

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma / Rakennesuunnittelu

Piia Talsi

PAALUTUKSEN SUUNNITTELU EUROKOODIN MUKAAN

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka

TALSI, PIIA

Paalutuksen suunnittelu eurokoodin mukaan

Opinnäytetyö

43 sivua + 6 liitesivua

Työn ohjaajat

Lehtori Juha Karvonen

Päätoiminen opettaja Jani Pitkänen

Toimeksiantaja

Wise Group Finland Oy

Toukokuu 2012

Avainsanat

paalut, suunnittelu, eurokoodi, paalutus, perustukset

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten uusi eurokoodi vaikuttaa paalutuksen suunnitteluun. Työ tehtiin suunnittelutoimisto Wise Group Finland Oy:lle.

Opinnäytetyö tehtiin kirjallisena tutkielmana, jossa kartoitettiin lähinnä uuden paalutusohjeen PO-2011 keskeisintä sisältöä. Työssä on esitelty kooste paalutuksen ja paaluperustusten rakentamisesta, sisältäen perustietoa pohjatutkimuksista, paalujen suunnittelusta ja paalutuksen laadunvalvonnasta sekä paalutuksen lopullisesta hyväksymisestä. Työn lopussa on pieni laskuesimerkki paalukuorman laskemiselle.

Yhteenvetona todettiin uuden paalutusohjeistuksen olevan samansuuntainen vanhojen ohjeiden kanssa, mutta erojakin löytyi. Uusi paalutusopas perustuu osavarmuusmenetelmään ja korostaa valmistajan ja asentajan vaikutusta paalutuksen onnistumiseen. Lisäksi paalutusluokka on vaihtunut paalutustyöluokaksi. Opinnäytetyötä voidaan käyttää apuna perehdyttäessä uusien eurokoodin mukaisiin suunnittelukäytäntöihin esimerkiksi suunnittelutoimistoissa.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Construction engineering

TALSI, PIIA

Bachelor's Thesis

Supervisors

Commissioned by

May 2012

Keywords

Designing Piling Using Eurocode

43 pages + 6 pages of appendices

Juha Karvonen, senior lecturer

Jani Pitkänen, lecturer

Wise Group Finland Oy

building, design, Eurocode, pile

The topic of this bachelor's thesis work was to find out how the new Eurocode affects piling design. The work was commissioned by the engineer office Wise Group Finland Oy.

The study was made as a literature survey which explored the most prominent features of the new piling guide PO-2011. The main focus was on piling design. In addition to design work, the paper also briefly discusses the properties and functions of the pile. At the end, there is a small example of a calculation for calculating pole load.

In summary, the old and new piling guides were found to be very similar, but differences were also found. The new piling guide is based on a partial safety factor and it highlights the manufacturer and installer of the effect of piling success. In addition, piling class has been changed to piling work class.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Wise Group Finland Oy:lle keväällä 2012. Haluan kiittää ohjaajiani Timo Ahtia Wise Group Finland Oy:stä ja lehtori Juha Karvosta Kymenlaakson ammattikorkeakoulusta. Suuri kiitos myös kaikille, jotka ehtivät työni lukea ja sitä kommentoida sen ollessa kesken. Kiitokset myös kaikille taustatukena pyörineille.

Kotkassa 16.5.2012

Piia Talsi

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

1	JOHDANTO	7
2	HISTORIA	7
	2.1 Varhaiset paaluperustukset	7
	2.2 Nykytilanne	9
	2.3 Rakennusmääräyskokoelma ja eurokoodi	11
3	MÄÄRITELMÄT	12
4	POHJATUTKIMUKSET	13
	4.1 Yleiset vaatimukset	13
	4.2 Geotekniset luokat	14
	4.3 Pohjatutkimusraportti ja perustamislausunto	15
	4.4 Ympäristötekniset tutkimukset	16
5	PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET	16
	5.1 Yleiset vaatimukset	16
	5.2 Paalun kärjen suojaaminen	18
	5.3 Paalun jatkokset	19
	5.4 Paalun pään suojaaminen	20
6	SUUNNITTELU	21
	6.1 Paalutuksen suunnittelun yleisperiaatteet Eurokoodin mukaan	21
	6.2 Paalukuormien laskeminen	21
	6.3 Paalutyypin valinta	24
	6.4 Paalutustyöluokat	24
	6.5 Paalujen ja paaluryhmien kuormitukset	25
	6.6 Paalujen geotekninen mitoitus	30
	6.7 Paalutuksen vaikutus jo asennettuihin paaluihin, muihin pohjarakenteisiin ja lähiympäristöön	30

6.8	Paalutus vaikeissa olosuhteissa	31
6.9	Paalujen rakenteellinen mitoitus	32
6.10	Loppulyönnit	33
6.11	Paalujen sijoitus	33
6.11.1	Katkaisutaso	33
6.11.2	Keskiöetäisyydet	34
6.11.3	Paaluanturan reunan etäisyys paaluista	35
6.11.4	Paalujen etäisyydet muista rakenteista	35
6.11.5	Paalujen kaltevuudet	35
6.12	Sallitut sijaintipoikkeamat	35
7	PAALUTUSTYÖN LAADUNVALVONTA JA MITTAUKSET	37
7.1	Paalutustyön dokumentointi työmaalla	37
7.2	Suunnittelijan hyväksyntä paalutukselle	37
7.3	Paalujen koekuormitukset	38
8	LOPPUSANAT	40
	LÄHTEET	41
	LIITTEET	
	Liite 1. Paalukuorman laskenta	
	Liite 2. Paalutuspöytäkirja	
	Liite 3. Pohjatutkimuskartta	
	Liite 4. Paalukartta, jossa paalukoordinaatit ovat olleet erillisenä tietona	
	Liite 5. Perustuspiirustus: Erikoispaaluanturoiden raudoitusmallit	

1 JOHDANTO

Wise Group Finland Oy tarjoaa talonrakennusalan konsultointi-, suunnittelu- ja rakentamispalveluita uudis- ja korjauskohteisiin Suomessa, Venäjällä ja Baltian maissa. Yhtiö perustettiin 2010 ja se on suomalaisessa omistuksessa. Yhtiön tavoitteena on yhdistää alan parhaita toimijoita ja siten uudistaa palvelua ja toimialaa. Wise Group Finland Oy on yksi Suomen kymmenestä suurimmasta alan yhtiöstä. (1)



Kuva 1: Wise Group Finland Oy:n logo (1)

Opinnäytetyön taustalla ovat rakennusmääräyskokoelmasta eurokoodien käyttöön siirtymisen tuottamat ongelmat. Kun on totuttu laskemaan asiat tietyllä tavalla, vaatii aikaa ja vaivaa vaihtaa määräyksistä toiseen. Opinnäytetyön tavoitteena on helpottaa tätä siirtymistä tuomalla esille vain tärkeimmät asiat paaluperustuksen suunnittelusta eurokoodin mukaan. Lopussa kerrotaan muutamista suurimmista eroista, joihin suunnittelijan kannattaa kiinnittää huomiota uusien määräyksien mukaan suunniteltaessa.

Opinnäytetyö suoritetaan kirjallisuustutkielmana. Tarvittava taustatutkimus suoritetaan tutustumalla rakennusalan julkaisuihin, kuten kirjoihin ja Internet-sivustoihin. Loppuun on laskettu myös pieni esimerkkilasku.

2 HISTORIA

2.1 Varhaiset paaluperustukset

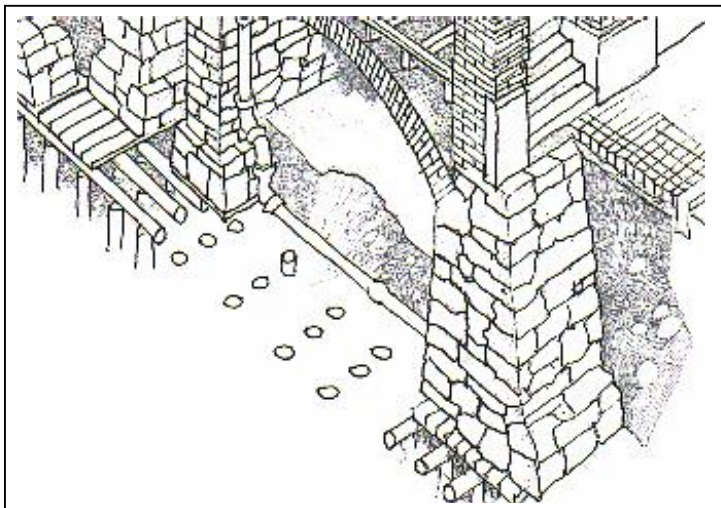
Paaluja käytetään, kun rakennuksia halutaan perustaa paikkaan, jossa maan kantavuus on heikko. Kuuluisin paaluille perustettu kaupunki lienee Venetsia Italiassa. Venetsia on perustettu puusta tehtyjen paalujen varaan, jotka on isketty mutaan. Tämän vuoksi kaupunki vajoaa pikku hiljaa paalujen vaatimattoman tuen vuoksi. Kaupungin vajoaminen alkoi, kun Italian suurimman joen Pon uoma ohjattiin virtaamaan Venetsian ohi. Tällöin jokiliejua ei enää virrannut paalujen tueksi. Painuminen on onneksi saatu lähes pysäytettyä, kun pohjaveden pumppaaminen kiellettiin 1960-luvulla. Puupaalu-

jen ongelmana on myös lahoaminen. Venetsiassa asia on ratkaistu ruiskuttamalla paaluihin mikrobeja tappavia kemikaaleja. (2)

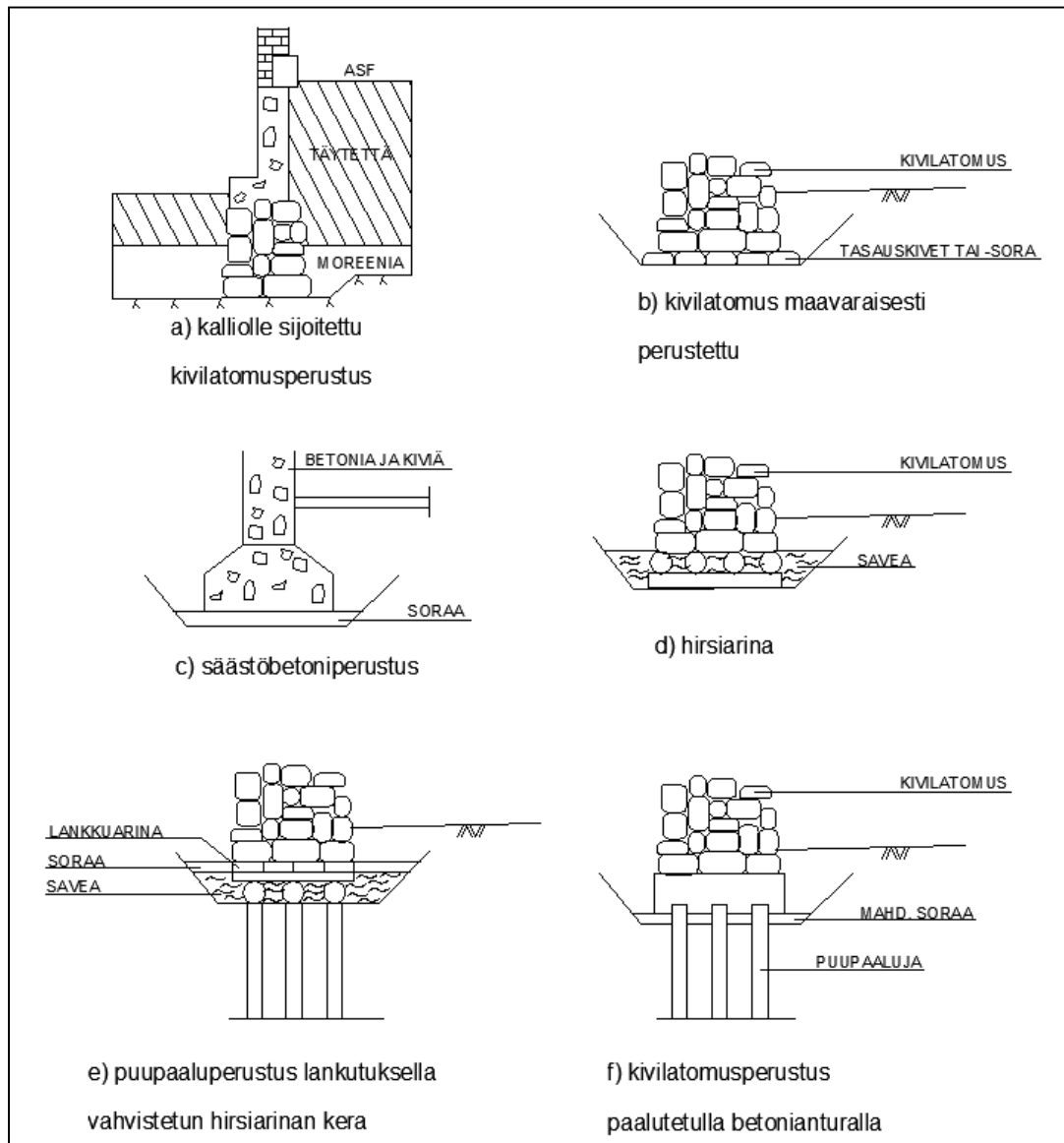
Suomessa samantapaisia ongelmia on tavattu vesistöjen lähelle rakennetuissa kaupungeissa, kuten Turussa, Helsingissä ja Lahdessa. Ongelmia syntyy, kun pohjamaan kantavuus on riittämätön tai kun pohjavedenpinta laskee. Vedenpinnan liike altistaa vanhat puupaalut lahoamiselle ja uudemmat teräspaalut ruostumiselle, ellei niitä suojata asianmukaisesti. Teräspaaluja suunniteltaessa mitoituksessa otetaan korroosiovara huomioon. Onnistuneesti suunniteltu ja asennettu paalu kestää vuosikymmeniä ja on hyvä ratkaisu perustettaessa huonolle maaperälle. (3)

Ennen pohjatutkimusmenetelmien kehittymistä perustukset rakennettiin kokoneiden rakentajien asiantuntemuksen perusteella. Paalutusmenetelmät olivat tehottomia ja aina paalujen alapäätt eivät välttämättä tavoittaneet kantavaa pohjamaakerrosta. Tästä johtuen ovat monet rakennukset painuneet, mikä taas on aiheuttanut vaurioita rakenteisiin. Vanhimmat Suomesta löytyneet perustukset on rakennettu luonnonkivistä suoraan maa- tai kallioperän päälle. 1900-luvulla alettiin käyttää myös betoniperustuksia, ensin raudoittamattomina ja paljon luonnonkiveä sisältävinä. Huonosti kantavalle maalle perustettaessa alettiin käyttää puupaaluja, jotka sijoitettiin pohjaveden pinnan alapuolelle. (4, s.209)

Kuvassa 2 on esitetty keskiaikainen tapa perustaa puupaaluille. Kuvassa näkyy hyvin, miten paalujen yläpäät on sidottu toisiinsa hirsjarinalla ja sen päälle on ylärakenteet voitu rakentaa kivistä latomalla tai muuraamalla.



Kuva 2: Keskiaikainen perustus



Kuva 3: Vanhoja perustuksia (4, s.210)

2.2 Nykytilanne

Nykyisin käytetään enimmäkseen teräsbetonipaaluja ja teräspaaluja. Puupaalujen käyttö on harvinaista. Paalutuksen suosio on noussut, koska niin sanotut hyvät eli tarpeeksi kantavat rakennuspaikat on jo rakennettu täyteen, jolloin rakennuksia aletaan rakentaa huonosti kantaville maille. Paaluja käytetään myös kaivantojen rakentamiseen. Teräksisiä pienipaaluja käytetään pientalojen perustuksiin ja korjausrakentamiseen, mutta läpimitaltaan suuria suurpaaluja voidaan käyttää kantamaan vaativia rakenteita, kuten satamalaitureita ja siltoja.

Yksi suosituimmista pienpaaluista on teräksinen RR-paalu. Se asennetaan lyömällä tai puristamalla ja se on teräsputkipaalu. RR-paaluja on edullista ja nopeaa jatkaa, ne syrjäyttävät vähän maata ja aiheuttavat vähän tärinää. Ne myös kestävät varsin hyvin osuessa esimerkiksi lohkareeseen. RR-paaluja käytetään erilaisten pienten rakennuskohteiden paaluttamiseen, korjausrakentamiskohteisiin ja jossain määrin myös infrarakentamiseen (5)



Kuva 4: RR-pienpaalu (5)

Taulukko 1: RR-pienpaalujen mittoja

Paalu	D (mm)	t (mm)	M (kg/m)	A (mm ²)	A _u (mm ²)	A _b (mm ²)	W _{ei} (cm ³)	EI (kNm ²)	A _{1,2} (mm ²)	EI _{1,2} (kNm ²)	A _{2,0} (mm ²)	EI _{2,0} (kNm ²)
RR75	76,1	6,3	10,8	1381	0,24	4548	22,3	178	1099	137	916	111
RR90	88,9	6,3	12,8	1635	0,28	6207	31,6	295	1304	228	1089	186
RR115/6,3	114,3	6,3	16,8	2138	0,36	10261	54,7	657	1711	514	1432	423
RR115/8	114,3	8	21	2672	0,36	10261	66,4	797	2245	654	1966	563
RR/RRs140/8	139,7	8	26	3310	0,44	15328	103,1	1513	2788	1250	2445	1082
RR/RRs140/10	139,7	10	32	4075	0,44	15328	123,4	1810	3553	1547	3209	1379
RR/RRs170/10	168,3	10	39	4973	0,53	22246	185,9	3284	4343	2823	3928	2526
RR170/12,5	1683	12,5	48	6118	0,53	22246	222	3924	5488	3462	5073	3165
RR220/10	219,1	10	51,6	6569	0,69	37703	328,5	7557	5748	6533	5205	5869
RR220/12,5	219,1	12,5	63,7	8113	0,69	37703	396,6	9123	7291	8100	6749	7436
RR270/10	273	10	64,9	8262	0,86	58535	524	15024	7238	13037	6560	11741
RR270/12,5	273	12,5	80,3	10230	0,86	58535	637	18265	9205	16278	8527	14982
RR320/10	323,9	10	77,4	9861	1,02	82397	751	25533	8645	22207	7839	20031
RR320/12,5	323,9	12,5	96	12229	1,02	82397	917	31178	11012	27852	10206	25676

A = teräspoikkileikkauksen pinta-ala A_u = paalun vaipan pinta-ala A_b = paalun kärjen pinta-ala
W_{ei} = taivutusvastus EI = taivutusjäykkyys

Korroosiovähennetyt poikkileikkaussuureet
A_{1,2} = poikkileikkauksala 1,2 mm korroosiovähennyksen jälkeen

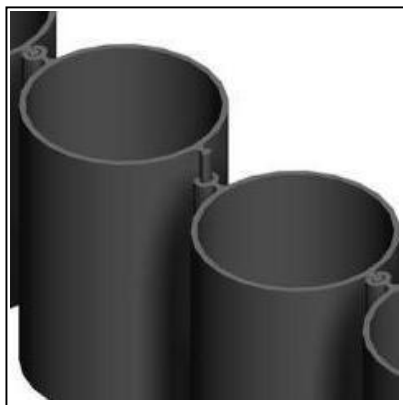
Teräsbetoniset paalut ovat suhteellisen edullisia ja niillä on hyvä kantokyky. Pienin teräsbetonipaalu on kooltaan 250x250mm. Teräsbetonipaaluja käytetään moniin erilaisiin käyttökohteisiin aina maan kantavuuden parantamisesta rakennuksien perustami-

seen. Teräsbetonipaalut ovat varsin heikkoja osuessaan kiviin tai lohkareisiin, mutta läpimittaa kasvattamalla ne kuitenkin kestävät hyvin.

Taulukko 2: Teräsbetonipaalujen mittoja

Paalun tyyppi	b [mm]	C [mm]		M [kg/m]	A [mm ²]	A _u [m ² /m]	f _{ck,cube} [MPa]	
TB250a	250	+15 -10	25	+10 -5	156	62500	1,00	45
TB250b	250				156	62500	1,00	45
TB300a	300				225	90000	1,20	45
TB300b	300				225	90000	1,20	45
TB300c	300				225	90000	1,20	50
TB350a	350				307	122500	1,40	50

Kaivauksiin käytettävät paaluseinät voidaan tehdä esimerkiksi Ruukin RD-paaluista. Ontot teräsputkipaalut lyödään maahan vieri viereen ja ne liitetään toisiinsa ponttilukkojen avulla. RD-paaluseinät soveltuvat kaivausten lisäksi vaikeisiin kohteisiin, kuten satamalaitureihin tai siltojen perustamiseen. (6)



Kuva 5: RD-paaluseinä (6)

2.3 Rakennusmääräyskokoelma ja eurokoodi

Suomessa on tällä hetkellä käytössä rinnakkain kaksi suunnitteluohjeistusta. Rakennusmääräyskokoelma (RakMk) on joukko määräyksiä, joiden mukaan Suomessa on aikaisemmin rakennukset suunniteltu. Määräyksiä lisäksi on laadittu ohjeita, jotka ovat suuntaa antavia. Määräykset koskevat uuden rakennuksen ja uusien rakennusosien, esimerkiksi laajennusten, rakentamista. Määräyksiä sovelletaan myös kun kyseessä on korjaus- tai muutostyö. (7)

Eurokoodit ovat toinen Suomessa käytössä oleva kantavien rakenteiden suunnittelu-standardi. Eurooppalaisten standardien (EN) soveltaminen vaatii kyseisessä maassa laadittujen kansallisten liitteiden käyttöä. Standardia voi käyttää, kun sille on vahvistettu kansallinen liite. Suomessa kansalliset liitteet (NA) ovat ympäristöministeriön laatimia. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry julkaisee eurokoodit Suomessa. Yhtenäisten eurokoodien käyttö edistää EU:n sisäisiä markkinoita, kun samoilla ohjeilla voi suunnitella muuallakin kuin vain yhdessä maassa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään vain eurokoodien käyttöön paalutuksen suunnittelussa. (8;9)

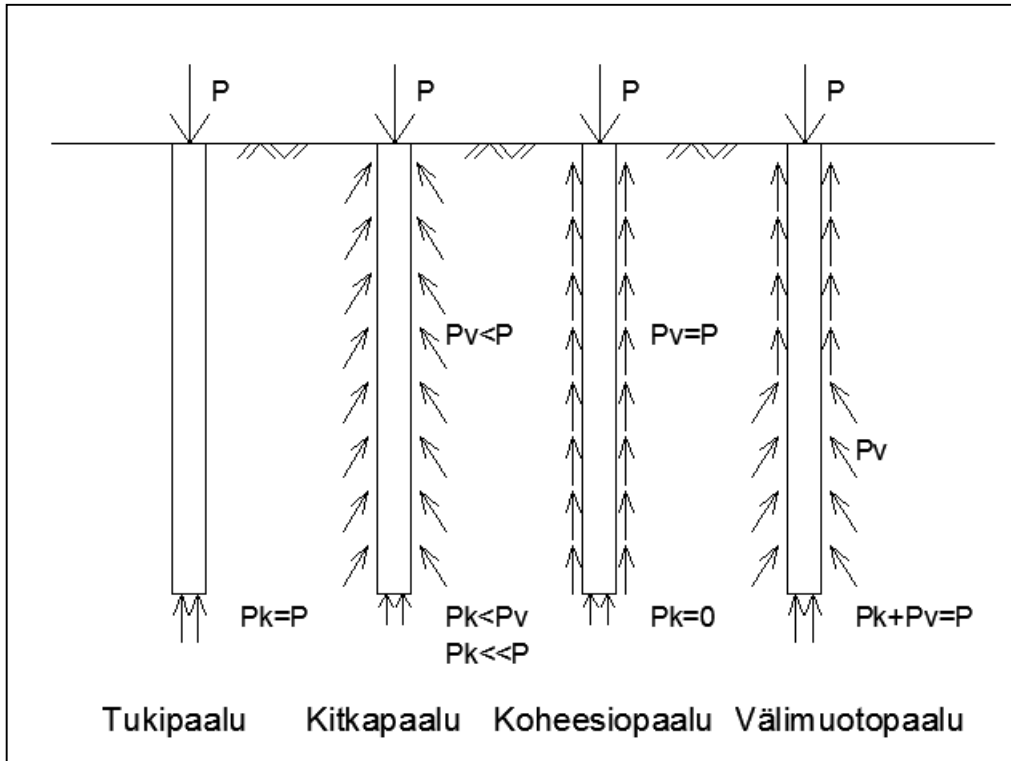
Rakennusmääräyskokoelma perustuu osittain kokonaisvarmuuslukumenetelmään. Uusi eurokoodi pohjautuu osavarmuuslukumenetelmään, joka tarkentaa tuloksia. Entisten paalutusohjeiden tilalla on nyt käytössä vain kaksi Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisemaa ohjetta ja eurostandardi SFS-EN 1990.

3 MÄÄRITELMÄT

Paalu

Paalu on hoikka kantava rakenne, joka ottaa vastaan lähinnä puristusrasituksia ja siirtää kuormia kallioon tai kantavaan maakerrokseen. Paalu voi olla valmistettu teräsbetonista, teräksestä tai puusta.

Paalut voidaan ryhmitellä toimintatavan mukaan neljään luokkaan. Tukipaalun kautta kuorma siirtyy kärjen kautta kallioon tai muuhun tiivisrakenteiseen maapohjaan. Kitkapaalussa kuorma välittyy ympäröivään maahan vaippapinnan ja kitkamaan välisen kitkan avulla. Kitkapaalua käytetään yleensä silloin, kun kallion tai tiivisrakenteisen pohjakerroksen päällä oleva karkearakeinen maakerros on paksu. Koheesiopaalun kuorma välittyy maan ja vaippapinnan välisen adheesion eli kahden aineen välisen vetovoiman avulla. Koheesiopaalua käytetään vain silloin, kun koheesiomaakerros on erityisen paksu tai kova. Välimuotopaalun toimintatapa on kaikkien edellä mainittujen yhdistelmä. (4, s.43) (11)



Kuva 6: Paalutyypit toimintatavan mukaan lajiteltuna (4, s.44)

Koheesiomaalla tarkoitetaan Suomessa lähinnä savista maaperää. Koheesiolla tarkoitetaan voimaa, joka pitää aineen koossa. Se siis vastustaa rikkovia voimia.

Kitkamaa sisältää hiekkaa ja soraa, joiden raekoko on savea suurempi.

4 POHJATUTKIMUKSET

4.1 Yleiset vaatimukset

Pohjatutkimusten yleiset vaatimukset on esitetty Eurokoodissa siten, että pohjatutkimukset on suoritettava niin, että saadaan selville kaikki maapohjan muodostumat ja kerrostumat, joilla voi olla vaikutusta perustamistapaan ja mahdolliseen paalutustyöhön. Pohjatutkimus on ulotettava niin syväälle ja laajalle alueelle kuin tarpeellista, jotta asia varmistuu. Maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet tulee tutkia. Pohjatutkimuksen yhteydessä pitää tutkia myös lähirakenteet, joita ovat muun muassa putket, johdot, kaapelit, maanalaiset rakenteet sekä rakennukset. Suunnittelua varten selvitetään, onko tärinästä vaurioituvia laitteita tai rakenteita tulevan tärinälähteen ympärillä 30–50 metrin säteellä. Löydetyt laitteet tulee luetteloida ja selvittää niille sallitut tärinärajat. Työn aikana tarkkaillaan tärinää mittauksilla ja tarpeen mukaan työmenetelmiä muutetaan. Pohjatutkimuksen tulee olla riittävä ennen perustuksen rakenne-

suunnittelun ja töiden aloittamista, tai sitä joudutaan täydentämään. Rakennushankkeen vastaava pohjarakennesuunnittelija pitää huolen pohjatutkimusten riittävydestä. (12, s.35)

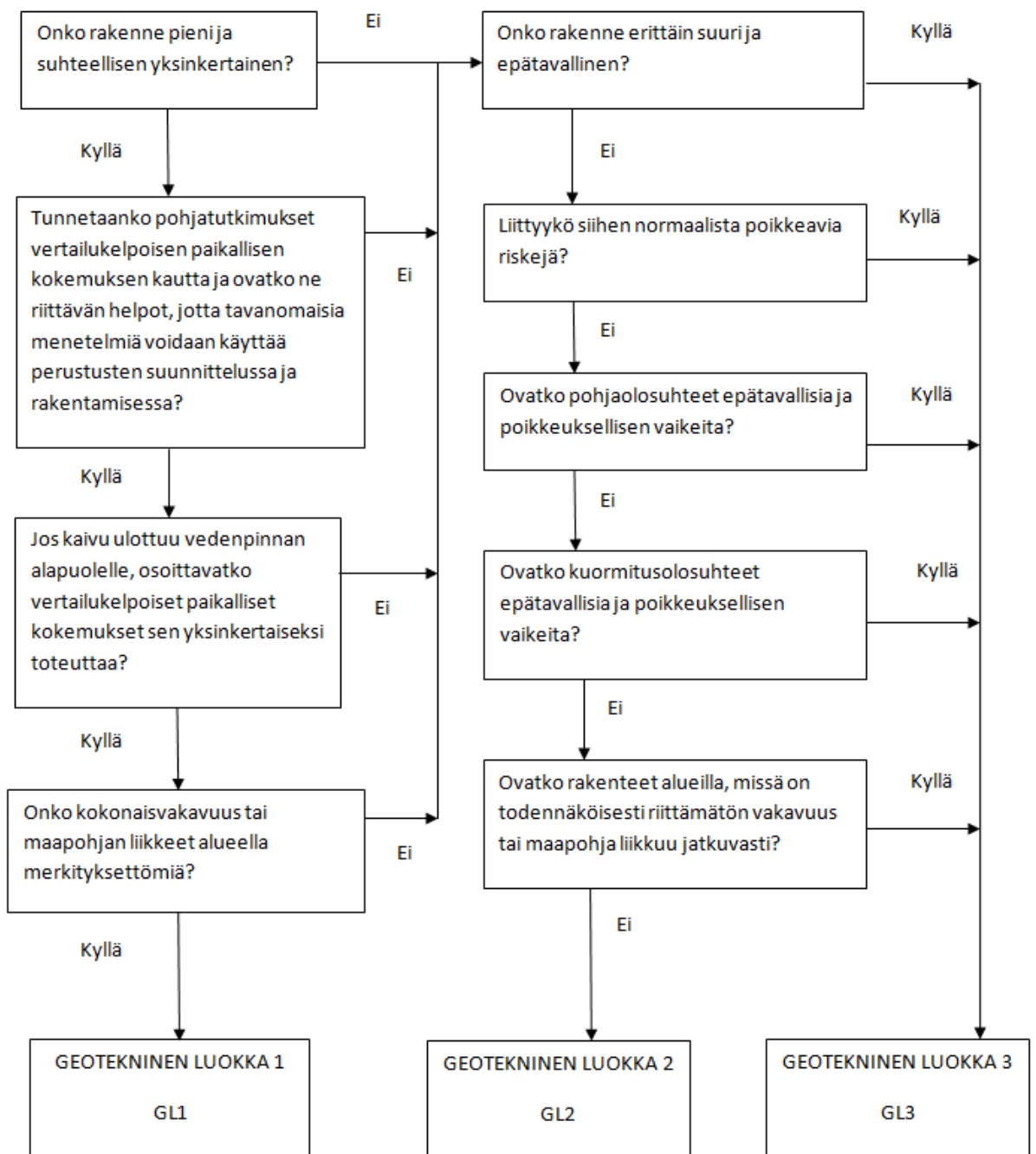
4.2 Geotekniset luokat

Rakennuskohteen pohjatutkimuksen laajuus voi perustua kolmeen eri luokkaan. Helppoissa kohteissa (GL1) pohjatutkimukseksi voi riittää asiantuntijan tekemä maastokatselmus. Maastokatselmus varmistetaan kuitenkin yleensä paino- tai porakairauksella rakennuksen jokaisesta nurkan tai yksittäisen rakenteen kohdalta. Luokan 1 menetelmiä voidaan käyttää vain, kun riski rakennuksen kaatumiselle tai maanpohjan liikkeille, kuten painumille, on merkityksetön. Menetelmää voidaan käyttää myös, jos vastaavista kohteista saadut tulokset ovat tarpeeksi yksinkertaisia ja vertailukelpoisia. Maastokatselmus riittää vain silloin, kun kaivu ei ulotu vedenpinnan alapuolelle tai se on tarpeeksi yksinkertainen ja toimiva toteuttaa. Yksinkertaiset rakennukset, joissa ei asuta, voidaan laskea luokkaan 1. Näitä ovat muun muassa varastot. Geotekniseen luokkaan 1 sijoittuva rakennus ei yleensä vaadi paaluttamista. (12, s.36)

Vaativissa kohteissa (GL2) pohjatutkimukset tulee ulottaa niin laajalle alueelle, että maan ominaisuudet saadaan selvitettyä koko paalutuksen vaikutusalueella. Pohjatutkimuksen syvyyden tulee olla riittävä kaikkien kerrostumien tutkimiseen. Alueella tehdään kairauksia, mieluiten vähintään kahta eri menetelmää käyttäen. Kairaus on suoritettava vähintään paalun oletetulle tunkeutumistasolle, mieluiten vielä syvemmälle. Tutkimuspisteiden tulee olla rakennuksen jokaisen nurkan kohdalla sekä noin 5 - 15 metrin välein riippuen pohjasuhteiden vaihtelusta. Pohjaveden korkeusasema ja virtaussuunta tulee selvittää vähintään yhdestä paikasta rakennuspaikalta tai sen välittömästä läheisyydestä. Luokkaan 2 lasketaan rakennukset, joissa asutaan tai työskennellään. Normaalit omakotitalot kuuluvat tähän luokkaan. (12, s.37)

Erittäin vaativissa kohteissa (GL3) pohjatutkimus tehdään jokaisen perustuksen kohdalta. Jos rakennuspaikalla on paineellista pohjavettä, tulee sen painetaso mitata. Kallion päällä olevien maakerrosten ominaisuudet selvitetään ja maalajien kerrosrajat selvitetään ottamalla riittävästi näytteitä. Erittäin vaativia kohteita ovat suuret ja epätaivalliset rakenteet ja kohteet, jotka sijaitsevat todella huonoissa pohjaolosuhteissa. (12, s.38)

Kaavio 1: Geoteknisen luokan valintaperusteet (12, s.29)



4.3 Pohjatutkimusraportti ja perustamislause

Kohteessa suoritetaan maaperätutkimuksia, joiden tulokset raportoidaan joko pohjatutkimusraporttina tai perustamislauseuna. Samassa dokumentissa voidaan esittää myös kohteesta otettujen maanäytteiden geolaboratoriotestien tulokset. Pohjatutkimusraportti esittää kohteeseen soveltuvat perustustavat. Maanvaraisessa perustuksessa pohjatutkimusraportti esittää sallitun pohjapaineen eli geoteknisen kantavuuden maanvaraisen perustuksen alla ja paaluperustuksessa soveltuvat paalutyypit. (12)

4.4 Ympäristötekhniset tutkimukset

Nykyisin joudutaan usein selvittämään myös rakennettavan tontin maaperän ja pohjaveden pilaantuneisuus. Tällöin on suositeltu niin sanottu ympäristötekhninen tutkimus joka voidaan tehdä pohjatutkimuksen yhteydessä tai erillisenä työnä. Ympäristötekhnisessä tutkimuksessa otetaan tontilta maanäytteitä, jotka tutkitaan erillisessä laboratoriossa.

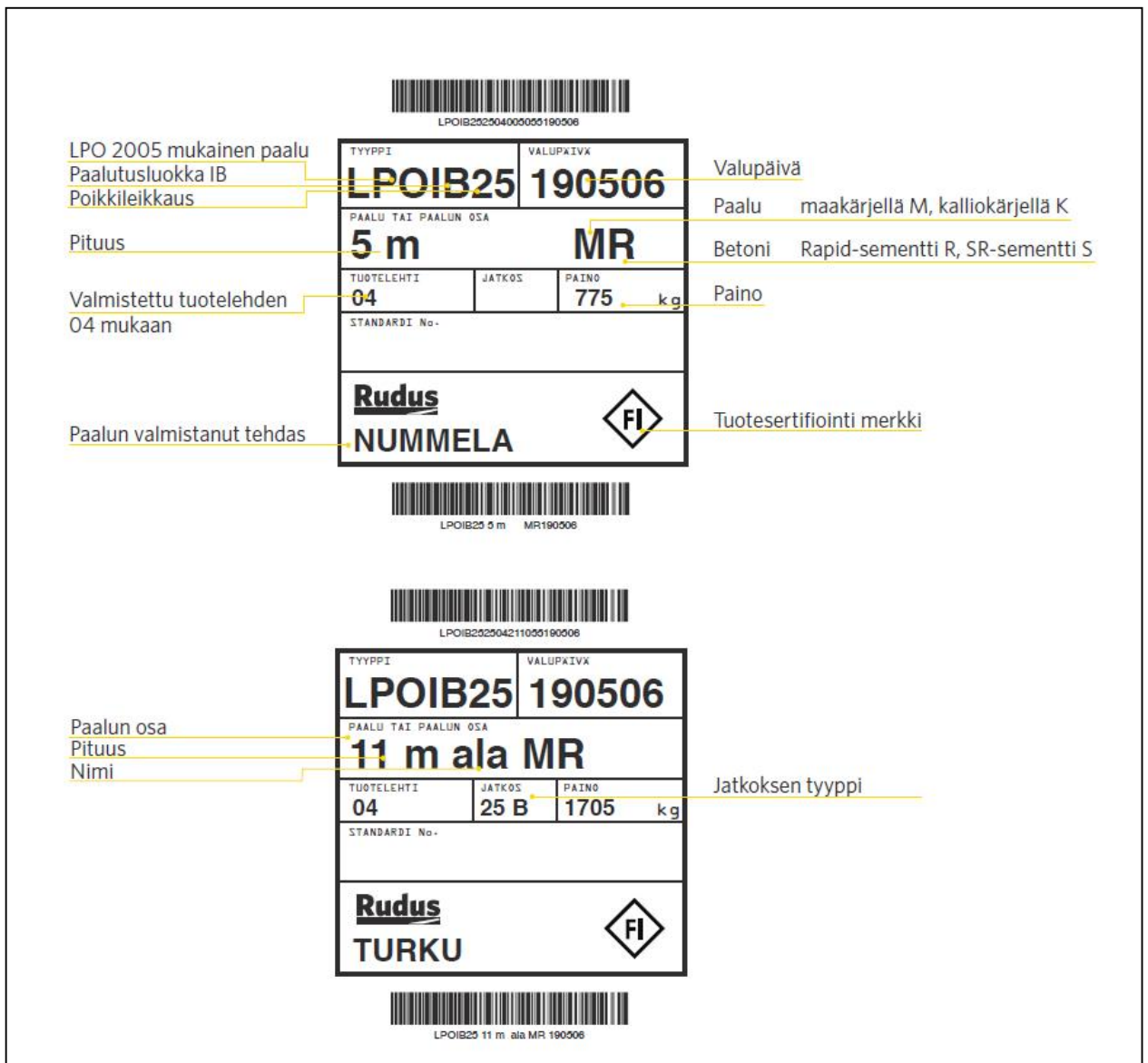
5 PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET

5.1 Yleiset vaatimukset

Käytettävissä paaluissa ja niiden tarvikkeissa olisi hyvä olla jo nyt CE-merkintä, jolloin tiedetään, että tuotteet täyttävät niille asetetut vaatimukset. CE-merkintä tulee pakolliseksi kuitenkin vasta 1.7.2013. Tuotteiden ja materiaalien ominaisuudet tulee ilmoittaa vaaditulla tavalla. (13)

Rakennustuotteiden CE-merkintä perustuu rakennustuotedirektiiviin, jonka tavoitteena on helpottaa rakennustuotteiden liikkuvuutta ja yhdenmukaistaa vaadittua laatua Euroopan talousalueella. CE-merkinnällä valmistaja vakuuttaa tuotteen vastaavan standardia ja että tuotteen valmistuksen valvonta on asianmukaista. (13)

CE-merkinnän yhteydessä on kerrottava vähintään varmentamislaitoksen tunnusnumero, valmistajan nimi tai tunnusmerkki, merkinnän kiinnittämivuosi, valmistusstandardin tunnus, vaatimustenmukaisuustodistuksen numero, tarkoitettu käyttökohde sekä tiedot, joiden mukaan on mahdollista tunnistaa tuotteen ominaisuudet standardia vastaaviksi. (13)



Kuva 7: Esimerkki tb-paalun CE-merkinnästä (14)

Uusiokäyttöön otettavien kuormia siirtävien paaluosien tulee vastata suunniteltuja arvoja ja ne on varmennettava tai testattava. Osissa ei saa olla vaurioita, jotka voivat vaikuttaa lujuteen tai säilyvyyteen. (12, s.31)

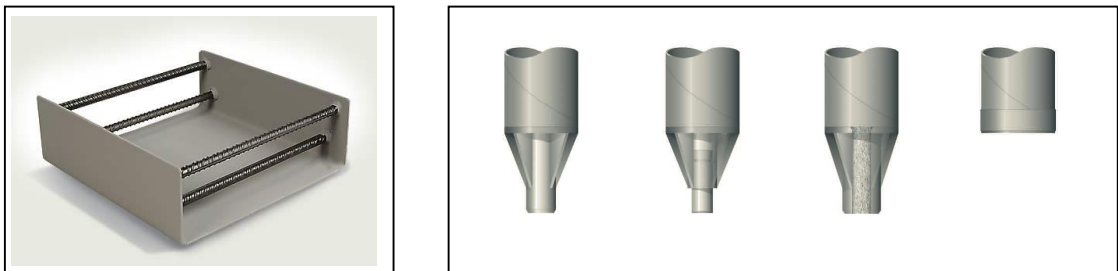
Paalut tulee suunnitella vastaamaan rakennuksen käyttöikä. Käyttöikä pitää lukea suunnitelmissa. Paalun on kestettävä sille tulevat kuormitukset sekä liikuttelusta ja asennuksesta johtuvat kuormat. Materiaalien alkuperän tulee olla löydettävissä dokumenteista. (12, s.31)

5.2 Paalun kärjen suojaaminen

Lyötävien paalujen kärjet suojataan yleensä joko maa- tai kalliokärjellä. Kärjet mitoitetaan siten, että ne kestävät vähintään yhtä paljon kuormaa, kuin paalut on suunniteltu kestävänsä. Jos paalu tukeutuu hienorakeisiin tai löyhiin maakerrokseen, voidaan paalut suunnitella alapäästä avoimina, esimerkiksi putkiprofiileina, tai käytettäväksi ilman maakärkeä, kuten teräsbetonipaaluina. Avoimissa läpimitaltaan suurissa teräsputkipaaluissa käytetään yleensä karkivahviketta suojaamaan paalun alapäätä. (12, s.131)

Maakärjet

Maakärkeä voidaan käyttää, kun maapohjassa ei ole suuria kiviä tai lohkareita, eikä paalun kärki tukeudu kalliioon. Maakärki estää paalun alaosa vaurioitumiselta asennuksen aikana. Puristuspaalun kärkiosan on kestävä kuormaa vähintään yhtä paljon, kuin paalun oletetaan kestävänsä. (12, s.161)



Kuva 8: Teräsbetonipaalun Emeca-maakärki (15), RR-suurpaalujen kärkiä (20)

Kalliokärjet

Kalliokärkiä käytetään teräs- ja teräsbetonipaaluissa, kun paalu lyödään kalliioon tai kiviseen tai lohkareiseen maakerrokseen. Kärki mitoitetaan siten, että se kestää lyönneistä aiheutuvat vetoaallot hajoamatta. Kärjen tulee kestää myös, kun se osuu kiviin, lohkareisiin tai kalliioon. Kärkeä käytetään suojelemaan paalun päätä sekä keskittämään kuormituksia. Kärki ei liu'u kallio pintaa vasten, kun kallion pinta on tasainen tai ympärillä on riittävän tiivis ja tukeva maakerros. Jos liukuminen kuitenkin on mahdollista, voidaan kalliokärjen läpi porata reikä ja ankkuroida paalu kalliioon. (12, s.162)



Kuva 9: Teräsbetonipaalun Emeca-kalliokärki (16)

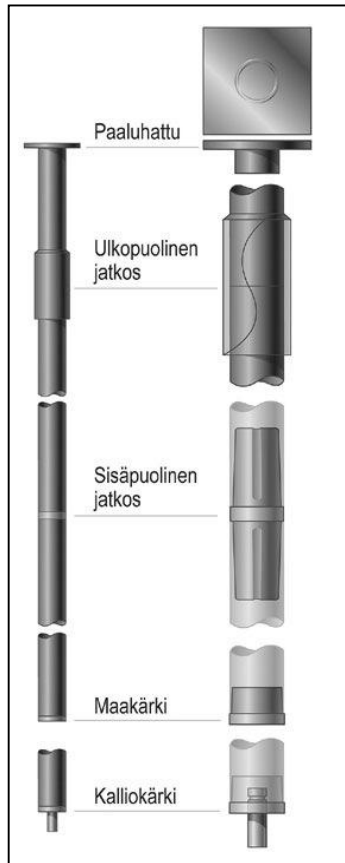
5.3 Paalun jatkokset

Mekaaniset jatkokset ovat teräspaaluilla joko ulkopuolisia holkkijatkoksia tai irrallisia sisäpuolisia jatkoksia. Molemmissa kiinnitys perustuu jatkoskappaleen ja paalun väliin puskuvoimaan. Vetopaalujen liitoksien täytyy olla vetoa kestäviä, teräspaalujen liitoksien esimerkiksi hitsattuja. Liitoselementtien tulee kestää käsittelystä, kuljetuksesta ja asennuksesta tulevat rasitukset. Porapaalujen mekaaniset jatkokset ovat yleensä kierrejatkoksia. Lyöntipaaluissa käytettäviä mekaanisia jatkoksia testataan lyöntikokeella, jossa paalua isketään vähintään 500 kertaa paalun koosta riippuvan kokoisella järkäleellä. Lyöntien jälkeen mitataan paalun kestävyys ja niitä verrataan arvoihin, joita paalun on suunniteltu kestävä. (12, s.157)

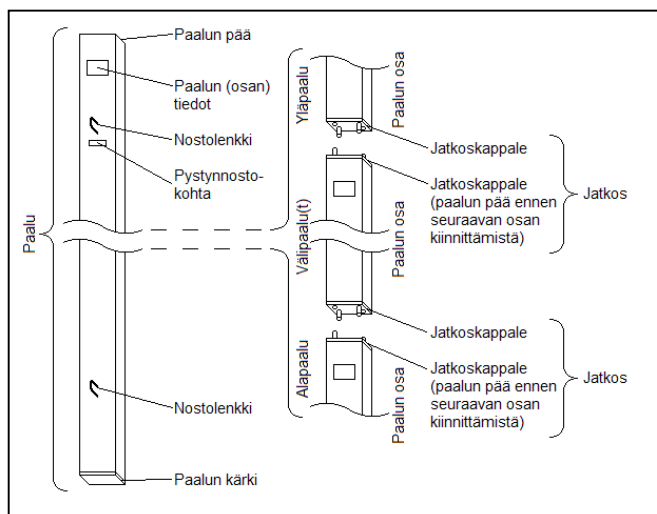
Infran rakenteissa käytettävät suuret teräspuutkipaalut jatketaan aina hitsiliitoksella. Hitsattujen jatkoksien kestävyyttä testataan NDT-tarkastuksilla eli rikkomattomilla ainekoetuksilla (non-destructive testing). Tässä menetelmässä rakennetta ei tarvitse rikkoa, vaan laatu tarkistetaan joko röntgenkuvauksella tai ultraäänitarkastuksella. (17)

5.4 Paalun pään suojaaminen

Paaluhattuja käytetään teräksisten pienpaalujen yläpäässä siirtämään kuormat perustuksilta paaluille. Paaluhattu asennetaan paaluun paalun pään katkaisun jälkeen. (12, s.168)



Kuva 10: RR-teräsputkipaalun rakenne (18)



Kuva 11: Teräsbetonipaalun rakenne (10, s.21)

6 SUUNNITTELU

6.1 Paalutuksen suunnittelun yleisperiaatteet Eurokoodin mukaan

”Paalujen suunnittelussa tulee määrittää paalujen tyyppi ja koko sekä asennustapa, joka soveltuu kyseisiin pohja- ja ympäristöolosuhteisiin.” (12, s.169)

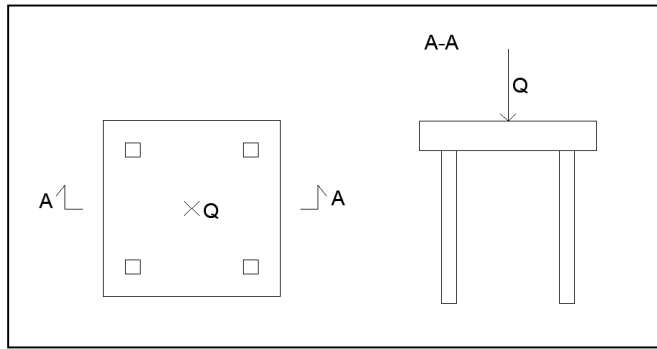
Soveltuvan paalutyypin valinnan jälkeen suunnittelun tarkoituksena on selvittää kuorman jakautuminen paalulle tai paaluryhmälle. Seuraavaksi paalun geotekninen ja rakenteellinen kantavuus on määritettävä. Työnaikaiseen mitoitukseen kuuluu paalun lyöntijännitysten laskeminen sekä lyöntikaluston ja lyöntiparametrien suunnittelu.

Suunnittelutyötä varten tarvitaan lähtötietoina vähintään työmaan pohjatutkimusraportti, suunnittelun ja toteutuksen ohjeet ja laatuvaatimukset. Lisäksi tarvitaan työn valvontaa, seuranta- ja mittaustarkkailua tai testausta koskevat lisävaatimukset, tiedot työtä mahdollisesti rajoittavista olosuhteista ja tiedot työtä koskevista rajoituksista joita voivat olla työalueen koko, pinnanmuodot, kulkutiet, puut, kaapelit sekä kohteen läheisyydessä olevat herkästi vaurioituvat rakennukset tai rakenteet. Suunnittelua varten tulee ottaa huomioon myös työstä syntyvä melu, tärinä tai saastuminen sekä muut tekijät, jotka voivat vaikuttaa työn toteutukseen, kuten läheisten rakennusten perustukset. (12, s.169)

6.2 Paalukuormien laskeminen

Paalukuormien laskemisessa voidaan erottaa kaksi tapausta jotka ovat yksittäisen paalun laskeminen ja paaluryhmän paalujen paalukuorman määrittäminen. Yksittäisen paalun paalukuorma lasketaan yläpuolisilta rakenteilta tulevien kuormien perusteella ottaen huomioon ylärakenteiden esimerkiksi sokkelipalkkien, alapohjan rakenteiden jäykkyydet, materiaalit ja mittasuhteet. Laskennassa voidaan hyödyntää FEM-malleja, ohjelmistoja ja muita valmiita laskuohjelmia.

Paaluryhmän paalukuormien laskentaan on ohessa johdettu statiikan pohjalta yksinkertaisia laskentakaavoja. Tässä on erotettu tapaukset, joiden yläpuolisilta rakenteilta paaluryhmälle tuleva kuorma on keskeinen tai epäkeskeinen. Epäkeskeinen kuorma syntyy käytännössä aina, jos paaluryhmän mitoituksessa tulee ottaa huomioon vaakakuormituksia.



Kuva 12: Kuorma paaluryhmälle keskeinen

Kun paalukuorma on ryhmälle keskeinen, paalujen kuormat lasketaan kaavalla

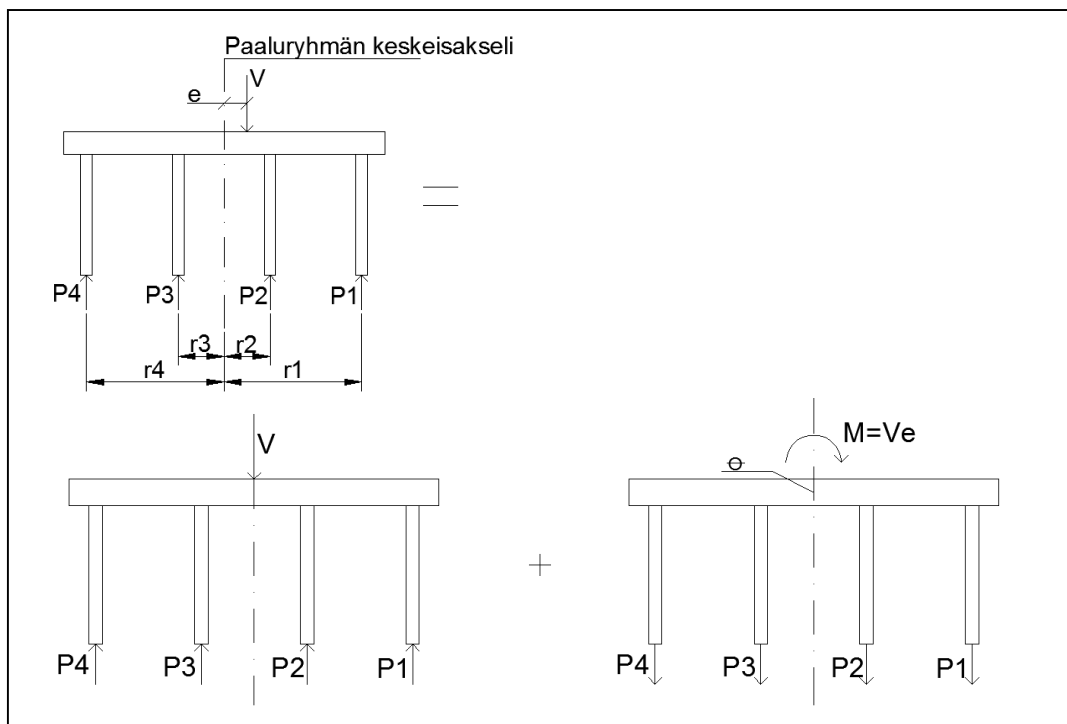
$$P = \frac{V}{n}$$

jossa

P = yksittäisen paalun kuorma

V = paaluryhmän vertikaalikuorma

n = paalujen lukumäärä paaluryhmässä



Kuva 13: Kuorma paaluryhmälle epäkeskeinen

Kuorman ollessa paaluryhmälle epäkeskeinen kuorman kaava voidaan johtaa seuraavasti:

$$P_1 = P_1$$

$$P_2 = \frac{r_2}{r_1} \cdot P_1$$

$$P_3 = \frac{r_3}{r_1} \cdot P_1$$

$$P_4 = \frac{r_4}{r_1} \cdot P_1$$

jossa

P_i = paalun i paalukuorma

r_i = paalun i etäisyys paaluryhmän keskeisakselilta

(huom! r voi olla negatiivinen)

Yksittäisen paalun kuorma muuttuu siis lineaarisesti paaluryhmän sisällä kun kuormitus on epäkeskeisyydestä tuleva momentti.

Paalujen kuorman saa edellä mainitun lähtökohdan perusteella momenttitasapainoyhtälöstä:

$$\hat{\theta}_i: P_1 \cdot r_1 + P_2 \cdot r_2 + P_3 \cdot r_3 + P_4 \cdot r_4 - V \cdot e$$

$$P_1 \left(\frac{r_1^2}{r_1} \right) + P_1 \left(\frac{r_2^2}{r_1} \right) + P_1 \left(\frac{r_3^2}{r_1} \right) + P_1 \left(\frac{r_4^2}{r_1} \right) - V \cdot e = 0$$

$$P_i = \frac{V}{n} + \frac{V \cdot e \cdot r_i}{\sum a_i \cdot r_i^2} = 0$$

→ Paaluryhmän paalun paalukuorma on siis

$$P_i = \frac{V}{n} + \frac{V \cdot e \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n a_i r_i^2}$$

jossa

P_i =paalun i paalukuorma

r_i = paalun i etäisyys paaluryhmän keskeisakselilta
(huom! r voi olla negatiivinen)

V = paaluryhmän vertikaalikuorma

n = paalujen lukumäärä paaluryhmässä

a = paalujen lukumäärä rivissä i

Huom! Etäisyyden r etumerkit (alla olevan kuvan keskeisakselin vasen puoli on negatiivinen)

Esimerkki paalukuorman laskemisesta on liitteenä.

6.3 Paalutyypin valinta

Paalutyyppi valitaan rakennuspaikan pohjasuhteiden ja rakenteiden asettamien vaatimusten perusteella. Paalutyyppin valintaan vaikuttavat maaperän kivisyys ja läpäistävät rakenteet. Jos paalutus tulee korjausrakennuskohteeseen, voidaan joutua läpäisemään olemassa olevia rakenteita. Jos paalu täytyy asentaa vanhan rakenteen läpi, voidaan käyttää porapaaluja. Tulevat kuormat, ympäristön vaatimukset ja kohteen laajuus eli tulevien paalujen lukumäärä huomioidaan myös. Lisäksi huomioidaan kaluston käyttö ja soveltuvuus kyseiseen kohteeseen.

6.4 Paalutustyöluokat

Paalun rakenne määräytyy paalutustyöluokan mukaan. Paalutustyöluokkia on kolme (PTL1-PTL3) ja niissä huomioidaan tavanomaiset kuormitus- ja rasitustilat. Tavan-

omaisessa kuormitusilanteessa paaluun kohdistuu lähinnä vain paalun keskeisakselin suuntaisia kuormia. Paalun rakenteessa tulee huomioida paalutustyötapauhtuman lisäksi ominaisuudet, joita kuvataan seuraamusluokan ja geoteknisen luokan (katso kohta 4.2) avulla. (12, s.99)

Seuraamusluokka määräytyy seuraavasti:

- CC3 **Suuret** seuraamukset ihmishenkien menetysten tai **hyvin suurten** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
- CC2 **Keskisuuret** seuraamukset ihmishenkien menetysten tai **merkittävien** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
- CC1 **Vähäiset** seuraamukset ihmishenkien menetysten tai **pienten tai merkittävien** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.

Seuraamusluokka CC3 sisältää esimerkiksi yli 8-kerroksiset rakennukset, konserttitalit, teatterit, katsomot ja muut suuret kohteet. Seuraamusluokkaan CC1 kuuluvat korkeintaan kaksikerroksiset rakennukset, joissa oleskelee ihmisiä vain tilapäisesti, kuten varastot. Loput rakennukset ja rakenteet kuuluvat seuraamusluokkaan CC2. (19, s.7)

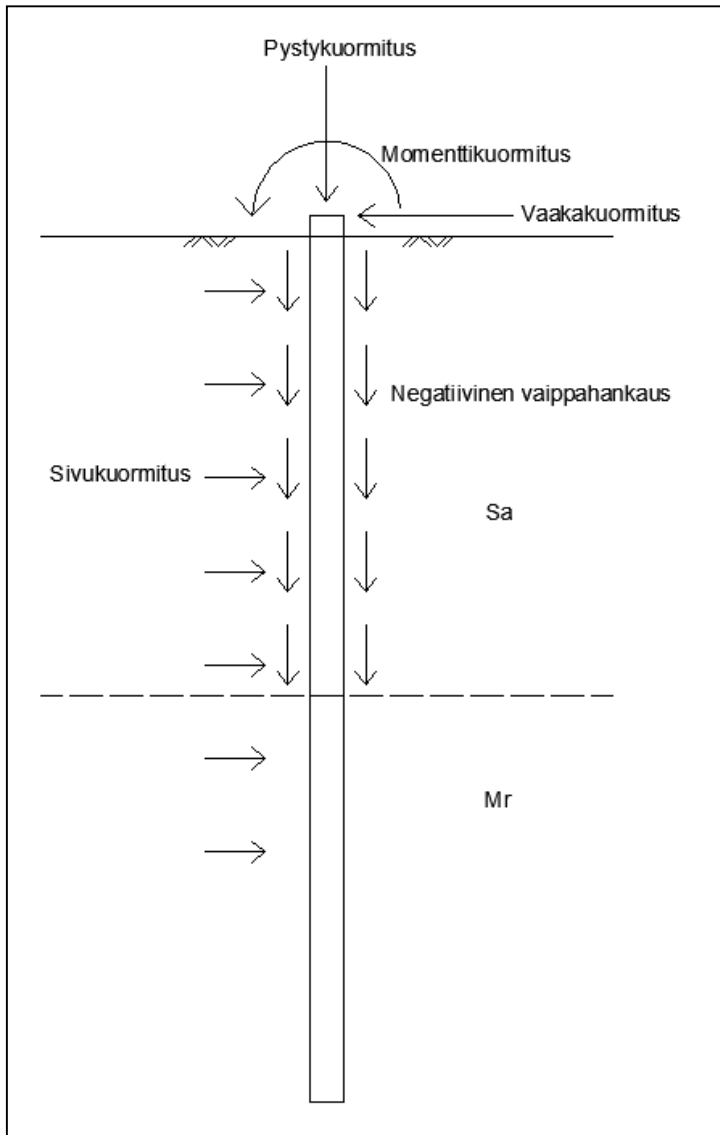
Oheisesta taulukosta nähdään kuinka geoteknisen luokan ja seuraamusluokan perusteella määräytyy alhaisin vaadittava paalutustyöluokka.

Taulukko 3: Paalutustyöluokan valinta (12, s.100)

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

6.5 Paalujen ja paaluryhmien kuormitukset

Oheiseen kuvaan on koottu paaluun mahdollisesti vaikuttavia ulkoisia kuormia. Lisäksi paaluun muodostuu taivutusrasituksia, koska paalua ei ikinä saada asennettua täysin suoraan ja maaperä on harvoin täysin homogeeninen. (10, s.46)



Kuva 14: Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormat (10, s.46)

Pystysuunnassa eli aksiaalisesti kuormitettujen paalujen mitoituksessa tulee osoittaa, että rajatilojen ylittyminen on riittävän epätodennäköistä. Näitä rajatiloja ovat yksittäisen paalun puristus- ja vetokestävyys, koko paaluperustuksen puristus- ja vetokestävyys, paaluperustuksen liian suuren siirtymän tai epätasaisten siirtymien aiheuttama tuetun rakenteen käyttökelpoisuuden menettäminen ja paalujen siirtymän aiheuttamat käyttörajatilat tuetussa rakenteessa. (12, s.58)

Geoteknisissä luokissa 1 ja 2 olevien tukipaalujen painumia ei yleensä tarvitse tarkastella.

Murtokestävyys arvo paalulle on se kuorma, jossa paalun rakenne murtuu tai paalun siirtymä selvästi lisääntyy.

Jotta voidaan olla varmoja paalun kantavuudesta, tulee epäyhtälön

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

jossa

$$F_{c;d} = \text{mitoituskuorma}$$

$$R_{c;d} = \text{puristuskestävyyden mitoitusarvo murtorajatilassa}$$

toteutua kaikilla murtorajatilan kuormilla ja kuormitusyhdistelmillä. Paaluperustuksen mitoituskuormaan ei lisätä paalun omaa painoa eikä kestävydestä vähennetä maan painoa.

Paaluryhmä voi murtua kahdella tapaa. Yksittäinen paalu voi murtua puristuksen vaikutuksesta tai paalujen ja niiden välisen maan muodostaman blokki voi murtua puristuksesta. Blokkia voidaan käsitellä yhtenä suurena paaluna. Kestävyyden mitoitusarvoksi otetaan näiden kahden murtumistavan arvoista pienempi.

Geotekninen puristuskestävyys staattisten koekuormitusten perusteella voidaan laskea kaavalla

$$R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t$$

jossa

$$R_{c;k} = \text{puristuskestävyyden ominaisarvo}$$

$$\gamma_t = \text{kokonaiskestävyyden osavarmuusluku}$$

tai

$$R_{c;d} = R_{b;k} / \gamma_b + R_{s;k} / \gamma_s$$

jossa

$$R_{b;k} = \text{paalun kärjen kestävyden ominaisarvo}$$

γ_b = kärkikestävyyden osavarmuusluku

$R_{s;k}$ = vaipan kestävyuden ominaisarvo

γ_s = vaipan kestävyuden osavarmuusluku

joissa osavarmuuslukujen γ arvo puristukselle määräytyy alla olevan taulukon mukaisesti. (12, s.59-63)

Taulukko 4: Osavarmuuslukujen arvot (12, s.63)

Kestävyys	Merkintä	Arvo
Kärki	γ_b	1,20
Vaippa	γ_s	1,20
Kokonais-/yhdistetty	γ_t	1,20

Vetomurtuman suhteen tarkasteltaessa perustusta ja paalua tulee epäyhtälön

$$F_{t;d} \leq R_{t;d}$$

jossa

$F_{t;d}$ = vetopaaluun kohdistuvan aksiaalisen vetokuorman mitoitusarvo

$R_{t;d}$ = paalun vetokuorman mitoitusarvo

pitää paikkansa kaikissa kuormitustapauksilla ja kuormitusyhdistelmillä murtorajatilassa.

Paalussa voi tapahtua vetomurtuma, kun paalu vedetään ulos maamassasta tai kalliosta tai kun paaluja sisältävä maablokki nousee. Yksittäisillä vedetyillä paaluilla murtokeskävyyden voi määrätä maakartion ulosvetokestävyys. Paaluryhmän vaikutus voi huomattavasti alentaa ryhmän yksittäisen paalun vaippakestävyyttä. Jos paaluun kohdistuvia vetorasituksia ei voida siirtää ympäröivään maahan, tulee paalu ankkuroida siten, että koko paalun vetovoima siirtyy ankkureiden välityksellä kallioon tai maahan. (12, s.79)

Paalun kestävyys poikittaisen mitoituskuormituksen suhteen osoitetaan kaavalla

$$F_{tr;d} \leq R_{tr;d}$$

jossa

$F_{tr;d}$ = paaluun tai paaluperustukseen kohdistuvan poikittaisen kuorman mitoitusarvo

$R_{tr;d}$ = paalun geotekninen kestävyden mitoitusarvo poikittaisille kuormille

jonka tulee päteä kaikilla murtorajatilan kuormitustapauksilla ja – yhdistelmillä.

Murtumismekanismeja lyhyillä paaluilla ovat kiertymä ja siirtymä, pitkillä ja hoikilla paaluilla taivutusmurto yhdistettynä maan myötäämiseen ja siirtymiseen paalun yläpään lähellä sekä nurjahdus. Ryhmävaikutus tulee huomioida. (12, s.88)

Sivukuormitusta paalulle voi aiheutua, jos paalun lähellä tehdään kaivauksia, paalutuskoneen paino aiheuttaa maahan jännityksiä, paalulle tuleva kuorma on epäkeskinen tai paalu on käyrä. (10, s.47)

Negatiivinen vaippahankaus syntyy, kun maa painuu enemmän kuin paalu ja jää niin sanotusti riippumaan paaluun. Tämä maan ja paalun välinen kitka ja/tai adheesio aiheuttaa paaluun lisäkuormaa, joka tulee ottaa huomioon mitoituksessa. Negatiivista vaippahankausta esiintyy pääasiassa vain kokoonpuristuvissa maissa. (4, s.48)

Vaippahankausta laskettaessa tulee käyttää suurinta maapohjan liikkeen aiheuttamaa kuormaa. Maksimiarvoa laskettaessa huomioidaan leikkauskestävyys maan ja paalun vaipan rajapinnalla sekä alaspäin suuntautuva liike. Maa voi painua oman painonsa vaikutuksesta tai paalun ympärillä olevan pintakuorman vaikutuksesta. Leikkauskestävyyden maksimiarvoa kutsutaan paalun tai paaluryhmän vaippakestävyudeksi. (12, s.49)

Vaippakestävyyttä vähentää paalun painuma, ja se on aina otettava huomioon paaluja mitoitettaessa. Paaluryhmä vaikuttaa mitoitukseen. Negatiivisen vaippahankauksen

aiheuttama lisäkuorma lasketaan vain paalun osalle, jossa maa painuu vähintään 5 mm paaluun nähden. Paalun oletetaan pysyvän paikoillaan. (12, s.50)

Paalun asennus pehmeään maahan, kuten saveen, voi aiheuttaa maanpinnan nousua ja myöhemmin painumaa. Kyseisissä tapauksissa, joissa massaa syrjäytetään, tulee aina ottaa negatiivinen vaippahankaus huomioon. Negatiivisen vaippahankauksen suuruuden voidaan olettaa olevan 70...100 % suljetun leikkauslujuuden ominaisarvosta. (12, s.50)

Yksittäisiin paaluihin kohdistuva negatiivinen vaippahankauksen aiheuttama lisäkuorma on yleensä suurin mahdollinen. Paaluryhmissä lisäkuormaan vaikuttaa paalujen keskiöetäisyys ja paalujen lukumäärä. (12, s.50)

6.6 Paalujen geotekninen mitoitus

Geoteknisessä mitoituksessa tulee huomioida seuraavat kuormiin kuuluvat tekijät, joita ovat pysyvät ja hyötykuormat rakenteissa, maan, kallion ja veden paino, jännitykset maapohjassa eli maanpaineet ja pohjavedenpaine, suotovirtausten paine, veden ja jään paineet, työkone-, liikenne- ja muut pintakuormat, rakentamisesta aiheutuvat kuormat mukaan lukien läjitykset ja maan kaivu, liukumisista tai painumista aiheutuvat siirtymät ja muodonmuutokset, räjäytyksistä tai tärinästä aiheutuvat siirtymät ja muodonmuutokset, lämpöliikkeet ja routakuormat, negatiivinen vaippahankaus ja perustusten epätasainen painuma.

Mitoitustilanteissa huomioidaan lyhyt- ja pitkäaikaisia rasiustilanteita ja niiden yhdistelmiä.

Geoteknisen mitoituksen tulee perustua koekuormituksiin tai kokemusperäisiin tai analyyttisiin laskentamenetelmiin, jotka on todettu paikkansapitäviksi koekuormituksilla. (12, s.47)

6.7 Paalutuksen vaikutus jo asennettuihin paaluihin, muihin pohjarakenteisiin ja lähiympäristöön

Paalutuksen aiheuttama melu ja tärinä tulee mitata koepaalutuksen yhteydessä tai arvioida vertailukelpoisten kokemusten perusteella. Jos melu tai tärinä on liian kova, ei paalutusta saa suorittaa. Paalutuksen aikana on seurattava ja mitattava syntyvää melua

ja tärinää, etteivät ne nouse liian suuriksi. Ihmiset voivat kokea haitalliseksi melun ja tärinän, josta ei ole vielä haittaa ympäröiville rakenteille tai rakennuksille. Jos melu ylittää 80 desibeliä, on työmaalla käytettävä kuulosuojaimia ja ulkopuolisten pääsy melualueelle on estettävä. (12, s.253)

Paalutustyön aikana on huolehdittava, ettei ympäristölle aiheudu rakentamisesta haittaa. Haittoja voivat olla melun ja tärinän lisäksi maakerrosten tiivistyminen, siirtyminen tai häiriintyminen, huokosvedenpaineen kasvu ja saastuminen. Vesi- ja pohjavesialueilla työskenneltäessä täytyy pitää huolta, ettei vesistöön valu kemikaaleja eikä koneiden hajotessa öljyä. Rakentaminen tulee hoitaa niin, että öljyvuodon sattuessa se saadaan siivottua nopeasti pois. Koneissa suositellaan käytettäväksi luonnossa nopeasti hajoavaa öljyä. Savukaasupäästöjä voidaan vähentää käyttämällä uudenaikaisia asennuskoneita. (12, s.254)

Jos paalutusalueen läheisyydessä on herkästi vaurioituvia rakenteita, tulee niiden kunto tarkistaa ennen paalutustyön aloittamista. Kuntoa tarkkaillaan myös työn aikana, jotta vahingot pystytään minimoimaan. Samoin menetellään myös epästabiliin luiskien ja herkkien laitteiden kohdalla. Uusien paalujen asentaminen ei saa vaurioittaa jo asennettuja paaluja. (12, s.254)

6.8 Paalutus vaikeissa olosuhteissa

Paalutettaessa kivisellä tai lohkareisella alueella voidaan paalutuksen yhteydessä porata maahan reiät paaluja varten. Olosuhteista tai maan laadusta riippuen voidaan vaikeasti läpäistävä maakerros vaihtaa tai poistaa kokonaan. Kiviselle maalle paalutettaessa voi tulla kysymykseen iskupituuden pienentäminen, jos paalun katkeaminen on mahdollista.

Vinoon kalliopintaan paaluttaessa, paalun kalliojärki täytyy upottaa kallioon tarpeeksi syväälle, ettei paalun kärki lähde liukumaan kalliota pitkin. Vaihtoehtoisesti voidaan paalun pää kiinnittää kallioon kalliovaarnalla tai kallioankkurilla. Porapaalun käyttö estää myös paalun alapäätä liukumasta kalliota pitkin.

Maaperän ollessa erityisen pehmeä, tulee käyttää pientä iskupituutta. Jos paalu painuu oman painonsa vaikutuksesta, ei paalua saa lyödä ollenkaan.

Jos paalulla joutuu läpäisemään tiiviitä tai paksuja koheesiomaakerroksia, voidaan paalutusta helpottaa vesihuuhtelulla. Vesihuuhtelu ei saa vahingoittaa ympärillä olevia paaluja tai häiritä ympäröivää maata. Jos vesihuuhtelu ei ole mahdollista, voidaan käyttää lujempaa betonia. (10, s.78)

6.9 Paalujen rakenteellinen mitoitus

Rakenteellisen mitoituksen yleisperiaatteet

Paalujen rakenne tulee suunnitella siten, että paalun kantavuus säilyy koko sen käyttöajan. Paalun tulee kestää asennusaikaiset olosuhteet, joita ovat työn aikana ja ennen sitä syntyvät käsittelystä aiheutuvat rasitukset, lyöntien aiheuttamat rasitukset, pohjasuhteiden aiheuttamat rasitukset, iskun epäkeskisyys asennuksen yhteydessä. Myös jatkosten laatu vaikuttaa paalun kestävyYTEEN. Käytön aikaisia kuormia ovat rakennuksen aiheuttama kuorma ja maan liikkeistä johtuvat rasitukset. Paalun tulee kestää myös maaperän syövyttävä ominaisuus ja lämpötilan vaihtelut. (12, s.169)

Paalun sallitut lyöntijännitykset

Paalun tulee kestää paalutustyöluokkansa mukaiset vaatimukset. Paalutustyöluokassa 3 paalun lyönninkestävyyden määräämästä ylärajasta voidaan hyödyntää enintään 100 %, paalutustyöluokassa 2 luku on 80 % ja luokassa 1 luku on 60 %. Lyönninkestävyyden ylärajat ja vastaavat geoteknisen kestävyYDEN ylärajat on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 5: Geoteknisen kestävyuden ominaisarvon maksimiarvo lyömällä asennettavilla paaluilla ja suurin keskeinen lyöntivoima. (12, s.101)

Paalun materiaali	Suurin sallittu puristusrasituksen aikaansaava keskeinen lyöntivoima asennettaessa, $F_{c,lyönti}$	Suurin kestävyuden ominaisarvo $R_{k,geo,max}$
Teräspaalu	$\leq 0,9 * f_{yk} * A_s$	PTL3: $R_{k,geo,max} \leq F_{c,lyönti}$
		PTL2: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$
		PTL1: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$
Teräsbetonipaalu	$\leq 0,8 * f_{ck} * A_c^a$	PTL3: $R_{k,geo,max} \leq F_{c,lyönti}$
		PTL2: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$
		PTL1: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$
Puupaalu	$\leq 0,8 * f_{c,0,k} * A_{min}$	PTL3: Ei käytetä
		PTL2: $R_{k,geo,max} \leq 0,8 * F_{c,lyönti}$
		PTL1: $R_{k,geo,max} \leq 0,6 * F_{c,lyönti}$

6.10 Loppulyönnit

Kun tukipaalu osuu kiinteään pohjamuodostumaan eikä painu lyödessä enää niin paljon kuin lyönnin alussa, tulee paalulle tehdä loppulyönnit. Niihin kuuluu 3-5 kymmenen lyönnin sarjaa. Mitä hitaammin paalun painuminen hidastuu, sitä useampi sarja loppulyöntejä tehdään. Loppulyöntien järkäleen putoamiskorkeus voidaan tarkistaa asianmukaisista taulukoista. Kitkapaalujen loppulyönnit suoritetaan, kun paalu on saavuttanut suunnitellun syvyyden. Betonipaaluja ei tule lyödä yli 5000 kertaa, ettei paalu väsy. (4, s.85)

6.11 Paalujen sijoitus

6.11.1 Katkaisutaso

Paalut katkaistaan siten, että ne ulottuvat vähintään 50 mm paaluanturaan. Mikäli paalun ja paaluanturan liitoksesta halutaan jäykkä, katkaisutasona on paalun hyötöpituus johon lisätään terästen tartuntapituus. Katkaisun jälkeen teräkset paljastetaan paalun hyötöpituuteen asti. Teräksisillä pienpaaluilla katkaisutasossa huomioidaan mahdollinen paaluhatun korkeus. Teräsputkipaalujen päät tulee katkaisun jälkeen peittää, ettei paalun sisälle putoa mitään ylimääräistä. (12, s.170)

Paalun ja ylärakenteen väliset liitokset suunnitellaan paalun rakenteen tai geoteknisen kestävyuden mukaan, ellei toisin ole määritelty. Pienempi edellä mainituista kestävyyksistä on määräävä. Paalun yläpään ja betonirakenteen välinen liitos tulee suunnitella

tella siten, että paalu pystyy ottamaan vastaan kaikki betonirakenteelta tulevat voimat. (12, s.171)

6.11.2 Keskiöetäisyydet

Paalujen väliset etäisyydet valitaan niin, etteivät ne vaikuta viereisten paalujen kantavuuteen vähentävästi eivätkä ne asennuksen aikana vahingoita viereisiä paaluja. Paalujen väliset etäisyydet tulee kirjata suunnitelma-asiakirjoihin. Ohjeellisia vähimmäisarvoja pien- ja teräsbetonipaalujen välisille etäisyyksille on alla olevassa taulukossa. (12, s.171)

Taulukko 6: Paalujen etäisyyksien vähimmäisarvot eurokoodissa (12, s.171)

Paalun pituus [m]	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7d	3d	4d	4,5d
10-25	Väliarvot interpoloidaan		5d	5,6d
25	3,5d	4d	6d	6,8d

Etäisyydet on suunniteltava siten, etteivät tuki- ja kitkapaalujen etäisyydet ole alle 0,8 metriä, koheesiopaalujen alle 1,0 metriä ja maakerrokseen tukeutuvien vetopaalujen alle 1,5 metriä.

Suurpaaluilla vaippapintojen lyhin etäisyys lasketaan kaavalla

$$e_i = 300 + 0,7d.$$

Paaluryhmiä suunniteltaessa alaspäin hajaantuviksi, voidaan paalujen yläpäät sijoittaa lähemmäksi toisiaan. Risteävien tukipaalujen minimietäisyydet riippuvat maalajista sekä risteilykohdan syvyydestä. Hienossa maassa paalujen etäisyydet voivat olla paalun halkaisijan luokkaa. On kuitenkin pidettävä huoli, ettei paalu osu viereiseen paaluun. Karkearakeisessa maassa etäisyyksien tulee olla suurempia varsinkin maata syrjäyttävien paalujen asennuksessa, jolloin paalun asennus voi vaikuttaa viereisiin paaluihin. Kun risteämiskohta sijoitetaan mahdollisimman lähelle maanpintaa, paalujen etäisyydet voidaan pitää pieninä. Paalujen etäisyyksiä suunniteltaessa on muistettava ottaa sallitut sijaintipoikkeamat huomioon. (12, s.172)

6.11.3 Paaluanturan reunan etäisyys paaluista

Paaluanturan reunan etäisyyden paaluista tulisi olla sellainen, että antura kestää paaluvoimien aiheuttamat jännitykset eikä anturan reunan lohkeamisvaaraa ole. Paaluanturan reunan etäisyys lähimmästä paalusta on normaalisti vähintään puolet paalun halkaisijasta, lisättynä sallittu sijaintipoikkeama. Jos paaluantura joudutaan tekemään vaikeissa olosuhteissa, on rakentamisen kannalta helpompaa käyttää suurempaa etäisyyttä. (12, s.172)

6.11.4 Paalujen etäisyydet muista rakenteista

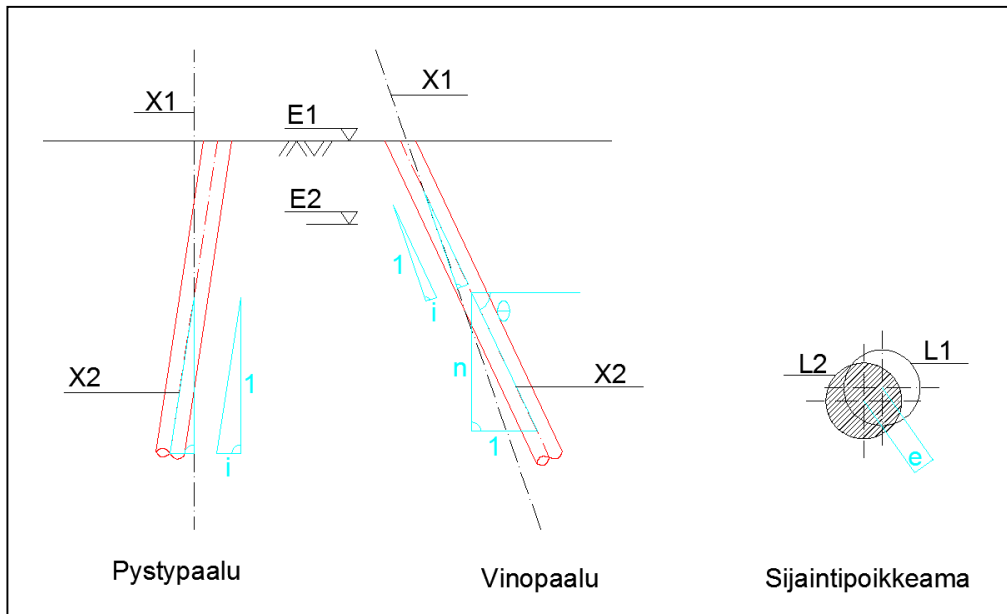
Paalun etäisyys muista rakenteista määräytyy yleensä kohteen mukaan. Etäisyyteen vaikuttaa paalun muoto, asentamisesta syntyvä värinä, millainen rakenne vieressä on ja millaiset pohjaolosuhteet alueella on. Jos paalu asennetaan aikaisemmin tehtyjen rakenteiden alapuolelle, tulee ottaa huomioon painumat ja siirtymät ja se, kuinka ne vaikuttavat jo olemassa oleviin rakenteisiin. (12, s.173)

6.11.5 Paalujen kaltevuudet

Vinopaaluilla voidaan lisätä rakennuksen vakavuutta halutulla tavalla. Vinopaaluja suunniteltaessa tulee ottaa huomioon maaperän paalulle aiheuttamat rasiukset. Esimerkiksi perustuksen viereen tulevan täytön paino aiheuttaa muutoksia maaperässä ja täten se aiheuttaa paalulle taivutusta. Vinopaaluja ei suositellakaan suunnattavaksi suurien täyttöjen alle juuri tästä syystä. (12, s.173)

6.12 Sallitut sijaintipoikkeamat

Vaikka paalut pyritään asentamaan tarkalleen niille suunniteltuihin paikkoihin, voi maaperästä tai asennuksesta johtuen paalu kuitenkin vääntyä tai kallistua väärään asentoon. Nämä poikkeamat tulee ottaa huomioon paaluperustusta suunniteltaessa. Poikkeamien suuruus vaihtelee eri paalutyypeillä: keskinäisesti porattavalla paalulla poikkeamia on vähän ja kiviseen maahan asennettavalla lyöntipaalulla paljon. Mittaustarkkuus sijainnin poikkeamille on 0,01 mm, ellei suunnitelmissa ole toisin mainittu. Seuraavassa kuvassa on ilmaistu geometristen rakentamistoleranssien määritelmät. (12, s.173)



Kuva 15: Geometrinen asennustoleranssin määritelmät (12, s.174)

Kuvassa käytetyt lyhenteet ovat

E1: Työskentelytaso

E2: Katkaisutaso

X1: Suunniteltu keskilinja

X2: Toteutunut keskilinja

i: Poikkeamakulman (paalun suunnitellun ja toteutuneen keskilinjan välisen kulman) tangentti

n: Suunnitellun keskilinjan ja vaakasuoran välinen vinous

θ : Suunnitellun keskilinjan ja vaakasuoran välinen kulma

L1: Suunniteltu sijainti

L2: Toteutunut sijainti

e: Poikkeama vaakatasossa mitattuna työskentelytasolta.

7 PAALUTUSTYÖN LAADUNVALVONTA JA MITTAUKSET

Työmaalla tulee olla saatavilla valvonta-aikataulu, jossa ilmoitetaan vähintään kunkin tarkastamisen toistumistiheys sekä kunkin tarkastuksen sisältö. Jos työmaavalvonnassa tai asiakirjoissa paljastuu epävarmuuksia paalujen laadun suhteen, tulee tutkia tarkemmin paalujen laatu sekä pohtia, tarvitaanko parannustoimenpiteitä. Paalulle voidaan tehdä staattinen tai dynaaminen koekuormitus, tilalle voidaan asentaa uusi paalu tai paalulle voidaan suorittaa jälkilyönti, jonka yhteydessä tehdään pohjatutkimusta. Jos näillä ei selviä paalun vauriot, voidaan myös käyttää ultraäänimittauksia tai porata paalusta näytteitä. (12, s.233)

Paalutustyössä saa käyttää vain paaluja, jotka ovat silmämääräisesti ehjiä ja suoria. Valvoja merkitsee hylätyt paalut ja ne poistetaan työmaalta. (12, s.134)

7.1 Paalutustyön dokumentointi työmaalla

Paalutustyönjohtaja valvoo paalutusta ja merkitsee muistiin tehtäviinsä kuuluvat toimenpiteet. Hän myös vastaa paalutuspöytäkirjan pitämisestä. Laadunvarmistus hoidetaan vertaamalla suorituspöytäkirjoja ja raportteja suunnitelma-asiakirjoihin. Paalutustyönjohtajan tehtävänä on huolehtia muun muassa henkilökunnan ammattitaidosta, työkoneiden soveltuvuudesta työhön, suunnitelmien paikkansapitävyydestä, materiaalien laadusta ja varastoinnista ja tietenkin paalutustyön sujuvuudesta. Jokaisesta paalusta pidetään paalutuspöytäkirjaa, jossa mainitaan paalun numero, pituus, koko ja materiaalit, asennuslaitteisto ja aika, jolloin paalu asennetaan, sekä sijaintipoikkeamat asennuksen jälkeen. Paalutuspöytäkirjoja säilytetään vähintään viisi vuotta. Rakennesuunnittelijan hyväksymät paalutuspöytäkirjat ja paalutuspiirustukset (katso liite 4) lähetetään myös rakennusvalvontaan. Liitteenä (liite 2) on osa paalutuspöytäkirjasta. (12, s.234)

7.2 Suunnittelijan hyväksyntä paalutukselle

Paalutustyön alkaessa suunnitelmiin kirjataan sallitut maksimisiirtymät. Jos siirtymien maksimiarvot ylittyvät työn aikana tai sen loputtua, täytyy antaa suunnitella uudelleen ja mahdollisesti lyödä epäonnistuneen paalun viereen uusi lisäpaalu, jotta rakenteen kantavuus ei kärsi.

Rakennesuunnittelija hyväksyy tai hylkää paalutuksen edellä mainittujen dokumenttien perusteella. Tarvittaessa lyödään lisäpaaluja tai korvaavia paaluja tai paalun päälle tulevien rakenteiden dimensioita ja raudoitusta muutetaan (katso liite 5). (12)

7.3 Paalujen koekuormitukset

Koekuormitusta tulee käyttää, kun ollaan asentamassa paalua olosuhteisiin, joista ei ole aikaisempaa luotettavaa näyttöä, paalutyypä on uusi ja erilainen tai paaluihin tulee kohdistumaan kuormitus, josta kokemus ja teoria eivät anna riittävää varmuutta. Koekuormituksella saadaan selville paalun sopivuus kyseisiin pohjaolosuhteisiin. Koekuormitus tulisi tehdä paikassa, jossa on epäedullisimmat pohjaolosuhteet. Jos koekuormitus tehdään yhdellä tai useammalla paalulla, toinen asennetaan vaadittavalle asennuspaikalle ja toinen epäedulliseen paikkaan. Koekuormituksen ja varsinaisen paaluttamisen välillä tulee olla riittävä aika, jolloin nähdään varmasti, kuinka paalu soveltuu kyseisiin olosuhteisiin. Paalutustyöluokkaan 3 kuuluvien lyötävien paalujen geotekninen kestävyys testataan aina staattisella tai dynaamisella koekuormituksella. Varmistettuun ja ehjään kallioon lyötyjä paaluja ei yleensä tarvitse koekuormittaa. (12, s.54)

Staattinen koekuormitus

Staattisen koekuormituksen tilalla voidaan Suomessa käyttää myös dynaamista koekuormitusta. Paalua kuormitetaan, kuten sitä kuormitettaisiin asennustilanteessa. Näiden lyöntien, kestojen ja sykkeiden määrän tulee olla sellainen, että tuloksista pystytään määrittelemään paalun muodonmuutoksia, virumaa ja palautumista. Voimien, jännitysten ja venymien määrittelylaitteet pitää muistaa kalibroida ennen koetta. Ennen koekuormitusta täytyy tutkia pohjaolosuhteet riittävän yksityiskohtaisesti. Kaikkien maakerrosten, jotka voivat vaikuttaa paalun muodonmuutoksiin, täytyy olla tutkittuna ennen koekuormituksen aloittamista. Koepaalujen asennus täytyy dokumentoida. (12, s.55)

Dynaaminen koekuormitus

Dynaamista koekuormitusta voidaan käyttää suoraan tukipaalujen puristuskestävyyden arvioimisessa, mikäli pohjatutkimukset on tehty tarpeeksi hyvin. Tapaa voidaan käyttää myös paalujen eheyden osoittamiseen ja geotekniseltä kestävyydeltään heik-

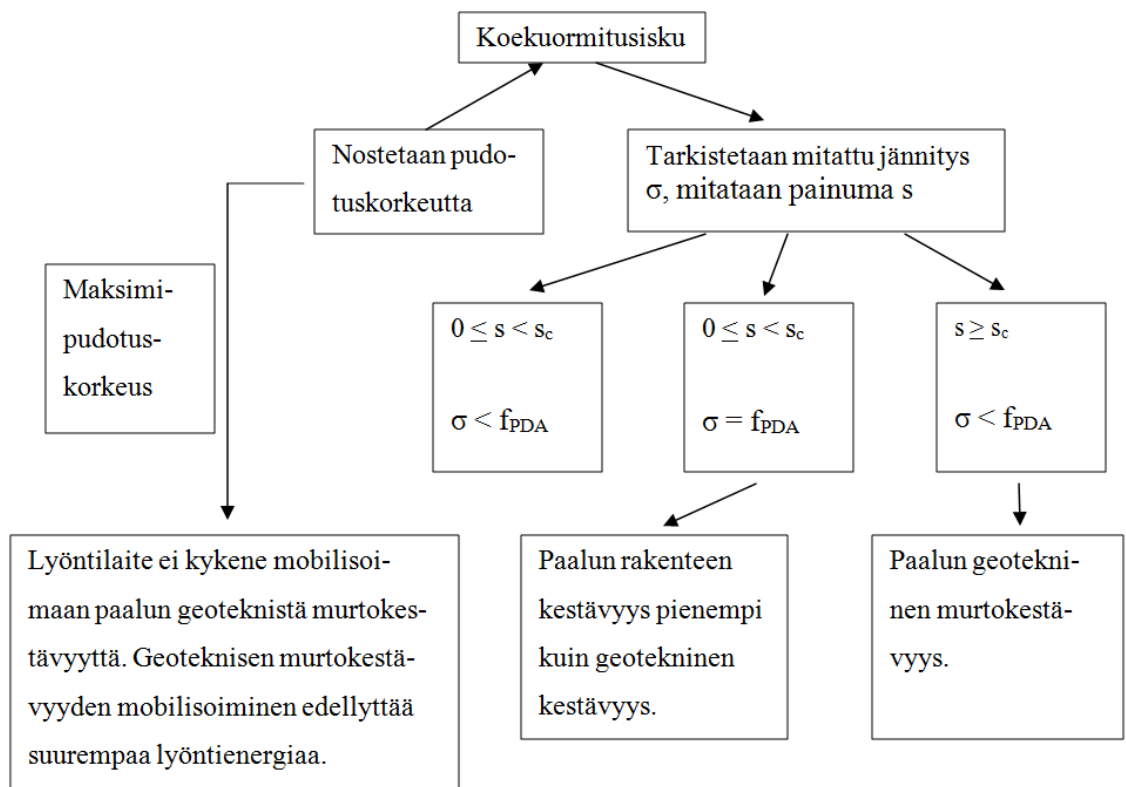
kojen paalujen havaitsemiseen. Dynaamista koekuormitusta käytetään aina, kun tarkistetaan paalutustyöluokan 3 lyöntipaalujen geotekninen kestävyys ja loppulyöntiohjeen varmistus. (12, s.56)

Seuraavan sivun kuvaajasta nähdään dynaamisen koekuormituksen kulku, jossa

s_c on painuma, jolla paalun murtokestävyys mobilisoi PDA-mittauksessa, tavallisesti $s \geq d/120$

f_{PDA} on paalumateriaalin maksimijännitys PDA-mittauksessa. SFS-EN12699: teräkselle $1,08 f_{yk}$, betonille $0,88 f_{yk}$ ja puulle $0,88 f_{c,0,k}$. (12, s.74)

Kaavio 2: Dynaamisen koekuormituksen kulku (12, s.74)



8 LOPPUSANAT

Opinnäytetyössä keskityttiin paalujen eurokoodipohjaisten suunnittelukäytäntöjen läpikäymiseen ja samalla ohjeistusta pyrittiin saattamaan ymmärrettävään muotoon. Työhön poimittiin uudesta Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL:n julkaisemasta paalutusoppaasta tärkeimpiä huomioon otettavia asioita. Työssä ei tehty vertailua eurokoodin ja rakennusmääräyskokoelman välillä vaikka se yhtenä työn tavoitteena alkuvaiheessa olikin.

Eurokoodi tuo mukanaan muutoksia paalutusluokkiin sekä vaatii tuotteiden CE-merkinnän pakolliseksi. Uusi paalutustyöluokka määräytyy geoteknisestä luokasta ja seuraamusluokasta. Eurokoodi painottaa entistä enemmän valmistajan ja asentajan vastuuta työn onnistumiseksi.

Eurokoodi ei muuta paalujen suunnittelua kokonaisuutena eli paalujen rakenteellinen ja geotekninen kestävyys on edelleen tarkasteltava samoin kuin paalujen työnaikainen kestävyys sekä paalujen siirtojen ja pystyyn noston että lyöntijännitysten suhteen. Paalun lopullinen hyväksyntä tehdään työn aikaisten dokumenttien ja muiden laadunvalvontatoimenpiteiden perusteella. On melko varmaa että eurokoodipohjaisen suunnitteluhjeistuksen käyttöönotto lisää aluksi paalutuskohteen suunnittelijan työmäärää. Kun uudet suunnittelukäytännöt vakiintuvat sekä uutta ohjeistusta ja esimerkkilaskelmia julkaistaan, poistuu normin muutoksesta tuleva epävarmuus. Tärkeää on että jatkossa, mahdollisimman pian, suunnittelua tehdään pelkästään uudella eurokoodin määrittelemällä suunnittelujärjestelmällä.

LÄHTEET

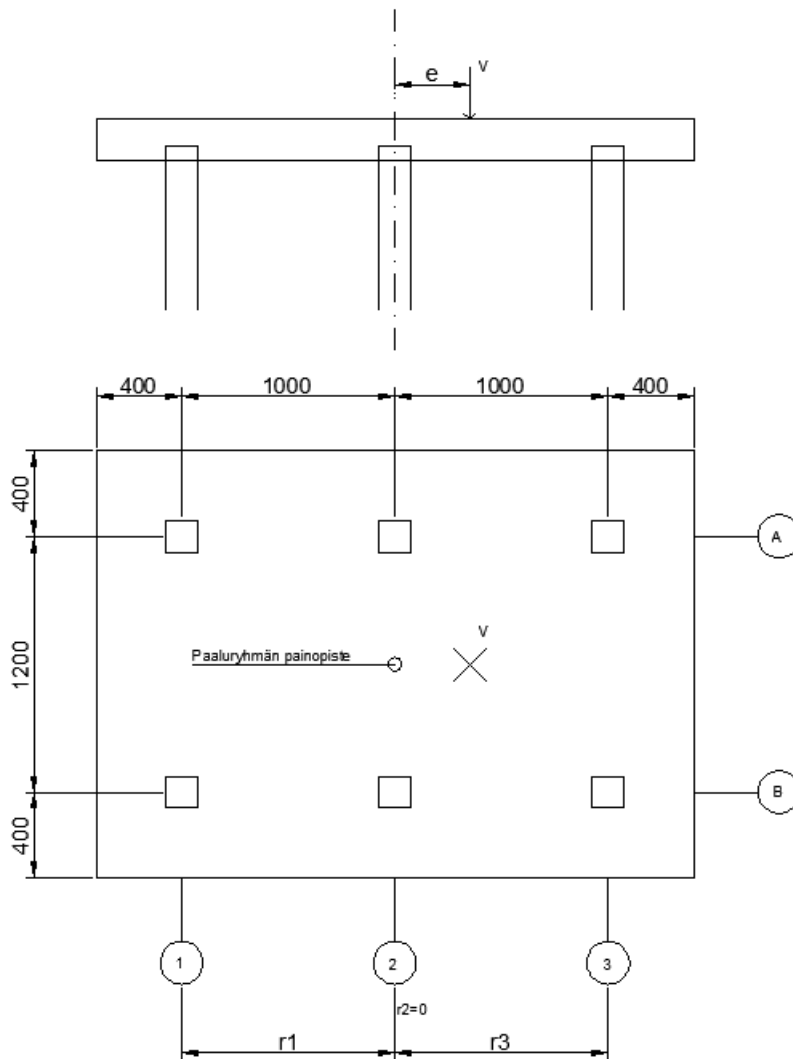
1. Wise Group Finland Oy. 2011. Wise Group esittely. Saatavissa: www.wisegroup.fi [Viitattu 11.2.2012]
2. Pesonen, H. 2007. Venetsia: Kaupunki, joka on ikänsä kamppaillut kuolemaa vastaan. Tiede-lehti 8/2007. Saatavissa: http://www.tiede.fi/artikkeli/760/venetsia_kaupunki_joka_on_ikansa_kamppaillut_kuole [Viitattu 11.2.2012]
3. Rissanen, H. 2009. Ongelmat ovat opettaneet – Perustusten painuminen hallintaan. Kiinteistöposti Professional 4/2009. Saatavissa: <http://www.kiinteistoklubi.com/rakentaminen/96-peruskorjaus/549-ongelmat-ovat-opettaneet-perustusten-painuminen-hallintaan> [Viitattu 11.2.2012]
4. Rantamäki, M. & Tamminne, M. 1979. Pohjarakennus. 9. muuttamaton painos. Hämeenlinna: Karisto Oy.
5. Ruukki. Lyötävät RR-pienpaalut. 2011. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Infrastruktuuriratkaisut/Teraspaalut/Lyotavat-RR-pienpaalut/> [Viitattu: 24.4.2012]
6. Ruukki, RD-paaluseinät. 2011. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Infrastruktuuriratkaisut/Tukiseinarakenteet/RD-paaluseinat/> [Viitattu: 24.4.2012]
7. Ympäristöministeriö. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Saatavissa: www.ymparisto.fi/rakentamismaaraykset [Viitattu: 11.2.2012]
8. Ympäristöministeriö. 2011. Eurokoodit. Saatavissa: www.ymparisto.fi/eurokoodit [Viitattu: 11.2.2012]
9. Ympäristöministeriön viestintäyksikkö. 2006. Eurokoodit käyttöön vuonna 2007. Faktaa rakentamisesta. Ympäristöministeriön tietoisuus 1/2006. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=54079&lan=fi> [Viitattu 11.2.2012]

10. RIL 233-2005 Lyöntipaalausohje LPO-2005. Teräsbetoni- ja puupaalut. 2005. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
11. Tiehallinto. 1999. Saatavissa:
<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/terasputkipaalut1999.pdf> [viitattu: 12.4.2012]
12. RIL 254-2011 Paalausohje 2011 PO-2011. 2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
13. Tukes. 2012. Rakennustuotteiden CE-merkintä –esite. 8/2007. Saatavissa:
<http://www.tukes.fi/Tiedostot/rakennustuotteet/CE-esite.pdf> [viitattu: 1.4.2012]
14. Rudus Oy. Tuotelehti 250x250IB. 2010. Saatavissa:
<http://www.rudus.fi/tuotteet/paalut> [Viitattu: 21.4.2012]
15. Emeca Oy. 2010. Emeca-maakärki. Saatavissa:
<http://www.emeca.fi/images/maakarki.jpg> [viitattu: 21.2.2012]
16. Emeca Oy. 2010. Emeca-kalliokärki. Saatavissa:
<http://www.emeca.fi/images/kalliokarki-300.jpg> [viitattu: 21.2.2012]
17. Inspecta Group. 2012. Non Destructive Testing. Saatavissa:
<http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Testaus/Rikkomaton-aineenkoetus-NDT-Non-Destructive-Testing/?ad=adwords> [viitattu: 21.2.2012]
18. Rakentaja.fi. 2012. Teräspaalun rakenne. Saatavissa:
http://www.rakentaja.fi/artikkelit/img/20121/29319_p_ver-2.jpg [viitattu: 17.4.2012]
19. Valtion ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=80783> [viitattu: 5.4.2012]
20. Ruukki. 2010. Suuriläpimittaiset teräspuutkipaalut pohjarakentamisessa. Saatavissa:
<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Infra/Ruukki->

Suuril% C3% A4pimitaiset-ter% C3% A4sputkipaalut-pohjarakentamisessa.pdf [viitattu: 10.5.2012]

Liite 1

Paalukuorman laskeminen



$$V = Q = 3,0 \text{ MN}$$

$$e = 0,30 \text{ m}$$

$$n = 6 \text{ kpl}$$

$$P_i = \frac{Q}{n} + \frac{Qer_i}{\sum_{i=1}^n a_i r_i^2}$$

$$\sum a_i r_i^2 = 2 \cdot (-1,0 \text{ m})^2 + 2 \cdot (0 \text{ m})^2 + 2 \cdot (1 \text{ m})^2 = 4 \text{ m}^2$$

Paalut 1A ja 1B:

$$P_1 = (3,0 \text{ MN} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot (-1 \text{ m}))/4 \text{ m}^2 + 3 \text{ MN}/6 = 275 \text{ kN}$$

Paalut 2A ja 2B:

$$P_2 = (3,0 \text{ MN} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0 \text{ m})/4 \text{ m}^2 + 3 \text{ MN}/6 = 500 \text{ kN}$$

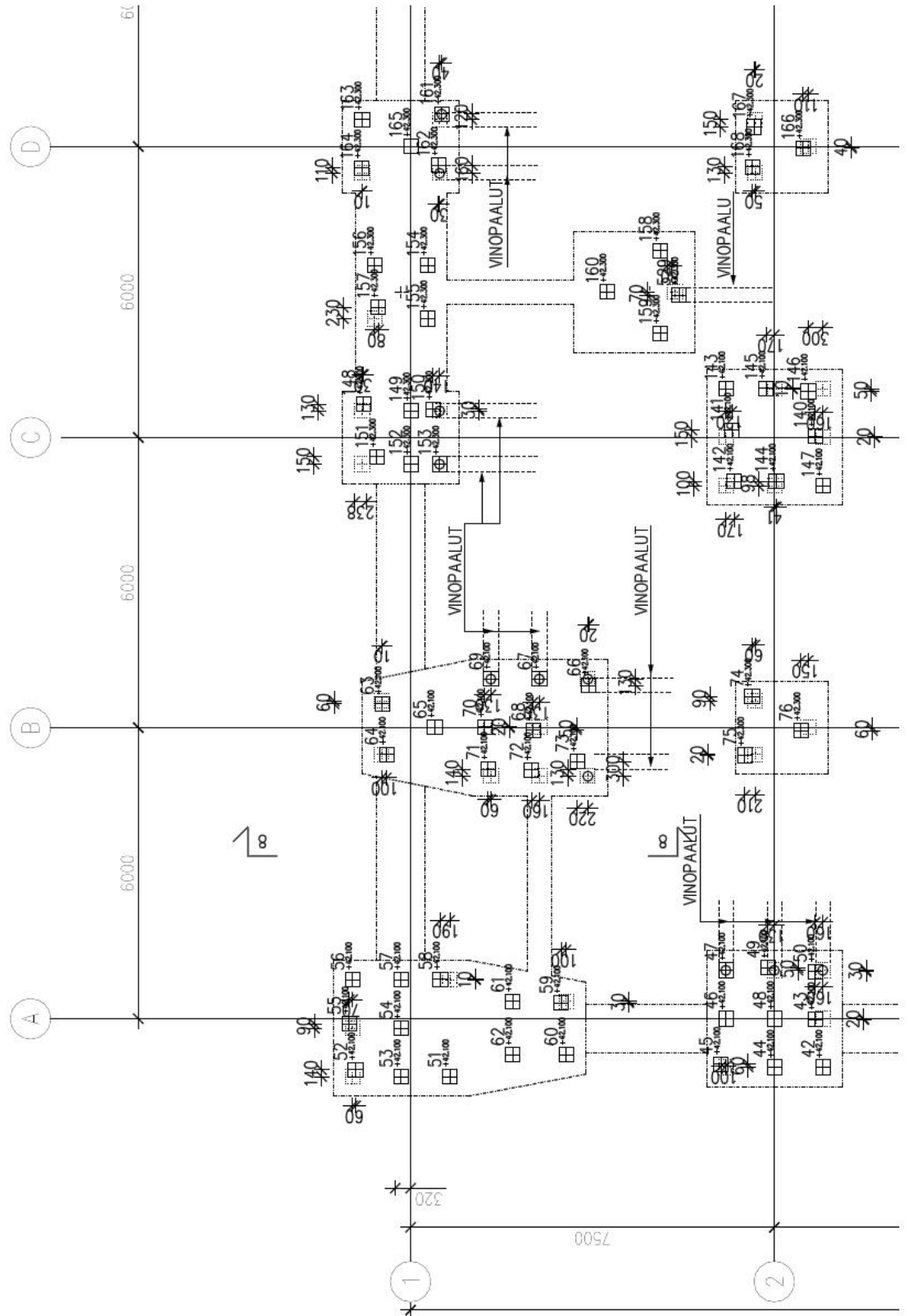
Paalut 3A ja 3B:

$$P_3 = (3,0 \text{ MN} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 1 \text{ m})/4 \text{ m}^2 + 3 \text{ MN}/6 = 725 \text{ kN}$$

$$\text{Tarkistus: } 2 \cdot P_1 + 2 \cdot P_2 + 2 \cdot P_3 = 3,0 \text{ MN} \rightarrow \text{OK!}$$

Liite 4

Paalukartta, jossa paalukoordinaatit ovat olleet erillisenä tietona



Liite 5

Perustuspiirustus: erikoispaaluanturoiden rauditusmallit

