



# **LASKENTAOHJELMAN KÄYTTÖ TUKISEINÄN MITOITUKSESSA**

Novapoint GeoCalc -ohjelma

Aarre Järvinen

Opinnäytetyö  
Marraskuu 2012  
Rakennustekniikka  
Infrarakentaminen

# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka  
Infrarakentaminen

AARRE JÄRVINEN

Laskentaohjelman käyttö tukiseinän mitoituksessa  
Novapoint GeoCalc -ohjelma

Opinnäytetyö 70 sivua, joista liitteitä 8 sivua  
Marraskuu 2012

---

Rakennuskaivantojen reunat pyritään tekemään luiskattuina. Mikäli tämä ei ole maaperän ominaisuuksien tai olosuhteiden vuoksi turvallista tai taloudellista, reunat tuetaan.

Kaivantojen tukiin kohdistuu maanpaine. Maanpaine on maa-ainesten ja huokosveden omaa painoa ja niiden kautta mahdollisesti välittyvää muuta kuormaa. Mikäli tuki on liikkumaton, paine on lepopainetta. Maanpaine mobilisoituu aktiivipaineeksi, kun tuki antaa myöten ja passiivipaineeksi, kun tuki siirtyy tuettavaa maata kohden.

Maaperän tärkein lujuusominaisuus on leikkauslujuus. Koheesiomaalla ja kitkamaalla leikkauslujuus perustuu eri tekijöihin. Maanpaineteoriat tarkastelevat maanpaineesta aiheutuvia jännityksiä ja maan rakenneominaisuuksista syntyviä leikkauslujuuksia ja määrittävät niiden avulla, missä vaiheessa maa joutuu murtotilaan.

Tukiseinien suunnittelun edellyttämä laskenta on vaativaa ja monivaiheista. Laskenta edellyttää iterointia ja vaihtoehtojen tarkastelua. Laskenta soveltuu siten hyvin tietokoneavusteisesti suoritettavaksi. Tässä opinnäytetyössä käytettävä ohjelma on Novapoint GeoCalc 2.3.1. Ohjelma on valittu Tampereen ammattikorkeakoulussa annettavan opetuksen tarpeiden perusteella ja tavoitteena on, että opinnäytetyötä tai osia siitä voitaisiin käyttää oppilaitoksessa annettavan opetuksen tukena.

Opinnäytetyössä selvitetään maanpaineen teoreettista perustaa ja laskentamenetelmiä siinä laajuudessa, että GeoCalc -ohjelmassa tehdyt teoreettiset valinnat ja vaihtoehdot tulevat helpommin ymmärrettäviksi.

Opinnäytetyö sisältää kaksi yksityiskohtaisesti opastavaa käyttöesimerkkiä tukiseinien mitoittamisesta GeoCalc -ohjelmalla. Mitoituksessa noudatetaan eurokoodia ja sen kansallista liitettä ja ohjeita, joita on annettu näiden soveltamisesta jousimalleihin perustuviin laskentaohjelmiin.

GeoCalc -tukiseinäosio on käyttäjäystävällinen, mutta edellyttää käyttäjältä suuren määrän teoreettista ja käytännöllistä tietoa. Ohjelman käytön aloittaminen on helppoa, mutta edistyneempi käyttö vaativaa. Itseopiskelun tai lyhyen ohjatun opiskelun avulla on vaikea saavuttaa tuotantokäytössä vaadittavaa ammattitaitoa.

---

Asiasanat: tuettu kaivanto, maanpaine, tukiseinän mitoittaminen, GeoCalc

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Construction Engineering  
Civil Engineering

AARRE JÄRVINEN

Supported excavation designing with computer software  
Novapoint GeoCalc -program

Bachelor's thesis 70 pages, appendices 8 pages  
November 2012

---

The sides of the building pits are made using weathering. If this is not safe or cost-effective due to property or condition limitations, a support is built to the sides.

The supports built for the building pits is affected by the earth pressure which is the weight of ground and capillary water and other load that is possibly transmitted through them. If the support is stationary the pressure is said to be at rest. Earth pressure is active when the support yields and passive when it moves towards the ground.

The most important attribute of the soil is shearing strength. For cohesion and non-cohesion soil it is based on different factors. Earth pressure theories reflect the earth pressure caused by stress and the shearing strength caused by the structural attributes of the earth and uses them to determine when the soil is at its fracture point.

The purpose of this study was to describe Novapoint GeoCalc program and its theoretical basis in order to promote its usage and with detailed examples a beginner in its use. Due to the Eurocode system the examples became more complex than initially intended.

During the work it became clear that the theoretical section should have been more comprehensive for the appointed purpose. The description of the program is detailed enough, but at the same time heavy to study. The conclusion is that it is easy to start the use of the program but the advanced and professional usage is very demanding.

Novapoint GeoCalc program is an excellent assistance for the geotechnical planning, especially in the calculations relating to the supported excavations and the retaining walls.

---

Key words: computational geotechnics, supported excavation, GeoCalc

## SISÄLLYS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | JOHDANTO.....   | 9  |
| 2     | TUETUN KAIVANNON SUUNNITTELUPROSESSI.....                               | 11 |
| 3     | MAA JA SEN OMINAISUUDET .....   | 13 |
| 3.1   | Maa aineena .....   | 13 |
| 3.2   | Kitkamaa .....  | 14 |
| 3.3   | Koheesiomaa.....  | 14 |
| 3.4   | Avoin ja suljettu leikkauslujuus.....                                   | 15 |
| 3.5   | Maanpaine.....  | 16 |
| 3.6   | Maanpaineteoriat .....  | 16 |
| 3.7   | Lepopaine.....  | 19 |
| 3.8   | Aktiivi- ja passiivipaineen maksimiarvot .....                          | 20 |
| 4     | LASKENTAOHJELMA JA SEN KÄYTTÖ.....                                      | 22 |
| 4.1   | GeoCalc -ohjelman käyttöliittymä ja moduulit.....                       | 22 |
| 4.2   | Tukiseinämoduulin teoria .....  | 23 |
| 4.3   | Tukiseinämoduulin käyttöliittymä.....                                   | 24 |
| 4.4   | Projektikohtainen päälehti (General) .....                              | 25 |
| 4.5   | Näyttöasetukset (View).....   | 25 |
| 4.6   | Maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot (Soil) .....                | 26 |
| 4.6.1 | Maan rakenne- ja ominaisuustietojen määrittäminen .....                 | 26 |
| 4.6.2 | Maanpainekertoimien määrittäminen.....                                  | 27 |
| 4.6.3 | Laskentamallien määrittäminen .....                                     | 30 |
| 4.6.4 | Siirtymäperusteinen malli .....   | 31 |
| 4.6.5 | Muodonmuutosperusteinen malli.....                                      | 33 |
| 4.7   | Tukiseinän tiedot (Wall) .....  | 35 |
| 4.8   | Pohjavesitiedot.....  | 37 |
| 4.9   | Kuormien tiedot (Load) .....  | 38 |
| 4.10  | Ankkurointi (Anchorage).....  | 39 |
| 4.11  | Laskenta (Calculate) .....  | 40 |
| 4.12  | Laskennan tulokset .....  | 41 |
| 5     | LASKENTAESIMERKIT.....  | 46 |
| 5.1   | Esimerkeissä käytettävä eurokoodimenettely varmuuden määrittelyssä..... | 46 |
| 5.2   | Esimerkki 1: Tuettu kaivanto kitkamaahan .....                          | 48 |
| 5.2.1 | Lähtötiedot .....   | 48 |
| 5.2.2 | Laskentaparametrit ja laskentavalinnat .....                            | 49 |
| 5.2.3 | Toimivan ratkaisun etsiminen .....                                      | 50 |
| 5.2.4 | Varmuustarkastelu eurokoodeilla.....                                    | 51 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.3   | Esimerkki 2: Tuettu kaivanto kerrokselliseen maahan .....           | 52 |
| 5.3.1 | Lähtötiedot .....   | 52 |
| 5.3.2 | Laskentaparametrit ja laskentavallinnat .....                       | 53 |
| 5.3.3 | Käyttörajoitilataarkastelu .....                                    | 54 |
| 5.3.4 | Murtorajoitilataarkastelu .....                                     | 55 |
| 5.4   | GeoCalc -ohjelman dokumentteihin sisältyvät laskentaesimerkit ..... | 59 |
| 6     | POHDINTA.....   | 60 |
|       | LÄHTEET.....  | 61 |
|       | LIITTEET .....  | 63 |
|       | Liite 1. Maanpaineen mobilisoituminen.....                          | 63 |
|       | Liite 2. Moduuliluvut ja jännitysekspONENTIT .....                  | 64 |
|       | Liite 3. Eurokoodin mukaiset maanpainekertoimet .....               | 65 |
|       | Liite 4. Sovellettavat osavarmuusluvut .....                        | 69 |
|       | Liite 5. Ankkurien esijännitystarkastelu.....                       | 70 |

## KUVAT

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Kuva 1:  | RD-paaluseinää Länsimetron Koivusaaren työmaalla .....          | 12 |
| Kuva 2:  | Maa-aineksen kolme faasia .....                                 | 13 |
| Kuva 3:  | Aktiivi- ja passiivipaineen syntyminen seinämän liikkeessä..... | 17 |
| Kuva 4:  | Käyttöoikeuden tarkistus.....                                   | 22 |
| Kuva 5:  | GeoCalc käyttöliittymä.....                                     | 23 |
| Kuva 6:  | Tukiseinämoduulin teoreettinen malli .....                      | 24 |
| Kuva 7:  | Projektikohtainen päällehti .....                               | 25 |
| Kuva 8:  | Näyttöasetukset .....   | 26 |
| Kuva 9:  | Maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot.....                | 26 |
| Kuva 10: | Maakerrokset, tilavuuspainot ja leikkauslujuudet .....          | 27 |
| Kuva 11: | Kaivannon puolta vahvistettu .....                              | 27 |
| Kuva 12: | Maanpainekertoimet .....  | 28 |
| Kuva 13: | Maaparametrien erityisvalikko .....                             | 28 |
| Kuva 14: | Kaivannon puoleisen lepopaineen vaihtoehdot .....               | 29 |
| Kuva 15: | Painekertoimien määrittäminen nomogrammeista .....              | 30 |
| Kuva 16: | Siirtymäperusteinen malli.....                                  | 31 |
| Kuva 17: | Siirtymämallin kertoimet.....                                   | 32 |
| Kuva 18: | Moduuliperusteinen malli.....                                   | 34 |
| Kuva 19: | Tukiseinän tiedot sisältävä lehti .....                         | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Kuva 20: Passiivipainekertoimen riippuvuus laskentatavasta ..... | 36 |
| Kuva 21: Pohjavesitiedot sisältävä lehti .....                   | 37 |
| Kuva 22: Kuormien tiedot sisältävä lehti.....                    | 38 |
| Kuva 23: Aluekuormien vaihtoehdot .....                          | 39 |
| Kuva 24: Ankkuroinnin tiedot .....                               | 40 |
| Kuva 25: Laskennan asetukset ja laskennan käynnistäminen.....    | 40 |
| Kuva 26: Laskennan tulokset .....                                | 42 |
| Kuva 27: Maanpainegraafi havainnollistettuna .....               | 43 |
| Kuva 28: Piirtoalusta.....                                       | 44 |
| Kuva 29: Larssen 703 profiili .....                              | 48 |
| Kuva 30: Esimerkki 1, maaparametrit .....                        | 49 |
| Kuva 31: Esimerkki 1, passiivipainekertoimien tarkistaminen..... | 50 |
| Kuva 32: Esimerkki 1, ratkaisu .....                             | 51 |
| Kuva 33: Esimerkki 2, käyttörajatila, esijännitys 80 kN .....    | 55 |
| Kuva 34: Murtorajatila 6.10a, esijännitys 80 kN .....            | 56 |
| Kuva 35: Murtorajatila 6.10a, esijännitys 40 kN .....            | 57 |
| Kuva 36: Murtorajatila 6.10b, esijännitys 80 kN .....            | 58 |

## TAULUKOT

|  |    |
|--|----|
| Taulukko 1: Maanpaineen mobilisoitumiseen tarvittavan siirtymän suuruus..... | 18 |
| Taulukko 2: Esimerkki tulosten siirtämisestä taulukkolaskentaohjelmaan ..... | 45 |
| Taulukko 3: Osavarmuuskertoimet ja jousimallien varmuuskertoimet .....       | 47 |
| Taulukko 4: Esimerkki 1, mitoitusarvot.....                                  | 52 |
| Taulukko 5: Esimerkki 2, mitoitusarvot.....                                  | 58 |

## LYHENTEET JA TERMIT

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $a$                        | Jakyn kaavaan liittyvä parametri   |
| $c$                        | Koheesio   |
| $c'$                       | Tehokas koheesio   |
| $E$                        | Kimmomoduuli   |
| $h$                        | Maakerroksen paksuus   |
| $k$                        | Maan jännitystilankerroin  |
| $K_a$                      | Aktiivisen maanpaineen kerroin   |
| $K_p$                      | Passiivisen maanpaineen kerroin  |
| $K_0$                      | Lepopaine kerroin  |
| $K_{0OCR}$                 | Ylikonsolidoituneen maan lepopaine kerroin   |
| $K_{0ud}$                  | Suljetun tilan lepopaine kerroin   |
| $M$                        | Kokoonpuristuvuusmoduuli   |
| $m$                        | Moduuliluku  |
| $n$                        | Jännityseksponentti (yleensä tunnuksena $\beta$ )  |
| $p$                        | Kuorma   |
| $p_0$                      | Lepopaine  |
| $p_a$                      | Aktiivinen maanpaine   |
| $p_p$                      | Passiivinen maanpaine  |
| $q$                        | Pystysuuntainen pintakuorma  |
| $u$                        | Huokosvedenpaine   |
| $z$                        | Etäisyys maan pinnasta   |
| $\alpha$                   | Tukiseinän pystysuuntainen kaltevuus   |
| $\beta$                    | Maanpinnan kaltevuus   |
| $\gamma$                   | Maan tilavuuspaino   |
| $\gamma'$                  | Maan tehokas tilavuuspaino   |
| $\delta$                   | Seinäkitkakulma  |
| $\delta_{ya}$              | Suhteellinen siirtymä aktiiviselle maanpaineelle   |
| $\delta_{yp}$              | Suhteellinen siirtymä passiiviselle maanpaineelle  |
| $\varepsilon$              | Muodonmuutos   |
| $\xi_{50a}$ ja $\xi_{50p}$ | Maanpaineen 50 % muutokseen tarvittava suhteellinen siirtymä aktiiviselle ja passiiviselle maanpaineelle |
| $\sigma$                   | Jännitys tai normaalijännitys  |
| $\sigma'$                  | Tehokas normaalijännitys   |

|                |  |
|----------------|--|
| $\sigma_a$     | Vertailujännitys, 100 kPa                            |
| $\sigma_h$     | Vaakasuora jännitys                                  |
| $\sigma_v$     | Pystysuora normaalijännitys                          |
| $\tau, \tau_f$ | Murtopinnalla sijaitseva vallitseva leikkausjännitys |
| $\nu$          | Poissonin luku                                       |
| $\varphi$      | Kitkakulma   |
| $\varphi'$     | Tehokas kitkakulma                                   |
| DCM            | Displacement Controlled Model, DCM-malli             |
| MCM            | Modulus Controlled Model, MCM-malli                  |
| OCR            | Over Consolidation Ratio, ylikonsolidoitumisaste     |



## 1 JOHDANTO

Maan leikkaaminen on oleellinen osa rakentamista. Maata leikataan rakennusten ja alueiden ja infrastruktuurin rakenteiden perustuksia ja maan alle sijoittamista varten. Rajattu alue, josta on leikattu ja siirretty maata pois niin, että alue jää ympäristöään oleellisesti alemmalle tasolle, on kaivanto.

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009 35§) määrää, että kaivanto suunnitellaan etukäteen. Kaivutyö on tehtävä turvallisesti ottaen huomioon maan geotekniset ominaisuudet, kaivannon syvyys, luiskan kaltevuus ja kuormitus sekä vedestä ja liikenteen tärinästä aiheutuvat vaaratekijät.

Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset edellyttävät, että kaivanto tuetaan, porrastetaan tai luiskataan tehdyn suunnitelman mukaisesti. Kaivu tehdään suunnitelman mukaisella tavalla ja laajuudessa siten, että varmuus sortumista vastaan säilyy kaikissa olosuhteissa. Työssä tulee ottaa huomioon työturvallisuuden edellyttämät toimet kaivannon luisien sortumisen ja muiden vahinkojen estämiseksi (MaaRYL 2010, 71).

Rakennuskaivanto-ohjeen mukaan kaivanto on tuettava, mikäli kaivannon tekeminen luiskattuna on epätaloudellista, rakentamiselle käytettävissä oleva tila ei riitä luiskatulle kaivannolle tai luiskatun kaivannon varmuus sortumaa vastaan on riittämätön (RIL 181 1989, 28).

Kaivannon tukeminen suunnitellaan siten, että lopputulos on mahdollisimman taloudellinen, teknisesti oikea ja turvallinen. Suunnittelu on luonteeltaan optimointitehtävä (RIL 181 1989, 65).

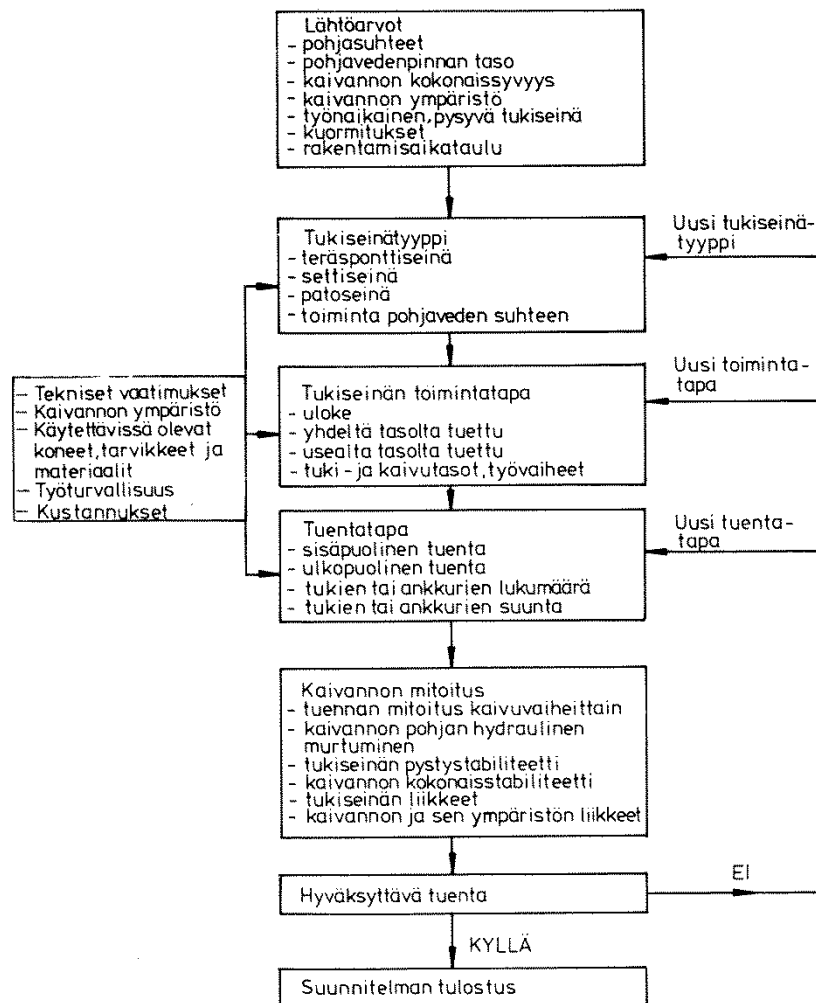
Optimointi edellyttää teoreettisesti pätevää mallintamista ja mitoituslaskelmien iterointeja. Laskenta soveltuu hyvin tietokoneavusteisesti suoritettavaksi. Tässä opinnäytetyössä esitellään esimerkein tietokoneavusteista suunnittelua GeoCalc -ohjelman tukiseinämoduulin avulla. Ohjelma on valittu Tampereen ammattikorkeakoulussa annettavan opetuksen tarpeiden perusteella. Teorian ja esimerkkien taso on mitoitettu aiheeseen ja ohjelmaan tutustumista varten.

Rakenteiden suunnittelu voi vielä tällä hetkellä perustua joko eurokoodien ja niiden kansallisten liitteiden tai Suomen rakentamismääräyskokoelman määräysten ja ohjeiden mukaiseen suunnitteluun. Rinnakkaiskäyttökauden ennakoidaan päättyvän 30.06.2013, jolloin siirryttäisiin yksinomaan eurokoodien käyttöön. (Rakentamismääräykset ja eurokoodisuunnittelu 2012). Sen vuoksi opinnäytetyö sisältää myös eurokoodien mukaisen suunnittelun perusteita.

Opinnäytetyö on jaksotettu neljään toisiinsa nivoutuvaan sisältökokonaisuuteen. Luvussa 2 käsitellään tuetun kaivannon mitoitustehtävää prosessina. Luku 3 on maata, maanpainetta ja maan kestävyysominaisuuksia suppeasti käsittelevä teoriaosio. Luvussa 4 esitellään GeoCalc -laskentaohjelma ja sen tukiseinämoduuli. Esittely on laadittu niin yksityiskohtaiseksi, että sen perusteella on mahdollista tutustua omaehtoisesti ohjelmaan. Luvussa 5 käsitellään mitoitusprosessia kahden esimerkin avulla ja kuvataan, miten GeoCalc -ohjelmaa voidaan käyttää eurokoodeilla toteutettavassa tukiseinämitoituksessa.

## 2 TUETUN KAIVANNON SUUNNITTELUPROSESSI

Tuetun kaivannon suunnittelua voidaan kuvata kaavion 1 mukaisena prosessina. Lähtötietojen selvittämisen jälkeen aloitetaan prosessi valitsemalla tukiseinätyyppi. Sen jälkeen määritetään edeten ja tarvittaessa aikaisempiin vaiheisiin palaten tilanteeseen sopiva, varmuudeltaan riittävä ja kustannuksiltaan hyväksyttävissä oleva ratkaisu.



Kaavio 1: Tuetun kaivannon suunnittelun kulku (RIL 181 1989, 95)

Rakennuskaivanto-ohjeen mukaan tukiseinän tyyppi, materiaali ja tuentatapa on valitaan käyttötarkoituksen ja olosuhteiden mukaisesti (RIL 181 1989). Esimerkiksi Simo Nykänen (2009), Harri Perkkiö (2009), Anu Tran (2008) ja Mirja Ruotsala (2011) ovat opinnäytetöissään käsitelleet aihetta seikkaperäisesti, joten on perusteltua pidättäytyä aiheen yksityiskohtaisesta käsittelemisestä tässä yhteydessä.

Liikenneviraston antaman eurokoodi 7:n soveltamisohjeen mukaan taipuisan upotetun tukiseinän mitoitus käsittää riittävän upotussyvyyden tarkistuksen, pystystabiliteetin tarkistuksen, kokonaisstabiliteetin tarkistuksen, kaivannon pohjan stabiliteetin tarkistuksen ja rakenteellisen kestävyys tarkistuksen (Liikenneviraston ohjeita 12/2011, 61).

Taipuisan tukiseinän mitoitus tehdään yleensä jousimallilla. Jousimallissa maata ja ankkureita kuvataan jousilla ja tukiseinää taipuisalla palkilla. (Liikenneviraston ohjeita 12/2011, 61.)

Kuvassa 1 on esimerkki järeästä työaikaisesta tukiseinästä, joka jää myös pysyväksi tukirakenteeksi. Seinä on rakennettu Rautaruukin RD-paaluista, jotka on porattu ja kiinnitetty kallioon siten, että paalun alapää ottaa myös momenttikuormia. Seinän vedenpitävyys on varmistettu hitsaamalla. Seinät on tuettu kallioankkureilla.



**Kuva 1: RD-paaluseinää Länsimetron Koivusaaren työmaalla**

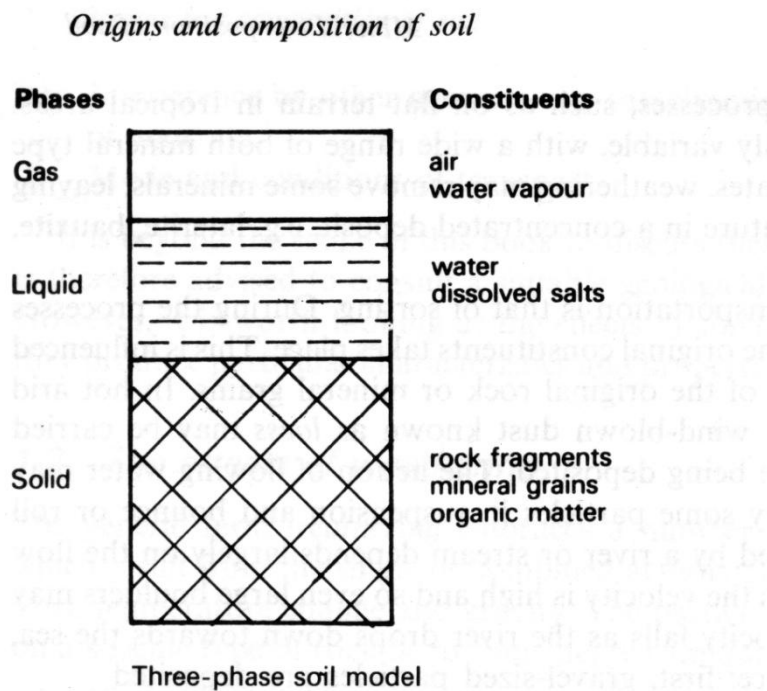
Suunnitteluprosessi kuvataan tarkemmin viidennessä luvussa teorian käsittelyn ja laskentaohjelman esittelyn jälkeen.

### 3 MAA JA SEN OMINAISUUDET

#### 3.1 Maa aineena

Maa-aines on erillisistä partikkeleista muodostuvaa massaa. Partikkelit ovat syntyneet luonnon prosessien seurauksena kallioperän hajotessa ja orgaanisten ainesten maatues-  
sa. Jotta maa-aineesta voidaan saada kokonaiskuva, on selvitettävä kiinteiden partikke-  
lien koostumus, huokosissa olevien kaasujen ja nesteiden ja niihin liuenneiden aineiden  
koostumus sekä rakeiden koon, muodon ja särmikkyyden jakaumat. Termi "maa-aines"  
ei siten viittaa pelkästään kiviaineksiin, vaan materiaaliin kokonaisuutenaan. (Poulos,  
1971, 4.)

Englantilainen tutkija Roy Whitlow kuvaa teoksessaan *Basic soil mechanics* maata kiin-  
teästä aineesta, nesteistä ja kaasuista koostuvaksi kokonaisuudeksi (kuva 2).



Kuva 2: Maa-aineksen kolme faasia (Whitlow 1995,4)

Maat jaetaan lujuusominaisuuksien perusteella kitkamaihin ja koheesiomaihin.

### 3.2 Kitkamaa

Kitkamaalajeilla tarkoitetaan hiekkaa, soraa, louhetta ja moreenia sekä yleensä sellaisia maamateriaaleja, joiden lujuusominaisuudet perustuvat pääasiassa rakeiden väliseen kitkaan. Kaikilla näillä materiaaleilla esiintyy myös jossain määrin koheesiota, joko ns. näennäistä tai todellista koheesiota. (Laaksonen & Lojander 1990, 35.)

Siltti ja moreeni ovat välimuotomaalajeja. Niiden lujuusominaisuudet perustuvat sekä kitkaan että koheesioon. (Jääskeläinen 2011, 101).

Kitkamaalajit ovat yleensä huokosrakenteiltaan avoimia (engl. drained), niin että huokostilassa oleva ilma ja vesi pystyvät nopeissakin muodonmuutostilanteissa puristumaan pois tai imeytymään sisään maamateriaaliin (Jääskeläinen 2011, 102). Muodonmuutoksen yhteydessä tapahtuu siten yleensä myös tilavuuden muutoksia.

### 3.3 Koheesiomaa

Hienorakeisissa maalajeissa lujuusominaisuudet perustuvat rakeiden välisiin kiinnevoimiin eli koheesioon. Näitä maalajeja kutsutaan koheesiomaalajeiksi. Savet ja hieno siltti ovat koheesiomaalajeja. (Laaksonen & Lojander 1990, 18.)

Koheesiomaalajit koostuvat pienistä ja litteistä rakeista, joilla on hyvin laaja pinta. Pinnat ovat negatiivisesti varautuneita ja muodostavat sähköisiä sidoksia veden kanssa. Sitoutuneen (adsorboituneen) veden määrä voi olla jopa 40% huokosveden määrästä. Sitoutuneen veden ominaisuudet (viskositeetti, kiehumispiste ja jäätymispiste) poikkeavat vapaan huokosveden ominaisuuksista. (Whitlow 1995,10)

Koheesiomaalajit ovat yleensä huokosrakenteeltaan suljettuja (engl. undrained). Suljetussa tilassa oleva maalaji on huonosti vettä läpäisevää, joten huokosveden määrä ei muutu nopeissa muodonmuutostilanteissa. Koska vesi ei normaalipaineissa ole koonpuristuvaa, ei tällöin tapahdu tilavuudenmuutoksia.

### 3.4 Avoin ja suljettu leikkauslujuus

Maanrakennustekniikassa tärkein lujuusominaisuus on leikkauslujuus. Maan leikkauslujuus muodostuu rakeiden välisestä kitkasta ja koheesiosta. Savessa leikkauslujuus perustuu yksinomaan koheesioon. Sorassa ja muissa karkearakeisissa maissa leikkauslujuuden antaa rakeiden välinen kitka. (Jääskeläinen 2011, 100.)

Rakeiden välistä kitkaa kuvataan kitkakulmalla. Kitkakulma on likipitään se kaltevuus, johon liian jyrkkään kaivettu karkearakeisen maan penger luontaisesti itsestään asettuu. (Jääskeläinen 2011, 100.)

Leikkauslujuuden klassiseksi muodostuneen peruskaavan (1) vuodelta 1773 kehitti ranskalaisen fyysikko Charles-Augustin De Coulomb (Rantamäki & Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 123).

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

missä  $\tau_f$  = leikkauslujuus  
 $c$  = koheesio  
 $\sigma$  = leikkauspinnassa vallitseva normaalijännitys  
 $\varphi$  = maan sisäinen kitkakulma

Koska huokosvedenpaine vähentää leikkauslujuutta, kirjoitetaan Coulombin kaava nykyisin kokonaisjännitysten sijasta tehokkailla jännityksillä kaavan (2) mukaisesti (Lofjander 2012, 3).

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (2)$$

missä  $\tau_f$  = leikkauslujuus  
 $c'$  = tehokas koheesio  
 $\sigma'$  = tehokas normaalijännitys ( $\sigma' = \sigma - u$ )  
 $u$  = huokosveden paine  
 $\varphi'$  = tehokas kitkakulma

### 3.5 Maanpaine

Maanpaineella tarkoitetaan maan ja rakenteen kosketuskohdassa vaikuttavaa rakentamiseen kohdistuvaa painetta. Maanpaineen suuruus, suunta ja jakautuminen riippuvat maamassan ja rakenteen välisistä liikkeistä ja muodonmuutoksista. (Rantamäki & Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 225.)

Maanpaineella tarkoitetaan yleensä tukirakenteeseen kohdistuvaa likimain vaakasuoraa jännitystä erotuksena pohjapaineesta (Korkiala-Tanttu 2012,1). Lepopaineen oletetaan vaikuttavan aina vaakasuoraan (Jääskeläinen 2011, 174).

Maanpaine aiheutuu tavanomaisissa tilanteissa painovoimasta. Painovoima aiheuttaa maamassan sisällä olevaan maa-alkioon rasituksia. Rasitukset synnyttävät maa-alkioon jännityksiä. (Jääskeläinen 2011, 172.)

Maanpaine siirtyy maassa toisaalta rakeiden välityksellä raepaineena ja toisaalta rakeiden välissä olevan veden välityksellä huokospaineena. Raepaine aiheuttaa maa-alkiossa pystysuuntaisen jännityksen, joka on suoran verrannollinen etäisyyteen maanpinnasta. Pystysuuntainen jännitys generoi vaakasuuntaisen jännityksen, jonka suuruus riippuu maamateriaalin ominaisuuksista ja tilasta.

Huokospaine aiheuttaa maa-alkiossa jännityksen, joka avoimessa kitkamaassa on suoraan verrannollinen etäisyyteen pohjaveden pinnasta. Koheesiomaassa ja sellaisessa kitkamaassa, jossa on vettä läpäisemättömiä kerroksia, huokospaine voi olla ylipaineista. Huokospaine aiheuttaa maa-alkiossa jännityksen, joka on yhtä suuri kaikissa suunnissa.

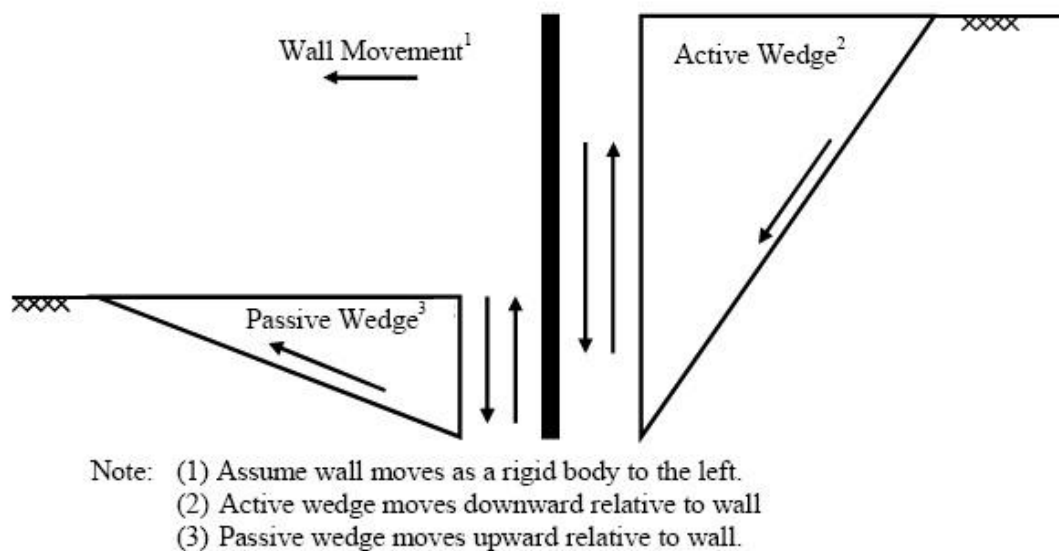
### 3.6 Maanpaineteoriat

Maanpaineteorioilla tarkoitetaan teoreettisia malleja maa-alkioon kohdistuvien pystysuuntaisten ja vaakasuuntaisten jännityksien keskinäisistä riippuvuuksista.



Kun tarkastellaan maan tai rakenteen käyttörajatilaa, voidaan soveltaa kimmoteoriaa ja elastisia maanpaineteorioita. Murtotilassa sovelletaan plastisia teorioita. Elastisuus- eli kimmoteoriat perustuvat Hooken lain soveltamiseen. Teorioita voidaan käyttää tilanteissa, joissa maa on kimmoisessa tilassa ja siinä tapahtuvat muodonmuutokset ovat lineaarisia. Lineaarisessa muodonmuutoksessa pienet muodonmuutokset ovat suoraan verrannollisia pieniin jännityslisäyksiin. (Laaksonen & Lojander 1990, 22.)

Kun rasitukset ja niistä aiheutuvat jännitykset synnyttävät maassa pysyviä muodonmuutoksia, maa on plastisessa tilassa. Plastisiin muodonmuutoksiin perustuvia teorioita voidaan havainnollistaa alla olevan kuvan (kuva 3) mukaisella maan ja tukiseinän mallilla.



Kuva 3: Aktiivi- ja passiivipaineen syntyminen seinämän liikkuesssa (Samtani & Nowatzki 2006, 16)

Mikäli tukiseinä tai rakennelma on liikkumaton, vallitsee maassa ja maan ja seinän kosketuskohdassa lepopaine. Jos tukiseinä liikkuu maamassaa kohti, pyrkii se samalla siirtämään liikkeen suunnassa kiilamaista maakappaletta vinosti ylöspäin. Kiilamaisen maakappaleen ja seinämän välinen vaakasuora jännitys on passiivipaine. Tukiseinää liikuttavan voiman on voitettava kiilamaiseen kappaleeseen vaikuttava painovoima, kappaleen ja liikkumattoman maaperän välinen kitka ja kappaleen ja tukiseinän välinen kitka. Tämän vuoksi passiivipaine on suurempi kuin lepopaine.

Vastaavasti seinämän liike pois päin maamassasta mahdollistaa kiilamaisen kappaleen siirtymisen vinosti alaspäin ja seinämän suuntaan. Seinämän ja kappaleen välinen vaakasuora jännitys on aktiivipaine. Kiilamaisen kappaleen liikettä vastustaa maan leikkajuhuus ja maan ja tukiseinän välinen kitka. Aktiivipaine on pienempi kuin lepopaine ja passiivipaine.

Coulombin ja Rankine'n teorialla ovat keskeisiä plastisen tilan teorioita. Teorioilla saadaan samat tulokset, kun niillä lasketaan tilanteissa, joihin molemmat soveltuvat. (Jääskeläinen 2011, 176).

Maata tarkastellaan molemmissa kaksiulotteisessa tasossa, mutta Coulombin teoria huomioi maan ja seinän välisen kitkan. Rankine'n teoriassa seinäkitkakulman oletetaan olevan nolla. Rankine'n teoriassa maanpinta on vaakasuuntainen ja seinä pystysuunnassa, Coulombin teoriassa ei tällaisia rajoituksia ole.

Seinämän siirtymän on oltava riittävän suuri, jotta lepopaine mobilisoituisi aktiivi- ja passiivipaineeksi. Tarvittavan siirtymän suuruuteen vaikuttavat rakenteen korkeus, maalaji ja rakenteen kiinnitys- ja tukemistapa. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n Pohjarakennusohjeessa (RIL 121 2004) annetaan tarvittavan liikkeen suuruudesta taulukon 1 mukaiset normit.

**Taulukko 1: Maanpaineen mobilisoitumiseen tarvittavan siirtymän suuruus**

| <b>Maalaji</b> | <b>Aktiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä</b> | <b>Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä</b> |
|----------------|--|---|
| Tiivis hiekka  | $0,0005H_a^*$  | $0,002H_p^{**}$   |
| Löyhä hiekka   | $0,002H_a$   | $0,006H_p$  |
| Kiinteä savi   | $0,01H_a$  | $0,02H_p$   |
| Pehmeä savi    | $0,02H_a$  | $0,04H_p$   |

\* $H_a$  on seinän maassa olevan osan korkeus, johon aktiivinen maanpaine kohdistuu

\*\* $H_p$  on seinän maassa olevan osan korkeus, johon passiivinen maanpaine kohdistuu

Eurokoodin geoteknisen suunnitteluohjeen (RIL 207 2009) liitteissä C.1. ja C.2. käsitellään tarvittavan siirtymän suuruutta erityyppisten tukirakenteiden yhteydessä. Kyseiset suunnitteluohjeen liitteet on esitetty liitteessä 1.

### 3.7 Lepopaine

Lepotilassa ennen rakentamista maassa vallitsee geostaattisia jännityksiä. Ne aiheutuvat maan omasta painosta tai ovat syntyneet maa-ainekseen maan kuoren liikkumisen seurauksena. Geostaattisia jännityksiä laskettaessa voidaan soveltaa kimmoteoriaa, sillä maa ei ole murtumistilassa. (Lojander, 1985, 243.)

Syvyydessä  $z$  maa-alkioon kohdistuu yläpuolella olevan maan painon aiheuttama rasitus, joka generoi alkioon pystysuuntaisen jännityksen  $\sigma_v$  (Lojander, 1985, 243).

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3)$$

missä  $\sigma_v$  = pystysuora jännitys  
 $\gamma$  = maan tilavuuspaino  
 $z$  = etäisyys maan pinnasta

Pystysuorasta jännityksestä voidaan johtaa Hooken lain yleistystä soveltaen vaakasuora jännitys  $\sigma_h$  (Lojander, 1985, 243).

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma z \quad (4)$$

missä  $\sigma_h$  = vaakasuora jännitys  
 $\nu$  = Poissonin luku  
 $\gamma$  = maan tilavuuspaino  
 $z$  = etäisyys maan pinnasta

Vaakasuoraa jännitystä  $\sigma_h$  kutsutaan lepopaineeksi  $p_0$  ja kerrointa  $\frac{\nu}{1-\nu}$ , jolla pystysuorasta jännityksestä saadaan vaakasuora jännitys, lepopaineekertoimeksi  $K_0$ . Poissonin luku voi saada arvot 0–0,5, joten  $K_0$  voi saada arvot 0–1. (Lojander, 1985, 244).

Jos Poissonin lukua ei tunneta tarkasti, voidaan lepopaine kertoimen likiarvo määritellä Jakyn kaavan (5) perusteella. Kaava on laadittu laboratoriokokeiden tulosten perusteella. (Lojander, 1985, 244.)

$$K_0 = a - \sin\varphi' \quad (5)$$

missä  $K_0$  = lepopainekerroin  
 $a$  = parametri, jolla kitkamaassa arvo 1 ja koheesiomaassa arvo 0,95  
 $\varphi'$  = tehokas kitkakulma

Eurokoodissa lepopainekerroin lasketaan kaavan (6) mukaisesti (RIL 207 2009, 161).

$$K_0 = (1 - \sin\varphi')(1 + \sin\beta)\sqrt{OCR} \quad (6)$$

missä  $K_0$  = lepopainekerroin  
 $\varphi'$  = tehokas kitkakulma  
 $OCR$  = ylikonsolidoitumissuhde  
 $\beta$  = maanpinnan kaltevuus

Puhtaissa koheesiomaissa lepopainekerroin on 1.

Lepopaineen lauseke eurokoodeissa käytetyssä muodossa, kun mukana on myös maan pinnalla vaikuttava kuorma  $q$ , on kaavan 7 mukainen (Ruotsala 2011, 31).

$$p_0 = K_0 \left( \int_0^z \gamma dz + q - u \right) + u \quad (7)$$

missä  $p_0$  = lepopaine  
 $K_0$  = lepopainekerroin  
 $\gamma$  = maan tilavuuspaino  
 $z$  = etäisyys maan pinnasta  
 $q$  = pystysuuntainen pintakuorma  
 $u$  = huokosveden paine

### 3.8 Aktiivi- ja passiivipaineen maksimi-arvot

Kun aktiivi- tai passiivipaine on saavuttanut maksimi-arvonsa, sen sanotaan olevan mobilisoitunut. Eurokoodeissa käytetään nimitystä aktiivisen ja passiivisen rajatilan maanpaine.

Rakennuskaivanto-ohjeen (RIL 181 1989, 45) mukaan aktiivinen ja passiivinen maanpaineen maksimi saadaan määriteltä kaavojen (8) ja (9) mukaisilla yhtälöillä.

$$p_a = (\gamma z + q)K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (8)$$

$$p_p = (\gamma z + q)K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (9)$$

joissa  $p_a$ = aktiivisen rajatilan maanpaine  
 $p_p$ = passiivisen rajatilan maanpaine  
 $K_a$ = aktiivisen rajatilan maanpainekerroin  
 $K_p$ = passiivisen rajatilan maanpainekerroin  
 $\gamma$  = maan tilavuuspaino  
 $z$  = etäisyys maan pinnasta  
 $q$  = pystysuuntainen pintakuorma  
 $c$  = maan koheesio

Maanpainekertoimet saadaan laskettua seuraavasti:

$$K_a, K_p = \frac{\cos^2(\varphi \pm \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\delta - \alpha) \left[ 1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi \mp \beta)}{\cos(\delta - \alpha) \cos(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (10)$$

missä  $K_a$ = aktiivisen rajatilan maanpainekerroin  
 $K_p$ = passiivisen rajatilan maanpainekerroin  
 $\varphi$  = kitkakulma  
 $\alpha$  = tukiseinän pystysuuntainen kaltevuus  
 $\beta$  = maanpinnan kaltevuus  
 $\delta$  = seinäkitkakulma

Myös GeoCalc ohjelman tukiseinämoduulissa käytetään klassisen maanpaineteorian mukaista laskentaa (Länsivaara, 2012a, 4).

## 4 LASKENTAOHJELMA JA SEN KÄYTTÖ

### 4.1 GeoCalc -ohjelman käyttöliittymä ja moduulit

Novapoint GeoCalc on geoteknisiin laskentoihin tarkoitettu suunnitteluohjelmisto. Ohjelmisto koostuu GeoCad piirtoalustasta ja neljästä erillisestä laskentamoduulista. Piirtoalusta toimii kaikkien moduuleiden tukena perustason CAD-kuvien luomisessa, grafiikan näyttämässä, muokkaamisessa, lähtötietojen käsittelyssä ja tulostuskuvien luonnissa sekä jälkikäsittelyssä. (Vianova 2012a, 3.)

Painumalaskentamoduulin ytimenä on Teknillisessä korkeakoulussa (nykyisin Aalto-yliopisto) kehitetty Settle -laskentaohjelma. Stabiliateettilaskennan ytimenä on Hong Kongin teknillisessä yliopistossa kehitetty Slope2000 ohjelma. Tukiseinä-laskenta ja paalulaskenta pohjautuvat Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitettyihin laskentamalleihin. (Vianova 2012a, 3)

Ohjelma käynnistetään Windows käynnistysvalikosta Novapoint GeoCalc 2 alivalikosta GeoCalc 2 käynnistimellä. Ohjelmaa käynnistettäessä saattaa avautua alla olevan kuvan (kuva 3) mukainen ikkuna ohjelman käyttöoikeuden tarkistamiseksi. Oppilaitoskäytössä valitaan vaihtoehtoista alempi. Ohjelma on voitu asentaa myös siten, ettei käyttöoikeutta tarkisteta.



Kuva 4: Käyttöoikeuden tarkistus

Käyttöliittymä sisältää GeoCad-piirtoalustan ja sen eteen avautuvan käynnistystä helpottavan GeoCalc startup -ikkunan. Alla olevassa kuvassa (kuva 6) on esitetty suurennettuina käyttöliittymän alasvetovalikko, keskeiset työkalupaletit ja startup-ikkunan moduulivalikko.



Kuva 5: GeoCalc käyttöliittymä

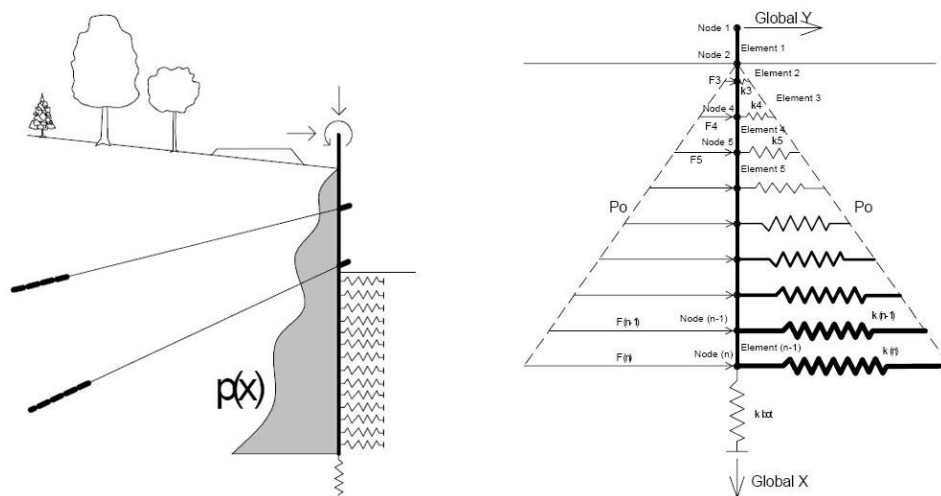
Haluttu moduuli voidaan valita joko käyttöliittymän yläreunassa sijaitsevasta Calculation -valikosta tai startup-ikkunan New Calculation -valikosta.

Käyttöliittymän toimintoja on selostettu tarkemmin ohjelman peruskäyttöohjeessa (Vianova 2012a).

## 4.2 Tukiseinämoduulin teoria

Tukiseinäohjelma perustuu palkki-jousimalliin, joka ratkaistaan elementtimenetelmällä. Palkkina on kolmen vapausasteen kaksiulotteinen palkkielementti. Tukiseinän ja kaivannon puoleisen maan yhteistoimintaa kuvataan jousielementeillä. Tukiseinän takana olevat maapaine, vedenpaine ja ulkoiset kuormat mallinnetaan kuormana ja kuorma-funktio muutetaan laskentamalliin solmukuormiksi. (Lämsävaara 2012a, 1.)

Tekijöiden yhteistoiminta iteroidaan jokaisessa solmupisteessä kaivun edetessä jousikerrallaan. Ohjelman mallia ja menetelmää on havainnollistettu kuvassa 7.



Kuva 6: Tukiseinämoduulin teoreettinen malli (Länsivaara 2012a, 1-2)

Tukiseinämoduulin geometriaa ei piirretä tai tuoda ohjelmaan erikseen, vaan ohjelma luo sen välilehdillä annettavien tietojen perusteella. Maanpintaa lukuun ottamatta kaikkien kerrosten tulee olla vaakasuoria ja yhtä paksuja molemmin puolin tukiseinää. Myös lepopaine kertoimen ja materiaalmallin tulee olla samat eri puolilla seinää. (Länsivaara 2012a, 2.)

Maapaine siirtyvää tukiseinää vastaan lasketaan siirtymistä. Maanpaineen laskemiseksi tarvitaan lepopaine ja malli siitä, miten paine mobilisoituu lepopaineesta ääripaineisiin. Aktiivi- ja passiivimaanpaineen ääriarvot lasketaan ohjelmassa Coulombin teorialla. Paineen mobilisoitumisen laskentaa varten ohjelmassa on valittavana kaksi samaa hyperbolista paine-siirtymä -yhteyttä hyödyntävää mallia. (Länsivaara 2012a, 2.)

### 4.3 Tukiseinämoduulin käyttöliittymä

Tukiseinämoduulin (engl. Supported Excavation) käyttöliittymä koostuu alasvetovalikoista ja välilehdistä. Käyttöliittymää on tarkoitus käyttää siten, että edetään välilehdestä seuraavaan vasemmalta alkaen. Laskennassa tarvittavat tiedot annetaan ohjelmalle välilehtien tietokenttien ja valikoiden avulla. Välilehtien kenttiä ja valikoita muokataan alasvetovalikkojen valintojen avulla.



Ohjelman muista moduuleista poiketen tukiseinälaskentaan ei tuoda tietoja eikä rakennekuvia piirtoalustan kautta. Tukiseinälaskenta käyttää piirtoalustaa vain tulostusalustana.

Käyttöliittymän välilehdet ovat projektikohtainen päälehti (General), näyttöasetuslehti (View), maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot (Soil), Wall, Ground Water, Load, Anchorage, Calculate ja laskennan suorittamisen jälkeen avautuva Results. Välilehtien käyttötarkoitus ja tietosisältö on kuvattu seuraavassa välilehdittäin.

#### 4.4 Projektikohtainen päälehti (General)

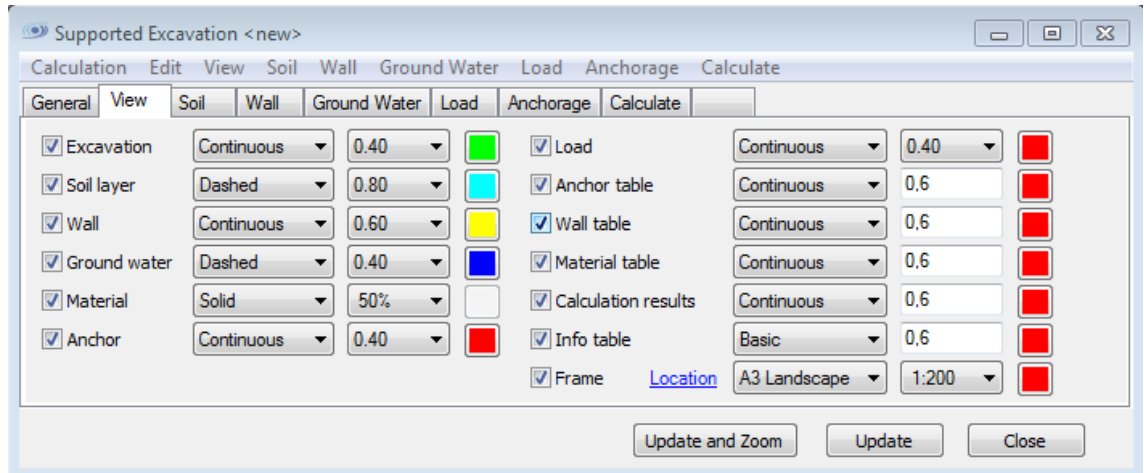
Projektikohtaisella päälehdellä yksilöidään ja nimetään laskenta. Lehdellä annetut tiedot ja kuvaukset tulostuvat tulostuslehdille ja piirtoalustalle.

Kuva 7: Projektikohtainen päälehti

Ohjelman käyttöohjeessa välilehdestä käytetään nimitystä laskennan tiedot (Vianova 2012b, 3).

#### 4.5 Näyttöasetukset (View)

Välilehti View ohjaa piirtoalustan näkymää. Lehdellä määritellään piirtoalustalla näytettävät elementit, värit ja viiva-paksuudet sekä tulostusasetukset.

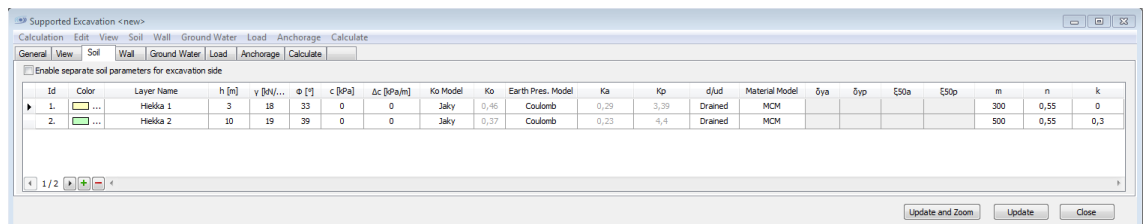


Kuva 8: Näyttöasetukset

## 4.6 Maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot (Soil)

### 4.6.1 Maan rakenne- ja ominaisuustietojen määrittäminen

Välilehdellä annetaan ohjelmalle keskeiset maa-ainesta koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot. Alkutilanteessa välilehti on tyhjä. Välilehdelle lisätään ja poistetaan maakerroksia alavetovalikon Soil-valikosta. Alla olevassa esimerkissä (kuva 8) välilehdelle on lisätty kaksi maakerrosta.



Kuva 9: Maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot

Välilehden alkuosassa maakerros nimetään ja sille annetaan grafiikassa käytettävä väri (kuva 9). Ohjelma tulkitsee, että kerrosten lisäysjärjestys on niiden järjestys ylhäältä alaspäin.

| Calculation Edit View Soil Wall Ground Water Load Anchorage Calculate        |      |       |            |              |                               |            |           |                    |
|--|------|-------|------------|--------------|-------------------------------|------------|-----------|--------------------|
| General  | View | Soil  | Wall       | Ground Water | Load                          | Anchorage  | Calculate |                    |
| <input type="checkbox"/> Enable separate soil parameters for excavation side |      |       |            |              |                               |            |           |                    |
|  | Id   | Color | Layer Name | h [m]        | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\Phi$ [°] | c [kPa]   | $\Delta c$ [kPa/m] |
| ▶  | 1.   | ...   | Hiekka 1   | 4            | 18                            | 38         | 0         | 0                  |
|  | 2.   | ...   | Hiekka 2   | 6            | 20                            | 39         | 0         | 0                  |

Kuva 10: Maakerrokset, tilavuuspainot ja leikkauslujuudet

Tilavuuspainot annetaan kuivatilavuuspainoina. Leikkauslujuudet ovat tehokkaita leikkauslujuuksia. Sarakkeessa  $\Delta c$  voidaan asettaa koheesiomaan lujuus lisääntyväksi halutulla määrällä kerroksen syvyyden suhteessa.

Ohjelmassa voidaan antaa kaivannon puolen maaparametreille erilliset arvot. Tämä on tarpeen esimerkiksi tapauksessa, jossa koheesiomaata on ollut tarpeen vahvistaa ennen kaivamista.

| Calculation Edit View Soil Wall Ground Water Load Anchorage Calculate                   |      |       |            |              |                               |            |           |                    |
|---|------|-------|------------|--------------|-------------------------------|------------|-----------|--------------------|
| General   | View | Soil  | Wall       | Ground Water | Load                          | Anchorage  | Calculate |                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Enable separate soil parameters for excavation side |      |       |            |              |                               |            |           |                    |
|   | Id   | Color | Layer Name | h [m]        | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\Phi$ [°] | c [kPa]   | $\Delta c$ [kPa/m] |
|   | 1.   | ...   | Hiekka     | 1            | 20                            | 35         | 0         | 0                  |
|   | L e  | ...   | Hiekka     |              | 20                            | 35         | 0         | 0                  |
|   | 2.   | ...   | Savi       | 15           | 17                            | 0          | 15        | 0                  |
| ▶   | L e  | ...   | Savi       |              | 17                            | 0          | 90        | 0                  |

Kuva 11: Kaivannon puolta vahvistettu

Kuvan 10 esimerkissä kaivannon puolen savikerros on stabiloitu.

#### 4.6.2 Maanpainekertoimien määrittäminen

Ohjelma laskee oletuksena lepopaineen Jakyn kaavan (kaava 3 kohdassa 3.3.1) mukaisesti. Sarakkeessa  $K_0$  Model voidaan tarvittaessa valita lepopaineekertoimeksi omavalmittainen arvo.

Suljetussa tilassa lepopainekerroin liittyy kokonaisjännityksiin ja sen arvo on suurempi kuin avoimen tilan kerroin. Lepopainekerroin on suljetussa tilassa yleensä 0,8–1. (Länsivaara 2012a, 3.)

Kuvissa 13 ja 14 on esimerkki maanpaineekertoimien ja niitä koskevien ohjausparametrien antamisesta ohjelmalle.

| Layer Name | h [m] | $\gamma$ [kN/...] | $\Phi$ [°] | c [kPa] | $\Delta c$ [kPa/m] | Ko Model | Ko   | Earth Pres. Model | Ka   | Kp   |
|------------|-------|-------------------|------------|---------|--------------------|----------|------|-------------------|------|------|
| Hiekka 1   | 4     | 18                | 38         | 0       | 0                  | Jaky     | 0,38 | Coulomb           | 0,22 | 7,91 |
| Hiekka 2   | 6     | 20                | 39         | 0       | 0                  | Jaky     | 0,37 | Coulomb           | 0,21 | 8,59 |

**Kuva 12: Maanpaineekertoimet**

Maaparametrien erityisvalikosta (kuva 14) voidaan mallin maanpaineiden laskentaa ohjata yksityiskohtaisemmin. Kaivannon puoleiselle lepopainelaskennalle on kolme vaihtoehtoa. Oletusasetus K0 laskee lepopaineen perusasetusten (kuva 13) mukaisesti siten, että lepopaine lasketaan aina kulloisenkin kaivuvaiheen mukaisesti eikä alkupe-  
räistä ennen kaivamista kyseisellä tasolla vallinnutta horisontaalista painetta oleteta säilyvän.

Toisessa vaihtoehdossa osa alkuperäisestä lepopaineesta säilyy kimmoteorian mukaisesti. Vaihtoehdossa on annettava ohjelmalle Poissonin luvun ( $\nu$ ) arvo. Tilanteeseen sopiva arvo on 0,15–0,25. (Länsivaara 2012a, 4.)

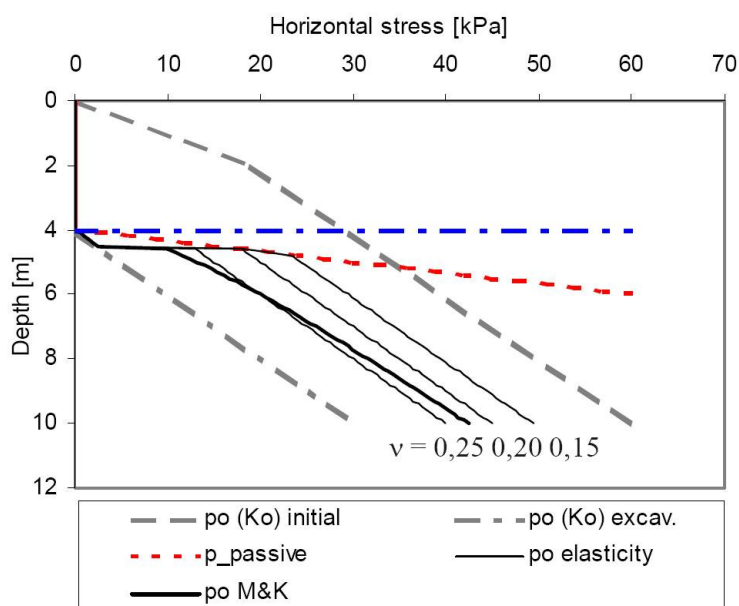
Jos kaivannon pohja häiriintyy kaivamisen aikana niin, ettei lepopaineen säilyminen ole kaivuvaiheen ylimmän kerroksen osalta todennäköistä, voidaan erityisvalikossa kohdassa *disturbed layer* määrittää tuon kerroksen paksuus (Länsivaara 2012e) . Valinta on käytettävissä kimmoteoriaa ja Mayne & Kulhawyn menetelmää käytettäessä.

**Kuva 13: Maaparametrien erityisvalikko**

Kolmannessa vaihtoehdossa palautusvaiheen lepopaine lasketaan Mayne & Culhawyn menetelmän mukaisesti kaavalla x (Länsivaara 2012a, 4). Vaihtoehtoja on havainnollistettu kuvassa 15.

$$K_{0OCR} = (1 - \sin\varphi) \times OCR^{\sin(\varphi)} \quad (11)$$

missä  $K_{0OCR}$  = ylikonsolidoituneen maan lepopaine kerroin  
 $\varphi$  = kitkakiulma  
 $OCR$  = ylikonsolidoitumisaste



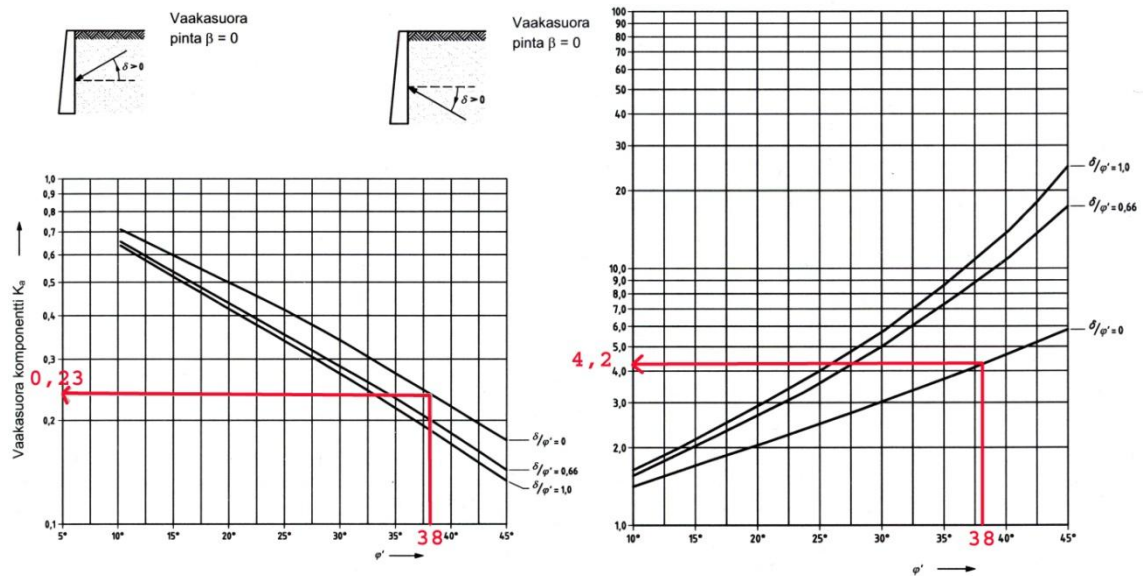
**Kuva 14:** Kaivannon puoleisen lepopaineen vaihtoehdot (Länsivaara 2012a, 4).

Maaparametrien erityisvalikossa voidaan määritellä myös tukiseinän takana olevan maan paineen laskentaperusteita. Oletuksena on, että seinän takana vallitsee paine, joka voi vaihdella kaivutilanteen mukaisesti lepopaineesta aktiivipaineeseen. Mikäli oletetaan, että tukiseinä on pysyvä ja liikkumaton, käytetään lepopainemitoitusta. Tärinämitoituksessa aktiivipaineen sijasta käytetään lepopainetta ja passiivipaineesta vähennetään 25%. (Länsivaara 2012a, 5).

Maaparametrien erityisvalikossa olevat muut parametrit (DCM length, characteristic length ja  $R_f$ ) liittyvät siirtymämalleihin ja on selostettu kohdissa 4.6.4 ja 4.6.5.

Aktiivi- ja passiivipaineet ohjelma laskee Coulombin maanpaineteorian mukaisesti (kaava 8 kohdassa 3.3.2). Käyttäjä voi asettaa maanpaine kertoimille myös muita arvoja. Eurokoodeilla suunniteltaessa voi olla tarkoituksenmukaista käyttää eurokoodeihin perustuvista nomogrammeista (RIL 207 2009, liite C) saatavia arvoja. Kuvassa 16 esimerkki kertoimien määrittämisestä nomogrammien avulla. Kertoimet on määritetty kuvan 13 ylimmälle kerrokselle, jonka kitkakulma on  $38^\circ$ . Aktiivipaine kerroin nomogrammeista määriteltynä on noin 0,23 ja passiivipaine kerroin noin 4,2. Tällöin on ole-

tettu, että maanpinta tukiseinän takana on vaakasuora ja että maan ja tukiseinän välillä ei ole kitkaa.



Kuva 15: Paine kertoimien määrittäminen nomogrammeista (RIL 207 2009, kuvat C.1.1. ja C.2.1)

#### 4.6.3 Laskentamallien määrittäminen

Soil -välilehdellä annetaan sarakkeessa d/ud ohjelmalle tieto siitä, suoritetaanko laskenta avoimessa tilassa (drained) vai suljetussa tilassa (undrained). Käsitteet on selostettu kohdassa 3.1.1 ja 3.1.2.

| Id | Color | Layer Name | d/ud      | Material Model | öya | öyp | ξ50a | ξ50p | m | n | k |
|----|-------|------------|-----------|----------------|-----|-----|------|------|---|---|---|
| 1. | ...   | Hiekka     | Drained   | DCM            |     |     |      |      |   |   |   |
| 2. | ...   | Savi       | Undrained | MCM            |     |     |      |      |   |   |   |

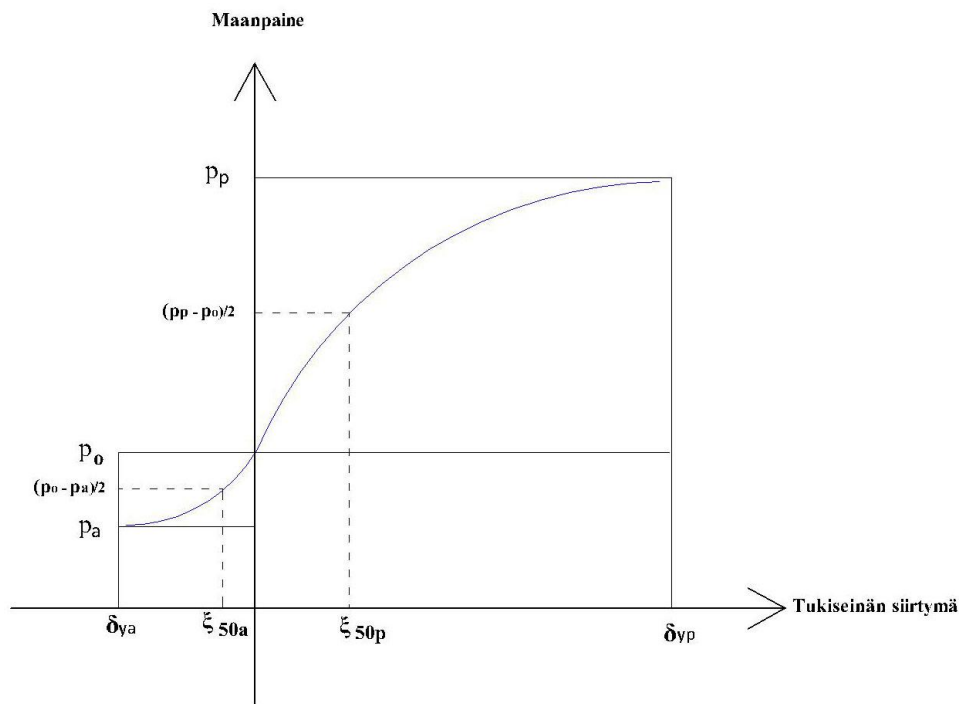
GeoCalc ohjelma mallintaa kaivannon puolisen maan ja tukiseinän yhteistoimintaa jousimallilla. Ohjelmassa on kaksi vaihtoehtoista mallintamistapaa: siirtymäperusteinen malli (Displacement Controlled Model) ja muodonmuutosperusteinen malli (Modulus Controlled model). Kullekin kerrokselle voidaan valita kumpi tahansa malleista. Maanpainemallit on kuvattu kohdissa 4.5.4 ja 4.5.5.

Kumpikin malli käyttää maan epälineaarista käyttäytymistä kuvatessaan samaa hyperbeliä, mutta ovat periaatteiltaan erilaisia. Mallit määrittävät annetuilla parametreilla jousien jäykkyyden ja jäykkyyden riippuvuuden syvyydestä. (Vianova 2012b, 40.) Muo-

donmuutosperusteinen malli kuvaa maan käyttäytymistä siirtymäperusteista mallia paremmin ja on malleista suositeltavampi. Siirtymäperusteiseen malliin liittyy teoreettisia ongelmia. Jos mallia erityisestä syystä halutaan käyttää, referenssipituudeksi tulisi valita karakteristinen pituus. (Länsivaara 2012c.)

#### 4.6.4 Siirtymäperusteinen malli

Siirtymäperusteisissa mallissa käyttäjä määrittää siirtymät  $\delta_{ya}$  ja  $\delta_{yp}$ , joilla aktiivi- ja passiivimaanpaineen maksimiarvot saavutetaan. Käyttäjän antamilla arvoilla kerrotaan jousen vaikutuspisteen etäisyys maanpinnasta tai vaihtoehtoisesti ns. karakteristinen pituus.




Kuva 16: Siirtymäperusteinen malli

Näiden lisäksi tulee antaa myös suhteellisen siirtymän arvot  $\xi_{50a}$  ja  $\xi_{50p}$ . Kertoimet ilmaisevat, millä suhteellisella siirtymällä saavutetaan puolet maanpaineen mobilisaatiosta (kuva 16). Mikäli  $\xi_{50p}$  saa arvon 0,5, siirtymän ja maanpaineen kehittymisen riippuvuus on lineaarinen. (Vianova 2012b, 40.)

Kuvan 17 yläosassa on ote eurokoodin geoteknisen suunnitteluohjeen (RIL 207 2009) liitteistä C.1. ja C.2., jotka määrittelevät erityyppisten siirtymätyyppien kohdalla mobi-

lisoitumiseen tarvittavan siirtymän suuruuden suhteessa tukiseinän korkeuteen. Kuvan alaosassa on ohjeen perusteella valitut kertoimet tiiviin kittamaan tapauksessa.

| Seinän siirtymän tyyppi |   | Suhteet $v_a/h$ kittamaille. |                            | Suhteet $v_p/h$ - ja $v/h$ arvolle $0,5\sigma_p$ kittamaille. |   |
|-------------------------|---|------------------------------|----------------------------|---|---|
|                         |   | $v_a/h$<br>löyhä maa<br>%    | $v_a/h$<br>tiivis maa<br>% | $v_p/h$ ( $v/h$ $0,5 \sigma_p$ )<br>löyhä maa<br>%            | $v_p/h$ ( $v/h$ $0,5 \sigma_p$ )<br>tiivis maa<br>% |
| a)                      |  | 0,4 ... 0,5                  | 0,1 ... 0,2                | 7 (1,5) ... 25 (4,0)  | 5 (1,1) ... 10 (2,0)                                |
| $v_a$                   | aktiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä                                |                              | $v$                        | seinän siirtymä   |   |
| $h$                     | seinän korkeus  |                              | $v_p$                      | tehokkaan passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä |   |
|                         |   |                              | $h$                        | seinän korkeus  |   |
|                         |   |                              | $\sigma_p$                 | täysin mobilisoitu passiivinen maanpaine                      |   |

| d/ud    | Material Model | $\delta_{ya}$ | $\delta_{yp}$ | $\xi_{50a}$ | $\xi_{50p}$ | m | n | k |
|---------|----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---|---|---|
| Drained | DCM            | 0,0015        | 0,075         | 0,25        | 0,2         |   |   |   |

Kuva 17: Siirtymämallin kertoimet

Aktiivisen paineen kerrointa  $\xi_{50a}$  ei suunnitteluohjeessa ole annettu. Ellei maasta otettujen kokeiden tai muiden tietojen perusteella voida muuta päätellä, on tarkoituksenmukaista käyttää arvoa väliltä 0,1–0,5. Tällöin malli olettaa maan käyttäytyvän teoreettisesti oikealla tavalla epälineaarisesti.

Eurokoodin geoteknisen suunnitteluohjeen (RIL 207 2009) liitteet C.1. ja C.2. on esitetty liitteenä 1. Rakennuskaivanto-ohjeeseen (RIL 181 1989) sisältyvät maanpaineiden mobilisoitumiseen tarvittavat siirtymät on esitetty kohdassa 3.4. taulukossa 1.

Siirtymäperusteisen mallin käyttö koheesiomaassa on haasteellista. Jos mallia käytetään suljetun leikkauslujuuden kanssa, saavutetaan teoreettisesti oikeampi tulos, kun maaparametrien erityisvalikosta (kuva 14) seinän siirtyvän mitan referenssipituudeksi valitaan oletuksena olevan kaivauspisteen ja alkuperäisen maanpinnan etäisyyden sijasta karakteristinen pituus. (Länsivaara 2012b, 5).

Karakteristiseksi pituudeksi on kuvassa 13 asetettu 10 metriä. Sillä, mikä pituus karakteristiseksi pituudeksi asetetaan, ei ole tulosten kannalta oleellista merkitystä. Käyttökelpoinen mitta on esimerkiksi kaivusvyvyys.

Kuvassa 13 maaparametrien erityisvalikossa esiintyvä muuttujaa  $R_f$  ei voi siirtymäperusteisissa mallissa antaa erikseen, sillä ohjelma laskee sen muista lähtötiedoista. (Länsivaara 2012a, 6).



#### 4.6.5 Muodonmuutosperusteinen malli

Kun maapohjaa kuormitetaan, tapahtuu muodonmuutoksia. Kimmoisien materiaalien jännitysten ja muodonmuutosten riippuvuuksia voidaan tutkia ja määrittää Hooken lain (kaava 11) avulla.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (12)$$

missä  $\sigma$  = jännitys  
 $E$  = kimmomoduuli  
 $\varepsilon$  = muodonmuutos

Geotekniikassa Hooken lakia sovelletaan myös plastisella alueella korvaamalla kimmomoduuli muodonmuutosmoduuleilla (Korhonen 1985, 265).

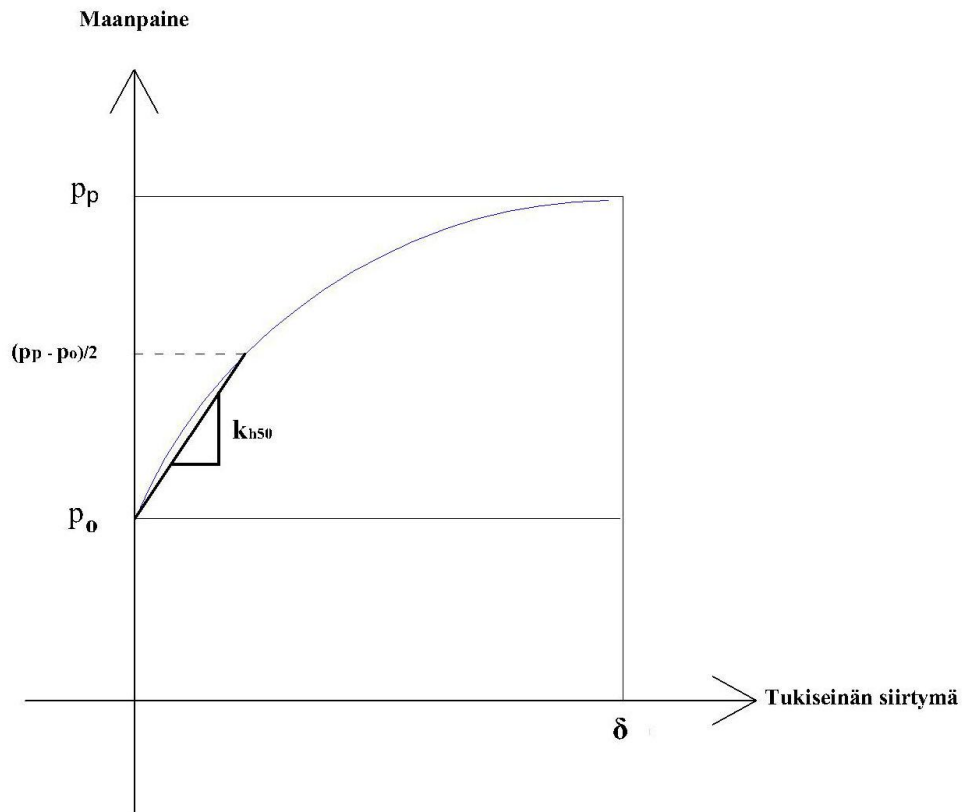
GeoCalc ohjelmassa muodonmuutosperusteinen siirtymä lepopaineesta maksimipaineeseen perustuu kokoonpuristuvuusmoduuliin. Kokoonpuristuvuusmoduuli lasketaan kaavan (12) avulla. (Vianova 2012b, 46).

$$M = m \cdot \sigma_a \cdot \left( \frac{\sigma'_v}{\sigma_a} \right)^{1-n} \cdot OCR^{k(1-n)} \quad (13)$$

missä  $M$  = kokoonpuristuvuusmoduuli  
 $m$  = moduuliluku  
 $\sigma_a$  = vertailujännitys (100 kPa)  
 $\sigma'_v$  = tehokas normaalijännitys  
 $n$  = jännitysekspONENTTI (kirjallisuudessa merkintä yleensä  $\beta$ )  
 $OCR$  = kaivuuseen liittyvä ylikonsolidaatioaste  
 $k$  = jännitysekspONENTTI

Ohjelma laskee kokoonpuristuvuusmoduulin arvon käyttäjän antamien moduuliluvun, jännitysekspONENTIN ja kaivun aikaiseen ylikonsolidaatioasteeseen liittyvän jännitysekspONENTIN avulla.

Ohjelma muuttaa kokoonpuristuvuusmoduulin vaakasuuntaiseksi jouseksi. Vaakasuuntainen jäykkyys  $k_{h50}^*$  on avoimessa tilassa 0,8 M ja suljetussa tilassa 1,1 M. Ohjelman laskennassa on käytetty Poissonin luvun arvona 0,3. (Vianova 2012b, 46.)



**Kuva 18: Moduuliperusteinen malli**

Moduuliluku ja jännityseksponentti määritetään kairausvastuksen ja laboratoriokokeiden perusteella. Kitkamaiden parametrit voidaan arvioida liitteessä 3 olevista Tiehallinnon suunnitteluohjeen (Tiehallinto 2001) taulukoista. Karkealla siltillä moduuliluku on 30–300, hiekalla 50–600 ja soralla 300–1200 karkeudesta ja tiivyydestä riippuen. Jännityseksponentti on karkealla siltillä 0,3, hiekalla ja soralla 0,5.

Savimailla, joilla kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  on suuruusluokaltaan 150–200, moduuliluku on suuruusluokaltaan 1,5–2 kertaa suljettu leikkauslujuus ja jännityseksponentti yleensä 1. Jos leikkauslujuus suurenee syvyyden lisääntyessä ollen esimerkiksi  $0,25\sigma_{v0}$ , moduuliluku on tyypillisesti 37,5–40 ja jännityseksponentti 0. (Länsivaara 2012c.)

Ylikonsolidaatioasteeseen liittyvä jännityksponentti voi saada arvoja 0–1. Arvolla 1 laskenta tehdään käyttäen alkuperäistä jännitystilaa ja arvolla 0 kaivuvaiheen jännitystilaa (Vianova 2012b, 46).

Edellä kuvassa 13 maaparametrien erityisvalikossa valittavalla referenssimuuttujalla  $R_f$  määritetään mallin alkujäykkyys. Muuttuja voi saada arvoja 0–1. Oletusarvoa 0,98 ei yleensä ole tarpeen muuttaa. Malli saadaan toimimaan lineaarisesti antamalla muuttujalle arvon 0. (Länsivaara 2012a, 7).

#### 4.7 Tukiseinän tiedot (Wall)

Tukiseinälehdellä annetaan tiedot seinätyypistä, seinän mitoista, kaivannon syvyydestä, seinän takana olevan maanpinnan kaltevuudesta ja maan ja seinän välisestä kitkasta.

**Kuva 19: Tukiseinän tiedot sisältävä lehti**

Ohjelmassa on tietokanta yleisimmistä seinätyypeistä ja profiileista. Tukiseinälehteä vastaavasta valikossa (Wall) voidaan tietokantaan tehdä lisäyksiä. Valitun profiilin yksityiskohtaiset tiedot saa näkyviin lehden painikkeesta View. (Vianova 2012b, 5.)

Laskentamallissa on asetettu seinälle yksi pystysuuntainen jousi. Jousi sijaitsee seinän alaosassa. Ohjelma edellyttää, että sille asetetaan jäykkyysarvo (vertical stiffness). Kuvassa 19 arvoksi on asetettu 100 kN/mm/m. Ohjelman tulosten kannalta arvon suuruudella ei ole merkitystä, kun muuttuvat kuormat ovat pintakuormia ja ankkurit vaakasuuntaisia. Kun tukiseinään kohdistuu pystykuormia, on pystysuuntaiselle jouselle annettava jäykkyysarvo. Yleensä jouselle annetaan riittävän suuri arvo ("seinä lyöty

kovaan"), jolloin seinälle ei tule pystysuuntaista liikettä. Useimmissa tapauksissa arvo väliltä 10–100 kN/mm/m näyttäisi olevan kelvollinen.

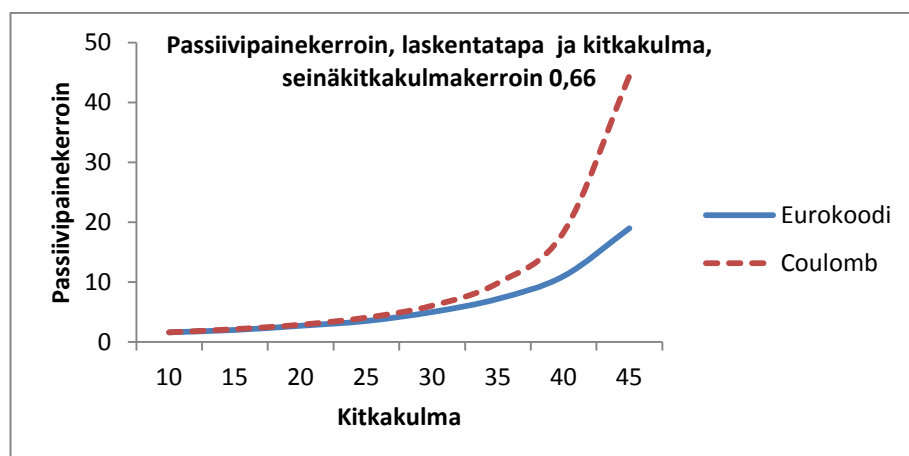
Jousimalliin perustuva ohjelma ei kykene itse tuottamaan pystysuuntaisen jousen jäykkyyden arvoa ohjelmalle annettujen parametrien avulla. Esimerkiksi maan ja seinän välinen kitka otetaan huomioon vain maanpaineita laskettaessa. Reaalimaailmassa tukiseinä tulee suunnitella maan ominaisuudet huomioon ottaen. Erityisesti silloin, kun käytetään vinoja ankkureita, joista kohdistuu seinään myös pystysuuntainen voimakomponentti, on varmistettava, ettei seinä pääse siirtymään alaspäin. Jos seinä siirtyy alaspäin, ankkurit löystyvät ja seinä menettää tukeaan. (Länsivaara 2012c.)

Seinä voidaan ankkuroida alaosaan kalliioon (rock bolt). Valinta edellyttää, että ohjelmalle annetaan myös tieto ankkuroinnin vaakasuuntaisesta jäykkyydestä.

Maan pinta voidaan antaa joko oletuksena olevana 0-tasona tai maantieteellisenä korkeutena.

Tukiseinän ja maan välinen kitka annetaan erikseen aktiivipaineelle ja passiivipaineelle. Mikäli maanpainekertoimet on määritetty eurokoodeihin perustuvista nomogrammeista (RIL 207 2009, Liite C), on syytä käyttää vastaavia seinäkitkan kertoimia.

Mikäli *Soil* -välilehdellä on määritetty maanpainekertoimien laskentatavaksi Coulombin teoria, on syytä seinäkitkakertoimien asettamisen jälkeen palata tarkistamaan, millaiseksi passiivipaineen kerroin on muodostunut. Coulombin teoria antaa liian korkean passiivipainekertoimen korkeilla seinäkitkan kertoimilla (kuva 20).



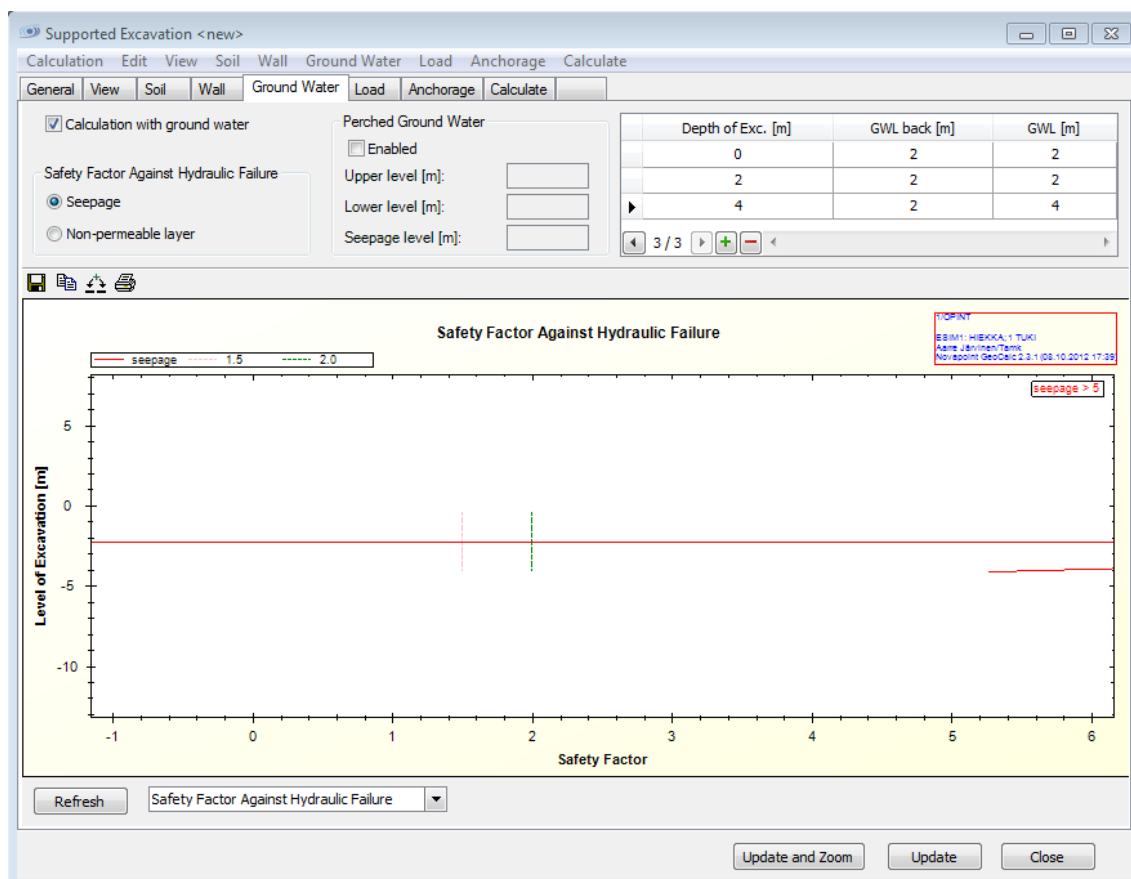
Kuva 20: Passiivipainekertoimen riippuvuus laskentatavasta

Kun tukiseinän tiedot on annettu ja sivu päivitetään, piirtää ohjelma tilannetta vastaavan grafiikan piirtoalustalle.

#### 4.8 Pohjavesitiedot

Pohjavesitiedot sisältävällä välilehdellä ohjataan laskentaa pohjaveden ja orsiveden osalta. Kun valitaan laskenta pohjaveden kanssa, välilehden oikeaan yläkulmaan avautuu taulukkopohja, jossa voidaan määritellä pohjaveden korkeus ja se, miten pohjaveden kanssa on tarkoitus kaivun aikana menetellä.

Alla olevassa kuvasta (kuva 21) ilmenee, että ennen kaivamisen aloittamista pohjavesi on kahden metrin syvyydessä. Kun kaivu etenee, kahden metrin syvyyteen, ollaan pohjavesisyvyydessä. Kun kaivu on neljän metrin syvyydessä, ohjelmalle annetaan taulukolla tieto, että tukiseinän takana pohjaveden pinta on edelleen kahden metrin syvyydessä, mutta kaivannon puolella pohjavesi on kaivannon pohjan tasolla eli maan pinnasta laskettuna neljän metrin syvyydessä.



Kuva 21: Pohjavesitiedot sisältävä lehti

Sivulla voidaan antaa ohjelmalle tietoja pohjaveden yläpuolisen orsiveden mallintamiseksi ja tarkastella varmuutta hydraulista murtumaa vastaan. Sivun alaosan ikkunassa voidaan havainnollistaa pohjaveden tilaa ja sen vaikutuksia vettä läpäisevässä ja vettä läpäisemättömässä maapohjassa.

#### 4.9 Kuormien tiedot (Load)

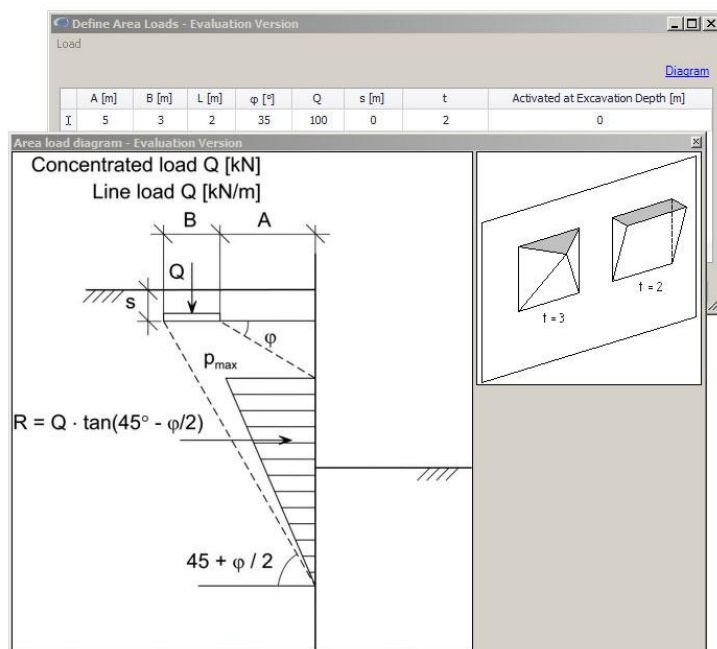
Ohjelmalle voidaan antaa kahden tasaisen pintakuorman parametrit molemmille puolille tukiseinää. Kuormien oletetaan alkavan vaikuttaa heti maanpinnasta, mutta vaikutuksen alkamissyvyyttä voidaan muuttaa. Näin voidaan liikennealueilla mallintaa tilannetta, jossa liikenne sallitaan vasta siinä vaiheessa, kun ensimmäinen tukitaso on asennettu. Oheisessa kuvassa (kuva 22) tukiseinän taakse on asetettu 10 kPa suuruinen laaja-alainen pintakuorma, joka otetaan laskennassa huomioon kaikilla kaivutasoilla.

Kuva 22: Kuormien tiedot sisältävä lehti

Tasaisten pintakuormien lisäksi voidaan mallintaa erilaisia aluekuormia ja pistekuormia. Välilehdeltä avautuu aluekuormavalinnan alta apulehti, jolla havainnollistetaan aluekuormien asettamisvaihtoehtoja.

Seuraavalla sivulla olevan kuvan (kuva 23) esimerkissä on asetettu viiden metrin etäisyydelle tukiseinästä kuuden neliömetrin alue, jolle kohdistuu yhteensä 100 kN kuorma, joka aktivoituu maan pinnassa. Kulman  $\phi$  avulla määritetään, mille tukiseinän korkeustasolle kuorma vaikuttaa. Kulmaksi voidaan asettaa maan kitkakulma tai haluttaessa jokin muu kulma.

Jos kuvan 23 esimerkissä parametrille  $t$  asetetaan arvo 1, ohjelma tulkitsee kuorman viivakuormaksi, jolla on jokaisella tukiseinän suuntaisella metrin pituisella matkalla 100 kN kuorma. Tällä tavalla voidaan mallintaa esimerkiksi rautatietä.



Kuva 23: Aluekuormien vaihtoehdot

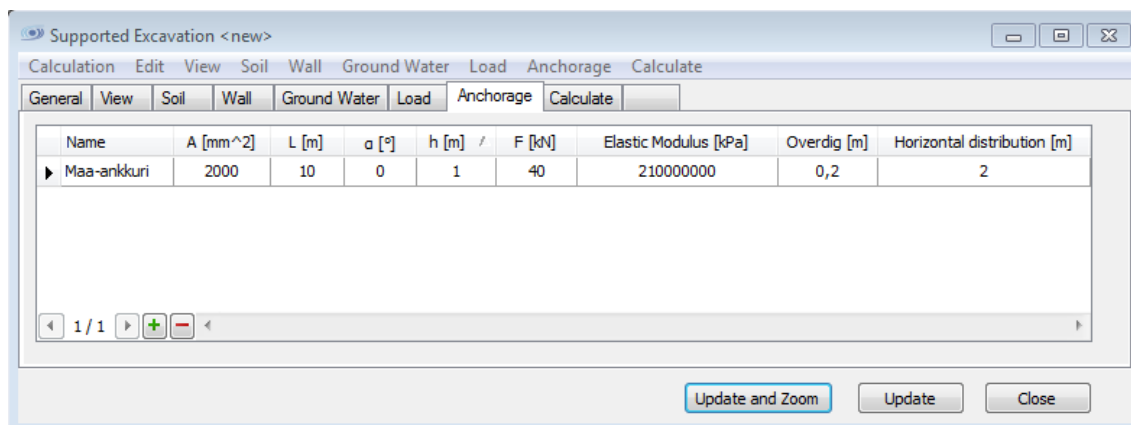
Tukiseinälle voidaan kohdistaa myös pistekuormia. Kuormat kohdistetaan suoraan tukiseinään siten, että sijoitus kohtaan -1 tarkoittaa seinän ylintä pistettä, sijoitus kohtaa 0 maanpintaa ja numerointi siitä alaspäin etäisyyttä maanpinnasta metreinä. Positiiviset vaakasuuntaiset pistekuormat vaikuttavat kaivantoon päin, negatiiviset kaivannosta pois päin.

#### 4.10 Ankkurointi (Anchorage)

Seinän tukivoimat esitetään sivulla ankkurointi (kuva 24). Jokaista tukitasoa varten avataan sivulle oma rivi, jolla kuvataan tukitason ankkureiden poikkileikkauksen pinta-ala, pituus, kulma poikkeamana vaakatasosta, tukitason etäisyys maan pinnasta, mahdollinen esijännitysvoima, ankkurin aineen kimmomoduuli, tukitason asentamisessa tarvittava työvara ja ankkureiden etäisyys toisistaan.

Ohjelmassa voidaan luoda ankkurointitietokanta. Valmista tietokantaa ei ole, mutta ohjelma esittää automaattisesti ankkurille teräksen kimmomoduulia.

Työvara tarvitaan sen vuoksi, että tukitason ja sen ankkuroinnin asentaminen edellyttää käytännössä kaivamista tukitason alapuolelle ennen kuin tukitason ja ankkureiden asentaminen on mahdollista.

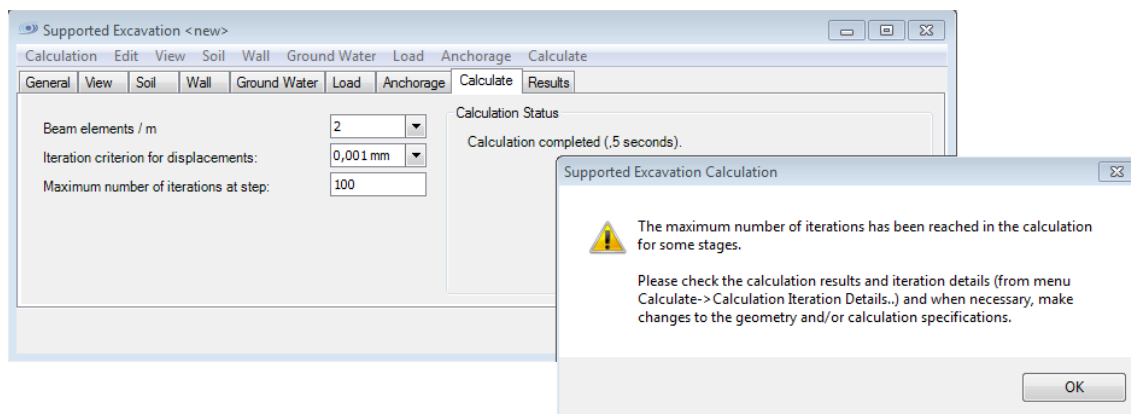


Kuva 24: Ankkuroinnin tiedot

Kun asennetaan ankkureita vinoon, on varmistettava, että tukivoimien pystysuuntaiset voimakomponentit saavat maasta riittävästi vastinetta.

#### 4.11 Laskenta (Calculate)

Laskentaa ohjaavalla lehdellä (kuva 25) määritetään, kuinka monta solmukohtaa tukiseinään lasketaan miten tarkasti laskenta suoritetaan.



Kuva 25: Laskennan asetukset ja laskennan käynnistäminen



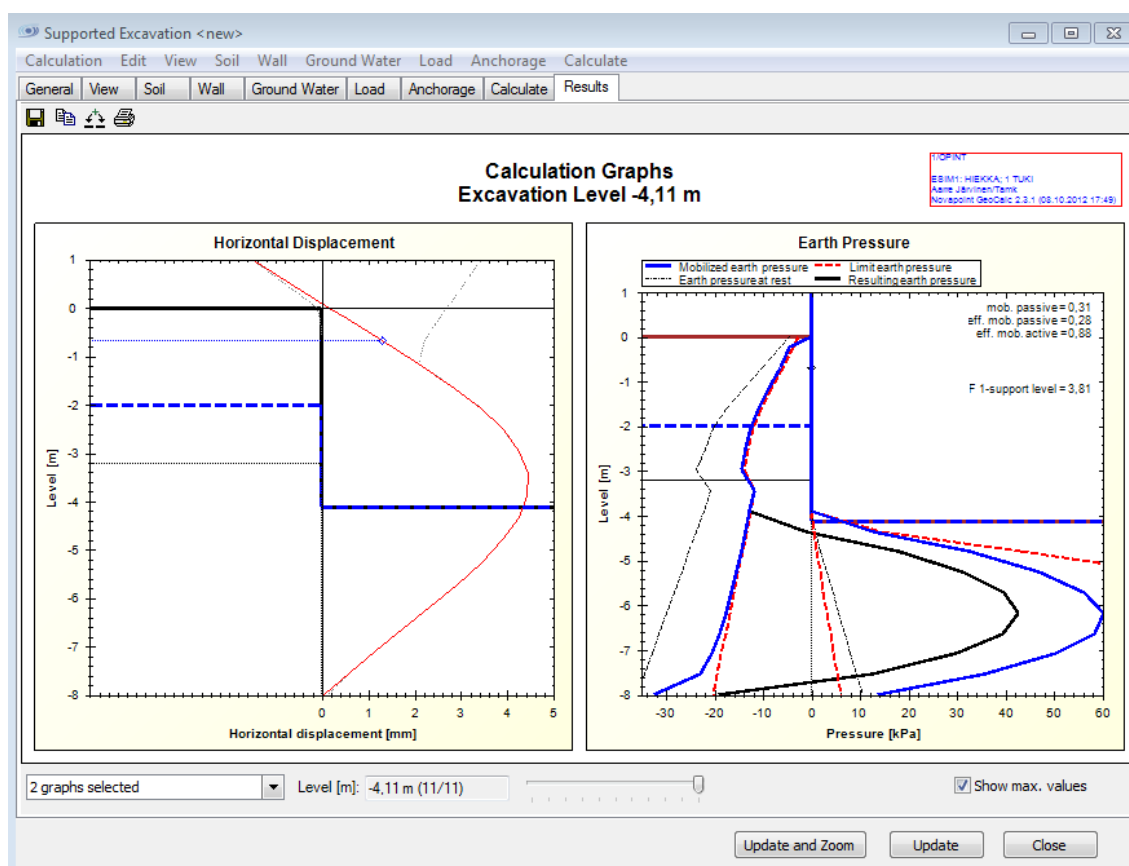
Ohjelmaa rakennettaessa on alunperin ajateltu, että laskenta-ajan säästämiseksi olisi iterointi ensin tarkoituksenmukaistaa suorittaa karkealla tasolla ja vasta vaihtoehtojen selkiytyttyä siirryttäisiin tarkempaan laskentaan. Tietokoneiden tehojen parannuttua tähän ei nykyisin ole tarvetta, vaan laskenta-asetukset on tarkoituksenmukaista pitää samoina koko ajan. (Länsivaara 2012c.)

Kuvassa 25 laskentaelementtien määräksi metriä kohden on asetettu 2. Oikeampi määrä on 4-5 elementtiä metriä kohden.

Laskennan aikana syntyy usein iterointiongelmia, joista ohjelma huomauttaa. Osa ongelmista on suunnittelun kannalta merkityksellisiä, osa ei. Laskentaprosessi on monimutkainen ja ohjelma on alun perin säädetty reagoimaan kaikkiin iteroinnissa tapahtuviin poikkeamiin. Jos laskennan tulokset ovat järkeviä, voidaan iterointivirheilmoitukset useimmissa tapauksissa jättää huomioon ottamatta. (Länsivaara 2012d.)

#### **4.12 Laskennan tulokset**

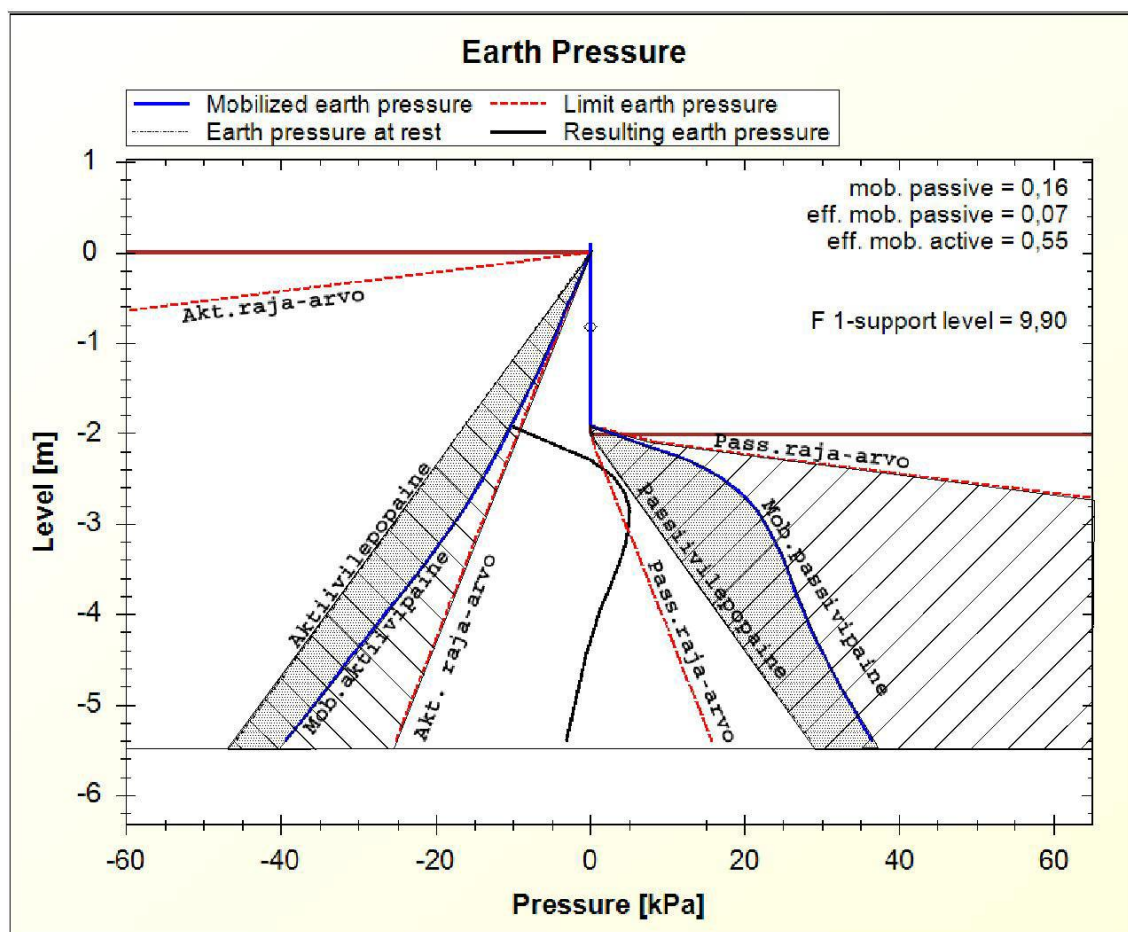
Laskennan tulokset esitetään kahdeksalla graafilla. Graafit on valittavissa tarkasteltavaksi yksitellen tai halutut graafit yhdessä. Oheisessa kuvassa (kuva 26) on valittu tarkasteltavaksi vaakasiirtymä- ja maanpaine kuvaavat.



Kuva 26: Laskennan tulokset

Nopein tapa havaita suunnitelman kelpoisuus on vaakasiirtymägraafi. Mikäli vaakasiirtymäkuvaaja on suora viiva ja siirtymät tuhansia millimetrejä, tukiseinä on annetuilla parametreilla ohjelman laskelmien mukaan kaatunut. Vaakasiirtymäkuvaaja on keskeinen tuloste myös käyttörajatilatarkastelussa. Käyttörajatilakriteerit asetetaan useimmiten juuri siirtymien raja-arvoina.

Murtorajatilatarkastelun kannalta keskeisin informaatio on maanpainegraafissa.



Kuva 27: Maanpainegraafi havainnollistettuna

Kuvassa 27 havainnollistetaan maanpainegraafin sisältöä. Kuvan tiedoista ja kuvioista voidaan päätellä, että tukiseinä pysyy hyvin pystyssä ainakin kyseisessä kaivuvaiheessa. Passiivipaineesta on mobilisoitunut 16 %. Tällöin mobilisoitunutta passiivipainetta verrataan passiivipaineen maksimiin. Tilannetta ehkä luotettavammin kuvaava efektiivinen passiivinen mobilisaatioaste on vasta 7%. Tässä ohjelmassa efektiivisellä passiivisella mobilisaatioasteella tarkoitetaan kyseisessä kaivuvaiheessa vaikuttavan passiivipaineen ja vastaavan lepopaineen erotuksen (tummennettu alue oikealla) suhdetta passiivipaineen maksimiin ja lepopaineen erotukseen (viivoitettu alue oikealla).

Efektiivisellä aktiivipaineen mobilisaatioasteella tarkoitetaan vastaavasti kyseisessä kaivuvaiheessa vaikuttavan aktiivipaineen ja lepopaineen erotuksen suhdetta lepopaineen ja aktiivipaineen minimin erotukseen. Kuvan 27 tapauksessa aktiivipaineen mobilisoitumismahdollisuudesta on toteutunut 55%.

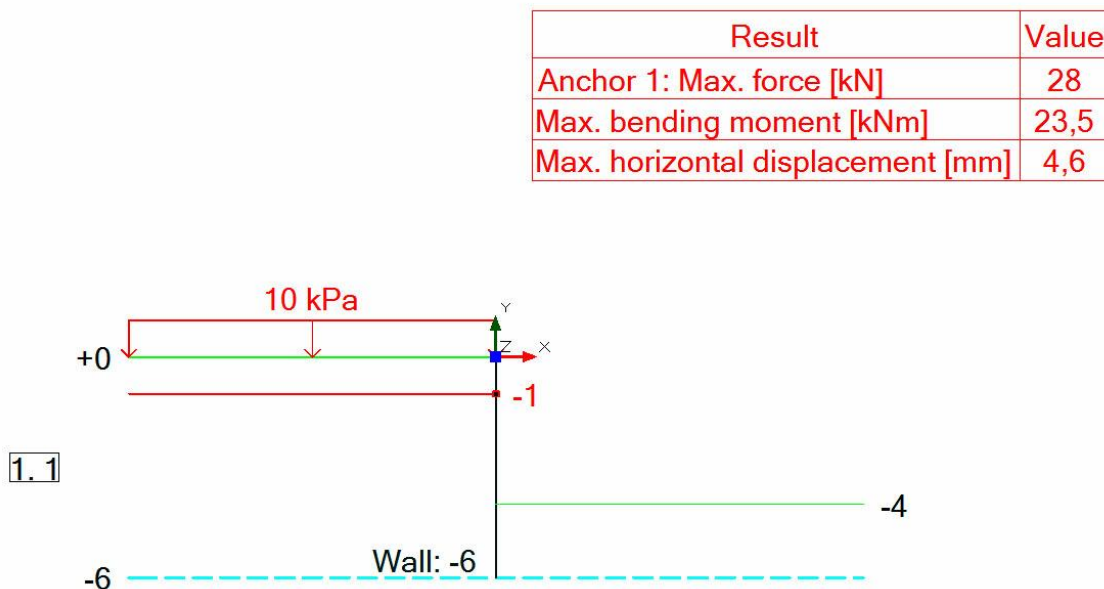
Efektiiivisyys ei tässä yhteydessä terminologian samankaltaisuudesta huolimatta tarkoita yhteyttä tehokkaisiin parametreihin, vaan on ohjelman laatijan valitsema nimitys edellä kuvatuille maanpaineiden suhteille (Länsivaara 2012d).

Eurokoodien mukaisessa mitoituksessa ei ole tarpeen käyttää edellä mainittuja efektiivisiä mobilisaatiosuhteita. Eurokooditarkastelussa käytetään passiivipaineen mobilisaatioastetta (mob. passive) ja momenttitasapainoa kuvaavaa varmuutta (F) .

GeoCalc ohjelma laskee varmuuden pyörähtämistä vastaan tapauksessa, jossa on yksi tuki. Kuvan 27 tapauksessa kyseisessä kaivuvaiheessa varmuus pyörähtämistä vastaan on 9,9.

Muut käytettävissä olevat graafit kuvaavat ankkurivoimia (Anchor Forces), normaali-voimia (Axial Force), taivutusmomenttia (Bending Moment), taivutusta ja puristusta yhdessä (Combined Bending and Compression) ja leikkausvoimia (Shearforce). Kahdeksas graafi esittää varmuutta (Safety). Se sisältää likipitään samat asiat kuin maanpainegraafi toisella tavalla esitettynä.

Osa tuloksista esitetään automaattisesti piirtoalustalla (kuva 28).



Kuva 28: Piirtoalusta

Piirtoalustalle voidaan siirtää myös halutut graafit. Muita piirtoalustan asetuksia voidaan määritellä näyttöasetukset välilehdellä.

Laskennan tulokset voidaan haluttaessa siirtää taulukkolaskentaohjelmaan. Siirto tapahtuu painamalla hiiren oikeasta näppäimestä kohdistimen ollessa halutun graafin päällä. Oheinen taulukko (taulukko 2) kuvaa erään tukiseinäratkaisun ankkurivoimia. Taulukosta ilmenee, että kyseessä on kahden tukitason ratkaisu, jossa tuet on kahden ja neljän metrin syvyydellä.

**Taulukko 2: Esimerkki tulosten siirtämisestä taulukkolaskentaohjelmaan**

| Force [kN]<br>Anchor Forces 1 | Level of Excavation [m] | Anchor Forces 2 |              |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|
| 0                             | 0                       | 0               | 0            |
| 0                             | -0,225380282            | 0               | -0,225380282 |
| 0                             | -0,450760563            | 0               | -0,450760563 |
| 0                             | -0,676140845            | 0               | -0,676140845 |
| 0                             | -0,901521127            | 0               | -0,901521127 |
| 0                             | -1,126901408            | 0               | -1,126901408 |
| 0                             | -1,35228169             | 0               | -1,35228169  |
| 0                             | -1,577661972            | 0               | -1,577661972 |
| 0                             | -1,803042254            | 0               | -1,803042254 |
| 0                             | -2,028422535            | 0               | -2,028422535 |
| 0                             | -2,028422535            | 0               | -2,028422535 |
| 10,14984513                   | -2,253802817            | 0               | -2,253802817 |
| 19,73662631                   | -2,479183099            | 0               | -2,479183099 |
| 46,74216516                   | -2,70456338             | 0               | -2,70456338  |
| 56,20491353                   | -2,929943662            | 0               | -2,929943662 |
| 66,33602717                   | -3,155323944            | 0               | -3,155323944 |
| 76,26388713                   | -3,380704225            | 0               | -3,380704225 |
| 86,13347613                   | -3,606084507            | 0               | -3,606084507 |
| 94,66758408                   | -3,831464789            | 0               | -3,831464789 |
| 105,9094989                   | -4,05684507             | 0               | -4,05684507  |
| 109,6503483                   | -4,05684507             | 0               | -4,05684507  |
| 109,7697219                   | -4,282225352            | 18,87282828     | -4,282225352 |
| 108,9787161                   | -4,507605634            | 38,0244335      | -4,507605634 |
| 106,8378715                   | -4,732985915            | 56,96152166     | -4,732985915 |
| 104,7160727                   | -4,958366197            | 78,94145137     | -4,958366197 |
| 101,645371                    | -5,183746479            | 101,3898797     | -5,183746479 |

## 5 LASKENTAESIMERKIT

### 5.1 Esimerkeissä käytettävä eurokoodimenettely varmuuden määrittelyssä

Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. Eurokoodisarja koostuu tällä hetkellä 58 osasta. Standardien soveltaminen eri maissa vaatii kansallisten liitteiden (NA) laatimista. Suomessa näiden kansallisten liitteiden laatimisesta vastaa Ympäristöministeriö talonrakentamisen ja Liikennevirasto infrastruktuurikohteiden osalta. (Eurokoodi help desk 2012.)

Keskeisin kansallinen infrastruktuurin suunnittelua koskeva eurokoodin soveltamisohje Liikenneviraston antama geoteknisen suunnittelun ohje (Liikennevirasto 2011) ja Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n geoteknisen suunnittelun ohje (RIL 207 2009).

Geoteknisen suunnittelun eurokoodiohjeessa on esitetty eurokoodin mukainen menettely varmuuden laskemiseksi jousimalleissa (RIL 207 2009, 174). Ohjeen mukaan kaikki maaparametrit, maanpaineet, nettovedenpaine ja muut pysyvät kuormat sisällytetään laskelmiin ominaisarvoina.

Kuormitusyhdistelmässä 6.10a laskelman tuloksena saadut arvot muutetaan mitoitusarvoiksi kertomalla osavarmuusluvulla 1,35. Seinän upotussyvyys on riittävä, kun momenttivarmuus tukitason suhteen on vähintään 2,03 ja passiivipaineen mobilisaatioaste enintään 0,49. (RIL 207 2009, 174).

Kuormitusyhdistelmässä 6.10b varmuutta laskettaessa muuttuvat kuormat sisällytetään laskelmaan luvulla 1,3 kerrottuna. Laskelman tuloksena saadut arvot muutetaan mitoitusarvoiksi kertomalla osavarmuusluvulla 1,15. Seinän upotussyvyys on riittävä, kun momenttivarmuus tukitason suhteen on vähintään 1,73 ja passiivipaineen mobilisaatioaste enintään 0,58. (RIL 207 2009, 174; Länsivaara 2012d).

Alla olevaan taulukkoon (taulukko 3) on koottu tukiseinälaskennan kannalta keskeiset osavarmuuskertoimet ja jousimalleilla laskettaessa käytettävät kertoimet. (Jääskeläinen 2011,6; Länsivaara 2012b, 29).

**Taulukko 3: Osavarmuuskertoimet ja jousimallien varmuuskertoimet****Osavarmuuskertoimet**

## Pysyvä epäedullinen

|                           |                    |      |
|---------------------------|--------------------|------|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10a | $\gamma_{Gkj,sup}$ | 1,35 |
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b |                    | 1,15 |

## Pysyvä edullinen

|                           |                    |     |
|---------------------------|--------------------|-----|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10a | $\gamma_{Gkj,inf}$ | 0,9 |
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b |                    | 0,9 |

## Muuttuva epäedullinen

|                           |            |     |
|---------------------------|------------|-----|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b | $\gamma_Q$ | 1,5 |
|---------------------------|------------|-----|

## Kestävyys

|               |     |
|---------------|-----|
| $\gamma_{Re}$ | 1,5 |
|---------------|-----|

**Jousimallilaskennassa käytettävät kertoimet**

## Muuttuvan kuorman kerroin

|                           |                     |     |
|---------------------------|---------------------|-----|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b | $\gamma_Q/\gamma_G$ | 1,3 |
|---------------------------|---------------------|-----|

## Passiivipaineen mobilisaation maksimi

|                           |                                    |      |
|---------------------------|------------------------------------|------|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10a | $1/(\gamma_{G,sup} * \gamma_{Re})$ | 0,49 |
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b | $1/(\gamma_{G,sup} * \gamma_{Re})$ | 0,58 |

## Momenttitasapainon minimi

|                           |                                |      |
|---------------------------|--------------------------------|------|
| Kuormitusyhdistelmä 6.10a | $\gamma_{G,sup} * \gamma_{Re}$ | 2,03 |
| Kuormitusyhdistelmä 6.10b | $\gamma_{G,sup} * \gamma_{Re}$ | 1,73 |

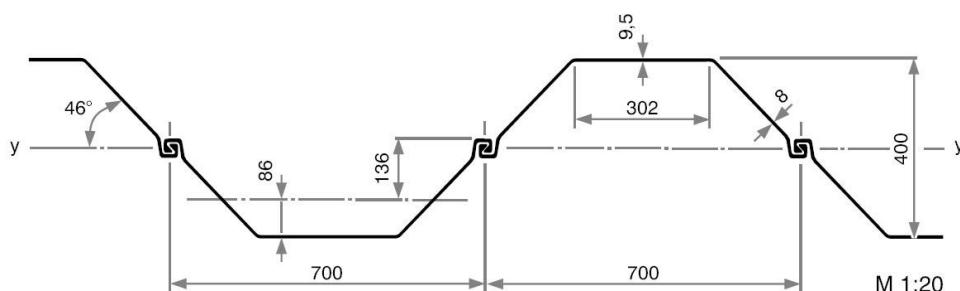
GeoCalc -ohjelmalla voidaan laskea tukiseinän tarvittava upotussyvyys yhden tukitason tapauksessa. Ohjelma laskee varmuuden pyörähtämistä vastaan momenttitasapainon avulla. Varmuus (F 1-support level) esitetään maanpaineita ja varmuutta kuvaavissa tulosgraafeissa.

## 5.2 Esimerkki 1: Tuettu kaivanto kitkamaahan

### 5.2.1 Lähtötiedot

Työmaalla tarvitaan viisi metriä syvä kaivanto. Kaivanto rakennetaan tuettuna. Kaivannon lähellä on rakennelmia, joiden vuoksi tukiseinän vaakasuuntaiset liikkeet voivat olla enintään 22 mm. Tukiseinän ympäristöä käytetään rakennustarvikkeiden varastointiin, jonka johdosta ympäristöön arvioidaan kohdistuvan laaja-alainen 10 kPa pinta-kuorma.

Käytettävissä on Larssen 703 teräsponttiprofiilia (kuva 29), halkaisijaltaan 50 mm ankkuriteräksiä sekä tarvittavat ankkurointitarvikkeet ja teräsprofiilit vaakatukia varten.



Kuva 29: Larssen 703 profiili (Nedeximpo 2012)

Poistetun pintamaan alla on hiekkaa kolmen metrin syvyyteen. Hiekan alla on soraa kuuden metrin syvyyteen. Soran alla on tiivistä moreenia. Pohjavesi on kahden metrin syvyydessä. Pohjatutkimusten ja maanäytteistä tehtyjen laboratoriotutkimusten perusteella kerrosten ominaisuudet ovat seuraavat:





|         | Kuivatilavuus-<br>paino | Kitkakulma | Moduuliluku | Jännitys-<br>eksponentti |
|---------|-------------------------|------------|-------------|--------------------------|
| Hiekka  | 17 kN/m <sup>3</sup>    | 33°        | 200         | 0,5                      |
| Sora    | 18 kN/m <sup>3</sup>    | 35°        | 300         | 0,5                      |
| Moreeni | 20 kN/m <sup>3</sup>    | 38°        | 800         | 0,5                      |

Hiekka sisältää hienoainesta ja on kapillaarista.



### 5.2.2 Laskentaparametrit ja laskentavalinnat

Laskentaohjelmaa varten hiekkakerros on jaettu kahdeksi kerrokseksi pohjavesipinnan kohdalta (kerrokset Hiekka 1 ja Hiekka 2 kuvassa 30). Tilavuuspaino tulee antaa ohjelmalle kuivatilavuuspainona ja ohjelma korjaa painon pohjavesipinnan avulla oikeaksi. Tässä tapauksessa on kuitenkin kapillaarisen vedennousun vuoksi tarpeen käyttää vedenpinnan yläpuolella suurempaa painoa kuin kuivatilavuuspaino. Tässä tapauksessa on arvioitu, että kapillaarinen vedennousu lisää ylimmän kerroksen painoa  $3 \text{ kN/m}^3$ .

| Id | Color   | Layer Name | h [m] | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $\Phi$ [°] |
|----|---|------------|-------|-------------------------------|------------|
| 1. |  ... | Hiekka 1   | 2     | 20                            | 33         |
| 2. |  ... | Hiekka 2   | 1     | 17                            | 33         |
| 3. |  ▼   | Sora       | 3     | 18                            | 35         |
| 4. |  ... | Moreeni    | 5     | 19                            | 38         |

Kuva 30: Esimerkki 1, maaparametrit

Lepopaineen laskentatapana käytetään ohjelman oletuksen mukaisesti Jakyn yhtälöä ja maanpaine kertoimet lasketaan Coulombin teorialla. Koska kyseessä on kitkamaa, laskenta suoritetaan avoimena (drained).

Käytettävissä on maakerrosten moduuliluvut ja jännityseksponentit, joten on tarkoituksenmukaista laskea maanpaineiden siirtymä lepopaineista kohti maksimipaineita moduuliperusteisella materiaalmallilla (MCM). Mallin tarvitsemaksi ylikonsolidoitumistas-teen jännityseksponentiksi annetaan 0,5, mikä tarkoittaa, että vaikka pystyjännitys vähenee kaivun aikana, noin puolet alkuperäisestä vaakatasoisesta jännityksestä säilyy.

Käytettävissä oleva profiili löytyy tukiseinä tietokannasta valmiina. Seinän upotussyvyyttä ei tässä vaiheessa tiedetä, vaan se etsitään laskennan avulla. Tässä vaiheessa upotussyvyudeksi valitaan seitsemän metriä. Syvyys ei todennäköisesti riitä, mutta se selviää simuloinnin avulla. Pystysuuntaiseksi jäykkyydeksi valitaan  $100 \text{ kN/mm/m}$ . Koska tukiseinään ei vaikuta merkittäviä pystysuuntaisia voimia, jäykkyyden arvolla ei ole laskennan kannalta merkitystä.

Seinäkitkan kertoimeksi valitaan sekä aktiivi- että passiivipaineen laskennalle 0,66. Valinta tarkoittaa, että tukiseinän ja maan välisen kitkan arvioidaan olevan kaksi kolmasosaa kitkakulmasta. Valinta tehdään Wall-välilehdellä. Valinnan jälkeen on tarpeen

tarkistaa Soil-välilehdeltä, millaiseksi passiivipaineen kerroin on Coulombin teorian mukaisena toteutunut. Koska kertoimet ovat suurempia kuin eurokoodin mukaiset kertoimet (Liite 3), muutetaan laskentatapa käyttäjän määrittämäksi ja asetetaan passiivikertoimet eurokoodin mukaisiksi (kuva 31).

| Ko Model | Ko   | Earth Pres. Model | Ka   | Kp   | d/ud    | Material Model |
|----------|------|-------------------|------|------|---------|----------------|
| Jaky     | 0,46 | User-defined      | 0,26 | 6,3  | Drained | MCM            |
| Jaky     | 0,46 | User-defined      | 0,26 | 6,3  | Drained | MCM            |
| Jaky     | 0,43 | User-defined      | 0,24 | 7,2  | Drained | MCM            |
| Jaky     | 0,38 | User-defined      | 0,22 | 10,5 | Drained | MCM            |

**Kuva 31: Esimerkki 1, passiivipaineekertoimien tarkistaminen**

Pohjavesitiedot asetetaan siten, että kaivannon puolella vesi pidetään kulloisenkin kaivuvaiheen tasolla. Varmuus hydraulista murtumaa vastaan on annetuilla tiedoilla riittävä, mikä ilmenee välilehdeltä *Ground Water* valintojen *Seepage* ja *Safety Factor Against Hydraulic Failure* avulla sivun päivityksen jälkeen.

Tukiseinän taakse tuleva pintakuorma asetetaan aktivoitumaan kaivun ollessa syvyydellä 2,5 metriä. Tämä mahdollistaa sen, että ylimmän tukitason korkeusasema voidaan määrätä vapaammin. Ratkaisu on mahdollinen rajoittamalla alueen käyttöä ylimmän ankkurin asentamiseen saakka.

### 5.2.3 Toimivan ratkaisun etsiminen

Suorittamalla laskenta tässä vaiheessa, ilmenee, että tukiseinä kaatuisi noin kahden metrin kaivamisen jälkeen. Tämän tiedon perusteella asetetaan tukitaso 1,5 metrin syvyyteen. Tukitasolle asennetaan vaakasuuntaiset ankkuriteräksset kahden metrin välein. Suorittamalla laskenta, havaitaan, että seinä kaatuisi noin viiden metrin syvyydessä.

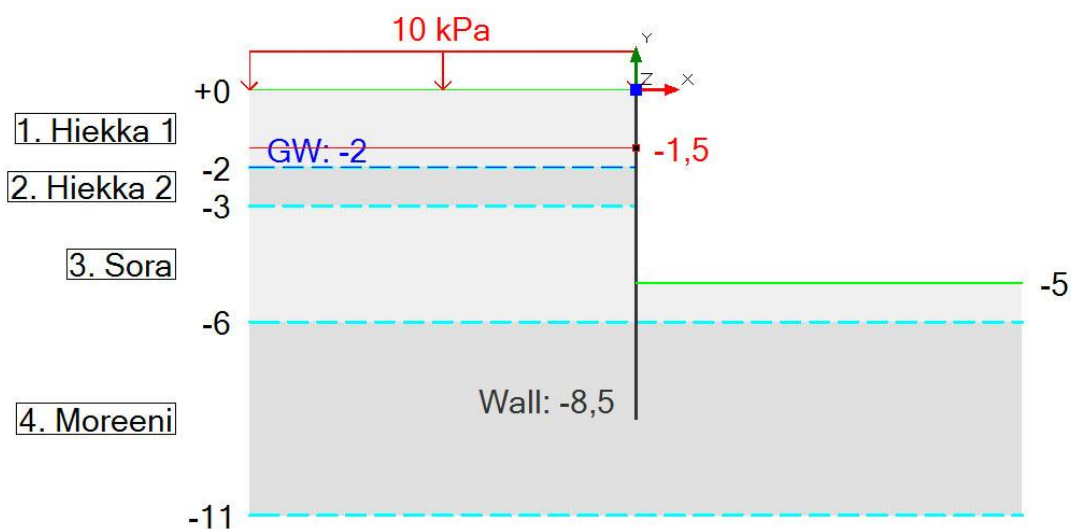
Laskennan tuloksista voidaan päätellä, että ankkurivoiman lisääminen valitulle tukitasolle ei yksin riitä, sillä kriittinen tekijä on riittämätön passiivinen maanpaine. Kun maanpainetta kasvatetaan lisäämällä upotussyvyyttä 0,5 metriä, seinä pysyy laskennallisesti pystyssä ja vaakasuuntaiset siirtymät ovat asetetuissa rajoissa.

### 5.2.4 Varmuustarkastelu eurokoodeilla

Määritetään tarvittava upotussyvyys ensin kuormitusyhdistelmällä 6.10b. Korotetulla kuormalla ohjelman laskema varmuus pyörähtämistä vastaan on 1,99 eli riittävä. Passiivipaineen mobilisaatioaste on 0,76, eli liian korkea. Lisäämällä upotussyvyyttä 8,25 metriin, mobilisaatioaste on 0,58, eli juuri riittävä.

Tarkistetaan upotussyvyyden riittävyys kuormitusyhdistelmässä 6.10a suorittamalla laskenta ilman muuttuvaa kuormaa. Passiivipaineen mobilisaatioaste on 0,55 eli liian suuri. Upotussyvyydellä 8,5 metriä mobilisaatioaste on 0,43, joka on alle raja-arvon 0,49.

Edellä suoritetun tarkastelun perusteella upotussyvyys 8,5 metriä on riittävä käytetyillä materiaali- ja tuentaratkaisulla. Ratkaisu on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32: Esimerkki 1, ratkaisu

Ohjelma laskee tarvittavat tukivoimat ja taivutusmomentit. Laskenta on suoritettu erikseen kuormitusyhdistelmälle 6.10a ja 6.10b.

Laskennan tulokset ovat eurokoodissa tarkoitettuja ominaisarvoja. Ominaisarvot muutetaan mitoitusarvoiksi kertomalla ne kuormitusyhdistelmittäin epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluvulla (taulukko 4).

**Taulukko 4: Esimerkki 1, mitoitusarvot**

Kuormitusyhdistelmä 6.10a:

|                  | Ominaisarvo | $\gamma_G$ | Mitoitusarvo |
|------------------|-------------|------------|--------------|
| Tukivoima        | 125 kN      | 1,35       | 168 kN       |
| Taivutusmomentti | 100 kNm     | 1,35       | 135 kNm      |

Kuormitusyhdistelmä 6.10b:

|                  | Ominaisarvo | $\gamma_G$ | Mitoitusarvo |
|------------------|-------------|------------|--------------|
| Tukivoima        | 155 kN      | 1,15       | 178 kN       |
| Taivutusmomentti | 118 kNm     | 1,15       | 135 kNm      |

Mitoittavaksi kuormitusyhdistelmäksi osoittautuu kuormitusyhdistelmä 6.10b. Mitoittava tukivoima 178 kN tarkoittaa yhdeltä ankkurilta edellytettävää kestävyyttä.

Ohjelmalle on Wall-välilehdellä annettu tukiseinämateriaalin tiedot. Ohjelma käyttää niitä laskiessaan mallin toimintaa. Laskenta on kuitenkin suoritettu ilman eurokoodivarmuutta, joten on tarkistettava, että seinämä kestää taivutusmomentin mitoitusarvon 135 kNm. Taivutuskestävyyttä arvioitaessa on lisäksi huomattava, että seinä tulee olla rakennettu siten, etteivät profiilit pääse liikkumaan toisiinsa nähden, mikäli profiilit liittyvät toisiinsa seinän keskiviivalla, kuten on kyse Larssen 703 profiilissa.

Käyttörajatilatarkastelua ei ole tässä tapauksessa tarpeen suorittaa erikseen, sillä vaakasuuntaiselle siirtymälle asetettu raja alittui korotetulla kuormallakin kuormitusyhdistelmällä 6.10b. Mikäli näin ei olisi tilanne, tulisi käyttörajatilatarkastelu suorittaa ominaisarvoilla.

### 5.3 Esimerkki 2: Tuettu kaivanto kerrokselliseen maahan

#### 5.3.1 Lähtötiedot

Kevyen liikenteen väylän viereen tarvitaan laaja-alainen neljä metriä syvä kaivanto. Tien liikenteen arvioidaan aiheuttavan keskimäärin 60 kN staattisen kuorman tiemetrille kuuden metrin leveydelle kaivannosta. Tien rakenne kärsii, jos tukiseinä liikkuu vaakatasossa enemmän kuin 20 mm.

Tie on rakennettu 2,5 metriä paksulle täyttöpenkereelle. Penkerein alla on neljä metriä savea ja sen alla tiivis moreeni. Pohjatutkimusten ja maanäytteistä tehtyjen laboratorio-tutkimusten perusteella kerrosten ominaisuudet ovat seuraavat:

|         | Kuivatilavuus-<br>paino | Leikkauslujuus | Moduuliluku | Jännitys-<br>eksponentti |
|---------|-------------------------|----------------|-------------|--------------------------|
| Täyttö  | 19 kN/m <sup>3</sup>    | 35°            | 300         | 0,5                      |
| Savi    | 16 kN/m <sup>3</sup>    | 10 kPa (cu)    | 30          | 0                        |
| Moreeni | 21 kN/m <sup>3</sup>    | 39°            | 800         | 0,5                      |

Pohjavesi on täytön alapinnassa. Täyttömateriaali ei sisällä hienoainesta, joten kapillaarista veden nousua ei tapahdu.

### 5.3.2 Laskentaparametrit ja laskentavalinnat

Lepopaineen laskentatapana käytetään Jakyn yhtälöä ja maanpaine kertoimet lasketaan Coulombin teorialla. Täyttömaan ja moreenin osalta laskenta suoritetaan avoimena (drained), saven osalta suljettuna (undrained).

Maanpaineiden siirtymä lepopaineista kohti maksimipaineita lasketaan moduuliperusteisella materiaalmallilla (MCM), koska käytettävissä on mallin tarvitsemat juuri tästä kohteesta selvitetty parametrit. Ylikonsolidoitumisasteen jännityseksponentiksi annetaan savelle 1 ja kitkamaille 0,5. Saven vaakatasoisen jännityksen arvioidaan siis säilyvän, vaikka pystyjännitys vähenee kaivun aikana.

Profiiliksi valitaan alustavasti teräsprofiili Larssen 24. Profiili löytyy ohjelman tukiseinä tietokannasta valmiina. Seinän upotussyvyudeksi valitaan aluksi 8,5 metriä. Pysytysuuntaiseksi jäykkyydeksi valitaan 100 kN/mm/m. Valinta vastaa todellisuutta, sillä seinä tukeutuu tiiviiseen moreeniin.

Seinäkitkan kertoimeksi valitaan sekä aktiivipuolelle 0,66 ja passiivipaineen laskentaan 0,33. Coulombin teorian mukaiset passiivipaine kertoimet osoittautuvat olevan näillä valinnoilla samaa suuruusluokkaa eurokoodin mukaisten kertoimien kanssa.

Pohjavesitiedot asetetaan siten, että kaivannon puolella vesi pidetään kulloisenkin kaivuvaiheen tasolla. Varmuus hydraulista murtumaa vastaan osoittautuu annetuilla tiedoilla riittäväksi.

Tukiseinän taakse määritellään liikenteen aiheuttama kuorma viivakuormana. Kuorma asetetaan aktivoitumaan kaivun ollessa kahden metrin syvyydellä, jolloin saadaan lisää liikkumavaraa tukitason korkeutta määriteltäessä. Aktivoituminen voidaan asettaa alemmas rajoittamalla kaivun alkuvaiheessa tien käyttöä.

### **5.3.3 Käyttörajatilatarkastelu**

Etsitään toimivaa ratkaisua, joka täyttää käyttörajatilaehdon. Käyttörajatilatarkastelu tehdään suorittamalla ohjelmalla laskentoja ominaisarvoilla. Käyttörajatilaehto täyttyy tässä tapauksessa, kun vaakasuuntainen siirtymä on enintään 20 mm.

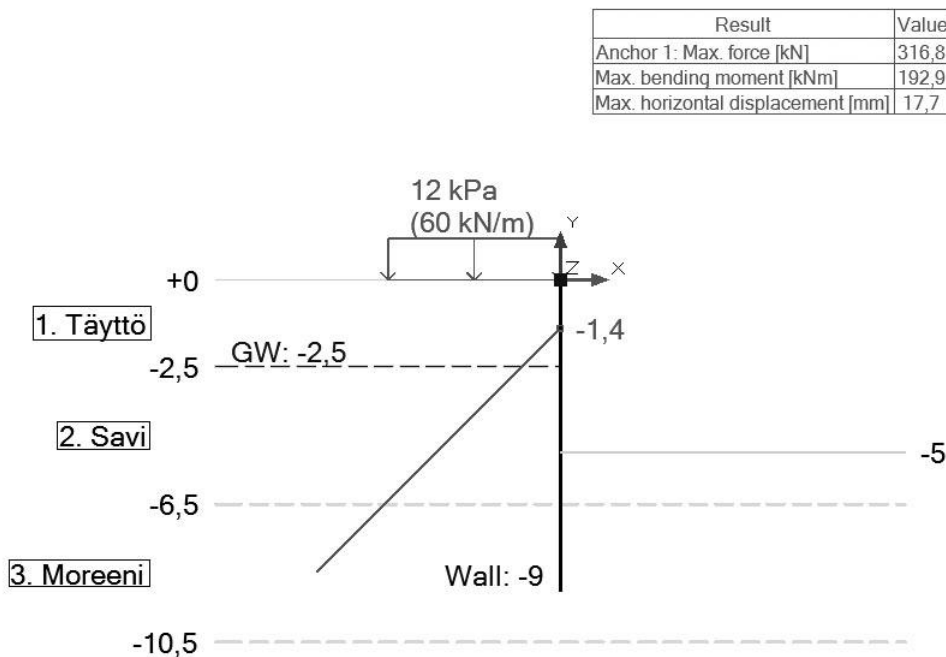
Käyttörajatilaehdon täyttäviä ratkaisuja löytyy useita. Voidaan valita erilaisia seinätyyppejä ja erilaisia tuentatapoja. Valinta tehdään kustannusten, käytettävissä olevien profiilien ja koneiden, ratkaisujen tuttuuden tai muiden syiden perusteella.

Ratkaisu etsitään kokeilemalla. Yksi tapa löytää ratkaisu on pyrkiä ulottamaan seinä kovaan maahan ja pyrkiä saamaan seinälle riittävä tuki yhdellä tukitasolla. Tukitason korkeusasema on määriteltävissä koelaskennoilla. Tukitason tulee olla niin ylhäällä, että seinän aluksi tukematon ylätaso ei kaivun edetessä siirry vaakatasossa liikaa ja toisaalta niin alhaalla, ettei seinän taivutusmomentti kasva liian suureksi.

Tässä esimerkissä on aloitettu tarkastelu Larssen 24 profiileista rakennetusta seinästä upotussyvyydellä 8,5 metriä. Koelaskelmilla havaitaan, että valittu upotussyvyys ja yksi tukitaso on vaikea yhdistää stabiiliksi rakennelmaksi. Kun upotussyvyyttä lisätään yhdeksään metriin, toimiva rakennelma löytyy esimerkiksi, kun seinä tuetaan 1,4 metrin syvyydellä maanpinnasta. Valitaan tukitavaksi ankkurointi 45 asteen kaltevuuteen asetuilla halkaisijaltaan 40 mm olevilla tankoankkureilla.

Koelaskelmat osoittavat, että vaikka seinämä pysyy pystyssä, vaakatasoiset siirtymät ovat suurempia kuin asetettu enimmäissiirtymä 20 mm. Kun ankkurit esijännitetään 80

kN:n voimalla, suurimmaksi vaakasuuntaiseksi siirtymäksi muodostuu 17,7 mm. Tämä käyttörajan mukainen ratkaisu on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33: Esimerkki 2, käyttöraja, esijännitys 80 kN

### 5.3.4 Murtorajatilatarkastelu

Murtorajatilatarkastelu aloitetaan tarkistamalla käyttörajoitustarkastelun perusteella määritellyn upotussyvyyden (9 m) riittävyys kuormitusyhdistelmissä 6.10a ja 6.10b.

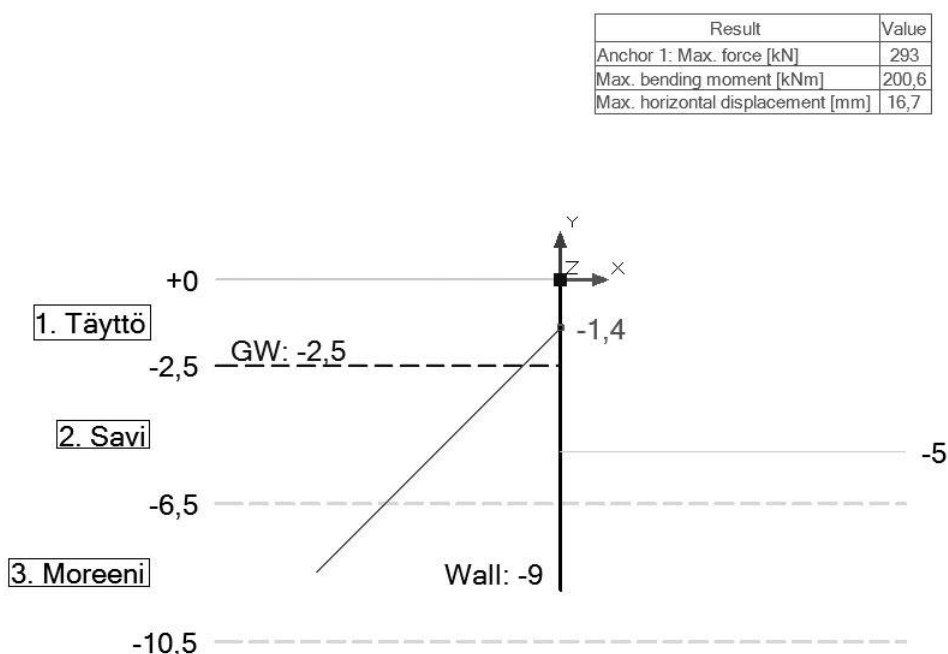
Suoritetaan laskenta kummallakin kuormitusyhdistelmällä. Laskenta suoritetaan kuormitusyhdistelmässä 6.10a ilman muuttuvaa kuormaa ja kuormitusyhdistelmässä 6.10b muuttuva kuorma kertoimella 1,3 kerrottuna. Tarkastetaan laskennan tuloksena syntyvistä maanpainegraafeista (Earth Pressure), täyttävätkö momenttitasapaino ja passiivipaineen mobilisaatioaste niille kummallekin kuormitusyhdistelmälle erikseen asetetut kriteerit. Kriteerit on esitetty edellä taulukossa 3.

Tässä tapauksessa momenttitasapaino ja mobilisaatioaste ovat kriteerien mukaiset, joten tukiseinä pysyy eurokoodien mukaan pystyssä myös murtorajatilatarkastelun perusteella.

Tässä esimerkissä tukiseinän tuki perustuu esijännitettyihin ankkureihin. Esijännityksen ominaisarvo on määriteltä edellä käyttörajatilan perusteella. Tavalla, millä esijännitys otetaan huomioon murtorajatilatarkastelussa, on merkitystä mitoitusarvoihin.

Eurokoodien suosituksena on, että murtorajatilatarkastelussa esijännitysvoima muista kuormista poiketen käsiteltäisiin edullisena kuormana, jolloin esijännitysvoima kerrottaisiin edullisen kuorman osavarmuusluvulla. Eurokoodisuosituksessa edullisen kuorman osavarmuusluku on kuitenkin 1, kun se Suomen kansallisessa liitteessä on 0,9. Jos Suomessa meneteltäisiin jousimalleihin perustuvissa laskentamalleissa eurokoodisuosituksen mukaisesti, käytäntö johtaisi varmuutta arvioitaessa epävarmalle puolelle. Tämän vuoksi on perusteltua käyttää ankkurivoimissa ominaisarvoa. (Länsivaara 2012b, 34.)

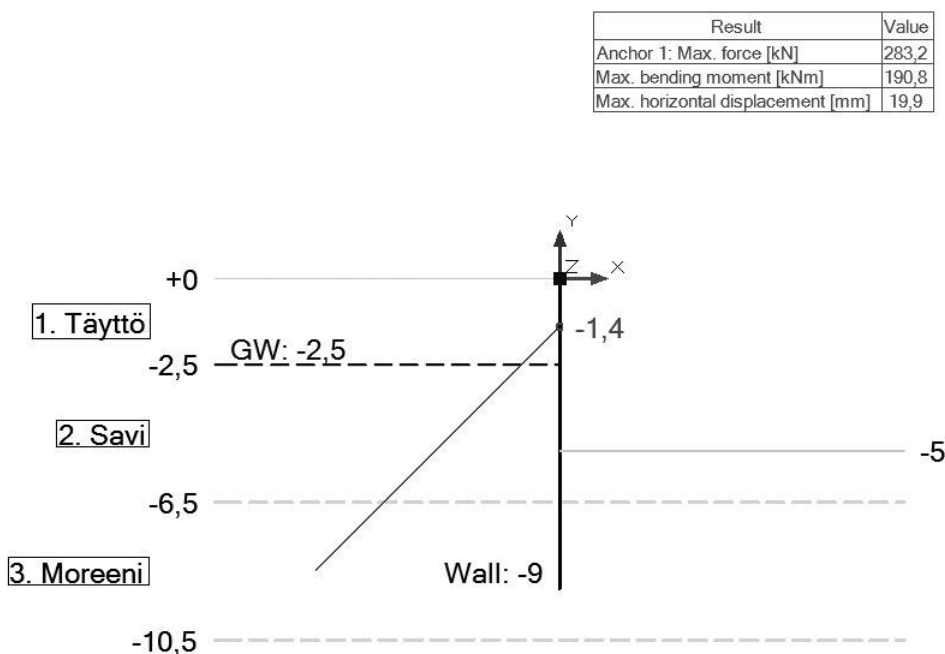
Murtorajatilatarkastelu tehdään erikseen kuormitusyhdistelmillä 6.10a ja 6.10b. **Kuormitusyhdistelmä 6.10a** tarkastellaan ilman muuttuvaa kuormaa. Esijännitysvoima on kuitenkin määräytynyt pääasiassa muuttuvan kuorman perusteella. Mikäli esijännitys on liian suuri kuormitusyhdistelmään nähden, yhdistelmän kautta määritellyt mitoitukset muodostuvat tarpeettoman suuriksi.



Kuva 34: Murtorajatila 6.10a, esijännitys 80 kN



Edellä kuvassa 34 on kuormitusyhdistelmän 6.10a laskennassa käytetty käyttörajatila-tarkastelun perusteella määriteltyä esijännitystä 80 kN ja alla kuvassa 35 puolta pienempää esijännitystä 40 kN.

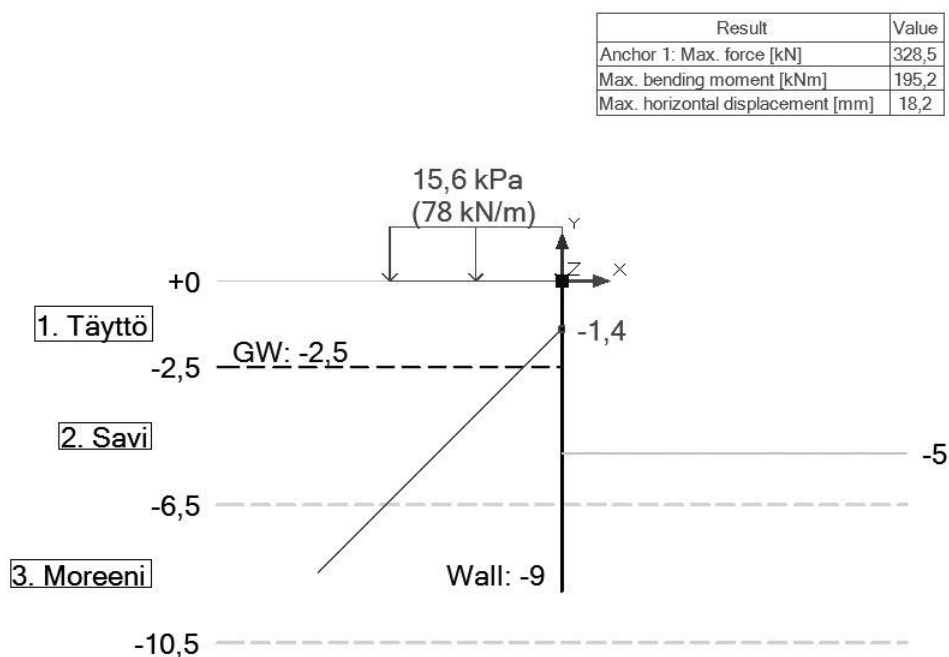


Kuva 35: Murtorajatila 6.10a, esijännitys 40 kN

Liitteessä 5 on tarkasteltu esimerkin ankkurivoimakuvioita eri esijännityksillä. Kuvioista voidaan päätellä, että kuormitusyhdistelmän 6.10a tarkastelun voisi tässä esimerkissä tehdä täysin ilman esijännitystä. Kun valitaan kuormitusyhdistelmän esijännitykseksi 40 kN kuvan 35 mukaisesti, ollaan varmalla puolella.

Toisaalta tässä esimerkissä mitoitusarvojen erot eivät eri esijännityksillä muodostu erityisen suuriksi. Tarkastelu on kuitenkin syytä tehdä. Jos tarkastelussa ilmenee, että ankkurivoimakuvajaajassa on selkeä piikki, on ulkoisen kuorman tapauksessa määritetty esijännitysvoima liian suuri (Länsivaara 2012b, 35).

**Kuormitusyhdistelmässä 6.10b** tulee käyttää käyttörajatilatarkastelussa määriteltyä esijännitysvoiman ominaisarvoa, sillä tarkastelussa on mukana muuttuva kuorma. Muuttuva kuorma tulee tässä kuormitusyhdistelmässä korottaa kertoimella 1,3. Kuormitusyhdistelmä ja sen keskeiset tulokset on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36: Murtorajatila 6.10b, esijännitys 80 kN

Laskennan tulokset ovat eurokoodissa tarkoitettuja ominaisarvoja. Ominaisarvot muutetaan mitoitusarvoiksi kertomalla ne kuormitusyhdistelmittäin epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluvulla (taulukko 5). Taulukossa on esitetty mitoitusarvot kuormitusyhdistelmälle 6.10a kahdella eri esijännitysvoimalla.

#### Taulukko 5: Esimerkki 2, mitoitusarvot

Kuormitusyhdistelmä 6.10a  
esijännitys 80 kN :

|                  | Ominaisarvo | $\gamma_G$ | Mitoitusarvo |
|------------------|-------------|------------|--------------|
| Tukivoima        | 293 kN      | 1,35       | 396 kN       |
| Taivutusmomentti | 201 kNm     | 1,35       | 272 kNm      |

Kuormitusyhdistelmä 6.10a  
Esijännitys 40 kN:

|                  | Ominaisarvo | $\gamma_G$ | Mitoitusarvo |
|------------------|-------------|------------|--------------|
| Tukivoima        | 283 kN      | 1,35       | 382 kN       |
| Taivutusmomentti | 191 kNm     | 1,35       | 258 kNm      |

Kuormitusyhdistelmä 6.10b:

|                  | Ominaisarvo | $\gamma_G$ | Mitoitusarvo |
|------------------|-------------|------------|--------------|
| Tukivoima        | 329 kN      | 1,15       | 379 kN       |
| Taivutusmomentti | 195 kNm     | 1,15       | 225 kNm      |

Tässä esimerkissä murtorajatilán kannalta ratkaisevaksi tarkasteluksi osoittautuu kuormitusyhdistelmä 6.10a. Tukivoiman mitoitusarvo on 382 kN ja taivutusmomentin mitoitusarvo 258 kNm. Todellisuudessa mitoittava tekijä on käyttörajatilatarkastelu, jossa edellytetään enintään 20 mm:n vaakasuuntaista siirtymää ja jonka perusteella seinän upotussyvyys ja ankkureiden esijännitysvoima tuli määriteltä.

#### **5.4 GeoCalc -ohjelman dokumentteihin sisältyvät laskentaesimerkit**

GeoCalc -ohjelman oheisaineistoon sisältyy useita itse ohjelmalla toteutettuja laskentaesimerkkejä. Esimerkeissä on mukana muun muassa kalliotapeilla tuettuja seiniä ja porapaaluseiniä. Mukana on myös esimerkki, jossa kaivannon puolen maata on vahvistettu stabiloimalla riittävien tukevien maanpaineiden aikaansaamiseksi.

Esimerkit ovat helppokäyttöisiä ja sisältävät oppimisen kannalta oleellista tietoa.

## 6 POHDINTA

Tuettujen kaivantojen suunnittelussa on otettava huomioon monia näkökohtia. Sen vuoksi sitä ei voida automatisoida eikä "ulkoistaa" laskentaohjelman suoritettavaksi, oli laskentaohjelma kuinka hyvä tahansa. Samasta syystä laskentaohjelmaa on vaikea tehdä helppokäyttöiseksi.

GeoCalc -tukiseinäosio on käyttäjäystävällinen, mutta edellyttää käyttäjältä suuren määrän teoreettista ja käytännöllistä tietoa. Ohjelman käytön aloittaminen on helppoa, mutta edistyneempi käyttö vaativaa. Itseopiskelun tai lyhyen ohjatun opiskelun avulla on vaikea saavuttaa tuotantokäytössä vaadittavaa ammattitaitoa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli helpottaa ohjelmaan tutustumista lyhyen teoreettisen tarkastelun, ohjelman esittelyn ja helppojen laskentaesimerkkien avulla. Tavoitteen toteutumista voi arvioida toteamalla, että toteutettu teoreettinen tarkastelu on liian lyhyt ja ohut tarpeeseen nähden, ohjelman esittely kattava, mutta samalla raskas ja laskentaesimerkit suhteellisen vaativia. Toisaalta ohjelman oheismateriaali sisältää käyttökelpoisia laskentaesimerkkejä.

Tuettujen kaivantojen mitoittaminen on prosessi, jossa tarvitaan tarkoituksenmukaisesti mallinnettua laskentavoimaa. Novapoint GeoCalc -ohjelma tuo sitä osaavalle suunnittelijalle.

## LÄHTEET

Eurokoodi help desk. Eurokoodien tilanne nyt.

Luettu 21.11.2011. <http://www.eurocodes.fi/> Eurokoodien tilanne nyt/.

Kapeat kaivannot. 2010. Työsuojeluoppaita ja -ohjeita 15.

Tampere. Aluehallintovirasto.

Korkiala-Tanttu L. 2012. Geotekniikan perusteet. Aalto-yliopisto. Kurssi Rak-50.2122. Luennon 6 materiaali. Tulostettu 27.8.2012.

<https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.2122/luennot/>.

Jääskeläinen R. 2011. Geotekniikan perusteet. Kolmas painos. Tampere: Tammertekniikka/ Amk-Kustannus Oy.

Laaksonen, R. & Lojander, M. 1990. Plastisuusteoria maamekaniikassa. Teoksessa RIL 157-2 Geomekaniikka II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Liikenneviraston ohjeita 12/2011. 2011. Eurokoodin soveltamisohje.

Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 (10.6.2011). Helsinki: Liikennevirasto.

Lojander M. 1985. Geostaattiset jännitykset. Teoksessa RIL 157-1 Geomekaniikka I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Lojander, M. 2012. Geomekaniikan perusteet. Aalto-yliopisto. Kurssi Rak-50.1119. Luento 4 ja 5 luentomateriaali.

Tulostettu 20.10.2012.

<https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-50.1119/materiaali/>.

Länsivaara T. 2012a. Tukiseinä. Opintomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto, kurssi MPR-5131 Pohjarakentamisen laskentaohjelmat.

Länsivaara T. 2012b. Tukiseinä - erikoistilanteet. Opintomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto, kurssi MPR-5131 Pohjarakentamisen laskentaohjelmat.

Länsivaara T. 2012c. Luento-opetus. Tampereen teknillinen yliopisto, kurssi MPR-5131 Pohjarakentamisen laskentaohjelmat.

Länsivaara T. 2012d. Asiantuntijahaastattelu 24.10.2012. Tampere.

MaaRYL 2010. 2010. Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset. Talonrakennuksen maatyöt. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Naresh C. Samtani, N. & and Nowatzki, E. 2006. FHWA NHI-06-089 10 – Earth Retaining Structures. SOILS AND FOUNDATIONS REFERENCE MANUAL – Volume II. Washington, D.C.:National Highway Institute. (Opintomoniste.)

Nedeximpo. 2012. Profielblad Larssen 703.

Tulostettu 21.11.2011. <http://www.nedeximpo.info>.

Nykänen S. 2009. Kaivantojen tukiseinien suunnittelu ja toteuttaminen pysyvinä rakenteina. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Perkkiö H. 2009. Tuettujen kaivantojen riskienhallinta. Teknillinen korkeakoulu (nyk. Aalto-yliopisto). Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Diplomityö.

Poulos S. 1971. The stress-strain curves of soils. Winchester, Massachusetts: Geotechnical engineers, inc.

Tulostettu 21.11.2011. <http://www.soilmechanics.us/StressStrain.pdf>,

Rakentamismääräykset ja eurokoodisuunnittelu. 2012. Ympäristöministeriö. Tulostettu 21.11.2012. <http://www.ymparisto.fi/>.

Rantamäki M., Jääskeläinen R. & Tammirinne M. 1986. Geotekniikka. 5. muuttamaton painos. Vaasa: Tekijät ja Otakustantamo.

RIL 121-2004. 2004. Pohjarakennusohjeet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 181-1989. 1989. Rakennuskaivanto-ohje. Helsinki: : Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RIL 207-2009. 2009. Geotekninen suunnittelu: eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Ruotsala M. 2011. Ratojen tukiseinien mitoittaminen Eurokoodilla. Aalto-yliopisto. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. Diplomityö.

Tran A. 2008. Tukiseinärakenteiden mitoittaminen rataympäristössä. Teknillinen korkeakoulu (nyk. Aalto-yliopisto). Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Diplomityö.

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta 26.3.2009/205.

Vianova. 2012a. Novapoint GeoCalc -ohjelman peruskäyttöohje Versio 2.3. Espoo: Vianova Systems Finland Oy.

Vianova. 2012b. Tukiseinä. Novapoint GeoCalc -ohjelman tukiseinämoduulin käyttöohje Versio 2.3. Espoo: Vianova Systems Finland Oy.

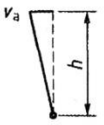
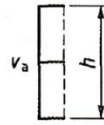
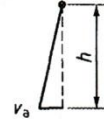
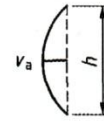
Whitlow R. 1994. Basic soil mechanics. Third edition. Harlow: Longman Group Limited.

# LIITTEET

## Liite 1. Maanpaineen mobilisoituminen (RIL 207 2009, 237-238)

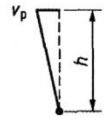
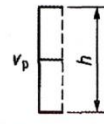
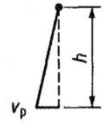
1 (1)

**Taulukko C.1.** Suhteet  $v_a/h$  kitkamaille.

| Seinän siirtymän tyyppi   | $v_a/h$<br>löyhä maa<br>% | $v_a/h$<br>tiivis maa<br>% |
|---|---------------------------|----------------------------|
| a)   | 0,4 ... 0,5               | 0,1 ... 0,2                |
| b)   | 0,2                       | 0,05 ... 0,1               |
| c)   | 0,8 ... 1,0               | 0,2 ... 0,5                |
| d)  | 0,4 ... 0,5               | 0,1 ... 0,2                |

$v_a$  aktiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä  
 $h$  seinän korkeus

**Taulukko C.2.** Suhteet  $v_p/h$ - ja  $v/h$  arvolle  $0,5\sigma_p$  kitkamaille.

| Seinän siirtymän tyyppi  | $v_p/h$ ( $v/h$ $0,5 \sigma_p$ )<br>löyhä maa<br>% | $v_p/h$ ( $v/h$ $0,5 \sigma_p$ )<br>tiivis maa<br>% |
|--|--|---|
| a)  | 7 (1,5) ... 25 (4,0)                               | 5 (1,1) ... 10 (2,0)                                |
| b)  | 5 (0,9) ... 10 (1,5)                               | 3 (0,5) ... 6 (1,0)                                 |
| c)  | 6 (1,0) ... 15 (1,5)                               | 5 (0,5) ... 6 (1,3)                                 |

$v$  seinän siirtymä  
 $v_p$  tehokkaan passiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän siirtymä  
 $h$  seinän korkeus  
 $\sigma_p$  täysin mobilisoitu passiivinen maanpaine

## Liite 2. Moduuliluvut ja jännityseksponentit

1 (1)

Lähde: (Tiehallinto 2001, Liite 5)

Taulukko 10.1. Karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella (Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa, TIEL 2172068).

| Maalaji                                 |                  | Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohja-<br>vedenpinnan |                  | Kitka-<br>kulma<br>(°) | Janbun yhtälön<br>muodonmuutos-<br>parametri |                                  | Kairausvastus                                |                               |                                |
|---|------------------|--|------------------|------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------|
|   |                  | Ylä-<br>puolella   | Ala-<br>puolella |                        | Moduuli-<br>luku<br>m                        | Jännitys-<br>ekspon-<br>nentti β | Puristin-<br>kairaus<br>q <sub>c</sub> (MPa) | Paino-<br>kairaus<br>Pk/0,2 m | Heijari-<br>kairaus<br>L/0,2 m |
| Karkea<br>siltti                        | Löyhä            | 14 ... 16  | 9 ...            | 28                     | 30 ... 100                                   | 0,3                              | < 7  | < 40                          | < 8                            |
|   | Keski-<br>tiivis |  |                  | 30                     | 70 ... 150                                   | 0,3                              | 7 ... 15                                     | 40 ... 100                    | 8 ... 25                       |
|   | Tiivis           | 16 ... 18  | 11               | 32                     | 100 ... 300                                  | 0,3                              | > 15   | > 100                         | > 25                           |
| Hieno<br>hiekk<br>d <sub>10</sub> <0,06 | Löyhä            | 15 ... 17  | 9 ...            | 30                     | 50 ... 150                                   | 0,5                              | < 10   | 20 ... 50                     | 5 ... 15                       |
|   | Keski-<br>tiivis |  |                  | 33                     | 100 ... 200                                  | 0,5                              | 10 ... 20                                    | 50 ... 100                    | 15 ... 30                      |
|   | Tiivis           | 16 ... 18  | 11               | 36                     | 150 ... 300                                  | 0,5                              | > 20   | > 100                         | > 30                           |
| Hiekka<br>d <sub>10</sub> >0,06         | Löyhä            | 16 ... 18  | 10 ...           | 32                     | 150 ... 300                                  | 0,5                              | < 6  | 10 ... 30                     | 5 ... 12                       |
|   | Keski-<br>tiivis |  |                  | 35                     | 200 ... 400                                  | 0,5                              | 6 ... 14                                     | 30 ... 60                     | 12 ... 25                      |
|   | Tiivis           | 18 ... 20  | 12               | 38                     | 300 ... 600                                  | 0,5                              | > 14   | > 60                          | > 25                           |

Taulukko 10.2. Kairausvastukseen perustuva lujuus- ja muodonmuutosparametri-  
en arviointi soralla ja moreenilla (Pohjarakennusohjeet sillansuun-  
nittelussa, TIEL 2172068).

| Maalaji |                  | Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohja-<br>vedenpinnan |                  | Kitka-<br>kulma<br>(°) | Janbun yhtälön<br>muodonmuutos-<br>parametri |                               | Kairausvastus                                |                               |                                |
|---------|------------------|--|------------------|------------------------|--|-------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------|
|         |                  | Ylä-<br>puolella   | Ala-<br>puolella |                        | Moduuliluku<br>m                             | Jännitys-<br>eksponentti<br>β | Puristin-<br>kairaus<br>q <sub>c</sub> (MPa) | Paino-<br>kairaus<br>Pk/0,2 m | Heijari-<br>kairaus<br>L/0,2 m |
| Sora    | Löyhä            | 17 ... 19  | 10 ...           | 34                     | 300 ... 600                                  | 0,5                           | < 5,5  | 10 ... 25                     | 5 ... 10                       |
|         | Keski-<br>tiivis |  |                  | 37                     | 400 ... 800                                  | 0,5                           | 5,5 ... 12                                   | 25 ... 50                     | 10 ... 20                      |
|         | Tiivis           | 18 ... 20  | 12               | 40                     | 600 ... 1200                                 | 0,5                           | > 12   | > 50                          | > 20                           |
| Moreeni | Hyvin<br>löyhä   | 16 ... 19  | 10 ... 12        | ... 34                 | (≤100) *<br>300 ... 600                      | 0,5                           | < 10   | < 40                          | < 20                           |
|         | Löyhä            | 17 ... 20  | 10 ... 12        | ... 36                 | (100...250)*<br>600 ...                      | 0,5                           | > 10   | 40 ... 100                    | 20 ... 60                      |
|         | Keski-<br>tiivis | 18 ... 21  | 11 ... 13        | ... 38                 | 800 ...                                      | 0,5                           | -  | > 100                         | 60 ... 140                     |
|         | Tiivis           | 19 ... 23  | 11 ... 14        | ... 40                 | 1200 ...                                     | 0,5                           | -  | Lyömällä                      | > 140                          |

\* jos moreeni ei ole ollut jäätikön puristamana

Taulukko 10.3. Louheen lujuus- ja muodonmuutosparametrien likimääräinen arvi-  
ointi.

| Louheen raekoko                               | Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) | Moduuliluku<br>m | Jännitys-<br>eksponentti<br>β | Kitkakulman<br>huippuarvo<br>(°) |
|---|------------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Esimurskattu louhe<br>0...150 /<br>0...300 mm | 17 ... 22                          | 500 ... 2000     | 0,5                           | 38 ... 50                        |
| Louhe 0...300 /<br>0...600 mm                 | 17 ... 22                          | 300 ... 1500     | 0,5                           | 38 ... 50                        |

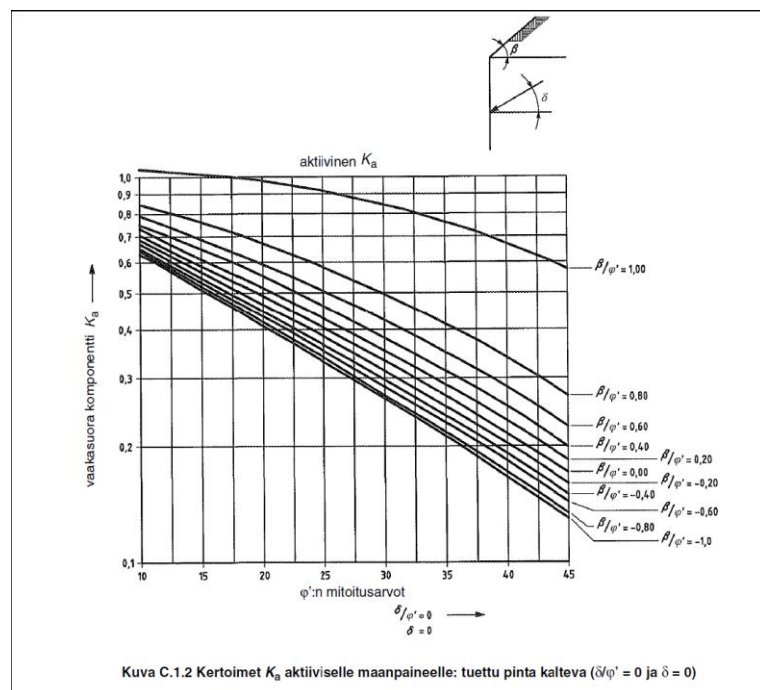
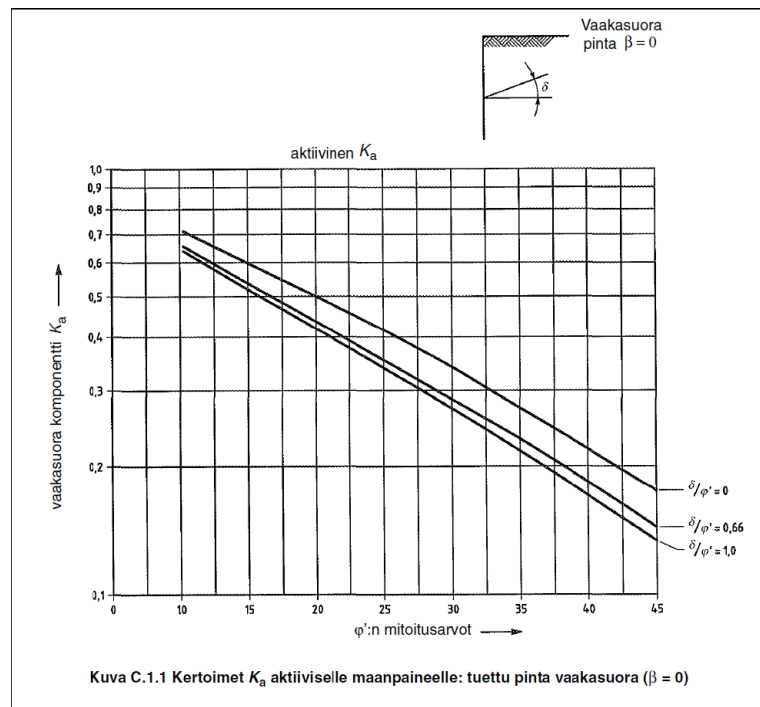


## Liite 3. Eurokoodin mukaiset maanpainekertoimet

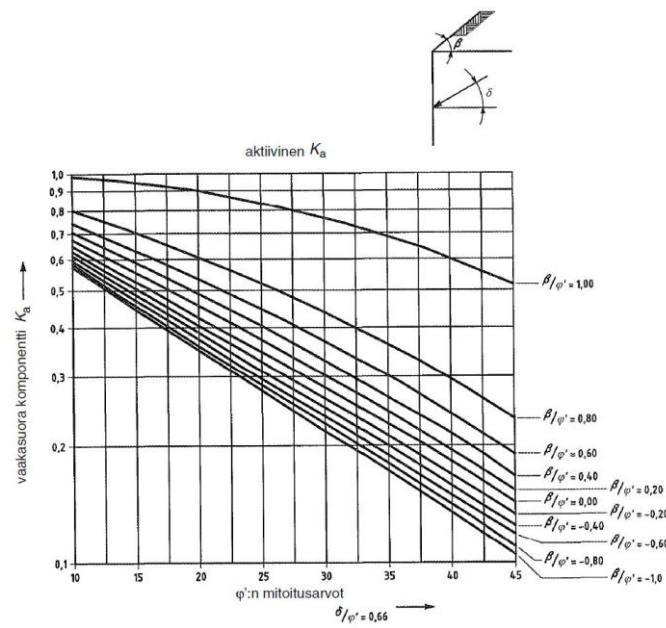
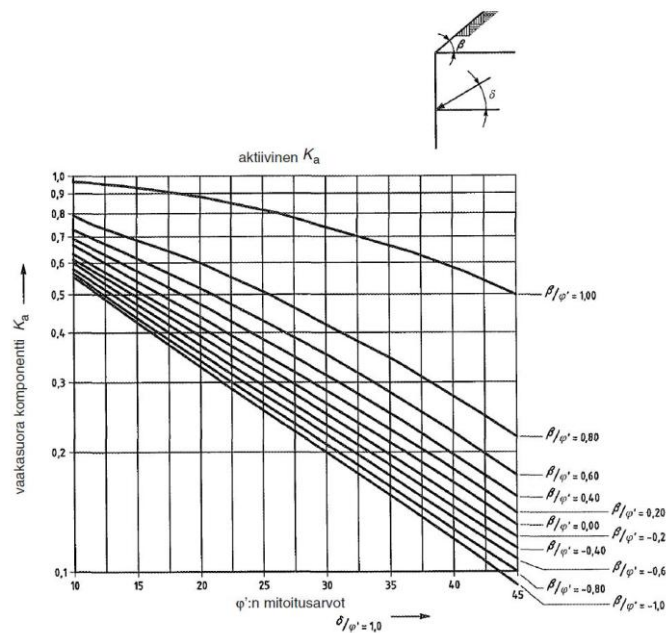
1(4)

Lähde: Liikenneviraston ohjeita 12/2011

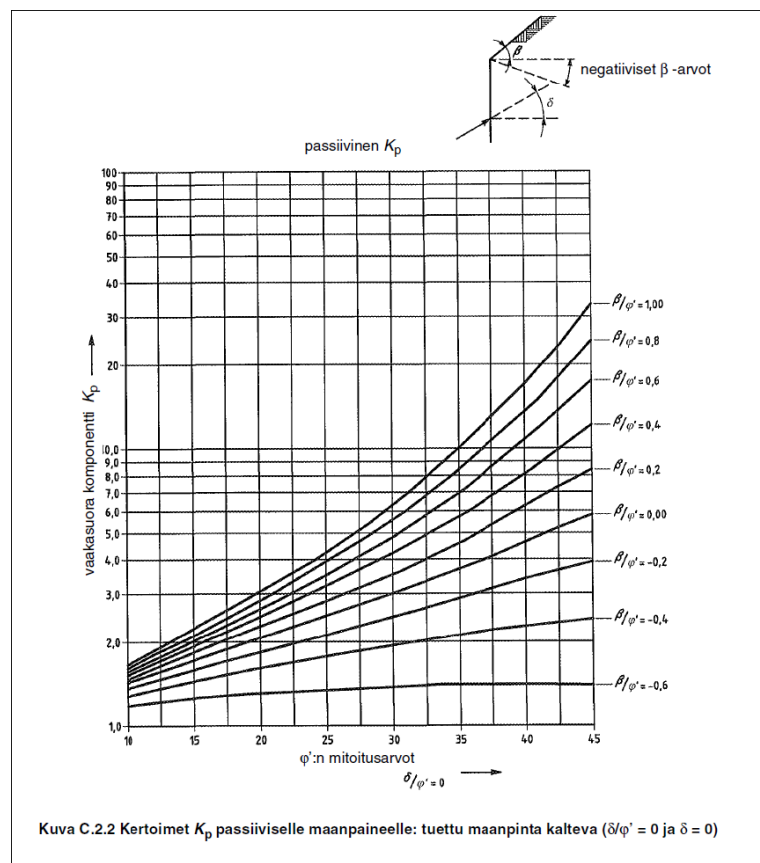
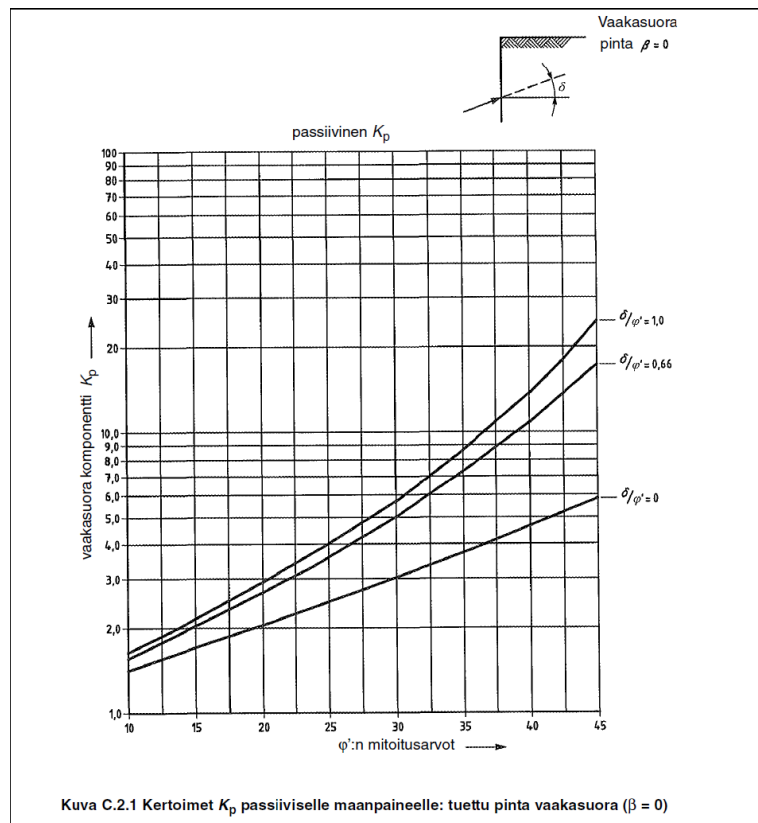
Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu - NCCI7 (10.6.2011) Liite 2/2



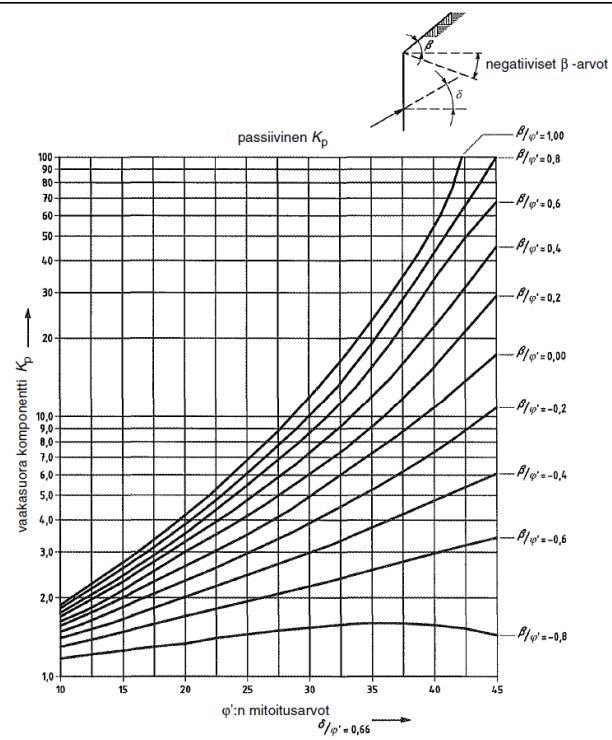
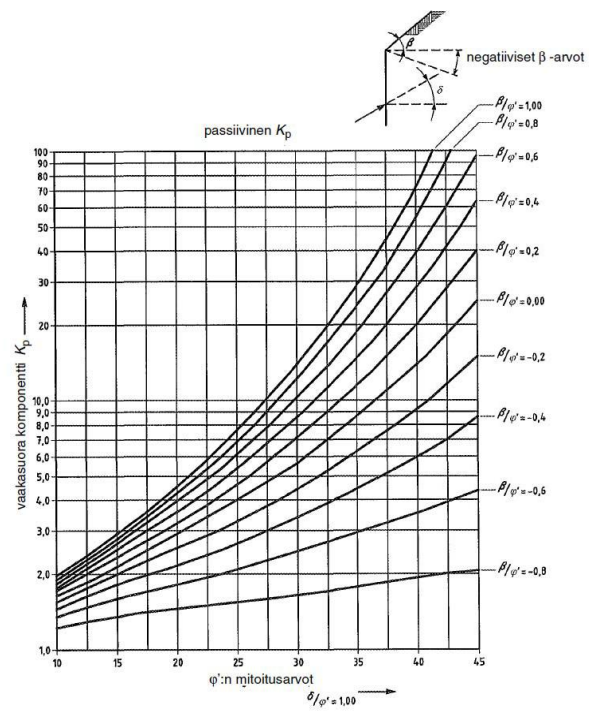
## Liite 3. 2(4)

Kuva C.1.3 Kertoimet  $K_a$  aktiiviselle maanpaineelle: tuettu pinta kalteva ( $\delta/\varphi' = 0,66$ )Kuva C.1.4 Kertoimet  $K_a$  aktiiviselle maanpaineelle: tuettu pinta kalteva ( $\delta/\varphi' = 1$ )

## Liite 3. 3(4)



## Liite 3. 4(4)

Kuva C.2.3 Kertoimet  $K_p$  passiiviselle maanpaineelle: tuettu pinta kalvea ( $\delta/\phi' = 0.66$ )Kuva C.2.4 Kertoimet  $K_p$  passiiviselle maanpaineelle: tuettu pinta kalvea ( $\delta/\phi' = 1$ )

## Liite 4. Sovellettavat osavarmuusluvut

Lähde: Liikenne- ja viestintäministeriö 1.6.2010

SFS-EN 1997-1

Geotekninen suunnittelu

Yleiset säännöt: Soveltaminen infrarakenteisiin.

**Taulukko A.3a(FI) – Kuormien ( $\gamma_F$ ) tai kuorman vaikutusten ( $\gamma_E$ ) osavarmuusluvut (STR/GEO)**

Taulukko A.3a(FI) on SFS-EN 1990:2002/A1 liitteen A2 kansallisen liitteen taulukko A2.4(B)(FI) (sarja B) ja se korvaa SFS-EN 1997-1 taulukon A.3 sarjan A1.

| yhtälö       | Pysyvät kuormat |          | Esi-jännitys  |          | Määrittävä muuttuva kuorma  | Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat   |
|--------------|-----------------|----------|---------------|----------|---|--|
| <b>6.10a</b> | $1,35 / 0,90$   | <b>G</b> | $1,10 / 0,90$ | <b>P</b> |   |  |
| <b>tai</b>   |                 |          |               |          |   |  |
| <b>6.10b</b> | $1,15 / 0,90$   | <b>G</b> | $1,10 / 0,90$ | <b>P</b> | $1,35 \cdot$ (tieliikennekuorma)<br>$1,35 \cdot$ (kevyen liikenteen kuorma)<br>$1,45/1,20 \cdot$ (rautatieliikennekuorma) | $1,50 \cdot \psi_{0,i} \cdot$ (muut muuttuvat kuormat)   |
|              | <b>tai</b>      |          |               |          |   |  |
|              | $1,15 / 0,90$   | <b>G</b> | $1,10 / 0,90$ | <b>P</b> | $1,50 \cdot$ (muu määrittävä muuttuva kuorma)   | $1,35 \cdot \psi_{0,i} \cdot$ (tieliikennekuorma)<br>$1,35 \cdot \psi_{0,i} \cdot$ (kevyen liikenteen kuorma)<br>$1,45/1,20 \cdot \psi_{0,i} \cdot$ (rautatieliikennekuorma)<br>$+ 1,50 \cdot \psi_{0,i} \cdot$ (muut muuttuvat kuormat) |

**Taulukko A.4(FI) – Maaparametrien osavarmuusluvut ( $\gamma_M$ ) (STR/GEO)**

| Maaparametri                        | Merkintä          | Sarja     |           |
|-------------------------------------|-------------------|-----------|-----------|
|                                     |                   | <b>M1</b> | <b>M2</b> |
| Leikkauskestävyyskulma <sup>a</sup> | $\gamma_{\phi'}$  | 1,0       | 1,25      |
| Tehokas koheesio                    | $\gamma_{c'}$     | 1,0       | 1,25      |
| Suljettu leikkauslujuus             | $\gamma_{cu}$     | 1,0       | 1,4       |
| Yksiakselialinen puristuskoe        | $\gamma_{qu}$     | 1,0       | 1,4       |
| Tilavuuspaino                       | $\gamma_{\gamma}$ | 1,0       | 1,0       |

<sup>a</sup> Tällä varmuusluvulla jaetaan  $\tan \phi'$ .**Taulukko A.13(FI) – Tukirakenteiden kestävyys osavarmuusluvut ( $\gamma_R$ )**

| Kestävyys         | Merkintä       | Sarja <b>R2</b> |
|-------------------|----------------|-----------------|
| Kantokestävyys    | $\gamma_{R,v}$ | 1,55            |
| Liukumiskestävyys | $\gamma_{R,h}$ | 1,1             |
| Maan kestävyys    | $\gamma_{R,e}$ | 1,5             |

## Liite 5. Ankkurien esijännitystarkastelu

Liitty laskentaesimerkkiin 2

