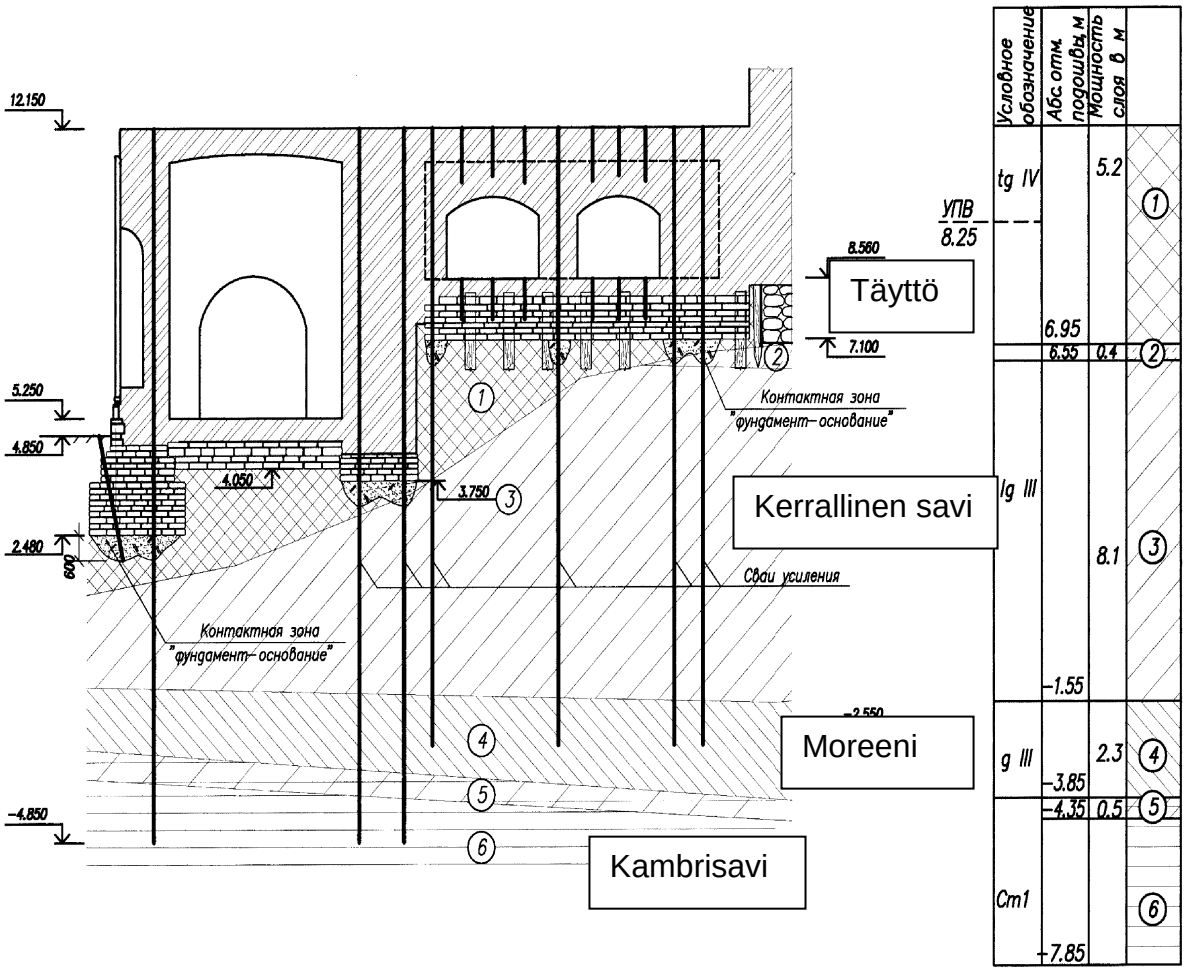
Konstantinovskin palatsi sijaitsee Suomenlahden rantatörmällä (Ulitsky 2006).

Palatsin vanhin puurakenteinen osa valmistui 1718. Nykyinen rakennus valmistui Suomenlahden rannalle sedimenttikivitörmän päälle 1807. Rakennus tuhoutui pahoin toisen maailmansodan aikana ja se peruskorjattiin Venäjän valtion edustuskäyttöön 2001.

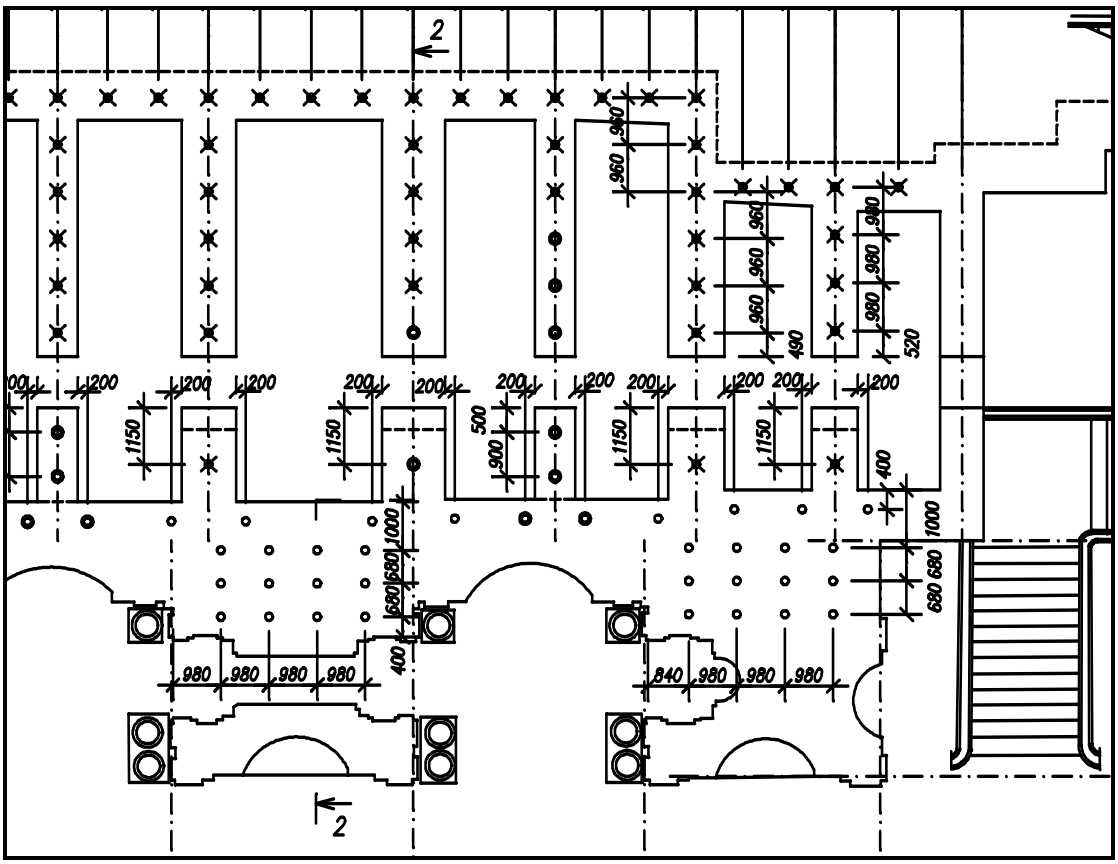
Alkujaan puupaaluille tehdyt perustukset vahvistettiin pääasiassa juuripaaluilla. Juuripaalut tehdään kantavien rakenteiden läpi maankamaraan. Paalun yläosa injektoidaan sementtilaastilla rakenteisiin ja alaosa moreeniin tai kambrisaveen.

Konstantinovskin palatsi ennen peruskorjausta (Ulitsky 2006).

Kantavien seinien vaurioita ennen peruskorjausta (Ulitsky 2006).



Kantavien rakenteiden korjaus juuripaaluilla (Ulitsky 2006).



Juuripaalut ja perustuspiirustus. (Ulitsky 2006).

METRO

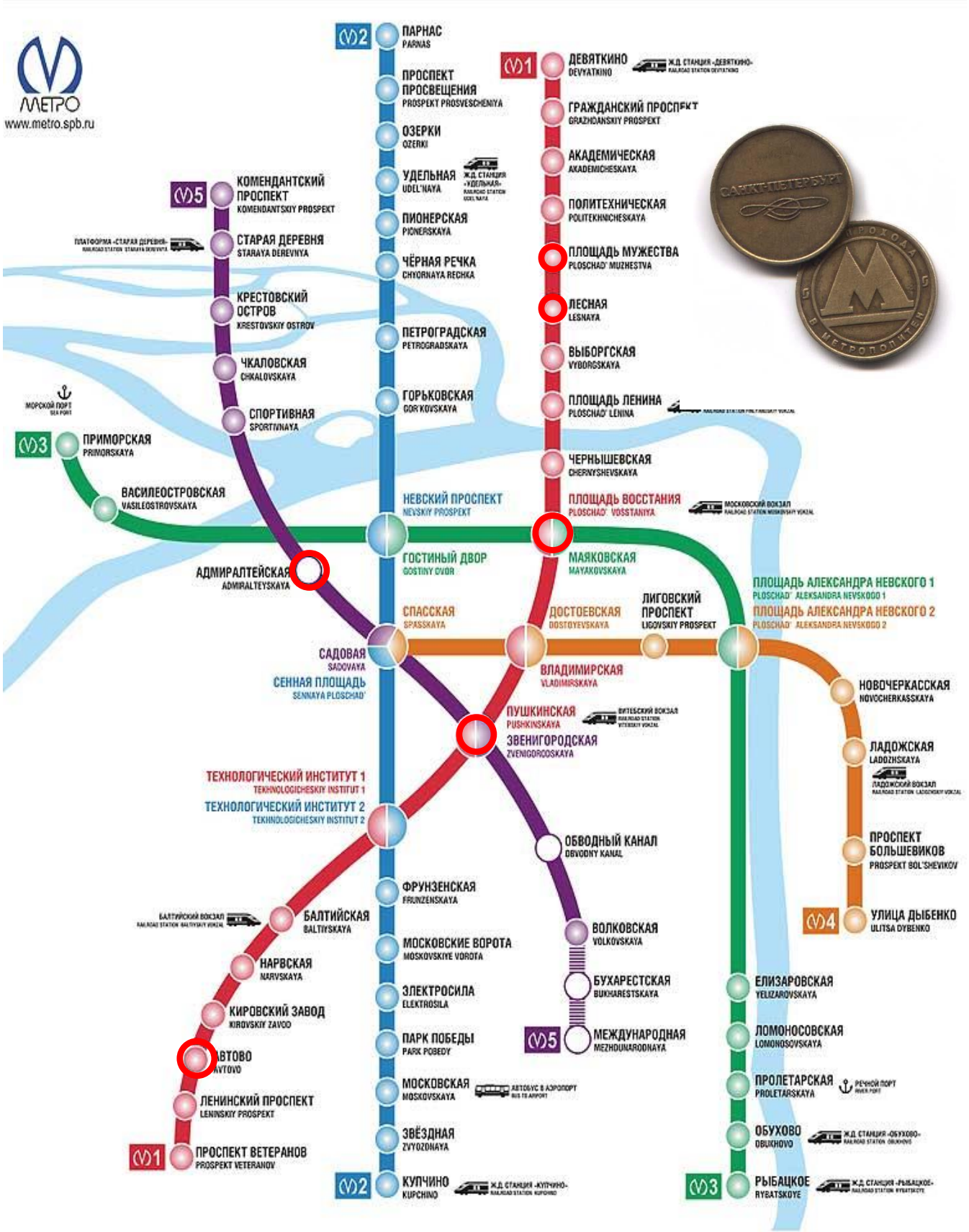
Puskinskayan metroasema vuodelta 1956 (kuva Matti Hakulinen).

Pietarin ilmaratasuunnitelma (kuva Matti Hakulinen).

Ensimmäinen Pietarin joukkoliikennesuunnitelman ratkaisuna oli ilmarata vuodelta 1899. Ilmaratojen rakentaminen tuli mahdolliseksi, kun teräsrakentaminen oli kehittynyt 1800-luvulla. Pietarin ilmarataa ei kuitenkaan koskaan rakennettu.

Varsinaisen Pietarin metron suunnittelu aloitettiin 1930-luvulla. Ensimmäiset menetelmät kehittyivät hiilikaivostunnelitekniikoista. Varsinaisesti rakentaminen käynnistyi vasta toisen maailmansodan jälkeen ja ensimmäinen metrolinja avattiin 1955 Avtovon ja Vosstanyan asemien välillä. Tällä rataosalla oleva Puskinskayan asema avattiin seuraavana vuonna 1956. Nykyisin tämä väli on osa metrolinja M1:tä. Nämä vanhimmat metroasemat on tehty ja koristeltu ns. Stalinin ajan tyylin mukaisesti.

Metroa laajennetaan jatkuvasti. Tällä hetkellä on toiminnassa viisi linjaa. Koska Pietarin alueelle on tyypillistä pohjavedenpinnan alapuolella olevat paksut irtorakeiset maakerrokset joihin tunneleiden rakentaminen on ollut vaikeaa, metro on rakennettu pääosin syvälle helpommin rakennettavaan kambrikautiseen saviker-rostumaan. Pietarin metro on maailman syvimmälle rakennettu maanalainen joukkoliikennejärjestelmä. Syvimmillään metro on historiallisessa keskustassa rakenteilla olevan Amiraliteetinaseman kohdalla noin 105 metriä maanpinnan alapuolella. Pääosa 63 asemasta on syvällä, vain seitsemän on rakennettu esikaupungeissa maanpinnan läheisyyteen. Pietarin pohjois- ja eteläosissa metro nousee maanpinnalle. Metroa rakentaa Metrostroi -organisaatio.



Nykyiset metrolinjat. Asemat, jotka on tekstissä mainittu, on merkitty punaisella ympyrällä.

Tunnelin rakentaminen TBM- laitteistolla (Mangushev 2010).

Metrolinjat on pääosin rakennettu tunneliporauslaitteella (TBM). Tunneli porataan täysperäporauksena ja välittömästi porauksen jälkeen seinämät verhoillaan valurauta- ja teräsbetonielementeillä.

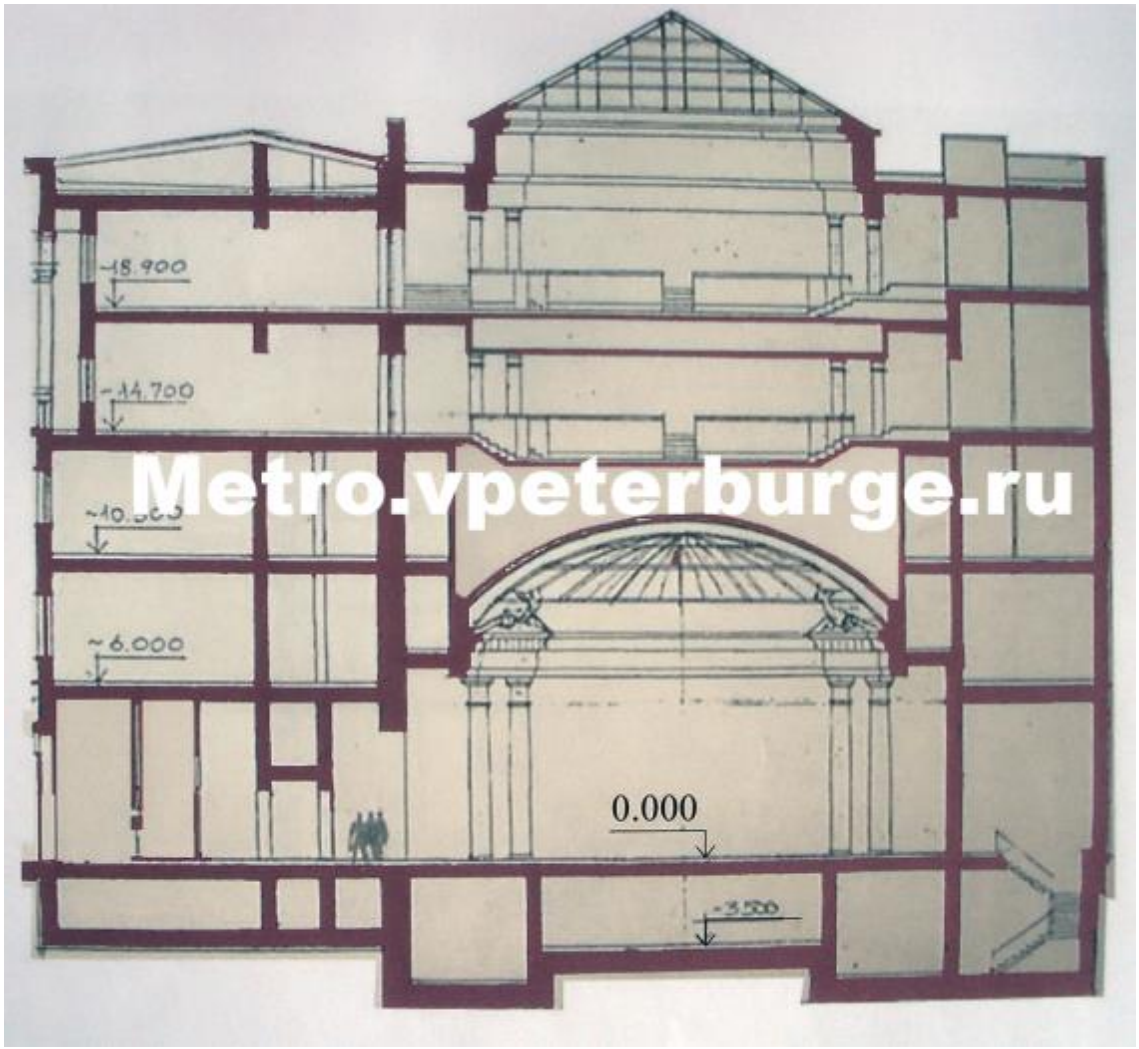
Puskinskayan metroasema on vanhimmalla Pietarin metrolinjalla (kuva Matti Hakulinen).

Koska metrotunnelitunnelit ovat syvällä, tarvitaan maanpinnalta pitkiä syvälle ulottuvia liukuporrastunneleita. Liukuporrasrakenteet on tehtävä paksujen irtorakeisten maakerrosten läpi kambrisaveen. Rakentamisen ongelmat on aikaisemmin ratkaistu jäädyttämällä maaperä liukuporrasrakenteiden ympäriltä. Jäätynyt routamaa kantaa holvimaisena rakenteena maan- ja vedenpainekuormat. Lopullisen rakenteen valmistuttua jään annetaan sulaa. Menetelmä on aiheuttanut Pietarin hienorakeisessa maapohjassa routimista ja huomattavia roudan sulamispainumia.

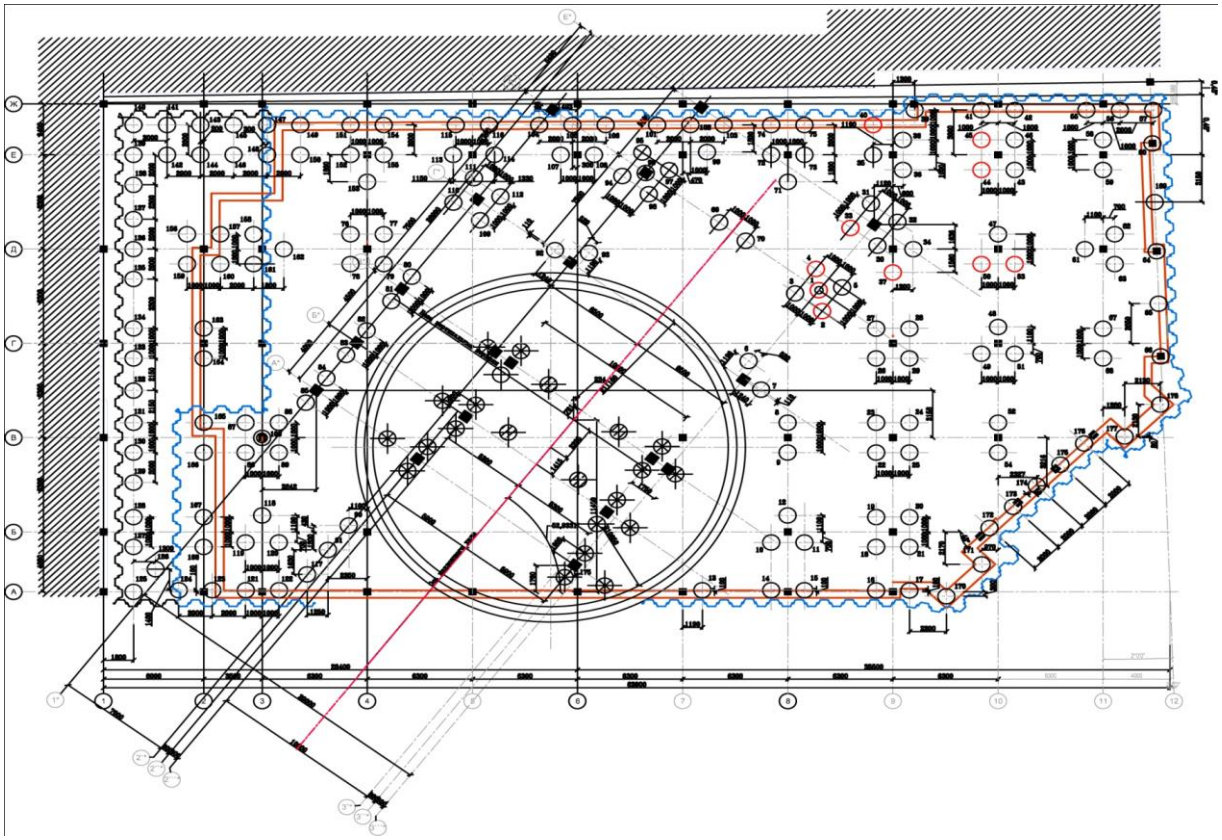
Liukuporrastunneli (kuva Matti Hakulinen).

Historiallisessa keskustassa rakenteilla olevan Admiralteyskajan metroaseman rakentamista suunniteltiin kauan, vaikka asema on liikenteellisesti hyvin tärkeässä paikassa. Aseman läheisyydessä on lukuisia historiallisia ja muita rakennuksia. Liukuporrastunneleiden jäädyttämistä ei voitu käyttää, koska sulamispainumien arvioitiin olevan liian suuria. Metroasema rakennettiin välittömästi muiden korttelissa olemassa olevien rakennusten viereen. Metroasema valmistui 2011.

Liukuportaiden kuilut tehtiin Admiralteyskajan metroasemalla kaivinpaaluseininä ja kantavat rakenteet perustetaan kaivinpaalujen varaan. Paalujen halkaisija on 1000 mm ja pituus 30 metriä. Paalut ulottuvat kambrisaveen. Kaivannon tukiseinä olemassa olevien rakennusten vieressä tehtiin teräsponttiseinänä. Pontit asennettiin tärymenetelmällä ennakkoon porattuun esireikään.



Admiralteyskajan metroasema (Krishtalevich ja Sadykov 2010).



Admiralteyskajan aseman perustussuunnitelma (Krishtalevich ja Sadykov 2010).

.

Admiralteyskajan aseman kuilun kaivinpaaluseinä (Krishtalevich ja Sadykov 2010).

Vuonna 1995 tapahtui metrotunnelin sortuma M1-linjalla Lesnaya ja Ploshad Muzhestvan asemien välillä. Sortuman kohdalla metrotunneli kulkee ikivanhan kambrisavessa olevan ruhjeen läpi. Ruhje on täyttynyt geologisen historiansa aikana irtomailla, joten tunnelia ei voitu tehdä tavanomaisesti poraamalla. Kun tunnelia vuonna 1974 rakennettiin, syvällä olevat irtomaat jäädytettiin maanpäältä ennen porausta, syvimmillään 86 metrin syvyyteen. Jäädytetyn maan tilavuus oli kaikkiaan 500 000 m^3. Tämän jälkeen poraus tehtiin tavanomaisesti. Jo rakentamisaikana vuonna 1974 tapahtui tunnelissa noin 40 000 m^3 maa-aineksen sortuma. Tunneliin vuoti vettä ja vuoto jatkui tunnelin käytön aikana. Alkuperäinen metrolinja avattiin sortumakohdalla juuri ennen silloisen viisivuotissuunnitelman päättymistä loppuvuodesta 1975.

Vuonna 1995 vesivuoto lisääntyi nopeasti ja veden mukana kulkeutui tunneliin maa-ainesta. Liikenne pysäytettiin ja tunneli tulpattiin vauriokohdalta betonitulpin. Vaurion syyksi osoittautuivat jäätyneen maan sulamisessa tapahtuneet epätasaiset painumat. Painumat aiheuttivat tunnelin pituussuunnassa taivutusrasituksia rakenteisiin, joita ei ollut suunnittelussa otettu huomioon, koska tavanomaisessa tilanteessa kambrisavessa olevaan tunneliin ei aiheudu merkittäviä pituussuuntaisia rasituksia. Tunnelirakenteet oli mitoitettu lähinnä sen poikittaissuunnan maanpaineille. Nämä maanpaineet aiheuttavat tunnelin teräsbetoni- ja teräsrakenteille lähinnä puristusrasituksia.

Metrolinja oli poikki yhdeksän vuotta ja se aiheutti suurta haittaa liikenteelle. Korjattu metrolinja avattiin vuonna 2004.

KIRJALLISUUS

Asikainen, N. Kaivinpaalutus Kelly- menetelmällä, diplomityö TKK 2009.

Dolukhanov, P., The Quaternary History of the Baltic Leningrad and Soviet Carelia. Acta.Univ.Ups.Symp.Univ.Ups.Annum Quingentesium Celebrantis. Upsala.

Ebnöther, A., Energy Piles, The European Experience, esitelmä 2008.

Golitsynsky, D.M. Comprehensive Plan of Mastering Underground space of St. Petersburg, 2000.

Golitsynsky, D.M. Reasons and Consequences of Accident on St. Petersburg Subway between Stations Lesnaya and Plotshchad Muzhestva, 2000.

Fursa, V.M., Sroiytelnye svojsta gruntov raiona Leningrad. 1975.

Hakulinen, M. Pietarin pohjarakentaminen, Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisu, 2000.

Hartikainen, J. Suurpaalujen geotekninen suunnittelu, Tampereen teknillinen korkeakoulu, moniste.

Heikkilä, M. (toim.), Kuinka Pietaria on rakennettu, Pietarin arkkitehtuurin historiaa ja kulttuuriheijastumia, 1999.

Kvasov, D., The late Quaternary History of Large Lakes and Inland Seas of Eastern Europe. Ann.Acad.Sci.Fennicae. A.III.127.

van Impe, W. New trends and developements in piling in middle Europa, Erikoispaalut rakentamisessa, RIL K105-1989.

van Impe, W. Auger piles, planning and use, Erikoispaalut rakentamisessa,RIL K105-1989.

Mangushev, R. Luennot Saimaan ammattikorkeakoulussa, 2010.

Patjas, E., Saarelainen, S. ja Tammirinne, M. Leningradin kaupungin alueen pohjasuhteista. VTT Tutkimuksia 101. 1982.

Proceedings of the International Geotechnical Conference Dedicated to the Tercentenary of Saint Petersburg, Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering, volume I, St. Petersburg 2003.

Proceedings of the International Geotechnical Conference, Soil-Structure Interaction: Calculation Methods and Engineering Practice, volume I, St. Petersburg 2005.

Proceedings of the International Geotechnical Conference, Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering, volume I and volume II, St. Petersburg 2008.

Saarnisto, M. (toim.), Viipurin läänin historia, Karjalan synty, 2003.

SNiP II-15-74 Rakennusnormit ja -ohjeet. Perustusten suunnittelu.

SNiP II-17-77, Paaluperustaminen.

Sotnikov, S.N. Lecture: St.Petersburg soils,Specific characters of foundation construction, 2000.

Tekniikka ja talouslehti 24.9.2008

Ulitsky, V.M. Luennot Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulussa, 2006.

Vasiliev, Y., Milnichuk, V. ja Arabaji, M. General and Historical Geology. MIR Publishers 1981.

Kaksoistutkinto-opiskelijoiden seminaariesitykset:

Bakhtina, N. ja Viunov,V., Okhta-Centre Foundations, 2010.

Golenkin, A. ja Kravtsov, A., Foundations of the Second stage of Mariinsky theatre, 2009.

Khutornoi, N. Ja Popov, N., Gazprom-arena stadium, 2010.

Krishtalevich, A. ja Sadykov, L., Vestibule of Admiralteystkaya Metro Station, 2010.

Mikhaylenko, I. ja Sulina, V., Atmosfera, 2010.