

Diplomityö

Paalutuskohteen työalustan laskennallinen mitoittaminen ja laadunvalvonta työmaaolosuhteissa

Kaisla Kivistö, 1.4.2026, Paalutuskoulutuspäivä

Työn taustaa

- Diplomityö tehtiin GeoPro Consulting Oy:ssä Paalutustoimikunnan tilauksesta
- Työn rahoittivat SGY, Väylävirasto, Betoniteollisuus ry sekä GeoPro Consulting Oy
- Diplomityön tarkoitus oli toimia esiselvitystyönä tulevaa Paalutusohjeen RIL254-2016 päivitystä varten paalutustyöalustojen osalta

Työn tutkimuskysymykset

- Miten paalutustyöalustoja tällä hetkellä suunnitellaan Suomessa sekä muualla maailmassa?
- Millaisilla laskentamenetelmillä paalutustyöalustoja voidaan mitoittaa ja miten nämä menetelmät soveltuvat käytettäväksi Suomen pohjaolosuhteissa?
- Miten paalutustyöalustan laatu tulisi varmistaa työmaaolosuhteissa?

Työalustan tarkoitus

- Työalusta vastaanottaa paalutuskalustosta aiheutuvia kuormia estäen heikkoa pohjamaata pettämästä kaluston alta
- Paalutuskoneen kaatuminen on yksi suurimmista paalutustyön työturvallisuuden vaaratekijöistä
→ pahimmassa tapauksessa seurauksena voi olla materiaalivahinkojen lisäksi myös henkilövahinkoja
- Laadukas työalusta myös vähentää riskiä esim. kompastumiseen tai liukastumiseen työmaalla
- Lisäksi alusta tarjoaa kuivan ja siistin työympäristön lisäten paalutustyön tehokkuutta
- Tässä työssä tarkastelu rajattiin maanvaraisiin murskeesta tehtyihin työalustoihin, joilla työskennellään teläalustaisella koneella

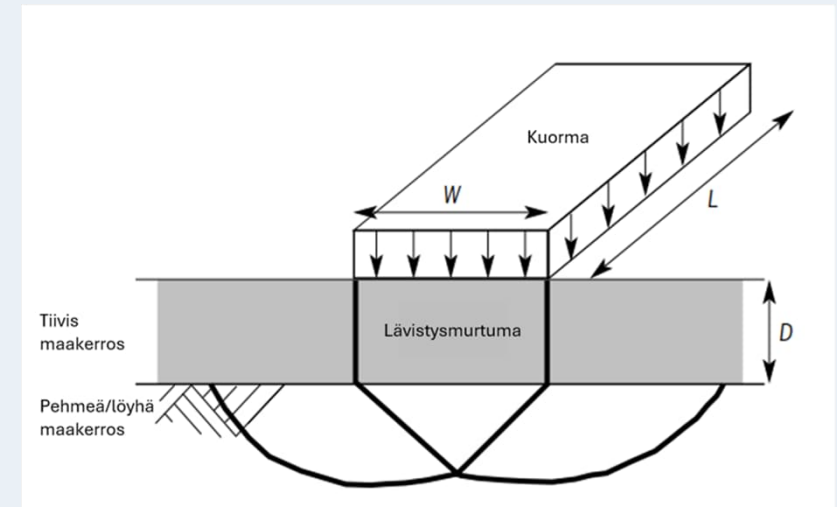
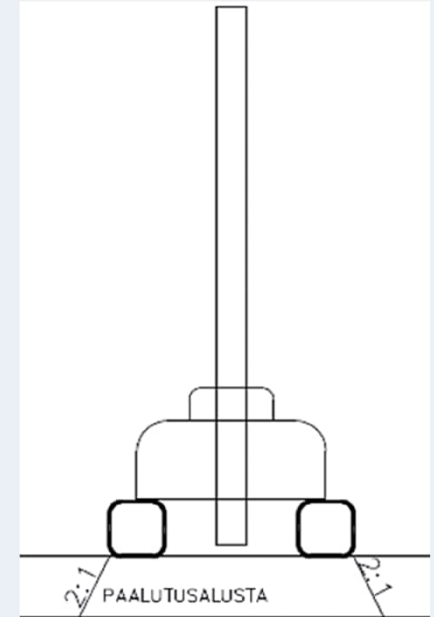


Työalustan mitoittaminen

- Perinteisesti työalustojen suunnittelu on perustunut niin sanotusti empiirisiin menetelmiin
→ alustan paksuus on valittu siltä pohjalta, mikä on aiempien kokemusten perusteella todettu toimivaksi
- Viime vuosikymmenien aikana työalustojen merkitykseen on havahduttu ja mitoittamiseen on kehitetty analyyttisempiä menetelmiä
- Suomessa paalutusalueet tulisi mitoittaa Paalutusohjeen RIL254-2016 mukaisesti
 - Nykyisessä Paalutusohjeessa on esitetty 2D-stabiliteettitarkasteluna tehtyjä esimerkkilaskelmia
 - Nykyinen Paalutusohje on kuitenkin varsin suppea työalustojen suunnittelun osalta

Työalustan mitoittaminen

- Muualla maailmassa mitoittamiseen käytetään yleisesti ottaen samankaltaisia kantavuuskaavoja, joita tavallisesti käytetään anturaperustusten mitoittamisessa
 - Kantavuuden laskemista lähestytään yleisesti kahdesta näkökulmasta:
 1. Oletetaan työalustan toimivan kuormaa jakavana rakenteena ja lasketaan pohjamaan kantavuus perinteisillä kantavuuskaavoilla
tai / ja
 2. Oletetaan murtumisen tapahtuvan niin, että kuorma lävistyy työalustan läpi. Tällöin kokonaiskantavuudessa huomioidaan pohjamaan kantavuuden lisäksi alustassa syntyvä lävistysleikkausvastus
- Työalustojen mitoittamiseen on olemassa useita eri menetelmiä, mutta siitä ei ole yksimielisyyttä, mitä menetelmää mitoittamiseen tulisi käyttää



Työalustan mitoitusmenetelmät

- Tässä työssä työalustan mitoittamista tarkasteltiin neljällä eri laskentamenetelmällä:
 - Kahdella maailmalla yleisesti käytetyimmällä menetelmällä:
 - BR 470
 - TWf 2019
 - Ja kahdella tuoreemmalla menetelmällä:
 - T-arvomenetelmä
 - SFS-EN 1997-3:2025 kahden maakerroksen kantavuuskaava B.6
- Lisäksi tehtiin vertailulaskelmia 2D-liukupintatarkasteluna GeoCalcilla nykyistä Paalutusohjetta mukaillen

Työalustan mitoitusmenetelmät

	BR 470	TWf 2019	T-arvo	SFS-EN 1997-3:2025 kaava B.6
Murtotapa	Kuorman lävistyminen alustan läpi ja pohjamaan murtuminen	Kuorman jakautuminen alustassa ja pohjamaan murtuminen	Kuorman "siirtyminen" alustassa ja pohjamaan murtuminen	Kuorman lävistyminen alustan läpi ja pohjamaan murtuminen
Alustan paksuuden vaikutus	Paksummalla alustalla on korkeampi lävistysleikkauskapasiteetti	Paksumpi alusta jakaa kuormaa laajemmalle alueelle	Paksumman alustan "kuormansiirtotehokkuus" on parempi	Paksummalla alustalla on korkeampi lävistysleikkauskapasiteetti
Soveltuvuus eri pohjaolosuhteisiin	Soveltuu sekä koheesio- että kitkamaille. Soveltuu sellaisenaan vain koheesiomaille, joiden leikkauslujuus on 20–80 kPa	Soveltuu sekä koheesio- että kitkamaille. Mahdollista huomioida myös useammasta maakerroksesta koostuva pohjamaa	Soveltuu sekä koheesio- että kitkamaille	Soveltuu koheesiomaille

Paalutuskoneesta aiheutuva kuorma

- Mitoitusmenetelmän valitsemisen lisäksi keskeistä on määrittää laskelmissa käytettävä paalutuskoneesta aiheutuva kuorma
- Paalutuskoneen työpainon ei voi suoraan olettaa jakautuvan koko telojen pinta-alalle, koska paaluttaessa koneen painopiste siirtyy
- Nykyisen Paalutusohjeen esimerkkilaskelmissa oletetaan paalutuskoneen työpainon jakautuvan 25 %:lle koneen pinta-alasta (pienpaalutuksessa 50 %:lle)



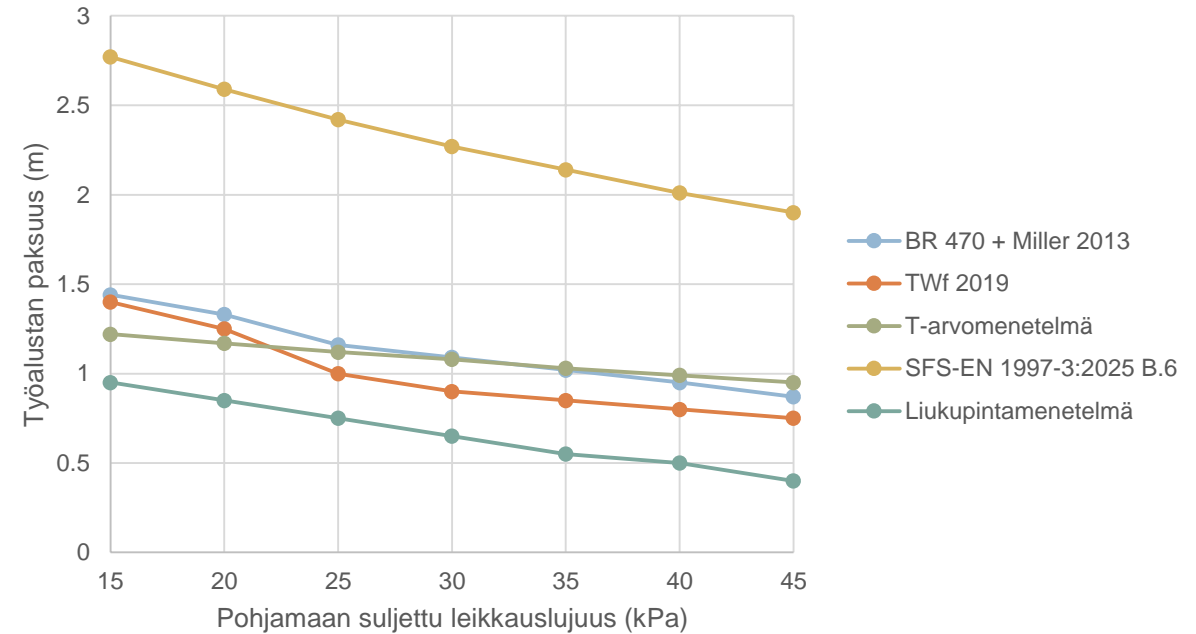
Paalutuskoneesta aiheutuva kuorma

- Jos paalutusalusta mitoitetaan eurokoodeja soveltaen, tulee kuormana käyttää standardin SFS-EN 16228-1 mukaisesti määritettyä kriittisimmän kuormitustilanteen telapainetta
 - Tällä hetkellä standardi vaatii koneenvalmistajaa ilmoittamaan käyttöohjekirjassa ainoastaan maksimipaineen, mutta ei painejakauman vaikutuspituutta, joka on myös varsin keskeinen lähtötieto
- Maksimitelapaine esiintyy tyypillisesti tilanteessa, jossa paalua asennetaan suurella etukallistuksella koneen ylävaunun ollessa käännettynä
 - Koska koneen painopisteen sijainti kriittisimmässä kuormitustilanteessa ei ole tiedossa, on painejakauman todellinen vaikutuspituus varsin haastava määrittää
- Tässä työssä laskelmissa oletettiin painejakauman vaikutuspituudeksi puolet telan tehokkaasta pituudesta

Mitoitusmenetelmien vertailu

- Tarkastelluilla menetelmillä ja käytetyllä kuormalla saadaan varsin suuria alustan paksuuksia
- Nykyisessä Paalutusohjeessa työalustojen ohjeelliset paksuudet vaihtelevat noin 0,2-1 m välillä
- BR 470, TWf 2019 ja T-arvomenetelmällä saadaan suhteellisen samankaltaisia tuloksia
- Toisen sukupolven eurokoodin kaava B.6 erottuu erittäin suurilla paksuuksilla
 - Menetelmä on tarkoitettu ensisijaisesti anturaperustusten mitoittamiseen
 - Käytetyt osavarmuusluvut ovat merkittävästi muita menetelmiä suuremmat
- Liukupintamenetelmällä saadaan parhaiten nykykäytäntöjä vastaavia tuloksia
- Menetelmät eroavat paljon siinä, millaisia osavarmuuslukuja käytetään ja mihin parametreihin varmuus kohdistetaan

Tulokset Junttan PMx22 koneelle koheesiomaalla



Parametri	Osavarmuusluku		
	BR 470	TWf 2019	SFS-EN 1997-3:2025 B.6
Paalutuskoneen kuorma	1,20	1,00	1,50
Kitkakulma	1,00	1,25	1,00
Suljettu leikkauslujuus	1,00	1,40	1,00
Kantokestävyys	1,00	1,00	1,55

T-arvomenetelmässä ja liukupintamenetelmässä käytettiin kokonaisvarmuuslukumenetelmää, ja vaatimus oli $FOS \geq 1,5$

Johtopäätökset

- Paalutusaluustojen suunnittelu on kehittynyt merkittävästi 2000-luvulla, mutta alustojen mitoittamiseen ei edelleenkään ole olemassa standardia
- Tarkastellut käsinlaskentamenetelmät eivät välttämättä sovellu sellaisenaan käytettäväksi Suomen pohjaolosuhteissa, mikäli kuormana käytetään standardin EN 16228-1 mukaista maksimitelapainetta
- Vaikka laskennallisesti alustalta vaadittaisiin reilusti yli metrin paksuus, ei alustan paksuutta voi käytännössä kasvattaa loputtomasti
 - Alustan itsensä paino lisää pohjamaahan kohdistuvaa kuormitusta
 - Paalu on saatava asennettua alustan läpi – paalun asentaminen paksun tiiviin murskekerroksen läpi voi olla haastavaa
 - Lisäksi on huomioitava alustan ympäristö- ja kustannusvaikutukset



Johtopäätökset

- Käsinlaskentamenetelmät koostuvat suhteellisen yksinkertaisista laskentakaavoista, joilla pyritään kuvaamaan varsin monimutkaista kuormitustilannetta
 - Menetelmiin sisältyy useita rajoituksia
 - Vaikeaa/mahdotonta huomioida useammasta maakerroksesta koostuva pohjamaa
 - Eivät vaikuta soveltuvan pehmeimmille savikoille
 - Paalutuskoneesta aiheutuvana kuormana täytyy käyttää tasaista painejakaumaa
 - Vaikeaa/mahdotonta huomioida geolujitteiden käyttö alustarakenteessa
- Paalutuskoneesta aiheutuvan kuorman määrittäminen on haastavaa riippumatta siitä, mitä menetelmää mitoittamiseen käytetään
- Mikäli kuormana käytetään EN 16228-1 mukaista maksimitelapainetta, voisi tilannetta mahdollisesti tarkastella onnettomuusmitoitustilanteena kriittisimmän kuormitustilanteen ollessa varsin harvinainen ja lyhytaikainen

Mahdolliset jatkotutkimusaiheet

- Keskeisin jatkotutkimusaihe olisi tutkia todellisia paalutuksessa syntyviä telapaineita ja niiden jakautumista maaperään
 - Aihe on edelleen erittäin vähän tutkittu ja telapaine on varsin keskeinen lähtötieto laskelmiin
 - Toisaalta kaikki nykyiset käsinlaskentamenetelmät vaativat käyttämään laskennassa tasaista suorakulmaista painejakaumaa
→ kuormasta täytyy joka tapauksessa käyttää yksinkertaistusta
- Lisäksi työalustan mitoittamista voisi tarkastella 3D-laskennalla
 - Tässäkin kuitenkin haasteena paalutuskoneesta aiheutuvan kuorman määrittäminen



Työalustan laadunvalvonta

- Tällä hetkellä Suomessa työalustojen laadunvalvontaa koskien ei ole asetettu vaatimuksia tai suosituksia
 - työalustoja toteutetaan myös suunnitelmista poiketen
 - alustan riittämätön kantavuus havaitaan tavallisesti vasta töiden alettua
- Laadunvalvonnassa keskeistä on varmistaa alustan riittävä kantavuus ja tiiviys
 - Vaihtoehtoina levykuormituskokeet tai pudotuspainolaitteella tehdyt mittaukset
- Sekä levykuormituskokeiden että pudotuspainolaitteen tehtyjen mittausten heikkoutena on niiden varsin rajallinen vaikutussyvyys
 - Lisäksi olisi suositeltavaa varmistaa esimerkiksi koekuopilla, että alustan todellinen paksuus vastaa suunnitelmissa vaadittua paksuutta
- Jokaiseen paalutuskohteeseen olisi suositeltavaa laatia työalustatodistus, jolla hyväksytään työalustan soveltuvuus tarkoitettuun paalutustyöhön

A!

—

**Kiitos
aalto.fi**