



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Teräsbetonilyöntipaalu

Lauri Aaltonen
Fundus Oy
lauri.aaltonen@fundus.fi

Ragnar Wikström
Fundus Oy
ragnar.wikstrom@fundus.fi

Johdanto

Teräsbetonista valmistettu ja maahan lyömällä upotettu paalu on saavuttanut Suomessa vankan aseman pehmeiköille perustettavissa silta-, säiliö-, katu-, tie- ja rautatiehankkeissa. Menetelmän valteja ovat sen edullisuus ja nopeus sekä ulottuminen suuriin syvyyksiin. Kaikilla paalutusmenetelmillä on jokin heikko kohta; teräsbetonisen lyöntipaalun käyttöä rajoittavat lohkarätyt, viereiset tärinäherkät rakennukset, maapohjan vaakaliikkeet sekä työskentelytilat.

Suomessa teräsbetoninen lyöntipaalu tuli markkinoille 1900-luvun alussa. Mm. Helsingin Hotelli Seurahuone on perustettu tällä menetelmällä. Kun Rautatietorin metroaseman rakennustöiden yhteydessä paljastettiin muutama hotellin paaluista, todettiin niiden olevan hyvässä kunnossa.

Kehitys

Paaluaines

Sekä betonin että teräksen lujuusluokat ovat vuosien kuluessa nousseet. Sen sijaan esijännitystekniikka ei osoittautunut erityisen hyödylliseksi. Kalliokarkien ja jatkosten kehitys ovat lisänneet turvallisuutta, koska paalu niiden ansiosta säilyy paremmin ehjänä.

Lyöntikalusto

Kaivinkoneiden käytöstä on siirrytty paalutus-koneisiin. Iskusuojan ja -tyynyn rakenteet ovat parantuneet kuten myös järkäleen pudotusenergian säädettyvyys. Automatisointi on elektroniikan avulla edistänyt paalutyön tarkkuutta.

Pohjatutkimusmenetelmät

Pliktaus on hävinnyt. Maalajien kerrosrajat alettiin paikallistaa painokairalla ja näytteenotoilla. Heijarikaira sai yliarvostetun aseman paalupi-tuuden määrittämisessä. Vaunuporalla varmistetaan kallion tarkka sijainti. Saven lujuusarvot löytyvät siipikairalla. Uudenaikainen puristin-kaira antaa luotettavat hiekkakerrosten lujuus-arvot, ellei kivisyys rajoita sen käyttöä.

Jos säästetään valitsemalla halvin tutkimusmenetelmä, voivat paalutuskustannukset nousta ylimitoituksen takia jopa 50 %.

Mitoitus

Nyrkkisääntömenettelyn jälkeen on otettu käyttöön nk. normituslinja, joka sinänsä antaa varmanpäällä olevan mitoituksen. Nykyiset kairausmenetelmät, mitoituskaavat ja simuloinnit mahdollistavat kuitenkin entistä luotettavampien paalutus suunnitelmien tekemisen. Sallitut paalukuormat ovat nousseet kokemuksen ja tutkimuksen kautta.

Tarkastus

Staattisia koekuormituksia ei enää tehdä, lähinnä sen takia, koska paalukuormat ovat kohonneet ja dynaamiset iskuaaltomittaukset (PDA) ovat selvästi joustoista laskettavia arvoja luotettavampia.

Normitus

Kiitos Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL) ja Suomen Geoteknillisen yhdistyksen (SGY) talkoohengessä laadittujen paalutusohjeiden on käytännön ja teoreettiset osaamiset yhtenäistetty. EU:n puitteissa laadittu ”Euro-normit EN12699 execution of special geotechnical works – Displacement Piles” ei tuo Suomen oloissa harjoitettavalle paalutustyölle varsinaista lisähyötyä. Määrävälein parannetut lyöntipaalutusohjeet (LPO) tulevat sen takia säilyttämään asemansa.

Käytäntö

Loppulyöntivaatimuksia noudatetaan kirjaimellisesti, tietämättä aina mihin ne johtavat. Paalutuskoneen kuljettajille ei ole juuri järjestetty kursseja, on vain luotettu siihen, että kyllähän he osaavat. Harva konemies on päässyt tutustumaan paalutettavan kohteen pohjatutkimusaineistoonkaan.

Kantavuuslaskelmat ja lyöntityön simulointi ATK-laskelmilla parantavat vallitsevaa tilannetta. Myös vanha epätarkka paalutus kalusto vähenee jatkuvasti, kun uutta kalustoa otetaan käyttöön.

Tulevaisuus

Teräsbetonisen lyöntipaalun suunnittelu, toteutus ja valvonta nousevat nykypäivän vaatimustasolle seuraavasti:

- pohjatutkimukset suoritetaan siten että
 - teoreettinen kantavuus saadaan laskettua – simuloinnilla tarkastetaan lyöntiohjeet
- koneisiin asennetuilla PDA-mittareilla valvotaan lyöntityö ja paalun kunto.

Pohjatutkimukset

Kerrosrajat

- kallionpinta vaunuporalla
- maakerrostumien rajat paino- tai puristinkairalla
- geofysikaaliset ja sähköiset luotaukset.

Ominaisuudet

- kitkamaakerrostumien ominaisuudet puristinkairalla näytteenottoineen tai paino- ja heijarikairalla näytteenottoineen
- tiivisrakenteisista moreenikerrostumista saadaan heijarikairan PDA-mittauksilla puristinkairan tyyppisiä vastauksia (SIPT-menetelmä); käytännöllinen varsinkin työskennellessä lautalta
- savimaakerrostumien ominaisuudet siipikairalla näytteenottoineen tai puristinkairalla näytteenottoineen
- erikoismenettelmät pressiometri ja dilatometri
- geofysikaaliset ja sähköiset luotaukset
- maaperän aggressiivisuus betonille näytteenotoilla.

Ympäristö

Tärinä- ja painumaherkät laitteet ja rakenteet kartoitetaan. Saven stabiliteetti, syrjäytyksen aikaansaama sivuliike ja pohjan nousu sekä kitkaan tiivistäminen/löyhtyminen on arvioitava.

Pohjatutkimusaineisto ja pohjarakennussuunnitelmat

- a) Geologiset kartat
- b) Geotekniset kartat
- c) ”Arkistoporaus”

Em. tietojen pohjalta vertaillaan hankesuunnitteluvaiheessa paaluvaihtoehtojen toteutettavuutta ja kustannuksia.

Yleispiirteiset pohjatutkimukset tehdään luonnossuunnitteluvaiheessa, jolloin määritellään paalutekniset mahdollisuudet. Toteutussuunnitteluvaiheessa tehdään yksityiskohtaiset pohjatutkimukset, joiden pohjalta laaditaan paalusuunnitelmat.

Rakennusaikaiset tehtävät liittyvät laadunvalvontaan.

Parametrit

Maakerrosten lujuus- ja tilavuuspainojen (huom. pohjavesi) arvot määräävät paalun lyöntivasuuden ja kantavuuden. Rakenteellinen tiiviys ilmistymiset/löyhtymiset, jotka vaikuttavat vastukseen ja kantavuuteen. Laskelmissa on käytetty osatekijänä nk. kriittistä syvyyttä, joka on riippuvainen em. lujuuksista ja paalun poikkeileikkauksesta.

Rakeisuus, herkkyys ja huokospaine yllättävät hienorakenteisissa maalajeissa etenkin lyöntivaiheessa. Näissä kerrostumissa voi esiintyä vaevastusta (falskt stopp).

Painuman laskemiseksi tarvitaan muodonmuutosparametrit, konsolidaatioaste ja vallitsevat pystyjännitykset.

Betonin korroosiosuojaus riippuu maaperän ja pohjaveden aggressiivisuudesta. Varsinkin jätealueilla voi syntyä paalujen elinkaariongelmia.

Parametrien määrittämisessä on pyrittävä käyttämään kahta menetelmää. Lisäksi niitä on verrattava kokemuksiin ja kirjallisuudesta löydetäviin ohjeellisiin korreloiviin arvoihin.

Mitoitus

- a) Ennen maahanlyöntiä
 - Paaluelementit mitoitetaan valmistus-, kuljetus- ja käsittelyrasituksille lyöntipaalutusohjeiden ja betoninormien mukaan. Kalliokärjen käyttö ja betonin korroosiokestävyyttä määrätään.
- b) Paalukuormat
 - Lasketaan rakennuskohteen pitkä- ja lyhytaikaiset sekä dynaamiset kuormat. Mahdolliset täytteestä syntyvät nk. negatiiviset vaippahankaukset otetaan huomioon.
 - Lyönnistä syntyvät rasitukset, ks. alempana.
- c) Paalun rakenteellinen kantavuus
 - Rakenne mitoitetaan betoninormien mukaan ottaen huomioon aggressiivisuus.
- d) Paalun pituus ja geotekninen kantavuus
 - Parametrien perusteella lasketaan paalun murtokapasiteetti eri syvyyksille ilman varmuuskertoimia. Teoreettisia kantavuuskaavoja on olemassa yhtä monta kuin asiasta kiinnostuneita alan asiantuntijoita. Tehtyihin koekuormitustuloksiin nähden teoreettiset laskelmat poikkeavat joko ylös- tai alaspäin. Kaavojen soveltuvuudet riippuvat maakerrosten ominaisuuksista. Sellaisissa tapauksissa, joissa arvioidun syvyyteen tunkeutunut paalu on saavuttanut teoreettisen kantavuuden, kannattaa suunnittelijan olla ylpeä – kilpailija puolestaan puhuu onnesta.

Kokonaisvarmuuskertoimella jaettu murto- kapasiteetti tuo sallitun kuorman. Jos käytetään osavarmuuskertoimia, on varmistettava, että kantavuuskaavat soveltuvat laskentatapaan. Mikäli on varmuus, että paaluryhmän kitkapaalujen välinen etäisyys on noin 3 x paalun sivumitta, kasvaa sallittu kuorma huomattavasti. Koheesiomaissa on aina tarkastettava ryhmävaikutuksen vähennystä. Jos paalu jää lyhyeksi (< 5m) eikä riittävää yläpään sivutukea ole, pienenee paalulle sallittu kuorma. Anturan kaivu voi vahingoittaa paalua siirtämällä tai nostamalla.

e) Paalun painuma

Painuma lasketaan pitkä- ja lyhytaikaisille ja dynaamisille kuormille. Painuma voi määrätä sallitun kuorman tai pituuden.

f) Löynnin aiheuttamat rasitukset

Simuloinnilla tarkastetaan millä lyöntienergialla aikaansaadaan vaadittu geotekninen murtokapasiteetti. Samalla tulostetaan paalulle tulevat iskuaallon aikaansaamat rasitukset.

g) Ympäristö

Tärinä- ja painumaherkät laitteet ja rakenteet voivat rajoittaa käytettävän lyöntienergian ja siten paalun pituuden ja kantavuuden, ts. paalua ei lyödä kovaa.

h) Koepaalutus ja -kuormitus

Tarkeimmat ja luotettavimmat arvot saadaan lyöntienergiasta ja paalupituudesta.

i) Varmuustarkastelu ja riskianalysointi

Paalutuksen suunnittelussa on paneuduttava varmuustasoon.

Pohjatutkimusten laajuus ja luotettavuus, kuormien laskentatarkkuus, kantavuus- ja painumalaskelmien oikeellisuus, paalutus- työn suorituksen ja valvonnan laatu, pohjajasuhteiden aiheuttamat vaikeudet (esim. lohkaraisuus) ja aikaisemmat kokemukset ovat riskianalyysin osatekijöitä.

Paalujen dynaamiset kantavuusmittaukset ja lyöntitapahtuman simulointi

Paalujen dynaamista koekuormitusta, jota yleisesti kutsutaan PDA-mittaukseksi, on tehty laajemmin 1970-luvulta lähtien. Sekä kiihtyvyyteen että voimamittaukseen perustuva PDA-mittaus vakiinnutti asemansa Suomessa 1980-luvun alkupuolella.

Mittaukset ovat nykyään lähinnä tukipaalujen kantavuuksiin liittyviä mittauksia betoni- paaluille paalutusluokassa Ib ja teräsputkipaaluille, jotka pääsääntöisesti toimivat tukipaaluina.

Paalun toimintaa tarkemmin selvittävää iskuaaltomittausten analysointia, ns. CAP-WAP-prosessia tai muuta paaluanalyysejä käytetään vähemmän, vaikka se asiallisesti joissakin koh-teissa antaisi paremman kuvan paalun toiminnasta.

Dynaaminen koekuormitus ja iskutapahtuman simulointi

PDA-mittauksessa mitataan läheltä paalun ylä-päätä iskusta aiheutunut suhteellinen muodonmuutos (ϵ), josta voidaan laskea normaali-voima ja tutkittavan kohdan paalun suuntainen kiihtyvyy- s, josta integroimalla lasketaan mittauskohdan nopeus. Mitta-anturit asennetaan vastakkai- sille puolille paalua, jolloin antureiden antamien impulssien keskiarvoa käytetään myöhemmissä analysoinneissa laskentasuureina F ja v . Mit- taustietokoneen muistiin tallentuu kummankin voima-anturin antama muodonmuutostieto ja kummankin kiihtyvyyssanturin impulssista las- kettu nopeustieto. Mittaustarkkuudesta antaa jonkinlaisen kuvan se, että numeeriseen tiedon- keruuseen saadaan kultakin anturilta 10000 ar- voa sekunnissa.

Dynaamisella koekuormituksella saadaan tietoa paalutuslaitteen toiminnasta sekä maan ja paalun yhteisestä toiminnasta iskun aikana. Isku- tapahtuman pääosa tapahtuu aikana $3 \times L/c$, jos- sa L on paalun mitta ja c on iskuaallon etenemis- nopeus (n. 3500...4000 m/s). Kun paalun mitta on esimerkiksi 15 m, on ”tehollinen” mittausai- ka betonipaalulla noin 20 ms.

Simuloinnissa paalutuslaitteesta ja paalusta muodostetaan elementtimalli, jossa on jono jou- sia ja massoja. Jokaiseen massaan vaikuttavat paalun ja maan väliset voimat sekä paalun sisäi- set voimat.

Lyöntitapahtuma simuloidaan tietokoneella. Ohjelma laskee elementtien liikkeet ja vallitse- vat voimat paalun sisällä sekä paalun ja maan väliset voimat.

Vertaamalla mitattua iskuaaltoa ja simuloin- nilla laskettua iskutapahtumaa voidaan paalu- tuslaitteen eri mallinnustekijöitä muuttamalla päästä iskulaitetta kuvaavan laitemallin arvoi- hin ja käyttää edelleen ”samaa paalutuskonetta” muiden paalujen ja paalutuskohteiden simuloin- tiin.

Paaluanalyyseillä (CAP-WAP) voidaan mää- rittää paalun ja maan välisten mallinnustekijöi- den arvot, koska tässä menetelmässä muuttujina käytetään vain mittauksen alapuolisia tekijöi- tä.

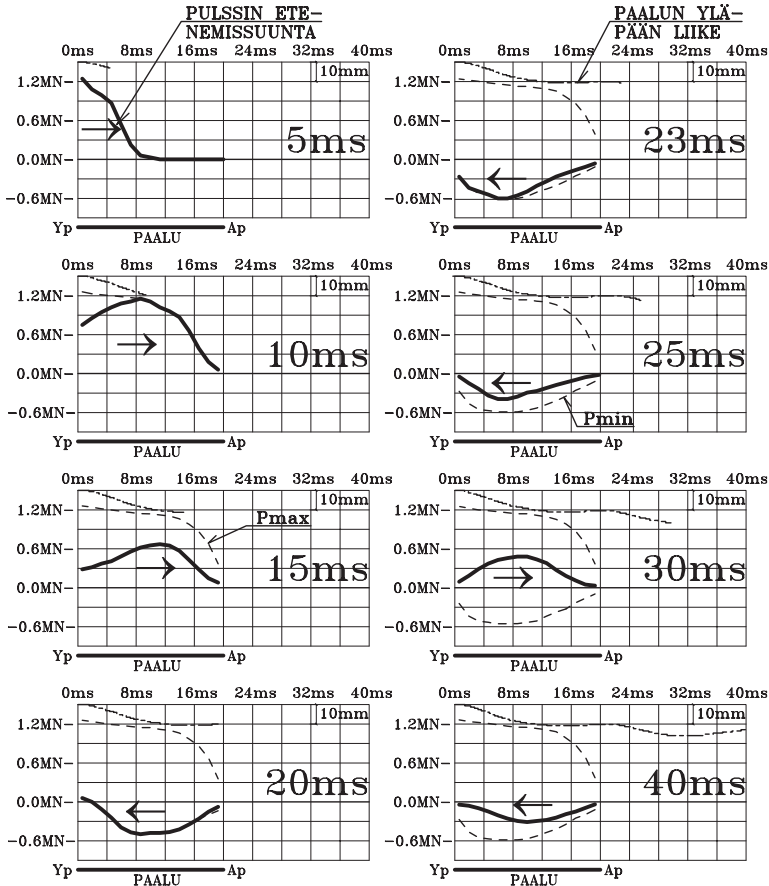
Paaluanalyyseillä saadaan myös tarkemmin selville paalun ja maan välinen vuorovaikutus iskun aikana, jolla on merkitystä arvioitaessa paalun painumaa kuormitustilanteessa.

Dynaaminen koeuormitus ja iskutapahtuman simulointi paalun mitoituksessa

PDA-mittausta käytetään paalujen kantavuuden määrittämiseen ja siitä saadaan tietoa maan ja paalun välisestä yhteistoiminnasta. Näitä tietoja käyttäen voidaan simuloinnilla etukäteen saada entistä varmpempi tieto paalutuksesta ja paalun kantavuudesta sekä paalun loppulyöntivaatimuksista. Samoin voidaan tehdä entistä tarkempi analyysi etukäteen eri paalutuslaitteiden soveltuvuudesta kulloinkin kyseessä olevaan kohteeseen. Simuloinnilla voidaan myös selvittää paalun lyönäinaikaisia jännityksiä ennen kuin paalu on saavuttanut ”kovan” pohjan. Veto-rasitusten ennustaminen on simuloinnilla mahdollista ja hyödyllistä.

Esimerkki pitkässä paalussa etenevästä iskuaaltokuvaajasta

Oheisessa kuvasarjassa on esitetty iskuaallon eteneminen paalussa 40 millisekunnin aikana noin 5 millisekunnin välein. Kuviossa ylimpänä on esitetty paalun yläpään liike siten, että yksi jakoväli on 10 mm. Kuvioissa paksulla viivalla piirretty viiva kuvaa paalusta vaikuttavaa voimaa kuviossa merkittynä ajankohtana. Paksun viivan ylä- ja alapuolella oleva katkoviiva kuvaa paalussa iskun aikana esiintynyttä maksimivoimaa ja minimivoimaa (vetovoimaa). Kaavion alapuolella on mittaviiva paalusta siten, että viivan pituus on aika-akselilla se aika, jonka iskuaalto vaatii kulkeakseen edestakaisin paalun yläpään ja alapää välillä.



Kuva 1. Iskuaallon eteneminen paalussa 40 millisekunnin aikana noin 5 millisekunnin välein.

Tapahtumat

5 ms

Isku on juuri osunut paalun yläpäähän ja maksimipuristus paalun yläpäässä on noin 1,2 MN. Paalun alapäässä ei ole vielä mitään merkkiä iskutapahtumasta. Paalun yläpää on liikkunut noin 2 mm.

10 ms

Iskuaalto on juuri tavoittamassa paalun alapään ja yläpäässä paalussa oleva voima alkaa heiketä.

15 ms

Koko paalu on puristettu keskimäärin 600 kN:n voimalla. Katkoviivasta nähdään miten paalussa maksimipuristusvoima on jakautunut paalun eri osissa.

20 ms

Koska paalu ei ole vielä saavuttanut ”kovaa pohjaa”, paalussa oleva puristusvoima heijastuu alapäästä voimakkaana vetovoimana.

23...25 ms

Paalu on kokonaisuudessaan vetorasitettu ja maksimivetorasitus paalun yläkolmannespiteessä on noin 600 kN.

30...40 ms

Veto ja puristusvoimat vaihtelevat ja vaimenevat iskun vaikutuksen päättyessä. Paalun lopullinen painuma on noin 13 mm/isku.

Paalu, jota simuloitiin, oli noin 35 metriä pitkä ja se murtui ensimmäisen jatkoksen kohdalta johtuen voimakkaista vetorasituksista.

KIRJALLISUUS

RT 10 – 10580 geosuunnittelun tehtäväluettelo

Betoninormit

Lyöntipaalutusohjeet

T SUOMEN
TERÄSPAALUTUS Oy
puh. 02 - 437 1100 fax. 02 - 438 37 11
stp@teraspaalu.com www.teraspaalu.com