



Tielaitos

Teräspuutkipaalut



Sillansuunnittelu

Helsinki 1999

TIEHALLINTO
Siltayksikkö

Teräspankipaalut

TIEHALLINTO

Helsinki 1999

ISBN 951-726-523-9
TIEL 2173448-99

Edita Oy
Helsinki 1999

Julkaisua myy:
Tiehallinto, julkaisumyynti
telefax 0204 44 2652

TIEHALLINTO
Siltayksikkö
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihde 0204 44 150



TIELAITOS
Tiehallinto

MUU OHJAUS

99/20/Hsi-126

8.4.1999

288/99/20/KH/1

SÄÄDÖSPERUSTA
TL 117 §

KORVAA

KOHDISTUVUUS
Tielaitos

VOIMASSA
15.4.1999 - toistaiseksi

ASIASANAT
Siltaperustukset, paalutus, pohjarakennus

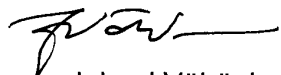
Teräsputkipaalut (TIEL 2173448)

Julkaisu Teräsputkipaalut sisältää halkaisijaltaan yli 300 mm:n teräsputkipaalujen suunnittelua, paalutustyötä ja paalutustyön valvontaa koskevat ohjeet Tielaitoksen siltakohteita varten.

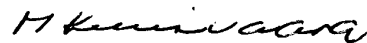
Paaluilla perustamisen yleiset perusteet esitetään ohjeessa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Siinä esitetään myös rajatilamitoituksen käyttö suurpaalujen mitoituksessa, mikä on vaihtoehtoinen menetelmä teräsputkipaalujen mitoitukseen.

Tämä kolmas painos on asiasisällöltään sama kuin toinen painos vuodelta 1993. Ohjeviittaukset on kuitenkin päivitetty nykytilanteen mukaisesti.

Apulaisjohtaja
Siltayksikkö


Juhani Vähäaho

Diplomi-insinööri


Matti Kuusivaara

LISÄTIETOJA
DI Esko Palmu
Tielaitos, Siltayksikkö
Puh. 0204442388

JAKELU/MYYNTI
Tielaitos, kirjasto
Puh. 0204442053
Telefax 0204 44 2652



Alkusanat

Teräsputkipaalujen käyttö siltojen perustamisessa on lisääntynyt vuoden 1989 jälkeen, jolloin otettiin koekäyttöön ohje Teräsputkipaalut, TVH 723448. Tänä aikana on saatu lisää kokemusta ja tutkimustietoa teräspaalujen suunnittelusta, valmistamisesta ja paalutustyöstä. Nämä kokemukset on siirretty uudistettuun ohjeeseen.

Ohjeen muutoksia ja täydennyksiä käsitelleen toimikunnan jäseninä ovat olleet dipl.ins. Matti Kuusivaara (pj.), dipl.ins. Jouko Lämsä ja insinööri Esko Palmu tiehallituksen siltayksiköstä, dipl.ins. Pentti Salo tiehallituksen geopalvelukeskuksesta, ins. Kari Väliaho Rautaruukki Oy:n putkiryhmästä sekä prof. Jorma Hartikainen ja dipl.ins. Juha Heinonen Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laitokselta.

Ohjeen kirjoitustyön on tehnyt GT-Geotieto konsulttityönä. Ohje perustuu Aki Hyrkkösen diplomityöhön: Suuren teräsputkipaalun geotekninen kantavuus ja Mauri Koskisen lisensiaattityöhön: Teräsputkipaalun sivukapasiteetti.

Uusitus ohjeessa on pyritty ottamaan huomioon tehdystä teräsputkipaalutustöistä saadut kokemukset. Erityisesti Heinolan Tähtiniemen sillan kokemuksia on systemaattisesti kerätty. Tutkimustyötä on pääosin tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laitoksen toimesta ja ohjeen täydentämisessä on käytetty seuraavia diplomitöitä ja julkaisuja: Juha Heinonen, Tähtiniemen sillan paalutus, 1992, Sami Punkari, Teräsputkipaalutuksen valvonta, 1992, Minna Leppänen, Teräspaalujen korroosio, 1992, Hannu Jokiniemi, Teräsputkipaalujen kalliojärjet, 1992 sekä Jorma Hartikainen, Bohdan Zadroga, Mauri Saari, Plugging of open ended steel pipe piles. Own test results, 1992. Tutkimustyötä ovat rahoittaneet tiehallitus, Rautaruukki Oy ja GT-Geotieto Oy.

Helsingissä joulukuussa 1992

Siltayksikkö

Kolmannen painoksen alkusanat

Kolmas painos on asiasisällöltään sama kuin toinen painos vuodelta 1993. Pieniä täydennyksiä siihen on esitetty ohjeessa "Sillansuunnittelun täydentävät ohjeet". Päivitykset on tehty kirjallisuusluettelon ohjeviittauksiin.

Helsingissä huhtikuussa 1999

Siltayksikkö

SISÄLTÖ

MÄÄRITELMIÄ	8
1 OHJEIDEN SOVELLUTUSALUE	9
2 POHJATUTKIMUKSET	10
2.1 Yleisvaatimukset	10
2.2 Paalujen toimintatavan vaikutus	10
2.2.1 Tukipaalu	10
2.2.2 Kitkapaalu	10
2.2.3 Sivukuormitetut paalut	11
2.2.4 Vetopaalu	11
2.2.5 Negatiivinen vaippahankaus	11
2.2.6 Korroosiotutkimukset	12
3 TERÄSPALKKIPAALUJEN VALINTAPERUSTEET	13
3.1 Paalujen toimintatapa	13
3.1.1 Tukipaalu	13
3.1.2 Kitkapaalu	14
3.1.3 Koheesiopaalu	15
3.2 Erilaisiin pohja- ja ympäristösuhteisiin soveltuvat paalutyypit	15
3.2.1 Suljetut paalut	16
3.2.1.1 Kalliokärjellä varustetut paalut (kuva 4a ja 4b)	16
3.2.1.2 Pohjalevyllä varustetut paalut (kuva 4c)	17
3.2.1.3 Franki-palkkipaalut (kuva 4d)	17
3.2.2 Avoimet paalut	18
3.2.2.1 Tulppaantuva paalu (kuva 5a)	18
3.2.2.2 Tulppaantumaton paalu (kuva 5b)	18
3.2.3 Teräskuorellinen betonipaalu (kuva 5c)	19
3.3 Paalutuksen ympäristövaikutukset	19
3.3.1 Maan syrjäytymisestä aiheutuvat haitat	20
3.3.1.1 Maanpinnan painuminen	20
3.3.1.2 Maakerrosten vaakasiirtymät ja maanpinnan kohoaminen	20
3.3.1.3 Huokospaineen kasvu	20
3.3.1.4 Maakerrosten häiriintyminen	21
3.3.2 Tärinävauriot	21
3.3.2.1 Paalutuksen aiheuttama tärinä	21
3.3.2.2 Tärinätason valvonta ja alentaminen	22
3.3.3 Meluhaitat	23
3.3.3.1 Paalutuksesta aiheutuva melutaso	23
3.3.3.2 Melutason pienentäminen ja valvonta	23
4 GEOTEKNINEN KANTAVUUS	24
4.1 Kantavuuden määrittäminen	24
4.1.1 Staattiset kantavuuskaavat	25
4.1.1.1 Kärkivastus homogeenisessä kitkamaakerroksessa	25
4.1.1.2 Kärkivastus kalliossa	26
4.1.1.3 Vaippavastus kitkamaakerroksessa	27
4.1.1.4 Vaippavastus koheesiomaakerroksessa	28

4.1.2	Kairausvastukseen perustuvat menetelmät	28
4.1.2.1	Paalun geotekninen murtokuorma heijarikairausvastuksen perusteella	29
4.1.3	Dynaamiset paalutuskaavat	29
4.1.4	Dynaamiset koekuormitukset	30
4.2	Kärjestä avoimen paalun sisäpuolinen vaippavastus	31
4.3	Tulppaantuneen paalun kantavuus	31
4.4	Negatiivinen vaippahankaus	32
4.5	Paalujen vetokapasiteetti	32
4.6	Varmuustasovaatimukset	32
4.7	Paalun painuma	33
4.8	Kuormitukset	35
4.9	Geotekninen mitoitus sivusuuntaan	35
4.9.1	Paalun sivukapasiteetti	35
4.9.2	Paalun sivukuormitus	36
4.9.3	Paalun murtomekanismit	36
4.9.4	Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot	39
4.9.5	Siirtymien laskeminen	40
4.9.6	Mitoitus staattiselle sivukuormitukselle	43
4.9.7	Mitoitus sykliselle sivukuormitukselle	44
4.9.8	Varmuuden huomioon ottaminen mitoituksessa	45
4.9.9	Sivukapasiteetin kasvattaminen	45
5	PAALUN RAKENTEELLINEN KANTAVUUS	47
5.1	Paalun rakenteellisen kantavuuden suunnittelu	47
5.2	Rakenteellinen mitoitus	47
5.2.1	Betonoimaton teräspalkkipaalu	47
5.2.1.1	Lyöntijännitykset	47
5.2.1.2	Käyttöjännitykset	48
5.2.1.3	Nurjahdus	48
5.2.2	Liittorakennepaalu	49
5.2.2.1	Lyöntijännitykset	49
5.2.2.2	Käyttöjännitykset	49
5.2.2.3	Nurjahdus	49
5.2.3	Teräskuorellinen betonipaalu	49
5.2.3.1	Lyöntijännitykset	50
5.2.3.2	Käyttöjännitykset	50
5.2.3.3	Nurjahdus	50
5.3	Korroosion huomioon ottaminen	50
5.3.1	Ylimitoitus	51
5.3.2	Erikoisteräket	52
5.3.3	Katodinen suojaus	52
5.3.4	Orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet	52
5.3.5	Betoniverhoilu	53
6	PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET	55
6.1	Putkien materiaali- ja laatuvaatimukset	55
6.1.1	Teräslajit	55
6.1.2	Laatuluokan valinta	55
6.1.3	Mitat ja tekniset toimitusehdot	55
6.2	Kalliokärki ja kalliokärjen kiinnitys paaluputkeen	57

6.3	Pohjalevy	58
6.4	Kärkivahvistus	59
6.5	Jatkoksen ja kärjen liitoshitsaukset	60
6.5.1	Hitsaus suunnitelma	60
6.5.2	Railomuodot	60
6.5.3	Hitsauslisäaineen valinta	61
6.5.4	Putkien sovitus ja silloitus	61
6.5.5	Hitsaus	62
6.5.6	Hitsausliitosten laatuvaatimukset ja tarkastus	63
6.6	Yläpään kiinnitys betonirakenteisiin	63
7	PAALUJEN SIJOITUS	65
7.1	Keskinäiset etäisyydet paaluryhmissä	65
7.2	Etäisyydet muista rakenteista	65
7.3	Poikkeamat	66
8	TERÄSPANKIPAAUTUKSEN POHJARAKENNUSSUUNNITELMA	67
9	PAALUTUSTYÖ	68
9.1	Soveltuvat paalutuskalustot	68
9.2	Lyönnin keskittäminen	69
9.3	Lyöntienergian tarkistaminen	69
9.4	Lyöntiohjeen laadinta ja tarkistaminen	70
9.5	Paalun tuenta ja ohjaus lyönnin aikana	71
10	PAALUTUSTYÖN VALVONTA	72
10.1	Asiantuntijavalvonta	72
10.2	Työkohdevalvonta	72
10.3	Paalutustyönjohtajan tehtävät	73
10.4	Geoteknisen kantavuuden varmistaminen	74
10.5	Todellisten paalukuormien ja rakenteellisen kantavuuden varmistaminen	74
10.6	Paalutuksen hyväksymisen dokumentointi	75
	KIRJALLISUUSLUETTELO	76
	LIITTEET	

MÄÄRITELMIÄ

1) Teräsputkipaalu

Paalu muodostuu halkaisijaltaan yli 300 mm teräsputkesta. Eri teräsputkipaalutyypit eroavat toisistaan paalun kärjen ja paalun varren rakenteen mukaan sekä paalun upotukseen käytettävän paalutuskaluston mukaan. Jos teräsputkipaalu betonoidaan ja betonin sekä teräsrakenteen välinen tartunta on riittävä, voidaan rakenne mitoittaa liittorakenteena.

2) Tulppaantumaton avoin teräsputkipaalu

Paalu on molemmista päistään avoin teräsputki, joka upotetaan maahan lyömällä paalun yläpäähän. Lyöntityön jälkeen maanpinta putken sisällä on likimäärin samalla tasolla kuin paalun ulkopuolella.

3) Tulppaantunut avoin teräsputkipaalu

Paalu on molemmista päistään avoin teräsputki, joka upotetaan maahan lyömällä paalun yläpäähän. Lyöntityön jälkeen maanpinta putken sisällä on selvästi alempana kuin sen ulkopuolella. Paalun tulppaantumisaste määritetään sisä- ja ulkopuolisen maanpinnan korkeuseron perusteella. Yleensä maatulpan muodostuminen edellyttää, että paalu tunkeutuu tulppaavaan maakerrokseen vähintään matkan $10 \cdot d$, jossa d on paalun halkaisija.

4) Pohjalevyllä suljettu teräsputkipaalu

Paalun muodostavat paalun vartena toimiva teräsputki ja teräsputken alapäähän hitsaamalla kiinnitetty levy. Levy sulkee putken alapään. Paalu on tarkoitettu tukeutumaan kantavaan maakerrokseen. Paalun upotus tehdään paalun yläpäähän lyöväällä paalujuntalla tai Franki-paalujuntalla.

5) Kalliokärjellinen teräsputkipaalu

Paalu muodostuu teräsputkesta, jonka alapäähän on hitsaamalla kiinnitetty kalliokärki. Kalliokärjen tehtävänä on siirtää paalun kuorma kallioon ja estää kärjen liukuminen. Kalliokärjen tulee kestää siihen rakenteen käytön aikana sekä paalun lyöntityön aikana kohdistuvat rasitukset. Kalliokärjellisen teräsputkipaalun upotus tehdään paalun yläpäähän lyöväällä paalujuntalla tai paalun alapäähän lyöväällä Franki-paalujuntalla.

6) Franki-putkipaalu

Franki-putkipaalu eroaa Franki-paalusta siten, että työputkena käytettävä teräsputki jää pysyväksi rakenteeksi.

7) Teräskuorellinen betonipaalu

Paaluputken upotus ei edellytä loppulyöntiehtojen täyttymistä, ja paalun geotekninen kantavuus mitoitetaan kaivinpaalun tapaan.

1 OHJEIDEN SOVELLUTUSALUE

Tämä ohje on laadittu noudatettavaksi suunniteltaessa ja tehtäessä paalutustöitä, joissa käytetään halkaisijaltaan yli 300 mm suuruisia teräsputkipaaluja. Paalutus tehdään pudotusjärjällellä tai muulla iskevällä laitteella varustettua paalutuskonetta käyttäen. Paalutuskoneen lyöntienergian on oltava riittävä niin, että paalujen kantavuus on todettavissa paitsi tunkeutumisvyyden myöskin käytetyn lyöntivoiman ja paalun kärjen voimavastuksen perusteella, jolloin paaluja voidaan pitää lyöntipaaluina. Tässä ohjeessa sovelletaan Lyöntipaalutusohjeen LPO-87 paalutusluokan I periaatteita.

Erikoistapauksissa voidaan käyttää myös muunlaisia paalutuskoneita etenkin avoimien putkien upotuksessa. Jos paalutuskoneesta paaluun välittyvä lyöntienergia ei ole riittävä kantavuuden varmistamiseksi tai sitä ei voida todeta, paalun kantavuuden toteaminen perustuu vain tunkeutumisvyyteen. Tällöin paalut on yleensä pääosiltaan tyhjennettävä maasta ja täytettävä betonilla. Tällaisia paaluja käsitellään kitkapaaluina tai moreenikerrokseen tukeutuvina kaivinpaaluina. Tällöin niiden geoteknisen kantavuuden mitoitus tehdään tämän ohjeen kappaleiden 4.1.1 ja 4.1.2 mukaan.

Paalujen valmistuksessa, pohjarakennussuunnittelussa ja paalutustöissä on noudatettava Suomen rakentamismääräyskokoelman määräyksiä, yleisiä työturvallisuutta koskevia säännöksiä ja näitä ohjeita sekä soveltuvin osin käytössä olevia normeja ja ohjeita, joista erityisesti mainittakoon

- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry:n Pohjarakennusohjeet 1988 RIL 121
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry:n Lyöntipaalutusohjeet LPO-87, Suurpaaluohjeet SPO-78 tai voimassa olevat suurpaaluohjeet
- Suomen Betoniyhdistys ry:n ja Teräsrakenneyhdistys ry:n Liittorakenteet, suunnitteluohjeet 1988
- Tielaitoksen Siltojen pohjatutkimukset (TIEL 3200537), Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa (TIEL 2172068), Siltojen kuormat (TIEL 2172072) ja Teräsrakenneohjeet (TIEL 21723449) sekä Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset SYL ja Sillanrakentamisen valvontaohje SVO.

2 POHJATUTKIMUKSET

2.1 Yleisvaatimukset

Rakennushankkeeseen ryhtyessä on tehtävä riittävän seikkaperäiset pohjatutkimukset eri suunnitteluvaiheita vastaavasti ensin perustamistavan valintaa ja sitten perustusrakenteiden sekä muiden pohjarakennustöiden suunnittelua ja rakentamista varten.

Pohjatutkimukset tehdään julkaisun Siltojen pohjatutkimukset (TIEL 3200537) /31/ mukaisesti.

2.2 Paalujen toimintatavan vaikutus

2.2.1 Tukipaalut

Tukipaaluperustuksia käytettäessä kairauksilla selvitetään kallionpinnan sijainti ja kallion pintaosan rakenne pääpiirteittäin. Kallionpinnan sijainti ja muodot selvitetään erityisesti silloin, kun koheesiomaakerrokset ulottuvat kallionpintaan asti, kun kaltevan kallionpinnan päällä on löyhä karkearakeinen maakerros tai moreenikerros ja kun kaltevan kallionpinnan päällä oleva tiivis karkearakeinen maakerros tai moreenikerros on ohut. Kun kallion päällä oleva karkearakeinen maakerros tai moreenikerros on niin tiivis ja paksu, että paalut saavuttavat riittävän geoteknisen kantavuuden tukeutumatta kallioon, voidaan kairaukset päättää kovaan pohjakerrokseen.

Yleensä kallionpinnan sijainti on selvitettävä porakonekairauksin. Paalujen tunkeutuvuuden ja maakerrosten tiiviyyden selvittämiseksi on tehtävä heijarikairauksia.

Käytettäessä kallioon ulottuvia tukipaaluja selvitetään kallionpinnan sijainti aina porakonekairauksin jokaisen paaluryhmän kohdalta. Erityistapauksissa on tarpeen tehdä myös kallion pintaosan rakenteen selvityksiä kallionäytekairauksin.

2.2.2 Kitka- ja puristuspäälut

Kitka- ja puristuspäälut käytettäessä selvitetään maakerrosten väliset rajat ja tiiviys sekä pääluilla läpäistävien kerrosten että varsinkin päälutä kantavien maakerrosten osalta.

Pohjatutkimukset tehdään pääasiassa heijari-, puristin- tai puristinheijarikairauksin. Tutkimusmenetelmiä valittaessa ja tutkimusta tehtäessä on kiinnitettävä huomiota erityisesti siihen, että myös kitkamaakerrosten välissä mahdollisesti esiintyvät koheesiomaakerrokset voidaan luotettavasti todeta ja paikallistaa.

Maakerroksista, joihin päälut tukeutuvat, on otettava maanäytteitä rakeisuuden määrittämistä varten. Vaippavastuksen määrittämiseksi on suositeltavaa tehdä maan lujuusarvojen määrittämissä esimerkiksi kolmiakselialikokein.

Avointa paalua lyötäessä voi sen kärkeen muodostua maatulppa. Jos maatulppaa käytetään hyväksi paalun geoteknistä kantavuutta mitoitettaessa, on tulppaavasta maakerroksesta otettava maanäytteitä, joista määritetään vähintään rakeisuus, mutta mieluummin myös lujuusarvot.

2.2.3 Sivukuormitetut paalut

Käytettäessä sivukapasiteettia hyväksi tai rakennusjärjestelmän pakkovoi-
mien aiheuttaessa paaluille sivukuormaa on erityisesti paalun yläosaa tuke-
vien maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosarvot selvitettävä.

Lujuusarvot selvitetään hienorakeisissa ja eloperäisissä maa-
kerroksissa siipikairauksin ja karkearakeisissa maakerroksissa
ja moreenikerroksissa välillisesti maalajimääritysten ja kairauk-
silla tehdyn tiiviysmäärittelyn avulla tai näytteistä kolmiak-
siaalikokein.

2.2.4 Vetopaalut

Käytettäessä paaluja, joille tulee pysyvästi tai toistuvasti vetoa enemmän
kuin paalu tehollisesti painaa, on pohjatutkimuksen avulla voitava selvittää
paalun vaipan ja maakerrosten välinen kitka ja adheesio.

Paaluille voidaan sallia pitkäaikaista vetovoimaa vain karkeara-
keisten tai moreenikerrosten osalla. Tätä varten tarvitaan kit-
kapaaluja vastaavat pohjatutkimukset. Hetkellistä vetovoimaa
voidaan sallia myös koheesiomaakerroksille. Tätä varten tarvi-
taan siipikairaustuloksia, joiden perusteella arvioidaan vaipan
adheesio.

2.2.5 Negatiivinen vaippahankaus

Sillä osalla paalun vaippaa, missä hienorakeiset tai eloperäiset maakerrok-
set painuvat yli 5 mm enemmän kuin paalu, esimerkiksi täytön vaikutuk-
sesta, on paalun vaipan ja maakerrosten välinen adheesiovoima voitava
määrittää negatiivisen vaippahankauksen huomioonottamiseksi.

Painumien määrittämiseksi tarvitaan häiriintymättömistä näyt-
teistä ödometrikokein määritettyjä kokoonpuristuvuusarvoja.
Koheesion määrittämiseksi tarvitaan siipikairauksin selvitettyjä
lujuusarvoja.

2.2.6 Korroosiotutkimukset

Teräspanluja käytettäessä on selvitettävä mahdollinen korroosioriski.

Luonnontilaisen ja homogeenisen maaperän syövyttävyyden on yleensä pieni. Merkittävää korroosiota voi tapahtua vain hapellisissa olosuhteissa. Hapellisia olosuhteita esiintyy Pohjarakennusohjeiden RIL-121 /20/ esittämän alimman mitoittavan pohjavedenpinnan yläpuolella.

Maaperän syövyttävyyden on tutkittava korroosiotutkimuksilla, jos alueella esiintyy eloperäisiä maalajeja, täyttöjä tai sulfidisavia tai jos paalua ympäröivä vesi on saastunut. Erityisen syövyttäviä voivat olla sellaiset maa-alueet, joiden ominaisvastus ja pH-lukuarvo on pieni.

Maaperäkorroosioon vaikuttavat monet tekijät, joiden yhteisvaikutusta on vaikea ennustaa. Korroosiotutkimuksilla voidaan tutkia yksittäisten tekijöiden vaikutusta. Tärkeimpiä tekijöitä ovat vesi- ja humuspitoisuus, maan happamuus, ominaisvastus, huokosveden kemiallinen koostumus sekä pohjavedenpinnan sijainti ja vaihtelu.

Ominaisvastus määritetään maastossa Wennerin nelipistemenetelmällä tai Wennerin sauvaelektrodilla. Laboratoriossa ominaisvastus voidaan määrittää maalaatikkomenetelmällä tai levymäisillä pis-toelektrodeilla.

Korroosiotutkimuksissa voidaan käyttää myös korroosiosondia tai tehdä soveltuvia sähkökemiallisia mittauksia.

Pohjatutkimusten yhteydessä tulisi varata näytteitä myös laboratorioissa tehtäviä korroosiotutkimuksia varten. Näytteiden käsittelyssä ja säilytyksessä on pyrittävä estämään näytteen häiriintyminen ja hapettuminen. Laboratoriotutkimukset tulee tehdä mahdollisimman nopeasti, jotta näytteiden ominaisuudet eivät ehdi muuttua.

Rakennuskohteen lähellä sijaitsevat sähkölaitokset, voimajohtopylväät ja sähköinen raideliikenne voivat aiheuttaa hajavirtakorroosiota, jonka suuruutta voidaan arvioida mittaamalla laitteiden vuotovirrat ja selvittämällä maaperän sähkönjohtokyky. Korroosioolosuhteiden muuttumiseen paalujen suunniteltuna käyttöaikana tulee tarvittaessa varautua suoja-aluevarauksilla tms. rakennuttajan päätettävissä olevilla toimenpiteillä.

Rikkipitoisessa maassa, mm. sulfidisavissa, voi tapahtua mikrobiologista korroosiota hapettomassa tilassa. Sitä voidaan arvioida tutkimalla maaperässä olevien mikrobien määrää, lajivalikoimaa ja aktiivisuutta. Sulfidisavien esiintyminen on mahdollista Litorinasavien esiintymisalueella ja joskus myös Ancylos-savissa.

Korroosiotutkimusten perusteella valitaan sopiva korroosionestomenetelmä. Niitä käsitellään luvussa 5.3.

3 TERÄSPUTKIPAALUJEN VALINTAPERUSTEET

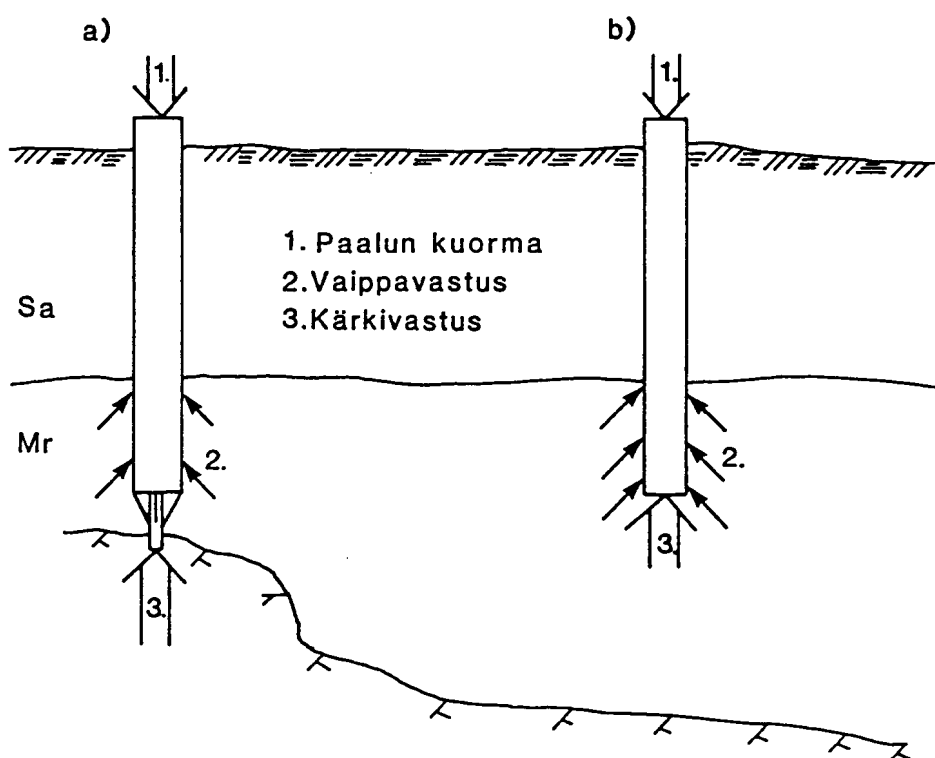
Tehtäessä valintaa toimintatavaltaan erilaisten paalutyyppejen välillä vaikuttavat ratkaisuun ensisijaisesti rakennuspaikan pohjasuhteet ja rakenteiden asettamat vaatimukset.

3.1 Paalujen toimintatapa

3.1.1 Tukipaalu

Tukipaalu siirtää pääosan kuormastaan kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen pohjakerrokseen. Osa kuormasta voi siirtyä ympäröivään maakerrokseen vaippakitkan avulla (kuva 1).

Paaluperustusta suunniteltaessa on yleensä ensin selvitettävä tukipaalujen teknillinen ja taloudellinen käyttömahdollisuus. Käytettäessä suuria teräsputkipaaluja tukipaaluina voidaan materiaalin lujuus käyttää tehokkaasti hyväksi.



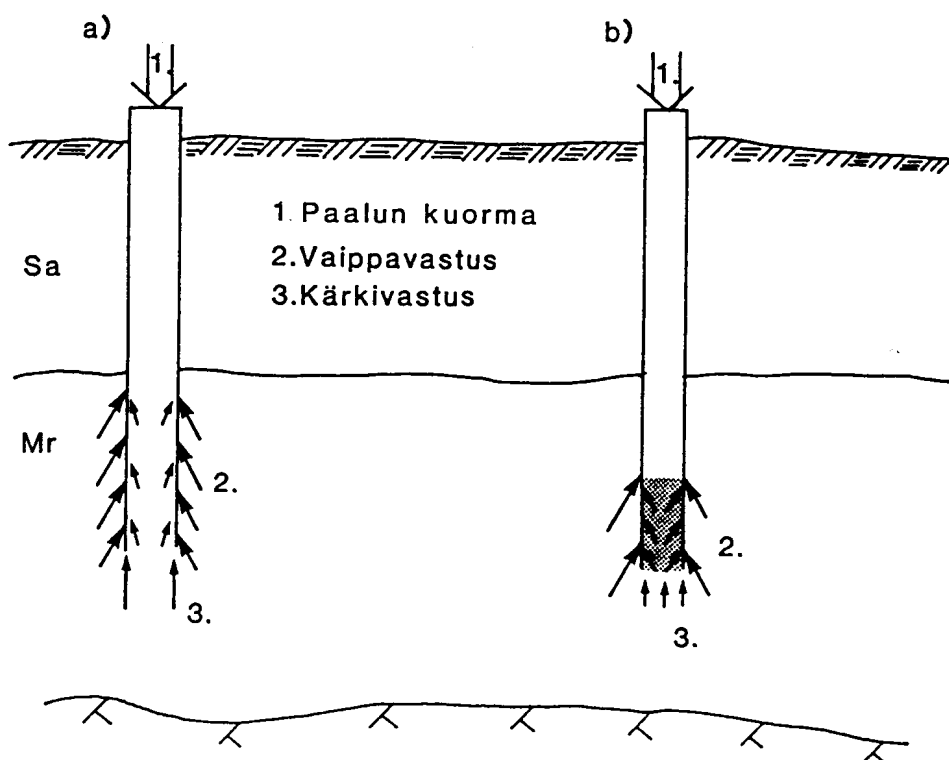
Kuva 1. a) Kallioon tukeutuvan tukipaalun toimintatapa ja b) maahan tukeutuvan tukipaalun toimintatapa /5/.

3.1.2 Kitkapaalu

Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta vaippavastuksen välityksellä maakerroksille. Kärjestä avoimen kitkapaalun toimintatapa voidaan rajata kahteen eri tapaukseen.

- 1) Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta ulko- ja sisäpuolisen vaippakitkan välityksellä ympäröivään maakerrokseen. Osa kuormasta siirtyy putken kärjen välityksellä (kuva 2a).
- 2) Kitkapaalu siirtää osan kuormasta ulkopinnan vaippakitkan välityksellä viereiseen maakerrokseen. Osa kuormasta siirtyy paalun alapäähän muodostuneen maatulpan välityksellä. Maatulppa muodostuu paalun sisään tunkeutuneen maan ja sisäpuolisen vaippapinnan välisen kitkan vaikutuksesta (kuva 2b).

Kitkapaalujen käyttö tulee kysymykseen silloin, kun kallion tai tiivisrakenteisen pohjakerroksen päällä oleva karkearakeinen maakerros tai moreenimaakerros on paksu.

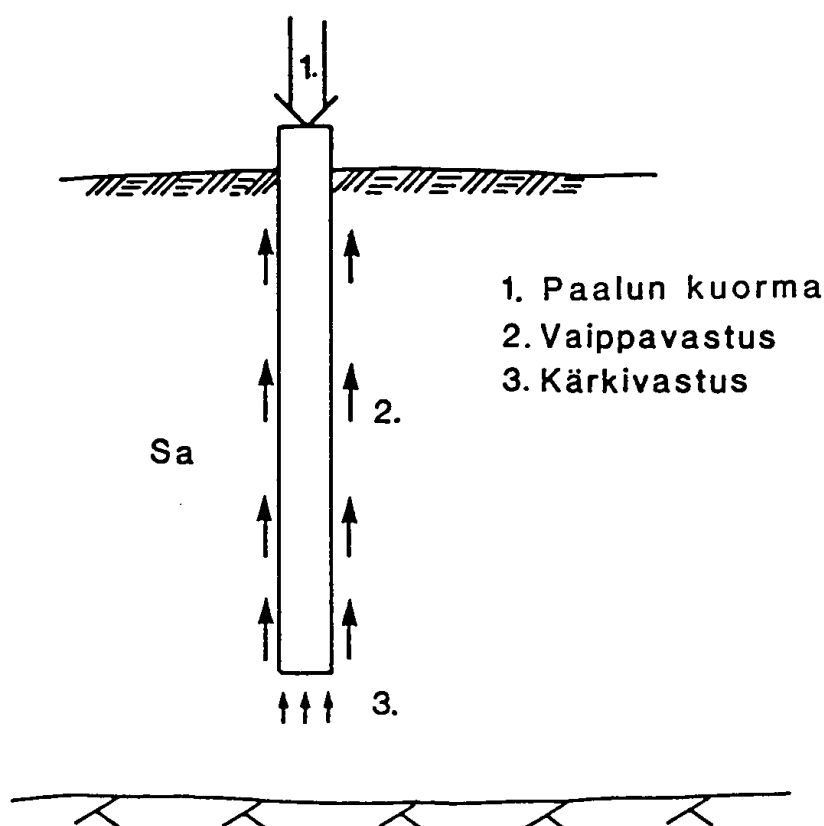


Kuva 2. Kitkapaalun toimintatapa /5/. a) Ulko- ja sisäpuolinen vaippakitka ja b) ulkopuolinen vaippakitka ja maatulppa

3.1.3 Koheesiopaalu

Koheesiopaalu siirtää paalun kuorman vaippapinnalla syntyvän adheesiovälityksellä. Kärkivastus on pieni (kuva 3). Koheesiopaaluilla perustettu rakenne tavallisesti painuu, koska paalut kuormittavat kokoonpuristuvia maakerroksia. Rakenteelle sallittavat painumat ja syntyvien painumien tasaisuus määräävät ratkaisun käyttökelpoisuuden.

Koheesiopaalujen käyttö tulee pysyvissä rakenteissa kysymykseen ainoastaan silloin, kun koheesiomaakerros on erityisen paksu tai kova. Suomessa ei esiinny maakerroksia, joissa teräspaalujen käyttö koheesiopaaluina on järkevää.



Kuva 3. Koheesiopaalun toimintatapa /5/.

3.2 Erilaisiin pohja- ja ympäristösuhteisiin soveltuvat paalutyypit

Suuret teräsputkipaalut soveltuvat moniin vaikeisiin käyttöolosuhteisiin ja rakenteisiin, kuten esimerkiksi

- suurille paalujen kuormille,
- paalujen saadessa taivutusrasituksia,
- vaikeisiin pohjaolosuhteisiin,
- vesirakentamiseen, erityisesti satamarakenteisiin ja vesistösiltoihin,
- paalutettaessa lähellä helposti vaurioituvia rakenteita soveltuvat erityisesti avoimet paalut.

Teräsputkipaalut, erityisesti liittorakenteisena toimivat teräsputkipaalut, sietävät suuria puristus- ja taivutusrasituksia.

Kun pehmeät maakerrokset ovat paksut tai vesisyvyys on suuri, tarvitaan suurten teräsputkipaalujen hyvää kestävyyttä nurjahdusta vastaan. Tämä mahdollistaa paaluanturan suunnittelamisen lähelle vesirajaa. Jos käytetään kasuunia, paaluantura voidaan valaa kuivatyönä. Kun on läpäistävä tiiviitä maakerroksia tai saavutettava suuri geotekninen kantavuus, teräsputkipaalujen hyvä tunkeutuvuus on merkittävä etu. Vesirakentamisessa etuina ovat myöskin paalujen helppo käsittely yleensä ja erityisesti mahdollisuus uittaa niitä. Lisäksi teräsputkipaalujen lyöntikaluston, erityisesti hydrauli- ja dieseljunttien, soveltuvuus laualta työskentelyyn on tärkeä etu.

Jos lähellä on vaurioitumisherkkiä rakenteita, voidaan avoimia paaluja käyttämällä vähentää paalutuksessa syntyviä tärinöitä ja siirtymiä sekä vähentää maan lujuuden alenemista häiriintymisen ja huokosvedenpaineen nousun seurauksena. Suljetuilakin paaluilla maan syrjäytyminen on suhteessa kantavuuteen pienempi kuin lyötävillä betonipaaluilla.

3.2.1 Suljetut paalut

Suljettuja paaluja ovat kalliokärjillä ja pohjalevyllä varustetut teräsputkipaalut sekä betonitulpalla alapäästä suljetut Franki-putkipaalut.

Suljetut paalut soveltuvat käytettäväksi pääasiassa silloin, kun paalut tunkeutuvat kiviseen moreeniin ja aina, kun paalut tukeutuvat kallioon.

3.2.1.1 Kalliokärjellä varustetut paalut (kuva 4a ja 4b)

Kalliokärjen tarkoituksena on estää paalun kärjen liukuminen vinolla kallion pinnalla. Lisäksi kalliokärkeä käytettäessä pyritään keskistämään paalun kuorma paalun kärjessä ja vähentämään paalua rasittavan taivutusmomentin syntymistä.

Kalliokärkeä käytetään kohteissa, joissa paalun kärki tukeutuu kallioon tai joissa paalua lyödään lohkareiseen moreeniin. Kalliokärjellinen paalu voidaan lyödä joko ylä- tai alapäästä. Kalliokärkeä käsitellään tarkemmin kohdassa 6.2.

Jos kalliopinta on jyrkästi viettävä ja tukeva karkearakeinen maa- tai moreenikerros on ohut, voidaan paalu luotettavan kallioon tukeutumisen varmistamiseksi varustaa kalliokärjen läpi porattavalla terästäpilla.

3.2.1.2 Pohjalevyllä varustetut haalut (kuva 4c)

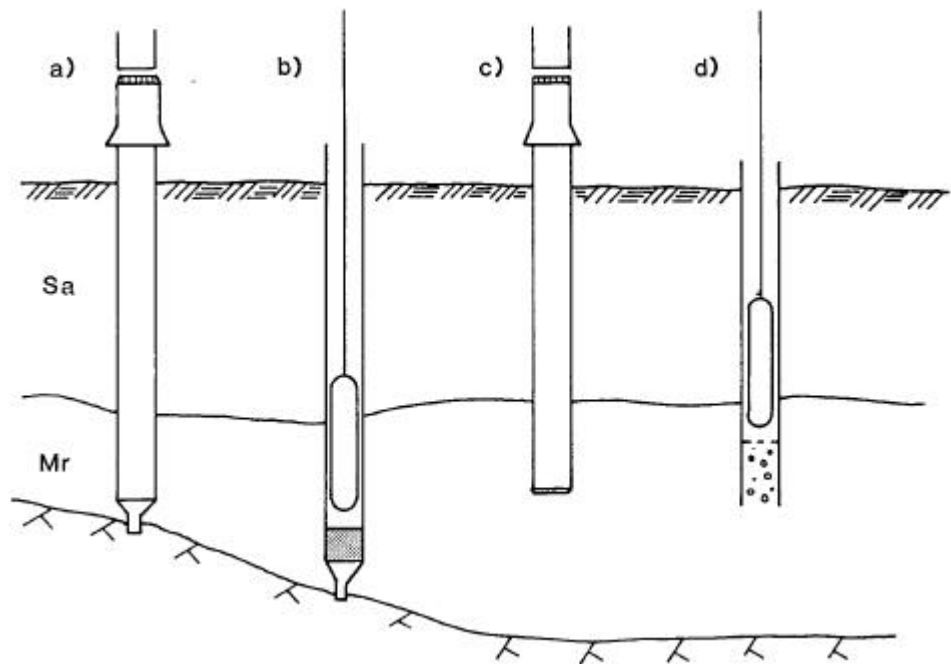
Pohjalevyllä varmistetaan haalun kärjen kantaminen koko haalun bruttopoikileikkausalalla.

Pohjalevyä käytetään kohteissa, joissa kallion päällä on niin paksu kantava maakerros, että haalun geotekninen kantavuus maakerroksessa on riittävä ilman sen ulottamista kallioon.

3.2.1.3 Franki-hutkihaalut (kuva 4d)

Franki-hutkihaalu suljetaan kärjestään maakostealla betonitulpalla. Franki-hutkihaalu mahdollistaa suuren lyöntienergian käytön ja samalla hyvän tunkeutuvuuden haaluputken rakenteellisen kapasiteetin sitä rajoittamatta.

Betonitulpalla varustettu Franki-hutkihaalu soveltuu samoihin olosuhteisiin kuin pohjalevyllä varustettu haalu.



Kuva 4.

a) Kalliokärjellä varustettu yläpäästä lyötävä haalu, b) kallio-kärjellä alapäästä lyötävä haalu, c) pohjalevyllä varustettu yläpäästä lyötävä haalu, d) Franki-hutkihaalu

3.2.2 Avoimet paalut

Avoimina lyötäviä paaluja ovat avoin tulppaantuva paalu, avoin tulppaantumaton paalu sekä teräskuorellinen betonipaalu. Avointa paalua ei voida ulottaa kallioon.

Avoimien tulppaantumattomien paalujen syrjäyttämä maamassa on pieni ja maan häiriintyminen on vähäistä. Täten ne soveltuvat käytettäväksi helposti vaurioituvien rakenteiden lähellä. Lisäksi paalutustyö on helpompi ja vaipan kautta kulkevat jännitykset pienemmät verrattuna vastaaviin suljettuihin lyöntipaaluihin.

Avoimia paaluja käytetään ensisijaisesti kitkapaaluina. Avoimen paalun käyttö edellyttää, että karkearakeinen maakerros tai moreenikerros kallion päällä on paksu eikä siinä esiinny huomattavaa kivisyyttä tai lohkaraisuutta. Kun avoimia paaluja ei uloteta kallioon, paalun on saavutettava maakerroksissa riittävä geotekninen kantavuus.

3.2.2.1 Tulppaantuva paalu (kuva 5a)

Tulppaantuva paalu soveltuu kohteisiin, joissa paalun sisään muodostuu kantavassa maakerroksessa maatulppa kitkan vaikutuksesta. Tällöin paalu toimii lähes kuten suljettu paalu. Avoimen ja tulppaantuvan paalun suositeltavia käyttökohteita on esitelty luvussa 3.3.

Avoin tulppaantuva paalu on geoteknisesti edullinen teräspaalityyppi, jonka käyttö edellyttää kuitenkin tulpan muodostumisen toteutumista. Tulppaantuminen voi tapahtua, kun tulppaavan maakerroksen paksuuden suhde paalun halkaisijaan on riittävä, ja jos tulppaava maakerros on keskitiivis tai tiivis, riittävän suhteistunut ja siltipitoisuudeltaan vähäinen. Jos tulpan muodostumista ei voida todeta lyönnin yhteydessä, se on todettava kairauksilla. Jos riittävää tulpan muodostumista ei voida todeta, paalut on mitoitettava tulppaantumattomina ja ulotettava syvemmälle.

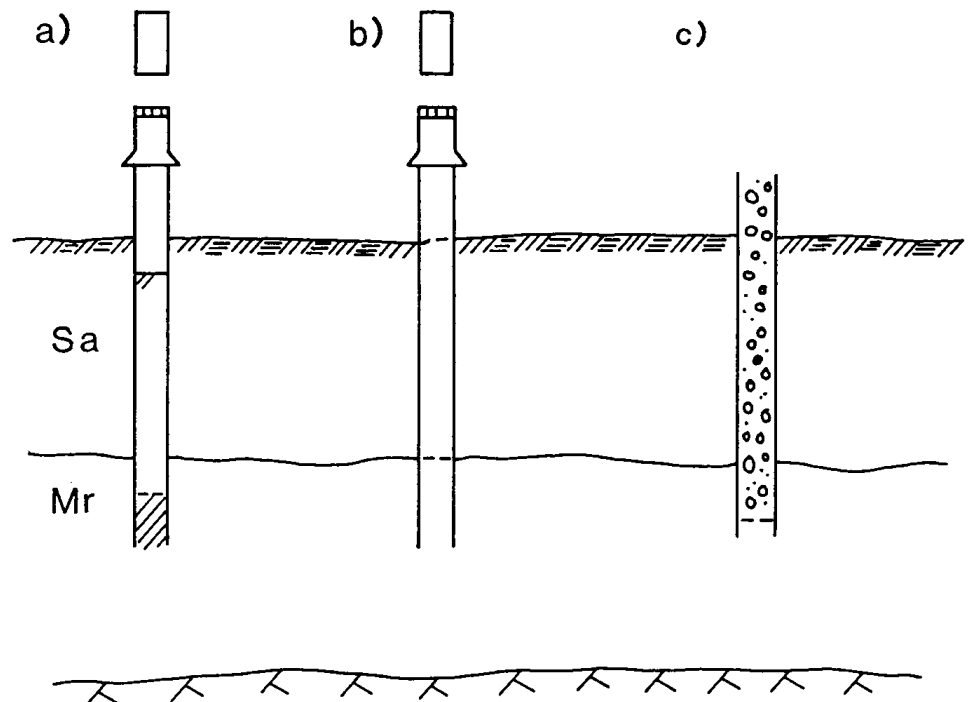
3.2.2.2 Tulppaantumaton paalu (kuva 5b)

Tulppaantumaton kärjestä avointa paalua voidaan käyttää kohteissa, joissa tulppaantumista ei tapahdu ja olosuhteiden vuoksi suljettua paalua ei voida käyttää.

3.2.3 Teräskuorellinen betonipaalu (kuva 5c)

Teräskuorellista betonipaalua käytetään mm. silloin, kun teräsputki upotetaan kalustolla, jonka lyöntienergia ei ole todettavissa. Teräskuorellinen betonipaalu on kaivettava tyhjäksi. Paalun alapäähän voidaan kuitenkin jättää ohuehko tiivis maakerros. Paalu betonoidaan vedenalaisena työnä. Teräskuorellinen betonipaalu voidaan kantavuudeltaan rinnastaa moreeniin tukeutuvaan tai kitkapaaluna toimivaan kaivinpaaluun kuitenkin niin, että vaippavastus on enintään 70% vastaavan kokoisen kaivinpaalun vaippavastuksesta.

Teräskuorellista betonipaalua käytettäessä putket voidaan upottaa lyömällä, täryttämällä, painamalla tai hiertämällä. Teräskuorellisen betonipaalun teräsputken seinämä voi olla ohuempi ja teräslaatu alempi kuin teräsputkipaaluilla.



Kuva 5. a) Avoin tulppaantunut paalu
b) avoin tulppaantumaton paalu
c) teräskuorellinen betonipaalu

3.3 Paalutuksen ympäristövaikutukset

Paalutuksesta aiheutuvia ympäristöhaittoja ovat maanpinnan painuminen tai kohoaminen ja siirtyminen, maakerrosten häiriintyminen ja huokosvedenpaineen kasvu sekä värinä ja melu. Ympäristöhaittojen on pysyttävä sallituissa rajoissa, joissa pysyminen on varmistettava tarvittaessa jatkuvin tarkkailumittauksin. Ympäristöhaittoja voidaan pienentää oikealla paalutyypin valinnalla. Avoimen teräsputkipaalun käyttö on suositeltavaa kohteissa, joissa on maan siirtymille herkkiä rakenteita kuten esimerkiksi satamissa sekä työkohteissa, jotka sijaitsevat rakennusten läheisyydessä.

3.3.1 Maan syrjäytymisestä aiheutuvat haitat

Maan syrjäytymisestä aiheutuvia haittoja voidaan välttää käyttämällä avoimia teräspankipaaluja, jolloin syrjäytetty pinta-ala on pienin mahdollinen eli teräspankileikkauksen pinta-ala ennen tulppaantumisen alkamista.

Kuitenkin suljetuillakin paaluilla maan syrjäytyminen on suhteessa kantavuuteen vähäisempää kuin betonipaaluilla.

3.3.1.1 Maanpinnan painuminen

Lyödessä paaluja löyhään karkearakeiseen maakerrokseen paalutus aiheuttaa maaperän tiivistymistä, joka näkyy maanpinnan painumisena paalutusalueella.

Painumat voivat aiheuttaa viereisten rakennusten painumia. Painumanotkon tilavuus voi olla jopa 50% maahan lyötyjen paalujen tilavuudesta. Painumia esiintyy 1/4 - 1 kertaa paalun maassa olevan pituuden suuruisella etäisyydellä paalusta. Löyhässä kitkamaassa paalutus on edullista aloittaa riskialttiimmalta kohdalta poispäin edeten. Maanpinnan ja ympäröivien rakenteiden painumista valvotaan vaaituksilla.

3.3.1.2 Maakerrosten vaakasiirtymät ja maanpinnan kohoaminen

Lyödessä paaluja hienorakeiseen maakerrokseen paalutus aiheuttaa maan syrjäytymistä, kun savi tai siltti eivät tiivisty. Tämä ilmenee maanpinnan kohoamisena ja maakerrosten sivusiirtyminä.

Kohouman tilavuus voi vastata lyötyjen paalujen tilavuutta. Maan kohoamista esiintyy alueella, joka ulottuu savi- tai silttikerroksen syvyyden verran paalutuksen ulkopuolelle. Paalujen lyönti on syytä aloittaa riskialtteinnaasta kohdasta poispäin. Syrjäytyminen voi aiheuttaa esimerkiksi viereisten putkien tai jopa rakennusten vaurioitumisen. Maanpinnan sekä paalujen ja ympäröivien rakenteiden kohoamista valvotaan vaaituksilla sekä paalujen ja ympäröivien rakenteiden siirtymiä siirtymämittaustuksilla.

3.3.1.3 Huokospaineen kasvu

Paalujen lyönti maakerrokseen aiheuttaa huokosvedenpaineen kasvua, mikä pienentää maapohjan leikkauslujuutta.

Rinnealueilla, maaluiskien ja kaivantojen lähellä paalutettaessa tulee paalutuksen aiheuttamia huokosvedenpaineita mitata ja ottaa ne huomioon vakavuuslaskelmissa. Huokosvedenpaineen kehittymistä voidaan rajoittaa käyttämällä avoimia paaluja tai minimoimalla suljettujen paalujen bruttopoikkileikkauksala. Huokosvedenpaineen nousua voidaan vähentää myös

- poistamalla hienorakeisia maakerroksia paalun kohdalta esimerkiksi putken avulla,
- varustamalla paalut liuskapystyöjillä tai pystyöjittämällä paalutettava alue sekä
- jaksottamalla paalujen lyöntiä tai pidentämällä paalutuksen kestoa.

3.3.1.4 Maakerrosten häiriintyminen

Paalujen lyönti hienorakeisiin maakerroksiin aiheuttaa niiden häiriintymisen takia lujuuden alenemista, joka palautuu hitaasti, mutta ylikonsolidoituneiden maakerrosten osalta vain osittain.

Rinnealueilla, maaluiskien ja kaivantojen lähellä paalutettaessa tulee paalutuksen aiheuttama leikkauslujuuden aleneminen ottaa huomioon vakavuuslaskelmissa. Leikkauslujuutta on syytä seurata siipikairauksin paalutuksen aikana. Häiriintymistä voidaan ehkäistä ensisijaisesti käyttämällä avoimia paaluja tai rajoittamalla suljettujen paalujen bruttopoikki-leikkausala. Lisäksi haittoja voidaan vähentää poistamalla hienorakeiset maakerrokset paalun kohdalta. Jaksottamalla paalujen lyöntiä tai pidentämällä paalutuksen kestoa voidaan antaa aikaa lujuuden palautumiselle.

3.3.2 Tärinävauriot

3.3.2.1 Paalutuksen aiheuttama tärinä

Täristä johtuvaa rakennusten vaurioitumisriskiä voidaan yleensä arvioida suurimman pystysuoran heilahdusnopeuden perusteella.

Paalutuksesta aiheutuvien tärinöiden taajuudet vaihtelevat 2 - 50 Hz. Suurimmat tärinät esiintyvät taajuuksialueella 5 - 20 Hz.

Paalutustyöstä aiheutuva maanpinnan suurin pystysuora heilahdusnopeus, jota voidaan käyttää alustaviin tarkasteluihin, saadaan kaavasta /16/

$$v_{\max} = 15 \frac{\sqrt{W}}{r} \quad (1)$$

$v_{\max}$ = suurin pystysuora heilahdusnopeus, [mm/s]

W = lyöntienergia, Nm/lyönti

r = etäisyys paalusta mittauspisteeseen, [m]

Maalajin ja kyllästysasteen vaikutusta värinän etenemiseen ei kaavassa ole otettu huomioon. Värinä etenee pisimmälle pehmeässä savessa ja siltissä, joiden vesipitoisuus on korkea. Sorassa ja moreenissa värinä vaimenee nopeimmin.

Paalutuspaikan lähellä sijaitsevaan rakennukseen siirtyvän värinän heilahdusnopeus on eräiden havaintojen mukaan noin 10 - 60 % kaavalla (1) saaduista arvoista rakennuksen perustamistavasta riippuen.

Rakennusten suurimpia sallittuja heilahdusnopeuden arvoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Rakennusten suurimpia sallittuja pystysuoria heilahdusnopeuden arvoja /16/.

Rakennuksen luokka	Rakennuksen laatu	Suurin pystysuora heilahdusnopeus [mm/s]
1	Vanhat historialliset rakennukset	2
2	Halkeilleet rakennukset, tiilirakennukset	5
3	Hyväkuntoiset vauriottomat rakennukset	10
4	Hyvin vahvat rakennukset	10 – 40

Rakennuksen laadun lisäksi heilahdusnopeuden ja vaurioriskin vuorosuhde riippuu paikallisista olosuhteista, muun muassa pohjasuhteista sekä värinän ominaisuuksista, kestoajasta ja taajuudesta.

3.3.2.2 Värinätason valvonta ja alentaminen

Värinätasoa valvotaan värinämittauksin rakenteista ja mahdollisesti laitteista.

Yleensä riittää värinän heilahdusnopeuden mittaaminen, mutta vaativissa tapauksissa ja laitteiden osalta tulee mitata kiihtyvyyksiä ja taajuutta. Värinämittauspisteet asennetaan lähelle lyötävää paalua rakennuksen kantaviin rakenteisiin. Kipsisiltöjen ja teippien asentaminen vaurioille herkkiin paikkoihin on myös suositeltavaa.

Värinätasoa voidaan alentaa ensisijaisesti minimoimalla paalujen bruttopoikkileikkausala. Muita toimenpiteitä, joilla voidaan ehkäistä värinää ovat

- ko. paalujen lyöntiin hyvin soveltuvan, tehokkaan ja hyväkuntoisen paalutuskoneen käyttäminen,

- järkäleen iskujen pitäminen keskeisinä ja paalun pituusakselin suuntaisena,
- tarpeettoman lyönnin välttäminen suunnittelemalla paalun tavoitesyvyys ja loppulyöntiohje tarkasti,
- alkureiän poraaminen paalulle täyteen, roudan tai tiiviin pintakerroksen läpi sekä
- täryjuntan käytön välttäminen koheesiomaassa

3.3.3 Meluhaitat

3.3.3.1 Paalutuksesta aiheutuva melutaso

Paalutuksesta aiheutuvan melutason määrittämiseen soveltuvia laskumenetelmiä ei ole käytettävissä. Suurin sallittu melutaso L_{Aeq} saa olla enintään 80 dB tiloissa, joissa pääsääntöisesti oleskelee työmaalle kuulumattomia henkilöitä.

Taulukossa 2 on esitetty eräitä ohjearvoja, joita voidaan käyttää erityyppisten paalutuskoneiden aiheuttaman melutason arvioimiseen.

Taulukko 2. Erilaisten paalutuslaitteiden aiheuttama melu ja sen vaimeneminen avoimessa maastossa.

Paalutuslaite	Melutaso 10 m etäisyydellä [dB]	Arvioitu etäisyys, jolla melutaso on 80 dB [m]
Pudotusjärkäle	90 – 100	40 – 160
Täryjuntta	90 – 100	40 – 160
Diesel- ja hydraulijärkäle	100 – 105	160 – 320
Franki-paalutuskone	80 – 90	10 – 40

3.3.3.2 Melutason pienentäminen ja valvonta

Melutasoa voidaan pienentää melulähteen eristämällä sekä sopivien iskutyynyjen käyttämisellä.

Paalutuskoneisiin asennettavilla melusuojuimilla melutasoa on voitu pienentää noin 20 dB. Lisäksi suojain estää öljyn roiskumisen ja pakokaasujen leviämisen.

Melutason valvonta tehdään äänitasomittauksin.

4 GEOTEKNINEN KANTAVUUS

Paalun kantavuus määritetään siten, että paalu lyöntirasitusten jälkeen riittäväällä varmuudella kestää eri kuormitustapauksissa sille tulevat kuormat painumien ja sivusiirtymien pysyessä rakenteen sietämissä rajoissa.

Paalun kantavuus määräytyy joko rakenteellisen tai geoteknisen kantavuuden perusteella, jolloin pienempi kantavuusarvo on määräävä.

Geotekninen kantavuus määritetään pohjasuhteiden ja paalutustyölle asetettavien vaatimusten sekä tarkastustoimenpiteiden mukaan.

Paalun geotekninen kantavuus koostuu paalun kärjen kantavuudesta eli kärkivastuksesta ja vaipan kantavuudesta eli vaippavastuksesta. Kärkivastuksen mobilisoituminen vaatii huomattavasti suuremman painuman kuin vaippavastuksen mobilisoituminen. Negatiivisen vaippahankauksen ja avoimen paalun tulppautumisen vaikutus geotekniseen kantavuuteen tarkistetaan erikseen silloin, kun negatiivista vaippahankausta kehittyy tai kun paalu tulppautuu. Paalun mahdollinen korroosio ei vähennä geoteknistä kantavuutta.

4.1 Kantavuuden määrittystavat

Tässä ohjeessa käsitellään pääosin lyöntipaaluja, joiden geotekninen kantavuus on määritettävä sekä paalujen tunkeutumisvyödyden että loppulyöntien perusteella. Erikoistapauksina käsitellään teräskuorellisia betonipaaluja, joiden teräsputki on upotettu niin, ettei lyöntienergia lyöntipaalutuksen kannalta ole ollut riittävä. Näiden paalujen kantavuus määritellään tunkeutumisvyödyden tai kaivinpaalutusta koskevien ohjeiden perusteella.

Paalun geotekninen kantavuus voidaan määrittää monella eri tavalla. Menetelmät voidaan karkeasti ryhmitellä epäsuoriin ja suoriin menetelmiin. Epäsuoria menetelmiä ovat

- staattiset kantavuuskaavat,
- empiiriset kairausvastukseen perustuvat menetelmät,
- dynaamiset paalutuskaavat sekä
- iskuaaltoteoreettiset laskelmat ilman rakennuspaikalla tapahtuvaa iskuaaltomittausta.

Suoria menetelmiä ovat

- iskuaaltoteoriaan perustuvat dynaamiset koekuormitukset ja
- staattiset koekuormitukset.

Epäsuorilla menetelmillä tehdään suunnitteluvaiheessa sekä paalun koon ja tunkeutumisvyödyden mitoitus että lyöntikaluston mitoitus. Nämä tarkistetaan työmaalla suorilla menetelmillä, yleensä dynaamisilla koekuormituksilla.

Suljetun paalun kantavuus muodostuu kärkivastuksesta ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Avoimen paalun kantavuus muodostuu kärkivastuksesta, sisäpuolisesta vaippavastuksesta ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Avoimen tulppaantuneen paalun kantavuus muodostuu tulppaantuneen paalun kärkivastuksesta (kohta 4.3) ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta.

Paaluryhmän kantavuus on pienin seuraavista

- yksittäisten paalujen kantavuuksien summa; yleensä tukipaaluryhmillä,
- kantavuus, joka saadaan otaksumalla paaluryhmä yhtenäiseksi pilariperustukseksi tai
- kuormitus, joka aiheuttaa paaluryhmän suurimman sallitun painuman.

4.1.1 Staattiset kantavuuskaavat

Paalun geotekninen murtokuorma P_u määritetään yhtälöstä

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s dZ + A_{pk} q_p - W \quad (2)$$

- Z = paalun maassa olevan osan pituus
 d = paalun halkaisija
 f_s = vaippavastus
 A_{pk} = paalun kärjen poikkileikkauspinta-ala
 q_p = kärkivastus
 W = paalun paino

4.1.1.1 Kärkivastus homogeenisessä kitkamaakerroksessa

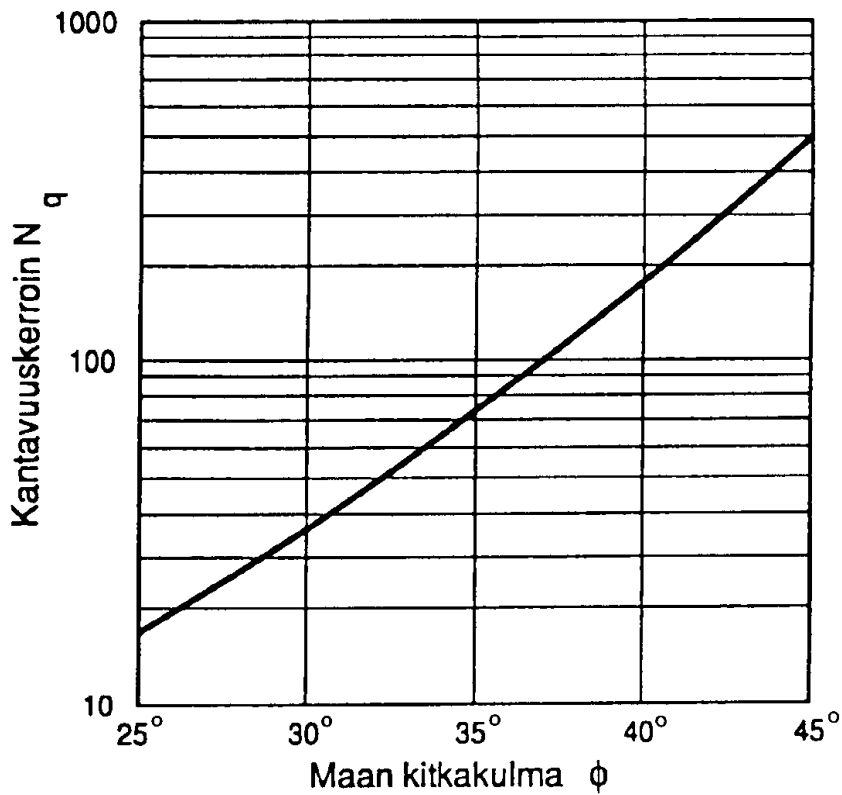
Kärkivastus q_p määritellään yhtälöstä

$$q_p = s_{vp}' N_q \quad (3)$$

s_{vp}' = tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla. Tehokas pystysuora jännitys lasketaan ottamalla huomioon maakerosten tehokas paino enintään $10 \cdot d$ paalun kärjen yläpuolella.

N_q = kantavuuskerroin (kuva 6). Kantavuuskertoimen määrittämisessä kitkakulma otetaan keskimääräisenä $5d$ paalun kärjen yläpuolelta $3d$ paalun kärjen alapuolelle. Kitkakulman $\phi > 40^\circ$ käyttö edellyttää kolmiaksisia kokeita laboratorioissa tai in-situ kokeita.

Kärkivastukseksi voidaan ottaa enintään $q_p \leq 20$ MPa, jos lujuusparametrien määrittäminen ei perustu laboratorio- tai in-situ kokeisiin. Franki-palkkipaalun kärkivastus määritetään Franki-paalua koskevien voimassa olevien ohjeiden mukaan.



Kuva 6. Kantavuuskerroin N_q maan kitkakulman ϕ funktiona /11/.

4.1.1.2 Kärkivastus kalliossa

Kallioon tukeutuvan paalun (vrt. 3.2.1.1) kärkivastus q_p määritetään yhtälöstä 4.

Lukuisten lyöntikertojen (5000 - 10000) jälkeen kärkivastus on

$$q_p = 2 q_{cyl} \quad (4)$$

q_{cyl} = kallion yksiakselialinen puristuslujuus [MN/m^2]

Kalliomassan lujuutta voidaan arvioida yksiakselialisen puristus-murtolujuuden perusteella. Kiven yksiakselialinen puristuslujuus on yleensä 100 ... 300 MN/m^2 . Tarkemmin kivien yksiakselialisia puristuslujuuksia on käsitelty lähteessä /19/.

4.1.1.3 Vaippavastus kitkamaakerroksessa

Lyötävien teräspalkkipaalujen vaippavastus f_s määritellään yhtälöstä

$$f_s = K_s s_v' \tan \phi_a \quad (5)$$

K_s = maanpainekerroin (kuva 7)

ϕ_a = teräspalkkipaalun ja maan välinen kitkakulma; $\tan \phi_a = 0,7 \tan \phi$

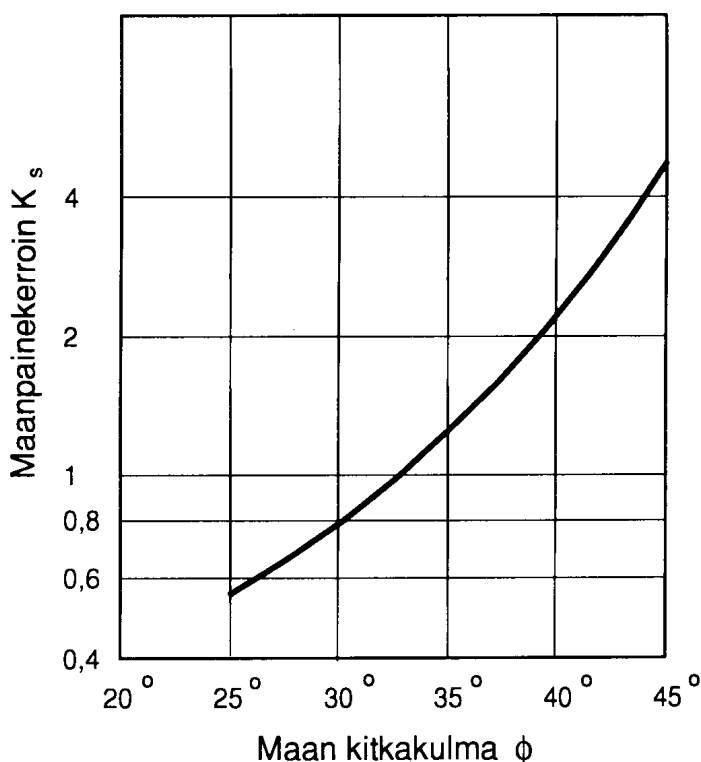
s_v' = tehokas pystysuora jännitys maassa

Maanpainekerroin K_s määritetään maan kitkakulman ϕ funktiona. Todellisuudessa vaippavastukseen vaikuttaa maan kokoonpuristuvuus, maan alkuperäinen vaakasuora jännitys sekä paalun koko ja muoto. Vaippavastuksen tarkka määrittäminen edellyttää koekuormituksia.

Paalun ja maan välinen kitkakulma ϕ_a on pienempi kuin maan kitkakulma ϕ . Redusointi tehdään termille $\tan \phi$. Kitkamaan ja teräksen välinen $\tan \phi_a$ saadaan redusoidulla $\tan \phi$ kertoimella 0,7.

Teräspalkkipaalujen vaippavastukseksi voidaan ottaa enintään $f_s \leq 0,15$ MPa.

Jos paalussa on kärkivahvistus, on sen vaippavastusta pienentävä vaikutus otettava huomioon (kohta 6.4).



Kuva 7. Maanpainekerroin K_s maan kitkakulman ϕ funktiona [5].

4.1.1.4 Vaippavastus koheesiomaakerroksessa

Vaippavastusta koheesiomaakerroksessa ei voida käyttää hyväksi kantaan teräsputkipaalujen pysyviä kuormia.

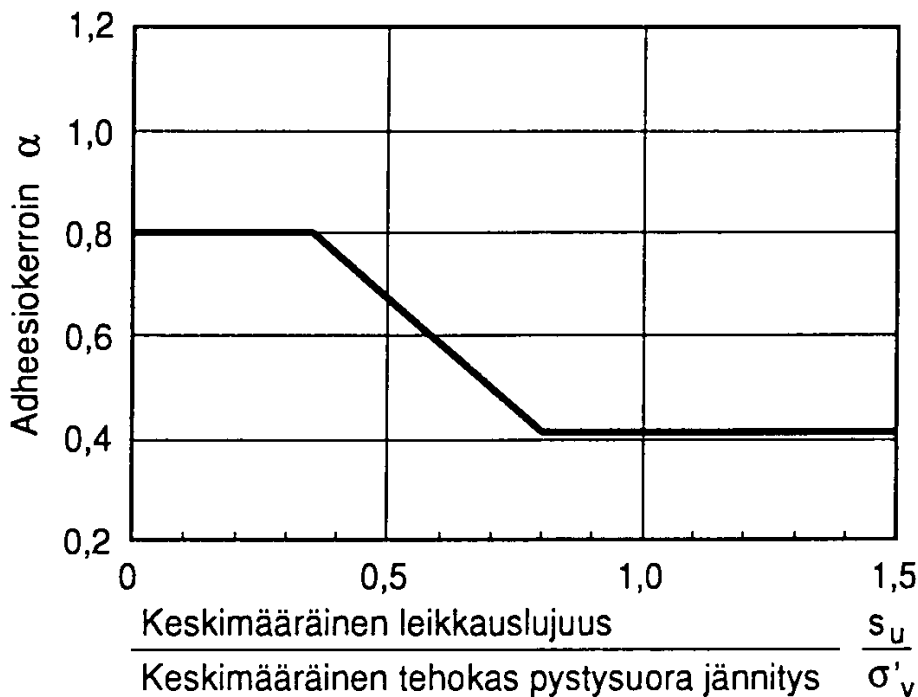
Vedellä kyllästetyssä savessa vaippavastus on sama kuin adheesio, kun paalutuksen aiheuttama huokosveden ylipaine on pääosin hävinnyt. Vaippavastus f_s määritetään yhtälöstä

$$f_s = s_a = a s_u \quad (6)$$

s_a = adheesio

a = teräspaalujen adheesiokerroin (kuva 8)

s_u = suljettu leikkauslujuus



Kuva 8. Adheesiokerroin a teräspaaluille savessa /10/

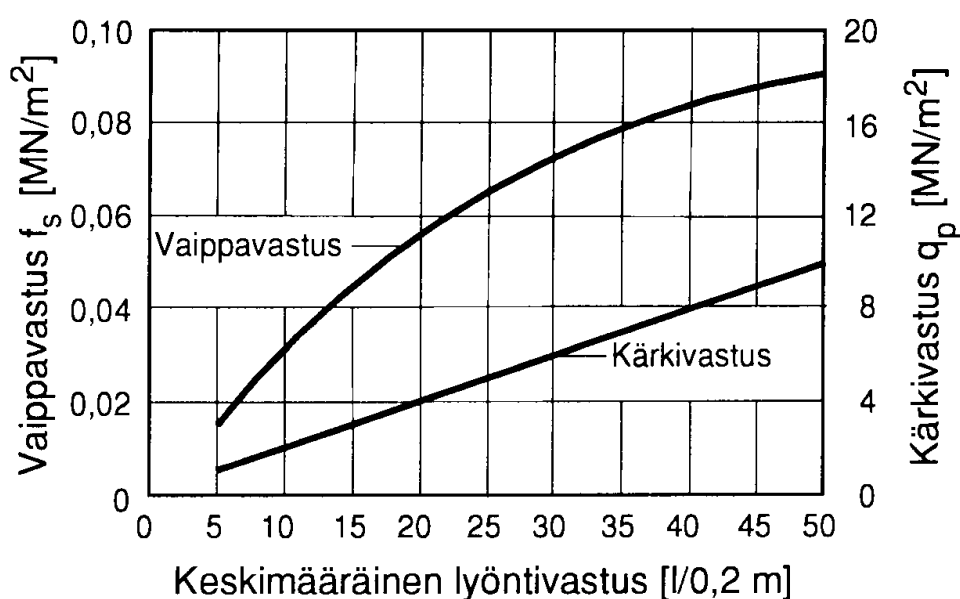
4.1.2 Kairausvastukseen perustuvat menetelmät

Paalun kantavuus voidaan arvioida suoraan heijari-, paino- tai puristinkairausvastuksien perusteella. Perusteet eri kairausmenetelmillä saatujen kairausvastuksien karkealle keskinäiselle vertailulle on esitetty ohjeessa Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa (TIEL 2172068) /22/.

4.1.2.1 Paalun geotekninen murtokuorma heijarikairausvastuksen perusteella

Paalun geotekninen murtokuorma P_u määritellään yhtälöstä (2).

Vaippavastus f_s ja kärkivastus q_p määritetään teräspaaluille kuvasta 9. Materiaalin vaikutus vaippakittakulmaan on otettu huomioon kuvan 9 vaippavastuskäyrässä. Kuvan 9 perusteella paalun kärkivastusta määritettäessä keskimääräinen heijarikairausvastus otetaan alkaen 5 d paalun kärjen yläpuolelta syvyyteen 3 d paalun kärjen alapuolelle.



Kuva 9. Vaippavastus f_s ja kärkivastus q_p teräspaaluille heijarikairauksen keskimääräisen lyöntivastuksen perusteella.

Kärkivastusta voidaan extrapoloida lineaarisesti arvoon $q_p \leq 20$ MPa asti. Vaippavastus ei kasva arvoa $f_s = 15$ MPa suuremmaksi kairausvastuksen kasvaessa.

4.1.3 Dynaamiset paalutuskaavat

Dynaamiset paalutuskaavat perustuvat energiatarkasteluihin, joissa staattista kantavuutta arvioidaan yksinkertaistetun lyöntivastuksen avulla. Paalun kantavuus määritetään mitatun painuman avulla Gatesin kaavalla tai mitatun painuman ja jouston avulla Hileyin kaavalla.

Gatesin kaava

$$P_u = 96 (2,4 - \log s) \sqrt{e_f W_h H} \quad (7)$$

e_f = lyönnin tehokkuuskerroin
 W_h = järkäleen paino [kN]
 H = järkäleen pudotuskorkeus [m]
 s = mitattu paalun painuma/lyönti [m]

Hileyin kaava

$$P_u = \frac{e_f E_j}{s + \frac{1}{2}c} \frac{W_h + n^2 W_p}{W_h + W_p} \quad (8)$$

E_j = iskuenergia [kJ]
 e_f = lyönnin tehokkuuskerroin
 n = kova puinen iskutyyny $n=0,5$, kova muovinen iskutyyny $n=0,8$ ja teräksinen vastin ilman iskutyynyä $n=1,0$ /12/
 s = paalun pysyvä painuma [mm]
 c = jousto [mm]
 W_p = paalun paino [kN]

Paalutuskaluston lyönnin tehokkuus on yleensä tarkistettava työmaalla dynaamisten koekuormitusten yhteydessä.

4.1.4 Dynaamiset koekuormitukset

Dynaaminen koekuormitus on suora paalun kantavuuden määritysmenetelmä, joka perustuu rakennuspaikalla tehtäviin iskuaaltomittauksiin (PDA-mittauksiin). Mittaustuloksista lasketaan paalun staattinen kantavuus ottamalla huomioon dynaamisen kuormituksen nopeuden vaikutukset.

Dynaamisia mittauksia voidaan analysoida usealla eri tavalla, esimerkiksi CASE-menetelmällä. Saatuja tuloksia voidaan käsitellä edelleen tietokoneella. Sovittamalla maaparametreinä käytetyt vaimennus- ja joustokertoimet siten, että laskettu iskuaalto yhtyy mitattuun aaltoon, saadaan kuormitusjakauma paalussa selvitettyksi ja kantavuus voidaan jakaa vaippa- ja kärkivastukseksi. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat CAPWAP ja SIGNAL MATCHING- analyysi.

Osasta PDA-mittaustuloksia voidaan tehdä kantavuuden määrittäminen CAP-WAP-analyysillä tai vastaavalla analyysillä, kun paalujen murto-kuorman ensisijainen määrittäminen on tehty CASE-menetelmällä.

4.2 Kärjestä avoimen paalun sisäpuolinen vaippavastus

Jos paalussa ei tapahdu minkäänlaista tulppaantumista, voidaan sisäpuolisen vaippavastuksen olettaa olevan puolet ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Sisäpuolisesta vaippavastuksesta ja paalun teräspoikkileikkausalan kärkivastuksesta muodostuva kantavuus ei kuitenkaan saa ylittää vastaavan kokoisen tulppaantuneen paalun kärkivastuksesta muodostuvaa kantavuutta.

4.3 Tulppaantuneen paalun kantavuus

Kärjestä avoin paalu tulppaantuu kitkamaakerroksessa, jos tulppaava maakerros sisältää vain vähän hienoainesta ja on riittävän suhteistunut ja tiiviydeltään vähintään keskitiivis ja jos paalu upotetaan riittävän syvälle tulppaavaan maakerrokseen. Lisäksi paalutustyö on tehtävä hidaskuisella lyöväällä järkäleellä. Paalun tulppaantuminen tehostuu, kun paaluun iskusta aiheutunut kiihtyvyys pienenee. Upotettaessa paalua täryjuntalla tulppaantumista ei tapahdu. Jos paalu suunnitellaan kantaamaan tulppaantuneena, on tehtävä koepaalutus, jossa tulppaantuminen luotettavasti todetaan.

Kärjestä avoimen tulppaantuneen paalun geotekninen murtokuorma P_u määritetään yhtälöstä

$$P_u = \int_0^z \pi d f_s dZ + \eta A_{pk} q_p - W \quad (9)$$

Z = paalun maassa olevan osan pituus

d = paalun ulkohalkaisija

f_s = vaippavastus ulkovaipalla

η = tulppaantumiskerroin

A_{pk} = vastaavan kokoisen suljetun paalun kärjen poikkileikkauspinta-ala

q_p = kärkivastus

W = paalun paino

Tulppaantumiskerroin η määritetään seuraavasti /1,2/ moreenissa:

$$\eta = 0,8 \quad \text{jos} \quad \frac{Z}{d} = 10 \quad (10)$$

ja hiekassa tai sorassa:

$$\eta = 0,8 \quad \text{jos} \quad \frac{z}{d} = 15 \quad (11)$$

z = upotussyvyys tulppaavaan maakerrokseen
 d = paalun halkaisija

Suhteen z/d pienentyessä tulppaantumiskerrointa pienennetään lineaarisesti.

Tulppaantuminen voidaan todeta, jos tulppaavassa maakerroksessa maanpinnan painuma putken sisällä on vähintään puolet paalun painumasta. Tulppaantumista ei voida todeta lyönninaikaisista PDA-mittauksista. Tulppaantuminen voidaan todeta aikaisintaan kahden viikon kuluttua paalun lyömisestä paalun läpi tehtävillä heijarikairauksilla. Arvioitaessa tulppaantumisasastetta PDA-mittauksin voidaan mittaukset tehdä jälkilyönneistä aikaisintaan kahden viikon kuluttua paalun lyönneistä.

4.4 Negatiivinen vaippahankaus

Negatiivinen vaippahankaus määritetään Lyöntipaalutusohjeiden LPO-87 /16/ mukaan.

4.5 Paalujen vetokapasiteetti

Mitoitettaessa paalujen vetokapasiteettia pitkäaikaisessa vetorasituksessa voidaan paalun tehokkaan painon lisäksi ottaa huomioon vaippavastusta vain kitkamaakerroksissa. Tällöin puristetun paalun vaippavastus jaetaan kertoimella $k_v = 2$. Hetkellisessä kuormituksessa puristetun paalun vaippavastus jaetaan kertoimella $k_v = 1,5$, ja vaippavastus voidaan ottaa huomioon myös koheesiomaakerroksissa.

4.6 Varmuustasovaatimukset

Aiemmin esitetyillä menetelmillä (vrt. 4.1 - 4.3) voidaan määrittää teräspalkkipaalujen geotekninen murtokuorma. Varmuustasovaatimus riippuu paalun geoteknisen murtokuorman määrittämismenetelmän luotettavuudesta kyseessä olevissa olosuhteissa.

Paalun geotekninen kantavuus määritetään paalun murtokuormasta jakamalla tämä kokonaisvarmuuskertoimella. Suositeltavia kokonaisvarmuuskertoimen arvoja on esitetty taulukossa 3. Käytettäessä taulukon 3 kertoimia kantavuuden laskennassa kuormien vaikutukset lasketaan ominaiskuormia käyttäen.

Taulukko 3. Geoteknisen kantavuuden määrittämisessä käytetyt kokonaisvarmuuskertoimet.

Geoteknisen murtokuorman määrittämenetelmä	Varmuuskerroin F
Staattiset kantavuuskaavat	2,5 - 3,0
Kairausvastukseen perustuvat menetelmät	2,5 - 3,0
Dynaamiset paalutuskaavat	2,5 - 3,0
Dynaaminen koekuormitus	2,0
Staattinen koekuormitus	1,8

Suurille teräsputkipaaluille on yleensä tehtävä dynaamisia koekuormituksia. Jos dynaamisia koekuormituksia ei tehdä, paalun kantokyky määritetään paalutuksen jälkeen sekä tunkeutumissyvyyden että loppulyöntien perusteella. Tällöin määritettäessä kantokyky kahdella eri perusteella sekä staattisilla kantavuuskaavoilla tai kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä että paalutuskaavoilla voidaan käyttää taulukkoon 3 nähden hieman alennettua varmuustasoa $F \geq 2,2$. Kaivinpaaluihin rinnastettavilla teräskuorellisilla betonipaaluilla, joiden kantavuuden määrittäminen perustuu paalun tunkeutumissyvyyteen, on varmuustasovaatimus $F \geq 2,5$. Jos kohteessa tehdään paljon dynaamisia tai staattisia koekuormituksia, varmuustasovaatimus voi olla taulukossa 3 esitettyjä varmuuskertoimia alempi.

4.7 Paalun painuma

Maakerrokseen päätyvien tukipaalujen painuman arvioiminen on epätarkkaa ilman koekuormituksia. Staattiset koekuormitukset pitää tehdä siten, että paalun kärjen painuma voidaan havaita. Tukipaaluperustusten painumatarkastelu tapahtuu usein yksittäisten paalujen painumarvioiden pohjalta.

Suljetun tukipaalun pään painuma S_0 koostuu paalun kimmoisesta kokoonpuristumasta S_e ja kärjen alapuolisten kerrosten muodonmuutoksesta S_s . Paalun yläpään painuma S_0 on

$$S_0 = S_e + S_s = \frac{P L}{A_p E_p} + \frac{P d}{A_p E_s} \quad (12)$$

P = paalun kuorma

L = paalun pituus

d = paalun halkaisija

A_p = paalun poikkileikkausala

E_p = paalun kimmomoduuli

E_s = paalun kärjen alapuolisen kerroksen kimmomoduuli

Moduulille E_s lyöntipaalun kärjen alla suositellaan taulukon 4 mukaisia arvoja.

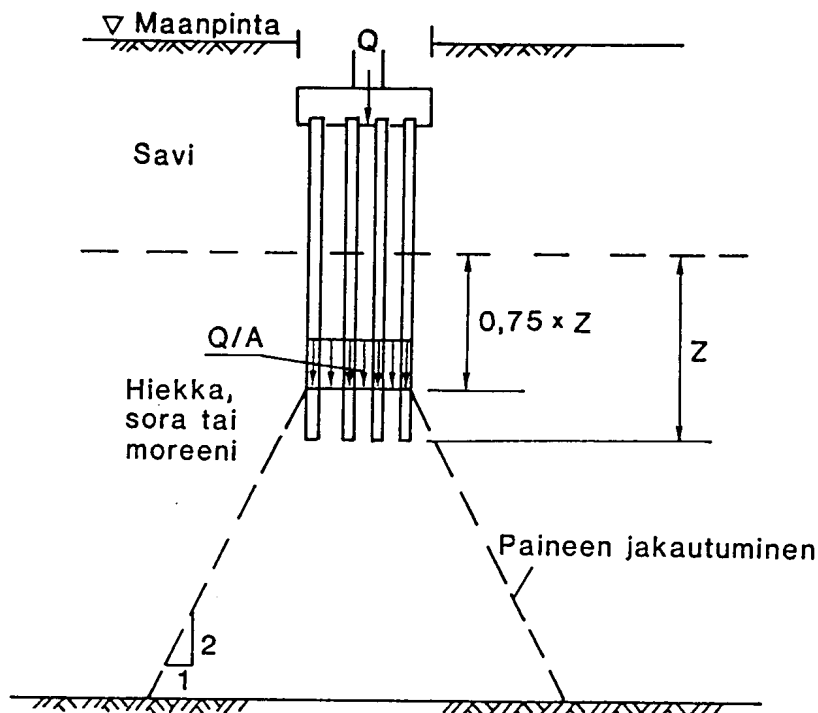
Taulukko 4. Maan ja kallion kimmomoduulit E_s yksittäisen, suljetun paalun kärjen alla lyöntityön jälkeen.

Maalaji	E_s [MPa]
Hiekka, sora	1000 – 2000
Moreeni	2000 – 10000
Kallio	50000 – 100000

Tulppaantumattoman paalun ja teräskuorellisen kaivinpaalun upotuksessa paalun kärjen alapuolinen maa ei tiivisty. Tällöin käytetään paalun painuman laskennassa kärjen alapuoliselle maalle maan luonnontilaista kokoonpuristuvuusmoduulia.

Tukipaaluryhmän painuma vastaa yksittäisten paalujen painumaa, jos paalut tukeutuvat kalliin tai paalujen kärjen ja kallion väliin jäävä moreenikerros on ohut ja tiivis. Yksittäisten paalujen painuma voidaan arvioida samalla periaatteella ottaen huomioon myös vaippavastuksen vaikutus.

Kitkapaaluryhmien painuma voidaan laskea kuvan 10 mukaista mallia käyttäen. Tällöin maakerrosten kokoonpuristuvuusmoduulit määritetään kuten luonnontilaisten maakerrosten kokoonpuristuvuusmoduulit.



Kuva 10. Kitkapaaluryhmän painuman laskeminen /14/.

4.8 Kuormitukset

Paalun mitoituksessa vaakasuuntaiset kuormat ja momentit on otettava huomioon paalunsuuntaisten kuormien lisäksi. Mitoitus on tehtävä vaarallisimmille kuormitusyhdistelmille. Kuormitukset on määritettävä ohjeen Siltojen kuormat (TIEL 2172072) /23/ ja muiden voimassa olevien ohjeiden mukaisesti. Paalujen kuormissa on otettava huomioon myös paalurakenteen sijainti- ja kaltevuusvirheiden sekä ylärakenteen sijaintivirheiden ja siirtymän aiheuttamat lisärasitukset.

Paalujen sallitut sijaintipoikkeamat on määritettävä kohdassa 7.3 esitettyjä pienemmiksi, jos kohdan 7.3 mukaiset sijaintipoikkeamat voivat aiheuttaa sallitun kantavuuden ylittymisen 15%:lla. Jos todelliset mittapoikkeamat ylittävät sallitut arvot, tehdään tarkistuslaskelmat kappaleen 10.5 mukaisesti. Tällöin yksittäiselle paalulle voidaan sallia 15% ylitys kantavuuteen. Tarvittaessa sijaintipoikkeamiin voidaan varautua käyttämällä mitoituksessa sallittua kantavuutta pienempää paalun kuormaa

4.9 Geotekninen mitoitus sivusuuntaan

4.9.1 Paalun sivukapasiteetti

Paalun sivukapasiteetilla tarkoitetaan yleensä paalun sietämää suurinta vaakakuormitusta, joka vastaa maan murtokuormaa tai joskus paalun myötömomenttia. Sivukapasiteetti muodostuu siten ympäröivän maan vastuksesta, paalun yläpään kiinnitysasteesta ja paalun omasta taivutusjäykkyyydestä. Ympäröivän maan käyttäytyminen saattaa muodostua määrääväksi erityisesti, jos kuormitus on toistuvaa tai dynaamista.

Sivukapasiteetin määrää sillan suunnittelussa kuitenkin yleensä sallittu vaakasiirtymä, koska muodonmuutokset saattavat kasvaa siltarakenteiden kanalta liian suuriksi paljon ennen sivukapasiteetin ylittymistä. Sallitut vaakasiirtymät määräytyvät tällöin muiden rakenteiden sallimista siirtymistä.

Paaluryhmän sivukapasiteetti on yleensä pienempi kuin paalujen lukumäärä kertaa yksittäisen paalun sivukapasiteetti, jos paalujen keskiöväli vaakavoiman suunnassa on pienempi kuin 6 - 8 kertaa paalun halkaisija. Sivuvastus ja -kapasiteetti pienenevät edelleen peräkkäisten paalurivien lisääntyessä voiman vaikutussuunnassa ja paalujen keskiöetäisyyksien pienentyessä.

Paaluryhmän mitoitus palautuu periaatteessa yksittäisten paalujen mitoituksiksi, kun paaluanturan kautta paaluille tulevat kuormat on määritetty jollakin yleisesti hyväksytyllä menetelmällä.

4.9.2 Paalun sivukuormitus

Paalun sivukuormitus syntyy siirtymän aiheuttamasta pakkovoimasta, vaakakuormien aiheuttamasta tukivoimasta tai maanpaineesta paalua vasten.

Pakkovoimia aiheuttavat lähinnä ylärakenteen lämpötilan muutokset, kiertymät, kutistumat ja viruminen.

Maanpaine aiheutuu maanpintojen korkeuseron, kaivannon tai kaltevan luiskan heikon vakavuuden aiheuttamasta maamassan siirtymisestä paalua vasten. Kun varmuus maamassan liukusortumalle paalujen alueella on $F < 1,8$, maassa syntyy plastisia liikkeitä, ja maanpaine paaluja vastaan on otettava huomioon. Tätä suuremmalla varmuustasolla syntyy kuormituseroista vain kimmoisia siirtymiä, jotka voivat pehmeissä maakerroksissa olla niin suuria, että niiden huomioon ottaminen paalua kuormittavana taivutuksena on tarpeen. Sivukuormitusta paaluille syntyy myös maan painuessa vinopaalujen ympärillä sekä routimispaineesta, jonka syntyminen on yleensä estettävää.

Sivukuorman suuruus riippuu maan leikkauslujuudesta, paalun muodosta ja kuormitusnopeudesta. Sivukuorma on suurimmillaan silloin, kun paalu leikkautuu maamassan läpi. Tällöin sivukuorman ääriarvo saadaan kappaleen 4.9.4 mukaan. Mitoitettaessa paalua pakkovoimasta tai maapaineesta aiheutuvalle sivukuormalle voidaan käyttää moduuli- tai alustalukumetelmän mukaisia sivupainesiirtymäyhteyksiä (vrt. kappale 4.9.5).

4.9.3 Paalun murtomekanismit

Sivukuormitetun paalun murtomekanismit riippuvat maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteeseen.

Suhteellista jäykkyyttä voidaan arvioida parametrilla R koheesiomaassa ja parametrilla T kitkamaassa.

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{E_s}} \quad (13)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (14)$$

$E_p I_p$ = paalun jäykkyys

E_s = koheesiomaan vaakasuuntainen moduuli

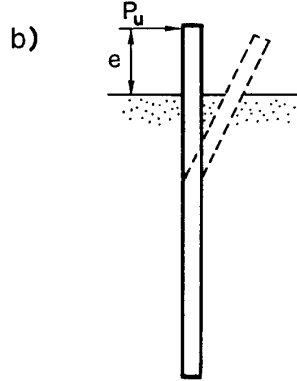
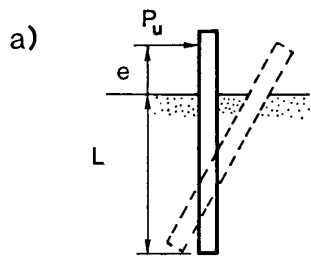
n_h = kitkamaan vaakasuuntainen alustalukukerroin

Kun paalun upotussyvyyden ja parametrien suhde L/R tai L/T eli jäykkyys suhde on enintään kaksi, käsitellään paalua jäykästi maassa kiertyvänä kappaleena ja paalun muodonmuutokset voidaan jättää huomioon ottamatta. Maan murtuminen tapahtuu tällöin ennen paalun murtumista. Kiertokeskuksen paikka lasketaan siten, että vaikuttavat momentit ovat tasapainossa. Kiertokeskuksen sijainniksi voidaan homogeenisessä maaperässä olettaa likimäärin 70% upotussyvyydestä. Tällöin voidaan arvioida sivukapasiteettia myös käsinlaskentana määrittämällä ensin sivuvastuksen ääriarvo ja jakautuma (vrt. 4.9.4).

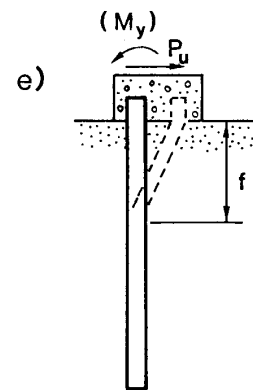
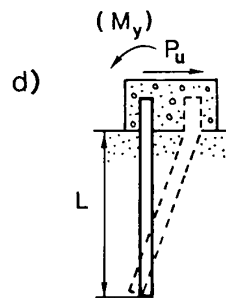
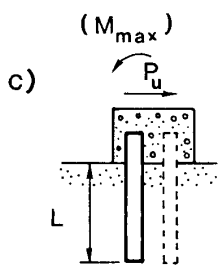
Kun upotussyvyyden ja parametrien suhde L/R ja L/T on vähintään neljä, on laskelmissa otettava huomioon myös paalun muodonmuutokset. Paalun murtuminen tapahtuu tällä jäykkyysasteella ennen maan murtumista. Jäykkyys suhteen ollessa välillä 2 - 4 voidaan väliarvot interpoloida riittävällä tarkkuudella. Jäykkyys suhteen arvoa neljä vastaavaa paalun pituutta voidaan pitää paalun toiminnallisen pituuden ääriarvona, jonka jälkeen upotussyvyyden lisääminen ei vaikuta paalun toimintaan.

Kuvassa 11 on esitetty jäykkyys suhteen vaikutus paalun murtomekanismiin. Kuvat 11 a ja c edustavat jäykkyys suhteen arvoja pienempi tai yhtäsuuri kuin 2, kuva 11 d arvoja 2 - 4 ja kuvat 11 b ja e arvoja suurempi tai yhtäsuuri kuin 4.

Vapaa pää

a) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \leq 2$ b) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \geq 4$

Kiinnitetty pää

c) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \leq 2$ d) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \geq 4$ e) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \geq 4$

Kuva 11. Jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin /8/

4.9.4 Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot

Sivuvastus syntyy, kun paalu siirtyy ulkoisesta kuormasta johtuen maata vasten. Sivuvastuksella tarkoitetaan maamassan aiheuttamaa vastusta pintayksikköä kohti. Sivuvastusta käytetään hyväksi laskettaessa paalun sivukapasiteettia.

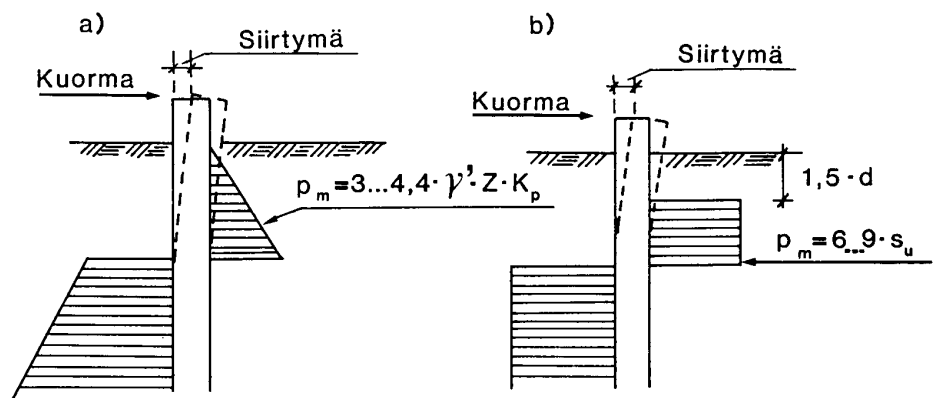
Sivupaine syntyy, kun maa siirtyy paalua vasten. Käsitettä käytetään sivukuormitusta laskettaessa.

Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot riippuvat maan lujuusominaisuuksista ja kitkamaalla myös tehokkaasta tilavuuspainosta.

Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot määritetään maan murtotilan mukaan maanpaineteoriaan perustuen. Varmuus sijoitetaan sivuvastuksen ja sivupaineen laskentaan kappaleen 4.9.8 mukaan siten, että epäedullisin vaikutus sivukapasiteettiin tai sivukuormitukseen tulee huomioon otetuksi.

Kuvassa 12 esitetty kitka- ja koheesiomaan sivuvastuksen ääriarvot eri lähteiden mukaan [3].

Kitkamaassa sivuvastuksen ja -paineen ääriarvojen oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyden kasvaessa. Koheesiomaassa arvot oletetaan vakioksi syvyydestä riippumatta. Koheesiomaan pintakerroksen osuus syvyyteen $1,5 \cdot d$ asti otetaan huomioon sivukuormitusta laskettaessa, mutta ei sivukapasiteettia laskettaessa.



Kuva 12. Sivuvastuksen ja sivupaineen p_m ääriarvot a) kitkamaassa ja b) koheesiomaassa.

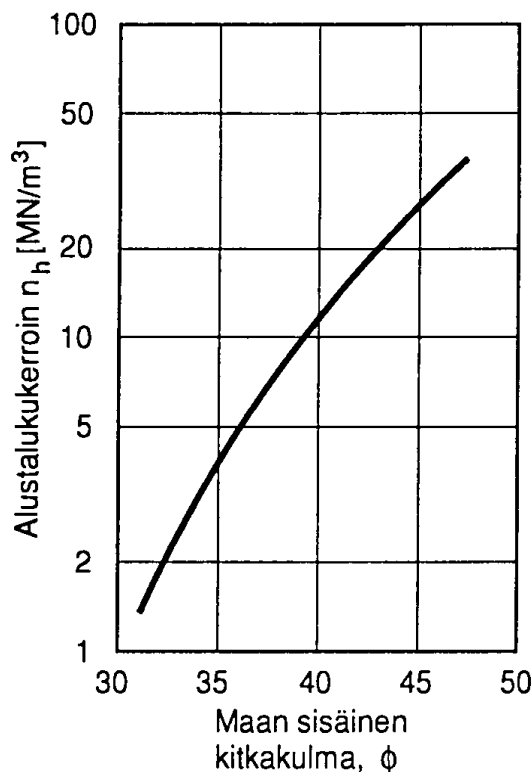
4.9.5 Siirtymien laskeminen

Siirtymät lasketaan alustalukumenetelmällä. Sivuvastuksen tai sivupaineen ja siirtymien välistä vuorosuhdetta kuvataan yleensä alustalukujen avulla. Alustaluvut eivät ole maan materiaaliparametreja, jolloin ne riippuvat myös rakenteen mitoista. Siirtymät lasketaan käyttörajatilassa käyttäen materiaali-parametrien ja kuormien ominaisarvoja. Varmuus otetaan huomioon sallittujen siirtymien arvoissa.

Kitkamaan vaakasuoran alustaluvun k_s oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyteen $z = 10$ d asti ja pysyvän tämän jälkeen vakiona. Kitkamaan alustaluku staattisessa kuormituksessa määritetään kaavalla

$$k_s = n_h \frac{z}{d} \quad (15)$$

jossa alustalukukerroin n_h saadaan kuvasta 13 kitkakulman funktiona. Kitkakulma voidaan arvioida ohjeen Pohjarakenusohjeet sillansuunnittelussa (TIEL 2172068) /22/ mukaan. Alustaluku syklisellä kuormituksella voidaan määrittää kohdan 4.9.7 taulukon 5 mukaan. Alustaluku syklisessä tai dynaamisessa kuormituksessa voidaan määrittää staattiseen alustalukuun nähden samassa suhteessa kuin dynaamisen (muodonmuutostasosta riippuvan) ja staattisen kimmo- tai leikkausmoduulin suhde.



Kuva 13. Kitkamaan alustalukukertoimen arviointi kitkakulman perusteella. Pohjaveden pinnan alapuolella n_h on 60% kuvan arvoista /16/.

Kuvassa 14 on esitetty tapa, jolla voidaan kuvata kitkamaan alustaluvun likimääräinen sivupainesiirtymäyhteys.

Koska alustaluku riippuu kuitenkin suoraan maan kokoonpuristuvuudesta, voidaan sitä tarkastella myös maan kokoonpuristuvuusmoduulin M tai avoimen tilan kimmomoduulin E_d kautta, jolloin alustalukukerroin saadaan kaavasta

$$n_h = a \cdot b \cdot \frac{M}{z} = a \cdot \frac{E_d}{z} \quad (16)$$

$a = 0,74$ (Terzaghin mukaan) /8/

$a = 1,0$ (Poulosin mukaan) /8/

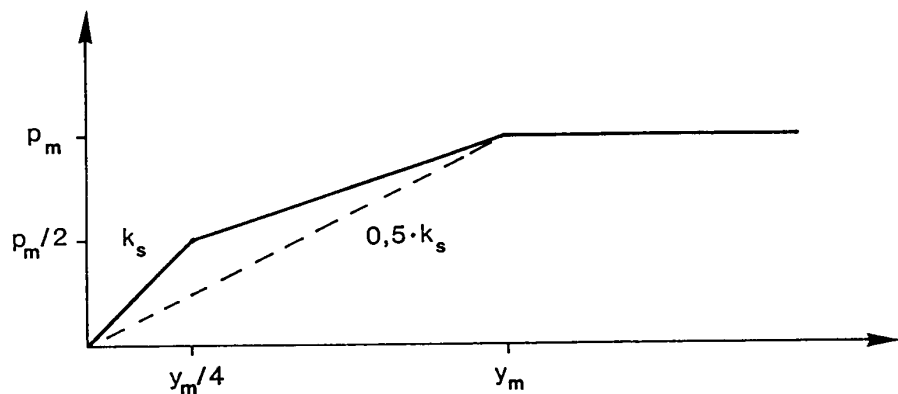
$\beta = 0,83 - 0,95$ hiekalle Poissonin vakion vaihdellessa vastavasti välillä $0,25 - 0,15$.

Lyhytaikaisessa kuormituksessa koheesiomaan vaakasuora alustaluku vaihtelee rajoissa

$$k_s = 50 \dots 150 \frac{s_u}{d} \quad (17)$$

Pitkäaikaisessa kuormituksessa koheesiomaan alustaluku vaihtelee rajoissa

$$k_s = 20 \dots 50 \frac{s_u}{d} \quad (18)$$



Kuva 14. Kitkamaan alustaluvun määrittäminen. p_m on sivuvastuksen ääriarvo ja y_m on sitä vastaava siirtymä /8/.

Kuvassa 15 a on esitetty koheesiomaan alustaluvun likimääräinen sivupaine-siirtymäyhteys lyhytaikaisessa kuormituksessa ja kuvassa 15 b pitkäaikaisessa kuormituksessa. Murtokuormaa vastaavaa sivupainetta vastaa kuvassa 15 merkintä p_m ja sitä vastaavaa paalun sivusiirtymää on merkitty y_m .

Koheesiomaan alustaluku oletetaan vakioksi syvyydestä riippumatta.

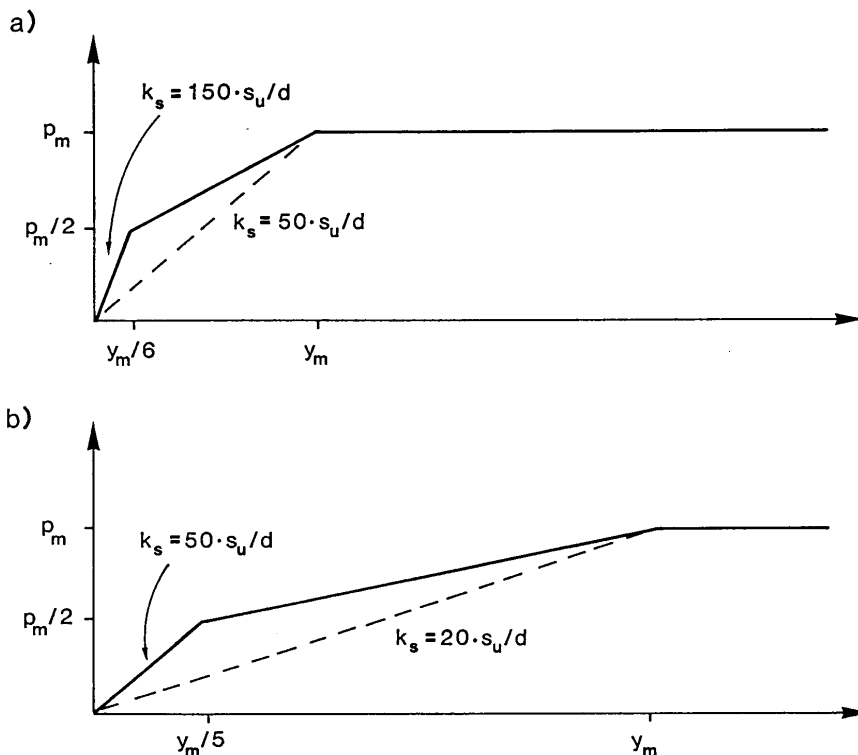
Pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa koheesiomaan alustaluku voidaan määrittää myös kokoonpuristuvuusmoduulin (M) kautta, jolloin alustaluku k_s on

$$k_s = \beta \frac{M}{d} \quad (19)$$

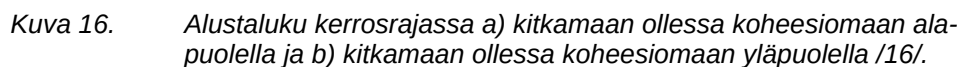
$\beta = 0,46 - 0,74$ savelle Poissonin vakion vaihdellessa vastavasti välillä $0,4 - 0,3$

$\beta = 0,62 - 0,83$ siltile Poissonin vakion vaihdellessa välillä $0,35 - 0,25$.

Lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa koheesiomaan alustaluku voidaan määrittää suljetun tilan kimmomoduulin E_u kautta, jolloin määrittäminen voidaan tehdä esimerkiksi suljetulla kolmiaksaalikoelalla. Kuvassa 16 on esitetty alustaluvun määrittäminen erilaisissa kerrosrajoissa.

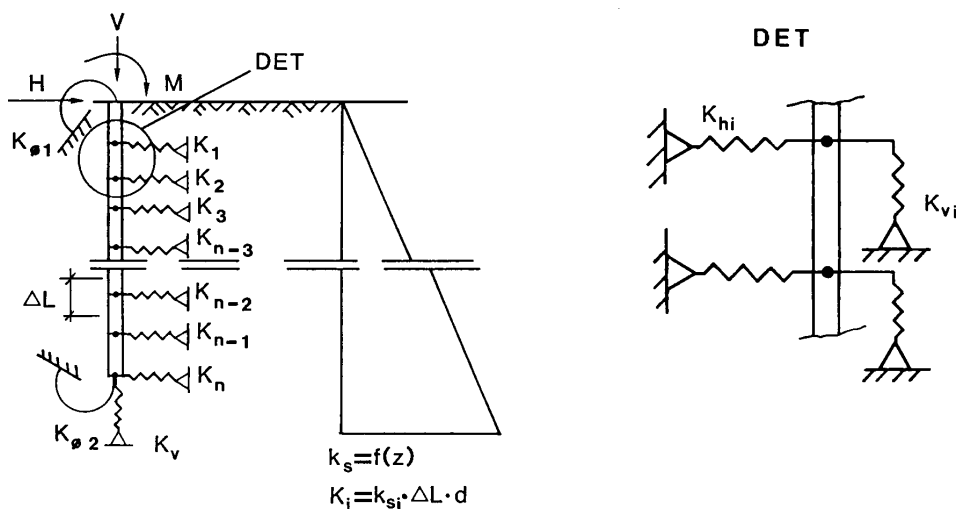


Kuva 15. Koheesiomaan alustaluvun määrittäminen a) lyhytaikaisessa kuormituksessa ja b) pitkäaikaisessa kuormituksessa.



Mitoituksella staattisille sivukuormituksille tarkoitetaan paalun analysointia kuormitustilanteelle, jossa kuorma on ajan suhteen vakio ja jossa hitausvoimilla ei ole vaikutusta rakenteen rasituksiin.

Seuraavassa on esitetty mikrotietokoneelle soveltuva laskentamalli, jossa maan staattiset ominaisuudet on kuvattu epälineaaristen vaakasuuntaisten jousien avulla ja paalu elementtimenetelmän (FEM) avulla. Paalun liikkeistä aiheutuvat reaktiovoimat keskitetään jousina elementtimallin solmupisteisiin. Jousien arvot voidaan määrittää esimerkiksi alustalukumenetelmän mukaan (vrt. kohta 4.9.5). Laskennan tarkkuuden kannalta lähinnä maanpintaa olevien jousien arvojen tarkka määrittäminen on ensisijaisen tärkeää. Siirtymän ylittäessä vastaavan maan murtojuuuden eli sivuvastuksen ääriarvon iteroidaan elastoplastista sivupaine-siirtymäfunktiota. Menetelmän mukainen elementti-jousimalli, joka on käsittelyltään riippumaton jäykkyys-suhteen L/R ja L/T arvoista, on esitetty kuvassa 17. Paalun pään ja kärjen reunaehdot mallinnetaan myös jousien avulla ja niiden tulee vastata mahdollisimman hyvin ylärakenteen toimintaa ja kärjen olosuhteita.



Kuva 17. Paalun ja maan välistä vuorovaikutusta kuvaava elementti-jousimalli

4.9.7 Mitoitus sykliselle sivukuormitukselle

Mitoituksella sykliselle sivukuormitukselle tarkoitetaan paalun analysointia kuormitustilanteelle, jossa kuormitus on ajan suhteen muuttuva eikä hitausvoimilla pääsääntöisesti ole merkitystä rakenteen rasituksiin. Kuormitus voi olla suunnaltaan yksisuuntaista tai vaihtuvaa. Syklinen eli toistuva kuormitus heikentää maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia ja lisää siten vaakasiirtymän suuruutta verrattuna staattiseen kuormitustilanteeseen. Lisäys on sitä suurempi mitä löyhempää maa on. Syklisen kuormituksen taajuuden ylärajaksi oletetaan yleensä $f = 1$ Hz. Hiekalla tiiviyn ollessa alle kriittisen arvon, joka vastaa heijarikairausvastusta 15 lyöntiä/0,2 m, tulee ottaa huomioon maan nesteytymisvaara.

Syklisiin kuormituksiin voidaan lukea aaltokuormat, joiden merkitys suoraan paalua tai siltapilaria kuormittavana on pienehkö. Kuitenkin aaltokuormitukset suurten perustuskasunien, laivojen tai ahtojään välityksellä vaikuttavina on otettava huomioon.

Analyysoitaessa sivukuormitettua paalua syklisille kuormille voidaan käyttää staattista alustalukumenetelmää, jossa käytetään taulukon 5 mukaisia muunnettuja alustalukuja. Taulukon arvot pätevät kitkamaalle ja määräytyvät maan tiiviyn mukaan.

Taulukko 5. *Kitkamaan vaakasuorat alustaluvut k_{ss} syklisellä kuormituksella /8/.
 k_s = staattinen alustaluku.*

Alustaluku syklisellä kuormituksella	Suhteellinen tiiviys D_r		
	< 0,35 Löyhä	0,35 - 0,65 Keskitiivis	> 0,65 Tiivis
k_{ss}	0,25 k_s	0,33 k_s	0,5 k_s

Löyhän kitkamaan juoksettumisvaara tarkistetaan ja otetaan tarvittaessa huomioon.

4.9.8 Varmuuden huomioon ottaminen mitoituksessa

Mitoitettaessa paalua sivusuuntaan suositellaan käytettäväksi rajatilamenetelmää. Tällöin osavarmuusluvut sijoitetaan materiaaliparametreihin ja vaakakuormaan, mutta joissakin tapauksissa myös siirtymään. Myöskin kokonaisvarmuuslukumenetelmää voidaan käyttää.

Kun mitoitetaan paalun sivukapasiteettia, maan materiaaliparametrit jaetaan osavarmuusluvuilla. Jos sivukapasiteetin varmuutta arvioidaan siirtymän mukaan, voidaan varmuus sisällyttää sallitun siirtymän arvoihin. Tällöin kuormat lasketaan ominaiskuormina.

Kun paalu mitoitetaan pakkovoimasta tai maapaineesta aiheutuvalle sivukuormalle, materiaaliparametrit puolestaan kerrotaan osavarmuusluvuilla ja varmuus sivukuormalle tulee tätä kautta.

Käytettäessä kokonaisvarmuuslukumenetelmää, on kokonaisvarmuuden oltava vähintään $F \geq 2,2$ laskennallisesti mitoitettuna ja vähintään $F \geq 1,8$ staattisesti koekuormitettuna. Joskus on tarpeen tarkistaa rajatilamenetelmää käytettäessä kohtuullinen varmuustaso myös kokonaisvarmuuslukumenetelmällä.

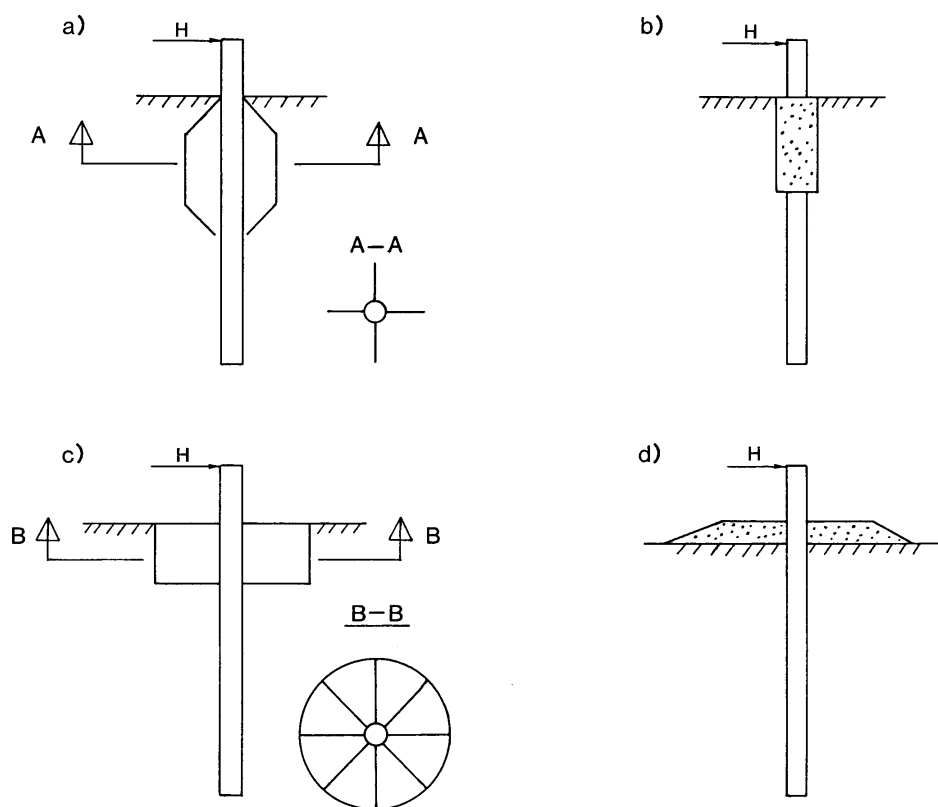
4.9.9 Sivukapasiteetin kasvattaminen

Paalun sivukapasiteettia voidaan lisätä maata lujittamalla tai muilla rakenteellisilla keinoilla, joilla ensisijaisesti kasvatetaan paalun yläosan poikkileikkausta.

Maan lujuutta on mahdollista parantaa tiivistämällä tai injektoidamalla maaperää.

Rakenteellisia keinoja voivat olla esimerkiksi paaluun hitsatut siivekkeet tai betonikaulus. Näitä esittävät kuvat 18 a ja b. Huomattava vaakakapasiteetin lisäys voidaan saada aikaan kuvassa 18 c esitetyllä teräsheikkoratkaisulla. Muita keinoja on lisätäyttö maan pinnalla (kuva 18 d).

Käänteisiä keinoja voivat olla sivukuormien vähentämiseksi tehtävät kevennyskaivut ja kevyet täytöt.



Kuva 18. Mahdollisia ratkaisuja sivukapasiteetin lisäämiseksi /6/.

5 PAALUN RAKENTEELLINEN KANTAVUUS

Paalun rakenteellisen kantavuuden määrää paalun rakenteen kestävyys. Rakenteellinen kantavuus tarkistetaan perustettavasta rakenteesta tuleville kuormille. Paaluun voi kohdistua myös taivutusta vaakakuormista, epäkeskisyyksistä tai kiinnitysmomenteista. Perustettavan rakenteen asettamien vaatimusten lisäksi paalun rakenteellinen kantavuus on tarkistettava nurjahdukselle, maan painumisen aiheuttamille lisäkuormille kuten negatiiviselle vaippahankaukselle ja vinopaalujen taivutukselle sekä toispuoleisen maanpaineen tai sivuvastuksen aiheuttamalle taivutukselle. Yläpäästä lyötävän teräsputkipaalun pienin suositeltava seinämävahvuus on 10 mm. Halkaisijaltaan alle 600 mm putkilla voi seinämävahvuus olla 8 mm. Paalun korroosio on otettava huomioon paalun pitkäaikaista rakenteellista kantavuutta määritettäessä.

5.1 Paalun rakenteellisen kantavuuden suunnittelu

- 1) Määritetään paalun sallitut materiaali-jännitykset paalumateriaalin ja pohjasuhteiden perusteella. Lohkareisissa pohjasuhteissa saattaa olla paikallaan pienentää normaalisti sallittuja materiaali-jännityksiä.
- 2) Tarkistetaan paalun rakenteellinen kapasiteetti määrävissä kuormitustapauksissa korroosiovähennys huomioon ottaen.
- 3) Määritetään sallitun geoteknisen kantavuuden vaatima lyöntivoima ja tarkistetaan lyöntijännitykset huomioon ottaen varmuuskerroin. Paalun korroosiota ei tarvitse tällöin ottaa huomioon.

5.2 Rakenteellinen mitoitus

5.2.1 Betonoimaton teräsputkipaalu

Teräsputkipaalun sisäosa on valmiina rakenteena maataytteen ja joskus yläosaltaan tyhjä kärjestä avoimella paalulla ja tyhjä suljetulla paalulla. Paalun rakenteellinen kantavuus muodostuu teräsputken kantavuudesta.

5.2.1.1 Lyöntijännitykset

Paalun sallittu lyöntijännitys on enintään $\sigma_{dsall} = 0,9 \sigma_{sa}$, jolloin σ_{sa} on paalumateriaalin alempi myötöraja tai 0,2 raja. Paalun korroosiota ei oteta huomioon.

Paalun lyönti aiheuttaa paaluun sekä puristus- että vetojännityksiä. Iskun aiheuttama voima saadaan kertomalla jännitys paalun pinta-alalla. Lyöntijännitystä voidaan alustavasti arvioida kaavalla

$$s_{\max} = f_w f_0 v_0 \frac{E}{c} = f_w f_0 \sqrt{g H E} \quad (20)$$

γ = teräksen tilavuuspaino = 77 kN/m³

E = teräksen kimmomoduuli = 2,1 x 10⁸ kN/m²

c = iskuaallon nopeus teräksessä ≈ 5100 m/s

f_0 = lyöntikalustosta riippuva kerroin $f_0 = e_f \sqrt{2}$, jossa e_f on lyöntikaluston tehokerroin

f_w = rakennuspaikan pohjaolosuhteista riippuva iskuaallon heijastuskerroin

v_0 = järkäleen nopeus [m/s]

H = järkäleen pudotuskorkeus [m]

Ellei paalutuskalustosta ole tarkempaa tietoa, voidaan kertoimelle f_0 antaa arvoja $f_0 = 0,7 - 0,85$. Lyötyessä teräspalkkipaalua kalliota vastaan saa iskuaallon heijastuskerroin arvoja $f_w = 1,5 - 1,7$. Paalun kärjen ollessa tiiviissä maassa $f_w = 1,3 - 1,5$.

Paalutuskaluston tehokkuus ja lyöntijännitykset määritetään iskuaaltomittauksin, esimerkiksi PDA-mittauksin.

5.2.1.2 Käyttöjännitykset

Teräspalkkipaalun sallittu keskeinen puristusjännitys määräytyy paalutusluokan perusteella. Suuret teräspalkkipaalut suunnitellaan yleensä paalutusluokkiin IA tai IB, jolloin sallittu keskeinen puristusjännitys on enintään 0,58 σ_{sa} luokassa IA ja 0,50 σ_{sa} luokassa IB.

Jos teräspalkkipaaluun kohdistuu taivutus- tai leikkausrasituksia, määritetään paalun rakenteellinen kantavuus normaalivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle Suomen rakentamismääräyskokoelman teräsrakenteita koskevien ohjeiden ja niitä täydentävien Tielaitoksen Teräsrakenneohjeiden (TIEL 2173449) /32/ mukaan.

Käyttöjännityksiä määritettäessä on otettava huomioon paalun korroosiovähennys.

5.2.1.3 Nurjahdus

Teräspalkkipaalun rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään Lyöntipaalutusohjeiden LPO-87 /16/ kohdan 3.475 mukaan ottaen huomioon paalun korroosiovähennys.

5.2.2 Liittorakennepaalu

Liittorakennepaalin sisäosa on valmiina rakenteena teräsputkipaalu, joka on täytetty betonilla siten, että teräksen ja betonin välinen tartunta on riittävä yhteistoiminnan varmistamiseksi. Liittorakennepaalu mitoitetaan rakenteena Suomen rakentamismääräyskokoelman liittorakenteita koskevien ohjeiden mukaisesti.

5.2.2.1 Lyöntijännitykset

Liittorakennepaalin teräsputken upotuksessa sallittavat lyöntijännitykset määritetään kohdan 5.2.1.1 mukaan.

5.2.2.2 Käyttöjännitykset

Liittorakennepaalin rakenteellinen kantavuus puristukselle, normaalivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle määritetään Liittorakenteiden suunnitteluohjeiden 1988 kohdan 3.1 /15/ ja niitä täydentävien Tielaitoksen Teräsrakennepaalojen (TIEL 2173449) /32/ mukaan ottaen huomioon paalin korroosiovähennys.

5.2.2.3 Nurjahdus

Liittorakennepaalin rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään Lyöntipaalutusohjeiden LPO-87 /16/ kohdan 3.475 mukaan ottaen huomioon paalin mahdollinen korroosiovähennys. Paalin taivutusjäykkyys määritetään kaavasta

$$EI = E_{cd} I_c + E_s I_s + E_r I_r \quad (21)$$

E_{cd} = betonin kimmomoduuli

I_c = betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti

E_s = betoniterästen kimmomoduuli

I_s = betoniterästen jäyhyysmomentti

E_r = teräsputken kimmomoduuli

I_r = teräsputken neliömomentti

5.2.3 Teräskuorellinen betonipaalu

Teräskuorellisen betonipaalin teräskuori toimii ainoastaan kaivu- ja valumuottina. Paalin rakenteellinen kantavuus määräytyy teräskuoren sisään valetun teräsbetonin kantavuudesta.

5.2.3.1 Lyöntijännitykset

Teräskuoren upotuksessa sallittavat lyöntijännitykset tarkistetaan kohdan 5.2.1.1 mukaisesti.

5.2.3.2 Käyttöjännitykset

Teräskuorellisen betonipaalun rakenteellinen kantavuus puristukselle, normaalivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle määritetään Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevien ohjeiden ja niitä täydentävien ohjeiden (TIEL 2172073) /30/ sekä Tielaitoksen ohjeiden Siltojen kuormat (TIEL 2172072) /23/ mukaan.

Vedenalaisessa valussa betonin lujuusluokka on yleensä K 30, joka edellyttää sementtimäärää $350 - 400 \text{ kg/m}^3$ vesisementtisuhteen ollessa enintään 0,6.

5.2.3.3 Nurjahdus

Teräskuorellisen betonipaalun rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään kohdassa 5.2.3.2 mainittujen ohjeiden sekä voimassa olevien Suurpaaluohjeiden mukaan.

5.3 Korroosion huomioon ottaminen

Teräspaalun korroosio on otettava huomioon, kun määritetään paalun rakenteellista kantavuutta käyttötilassa. Umpinaisessa teräspalkkipaalussa tapahtuu merkittävää korroosiota yleensä vain paalun ulkopinnalla. Avoimessa teräspalkkipaalussa on otettava huomioon myös paalun sisäpinnan syöpyminen. Jos kuitenkin avoimen paalun kärki on pysyvästi pohjavedenpinnan alapuolella ja paalun yläpää on suljettu ilmatiiviisti, muodostaa paalun sisäosa umpinaisen, ilmatiiviin kotelon, jolloin paalun sisäpinnan korroosio on yleensä vähäistä.

Teräspalkkipaalujen korroosionestomenetelmiä ovat

- seostaminen,
- katodinen suojaus,
- orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet sekä
- betoniverhoilu tai betonointi.

Korroosion arvioidut vaikutukset voidaan ottaa huomioon lisäksi ylimitoituksella.

5.3.1 Ylimitoitus

Ylimitoituksella kasvatetaan paalun seinämän ainepaksuutta siten, että rakenteen seinämäpaksuus on vielä arvioidun käyttöiän aikana tapahtuvan syöpymisen jälkeenkin riittävä kantamaan rakenteelle suunnitellut kuormat. Tarvittava korroosiovara riippuu rakenteen suunnitellusta käyttöiästä ja paalua ympäröivän maan tai veden korroosio-ominaisuuksista.

Korroosiovara teräspuutkipaaluissa mitoitetaan 100 vuoden käyttöiälle. Korroosiovara maassa mitoitettavan alimman pohjaveden pinnan alapuolella tai 1,5 m vesistön pohjan alapuolella on korroosioaltista pintaa kohti 2 mm/100 vuotta luonnontilaisessa maassa, jossa ei esiinny humusta, sulfideja tai epäpuhtauksia ja jonka pH-arvo tai ominaisvastus ei ole huomattavan alhainen.

Ylimitoituksen käyttö ainoana keinona varautua korroosioon mitoitettavan alimman pohjaveden pinnan yläpuolella tai vesistön pohjakerroksen (vesistönpohja -1,5 m) yläpuolella edellyttää yleensä, että maaperän korroosio on tutkittu korroosiotutkimuksella (vrt. 2.2.6). Pienissä siltakohteissa ja maaperässä tai vedessä, jossa syövyttävyys voidaan perustellusti arvioida vähäiseksi, voidaan käyttää taulukon 6 mukaista ylimitoitusta.

Taulukko 6. Normaaleissa korroosio-olosuhteissa suositeltavat korroosiovarat [mm] ruostuvaa pintaa kohti 100:ssa käyttövuodessa.

VESIALUE			MAA-ALUE	
Vyöhyke	Meri	Sisävesi	Vyöhyke	
> HW+1,5	4	3	Maanpinta+1,0	3*
HW+1,5 ... NW-1,5	10	6	Maanpinta+1,0... HW+1,0	4*
NW-1,5 ... Pohja-1,5	4	3	HW+1,0 ... NW-1,0	4
< Vesistönpohja-1,5	2	2	< NW-1,0	2

*Jos paalut ovat alttiina tiesuolan vaikutukselle, korroosiosuojaus tai korroosiovara on harkittava erikseen.

5.3.2 Erikoisteräket

Teräksen korroosiokestävyyden parantaminen seostamalla ei myöskään ole varsinainen korroosionestomenetelmä. Pienet määrät kuparia, nikkeliä, mangaania tai kromia parantavat teräksen korroosiokestävyyttä ilmassa. Maahan sijoitetuissa rakenteissa ei tavanomaisilla pienillä seosmäärillä ole merkitystä. Merkittävä suoja saavutetaan ainoastaan käyttämällä ns. haponkestävää molybdeeniseosteista ruostumatonta terästä, jonka hinta on noin kymmenkertainen tavalliseen hiiliteräseen verrattuna.

5.3.3 Katodinen suojaus

Katodinen suojaus on korroosionestomenetelmä, jossa korroosiovirta kumotaan vastakkaissuuntaisella suojavirralla. Metallin elektrodipotentiaali laskee immunitaettialueelle, jolloin korroosioreaktiot käytännössä hidastuvat merkittävästi. Potentiaalilasku voidaan toteuttaa joko epäjalomman metallin kontaktilla, ns. uhrautuvilla anodeilla tai ulkoisella tasavirtalähteellä.

Katodisen suojauksen käytön edellytyksenä on, että suojattavia teräsputkipaaluja ympäröi sähköä johtava väliaine, kuten vesi tai kostea maa.

Käytettävä menetelmä riippuu suojattavasta rakenteesta, tarvittavan suojavirran suuruudesta, ympäristön sähkönvastuksesta, tasavirran saatavuudesta sekä taloudellisista tekijöistä. Katodisen suojauksen käyttö edellyttää hyväksyttyä suunnitelmaa.

Katodisen suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon muut maan kanssa kosketuksissa olevat metallirakenteet, jotka on myös otettava suojauksen piiriin, jottei niissä aiheutettaisi hajavirtakorroosiota.

5.3.4 Orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet

Orgaanisilla pinnoitteilla pyritään estämään tai hidastamaan korroosioparien toimintaa. Tavallisimmat teräsputkipaaluissa käytetyt orgaaniset pinnoitemateriaalit ovat epoksi, tervaepoksi, bitumi, polyuretaani ja polyeteeni.

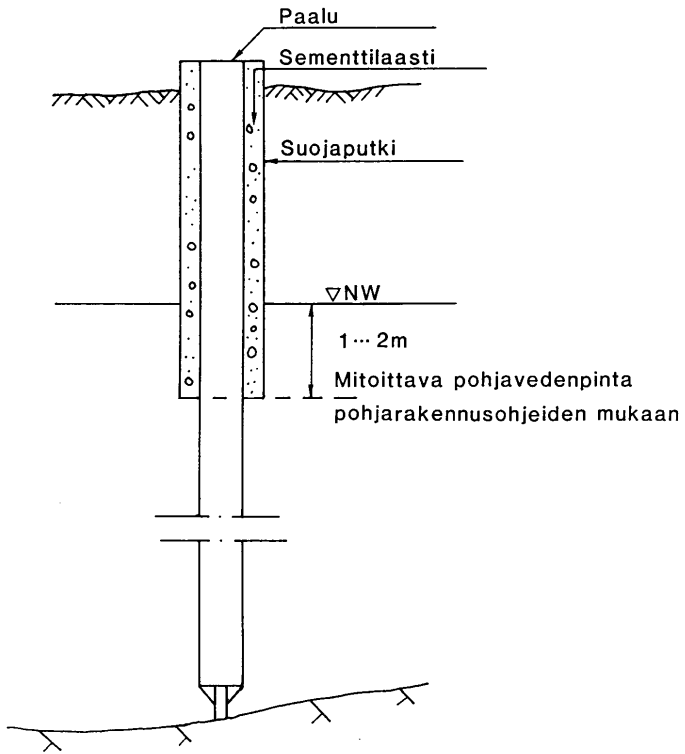
Teräsputkipaaluja käytetään yleensä lyöntipaaluina, jolloin pinnoitteiden käyttö on ongelmallista. Lyöntityön aikana pinnoitteet naarmuuntuvat tai repeytyvät helposti. Nostolaitteet, ohjausrakenteet ja karkearakeiset maakerrokset aiheuttavat pinnoitteeseen naarmuja, jotka keskittävät korroosiota. Naarmuuntuneen pinnoitteen antama suoja voidaan täydentää katodisella suojauksella. Jos pinnoitetta halutaan käyttää, voidaan vaurioitumisriskiä pienentää esimerkiksi rakentamalla täyttökerrokset vasta lyöntityön jälkeen tai pinnoittamalla paalun yläosa kaivannossa.

Tavallisin epäorgaaninen pinnoite on sinkki. Sinkki suojaa terästä myös katodisesti. Jos sinkkikerros vaurioituu ja teräspinta paljastuu, alkaa sinkki syöpyä. Sinkkikerroksen suojausvaikutus loppuu, kun sinkkikerros on syöplynyt pois. Teräsputkipaalujen sinkitys on yleensä hankala toteuttaa paalujen suuren koon takia.

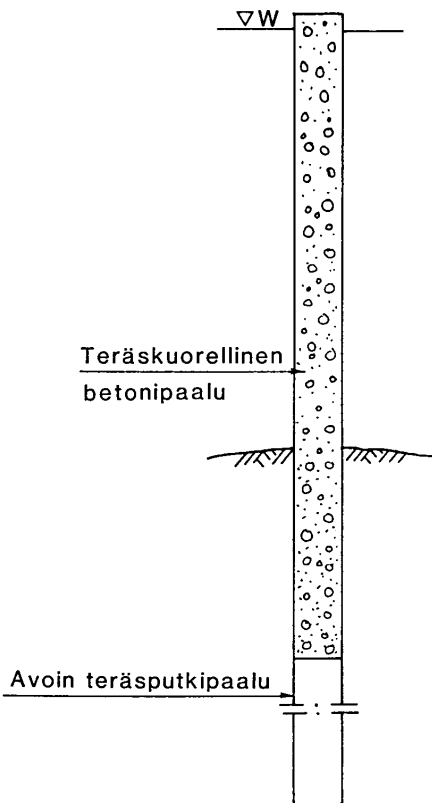
5.3.5 Betoniverhoilu

Teräspaalu voidaan erottaa ympäröivästä maasta myös betonivaipalla (kuva 19). Betonin alkalisuus saa lisäksi aikaan suojaavan oksidikerroksen teräksen pinnalle. Betoniverhoilu tarvitaan suojaamaan vain paalun ylintä osaa, joka usein on syövyttävimmässä ympäristössä. Betoni voidaan valaa joko esiporattuun reikään tai työputkeen, joka lyödään paalun ympärille paalun lyönnin jälkeen. Työputkessa on paalun muotoon sovitettu päätelevy.

Teräsputkipaaluissa voidaan käyttää myös sisäpuolista betonointia, jolloin betoni ja rauditus mitoitetaan tarvittaessa kantamaan kaikki paalulle tulevat kuormat. Teräsputkipaalu toimii tavallaan valumuotina, joka voi syöpyä kokonaan pois. Tästä huolimatta putkipaalu tulee mitoittaa lyöntijännityksille, jos kantavuus halutaan todeta lyöntivaiheessa. Betonointi tarvitaan vain paalun yläosan korroosioaltteimalle alueella (kuva 20).



Kuva 19. Korroosiosuojaus betoniverhouksella /9/



Kuva 20. Varautuminen korroosioon suunnittelemalla paalun yläosa teräskuorellisena betonipaaluna /9/.

6 PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET

6.1 Putkien materiaali- ja laatuvaatimukset

Silloissa käytettävät teräsputkipaalut ovat yleensä hitsattuja teräsputkia. Putket valmistetaan kuumavalssatusta teräsnauhasta joko pituus- tai kierresaumahitsaamalla. Myös muilla menetelmillä valmistettuja teräsputkia voidaan käyttää, kun ne täyttävät tässä ohjeessa esitetyt laatuvaatimukset.

6.1.1 Teräslajit

Teräsputkipaalujen materiaaleina käytetään SFS 200 mukaisia yleisiä rakenneteräksiä. Vakioteräslaji on Fe 510 ja laatuluokka C tai D rakenteen tai paalutustyön edellyttämästä laatuluokasta riippuen (vrt. 6.1.2). Kohteissa, joissa paaluilta vaaditaan suurta rakenteellista kapasiteettia, putkien teräsmäärää voidaan vähentää käyttämällä korkealujuuksista terästä, kuten standardin API 5L mukaisia putkiteräksiä X 60 ja X 70.

6.1.2 Laatuluokan valinta

Yleisemmin teräsputkipaalutuskohteissa on käytetty laatuluokkaa D. Erityisesti laatuluokan D käyttämistä suositellaan, kun rakenteen alin käyttölämpötila on alle -20 °C ja yläpuoliset rakenteet liitetään suoraan hitsaamalla paaluihin tai paalutustyö tehdään lämpötilassa alle -20 °C .

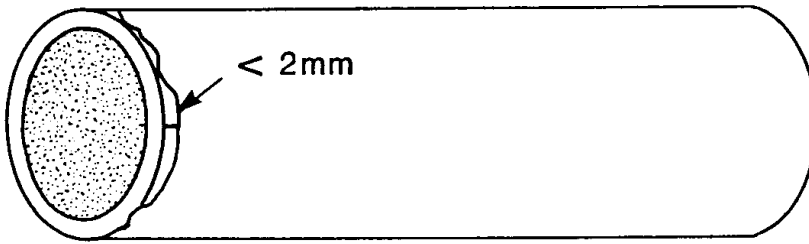
Yksityiskohtaisemmin laatuluokan valintaa on käsitelty Tielaitoksen Teräsrakenneohjeissa (TIEL 2173449) /32/.

6.1.3 Mitat ja tekniset toimitusehdot

Mittojen teknisten toimitusehtojen osalta paaluputkiin sovelletaan putkipalkkistandardia SFS 5001 seuraavin toleransseja koskevin tarkennuksin:

Ulkohalkaisija	$\pm 0,5\%$ ympärysmitasta laskettuna
Seinämäpaksuus	+ 10 % - 5 %
Pituus	- 0 + 50 mm
Suoruus	$< 0,1\%$ pituudesta
Pään tasomaisuus	$< 2\text{ mm}$

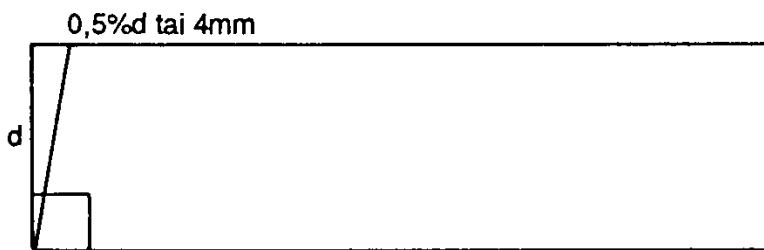
Paalun pään tasomaisuudella tarkoitetaan paalun katkaisujäljen tarkkuutta (kuva 21). Tasomaisuus voidaan mitata paalun päähän asetettavan levyn avulla. Tällöin virheet paalun pään tasomaisuudessa näkyvät levyn ja paalun pään välisenä rakonaa.



Kuva 21. Paalun pään tasomaisuus /13/.

Pään suorakulmaisuus $< 0,5 \% \text{ ulkohalkaisijasta } d$
tai $\leq 4 \text{ mm}$

Paalun pään suorakulmaisuus tarkoittaa paalun katkaisupinnan suorakulmaisuutta paalun pituusakseliin nähden (kuva 22). Paalun pään suorakulmaisuus voidaan mitata esimerkiksi suorakulmalla tai paalun ympäri asetettavalla leveällä teräspannalla.



Kuva 22. Paalun pään suorakulmaisuus /13/.

Pyöreys

$$R \leq 2\%; \quad R = 200 \frac{d_{\text{amax}} - d_{\text{amin}}}{d_{\text{amax}} + d_{\text{amin}}} \%$$

d_{amax} = suurin mitattu ulkohalkaisija

d_{amin} = pienin mitattu ulkohalkaisija

6.2 Kalliokärki ja kalliokärjen kiinnitys paaluputkeen

Kallioon tukeutuviissa teräsputkipaaluissa, joiden kärkien odotetaan tukeutuvan kallioon, käytetään liukumisen estämiseksi kovametallipalalla varustettuja kalliokärkiä. Kalliokärki mitoitetaan puristusrasitukselle siten, että kärkikappale ja -tappi kestävät kuormaa vähintään yhtä paljon kuin paalu. Kärkitapin ja kärkikappaleen kiinnitys mitoitetaan vetorasitukselle siten, että lyönnin aiheuttamat vetoaallot eivät irrota kärkitappia tai -kappaletta. Kalliokärjen taivutusrasitus ennen kovametallipalan tunkeutumista kallioon riippuu kallion pinnan kaltevuudesta ja lyöntivoimasta. Kärkitapin kunnollinen kiinnittyminen suomalaiseen kovaan kallioon saattaa edellyttää tuhansia lyönnejä pienellä lyöntienergialla.

Puristusrasitusta kohdistuu paaluun sekä paalun upotuksessa että valmiissa rakenteessa. Kärkitapin ja paalun välissä kärkikappale mitoitetaan teräsrakenteena siten, että se siirtää lyönninaikaiset ja valmiin rakenteen kuormitukset kärkitapin ja paalun välillä. Lyönnin-aikaisten jännitysten mitoitus tehdään kohdan 5.2.1.1 mukaan.

Taivutusrasitusta kalliokärkeen kohdistuu lyötäessä paalua lohka-reisen tai kivisen maakerroksen läpi sekä kärjen kohdatessa vinon kalliopinnan, jolloin rasittavan momentin suuruus riippuu lyöntivoimasta ja kalliopinnan kaltevuudesta. Kalliokärki mitoitetaan taivutukselle siten, että paalua tukevan maapaineresultantin ollessa 1,5d etäisyydellä paaluputken alapäästä kärjen mahdollinen liukuminen kallion pinnalla ei aiheuta kärjen taivutuskapasiteetin ylittymistä ennen paaluputken taivutuskapasiteetin ylittymistä.

Vetorasitusta kärkitappiin kohdistuu paalun upotuksessa kärjen ollessa vielä löyhässä kerroksessa. Lyötäessä suuria teräsputkipaaluja vapaapudotus- tai dieseljuntilla voi kiihtyvyys olla 6000 m/s^2 .

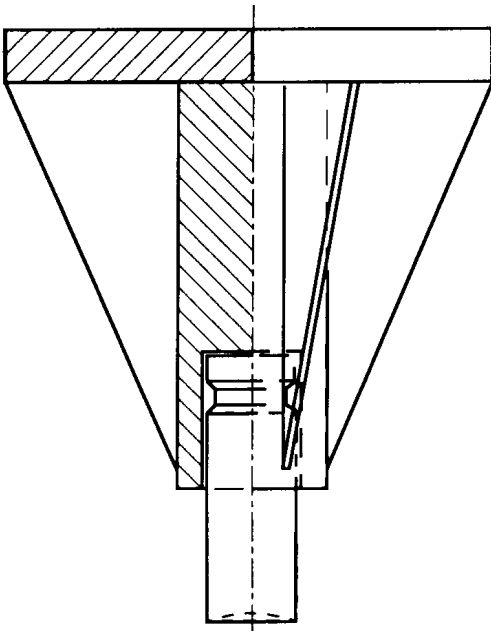
Kalliokärjen kärkitapin mitoitus tarkistetaan käyttötilassa LPO-87:n taulukon 4.3225 mukaiselle momentille ja veto- ja leikkaus voimalle paalutusluokan 1A mukaisia sallittuja jännityksiä käyttäen.

Kalliokärki kiinnitetään paaluun hitsaamalla.

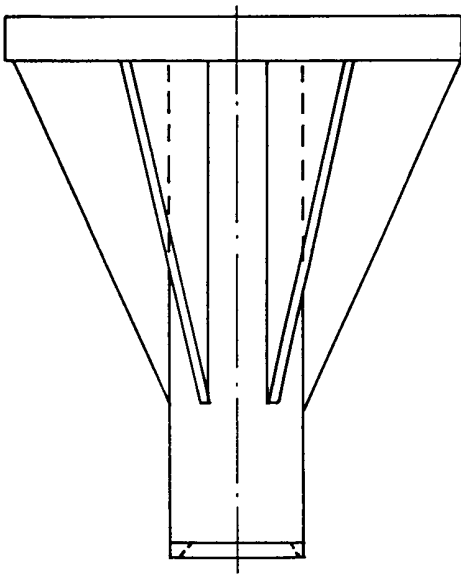
Kovametallipalalla varustetut kalliokärjet (kuva 23) tehdään tielaitoksen kohteissa tiehallituksen hyväksymän tyyppipiirustuksen mukaan.

Tielaitoksen hyväksymiä rakenneteräksestä tehtyjä kalliokärkiä (kuva 24) voidaan käyttää suojelemaan paalun kärkeä kivien ja lohka-reiden aiheuttamilta vaurioilta tai keskistämään kuormituksia ja siten estämään taivutusrasituksen syntymistä. Liukumisvaaraa kallion pinnalla ei ole, jos kallion pinta on riittävän tasainen tai tukeva maakerros on riittävän tiivis ja paksu estämään liukumisen.

Poikkeuksellisen vaativissa olosuhteissa (vrt. 3.2.1.1) voidaan liukuminen estää kalliokärjen läpiporattavalla terästapilla. Tällöin käytetään kalliokärkiä, joissa on betonilla suljettu reikä läpiporattavaa tappia varten. Tästä seuraa, että kärjen poikkileikkausala tulee niin suureksi, ettei kärjen lyöminen kallioon rikkoutumatta ole yleensä mahdollista.



Kuva 23. Periaatepiirros kovametallipalalla varustetusta kalliokärjestä.



Kuva 24. Periaatepiirros rakenneteräksestä varustetusta kalliokärjestä.

6.3 Pohjalevy

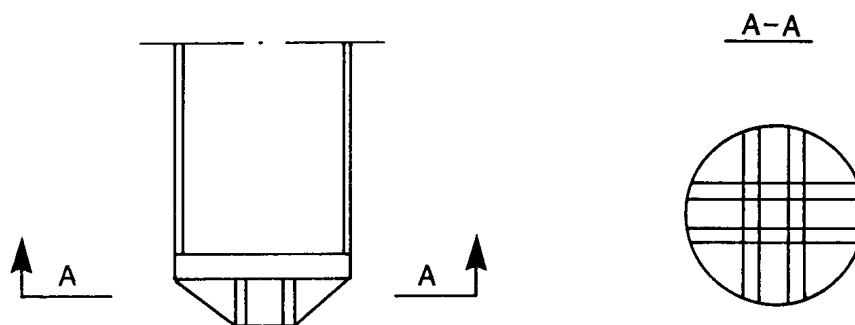
Pohjalevyn tarkoituksena on saada paalu toimimaan suljettuna paaluna. Pohjalevy mitoitetaan kestäämään kärkivastus sekä lyönnin aikana että valmiissa rakenteessa. Pohjalevyn kiinnitys paaluputkeen mitoitetaan kestäämään lyönnistä aiheutuvat vetorasitukset.

Pohjalevyn ja samalla paalun kärjen vaurioitumisvaara voi olla suuri lyötäessä paalua kivisessä ja lohkareisessa moreenissa. Tällöin on suositeltavaa käyttää kalliokärkeä.

Paaluun kohdistuu puristusrasitusta sekä paalun upotuksessa että valmiissa rakenteessa. Pohjalevy mitoitetaan teräsrakenteena siten, että se kestää maan vastuksesta aiheutuvat kuormitukset sekä lyönnin aikana että valmiissa rakenteessa. Lyönninaikaiset jännitykset mitoitetaan kohdan 5.2.1.1 mukaan.

Pohjalevyyn aiheutuu vetorasitusta paalun upotuksen aikana paalun kärjen ollessa löyhässä maakerroksessa. Lyöäessä suuria teräspaaluja vapaapudotus-, hydrauli- tai dieseljuntilla voi kiihtyvyys olla 6000 m/s^2 .

Pohjalevy tehdään yleensä teräslevystä, joka kiinnitetään paaluun hitsaamalla. Pohjalevyä voidaan vahvistaa erilaisin teräsjäykistein, joista on esitetty esimerkki kuvassa 25.

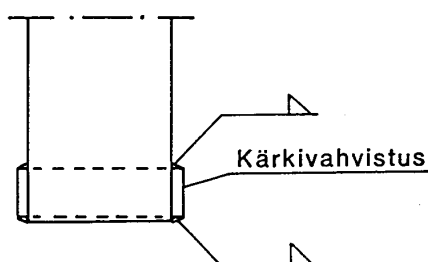


Kuva 25. Teräslevyillä vahvistettu pohjalevy.

6.4 Kärkivahvistus

Kärkivahvistuksen tarkoitus on vahvistaa avoimena lyötävän paalun kärkeä. Kärkivahvistusta käytetään kärjestä avoimissa paaluissa sellaisissa pohjaolosuhteissa, joissa on vaarana kärjen rikkoutuminen paalua upotettaessa. Kärkivahvistus lisää geoteknistä kärkivastusta kärjen poikkileikkauspinta-alan suurentuessa. Ulkopuolinen vaippavastus sen sijaan pienenee tiiviissä karkearakeisessa maakerroksessa tai moreenikerroksessa 50% ja löyhässä maakerroksessa 25%

Kärkivahvistus on tavallisesti vähintään 100 mm leveä teräspanta, joka hitsataan paalun kärkeen vaipan ulkopinnalle (kuva 26).



Kuva 26. Kärkivahvistettu teräspaalu.

6.5 Jatkoksen ja kärjen liitoshitsaukset

Teräsputkipaalujen jatkos tehdään asennushitsauksena. Jatkos voidaan hitsata joko puikkohitsaus- tai kaasukaarimenetelmällä. Työmaaolosuhteissa on suositeltavaa käyttää puikkohitsausmenetelmää, koska kaasukaarimenetelmä on herkkä tuulelle ja ilmavirtauksille.

6.5.1 Hitsaussuunnitelma

Hitsauksesta laaditaan yksityiskohtainen suunnitelma osana paalutustyösuunnitelmaa. Suunnitelmasta tulee käydä ilmi vähintään seuraavat asiat

- selvitys perusaineen hitsattavuudesta,
- hitsausolosuhteet,
- mahdollisesti tarvittava esilämmitys kärjen valmistuksessa ja kiinnihitsauksessa,
- hitsausjärjestys,
- railon muodot ja railon viimeistely,
- hitsausasennot,
- jatkettavan paalun hitsaustyön aikainen tuenta,
- hitsausmenetelmät ja -laitteet,
- käytettävät lisäaineet: puikot, langat, jauheet ja suojakaasut,
- perustelut lisäaineiden, hitsausmenetelmän ja hitsausarvojen valinnalle tarvittaessa menetelmäkokein,
- palkojen lukumäärä ja järjestys piirroksena,
- hitsaajien pätevyys,
- mahdollinen hitsien jälkikäsittely,
- mahdollinen hitsattujen kappaleiden lämpökäsittely ja
- hitsausliitosten tarkastaminen.

Menetelmäkoetta ei yleensä vaadita, kun hitsaus perustuu lisä- tai perusainevalmistajien suosituksiin. Menetelmäkoetta tulee tehdä, jos käytetty putkimateriaali tai lisäaine on sellainen, että aiempien putken- tai lisäaineen valmistajan tekemien hitsauskokeiden perusteella ei voida osoittaa hitsausliitosten täyttävän annettuja laatuvaatimuksia. Menetelmäkoetta tehdään noudattaen standardia SFS 3326 soveltuvien osien.

6.5.2 Railomuodot

Teräsputkipaalujen hitsaaminen tapahtuu yleensä yhdeltä puolelta, jolloin railomuodon on oltava sellainen, että saavutetaan riittävä läpihitsautuminen ja mahdollisimman tasainen kupu putken sisäpuolelle. Railomuodot valitaan standardin SFS 2143 tai SFS 4594 mukaan.

Tavallisimmin käytettyjä railomuotoja ovat $\frac{1}{2}$ V- ja V-railo. V-railon käyttöä suositellaan vaakahitsin ja $\frac{1}{2}$ V-railoa pystyhitsin hitsaamisessa.

6.5.3 Hitsauslisäaineen valinta

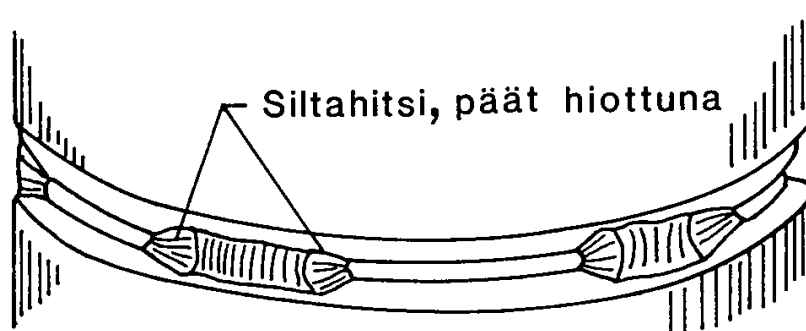
Hitsauslisäaine valitaan putken raaka-aineen mukaan putken tai lisä-
aineen valmistajan suosituksia noudattaen.

6.5.4 Putkien sovitus ja silloitus

Railon valmistuksen ja puhdistuksen jälkeen putket sovitetään hit-
sausta varten. Sovituksen huolellisuuteen ja tarkkuuteen sekä oikein
tehtyyn kestäväään silloitukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.
Putkien ympyrästä poikkeava muoto ja sisähalkaisijoiden mittaerot ai-
heuttavat sovitusvaikeuksia, jotka vaikuttavat hitsausaikaan ja hitsin
laatuun. Huomattavat juuripinnan korkeusvaihtelut on korjattava en-
nen sovitusta. Ympyrästä poikkeava muoto ja halkaisijaero aiheut-
tavat sen, ettei juurisärmiä saada samaan tasoon. Jos putken sovi-
tuksen aikana on mahdollista pyörittää putkea, voidaan sovitusvirhet-
tä pienentää ja usein päästä riittävän hyvään sovitukseen jatkoksen
onnistumisen kannalta. Sallittuna tasopoikkeamana on 1,6 mm, koska
muuten sisempää juurisärmää ei kyetä varmuudella sulattamaan.

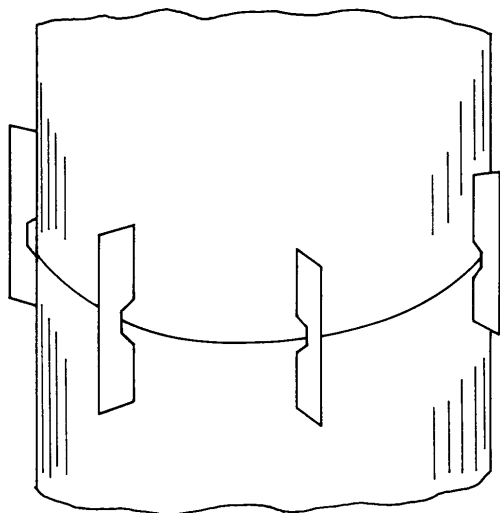
Ilmarakoa sovitettaessa on otettava huomioon silloituksen ja hitsauk-
sen ilmarakoa supistava vaikutus. Jos raon suuruus vaihtelee, on
huolehdittava, että se pienimmilläänkin täyttää läpihitsauksen edelly-
tykset. Sovituksessa tulee pyrkiä käyttämään apulaitteita silloituksen
välttämiseksi.

Paras silloitustapa on hitsata pitkä siltahitsi huolellisesti läpihitsaten ja
jättää se osaksi pohjapalkoa (kuva 27). Siltahitsin päät on ohennet-
tava virheettömän läpihitsauksen varmistamiseksi liittymäkohdissa.
Lyhyiden siltahitsien hitsaamista suoraan railoon ei suositella.



Kuva 27. Hitsiin jätettävä silloitus /18/.

Silloituksessa on usein edullista käyttää railon kohdalta lovet-
tuja sidepaloja. Tällaisen silloituksen etuna on, että palat autta-
vat raskaiden putkien sovituksessa ja hitsattava railo jää avoi-
meksi. Sidepalojen hitsaus on tehtävä siten, ettei putki vioitu
silloituksen tai palan irrotuksen takia (kuva 28).



Kuva 28. Silloitus sidepaloilla /18/.

6.5.5 Hitsaus

Hitsaajien tulee olla pätevyityneitä standardin SFS-EN 287-1 mukaisella pätevyystodistuksella. Hitsaajien pätevyystodistukset tai kopiot pätevyystodistuksista tulee esittää hitsaustyön valvojalle ennen hitsaustyön aloittamista. Hitsausolosuhteet on järjestettävä sellaisiksi, että suunnitelman mukainen laatutaso voidaan saavuttaa. Erityisesti railojen ja lisäaineiden kuivana ja puhtaana pitämiseen on kiinnitettävä huomiota.

Hitsausohjeet sekä vaaka- että pystyasentoiselle hitsaukselle on annettu viitteessä /18/.

Putkien jatkohitsauksessa voidaan käyttää juuritukea. Juurituen materiaaliksi valitaan saman laatuluokan teräs kuin jatkettava putki. Juurituen leveyden tulee olla riittävä, kuitenkin vähintään 60 mm, ja se asennetaan symmetrisesti hitsisaumaan nähden. Juurituki kiinnitetään valmiiksi jatkoputkeen. Ennen juurituen kiinnittämistä putken sisäpuolinen hitsisauma hiotaan perustasoon. Juurituki kiinnitetään putkeen katkositsein, joiden pituus on 50 mm ja väli noin 50 mm sekä a-mitta sama kuin juurituen ainevahvuus. Juurituen ja putken seinämän väliin ei saa jäädä ilmarakoa. Juurituen ainevahvuus valitaan hitsausmenetelmän ja hitsausarvojen perusteella, jotka esitetään hitsaussuunnitelmassa. Juurituen ainevahvuuden tulee kuitenkin olla vähintään 4 mm.

Hitsin rakenteellinen mitoitus tulee tarkistaa standardin SFS 2378 kyseistä railomuotoa vastaavalla tavalla.

6.5.6 Hitsausliitosten laatuvaatimukset ja tarkastus

Paaluissa, joissa putki ei toimi kantavana rakenteena, jatkoshitsin hitsiluokkavaatimus on WC.

Paaluissa, joissa putki toimii osittainkin kantavana rakenteena, hitsausluokkavaatimus on WB.

Hitsaajan pätevyys todetaan standardin SFS-EN 287-1 mukaisella pätevyyskokeella.

Luokassa WC hitseille tehdään silmämääräinen laadun tarkastus koko sauman pituudelta.

Luokassa WB hitseille tehdään silmämääräisen tarkastuksen lisäksi vähintään 10%:lle hitsisaumoista ultraäänitarkastus ja dokumentoidaan saumakohtaisesti tarkastuspöytäkirjaan. Ultraäänitarkastus aloitetaan ensimmäisestä hitsisaumasta.

Juuritukea käytettäessä hitsin laatu tarkistetaan paalujatkoksia vastaavalla standardin SFS-EN 288-3 mukaisella menetelmäkokeella. Testauksessa ei kuitenkaan vaadita iskutkeys- ja kovuuskoetta. Asennuspaikalla paalujen jatkoshitsit tarkastetaan koko pituudeltaan.

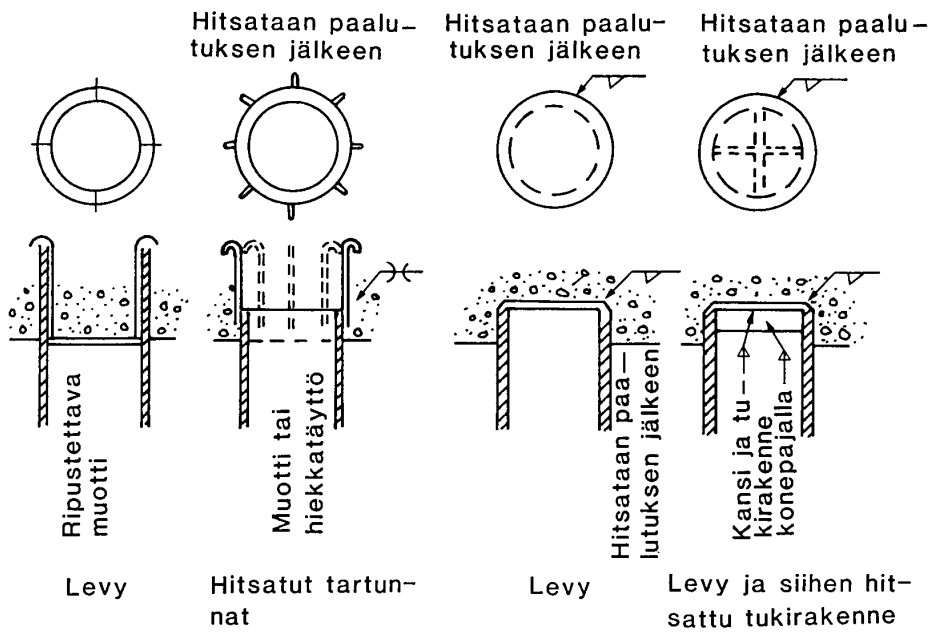
Hitsien mitoitus paalun käyttöjännityksille ja lyönnin aikaisille rasituksille tehdään standardin SFS 2378 kyseistä railomuotoa vastaavan väsytystapauksen mukaisesti tai standardin 2373 mukaisesti, kun standardin 2378 taulukon 3 määrittelemää jännityksen vaihteluväliä vastaava kuormanvaihtoluku alittuu. Hitsiliitoksen lujuuslaskelmat esitetään suunnitelma-asiakirjoissa ja hitsin laatuluokka merkitään piirustuksiin.

6.6 Yläpään kiinnitys betonirakenteisiin

Paalun yläpään ja betonirakenteen välinen liitos on suunniteltava siten, että se pystyy siirtämään kaikki betonirakenteelta paaluun kohdistuvat kuormat.

Liittorakennepaalun ja teräskuorellisen betonipaalun liitos betonianturaan tehdään käyttäen betonirakenteiden välisiä tartuntateräksiä. Samoin tehdään avoimen teräsputkipaalun liittäminen, kun paalun yläosa on varmistettu korroosiota vastaan sisäpuolisella betonipaalulla tai kun teräsputkipaalu jatkuu suoraan pilarina ilman anturaa.

Tyypillisiä avoimen teräsputkipaalun ja betonianturan välisiä liitoksia on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Tyypillisiä avoimen teräsputkipaalun ja betonianturan välisiä liitoksia.

7 PAALUJEN SIIJOITUS

7.1 Keskinäiset etäisyydet paaluryhmissä

Paalujen pienimmät keskiöetäisyydet valitaan sellaisiksi, etteivät paalut vaikuta vähentävästi toistensa kantokykyyn, eivätkä lyötäessä vahingoita toisiinsa.

Paaluryhmässä yhdensuuntaisten paalujen vaippapintojen lyhin etäisyys määritetään yleensä kaavan mukaan.

$$e_l = 300 + 0,7d \quad (23)$$

e_l = yhdensuuntaisten paalujen vaippapintojen lyhin etäisyys
 d = paalun halkaisija [mm]

Vaikeissa pohjaolosuhteissa on syytä pidentää etäisyyksiä. Paalujen ohjautuessa toisistaan, esimerkiksi tehtäessä putki-paaluseiniä laatikkoperustuksia varten, voidaan edellä esitettyjä minimietäisyyksiä pienentää. Tällöin paalut on yleensä lyötävä kärjestä avoimina.

Jos paaluryhmä on alaspäin hajaantuva, voidaan paalujen yläpäätt sijoittaa pienemmin etäisyyksin kuin yllä on mainittu.

Jos paaluryhmässä on risteäviä paaluja, on risteyskohta pyrittävä suunnittelemaan mahdollisimman lähelle maanpintaa. Risteävien paalujen minimietäisyys toisistaan riippuu paalujen risteyskohdan syvyydestä. Minimietäisyys [mm/m] määritetään yhtälöstä

$$e_r = 50 l_r \geq e_l \quad (24)$$

e_r = risteävien paalujen minimietäisyys toisistaan [mm]
 l_r = risteyskohdan syvyys [m]

7.2 Etäisyydet muista rakenteista

Paalun minimietäisyydet viereisestä rakenteesta on määriteltävä kulloinkin erikseen. Ne riippuvat viereisen rakenteen kunnosta, rakenteesta ja perustamistavasta ja maapohjan oletettavissa olevista siirtymistä.

Arkojen rakenteiden vieressä on syytä käyttää kärjestä avoimia paaluja. Jos tulppaantumista ei tapahdu, voidaan paalut lyödä kohdan 7.1 mukaisin etäisyyksin. Lyötäessä suljettua tai tulppaantuvaa paalua suurpaalujen vieressä on paalujen vaippapintojen lyhimmän etäisyyden oltava vähintään $2d$, jossa d tarkoittaa lyötävän paalun halkaisijaa. Vastaavasti paalujen vaippapintojen välinen lyhin etäisyys betonipaaluryhmien vieressä on $3d$, yksittäisten betonipaalujen vieressä $4d$, puupaalujen, hoikkien teräspaalujen tai huonokuntoisen paalutuksen vieressä $5d$. Jos uusi paalu lyödään vanhaa paalutusta syvemmälle, on vanhalle paalutukselle aiheutuvat painumat arvioitava erikseen.

7.3 Poikkeamat

Paalun asemalle ja suunnalle sallitut poikkeamat tulee harkita tapauskohtaisesti, koska liian kireät tarkkuusvaatimukset hidastavat paalutustyötä. Sallitut poikkeamat (vrt. 4.8) merkitään suunnitelmiin ensisijaisesti paalujen sijaintipiirustuksiin. Taulukossa 7 on esitetty tavanomaisessa putkipaalutustyössä sallitut sijainti-, suunta- ja kaltevuuspoikkeamat, joita käytetään, jos suunnitelmassa ei ole muuta esitetty.

Taulukko 7. Paalujen sallitut sijainti-, suunta- ja kaltevuuspoikkeamat /17/.

Poikkeaman kohde	Sallittu poikkeama
Yksittäisen paalun sijainti	±80 mm
Paalun sijainti paaluryhmässä	±100 mm
Paaluryhmän painopiste	±80 mm
Suuntapoikkeama, kaltevan paalun vaakatasoon projisoidun suunnan poikkeama	±5° (±87 mm/m)
Kaltevuuspoikkeama, yksittäisen paalun poikkeama pystysuorasta tai kaltevasta suunnasta	±2 % (±20 mm/m)
Yläpinnan poikkeama tasauksen jälkeen	±50 mm

8 TERÄSPANKKIPAALUTUKSEN POHJARAKENNUSSUUNNITELMA

Pohjarakennussuunnitelma esitetään siltakohtaisen työselityksen pohjarakennusosassa, josta viitataan siltapiirustuksiin. Sillanrakentamisen yleisiin laatuvaatimuksiin (SYL) viitataan siltä osin kuin pohjarakennussuunnitelmaan sisältyvät asiat on siinä esitetty riittävän tarkasti.

Kohteen pohjarakennussuunnitelmassa tulee esittää ainakin seuraavat asiat

- yleinen työjärjestys,
- paalutyypit ja paalujen koot,
- paalujen tavoitetasot,
- paalujen sallittu kantavuus,
- sallitut sijainti- ja kaltevuuspoikkeamat,
- sallitut käyryydet,
- paalutusjärjestys,
- paalujen jatkaminen,
- kalliokärkien, pohjalevyjen, kärkivahvistusten yms. varusteiden käyttö,
- alustava loppulyöntiohje ja menettelytapa sen tarkistamiseksi (vrt. 9.4),
- paalutuskalusto ja siltä vaadittava tehokas paaluun siirtyvä lyöntienergia,
- tehtävät koekuormitukset,
- ohjeet kivisen ja lohkareisen täytemaan läpäisystä,
- paalutuksen aiheuttamien siirtymien tarkkailu ja niiden estämiseen tarvittavat toimenpiteet,
- ohjeet paalujen mahdollisen nousun tarkkailusta sekä alustavat ohjeet tarkistus- ja jälkilyönnistä,
- ohjeet paalutuspöytäkirjan pitämisestä (pöytäkirjakaavakkeen malli liitteenä 1),
- mahdollinen betonointi, betonin laatu, valutapa ja betonoinnin tarvittava raudoitus sekä tarkistusputkien käyttö ja sijoitus,
- vaatimukset toteutumapiirustuksesta Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset, SYL 2 (TIEL 2210004) /27/ sekä
- mahdolliset jälkitarkkailumittaukset.

9 PAALUTUSTYÖ

Paalutustyössä noudatetaan soveltuvin osin Sillanrakentamisen yleisiä laatuvaatimuksia (SYL).

9.1 Soveltuvat paalutuskalustot

Suurten teräsputkipaalujen lyöntiin soveltuvat juntat, joilla on paalujen haluttuun kantavuuteen nähden riittävä lyöntienergia niin, että paalujen kantavuus voidaan tarkastaa lyöntityön perusteella. Järkäleen lyöntikorkeuden tai männän iskunopeuden on oltava niin suuri, että teräksen rakenteellinen kapasiteetti voidaan käyttää lyödessä hyväksi, jolloin paalutustyö tulee tehokkaaksi.

Järkäleen lyöntikorkeuden ja männän iskunopeuden on oltava säädettävissä niin, että lyöntienergia on hallittavissa kaikissa lyönnin vaiheissa. Järkäleen pudotuskorkeuden tulee olla määriteltävissä lyönnin aikana vähintään 0,1 m tarkkuudella.

Järkäleen poikkileikkausalan suhde paalun teräspoikkileikkausalaan tulee olla mahdollisimman pieni, ei kuitenkaan pienempi kuin 1. Tällä varmistetaan, että paaluun siirtynyt lyöntienergia on mahdollisimman suuri.

Franki-putkipaalujen upotus tehdään Franki-paalujuntalla samoin kuin Franki-paalun työputken upotus.

Teräsputkipaalujen loppulyöntejä ei voida lyödä täryjuntalla, koska paalujen kantavuutta ei voida arvioida upotustyön perusteella ja kantavuus jää pienemmäksi kuin vastaavan lyödyn paalun kantavuus. Kuitenkin teräsputkipaaluja voidaan upottaa täryjuntalla ennen loppulyöntejä niissä maakerroksissa, joissa vaippavastusta ei käytetä hyväksi geoteknisessä mitoituksessa.

Paalutuslaitteen on oltava rakenteeltaan sellainen, että paalun tunkeutumista maahan voidaan seurata riittävän tarkasti ja lyönti keskeyttää tarvittaessa.

Paalutuslaitteen maston paalujohteet on voitava asentaa riittävän tukevasti kulloinkin tarvittavaan kaltevuuteen. Paalutettaessa nosturilla riiputetulla paalujuntalla on paalu tuettava riittävästi muilla tukirakenteilla. Koko paalutuslaitteisto on oltava siten tuettu ja kokoonpantu, ettei se heilu paalutettaessa.

Lisäksi paalutuslaitteiden tulee täyttää työturvallisuuteen liittyvät näkökohdat.

Teräsputkipaalujen lyöntiin soveltuvat vapaapudotusjärkäleellä varustetut paalujuntat ja dieseljuntat sekä hydraulijuntat ja dieseljuntat, joissa järkäleen isku on kiihdytetty. Paalujunttien mahdollisen lyöntikorkeuden on oltava 1,5 - 2,0 m, jos järkäle putoaa vapaasti ja 2 - 2,5 m, jos järkäle on ripustettu vaijerilla.

Jos järkäleen isku on kiihdytetty, sen nopeus saa olla enintään 7 m/s. Paalumateriaalin teräsjännityksen hyväksikäyttöaste on tarkistettava järkäleen tai männän arvioidun iskunopeuden perusteella. Lyöntijännitysten mittaaminen dynaamisten koekuormitusten yhteydessä on kuitenkin suositeltavin tapa. Teräsjännitysten on pysyttävä kappaleessa 5.2.1.1 esitetyissä rajoissa.

Paaluputken alapäästä lyötävien Franki-putkipaalujen lyöntijännitykset eivät vaikuta merkittävästi paaluputken yläosaan. Tällöin voi Franki-paalujärkäleen pudotuskorkeus olla jopa 6 m. Franki-putkipaalujen paaluputken alaosan vahvistaminen voi olla tarpeen, kun putken lyönti tapahtuu kiviseen tai lohkaraiseen maakerrokseen.

9.2 Lyönnin keskittäminen

Paalun päähän kohdistuvan järkäleen tai iskumännän iskun tulee tapahtua keskeisesti ja paalun pituusakselin suuntaisesti.

Käytettäessä hidaskuivia junteja on iskun keskistämiseksi ja paalun pään suojelemiseksi käytettävä iskutyynyä tai vastinta. Teräsputkipaaluja lyötäessä ei tarvitse käyttää iskutyynyä, jos paalu ja erityisesti paalun pää sietävät lyönnin aikaiset maksimijännitykset. Jos iskutyynyä ei käytetä, järkäleen tai männän ja paalun pään välissä on käytettävä paksusta teräslevystä valmistettua vastinta. Iskutyynyn tai vastimen tulee olla rakenteeltaan sellainen, että se voidaan keskittää järkäleen tai iskumännän ja paalun suhteen.

Iskutyyny tai vastin keskistetään suoraan paalun päähän tulevan teräslevyn ohjaimien avulla. Iskutyynyn tai vastimen kehysosan, johon iskutyyny tai vastin kiinnitetään tukevasti, tulee olla keskeisesti teräslevyyn kiinnitetty.

Iskutyynyyn sopiva materiaali on azobe-puu. Iskutyynyn poikkileikkausalan on oltava sama kuin järkäleen. Iskutyynyn sopiva pituus on 300 - 800 mm. Iskutyyny vaihdetaan ennen kuin puuosa on kulunut niin, että lyönti osuu kehyksiin. Iskutyyny tulee valita painoltaan mahdollisimman kevyeksi.

Vastimen materiaalin tulee kestää lyönnistä aiheutuvat jännitykset. Vastimen dimensiot määräytyvät samoin perustein kuin iskutyynyn.

Täryjunttaa käytettäessä juntta kiinnitetään keskeisesti paalun päähän.

9.3 Lyöntienergian tarkistaminen

Paalutuslaitteen, mukaan lukien iskutyyny tai vastin, tehokas lyöntienergia, joka siirtyy paaluun, voidaan tarkistaa dynaamisten koekuormitusten yhteydessä iskuaaltomittauksilla.

Paaluun siirtyvän lyöntienergian tarkistaminen tehdään dynaamisten koekuormitusten yhteydessä. Samalla lyöntikalustollakin tehokas lyöntienergia voi olla vinopaaluja lyötäessä merkittävästi pienempi kuin pystypaaluja lyötäessä. Paaluun siirtyvä lyöntienergia on suositeltavaa tarkastaa paalutustyön alussa ja uudestaan, jos paalutuskalusto tai sen osia, esimerkiksi iskutyyny tai vastin vaihdetaan paalutustyön aikana.

Kun käytetään hydraulijunttia, lyöntienergian häviöt ovat pienimmillään. Vapaapudotusjätkälettä käytettäessä iskuenergia riippuu paalun kaltevuudesta ja iskutyynystä. Vaijerilla ripustettujen jätkäleiden energiahäviöt ovat suuret. Vanhojen dieseljunttien tehokas lyöntienergia saattaa poiketa huomattavasti valmistajan ilmoittamista arvoista.

Niiden pohjalevyllä tai kalliokärjellä varustettujen paaluputken alapäästä lyötävien paalujen tai Franki-putkipaalujen, joiden kantavuus tarkistetaan PDA-mittauksella, paaluputki on mitoitettava kestäämään paalun yläpäähän tehtävä koelyönti.

9.4 Lyöntiohjeen laadinta ja tarkistaminen

Suunnittelija laatii kullekin paalutyypin ja pohjasuhteiden yhdistelmälle pohjarakennussuunnitelmaan (vrt. 8) sisältyvät lyöntiohjeet, joita täsmennetään paalutuskalustosta saatujen tietojen sekä koepaalutusten ja koekuormitusten jälkeen.

Lyöntiohjeen laadinta etenee seuraavasti

- 1) suunnittelija laatii pohjasuhteiden, valitun paalutyypin ja -koon sekä tavoitetasen perusteella lyöntiohjeen, jossa esitetään alustavasti paalutustyön vaiheet ja määritellään lyöntikalustolta vaadittava tehokas lyöntienergia. Kappaleessa 4.1.3 esitettyjä paalutuskäyttöä hyväksikäyttäen voidaan saada kohtuullinen loppulyöntivaatimus, kun tavoitteeksi murtokuormaksi valitaan 2,5 - 3,0 kertaa sallittu geotekninen kantavuus. Suurin sallittu pudotuskorkeus H saadaan kaavan (20) avulla niin, että $\sigma_{\max} \leq 0,9 \sigma_{sa}$, kun σ_{sa} on paalumateriaalin myötöraja
- 2) urakoitsija valitsee soveltuvan paalutuskaluston siten, että vaadittava lyöntienergia saavutetaan sallittua jätkäleen pudotuskorkeutta tai iskumännän nopeutta pienemmillä arvoilla ja ilmoittaa siitä tiedot suunnittelijalle
- 3) suunnittelija tarkentaa tarvittaessa lyöntiohjeen käytettävän paalutuskaluston mukaisiksi
- 4) jos työkohteessa ei tehdä koepaalutusta ennen varsinaisen paalutuksen alkamista, aloitetaan paalutustyö koepaalutusluonteisesti. Suunnittelija laatii lopullisen lyöntiohjeen dynaamisten koekuormitusten perusteella.

Lyöntiohjeessa tulee esittää ainakin

- ohjeet lyöntikorkeudesta tai käytettävästä lyöntienergiasta lyönnin eri vaiheissa,
- ohjeet suljettujen yläpäästä lyötävien paalujen täyttämisestä vedellä tunkeutumisen helpottamiseksi. Paalua ei saa osittainkaan täyttää betonilla ennen kuin geotekninen suunnittelija on varmistanut paalun geoteknisen kantavuuden ja rakennesuunnittelija on tarkistanut sijainti-, kaltevuus- ja suoruusmittausten perusteella paalujen todelliset kuormat (vrt. kappale 10.5),
- ohjeet kalliokärjen kärkitapin varovaisesta lyömisestä kallioon,
- ohjeet lyönnin lopettamisesta, loppulyöntiohjeet,
- menettelyohjeet lyönnin aikana odotettavissa olevien erityistekijöiden ilmenemisen varalta,
- ohjeet ilmoitusvelvollisuuksista ja täsmennetyt ohjeet paalutuspöytäkirjan pitämisestä ja
- mahdolliset dynaamiset koekuormitukset.

9.5 Paalun tuenta ja ohjaus lyönnin aikana

Paalu on tuettava lyönnin tai upotuksen alussa siten, että se pysyy suunnitellulla paikalla ja suunnitellussa kaltevuudessa. Lyönti- tai upotustyön kestäessä paalun tuennan on toimittava paalun ohjurina siten, että paalu on jatkuvasti tuettuna paikoilleen katkaisutasossa. Jos paalun yläpään riittävä tuenta on kohtuuttoman vaikea toteuttaa, paalutustyön aikana on seurattava paalun yläpään asemaa ja kaltevuutta. Jos paalun havaitaan poikkeavan suunnitellusta asemasta tai kaltevuudesta, paalun sijainti ja kaltevuus on pyrittävä korjaamaan oikeaksi.

Jos paalun kärki kohtaa maaperässä olevan kiven tai lohka-reen ja pyrkii muuttamaan siitä suuntaansa, ohjausta on voitava väljentää siten, että paalu voi käyristymättä väistää esteen. Jos ohjausta on tarpeen väljentää enemmän kuin paalun sijainnille ja kaltevuudelle määrätyt toleranssit sallivat, tämä edellyttää paaluperustuksen rakenteellisen mitoituksen tarkistamista (vrt. 10.5).

10 PAALUTUSTYÖN VALVONTA

Paalutustöiden valvonnassa noudatetaan soveltuvin osin Sillanrakennustöiden valvontaohjetta (TIEL 2220001 ja TIEL 2210002) /24, 25/.

10.1 Asiantuntijavalvonta

Teräsputkipaalutuksen geotekninen suunnittelija tekee asiantuntijavalvontaa, jonka tarkoituksena on paalujen ja paaluryhmien geoteknisen kantavuuden varmistaminen ja hyväksyminen. Rakennesuunnittelija tekee paalujen osalta asiantuntijavalvontaa, jonka tarkoituksena on paalujen ja paaluryhmien rakenteellisen kantavuuden varmistaminen ja hyväksyminen.

10.2 Työkohdevalvonta

Työkohteessa on rakennuttajan nimeämä paalutustöiden valvoja. Paalutustyön valvoja huolehtii siitä, että paalutustyötä tehdään pohjarakennussuunnitelman sekä työmaalla hyväksytyn paalutustyösuunnitelman mukaisesti. Erityisesti paalutustyön valvojan tehtäviin kuuluu

- 1) tarkastaa, että paalumateriaalista on toimitettu rakennuttajalle ainestodistukset ja putkimateriaali täyttää suoruudelle, pyöreydelle ja päiden tasomaisuudelle asetetut vaatimukset
- 2) varmistaa, että työmaalle toimitetut paalut ja niiden varusteet vastaavat suunnitelmia
- 3) varmistaa, että urakoitsijan työsuunnitelmat soveltuvat noudatettavaksi työmaan olosuhteissa sekä pyytää geoteknistä ja rakennesuunnittelijaa tarkastamaan työsuunnitelmat
- 4) varmistaa urakoitsijan paalutustyönjohtajan pätevyys sekä paalujen jatkoksia hitsaavien hitsaajien pätevyyydet SYL 4 (TIEL 2210006) /29/
- 5) huolehtia, että paalutustyönjohtaja on tietoinen kulloinkin voimassa olevasta paalujen lyöntiohjeesta
- 6) valvoa, että paalumateriaalia käsitellään ja varastoidaan asianmukaisesti
- 7) valvoa, että urakoitsija tekee ja raportoi viipymättä sille määrättyä paalutustöihin liittyvät mittaukset sekä että urakoitsija myös raportoi tekemänsä mittaukset
- 8) tarkastaa työmaalla tehdyt paalujen hitsaukset silmämääräisesti, määrätä ultraäänitarkastettavat hitsaukset työselityksen mukaisesti sekä valvoa tarkastusten tekeminen
- 9) tarkastaa paalujen jatkohitsauksien kulmapoikkeamat sekä raportoida sallitun poikkeaman ylittävät kulmapoikkeamat rakennesuunnittelijalle
- 10) määrätä ja valvoa paalujen koekuormitukset työselityksen mukaisesti sekä huolehtia, että geotekninen suunnittelija saa tehtyjen koekuormitusten tulokset mahdollisimman nopeasti
- 11) valvoa paalujen loppulyönnit, varmistaa paalutuspöytäkirjojen täyttämisen toteutuneen paalutuksen mukaisesti sekä välittää täytetyt paalutuspöytäkirjat geoteknisen suunnittelijan tarkastettavaksi

- 12) valvoa paalujen sijainti-, kaltevuus- ja suoruusmittaukset, tarkastaa näiden raportointi ja huolehtia, että mittaustiedot toimitetaan rakennesuunnittelijalle mahdollisimman nopeasti
- 13) valvoa betonoitavien paalujen puhdistus ja valu sitten, kun geotekninen ja rakenteellinen kantavuus on varmistettu (vrt. kappaleet 10.4 ja 10.5)
- 14) huomauttaa urakoitsijaa työturvallisuuteen liittyvistä laiminlyönteistä
- 15) valvoa, että urakoitsijan työtavat ovat oikeat.

LVR-urakassa valvonta on pistokoeluonteista ja keskittyy erityisesti urakoitsijan laatu- ja työvaihekohtaisten suunnitelmien tarkastamiseen ja lopputuotteen hyväksymiseen.

10.3 Paalutustyönjohtajan tehtävät

Paalutustyönjohtajan tehtäviin kuuluu yleensä huolehtia mm. siitä, että

- 1) paalutustyösuunnitelma on laadittu ja hyväksytty
- 2) paalu täyttää valmistustoleransseja ja paalun päiden kohtisuoruutta koskevat vaatimukset
- 3) kalliokärki on suunnitelman mukainen ja kiinnitetty suunnitellulla tavalla
- 4) paalua käsitellään ja nostetaan asiaan kuuluvalla tavalla
- 5) paalu sijoitetaan suunnitellulle paikalle pystyyn tai suunniteltuun kaltevuuteen paalutustyösuunnitelman mukaisesti tuettuna
- 6) paalun jatkoksen hitsausraiot ovat suunnitelman mukaiset ja hitsaus tehdään hitsaustöiden valvontaohjeiden mukaan sekä suunnitellut jatkosten tarkastukset tehdään ultraäänimittauksilla
- 7) suunnitellut koepaalutukset ja dynaamiset koekuormitukset (PDA) tehdään ja geotekniseltä suunnittelijalta saadaan paalujen tarkistettut lyöntiohjeet
- 8) suunnitellut jouston mittaukset tehdään
- 9) järkäleen isku säilyy koko lyöntityön ajan keskeisenä ja paalun suuntaisena
- 10) iskutyynyn puuosa vaihdetaan ajoissa
- 11) aikaisemmin lyötyjen paalujen korkeusasemaa tarkkaillaan vaaituksilla paalutettaessa paalujen läheisyydessä ja otetaan yhteyttä geotekniseen suunnittelijaan tarkistus- ja jälkilyöntiohjeiden saamiseksi, jos havaitaan paalujen nousua
- 12) loppulyönnit lyödään lyöntiohjeen mukaisella pudotuskorkeudella
- 13) loppulyöntejä ei keskeytetä, ennen kuin paalun painuma täyttää lyöntiohjeessa annetun loppulyöntivaatimuksen
- 14) loppulyöntipainumat mitataan ja merkitään välittömästi paalutuspöytäkirjaan, jota pidetään jatkuvasti paalutustyön aikana ja paalutuspöytäkirjat toimitetaan päivittäin geotekniselle suunnittelijalle (liite 1)
- 15) suunnitelman mukaiset ja geoteknisen suunnittelijan työn aikana määräämät tarkistus- ja jälkilyönnit tehdään

- 16) paalutustyö keskeytetään, jos lämpötila alittaa kohdassa 6.1.2 esitetyt ohjearvot
- 17) paalujen sijainti, kaltevuus ja suoruus mitataan ja mittaustulokset toimitetaan selkeinä mittapiirustuksina rakennesuunnittelijalle, jos vaaditut toleranssit ylittyvät
- 18) betonoitavat paalut puhdistetaan ja valetaan sitten, kun geotekninen ja rakenteellinen kantavuus on varmistettu (vrt. 10.4 ja 10.5)
- 19) betonoiduissa paaluissa tehdään tarvittavat tarkistukset vedenalaisen valun varmistamiseksi
- 20) lisäpaalujen tarve tarkistetaan suunnittelijoilta kohtien 10.4 ja 10.5 mukaisesti.

Edellä esitettyä toimenpideluetteloa tulee tarpeen mukaan täydentää käytettävän paalutyyppin, lyöntikaluston ja rakennuspaikan olosuhteiden mukaan, jotta voidaan varmistua siitä, että tavoiteltu paalun kantavuus saavutetaan.

10.4 Geoteknisen kantavuuden varmistaminen

Geoteknisen kantavuuden varmistamiseksi paalujen on saavutettava tavoite-
tasonsa, täytettävä loppulyöntiohjeessa asetetut vaatimukset ja niille on tehtävä määrätty koekuormitukset. Tiedot paalujen tunkeumatasoista ja loppulyöntipainumista on toimitettava päivittäin paalutuspöytäkirjoina geotekniselle suunnittelijalle. Samoin geotekniselle suunnittelijalle toimitetaan joustomittaustulokset sekä tulokset dynaamisista koekuormituksista. Näiden tietojen perusteella geotekninen suunnittelija määrittelee paalujen todellisen geoteknisen kantavuuden ja päättää mahdollisesta lisäpaalujen tarpeesta tai muista toimenpiteistä geoteknisen kantavuuden saavuttamiseksi.

Tarkimmin geotekninen kantavuus voidaan määrittää koekuormituksilla, joista suurille paaluille kysymykseen tulevat lähinnä dynaamiset koekuormitukset. Dynaamiset koekuormitukset tulisi tehdä paalutustöiden alkaessa kullakin pohjasuhteillaan ja paalupituudeltaan erilaisella paikalla, jotta paalutustyösuunnitelma ja erityisesti loppulyöntiohje saadaan tarkennetuksi niin, että paalujen suunniteltu kantavuus voidaan saavuttaa.

10.5 Todellisten paalukuormien ja rakenteellisen kantavuuden varmistaminen

Paalujen todellisten kuormien ja paaluryhmän rakenteellisen kantavuuden varmistamiseksi mitataan paalujen kaltevuus ja sijainti.

Paalun rakenteellisen kantavuuden varmistamiseksi mitataan paalun suoruus. Lisäksi selvitetään, että paalu on ehjä ja että jatkokset on hitsattu ja tarkastettu asiaan kuuluvalla tavalla.

Jos suunnitelmissa edellytetyt sijainti- ja kaltevuustoleranssit ylittyvät, on selkeästi ja yksikäsitteisesti esitetyt tulokset sijainti- kaltevuus- ja suoruusmitauksista toimitettava välittömästi rakennesuunnittelijalle. Mittaustulosten perusteella rakennesuunnittelija laskee paalujen todelliset kuormat paaluryhmän tarkistuslaskennalla sekä mitoittaa paalujen ja paaluryhmän rakenteellisen kantavuuden sekä päättää mahdollisesta lisäpaalujen tarpeesta tai muista toimenpiteistä vaaditun rakenteellisen kantavuuden saavuttamiseksi. Yleensä vain sallitut sijaintipoikkeamat ylittävien paalujen kuormitukset on tarkistettava paalutustyön jälkeen. Kuitenkin paaluryhmät on yleensä analysoitava kokonaisuutena toteutuneen paalutuksen mukaisesti.

Paalun saa katkaista ja valaa vasta geoteknisen ja rakenteellisen kantavuuden hyväksymisen jälkeen. Rakenteellisen kantavuuden lopulliseksi varmistamiseksi on selvítettävä, että paalujen betonivalut on tehty suunnitellulla tavalla.

Paalujen jatkaminen tehdään hitsaamalla. Hitsausliitosten tarkastustoimenpiteet on esitetty kohdassa 6.5.6.

Myöskin vedenalaisen betonoinnin laatu on tarkastettava siten kuin suunnitelmissa on edellytetty. Ellei suunnitelmassa ole esitetty tarkastusmenettelyä, noudatetaan Sillanrakentamisen yleisten laatuvaatimusten (SYL) mukaista kaivinpaalujen tarkastustapaa, ts. ultraäänimittausta ja injektointia erikoisletkuis- ta. Halkaisijaltaan alle 600 mm:n paaluja ei ole suositeltavaa betonoida vedenalaisena työnä. Jos valu kuitenkin tehdään vedenalaisena, pitää laadunvarmistustoimenpiteet esittää erikseen suunnitelmassa.

10.6 Paalutuksen hyväksymisen dokumentointi

Paalutuksen valmistuttua sen hyväksyminen raportoidaan ja laaditaan Sillanrakennustöiden valvontaohjeen (TIEL 2220001) /24/ mukainen toteutumapiirustus. Toteutumapiirustus sekä kaikki mittaustiedot arkistoidaan sillan laaturaportin liitteiksi.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Hartikainen, J., Zadroga, B., Plugging of Soil in Open-ended Steel Pipe Piles, Part I: A Literature Review. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1992.
- /2/ Hartikainen, J., Zadroga, B., Saari, M., Plugging of Soil in Open-ended Steel Pipe Piles, Part II: Own Model Test Results. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1992
- /3/ Heikkilä, J., Putkipaalumerkkien geotekninen mitoitus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1988.
- /4/ Heinonen, J., Tähtiniemen sillan paalutus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1992.
- /5/ Hyrkkönen, A., Suuren teräsputkipaalun geotekninen kantavuus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1988.
- /6/ Japanese Association for Steel Pipe Piles. Steel pipe piles design. Tokio 1982.
- /7/ Japanese Association for Steel Pipe Piles. Teräspaalujen suunnittelu ja käyttö. Tokio 1985.
- /8/ Koskinen, M., Teräsputkipaalun sivukapasiteetti. Lisensiaattityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1990.
- /9/ Leppänen, M., Teräspaalujen korroosio. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1992.
- /10/ Norges Byggstandardiseringsråd. Peleveledningen. Oslo 1991.
- /11/ Poulos, H.G., Davis, E.h., Pile foundation analysis and desing. John Wiley and Sons. New York 1980.
- /12/ Prakash, S., Sharma, H. D., Pile Foundation in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Inc. New York 1991.
- /13/ Punkari, S., Teräsputkipaalutuksen valvonta. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere 1992.
- /14/ Slunga, E., Paalun geoteknillisen kantavuuden määrittäminen. Teräspaalujen suunnittelu ja käyttö. RIL k 75 - 1987.
- /15/ Suomen betoniyhdistys r.y.. Liittorakenteet: Suunnitteluohjeet. Helsinki 1988.
- /16/ Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y.. Lyöntipaalutusohjeet LPO-87. Helsinki 1987.

-
- /17/ Suomen Geoteknillinen Yhdistys r.y.. Suurpaaluohjeet, SPO-78. Helsinki 1978.
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.. Suurpaaluohje 1995, SPO-95. Helsinki 1995.
- /18/ Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto. Putkistohitsauksen suoritustekniikka. MET tekninen tiedotus 37/84.
- /19/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.. Maa- ja kalliorakennus, RIL-98. Helsinki 1987.
- /20/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.. Pohjarakennusohjeet, RIL-121. Helsinki 1988.
- /21/ Suomen Standardisoimisliitto SFS r.y.. Standardit: SFS 200, SFS 2143, SFS 2218, SFS 2373, SFS 2378, SFS 3326, SFS 4594, SFS 5001, SFS-EN 287-1, SFS 288-3.
- /22/ Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 2172068
- /23/ Siltojen kuormat. Tielaitos. Helsinki 1991. TIEL 2172072.
- /24/ Sillanrakentamisen valvontaohje-SVO. Tielaitos. Helsinki 1993. TIEL 2220001.
- /25/ Sillanrakentamisen valvontaohje, Teräsrakenteet. Tielaitos. Helsinki 1993. TIEL 2210002.
- /26/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset – SYL 1. Tielaitos. Helsinki 1996. TIEL 2210003-96.
- /27/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset – SYL 2. Tielaitos. Helsinki 1996. TIEL 2210004-96.
- /28/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset – SYL 3. Tielaitos. Helsinki 1996. TIEL 2210005-96.
- /29/ Sillanrakentamisen yleiset laatuvaatimukset – SYL 4. Tielaitos. Helsinki 1996. TIEL 2210006-96.
- /30/ Betonirakenneohjeet. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 2172073.
- /31/ Siltojen pohjatutkimukset. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 3200537.
- /32/ Teräsrakenneohjeet. Tielaitos. Helsinki 1999. TIEL 2173449.

LIITE 1

Työkohte:	Päätö n:o		
Paikka:	Pöytäkirja n:o	sivu n:o	/

TERÄSPUTKI

Ø	ulko =	mm	seinämävahvuus =	mm	pituus ≈	mm	paino ≈	kN
osa	teräslaatu		valmistaja		valm.pvm		todistukset ja huomautukset	
putki								
kärki								
jatkos								

Putken toleranssit:

Ulkohalkaisija	_____ %	ympärysmittasta	Seinämäpaksuus	_____ %
Suoruus	_____ %	pituudesta	Pituus	_____ mm
Pyöreys	_____ %		Pään tasomaisuus	_____ mm
Pään suorakulmaisuus	_____ %	ulkohalkaisijasta tai _____ mm		

TERÄSPUTKEN UPOTUS ALKOI: PVM KLO PÄÄTTYI: PVM KLO

Paalutuskone:					Suunniteltu kaltevuus _____ Mittaustaso _____ + _____ Paalun pään korkeustaso + _____ Paalun pituus (m) = _____ Paalun kärki, saavutettu taso + _____ Paalun kärki, tavoitetaso + _____	
Osa	Aine	Massa (kg)	Poikkileikkaus (mm ²)	Pituus (m)		
Järkile Isku- tyyny						
Pudotus- korkeus (m)	Iskuja (kpl/s)	Painuma		Jousto (mm)	Kärjen syvyys mittaustasosta (m)	Huomautuksia (paalun jat- kaminen, keskeytykset, yms.)
		(mm)	(mm/isku)			

KAIVU, MAAPERÄTIEDOT JA TYÖAJAT

LIITE 3

Kerros- paksuus	Maalajien rajat	Maalaji	Tehokas työaika	Huomautuksia (kaivukalusto, (näytteet, lohkareet, keskeytykset, yms.)
_____	Mittaustaso		Työ alkoi:	
m			h	
m			h	
m			h	
m			h	
m			h	
m	Pohjan taso		h	
Tulpan paksuus			Työ päättyi:	Pohjan käsittely:
m				
Tehokas työaika yhteensä			h	Kokonaistyoaika: h

RAUDOITUS JA BETONOINTI ALKOI: PVM KLO PÄÄTTYI: PVM KLO

Pohjan tarkastus: pvm	klo	Pohjan hyväksyminen, tarkastaja:
Tehdyt puhdistustoimenpiteet:		
Rauditus, pääteräksel:	haat:	Tarkistusputket:
Betonin valmistaja:		Lujuusluokka K
Sementtimäärä:	kg/m ³	Suurin raekoko: mm Notkeus: sVB
Vesisementtisuhte:	Lisäaineet:	
Betonimenekki: todellinen:	m ³ , teoreettinen: m ³	Koekappaleet (tunnus):
Betonointitapa:		Lämpötila C°
Betonoinnin keskeytys klo		korkeustasossa +
Syy keskeytykseen:		

ERIKOIS- JA KORJAUSTOIMENPITEET

TARKISTUSMITTAUKSET

Tarkistukset	Suunniteltu	Poikkeama / mitattuarvo	Paalun pään korkeustaso lyönnin jälkeen - _____
Sijainti	☐	Δ X =	Tarkistusvaaitus, pvm _____, korkeus - _____
Käyryys	<1:	Δ Y =	Tarkistus / jälkilyönti pvm _____
Suunta	☐	_____	Paalun katkaisutaso - _____
Kaltevuus	☐	_____:1____	Laatinut: ____ / ____ 19 ____

Tarkastanut:

pvm

liitteitä

kpl