



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Dynaamisten rasitusten kuormittaman koneperustuksen esisuunnitteluvaiheen mitoitus

Eeva Hakala

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2016
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

HAKALA, EEVA:

Dynaamisten rasiusten kuormittaman koneperustuksen esisuunnitteluvaiheen mitoitus

Opinnäytetyö 65 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Huhtikuu 2016

Opinnäytetyön aihe syntyi yrityksen tarpeesta arvioida koneiden perustusten tilantarvetta jo projektin esisuunnitteluvaiheessa. Työssä perehdyttiin kaksitasoisen koneperustuksen stabiliteettitarkasteluun. Tarkoituksena oli tuottaa tarjousvaiheeseen sopiva laskentataulukko, jolla voitaisiin arvioida perustuksen päämitat yksinkertaisesti ja ilman mitoitushelmia.

Teoriaosuus käsittelee koneperustusten suunnittelun periaatteita ja niille tyypillisiä rasituksia, kuten värähtelyä. Laskentaosuudessa tarkasteltiin perustusten staattista tasapainoa dynaamisten voimien aiheuttamien momenttien kautta eri kuormitusyhdistelmissä. Esi-merkkitapauksena ollut kahteen tasoon rakennettu koneiden perustus on kokonaisuudessaan monimutkainen. Se kannattelee useita laitteita, jotka kaikki aiheuttavat suuria staattisia ja dynaamisia rasituksia perustukseen ja maaperään. Työssä on lisäksi esitelty esimerkkejä runkorakenteesta sekä koneiden liitoksista perustukseen.

Koneperustuksia varten on hyvin haastavaa laatia vain yhdenlaista laskentapohjaa, koska jokainen tapaus on yksilöllinen. Tähän opinnäytetyöhön laadittu rasiukset erotteleva ja summaava Excel-taulukko toimii riittävänä pohjana tehtäessä samankaltaisiin kokonaisuksiin esisuunnittelua, koska stabiliteettitarkastelua voidaan suorittaa ilman tarkkoja rakennesuunnitelmia tai maakohtaisia tietoja.

Lopputuloksena todettiin alustavien mittojen olleen stabiliteetin kannalta riittäviä ja Excel-taulukon toimivan. Koska suunniteltua vertailua FEM-analyysiin ei voitu tehdä, tehtiin laskentataulukolla samat stabiliteettitarkastelut myös toisen samankaltaisen koneen perustuksiin. Sekin päätettiin suunnitella samoilla alustavilla mitoilla kuin alkuperäinen kohde. Tarkasteltiin myös tapausta, jossa kahden moottoriyksikön korvaa yksi tehokkaampi moottori. Jatkossa taulukkoa muokataan myös muiden yleisimpien sekoituskoneiden perustusten tarkastelua varten sopivaksi ja tutkitaan koneiden sijoittelun vaikutusta perustusten kokoon. Myös teknisten maaparametrien lisääminen taulukkoon koettiin jatkossa aiheelliseksi.

Asiasanat: dynaaminen rasitus, koneperustus, suunnittelu, stabiliteetti, värähtely

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Civil Engineering
Option of Structural Engineering

HAKALA, EEVA:

Preliminary design of machine foundations with dynamic loads

Bachelor's thesis 65 pages, appendices 8 pages

April 2016

The subject of this thesis originated from the company's need to assess the space requirement of machine foundations in the pre-design phase of a project. The stability of a two-level machinery platform was examined. The aim was to produce a calculation worksheet for estimating the main dimensions of a block foundation that is suitable for preliminary planning.

The theoretical section of this thesis explores the principals of machine foundation design and their typical loads such as vibration. The calculation chapter examines the static balance of the structure by calculating the moments caused by dynamic stress in different load combinations. The studied example case is a complex structure supporting multiple devices all of which cause high static and dynamic loads on the foundation and ground. The thesis has examples of platform frame structure as well the machine connections to the foundation.

It is challenging to produce only one type of worksheet suitable for different compositions because every case is unique. The produced Excel spreadsheet sorts and adds up the loads. It works as a sufficient basis for similar examinations in the pre-design phase because it does not require precise construction drawings or country-specific information.

The result of the calculations confirmed that the stability is sufficient with the preliminary dimensions and the spreadsheet is functioning as intended. Because it was not possible to do the planned comparison with a FEM-analysis, another stability examination was done with a similar machinery platform complex. It was also decided to design with the same dimensions. In case in which a single more powerful motor unit replaces the double motor unit that was in the original platform was also examined. In the future the worksheet will be modified for the examination of other most commonly used machines use with type of foundations and exploring the effect of the placement of the devices. Also adding the technical parameters of the ground to the worksheet was found to be justified.

Key words: dynamic load, machine foundation, design, stability, vibration

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	KONEPERUSTUKSEN SUUNNITTELU	7
2.1	Suunnittelun lähtökohdat	7
2.2	Perustustyyppiä	9
2.3	Koneperustuksen tyypilliset rasitukset	12
2.3.1	Staattinen rasitus	12
2.3.2	Dynaaminen rasitus.....	12
2.4	Maaperä dynaamisen kuormituksen alaisena.....	13
2.5	Värähtely.....	16
2.6	Maanjäristys.....	19
2.7	Palomitoitus	21
3	LÄHTÖTIEDOT	22
3.1	Esimerkkikohteen lähtötiedot	22
3.1.1	Tuotantolaitos ja perustusta ympäröivät rakenteet.....	22
3.1.2	Maapohja.....	25
3.1.3	Koneisto ja perustuksen alustava malli	26
3.1.4	Koneiden sijoitus jalustalle	30
3.2	Mitoitusperiaatteet ja toteutustapa	32
4	KUORMITUKSET	33
4.1	Kuormat	33
4.2	Kuormitusyhdistelmät.....	35
5	LASKENTA	40
5.1	Rakenne	40
5.2	Rakennuspohjan kestävyys (GEO)	42
5.2.1	Alkutarkistus	42
5.2.2	Anturan alapinnassa vallitsevan pohjapaineen laskenta	42
5.2.3	Epäkeskisyys.....	45
5.3	Stabiliteetti (EQU).....	48
5.3.1	Kaatuminen	48
5.3.2	Liukuminen	51
6	TULOKSET	52
7	POHDINTA.....	54
	LÄHTEET.....	56
	LIITTEET	58
	Liite 1. Laskentataulukot kuormitusyhdistelmälle 4.	58
	Liite 2. Laskentataulukot ominaisarvoilla kuormitusyhdistelmille 1 – 3.	63

LYHENTEET JA TERMIT

Amplitudi	Värähtelyn suure, joka ilmoittaa värähtelyn suurimman poikkeaman tasapainotilasta.
Dynaaminen kuorma	Ajan suhteen vaihteleva kuorma, joka voi aiheuttaa huomattavia dynaamisia vaikutuksia rakenteeseen.
Dynaamisuuskerroin	Kerroin, joka ottaa huomioon dynaamiset vaikutukset värähtelyistä, hidastuksista, iskuista jne.
FEM	Lujuuslaskentaan kehitetty numeerinen elementtimenetelmä (finite element method), johon moni laskentaohjelmisto perustuu.
Hydraulinen murtuminen	Huokosvedenpaineen aiheuttama maaperän murtumistapa.
Iskusitkeys	Kokeellisesti mitattava haurasmurtumisen vastustuskyky metalleilla ja metalliseoksilla.
Liukumistarkastelu	Valitaan kuormitustapaus, jossa stabiloiva normaalivoima on pienin.
Kaatumistarkastelu	Valitaan kuormitustapaus, jossa kaatavan momentin ja stabiloivan normaalivoiman suhde eli epäkeskisyys on suurin.
KRT	Käyttörajatila on tila, jonka ylittyessä rakenteen käyttökelpoisuusvaatimukset eivät täyty (serviceability limit state).
Kuormitusyhdistelmä	Mitoitusarvojen joukko, jota käytetään rakenteen luotettavuuden osoittamiseen eri kuormien vaikuttaessa samanaikaisesti.
MRT	Murtorajatila on rakenteen sortumiseen tai kantokyvyn menetykseen liittyvä tila (ultimate limit state).
Ominaistaajuus	Vapaasti värähtelevän systeemin taajuus.
Pohjapainetarkastelu	Valitaan kuormitustapaus, jossa pohjapaine perustuksen alapinnan tasossa on suurin.
Resonanssi	Systeemin resonanssi on tila, jossa pienikin muutos herätteen taajuudessa saa aikaan systeemin vasteen pienenemisen. Kuormitustaajuus on tällöin yhtä suuri kuin rakenteen ominaistaajuus.

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Black Donuts Engineering Oy:n käyttöön. Yhtiön päätoimialana ovat renkaiden tuotekehitys ja testaus, uusien rengastehtaiden suunnittelu ja rakennuttaminen sekä vanhojen tehtaiden kehittäminen ja modernisointi. Tehdaskohteet sijaitsevat lähtökohtaisesti ulkomailla ja kohteiden rakennesuunnitelmat teetetään pääsääntöisesti paikallisilla insinööritoimistoilla. Tilaajalla on kuitenkin tarve kartoittaa esisuunnitteluvaiheeseen sopivia mitoitusmenetelmiä.

Tarkastelun kohteena on kuminsekoituskoneen perustus. Tarkoituksena on selvittää alustavasti perustuksen ohjeelliset ulkomitat sekä vertailla käsinlaskentamallia mitoitusohjelmasta saatuihin arvoihin. Selvitetään, miten karkea, yksinkertaistettu malli sopii esisuunnitteluvaiheen mitoitukseen ja onko tällä menetelmällä riittävästi tarkkuutta lopullisen mitoituksen varmuustason määrittämiseen. Laskentaosuudessa pyritään selvittämään dynaamisten kuormitusten vaikutus perustuksen stabiliteettiin. Työssä on lisäksi selvitetty koneperustuksen suunnitteluperusteita teoriatasolla. Kohteen vaativuuden takia ei tehdä tarkkoja laskelmia kaikista vaadittavista tarkasteluista. Lisäksi esitetään periaatteellisia rakennepiirustuksia, joita käytetään soveltaen lopulliseen suunnitteluun.

Salassapitosopimuksen vuoksi ei tässä opinnäytetyössä kerrota asiakkaan tai kohteen tarkkoja tietoja, jotta tutkimukset ja tulokset voidaan kaikilta osin pitää julkisina. Väärähately käsitellään vain lyhyesti teoriana koneperustuksen näkökulmasta, vaikka aiheena olisi hyvä jatkotutkimuksiin jo itsessään. Työssä ei myöskään käsitellä tarkemmin maanjäristysmitoitusta, koneiden liitoksia laattoihin, ylemmän laatan aukon vaikutusta eikä tehdä lujuuslaskelmia mistään rakenneosista. Työstä selviää kuitenkin lähtötietoihin liittyvä alustavan suunnittelun rooli.

2 KONEPERUSTUKSEN SUUNNITTELU

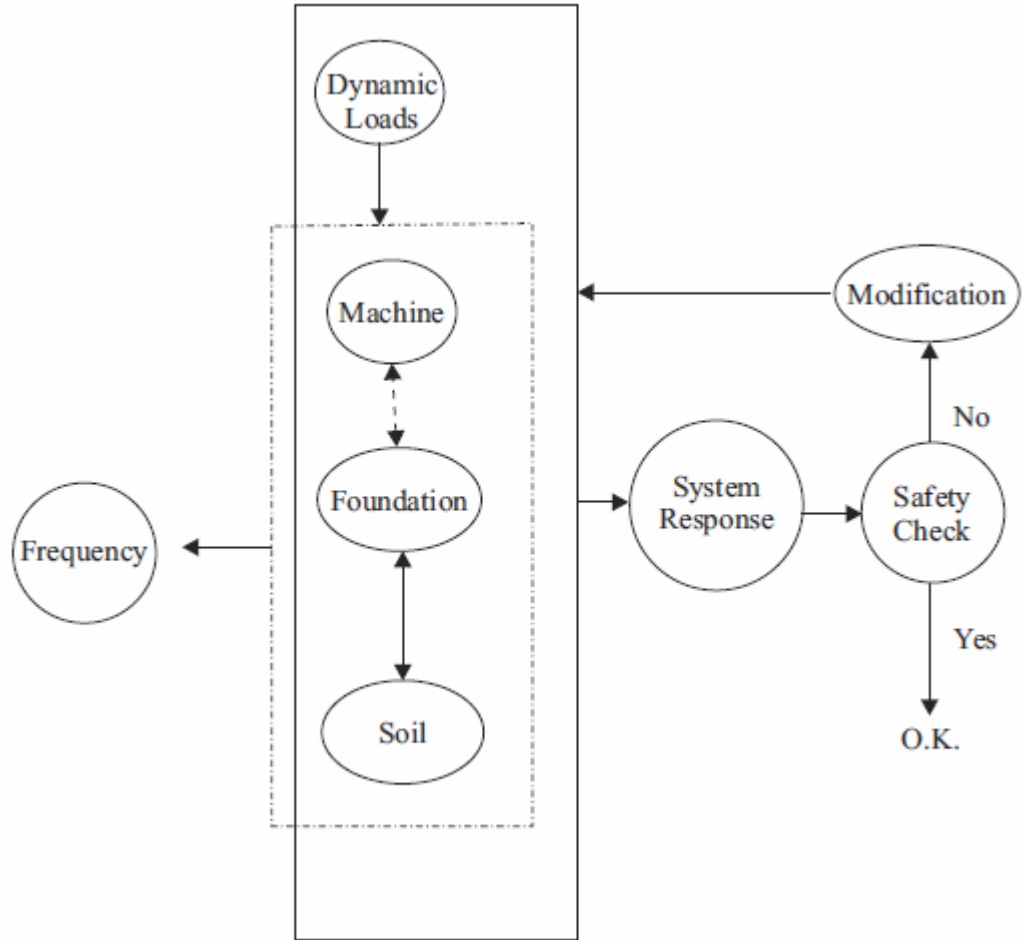
2.1 Suunnittelun lähtökohdat

Koneperustuksen tilantarve on määriteltävä esisuunnitteluvaiheessa. Suunnittelussa on huomioitava, ettei kone toiminnallaan aiheuta häiriöitä tuotantoprosessiin, eikä perustus välitä prosessia häiritseviä rasituksia ympärilleen (professori Aho K. Koneperustukset, 1984). Myöhemmin toteutettavassa lopullisessa suunnittelussa pääpaino on dynaamisten kuormien tarkastelussa, jossa koneiden aiheuttamia rasituksia on tutkittava yhdessä perustuksen kanssa. Käyttörajan mitoitus on yleensä määräävä, koska käyttökelpoisuusvaatimukset ovat tiukat. Lähtökohtaisesti koneen dynaamisille kuormille alttiit perustuksen osat erotetaan muusta rakennusrungosta värähtelyn kulkeutumisen estämiseksi.

Laitetoimittajalla on vastuu koneen toiminnasta, mutta toimittaja osallistuu yleensä koneen perustuksen suunnitteluun vain antamalla laitteiston lähtötiedot. Oleellisin näistä on dynaaminen kuormitus. Rakennesuunnittelijan vastuulla on rakenteiden toiminta, kestävyys ja taloudellisuus. Suunnittelijoiden on huomioitava yhdessä koneiden kiinnitykset rakenteisiin, prosessin toimivuus, laitteiden sijoitus ja tilantarve sekä tarvittavan LVIS-tekniikan vienti. Koska usein koneperustuksiin kohdistuu suuria kuormia, on myös maaperätutkimuksilla tärkeä rooli.

Tyypillisiä ongelmakohtia koneperustusten suunnittelussa ovat tiedonsiirron ongelmat eri tahojen välillä, lähtötietojen välittäminen (tästä lisää luvussa 2.3.2) ja erot eri maiden normikäytännöissä. Liian tiukaksi asetetut vaatimukset perustusrakenteiden jäykkyyden tai värähtelyn osalta saattavat johtaa epätaloudellisiin ja ylimitoitettuihin ratkaisuihin. (Aalto-yliopisto luentomateriaali.)

Bhatian (2008) mukaan FEM-ohjelmien periaate on jakaa analysoitava kokonaisuus pienempiin, yksinkertaisiin elementteihin, joista koostuva malli edustaa mallinnettavaa rakennetta. Tällä pyritään mahdollisimman tarkkaan esittämään rakenteen luonnollista käyttäytymistä, vaikka sitä ei koskaan pystytä mallintamaan täydellisesti. Koneperustuksia mitoitettaessa käytetään yleisesti tähän tekniikkaan perustuvia ohjelmistoja. Suurin etu näitä käytettäessä on, että voidaan mallintaa koneet, perustukset ja maapohja sekä niiden yhteistoiminta samaan malliin.

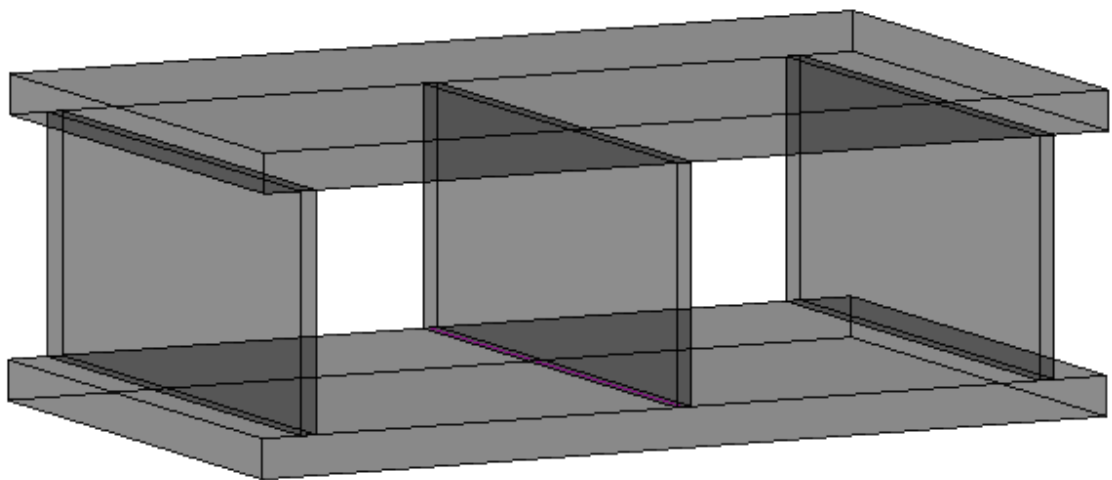


KUVA 1. Koneperustusten suunnitteludiagrammi (Foundations for industrial machines and earthquake effects 2008, 15)

2.2 Perustustyyppinä

Koneperustukset ovat yleensä maanvaraisia tai paalutettuja massiivikappaleita. Perustuksen vakavuus saavutetaan riittävällä massalla ja rakenteiden jäykkyydellä. Tarkalla mallinnuksella voidaan myös optimoida rakenne ja laskea osa kuormituksesta hukattavaksi plastisten kappaleiden muodonmuutokseen esimerkiksi pilarirakenteessa. Rakenteesta pyritään tekemään hidas lisäämällä massaa tai pehmeitä jousia, koska rakenteen hitausvoimat vastustavat dynaamisia voimia.

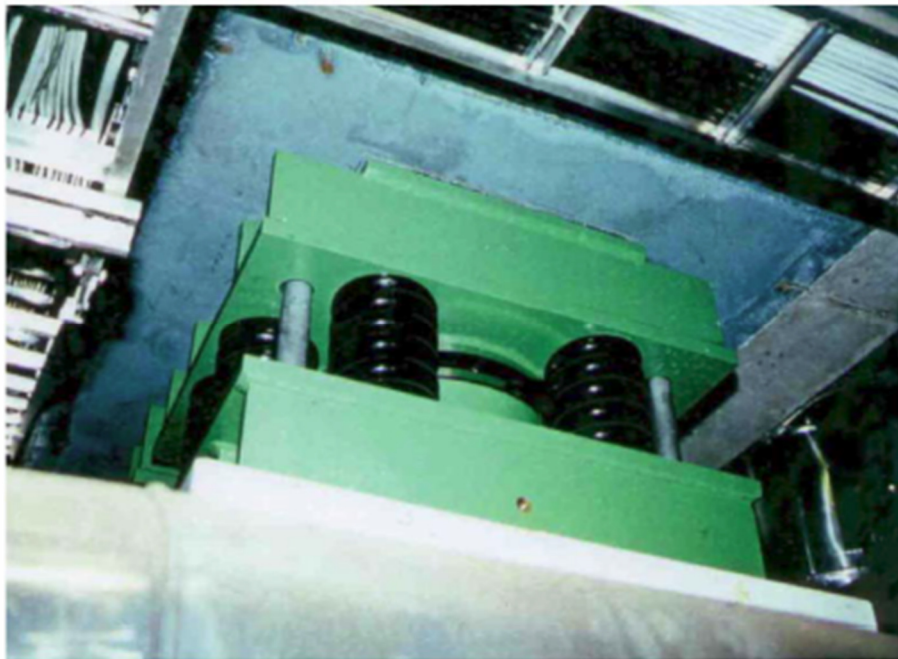
Koneiden alustoina voidaan myös käyttää esimerkiksi kehä- tai jousiperustusta. Kehäperustuksen periaatemalli nähdään kuvassa 2. Jousiperustus hillitsee rakenteen värähtelyä. Jousien ominaisuuksien on oltava selvästi ylä- ja alapuolisten rakenteiden ominaisuuksia pienempiä, jotta vältetään rakenneosien resonanssi eli yhteisvärähtely. Alapuolinen rakenne erotetaan lattialaatasta, koska lattiaa ei ole useinkaan järkevää mitoittaa laitekuormille. Vaimentimina voivat toimia teräskierrejouset (kuvat 4 ja 6) tai esim. kumilevyt. Värähtelyä voidaan vaimentaa lisäksi koneen tai sen alustan alle asennettavalla nitiilikumi-, neopreeni- tai polyuretaanimatolla (kuva 3). Jousien avulla voidaan myös esim. rakennusrungon pilareita käyttää koneperustuksena (kuva 5). Kone, tila tai jopa koko rakennus voidaan jousituksella eristää ulkoiselta tärinältä, kuten maanjäristykseltä tai maantie- ja raideliikenteen värähtelyiltä. (Aalto-yliopiston luentomateriaali.)



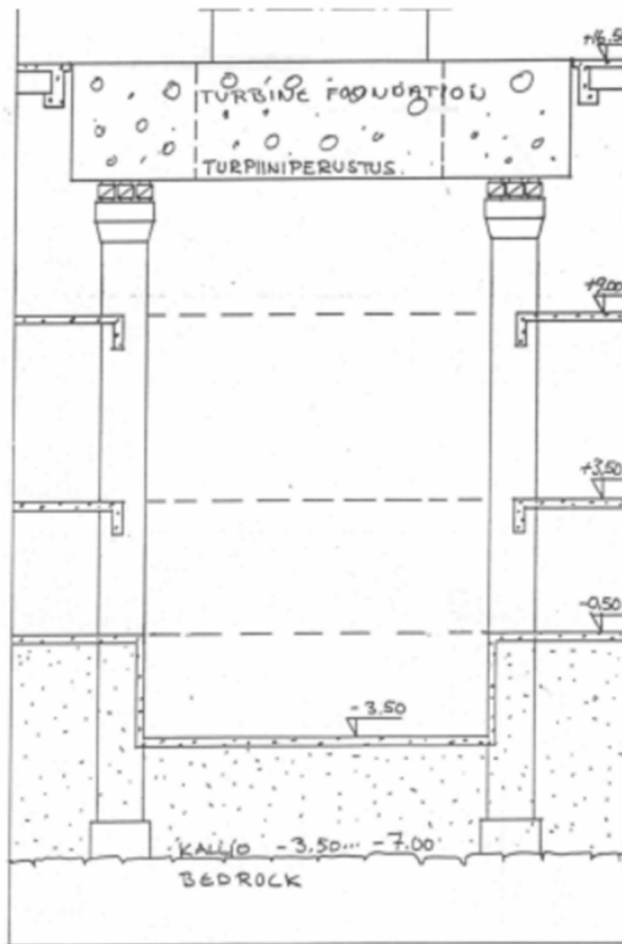
KUVA 2. Kehäperustus seinillä



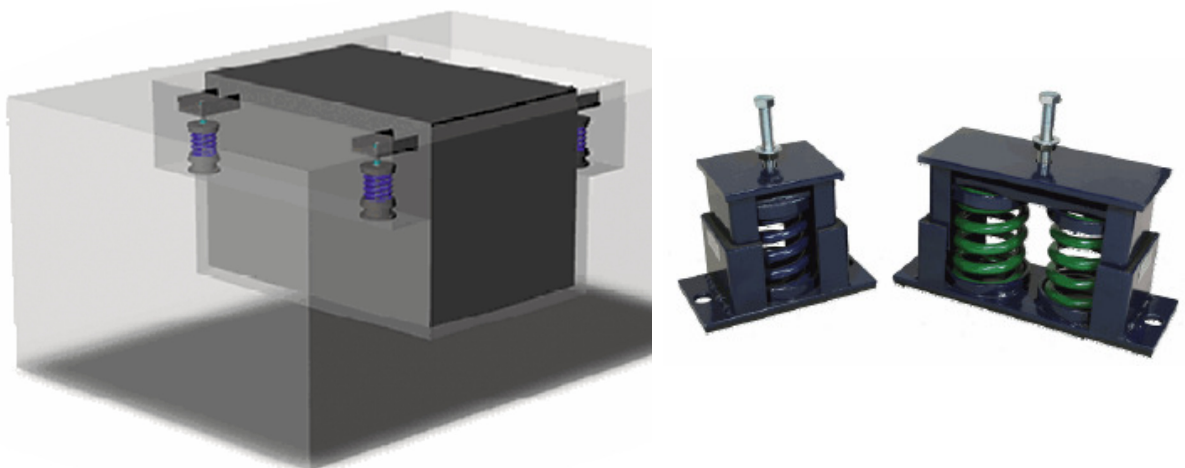
KUVA 3. Kumisekoitematto värähtelyn passiivisena vaimentimena (Berleburger 2014)



KUVA 4. Pilarin päähän sijoitettu jousipakka (Aalto-yliopiston luentomateriaali)



KUVA 5. Jousiperustus pilareilla (Aalto-yliopiston luentomateriaali)



KUVA 6. Jousitettu teräsbetoniperustus (Vibrodynamics)

2.3 Koneperustuksen tyypilliset rasitukset

2.3.1 Staattinen rasitus

Staattiset rasitukset vaikuttavat kaikissa rakenteissa. Materiaalien ja liitosten mitoituslujuuksien laskennassa otetaan huomioon kunkin staattisen kuormituksen aika- ja käyttöluokka. Tässä työssä tutkittava rakenne on sisätiloissa, joten luonnonkuormia, kuten lumitai tuulikuormia, ei huomioida. Laskentaosuudessa käsitellään staattisista rasituksista rakenteen ja koneiden oma paino sekä konetasojen hyötykuorma.

Muita koneperustuksiin mahdollisesti kohdistuvia staattisia rasituksia ovat mm.

- kondensaattorien tyhjiöimu
- kitkakuormat
- koneeseen liittyvien rakenteiden sisäisistä massavirroista, lämpöliikkeistä ja paineista perustukseen kohdistuvat voimavaikutukset
- perustuksen lämpeneminen
- käynnin aikainen vääntömomentti. (Aalto-yliopisto luentomateriaali.)

2.3.2 Dynaaminen rasitus

Dynaaminen rasitus on ajan suhteen tapahtuvaa kuormitusta. Värähtelyä ja iskumaista rasitusta syntyy mm. liikenne-, aalto-, räjähdys- ja maanjäristyskuormista. Kun dynaamisia (iskumaisia) kuormituksia lasketaan koneperustuksessa, otetaan huomioon koneiden normaali käynnistys- ja käyttötilanne sekä valittujen vikatilanteiden kuormitus. Tässä tarkasteltavan tapauksen suurin kuormitus aiheutuu vikatilanteessa. Vikatilanteisiin voi kuulua esimerkiksi massaepätasapainon kasvu sähkökatkoksen tai oikosulun sattuessa sekä putkiston iskukuormat. Sellaisten koneiden perustukset, joiden akselien kokonaismassa on pienempi kuin 1 % koneen ja sen tukien kokonaismassasta, voidaan suunnitella vain staattiselle kuormalle. (Aalto-yliopisto, luentomateriaali; Vibration of Structures 1988, 4.)

Jatkuvatoimiset moottorit aiheuttavat säännöllistä dynaamista rasitusta, joka saattaa ilmetä useilla taajuusalueilla ja laajalla taajuuskaistalla (Koneperustukset 1984, VII 1). Dynaamiset voimat otetaan yleensä huomioon kertomalla omapaino dynaamisilla suurenuskertoimilla, kuten tässä työssä on tehty. Konevalmistaja voi ilmoittaa laitteen dynaamiset rasitukset myös herätevoimana, liikkuvana massana ja pyörimisnopeutena, painopisteessä suunnattuina voimina ja momentteina tai suoraan dynaamisena kuormana. Erilaisia laskentatapoja ja -kaavoja on monia riippuen mm. koneen toimintatavasta, eikä niitä ei selvitetä tässä raportissa. Koneen dynaaminen kuormitus riippuu suuresti sen tyypistä, mikä määrittelee värähtelyominaisuudet ja laskentamenetelmän.

Tarvittavien lähtötietojen saaminen ei aina ole yksinkertaista. Laitevalmistajalla näistä vastaa usein koneinsinööri, joka ei välttämättä tiedä, mitkä tiedot ovat rakennesuunnittelijalle olennaisia. Konepuolella varmuuskertoimien suuruusluokat ovat hyvin erilaisia. Tyypillisesti koneperustus suunnitellaan samalla tavalla kuin aina ennenkin, ottaen mallia vanhasta kohteesta tai ylimitoittamalla rakenne varmuuden vuoksi. Tosiasiassa rakennesuunnittelija ei voi taloudellisistakaan syistä käyttää tyypillisiä koneinsinöörien käyttämiä varmuuskertoimia, jotka voivat olla moninkertaisia rakennelaskelmissa yleisesti käytettyihin kertoimiin nähden.

Rakennesuunnittelija tarvitsee suunnitelmiinsa aina lähtötietoina kuormia. Näitä arvoja voi joutua etsimään ja laskemaan koneinsinöörin ilmoittaessa lähtötietoina laitteen tehon, pyörimisnopeuden tai herätevoiman. Tiedonkulun ongelmat tulevat usein näissä esiin eri alojen insinöörien tehdessä yhteistyötä. Pyörimisnopeus saadaan muunnettua hertseiksi ja siitä laskemalla varmistetaan värähtelyn resonanssitaajuus. Dynaamisten voimien ilmoittamisessa voi olla suuria eroja konepajasta riippuen, jolloin myös virheiden mahdollisuus kasvaa, jos rakennesuunnittelija ei ymmärrä saamaansa tietoa.

2.4 Maaperä dynaamisen kuormituksen alaisena

Maanvarainen perustus kuormittaa myös maaperää dynaamisesti. Maapohjan tulee kestää syntyneet kuormitukset riittävällä varmuudella. Staattiset tai dynaamiset rasitukset eivät saa aiheuttaa haitallisia painumia ja maapohjassa syntyvien värähdysamplitudien on pysyttävä sallituissa lukemissa. Ympäristöstä ei saa siirtyä haitallista värinää koneperustukseen, eikä ympäröiviin rakenteisiin saa siirtyä haitallista värähtelyä maapohjan kautta.

Maapohjan kantavuus ja kokoonpuristuvuus on tutkittava tarkoin esisuunnitteluvaiheessa. (Koneiden perustusten suunnittelu 1969, IX 6 - 7.)

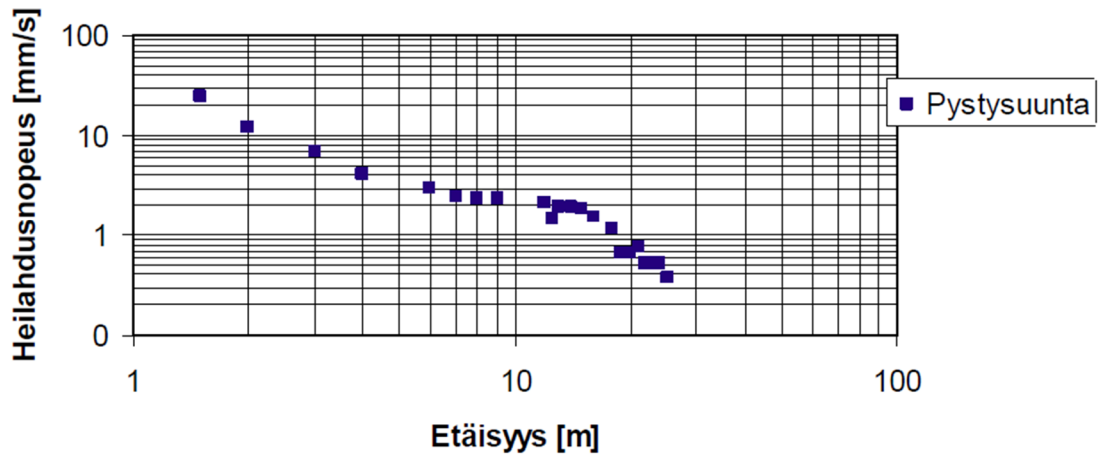
Samaan aikaan vaikuttavat staattiset ja dynaamiset voimat saattavat aiheuttaa maaperässä hydraulisen murtuman, jossa huokosvedenpaineen nousu aiheuttaa maalajin leikkauslujuuden häviämisen täydellisesti tai osittain. Ilmiö on tyypillinen vedellä kyllästyneissä kitkamaalajeissa, joita ovat hiekka, sora ja moreeni. Murtumisen aiheuttavan voiman amplitudin ja maaperän suhteellisen tiiviyyden välisen yhteyden on todettu olevan liki lineaarinen, eli löyhempi maa-aines murtuu helpommin. Maapohjan värähtelyominaisuudet ja ominaistaajuus ovat suuresti riippuvaisia siinä vallitsevasta jännitystilasta. (Koneperustukset 1983, VII 5; Foundations for industrial machines and earthquake effects 2008.)

Hydraulisen murtumisvaaran välttämiseksi on vapaan pohjaveden pinnan tason oltava vähintään 0,5 - 1,0 metrin syvyydellä perustamistasosta. Pohjavesi myös johtaa hyvin värähtelyä rakenteiden välillä, mitä on vältettävä. Suunnittelussa suositellaan käytettävän mahdollisimman suuria pohjapaineen arvoja, mikä vähentää osaltaan murtumisriskiä. Pehmeillä maapohjilla, kuten savi ja siltti, on raskaat perustukset paalutettava. Maaperä voidaan vaihtoehtoisesti stabiloida myös esimerkiksi massanvaihdolla, massastabiloinnilla tai syvätiivistämällä. (Koneperustukset 1984, VI 9; VII, 3.)

Laattamaisia perustuksia suunnitellessa maapohjan ominaisuuksia kuvataan jousivakioilla, jotka voidaan määrittää geoteknisillä painumalaskelmilla. Tätä jäykkyyttä kuvataan alustaluvulla, joka on yksinkertaisesti pohjapaineen suhde painumaan. Painumaa voidaan laskea homogeenisellä maaperällä kimmoteorian mukaan. Jousivakio ei pysy vakiona koko laatan alalla, vaan tyypillisesti vaihtelee niin, että jäykkyys on suurempi laatan reuna-alueilla. Koneperustuksia suunnitellessa jousivakioilla ja muilla teknisillä parametreilla on suuri merkitys. (Luukkonen 2010.)

Maaperän ominaisuuksilla on suuri vaikutus värinän leviämiseen. Kitkamaalajeilla värähtelyn taajuusalue on laajin, mikä aiheuttaa haasteellisimmat pohjaolosuhteet värähtelyn kannalta. Kuitenkin pehmeillä maalajeilla värähtely leviää laajimmalle alueelle värähtelyn lähteestä. Ongelmaksi voi muodostua myös kallio, joka johtaa värähtelyä perustusten välillä. Kuvassa 7 on esitetty kokeellisesti mitattu tyypillinen tilanne, jossa tärinä

vaimenee etäisyyden kasvaessa. Tyypillisesti maalajien ominaistajuuudet vaihtelevat välillä 12 - 34 Hz. Maa tai kallio vastustaa dynaamista kuormitusta sen hitaus- ja vaimenusvoimilla sekä kimmoisuudella. Koska maaperän värähtelyominaisuuksia täytyy tutkia usein myös infrakentämissä, olisi hyödyllistä saada yhtenäinen ohjeistus sekä mitoitustandardi tulevaisuudessa. (Hakulinen; Farrat Engineering Excellence.)



KUVA 7. Tärinän vaimeneminen maaperässä etäisyyden kasvaessa tärinänlähteestä

Matalataajuiset värähtelyt ovat perustusten kannalta kriittisempiä, koska ne kulkeutuvat helpommin perustuksiin. Laskennassa taajuuksia voidaan pienentää kertoimilla, kun $\text{Hz} < 12,6$ (Ilkka Hurme 2012, s 12). Värähtelyaallot vaimenevat maaperässä pääosin geometrisen ja materiaalivaimennuksen yhteisvaikutuksesta, joka voidaan laskea yhtälöllä 1. Geometrisessä vaimennuksessa amplitudi pienenee, kun aaltoenergia leviää laajemmalle pinta-alalle etäisyyden kasvaessa. Materiaalivaimennuksessa maan rakeiden välinen kitka kuluttaa energiaa. VTT:n tutkimuksessa (2006) todettiin, että resonanssitaaajuutta lähellä olevat taajuudet vaimenevat hitaimmin. Savimaassa värähtelyn kulkeutumiseen vaikuttaa suuresti sekä maan pehmeys että maakerroksen paksuus. Jos halutaan vaimentaa maaperään kohdistuvaa, tai maaperän kautta siirtyvää värähtelyä, on vaimennettava taajuusalue ja sen mukainen vaimennin valittava maalajin mukaan. Kovalle maalajeille sopiva vaimennin voi jopa lisätä värähtelyä pehmeillä maalajeilla. (Maadynamiikan perusteet TTY, 8; VTT 2006.)

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^n \cdot e^{\alpha \cdot (R_2 - R_1)} \quad (1)$$

v_1 = värähtelyn heilahdusnopeus etäisyydellä R_1

v_2 = värähtelyn heilahdusnopeus etäisyydellä R_2

n = vaimenemisen kerroin

α = materiaalivaimennuskerroin

2.5 Värähtely

Kaikki koneet synnyttävät värähtelyä, jos niissä on edestakaisin liikkuvia tai pyöriviä massoja. Erittäin pienten koneiden värähtelyä ei yleensä tarvitse huomioida muuten kuin koneen kiinnityksessä, joka voidaan usein tehdä suoraan lattiatasoon. Voimien kasvaessa koneisto saattaa vaatia oman perustuksensa, jotta värähtely ei etene ympäröiviin rakenteisiin. Perustuksiin voidaan suunnitella erilaisia jousituksia tai muita vaimennuskeinoja värähtelyn hallitsemiseksi. Värähtelyrasitus ei saa aiheuttaa haitallista painumaa värähtelylle alttiiden rakenteiden perustuksiin. Suunnittelussa varmistetaan, ettei dynaamisen kuorman taajuuden ja perustus-maapohja-systeemin kriittisen taajuuden välillä esiinny resonanssia, ja ettei maapohjassa tapahdu nesteytymistä. (RIL 207-2009, 114 - 115.)

Dynaaminen rasitus ja värähtely aiheuttavat myös materiaalin väsymistä varsinkin metallirakenteissa, jolloin materiaalin rakenneominaisuudet heikkenevät pitkäaikaisen vaihtelevan kuormituksen seurauksena. Rakenteeseen tulee pysyviä mikroskooppisia vaurioita, vaikka rasituksen aiheuttama jännitys ei ylittäisikään nimellisarvoja. Hauras väsymismurtuma voi syntyä ennalta arvaamatta jo pitkään kuormitettuna olleisiin rakenteisiin. Materiaalin kykyä vastustaa väsymistä kuvataan sen sitkeydellä. Austeniittisen ruostumattoman teräksen iskusitkeys on lähes lämpötilasta riippumaton. (TTY 2005.)

Värähtelyn huomioiminen suunnittelussa tapahtuu pääpainoisesti ominaisvärähtelytaajuuden perusteella. Jokaisella värähtelevällä kappaleella on oma ominaisvärähtelylukunsa. Jos useampi kone resonoi samalla taajuudella tai yhdessä perustuksen kanssa, aiheuttaa yhteisvärähtely huomattavasti suurempia voimia. Suunnittelussa vältetään koneiden ja perustuksen yhteisresonanssialuetta, jolloin puhutaan rakenteen olevan yli- tai aliviritetty taajuudeltaan koneen taajuuteen nähden. (Koneperustuksien suunnittelu, 1969.)

Koneiden, joissa on pyöriviä komponentteja, aiheuttamien voimien amplitudit riippuvat pyörivästä massasta, sen epäkeskisyydestä painopisteeseen nähden sekä taajuudesta, joka voidaan laskea laitteen tehon perusteella. Tällaisia ovat esimerkiksi turbiinit ja moottorit. Rakenteen tasapainoa poikkeuttavan voiman aiheuttaman vapaan värähtelyn yhden vapausasteen ominaistajuus (f_n) voidaan laskea kaavalla 2. (Vibrations of machine foundations and surrounding soil 2012, 29.)

$$f_n \text{ (Hz)} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

k = jousivakio (N/m)

m = koko rakenteen massa koneineen (kg)

T = jaksonaika (s)

Perustuksen ominaisvärähtelyluvun (kaava 3) ja koneen kierrosluvun on poikettava toisistaan riittävästi. Taajuussuhteen yhtälön 4 toteutuessa perustus on korkeaviritetty ja yhtälön 5 toteutuessa perustus on matalaviritetty. Rakennesuunnittelija harkitsee, millaiseen perustuksen viritystaajuuteen hän vallitsevissa olosuhteissa pyrkii. Yleensä alhaisten kierroslukujen koneiden (alle 300 r/min) perustukset on käytännöllisintä suunnitella ne korkeaviritettyinä ja korkeilla kierrosluvuilla (yli 1000 r/min) puolestaan matalaviritettyinä (Koneperustuksien suunnittelu 1969, X 3.)

Viritystasoa tarkemmin laskettaessa on otettava huomioon kaikki eri värähtelyn vapausasteet (kuva 8). Liikeyhtälöt kirjoitetaan yleensä matriisimuotoon, ja niitä on hyvin monimutkaista ratkoa käsin. Jäykällä kappaleella näitä on teoriassa kuusi; liikkumisen vapausasteet suuntiin x, y ja z eli translaatiot sekä pyörimisen vapausasteet suuntiin x, y ja z eli rotaatiot (Koneperustukset 1984, VI 2). Värähtelyn analysointi tehdään yleensä yksinkertaistettua matemaattista mallia hyödyntäen, jolla pyritään kuvaamaan mahdollisimman tarkasti todellista systeemiä. Malliin on kuitenkin miltei mahdotonta ottaa huomioon kaikkia systeemin yksityiskohtia.

$$n = \frac{300}{\sqrt{\delta}} \quad (3)$$

$$\frac{f}{f_0} \leq 0,5 \quad (4)$$

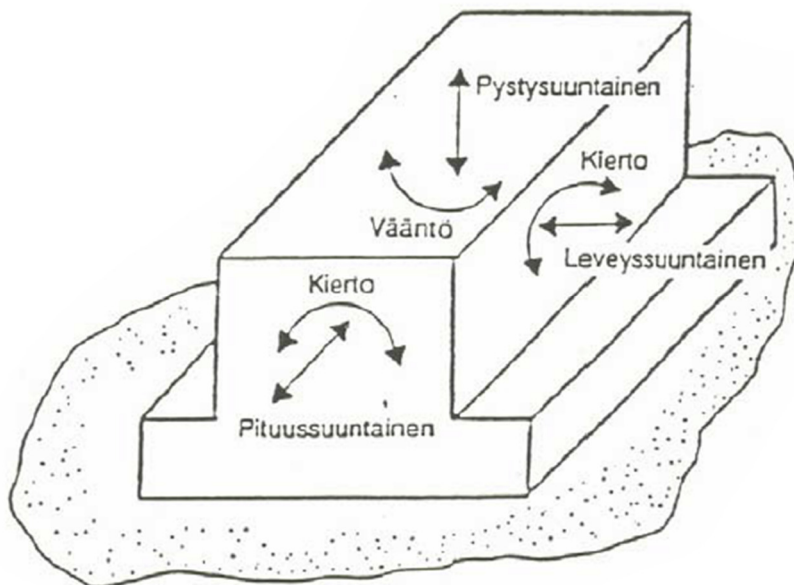
$$\frac{f}{f_0} \geq 2,0 \quad (5)$$

n = ominaisvärähtelyluku, jolla yhdessä koneen kierrosluvun kanssa voidaan laskea dynaamiset kertoimet eri liikesuuntiin.

δ = koneen alustassa esiintyvä kokonaisjousto tai painuma, joka syntyy koneen ja perustuksen staattisen kuormituksen yhteisvaikutuksesta

f = konekierrosluku

f_0 = perustuksen ominaisvärähtelyluku



KUVA 8. Värähtelymuodot jäykässä perustuksessa (Hakulinen)

Koneperustuksien suunnittelu (1969) antaa lähtöarvon perustuksien painolle kaavalla 6, jolla voidaan laskea vaadittava minimimassa perustuksille koneen tehon perusteella, kun kierrosluku on 300–1000 r/min.

$$\log Gf = 0,9 \cdot (\log Ps - 0,6) \quad (6)$$

Gf = perustuksen ominaispaino

Ps = koneen teho hevosvoimina

Tällä kaavalla laskettuna esimerkiksi 100 hv dieselmoottori vaatisi noin 18 tonnin painoisen perustuksen. On kuitenkin otettava huomioon muut muuttujat, kuten vallitsevat pohjaolosuhteet. Mitä suurempi on koneen kierrosluku, sitä suurempi on perustuksen massan oltava.

Kaikissa rakenteissa on sisäistä vaimennusta eli sisäistä kitkaa, joka estää amplitudin kasvamisen äärettömäksi. Vaimennusmekanismit ja vaimennuksen suuruus tunnetaan huonosti vastelaskennassa, vaikka vaimennuksella on suuri merkitys. Tekesin teettämässä VÄRE-ohjelmassa (2003) tavoitteena oli parantaa yritysten valmiutta vastata tuotteiden värähtely- ja ääniominaisuuksille asetettuihin vaatimuksiin. Haasteet syntyvät kilpailun ja vaatimusten kiristyessä. Useat laitevalmistajat myös kokoavat koneensa useiden eri alihankkijoiden tekemistä komponenteista, joiden tarkkoja malleja ei aina haluta luovuttaa eteenpäin, mikä puolestaan vaikeuttaa tarkkaa mallinnusta.

2.6 Maanjäristys

Hakulisen mukaan (2011, 19) mannerlaattojen liikkumisesta aiheutuva muodonmuutosenergia leviää värinäaaltoina ympäristöön. Rakenteiden hitausvoimat vastustavat maanjäristyksen aiheuttamaa dynaamista kuormitusta, jonka taajuus pienenee, mitä kauempana järistyksen keskus on. Suurin rasitus syntyy järistyksen ollessa resonanssissa rakenteen kanssa. Suurimassaiset rakennukset, kuten teräsbetoni- ja tiilirakenteet, joissa hitausvoimat ja rasitukset ovat suurimpia, kestävät heikommin tällaisia rasituksia kuin kevyet ja joustavat rakenteet, kuten puu- ja teräsrunkoiset rakennukset.

Maanjäristysalueilla sijaitsevien kohteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös mahdollinen maanjäristyksen aiheuttama värähtely. Mitoituksessa tulisi huomioida kaksi erilaista tilannetta. Ensimmäisessä huomioidaan voimakkuudeltaan keskisuuri maanjäristys, jonka oletetaan tapahtuvan 100 % todennäköisyydellä kerran rakennuksen käyttöaikana. Rakennukseen ei saa tästä syntyä merkittäviä vaurioita tai niiden on oltava helposti korjattavissa. Toinen tilanne on harvinainen ja voimakas maanjäristys, joka vaurioittaa kantavia rakenteita. Tällöin mitoitusavoitteena on, ettei rakennus sorru tai vaaranna ihmishenkiä. (Teräsrakenneyhdistys ry, 4.)

Suunnitteluun vaikuttaa suuresti rakennuksen käyttötarkoitus ja mahdollisen vaurion aiheuttamat välilliset riskit. Yhteiskunnallisesti tärkeät rakennukset, järjestelmät sekä ympäristölleen vaaralliset laitokset suunnitellaan kestävämpään suurempia seismisiä voimia. Rakennukseen kohdistuvat maanjäristysvoimat riippuvat edellisen lisäksi myös maaperän laadusta, rakennuspaikan seismisestä aktiivisuudesta sekä rakenneratkaisuista. (Teräsrakenneyhdistys ry, 5.)

Seismisen värähtelyn riski vaikuttaa suuresti materiaaleihin ja liitostyypeihin rakenteissa. Teräs soveltuukin hyvin tällaisiin riskikohteisiin sitkeytensä ansiosta. Rakenteet pyritään suunnittelemaan niin, että niissä tapahtuu näkyviä plastisia muodonmuutoksia ennen osien stabiiliuden menetystä. Myös maanjäristyksestä johtuvaa värähtelyä voidaan vaimentaa esimerkiksi erilaisilla mekaanisilla vaimentimilla, kuten jousilla (kuva 9). (Teräsrakenneyhdistys ry, 13.)

Maanjäristysalueelle suunniteltaville rakennuksille on annettu joitakin suosituksia, joita noudattamalla vähennetään vaurioriskiä rakenteille. Rakennusten olisi oltava muodoltaan ja pohjaratkaisultaan yksinkertaisia ja symmetrisiä. Saumoja ja epäjatkuvuuskohtia, joissa materiaalin jäykkyys tai rakenteen korkeus vaihtuu, pitäisi välttää. Pystysuuntaisia jäykistäviä elementtejä, kuten hissikuiluja, ei pitäisi sijoittaa keskeisesti rakennuksen massaan nähden. Massakeskittymiä tulisi välttää erityisesti rakennuksen yläosissa. Korkeiden rakennusten etäisyyden toisistaan on oltava riittävä. Suunnitellaan kantavat rakenteosat niin, että yhden osan pettäessä kuormat siirtyvät vaihtoehtoista reittiä alapuolisille rakenteille, joille on tätä varten mitoitettu riittävästi käyttövarmuutta. Tällä tavoin estetään jatkuva sortuma. (Vibration of Structures 1988, 188 - 191.)



KUVA 9. Seismisen värähtelyn vaimennin (kineticsnoise.com)

2.7 Palomitoitus

Betoni on luokan A1 materiaalina paloturvallinen. Vaikka teräskin on materiaalina palamaton, sen lujuus ja kimmokerroin pienenevät nopeasti lämpötilan kohotessa. Teräsrunkoiset rakenteet on siksi suojattava joko rakenteellisesti palonkestävällä materiaalilla tai palonsuojakäsittelyllä, ellei niitä ole ylimitoitettu palon varalta.

Jos koneperustusta pidetään lähtökohtaisesti kiinteänä rakenteena, on sitä tarkasteltava myös palomitoituksen kannalta. Kohteen teräsrunko on kuitenkin betonin peitossa joka suunnalta, joten sitä voidaan tässä yhteydessä pitää paloturvallisena rakenteena. Tarkistetaan tarvittaessa suojabetonin paksuus kohdissa, joissa teräsrakenteita on lähellä betoninvaipan pintaa.

3 LÄHTÖTIEDOT

3.1 Esimerkkikohteen lähtötiedot

3.1.1 Tuotantolaitos ja perustusta ympäröivät rakenteet

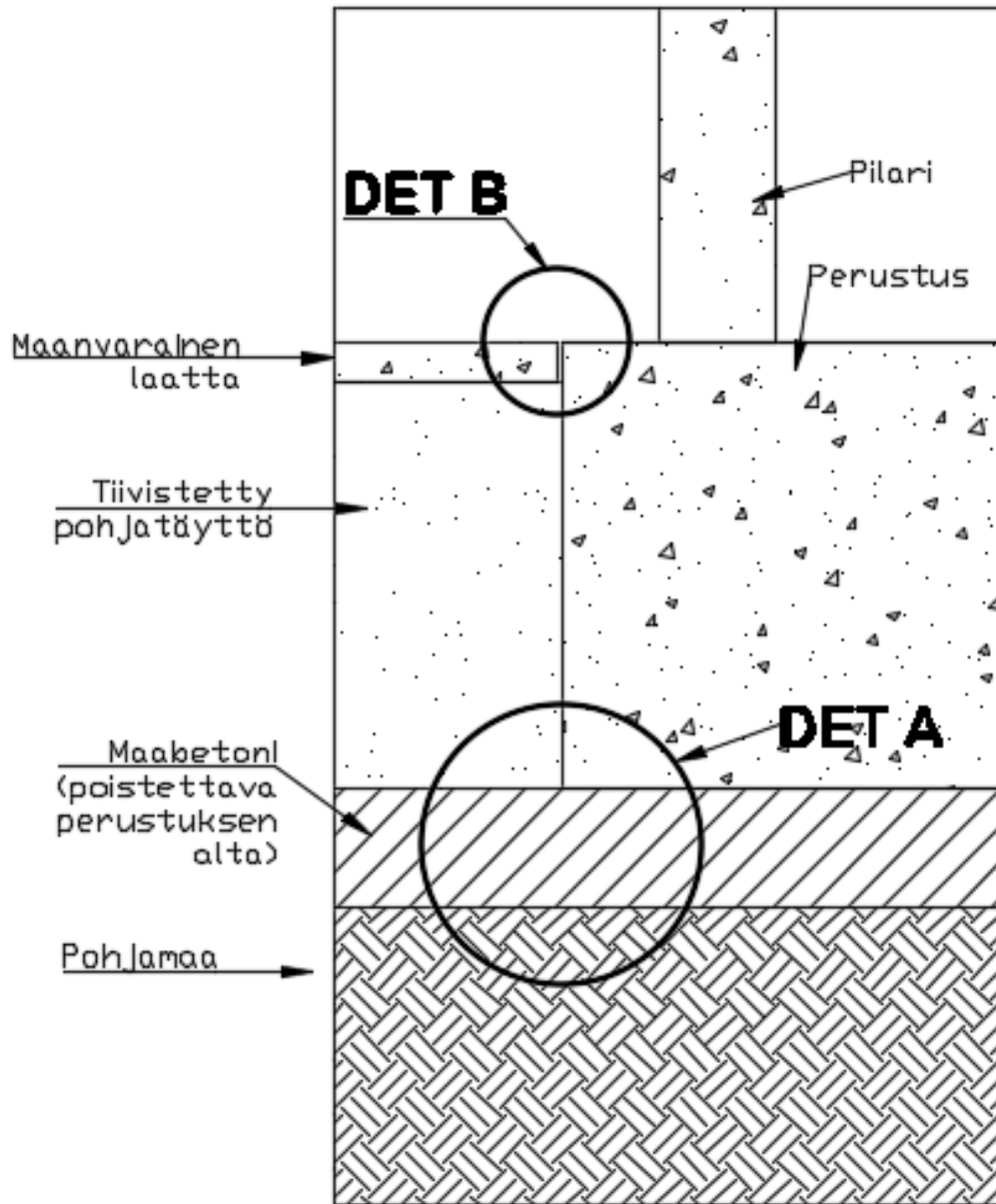
Kohteena oleva rengastehdas on rakenteilla Pohjois-Afrikkaan tätä opinnäytetyötä tehdessä. Tuotantorakennus, jossa työssä tarkasteltava koneperustus sijaitsee, on kooltaan noin 6400 m². Se rakennetaan teräsrunkoisena pilari-palkki-rakenteena. Ulkoseinät toteutetaan sandwich-elementeillä ja kattorakenne kantavilla poimulevyillä. Tuotannon on tarkoitus käynnistyä syksyllä 2017.

Sekoituskoneiston perustuksia ympäröi tehtaan lattia, joka on maanvarainen 200 mm teräsbetoni-laatta. Pystyleikkaus lattiatason alapuolisista kerroksista on esitetty kuvassa 10. Koneperustuksen ja koko rakennuksen alle on tässä kohteessa valettu noin 300 mm kerros betonia pohjamaan tasaamiseksi ja vahvistamiseksi paikallisen rakennustavan mukaan. Tämä betonikerros on kuitenkin poistettava tai katkaistava vähintään maabetonikerroksen paksuuden etäisyydeltä perustuksen reunasta mitattuna, koska värähtely ei saa siirtyä pohjan kautta tehdasrakennuksen kantaviin rakenteisiin (kuva 11).

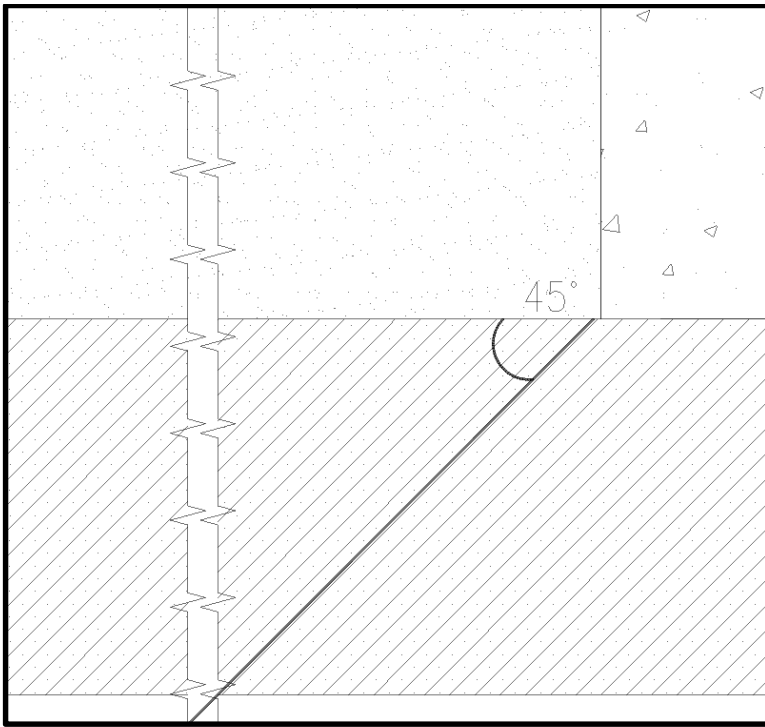
Pohjabetonin vaikutukseen pohjapaineen jakautumiseen ja värähtelyn etenemiseen maaperässä olisi syytä kiinnittää huomiota. Kohteen rakennusta kannattelevien pilareiden perustukset sijaitsevat lähellä koneperustusta, mikä saattaa mahdollistaa vahingollisen värähtelyn siirtymisen maaperän kautta rakenteisiin. Värähtelyä maaperässä on käsitelty luvussa 2.4, mutta selkeitä ohjeita tärinän leviämisen suojaetäisyyksistä perustusten välillä ei löydetty.

Koneperustus erotetaan ympäröivästä kuitubetonilattiarakenteesta. Väliin asennetaan solumuovi, neopreenikumi tai muu vastaava pehmeätkö (kovuusluokka esim. 35 ShoreA) eriste. Liitossauma peitetään esimerkiksi alumiinilevyllä, L-profiililla tai vastaavalla listalla (kuva 12), tai se voidaan jättää paljaaksi. Muita vaihtoehtoja ovat mm. laattojen reunoille asennettavat kulmateräkset tai laattojen ponttisauma. Maanvaraisen teräsbetoni-la-

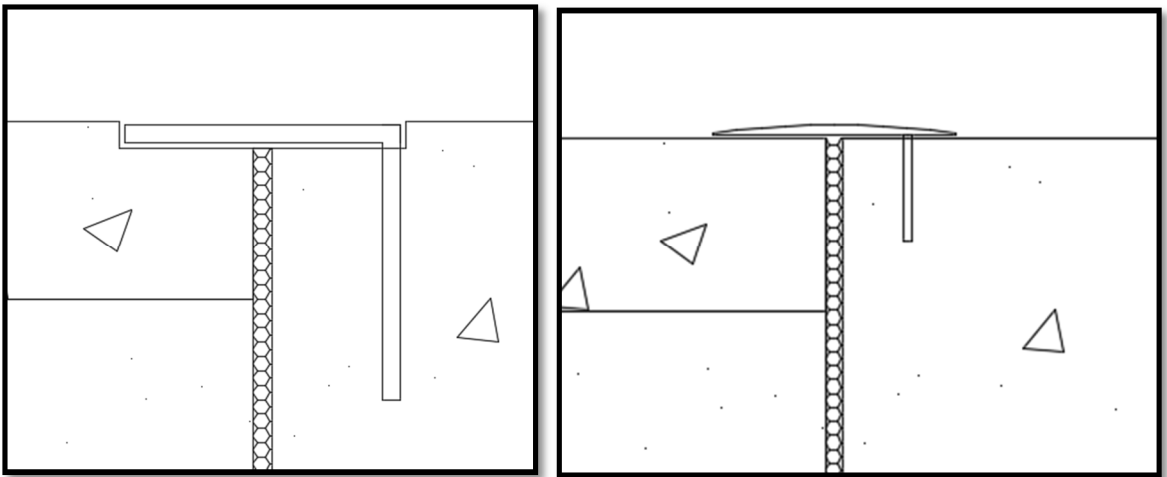
tan reuna-alueet on syytä vahvistaa, jos saumoihin kohdistuu raskaita kuormia esim. truk-kiliikennettä. Yhtenä vaihtoehtona on valaa perustukseen raudoitettu ”leuka”, ja asentaa saumaan tärinää vaimentava neopreenikuminauha (kuva 13).



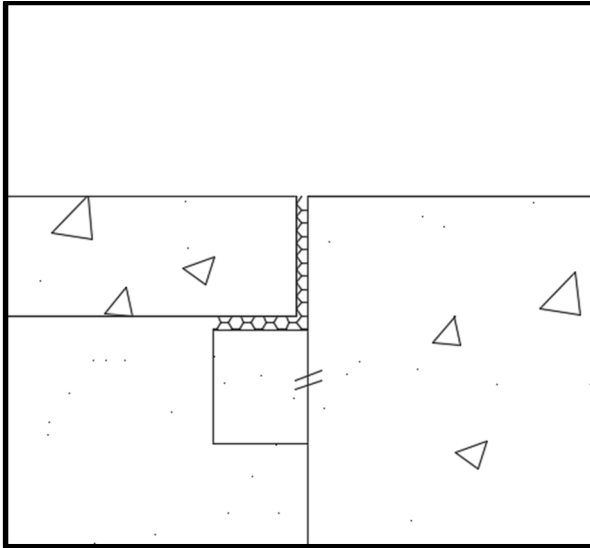
KUVA 10. Lattian alapuoliset kerrokset



KUVA 11. DET A maabetonin katkaisu perustuksen ympärillä



KUVA 12. DET B1/B2 esimerkkejä lattiatason liitoksesta



KUVA 13. Esimerkki perustuksen liitoksesta lattiaan

3.1.2 Maapohja

Penetrometri- ja pressometrikokeiden mukaan rakennuspaikan maaperä on homogeenista, punaista savea, joka sisältää soraa ja suuria lohkareita. Maaperä ei tutkimusten mukaan sisällä sulfaatteja, jolloin voidaan käyttää tavallista betonia koko rakennuksen perustuksissa. Sallituksi pohjapaineeksi koko rakennuksen alueelle on määritelty 2,1 bar eli 210 kN/m^2 . Muita geoteknisiä parametreja ei ole saatu, joten kantokestävyytlaskelmia ei niiden perusteella voitu tehdä.

Jos maabetonin osuus huomioidaan perustuksen omapainossa (kaava 8) sekä perustuksen pohjan pinta-alassa (kaava 7), pohjapaine anturan alapinnassa kasvaa sen vaikutuksesta noin 1 - 6 %. Oletetaan betonikerroksen paksuudeksi 0,3 - 1,0 m. Tätä ei kuitenkaan voitu laskea tarkasti, koska maabetonin todellinen paksuus vaihtelee suuresti, eikä sitä sen takia huomioitu myöhemmissä laskelmissa.

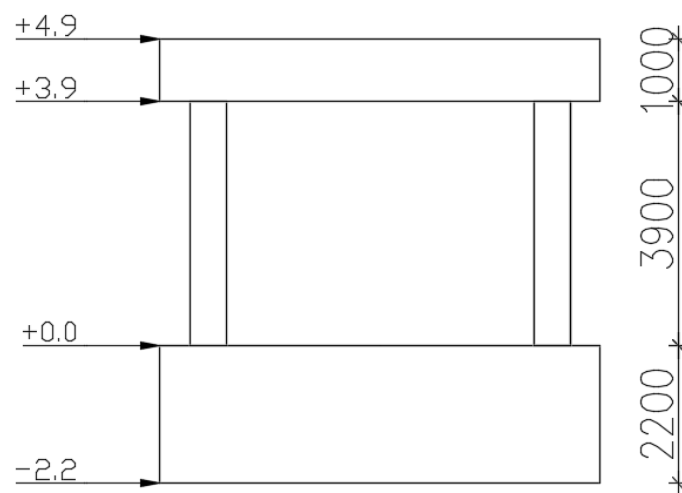
$$(7 \text{ m} + 2 \cdot 0,5 \text{ m}) \cdot (11,4 \text{ m} + 2 \cdot 0,5 \text{ m}) = 99,2 \text{ m}^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 80 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} + \frac{(99,2 \text{ m}^2 - 80 \text{ m}^2) \cdot 0,5 \text{ m}}{2} \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} & \quad (8) \\ = 960 \text{ kN} + 114 \text{ kN} = 1074 \text{ kN} & \end{aligned}$$

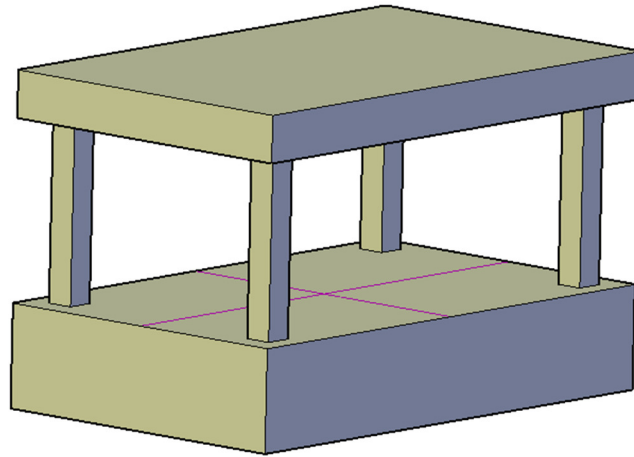
Koska perustuksiin kohdistuu suuria kuormituksia, on syytä kiinnittää perusmaan tiivistämiseen erityistä huomiota tapauksissa, joissa maabetonia ei käytetä. Työmaalle voidaan laatia tiivistämisestä ohjeet, joissa on selitykset vähintään maakerrospaksuuksista, tarvittavista laitteistoista, tiiveysvaatimuksista ja niiden varmistamisesta työmaalla. Geoteknisissä tutkimuksissa selvitetään myös maalajin optimivesipitoisuus (Proctor-koee). Siinä haetaan maalajille ominaista kosteuspitoisuutta, jossa sen kuivatilavuuspaino on suurin. Silloin maan tiivistämisellä saavutetaan parhaimmat tulokset. Kohteen sijainnista riippuen täytyy huomioida myös routasuojaus perustuksen alapuolella. Tällöin voidaan vaihtaa pohjamaa tarvittavalta syvyydeltä routimattomaan maa-ainekseen, joka toimii samalla kapillaarikatkona.

3.1.3 Koneisto ja perustuksen alustava malli

Suunnittelun alkuvaiheessa koneperustuksen vähimmäiskoko määräytyy laitevalmistajan tietojen ja edellisten suunnittelukohteiden perusteella. Konepeti irrotetaan rakennuksen muista rakenteista värähtelyn siirtymisen estämiseksi. Tehtaan valmiin lattiapinnan korko on +0.0, joka on samassa tasossa koneperustuksen yläpinnan kanssa. Ylemmässä laatussa on noin 1300 mm x 1300 mm kokoinen syöttöaukko suoraan sekoituskoneen (kone 1) alapuolella, mutta sitä ei ole tässä tarkastelussa huomioitu. Jalustan alustava koko ja malli on esitetty kuvissa 14 ja 15.



KUVA 14. Leikkauskuva perustuksesta ja konetasosta



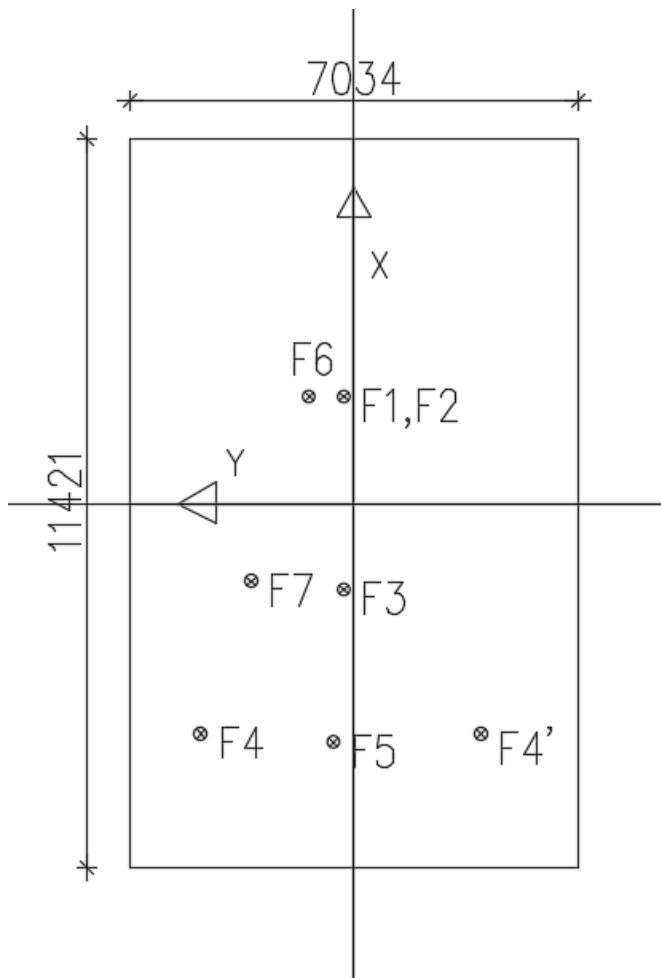
KUVA 15. 3D-malli perustuksesta ja konetasosta

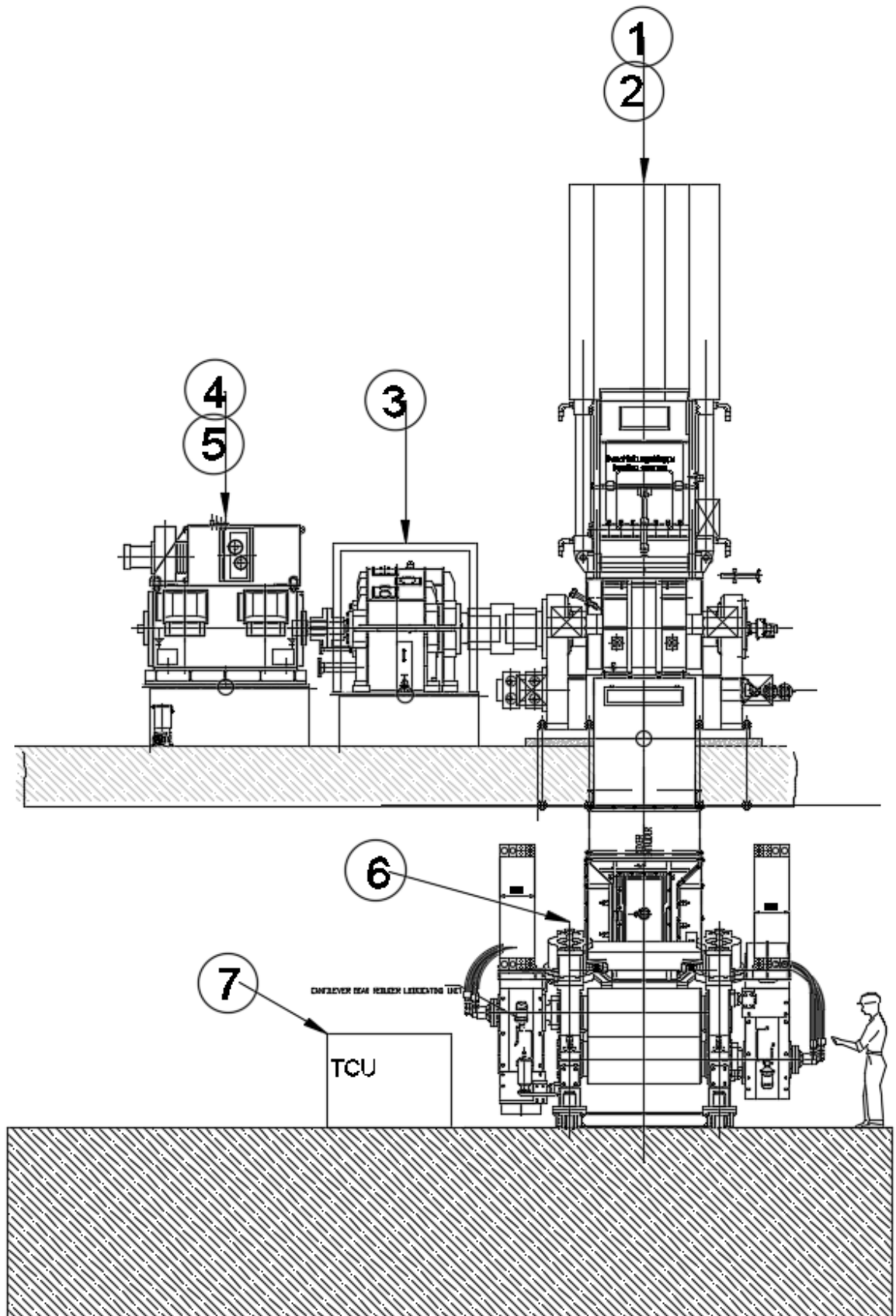
Ylemmällä laatala seisoo varsinainen sekoituskone (kone 1), joka aiheuttaa suurimmat dynaamiset rasitukset, ja sen päällä raaka-aineiden syöttölaite (kone 2). Valmis kumi-massa syötetään laatan aukosta koneelle 6. Varsinaiset moottorit ovat koneet 4 ja 4'. Hydraulikkayksikkö (kone 5) on sijoitettu kuvan 17 mukaisesti. Edellä mainittujen välissä on vaihdelaatikko (kone 3).

Koordinaatiston nollapisteeksi on valittu laatan keskipiste tasossa -2.2 (kuva 16). Taulukossa 1 on esitetty laitteiden painot, jotka on saatu laitevalmistajalta. Painopisteiden koordinaatit on laskettu alustavasta mallikuvasta. Taulukon 1 tietoja on käytetty kohdan 4.1.1 omien painojen laskentaan. Perustus koneineen on esitetty kuvassa 17.

TAULUKKO 1. Koneiden painopisteet ja massat

	Kone	Painopisteen koordinaatit (m)			Massa (kg)	Massa (N)
		X	Y	Z		
1	Heavy duty mixer	1,672	0,168	5,000	41 202	412 020
2	Feeding device	1,672	0,168	5,000	13 734	137 340
3	Gear box with oil	-1,353	0,168	5,600	18 639	186 390
4	Main drive motor 1	-3,618	2,418	5,700	6 573	65 730
4'	Main drive motor 2	-3,618	-1,982	5,700	6 573	65 730
5	Hydraulic unit	-3,745	0,327	4,900	2 943	29 430
6	Extruder Convex	1, 672	0,701	0,000	51 012	510 120
7	Temperature control unit	-1,221	1,615	0,000	4 022	40 220
	Σ					1 446 975

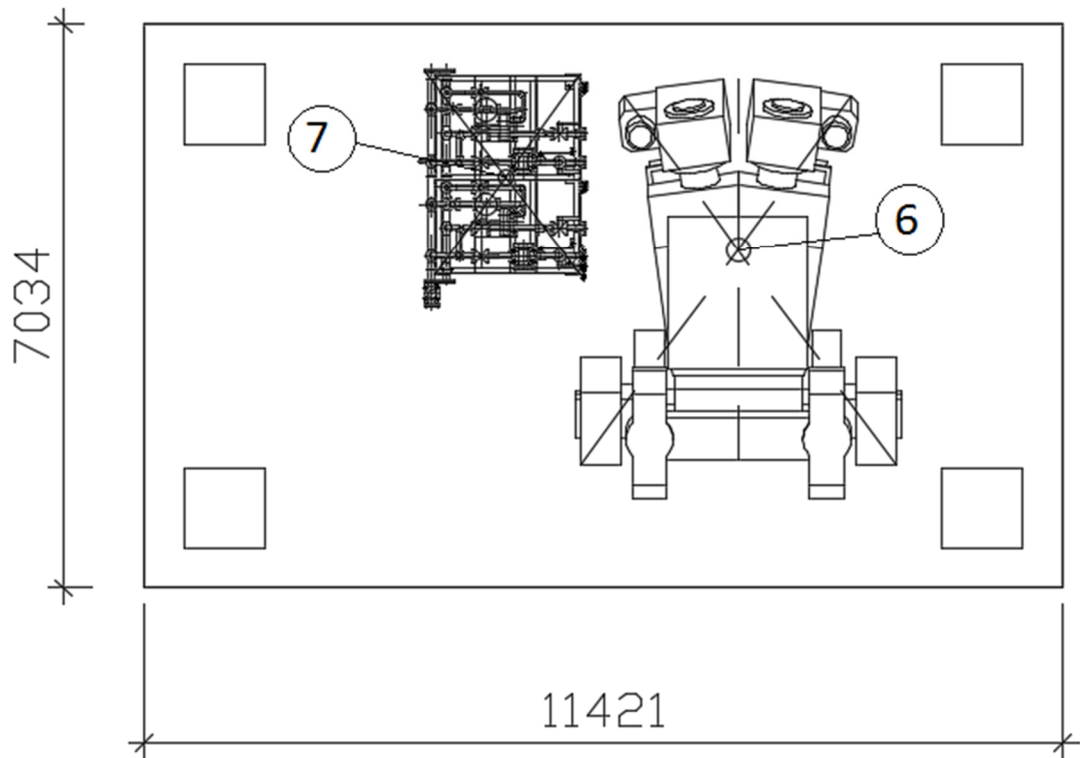
**KUVA 16. Molempien tasojen koneiden painopisteiden paikat tasoleikkauksessa**



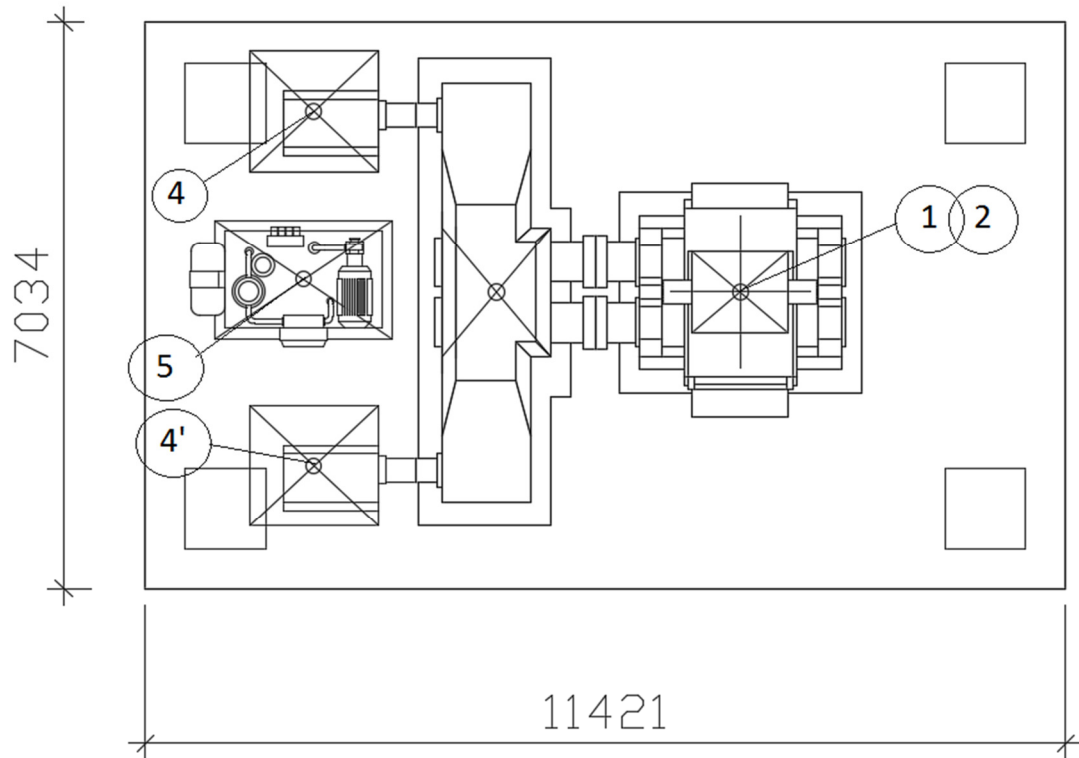
KUVA 17. Koneiden numerointi ja periaatekuva kokonaisuudesta

3.1.4 Koneiden sijoitus jalustalle

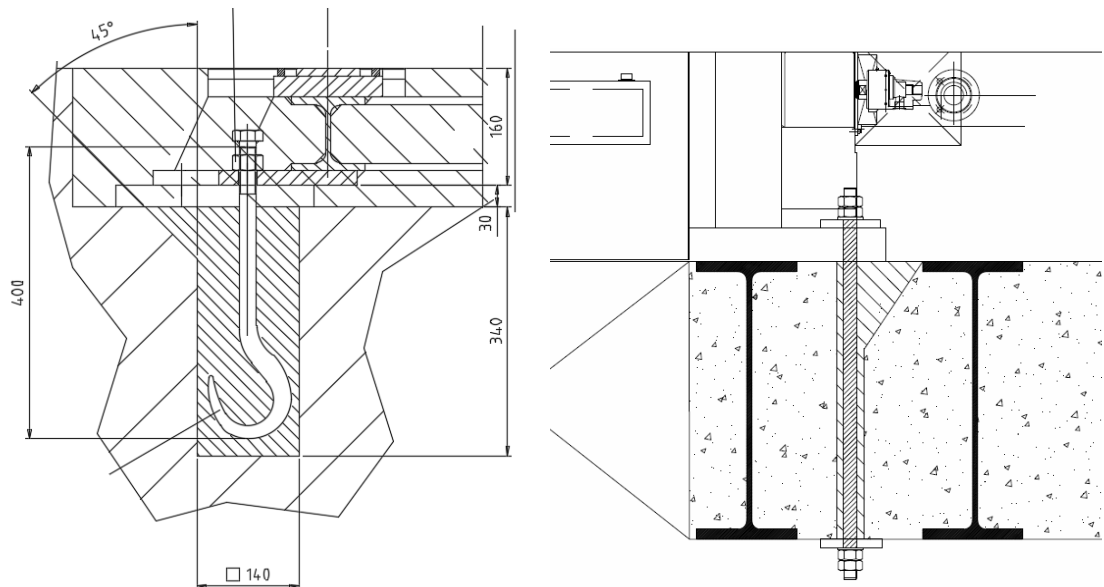
Perustuksen alemmalle tasolle (+0.0) asennetaan koneet 6 ja 7. Kuvaan 18 on merkitty koneiden painopisteet ja koneiden sijoitus peruslaatatalla. Ylemmälle tasolle (+4.9) asennetaan koneet 1 - 5 (kuva 19). Kone 6 asennetaan teräskiskojen päälle, jotta laite saadaan avattua huoltotöiden ajaksi. Teräskehikko tulee konevalmistajalta ja liitetään laattaan valetuilla pulttiliitoksilla. Kehikon kiinnitys peitetään betonivalulla ennen koneiden asennusta. Esimerkki koneen 6 kiinnityksestä on esitetty kuvassa 20. Sekoituskone kiinnitetään teräsbetonilaatan läpi pulteilla (kuva 21), jotka asennetaan teräsputkeen (esim. S420MH CFRHS 100 x100 x 3 mm tai CFCHS d=100 mm) ja suljetaan juotosvalulla.



KUVA 18. Koneiden 6 ja 7 sijoittelu alemmalla konetasolla (+0.0)



KUVA 19. Koneiden 1 - 5 sijoittelu ylemmällä tasolla (+4,9)



KUVA 20. Esimerkki koneen 6 asennuskehikon liitoksesta teräsbetoniperustukseen

KUVA 21. Periaatekuva koneen 1 kiinnityksestä laattaan

3.2 Mitoitusperiaatteet ja toteutustapa

Koska työn tarkoituksena on luoda periaatteellinen yleispätevä tarkastelumenetelmä, ei tässä työssä käytetä kohteen kaikkia tarkkoja tietoja. Esisuunnitteluvaiheessa ei ole vielä määriteltä mm. perustuksessa käytettävien materiaalien lujuuksia eikä rakenteiden tarkkoja tyyppejä, mittoja tai korkoja. Kansainvälisten hankkeiden vuoksi maakohtaiset standardit vaihtelevat suuresti. Tämän vuoksi opinnäytetyössä käytetään lähtökohtaisesti eurokoodin mukaisia ohjeistuksia.

Tarkoissa lujuuslaskelmissa kaikki kuormat lasketaan teräsrungolle ja liitokset suunnitellaan momenttijäykiksi. Perustuksen rakenne oletetaan myös tämän työn tarkasteluissa täysin jäykäksi. Momentit lasketaan neljälle kuormitustapaukselle käyttäen dynaamisuuskertoimia. Stabiliateettitarkastelussa ei huomioida rakenteen mallia, vaan tutkitaan staattisesti rakennetta vain voimien kautta ikään kuin ehjänä massiivikappaleena. Erilaisia varmuuskertoimia ja niiden vaikutusta on vertailtu tuloksissa.

Teräsrunko kasataan esivalmistetuista osista paikan päällä. Pilarit ja ylemmän konetason arina rakennetaan teräsprofiileista (IPE, HEB, HEM tai kotelopalkki) ja ne peitetään teräsrungon asentamisen jälkeen betonilla. Massiiviperustus toteutetaan paikalla valettuna teräsbetonirakenteena. Pilareiden liitos perustukseen toteutetaan peruspulttiliitoksena. Betoni toimii työskentelytasona, jäykistävänä elementtinä ja palosuojana. Massiivinen betonilaatta tuo myös koneperustukselle sen tarvitseman stabiloivan massan. Jos konetason teräspalkkien haluttaisiin toimivan liittorakenteena yhdessä betonin kanssa, olisivat teräspalkit tapitettava, jolloin voitaisiin ottaa myös betonin osuus huomioon laskuissa.

Massiiviperustuksen valussa on vältettävä betonin lämpötilan liiallista kohoamista sitoutumisvaiheen aikana. Tähän voidaan vaikuttaa esimerkiksi valitsemalla hitaasti sitoutuvaa sementtiä ja korvaamalla osa sementistä masuunikuonalla. Sementin määrää voidaan vähentää myös valitsemalla mahdollisimman jäykkä massa käyttämällä notkistinta.

4 KUORMITUKSET

4.1 Kuormat

Omapaino

Lasketaan jalustan omapainot.

$$G_{perustus} = 11,421 \text{ m} \cdot 7,034 \text{ m} \cdot 2,2 \text{ m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 4418,44 \text{ kN} \quad (9)$$

$$G_{ylempi\ laatta} = 11,421 \text{ m} \cdot 7,034 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2008,38 \text{ kN} \quad (10)$$

Lasketaan kokonaisomapaino lisäten laatan ja perustuksen painoon viiden prosentin lisä pilareista ja palkeista. Koneiden painot on esitetty taulukossa 1.

$$G_{op} = 1,05 \cdot (G_{perustus} + G_{ylempi\ laatta}) = 6748,17 \text{ kN} \quad (11)$$

Hyötykuorma

Tasojen hyötykuormaksi on määritelty 5 kN/m^2 . Hyötykuorma kahdelle tasolle:

$$Q_{hyöty} = 2 \cdot 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (12)$$

Koneiden dynaamiset kuormat

Laittevalmistajalta saadaan koneiden dynaamisten kuormitusten kertoimet z-akselin suuntaan ja vaakatasossa x- ja y- akseleiden suuntaan (taulukko 2). Vaakavoimien kerroin FDH pysyy samana eri tarkastelusuunnissa. Laskelmissa on huomioitava aina epäsuotuisamman vaikutuksen suunta. Kertoimilla on laskettu koneiden aiheuttamat momentit eri kuormitustapauksissa (liite 1). Dynaaminen kuorma saadaan kertomalla koneen oma paino taulukon 2 kertoimilla.

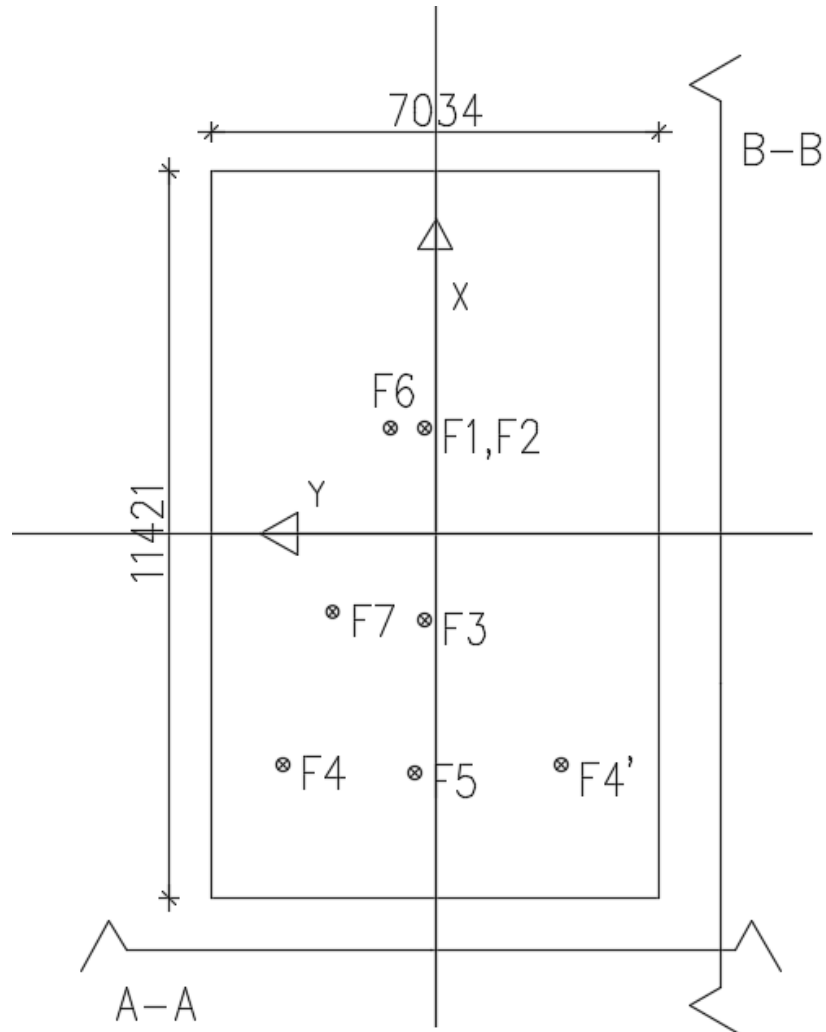
TAULUKKO 2. Koneiden dynaamisten kuormitusten kertoimet

	Kone	FDD kerroin alaspäin (-Z)	FDU kerroin ylöspäin (+Z)	FDH kerroin vaaka- suunnassa (+/-)
1	Heavy duty mixer	2,5	1,5	0,1
2	Feeding device	2,5	1,5	0,1
3	Gear box with oil	2,5	1,5	0,1
4	Main drive motor 1	5	5	0,1
4'	Main drive motor 2	5	5	0,1
5	Hydraulic unit	1	1	0
6	Extruder Convex	2,5	1,5	0,1
7	Temperature control unit	1	1	0,1

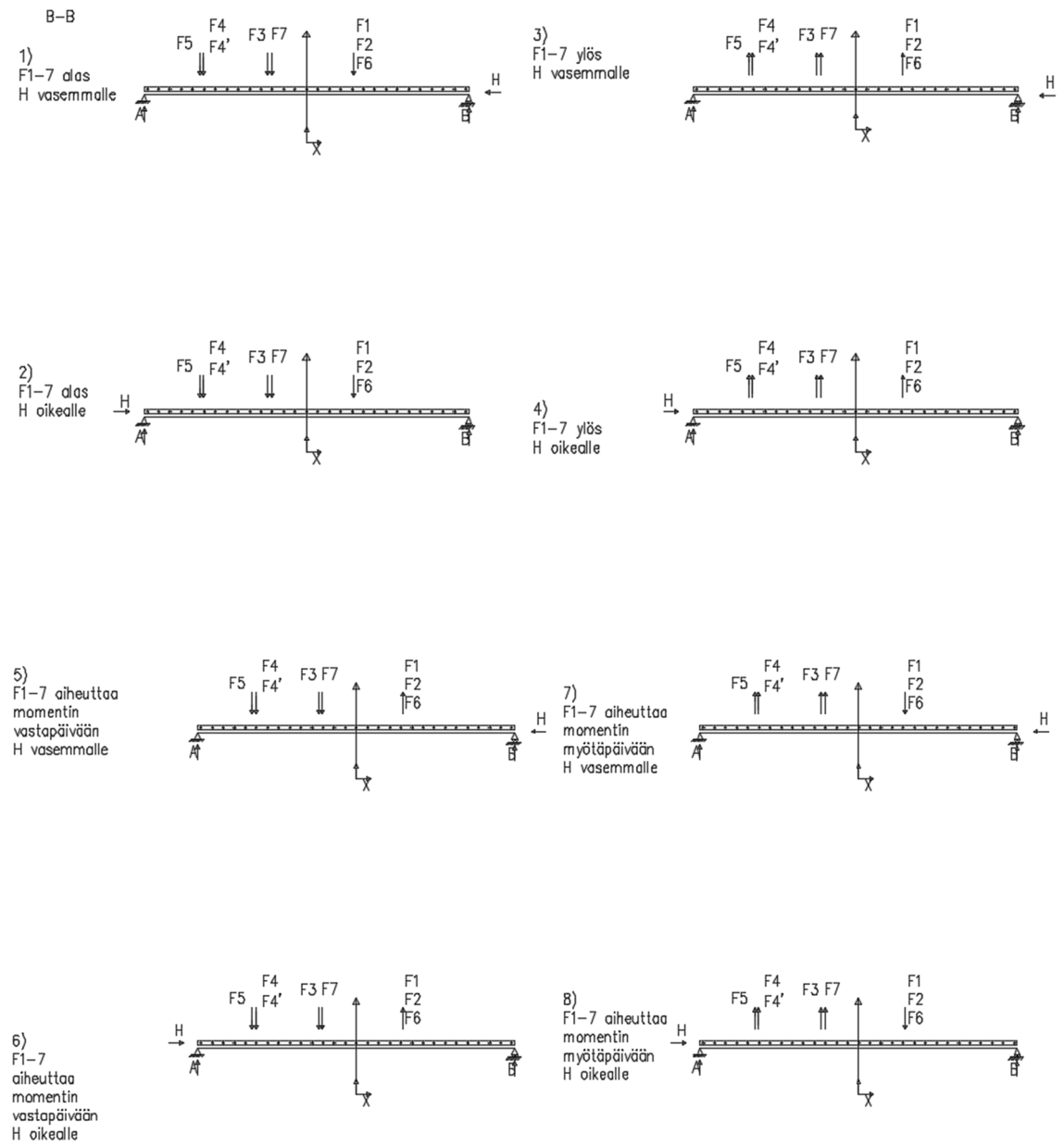
4.2 Kuormitusyhdistelmät

Voimakuvaajat

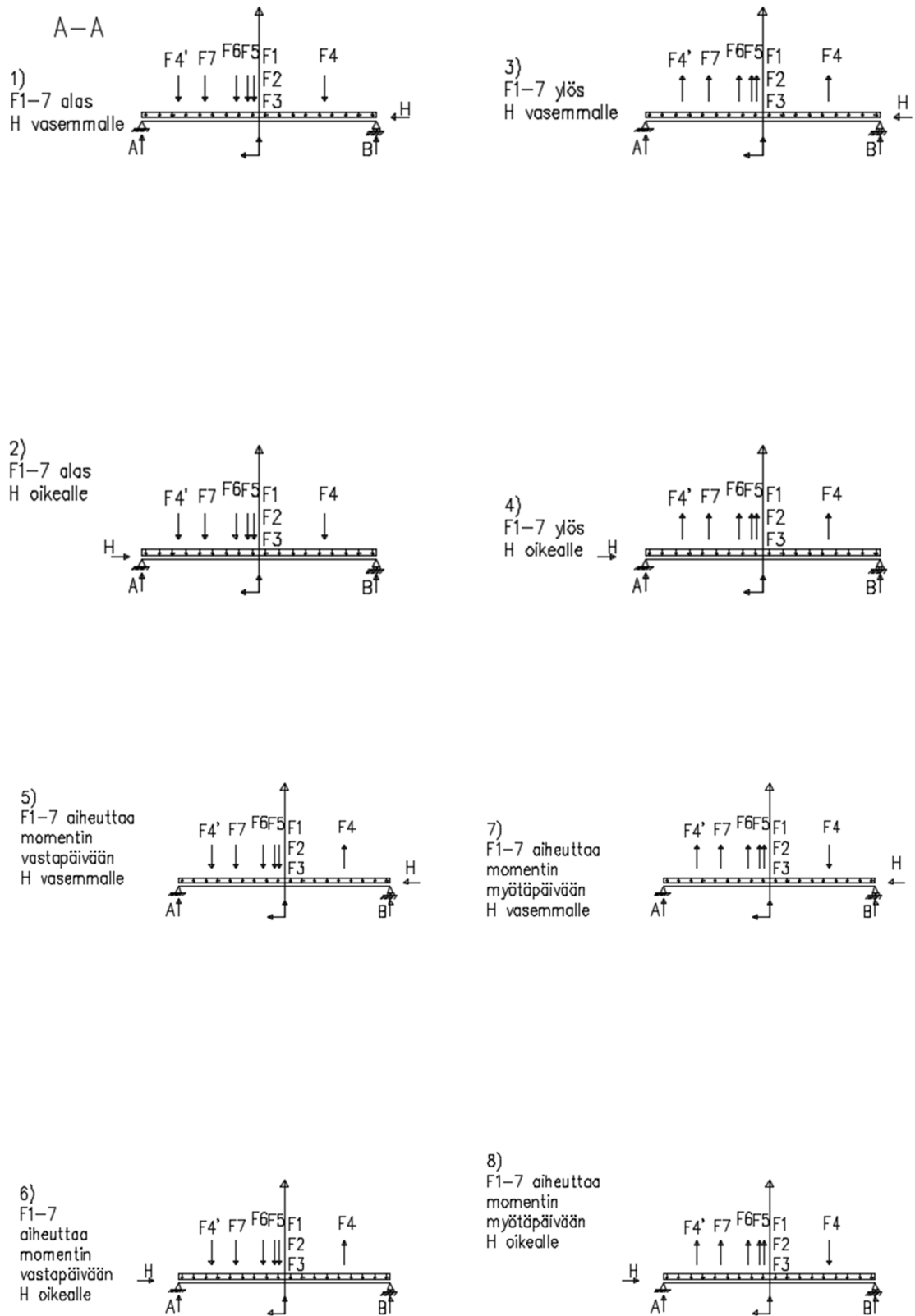
Jalustaa lähdettiin ensin tarkastelemaan kaksiulotteisena piirtäen voimat yksinkertaiseen staattiseen malliin. Mallit piirrettiin jokaiselle kahdeksalle tapaukselle, jotka muodostuivat, kun neljään eri vertikaalivoimien kuormitustapaukseen yhdistettiin horisontaalivoima molempiin suuntiin. Näin saatiin 16 kuvaajaa. Voimien ja kääntävien momenttien suunnat oli näin helpompi hahmottaa, kuten nähdään kuvista 22 - 24.



KUVA 22. Rakennemallien leikkaussuunnat



KUVA 23. Leikkaus suunnassa B-B: Voimat pidemmän sivun suunnassa



KUVA 24. Leikkaus suunnassa A-A: Voimat lyhemmän sivun suunnassa

Tarkasteltavat kuormitustapaukset

Laittevalmistajan ohjeen mukaan tarkasteltiin neljää kuormitusyhdistelmää dynaamisille pystysuuntaisille voimille lisäten jokaiseen myös vaakasuuntainen voima. Kuormitusyhdistelmät nähdään kuvassa 25, jossa on värein havainnollistettu z-akselin suuntaiset voimat, punaiset alaspäin ja vihreät ylöspäin. Horisontaaliset voimat aiheuttavat momentin vaarallisimpaan suuntaan kaikissa kuormitustapauksissa. Taulukossa 3 on esitetty dynaamisten rasiusten suuntia eri kuormitusyhdistelmissä.

KY1: Kone 4 pystyvoimat alaspäin, muiden koneiden dynaaminen kuorma nostava.

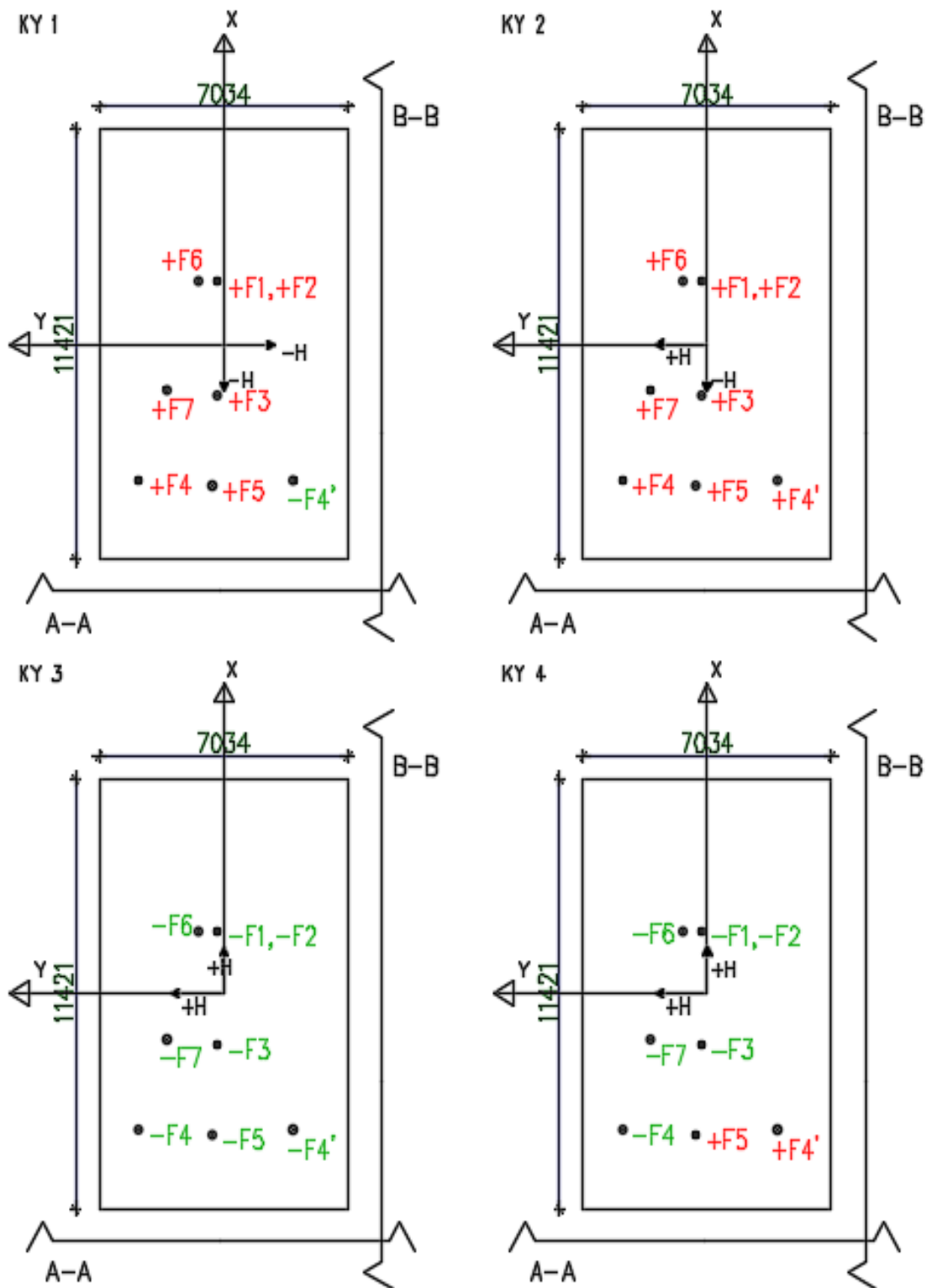
KY2: Kaikkien koneiden vertikaalivoimat nostavia.

KY3: Kaikkien koneiden vertikaalivoimat alaspäin.

KY4: Koneiden 4' ja 5 kuormat nostavia, muiden koneiden vertikaalivoimat alaspäin.

TAULUKKO 3. Koneiden vertikaalivoimien suunnat eri kuormitusyhdistelmissä

Kone	KY1	KY2	KY3	KY4
1	↑	↑	↓	↓
2	↑	↑	↓	↓
3	↑	↑	↓	↓
4	↓	↑	↓	↓
4'	↑	↑	↓	↑
5	↑	↑	↓	↑
6	↑	↑	↓	↓
7	↑	↑	↓	↓

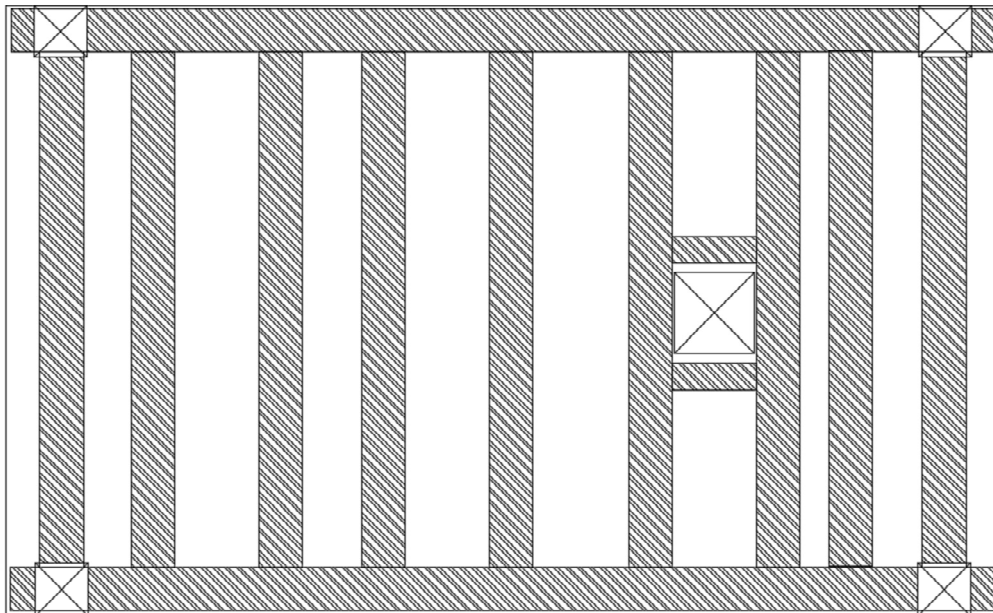


KUVA 25. Kuormitusyhdistelmät

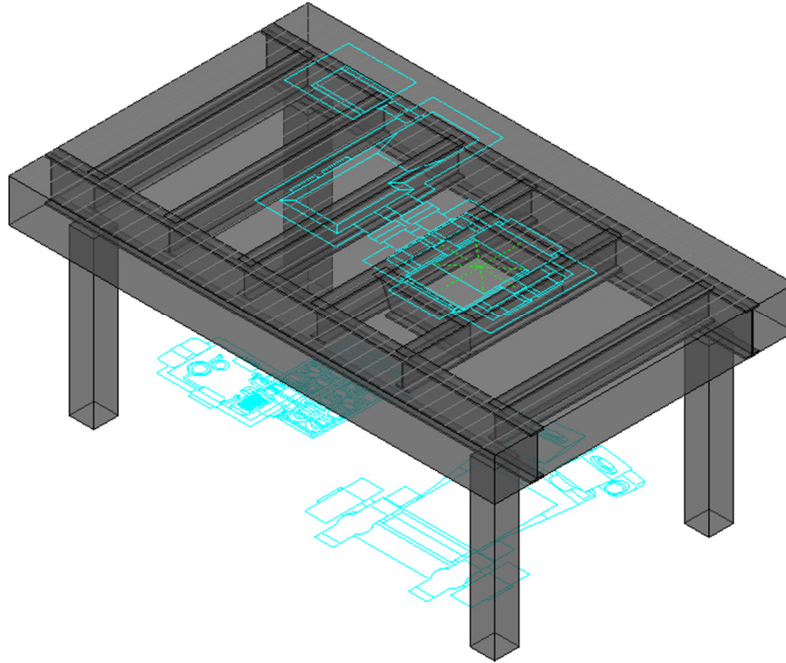
5 LASKENTA

5.1 Rakenne

Ylätason reunoilla pidemmän sivun suunnassa ovat pääkannattajat (esim. IPE tai kotelo-palkki), jotka siirtävät kuormat pilareille. Niiden väliin asennetaan kohtisuorassa suunnassa mitoituksen vaatima määrä sekundäärisiä kannatinpalkkeja. Aukon ympärille asennetaan palkit myös pidemmän sivun suuntaisesti sekä mahdollisesti myös muihin palkki-väleihin kuormien tasaamiseksi. Palkkien sijoittelun periaate nähdään kuvissa 26 ja 27. Liitokset ovat pulttiliitoksia. Rakenteen oletusmitat (7,034 m x 11,421 m) voidaan pyöristää (7,0 m x 11,4 m) laskujen oleellisesti muuttumatta.

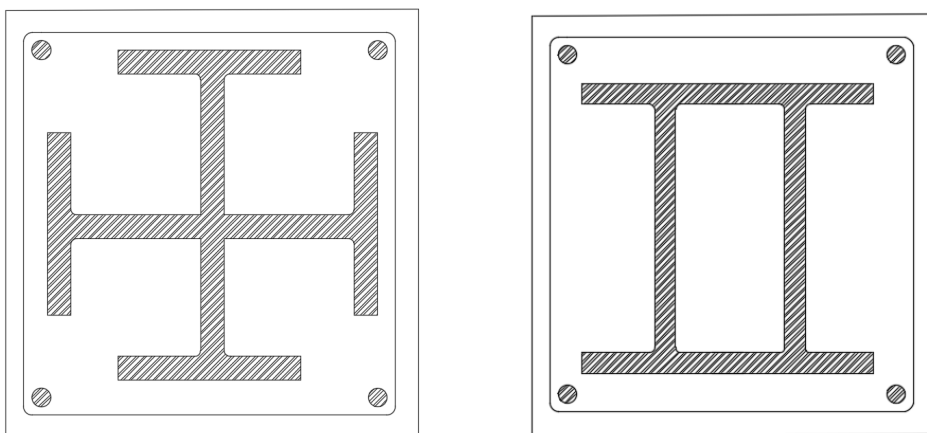


KUVA 26. Periaatekuva yläkerran palkkeista



KUVA 27. 3D periaatekuva konetasosta

Pilari on esisuunnitelmissa poikkileikkaukseltaan 600 mm x 600 mm. Pilarin sisällä on kahdesta teräsprofiilista ristiin hitsattu, tai laipoistaan yhteen hitsattu, kantava teräspilari (esim. HEB). Teräsrunko peitetään betonivalulla, johon asennetaan tarvittava määrä haakoja ja rakenneteräksiä. Esimerkkejä pilarin mahdollisesta poikkileikkausmallista on esitetty kuvassa 28.



KUVA 28. Esimerkkejä pilarin poikkileikkauksesta

5.2 Rakennuspohjan kestävyys (GEO)

5.2.1 Alkutarkistus

Arvioidaan aluksi perustuksen kokoa laskemalla yksinkertaisella menetelmällä perustuksen ja koneiden massojen aiheuttama jännitys ottamatta huomioon dynaamisia kuormia. Jännityksellä (P_d) on oltava riittävä varmuus kantokestävyyteen (P_{Rd}). Lasketaan pohjapaine kaavalla 13 ilman varmuuskertoimia.

$$P_d = \frac{G_{op} + G_{koneet}}{A} < P_{Rd} \quad (13)$$

$$P_d = \frac{6748,17 \text{ kN} + 1446,98 \text{ kN}}{7,034 \text{ m} \cdot 11,421 \text{ m}} = 102,01 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} < P_{Rd} = 210 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Käyttöaste 49 %

Koska käyttöaste jää noin puoleen sallitusta, voidaan jatkaa näillä perustuksen mitoilla tarkempiin tarkasteluihin.

5.2.2 Anturan alapinnassa vallitsevan pohjapaineen laskenta

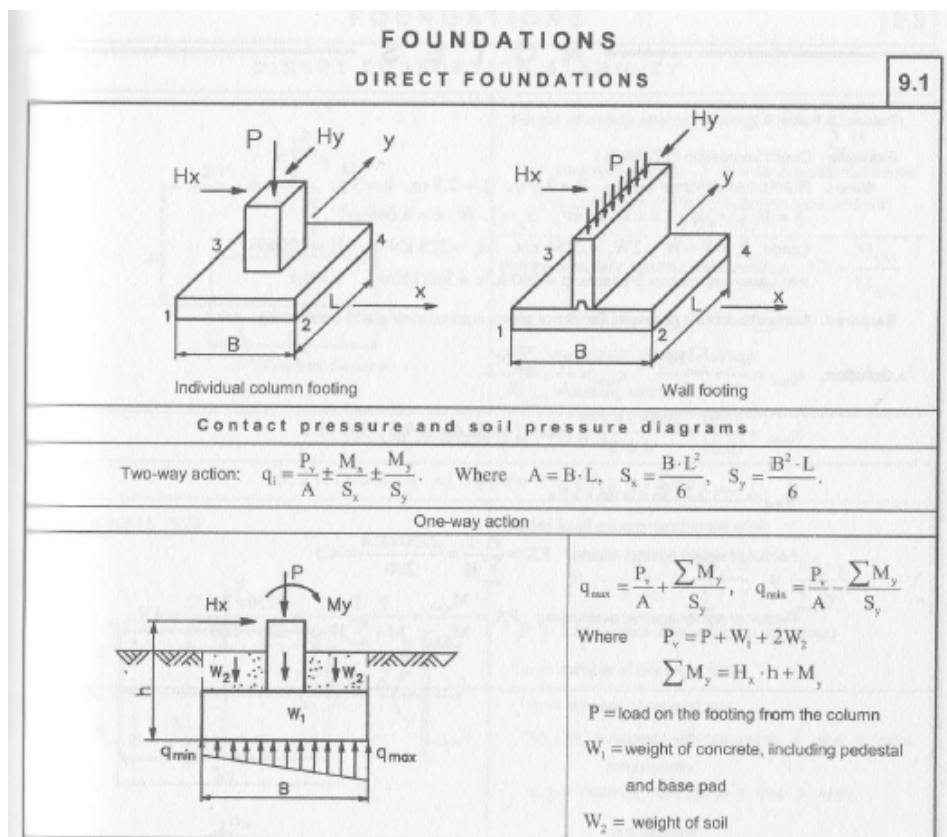
Kuormitusyhdistelmistä tehtiin laskentataulukot MS Excel-ohjelmalla. Näistä suurin pohjapaine saatiin yhdistelmästä 4. Mitoittavan kuormitusyhdistelmän laskentataulukot nähdään liitteestä 1. Kuormitusyhdistelmien 1 - 3 laskentataulukot on liitteessä 2.

Jännitys perustuksen alapinnan tasolla laskettiin kahdella tapaa. Kaava 14 on peräisin Mikhelsonin kaavakirjasta (kuva 29). Kaava 15 ottaa huomioon dynaamisten kuormitusten aiheuttamat momentit epäkeskisyyden kautta laskemalla perustukselle tehollisen pohjapinta-alan. Näistä saatuja arvoja vertailtiin eri varmuuskertoimien kanssa. Näin etsittiin sopivinta laskentakaavaa varmuuskertoimineen, mitä voitaisiin käyttää tulevaisuudessa vastaavien perustuksien esimitoituksessa. Muista kuormitusyhdistelmistä saadut arvot on

esitetty taulukossa 4. Tulokset on laskettu vain ominaisarvoina kaavalla 14. Laskentamenetelmä nähdään liitteen 1 laskentataulukossa (A).

TAULUKKO 4. Anturan pohjassa vallitsevan jännityksen ominaisarvot

KY1	$\sigma = 139 \frac{kN}{m^2}$
KY2	$\sigma = 109 \frac{kN}{m^2}$
KY3	$\sigma = 168 \frac{kN}{m^2}$
KY4	$\sigma = 204 \frac{kN}{m^2}$



KUVA 29. Pohjapaineen kaava 13 (Mikhelson 2004, 157)

$$\sigma = \frac{N_{total}}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y} < \sigma_{sall} \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{N_{total}}{A'} < \sigma_{sall} \quad (15)$$

Lasketaan taivutusvastus

$$W_y = \frac{BL^2}{6} = \frac{7,034 \text{ m} \cdot 11,421^2 \text{ m}}{6} = 152,9183 \text{ m}^3 \quad (16)$$

$$W_x = \frac{LB^2}{6} = \frac{11,421 \cdot 7,034^2}{6} = 94,1798 \text{ m}^3$$

Liitteen 1 taulukoissa on käytetty viittä erilaista varmuuskerroinyhdistelmää:

- A) Kaikki kuormat ominaisarvoina (kaava 14).
- B) Pysyvät kuormat (kaava 14)
 - edulliset kuormat kertoimella 0,9
 - epäedulliset kuormat kertoimella 1,1
 - hyötykuorma kertoimella 1,5.
- C) Pysyvät kuormat (kaava 15)
 - edulliset kuormat kertoimella 0,9
 - epäedulliset kuormat kertoimella 1,1
 - hyötykuorma kertoimella 1,5.
- D) Koneiden painot kertoimella 1,35 ja hyötykuorma kertoimella 1,5 (kaava 15).
- E) Pysyvät kuormat kertoimella 1,15 ja hyötykuorma kertoimella 1,5 (kaava 14), varmuuskertoimet vasta laskun lopussa.

5.2.3 Epäkeskisyys

Lasketaan efektiivinen pohjapaine kuormitusyhdistelmälle 4 tapauksissa C ja D epäkeskisyyden kautta. Epäkeskisyys ei saisi olla suurempi kuin 1/3 anturan leveydestä. Kuvassa 30 tätä kuvataan ellipsinmuotoisella alueella. Jos taas kuormaresultantti sijaitsee vinoneliön alueella, anturan koko pohjan ala on puristettu. (RIL 207–2009, 110.)

$$e_L = \frac{M_{ed,y}}{N_{ed}} \quad (17)$$

$$e_B = \frac{M_{ed,x}}{N_{ed}} \quad (18)$$

$$B' = 7,034 \text{ m} - 2 \cdot e_B \quad (19)$$

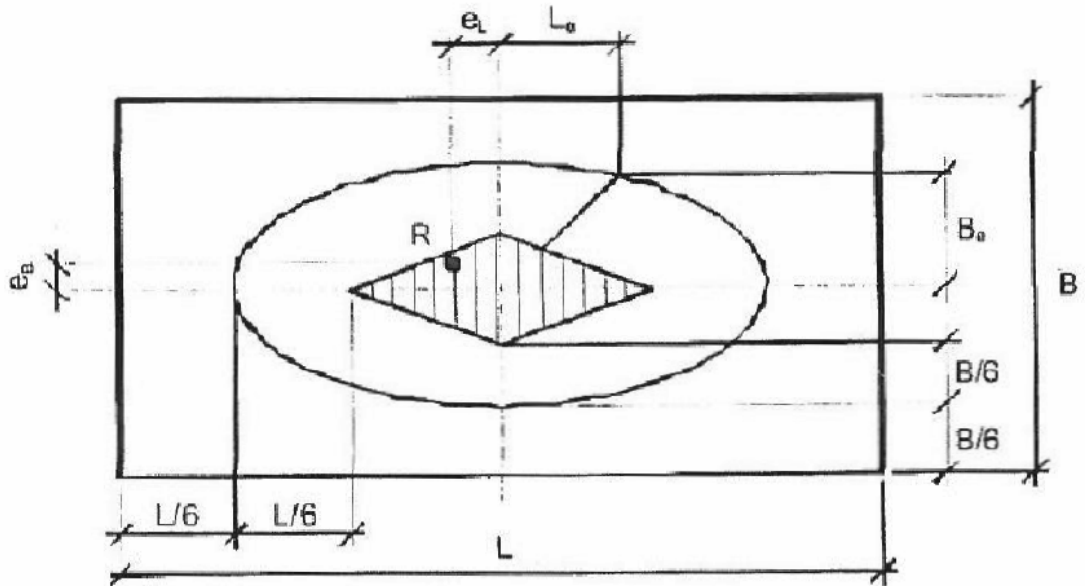
$$L' = 11,421 \text{ m} - 2 \cdot e_L \quad (20)$$

$$A' = B' \cdot L' \quad (21)$$

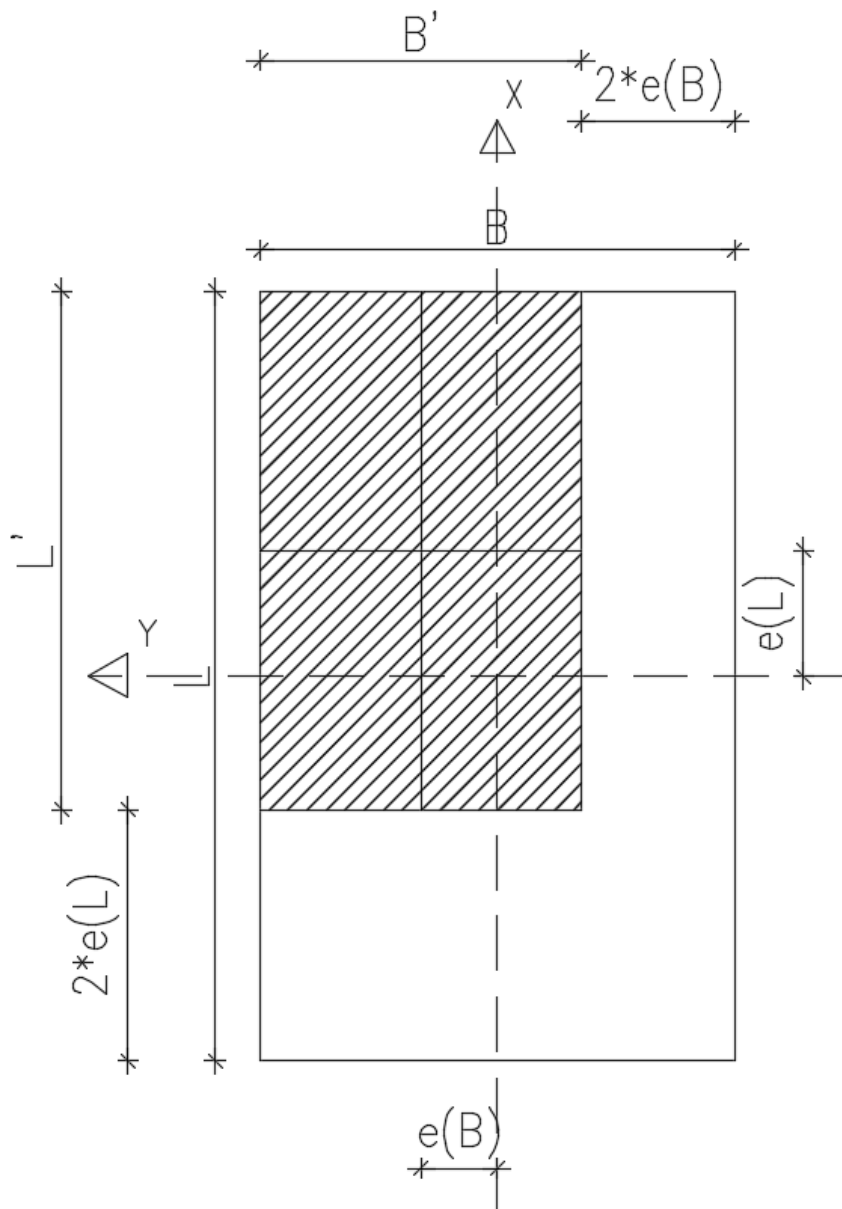
jossa,

e_L, e_B	epäkeskisyys (m)
$M_{ed,y}$ ja $M_{ed,x}$	mitoitettavat momentit (kNm)
N_{ed}	pystyvoimien summa (kN)
B'	efektiivinen leveys (m)
L'	efektiivinen pituus (m)
A'	efektiivinen pohjapaineen pinta-ala (m ²)

Laskut epäkeskisyyksistä on esitetty liitteessä 1. Jokaisessa tapauksessa arvot olivat niin pieniä, että voidaan olettaa koko pohjan pinta-alan olevan puristettuna. Maksimi epäkeskisyydeksi saatiin $eL = 0,49$ m (tapaus D). Kaavojen 17 - 21 termit nähdään kuvassa 31. Perustuksen suuren massan ja pienten epäkeskisyyksien vuoksi missään tarkastelutilanteessa ei syntynyt vetoa perustuksen reuna-alueille.



KUVA 30. Epäkeskisyyden merkinnät (RIL 207–2009, 110)



KUVA 31. Voimien epäkeskisyys tehollisen pinta-alan laskennassa

5.3 Stabiliateetti (EQU)

5.3.1 Kaatuminen

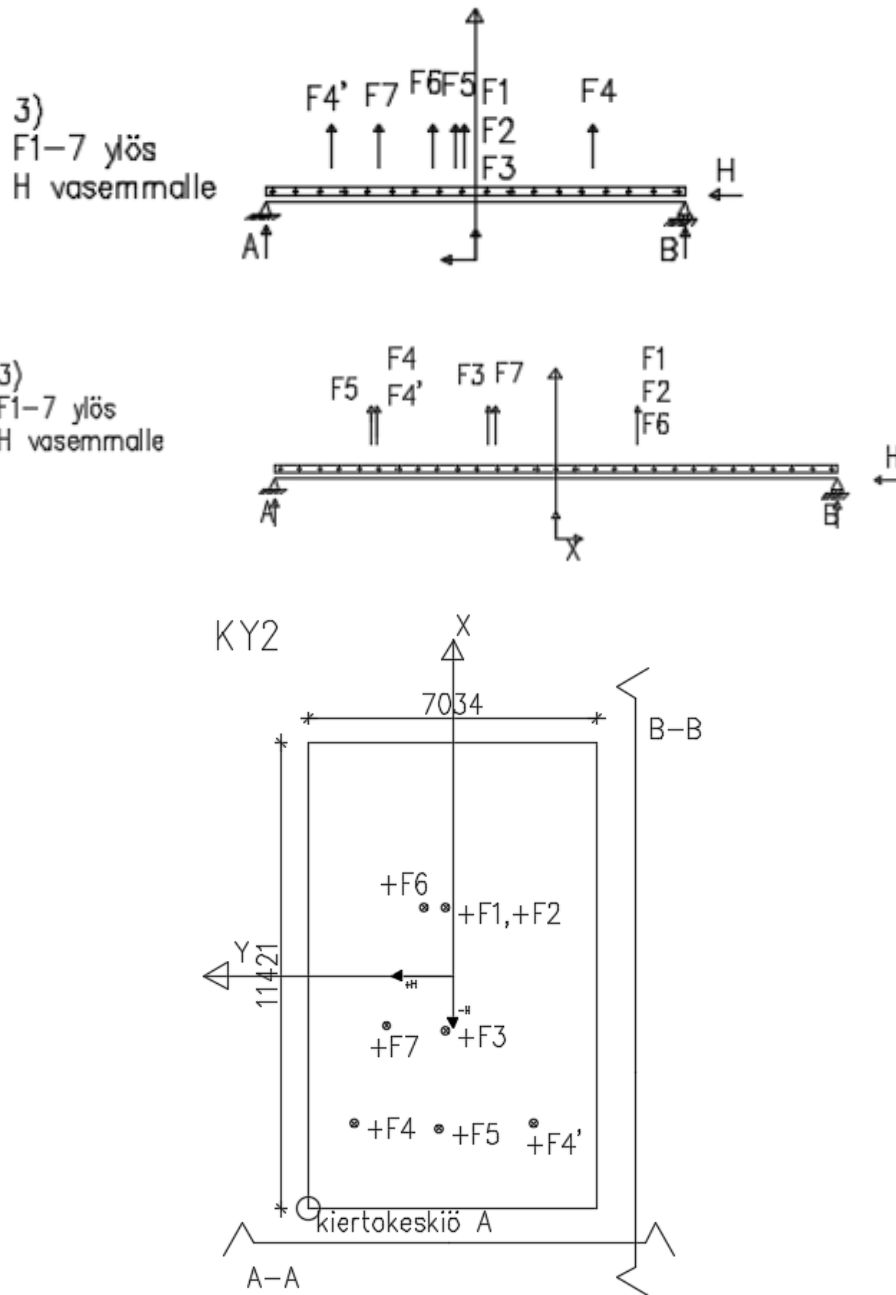
Rakenteen staattisen tasapainon rajatilaa tarkasteltaessa tulee osoittaa, että tasapainoa heikentävien kuormien vaikutusten mitoitusarvo on pienempi kuin sitä parantavien kuormien vaikutusten mitoitusarvo. Tässä tarkastellaan tasapainoa vain staattisesti voimien kautta.

Tarkastellaan kuormitusyhdistelmää 2, koska siinä stabiloivien pystykuormien summa on pienin. Stabiloivana kuormana huomioidaan vain rakenteen oma paino. Kaatavina voimina ovat kaikkien koneiden pystyvoimat ylöspäin sekä vaakavoimat. Käytetään kuormien osavarmuuslukuina kuvan 32 arvoja. Kiertokeskiönä on piste A (kuva 33). Laskentamenetelmä on esitetty taulukossa 5. Koneperustuksen voidaan todeta säilyvän tasapainossa.

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{G,dst}$	1,1 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen ^a	$\gamma_{Q,dst}$	1,5 K_{FI}
Edullinen ^b	$\gamma_{Q,stb}$	0

^a Kaatava kuorma
^b Vakauttava kuorma

KUVA 32. Kuormien osavarmuusluvut staattisessa tasapainorajatilassa EQU (RIL 207–2009, 47)



KUVA 33. Staattiset mallit

5.3.2 Liukuminen

Tarkistetaan liukumisen varmuuskerroin kaavalla 22 kuormitusyhdistelmälle 2, koska siinä stabiloivien pystyvoimien summa on pienin. Kuormitukset nähdään taulukosta 6, jotka ovat laskentataulukossa liitteen 2 sivulla 2. Arvoissa ei ole käytetty varmuuskertoimia. Voidaan todeta rakenteella olevan riittävä varmuus liukumiselle.

TAULUKKO 6. Kuormitusyhdistelmän 2 rasitukset

H _{max}			141,7545	kN
N _{max,down=}			0,00	kN
N _{max,up=}			2595,73	kN
M _{max,x=}	MxGdown+MxGup-MhGx		-1705,51	kNm
M _{max,y=}	MyGdown+MyGup+MhGy		1024,28	kNm
N _{total=}	N _{max,down=} +Gop		6748,17	kN
A	7,034	11,421	80,34	m ²

Varmuuskerroin (F_f) liukumiselle Mikhelsonin mukaan:

$$F_f = \frac{N_{total} \cdot f}{H_{max}} = \frac{6748 \text{ kN} \cdot 0,2}{142 \text{ kN}} = 9,5 \quad (22)$$

jossa;

f = kitkakerroin perustuksen alapinnassa (epäsuotuisin kun, $0,2 < f < 0,5$)

N_{total} = pystyvoimien summa

H_{max} = vaakavoimien summa

6 TULOKSET

Hyötykuorman osuus verrattuna muihin rasituksiin on pieni (5 %), joten sen huomioimatta jättäminen muuttaisi laskennan tuloksia vain 10 kN/m². Epäkeskisyyys kaikissa kuormitusyhdistelmissä jäi alle 0,5 metrin, joka on noin 7 % lyhemmän sivun pituudesta, joten on turvallista olettaa koko perustuksen pohjan alan olevan puristettuna. Myöskään perustuksen ulkomittojen pyöristäminen 100 mm tarkkuuteen ei vaikuta tuloksiin merkittävästi (noin 0,1 % vaikutus pohjapaineeseen).

Perustuksen stabiileittitarkastelussa todettiin rakenteella olevan riittävä varmuus sekä kaatumista että liukumista vastaan. Taulukosta 7 nähdään eri kuormitusyhdistelmistä saadut suurimmat rasitusten arvot rakennuspohjan kestävyuden tarkastelussa. Pohjapaineen käyttöasteeksi on saatu 97,5 % ominaisarvoilla.

TAULUKKO 7. Suurimmat kuormitukset ominaisarvoilla (A)

	KY		
N_{up}	2	2595,7	kN
N_{down}	3	3841,6	kN
H_{max}	1 - 4	141,8	kN
$M_{x,max}$	4	3470,2	kNm
$M_{y,max}$	4	4625,1	kNm
σ_{max}	4	204,5	kN/m ²
σ_{sall}		210	kN/m²

Liitteen 1 taulukoiden eri varmuuskertoimia vertailemalla voidaan todeta, että varmuuskertoimien lisääminen vasta lopussa (tapa E) kasvattaa saatavia pohjapaineen arvoja liki neljänneksen. Tämä tapa tuottaa luultavasti epätaloudellisimman ratkaisun ja laskujen virhemarginaali on hyvinkin suuri. Tapa ei myöskään tuo varmuutta momenttien arvoihin, vaan pelkästään pystykuormille, ollen näin epäluotettava ja vääristävä.

Jos käytetään momenttien kautta laskettua epäkeskisyyttä ja kaavaa 15 (tapa C), voidaan todeta arvon olevan taulukon pienin jopa varmuuskertoimien kanssa. Koska luvussa 5.2.3 todettiin koko perustuksen pohjan alan olevan puristettuna, en pidä efektiivisen pinta-alan kautta laskettuja tuloksia luotettavina sen pienentäessä pohjapainetta yli 16 % verrattuna ominaisarvoihin. Varmuuskertoimella 1,35 (tapa D) kerrotut koneiden painot tuottaa sekin pienemmän arvon kuin tapa A. Ilman kertoimia kaavalla 15 ominaisarvoksi saatiin 166,6 kN/m². Suuren erotuksen takia ei ole suositeltavaa käyttää kyseistä kaavaa esisuunnitteluvaiheen tarkasteluissa.

Luvussa 5.2.2 on selitetty eri varmuuskertoimien laskentatavat.

TAULUKKO 8. Yhteenveto liitteen 1 tuloksista

	σ (kN/m ²)	
A	204,5	ominaisarvot
B	218,2	
C	171,4	Pienin arvo, varmuuskertoimien kanssa jää alle ominaisarvojen
D	191,4	
E	250,5	Suurin arvo, yli 20 % muutos ominaisarvoon nähden

Jos käytetään varmuuskertoimia tavan B mukaan, saadaan arvoihin noin 7 % ”puskuria”. Kuitenkin tässä tapauksessa verrattiin suoraan ominaisarvoa sallittuun pohjapaineeseen. Tutkimuksen tarkkuus varmistuneekin myöhemmin, kun saadaan tarkan analyysimallin tulokset.

Tarkasteltiin taulukolla myös vaihtoehtoa, jossa moottorit (4 ja 4') korvaa yksi tehokkaampi moottori. Tämä muuttaa myös vaihdelaatikon kokoa ja painopistettä. Sekä pohjapaine että kaatumisen varmuuskerroin pysyvät sallituissa arvoissa. Tulokset olivat noin 6 % pienempiä kuin alkuperäisen kokonaisuuden tarkasteluissa.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön aihealue ei suoranaisesti kuulu insinööri (AMK) –koulutukseen. Tämä toikin haastetta mm. tiedonhakuun ja aiheen rajaamiseen. Koneperustuksesta saisi monimutkaisena rakenteena useitakin tutkimusaiheita, mutta aiheen haastavuuden vuoksi monet soveltuisivat paremmin alan DI-tutkinnon lopputyöksi. Työlle asetetut tavoitteet kuitenkin mielestäni saavutettiin. Laskentapohjasta saadaan jatkossa muunneltua versioita muille tyypillisille koneyhdistelmille vastaavilla perusteilla.

Työllä haettiin menetelmiä koneperustuksen esisuunnitteluvaiheeseen alustavien mittojen selvittämiseksi. Näillä yksinkertaistetuilla tarkastelumenetelmillä tehtyjen tutkimusten tuloksena koneperustusta voidaan alkaa alustavasti suunnittelemaan arvioiduilla lähtömitoilla perustuksen säilyttäessä vakavuutensa. Koska esisuunnitteluvaiheessa ei edes koneiden tarkkoja malleja ole lyöty lukkoon, on kaikki tässä vaiheessa tehty mitoitus vain suuntaa antavaa ja tarkistettava myöhemmin. Koneiden sijainnit saattavat vielä muuttua jonkin verran, joten on stabiliteettikin tarkastettava uudelleen painopisteiden siirtyessä. Tarkempi analyysi on aina tarpeen suurten kuormitusten monimutkaisissa laskennoissa, jotta vältetään liioitellulta ylimitoittamiselta. Kyseessä oleva rakenne on kuitenkin suhteellisen pieni osa rakenteilla olevaan tehdaskompleksiin, joten siitä ei aiheudu merkittäviä taloudellisia kustannuksia, vaikka rakenteelle mitoitettu käyttöaste olisi optimaalista hieman alhaisempi.

Värähtely on matemaattisena aiheena laaja, ja siihen oli haasteellista löytää sovellusohjeita nimenomaan koneperustusten värähtelyn näkökulmasta. Värähtelyn yhtälö riippuu mm. vapausasteiden määrästä, vaimennuksesta sekä värähtelyn lineaarisuudesta. Epälineaaristen differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseksi on käytettävä likimääräismenetelmiä. Jos siirtymien ja nopeuden amplitudit ovat kyllin pieniä, voidaan näitäkin arvioida lineaarisilla funktioilla. Vain lineaarisia, yhden tai kahden vapausasteen yhtälöitä voidaan suhteellisen vähällä vaivalla ratkoa käsin, ja saada täten alustavaan mitoitukseen riittävät parametrit.

Tarkoituksena oli vertailla yksinkertaistetulla menetelmällä laskettuja arvoja tarkkaan analyysiin, mutta se rajattiin työn ulkopuolelle, koska lähtötiedot ja laskelmat paikalliselta insinööritoimistolta viivästyivät. Laskentataulukon avulla kuitenkin tarkasteltiin

myös toisen vastaavan koneperustuksen stabiliteettia. Lopputuloksena päätettiin tehdä molemmat perustukset konetasoiseen samoilla rakenneratkaisuilla vain pienten eroavaisuuksien ja taloudellisuuden vuoksi. Samanlaiset perustukset ovat helpompi toteuttaa työmaalla, kun työohjeet pysyvät yhtenäisinä.

Jos perustuksen käyttöasteet joltain tarkastelun osalta olisivat ylittyneet, olisi ollut syytä tutkia erilaisia ratkaisumenetelmiä ongelmaan. Sallitun pohjapaineen ylittyessä voisi harkita paaluperustusta vaihtoehtona perustuksen koon kasvattamiselle, koska tässä kohteessa ympäröivät rakenteet estävät perustuksen pinta-alan suurentamisen. Vaakavoimista johtuen paaluja olisi lyötävä myös vinokulmassa perustukseen nähden. Jos FEM-mitoituksessa dynaamiset rasitukset aiheuttaisivat kriittisen momentin teräsrungon liitoksiin, rakennetta voitaisiin jäykistää esim. vinositeillä. Pilareiden yläpään liitoskohtaa laataan voitaisiin vahvistaa vinotuilla. Hyviä aiheita jatkotutkimuksiin olisivat sekä värähtelyn että maanjäristyksen aiheuttamat rasitukset ja näille voimille rakenteiden mitoittaminen. Laskentataulukkoa voidaan muokata jatkossa ottamaan huomioon myös maapohjan parametrit.

LÄHTEET

Aalto-yliopisto. Luentomateriaali. Luento 10.2. Koneperustuksen rungon osana, nosturi-kuormat ja rungon värähtelyn hallinta. Luettu 28.1.2016.

<https://mycourses.aalto.fi/mod/resource/view.php?id=49010>

Bhatia, K.G. 2008. Foundations for industrial machines and earthquake effects. ISET Journal of Earthquake Technology 45 (1-2), sivut 13-29.

BSW Berleburger Schaumstoffwerk GmbH. 2014. Vibration isolation of machine foundations. Luettu 31.3.2016. <https://www.berleburger.com/en/products/impact-sound-insulation-vibration-isolation/vibration-isolation-of-machine-foundations/>

Farrat Engineering Excellence. 2016. Luettu 30.3.2016. <http://www.farrat.com/resources/active-passive-shock-vibration-isolation>

Hakulinen, M. TkL. Maa- ja kalliodynamiikan perusteet. Tärinän siirtyminen rakenteisiin. TTY luentomateriaali. 19 s.

Hakulinen, M. TkL. 2011. Rakenteiden dynamiikan perusteet. 57 s.

Hoogenboom, P.C.J., van Koten, H. 2012. Vibrations of machine foundations and surrounding soil. Heron Journal 57 (1), 54 s.

Hurme, I. 2012. Asuinkerrostalojen värähtelytarkastelut liikennetärinäalueella. Saimaan ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus. 1969. Koneiden perustusten suunnittelu. Julkaisu 23-69. 300. painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus. 1983. Koneperustukset. Julkaisu 6-83. 100. Painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus. 1984. Koneperustukset. Julkaisu 22-84. 25. Painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.

Kinetics Noise Control, Inc. 2016. Luettu 30.3.2016. <http://www.kineticsnoise.com/seismic/fhs.html>

Luukkonen, S. 2010. Laattaperustuksen maajousien määrittäminen. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Mikhelson, I. 2004. Structural Engineering Formulas. USA: The McGraw-Hill Companies.

Smith, J.W. 1988. Vibration of Structures. Applications in civil engineering design. Iso-Britannia: Chapman and Hall.

Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 2009. RIL 207-2009. Geotekninen suunnittelu. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Talja, A., Törnqvist, J. 2006. Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa. Tutkimusraportti. 80 s. Espoo: VTT.

Tampereen teknillinen yliopisto. 2005. Rasitus. Verkkosivut. Luettu 28.1.2016.
http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_1.php

TEKES. VÄRE – Värähtelyn ja äänen hallinta –teknologiaohjelma 1999-2002. Teknologiaohjelmaraportti 3/2003. Helsinki: Paino-Center-Oy.

Teräsrakenneyhdistys ry. (n.d.) Teräsrakenteiden maanjäristysmitoitus. Luettu 28.1.2016. http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/118/19c1dc0/jalkanen_terasrakenteiden_maanjristysmitoitus.pdf

Vibrodynamics LLC. 2016. Luettu 30.3.2016. <http://www.vibrodynamics.com/english/sprng-vsc.html>

LIITTEET

Liite 1. Laskentataulukot kuormitusyhdistelmälle 4.

1 (5)

(kN, m)	koordinaatit	etaisyys (m)	Vertikaali alas kN			Vertikaali ylös kN			Horisontaali kN	Momentti vertikaalivoimat alas (kNm)			Momentti vertikaalivoimat ylös (kNm)			Momentti (X tai Y-suuntaan) horisontaalivoimat (±) (kNm)
			W	FDD	W*FDD	W*FDD	FDD	W*FDD		FDU	W*FDD	FDH	W*FDD	W*FDD*X'	MxGup=W*FDD*Y'	
MACHINE X'	Y'	Z' +2.2	W (kN)	FDD	W*FDD	W*FDD	FDU	W*FDD	FDH	W*FDD	MxGdown=W*FDD*Y'	MyGdown=W*FDD*X'	MxGup=W*FDD*Y'	MyGup=W*FDD*X'	$\pm Mh_{G_{x,y}} = W*FDH*(Z+2.2)$	
1-mixer	1,672	0,168	412,02	2,5	1 1030,05	1,5	0	0 0,1	41,202	1 173,0484	1 1722,244	1	0	1	296,6544	
2-feeding c	1,672	0,168	7,200	2,5	1 343,35	1,5	0	0 0,1	13,734	1 57,6828	1 574,0812	1	0	1	98,8848	
3-gearbox	-1,353	0,168	7,800	2,5	1 465,975	1,5	0	0 0,1	18,639	1 78,2838	1 -630,4642	1	0	1	145,3842	
4- motor	-3,618	2,418	7,900	5,0	1 328,635	5,0	0	0 0,1	6,5727	1 794,63943	1 -1189,001	1	0	1	51,92433	
4'- motor	-3,618	-1,982	7,900	5,0	0	5,0	1	328,635	0,1	6,5727	1	0	1	651,3546	1 51,92433	
5-hydraulic	-3,745	0,327	7,100	1,0	0	0	1	29,43	0,0	0	1	0	1	-9,62361	1 110,2154	
6-convex 2	1,672	0,701	2,200	2,5	1 1275,3	1,5	0	0 0,1	51,012	1 893,9853	1 2132,302	1	0	1	112,2264	
7- TUC	-1,221	1,615	2,200	1,0	1 40,221	1,0	0	0 0,1	4,0221	1 64,956915	1 -49,10984	1	0	1	8,84862	
Σ					3483,53			358,07	141,75	2062,60	2560,05	641,73	1299,22	765,85		
N _{max,down} =			3483,53	kN												
N _{max,ups}			358,07	kN												
M _{max,x}	MxGdown+MxGup+MhGx		3470,17	kNm												
M _{max,y}	MyGdown+MyGup+MhGy		4625,11	kNm												
N _{total}	N _{max,down} +Gop		10231,70	kN												
A	7,034	11,421	80,34	m2												
W _x	$\frac{LB^2}{6}$		94,1798	m3												
W _y	$\frac{BL^2}{6}$		152,9183	m3												
δ ₁ =N _{total} /A +Q			137,3623873	kN/m2												
δ ₂ = Mx/Wx			36,84627367	kN/m2												
δ ₃ = My/Wy			30,24565937	kN/m2												
Jalustan oma paino																
Yliätaso h	1 (m)															
Alataso h	2,2 (m)															
teräsbetoni	25 kN/m3															
Gper	4418,442 kN															
Gtaso	2008,383 kN															
Gop	5% 6748,1664 kN															
Qhyöty	10 kN/m2															

A) Kuormitusyhdistelmä 4 pysyvät kuormat ja hyötykuorma ominaisarvoilla

tarkistetaan e, max (1/6)

< 1,1723333 ok

< 1,9035 ok

(kN, m)	koordinaatit	B) Kuormitusyhdistelmä 4 pysyvät kuormat (edull. 0,9 epäedull. 1,1) ja (1,5Q) hyötykuorma										Momentti (X tai Y-suuntaan)			Momentti (X tai Y-suuntaan) horisontaalivoimat ylös mat (±) (kNm)
		etaisyys (m)		Vertikaali alas kN		Vertikaali ylös kN		Horisontaali kN		Momentti vertikaalivoimat alas (kNm)			Momentti vertikaalivoimat ylös (kNm)		
	Y'	Z' +2,2	W (kN)	FDD	W*FDD	FDU	W*FDU	FDH	W*FDH	MxGdown= W*FDD*Y'	MyGdown= W*FDD*X'	MxGup= W*FDU*Y'	MyGup= W*FDU*X'	±MhG _{x,y} = W*FDH* (Z'-2,2)	
MACHINE X'															
1-mixer	1,672	0,168	7,200	2,5	1 1133,055	1,5	0	0,1	45,3222	1 190,35324	1 1894,468	0	0	1 326,3198	
2-feeding	1,672	0,168	7,200	2,5	1 377,685	1,5	0	0,1	15,1074	1 63,45108	1 631,48932	0	0	1 108,7733	
3-gearbox	-1,353	0,168	7,800	2,5	1 419,3775	1,5	0	0,1	16,7751	1 70,45542	1 -567,4178	0	0	1 130,8458	
4-motor	-3,618	2,418	7,900	5,0	1 295,7715	5,0	0	0,1	5,91543	1 715,17549	1 -1070,101	0	0	1 46,7319	
4'- motor	-3,618	-1,982	7,900	5,0	0	0	0	0,1	7,2997	1 0	0	1 716,49	1 1307,902	1 57,11676	
5-hydrauli	-3,745	0,327	7,100	1,0	0	0	0	0,1	0	1 0	0	1 -10,58597	1 121,2369	1 0	
6-convex	1,672	0,701	2,200	2,5	1 1402,83	1,5	0	0,1	56,1132	1 983,38383	1 2345,5318	0	0	1 123,449	
7- TUC	-1,221	1,615	2,200	1,0	1 36,1989	1,0	0	0,1	3,61989	1 58,461224	1 -44,19886	0	0	1 7,963758	
Σ					3664,92				150,08	2081,28	3189,77	705,90	1429,14	801,20	
N _{max,down} =															
N _{max,up} =															
M _{max,x} =															
M _{max,y} =															
N _{total} =															
A	7,034	11,421													
W _x	$\frac{I B^3}{6}$														
W _y	$\frac{B I^3}{6}$														
δ ₁ =N _{total} /A +Q															
δ ₂ = M _x /W _x															
δ ₃ = M _y /W _y															
Jalustan oma paino															
Ylätaso h		1 (m)													
Alataso h		2,2 (m)													
teräsbetoni		25 kN/m ³													
Gper															
Gtaso															
Gop															
Qhyöty															
1,5*Q															

tarkistetaan e_{max} (1/6)

< 1,1723333 ok

< 1,9035 ok

6,35007 m

10,48796 m

0,341965 m

0,466522 m

6,35007 m

10,48796 m

4418,442 kN

2008,383 kN

6748,1664 kN

10 kN/m²

15 kN/m²

