



FULGEO- JA GEOCALC- LASKENTAOHJELMIEN VERTAILU TERÄSPONTTI- SEINÄN MITOITUKSESSA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala		
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma		
Työn tekijä(t) Jesse Eskelinen		
Työn nimi Fulgeo- ja GeoCalc-laskentaohjelmien vertailu teräsponttiseinän mitoituksessa		
Päiväys	30.3.2017	Sivumäärä/Liitteet
		49/17
Ohjaaja(t) Juha Pakarinen, tuntiopettaja; Mervi Heiskanen, tuntiopettaja		
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Pöyry Finland Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli verrata GeoCalc- ja Fulgeo-laskentaohjelmia teräsponttiseinän mitoituksessa. Pöyry Finland Oy:n Kuopion toimisto halusi selvityksen, onko ohjelmien tuloksilla ja käytettävyydellä eroja. Fulgeo on pitkään käytössä ollut laskentaohjelma johon ei ole enää saatavilla päivityksiä ja käyttäjätukea. Opinnäytetyön lähtökohtana oli tehdä muutamia esimerkkilaskelmia vertailukohteiksi tyypillisistä tapauksista käyttämällä molempia ohjelmia.</p> <p>Aluksi tutustuttiin lähdeaineistoon ja kirjallisuuteen. Tietoa kerättiin ohjelmien käyttöohjeista, verkkojulkaisuista, aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta sekä kahdesta Pöyryn Oulun osaston geoteknikoiden kanssa käydystä vapaa- muotoisesta puhelinhaastattelusta. Tämän jälkeen opeteltiin ohjelmien käyttöä ja tehtiin kaksi esimerkkilaskelmaa: ankkuroitu teräsponttiseinä tuettuna kallioon kalliotapilla ja ankkuroitu teräsponttiseinä lyötynä tiiviiseen hiekkakerrokseen. Molemmat tapaukset laskettiin GeoCalcin moduuli- ja siirtymäperusteisella mallilla sekä Fulgeolla. Lisäksi yhden laskelman perusteella tehtiin esimerkki teräsponttiseinän rakenteellisesta mitoituksesta. Lopuksi tulokset koottiin ja ohjelmien käytettävyyttä verrattiin kokemusten perusteella.</p> <p>Tuloksena voidaan todeta GeoCalcin vastaavan Fulgeoa ankkurivoimien osalta. Taivutusmomentti ja kalliotapin leikkausvoima eivät vastanneet toisiaan. Tämän todettiin johtuvan siitä, ettei Fulgeo osaa ottaa huomioon teräsponttiseinän siirtymää ja siitä johtuvaa maanpaineen mobilisoitumista. GeoCalcin tuloksien arvioitiin vastaavan paremmin todellista tilannetta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että GeoCalcilla mitoittaessa täytyy valita jäykempi tukiseinä verrattuna Fulgeoon. Tulosten perusteella voitiin todeta GeoCalcin nopeuttavan ja selkeyttävän tukiseinän suunnittelua. Käyttökokemusten perusteella Pöyryn sisäiseen käyttöön tehtiin GeoCalcista tiivistetty ohje, joka helpottaa uuden ohjelman käyttöönottoa Pöyryn Kuopion infrayksikössä.</p>		
Avainsanat Fulgeo, GeoCalc, teräsponttiseinä, tukiseinä, geotekninen suunnittelu		

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Jesse Eskelinen			
Title of Thesis Comparing Fulgeo and GeoCalc Software in Sheet Pile Wall Design			
Date	30 March 2017	Pages/Appendices	49/17
Supervisor(s) Mr. Juha Pakarinen, Lecturer; Ms. Mervi Heiskanen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Pöyry Finland PLC			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to compare Fulgeo and GeoCalc software in designing a sheet pile wall. Pöyry Finland PLC Kuopio department wanted a report on the differences these programs have in results and usability. Even though Fulgeo has been in use for a long time its updates and support have been ceased. The premise of the thesis was a few calculation examples made with both programs for point of comparison.</p> <p>The work on thesis was began by studying initial data and literature. Information was collected from user manuals, internet publications, relevant literature and two phone interviews with Pöyry Oulu department geotechnicians. Next I trained using the programs and made two calculation examples: anchored sheet pile wall supported to the bedrock with rock bolts and anchored sheet pile wall embedded in the compact sand. Examples were calculated with GeoCalc's modulus controlled- and displacement controlled models and Fulgeo. In addition to the calculations, an example of structural design of sheet pile wall based on the previous calculation results was made. Lastly the results were compiled and the usability of the programs was compared based on my experiences.</p> <p>In conclusion the anchor forces in GeoCalc and Fulgeo were comparable. The bending moment and rock bolt shearforce were not equivalent between the programs. This was the result of Fulgeos inability to take into account sheet pile walls displacement and the earth pressure mobilization caused by this. It was estimated that GeoCalc's results represented better the real world case. In practice this means that when designing with GeoCalc a stiffer sheet pile wall must be used compared to Fulgeo. In conclusion it could be determined that designing the sheet pile wall was faster and simpler with GeoCalc. To help implementation of GeoCalc in Kuopio infra department a compact GeoCalc manual for Pöyrys internal use was made.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Fulgeo, GeoCalc, sheet pile wall, bulkhead, geotechnical design</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää Pöyry Finland Oy:tä mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö Kuopion yksikössä. Kiitos Marko Haataiselle opinnäytetyön ohjaamisesta ja mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitokset myös Pöyryn Oulun toimiston geoteknikoille Ari Juntuselle ja Sakari Lotvoselle GeoCalc- ja Fulgeo-ohjelmien käyttöön liittyvissä kysymyksissä.

Iso kiitos myös Juha Pakariselle opinnäytetyön ohjauksesta ja tarkastamisesta.

Kuopiossa 30.3.2017

Jesse Eskelinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	KAIVANTOJEN TUENTA.....	9
2.1	Yleistä kaivantojen tuennasta.....	9
2.2	Tukiseinät	10
2.3	Teräsponttiseinä	11
2.4	Tukiseinän vaakatuenta	12
3	TUKISEINÄN MITOITUS	15
3.1	Mitoituksen yleisperiaatteet.....	15
3.2	Kuormat.....	15
3.3	Mitoitustapa ja käytettävät osavarmuusluvut	16
3.4	Varmuuden kohdentaminen laskentaohjelmissa	19
3.5	Murtorajatila ja käyttörajatila	19
4	LASKENTAOHJELMIEN ESITELY	20
4.1	GeoCalc	20
4.1.1	Yleisesittely.....	20
4.1.2	Ominaisuudet.....	21
4.1.3	Laskentatapa	21
4.2	Fulgeo.....	24
4.2.1	Yleisesittely.....	24
4.2.2	Ominaisuudet.....	25
4.2.3	Laskentatapa	25
5	ESIMERKKISEINÄN LASKENNAT JA TYÖNKUVAUS	28
5.1	Esimerkin lähtötiedot.....	28
5.2	Tukiseinälaskelman työvaiheet GeoCalcilla.....	29
5.3	Tukiseinälaskelman työvaiheet Fulgeolla	38
5.4	Laskennan tulokset	44
5.5	Tulosten arviointi	44
5.6	Käytettävyyden arviointi	45
6	ESIMERKKI TERÄSPONTTISEINÄN RAKENTEELLISESTA MITOITUKSESTA.....	46
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	48
	LÄHTEET.....	49

LIITE 1: GEOCALCIN TULOSKUVAAJAT	50
LIITE 2: FULGEO TULOSKUVAAJAT	61
LIITE 3: MODUULILUVUT JA JÄNNITYSEKSPONENTIT	62
LIITE 4: TARVITTAVA SIIRTYMÄ MAANPAINEEN KEHITTYMISEKSI	64
LIITE 5: PAINEKERTOIMIEN MÄÄRITYS NOMOGRAMMEISTA	65

SYMBOLIT JA LYHENTEET

F_d	kuorman mitoitusarvo
H	kaivannon syvyys
H_w	vedenpaine korkeus
K_a	aktiivisen maanpaineen kerroin
K_{FI}	kuormakerroin
K_p	passiivisen maanpaineen kerroin
K_0	lepopaine kerroin
M	kokoonpuristuvuusmoduuli
c	koheesio
c'	tehokas koheesio
k	konsolidaatioasteen huomioiva eksponentti
m	moduuliluku
q	pystysuuntainen pintakuorma
q_k	pystysuuntaisen pintakuorman ominaisarvo
β	jännityseksponentti (GeoCalc käyttää tunnuksena n)
γ	tilavuuspaino
γ'	tehokas tilavuuspaino
δ	seinäkitkakulma
δ_{ya}	suhteellinen siirtymä aktiiviselle maanpaineelle
δ_{yp}	suhteellinen siirtymä passiiviselle maanpaineelle
ξ_{50a}	50 % aktiivipaineen tarvitsema suhteellinen siirtymä
ξ_{50p}	50 % passiivipaineen tarvitsema suhteellinen siirtymä
φ	leikkauskestävyyskulma (kitkakulma)
DCM	siirtymäperusteinen jousimalli
MCM	moduuliperusteinen jousimalli
OCR	ylikonsolidaatioaste (Over Consolidation Ratio)
Iterointi	Toistuva laskutoimistus jonka lopputulos tarkentuu jokaisella toistokerralla, kunnes haluttu tarkkuus on saavutettu.

1 JOHDANTO

Kaivantojen tukiseinien suunnittelun laskenta on vaativaa ja aikaa vievää. Laskenta on siksi järkevin-
tä tehdä tietokoneohjelmien avulla. Tukiseinät ja tässä opinnäytetyössä käsiteltävät teräsponttiseinät
täytyy aina mitoittaa ennen rakentamista. Mitoituksen tarkoituksena on varmistaa, ettei rakennus-
kohteelle tai ihmisille vaarallista tukiseinän liikkumista ja murtumista pääse tapahtumaan. Mitoituk-
sen voi tehdä käsinlaskentana tai apuna voidaan käyttää tähän tarkoitukseen kehitettyjä laskentaoh-
jelmia. Näitä ovat muun muassa GeoCalc, Fulgeo, Geostudio, RS3 ja Plaxis 3d. Tässä opinnäytetyös-
sä keskitytään GeoCalc- ja Fulgeo-ohjelmien vertailuun.

Työ alkoi Pöyryn tarpeesta selvittää löytyisikö korvaava ohjelma vanhentuneelle Fulgeo-ohjelmalle.
Opinnäytetyön tavoitteena on geoteknisten laskentaohjelmien GeoCalc ja Fulgeo vertaaminen te-
räsponttiseinän mitoituksessa. Pöyry Finland Oy:n Kuopion toimisto halusi selvityksen, onko ohjel-
mien tuloksilla ja käytettävyydellä eroja. Fulgeo on pitkään käytössä ollut laskentaohjelma johon ei
ole enää saatavilla päivityksiä eikä käyttäjätukea. Pöyryllä on lisenssi GeoCalc-ohjelmaan mutta sitä
ei ole testattu käytännössä Kuopion toimistolla. Lisäksi Pöyry halusi sisäiseen käyttöön GeoCalcista
tiivistetyn ohjeen joka helpottaa GeoCalcin käyttöönottoa Pöyryn Kuopion infrayksikössä.

Työ alkaa yleiskuvauksella kaivannoista ja niiden tuentatavoista. Mitoitusosiossa selitetään tukisei-
nien mitoitus eurokoodien mukaan yleisperiaatteiltaan. Työn seuraavassa osiossa käydään läpi oh-
jelmien yleisesittely, ominaisuudet ja laskentatavat. Tämän jälkeen tutustutaan ohjelmilla tehtyihin
laskelmiin ja saatuihin tuloksiin. Esimerkilaskelmia on kaksi, ankkuroitu teräsponttiseinä tuettuna
kallioon kalliotapilla ja ankkuroitu teräsponttiseinä lyötynä tiiviiseen hiekkakerrokseen. Lisäksi tein
esimerkin teräsponttiseinän rakenteellisesta mitoituksesta yhden laskentatapauksen tuloksien perus-
teella. Lopuksi kokosin tulokset ja vertasin omien kokemusteni perusteella ohjelmien käytettävyyttä.

Aineistoa opinnäytetyöhön kerättiin ohjelmien käyttöohjeista, verkkojulkaisuista, aiheeseen liittyväs-
tä kirjallisuudesta sekä Pöyryn Oulun toimiston geoteknikoiden asiantuntijahaastatteluista. GeoCalc
ja Fulgeo ovat ammattikäyttöön tarkoitettuja ohjelmia. Tämän vuoksi osa opinnäytetyön käsitteistä
on vaikea ymmärtää ilman aiempaa perehtymistä aiheeseen. Theseuksesta löytyy hyviä tutustumi-
sen arvoisia opinnäytetöitä GeoCalcista. Aarre Järvinen ja Rosa Sirén ovat kirjoittaneet GeoCalcin
käytöstä tukiseinä laskentaan. Taru Anttolainen puolestaan on kirjoittanut painuma-, vakavuus- ja
stabilointilaskelmien tekemisestä GeoCalcilla.

Pöyry Oyj

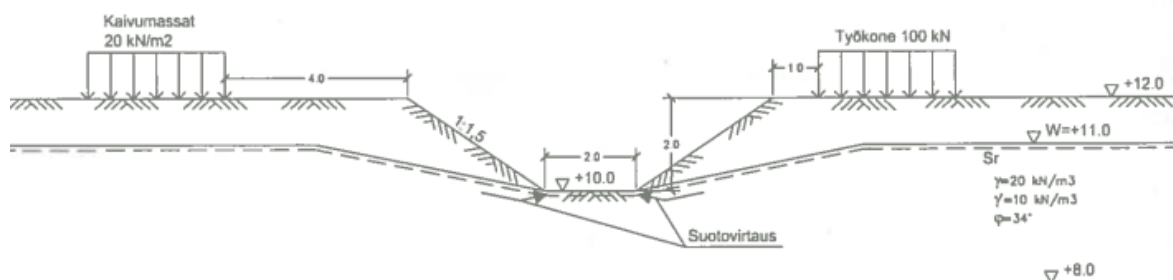
Pöyry on kansainvälinen konsultointi- ja suunnitteluyhtiö, jolla on toimistoja 40 maassa. Yhtiön pää-
toimialat ovat energia, teollisuus ja infra. Yrityksen perusti vuonna 1958 Jaakko Pöyry. Yrityksen al-
kuvaiheessa Pöyry keskittyi metsäteollisuuden kohteisiin ja alkoi laajentua 1990-luvulla muille toimi-
aloille. Pörssiin Pöyry listautui vuonna 1997. Yhteensä Pöyryllä on noin 5 500 työntekijää, joista
Suomessa työskentelee 1 600. Yhteenlaskettu liikevaihto Pöyry Oyj:llä vuonna 2016 oli noin 530 mil-
joonaa euroa.

2 KAIVANTOJEN TUENTA

2.1 Yleistä kaivantojen tuennasta

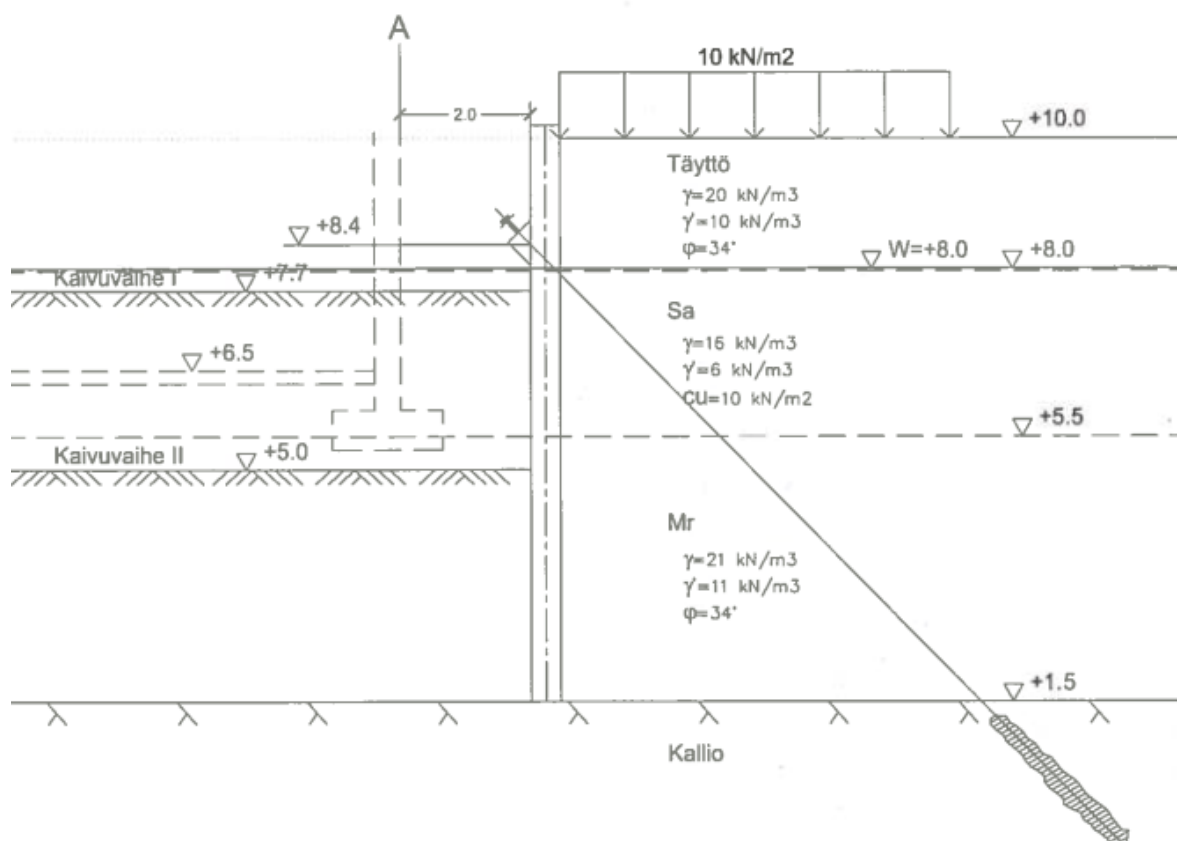
Kaivanto voidaan toteuttaa joko luiskattuna tai tuettuna kaivantona. Valintaan näiden välillä vaikuttaa kaivannon varmuus sortumista vastaan, käytettävissä oleva tila, ympäristötekijät, kaivannon vesitiiviys, rakennuskustannukset ja työmaan toimintaympäristö. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014.)

Luiskatuskaivannossa kaivannon seinämät kaivetaan niin loiviksi, että ne kestävät oman painonsa ja mahdolliset kuormat kaivannon reunoilla (kuva 1). Luiskattu kaivanto soveltuu kohteisiin joissa kaivanto pysyy matalana, käytettävissä on runsaasti tilaa eikä luiskan sortumisvaara ole suuri. Luiskaus on myös yleensä halvempi tapa toteuttaa kaivanto, mikäli kaivutyöt pysyvät maltillisina eikä kunnallistekniikkaa jouduta siirtämään luiskan tieltä. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 44–45.)



Kuva 1. Esimerkkipiirros luiskatusta kaivannosta (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 148)

Tuetussa kaivannossa käytetään tukiseinää, joka tuetaan kaivannon ulko- tai sisäpuolelta (kuva 2). Tuettu kaivanto valitaan, kun halutaan tehostaa tilankäyttöä, kaivanto on syvä tai pohjaolosuhteet ovat haasteelliset. Jos varmuutta kaivannon sortumista vastaan ei saada luiskatulla kaivannolla tai kaivannon tulee olla vesitiivis, tehdään kaivanto tuettuna. Verrattuna luiskattuun kaivantoon tuetun kaivannon viereen jää enemmän toimintatilaa ja työmaan logistiikka tehostuu sekä työjärjestelymahdollisuudet paranevat. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 44–45.)



Kuva 2. Esimerkkipiirros tuetusta kaivannosta (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 148)

2.2 Tukiseinät

Tukiseinätyypin valinta perustuu Kaivanto-ohjeen (RIL 263 - 2014, 45) mukaan lähinnä seuraaviin tekijöihin:

- *kaivannon pohjaolosuhteet*
- *kaivannon ympäristöolosuhteet*
- *tukiseinän käyttötarkoitus*
- *eri tukiseinätyyppien ominaisuudet*
- *eri tukiseinätyyppien rakennuskustannukset ja tarvittava rakennusaika.*

Kaikki tukiseinätyypit ovat yleensä teknisesti käyttökelpoisia tavanomaisissa pohja- ja ympäristöolosuhteissa. Tällöin tukiseinätyypin valinnassa painottuvat rakennuskustannukset ja tarvittava rakennusaika. Olosuhteiden vaativuuden kasvaessa tukiseinältä vaadittavien ominaisuuksien merkitys kasvaa ja käyttökelpoisten tukiseinätyyppien määrä vähenee. Erittäin vaativissa pohja- ja ympäristöolosuhteissa tukiseinätyypin valinta perustuu yleensä lähes yksinomaan tukiseinältä vaadittaviin erityisominaisuuksiin.

Tukiseinälle voidaan asettaa tukiseinänä toimimisen lisäksi muukin käyttötarkoitus, esimerkiksi toimiminen pystykuormia kantavana rakenteena. Tällöin käyttötarkoitus voi edellyttää tukiseinältä erityisominaisuuksia, joilla voi olla oleellinen vaikutus tukiseinätyypin valintaan.

Yleisimmät tukiseinätyypit ovat teräsponttiseinä, settiseinä, porapaaluseinä, suihkuinjektoitu seinä, porapaalu-suihkuinjektoitu seinä, kaivnopaaluseinä ja kaivantoseinä (kuva 3).



Kuva 3. Eri tukiseinätyyppejä (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 49)

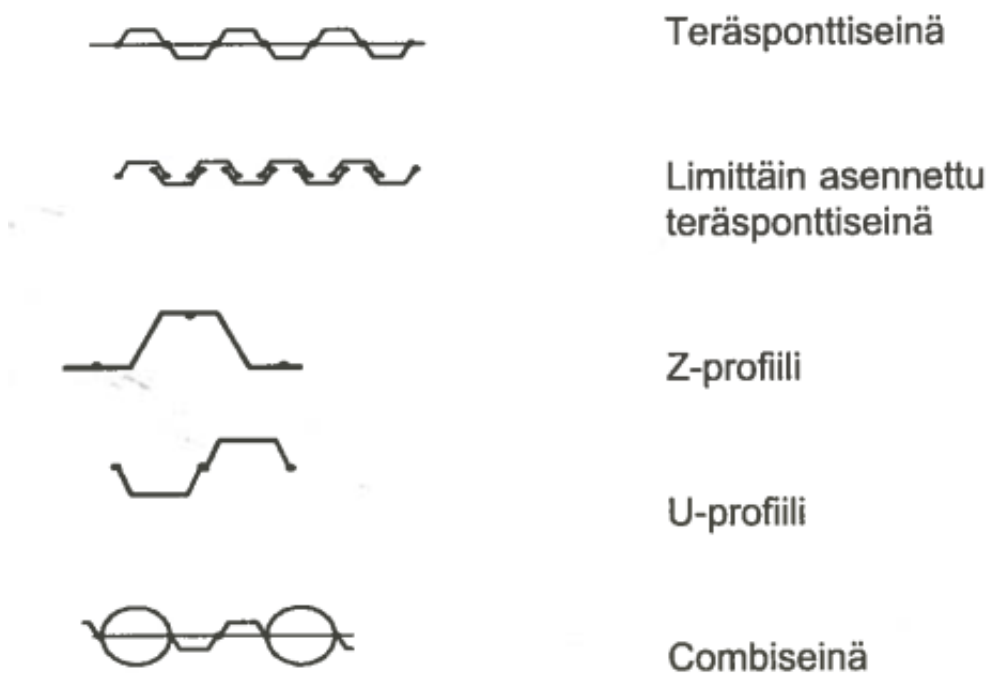
Settiseinä tehdään 1...4m:n välein asennettavista pystypalkeista ja niihin tukeutuvista vaakasuorista settilankuista, jotka ovat yleensä kevyitä teräspalkkeja tai puulankkuja. Porapaaluseinä muodostuu kallio- tai maaperään poraamalla asennetuista teräspalkkipaaluista, jotka liittyvät toisiinsa putkien sivuihin hitsatuin lukkoprofiilein. Suihkuinjektoitu seinä koostuu maahan sementillä injektoiduista toisiinsa limittyvistä pilareista. Porapaalu-suihkuinjektoitu seinä tehdään porapaaluista ja niiden väliin suihkuinjektoiduista pilareista. Kaivinpaaluseinä on vesitiivis patoseinä, joka muodostuu toisiaan leikkaavista vuorottelevista raudoitetuista ja raudoittamattomista kaivinpaaluista. Kaivantoseinä on teräsbetoninen valulohkoista koostuva patoseinä, jonka kaivanto kaivetaan valulohko kerrallaan pitäen kaivanto bentoniittilietteellä täytettynä. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 46–58.) Tässä opin-
nätetyössä keskitytään teräsponttiseinien käsittelyyn.

2.3 Teräsponttiseinä

Kaivanto-ohjeessa (RIL 263 - 2014, 46–50) kerrotaan teräsponttiseinästä seuraavasti. Teräsponttiseinä on yleisin käytössä oleva tukiseinätyyppi. Muihin tukiseinätyyppeihin verrattuna teräsponttiseinä on yleensä kustannuksiltaan edullisin ja sen rakentaminen ja purkaminen on nopeaa. Teräsponttiseinä muodostuu maahan lyömällä tai täryttämällä upotettavista teräsponteista, jotka lukkiutuvat toisiinsa lukkoprofiilein muodostaen yhtenäisenä toimivan seinärakenteen. Teräspontit voidaan asentaa myös limittäin lukitsematta niitä toisiinsa, jolloin seinän jäykkyys eli taivutusvastus pienenee oleellisesti ja seinä on vettä läpäisevä.

Poikkileikkausprofiililtaan erilaisia teräspontteja on käytössä suuri määrä (kuva 4). Yleisimmät profiilit ovat U-profiili ja Z-profiili. U-profiilit liittyvät toisiinsa seinän neutraaliakselilla, Z-profiilit seinän ulkosivuilla. Teräsponttiseinän taipuessa maanpaineen vaikutuksesta U-profiilit voivat luistaa toistensa suhteen, kun pohjamaa on pehmeää savea tai löyhää hiekkaa. Tällöin seinän jäykkyys (taivutusvastus) pienenee, mikä tu-

lee ottaa seinän mitoituksessa huomioon. Z-profiilin teräsponteissa luistamista ei tapahdu. Suurta jäykkyyttä vaativa tukiseinä voidaan rakentaa ns. combiseinä, jolloin teräsponttien väleihin liitetään putkipaaluja tai palkki- tai koteloprofiileja. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 47.)

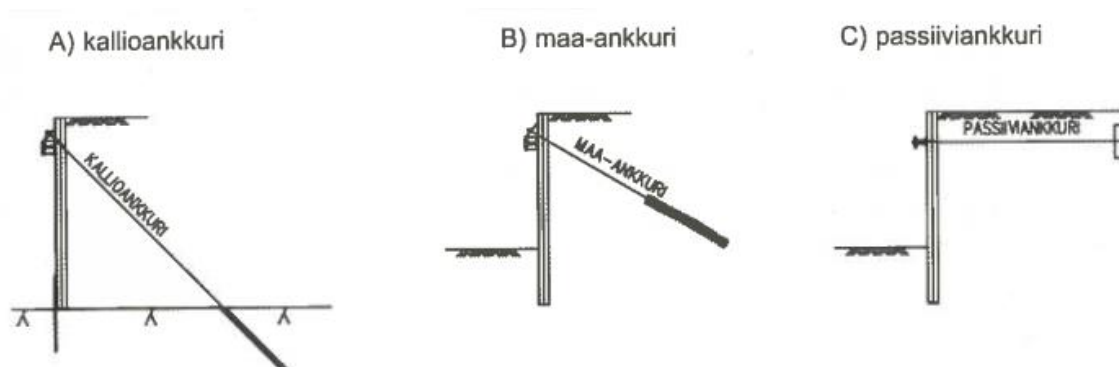


Kuva 4. Teräsponttiseinä ja combiseinä (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 47)

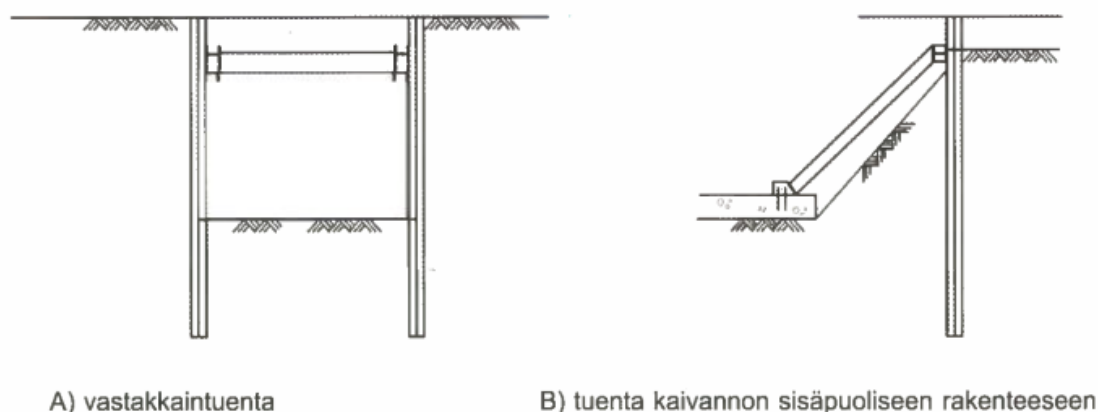
Teräsponttiseinä soveltuu useimpiin pohjaolosuhteisiin. Pontteja ei kuitenkaan saada tunkeutumaan kiviseen tai lohkaraiseen maakerrokseen, eikä hyvin tiiviiseen karkeaan kitkamaakerrokseen. Kivettömissä pohjaolosuhteissa teräsponttiseinät säilyvät käyttökelpoisina monta käyttökertaa. Teräsponttiseinää ei voida käyttää, jos lähiympäristö on pontitustärinästä helposti häiriintyvää. Ponttien tunkeutumistason karkeana arviona voidaan pitää heijarikairauksen päättymistasoa. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 47–50.) Teräspontti lyödään maahan tavallisimmin paalutuskalustolla. Sopivia lyöntilaitteita ovat: järkälejunta 2-3 tonnin järkäleellä varustettuna, kaksitoiminen paineilmasasara, räjähdysjunta, täryvasara ja hydraulinen tunkki. Erityisen tehokkaaksi lyöntikoneeksi on osoittautunut täryvasara, jota voidaan käyttää tehokkaasti myös ponttien ylösvetämiseen. Teräsponttien maahanlyöntiä varten rakennetaan ensin ohjauskehys, joka varmistaa ponttien pysymisen oikeassa suunnassa. Ponttiseinä lyödään asteittain useamman pontin sarjoina eli paneelimenettelyllä. (Rantamäki & Tammirinne 1979, 116.)

2.4 Tukiseinän vaakatuenta

Tukiseinä voidaan tukea vaakakuormia vastaan joko kaivannon ulkopuolisin vetoankkurein (kuva 5) tai kaivannon sisäpuolisin puristusrakentein (kuva 6) tai näiden yhdistelmin (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 59).



Kuva 5. Kaivannon ulkopuolinen tuenta vetoankkurein (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 59)



Kuva 6. Kaivannon sisäpuolinen tuenta puristussavoin (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 60)

Ulkopuolinen tuenta

Ulkopuolelta tuetun tukiseinän tyypillisiä käyttökohteita ovat laajat, syvät ja monelta tasolta tuetut kaivannot. Ulkopuolisen tuennan etuja verrattuna sisäpuoliseen tuentaan ovat rakentamista haittaavien tukirakenteiden puute ja teknisesti yksinkertaisempi ratkaisu laajoissa kaivannoissa. Kaivannon ulkopuolisessa tuennassa tukiseinä ankkuroidaan ulkopuolisiin vetoankkurein.

Ankkurointitavan mukaan erotetaan seuraavat ankkurityypit (kuva 5):

- kallioankkuri, ankkuroidaan kallioon
- maa-ankkuri, ankkuroidaan maakerrokseen
- passiiviankkuri, ankkuroidaan ankkuripontteihin, ankkurilaattaan tai vastaavaan.

(Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 60–61.)

*Kallioankkurin kaltevuuskulma on yleensä 45°. Maa-ankkurin kaltevuuskulma on 45° tai loivempi siten, että ankkuri tavoittaa ankkuroitumiseen soveltuvan tiiviin kitka-
maakerroksen. Kallioankkurin alapää injektoidaan sementtilaastilla tartuntapituuden
verran kiinni kallioreikään ja maa-ankkurin alapää tartuntapituuden verran kiinni ympäröivään maakerrokseen. Ankkurien kiinnitysrakenne tukiseinään tulee suunnitella
huolellisesti ja yksityiskohtaisesti, jotta siitä ei tule tukiseinän heikointa osaa. Vaaka-
palkki jäykistää tukiseinää vaakatasossa ja siirtää kuormia tukipisteille. Se suunnitel-
laan yleensä jatkuvaksi palkiksi. Vaakapalkkina käytetään useimmiten HEB-*

teräspalkkia, mutta se voi olla myös putkipalkki, teräspontti tai betonirakenne. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 61–62.)

Sisäpuolinen tuenta

Sisäpuolelta tuetun tukiseinän tyypillisiä käyttökohteita ovat kapeat putki- ja kuilukaivannot sekä laajemmat kaivannot silloin, kun tukirakenteet ja työvaiheistus kyetään suunnittelemaan siten, että tukirakenteiden aiheuttama haitta rakentamiselle jää kohtuulliseksi. Sisäpuolista tuentaa tulee myös käyttää silloin, kun kaivantoa ei ympäristöolosuhteiden vuoksi voida tukea ulkopuolisesti tai tukiseinän alapään pystykantavuus ei ole riittävä ulkopuolisten ankkurien pystykuormille. Sisäpuolisen tuennan etuna on, ettei se aiheuta pystykuormaa tukiseinälle ja tuennan rakentamiskustannukset ovat pienemmät kuin ulkopuolisessa tuennassa.

Sisäpuolisessa tuennassa käytetään mm. seuraavia periaateratkaisuja (kuva 6):

- tukiseinät tuetaan vastakkain puristussauvoin
- tukiseinät tuetaan vastakkain seinien välisellä betonilaatalla, joka on lopullinen rakenne
- tukiseinä tuetaan kaivannon sisäpuoliseen rakenteeseen puristussauvoin
- porrastetut vaiheittaiset kaivut ja sisäpuoliset passiiviankkurit. Menetelmä tulee kyseeseen yleensä vain kitkamaahan tehtävissä laajoissa kaivannoissa.

Puristussauvoina käytetään kapeissa kaivannoissa yleensä HEB-teräspalkkia ja leveämmissä kaivannoissa teräsputkea D 500...1000mm. (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 60–63.)

Vapaasti seisova tukiseinä

Tukiseinä voidaan myös tehdä ilman vaakatuentaa. Tällaista tukiseinää kutsutaan vapaasti seisovaksi tai ulokkeena toimivaksi tukiseinäksi. Vapaasti tuettuja tukiseiniä käytetään yleensä vain matalissa kaivannoissa ja alkukaivun aikana. Vapaasti seisova tukiseinä upotetaan niin syvälle, että se pysyy paikoillaan tilanteessa kehittyvien maanpaineiden varassa ja kiinnittyy kimmoisesti paikoilleen. Vapaasti seisovan tukiseinän etuina ovat lyhyempi aikataulu ja pienemmät kustannukset. Lisäksi vapaasti seisovalla tukiseinällä saadaan rakennusala tehokkaampaan käyttöön koska tukirakenteille ei tarvitse jättää tilaa. (Jääskeläinen 2011, 194.)

3 TUKISEINÄN MITOITUS

3.1 Mitoituksen yleisperiaatteet

Kaivanto mitoitetaan siten, että maapohja ja tukirakenne kestävät niille kaikissa eri työvaiheissa tulevat kuormitukset riittävällä varmuudella, ja että ympäristössä syntyvät siirtymät ja painumat pysyvät sallituissa rajoissa (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 99). Laskelmiin perustuvassa suunnittelussa tulee noudattaa EN 1990:2002:n perusvaatimuksia ja standardin RIL 207 - 2009 erityissääntöjä (Geotekninen suunnittelu: RIL 207 - 2009, 34).

Vähintään seuraavat asiat tulee varmistaa kaivannon mitoituksessa:

- Kaivannolla on riittävä kokonaisstabiliteetti.
 - Rakenneosat, kuten seinät, ankkurit, vaakapalkit ja puristussauvat ja näiden liitokset eivät mure.
 - Kaivannossa ei tapahdu maapohjan ja rakenteellisen osan yhteistä murtumista.
 - Tukiseinän siirtymän tulee pysyä tukiseinän toiminnan ja kaivannon ympäristövaikutusten sallimissa rajoissa.
 - Kaivannon vesitiiveys on riittävä.
- (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 99.)

3.2 Kuormat

Tukiseinän mitoituksessa tulee ottaa huomioon erilaisia tukiseinää rasittavia kuormia. Kuormat voivat olla muuttuvia tai pysyviä. Ne voivat esiintyä yksittäin tai niiden yhdistelminä, pitkäaikaisina tai hetkellisinä, paikallisina tai alueena.

Geoteknisessä mitoituksessa otetaan huomioon seuraavat kuormiin sisällytettävät tekijät:

- maan, kallion ja veden paino
- jännitykset maapohjassa
- maanpaineet
- vapaanveden paineet, mukaan lukien aallon aiheuttamat paineet
- pohjavedenpaine
- suotovirtauksesta aiheutuvat voimat
- pysyvät ja hyötykuormat rakenteista
- pintakuormat
- ankkurointivoimat
- kuorman poistuminen tai maan kaivu
- liikennekuormat
- kaivostuominnasta tai muusta luolan tai tunnelin rakentamisesta aiheutuvat liikkeet
- kasvillisuuden, ilmaston tai kosteusvaihtelujen aiheuttama paisuminen ja kutistuminen
- maamassojen virumisen, liukumisen tai painumisen aiheuttamat siirtymät

- hajoamisesta, hajaantumisesta, maatumisesta, itsetiivistymisestä ja liukenemisesta aiheutuvat siirtymät
 - maanjäristyksistä, räjäytyksistä, tärinästä tai dynaamisista kuormituksista aiheutuvat siirtymät ja kiihtyvyydet
 - lämpötilan vaikutukset mukaan luettuna routanousu
 - jääkuormat
 - maa-ankkurien ja tukien esijännitys
 - negatiivinen vaippahankaus (-kitka).
- (Geotekninen suunnittelu: RIL 207 - 2009, 36.)

Laskennassa käytettävät mitoitusarvot tulee määrittää EN 1990:2002:n mukaisesti. Mitoitusarvon voi arvioida suoraan tai laskea kyseisen kuorman osavarmuusluvun ja kuormakertoimen suunnitteluohjeen yhtälön perusteella. (Geotekninen suunnittelu: RIL 207 - 2009, 41.)

3.3 Mitoitustapa ja käytettävät osavarmuusluvut

Tässä luvussa käsitellään tukiseinän mitoitusta ja käytettäviä osavarmuuslukuja. Lähdetiedot ovat Kaivanto-ohjeesta (RIL 263 - 2014, 99–102). Tuetut kaivannot mitoitetaan eurokoodin mukaisesti mitoitustavalla 2. Tällöin tulee osoittaa, että liiallisia muodonmuutoksia ei synny ominaiskertoimilla lasketussa käyttörajatilassa ja murtorajatilan jännitykset eivät ylitä seuraavalla osavarmuuslukujen yhdistelmällä:

Yhdistelmä: $A1 + M1 + R2$, jossa

- | | |
|----|--|
| A1 | on kuormien tai kuorman vaikutuksen osavarmuusluvut (taulukko 1) |
| M1 | on maaparametrien osavarmuusluvut (taulukko 2) |
| R2 | on tukirakenteiden kestävyys osavarmuusluvut (taulukot 3 ja 4) |

Mitoitustapa 2 tarkoittaa käytännössä, että varmuus kohdennetaan kuormiin tai kuormien vaikutukseen (A1), sekä kestävyys (R2). Maaparametrien osavarmuusluvut ovat kaikki suuruudeltaan 1,0. Kuormia ovat esimerkiksi aktiivinen maanpaine, vedenpaine ja ulkoiset kuormat. Passiivimaanpaine käsitellään kestävyysnä.

Mitoitustapaa 2 voidaan käyttää kahdella tavalla, joista käytetään merkintöjä DA2 ja DA2*. Mitoitustavassa DA2 osavarmuuslukuja käytetään lähtöarvoihin. Mitoitustavassa DA2* laskenta tehdään ominaisarvoilla ja osavarmuuslukuja käytetään tuloksina saatuihin tukivoimiin.

Tukiseinämitoituksessa tulee pääsääntöisesti käyttää mitoitustapaa DA2*, jolla siirtymät saadaan ratkaistuksi todenmukaisemmin. Virheelliset siirtymät johtavat virheellisiin tukivoimien jakautumisiin erityisesti usean tukitason tapauksissa, mikäli laskenta tehdään siirtymiin perustuvilla kaavoilla.

Taulukossa 1 esitetyt osavarmuusluvut koskevat normaalisti vallitsevia ja tilapäisiä mitoitustilanteita. Poikkeuksellisen suuren riskin tapauksissa tai epätavallisissa tai poikkeuksellisen vaikeissa pohja- tai kuormitusolosuhteissa kerrotaan kuorman osavarmuusluvut kuormakertoimella K_{FI} .

Kuormakerroin K_{FI} riippuu luotettavuusluokasta seuraavasti:

- luotettavuusluokassa RC3 = 1,1
- luotettavuusluokassa RC2 = 1,0

Kaivantosunnittelussa ei käytetä luotettavuusluokkaa RC1

Kuormien osavarmuusluvut (A1)

Taulukko 1. Kuormien tai kuorman vaikutusten osavarmuusluvut tukiseinämitoituksessa (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 100)

Pysyvä kuorma (γ_G)	Epäedullinen	
	(Yhtälö EN 1990 6.10 a)	1,35 K_{FI}
	(Yhtälö EN 1990 6.10 b)	1,15 K_{FI}
	Edullinen	0,9 K_{FI}
Muuttuva kuorma (γ_Q)	Epäedullinen	1,5 K_{FI}
	Edullinen	0

Tukiseinämitoituksessa kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa kahdesta seuraavasta lausekkeesta:

$$1,15 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (\text{EN 1990 6.10 b})$$

$$1,35 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} \quad (\text{EN 1990 6.10 a})$$

$G_{kj,sup}$ kaatavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
 $G_{kj,inf}$ vakauttavien pysyvien kuormien/vaikutusten ominaisarvo
 $Q_{k,i}$ kaatavan muuttuvan kuorman/vaikutuksen ominaisarvo

Kuva 7. Kuormien mitoituskaavat (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 101)

Maaparametrien osavarmuusluvut (M1)

Taulukko 2. Maaparametrien osavarmuusluvut (γ_M) (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 101)

Leikkauskestävyyskulma	$\gamma_\phi = 1,0$
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'} = 1,0$
Suljettu leikkauslujuus	$\gamma_{cu} = 1,0$
Yksiaksiaalinen puristuskoe	$\gamma_{qu} = 1,0$
Tilavuuspaino	$\gamma_\gamma = 1,0$

*Tukirakenteiden osavarmuusluvut (R2)*Taulukko 3. Ankkurointien osavarmuusluvut (γ_R) (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 101)

Tilapäinen ankkuri	$\gamma_{a,t} = 1,25$
Pysyvä ankkuri	$\gamma_{a,p} = 1,5$

Taulukko 4. Tukirakenteiden osavarmuusluvut (γ_R) (Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 101)

Kantokestävyys	$\gamma_{Rv} = 1,55$ (esim. pontin pystysuora liukuminen)
Liukumiskestävyys	$\gamma_{Rh} = 1,1$ (esim. tukimuurin liukuvarmuus)
Maan kestävyys	$\gamma_{Re} = 1,5$ (esim. ponttien alapään vakavuus/passiivimaanpaine)

Kuorman mallikerroin

Laskettaessa ankkuroidun tai vapaasti seisovan tukiseinän maanpaine kuormia rajatilassa STR/GEO ja mitoitustavalla DA2 (DA2*) käytetään kaatavalle maan- ja vedenpaineelle kuorman mallikerrointa 1,35 pysyville rakenteille ja 1,15 työnaikaisille rakenteille. Mallikerroin ei koske ankkurien mitoitusta. Mallikerrointa ei myöskään käytetä laskettaessa tukiseinän upotussyvyyttä momenttitasapainoehdolla. Vakauttavat maanpaineet käsitellään kestävyysinä taulukon 4 mukaisesti.

Mallikerrointa käytetään, koska rakenteellista tarkastelua varten johdetut pysyvän kuorman osavarmuusluvut on alun perin johdettu pysyvien rakenteiden oman painon hajonnan perusteella. Tukiseinän mitoituksessa samoja osavarmuuslukuja käytetään maanpaineesta aiheutuvien rasitusten mitoitussarvojen laskentaan. Näiden hajonta muodostuu maan lujuuden hajonnasta ja laskentamallien hajonnasta, ja on selvästi suurempi kuin rakenteiden oman painon hajonta.

Lisäksi tukiseinän mitoituksessa tulee Kaivanto-ohjeen (RIL 263 - 2014, 102–123) mitoittaa ja tarkastaa seuraavia asioita:

- vetoankkuri
- kallioankkuri
- maa-ankkuri
- passiiviankkuri
- seinärakenne
- vaakapalkki
- puristussauva
- juuripultti
- tukiseinän pystystabiliteetti
- tukiseinän upotussyvyys ja kaivannon pohjan vakavuus
- tukiseinän jatkuva sortuma
- kaivannon pohjan hydraulinen murtuminen
- kaivannon kokonaisstabiliteetti.

3.4 Varmuuden kohdentaminen laskentaohjelmissa

Käytettäessä mitoitustapaa 2 laitetaan varmuus kuormien ohella myös kestävyYTEEN. Tukiseinälas-kennassa tämä tarkoittaa passiivipainetta. Laskettaessa tukiseinää jousimallilla, kuten GeoCalc oh-jelmalla, ei osavarmuuslukuja kuitenkaan kohdenneta suoraan kuormiin tai passiivipaineeseen. Kaik-ki maaparametrit, maanpaineet, nettovedenpaine ja muut pysyvät kuormat sisällytetään laskentoihin niiden ominaisarvoina. Muuttuvat kuormat otetaan kuromayhdistelmässä 6.10 b) laskelmiin arvolla $q = q_k(\gamma_Q/\gamma_G)$, jolla otetaan huomioon kuormien osavarmuuslukujen ero. Näin lasketut tukireaktiot, seinän rasitukset (kuten taivutusmomentti) ja mobilisoitunut maan kestävyys eivät sisällä osavar-muuksia, vaan ovat ominaisarvoja. Suureiden mitoitusarvot saadaan kertomalla ne epäedullisen py-syvän kuorman osavarmuusluvulla γ_G . Edellä esitetyn mukaisesti on $\gamma_G = 1,35$ kuormitustapauksella 6.10 a ja $\gamma_G = 1,15$ kuormitustapauksella 6.10 b (kuva 7). (Länsivaara 2012b, 27.)

3.5 Murtorajatila ja käyttörajatila

Murtorajatilalla tarkoitetaan rakenteen sortumiseen tai kantokyvyn menetykseen liittyvä tilaa. Ylitty-minen tarkoittaa rakenteen varmuuden tai ihmisten turvallisuuden vaarantumista.

Suunnittelun yhteydessä tulee tarkistaa, ettei seuraavia murtorajatiloja ylitetä:

- rakenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen, kun sitä tarkastellaan jäykkänä kappa-leena, jossa rakennemateriaalien ja maapohjan lujuudet ovat merkityksettä kestävyYDEN ai-kaansaamiseksi (EQU)
- rakenteen tai rakenteellisen osien sisäinen murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, mukaan lu-kien esimerkiksi perustukset, paalut tai kellarin seinät, joissa rakennemateriaalinen lujuus on merkittävä kestävyYDEN aikaansaamiseksi (STR)
- rakennuspohjan murtuminen tai liiallinen muodonmuutos, jossa maan tai kallion lujuus on mer-kittävä kestävyYDEN aikaansaamiseksi (GEO)
- vedenpaineen aiheuttamasta nosteesta tai muusta pystysuuntaisesta kuormituksesta johtuva ra-kenteen tai maapohjan tasapainotilan menettäminen (UPL)
- hydraulisten gradienttien aiheuttama hydraulinen pohjannousu, sisäinen eroosio ja sisäinen put-kieroosio maassa (HYD).

(Geotekninen suunnittelu: RIL 207 - 2009, 45.)

Käyttörajatilalla tarkoitetaan sellaista tilaa, jonka ylittyttyä rakenteen käyttökelpoisuusvaatimukset ei-vät täyty. Tällä voidaan tarkoittaa rakenteen toimintaan, rakennuskohteen ulkonäköön tai ihmisten mukavuuteen liittyviä tekijöitä normaalikäytössä. Tarkasteltavia arvoja voivat olla esimerkiksi siirty-mät, halkeilu ja tärinä.

4 LASKENTAOHJELMIEN ESITELY

4.1 GeoCalc

4.1.1 Yleisesittely

GeoCalc valmistui lopputuloksena vuonna 2002 käynnistyneestä GeoSuite-projektista, jota Vianova Systems Finland Oy koordinoi. Projektin tavoitteena oli kehittää laskentaohjelma, jolla voitaisiin korvata usean eri laskentaohjelman tarve. Nykyään GeoCalcin omistaa Viasys VDC Oy alkuperäisen yhtiön jakaantuessa kahteen osaan 1.1.2016. Yhtiö huolehtii ohjelmiston myynnistä, tuotekehityksestä ja koulutuspalvelusta.

GeoCalc on Windows käyttöjärjestelmällä toimiva modulaarinen geoteknisiin laskentoihin käytetty ohjelmistopaketti. Opinnäytetyön aikana käytössä oli GeoCalcin versio 3.2. Laskentojen tekemiseen käytetään laskentamoduuleja, joita on opinnäytetyön kirjoittamisen aikana viisi kappaletta:

Painumalaskenta

Painumalaskentamoduulin ytimenä on Teknillisellä Korkeakoululla Espoossa kehitetty ja ohjelmoitu SETTLE laskentamoottori.

Stabiliteetti

Stabiliteettilaskentamoduulin ytimenä on Hong Kongin yliopistossa kehitetty Slope 2000 laskentamoottori, jota on edelleen kehitetty suomalaisten erityistarpeiden mukaan.

Tukiseinälaskenta

Tukiseinälaskentamoottorin laskentamalli on kehitetty Tampereen Teknillisessä yliopistossa. Laskentamoottori on mallin pohjalta toteutettu Viasys VDC Oy:ssä.

Syvästabilointi

Syvästabiloinnin laskentamalleissa on käytetty KPO 2000 ja LiVi ohjeita.

Paalu

Paalulaskentamoottorin laskentamalli on kehitetty Tampereen Teknillisessä yliopistossa. Laskentamoottori on mallin pohjalta toteutettu Viasys VDC Oy:ssä.

GeoCalc laskentamoduulit toimivat GeoCad piirtoalustan päällä. Piirtoalusta tarjoaa perustason 2D-CAD ohjelman ominaisuudet laskentasovellusten käyttäjälle. Poikkileikkausgeometrian voi siis tuoda suoraan esim. AutoCAD ja MicroStation ohjelmista. Ohjelmistoa käytettäessä kukin laskentamoduuli toimii omassa ikkunassaan ja käyttää piirtoalustan ominaisuuksia grafiikan näyttämisessä, muokkaamisessa, lähtötietojen käsittelyssä ja tulostuskuvien luonnissa sekä jälkikäsittelyssä. (GeoCalc peruskäyttöohje, 3.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään GeoCalcilla tehtäviin tukiseinälaskelmiin.

4.1.2 Ominaisuudet

GeoCalc on käyttöliittymältään ja ulkoasultaan nykyaikainen. Eri asetukset ja valikot löytyvät helposti muista suunnitteluohjelmista tutuilta paikoilta. Ohjelma on englanninkielinen. Sanoja tai symboleja hiirellä osoitettaessa tulee näkyviin vihjelaatikko, josta löytyy sanan suomenkielinen selitys. GeoCalcin etuina ovat monipuoliset tulokuvaajat, hyvä leikkauskuva ja helppo tulostus.

4.1.3 Laskentatapa

Tukiseinäohjelman ratkaisu perustuu palkki-jousimallin ratkaisemiseen elementtimenetelmällä. Palkkielementtinä käytetään kolmen vapausasteen 2D palkkielementtiä, kaivannon puoleinen maa mallinnetaan jousielementein ja taustan puoleiset kuormat (maanpaine, vedenpaine, ulkoiset kuormat) mallinnetaan kuormana. Kuormafunktio muutetaan solmukuormiksi elementtimalliin. Kuormien ja siirtymien välinen yhteys iteroidaan jokaisessa solmupisteessä yksi jousi kerrallaan. (Länsivaara 2012a, 2)

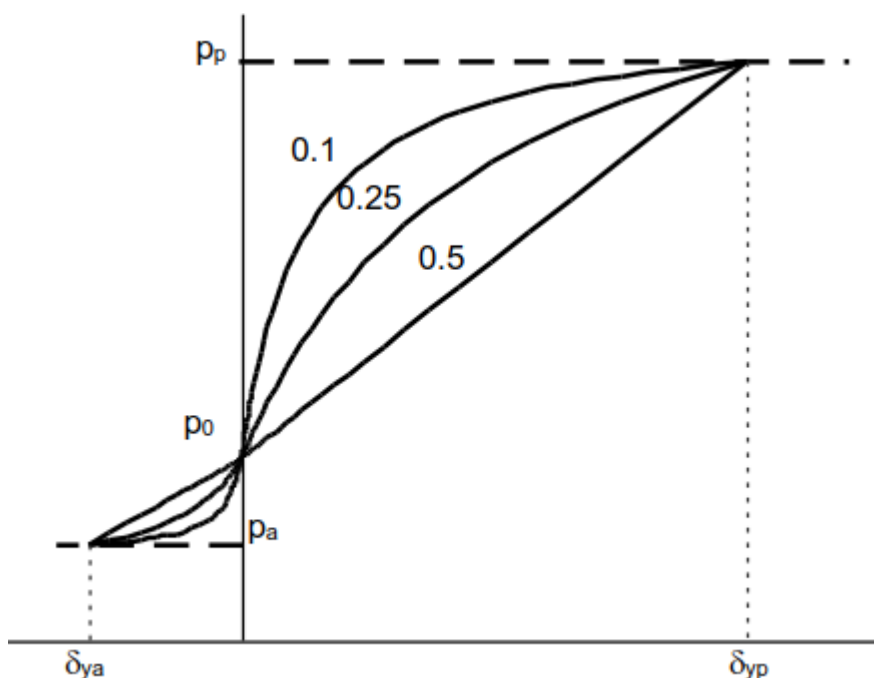
Jousimallit

Jousimalleja on käsitelty seuraavasti GeoCalc tukiseinä käyttöohjeessa (41–49). Jousimalleilla kuvataan maan seinää kuormittavaa/tukevaa vaikutusta seinän siirtyessä, eli maanpaineiden kehittymistä siirtymän funktiona. GeoCalc ohjelmassa on kaksi jousimallia. Kumpikin perustuu saman hyperbelin käyttöön. Hyperbeli sopii hyvin maan epälineaarisen käyttäytymisen kuvaamiseen. Toinen jousimalleista perustuu ääripaineiden kehittymistä vastaavan siirtymän antamiseen (DCM = Displacement Controlled Model) ja toinen maan muodonmuutosmoduulin antamiseen (MCM = Modulus Controlled Model). Vaikka mallit perustuvatkin samaan hyperbeliin, ovat ne kovin erilaisia. On tärkeä ymmärtää, että vaikka mallien parametrit ensisijaisesti määrittävät maan jäykkyyden määrittävät ne myös sen syvyysriippuvuuden. Usein juuri syvyysriippuvuus on tärkein asia seinän oikeanlaisen siirtymäkäyttäytymisen kuvaamiseksi.

Siirtymäperusteinen malli, DCM

Siirtymäperusteisessa mallissa käyttäjä määrittää siirtymät, joilla aktiivi- ja passiivimaanpaine saavutetaan. Käyttäjän antamat arvot ovat kertoimia, joilla kerrotaan jousen vaikutuspisteen etäisyys maanpinnasta tai ns. karakteristinen pituus. Kertoimien δ_{ya}/H_a ja δ_{yp}/H_p arvoja on esitetty esimerkiksi Kaivanto-ohjeessa (liite 4). Näiden lisäksi tulee antaa myös suhteellisen siirtymän arvot ξ_{50a} ja ξ_{50p} , joilla 50 % maanpainemuutoksesta tapahtuu. Nämä arvot määrittävät hyperbelin epälineaarisuuden määrän (kuva 8).

Hyperbelin yhtälöt on esitetty GeoCalcin teoriamanuaalissa. Käyttäjän kannalta on oleellista tuntea suhteellisen siirtymäparametrien ξ_{50a} ja ξ_{50p} vaikutus. Kuvassa 8 on esitetty parametrin vaikutus arvoilla 0.1, 0.25 ja 0.5. Kuten kuvasta havaitaan, yksinkertaistuu hyperbeli suoraksi kun parametri saa arvon 0.5 (eli puolet maksimi maanpainemuutoksesta saavutetaan puolella siirtymästä).



Kuva 8. Suhteellisen siirtymäparametrin ξ_{50} vaikutus maanpaineikäyttäytymiseen (Tukiseinä käyttö-
ohje, 42)

Täysin oleellinen asia siirtymäperusteisen mallin käyttäytymisessä on, mikä pituus siirtymäkertoimilla δ_{ya}/H_a ja δ_{yp}/H_p kerrotaan. Kuten edellä jo mainittiin, voi käyttäjä valita referenssipituudeksi joko tarkastelupisteen etäisyyden maanpinnasta tai niin sanotun karakteristisen pituuden. Suomessa on perinteisesti käytetty paljon ensin mainittua, joka tästä johtuen on GeoCalcissa asetettu oletusvalinnaksi.

Moduuliperusteinen malli, MCM

Moduuliperusteisissa mallissa (MCM) käytetään samaa hyperbolista funktiota kuin siirtymäperusteisissa mallissa. Siirtymän sijasta jäykkyys määritetään nyt moduulin avulla. Koska maan pystysuuntainen kokoonpuristuvuusmoduuli tunnetaan yleensä eri moduuleista parhaiten, annetaan jäykkyys sen avulla, ja ohjelma muuttaa sen automaattisesti vaakasuunteiseksi, tasotapausta vastaavaksi jouseksi. Muunnos on esitetty tarkemmin GeoCalcin teoriamanuaalissa. Lopputuloksena on, että vaakasuuntainen jäykkyys on avoimen tilan tapauksessa:

$$k_{h50}^* = 0.8 \cdot M$$

ja suljetun tilan tapauksessa:

$$k_{h50}^* = 1.1 \cdot M$$

Suljetussa tilassa saadaan siis samoilla parametreilla hieman jäykempi käyttäytyminen kuin avoimessa tilassa.

Moduuliluvun ja jännitysekspONENTIN lisäksi jäykkyyden kuvaamisen on lisätty ylikonsolidaatiota kuvaava parametri k . Kokoonpuristuvuusmoduuli määritetään siten yhtälöllä:

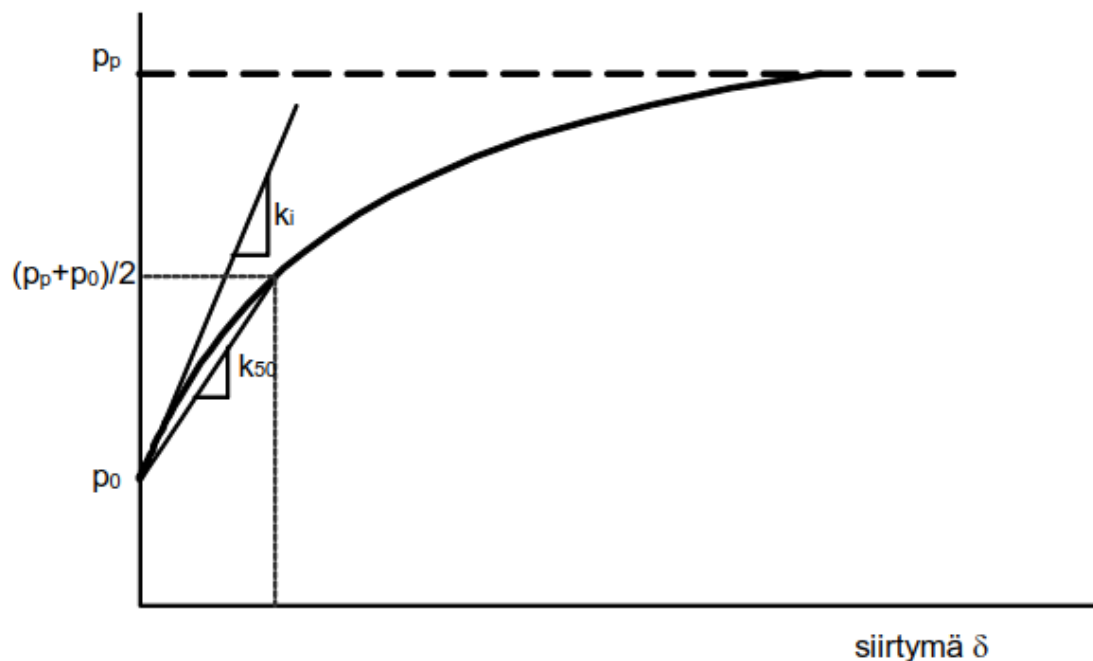
$$M = m \cdot \sigma_a \cdot \left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_a} \right)^{1-n} \cdot OCR^{k(1-n)}$$

missä	m	=	moduuliluku
	n	=	jännitysekspONENTTI
	σ_v'	=	tehokas pystyjännitys
	σ_a	=	vertailujännitys = 100 kPa
	OCR	=	kaivuun liittyvä ylikonsolidaatioaste
	k	=	jännitysekspONENTTI, k = [0,1]

Ylikonsolidaation osalta oleellista on, että sillä tarkoitetaan tässä yhteydessä kaivannon puoleisen maan jännitystilan suhdetta alkuperäisen maanpinnan mukaiseen jännitystilaan. Jos jännitysekspONENTILLE k annetaan arvo 1, lasketaan moduuli käytännössä alkuperäisen jännitystilan mukaan. Jos k saa arvon k = 0, lasketaan moduuli aina kaivuvaihetta vastaavan jännitystilan mukaan.

Edellä mainittujen parametrien lisäksi hyperbolinen funktion skaalataan parametrilla Rf. Parametrin oletusarvo on 0,98, mutta käyttäjä voi muuttaa sitä. Yleensä oletusarvoa ei ole syytä muuttaa, mutta jos halutaan laskea lineaarisella mallilla, annetaan parametrin arvoksi Rf = 0.

MCM mallin osalta on olennaista tiedostaa, että moduuliluku ja jännitysekspONENTTI eivät suoraan määrää maanpaine siirtymä käyttäytymistä vaan maan jäykkyyden syvyysriippuvuuden. Annetuilla parametreilla m, n ja k lasketaan aina kyseistä syvyyttä vastaava kokoonpuristuvuusmoduuli ja siitä edelleen jousivakio kh50, joka kuvaa jäykkyyttä puoliväliin mahdollisesta maanpainemuutoksesta (kuva 9).



Kuva 9. Moduuliperusteinen hyperbelimalli passiivipaineelle (Tukiseinä käyttöohje, 42)

Koska moduuliperusteisissa malleissa maan jäykkyys määritetään suoraan, eikä lujuus vaikuta siihen, ei ole tarpeen tarkastella erikseen suljetun leikkauslujuuden ja tehokkaiden lujuusparametrien tilanteita. Oleellista parametrien valinnassa on kuitenkin, mikä maalaji on kyseessä.

Kitkamailla kokoonpuristuvuusmoduuli määritetään yleensä kairausvastuksen perusteella. Hiekoilla ja tätä karkeammilla maalajeilla voidaan käyttää jännityseksponentin arvoa 0,5. Silteillä käytetään tää pienempää arvoa, kuitenkin suurempaa kuin nolla. Savimailla käytettävä jännityseksponentin arvo riippuu maan konsolidaatitilasta. Saven jäykkyyttä lineaarisesti mallinnettaessa jännityseksponentin arvoksi valitaan 0 ja ylikonsolidoituneella savella jännityseksponentiksi valitaan arvoksi 1. GeoCalcissa jännityseksponentille käytetään kirjainta n , kirjallisuudessa käytetään tunnuksena β .

Maalajien kokoonpuristuvuutta kuvaavia kertoimia ja parametrien arvoja voidaan ottaa kirjallisuudesta (liite 3). Tällöin on käyttäjän valittava mitä arvoja käytetään. Jos laskennan tuloksista halutaan tarkempia ja välttää ylivoimista voidaan parametrit selvittää maalajeille myös ödometrikokeen avulla. Tämä tulee yleensä kyseeseen koheesio maalajien kohdalla joille ei taulukoista löydy tarkkoja arvoja.

Ödometrikokeella saadaan myös arvio maan konsolidaatitilasta. GeoCalc huomioi maakerroksen konsolidaatioasteen eksponentilla k jonka arvo valitaan väliltä 0 - 1. Eksponentilla k on suuri vaikutus koheesio maalajien siirtymien suuruuteen käytettäessä pieniä muodonmuutosparametrien arvoja. Suurilla muodonmuutosparametrien arvoilla vaikutus jää pieneksi.

4.2 Fulgeo

4.2.1 Yleisesittely

Fulgeo on vuonna 1989 julkaistu Fulgeo Oy:n omistama MS-DOS käyttöjärjestelmällä toimiva laskentaohjelma. Fulgeoon oli mahdollista hankkia maksullisena lisäosana Sakari Lotvosen 1990-luvun alussa kehittämä differenssimenetelmään perustuva tukiseinälaskenta. Lisäosa mahdollisti tukiseinän siirtymien laskemisen. Fulgeon tuki- ja kehitystoiminta on loppunut, eikä ohjelmaa enää päivitetä. Ohjelman vanhentumisen takia Kuopion Pöyry päätyi etsimään sille korvaajaa.

Fulgeolla voidaan tehdä seuraavia laskentoja ja mitoituksia:

- peruslaatan kantokyky
- kantavuus odemarkin kantavuuskaavalla
- dynaamiset paalutuskaavat
- kulmatukimuurin mitoitus
- routamitoitus
- vakavuusanalyysi
- painuman laskenta
- ankkuroidun tukiseinän mitoitus.

4.2.2 Ominaisuudet

Fulgeon käyttöliittymä on kokonaan suomenkielinen. Lisäksi tietoja syötettäessä ohjelman alareunasta löytyy selventävä teksti. Fulgeon etuina ovat nopeus ja yksinkertaisuus mikä mahdollistaa laskentojen helpon tarkistamisen. Kuopion Fulgeo versiosta puuttuu siirtymien laskenta. Heikkoutena Fulgeolla on käyttöliittymän vanhanaikaisuus, joka ei hyväksy hiiren komentoja ja vaikeuttaa tulosten tekemistä. Fulgeo pystyy tulostamaan vain paperitulosteita, mutta nykyaikaiset tulostimet eivät tunnista ohjelmaa. Jotta tuloksia voidaan esittää sähköisessä muodossa tai muokata, täytyy ne tallentaa kuvankaappauksella ja siirtää tekstinkäsittelyohjelmaan. Fulgeo ei osaa piirtää leikkauskuvaa vaan tähän täytyy käyttää jotain toista ohjelmaa. Pöyry käyttää Fulgeoa lähinnä tukiseinälaskelmiin ja niiden tarkistamiseen.

4.2.3 Laskentatapa

Ohjelmisto käyttää laskentakaavoina pääasiassa yleisesti hyväksyttyjä ”käsinlaskenta” –menetelmiä. Tämä mahdollistaa ohjelman nopean toiminnan ja käytön. Tuttujen menetelmien takia suuruusluokka virheet jäävät harvinaisiksi. (Fulgeo käyttöohje: Fulgeo Oy, 3.)

Ankkuroidun tukiseinän laskenta

Tässä luvussa käsitellään ankkuroidun tukiseinän laskentaa. Lähdetiedot ovat Fulgeon käyttöohjeesta. Ohjelma laskee ankkuroituun tukiseinään kohdistuvat rasitukset Rakennuskaivanto-ohjeen RIL 181 - 1989 (RKO) mukaisesti. Lisäksi ohjelmaan on mahdollisuus liittää differenssimenetelmään perustuvaa laskentaohjelmaa (DIF) samoilla lähtöarvoilla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään RKO-laskentaan, sillä DIF-ohjelmaa ei ole Kuopion toimiston käytettävissä. Rakennuskaivanto-ohje RIL 181 - 1989 on korvautunut Kaivanto-ohjeella RIL 263 – 2014. Merkittävin muutos edelliseen julkaisuun on eurokoodien nouseminen ensisijaiseksi suunnittelujärjestelmäksi.

Laskenta jakaantuu ohjelmassa kolmeen vaiheeseen. Ensin ratkaistaan seinään kohdistuvan maanpaineen suuruus. Sen jälkeen määritetään seinän karakteristinen pituus ja tarkistetaan maanpaine kuviota kaivutason alapuolella seinän alapään kiinnitysasteesta riippuen. Lopuksi seinään syntyvät rasitukset lasketaan jatkuvana palkkina. Tässä vaiheessa ei maanpaine kuviota enää muuteta.

Usealta tasolta esijännittämättömillä tuilla tuettua seinää lukuun ottamatta perustuu maanpaine klassisen maanpaineteorian mukaiseen kokonaispaineeseen. Edellä mainitussa poikkeustapauksessa paine määräytyy tasoitetun nettomaanpaineen nollatasossa vaikuttavan paineen perusteella.

Maanpaineet lasketaan erikseen sekä aktiivi- että passiivipuolelle. Klassisen maanpaineen laskemiseen yhteydessä tarkistetaan settiseinän, suotovirtauksen ja passiivipaineen redusoinnin vaikutus. Vesipaineen ja kuormituksen vaikutukset huomioidaan tasoituksen jälkeen. Klassinen maanpaine voidaan laskea kolmella käyttäjän valittavissa olevalla tavalla.

- 1) Aktiivipaineena kitkan ja koheesion yhteisvaikutus huomioiden
- 2) Aktiivipaineen siten, että kussakin kohdassa voi vaikuttaa vain kitka tai koheesio.

3) Lepopaineena

Klassisen maanpaineen laskemisen jälkeen maanpaine tasoitetaan kaivuvaiheesta, laskentatavasta ja tuentatavasta riippuen seuraavasti.

Maanpainetta ei tasoiteta:

- lepopaineelle mitoittaessa
- aktiivipaineelle mitoittaessa tukemattomassa seinässä
- aktiivipaineelle mitoittaessa, yhdeltä tasolta esijännittämättömällä tuella tuetussa seinässä.

Maanpaine tasoitetaan menetelmällä A

- Aktiivipaineelle mitoittaessa kahdelta tai useammalta tasolta esijännittämättömillä tuilla tuetussa seinässä.
- Tasoitusmenetelmässä A ratkaistaan ensin syvyys d iteroimalla ja sen jälkeen lasketaan maakeroksittain tasoitetun paineen suuruus.

Maanpaine tasoitetaan menetelmällä B

- Aktiivipaineelle mitoittaessa esijännitetyillä tuilla tuetussa seinässä esijännitysvoiman ollessa vähintään 0,4 kertaa aktiivinen nettomaanpaineresultantti. Jos esijännitysvoima on pienempi, ohjelma laskee sekä A että B tasoituksen ja laskennassa käytetään näistä interpoloitua arvoa.
- Tasoitusmenetelmässä B ratkaistaan ensin B-pisteen sijainti, joka on klassisen nettomaanpaineen nollakohdan ja alimman tukitason puoliväli. Kuitenkin siten, että B-pisteen alapuolella olevien maanpainneiden resultantti on "passiivinen" ($P_{np} > P_{na}$).

Vedenpaine lisätään maanpainekuvioon mahdollisen tasoituksen jälkeen aina, jos mallissa on vedenalaisia kerroksia. Jos mallissa on orsivettä, huomioidaan se klassisen maanpaineen laskennassa käyttämällä orsiveden alueella vedellä kyllästetyn maan tiavuuspainoa.

Ohjelmassa voidaan käyttää viittä eri kuormitustyyppiä:

- seinään kohdistuva pistemäinen kuorma
- seinälle suorakaiteen muotoisesti jakaantunut kuorma
- seinälle kolmiomaisesti jakaantunut kuorma
- rakennuskaivanto-ohjeen mukainen keskitetty kuormitus
- rakennuskaivanto-ohjeen mukainen nauhakuorma (viivakuorma).

Kunkin kuorman vaikutus lisätään maanpainekuvioon "sellaisenaan" muiden maanpainetta aiheuttavien tekijöiden jälkeen. Kuormitusten lisäämisen jälkeen huomioidaan vielä maanpinnan tiivistyksen vaikutus.

Kun maanpaine on "ratkaistu" lasketaan seinä "normaaleilla" statiikan kaavoilla siten, että kuormana vaikuttaa saatu maanpaine. Normaaleissa tapauksissa sekä seinän ylä- että alapäähän syntyy uloke. Edellä selostettu maanpaineen määrittäminen johtaa myös alapäässä tasapainoiseen ratkaisuun, vaikka

syntyvä uloke on "tavallisiin" palkkeihin verrattuna luonnottoman pitkä. Laskennassa tarkastellaan vain seinään kohdistuvia vaakavoimia ja momentteja.

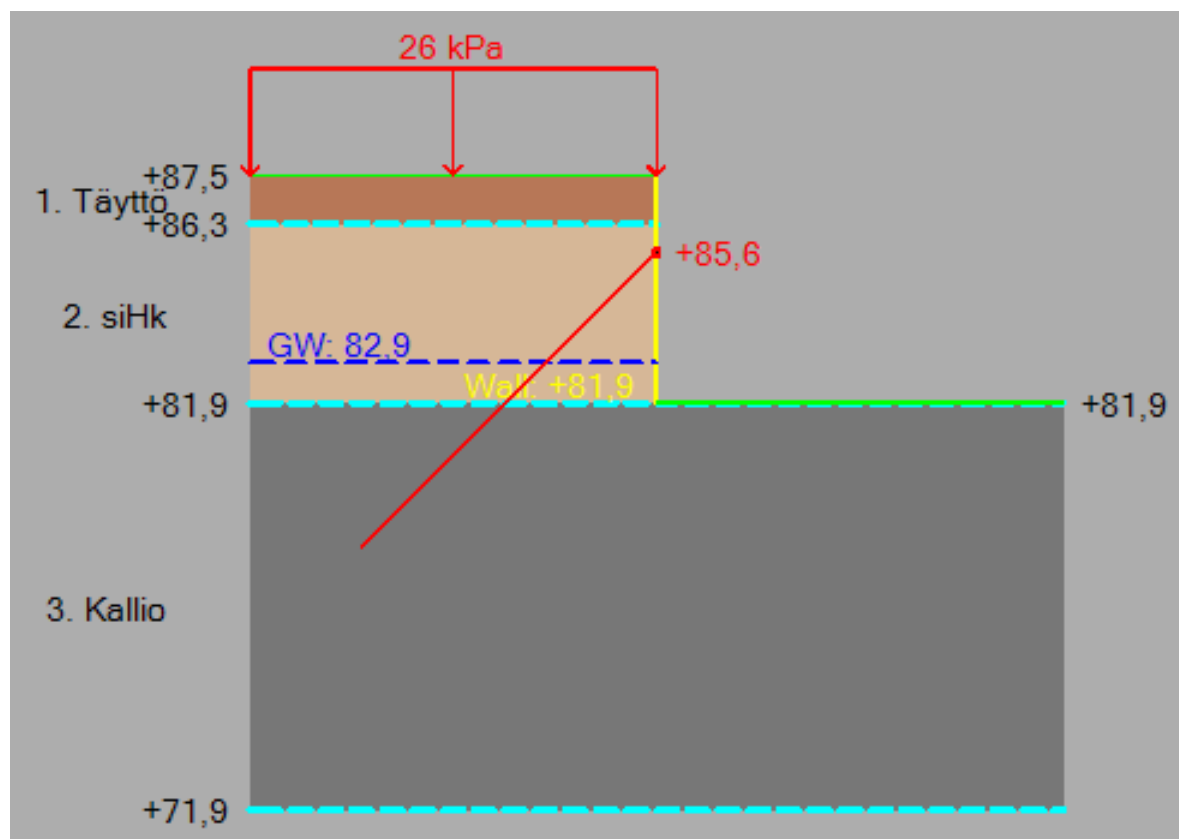
5 ESIMERKKISEINÄN LASKENNAT JA TYÖNKUVAUS

5.1 Esimerkin lähtötiedot

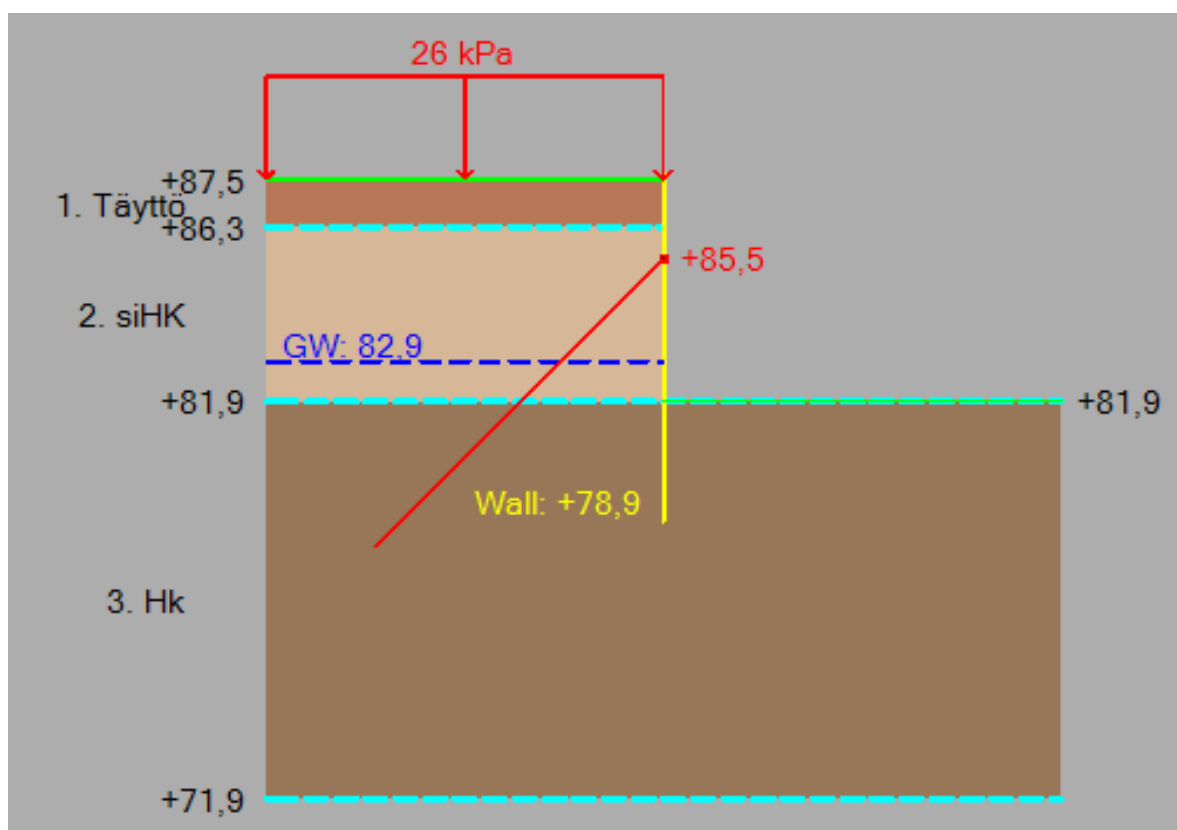
Tukiseinän ympärillä on työmaaliikennettä ja varastointia, josta arvioidaan aiheutuvan laaja-alainen 20 kPa pintakuorma. Esitetyt laskennat on tehty eurokoodin mukaisesti kuormitusyhdistelmällä 6.10b, joten muuttuva pintakuorma on kerrottu luvulla 1,3 ja muut tekijät on huomioitu ominaisarvoilla (katso kohta 3.4). Seinänä käytetään Larssen 603 teräsponsittiprofiilia. Ankkurivälinä on käytetty 4,8 metriä ja ankkurien asennuskulma on 45 astetta.

Laskenta tehdään kahdelle eri esimerkkitapaukselle molemmilla ohjelmilla. Ensimmäisessä laskennassa tukiseinä on tukeutuneena kallioon kalliotapilla (kuva 10). Toisessa laskennassa tukiseinän alaosa on lyöty ja tuettu tiiviiseen hiekkakerrokseen (kuva 11). Muilta osin laskentojen lähtötiedot pysyvät samoina. GeoCalcissa molemmat tapaukset on laskettu molemmilla jousimalleilla. Kaikki laskelmat on tehty aktiivipaine mitoituksena.

Laskennan kuvat on otettu laskennasta, jossa tukiseinä on lyöty tiiviiseen hiekkakerrokseen. GeoCalcin kuvat ovat muodonmuutosperusteisesta mallista (MCM). Kaikkien GeoCalcin laskentatapausten tuloskuvaajat löytyvät liitteestä 1 ja Fulgeon liitteestä 2.



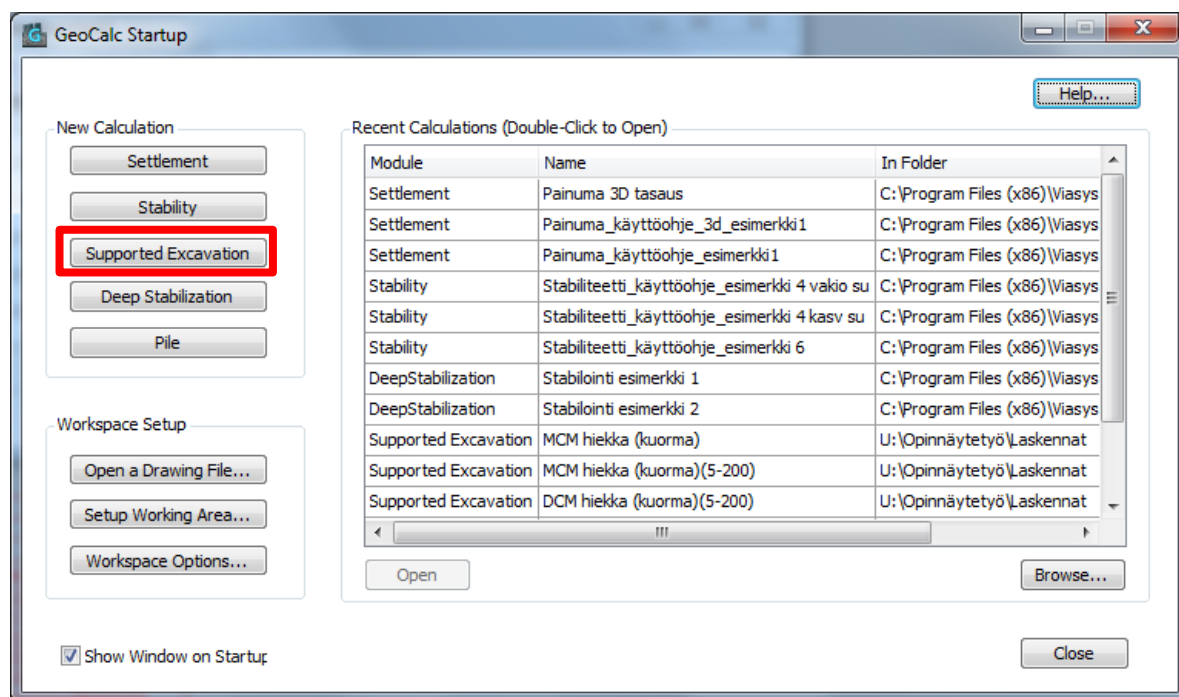
Kuva 10. Kallion pintaan lyöty tukiseinä



Kuva 11. Tiiviiseen hiekkakerrokseen lyöty tukiseinä

5.2 Tukiseinälaskelman työvaiheet GeoCalcilla

GeoCalc tukiseinäohjeen mukaan laskelma etenee seuraavasti: aluksi GeoCalcissa valitaan oikea laskentamoduuli, eli tässä tapauksessa tukiseinämoduuli (kuva 12).



Kuva 12. GeoCalc aloitusvalikko

Tukiseinäohjelma koostuu valikoista (sivuista tai lehdistä) joihin syötetään lähtötietoja. Tarkoituksena on edetä sivujen täyttämässä vasemmalta oikealle kunnes päästään laskennan kautta tuloksiin. Painuma ja stabiliteetti moduuleista poiketen tukiseinämoduulin geometriaa ei luoda Cad kuvassa, vaan maakerrosten paksuudet ja muu geometria annetaan ohjelman välilehdillä. (Länsivaara 2012a).

Laskennan tiedot (General)

Ensimmäisenä syötetään projektin yleistiedot kuten nimi, yritys ja asiakas (kuva 13).

Kuva 13. Laskennan tiedot

Näyttöasetukset (View)

View valikossa määritetään miten laskentaa vastaava poikkileikkauskuva esitetään grafiikkaikkunassa (kuva 14). Toistaiseksi laskentamallia ei kuitenkaan ole määritetty, joten muutosten vaikutuksia ei vielä näe. Kullekin laskenta- ja tulostuselementille määritellään näkyvyys (rasti ruudussa), viivatyyppi, viivapaksuus sekä väri. Painamalla *Update* painiketta ruudun saa päivitettyä milloin tahansa ohjelman ollessa käytössä.

Kuva 14. Näyttöasetukset

Maakerrosten tiedot (Soil)

Kolmanteen välilehteen *Soil* syötetään maata koskevat rakenne- ja ominaisuustiedot. Välilehdelle voi lisätä maakerroksia, sekä antaa niille nimet ja käytettävät värit. Maakerroksille täytyy antaa kerrospaksuus ja niiden järjestys määräytyy ylhäältä alaspäin. Materiaalitietoihin syötetään kerroksen tilavuuspaino, onko kyseessä avoimet vai suljetut olosuhteet, maalajin kitkakulma ja koheesio, sekä laskentatavasta riippuvat kertoimet. Maaparametrien erityisvalikosta voidaan mallin maanpaineiden laskentaa ohjata yksityiskohtaisemmin. Esimerkiksi voidaan valita käytetäänkö aktiivi- vai lepopainemitoitusta ja valita lepopaineen laskentatapa kaivannon puolella (kuva 18).

Esimerkkitapauksen maakerrokset ovat täyttö, silttinen hiekka ja tiivis hiekkakerros. Kerrosten paksuudet ja ominaisuudet näkyvät kuvassa 15. Lepopainekertoimen määrittämiseen käytetään Jakyn yhtälöä. Maanpainekertoimien laskentaan ohjelma käyttää oletuksena Coulombin teoriaa, joka antaa passiivimaanpainekertoimelle eurokoodia suurempia arvoja. Eurokoodin mukaisessa suunnittelussa tulisi käyttää eurokoodeihin perustuvista nomogrammeista saatavia maanpainekertoimien arvoja (liite 5). Tämä on huomioitu vaihtamalla maanpainekertoimien laskentatapa käyttäjän määrittämäksi ja syöttämällä nomogrammien mukaiset arvot. Kitkamailla laskenta suoritetaan avoimissa olosuhteissa (*drained*).

Id	Color	Layer Name	h [m]	γ [kN/m³]	φ [°]	c [kPa]	Δc [kPa/m]	Ko Model	Ko	Earth Pres. Model	Ka	Kp	d/Jud	Material Model
1.	...	Täyttö	1,2	20	34	0	0	Jaky	0,44	User-defined	0,24	6	Drained	MCM
2.	...	siltti	4,4	17	28	0	0	Jaky	0,53	User-defined	0,32	3,9	Drained	MCM
3.	...	Hk	10	20	36	0	0	Jaky	0,41	User-defined	0,23	6,5	Drained	MCM

Kuva 15. Maakerrosten tiedot

Material Model	δ_{ya}	δ_{yp}	ξ_{50a}	ξ_{50p}	m	n	k
MCM					400	0,5	0,5
MCM					300	0,5	0,5
MCM					600	0,5	0,5

Kuva 16. Muodonmuutosperusteisen mallin parametrit

Material Model	δ_{ya}	δ_{yp}	ξ_{50a}	ξ_{50p}	m	n	k
DCM	0,0005	0,002	0,25	0,25			
DCM	0,002	0,006	0,25	0,25			
DCM	0,0005	0,002	0,25	0,25			

Kuva 17. Siirtymäperusteisen mallin parametrit

Advanced Soil Parameters

p0 at excavation side: K0

p at back of wall: Ko - Kao

DCM length: location of calculation point

Rf: 0,98

Poisson ratio:

Disturbed layer [m]:

Characteristic length [m]:

Close

Kuva 18. Maaparametrien erityisvalikko

Tukiseinän tiedot (Wall)

Valikossa *Wall* annetaan tiedot tukiseinästä ja kaivannon syvyydestä (kuva 19). Kohtaan *Ground level*/voidaan antaa maanpinta joko maantieteellisenä korkona tai 0-tasona. Tukiseinätiетokantaan on syötetty yleisimmät tukiseinätyypit ja ne ovat valittavana *Wall Type* ja *Profile* valinnoista. *View*-painikkeella voi tarkastella tukiseinätyypin parametreja. Vakiotukiseinätyyppien parametreja ei voi muuttaa, mutta tukiseinätiетokantaan voi käyttäjä luoda omia profiileja. Tukiseinätiетokantaa voi muokata valitsemalla *Wall*-alasvetovalikosta toiminnan *Edit Library*. Tukiseinälle täytyy antaa myös pystysuuntainen jäykkyysarvo tai määrittää kalliotapin jäykkyys sitä käytettäessä. Lisäksi sivulla määritetään upotussyvyys, kaivannon syvyys, tukiseinän kaltevuus, maanpinnan kaltevuus tukiseinän takana sekä maan ja seinän väliset kitkakertoimet.

Seinän upotussyvyyttä ei alussa tiedetä mutta se selviää kokeilemalla. Upotussyvyys valitaan kokeilemalla eri syvyyksiä ja seuraamalla tukiseinän siirtymiä ja varmuutta pyörähtämistä vastaan. Pystysuuntaiseksi jäykkyydeksi on valittu 500 kN/mm/m sillä teräsponttiseinän ajatellaan tukeutuvan tiiviiseen maakerrokseen. Seinäkitkan kertoimeksi valitaan aktiivipaineen laskennalle 0,66 ja 0,5 passiivipaineen laskennalle.

Supported Excavation - [MCM hiekka (kuorma)]

Calculation Edit View Soil Wall Ground Water Load Anchorage Calculate

General View Soil Wall Ground Water Load Anchorage Calculate

Wall type: Sheet pile

Profile: View.. Larssen 603 (ThyssenK...)

Ground level [m]: 87,5

Depth of excavation [m]: 5,6

Length of wall below ground surface [m]: 8,6

Inclination angle of terrain at back side of wall [°]: 0

Height of wall above earth surface [m]: 0,1

Length of secondary profile [m]:

Calculation width [m]: 1

☐ Rock bolt at wall base

Vertical stiffness [kN/mm/m]: 500

Horizontal stiffness [kN/mm/m]: 0

Wall friction coefficient ra: 0,66

Wall friction coefficient rp: 0,5

Update and Zoom Update Close

Kuva 19. Tukiseinän tiedot

Pohjavesitiedot (Ground Water)

Valikossa *Ground Water* määritetään pohjavesitiedot (kuva 20). Sivun taulukkoon määritetään pohjavedenpinnat tukiseinän molemmiin puolin kaivussyvyyden funktiona. Orsivedestä annetaan vedenpinta, veden alapinta (vettä pidättävän kerroksen yläpinta) ja suotopinta (vettä pidättävän kerroksen

alapinta). Lisäksi sivulla voi määrittää lasketaanko varmuus hydraulista murtumista vastaan olettaen, että vesi on virtaustilassa tai että kaivannon pohjalla on vettä pidättävä kerros. Sivulla on myös tulostusosa, jossa voi piirtää varmuuden hydraulista murtumista vastaan, vedenpaine kuvaajat sekä annetut vedenpinnat.

Esimerkissä pohjavedenpinta on 4,6 metriä maanpinnan alapuolella. Kaivannon puolella pohjavesi asetetaan sen hetkisen kaivuvaiheen tasolle.

Depth of Exc. [m]	GWL back [m]	GWL [m]
0	4,6	4,6
4,6	4,6	4,6
5,6	4,6	5,6

Kuva 20. Pohjavesitiedot

Kuormien tiedot (Load)

Load valikossa määritetään laskentakuormat (kuva 21). Pintakuormat syötetään suoraan sivulle. Kaivannon kummallakin puolella voidaan antaa kaksi pintakuormaa, jotka voidaan aktivoida halutulla kaivussyvyydellä. Lisäksi on mahdollista antaa erikseen pintakuorma kaivannon pohjalle viimeisen kaivuvaiheen jälkeen kuvaamaan massanvaihtoa.

Kuva 21. Kuormien tiedot

Viivakuorma tai keskitetty kuorma kaivanto-ohjeen RIL 263 - 2014 mukaisesti voidaan ottaa käyttöön valitsemalla kohta *Calculation with area loads*. Kuormatyyppin parametrit voidaan määrittää valitsemalla toiminto *Define*. Kuormatyyppille voi määrittää myös aktivointisyvyyden.

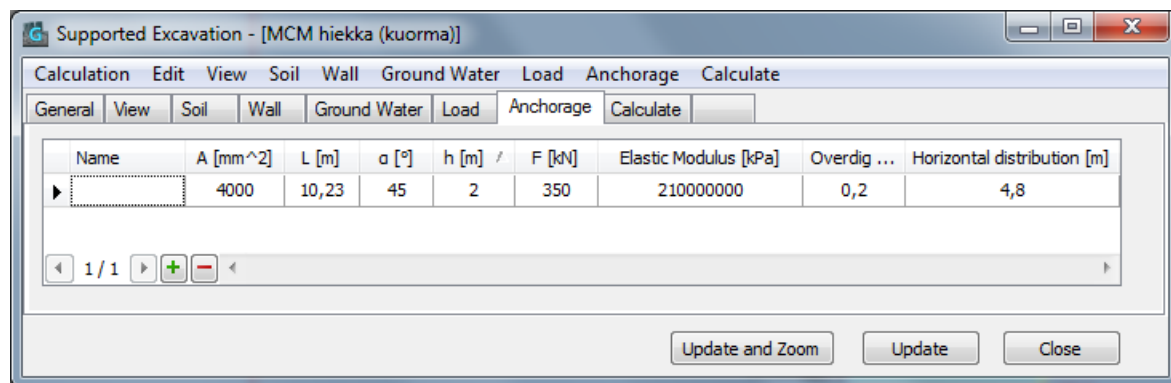
Kuormia voidaan määrittää suoraan tiettyyn solmupisteeseen valitsemalla kohta *Calculation with nodal loads*. Kuormat annetaan tietylle syvyydelle ja kuormille voi määrittää myös aktivointitasen. Kuormatyyppin parametrit voidaan määrittää valitsemalla toiminto *Define*.

Ankkurien tiedot (Anchorage)

Anchorage valikossa määritetään ankkurit, niiden taso ja esijännitysvoimat (kuva 22). Ankkuri määritetään antamalla sen pinta-ala, pituus, kulma, asennussyvyys, esijännitysvoima, kimmokerroin, työvara sekä ankkuriväli. Työvaralla tarkoitetaan etäisyyttä, paljonko yli annetun tukitason kaivetaan ennen ankkurin asentamista.

Tukiseinän laskenta perustuu tasomallin laskentaan. Ankkurien osalta tämä tarkoittaa, että laskentajäykkyys saadaan ankkurin pinta-alan A , pituuden L , kimmomoduulin E ja ankkurinvälin kk avulla yhtälöstä $EA/(Lkk)$. (Länsivaara 2012b, 16.)

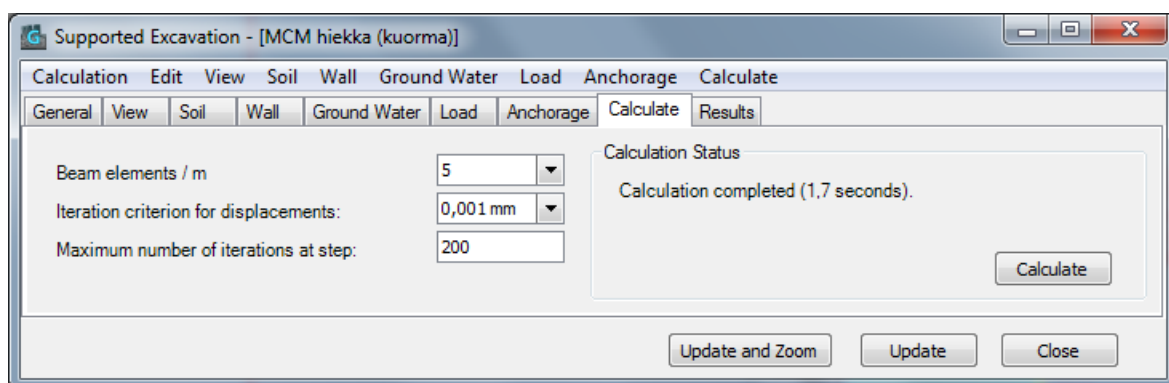
Esimerkkitapauksessa ei ole tietoa käytettävästä ankkurista. Ankkuri mallinnetaan jäykkänä, etteivät ankkurin venymät vaikuta merkittävästi tukiseinän siirtymään.



Kuva 22. Ankkurien tiedot

Laskenta (Calculate)

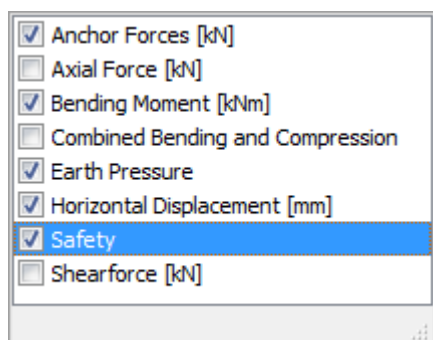
Calculate valikossa (kuva 23) määritetään laskennan asetukset ja käynnistetään itse laskenta. Sivulla valitaan kuinka moneen elementtiin tukiseinämetri jaetaan, mikä on iterointitarkkuus ja iterointikierrosten maksimilukumäärä. Laskennan nopeus riippuu osin käytetyistä arvoista. Toisaalta liian harva elementtijako voi vääristää geometriaa. Mikäli kaikki laskentaparametrit eivät ole määritettyjä tai laskennassa on muita ongelmia, ilmaisee teksti kentässä *Calculation Status* ongelman syyn.



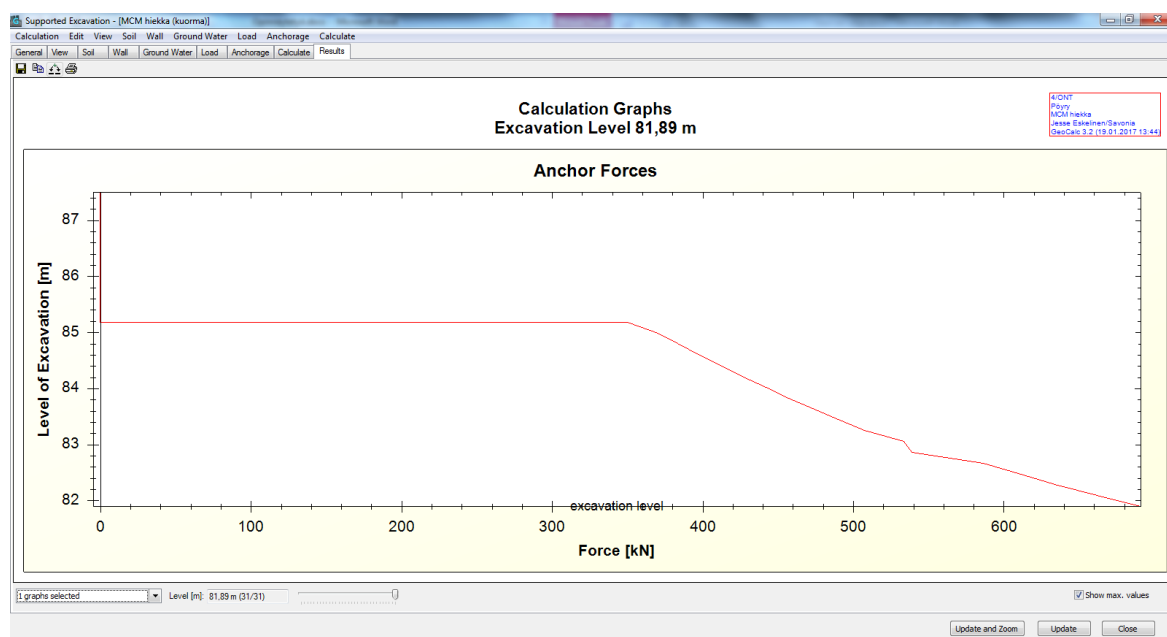
Kuva 23. Laskennan asetukset

Tulokset (Results)

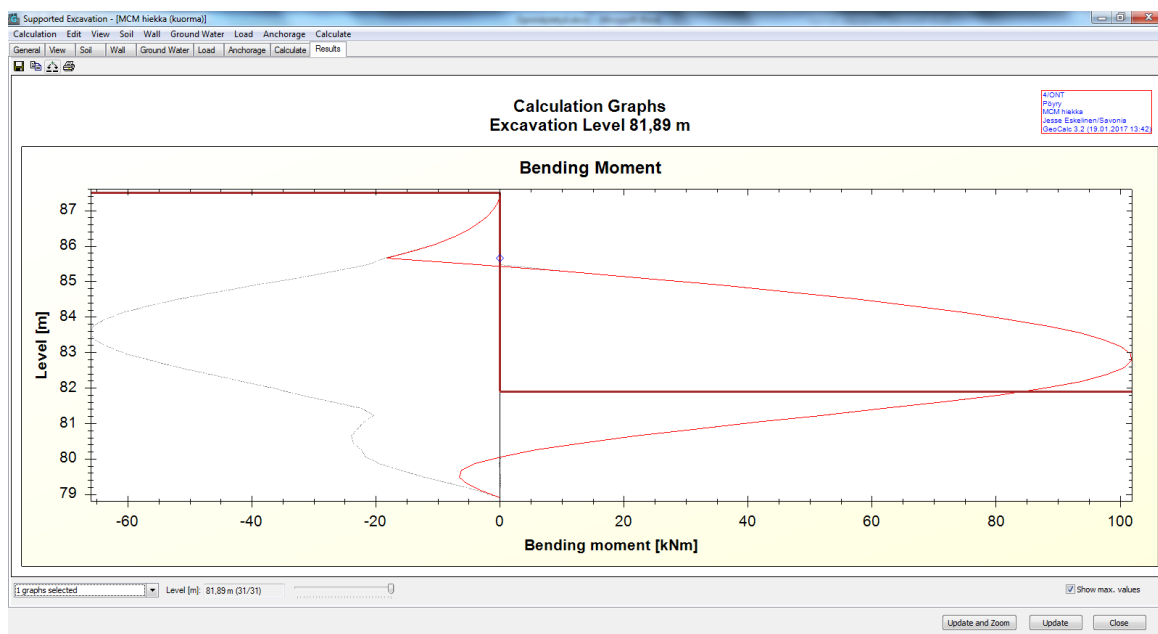
Laskennan jälkeen ohjelma siirtyy suoraan *results* välilehdelle. Tulokset esitetään kahdeksana kuvaajana (kuva 24). Vasemmasta alareunasta voidaan valita haluttuja kuvaajia esitettäväksi yksittäin tai yhdessä. Valittavissa ovat ankkurivoima, pystysuuntainen voima, taivutusmomentti, yhdistetty taivutus ja puristusjännitys, maanpaine, vaakasuuntainen siirtymä, varmuus ja mobilisaatio sekä leikkausvoima. Lähtötiedot ja osa tuloksista esitetään automaattisesti poikkileikkauskuvassa. Kaikki tulostulokuvaukset tästä esimerkistä löytyvät liitteestä 1.



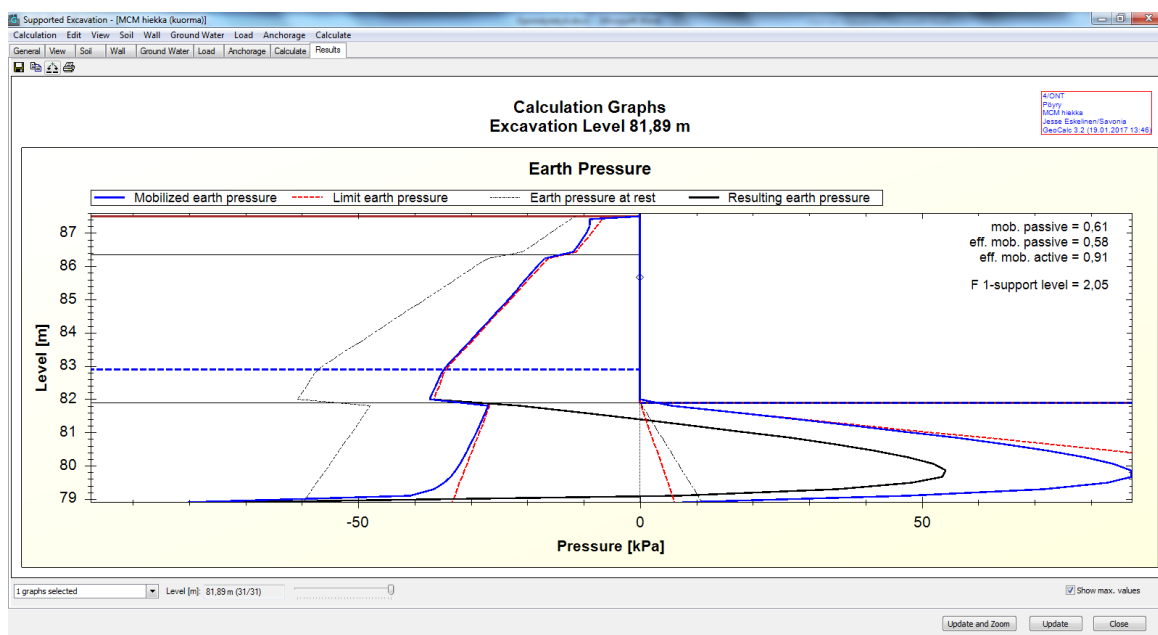
Kuva 24. Tulostulokuvauksien valinta



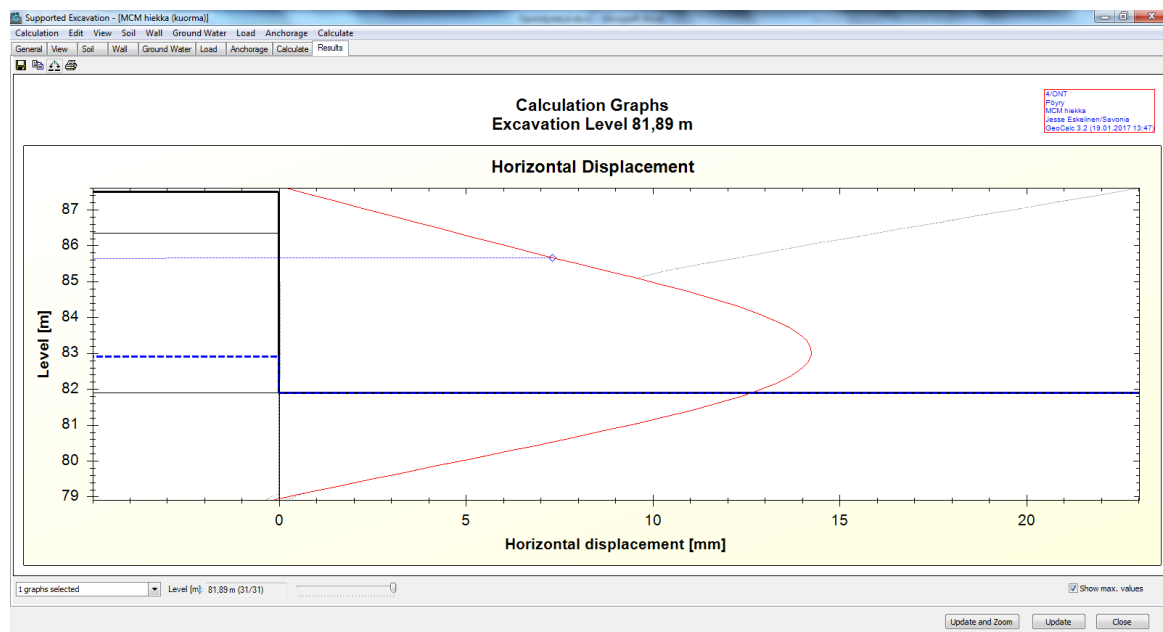
Kuva 25. Ankkurivoima



Kuva 26. Taivutusmomentti



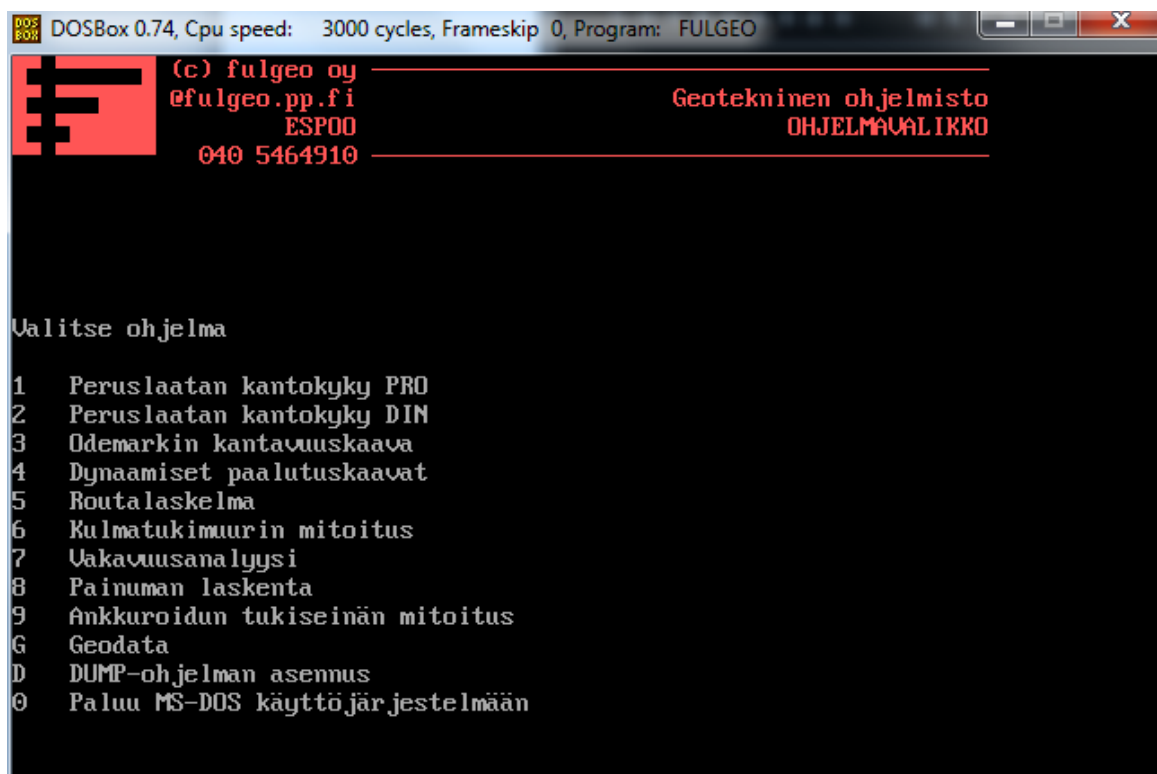
Kuva 27. Maanpaine



Kuva 28. Vaakasuuntainen siirtymä

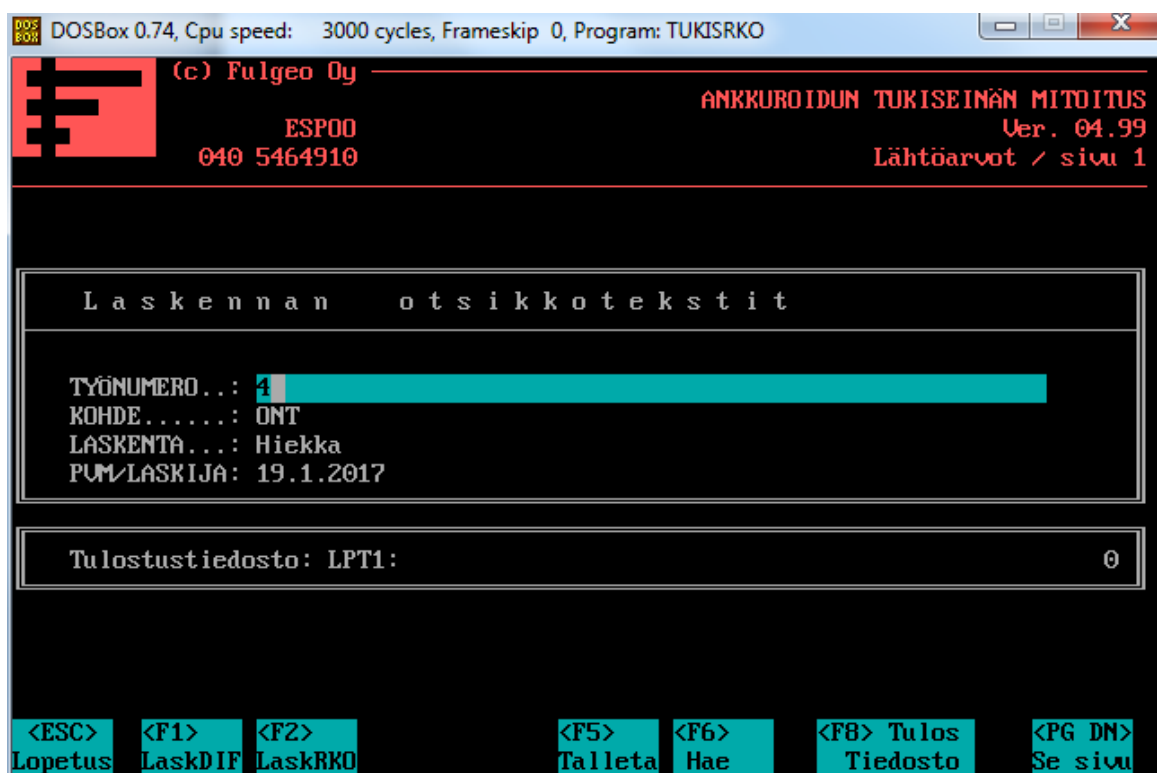
5.3 Tukiseinälaskelman työvaiheet Fulgeolla

Fulgeo käynnistyy ensiksi ohjelma-avalikkoon josta käyttäjä voi valita haluamansa ohjelman (kuva 29). Tässä työssä käydään läpi vain ankkuroidun tukiseinän mitoitus.



Kuva 29. Fulgeo aloitusvalikko

Ensimmäisellä sivulla annetaan laskennan tunnistetiedot (kuva 30).



Kuva 30. Laskennan tiedot

Toisella sivulla annetaan varmuuskertoimet, maakerrosten tiedot ja kulma-arvot (kuva 31). Maakerrostietoihin syötetään yläpinnan korko, maan tilavuuspainot, kitkakulma ja koheesio. Suotovirtaustekijä ei vaikuta RKO-laskennassa. Passiivipuolelle voi halutessaan antaa omat maakerrostiedot. Oletuksena ne ovat samat kuin aktiivipuolella.

Kulma-arvoihin syötetään seinän kaltevuus aktiivi- ja passiivipuolella, maanpinnan kaltevuudet seinän takana ja kaivannossa, sekä seinäkitkan kertoimet aktiivi- ja passiivipuolelle. ϕ -k on maan keskimääräinen kitkakulma, jota käytetään rakennuskaivanto-ohjeen mukaisen keskitetyn kuorman laskennassa.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: TUKISRKO

(c) Fulgeo Oy

ESP00
040 5464910

ANKKUROIDUN TUKISEINÄN MITOITUS
Ver. 04.99
Lähtöarvot / sivu 2

Varmuuskertoimet						Kulma-arvot						
f _y	f _c	f _{qa}	f _{qb}	f _Q	K	α-a	α-p	β-a	β-p	δδ-a	δδ-p	φ-k
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0	+0.0	+0.0	+0.0	+0.0	0.66	0.50	28.0

Aktiivipuolen maakerrokset						Passiivipuolen maakerrokset					
h	g	g'	φ	C	s	h	g	g'	φ	C	s
+87.6	20.0	10.0	34.0	0	0	+0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
+86.4	17.0	7.0	28.0	0	0						
+82.0	20.0	10.0	36.0	0	0						

Kerroksen yläpinnan +korko (m) DIF RKO

<ESC> Lopetus	<F1> LaskDIF	<F2> LaskRKO	<F5> Talleta	<F6> Hae	<F10> GeoData	<PG UP> Ed sivu	<PG DN> Se sivu
------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------	------------------	--------------------	--------------------

Kuva 31. Maakerrosten tiedot

Kolmannella sivulla annetaan ankkurien tiedot, kaivuvaiheet ja vesipinnat (kuva 32). Ankkureiden tietoihin annetaan ankkurointi taso, ankkurin kaltevuus, ankkurointiväli ja esijännitysvoima. Tukien materiaalitietoja sekä ankkurin poikkileikkauksen pinta-alaa ei tarvita RKO-laskennassa.

Kaivuvaiheisiin syötetään kaivutasot. Ylempi taso on ankkurointitaso 0,2m työvaralla ja alempi kaivannon pohjan taso. Seuraaviin sarakkeisiin syötetään pintakuormat aktiivi- ja passiivipuolille. LS-sarakkeeseen merkitään käytetäänkö passiivipuolen maanpaineen redusointia. Seuraavaan kohtaan voi käyttäjä halutessaan asettaa seinän karakterisen pituuden.

Vesipintatietoihin annetaan vesipinnan korot aktiivi- ja passiivipuolella, taso josta alkaen vesipintojen paine-eron oletetaan muuttuvan lineaarisesti nolaksi, orsiveden taso ja orsiveden tason vaikutusalueen alareuna.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: TUKISRKO

(c) Fulgeo Oy

ANKKUROIDUN TUKISEINÄN MITOITUS

Ver. 04.99

ESP00

040 5464910

Lähtöarvot / sivu 3

Tukien materiaali		Ankkurit						
Murtovenymä (°/oo)	Murtojämmitys (MPa)	A-taso	kalt	k/k	pituus	ala	esiämm.	
8.00	1600	+85.6	45	4.80	0.0	0	350	

Kaivuvaiheet					Vesipaineet				
K-taso	qa	qp	LS	kar.pit.	Hwpass	Hwakt	Hwa0	HWorsi	Hwa0
+85.4	26	0	0	+0.0	+83.0	+83.0	+0.0	+0.0	+0.0
+82.0	26	0	0	+0.0	+82.0	+83.0	+0.0	+0.0	+0.0

Kaivutaso (+korko)

DIF RKO

<ESC> Lopetus	<F1> LaskDIF	<F2> LaskRKO	<F5> Talleta	<F6> Hae	<F10> GeoData	<PG UP> Ed sivu	<PG DN> Se sivu
------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------	------------------	--------------------	--------------------

Kuva 32. Ankkurien, kaivuvaiheiden ja vesipaineiden tiedot

Neljännellä sivulla syötetään tukiseinän ja ulkoisten kuormitusten tiedot (kuva 33). Seinän tietoihin tulee profiilien väli ja leveys, passiivipaineen vähennysprosentti ja tiivistimen paino. Kimmomoduuli, momentti, pystyvoima, vaakavoima sekä ala- ja yläpään kiinnitysaste tarvitaan vain differenssimenettelmään perustuvassa laskennassa. Jäykkyys kohtaan tulee seinän ylä ja alapään korkotasot. Profiilin taivutusvastuksella, taivutusjäykkyydellä tai iteroinnilla ei ole vaikutusta RKO-laskentaan.

Tässä opinnäytetyössä ei tukiseinään kohdistu ulkoisia kuormia. Jos ulkoista kuormaa käytetään, täytyy kuorman tyyppi määrittää:

- 1 = seinään kohdistuva vaakasuuntainen pistekuorma [kN]
- 2 = suorakaidekuorma [kPa]
- 3 = kolmiokuorma [kPa]
- 4 = keskitetty kuormitus (aluekuorma) [kN]
- 5 = viivakuormitus (nauhakuorma) [kN/jm].

Jos kuormitus halutaan aktivoida tietyssä kaivuvaiheessa voidaan se asettaa kohtaan V1-V2. Tämän jälkehen syötetään kuormituksen suuruus, kuormituksen vaikutuksen vaikutustaso, etäisyys seinästä, leveys ja pituus käytetyn kuorman tyypin mukaan.

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: TUKISRKO

(c) Fulgeo Oy

ANKKUROIDUN TUKISEINÄN MITOITUS

Ver. 01.99

ESP00

040 5464910

Lähtöarvot / sivu 4

Seinän tiedot										Iterointi		
k/k	prof.	lev	Pp%	Jyrä	E(Gpa.)	Mo	No	Qo	Aki	Yki	D-X	D-Y
1.00	1000		0	0	210	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.000

Jäykkyys			Ulkoiset kuormitukset							
+korko	W(cm3)	J(cm4)	Tyyppi	U1	U2	Kuormitus	+korko	A1	A2	A3
+87.6	0	0	0	0	0	0.00	+0.0	+0.0	0.0	0.0
+79.0	0	0								

+korko (ylin = seinän yläpää ; alin = seinän alapää) DIF RKO

<ESC> Lopetus <F1> LaskDIF <F2> LaskRKO <F5> Talleta <F6> Hae <F10> GeoData <PG UP> Ed sivu <PG DN> Se sivu

Kuva 33. Tukiseinän ja ulkoisten kuormitusten tiedot

Viimeisellä sivulla annetaan maanpaineen ja siirtymän riippuvuutta kuvaavien p-y käyrien arvot, jotka vaikuttavat vain differenssimenetelmää käytettäessä (kuva 34).

DOSBox 0.74, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: TUKISRKO

(c) Fulgeo Oy

ANKKUROIDUN TUKISEINÄN MITOITUS

Ver. 04.99

ESP00

040 5464910

Lähtöarvot / sivu 5

ARVOT:

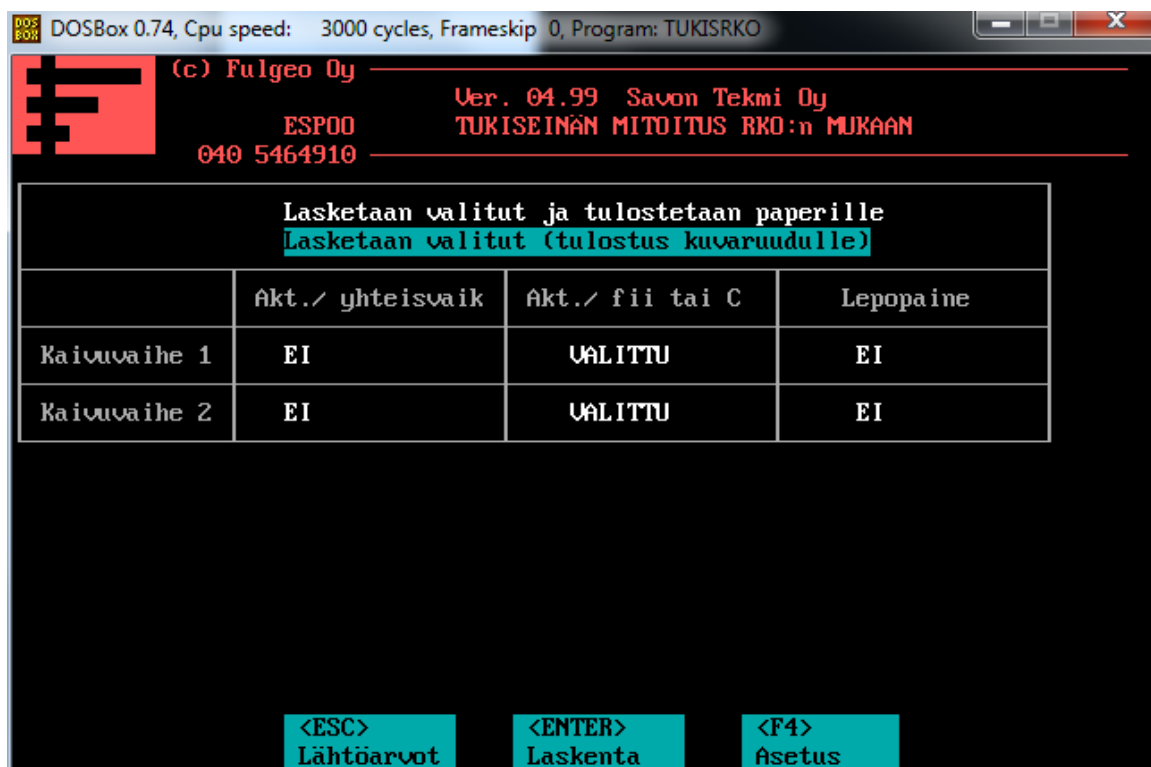
+korko(m)	0.0
koodi 0/1/2	0
dx	1/1
1-p-%	0.0000
	0.0000

Suhteellinen siirtymä ao. paine-%:lle. 0=Lepo / Neg.=Passiivi / Pos.=Aktiivi

<ESC> Lopetus <F1> LaskeDIF <F8> Lisää P-Y <F9> Poista P-Y <PG UP> Ed sivu

Kuva 34. p-y käyrien tiedot

F2 painikkeesta ohjelma siirtyy laskenta valikkoon (kuva 35). Valikosta voidaan valita laskentamene-
telmä. Valittavina ovat lepopaine sekä aktiivipaine erillis- tai yhteisvaikutuksena. Laskennat voidaan
valita käytettäväksi kaivuvaiheittain.



Kuva 35. Tulostus ja laskenta asetusten valinta

Laskennan jälkeen ohjelma siirtyy suoraan tulostuskuvaajien esitykseen (kuvat 36 ja 37).

Vasemmanpuoleisimmassa kuvassa on esitetty:

- maakerrosrajat ja lujuusparametrit
- vesipinnat
- maanpinta ja kaivutaso
- seinän ylä- ja alapään taso
- tuentasot.

Vasemmalta lukien seuraavassa kuvassa on esitetty:

- leikkausvoimapinta (asteikko on kN/profiili)
- tukireaktiot (vaakasurat komponentit kN/ankkuri)
- alapään kiinnitys (kalliotapitus) jos sellainen on laskettu (yksikkönä kN/profiili).

Seuraavassa kuvassa on esitetty:

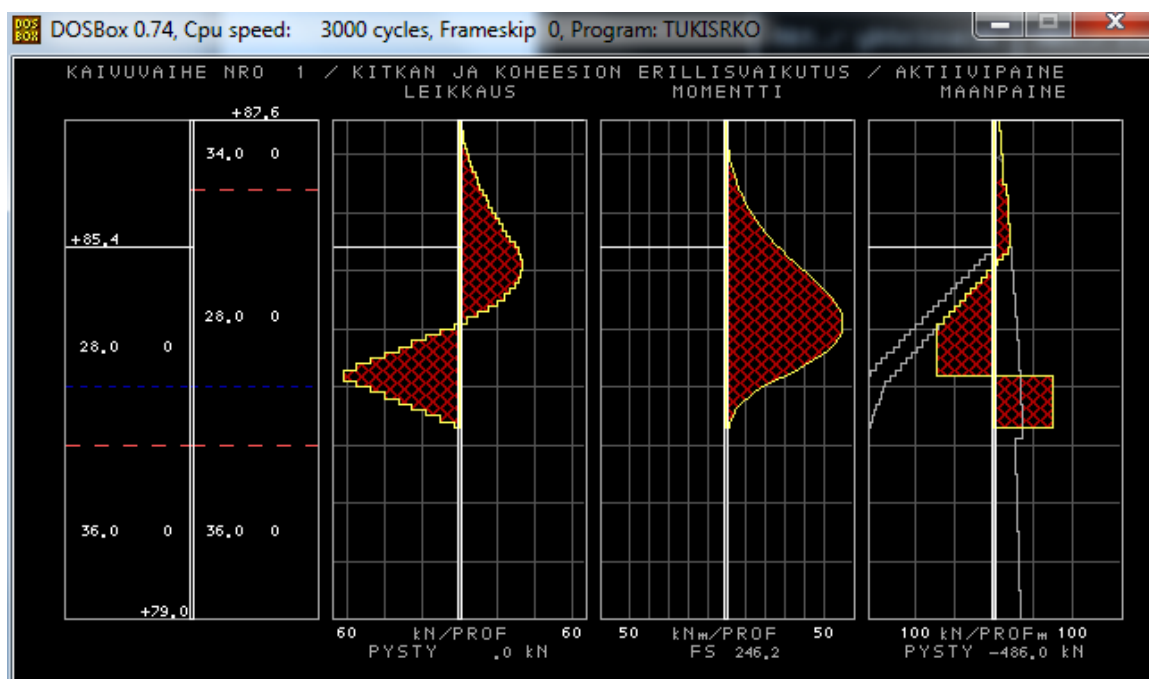
- momenttipinta (asteikko on kNm/profiili)
- tukimomentit (kNm/profiili).

Oikeanpuoleisimmassa kuvassa on esitetty:

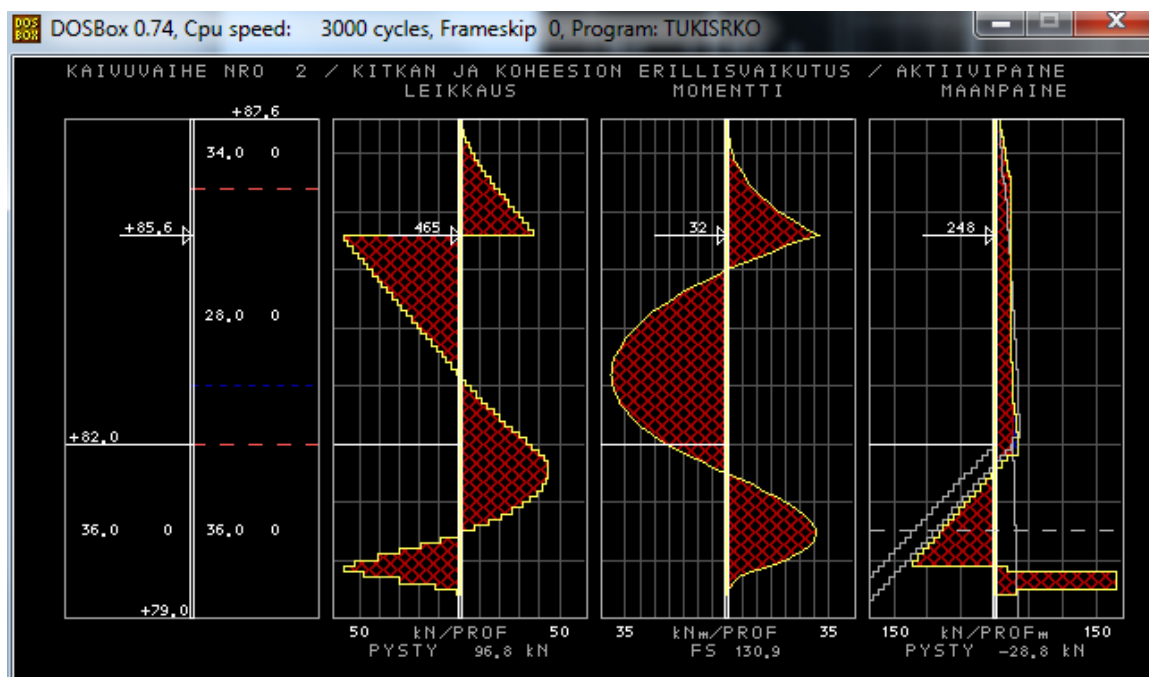
- seinään kohdistuvat paineet (asteikko on kNm/profiili)

- klassinen maanpaine (ohut valkea viiva)
- tukien kohdilla on esitetty esijännitysvoiman vaakasuora komponentti (kN/ankkuri).

Voimakuvioden alapuolelle tulostuu lisäksi pystystabiliteettiin vaikuttavat tekijät. Leikkausvoimakuvion alle tulostuu ankurivoimien pystykomponentti, momenttikuvion alle kaavatekijä F_s ja maanpaine kuvion alle maanpaineen pystykomponentti. Näitä tekijöitä voi käyttää pystystabiliteetin tarkastelussa.



Kuva 36. Ensimmäisen kaivuvaiheen tulokset



Kuva 37. Toisen kaivuvaiheen tulokset

5.4 Laskennan tulokset

Taulukko 5. Kootut tulokset, pontin alaosa tuettuna kallioon kalliotapilla

Ohjelma	Ankkurivoima [kN]	Kalliotapin leikkausvoima [kN]	Taivutusmomentti [kNm]	Suurin siirtymä [mm]
Fulgeo	590	42	32	—
GeoCalc (MCM)	553	75	70	38
GeoCalc (DCM)	556	84	66	31

Taulukko 6. Kootut tulokset, pontin alaosa tuettuna maanvaraisesti tiiviiseen hiekkakerrokseen

Ohjelma	Ankkurivoima [kN]	Taivutusmomentti [kNm]	Suurin siirtymä [mm]
Fulgeo	658	38	—
GeoCalc (MCM)	691	102	23
GeoCalc (DCM)	658	96	20

Fulgeo esittää kuvaajissaan ankkurivoiman vaakakomponentin. GeoCalc puolestaan esittää ankkurivoiman ankkurin suuntaisena eli 45° kulmassa. Jotta ankkurivoimia voidaan verrata suoraan ohjelmien välillä kuten yllä olevissa taulukoissa, täytyy Fulgeon ankkurivoima kertoa $\sqrt{2}$.

5.5 Tulosten arviointi

Kuten tuloksista voi nähdä GeoCalc antaa Fulgeoa suurempia momenteja tukiseinälle ja leikkausvoimia kalliotapille. Ankkurivoimat vastaavat lähes toisiaan molemmissa ohjelmissa. Fulgeo ei osaa laskea RKO-menetelmällä siirtymiä eikä tästä johtuvaa maanpaineen mobilisoitumista. Tämä aiheuttaa teräsponttiseinälle pienemmän momentin Fulgeossa, mikä selittää myös pienemmän kalliotapin leikkausvoiman. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että GeoCalcilla mitoittaessa tarvitaan jäykempi, suuremman taivutusvastuksen omaava teräsponttiprofiili ja paksumpi kalliotappi. GeoCalcin tuloksien arvioitiin vastaavan paremmin todellista tilannetta.

GeoCalcin molemmilla jousimalleilla saatiin toisiaan vastaavia tuloksia. Kirjallisuudessa on annettu moduuliperusteisen mallin moduuliluvuille tarkempia vaihteluvälejä, joita voidaan arvioida kairausvastusten perusteella (liite 3). Tästä johtuen moduuliperusteisella mallilla pystytään arvioimaan tarkemmin maalajien todellista käyttäytymistä. Siirtymäperusteisen mallin maanpaineen kehittymiseksi tarvitseman siirtymän arvot eivät ole niin tarkat (liite 4). Käytännössä tämä tarkoittaa, että moduuliperusteista mallia käytettäessä arvoja ei tarvitse arvioida niin karkeasti ja virheiden mahdollisuus vähenee.

5.6 Käytettävyyden arviointi

GeoCalcilla tehtyjen laskentojen tulokuvaajat ovat selkeitä ja niitä on helppo tarkastella. Tulosten muuttumista voi seurata kaivussyvyyden mukaan mikä helpottaa tulosten tulkintaa. Toisaalta GeoCalcin arvojen syöttäminen on työlästä ja pienetkin virheet voivat johtaa väärin tuloksiin. Koska muutettavia arvoja on paljon jokin arvo voi helposti jäädä syöttämättä tai muuttamatta. Varsinkin tasojen syöttämisessä tulee olla hyvin tarkka, sillä ohjelmaan ei syötetä korkotasoja vaan etäisyys metreinä maan pinnasta.

GeoCalcin käyttöä haittaavat melko yleiset iterointiongelmat laskennoissa. Ongelmia esiintyy varsinkin silloin kun käyttäjä valitsee ankkurin esijännitysvoiman tai ankkurin jäykkyyden liian suureksi. Tämä näkyy esimerkiksi ankkurivoiman rajuna vaihteluna tai siirtymäkuvaajan heilumisena liikutellessa kaivantotason valitsinta tulostähtäyksessä. Ongelman voi välttää aloittamalla laskennan pienemmillä ankkurin esijännitysvoimilla ja pienentämällä ankkurin jäykkyyttä. GeoCalc varoittaa kaikista iterointivirheistä laskennan jälkeen, mutta iterointivirheilmoitukset ovat yleisiä. Tästä syystä voi olla välillä vaikea tietää mitkä virheilmoituksista ovat merkityksellisiä ja mitkä voi jättää huomioimatta.

Toinen iterointiin liittyvä ongelma esiintyy harvemmin ja on vaikeammin todettavissa. Joskus ohjelma näyttää tukiseinän kaatuvan ilman näkyvää syytä. Esimerkiksi jollain tietyllä pontin upotussyvyydellä tukiseinä kaatu, mutta heti kun syvyyttä vaihtaa 0,2m johonkin suuntaan pysyy pontti pystyssä. Tähän voi auttaa laskentaelementtien tai iterointikertojen lisääminen mutta helpoiten ongelman voi todeta muuttamalla jotain laskennan arvoa. Ongelma on siitä ikävä, ettei käyttäjä välttämättä huomaa tapahtunutta ja voi ylimitoittaa tukiseinän. Kokeilemalla voi huomata tukiseinän pysyvän pystyssä esimerkiksi vielä metriä pienemmällä upotussyvyydellä.

GeoCalc vaatii huomattavasti enemmän lähtötietoja kuin Fulgeo. Tästä syystä GeoCalcin laskentatulokset ovat tarkempia kuin Fulgeon. GeoCalciin maalajien lähtötiedot voidaan ottaa taulukoista tai maanäytteille tehdyistä laboratorio tutkimuksista. GeoCalc on huomattavasti Fulgeoa mukavampi käyttää. Ohjelman ulkoasu on selkeä ja helposti ymmärrettävä. GeoCalcin nykyaikaisen käyttöliittymän avulla käyttäjän on helpompaa hallita suuria lähtötietojen määriä. Fulgeon pelkkiin näppäimistön komentoihin rajoittunut käyttöliittymä muodostuu ongelmaksi, kun tietoja pitää syöttää paljon. Lisäksi Fulgeon varoitukset puuttuvista arvoista ovat epäselviä ja oikean kohdan etsiminen vie aikaa. GeoCalcissa tämä on hoidettu punaisella merkillä, joka ilmaisee virheellisen kohdan.

Opinnäytetyön lisäksi tein Pöyrylle GeoCalcin käytöstä tiivistetyn ohjeen, johon kokosin eri lähteiden taulukot, käytettävät parametrit ja niiden selitykset. Ohjeelle oli tarvetta, sillä GeoCalcin omasta ohjeistuksesta ei löydy taulukoita, eikä asioita käsitellä välttämättä tukiseinälaskennan kannalta loogisessa järjestyksessä. Lisäksi ohjeeseen tuli huomioita omista ja muiden käyttökokemuksista, sekä arvoista joita laskennassa tulisi käyttää.

6 ESIMERKKI TERÄSPONTTISEINÄN RAKENTEELLISESTA MITOITUKSESTA

Esimerkki on tehty eurokoodin ohjeiden mukaisesti. Käytetään GeoCalcilla (MCM) lasketun kallioon kalliotapilla tuetun teräsponttiseinän tuloksia lähtötietoina. Laskenta on suoritettu molemmilla kuormitusyhdistelmillä. Kuormitusyhdistelmässä 6.10a laskenta tehdään ilman muuttuvaa kuormaa ja kuormitusyhdistelmässä 6.10b laskentaan otetaan mukaan muuttuva kuorma.

Laskussa käytetty muuttuva pintakuorma:

$$q = 20 \text{ kPa} \times (\gamma_Q/\gamma_G) = 20 \times (1,5/1,15) = 26 \text{ kPa}$$

Taulukko 7. Kallioon tuetun teräsponttiseinän tulokset

Kuormitusyhdistelmä	Ankkurivoima [kN]	Kalliotapin leikkausvoima [kN]	Taivutusmomentti [kNm]	Suurin siirtymä [mm]
6.10a	318	59	40	11
6.10b	553	75	70	38

Mitoitus tehdään Eurokoodin mukaisesti mitoitusstavalla DA2*, A1+M1+R2

Geotekninen luokka GL2

Seuraamusluokka CC2

Luotettavuusluokka RC2

Työnaikainen rakenne

Pontin taivutusmomentti:

$$6.10a: \quad M_{sd} = 1.0 \times 1.35 \times 40 \text{ kNm} = 54 \text{ kNm}$$

$$6.10b: \quad M_{sd} = 1.0 \times 1.15 \times 70 \text{ kNm} = \mathbf{81 \text{ kNm}}$$

Ankkurivoima (ankkurijako k/k 4,8m):

$$6.10a: \quad P_{mit} = 1.0 \times 1.35 \times 318 \text{ kN} = 430 \text{ kN}$$

$$6.10b: \quad P_{mit} = 1.0 \times 1.15 \times 554 \text{ kN} = \mathbf{638 \text{ kN}}$$

Kalliotapin leikkausvoima:

$$6.10a: \quad N_d = 1.0 \times 1.35 \times 59 \text{ kN} = 80 \text{ kN}$$

$$6.10b: \quad N_d = 1.0 \times 1.15 \times 75 \text{ kN} = \mathbf{87 \text{ kN}}$$

Pontin mitoitus, RIL 263–2014, 6.3.5:

Mitoitusehto $M_{sd} \times \gamma_M < M_{rd}$ (γ_M = mallikerroin = 1,15 työnaikaiselle rakenteelle)

$$M_{sd} \times \gamma_M = 81 \text{ kNm} \times 1.15 = 94 \text{ kNm}$$

$$M_{rd} = \beta_B \times W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0} [\text{kNm}] \geq 94 \text{ kNm}$$

$$W_{pl} \geq (M_{sd} \times \gamma_M) / (\beta_B \times f_d / \gamma_{M0}) \geq 94 \times 10^6 \text{ Nmm/jm} / (1.0 \times 355 \text{ N/mm}^2 / 1.0) \geq 265 \text{ cm}^3/\text{jm}$$

Pontti Larssen 603 ($W_{pl} = 1200 \text{ cm}^3/\text{jm}$) $\Rightarrow W_{pl} = 1200 \text{ cm}^3/\text{jm}$ OK

Juuritappi RIL 263–2014, 6.3.8:

Mitoitusehto $M_{sd} < M_{rd}$

$$M_{sd} = N_{sd} \times e \times \gamma_M$$

$e = 0,1 \text{ m}$ pontin etäisyys kalliosta

$\gamma_M = 1.15$ mallikerroin (työnaikainen)

$N_{sd} = N_d \times s$ mitoituskuorma tappia kohden

$s =$ tappien väli

$$M_{sd} = 87 \text{ kN/m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 1.15 = 12 \text{ kNm}$$

$$M_{rd} = W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0}$$

$$W_{pl} = 1.7 \times W_{el}$$

$$W_{el} = \pi \times d^3 / 32$$

Kokeillaan terästappeja $\varnothing 70$ (S355). k/k 1,2 m

$$M_{rd} = (1.7 \times \pi \times 70^3 / 32) \times 355 / 1.0 = 20,3 \text{ kNm} > M_{sd} \Rightarrow \text{OK}$$

$$\text{Tapin plastinen leikkauskestävyys } V_{pl,Rd} = (A_v f_y) / (\gamma_{M0} \sqrt{3}) = (\pi \times 35,0^2 \times 355) / (1.0 \times \sqrt{3}) = 788 \text{ kN}$$

Leikkausvoima on alle puolet plastisesta leikkauskestävyydestä, leikkausvoiman vaikutusta taivutuskestävyyteen ei tarvitse ottaa huomioon.

Kallioankkurit, RIL 263–2014, 6.3.1-2:

$$P_{koe} = P_{mit} \times \gamma_{a,t} = 638 \text{ kN} \times 1,25 = 798 \text{ kN}$$

$$P_{jät} = P_{mit} \times 0,8 = 638 \text{ kN} \times 0,8 = 511 \text{ kN}$$

Tukipalkki, RIL 263–2014, 6.3.6:

Mitoitusehto $M_{rd} > M_{pd}$

$$M_{rd} = W_{pl} \times f_d / \gamma_{M0}$$

Mitoittava kenttämomentti:

$$M_{pd}^1 = k \times (q \times \gamma_M) \times l^2$$

$M_{pd}^1 =$ palkkiin kohdistuva mitoittava kenttämomentti

$k =$ aukkojen määrästä ja sijainnista määräytyvä kerroin

(yksiaukkoisen vapaasti päistää tuetun palkin kerroin $k = 0.125$)

$q =$ palkkiin kohdistuva vaakasuuntainen kuormitus

$\gamma_M =$ kuorman mallikerroin (työnaikainen tilanne $\gamma_M = 1.15$)

$l =$ tukipisteiden välinen etäisyys

Tukitaso, tuentaväli k/k 4,8 m:

$$M_{pd}^1 = 0.125 \times (638/4,8) \text{ kN/jm} \times 1.15 \times 4.8^2 \text{ m}^2 = 441 \text{ kNm}$$

$$W_{pl} \geq M_{pd}^1 / (f_d / \gamma_{M0}) = 441 \times 10^6 \text{ Nmm/jm} / (355 \text{ N/mm}^2 / 1.0) = 1243 \text{ cm}^3.$$

valitaan vaakapalkiksi HEB300 ($W_{pl} = 1869 \text{ cm}^3$)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli arvioida kuinka GeoCalc soveltuisi Kuopion Pöyryn infrayksikön käyttöön. Lopputuloksena voidaan todeta, että GeoCalc on käyttökelpoinen ohjelma. GeoCalcin siirtymien arviointi on hyödyllinen työkalu siirtymille herkkien kohteiden suunnitteluun. Lisäksi kohteen suunnitelmia voidaan havainnollistaa jo aikaisessa vaiheessa GeoCalcin automaattisesti piirtämällä leikkauskuva. Puutteistaan huolimatta Fulgeoa on käytetty suunnittelun apuna jo pidemmän aikaa ja tuloksina on saatu toimivia tukiseinäratkaisuja. Fulgeolla on helppo ja nopea tehdä laskelmia, mutta ohjelman käyttöä vaikeuttaa se, että tulosten esittäminen on työlästä. Kuvaajien ja lähtötietojen siirtäminen tekstinkäsittelyohjelmaan ja muokkaaminen vie paljon aikaa.

Jatkotutkimuksena voisi GeoCalcin tuloksia verrata elementtimenetelmään perustuviin Plaxis 3D- ja Rocscience RS³-ohjelmiin. Myös laskettujen siirtymien vertaaminen toteutettujen tukiseinien mitattuihin siirtymiin olisi hyödyllistä. Näin voitaisiin todentaa tulosten paikkaansapitävyys. Toinen hyvä tutkimuskohde olisi kaikkien maaparametrien arvojen selvittäminen laboratoriokokeiden avulla. Näin voitaisiin verrata eroja todellisilla ja arvioiduilla maaparametrien arvoilla tehtyjen laskentojen tuloksissa. Samalla saataisiin tietoa välttyttäisiinkö lisätutkimuksilla ylimitoittamiselta.

Tämä opinnäytetyö on kattava katsaus Fulgeo- ja GeoCalc-ohjelmien tarjoamista hyödyistä tukiseinälaskentaan. Syvällisempään pohdintaan käytettävyydestä GeoCalcin osalta tarvittaisiin pidempää kokemusta ohjelman käytöstä ja mitoituslaskelmien tekemisestä. Ohjelma on hyvin laaja ja sillä voidaan tehdä monia erilaisia laskelmia, joita kaikkia ei ehdi tämän työn aikana käymään läpi. Toisaalta ohjelman oheismateriaalista löytyy monia hyviä laskentaesimerkkejä.

Yhtenä merkittävänä osa-alueena tässä opinnäytetyössä oli tiivistetyn GeoCalc-ohjeen kokoaminen. Tämän tarkoitus on helpottaa Kuopion Pöyryn infrayksikköä ohjelman käyttöönottamisessa. Ohjetta ei julkaista, sillä se on vielä keskeneräinen ja siihen tulee täydennyksiä käyttäjien palautteen perusteella. Opinnäytetyön alkuperäiseen tavoitteeseen kuului Slide- ja GeoCalc-ohjelmien vertaaminen stabiliteettilaskennassa. Tästä jouduttiin kuitenkin luopumaan opinnäytetyön laajuuden rajaamiseksi. Tähän opinnäytetyöhön olisi ollut hyvä saada vertailukohteeksi myös differenssimenetelmään perustuva versio Fulgeosta, joka olisi mahdollistanut tuloksina saatujen siirtymien arvojen vertailun ohjelmien välillä. Differenssimenetelmään perustuvaa Fulgeoa ei saatu käyttöön tarpeeksi ajoissa opinnäytetyön kannalta. Ohjelmien opettelu ja testaus sujuivat hyvin, mutta vaikeutena oli, ettei Kuopiossa kukaan pystynyt neuvomaan yksityiskohtaisesti GeoCalcin käytössä. Apua sain GeoCalcin käyttöön Pöyryn Oulun geoteknikoilta.

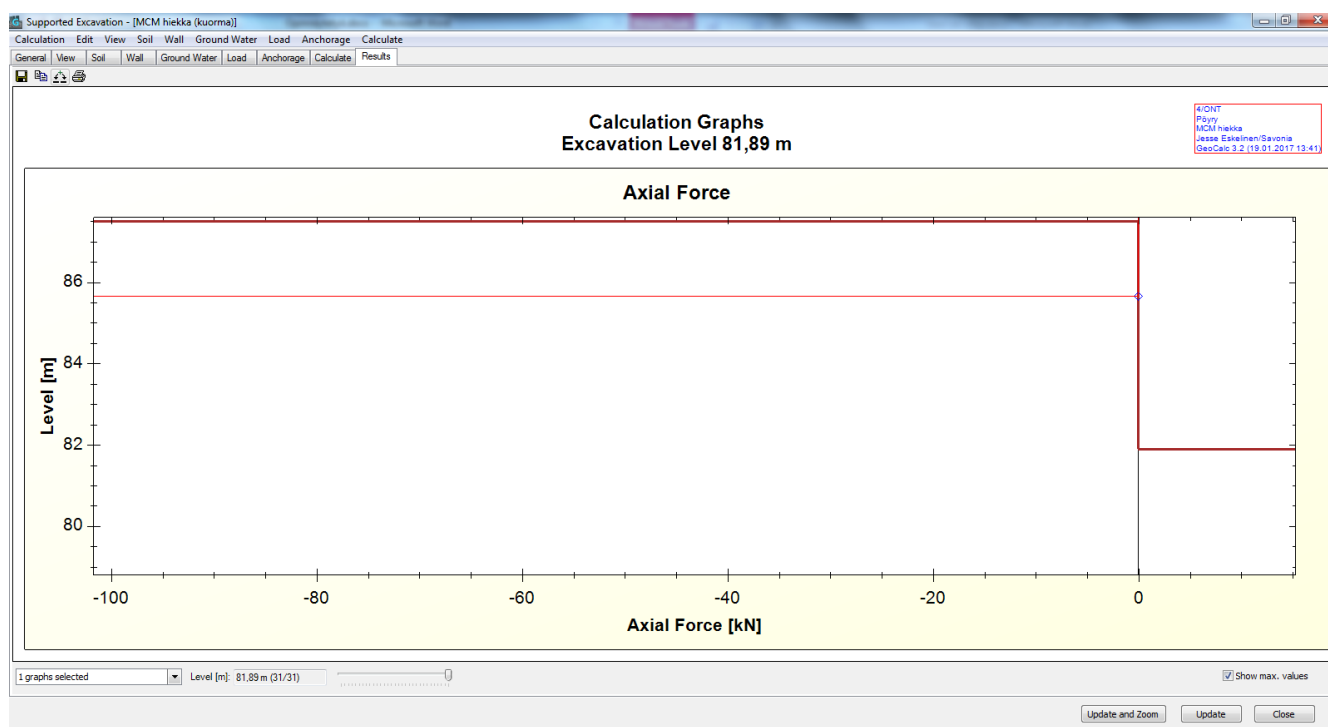
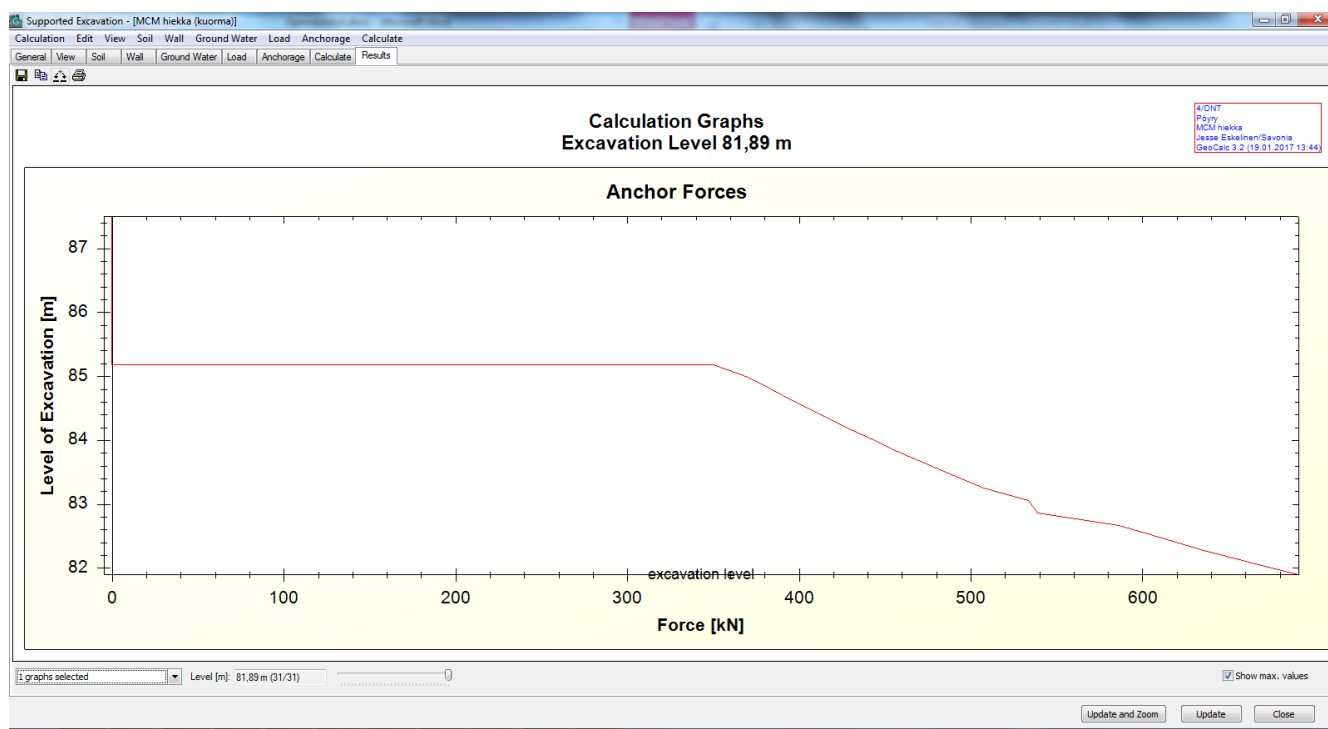
Opinnäytetyötä tehdessäni sain tutustua laajalti eri laskentaohjelmiin. Tämä työ antoi minulle hyvää perustietoa laskentaohjelmien käytöstä ja teräsponttiseinän suunnittelusta. Aihe vastasi hyvin koulutusalani opintoja ja oli ajankohtainen tulevissa työtehtävissäni. Työ antoi myös tietoa ja innostusta geotekniikan jatko-opintoihin. Opinnäytetyö oli haastava, sillä ammattikorkeakoulun geotekniikan opinnot olivat aiheeseen nähden suppeat.

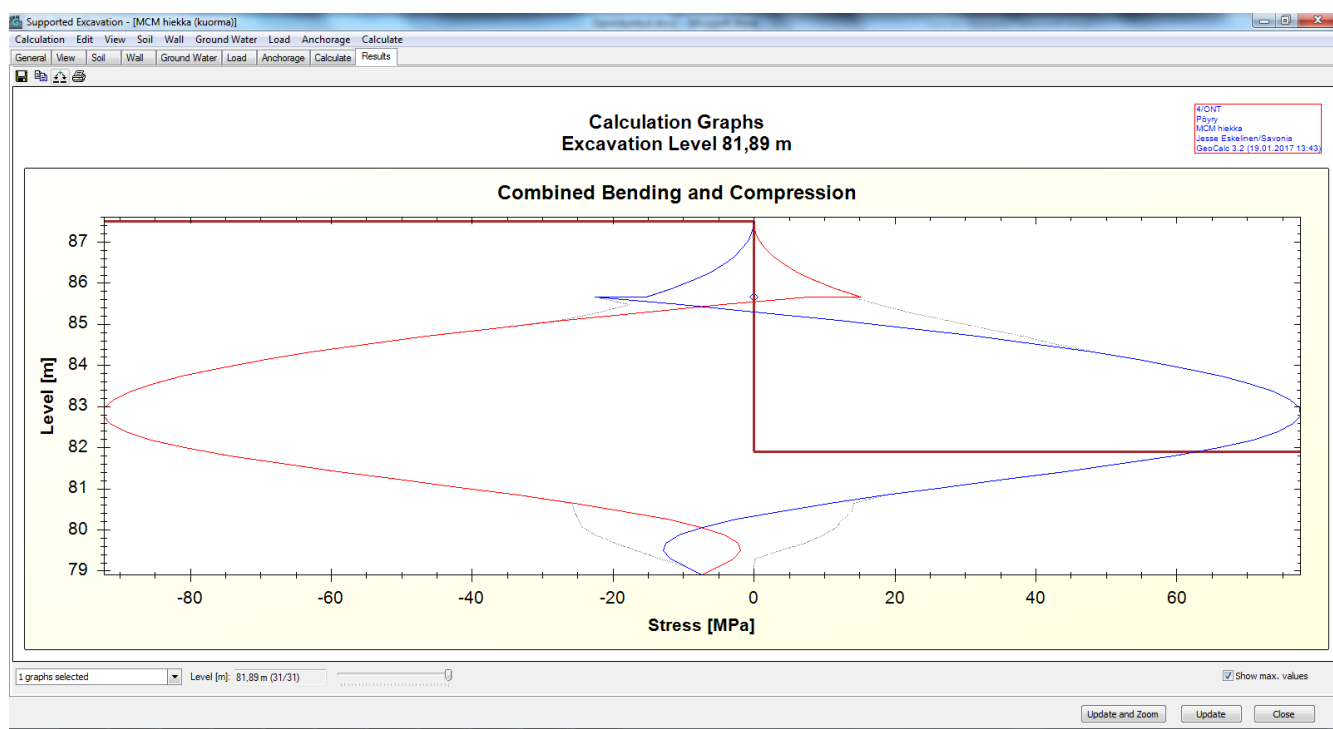
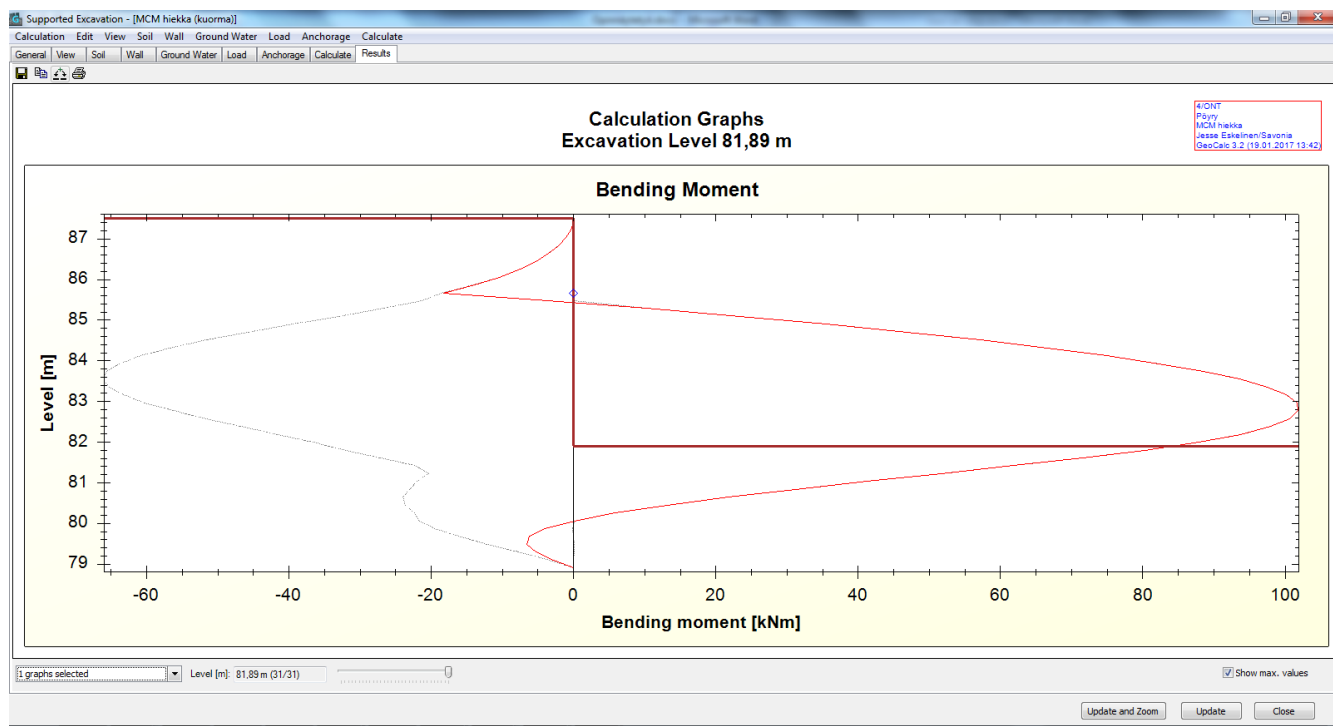
LÄHTEET

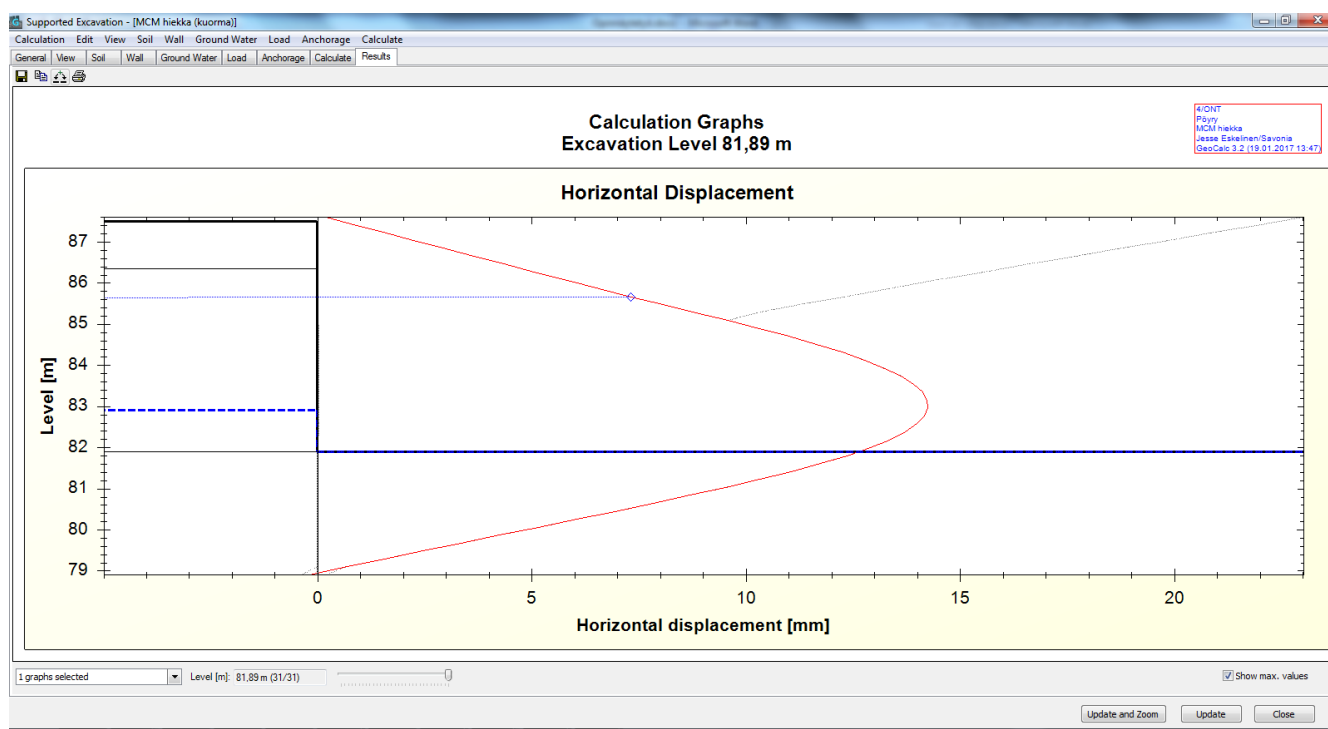
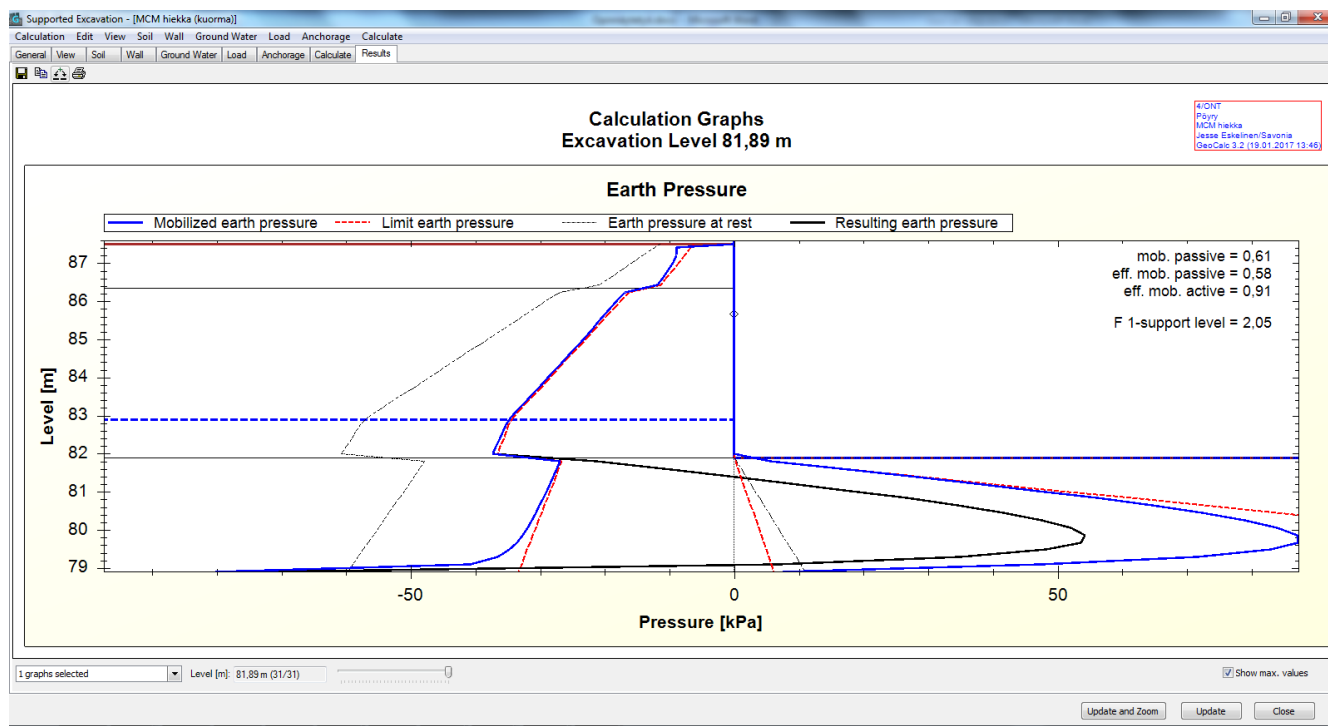
- Fulgeo geotekniset ohjelmat käyttöohje. Tampere: Fulgeo Oy. Ohje yrityksen hallussa.
- Geoala yhdisti osaamisensa ja tarpeensa: Nykyaikainen suunnittelutyökalu geotekniseen laskentaan. [Artikkeli]. Vianova Systems Finland Oy. 2006-05-10. [Viitattu 12.2.2017]. Saatavissa: <http://www.getunderground.fi/web/page.aspx?refid=99&newsid=35499&page=34>
- Geotekninen suunnittelu: RIL 207 - 2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry.
- Juntunen, Ari. 2016. Geoteknikko. Oulu 12.10.2016. Puhelinhaastattelu.
- Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 3. painos. Tampere: Tammertekniikka / AMK-Kustannus.
- Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry.
- Lotvonen, Sakari. 2017. Geoteknikko. Oulu 18.1.2017. Puhelinhaastattelu.
- Länsivaara T. 2012a. Tukiseinä. GeoCalc koulutusmateriaali Powerpoint-diat. Materiaali saatavissa GeoCalc ohjelman mukana.
- Länsivaara T. 2012b. Tukiseinä - erikoistilanteet. GeoCalc koulutusmateriaali Powerpoint-diat. Materiaali saatavissa GeoCalc ohjelman mukana.
- Novapoint GeoCalc peruskäyttöohje. [verkkodokumentti]. Viasys VDC Oy [viitattu 20.11.2016]. Saatavissa: <http://docs.vianova.fi/GeoCalc/3.2/>
- Pohjarakennusohjeet: RIL 121 - 2004. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto ry.
- Pöyryn www-sivu [viitattu 13.2.2017]. Saatavissa: <http://www.poyry.fi/>
- Rantamäki, M. & Tammirinne, M. 1979. Pohjarakennus. 13. painos. Helsinki: Otatieto.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 1979. Geotekniikka. 21. painos. Helsinki: Otatieto.
- Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. [verkkodokumentti]. Tiehallinto. 2001-06-01. [viitattu 23.11.2016]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100002-01i.pdf>
- Tukiseinä käyttöohje. [verkkodokumentti]. Viasys VDC Oy [viitattu 20.11.2016]. Saatavissa: <http://docs.vianova.fi/GeoCalc/3.2/>
- Vianova Systems Finland Oy jakautui kahdeksi yhtiöksi. [Artikkeli]. Viasys VDC Oy. 2016-01-21. [Viitattu 30.12.2016]. Saatavissa: <http://www.viasys.fi/ajankohtaista/jakautuminen/>

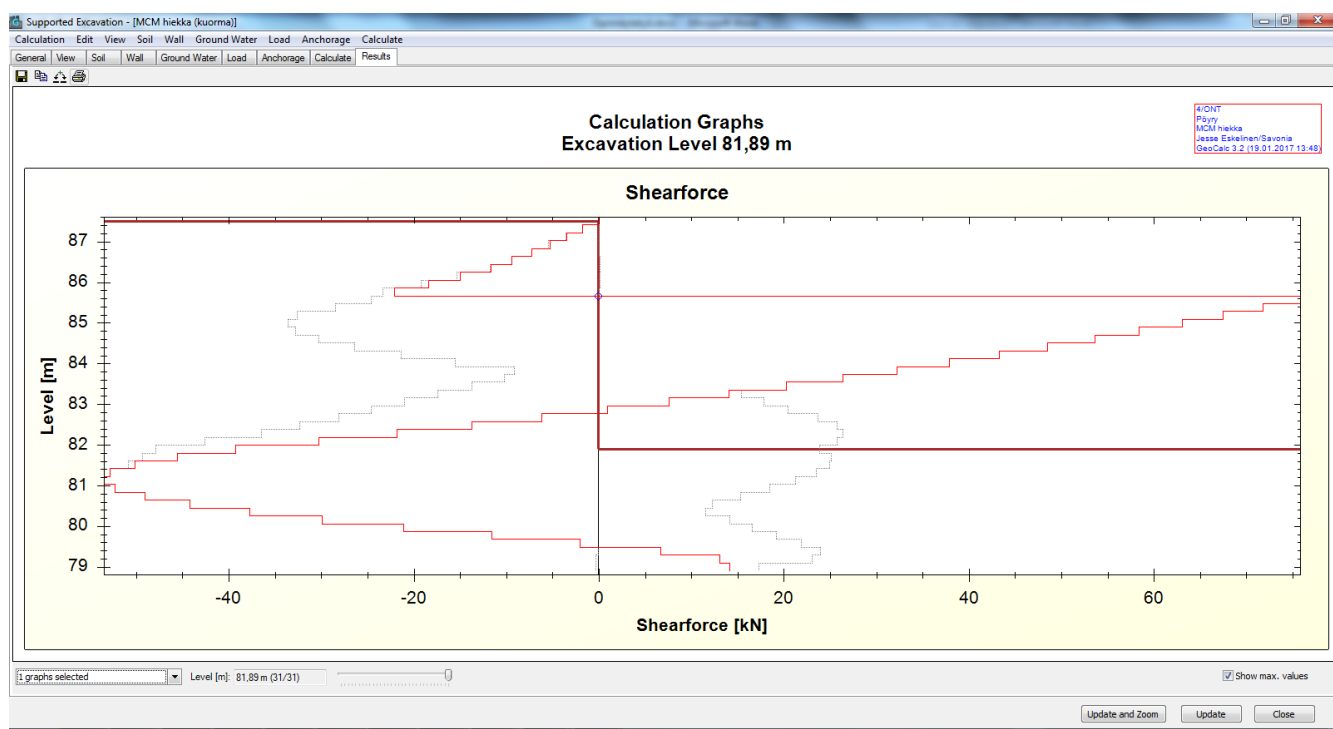
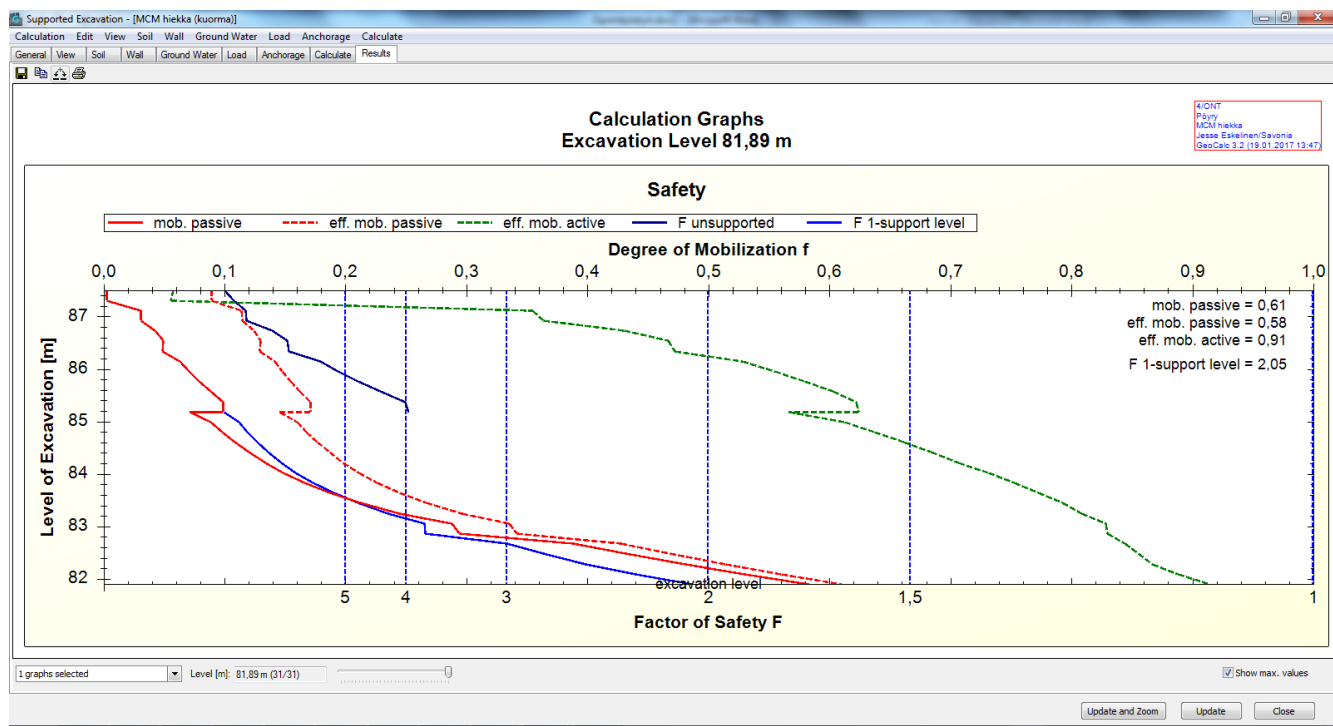
LIITE 1: GEOCALCIN TULOSKUVAAJAT

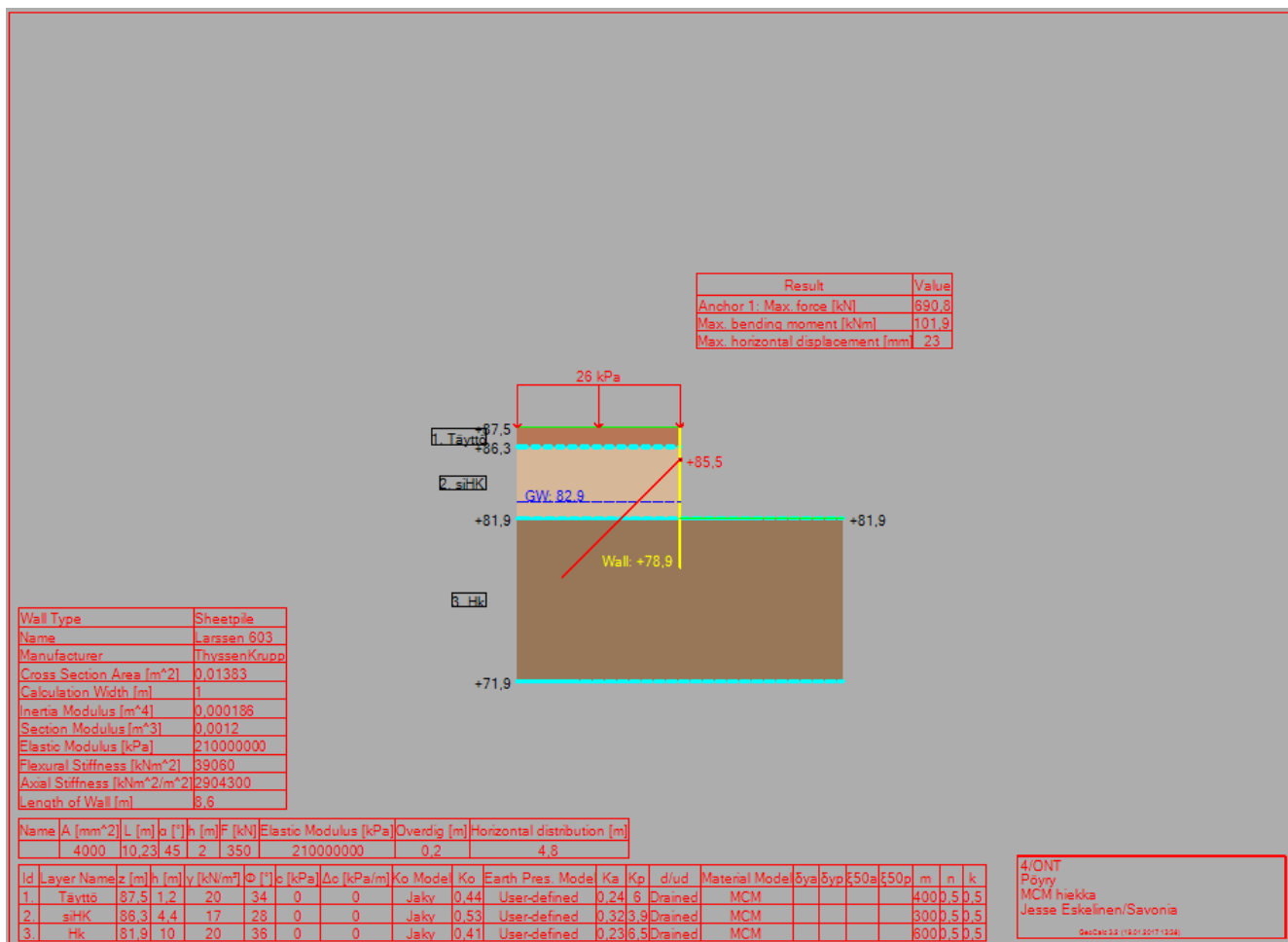
Teräsponttiseinä lyöty tiiviiseen hiekkaan, moduuliperusteinen malli (MCM)



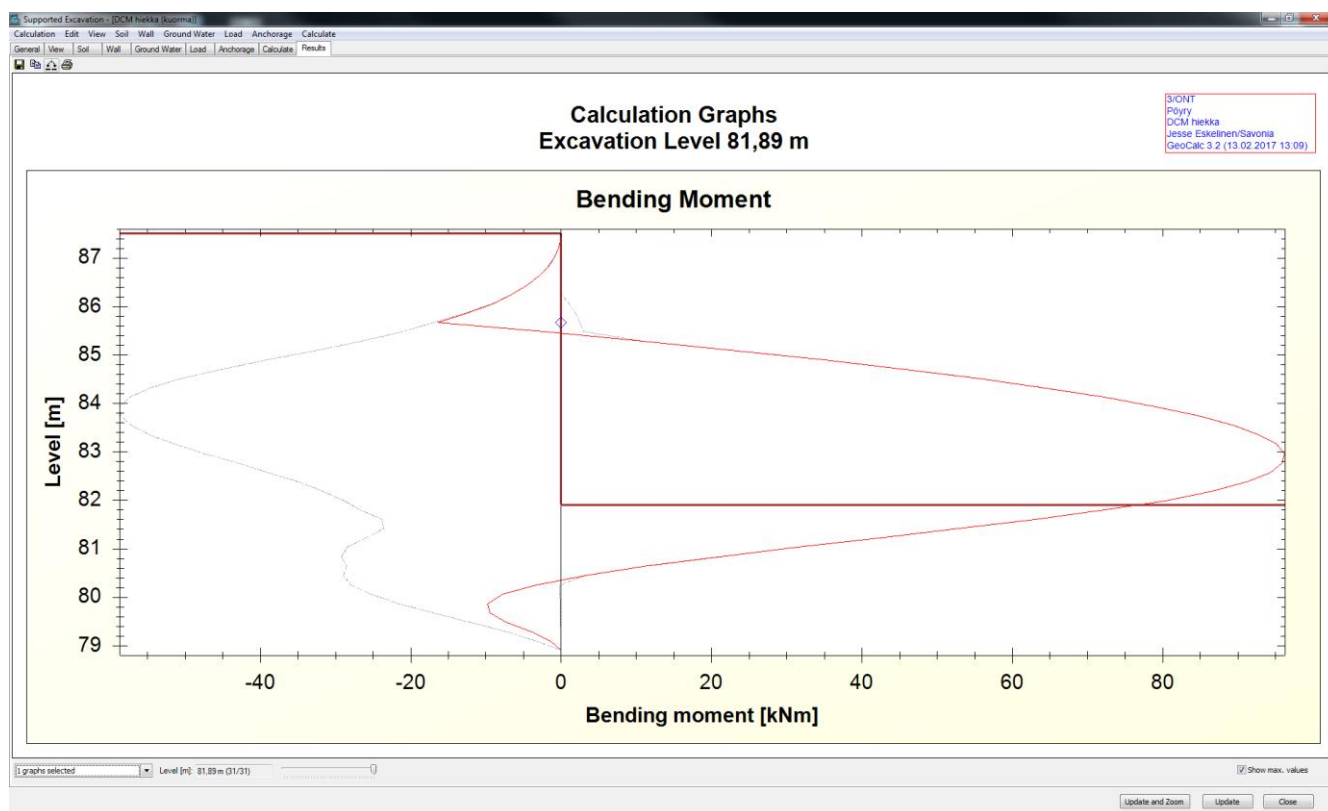
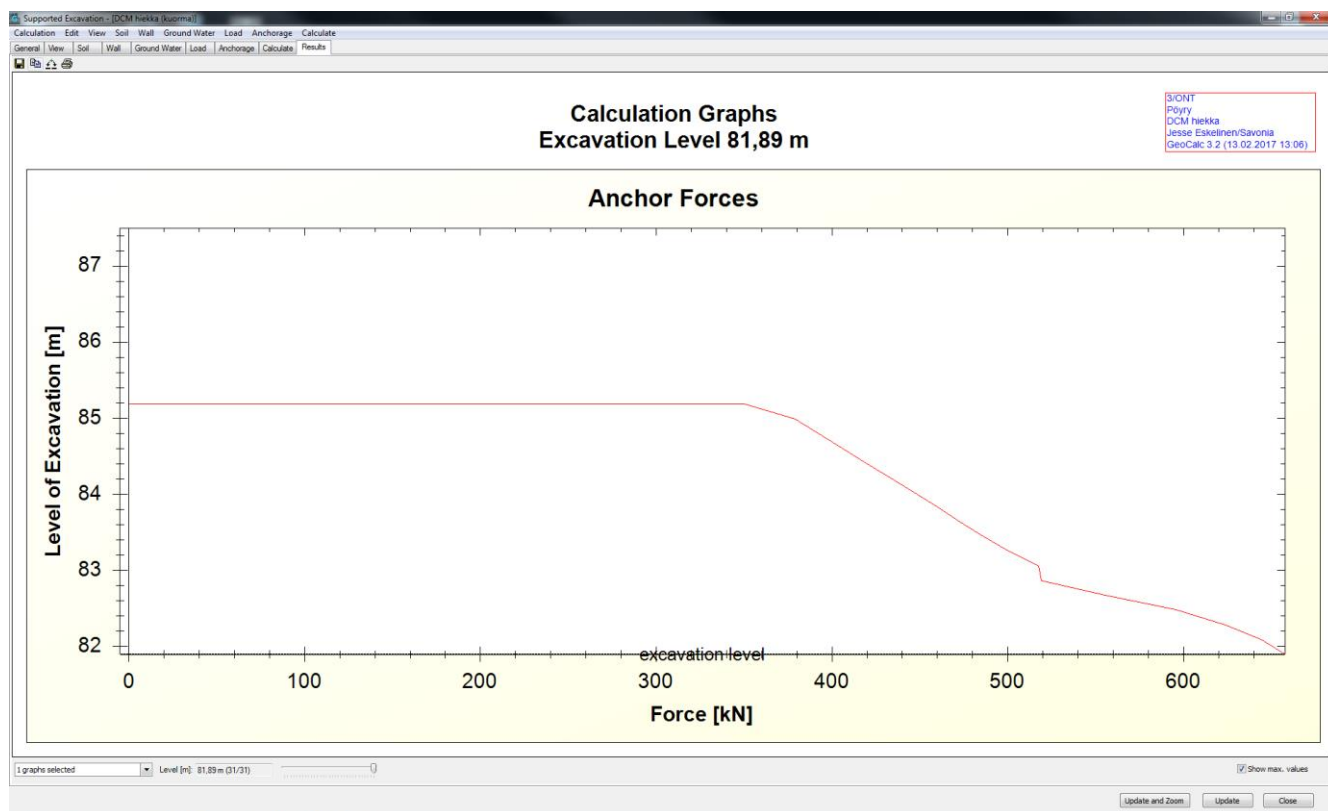


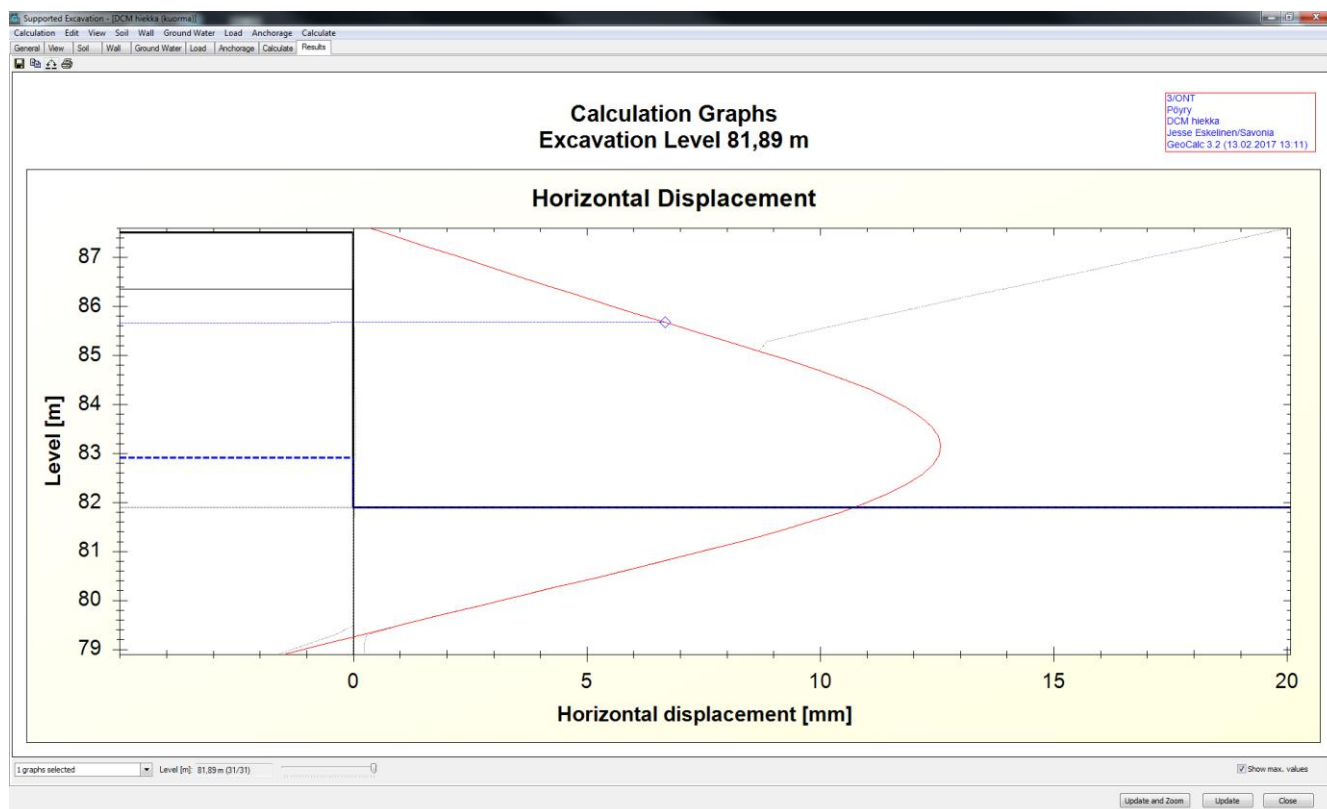
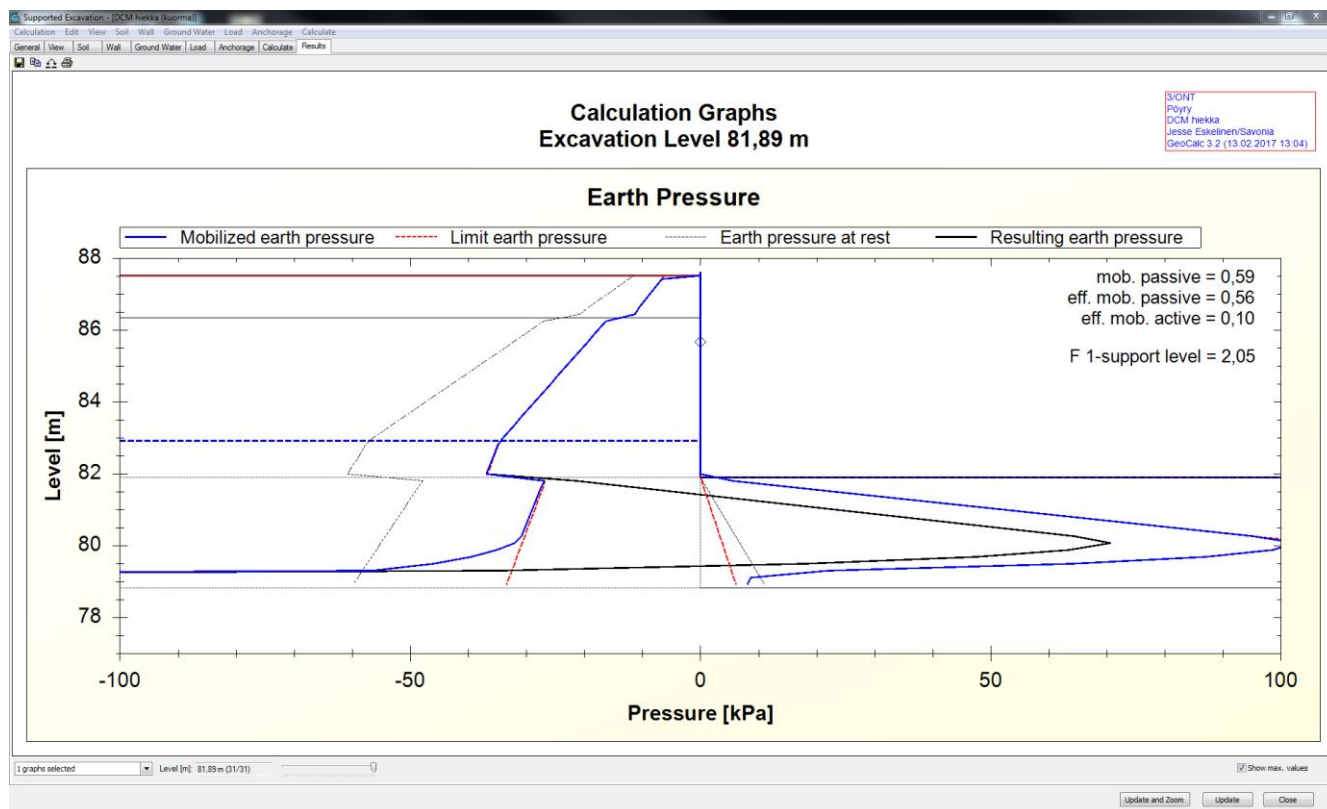




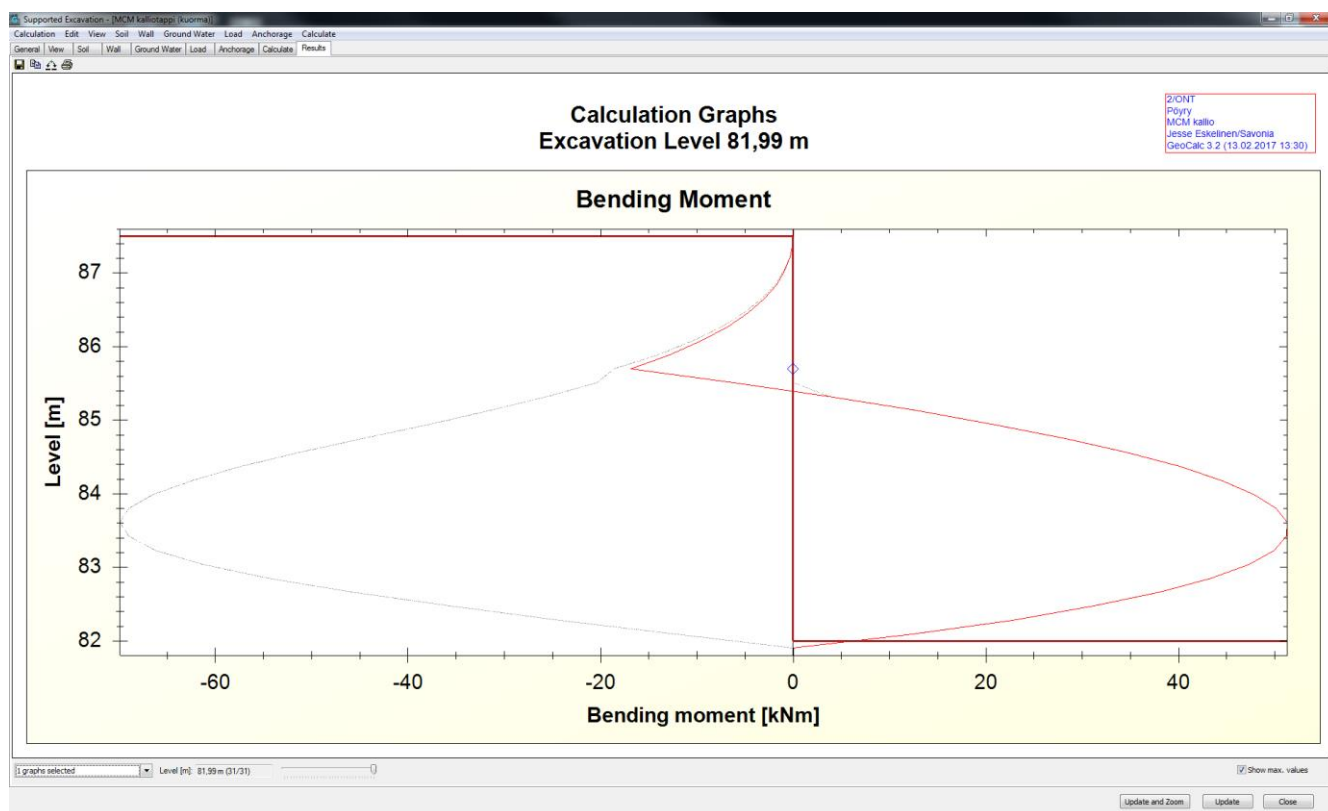
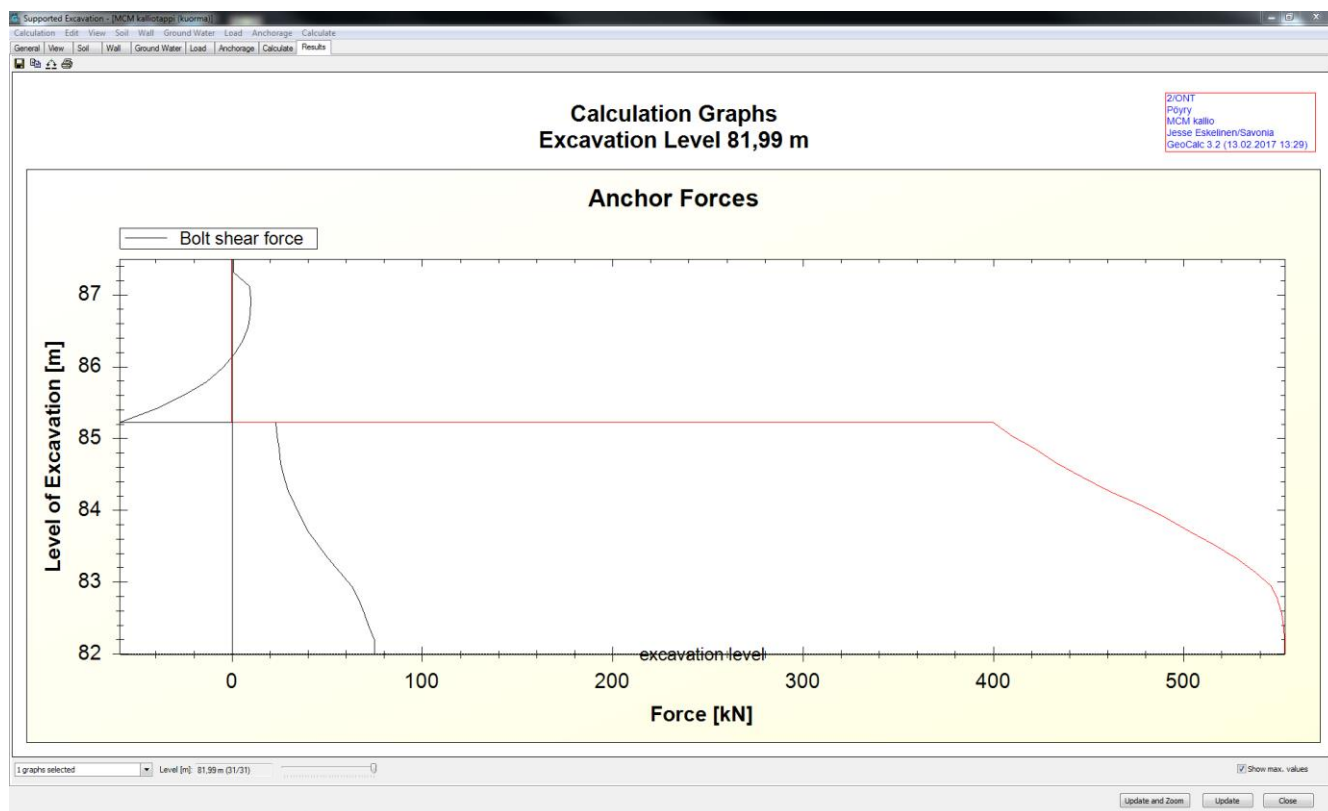


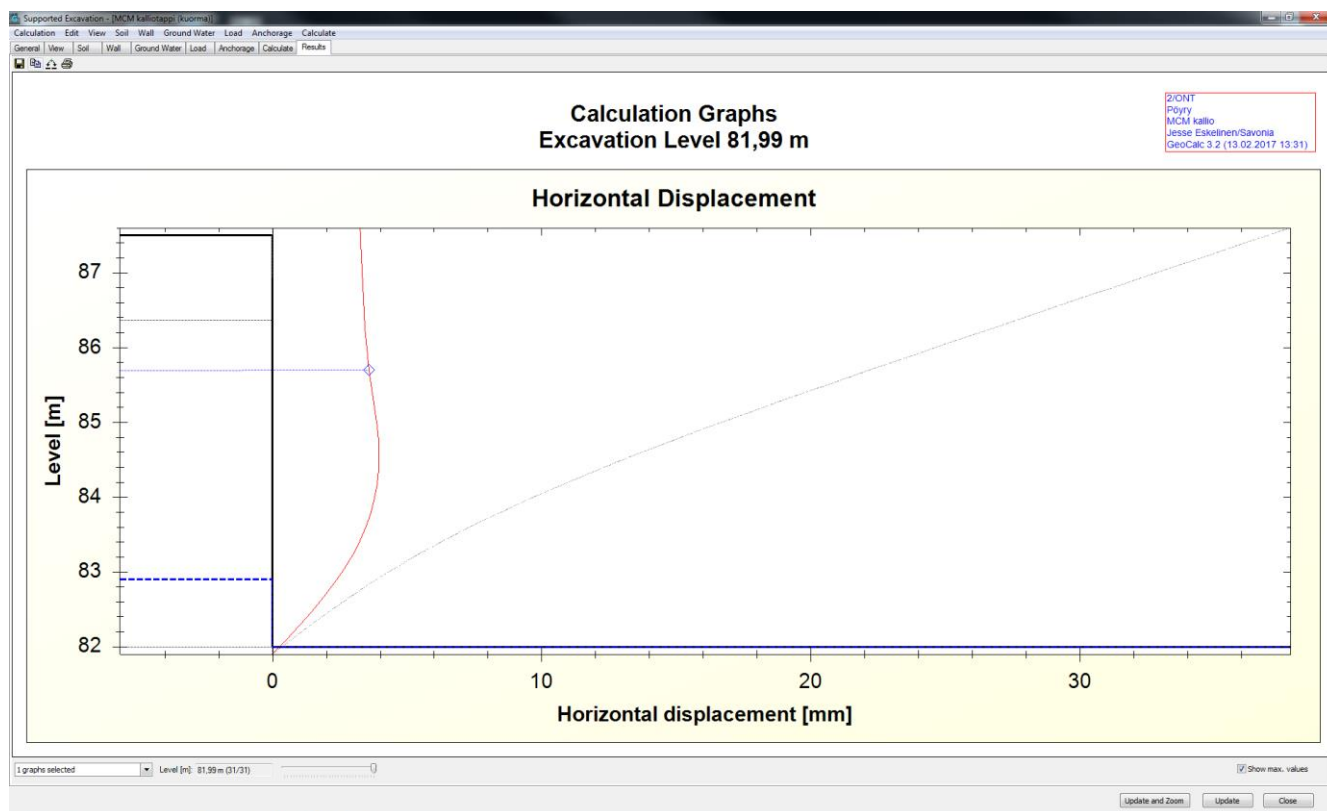
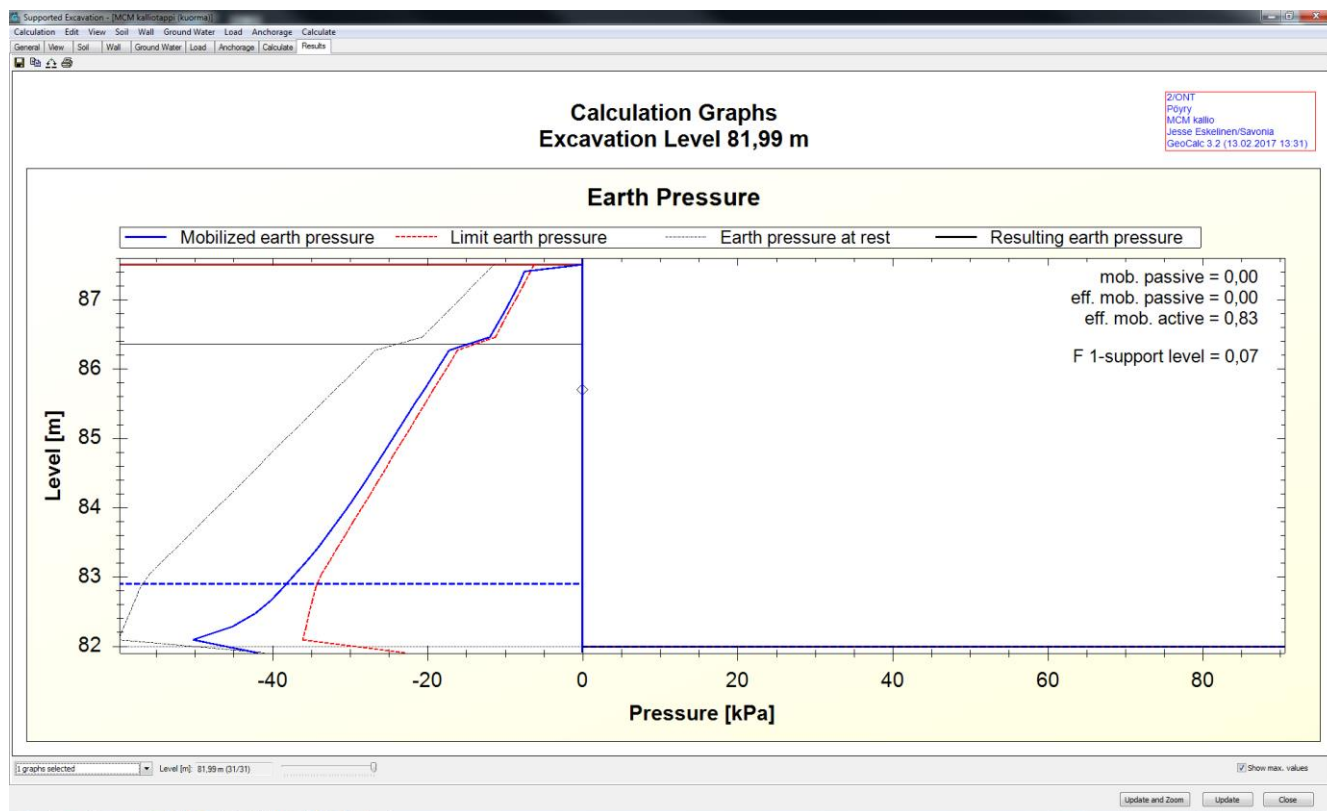
Teräsponttiseinä lyöty tiiviiseen hiekkaan, siirtymäperusteinen malli (DCM)



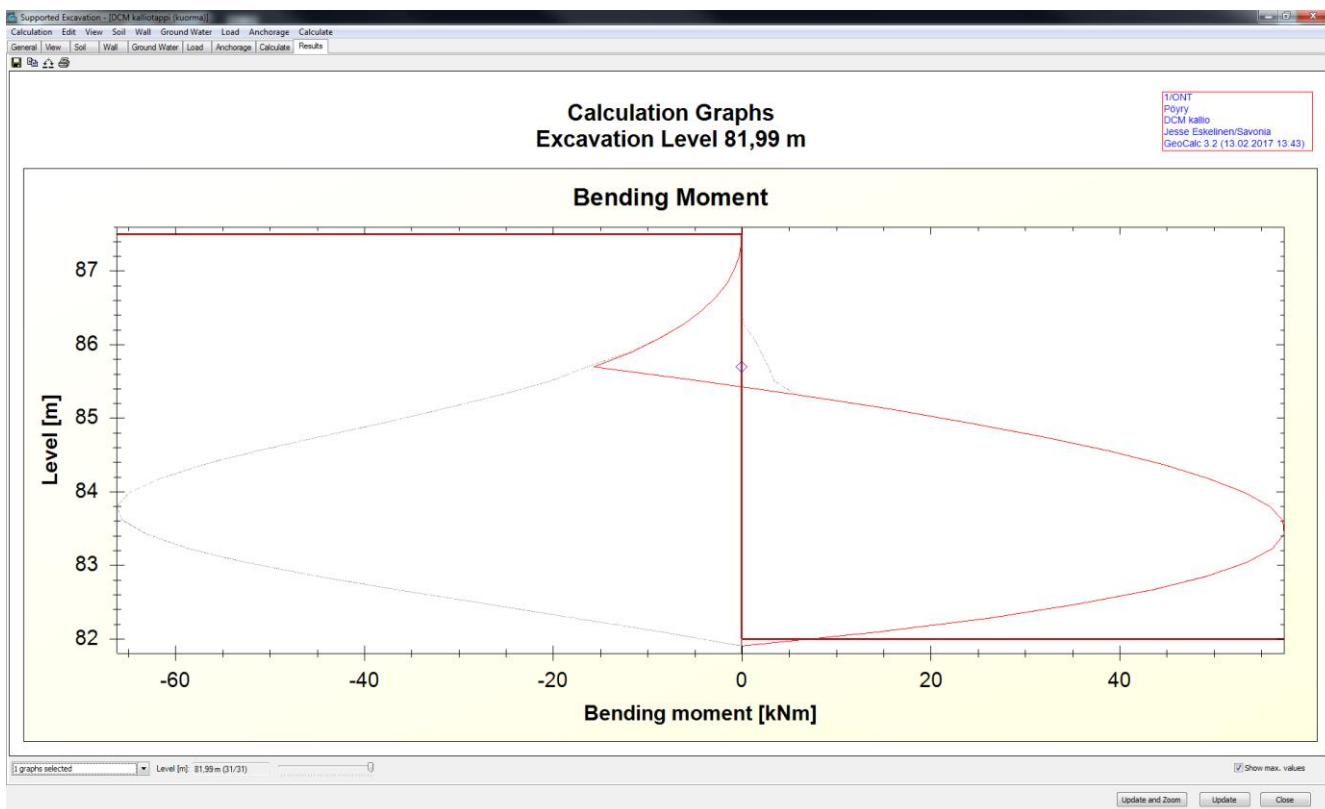
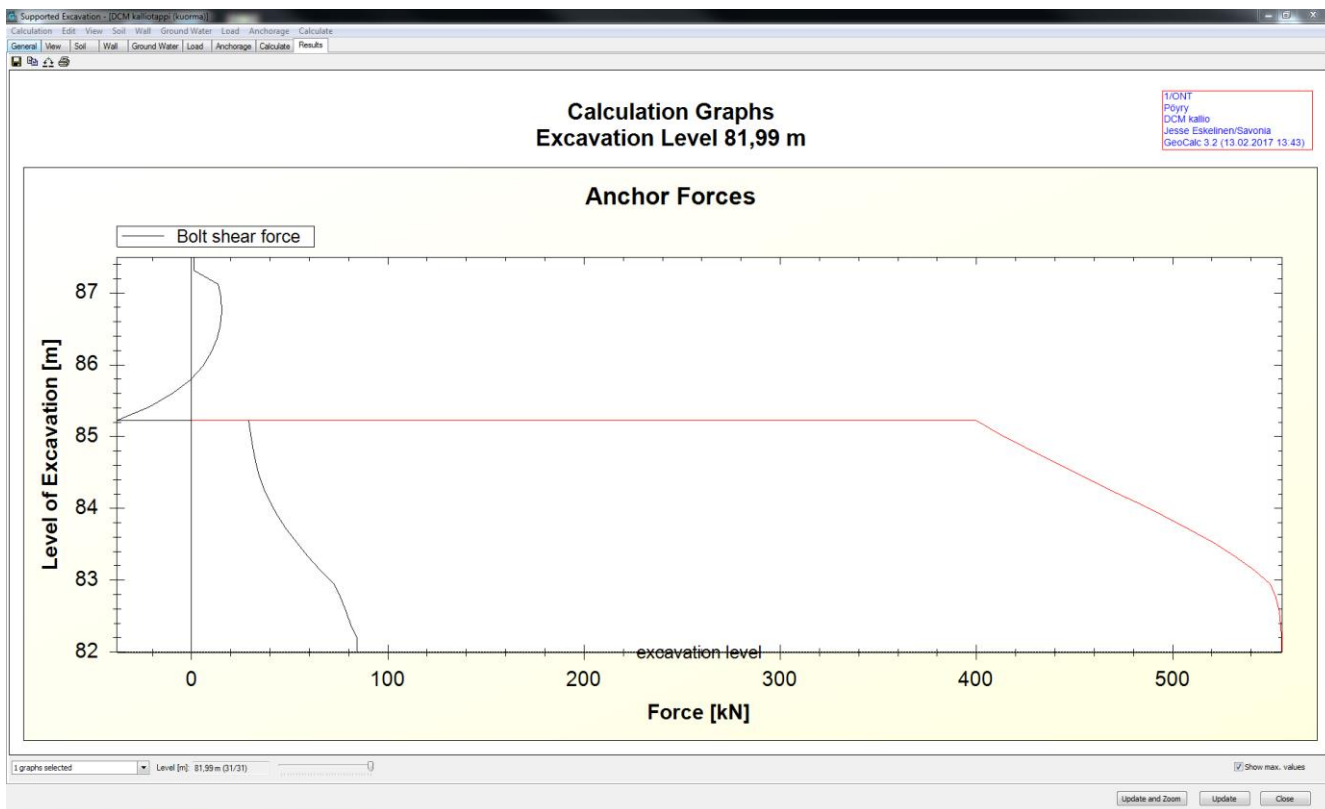


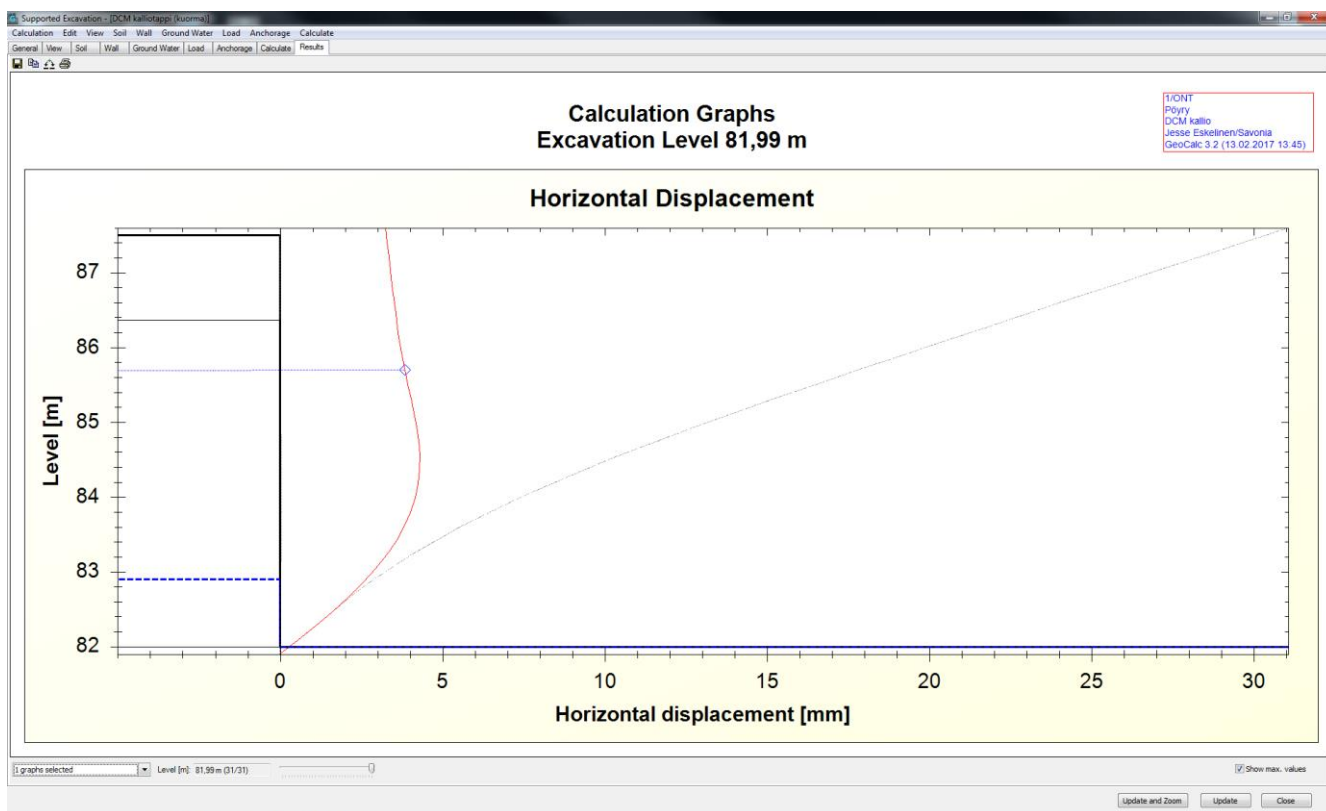
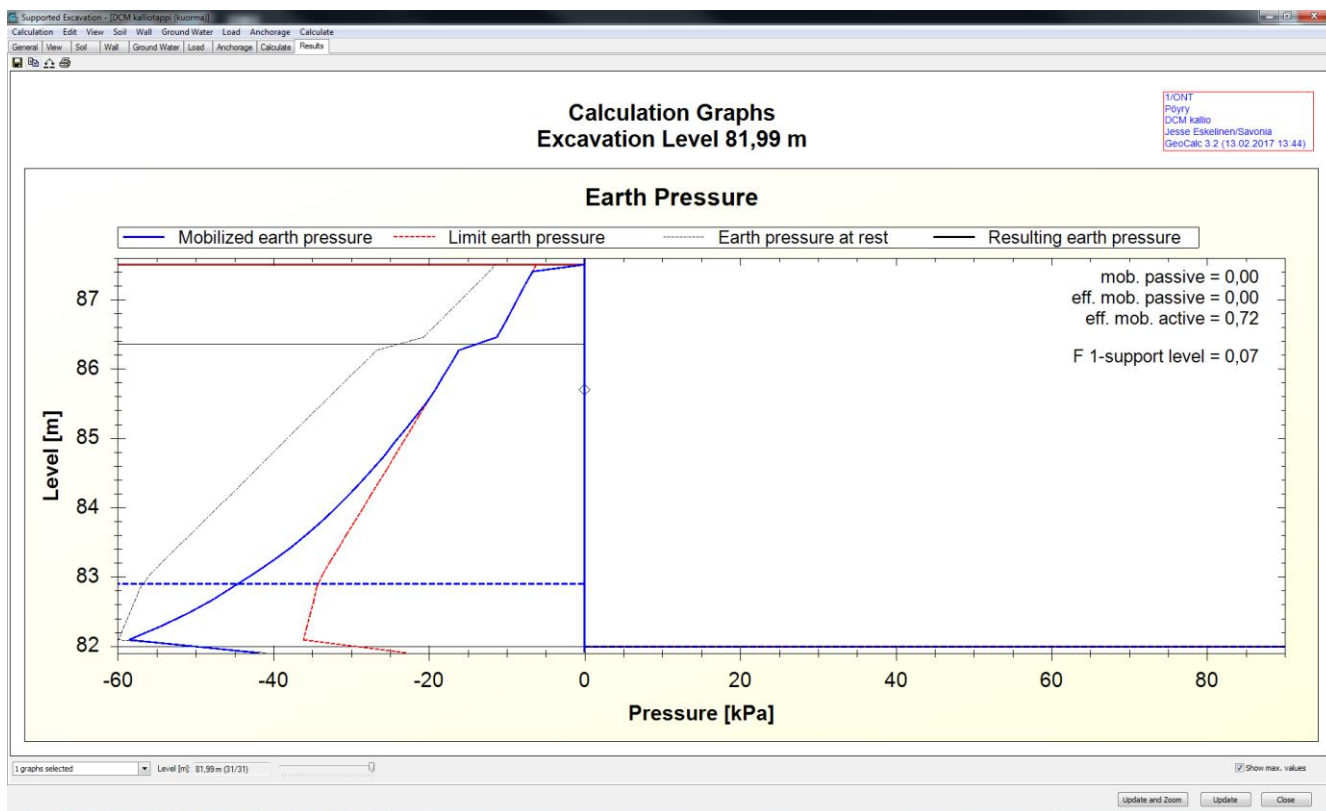
Teräsponttiseinä lyöty kallion pintaan, moduuliperusteinen malli (MCM)





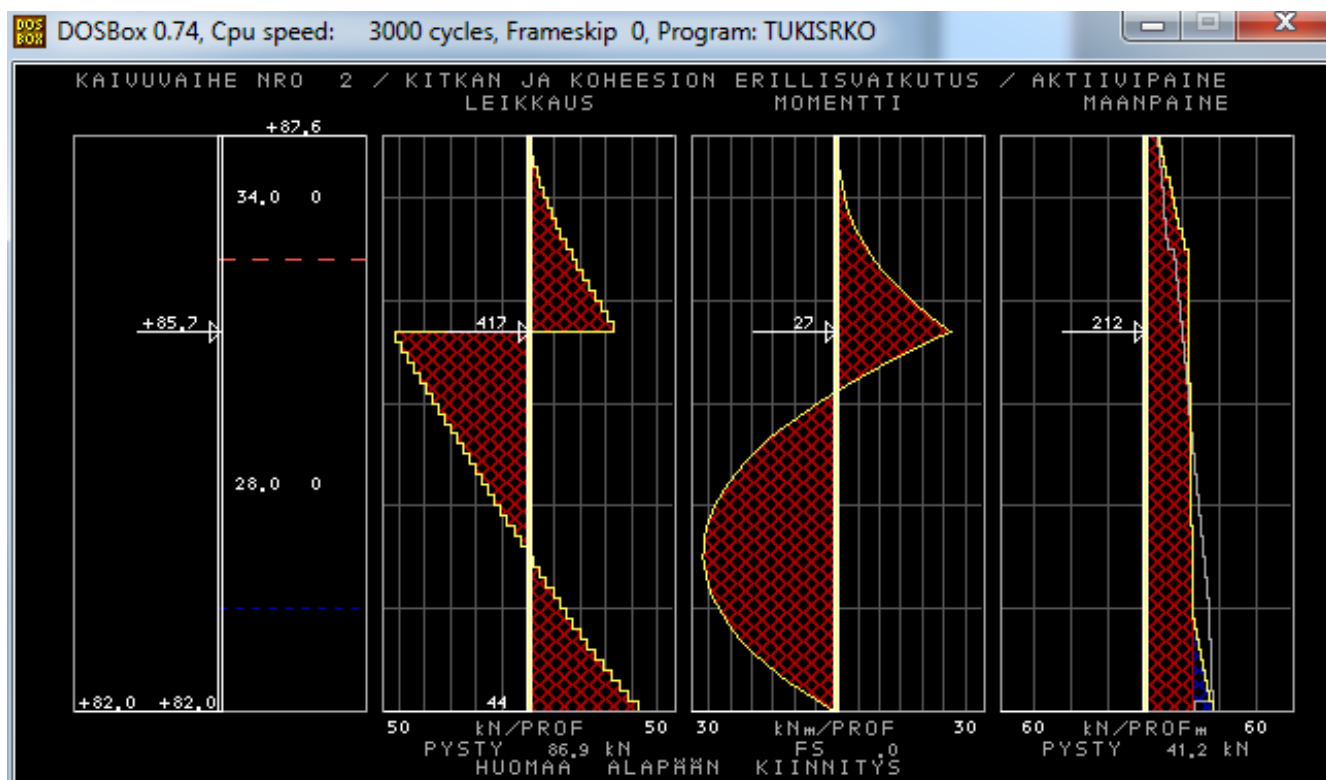
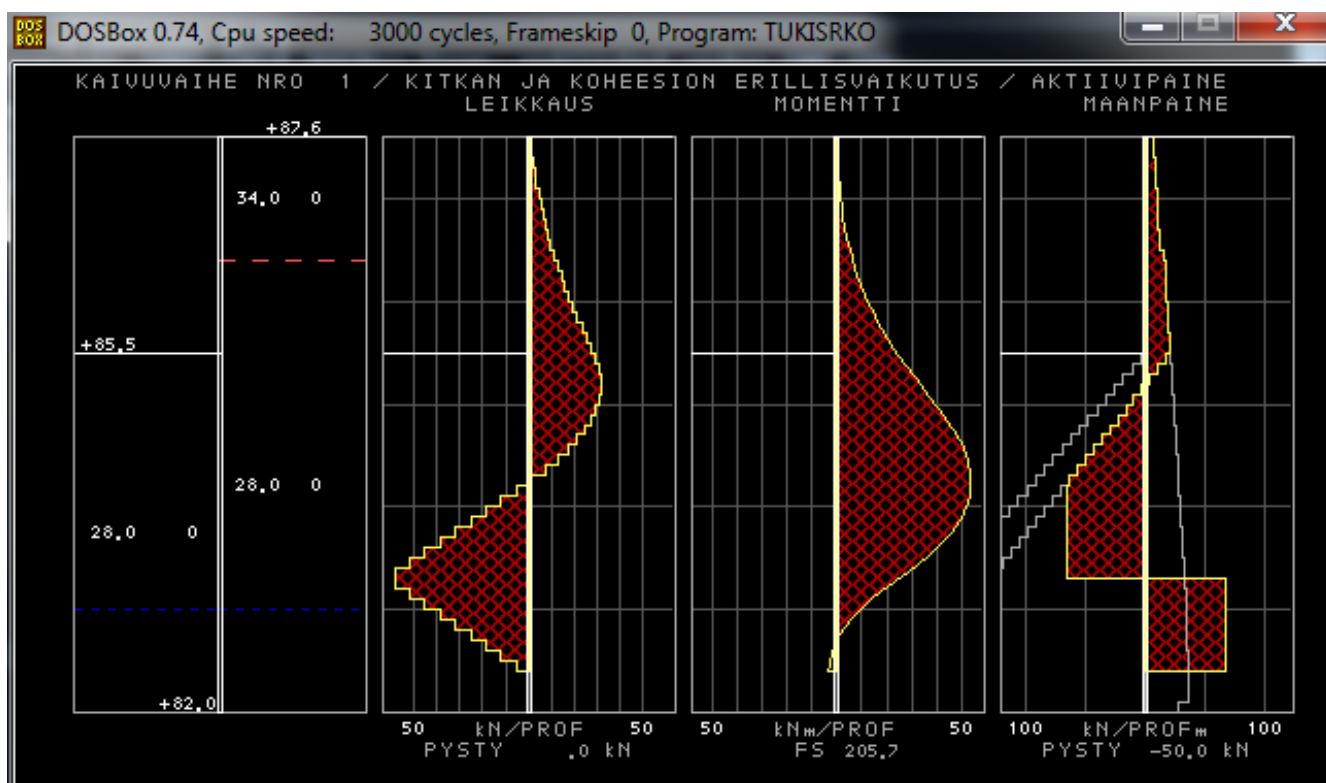
Teräsponttiseinä lyöty kallion pintaan, siirtymäperusteinen malli (DCM)





LIITE 2: FULGEO TULOSKUVAAJAT

Teräsponttiseinä lyöty kallion pintaan



LIITE 3: MODUULILUVUT JA JÄNNITYSEKSPONENTIT

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

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohja- vedenpinnan		Kitka- kulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutos- parametri		Kairausvastus		
		Ylä- puolella	Ala- puolella		Moduuli- luku m	Jännitys- ekspo- nenti β	Puristin- kairaus q _c (MPa)	Paino- kairaus Pk/0,2 m	Heijari- kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski- 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 hiekkä d ₁₀ <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keski- 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 d ₁₀ >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keski- 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 muodonmuutosparametrien arviointi soralla ja moreenilla (Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa, TIEL 2172068).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohja-vedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku m	Jännityksen eksponentti β	Puristin-kairaus q _c (MPa)	Painokairaus Pk/0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keskitiivis			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 löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100) * 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keskitiivis	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 arviointi.

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

(Tiehallinto 2001, Liite 5, 10–12)

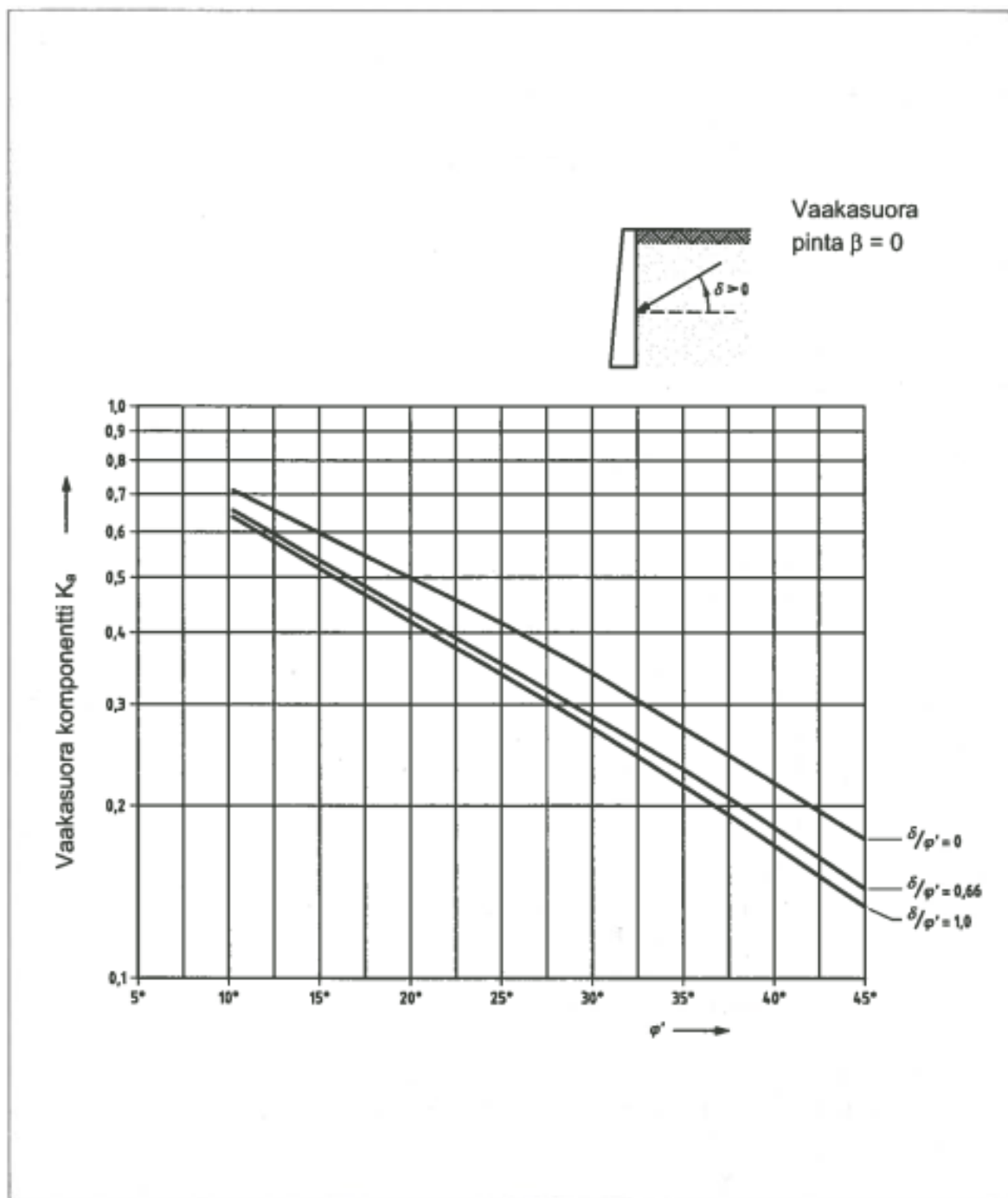
LIITE 4: TARVITTAVA SIIRTYMÄ MAANPAINEEN KEHITTYMISEKSI

Taulukko 5.1. Maanpaineen kehittymiseksi tarvittava tukirakenteen siirtymä H_a on sen seinän osan korkeus, johon aktiivinen maanpaine kohdistuu. H_p on sen seinänosan korkeus, johon passiivinen maanpaine kohdistuu (RIL 121-2004) /42/.

Maalaji	Aktiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä	Passiivisen maanpaineen kehittymiseksi tarvittava siirtymä
Tiivis hiekka	0,0005 H_a	0,002 H_p
Löyhä hiekka	0,002 H_a	0,006 H_p
Kiinteä savi	0,01 H_a	0,02 H_p
Pehmeä savi	0,02 H_a	0,04 H_p

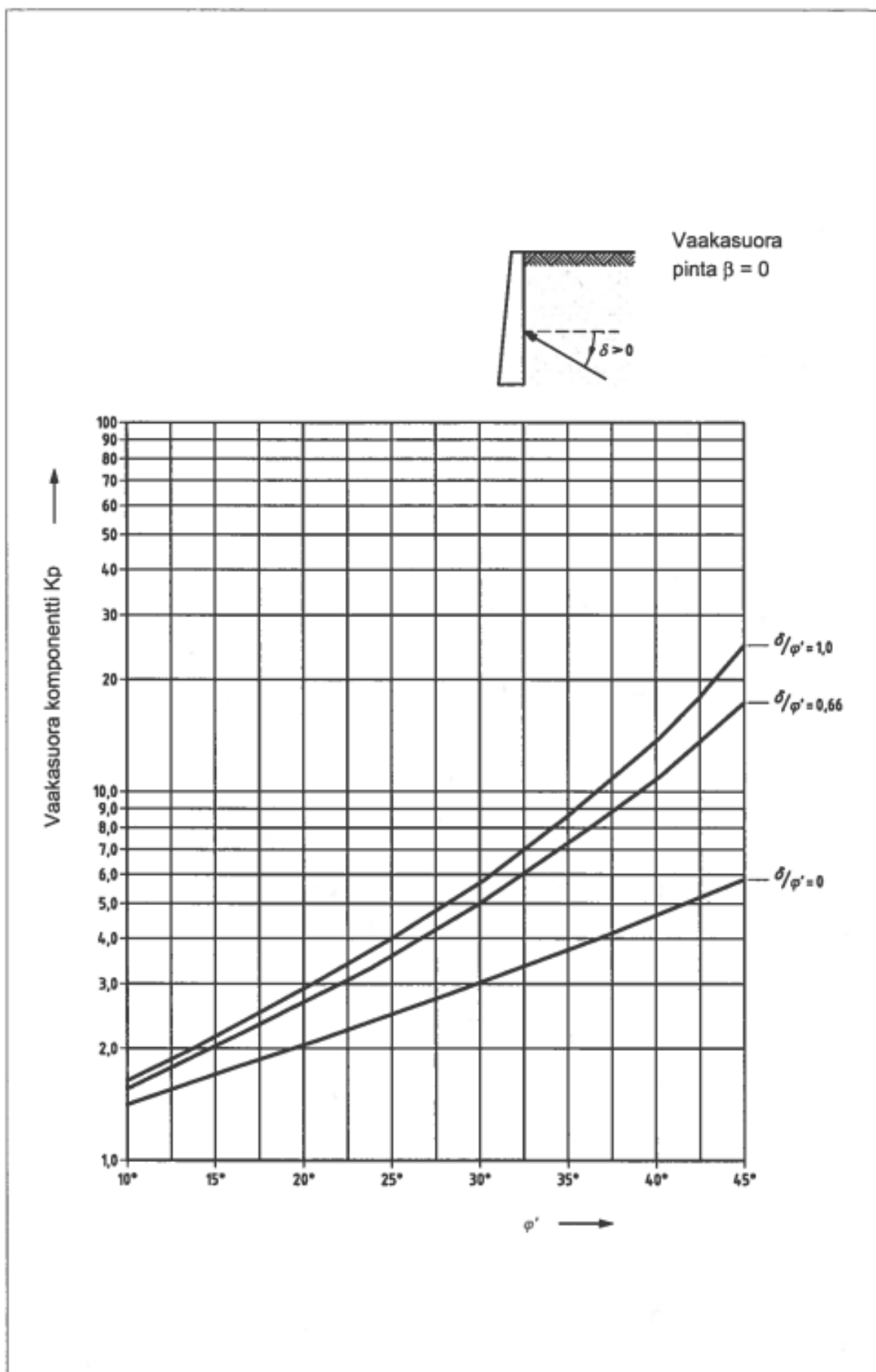
(Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 81)

LIITE 5: PAINEKERTOIMIEN MÄÄRITYS NOMOGRAMMEISTA



Kuva C.1.1. Kertoimet K_a tehokkaalle aktiiviselle maanpaineelle (vaakasuora komponentti): tuettu pinta vaakasuora ($\beta = 0$).

(Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 226)



Kuva C.2.1. Kertoimet K_p tehokkaalle passiiviselle maanpaineelle (vaakasuora komponentti): tuettu pinta vaakasuora ($\beta = 0$).

(Kaivanto-ohje: RIL 263 - 2014, 230)