Tampereen yliopisto

Jimi Andersson

TERÄSRAKENTEISEN TUKISEINÄN VAURIONSIETOKYVYN LASKENTA

2D- ja 3D-laskentaohjelmien vertailu

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: professori, Tim Länsivaara
Tarkastaja: DI, Olli Asp
Kesäkuu 2025

TIIVISTELMÄ

Jimi Andersson: Teräsrakenteisen tukiseinän vaurionsietokyvyn laskenta
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2025

Tukiseinärakenteiden suunnittelu voi olla haastavaa puuttuvien lähtötietojen tai rakenteen monimutkaisuuden takia. Tukiseinille syntyvät rasitukset voivat olla hankalasti arvioitavissa ja rakenteen toteuttaminen työmaalla ei välttämättä vastaa suunnitelmia. Tämän lisäksi suunnittelijan on arvioitava tukiseinän vaurionsietokykyä, tutkimalla jatkuvan sortuman riskiä yhden tuen pettäessä. Nykyään tukiseinien suunnitteluun löytyy kuitenkin monenlaisia laskentaohjelmia, joilla tukiseinien laskenta helpottuu.

Elementtimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmilla voidaan tarkistaa tukiseinien kestävyyttä eri tilanteissa. Niiden avulla on usein mahdollisuus ratkaista paljon monimutkaisempia ongelmia analyyttisiin menetelmiin verrattuna. Elementtimenetelmään perustuvien ohjelmien välillä on kuitenkin eroja, joista yksi on, kuinka montaa ulottuvuutta voidaan käsitellä. Vauriotilanteen käsittely kaksiulotteisena tapauksena voi olla hankalaa, sillä todellisuudessa kuormien uudelleenjakautuminen ei tukiseinällä tapahdu ainoastaan pystysuunnassa.

Tässä diplomityössä vertailtiin kaksiulotteista GeoCalc- ja kolmiulotteista Plaxis 3D-laskentaohjelmaa, tutkimalla miten tukiseinän ja erityisesti sen vaurionsietokyvyn mallintaminen eroaa ohjelmien välillä. Ohjelmissa mallinnettiin mahdollisimman paljon toisiaan muistuttavia laskentamalleja, jotka pyrkivät kuvaamaan tyypillisiä suomalaisia rakenneratkaisuja ja pohjaolosuhteita.

Tulokset osoittavat, että vauriotilanteen mallintaminen kolmiulotteisesti voi tuottaa hyvin erilaisia tuloksia verrattuna kaksiulotteiseen tapaukseen. Murto- ja käyttörajatilan tapauksissa, olivat tulokset kuitenkin usein samankaltaisia, eikä näissä tapauksissa kolmiulotteisesta mallintamisesta ollut aina suurta hyötyä.

Kolmiulotteisella mallintamisella voidaan myös selvittää tiettyjen rakenneosien rasituksia suoraan, kun taas kaksiulotteisessa mallintamisessa ne on selvitettävä erikseen laskentatuloksien avulla. Tällöin keskitytään selvittämään yhden rakenneosan rasituksia, eikä kuormien uudelleenjakaantumista koko tukiseinärakenteelle voida huomioida.

Tätä ongelmaa pyrittiin helpottaa esittämällä vaihtoehtoinen tapa mallintaa ankkuroidun seinän vaakapalkki. Tällöin jatkuvan palkin tuet on mallinnettu ankkurin jäykkyyttä vastaavilla jousilla, jolloin vauriotilanteessa ankkurivoimat jakaantuvat tasaisemmin ankkureiden välille. Palkille tuleva kuorma oli myös määritetty kaksiulotteisesta laskentamallista siten, että tuen ankkurijako kaksinkertaistetaan, jolloin syntyvä kuorma palkille vastaisi enemmän vauriotilanteen kuormaa.

Avainsanat: tukiseinä, elementtimenetelmä, vaurionsietokyky

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Jimi Andersson: Robustness analysis of steel tieback wall structures
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
June 2025

Designing retaining tieback walls can be difficult due to the lack of site investigations and the complexity of the structure. The loads on the wall might be hard to estimate and the construction of the structure might not be possible according to the design. The designer needs to also consider the robustness of the structure. This is usually done by checking the loads on other components of the structure, after one of them has failed. Today there are many calculation programs that are meant to help in designing retaining structures and to give a better understanding of the robustness of these structures.

Programs based on the finite element method offer more flexibility compared to analytical methods and can therefore be better suited for many retaining wall problems. There are many differences between geotechnical finite element method programs, one of them being: how many dimensions the problem can be modelled in. Calculating the robustness of a retaining wall in two dimensions is not easy, because the load transfer after a support failure does not happen only in the vertical direction of the wall.

In this thesis two calculation programs based on the finite element method were compared: GeoCalc which allows for two-dimensional analysis and Plaxis 3D which allows for three-dimensional analysis. The programs were compared focusing mostly on how the robustness of retaining walls can be analyzed. The comparisons were made with models that try to replicate common tieback wall structures and ground conditions in Finland.

Analyzing the robustness of the wall after a support fails, often resulted in very different load redistributions between the two calculation programs. However, in cases where no support failed, the results were often very similar. In those cases, the use of the 3D model was therefore not seen as hugely beneficial for optimizing the structure.

The three-dimensional analysis allowed for more freedom in modeling the different structural components of the wall. Therefore, the stresses of the components could be extracted straight from the program and no need for secondary calculation programs or hand calculations was needed, like in the case of the two-dimensional analysis. This also meant that the redistribution of loads in case of a support failure in the two-dimensional analysis did not consider the whole retaining wall structure, but only one component of it.

A solution for this problem was presented, where the supporting beam for rock anchors was modelled with springs as supports, instead of normal pinned supports. The springs had a stiffness similar to that of the anchors, which meant that in the case of one support being removed, the resulting anchor forces were redistributed more evenly. In addition, the load for the beam was derived from doubling the anchor spacing in the 2D retaining wall model, giving a more realistic load for the beam, after an anchor failure.

Keywords: tieback wall, finite element method, FEM, structure robustness

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTETYÖSSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☒ Ei
☐ Kyllä

ALKUSANAT

Toivon, että tässä diplomityössä saavutetut tulokset rohkaisevat muitakin kokeilemaan geoteknisten ongelmien mallintamista kolmiulotteisesti. Yhtenä työn tavoitteista oli selvittää, milloin kolmiulotteinen mallinnus on tukiseinien osalta kannattavaa. Uskon, että tähän kysymykseen pystyttiin osittain vastaamaan. Käsitellyt tapaukset ovat kuitenkin vain pintaraapaisu kaikista tilanteista, missä kolmiulotteinen mallintaminen voi olla hyödyllistä, rakenteiden optimoinnin kannalta.

Haluan kiittää Olli Aspia aiheen ideoinnista ja työn ohjaamisesta, erityisesti rakennetekniikan osalta. Ollin into aiheeseen selkeytti työn tavoitteiden löytämistä ja täten sujuvoitti työn tekemistä. Aihe oli myös itselle erityisen kiinnostava ja tarjosi mahdollisuuden opetella kyseisten laskentaohjelmien käyttöä. Haluan myös kiittää professori Tim Länsivaaraa ohjauksesta sekä neuvoistaan ohjelmien toiminnasta ja geotekniikan aihepiireistä. Diplomityön rahoitti ja laskentaohjelmien käytön mahdollisti A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

Tampereella, 18.5.2025

Jimi Andersson

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. YLEISTÄ 3
2.1 Tukiseinän tehtävä 3
2.2 Maanpaineteoria 4
2.3 Plastisuusteoria 5
2.4 Vaurionsietokyky 5
2.4.1 Tuen murtumismekanismit 6
3. TUKISEINIEN MITOITUS 7
3.1 Eurokoodin mukainen mitoitus yleisesti 7
3.2 Kuormitustapaukset 8
3.3 Geotekninen mitoitus 8
3.4 Rakennetekninen mitoitus 8
3.4.1 Seinä 8
3.4.2 Vaakapalkki 9
3.4.3 Ankkurit 10
3.4.4 Juuritappi ja -palkki 11
3.5 Mitoittamisen tarkkuus 12
4. TUKISEINIEN MALLINTAMINEN JA NUMEERINEN LASKENTA 13
4.1 Elementtimenetelmä 13
4.2 GeoCalc teoria 14
4.2.1 Kuormat ja maanpaine 16
4.2.2 Maajouset 17
4.2.3 Tukirakenteet 18
4.3 Plaxis teoria 19
4.3.1 Hardening soil -materiaalimalli 20
4.3.2 Tukirakenteet 22
4.3.3 Plastiset pisteet 23
5. LASKENTAMALLIT 24
5.1 Laskentamallien kelpoistaminen ja parametrit 24
5.1.1 Kitkamaa 26
5.1.2 Koheesiomaa 30
5.2 Yksi tukitaso 33
5.3 Kaksi tukitasoa 35
5.4 Kallioon alapäästään tuettu seinä 37

6. TULOKSET 39
6.1 Yksi tukitaso: vaakapalkin jäykkyyden vaikutus 39
6.2 Yksi tukitaso: ankkurijaon vaikutus 49
6.3 Yksi tukitaso: pohjamaan ja vaakapalkin plastisuuden vaikutus 52
6.4 Kaksi tukitasoa: seinän jäykkyyden vaikutus 58
6.5 Kallioon alapäästään tuettu seinä: plastinen tai elastinen juuritappi 61
6.6 Kallioon alapäästään tuettu seinä: juuripalkki 66
7. LASKENNAN YHTEENVETO 71
8. VAURIOTILANTEEN MITOITUSESIMERKKI 74
9. PÄÄTELMÄT 80
LÄHTEET 82

LYHENTEET JA MERKINNÄT

2D	kaksiulotteinen
3D	kolmiulotteinen
DA	mitoitusmenetelmä, engl. design approach
FEM	elementtimenetelmä, engl. finite element model
HS	myötölujittuva maaperämalli, engl. hardening soil model
MCM	moduuliperusteinen muodonmuutosmalli, engl. module controlled model
OCR	ylikonsolidaatioaste, engl. over consolidation ratio

A	pinta-ala
c	koheesio
E	kimmomoduuli
E_{50}	maan kimmomoduuli
E_i	alkutilan kimmomoduuli
E_{oed}	ödometrimoduuli
E_{ur}	palautus- toisto kuormitus moduuli
E^{ref}	referenssijäykkyys
$\{f\}$	voimavektori
I	jäyhyysmomentti
K_0	lepopainekerroin
K_a, K_p	aktiivipainekerroin, passiivipainekerroin
k	ylikonsolidaation jännitysesponentti
k_{h50}	jousivakio maanpaineen ollessa puolivälissä
k_z	jousivakio
$[k]$	jäykkyysmatriisi
L	pituus
M	kokoonpuristuvuusmoduuli
m	moduuliluku
n	jännitysesponentti (tangenttimoduulimenetelmä)
p^{ref}	referenssijäykkyys
q_k	viivakuorman ominaisarvo
R_{inter}	rajapinnan lujuudenvähennyskerroin
$\{u\}$	siirtymävektori
v, v_{ur}	Poissonin vakio, Poissonin vakio uudelleenkuormituksessa

β	jännitysesponentti (tangenttimoduulimenetelmä)
σ_v, σ_v'	vaakasuuntainen jännitys, tehokas vaakasuuntainen jännitys
σ_a	vertailujännitys
φ	kitkakulma

1. JOHDANTO

Tukiseinärakenteet ovat yleinen rakenneratkaisu sekä infra- että talonrakennuskohteissa. Niillä tuetaan kaivantoja, vahvistetaan maaperää ja luodaan monenlaisia muita rakenteita. Tukiseinien mitoitus on mahdollista monipuolisilla laskentaohjelmilla, joiden käyttäminen on intuitiivista. Toisaalta ne vaativat käyttäjältä syvää ymmärrystä ohjelman toiminnasta sekä geo- että rakennetekniikasta, jotta laskentatuloksia kyetään luotettavasti arvioimaan. Potentiaalia tarkempaan laskentaan siis löytyy, mutta sen hyödyntäminen vaatii oman aikansa, jota käytännön suunnittelutyössä ei aina ole tarjolla. Tarkemman laskennan hyöty voisi kuitenkin näkyä materiaali-, aikataulu- ja kustannussäästöinä, jos mitoituksessa kyetään todistamaan kevyemmän rakenteen riittävyys.

Usein tukiseinämitoituksessa tehdään laskennan aikana yksinkertaistukisa laskentamalliin – sen sisältämiin maakerroksiin sekä tukirakenteisiin. Tämä voi johtua mm. puutteellisista lähtötiedoista, mutta usein myös siitä, että laskentaan ei aikataulupaineiden takia kyetä panostamaan. Toisaalta tukiseinien suunnittelu sisältää sekä geo- että rakenneteknisiä kysymyksiä, joka asettaa yksittäiselle suunnittelijalle vastuun ymmärtää maaperän ja rakennemateriaalin ominaisuuksista. Tämä suuresti erilaisten materiaalien rajapinnassa toimiminen voi rajoittaa uskallusta tarkemman laskennan hyödyntämiseen.

Tässä työssä keskitytään teräsrakenteisiin tukiseiniin ja erityisesti niiden vaurionsietokykyyn onnettomuustilanteessa. Tukiseinien suunnittelussa on tarkastettava onnettomuusrajatila, jossa seinän tukitasolla yksi tuki, esimerkiksi kallioankkuri pettää. Tätä tarkastelua usein yksinkertaistetaan, jättämättä huomioon vauriosta syntyvä muodonmuutos, jolla voisi olla suuri vaikutus kuormien muutokseen eri rakenneosilla, jotka jäävät vastaanottamaan jäljelle jääviä kuormia vaurion jälkeen. Yksinkertaisemmalla laskennalla tulosten käsittely on luonnollisesti tehokkaampaa, mutta tällöin onnettomuustilanne usein määrittää tukirakenteiden lopullisen mitoituksen.

Ankkurin vaurioituminen on usein kolmiulotteinen ongelma, sillä kuormat jakaantuvat todellisuudessa viereisille ankkureille vaakasuunnassa, mutta myös mahdollisille muille tukitasoille ja tukiseinän maan alle ulottuvalle osuudelle pystysuunnassa. Pystysuuntaista kuormien jakaantumista voidaan yrittää mallintaa kaksiulotteisesti (2D) esimerkiksi muuttamalla tukitason jäykkyyttä, mutta parhaiten kuorman jakaantumisen luonteen saa ratkaistua kolmiulotteisella (3D) laskentaohjelmalla.

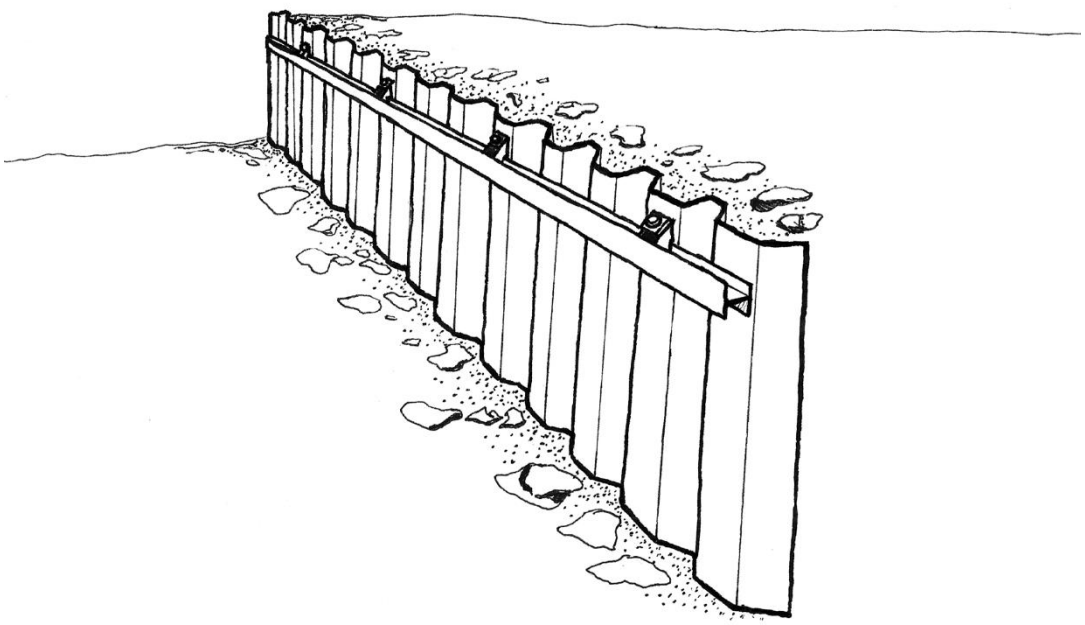
Tässä työssä mallinnetaan erilaisia ankkuroituja tukiseiniä ja tutkitaan niiden käyttäytymistä eri kuormitustilanteissa. Eri tapaukset mallinnetaan mahdollisimman samanlaisina 2D ja 3D -laskentaohjelmissa, jolloin tuloksia voidaan vertailla ohjelmien välillä. Tarkoituksena on myös löytää tapa mallintaa ankkurin vaurioituminen 2D-ohjelmaan, joka parhaiten vastaa 3D-ohjelman tuloksia. Tällöin ankkurin vaurioitumisen vaikutus voitaisiin laskea tehokkaammin 2D-laskentaohjelmalla, mutta samalla välttyä mahdolliselta ylimitoitukselta.

2. YLEISTÄ

Ennen tukiseinärakenteen mitoitusta on tärkeää ymmärtää sen osien ja siihen vaikuttavien kuormien taustalla oleva teoria. Laskentaohjelmien toiminta pohjautuu myös isoksi osaksi geotekniikan ja rakenteiden mekaniikan teoriaan, eli ohjelmien hyödyntäminen tulisi vaatia käyttäjältä ymmärrystä molemmista osa-alueista. Erityisesti jos mitoitusta pyritään parantamaan analyyttisestä tavasta, on tulosten käsittelyssä pystyttävä arvioimaan niiden luotettavuutta vertaamalla tuloksia tunnettuun teoriaan.

2.1 Tukiseinän tehtävä

Tukiseinällä tarkoitetaan rakennetta, jonka tehtävä on tukea maamassaa, estämällä sen sortuminen tai muu haitallinen liike. Tukiseinien avulla voidaan mahdollistaa korkeuseroja, jotka eivät luiskaamalla olisi mahdollisia. Tämä hyöty korostuu erityisesti silloin, jos kyseessä on ahdas rakennuspaikka, korkeuserot ovat suuret, maata rasittavat kuormat ovat suuret tai korkeuseroa ei jostain muusta syystä pystytä toteuttamaan luiskaamalla. Tukiseinien tarve lisää usein rakennuskustannuksia, mutta tukiseinän kustannuksiin voidaan kuitenkin vaikuttaa suunnittelulla.



Kuva 1. *Teräsrakenteinen ankkuroitu tukiseinä*

Tukiseinärakenteita on monenlaisia, mutta tässä työssä keskitytään erityisesti teräsrakenteilla tuettuihin ponttiseiniin. Seinät koostuvat yleisimmin lyötävistä, tärytettävistä tai porattavista teräspaaluista, jotka kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi ponteilla, muodostaen seinämaisen rakenteen. Pontteja ei kuitenkaan ole välttämätöntä kiinnittää toisiinsa, mutta tällöin seinä ei ole jatkuva rakennekokonaisuus. Seinää voidaan tukea eri menetelmillä, joko sisä- tai ulkopuolisesti. Ulkopuolinen tuenta tarkoittaa seinän ankkurointia maa- tai kallioperään, tai toiseen rakenteeseen. Sisäpuolinen tuenta tarkoittaa useimmiten seinän tukemista toiseen vastakkaiseen seinään tai kaivannon pohjaan puristussauvan avulla.

Tukiseinät jaetaan käyttöikänsä perusteella pysyviin ja työnaikaisiin, eli alle 2 vuotta paikallaan oleviin seiniin. Pysyville tukiseinille asetetaan suuremmat vaatimukset rakenteiden kestävyyden ja lujuuden kannalta, lähinnä suunnittelussa käytettävän suuremman mallikertoimen ja korroosiovarojen avulla. Jatkuvan sortumisen välttämiseksi ei koko tukiseinärakenne saa myöskään sortua yhden tuen pettäessä, pysyvillä tai työnaikaisilla tukiseinillä. Tällöin kuormat ovat usein murtorajatilan laskentaan verrattuna pienempiä ja koska kyseessä on onnettomuustilanne, voidaan käyttörajatilan mukaisia siirtymävaatimuksia hellittää, jos se on ympäristövaikutusten kannalta mahdollista. (RIL 271-2019)

2.2 Maanpaineteoria

Tukiseiniin kohdistuu maamassasta aiheutuvaa kosketuspainetta, jota kutsutaan maanpaineeksi. Maanpaineen suuruuteen vaikuttavat mm. maa-aineksen ominaisuudet, ulkoinen kuorma ja tukiseinän liike. Maanpaineet voidaan luokitella: lepo-, aktiivi- ja passiivimaanpaineisiin. Lepopaine syntyy tilanteissa, joissa maamassaa tukeva rakenne on liikkumaton. Toisin sanoen tukirakenne ei aiheuta muodonmuutoksia tuettavaan maamassaan ja päinvastoin. Todellisuudessa tukiseinissä tapahtuu liikettä aina kun seinän eri puolilla on epätasainen vaakasuuntainen kuormitus ja tämä liike suurentaa tai vähentää painetta lepopaineesta. Tällöin aktiivi- ja passiivipaine alkavat kehittyä. (RIL 157-2)

Passiivi- ja aktiivimaanpaineet kehittyvät riippuen siitä, liikkuuko seinä maamassasta poispäin, vai sitä kohti. Seinän liikkuessa maamassasta poispäin kehittyy seinälle aktiivimaanpaine. Tällöin maanpaine pienenee, sillä seinän takana olevan maa-aineksen leikkauslujuus alkaa kehittyä, kun se pyrkii vastustamaan maan liikettä. Kun leikkauslujuus vaarallisimmassa liukupinnassa kehittyy täysin, saavutetaan aktiivimaanpaine, jolloin seinälle syntyvä paine ei enää vähenny. Seinän liikkuessa maamassaa kohti, alkaa maanpaine kasvamaan lepopaineesta, kun maan lujuus mobilisoituu vastustamaan sei-

nän aiheuttamaa maamassan liikettä. Kun paine ei enää kasva seinän liikkuessa maamassaa vasten saavutetaan täysi passiivipaine. Yleisesti ottaen passiivipaineen täysi kehittyminen vaatii enemmän seinän liikettä kuin aktiivipaineen täysi kehittyminen. (RIL 157-2)

2.3 Plastisuusteoria

Materiaalien muodonmuutoskäyttäytyminen voidaan jakaa kimmoiseen ja plastiseen muodonmuutokseen. Kimmoisella muodonmuutoksella tarkoitetaan täysin palautuvaa muodonmuutosta ja plastisella pysyvää muodonmuutosta. Tukiseinärakenteissa käytettyjen rakenneterästen, voidaan olettaa käyttäytyvän tiettyyn jännitykseen asti kimmoisesti, jonka jälkeen lisäjännitys aiheuttaa pysyvää muodonmuutosta. Jännitys, jonka jälkeen syntyy pysyvää muodonmuutosta, kutsutaan myötörajaksi. Jos koko taivutettu rakennepoikkileikkaus pystyy saavuttamaan myötörajan tietyssä pisteessä, syntyy tähän pisteeseen ns. plastinen nivel. Rakenteen vapausasteitten mukaan, rakenne tällöin sortuu tai alkaa plastisoitumaan toisessa kohdassa rakennetta, kunnes tarpeeksi monta plastista niveltä aiheuttaa sortumisen. (Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2020)

Jos rakenne kykenee muodostamaan yhden tai useamman plastisen nivelen, jakaantuu tällöin rakenteelle tulevat rasitukset sen jäykkyyden mukaan uudelleen. Tällöin siis rasitusten kasvaminen on mahdollista, vaikka plastisen nivelen muodostuminen käytännössä tarkoittaa rakenteen vaurioitumista. Plastisten nivelien huomioiminen on kuitenkin hyödyllistä onnettomuustilannetta ajatellen, sillä tällöin rakenne oletetaan jo vaurioituneeksi. Täten plastiset muodonmuutokset eivät ole ongelma, olettaen että rakenteen vaurionsietokyky on riittävä.

2.4 Vaurionsietokyky

Hyvin suunniteltu rakenne tulisi olla tarpeeksi vaurionsietokykyinen, eli kestää yksittäisen komponentin murtuminen ilman rakennekokonaisuuden murtumista. Komponentit itsessään tulisi mitoittaa siten, että hauraasti murtuvat komponentit ovat reilusti ylimitoitettuja ja heikoimmat komponentit sitkeästi murtuvia (RIL 201-4-2017). Sitkeästi murtuvalla komponentilla tarkoitetaan komponenttia, joka on tarpeeksi muodonmuutoskykyinen ennen murtumista. Kuitenkin on varauduttava siihen, että jokin osa rakenteesta voi pettää ja tällöin ns. jatkuva sortuma ei saa tapahtua. Ankkuroidun tukiseinän tapauksessa tämä voisi tarkoittaa yhden ankkurin murtumista, mikä johtaa kuorman siirtymiseen toisille komponenteille, jolloin nämäkin osat pettävät ja aiheuttavat koko rakennekokonaisuuden

murtumiseen. RIL 263-2014 kaivanto-ohjeen mukaan ehjänä pysyvien tukirakenteiden varmuus myötöä vastaan tulee olla vähintään 1,1 jatkuvaa sortumaa tarkastellessa.

Tukiseinärakenteiden vaurionsietokyvyn parantamiseen on olemassa eri ratkaisuja, joista yksi on hyödyntää jatkuvaa tukipalkkia, eli palkkia, joka on tuettu useammasta kuin kahdesta kohdasta. Ankkuroidun seinän tapauksessa tämä voisi tarkoittaa vaakapalkkia, johon on kiinnitetty enemmän kuin kaksi ankkuria. Kun palkki on jatkuva, vaatii se enemmän muodonmuutosenergiaa palkin taivuttamiseen sekä rakenne pystyy synnyttämään plastisia niveliä murtumatta (RIL 201-4-2017).

2.4.1 Tuen murtumismekanismit

Rakenneteräs on hyvin muodonmuutoskykyistä ja verrattain korkealujuuksista. Suuren lujuuden takia teräksisten rakenneosien poikkileikkaukset voivat kuitenkin olla hyvin hoikkia. Tämä tekee niistä taivutettaessa ja puristaessa alttiita stabiliteetin menetykselle, joissa tietty osa poikkileikkauksesta kokee suuria muodonmuutoksia nurjahduksen takia. Teräsrakenneosien murtuminen voi siis myös olla haurasta, jos niiden kestävyys puristusta vastaan ei ole tarpeeksi suuri ennen stabiliteetin menetystä. Jotta plastisuusteoriaa voidaan hyödyntää, on teräsosien mitoituksessa siis varmistuttava niiden muodonmuutoskyvystä.

Kallioankkurin irtoaminen kalliosta oletetaan tapahtuvan hauraasti, sillä juotosmassan ja jänneteräksen tai kalliomassan välinen tartunta ei salli suuria muodonmuutoksia ennen murtumista. Tämän takia kallioankkureille suoritetaan ns. koeveto, jolla varmistetaan, että ankkurin tartunta kallioon on tarpeeksi ylimitoitettu. Koevedosta ja tukiseinän komponenttien mitoituksesta enemmän seuraavassa luvussa.

3. TUKISEINIEN MITOITUS

Tukiseinärakenteiden vaurio voi tapahtua monella eri tavalla. Suunnittelijan on osattava arvioimaan tukiseinän varmuutta eri vauriotilanteita vastaan, eli osoittaa laskennallisesti, millä todennäköisyydellä vauriotilanne voi tapahtua. Yksi tapa osoittaa tarpeellinen varmuus on vähentää maaperän ja rakennemateriaalien lujuutta laskennan alussa, ja selvittää onko rakenne vielä toimiva. Maan lujuuden vähentäminen laskennan aikana voi kuitenkin aiheuttaa suurta vääristymää tukiseinän siirtymässä, joka aiheuttaa maan epälineaarisen käyttäytymisen takia suurta vääristymää rakenteille syntyviin rasituksiin. Toisaalta maan lujuuden ominaisarvojen käyttö ja mallikertoimien kohdistaminen teräsrakenteiden kestävyyteen voi joissakin tapauksissa aiheuttaa melko matalaa varmuutta. Tämä johtuu osaksi siitä, että teräksellä on verrattain pieni osavarmuuskerroin, sen tasalaatuisuuden ansiosta. (Knuuti 2015)

3.1 Eurokoodin mukainen mitoitus yleisesti

Tukiseinärakenteet sisältävät monia rajatiloja, jotka tulee tarkastaa, jotta rakennekokonaisuus on toimiva ja turvallinen. Eurokoodissa 7 (SFS-EN-1997) on lueteltu eri rajatiloja, jotka tulisi ottaa huomioon. Tämän lisäksi standardi määrittää mitoituskäytännön, jonka avulla tukiseinärakenteet voidaan mitoittaa. Tätä käytäntöä hyödynnetään myös tässä työssä. Teräs- ja teräsbetonirakenteiden mitoitusta varten hyödynnetään myös niille suunnattuja eurokoodeja (SFS-EN-1992 ja SFS-EN-1993), ja näiden pohjalta kasattua RIL 271-2019 kirjaa, joka käsittää tukirakenteiden mitoituksen.

Eurokoodissa on esitetty geotekniselle suunnittelulle kolme päämitoitustapaa (SFS-EN-1997). Suomessa tukiseinät mitoitetaan eurokoodin mukaisella mitoitustavalla 2, josta on olemassa kaksi lähestymistapaa: DA2 (design approach) ja DA2*. Jälkimmäisessä tavassa rakenteille tulevat vaikutukset saadaan laskettua kohdentamalla varmuuskertoimet laskennasta saatuihin kuormien vaikutuksiin, eikä itse kuormiin. Rakenneosien rakenneteknisessä mitoituksessa käytetään myös mallikertoimia, joilla pyritään ottamaan huomioon laskennan epävarmuutta, kun itse laskentamallissa ei ole käytetty osavarmuuskertoimia. Tällä tavalla myös tukiseinän siirtymät pystytään arvioimaan arvoilla, joiden oletetaan olevan oikeat. (RIL 263-2014) Jos varmuuskertoimet kohdistettaisiin jo laskentamalliin voisi tästä syntyä vääristynyt kuva esimerkiksi tukirakenteen siirtymistä ja tästä johtuvasta kuormien jakautumisesta eri tukitasojen välille.

3.2 Kuormitustapaukset

Rakenteille asetetaan tiettyjä vaatimuksia, joista tärkein on luonnollisesti se, ettei rakenne sorru. Rakenteen sortumisen tarkastamisessa pyritään selvittämään rakenteelle siirtyvät kuormat ja löytää mitoittavin tilanne. Rakenteen sortuminen tarkastellaan murtorajatilatarkastelulla, mutta muita kuormitustilanteita tulee myös tarkastella, kuten käyttörajatila ja jatkuvan sortuman tarkastaminen.

Jännittämällä ankkuroidut rakenteet joudutaan myös koevetämään, jolloin tukirakenteelle kohdistuvat kuormat voivat olla erittäin suuria. Myös tämä kuormitustilanne on hyvä tarkastaa, sillä se voi olla rasittavin kuormitustilanne tietyille tukiseinärakenteen komponenteille.

3.3 Geotekninen mitoitus

Tukiseinien geotekninen mitoitus on hyvä tehdä ennen rakenteiden mitoitusta. Se usein määrittää vaadittavan seinätyypin, seinän syvyyden ja tukitasojen määrän, jonka jälkeen kyseisiä rakenteita voidaan alkaa mitoittamaan rakenneteknisesti. Geotekniseen mitoitukseen kuuluu mm. maa- ja kallioperänperän liikkeestä aiheutuvat stabiliteettivauriot, hydraulisesta murtumisesta aiheutuvat kaivannon pohjan vauriot ja pakkasesta aiheutuvat routavauriot (RIL 263-2014).

3.4 Rakennetekninen mitoitus

Kun laskenta on suoritettu käsin tai laskentamallin avulla, saadaan tuloksena tukirakenteille tulevat kuormat. Kuormista aiheutuvat tukirakenteiden rasitukset saadaan usein suoraan laskentamallista. Nämä rasitukset ovat kuitenkin jaettava pysyviin ja muuttuviin rasituksiin, sekä kerrottava erikseen varmuusluvuilla. Tämä johtuu siitä, että varmuuskertoimet kohdennetaan käyttämällä SFS-EN-1990 mukaisia kuormitusyhdistelmiä 6.10a ja 6.10b, jossa pysyville ja muuttuville kuormille on määritetty eri varmuuskertoimet.

3.4.1 Seinä

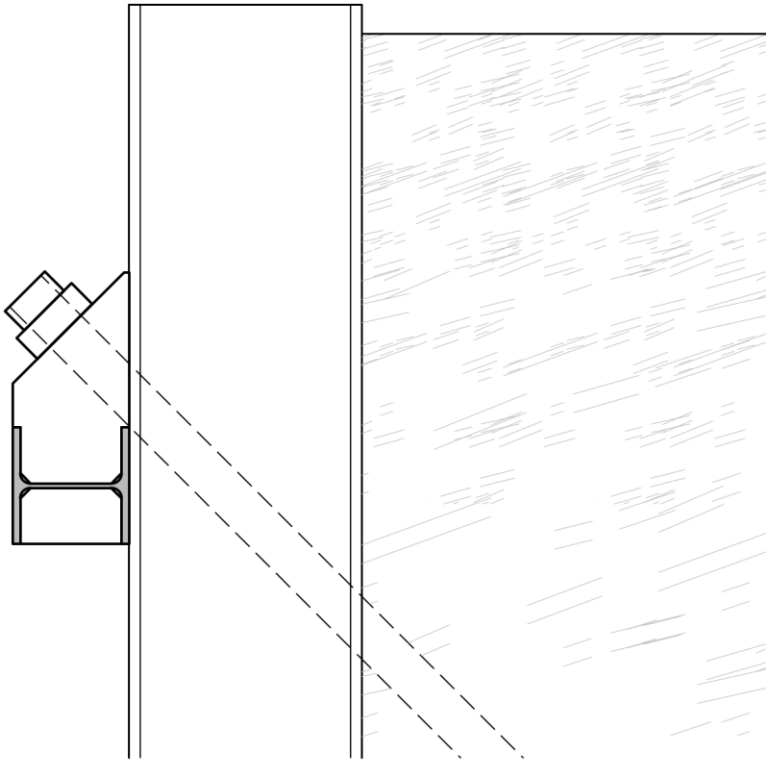
Tukiseinän seinäosuus voidaan mitoittaa palkin omaisesti määrittämällä poikkileikkaussuureet seinän poikkileikkaukselle. Koska laskentamallit antavat seinälle tulevat rasitukset yleensä metrin levyiselle alueelle seinää, on myös hyödyllistä määrittää ponttiprofiilien taivutus- ja leikkauskestävyydet metrin levyiselle osuudelle seinää. Jos kyseessä on

ponttiseinä, jossa ponttilukot sijaitsevat poikkileikkauksen neutraaliakselilla on mahdollista, ettei leikkausvoima välity ponttilukon kautta profiilien liukuessa toisiinsa nähden. Tämä ilmiö otetaan huomioon vähennyskertoimella määrittäessä seinän taivutusvastusta sekä jäyhyysmomenttia. Vähennyskerroin on empiirinen arvo, jonka suuruus määritetään pohjamaan mukaan. (RIL 271-2019)

Teräsponttiseinien laskennassa voidaan myös hyödyntää plastisuusteoriaa, jos seinän poikkileikkauksella on kyky plastisoitua ennen lommahdusta. Plastisesta muodonmuutoksesta ja momenttirasituksen uudelleen jakautumisesta voi olla hyötyä seinän momenttikapasiteetin kannalta. Tähän kuitenkin vaikuttaa pohjaolosuhteet ja seinän tukien määrä sekä geotekninen kapasiteetti. Esimerkiksi pohjavedenpaineen esiintyminen laskennassa vähentää momentin uudelleen jakautumisesta saatua hyötyä, sillä vedenpaine ei maanpaineen tapaan muutu seinän muodonmuutoksista. (Bourne-Webb et al. 2007)

3.4.2 Vaakapalkki

Tukitasojen rakennevaihtoehtoja on monenlaisia, mutta tässä työssä käsitellään tukirakennetta, jossa on yksi palkki tukitasoa kohden ja ankkurit kytketään palkkiin ankkurikonsolin avulla. Käsiteltävän tukitason periaate näkyy kuvassa 2. Palkit voidaan mitoittaa normaalisti teräsrakenteisen palkin tavoin. Niille syntyvien rasitusten määrittäminen ei kuitenkaan aina ole suoraviivaista, riippuen laskentamallista tai -tavasta. Esimerkiksi GeoCalc-ohjelma ei anna palkille tulevaa rasitusta suoraan, vaan se on määritettävä lasketuista ankkurivoimista. Usein ankkurivoima muunnetaan tasaiseksi kuormaksi jatkuvalle palkille, jossa tuet kuvaavat ankkuroituja kohtia. (RIL 271-2019)



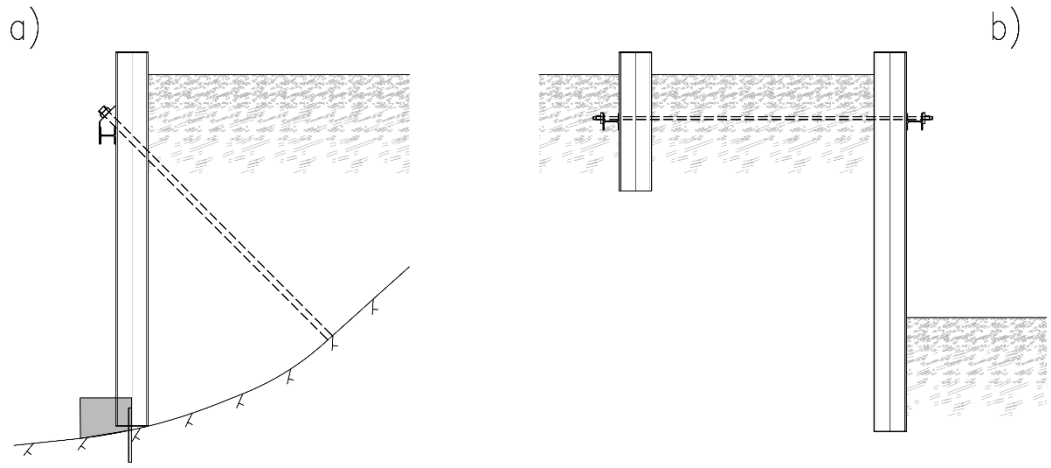
Kuva 2. *Tukiseinän tukitason periaatekuva*

Vaakapalkin mitoitusta voi hankaloittaa puuttuva tieto siitä, kuinka pitkä palkki rakennuskohteeseen voidaan asentaa. Kuten edellä on mainittu, jatkuvalla palkilla on tukiseinän vaurionsietokykyä parantava vaikutus, mutta koska yksittäinen tukitaso voi koostua monesta erillisestä palkista tai palkin mittoja ei muuten tiedetä, joudutaan mitoitustilannetta yksinkertaistamaan. Tällöin jatkuvan palkin hyödyt voivat jäädä hyödyntämättä ja rakenteesta tulee vaadittua kestävämpi, lisäten rakenteen kustannuksia.

3.4.3 Ankkurit

Eurokoodi määrittää ankkuriksi vedetyt rakenneosat, joilla on ns. vapaata pituutta, eli vedetyssä rakenteessa on osa, joka ei välitä voimaa ympäröivään maa- tai kallioperään (Liimatainen 2020). Ankkurin tehtävänä on tukea seinää, siirtämällä sitä kaatavat voimat maa- tai kallioperään. Ankkurit voidaan kiinnittää toisesta päästään kovettuvan juotosmassan avulla suoraan maa- tai kallioperään (kuva 3a)) tai toiseen rakenteeseen kuten kaivannon ulkopuolella sijaitsevaan vastaponttiseinään, joka jakaa kuorman maaperälle (kuva 3b)). Vastaponttiin ankkurointi tehdään usein ns. vetotangoilla, eli rakenneteräksestä valmistetuilla tangoilla.

Kallioankkurit pystyvät yleisesti ottaen vastaanottamaan suurempia kuormia, sillä kallioperä tarjoaa varmemman kiinnittymisalustan maaperään verrattuna. Ne koostuvat korkealujuuksisista teräsjännepunoksista, jotka kiinnitetään kallioperään juotosmassan avulla. Punoksista koostuvat ankkurirakenteet vaativat esijännityksen, jotta punokset saadaan lukittua kiinni ankkurikappaleeseen, joka taas kiinnittyy konsolirakenteen avulla tukitasoon. (Liimatainen 2020)



Kuva 3. *a) Kallioankkuroidun ja b) vastaponttiin ankkuroidun tukiseinän periaate*

Ennen injektoitujen ankkureiden lopullista jännittämistä ja käyttöönottoa on niille suoritettava hyväksyntäkoe. Tässä niin sanotussa koevedossa, pyritään varmistamaan mm. injektoinnin onnistuminen. Koevetovoima määräytyy ankkurin mitoitusvoiman perusteella ja sen perusteella, onko ankkuri pysyvä vai työnaikainen. (SFS-EN 1997) Koska koevetovoima on mitoitusvoimaa huomattavasti suurempi, voi siitä johtuvat rasitukset tukirakenteelle ja tukiseinälle olla merkittäviä. Koevedon tarkastaminen tukiseinää mitoittaessa on siis joissain tapauksissa tarpeellista tai vähintäänkin kannattavaa.

3.4.4 Juuritappi ja -palkki

Jos tukiseinän edestä on kaivettava maata kallioon asti tai seinän alapään stabiliteetti on riittämätön, on seinän alapään tukemistarve oleellista. Tähän voidaan hyödyntää juuritappia, joka on rakenneteräksestä varmistettu tanko. Se porataan kallioon aivan tukiseinän lähettyville, jolloin tanko tukee seinän alapäätä. Juuritappi voidaan mitoittaa taivutettuna tai molemmista päistään kiinnitettynä rakenneosana. Tapin ollessa molemmista puolista kiinnitetty on sen seinää tukeva kapasiteetti suurempi, mutta tällöin sen asentaminen hankaloituu, sillä se on juotettava kallioon ja kiinnitettävä esimerkiksi hitsaamalla seinään. Tapin mitoituksessa voidaan hyödyntää plastista kapasiteettia. (RIL 263-2014)

Juuritappien lisäksi seinän alapää voidaan tukea teräsbetonisella juuripalkilla. Juuritapin ja -palkin periaatteet näkyvät kuvassa 3 a). Juuripalkin kiinnitys kallioon tapahtuu kallioon poratun raudoituksen avulla. Kuitenkin jos juuripalkin betoni tarttuu hyvin kallioon, ja kaivannossa ei tehdä räjäytyslouhintaa, voidaan kallion ja betonin välistä tartuntaa hyödyntää mitoituksessa (RIL 217-2019). Pelkästään betonin tartunta ei kuitenkaan usein riitä palkin tarpeelliseen kiinnittämiseen kallioon.

Betonirakenteiden mitoitus on suureksi osaksi teräsraudoituksen mitoitusta. Raudoituksen plastista kapasiteettia olisi mahdollista hyödyntää olettaen, että sen muodonmuutoskapasiteetti on riittävä. Eurokoodi 2 (EN 1992-1-1) rajoittaa plastisuusteorian käytön vain murtorajatilatarkasteluun. Täten onnettomuustilannetta tarkastaessa plastisesta analyysistä voi olla apua. Usein kuitenkin käyttörajatilan sallitut halkeamat mitoittavat betonirakenteen, jolloin plastisesta analyysistä ei ole lopulta hyötyä.

3.5 Mitoittamisen tarkkuus

Tukiseinärakenteiden käytännön toteutus ei aina ole mahdollista suunnitelmien esittämällä tarkkuudella. Tämä voi johtua esimerkiksi rakenteen toteuttamista hankaloittavista pohjaolosuhteista. On siis olennaista ottaa huomioon, kuinka täsmällisesti rakenteita mitoitetaan, jos lopullista rakennetta ei ole mahdollista rakentaa samanlaisella tarkkuudella.

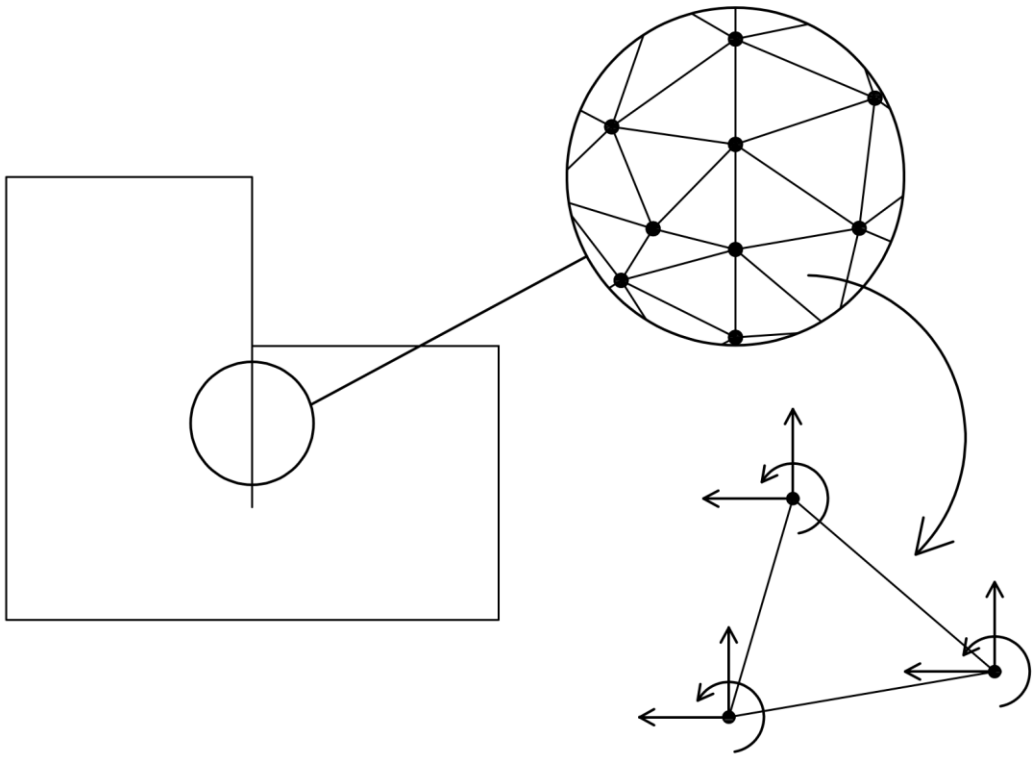
4. TUKISEINIEN MALLINTAMINEN JA NUMEERINEN LASKENTA

4.1 Elementtimenetelmä

Analyyttiset laskentamenetelmät tukiseinän mitoitusta varten rajoittuvat usein moniin yksinkertaistuksiin. Tällöin tukiseinän ja sen ympäristön todellista geometriaa ja ominaisuuksia ei voida mallintaa tarkasti. Laskentaohjelmien laskutehon kasvun myötä ns. numeerisista menetelmistä on kuitenkin tullut merkittävä osa käytännön suunnittelua. Niiden avulla voidaan ratkaista tarkka arvio todellisesta tuloksesta monimutkaisiin yhtälöihin. Ennen numeerisen menetelmän käyttöä on ongelmasta luotava ratkaistavat yhtälöt. Tähän voidaan käyttää elementtimenetelmää. (Segerlind 1984)

Elementtimenetelmässä (engl. finite element method, FEM) mallinnettavasta ongelmasta luodaan monesta elementistä koostuva kokonaisuus. Jokaisella elementeillä on tietty määrä solmuja, joihin voimat, siirtymät yms. syntyvät. Solmuille voidaan myös antaa reunaehtoja esimerkiksi siirtymien osalta. Olennaista on myös määrittää missä suhteessa muutokset vaikuttavat elementteihin, esimerkiksi mitkä muodonmuutosominaisuudet elementillä on. Kun mallinnettava ongelma on jaettu pienempiin osiin ja jokaisen osan ominaisuudet on määritetty, voidaan osat yhdistää kokonaisuudeksi, jonka laskentaohjelma ratkaisee numeerisesti. (Segerlind 1984)

Kuvassa 4 on esitetty, miten maamassa voitaisiin tukiseinämitoitustapauksessa jakaa kolmionmuotoisiin elementteihin. Solmun siirtymän laskenta tapahtuu kertomalla solmulle tulevat kuormat sen jäykkyydellä. Kun kyseessä on koko elementin tai elementtiverkon siirtymien laskenta, voidaan muuttujat ilmaista siirtymävektoreina {u} ja voimavektoreina {f} sekä jäykkyysmatriisina [k]. Siirtymävektori määrittyy elementin vapausasteiden perusteella, eli mihin suuntiin sillä on mahdollisuus liikkua. Jäykkyysmatriisi riippuu tukiseinämitoituksessa valitusta materiaalimallista, joka määrää materiaalin käyttäytymisen kuormituksen alaisena.



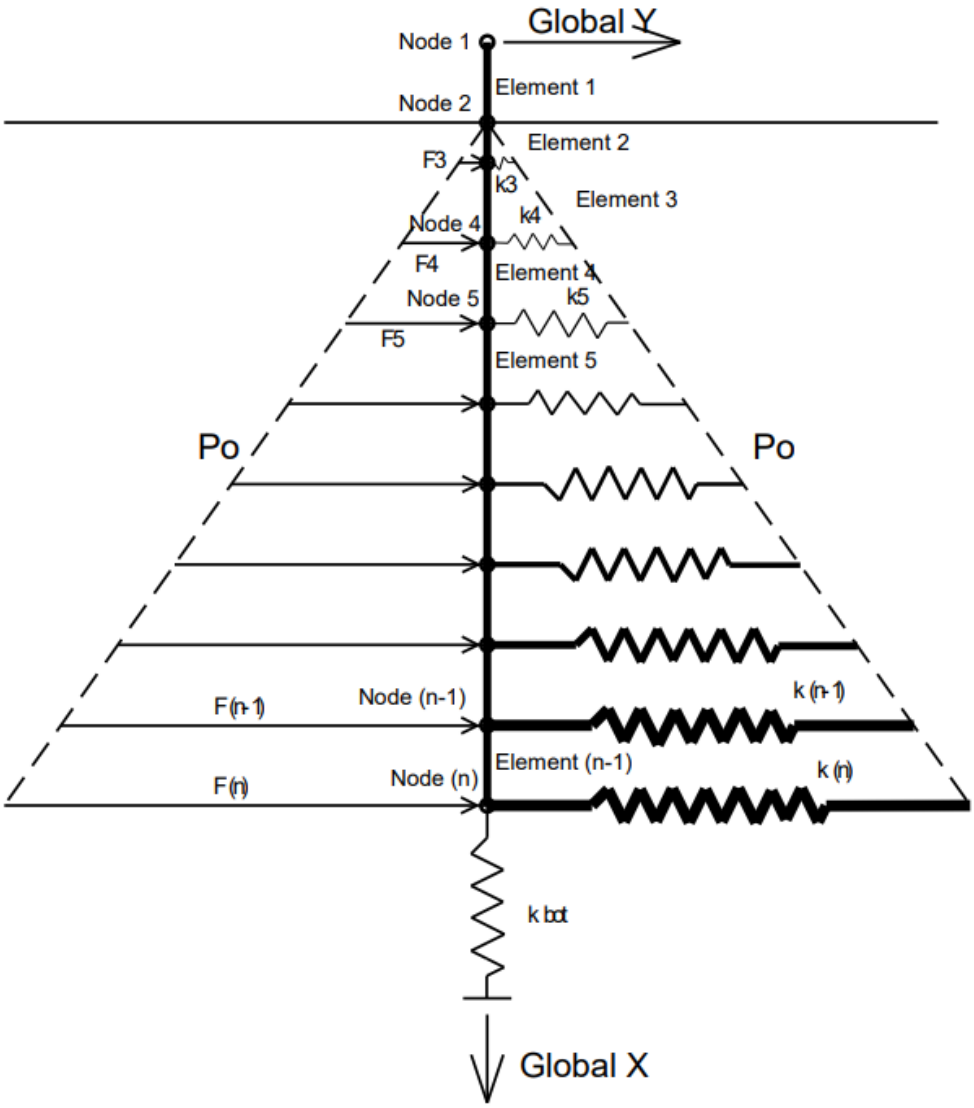
Kuva 4. *Kolmioverkko ja yksittäisen elementin vapausasteet*

Geoteknisissä FEM-laskentaohjelmissa tavoitteena on pääsääntöisesti ratkaista maaperän jännityksiä ja tästä tapahtuvia muodonmuutoksia. Tyypillisiä sovelluskohteita on stabiliteettilaskenta, ajasta riippuvat muodonmuutokset, pohjaveden suotovirtauksen mallintaminen, dynaamiset mallinnukset sekä maan ja rakenteen yhteistoiminta. Rakenteita mallinnetaan yleensä levy-, sauva- tai palkkielementteinä, riippuen rakenteen muodosta ja toiminnasta. Maa- ja kallioperä mallinnetaan yleensä kolmio- tai suorakulmaelementteinä, jos mallinnus tehdään kaksiulotteisena. Kolmiulotteisissa malleissa maaelementit ovat tilaelementtejä. Maaperän vaikutus rakenne-elementteihin voidaan kuitenkin yksinkertaistaa pelkkien jousielementtien avulla, jos kyseessä on maan ja rakenteen yhteistoimintaan liittyvä ongelma.

4.2 GeoCalc teoria

GeoCalc on ohjelmistokokonaisuus, joka sisältää sovelluksia geoteknisten ongelmien ratkaisemiseksi. Työssä käytetty ohjelmaversio on GeoCalc 6. Yksi sovelluksista on tarkoitettu tukiseinälaskentaan. GeoCalcin tukiseinälaskenta perustuu palkki-jousimalliin, jossa palkki- ja jousielementeistä koostuvaa mallia kuormitetaan viivakuormalla. Jouset kuvaavat tukiseinän passiivipuolen maan jäykkyyttä ja kuorma aktiivipuolen maan- ja vedenpainetta sekä ulkoisia kuormia. Laskentamallin periaate näkyy kuvassa 5. Malliin voi-

daan määrittää monta eri maakerrosta, jotka voivat myös olla erilaiset eri puolilla tukiseinää. Tukitasoja, ulkoisia kuormia ja pohjavedenpintoja voidaan myös määrittää. Ohjelmassa siis maaperää kuvataan kuorman ja jousien avulla ja seinää elementeistä koostuvien palkkimallin avulla. (Civilpoint Oy 2017)



Kuva 5. *GeoCalc-laskentamallin periaatekuva (Civilpoint Oy 2017)*

Käyttäjä valitsee elementtien määrän, eli kuinka moneksi laskentaelementiksi tukiseinä jaetaan. Laskenta tapahtuu vaiheittain siten, että jokaisen elementin kohdalla lasketaan kaivuvaihe, missä kaivannon pohjan korko on kyseisen palkkielementin keskellä. (Civilpoint Oy 2017) Täten laskennasta saadaan monivaiheinen tulos, jonka avulla tukirakenteen käyttäytymistä on helppo hahmottaa kaivun edetessä.

Laskenta etenee siten, että mallista poistetaan jousi, jonka jälkeen ohjelma pyrkii löytämään tasapainoehtojen avulla: uuden kuormituksen seinälle, jousien jäykkyydet ja näistä syntyvät seinän siirtymät ja rasitukset. Syntyvä viivakuorma jaetaan pistekuormiksi palkkielementtien solmuille, joihin myös jousielementit syntyvät.

4.2.1 Kuormat ja maanpaine

Maanpaineen lisäksi seinälle voi syntyä kuormaa: ulkoisesta kuormasta, vedenpaineesta tai tukitasojen esijännityksestä. Ulkoisen kuorman voi määrittää tasaisena kuormana kaivannon päälle ja pohjalle, tai viiva ja pistekuormina kaivannon päälle. Ulkoisten viiva- ja pistekuormien jakautuminen seinälle vaakakuormana riippuu niiden sijainnista, käyttäjän valitsemasta kuormatyypistä ja maan kitkakulmasta. (Civilpoint Oy 2017)

Tukitasojen esijännitys määrittyy pistekuormaksi solmuun, johon kyseinen tukitaso asettuu. Esijännitys lisätään siis kaivun edetessä pistekuormana seinälle. Ohjelmassa voidaan kuvata seinän alapään kiinnitys siten, että seinän alapää kiinnittyy myös vaakasuunnassa. (Civilpoint Oy 2017) Alapään kiinnityksellä voidaan kuvata kalliopultitusta tai muuta seinän alapään kiinnitystä ja hyödyntää laskennasta saatuja rasituksia kiinnityksen mitoitukseen.

Pohjavedenpaine seinälle voidaan huomioida eri pohja- ja orsivesipinnan tasojen korkeuksilla. Lisäksi myös suotovirtauksesta aiheutuvat tehokkaan pystyjännityksen muutokset voidaan huomioida hydraulisen gradientin avulla. (Civilpoint Oy 2017)

Lepo-, aktiivi- ja passiivipainekertoimet voidaan määrittää itse tai ohjelma voi laskea ne Jakyn yhtälön ja Coulombin maanpaineteorian avulla. Laskentaa varten ohjelma käyttää maakerroksen kitkakulmaa sekä seinän kitkakulmakertoimia. Aktiivi- ja passiivipaine kertoimien (K_a, K_p) määrityksen jälkeen voidaan laskea maanpaineet (p_a, p_p) kaavoilla 4.1 ja 4.2. Maapaineen tyyppi lasketaan riippuen siitä, liikkuuko seinä maakerrosta kohti vai siitä poispäin. Paine määrittyy vaakasuuntaisen jännityksen σ_v avulla ja maanpainekertoimien painetta lisäävä tai vähentävä vaikutus korostuu maan koheesion c avulla.

$$p_a = K_a * \sigma_v - 2 * c * \sqrt{K_a} \tag{4.1}$$

$$p_p = K_p * \sigma_v + 2 * c * \sqrt{K_p} \tag{4.2}$$

Maanpainekertoimet toimivat myös jousielementtien jäykkyyttä määrittäessä raja-arvoina, jotka vaikuttavat paineesta johtuvan siirtymän kuvaavan funktion muodostumiseen ja täten myös seinälle tulevan paineen minimi- ja maksimiarvoihin. Kun täysi aktiivi-

tai passiivipaine saavutetaan, ei paine voi siis enää kasvaa tai laskea näiden rajojen yli. (Civilpoint Oy 2017)

4.2.2 Maajouset

Maan seinää tukeva vaikutus mallinnetaan jousielementeillä, joiden jäykkyys määräytyy erikseen jokaiselle solmulle. Jousen jäykkyys voidaan määrittää kahdella tavalla: sallittujen siirtymien tai maan kokoonpuristuvuusmoduulin avulla. (Civilpoint Oy 2017) Näistä kahdesta menetelmästä kokoonpuristuvuusmoduulimenetelmä (MCM) soveltuu paremmin laskentamallien vertailuun, sillä 3D-laskentaohjelma Plaxis sisältää samankaltaisen tavan määrittää maan muodonmuutosominaisuuksia.

Maan kokoonpuristuvuusmoduulin M määrittämistä varten ohjelma käyttää lähtötietoina maakerroksen moduulilukua m ja jännitysekspponenttia β, joka ohjelmassa merkitään kirjaimella n. Kokoonpuristuvuusmoduuli määritetään kaavalla

$$M = m * \sigma_a * \left(\frac{\sigma_{v'}}{\sigma_a}\right)^{1-n} * OCR^{k(1-n)}, \tag{4.3}$$

jossa kokoonpuristuvuusmoduulin määrittämisessä huomioidaan myös jännitystila tehokkaalla pystyjännityksellä σ_v' ja vertailujännityksellä σ_a, joka on arvoltaan 100 kPa. Kaivusta aiheutuvan pystyjännityksen muutos voidaan myös huomioida jännitysekspponentilla k, joka vaikuttaa OCR ylikonsolidaatioasteeseen. Jos k saa arvon 0, on pystyjännitys kaivannon puolen maan yläpinnassa aina 0, riippumatta siitä kuinka syvälle kaivanto ulottuu. Jos taas k saa arvon 1, ei kaivun vaikutusta huomioida, eli pystyjännitys pysyy samana, kuin mitä se oli lähtötilanteessa ennen kaivamista. (Arkance systems 2024) Koska maan jäykkyys riippuu jännitystilasta, on eksponentilla k siis huomattava vaikutus maan jäykkyyteen ja täten myös tukiseinän käyttäytymiseen, erityisesti jos seinän tukeutuminen on suuresti passiivipaineen varassa.

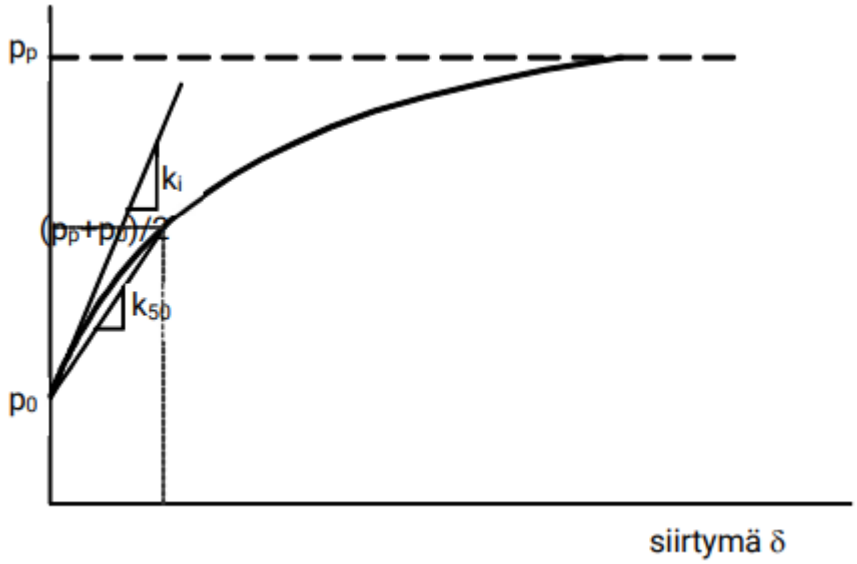
Suljettu ja avoin tila vaikuttavat maan muodonmuutoskäyttäytymiseen ja jousien jäykkyyteen. Suljetussa tilassa oletetaan, ettei maan huokospaine pääse purkautumaan ja täten myös maan tilavuudenmuutoksen oletetaan olevan nolla. Avoimessa tilassa huokospaine pääsee purkautumaan ja sen oletetaan olevan nolla, sekä maan tilavuudenmuutos on mahdollista. Näillä oletuksilla ohjelmassa avoin ja suljettu tila otetaan vaakasuuntaista jäykkyyttä määrittäessä huomioon kertoimella, joka on avoimelle tilalle 0,8 ja suljetulle tilalle 1,1. Täten jousivakiot määritetään avoimelle tilalle yhtälöllä

$$k_{h50} = 0{,}8 * M \tag{4.4}$$

ja suljetulle tilalle yhtälöllä

$$k_{h50} = 1{,}1 * M. \tag{4.5}$$

Jousivakio k_{h50} kuvaa siirtymää, kun puolet mahdollisesta maanpaineen muutoksesta on tapahtunut. Muissa maanpaineen suuruuksissa siirtymän arvo määräytyy hyperbolisen siirtymäfunktion mukaan. Hyperboolinen funktio syntyy siis k_{h50} arvon sekä maanpainekertoimien avulla. (Arkance systems 2024) Funktion passiivipuolen periaate on osoitettu kuvassa 6.



Kuva 6. *Siirtymäfunktion passiivipuolen periaate (Arkance systems 2024)*

Aktiivipuolen osuus funktiosta määritetään samaa periaatetta käyttäen, käyttämällä paineen rajana maksimiaktiivipainetta ja eri merkkistä siirtymää, sillä aktiivipaine kehittyy seinän siirtyessä eri suuntaan verrattuna passiivipaineeseen.

4.2.3 Tukirakenteet

Mallinnettava tukiseinä ja ankkurit ovat GeoCalc-ohjelmassa kimmoteoriaan perustuvia. Niille ei anneta myötörajaa, eivätkä ne voi murtua laskentamallissa. Rakenteille syntyy ainoastaan kimmoteoriaan perustuvia muodonmuutoksia jännityksien lisääntyessä. (Arkance systems 2024) Tällöin plastisuuden aiheuttamaa kuormien uudelleenjakaantumista, eikä rakenteiden murtumista voida laskentamallin kimmoteorialla ottaa huomioon. Seinäprofiileja on määritetty ohjelmaan jo valmiiksi, mutta käyttäjä voi itse määrittää seinän jäykkyyden. Ankkuritason jäykkyys määritetään myös itse määrittämällä ankkurin poikkipinta-ala, kimmokerroin ja ankkuriväli.

Tukirakenteiden mitoitus tehdään jälkeenpäin ohjelmasta saaduilla rasituksilla. Tällöin on mahdollista ottaa huomioon plastisuusteoria yksittäisten rakenneosien mitoituksessa. Yksi tapa on mallintaa tukipalkki toisella laskentaohjelmalla, joka ottaa huomioon plastisuusteorian. Palkille tuleva kuorma voidaan muuttaa ankkurivoimista tasaiseksi viivakuormaksi. Tällä tavalla ei kuitenkaan huomioida rakennekokonaisuuden kuormien jakaantumista ja sitä, miten esimerkiksi ankkurin murtuminen vaikuttaa seinälle tuleviin maanpaineisiin.

4.3 Plaxis teoria

Plaxis on geoteknisiin ongelmiin kehitetty FEM-laskentaohjelma, jolla voidaan laskea kaksi- ja kolmiulotteisia tapauksia. Ohjelmalla voidaan mallintaa maaperää, pohjavettä, ulkoisia kuormia ja erilaisia rakenteita. Ohjelma sisältää monia eri materiaalimalleja, jotka soveltuvat eri mallinnustapauksiin ja materiaaleihin. Maakerrokset mallinnetaan 2D-ohjelmassa kolmioelementeillä ja 3D-ohjelmassa kartioelementeillä. (Bentley Systems 2023 A) Sovelluksia tiettyihin erikoistapauksiin, on myös kehitetty Plaxis-ohjelman pohjalta, mutta tässä työssä käytetty versio ohjelmasta on Plaxis 3D Ultimate 2023.1.

Tiivistettynä laskenta etenee seuraavasti:

1. tarvittava geometria ja materiaaliominaisuudet määritellään,
2. mallin kontinuumit ja rakenneosat muutetaan elementeiksi valitulla tarkkuudella,
3. mallin alkutilan jännitykset lasketaan valitulla menetelmällä (lepopainekertoimen tai gravitaation avulla),
4. malliin tapahtuvat muutokset ja niistä syntyvät jännitykset sekä siirtymät lasketaan vaiheittain käyttäjän syöttämässä järjestyksessä,
5. tulosten käsittely.

Alkutilan jännityksien määrittäminen on tehtävä riippuen siitä, onko mallissa alkutilassa jyrkkiä kaltevuuksia. Tämä johtuu siitä, että lepopainekertoimen avulla määritetyt jännitykset tällaisessa tapauksessa eivät vastaa todellisuutta. Todenmukaisen jännitystilan määrittäminen saattaa myös vaatia alussa useamman laskentavaiheen, jolloin lisäjännitykset syntyvät malliin, mutta niistä aiheutuneet muodonmuutokset nollataan. Oletuksena mallin sivut mahdollistavat vain pystysuuntaisia muodonmuutoksia, alapinta ei salli muodonmuutoksia lainkaan ja yläpinta sallii kaikkien suuntien muodonmuutoksia. Mallin

koon ja elementtijaon valitseminen vaatii ammattitaitoa, jotta kaikki vaikutukset saadaan kuvattua tarvittavalla tarkkuudella. (Bentley Systems 2023 B)

4.3.1 Hardening soil -materiaalimalli

Plaxis-ohjelmassa mallinnettaville maa kontinuumeille on olemassa monta erilaista materiaalimallia, joiden avulla maan ominaisuudet määritetään. Yksi tukiseinälaskentaan hyvin soveltuva malli on hardening soil (HS) -materiaalimalli. Sen ominaisuuksiin kuuluu mm. jäykkyyden määritys epälineaarisesti jännityksen avulla, jännityshistorian huomioiminen ja plastinen leikkausmuodonmuutos sekä plastinen tilavuudenmuutos. Yksinkertaisempaan Mohr-Coulomb malliin verrattuna sen käyttäytyminen on paljon todenmukaisempaa. Maa-aineen lujuus kuitenkin määritetään HS-mallissa Mohr-Coulomb teorian mukaan kitkakulmalla ja koheesiolla. (Bentley Systems 2024)

Hardening soil -mallissa maan jäykkyys riippuu jännitystilasta. Maakerroksille annetaan kolme referenssijäykkyyttä, joiden avulla ohjelma laskee: ödometrimoduulin E_{oed}, maan kimmomoduulin E_{50} sekä palautus- toisto kuormitus moduulin E_{ur}. Pystysuuntainen ja vaakasuuntainen jäykkyys määritetään GeoCalc-ohjelman moduuliperusteisen malliin verrattavalla tavalla; kaavojen 4.6 ja 4.7 avulla. Referenssi jäykkyydet E^{ref}_{oed} ja E^{ref}_{50} muistuttavat MCM mallin moduulilukua. Erona kuitenkin se, että jäykkyydet määritetään erikseen eri suunnissa. pystysuuntaisen jäykkyyden määrityksessä hyödynnetään maanpainekerrointa K^{nc}_0. (Bentley Systems 2024)

$$E_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{c*cos\varphi-\sigma_3'*sin\varphi}{c*cos\varphi+p^{ref}*sin\varphi}\right)^m \tag{4.6}$$

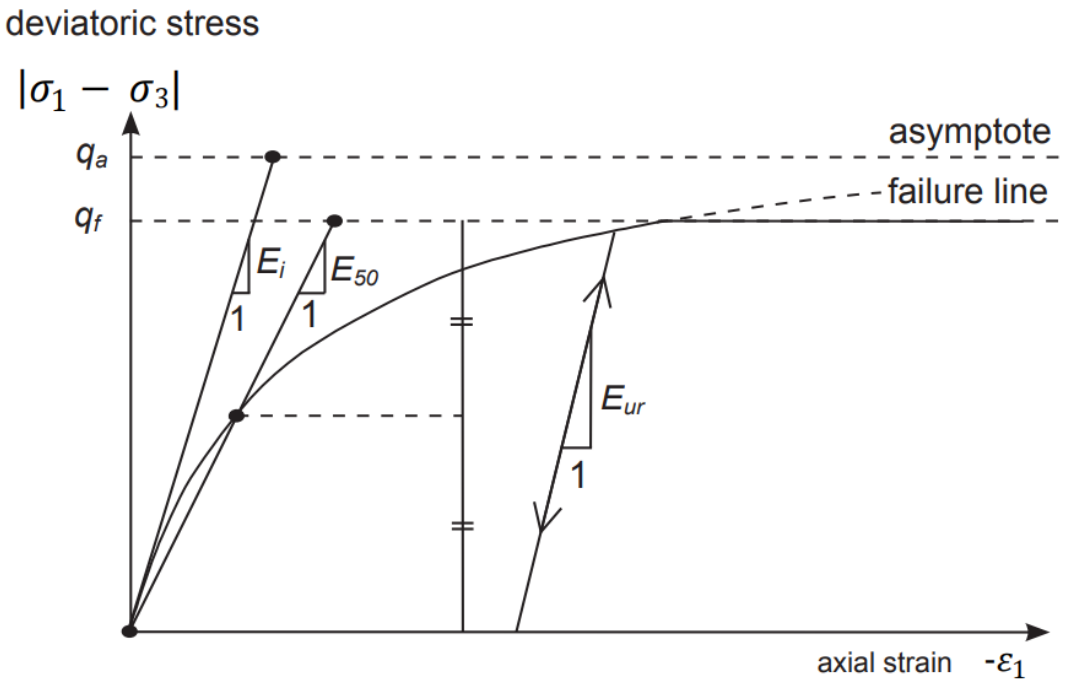
$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}\left(\frac{c*cos\varphi-\frac{\sigma_3'}{K_0^{nc}}*sin\varphi}{c*cos\varphi+p^{ref}*sin\varphi}\right)^m \tag{4.7}$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}\left(\frac{c*cos\varphi-\sigma_3'*sin\varphi}{c*cos\varphi+p^{ref}*sin\varphi}\right)^m \tag{4.8}$$

Jännitykseksponentti m määritetään nyt suoraan eksponentiksi, toisin kuin GeoCalc-ohjelmassa. Esimerkiksi GeoCalc-mallissa käytetty jännitykseksponentti 0 tulisi määrittää hardening soil -malliin luvulla 1, jos halutaan saavuttaa sama jäykkyysriippuvuus. Vertailujännitys p^{ref} on oletuksena suuruudeltaan 100 kPa GeoCalc-ohjelman tapaan. (Bentely Systems 2024)

Koska malli ottaa huomioon myös jännityshistorian, on jännityksen poistuessa maalla eri jäykkyys, jos jännitystä lisätään uudelleen. Uudelleenkuormituksen mukainen jäykkyys

ei seuraa alkutilanteen jäykkyyksien mukaan hyperbolista funktiota vaan on lineaarista. Jännitysten vähentyessä siirtymä ei siis palaudu nollaan alkuperäistä jännitys-siirtymä kuvaajaa, vaan vähenee kyseisestä pisteestä jyrkemmin lineaarisesti kaavan 4.8 mukaisella jäykkyydellä. Siirtymien kehittyminen alkutilasta ja uudelleenkuormituksen aikana on esitetty kolmiaksiaalikokeen tuloksena kuvassa 7. (Bentley Systems 2024)



Kuva 7. *E50 ja Eur jäykkyyksien kehittymisen periaate kolmiaksiaalikokeessa, E_i kuvaa alkutilan jäykkyyttä (Bentley systems 2024)*

Yksinkertaisemmassa Mohr-Coulomb mallissa jännityksen poistuminen voi tukiseinälaskentatapauksissa aiheuttaa maanpinnan kohoamista seinän takana. Yksi syy tälle käyttäytymiselle on Mohr-Coulomb mallin tapa mallintaa jännityksen poistuminen kimmoteoriaan perustuen. Tällöin jännitysten vähentyessä maahan ei jää plastisia, eli pysyviä muodonmuutoksia ja sen tilavuus alkaa kasvaa, jos myötörajaa ei ole saavutettu. HS-mallissa maa kuitenkin käyttäytyy todenmukaisemmin, sillä maamalliin jää plastisia muodonmuutoksia, vaikkei maan myötörajaa olisikaan saavutettu.

Toinen HS-mallin ominaisuuksista on myötölujittuminen. Tämä tarkoittaa sitä, että maan jännitystila voi kasvaa, vaikka myötöraja olisi saavutettu. Myötölujittuminen voi olla deviatoorista tai hydrostaattista. Deviatoorisella myötölujittumisella tarkoitetaan maan leikkautuessa tapahtuvaa lujittumista ja hydrostaattinen maan kokoonpuristuessa tapahtuvaa lujittumista. (Bentley Systems 2024)

Maamallia määritettäessä on valittava, tehdäänkö laskenta avoimessa vai suljetussa tilassa. Avoimessa tilassa huokosvedenpainetta ei synny ja lujuus määräytyy kitkakulman ja koheesion avulla, riippuen pystyjännityksestä. Suljetun tilan laskenta rajoittuu HS-mallissa menetelmiin A ja B. Menetelmässä A maan lujuus määräytyy tehokkaiden lujuusparametrien avulla, eli lujuudesta vähennetään kuormituksen aikaansaama huokosvedenpaine. Huokosvedenpaine syntyy annetun pohjavedenpinnan alapuolella ja ohjelman antamalla veden muodonmuutosparametreilla, mitkä estävät maamateriaalin tilavuudenmuutoksen. Menetelmässä B maan muodonmuutos ja huokosvedenpaineen kehittyminen vastaa menetelmää A, mutta maan lujuuden määrittää suljettu leikkauslujuus. Tällöin lujuus pysyy vakiona riippumatta jännitystilasta. Sen kasvulle voidaan kuitenkin määrittää syvyysriippuvuus. (Bentely Systems 2023 B)

4.3.2 Tukirakenteet

Koska kyseessä on kolmiulotteinen laskentamalli, mallinnetaan tukiseinä kaksiulotteisina levyelementteinä. Seinällä on siis myös vaakasuunnassa jäykkyys, joka voidaan määrittää erilaiseksi kuin pystysuuntainen jäykkyys. Ankkurit mallinnetaan kahden solmun välillä vaikuttavana elementtinä, johon vaikuttavat vain ankkurin suuntaiset voimat. Ankkurien sijoittaminen ja esijännityksen määrittäminen on vapaamuotoista, eli ohjelma mahdollistaa esimerkiksi ankkurin poistamisen tietyssä vaiheessa, jolloin ankkurin vaurioituminen onnettomuustilanteessa voidaan tarkastaa. Palkkeja pystytään myös mallintamaan palkkielementtien avulla. Tämä mahdollistaa ankkurivoimien todenmukaisemman jakautumisen seinälle.

Kaikille edellä mainituille rakenteille voidaan määrittää myötöraja. Jos rakenneosan tietty solmupiste siis saavuttaa tämän myötörajan, syntyy kyseiseen pisteeseen plastinen nivel ja rakenne sortuu tai jakaa kuorman uusien vapausasteiden perusteella, riippuen rakenteen muodonmuutoskyvystä. Plaxis 3D mahdollistaa siis tukiseinän tarkan mallintamisen geometrian ja plastisuusteorian osalta, eikä esimerkiksi vaakapalkkia tarvitse laskea erillisessä ohjelmassa rasitusten määrittämiseksi.

Rakenteen ja maan väliseen vuorovaikutukseen vaikuttavat niiden materiaaliominaisuudet sekä niiden välillä esiintyvät voimat. Rajapinta maan ja rakenteen välissä voidaan Plaxis-ohjelmassa ottaa huomioon interface elementeillä. Niiden avulla rajapinnan lujuusominaisuuksia voidaan vähentää, jolloin esimerkiksi tukiseinän ja maan väliseen liukumiseen tai irtautumiseen voidaan vaikuttaa. (Bentley Systems 2023 B)

4.3.3 Plastiset pisteet

Tulosten katselussa voidaan tarkastella plastisia pisteitä, eli solmuja, missä on tapahtunut plastisia muodonmuutoksia. Pisteet osoittavat myös minkälaista muodonmuutos on, riippuen mitä materiaalimallia on käytetty. (Bentley Systems 2023 B) Työtä varten tarkastellaan kuitenkin lähinnä murtumispisteitä (failure points), sillä tukirakenteiden plastinen käyttäytyminen mahdollistaa vain plastisten nivelten syntymisen, jolloin tälle kohdalle syntyy murtumispiste.

5. LASKENTAMALLIT

Jotta Plaxis- ja GeoCalc-ohjelmien tuloksia voidaan verrata, on niihin luotava vertailukelpoiset laskentamallit. Laskentamallit jaetaan seinän tukemistavan perusteella neljään kategoriaan:

1. Tukematon seinä (kelpoistamismallit),
2. yhden ankkuritason seinä,
3. kahden ankkuritason seinä,
4. kahden ankkuritason ja alapäästään kallioon kiinnitetty seinä.

Kategoriat määräytyvät tukitasojen perusteella, sillä niillä on merkitys tukiseinän rakenteelliseen toimintaan sekä kuormien uudelleenjakautumiseen. Kuormien uudelleenjakautuminen on vaurionsietokyvyn kannalta tärkeää tietoa, joten sen tutkiminen on ensisijaista. Muita mallien muuttuvia tekijöitä ovat: rakenteiden jäykkyys, maaperä, pohjavesi ja ulkoinen kuormitus. Näiden ominaisuuksien vaikutusta tarkastellaan vaihtelevassa laajuudessa kategorian mukaan.

5.1 Laskentamallien kelpoistaminen ja parametrit

Koska GeoCalc- ja Plaxis-laskentaohjelmat perustuvat eri laskentamenetelmiin, oli tärkeää löytää toisiaan hyvin vastaavat parametrit, jotta malleja voitaisiin vertailla luotettavasti. Molemmissa laskentaohjelmissa luotiin laskentamallit, joilla pyrittiin löytämään mahdollisimman paljon toisiaan vastaavat parametrit. Nämä kelpoistamismallit tehtiin sekä kitkamaa- että koheesiomaalle ja tukiseinät mallinnettiin vapaasti seisovina. Kun malleissa simuloidaan maan poistamista seinän edestä, voidaan maan ja rakenteen toimintaa vertailla. Maanpaineen lisäksi seinää kuormittavien vedenpaineen ja hyötykuorman vaikutusta pyrittiin vertailla.

Maa- ja kalliomassojen parametrit pyrittiin valitsemaan siten, että ne edustavat tyypillisiä koheesio- ja kitkamaa sekä kallio parametreja. Valitut parametrit näkyvät taulukoissa 1 ja 2. Seinän kiinnittyminen kallioon käsitellään neljännessä kategoriassa. Tällöin GeoCalc-ohjelmassa seinä kiinnitetään laskennallisesti alapäästään, luomatta erillistä kalliokerrosta. Plaxis-ohjelmassa kallioon kiinnitys tehdään rakenne-elementeillä ja mallintamalla kalliomassa erittäin jäykkänä ja lineaarisesti kimmoisena massana.

Taulukko 1. *Plaxis-maamallien laskentaparametrit*

	Koheesiomaa	Kitkamaa	Kallio
Materiaalimalli	Hardening soil	Hardening soil	Linear elastic
Avoin/suljettu tila	Avoin (Drained)	Avoin (Drained)	Non-porous
Tilavuuspaino	15 kN/m^3	15 kN/m^3	25 kN/m^3
Kitkakulma	0°	35°	-
Dilataatiokulma	0°	0°	-
Koheesio	5 kPa	0 kPa	-
Koheesion syvyyslisäys	5 kPa/m	-	-
E'_{ref}	-	-	60 GN/m^2
v (nu)	-	-	0,25
E^{ref}_{50}	20 MN/m^2	20 MN/m^2	-
E^{ref}_{oed}	20 MN/m^2	20 MN/m^2	-
E^{ref}_{ur}	60 MN/m^2	60 MN/m^2	-
v_{ur}	0,2	0,2	-
Jännitysekspo nentti m	1	0,5	-
R_{inter}	0,3	0,5	1
K_0	1	0,426	1

Taulukko 2. *GeoCalc-maamallien laskentaparametrit*

	Koheesiomaa	Kitkamaa
Avoin/suljettu tila	Suljettu	Avoin
Tilavuuspaino	15 kN/m^3	15 kN/m^3
Kitkakulma	0°	35°
Koheesio	5 kPa	0 kPa
Koheesion syvyyslisäys	5 kPa/m	-
m	200	200
n	0	0,5
k	1	0,5
Seinäkitkakulmakerroin	-	0,5
K_0	1	0,426
K_a	1	0,25
K_p	1	7,36

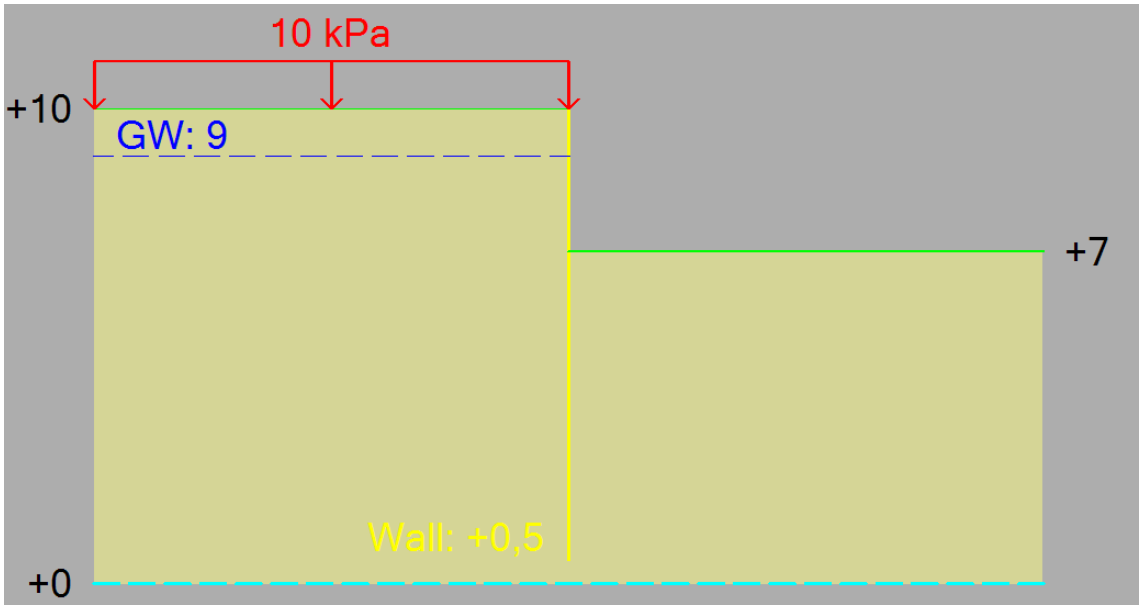
GeoCalc ja Plaxis tarjoavat valmiita ponttiseinämateriaaleja. Erona on se, että Plaxiksessa seinä mallinnetaan tasapaksuna levynä, jonka jäykkyys ja paino vastaavat tiettyä ponttiprofiilia. Levyn yksinkertaistetun geometrian takia kimmomoduulia ja painoa on kasvatettava tai vähennettävä vastaamaan todellista ponttiseinää. Taulukossa 3 on esitetty perustapauksen, eli PU 12 profiilisen (Larssen 603) seinän parametrit eri ohjelmissa.

Taulukko 3. *PU 12 ponttiseinäprofiilin parametrit laskentaohjelmissa*

	GeoCalc, PU 12	Plaxis, PU 12
Massa	109,9 kg/m	3,06 kN/m^3
Paksuus	-	0,36 m
Jäyhyysmomentti	21600 cm^4	388 800 cm^4
Kimmomoduuli, pystysuunta	210 GPa	11,67 GPa
Kimmomoduuli, vaakasuunta	-	0,58 GPa
EI, pystysuunta	45 360 kNm^2	45 373 kNm^2

5.1.1 Kitkamaamallin kelpoistaminen

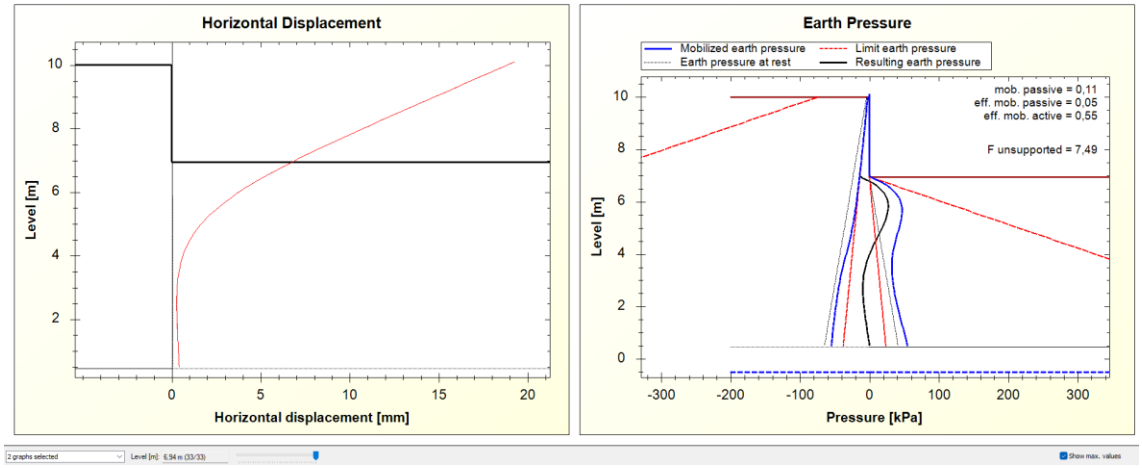
Seinän ja kaivannon geometriat ovat identtiset molemmissa ohjelmissa, kolmatta ulottuvuutta lukuun ottamatta. Seinän jäykkyys vastaa PU 12 profiilin ponttiseinää ja tukiseinä ulottuu 9,5 m syvyyteen alkuperäisestä maanpinnasta. Kaivusta johtuvaa seinän siirtymää ja siihen kohdistuvaa maanpainetta vertailtiin laskentaohjelmien välisesti. Kuvissa 8 ja 9 näkyy GeoCalc-mallin geometria sekä esimerkki tulosvälilehdestä laskennan jälkeen. Maanpaine tulokset osoittavat maanpaineen raja-arvot ja kyseisessä syvyydessä mobilisoituneen maanpaineen sekä seinälle tulevan paineen summan.



Kuva 8. *GeoCalc-mallin geometria*

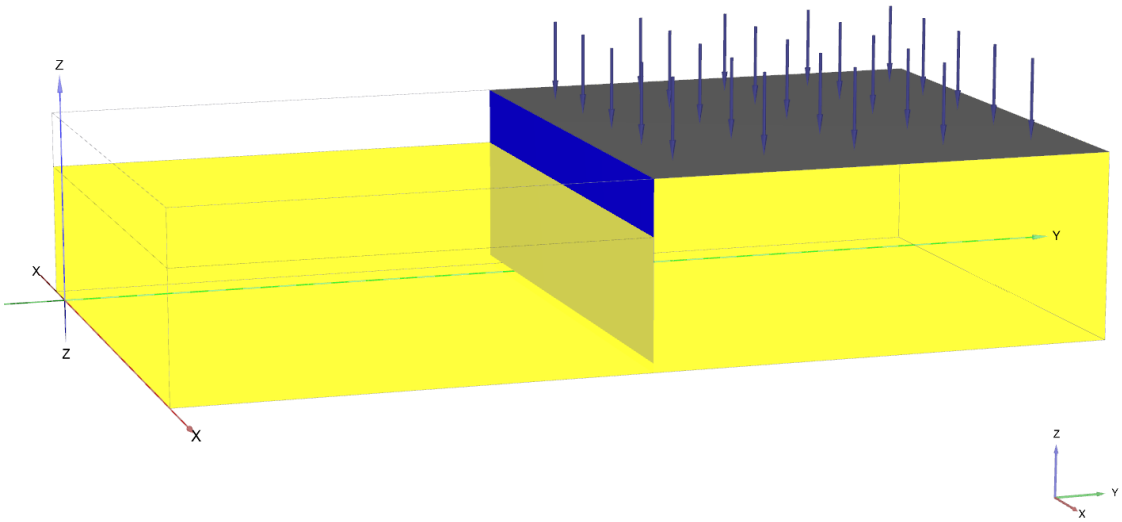
Tuloksia koottiin pelkästä kaivuun aiheuttamasta siirtymästä ja maanpaineesta, mutta myös erikseen 10 kPa hyötykuorman ja pohjavedenpinnan vaikutuksista siirtymään ja

maanpaineeseen. Pohjavedenpinta asetettiin kuvan 8 mukaan tasolle +9.

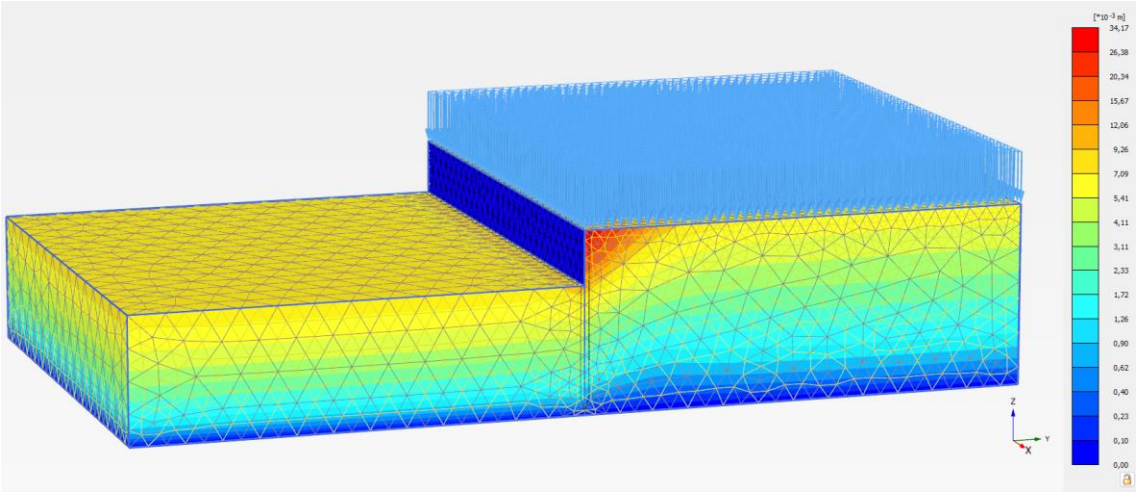


Kuva 9. *GeoCalc-tukiseinälaskennan tulosvälilehti*

Kuvissa 10 ja 11 on esitetty Plaxis-mallin geometria ja ote laskennan tuloksista, jossa näkyy myös mallin elementtien ääriviivat. Tuloksena näkyy maamallin siirtymät, jotka ovat esitetty värigradienttien avulla. Jotta tuloksista saadaan taulukoitavia ja vertailtavia arvoja, on mallista kuitenkin valittava tietty poikkileikkaus, mistä poikkileikkausta lähimpien solmujen tulokset saadaan.

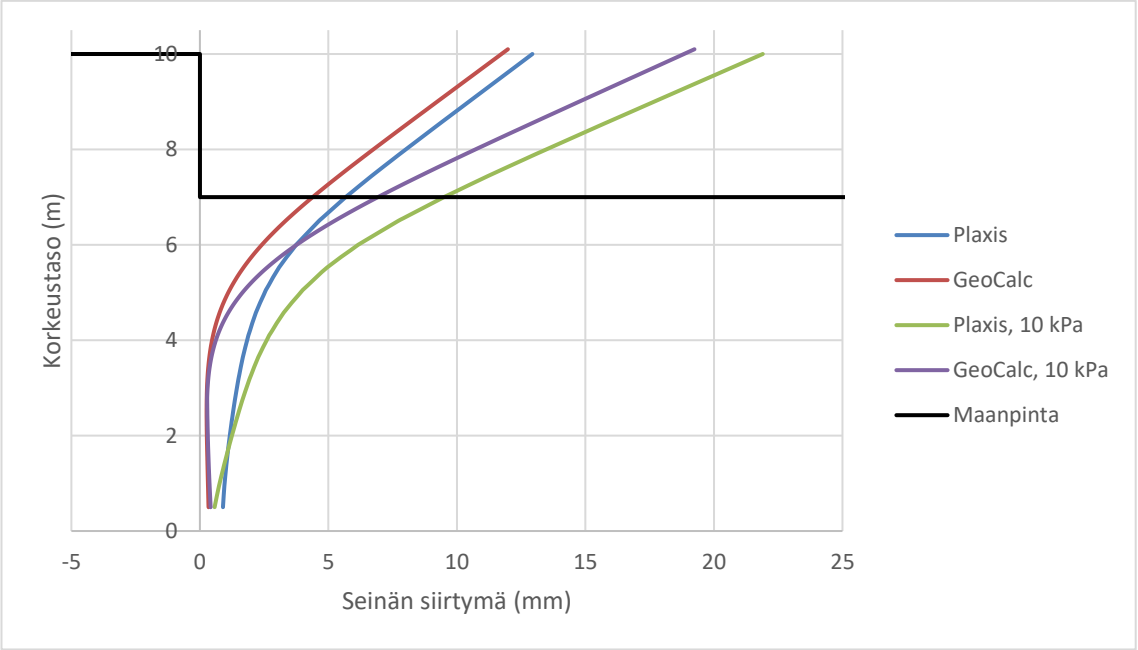


Kuva 10. *Plaxis-mallin geometria*

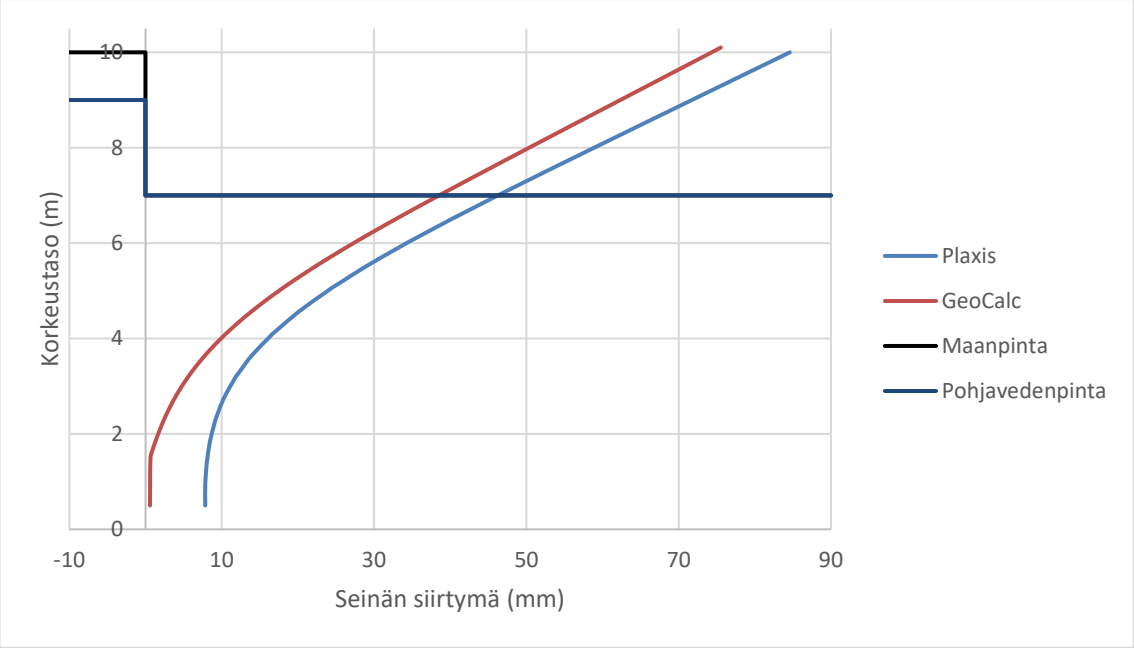


Kuva 11. *Plaxis-laskennan siirtymätulosten visualisointi, värigradientti*

Seuraavissa kuvissa on esitetty tiettyjen elementtipisteiden kohdalta saatujen tulosten synnyttämiä kuvaajia, jotka kuvaavat seinän siirtymää ja sille syntyvää maanpainetta. Tulokset esittävät kaivua lopulliseen tasoon seinän edestä.

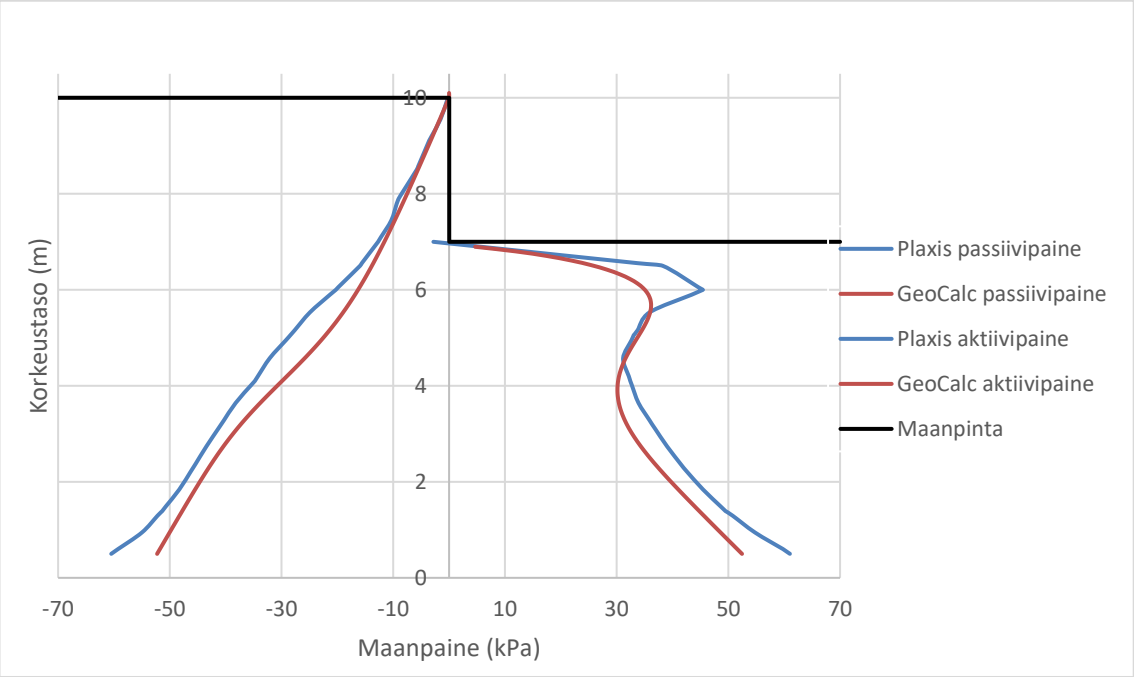


Kuva 12. *Seinän siirtymä kitkamaamalleissa, hyötykuormalla ja ilman*

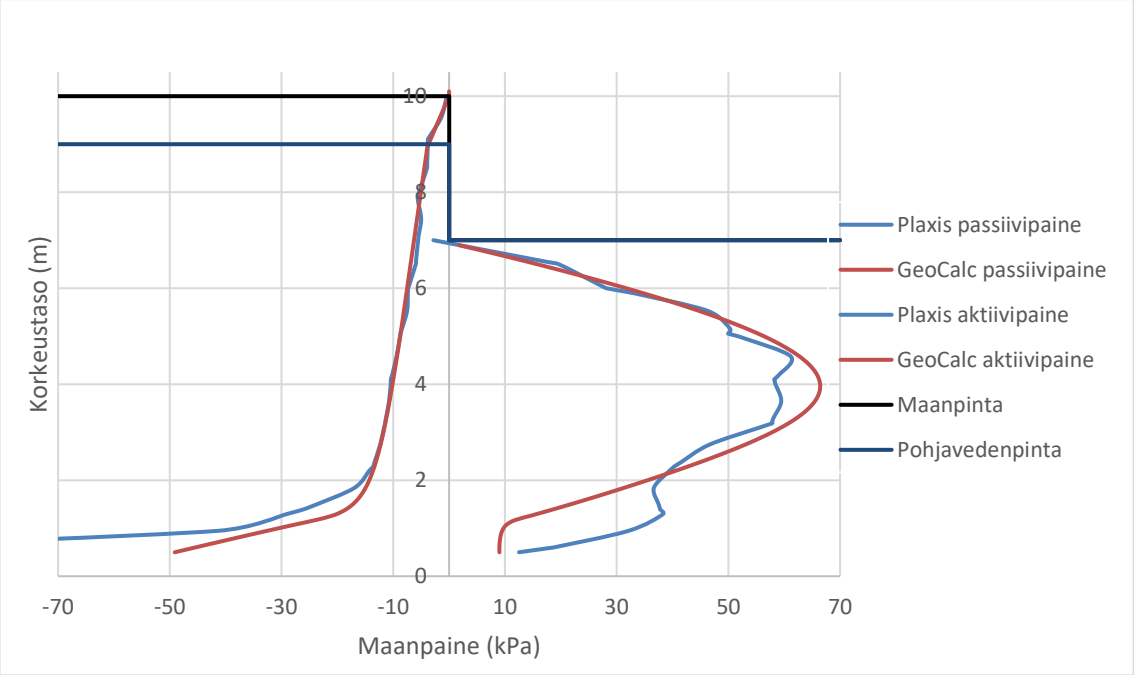


Kuva 13. *Seinän siirtymät kitkamaamalleissa pohjavedenpaineen alaisena*

Siirtymien osalta tulokset vaikuttavat samanlaisilta. Myös hyötykuorman ja pohjavedenpaineen vaikutukset tuottavat samansuuruisia lisäyksiä seinien siirtymään molemmissa laskentaohjelmissa. Plaxis-mallin seinä siirtyy kuitenkin jokaisessa tapauksessa hieman enemmän. On myös huomioitava, että Plaxis-mallin arvot ovat poikkileikkauksesta tietystä kohtaa tukiseinää. Ne eivät siis välttämättä esitä äärimmäisiä arvoja, mitä seinään koko matkalta kohdistuu.



Kuva 14. *Seinän eri puolille kohdistuva maanpaine kitkamaamalleissa, ilman hyötykuormaa*



Kuva 15. *Seinän eri puolille kohdistuva maanpaine kitkamaamalleissa, pohjavedenpaineen alaisena*

Plaxis-ohjelmassa maanpaine saatiin interface-elementtien tuloksista, joissa osoitetaan jokaisen pisteen jännitystila. Maanpaineen osalta tulokset vaikuttavat taas melko samanlaisilta. Pohjavedenpaineen vaikutus näkyy selkeästi passiivipainejakauman muodossa verrattuna kuivaan tapaukseen. Seinä alkaa myös pohjavedenpaineesta kiertymään, mikä ilmaantuu seinän alapäähän mobilisoituvana passiivipaineena seinän aktiivipuolella. Plaxis-mallin tuloksissa kuitenkin huomataan epätasaisuutta solmujen välisissä arvoissa. Solmujen määrä on tässä tapauksessa GeoCalc-mallin jousiin verrattuna pienempi, mikä antaa tuloksia harvemmasta kohdasta.

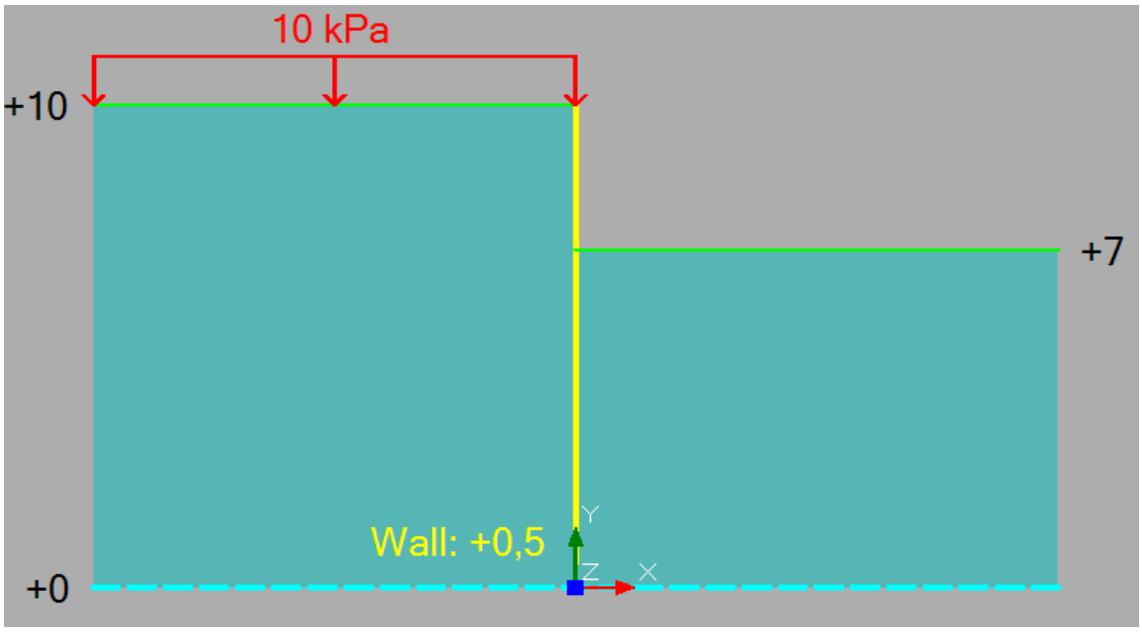
Tulokset kuitenkin osoittavat, että kitkamaan tapauksessa maamallien käyttäytyminen vertautuu hyvin toisiinsa. Ulkoisen kuorman aiheuttama paine seinälle syntyy samantapaisesti ja tämän paineen aiheuttama seinän siirtymä on myös hyvin samankaltaista.

5.1.2 Koheesiomaamallin kelpoistaminen

Koheesiomaiden mallintamista hankaloitti ohjelmien erilainen tapa käsittää suljettu tila. GeoCalc asettaa suljetussa tilassa seinälle minimipaineen, jolla varmistetaan, että seinällä on aina vähintään hydrostaattisen vedenpaineen suuruinen paine. Plaxis-ohjelmassa suljetussa tilassa seinälle ei sen liikkuessa kuitenkaan synny hydrostaattinen vedenpaine. Kuorman poistumisesta kaivuun edetessä muuttuu huokosvedenpaine negatiiviseksi, jolloin pohjamaahan syntyy imua. Seinän liikkuessa pois pohjamaasta ei vesi

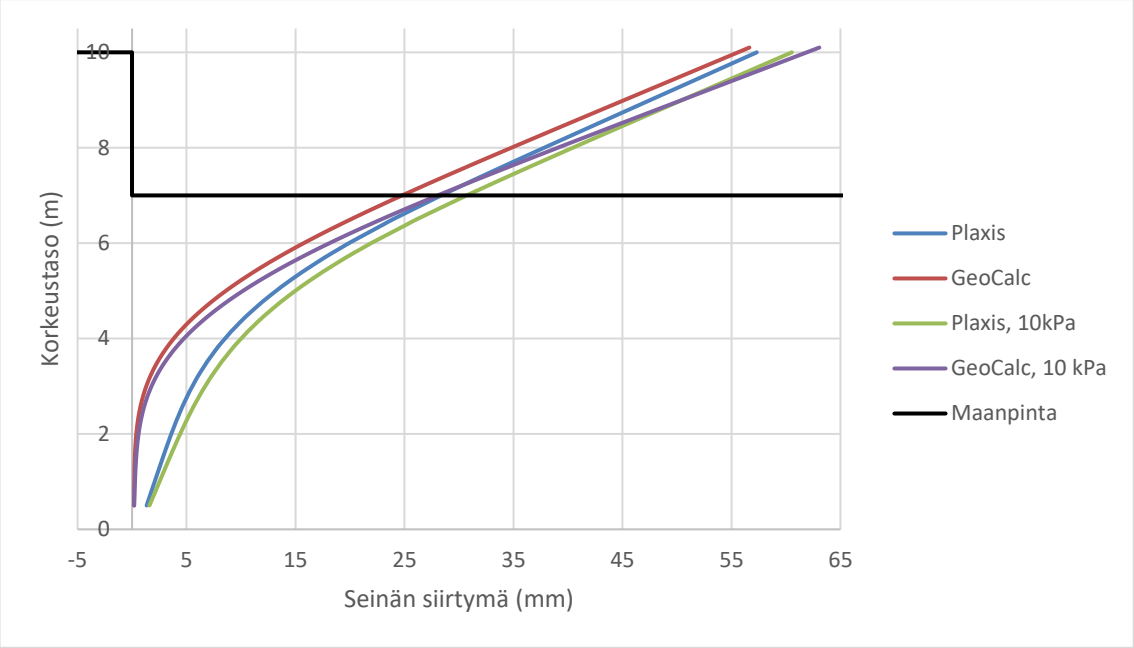
myöskään täytä seinän ja pohjamaan välistä tilaa, vaikka malliin määrittää pohjavedenpinnan maanpinnan tasolle.

Koska suljetun tilan periaate eroaa suuresti ohjelmien välillä, päätettiin laskenta tehdä avoimessa tilassa Plaxis-ohjelmassa ja suljetussa tilassa GeoCalc-ohjelmassa. Plaxis-ohjelmassa myös määritetään pohjavedenpinta aina maanpinnan tasolle. Tämä tapahtuu automaattisesti GeoCalc-ohjelman suljetussa tilassa, vaikka pohjavedenpintaa ei määritettäisikään. Kuten kuvasta 16 nähdään, geometria vastaa kitkamaan tapausta. Maamallien lujuus koostuu täysin koheesiosta ja niillä on molemmissa ohjelmissa syvyysriippuvuus, joka lisää koheesiota 5 kPa syvyysmetriä kohden. Koheesio maanpinnalla on 5 kPa.

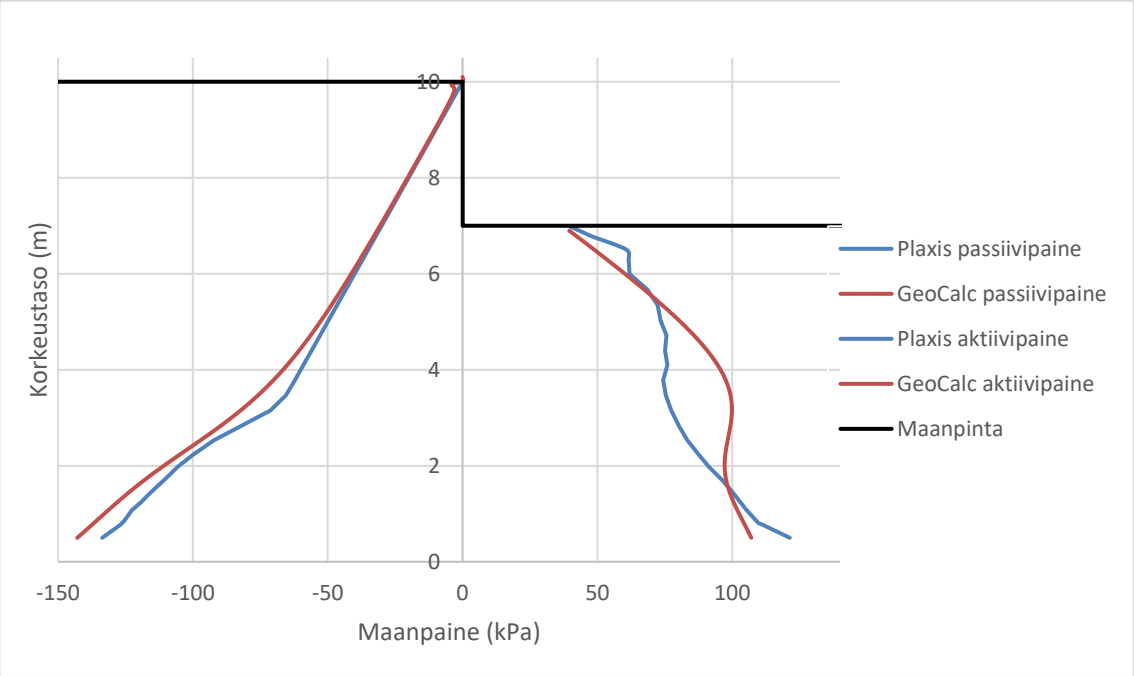


Kuva 16. *GeoCalc-koheesiomallin geometria*

Toinen eroavaisuus koheesiomallissa on se, että GeoCalc-mallissa ei kitkakulman puuttuessa huomioida seinäkitkaa, mutta Plaxis-mallissa on kuitenkin annettava jokin R_{inter} arvo, jolla maan lujuutta maan ja seinän rajapinnassa vähennetään. Arvo ei kuitenkaan voi olla nolla, sillä tämä johtaa laskennan epäonnistumiseen, kun maan lujuus on paikallisesti nolla. Kokeilluista R_{inter} arvoista 0,3 vastasi parhaiten GeoCalc-tuloksia.



Kuva 17. *Seinän siirtymä koheesiomaamalleissa, hyötykuormalla ja ilman*



Kuva 18. *Seinän eri puolille kohdistuva maanpaine, ilman hyötykuormaa*

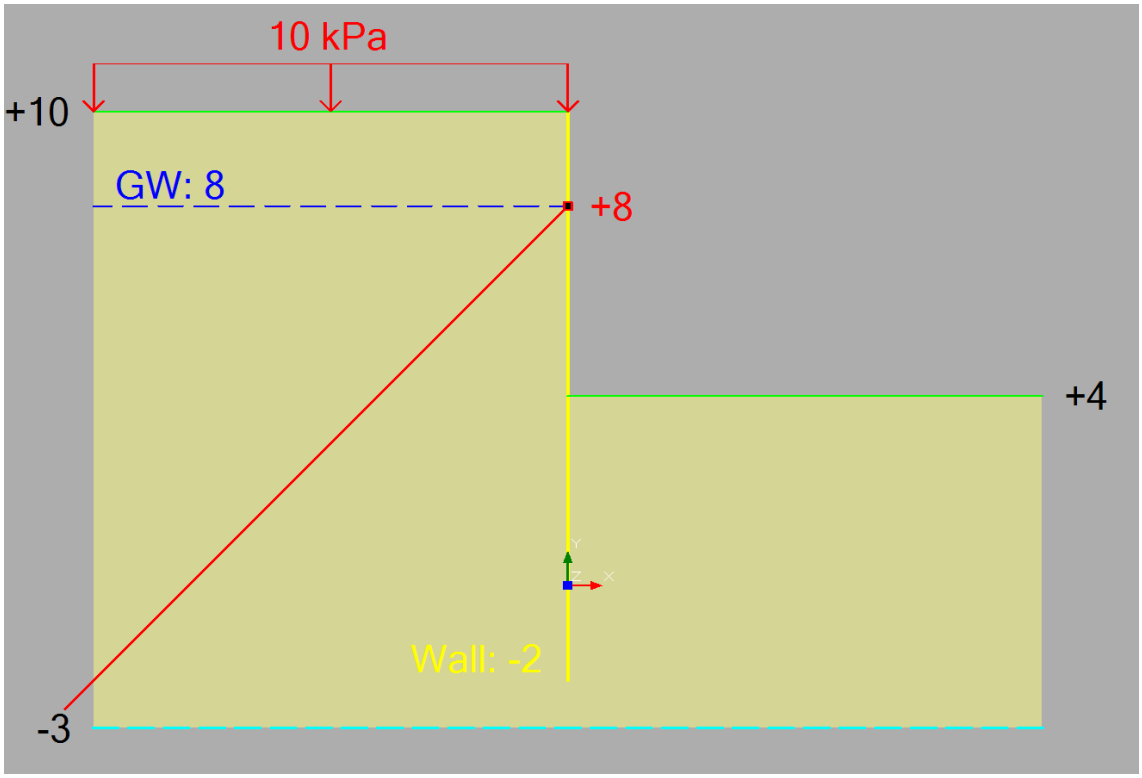
Passiivipaineessa on mallien välillä eroa, joka myös huomataan seinien siirtymän erossa maanpinnan alla. Ero suljetun tilan ja interface-elementtien välillä aiheuttaa siis eroavaisuuksia malleihin, mutta tulokset ovat tarpeeksi samanlaisia, jotta malleja voidaan joissain määrin vertailla keskenään. Aktiivipuolenpaine kasvaa hydrostaattisen paineen mukaisesti, melko tasaisesti ensimmäiset 4 metriä syvyyttä. Tämä viittaisi siihen, että paine

seinän takana syntyy pääosin tai kokonaan vedenpaineesta, sen ensimmäisillä syvyysmetreillä. Koheesiomaa on siis tarpeeksi lujaa, ettei se kohdista painetta seinälle tiettyyn syvyyteen asti, jossa seinä siirtyy vedenpaineen takia enemmän kuin pohjamaa.

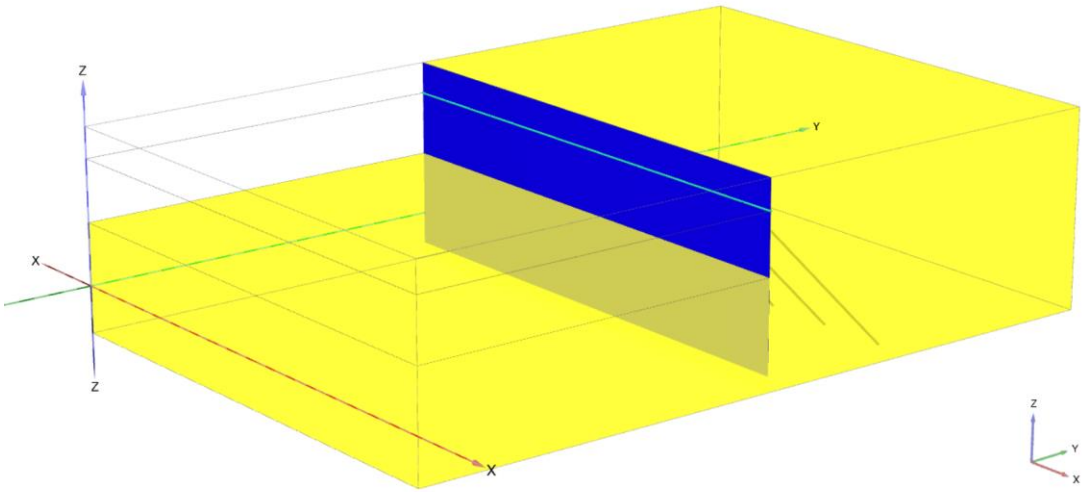
Todellisessa mitoitustilanteessa on arvioitava, käytetäänkö laskennassa suljettua vai avointa tilaa tietyille maakerroksille. Erot tilojen välillä voivat tuottaa hyvin erilaisia tuloksia ja suunnittelijan on myös pohdittava tukiseinän rasitusten aikariippuvuutta. Plaxis-ohjelmassa suljetun tilan käyttö voi johtaa rasitusten aliarvioimiseen, jos seinä tulee säilymään todellisuudessa paikallaan kauan, jolloin huokosvedenpaineet tasaantuvat ja seinälle voi syntyä pohjavedenpaine.

5.2 Yksi tukitaso

Yhden tukitason tapauksessa seinälle määritetään kallioon ankkuroitu tukitaso. Tukiseinä ulottuu nyt syvemmälle ja kaivantoa myös syvennetään. Yhden tukitason geometria näkyy kuvassa 19. Geometria on koheesio- ja kitkamaan tapauksissa sekä laskentaohjelmien välillä sama. Eri vaakapalkkeja ja ankkurivälejä kuitenkin vertaillaan keskenään. Tärkeänä vertailun kohteena on tapaus, jolloin yksi ankkuri vaurioituu ja kuormat jakaantuvat uudelleen eri rakenneosille ja maaperälle.



Kuva 19. *Geometria yhden tukitason tapauksessa*



Kuva 20. *Plaxis-laskentamalli yhdellä tukitasolla*

Kuvassa 20 näkyy vihreä viiva, joka on seinälle mallinnettu palkki ja mustalla seinän takana olevat yksittäiset ankkurit. Vertailtavat palkkiprofiilit näkyvät alla olevassa taulukossa 4. Palkkeja voidaan määrittää laskentamalliin vain Plaxis-ohjelmassa, mutta vertailua tehdään myös erillisen RFEM-laskentaohjelman avulla. Tällöin GeoCalc-ohjelmasta saatu ankkurivoima määritetään kuormaksi RFEM-ohjelmaan, jolloin eri profiilien palkeille saadaan laskettua rasituksia.

Taulukko 4. *Plaxis-palkkien parametrit*

Profiili	HEB 200	HEB 300	HEB 400
Tilavuuspaino	78,5 kN/m^3	78,5 kN/m^3	78,5 kN/m^3
Pinta-ala	0,00781 m^2	0,0149 m^2	0,0198 m^2
Jäyhyysmomentti	5 700 cm^4	25 170 cm^4	57 680 cm^4
Jäyhyysmomentti, heikompi akseli	2 000 cm^4	8 583 cm^4	10 819 cm^4
Kimmomoduuli	210 GPa	210 GPa	210 GPa
Plastisuusparametrit			
Myötöraja	235 MPa	235 MPa	235 MPa
Taivutusvastus	643 cm^3	1 869 cm^3	3232 cm^3
Taivutusvastus, heikompi akseli	306 cm^3	870 cm^3	1104 cm^3

Ankkurit ovat jokaisessa tapauksessa kolmen punoksen kallioankkureita, jotka jännitetään 100 kN esijännitysvoimalla. Todellisuudessa esijännitys on usein suurempi ankkurien toiminnan takaamiseksi, mutta GeoCalc-ohjelman laskenta aiheutti tilanteita, missä liian suuri esijännitys sai seinän siirtymät heittelehtimään suuresti eri suuntiin jokaisen

eri kaivutason kohdalla. Tämä aiheuttaa suurta heittelyä tuloksissa, joita on hankala verrata toisten tulosten kanssa.

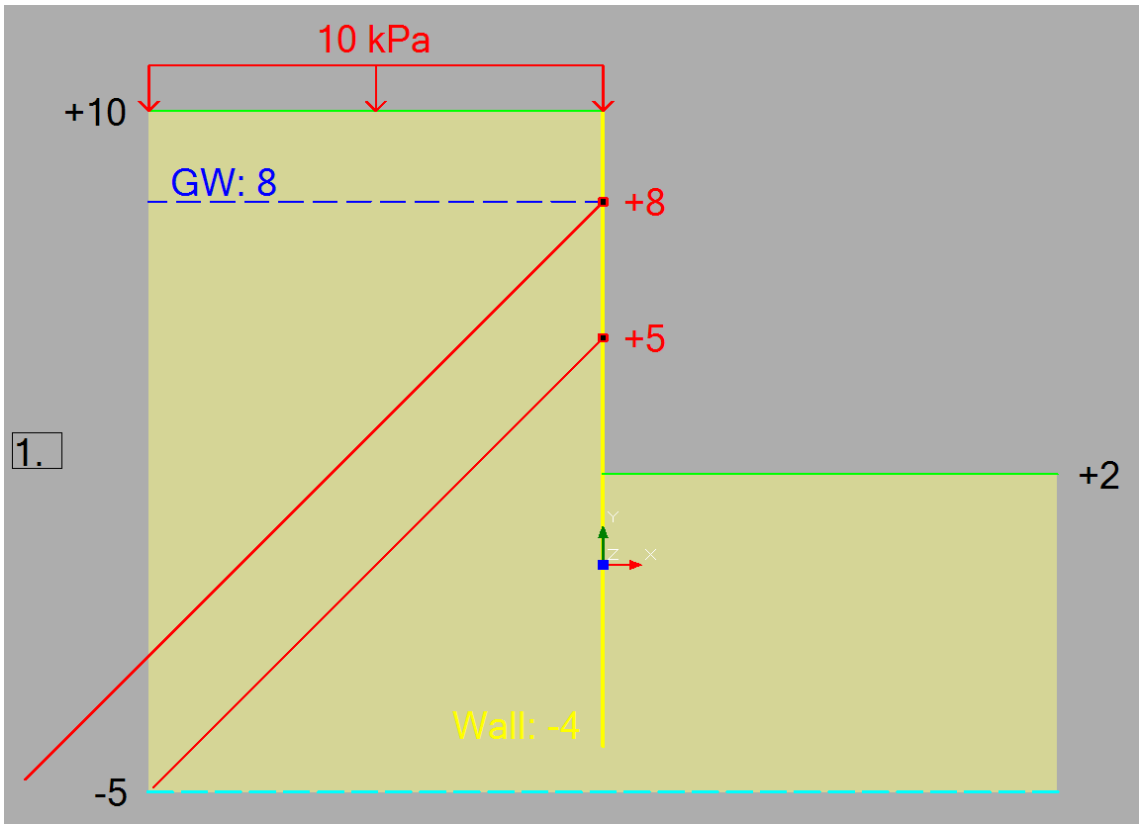
Taulukko 5. *Ankkurien parametrit*

	GeoCalc, 3 x 150 mm^2	Plaxis, 3 x 150 mm^2
Pinta-ala, A	450 mm^2	450 mm^2
Kimmomoduuli, E	210 GPa	210 GPa
Jäykkyys, EA	94 500 kN	94 500 kN
Vapaa pituus, L	15 m	~15 m
Ankkurikulma	45°	45°
Esijännitysvoima	100 kN	100 kN

Plaxis-mallissa ankkurit ovat kiinnitetty toisesta päästä laskentamallin alarajaan, eli siirtymättömään pisteeseen. Ankkurin vapaa pituus vaikuttaa ankkurin venymän suuruuteen ja täten myös muiden rakenteiden liikkeeseen, siksi on tärkeää mallintaa pituus mahdollisimman samanlaisena molemmissa laskentaohjelmissa.

5.3 Kaksi tukitasoa

Kahden tukitason tapauksessa verrataan tukiseinän jäykkyyttä ja tämän vaikutusta kuormien jakautumiseen pysty- ja vaakasuunnassa. Pystysuuntaisen jäykkyyden lisääntyessä kuormien jakaantumien pystysuunnassa ankkuritasojen ja muiden rakenneosien välillä tulisi muuttua.



Kuva 21. *Geometria kahden tukitason tapauksessa*

Ankkurit ovat samantapaisia kuin yhden tukitason tapauksessa, mutta niiden vapaa pituus riippuu nyt tukitasosta, sillä ankkurit ovat tällöin eri etäisyydellä kallionpinnasta. Ankkurit myös esijännitetään korkeampaan 200 kN esijännitykseen. Ylemmän tukitason ankkurien vapaa pituus on noin 18 m ja alemman tason ankkureiden noin 14 m. Vertailtavat ponttiprofiilit näkyvät alla olevassa taulukossa 6.

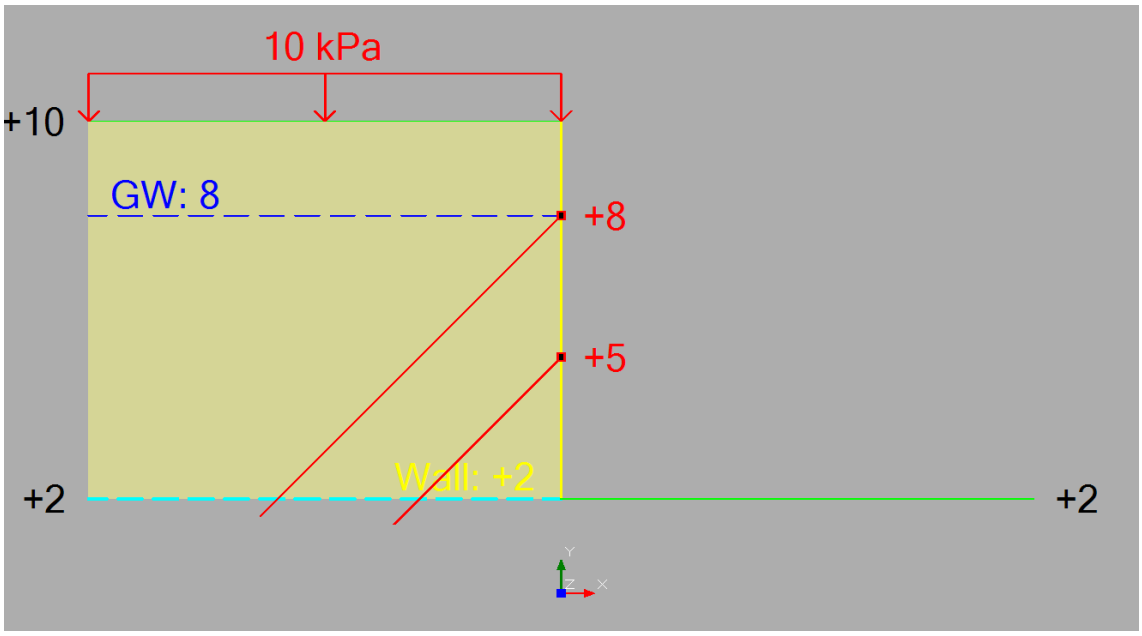
Taulukko 6. *Ponttiseinien parametrit*

GeoCalc	PU 12	PU 22	PU 32
Massa per metri	109,9 kg/m	143,6 kg/m	190 kg/m
Jäyhyysmomentti, I	21 600 cm^4	49 460 cm^4	72 320 cm^4
Kimmomoduuli, E	210 GPa	210 GPa	210 GPa
EI	45 360 kNm^2	103 866 kNm^2	151872 kNm^2
Plaxis	**PU 12**	**PU 22**	**PU 32**
Tilavuuspaino	3,06 kN/m^3	3,20 kN/m^3	4,21 kN/m^3
Levyn paksuus	0,36 m	0,45 m	0,452 m
Jäyhyysmomentti	46 656 cm^4	91 125 cm^4	92 345 cm^4
Kimmomoduuli, pystysuunta	11,67 GPa	13,68 GPa	19,74 GPa
Kimmomoduuli, vaakasuunta	0,58 GPa	0,68 GPa	0,99 GPa
EI, pystysuunta	45 360 kNm^2	103 900 kNm^2	151 900 kNm^2
EI, vaakasuunta	2268 kNm^2	5193 kNm^2	7594 kNm^2

Plaxis-seinien parametrit on saatu Plaxis-valmistajan Bentleyn ladattavasta tietoaineistopaketista. Sivustolla mainitaan, että ponttiseinävalmistaja ArcelorMittal on ollut mukana määrittämässä aineistoa. Profiilien vaakasuuntaisen jäykkyyden määrittämistä ei kuitenkaan ole esitetty sivulla. (Bentley Communities 2024) Vaakasuuntainen jäykkyys vaikuttaa olevan suuruudeltaan noin 5 % pystysuuntaisesta jäykkyydestä. Tämä on todennäköisesti empiirinen arvio, sillä todellisen vaakasuuntaisen jäykkyyden määrittäminen voi olla hankalaa ponttilukkojen käyttäytymisen takia.

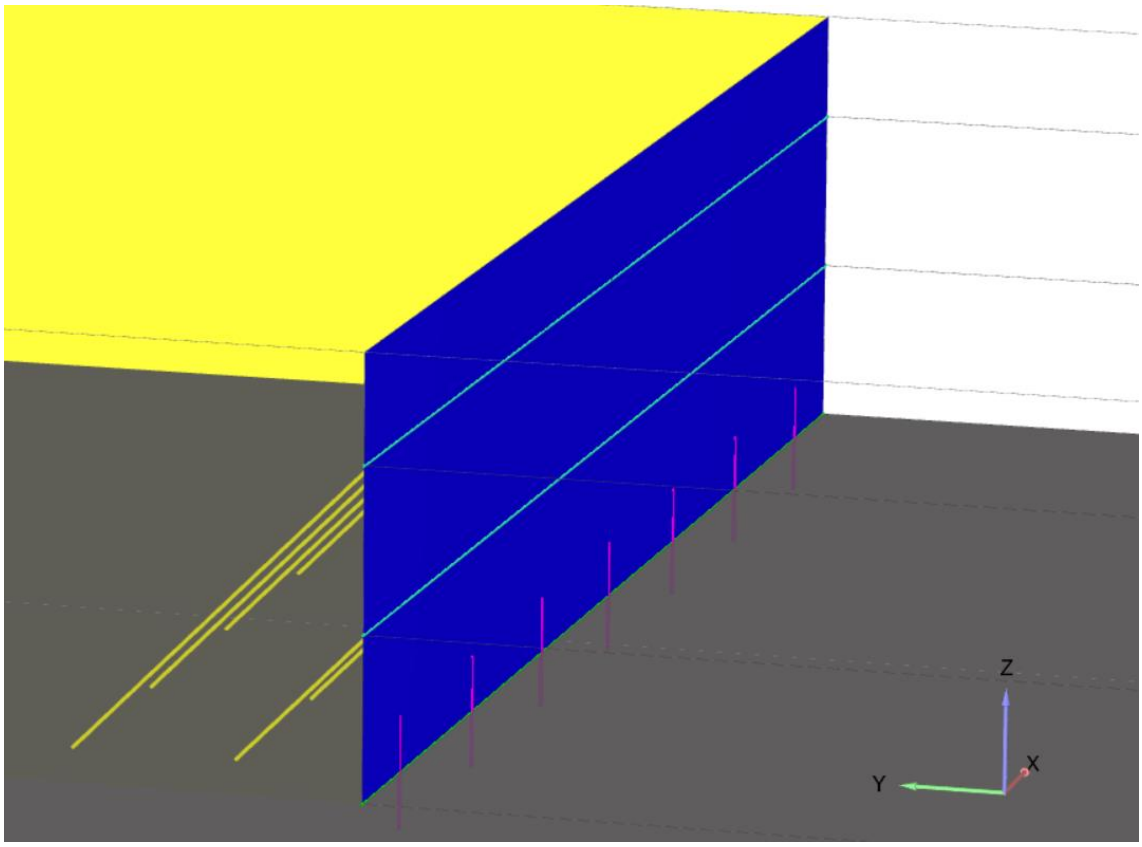
5.4 Kallioon alapäästään tuettu seinä

Kun seinä on tuettu alapäästään kallioon juuripulttien ja/tai juuripalkin avulla, ei sille enää synny tukevaa passiivipainetta. Seinää rasittavan maanpaineen on siis jakaannuttava pelkästään rakenneosille. Juuripulttien tapauksessa on myös tarkasteltava vauriotilanne, jossa yksi juuripalkki vaurioituu, eikä pysty enää vastaanottamaan kuormia. Tarkoituksena on tutkia miten juuripultin vaurioituminen jakaa kuormat muille rakenneosille ja miten teräsbetoninen juuripalkki muuttaa tätä tilannetta.



Kuva 22. *Geometria kallioon alapäästään tuetun seinän tapauksessa*

GeoCalc-ohjelmassa seinän alapään voi kiinnittää paikalleen niveltuen omaisesti. Tällöin kallioon tukevat rakenteet saavat rasituksensa seinän alapään leikkausvoimasta. Plaxis-ohjelmassa juuritapit ja -palkki voidaan mallintaa palkkielementeillä. Juuritappi on tällöin mahdollista asettaa tiettyyn syvyyteen kalliomassaa. Kuvassa 23 näkyy violetteina viivoina juuritapit, jotka ovat kaksi metriä pitkiä ja ulottuvat metrin syvyyteen kallioon. Tukiseinän alapään vihreä viiva on juuripalkki.



Kuva 23. *Plaxis-mallin rakenneosat*

Kallioon tukevien rakenteiden parametrit on esitetty taulukossa 7. Juuritappi mallinnetaan plastisuusteorian mukaan, eli niille voi syntyä pysyviä muodonmuutoksia. Juuritappien etäisyys toisistaan on ankkurien tapaan myös 4,8 m ja ne sijaitsevat x-akselilla samoissa kohdissa kuin ankkurit. Käytännön juuritappijaot ovat yleensä tiheämpiä, mutta tämä jako valittiin vertailun helpottamiseksi. Juuripalkki on elastinen ja sen kimmomoduuli vastaa tyypillistä betonin kimmomoduulia.

Taulukko 7. *Juuritapin ja -palkin parametrit*

	Juuritappi	Juuripalkki
Tilavuuspaino	78,5 kN/m^3	25 kN/m^3
Poikkileikkauksen muoto	Ympyrä, halkaisija 50 mm	Neliö, 300x300 mm
Pinta-ala	0,00193 m^2	0,09 m^2
Jäyhyysmomentti	30,68 cm^4	67 500 cm^4
Kimmomoduuli	210 GPa	30 GPa
Plastisuusparametrit		
Myötöraja	235 MPa	-
Taivutusvastus	12,27 cm^3	-

6. TULOKSET

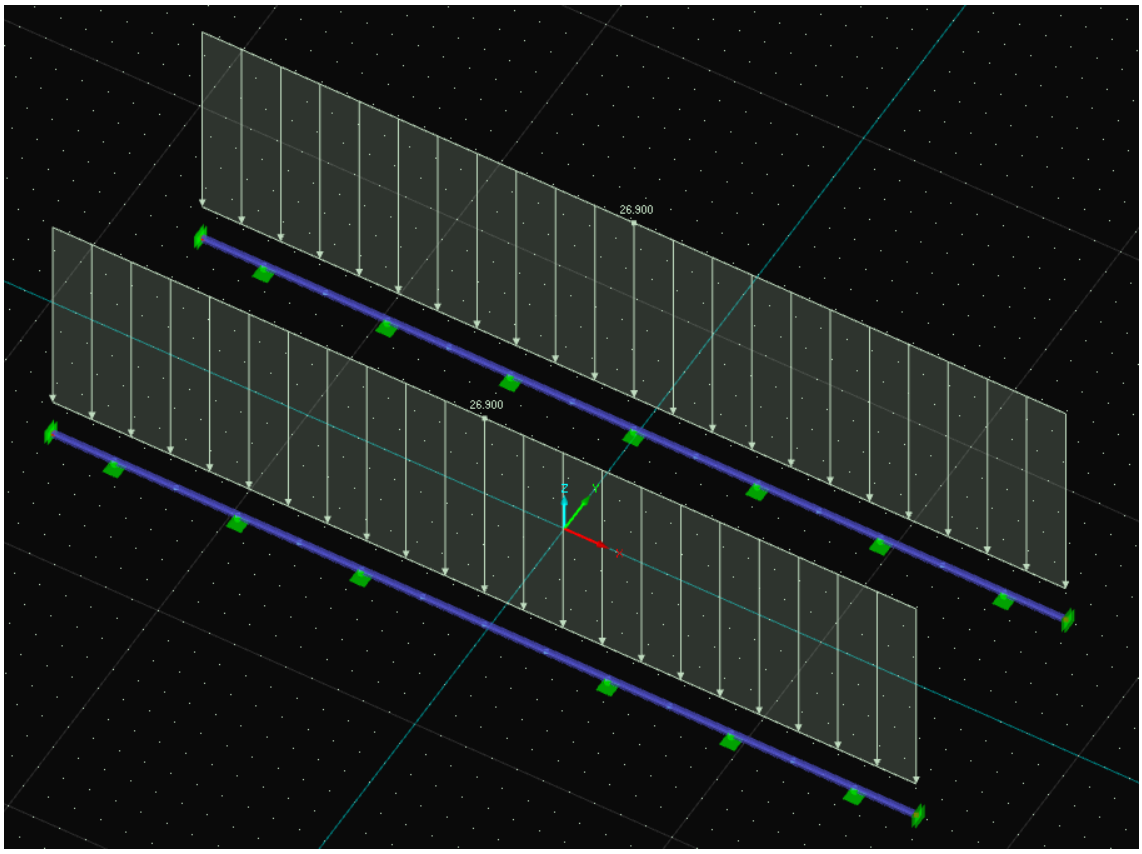
Laskennan tulosten esittäminen on jaettu kategorioihin, joissa vertaillaan tiettyjä laskentamallien ominaisuuksia. Tarkoituksena on esittää tilanteita, missä erot mallien, rakenneosien jne. välillä ovat merkittäviä tai muulla tavalla kiinnostavia, erityisesti tukiseinän vaurionsietokyvyn kannalta.

6.1 Yksi tukitaso: vaakapalkin jäykkyyden vaikutus

Plaxis 3D-ohjelmassa yhden ankkurin vaurioituminen voidaan esittää laskentavaiheena, jossa yksi ankkuri poistetaan mallista. Tällöin se ei enää tue seinää ja seinää kaatavat voimat joutuvat jakautumaan uudelleen. Voimien uudelleenjakautumista selvitettiin ankkurien vaakapalkin jäykkyyden suhteen. Lähtökohtana ajatellaan, että palkin jäykkyys taivutusta vastaan vaikuttaa siihen, jakaantuuko vaurioituneelta ankkurilta tulevat voimat viereisille ankkureille, vai seinälle esimerkiksi passiivipaineena.

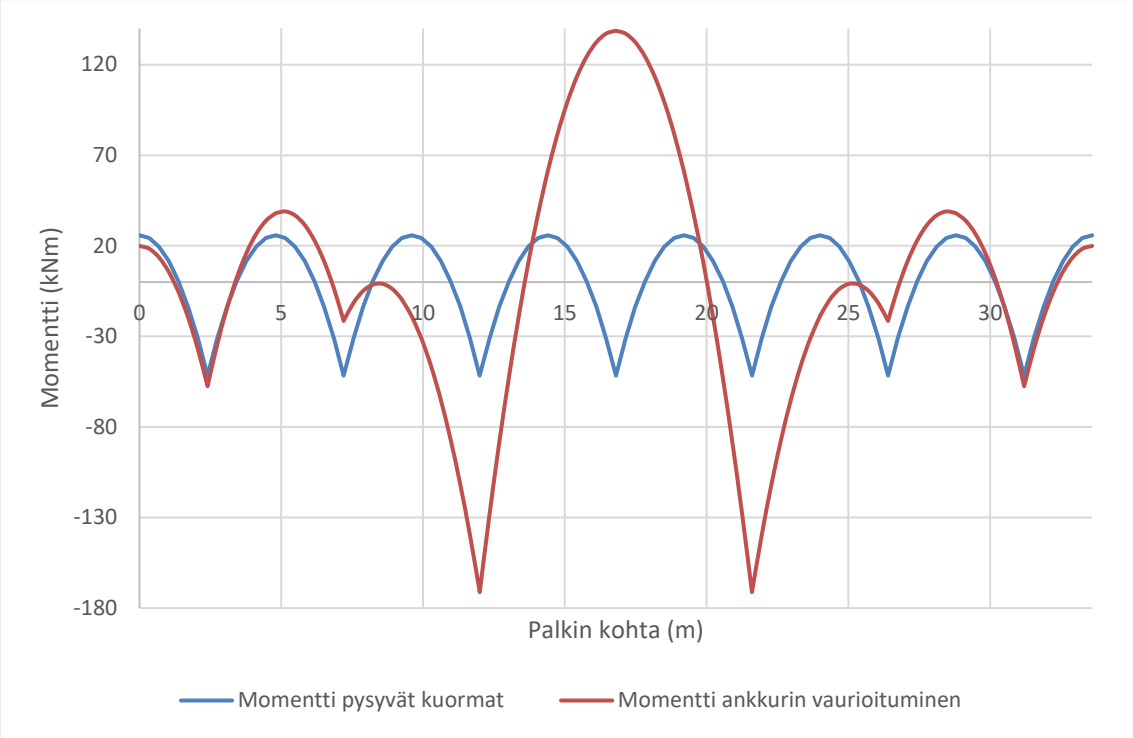
Kitkamaamalleissa vertailtiin HEB 200, 300 ja 400 profiilin palkkeja. Vertailu tehtiin ankkurijaon ollessa 4,8 metriä ja seinän profiilin ollessa PU 12. Plaxis-ohjelmalla ankkurien ja palkin rasitus saadaan suoraan tuloksista, mutta GeoCalc-ohjelma antaa vain yhden ankkurin rasituksen, jolloin itse palkin rasitukset on laskettava käsin tai toisella laskentaohjelmalla. Tähän käytetään RFEM 5 -laskentaohjelmaa, joka on myös elementtimenetelmään perustuva, mutta tarkoitettu pääosin rakennesuunnitteluun. Palkit mallinnetaan jatkuvina ja niiden välituet kuvaavat ankkureita. Tasainen viivakuorma palkille kuvaa maanpaineen vaikutusta ja sen suuruus saadaan ankkurivoimasta, kun siinä otetaan ankkurin kulma huomioon. GeoCalc-laskennan pysyvien kuormien ankkurivoima on 182,3 kN, ankkurijako 4,8 m ja ankkurikulma 45°, jolloin viivakuorma palkille saadaan yhtälöstä 6.1.

$$q_k = \frac{182{,}3kN}{4{,}8m*\sqrt{2}} = 26{,}9kN/m \tag{6.1}$$



Kuva 24. *Vaakapalkkien rakennemallit RFEM-laskentaohjelmassa, HEB 200*

Kuvassa 25 näkyy RFEM-laskennan HEB 200 palkin momenttirasitusjakauma normaalitilanteessa ja yhden ankkurin vaurioituessa. Vaurio mallinnetaan toisella palkilla, jonka keskimmäinen välituki on poistettu. Momenttirasituksessa on selkeä suuri ero, koska palkin jänneväli vaurion kohdalla kaksinkertaistuu. Kentässä momenttien ero on noin 110 kNm, joka vastaa 423 % lisäystä momenttirasitukseen ja tuella momenttien ero on noin 120 kNm, joka vastaa 230 % lisäystä. Palkkien rasitukset ja tukivoimat ovat melko samanlaisia profiilista huolimatta, eli palkin taivutusjäykkyydellä ei vaikuta olevan suurta merkitystä voimien uudelleenjakaantumisen kannalta.



Kuva 25. *HEB 200 palkin momenttirasitus RFEM-laskentamallista*

Palkin tukivoimat muutetaan takaisin ankkurivoimiksi kertomalla ne kertoimella √2. Ankkurivoimien ominaisarvot näkyvät taulukossa 8. Palkille määritettiin myös 10 kPa hyötykuormasta saatu kuorman osuus, jonka avulla murtorajatilan rasitukset kuormitusyhdistelmällä 6.10b saatiin laskettua ja niitä verrattiin vauriotilanteen rasituksiin. Vauriotilanteessa ankkurivoima on kerrottu kertoimella 1,1. Täten saadaan kuva, mikä kuormitustilanne on mitoittava ankkurin kannalta.

Taulukko 8. *RFEM-palkin (HEB 200) tukivoimat muutettuna ankkurivoimiksi (kN) ja ankkurivoiman muutoksen suuruus vauriotilanteessa*

Ankkuri	1	2	3	4	5	6	7
Pysyvä	182	182	182	182	182	182	182
6.10b	276	276	276	276	276	276	276
Vaurio	218	144	358	vaurio	358	144	218
Muutos	-21 %	-48 %	30 %	-100 %	30 %	-48 %	-21 %

Vaurio aiheuttaa suuren lisäyksen vaurioituneen ankkurin viereisille ankkureille. Ankkureiden 2 ja 5 ankkurivoimat kuitenkin vähentyvät. Tässä tapauksessa mitoittavin voima on vaurioituneen ankkurin viereiselle ankkurille syntyvä ankkurivoima. Luvussa 8 esitetään vaihtoehtoinen tapa mallintaa vaakapalkki RFEM-ohjelmalla, jossa pyritään paremmin huomioimaan koko rakennekokonaisuus ja onnettomuustilanteen kuorma palkille.

Vaikka rasitukset eri palkeilla eivät eroa toisistaan suuresti, on siirtymissä suuri ero jäykkyyksien välillä. Taulukossa 9 on RFEM- ja Plaxis-palkkien suurimmat siirtymän arvot pysyvän kuorman ja ankkurin vaurioitumisen tapauksissa. Koska tukiseinän ja ankkurien jäykkyyttä ei RFEM-palkin muodonmuutoksessa huomioida, eivät nämä siirtymät kuitenkaan vastaa todellisuutta. Plaxis-palkeilla nämä piirteet huomioidaan, jolloin palkin siirtymät syntyvät myös esimerkiksi koko tukiseinän siirtymisestä.

Taulukko 9. *RFEM- ja Plaxis-palkkien suurin siirtymän arvo (mm)*

Profiili	HEB 200	HEB 300	HEB 400
RFEM			
Siirtymä pysyvät kuormat	3,9	1,0	0,5
Siirtymä ankkurin vaurioituminen	90,6	20,5	9,7
Plaxis			
Siirtymä pysyvät kuormat	27	27	27
Siirtymä ankkurin vaurioituminen	54,8	48	44,3

Plaxis-laskennan muista tuloksista tutkittiin syntyneet ankkurivoimat eri tapauksissa sekä palkkien momenttirasitus pysyvien kuormien ja ankkurin vaurion tapauksissa. Vauriossa poistuva ankkuri on taas palkin keskimmäinen ankkuri. Myös koevedon suuruutta ja vaikutusta haluttiin tutkia. Koeveto tapahtuu kaivannon ollessa ankkuritason korkeudessa ja vain yksi ankkuri koevedetään, muiden ankkureiden esijännityksen ollessa nolla. Koevedon suuruus on murtorajatilan ankkurivoiman suuruus kerrottuna kertoimella 1,25. Vauriotapauksen ankkurivoima on taas kerrottu kertoimella 1,1 ja sen suuruutta verrataan 6.10b murtorajatilakuormaan. Ankkurivoimien tulokset näkyvät taulukossa 10.

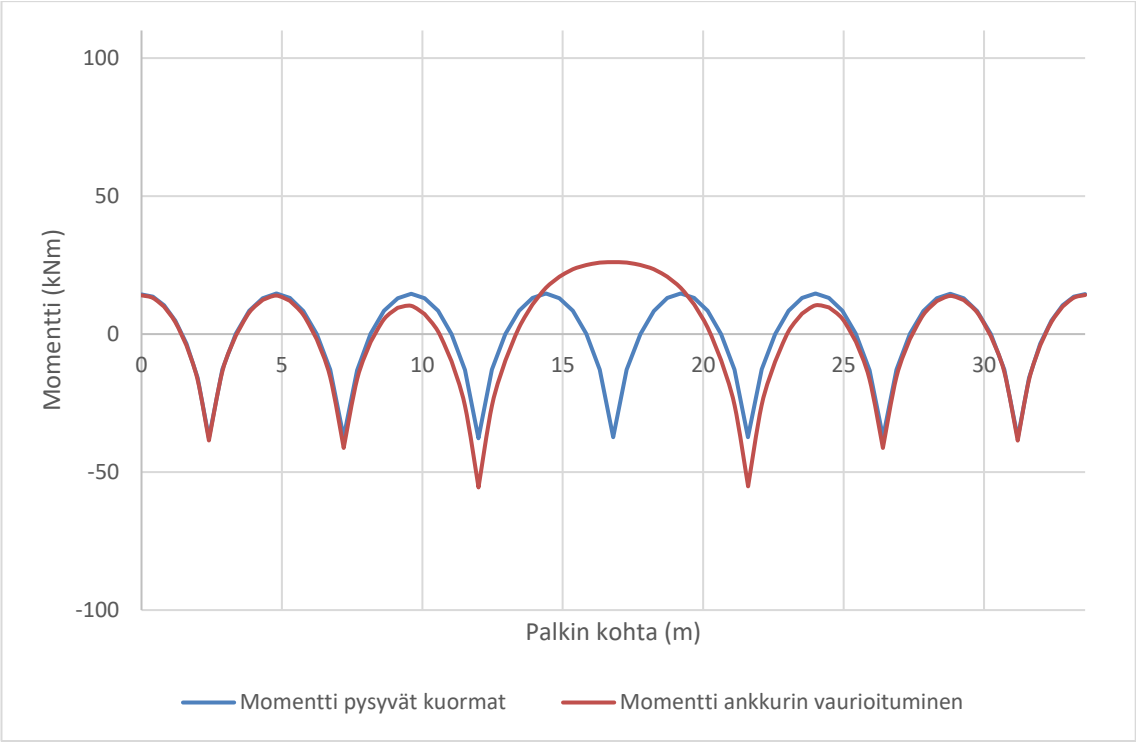
Palkin jäykkyydellä ei vaikuta olevan vaikutusta ankkureille syntyvän kuorman suuruuteen. Tuloksista kuitenkin huomataan, että keskimmäisen ankkurin poistuminen ei lisää viereisten ankkurien kuormaa yhä paljon kuin RFEM-ohjelman palkki. Esimerkiksi HEB 200 palkin tapauksessa ankkurivoimien summa vähenee kokonaisuudessaan 110 kN ankkurin vaurioituessa. Tämä johtuu siitä, että Plaxis-ohjelmassa palkki on osa tukiseinäkokonaisuutta, joka jakaa kuormat ankkurin poistuessa myös seinälle. Seinä jakaa taas kuorman pohjamaalle passiivipaineena ja seinän liikkuessa ankkurin vaurioituessa voi aktiivipaine seinän takana vähentyä.

Taulukko 10. *Plaxis-ankkurivoimat (kN) eri palkkiprofiileille*

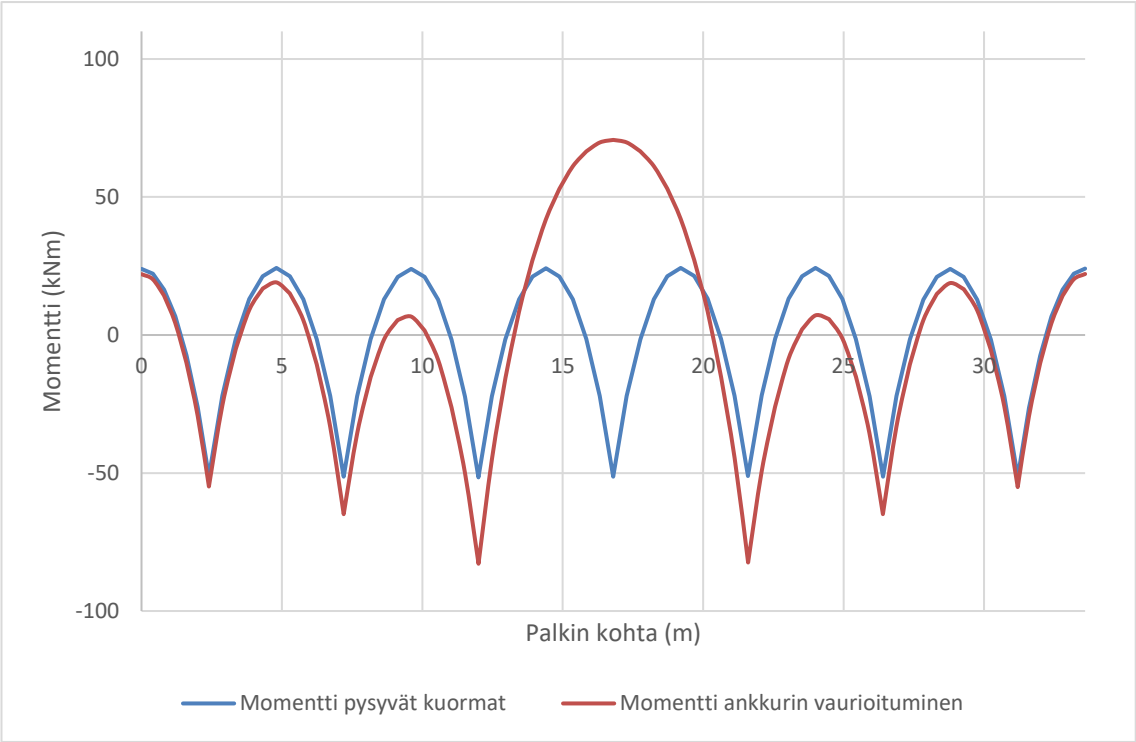
Ankkuri	1	2	3	4	5	6	7
HEB 200							
Pysyvä	213	213	213	213	213	213	213
Pysyvä + hyötykuorma	264	264	264	264	264	264	264
6.10b	321	321	321	321	321	321	321
Koeveto	0	0	-2	401	-2	0	0
Ankkurin vaurioituminen	238	244	278	-	278	244	238
Muutos	-26 %	-24 %	-14 %	-100 %	-14 %	-24 %	-26 %
HEB 300							
Pysyvä	213	213	213	213	213	213	213
Pysyvä + hyötykuorma	264	264	264	264	264	264	264
6.10b	321	321	321	321	321	321	321
Koeveto	0	0	-2	401	-2	0	0
Ankkurin vaurioituminen	238	244	278	-	278	244	238
Muutos	-26 %	-24 %	-14 %	-100 %	-14 %	-24 %	-26 %
HEB 400							
Pysyvä	213	213	213	213	213	213	213
Pysyvä + hyötykuorma	264	264	264	264	264	264	264
6.10b	321	321	321	321	321	321	321
Koeveto	0	0	-3	401	-3	0	0
Ankkurin vaurioituminen	238	245	277	-	277	245	238
Muutos	-26 %	-24 %	-14 %	-100 %	-14 %	-24 %	-26 %

Plaxis-laskennan tapauksessa mitoittavin ankkurivoima ei olekaan enää vauriotilanteessa, vaan murtorajatilassa. RFEM-laskennassa vauriotilanteessa oli 30 % suurempi ankkurivoima ja Plaxis-laskennassa se on 14 % pienempi vaurioituneen ankkurin viereisillä ankkureilla. Koeveto ei vaikuta olennaisesti muihin ankkureihin.

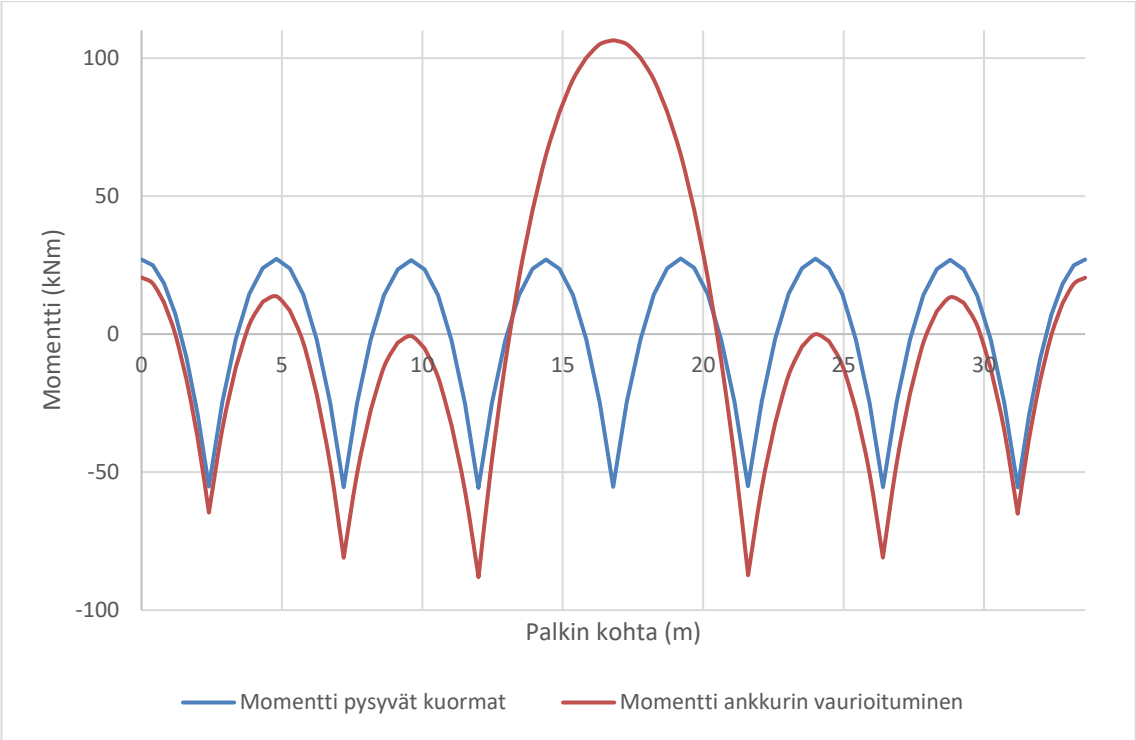
Kuvissa 26–28 näkyy eri palkkien momenttirasituskuvaajat. Nyt taivutusjäykkyydellä on merkittävä ero momenttirasituksen suuruuteen. Huomataan, että löysempi palkki (HEB 200) ei rasitu paljoa enempää ankkurin vaurioituessa. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että palkin ollessa löysempi siirtyy kuorma enemmän muille rakenneosille, eli tukiseinälle. Kentässä momenttien ero on noin 11 kNm, joka vastaa 77 % lisäystä momenttirasitukseen ja tuella momenttien ero on noin 20 kNm, joka vastaa 56 % lisäystä. Kahden muun palkin tapauksessa momenttirasituksen lisäykset ovat: 196 % kentässä ja 60 % tuella HEB 300 palkille sekä 293 % kentässä ja 60 % tuella HEB 400 palkille.



Kuva 26. *HEB 200 palkin momenttirasitus Plaxis-laskentamallista*



Kuva 27. *HEB 300 palkin momenttirasitus Plaxis-laskentamallista*

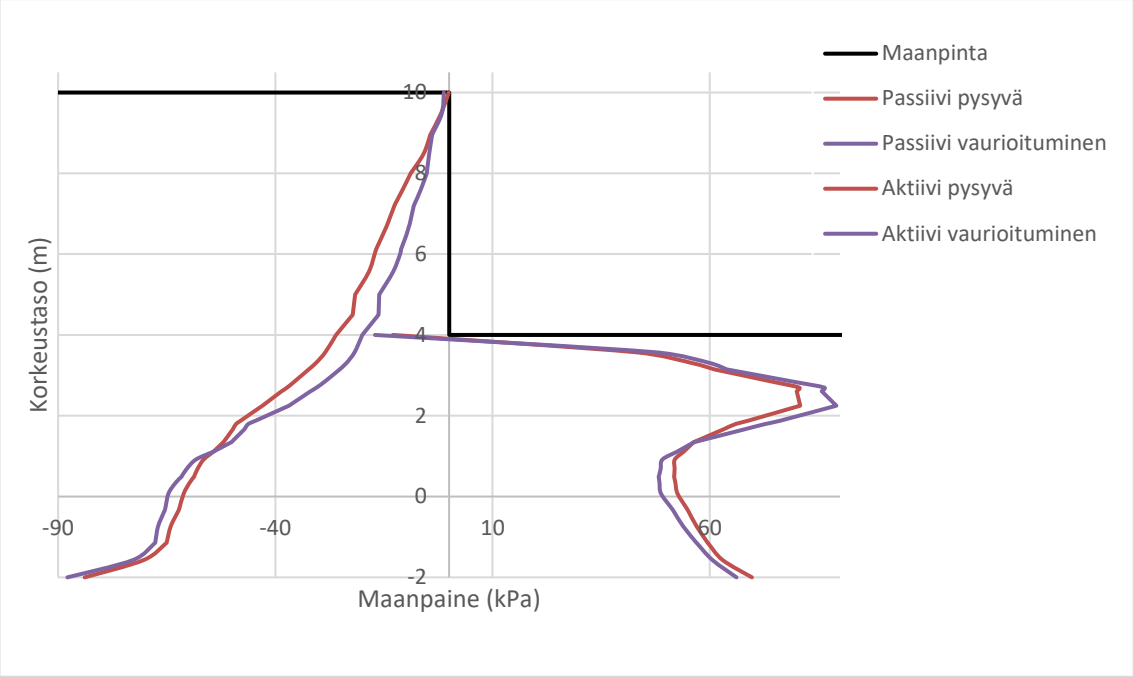


Kuva 28. *HEB 400 palkin momenttirasitus Plaxis-laskentamallista*

Momenttirasitus kasvaa siis paljon vähemmän RFEM-palkkiin verrattuna, jopa jäykän HEB 400 palkin tapauksessa. Rasitukset normaalitapauksessa ennen ankkurin vaurioitumista ovat myös pienempiä löysemmällä palkilla. Esimerkiksi HEB 200 palkilla rasitus on tuella noin 37 kNm, kun taas HEB 400 palkilla se on noin 55 kNm.

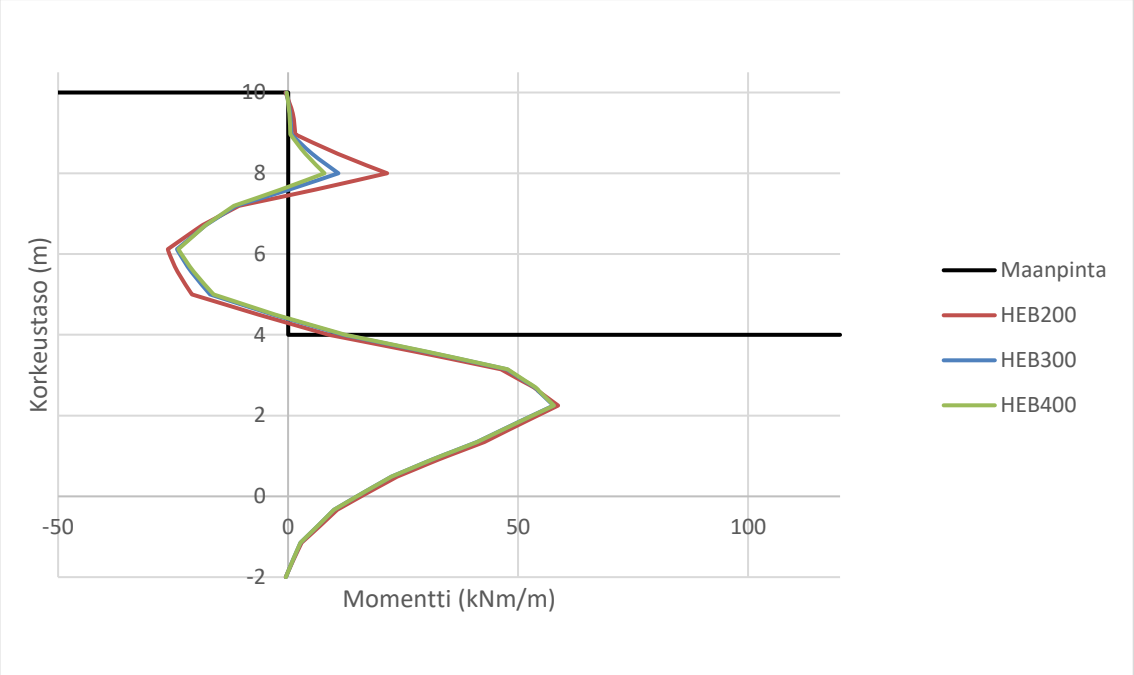
Löysemmän palkin pienempien momenttirasitusten kääntöpuolena on kuitenkin eri rasitukset ja siirtymät ponttiseinälle. Kuvassa 29 näkyy seinälle syntyvän maanpaineen erot pysyvien kuormien ja ankkurin vaurioitumisen tapauksissa. Vaakapalkki on HEB 200. Ankkurin poistuessa tukiseinä myös siirtyy, jolloin aktiivipuolen paine laskee ja passiivipuolen paine kasvaa.

Koevedon vaikutus palkille on merkittävä. Esimerkiksi HEB 300 palkilla koeveto aiheuttaa noin 105 kNm taivutusrasituksen palkille, joka on siis suurempi kuin vauriotilanteesta syntyvä rasitus. Kuitenkin jos palkille lasketaan kuormitusyhdistelmän 6.10b mukainen rasitus ja siihen lisätään mallikerroin 1,15, saadaan palkin mitoittavaksi rasitukseksi noin 137 kNm. Tässä tapauksessa koeveto ei siis mitoittaisi palkkia.



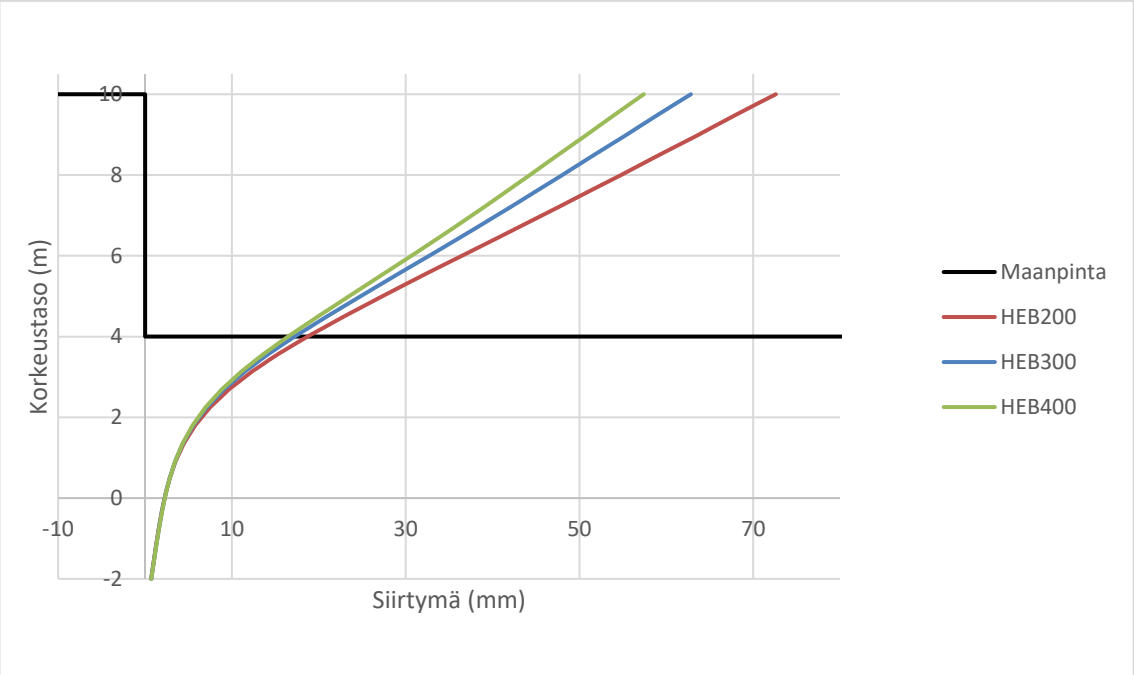
Kuva 29. *Tukiseinän maanpaine pysyvien kuormien ja ankkurin vaurioitumisen tapauksessa, vaurioituneen ankkurin kohdalla, vaakapalkin ollessa HEB 200*

Kuvassa 30 näkyy ponttiseinän momenttirasitus eri palkkiprofiileilla, pysyvillä kuormilla ennen ankkurin vaurioitumista. Ankkuritason kohdalla rasituksessa näkyy ero palkkien välillä, mutta rasituksen suurimmassa kohdassa maan alla ei nähdä merkittävää eroa palkkien välillä. Tukiseinän siirtymä on melkein identtinen palkista riippumatta pysyvän kuorman tapauksessa.

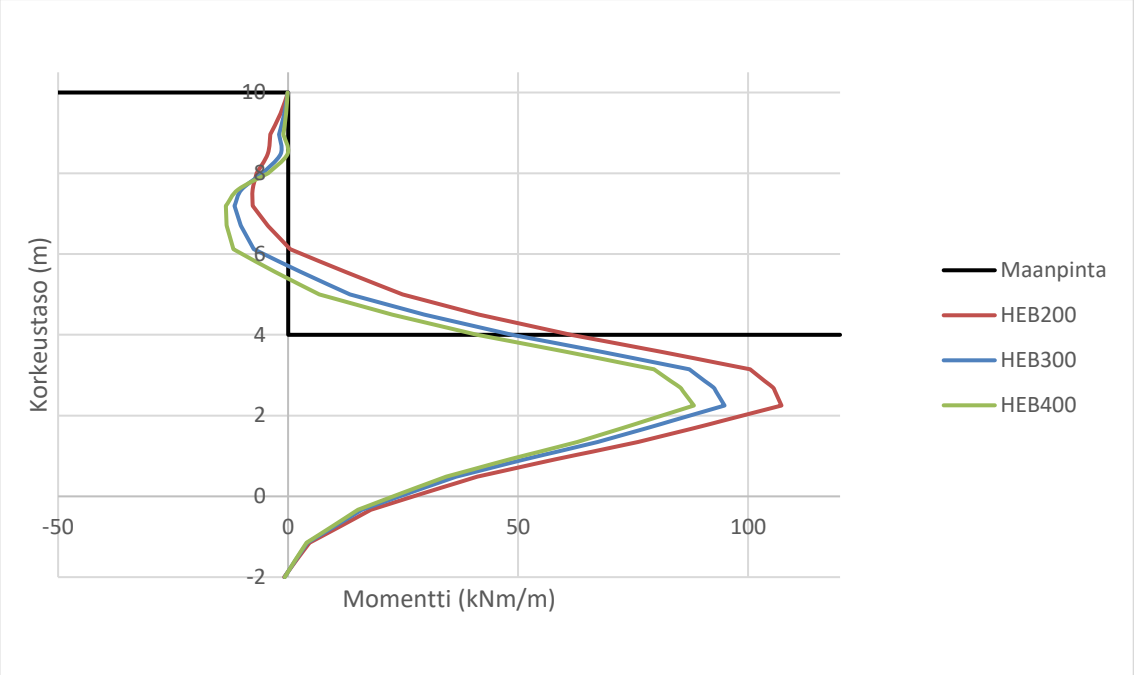


Kuva 30. *Tukiseinän momenttirasitus eri vaakapalkeilla, pysyvän kuorman tapauksessa*

Ankkurin vaurioituessa nähdään kuitenkin suurempi ero siirtymissä (kuva 31) ja seinän momenttirasituksessa (kuva 32). Siirtymässä esiintyy noin 26 % lisäys HEB 400 ja HEB 200 palkkien välillä. Momenttirasituksessa lisäys on noin 23 % HEB 400 ja HEB 200 palkkien välillä. Tällöin lisääntyvä momentti esiintyy jakauman huipulla, eli palkin jäykkyys muuttaa seinän suurinta momenttirasitusta.



Kuva 31. *Seinän siirtymä eri vaakapalkeilla vaurioituneen ankkurin kohdalla*



Kuva 32. *Seinän momenttirasitus eri vaakapalkeilla vaurioituneen ankkurin kohdalla*

Yhden ankkuritason tapauksessa Plaxis-palkin jäykkyys vaikutti suuresti sen momenttirasitukseen, erityisesti ankkurin vaurioituessa. Jäykempi HEB 400 palkki rasittuu huomattavasti enemmän ankkurin vaurioituessa, mutta HEB 200 palkki ei rasitu paljoa enempää. Ero HEB 200 ja HEB 400 palkkien kenttämomentissa on noin 80 kNm. Syy tälle johtuu todennäköisimmin siitä, että jäykempi palkki vastustaa enemmän seinän liikkumista, jolloin sille myös syntyy suuremmat rasitukset. HEB 200 palkki taas on tarpeeksi löysä, että seinä pääsee ankkurin vaurioituessa liikkumaan enemmän ja täten aktiivipaine pienenee sekä kuormat jakautuvat enemmän seinälle ja pohjamaalle. Löysempi palkki kuitenkin aiheuttaa suuremman seinän siirtymän ja momenttirasituksen. Palkin valinta siis vaikuttaa koko rakenteen toimintaan.

RFEM-ohjelmassa palkkien rasitukset olivat samankaltaisia riippumatta siitä, mikä profiili palkilla on. Rasitukset olivat myös huomattavasti suurempia verrattuna Plaxis-palkkeihin. HEB 200 tapauksessa kenttämomentin ero on noin 110 kNm ja HEB 400 tapauksessa noin 30 kNm. Tämä osoittaa, että palkin rasituksiin vaikuttaa koko tukiseinäkokonaisuus ja pohjamaan ominaisuudet, eikä pelkän tuen poistaminen RFEM-palkista välttämättä kuvaa realistista kuormien uudelleenjakaantumista. Ankkurivoimien uudelleenjakaantumiseen Plaxis-ohjelmassa ei suuresti vaikuta palkin jäykkyys. Myöskään vaurioituneen ankkurin viereiset ankkurit eivät kuormitu yhtä suuresti kuin RFEM-palkilla.

6.2 Yksi tukitaso: ankkurijaon vaikutus

Ankkurijako tarkoittaa ankkurien keskeistä etäisyyttä toisistaan samalla tukitasolla. Tarkoituksena oli tutkia, miten ankkurijaon muuttaminen vaikuttaa rakenneosien rasituksiin kitkamaan tapauksessa GeoCalc- ja Plaxis-laskentaohjelmassa. Taulukkoon 11 on kerätty GeoCalc-laskennan tuloksia: 2,4, 4,8, ja 9,6 metrin ankkurijaoilla. Etäisyys siis kaksinkertaistuu eri laskentojen välillä. Ankkurivoiman avulla laskettiin myös RFEM-palkille momenttirasitus. Palkkien profiili on molemmissa ohjelmissa HEB 300 ja ponttiseinän profiili PU 12. Palkin negatiivinen momenttirasitus tarkoittaa rasitusta, jossa palkin kaivannon puoleiselle puolelle syntyy puristusjännitystä (ankkurien kohdilla esiintyvä momenttirasitus) ja seinän negatiivinen momentti tarkoittaa rasitusta, jossa seinän kaivannon puoleiselle puolelle syntyy puristusjännitystä.

Taulukko 11. *GeoCalc-rakenneosien rasitukset eri ankkurijaoilla*

Ankkurijako 2,4 m			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Hyötykuorma	Pohjavesi
Ankkurivoima (kN)	122	145	309
Viivakuorma RFEM palkille (kN/m)	36	43	91
Seinän momentti (kNm/m)	-37	-61	164
Seinän vaakasiirtymä (mm)	12	30	114
RFEM-palkin momentti (kNm)	-17 (vaurio -56)	-21	-44
Ankkurijako 4,8 m			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Hyötykuorma	Pohjavesi
Ankkurivoima	182	223	588
Viivakuorma RFEM palkille	27	33	87
Seinän momentti (kNm/m)	-75	-107	150
Seinän vaakasiirtymä (mm)	41	64	211
RFEM-palkin momentti (kNm)	-52 (vaurio -170)	-63	-166
Ankkurijako 9,6 m			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Hyötykuorma	Pohjavesi
Ankkurivoima	263	329	1116
Viivakuorma RFEM palkille	19	24	82
Seinän momentti (kNm/m)	-111	-151	-188
Seinän vaakasiirtymä (mm)	68	98	364
RFEM-palkin momentti (kNm)	-148 (vaurio -492)	-186	-631

Tulokset osoittavat, että ankkurijaon kaksinkertaistaminen ei suoraan kaksinkertaista syntyvää ankkurivoimaa. Ankkurivoiman muutokseen ankkurijakojen välillä vaikuttaa kuormitustilanne ja se, mikä ankkurijako kaksinkertaistuu. Esimerkiksi 2,4 m ankkurijaon kaksinkertaistaminen kasvattaa ankkurivoimaa pysyvillä kuormilla 1,5 kertaisesti, mutta pohjaveden tapauksessa ankkurivoima kasvaa 1,9 kertaisesti.

Tukiseinän ja vaakapalkin momenttirasitus muuttuu myös eri suhteessa riippuen kuormitustilanteesta. Ankkurin vaurioituessa momenttirasitus palkille kuitenkin kasvaa noin kolminkertaiseksi molemmissa ankkurijaon muutoksissa. Taulukossa 12 näkyy Plaxis-laskennan tulokset, missä ensimmäinen ankkurijaon lisääminen myös kolminkertaistaa momenttirasituksen vaakapalkille. Toisessa muutoksessa rasitus kuitenkin lisääntyy vain noin 1,3 kertaisesti. Alaluvun 6.1 tapaan palkin rasitukset ovat ankkurin vaurioitumisen jälkeen huomattavasti pienempiä verrattuna RFEM-palkkiin. Muissa tapauksissa rasitukset ovat kuitenkin samankaltaisia, tai jopa pienempiä RFEM-palkilla.

Plaxis-mallin tuloksista nähdään, että ankkurin vaurioituminen vaikuttaa myös seinän momenttirasitukseen. Erityisesti 4,8 ja 9,6 m ankkurijaoilla seinän momenttirasitus kasvaa noin 1,6 kertaisesti kun ankkuri vaurioituu. Kun GeoCalc-ohjelmalla ankkurijakoa kaksinkertaistaan pysyvillä kuormilla on seinän momenttirasituksen lisäys samantapainen. Ankkurin vaurioitumisen vaikutus seinän momenttirasitukseen voitaisiin siis mahdollisesti tarkastaa kaksinkertaistamalla ankkurijako GeoCalc-ohjelmassa. On kuitenkin huomioitava kuormitustapauksen vaikutus seinän momenttirasitukselle. Esimerkiksi pohjaveden kuormittaessa seinää, muuttuu momenttirasitus hyvin eri tavalla ankkurijaon muuttuessa.

Taulukko 12. *Plaxis-rakenneosien rasitukset eri ankkurijaoilla*

Ankkuri	Pysyvä	Hyötykuorma	Pohjavesi	Vaurio
Ankkurijako 2,4 m				
Ankkurivoima 1 (kN)	148	177	359	153
2	148	177	359	158
3	148	177	359	172
4	148	177	359	-
5	148	177	359	172
6	148	177	359	158
7	148	177	359	153
Seinän momentti (kNm/m)	42	-43	180	-43
Seinän siirtymä (mm)	12	23	82	24
Palkin momentti (kNm)	-17	-21	-42	28
Ankkurijako 4,8 m				
Ankkurivoima 1 (kN)	212	264	647	216
2	212	264	647	222
3	212	264	647	252
4	212	264	647	-
5	212	264	647	252
6	212	264	647	222
7	212	264	647	216
Seinän momentti (kNm/m)	-60	-123	177	-95
Seinän siirtymä (mm)	36	92	144	63
Palkin momentti (kNm)	-52	-91	-156	-83
Ankkurijako 9,6 m				
Ankkurivoima 1 (kN)	283	357	1205	285
2	283	357	1203	287
3	282	356	1203	310
4	283	357	1196	-
5	283	357	1199	310
6	283	357	1201	288
7	283	357	1205	285
Seinän momentti (kNm/m)	-111	-145	198	-174
Seinän siirtymä (mm)	73	103	368	124
Palkin momentti (kNm)	-87	-114	-352	-105

Ankkurijaolla vaikuttaa olevan monipuolinen vaikutus eri rakenneosien rasituksille. Myös kuormitustapauksella on suuri merkitys siihen, miten rasitukset muuttuvat ankkurijaon muuttuessa. Oikean ankkurijaon valitseminen on siis monimutkainen optimointitehtävä, jos kuormitustilanteita ja tukiseinän rakenneosia on monia.

6.3 Yksi tukitaso: pohjamaan ja vaakapalkin plastisuuden vaikutus

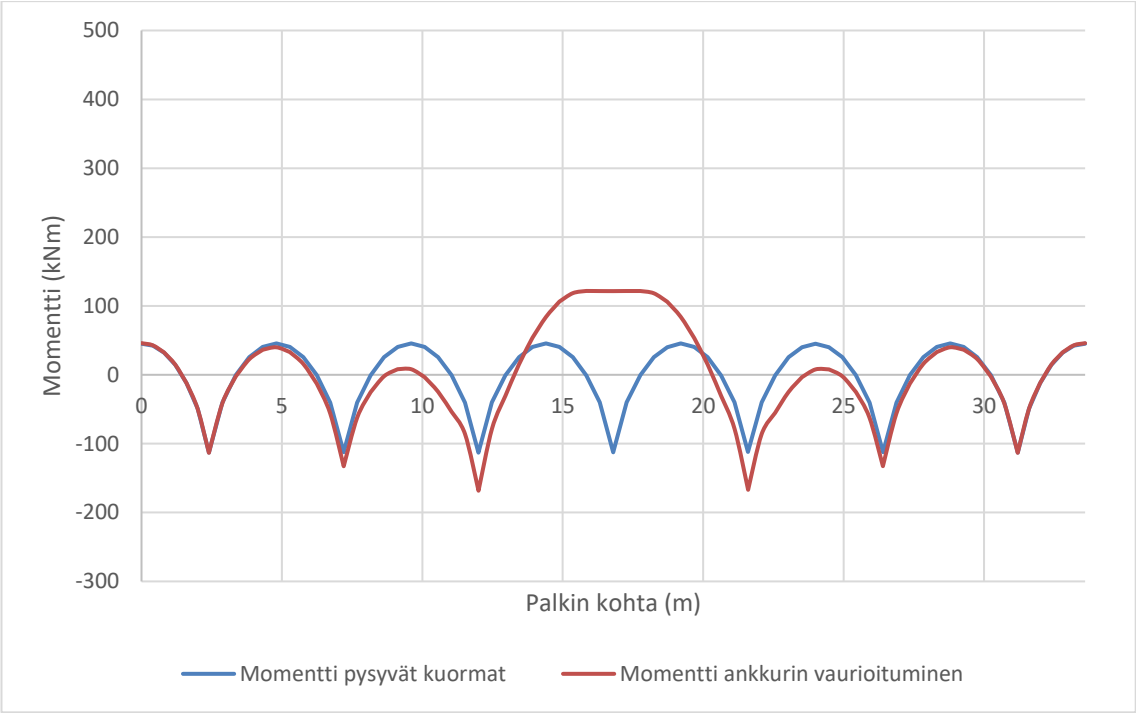
Koheesio- ja kitkamaassa mallinnetuille seinille syntyy pohjamaan ominaisuuksien takia erilaiset rasitukset. Voimme kuitenkin verrata koheesio- ja kitkamaata, tutkimalla miten erilaista kuormien uudelleenjakaantuminen on eri tapauksissa. Taulukossa 13 esitetään palkkien jäykkyyksien vaikutus ankkurivoimiin ja vaakapalkin momenttirasitukseen, kuten kitkamaan tapauksessa. Koeveto määräytyy murtorajatilan 6.10a kuormasta, joka kerrotaan kertoimella 1,25 ja ankkurin vaurioitumisen ominaisarvoja verrataan pysyvän kuorman ominaisarvoihin.

Taulukko 13. *Koheesiomaamallin Plaxis-ankkurivoimat (kN) eri palkkiprofiileille*

Ankkuri	1	2	3	4	5	6	7
HEB 200							
Pysyvä	624	624	624	624	624	624	624
Koeveto	0	-1	-4	1053	-4	-1	0
Ankkurin vaurioituminen	625	640	829	-	829	640	625
Muutos	0 %	3 %	33 %	-100 %	33 %	3 %	0 %
HEB 300							
Pysyvä	627	627	627	627	627	627	627
Koeveto	0	-1	-6	1053	-6	-1	0
Ankkurin vaurioituminen	622	658	829	-	829	658	622
Muutos	-1 %	5 %	33 %	-100 %	33 %	5 %	-1 %
HEB 400							
Pysyvä	626	626	626	626	626	626	626
Koeveto	0	-2	-8	1053	-8	-2	0
Ankkurin vaurioituminen	625	673	815	-	815	673	625
Muutos	0 %	8 %	30 %	-100 %	30 %	8 %	0 %

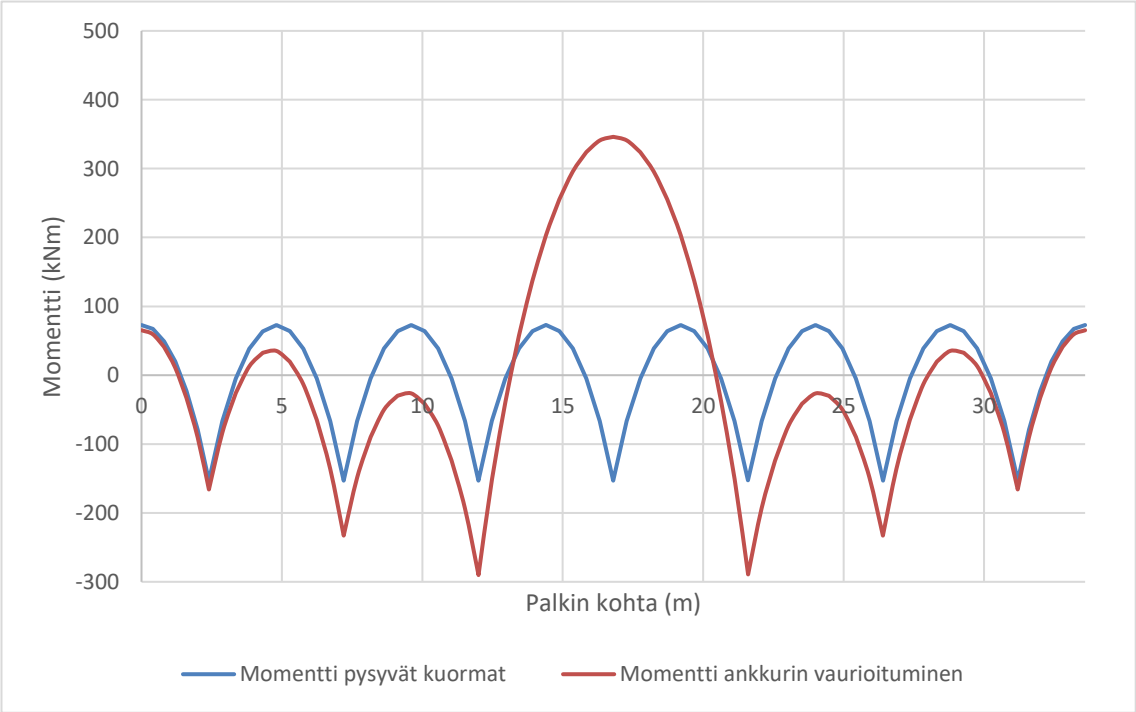
Ankkurivoimat eivät pysyvien kuormien tapauksessa eroa suuresti toisistaan, kuten kitkamaan tapauksessa, sillä palkin jäykkyydellä ei ole merkittävää vaikutusta seinän siirtymään. Koeveto ja ankkurin vaurio kuitenkin osoittavat, että palkin jäykkyys vaikuttaa ankkurivoimiin, kun ankkurien välillä on epäjatkuvuutta. Erityisesti ankkurin vaurioituessa muiden ankkurien voimat muuttuvat suhteessa palkin jäykkyyteen. Jäykemmällä palkilla ankkurivoima voi jakaantua tasaisemmin jokaiselle ankkurille, kun taas löysemmällä palkilla ankkurivoimat keskittyvät vaurioituneen ankkurin viereisille ankkureille.

Toisaalta HEB 200 ja HEB 300 palkeilla viereisten ankkurien voimat ovat identtisiä. Syy tälle selviää, kun tutkitaan palkkien rasituksia tarkemmin. Kuvissa 33, 34 ja 37 esitetään eri palkkien momenttirasituskuvaajat pysyvien kuormien ja ankkurin vaurioitumisen tapauksessa.



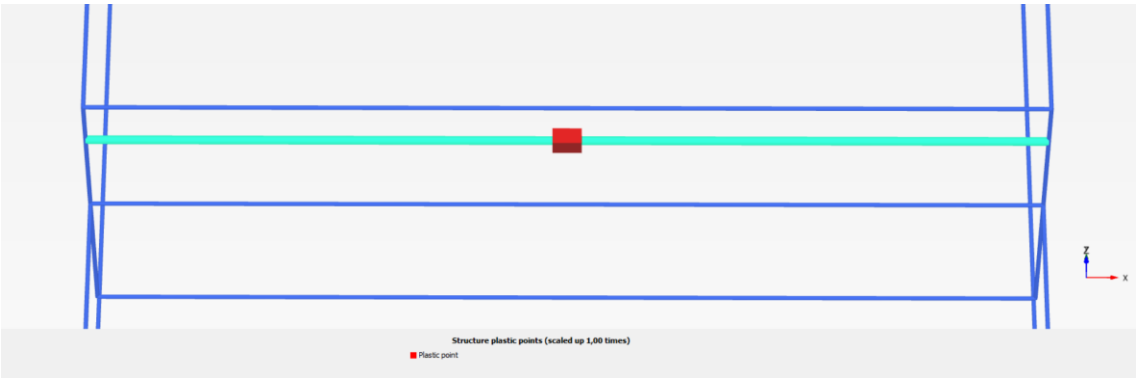
Kuva 33. *HEB 200 palkin momenttirasitus Plaxis-koheesiomaamallissa*

Vaurion tapauksessa huomataan momenttirasituksen tasaantuvan ja saavuttavan maksimiarvonsa HEB 200 palkille. Palkki siis plastisoituu ja täten rasitus alkaa kasvamaan kohdissa, joissa koko poikkileikkaus ei ole vielä saavuttanut myötörajaa. Annetulla 235 MPa myötörajalla on poikkileikkauksen HEB 200 momenttikestävyys 121,4 kNm.



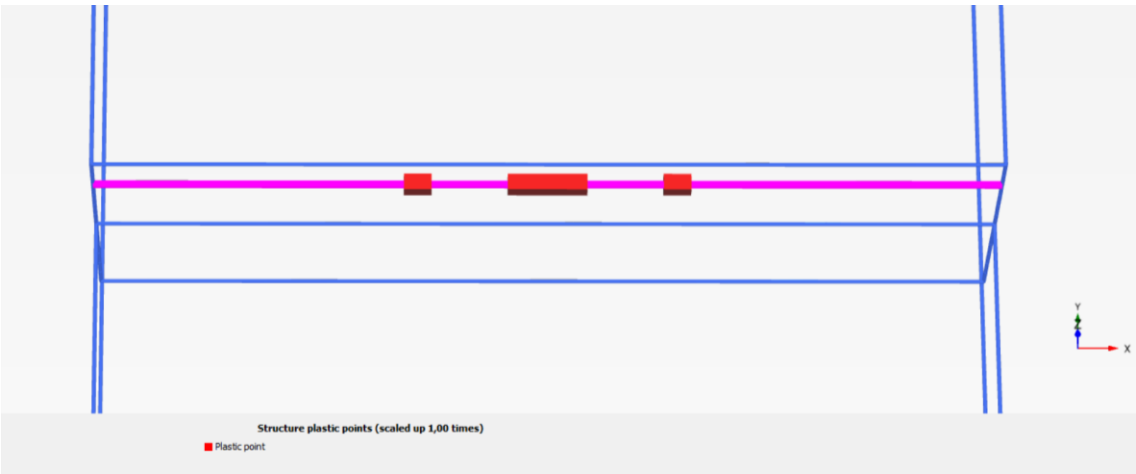
Kuva 34. *HEB 300 palkin momenttirasitus Plaxis-koheesiomaamallissa*

Jäykemmän HEB 300 palkin tapauksessa momenttikestävyys on 350,5 kNm. Myös HEB 300 palkin tapauksessa saavutetaan myötöraja ja vaurioituneen ankkurin kohdalle syntyy plastiset pisteet. Tämä ilmenee tutkimalla Plaxis-tulosten solmuja, jotka ovat saavuttaneet myötörajansa (kuva 35).



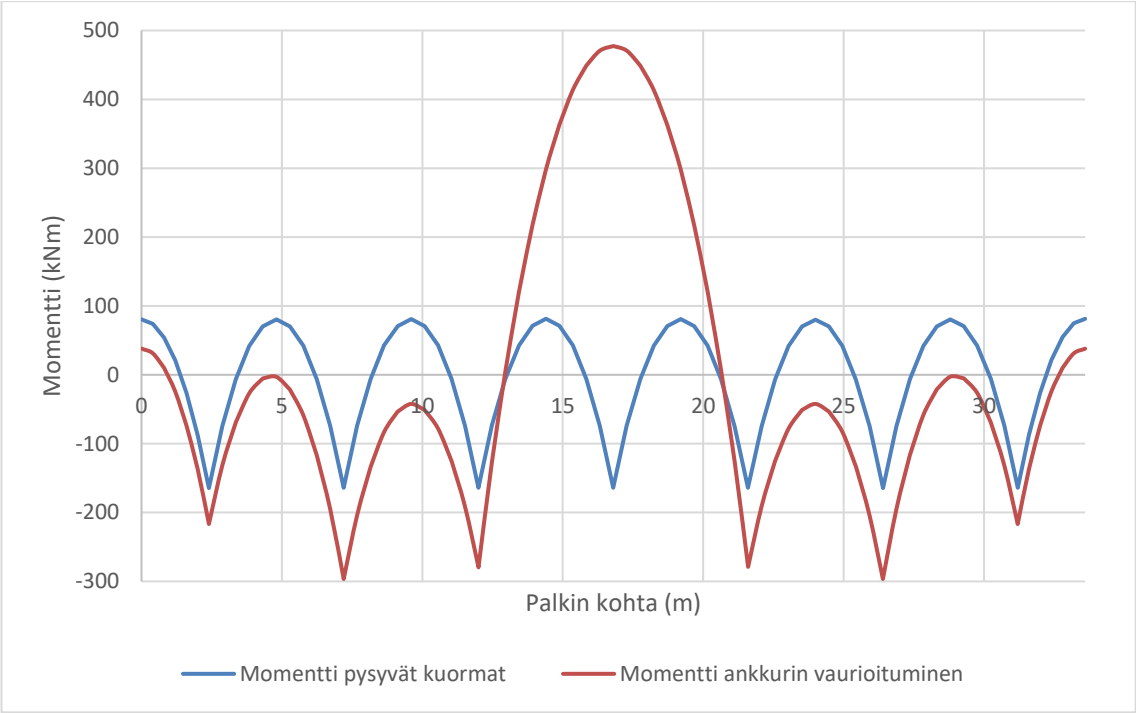
Kuva 35. *HEB 300 palkin plastiset pisteet ankkurin vaurioituessa Plaxis-koheesiomallissa*

Kuvassa 36 näkyy HEB 200 palkin plastiset pisteet ankkurin vaurioituessa koheesiomaamallissa. Pisteitä on huomattavasti enemmän verrattuna HEB 300 palkkiin ja pisteitä esiintyy myös vaurioituneen ankkurin viereisten ankkurien kohdalla.



Kuva 36. *HEB 200 palkin plastiset pisteet ankkurin vaurioituessa Plaxis-koheesiomallissa*

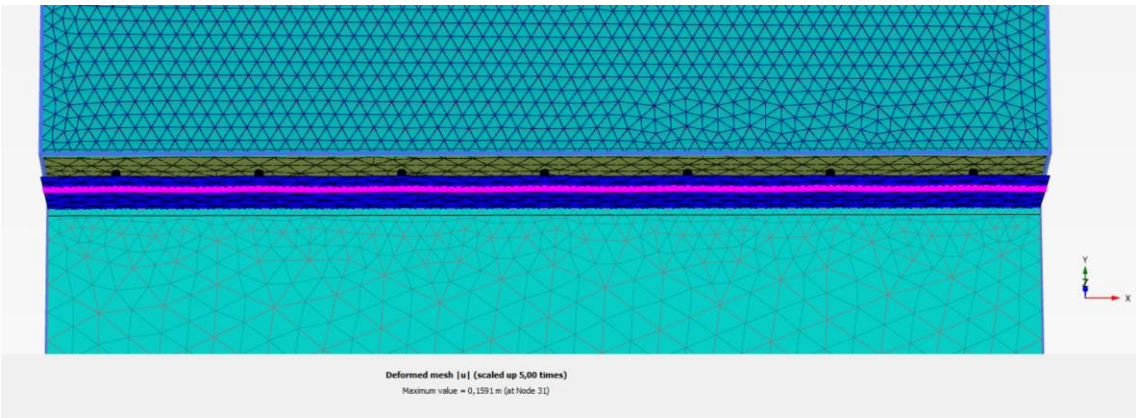
Tulokset osoittavat, että vaakapalkilla on teoreettisesti kapasiteettia jakaa kuormia jopa myötörajan saavuttamisen jälkeen. Lisäksi voidaan olettaa, että plastisten muodonmuutosten haitat eivät ole yhtä suuria, kun tukiseinärakenne on jo ankkurin kohdalla vaurioitunut. Vaakapalkilla ja täten koko tukiseinällä olisi siis enemmän vaurionsietokykyä tarjottavana, jos plastisten pisteiden syntyminen sallitaan vauriotilanteessa.



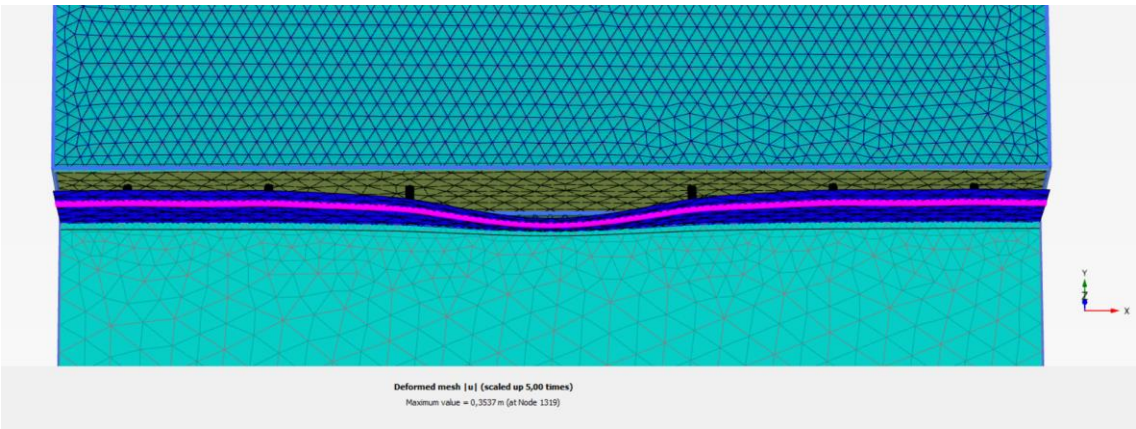
Kuva 37. *HEB 400 palkin momenttirasitus Plaxis-koheesiomaamallissa*

Jäykimmälle HEB 400 palkille ei synny plastisia pisteitä, mutta sille syntyvät rasitukset ovat myös paljon suurempia, riippumatta siitä onko plastisuutta saavutettu vai ei. Toinen huomioitava asia on se, että ehjien ankkurien kohdilla suurin momenttirasitus ei esiinny vaurioituneen ankkurin viereisillä ankkureilla vaan niitä viereisillä ankkureilla. Tämä ilmiö esiintyy myös kitkamaamallissa, kun pohjavedenpinnan vaikutuksen alaisena yksi ankkuri otetaan pois ja vaakapalkkina on HEB 400. Ilmiö siis todennäköisesti johtuu pohjaveden aiheuttamasta suuresta paineesta, eikä maamallien eri lujuuksista.

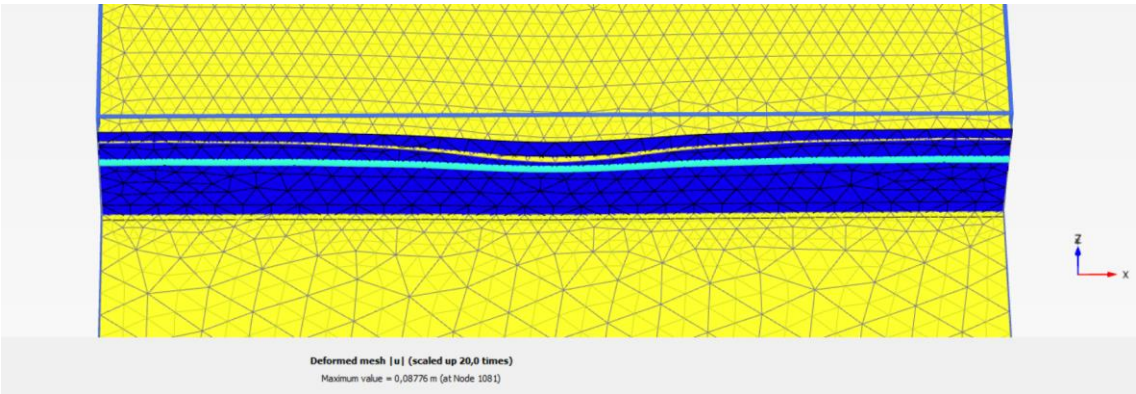
Jos mallien käyttäytymistä tutkitaan tarkemmin, nähdään, että koheesiomaamallissa seinän ja pohjamaan väliin jää selkeä rako, kun taas kitkamaa siirtyy seinän mukana. Ero nähdään vertaamalla kuvia 38 ja 40, joissa näkyy koheesio- ja kitkamaamallien liioitellut siirtymät ankkurin vaurioituessa. Koheesiomaalle siirtymät ovat viisinkertaisia ja kitkamaalle 20 kertaisia. Kuvassa 38 näkyy koheesiomaamallin siirtymät pysyvien kuormien tapauksessa, jossa myös huomataan rako seinän ja pohjamaan välissä. Rako osoittaa, että seinälle syntyvä paine on raon kohdalla täysin hydrostaattisesta pohjavedenpaineesta aiheutuvaa. Pohjamaa kuitenkin myös siirtyy, tosin vähemmän kuin seinä, eikä se täten kohdista maanpainetta seinälle raon kohdalla.



Kuva 38. *Koheesiomallin liioitellut siirtymät pysyvien kuormien tapauksessa*



Kuva 39. *Koheesiomallin liioitellut siirtymät ankkurin vaurioitumisen tapauksessa*



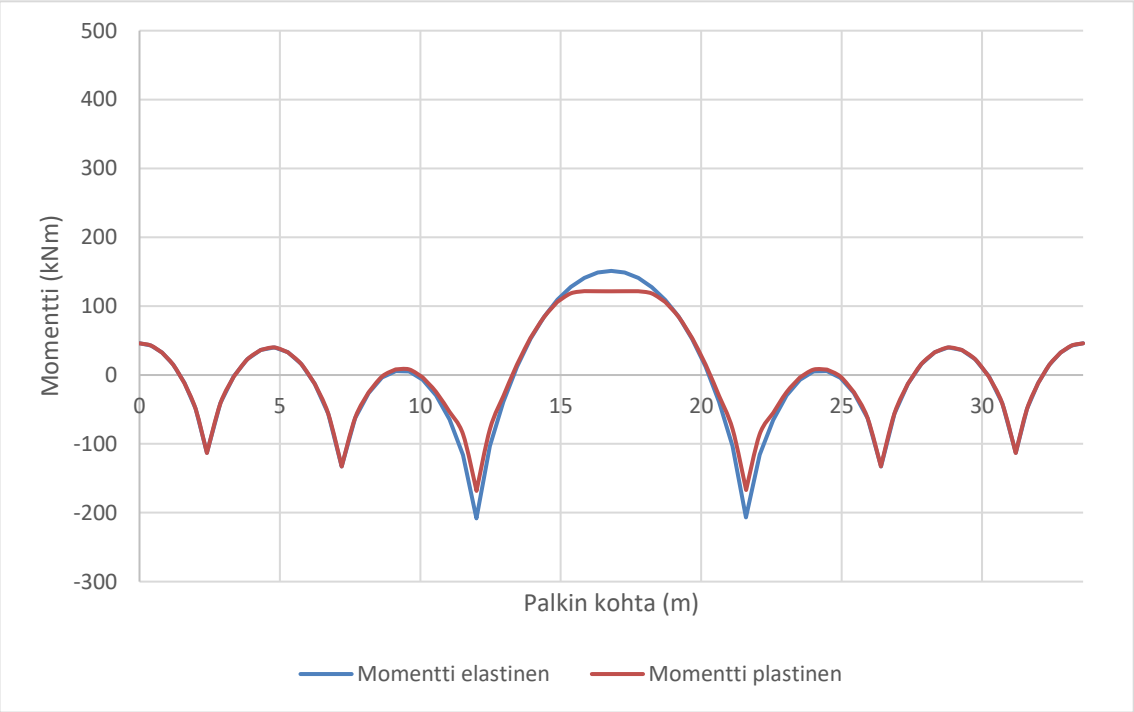
Kuva 40. *Kitkamaamallin liioitellut siirtymät ankkurin vaurioitumisen tapauksessa*

Raon syntyminen osoittaa hankaluuden mallintaa koheesiomaata käytännön tarkoituksiin. Vaikka rako teoriassa voi syntyä, ei tukiseinän mitoitusta olisi järkevää tehdä tällä oletuksella, sillä ajan kuluessa ja eri kuormitusten alaisena pohjamaa todennäköisesti siirtyy ja täyttää raon. Plastisuusteorian käyttö vaakapalkin mallintamisessa ei myöskään välttämättä vastaa todellisuutta, sillä tukiseinien toteutukseen liittyy usein suuria epävarmuustekijöitä.

Lopuksi verrataan miten HEB 200 palkin rasitukset eroavat, kun palkkia ei mallinneta plastisuusteorialla. Palkille syntyy tällöin loputtomasti palautuvaa elastista muodonmuutosta, joka johtaa erilaiseen momenttirasitusjakaumaan ja ankkurivoimien jakautumiseen. Taulukosta 14 nähdään, että erot ankkurivoimien välillä eivät kuitenkaan ole suuria. Vaurioituneen ankkurin viereisille ankkureille syntyy hieman suuremmat ankkurivoimat verrattuna plastisen palkin tapaukseen.

Taulukko 14. *Elastisen ja plastisen HEB 200 palkin ankkurivoimien jakautuminen ankkurin vaurioitumisen tapauksessa*

Ankkuri	1	2	3	4	5	6	7
HEB 200							
Ankkurin vaurio elastinen	625	638	833	-	833	638	625
Ankkurin vaurio plastinen	625	640	829	-	829	640	625



Kuva 41. *Elastisen ja plastisen HEB 200 palkin momenttirasitukset ankkurin vaurioitumisen tapauksessa*

Momenttirasituksessa huomataan suurempia eroja. Vaurioituneen ankkurin kohdalla momenttirasitus kasvaa 30 kNm, kun plastisesta muodonmuutoksesta aiheutuvaa jäykkyydenmuutosta ei huomioida.

6.4 Kaksi tukitasoa: seinän jäykkyyden vaikutus

Tukiseinän taivutusjäykkyyden vaikutusta kuormien jakautumiseen verrataan, laskemalla samat tapaukset taulukossa 6 esitetyillä tukiseinäprofiileilla. Tarkasteltavat tapaukset ovat pysyvät kuormat, eli kaivu lopulliseen tasoon ja eri tukitasojen ankkurin vaurioituminen. GeoCalc-ohjelmassa ankkurin vaurioituminen kuvataan kaksinkertaistamalla kyseisen tukitason ankkurijako normaalista 4,8 metristä 9,6 metriin. GeoCalc-laskennan tulokset näkyvät taulukossa 15. Ankkurivoimat on jaettu väriasteikkoihin tulosten havainnollistamiseksi.

Taulukko 15. *GeoCalc-laskennan ankkurivoimat ja tukiseinän momenttirasitus*

PU 12			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Taso 1 ankkurivoima (kN)	237	342	279
Taso 2 ankkurivoima (kN)	261	314	297
Seinän momentti (kNm/m)	60	-78	-73
Tason 1 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 44 %, alapuoliselle ankkurille = 20 %			
Tason 2 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 13 %, yläpuoliselle ankkurille = 18 %			
PU 22			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Taso 1 ankkurivoima (kN)	244	324	278
Taso 2 ankkurivoima (kN)	250	294	276
Seinän momentti (kNm/m)	62	-108	-91
Tason 1 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 33 %, alapuoliselle ankkurille = 18 %			
Tason 2 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 10 %, yläpuoliselle ankkurille = 14 %			
PU 32			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Taso 1 ankkurivoima (kN)	245	313	276
Taso 2 ankkurivoima (kN)	246	285	269
Seinän momentti (kNm/m)	-67	-123	-100
Tason 1 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 28 %, alapuoliselle ankkurille = 16 %			
Tason 2 vaurion ankkurivoimien muutos: viereiselle ankkurille = 9 %, yläpuoliselle ankkurille = 13 %			

Tukiseinän jäykistäminen lisää ankkuritason 1 rasitusta, mutta vähentää tason 2 rasitusta pysyvillä kuormilla. Jäykempi seinä siis jakaa ankkurivoimat tasaisemmin eri tukitasoille. Ankkurin vaurioituessa selvästi kriittisempi tapaus on ensimmäisen ankkuritason vaurio. Seinän jäykistäminen vähentää kuitenkin ankkureille vauriosta syntyvää lisäkuormaa huomattavasti. Ensimmäisen ankkuritason vaurio aiheuttaa PU 12 profiilin seinällä 44 % voiman lisäyksen viereisille ja 20 % alapuoliselle ankkurille, kun taas PU 32 profiilin seinällä lisäykset ovat vain 28 % viereisille ja 16 % alapuolisille ankkureille. Seinän jäyk-

kyyden kasvattaminen lisää kuitenkin sille syntyvää momenttirasitusta. Seinän rasituksen kannalta ankkuritason 1 vaurio on myös kriittisin tapaus. Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty Plaxis-laskennan tulokset.

Taulukko 16. *Plaxis-laskennan ankkurivoimat (kN)*

Ankkuri	1	2	3	4	5	6	7
PU 12 pysyvät kuormat							
Tukitaso 1	284	284	284	284	284	284	284
Tukitaso 2	281	281	281	281	281	281	281
PU 12 tukitaso 1 vaurio							
Tukitaso 1	287	294	322	vaurio	322	294	287
Tukitaso 2	284	288	304	325	304	288	284
Ankkurivoimien summan muutos = -1,9 %, viereiselle ankkurille = 13 %, alapuoliselle ankkurille = 16 %							
PU 12 tukitaso 2 vaurio							
Tukitaso 1	286	289	300	312	300	289	286
Tukitaso 2	283	286	295		295	286	283
Ankkurivoimien summan muutos = -4,4 %, viereiselle ankkurille = 5 %, yläpuoliselle ankkurille = 10 %							
PU 22 pysyvät kuormat							
Tukitaso 1	270	270	270	270	270	270	270
Tukitaso 2	256	256	256	256	256	256	256
PU 22 tukitaso 1 vaurio							
Tukitaso 1	274	279	295		295	279	274
Tukitaso 2	259	262	273	286	273	262	259
Ankkurivoimien summan muutos = -3,1 %, viereiselle ankkurille = 9 %, alapuoliselle ankkurille = 12 %							
PU 22 tukitaso 2 vaurio							
Tukitaso 1	272	275	281	290	281	275	272
Tukitaso 2	258	260	265		265	260	258
Ankkurivoimien summan muutos = -4,8 %, viereiselle ankkurille = 4 %, yläpuoliselle ankkurille = 7 %							
PU 32 pysyvät kuormat							
Tukitaso 1	269	269	269	269	269	269	269
Tukitaso 2	253	253	253	253	253	253	253
PU 32 tukitaso 1 vaurio							
Tukitaso 1	273	277	291		291	277	273
Tukitaso 2	256	259	268	280	268	259	256
Ankkurivoimien summan muutos = -3,5 %, viereiselle ankkurille = 8 %, alapuoliselle ankkurille = 11 %							
PU 32 tukitaso 2 vaurio							
Tukitaso 1	271	273	280	287	280	273	271
Tukitaso 2	255	257	261		261	257	255
Ankkurivoimien summan muutos = -5 %, viereiselle ankkurille = 3 %, yläpuoliselle ankkurille = 7 %							

Taulukko 17. *Plaxis-laskennan tukiseinän momenttirasitus*

PU 12			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Seinän momentti (kNm/m)	58	-71	-74
PU 22			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Seinän momentti (kNm/m)	-81	-114	-104
PU 32			
Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Seinän momentti (kNm/m)	-89	-129	-114

Seinän jäykkyydellä on myös Plaxis-ohjelmassa suuri vaikutus ankkurivoimien jakautumiseen vaurion syntyessä. Osittain muutokset ovat pienempiä kuin GeoCalc-laskennassa ja osittain suurempia. Kuitenkaan suurinta ankkurivoimaa, mitä GeoCalc-laskennassa saavutettiin ei saavuteta Plaxis-laskennassa. Ankkurivoimien muutokset viereisille ja ylä-/alapuolisille ankkureille on myös huomattavasti pienempiä. Suurimman muutoksen ollessa 13 % PU 12 tapauksessa viereisille ankkureille, kun GeoCalc-laskennassa suurin muutos on 44 % samassa tapauksessa. Muutokset ovat Plaxis-laskennassa suurempia pystysuunnassa molemmissa tapauksissa, mutta GeoCalc-laskennassa ne ovat suurempia vaakasuunnassa ensimmäisen tukitason vaurioituessa ja pystysuunnassa toisen tukitason vaurioituessa.

Ankkurivoimien summan muutos myös muuttuu seinän jäykkyyden kasvaessa Plaxis-laskennassa. Summan muutoksella tarkoitetaan yhden ankkurin poistuessa syntyvän ankkurivoimien summan erotusta pysyvien kuormien ankkurivoimien summasta. Toisin sanoen ankkureille jää kokonaisuudessaan pienempi ankkurivoima, yhden ankkurin poistuessa. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että seinän siirtyessä aktiivipuolen maanpaine laskee ja passiivipuolen maanpaine kasvaa, jolloin seinä välittää suuremman osan kuormasta pohjamaalle.

Ankkurin vaurion lisärasitus tukiseinälle ja muille ankkureille voidaan siis mallintaa pidentämällä kyseisen ankkuritason ankkurijakoa GeoCalc-ohjelmassa. Tulosten vertaus Plaxis-laskentaan kuitenkin osoittaa, ettei ankkurijaon kaksinkertaistaminen aina tuota samanlaisia tuloksia ankkurivoimien uudelleenjakaantumisessa. Tämä todennäköisesti johtuu ohjelmien eri tavasta mallintaa ankkuritasot.

6.5 Kallioon alapäästään tuettu seinä: plastinen tai elastinen juuritappi

Jos tukiseinä halutaan mallintaa kallioon alapäästään tuettuna GeoCalc-ohjelmassa, on sen alapää määritettävä nivelellisesti tuetuksi. Tällöin tukiseinän alapäähän muodostuu leikkausrasitusta, jota voidaan käyttää hyväksi juuripalkkien ja/tai -tappien mitoittamiseen. Seinän alapäähän syntyvä leikkausvoima on siten kerrottava juuritappien jaolla, jotta saadaan selville yhdelle juuritapille syntyvä rasitus. Plaxis-ohjelmassa juuritapit voidaan kuitenkin mallintaa palkkielementteinä, jolloin ne tukevat seinää vain kyseisetä kohdasta ja niille syntyvät rasitukset saadaan suoraan laskennasta.

Tarkoituksena oli selvittää, miten yksittäisten juuritappien mallintaminen elastisena ja plastisena eroaa 2D tapauksesta, missä seinän alapään leikkausvoima jakautuu valitun juuritappijaon mukaan. Laskenta tehtiin koheesiomaamallin avulla ja tukitasojen vaurioitumisen vaikutusta haluttiin myös tutkia. Taulukossa 18 on esitetty GeoCalc-laskennan tulokset ankkurivoimille ja seinän alapään leikkausvoima, joka on kerrottu juuritappien jaolla 4,8 m.

Taulukko 18. *GeoCalc-laskennan tulokset (kN) eri tilanteissa*

Kuormitustapaus	Pysyvä	Taso 1 vaurio	Taso 2 vaurio
Taso 1 ankkurivoima	700	1292	806
Taso 2 ankkurivoima	493	605	575
Juuritappi leikkausvoima	662	624	730

Juuritappien leikkausvoima kasvaa, kun toinen tukitaso vaurioituu, mutta vähenee kun ensimmäinen tukitaso vaurioituu. Voimien uudelleenjakautuminen riippuu siis pitkälti siitä, mikä tukitaso vaurioituu, kuten alaluvussa 6.4 huomattiin. Taulukossa 19 on esitetty Plaxis-laskennan tulokset. Elastiset ja plastiset juuritappielementit käsiteltiin erikseen. Ohjelma mahdollistaa myös juuritapin vaurioitumisen mallintamisen, jolloin tämän tilanteen vaikutukset muille rakenneosille saadaan myös selvitettyä.

Taulukko 19. *Plaxis-laskennan tulokset (kN) eri tilanteissa*

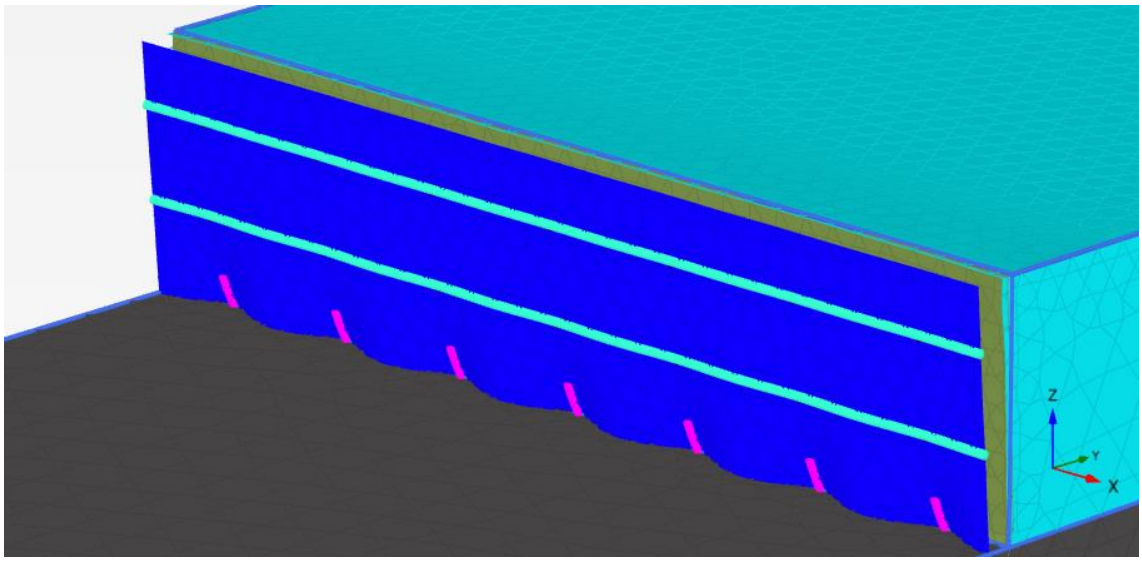
Ankkuri/juuritappi	1	2	3	4	5	6	7
Elastinen pysyvät kuormat							
Tukitaso 1	565	565	565	565	565	565	565
Tukitaso 2	795	795	795	795	795	795	795
Juuritapit	239	239	239	239	239	239	239
Elastinen tukitaso 1 vaurio							
Tukitaso 1	555	571	717	vaurio	717	571	555
Tukitaso 2	786	790	911	1103	911	790	786
Juuritapit	243	233	224	212	224	233	243
Elastinen tukitaso 2 vaurio							
Tukitaso 1	559	562	637	755	637	562	559
Tukitaso 2	790	783	881		881	783	790
Juuritapit	244	233	248	328	248	233	244
Elastinen juuritappi vaurio							
Tukitaso 1	563	541	500	432	500	541	563
Tukitaso 2	796	760	844	1377	844	760	796
Juuritapit	245	231	316		316	231	245
Plastinen pysyvät kuormat							
Tukitaso 1	566	566	566	566	566	566	566
Tukitaso 2	798	798	798	798	798	798	798
Juuritapit	232	232	232	232	232	232	232
Plastinen tukitaso 1 vaurio							
Tukitaso 1	556	571	718		718	571	556
Tukitaso 2	788	793	915	1107	915	793	788
Juuritapit	237	226	216	203	216	226	237
Plastinen tukitaso 2 vaurio							
Tukitaso 1	560	563	638	757	638	563	560
Tukitaso 2	793	786	885		885	786	793
Juuritapit	237	227	240	313	240	227	237
Plastinen juuritappi vaurio							
Tukitaso 1	564	543	501	431	501	543	564
Tukitaso 2	798	763	847	1378	847	763	798
Juuritapit	238	225	306		306	225	238

Juuritappien leikkausvoimassa on melko suuri ero verrattuna GeoCalc-tuloksiin. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että GeoCalc-ohjelmassa seinä on kokonaan kiinnitetty alapäästään, mutta Plaxis-ohjelmassa seinän alapää pääsee liikkumaan, jolloin juuritappien rasitukset jäävät pienemmiksi. Ankkurivoimien jakaantumisessa nähdään myös ero. GeoCalc-ohjelmassa ensimmäinen ankkuritaso vaikuttaa rasittuvan enemmän ja Plaxis-ohjelmassa toinen ankkuritaso vaurioituu enemmän. Sama ilmiö nähtiin alaluvussa 6.4,

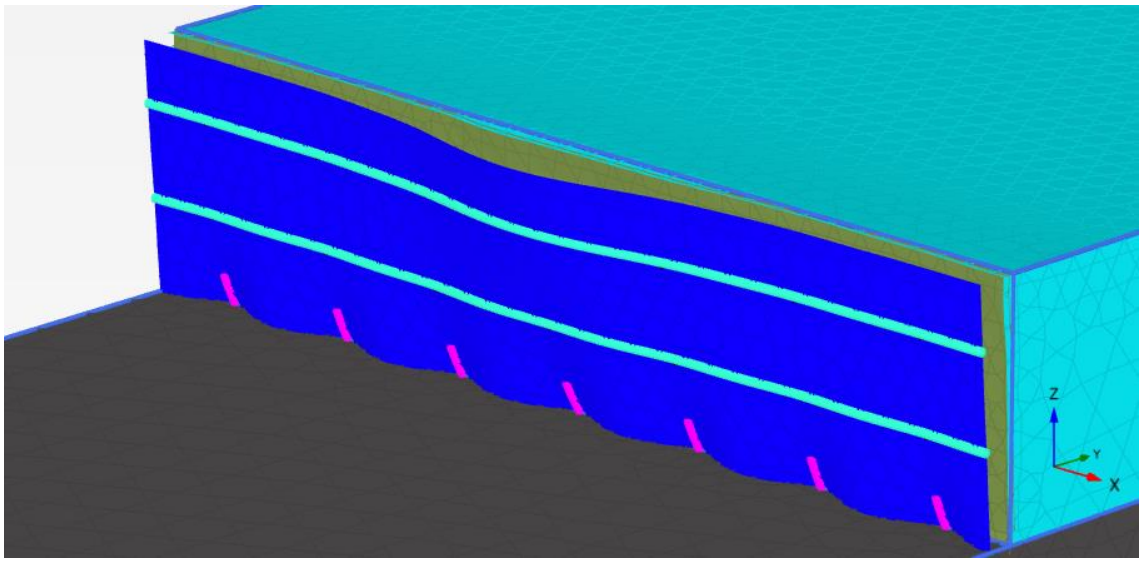
mutta erot olivat pienempiä. Syy tähän voi olla tukitasojen jäykkyyksien määrittämisen ero ohjelmien välillä.

Ankkurivoimissa on elastisten ja plastisten juuritappien välillä pieni ero. Kun juuritapit mallinnetaan elastisena, voi niille syntyä suuremmat rasitukset ja täten vähemmän voimaa siirtyy ankkureille. Juuritapeille syntyvän rasituksen ero on kuitenkin suurempi, kuin ankkurivoimissa tapahtuva ero. Voidaan siis sanoa, että juuritappien mallintaminen plastisena johtaa kokonaisuudessaan pienempään rasitukseen rakenneosille. Plastisille juuritapeille syntyy kuitenkin enemmän muodonmuutosta plastisten nivelien takia, jolloin erityisesti seinän alapäähän syntyy suurempaa siirtymää.

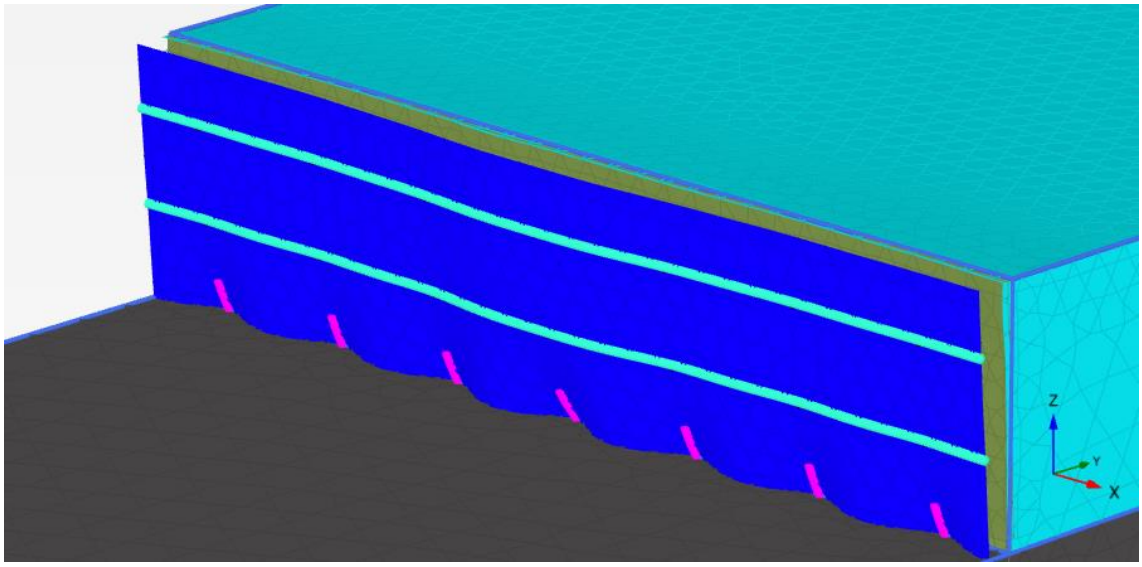
Vauriotilanteiden aiheuttamat siirtymät ja rasitukset seinälle sekä muille rakenneosille ovat selvästi riippuvaisia siitä, mikä tukitaso vaurioituu. Tämä voidaan havaita visuaalisesti Plaxis-laskennan tuloksista, missä mallin siirtymät voidaan visuaalisesti liioitella. Seuraavassa kuvasarjassa (kuvat 42–45) näkyy plastisten juuripalkkien Plaxis-mallien siirtymät visuaalisesti liioiteltuna 20 kertaisesti. Järjestys on sama kuin taulukon 19 tapauksien järjestys.



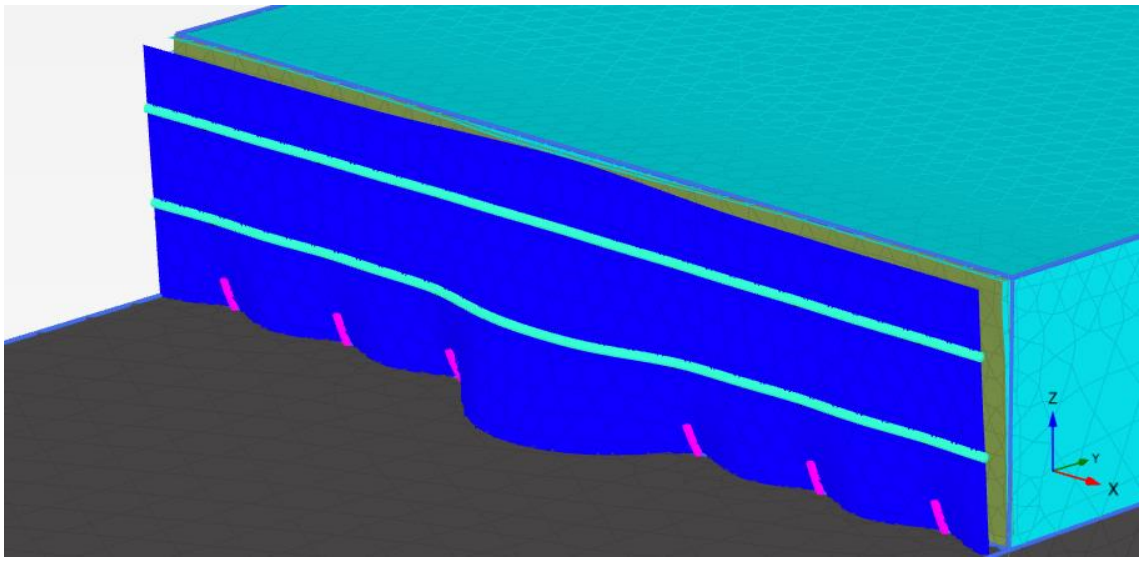
Kuva 42. *Plaxis-mallin siirtymät pysyvillä kuormilla*



Kuva 43. *Plaxis-mallin siirtymät ankkuritason 1 vaurioituessa*

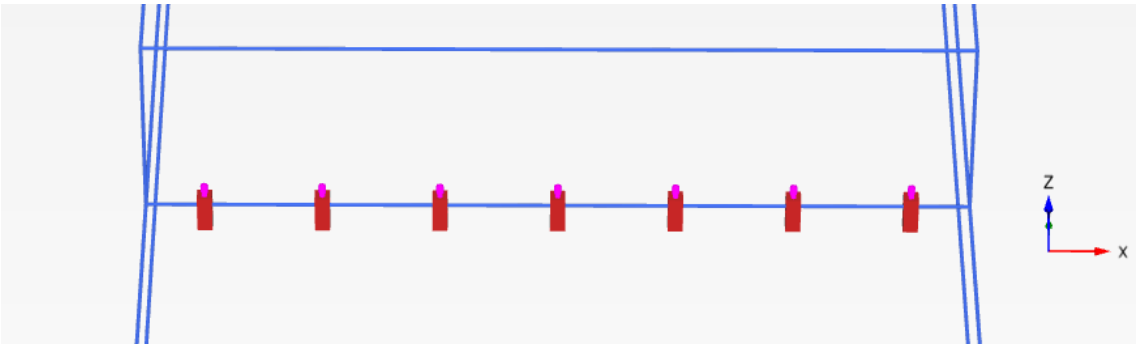


Kuva 44. *Plaxis-mallin siirtymät ankkuritason 2 vaurioituessa*

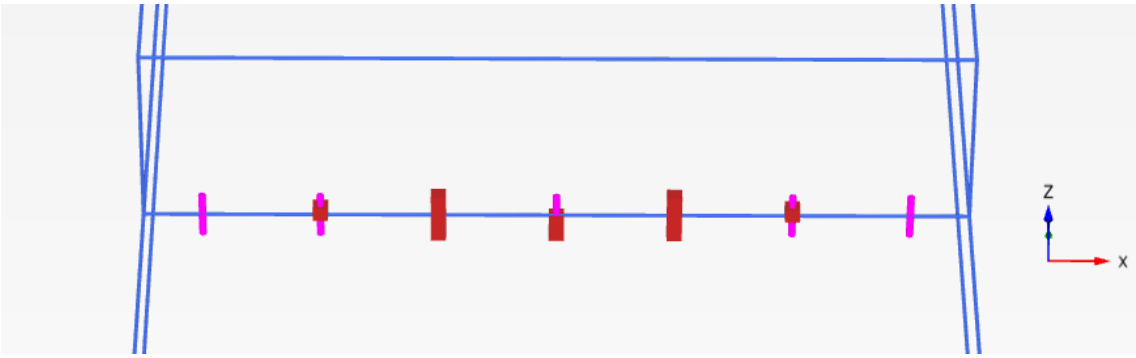


Kuva 45. *Plaxis-mallin siirtymät juuritapin vaurioituessa*

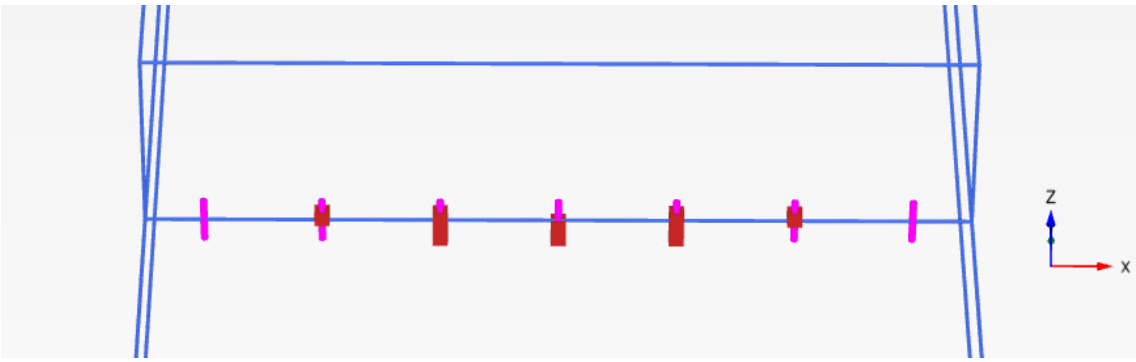
Eri tasojen vauriot ilmenevät selkeästi seinän ja palkkien muodonmuutosten vaihtelussa. Toisen ankkuritason vaurioituessa nähdään myös, kuinka paljon enemmän keskimmäinen juuritappi taipuu, kun se joutuu vastaanottamaan enemmän kuormaa tukiseinältä. Taulukon 19 leikkausrasitustuloksista nähdään, että tämä on rasitetuin kohta kaikista tapauksista. Seuraavassa kuvasarjassa (kuvat 46–49) näkyvät juuritappien plastiset pisteet eri kuormitustilanteissa. Tapausten järjestys on edelleen sama.



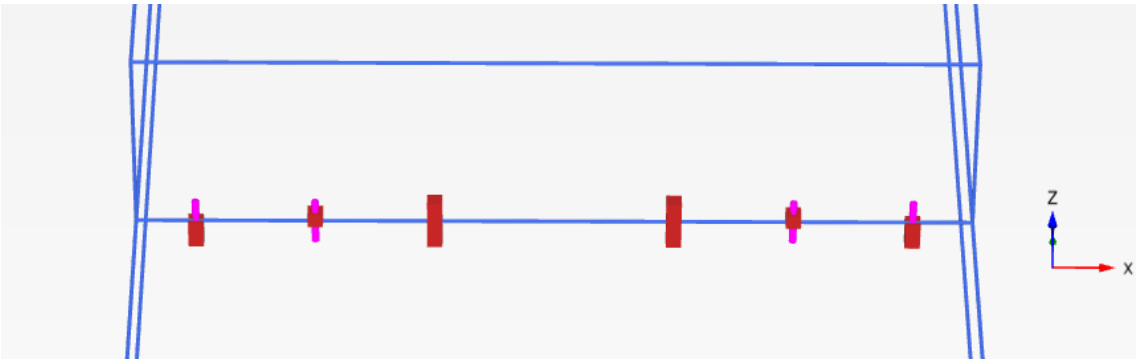
Kuva 46. *Juuritappien plastiset pisteet pysyvillä kuormilla*



Kuva 47. *Juuritappien plastiset pisteet ankkuritason 1 vaurioituessa*



Kuva 48. *Juuritappien plastiset pisteet ankkuritason 2 vaurioituessa*



Kuva 49. *Juuritappien plastiset pisteet juuritapin vaurioituessa*

Ankkuritasojen vaurioituessa, reunimmaisilla juuritapeilla ei esiinny plastisia pisteitä, vaikka pysyvien kuormien tapauksessa niitä esiintyy. Ohjelma ei siis muista rakenneosien plastisoitumista seuraavassa laskentatapauksessa. Ilmiö osoittaa myös, että juuritapin läheisyydellä vaurioituneeseen rakenneosaan on ankkurien tapaan suuri merkitys. Mitoittaessa ei kuitenkaan tiedetä, mikä ankkureista tai juuritapeista vaurioituu, jolloin kaikki rakenneosat on mitoitettava rasitetuimman komponentin mukaan.

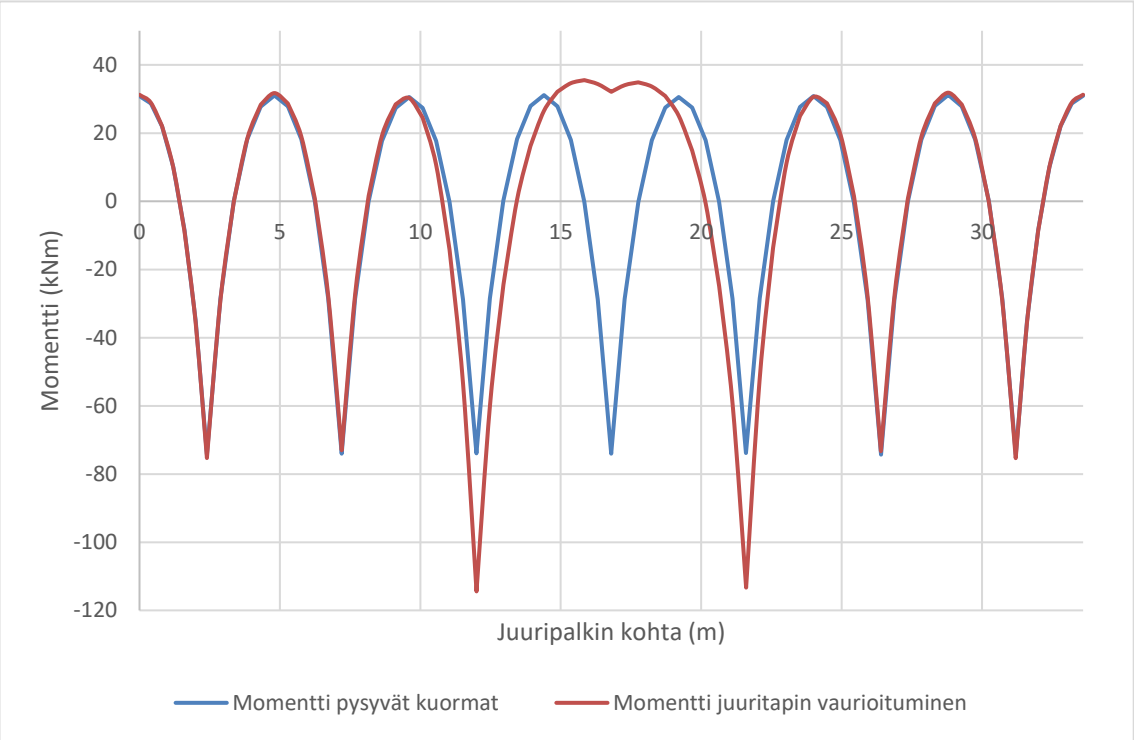
6.6 Kallioon alapäästään tuettu seinä: juuripalkki

Jos tuettu kaivanto kaivetaan kallioon asti, toteutetaan sen juurelle usein teräsbetoninen juuripalkki. Juuripalkki on mahdollista mallintaa Plaxis-malliin palkkina, joka kiinnittyy tukiseinään ja juuritappeihin. Tarkoituksena on selvittää, kuinka juuripalkin mallintaminen vaikuttaa juuritappien leikkausvoimiin. Tarkastelu tehtiin kitkamaamallissa. Taulukossa 20 on esitetty leikkausvoimat pysyvillä kuormilla ja eri tukitasojen vaurioituessa, sekä pelkille juuritapeille että juuritapeille kun juuripalkki on rakennettu.

Taulukko 20. *Juuritappien leikkausvoimat, juuripalkilla ja ilman*

Juuritappi	1	2	3	4	5	6	7
Pelkät juuritapit							
Pysyvä	73	73	73	73	73	73	73
Tukitaso 1 vaurio	74	73	69	60	69	73	74
Tukitaso 2 vaurio	74	73	76	87	76	73	74
Juuritappi vaurio	74	74	84	vaurio	84	74	74
Juuripalkki							
Pysyvä	21	21	21	21	21	21	21
Tukitaso 1 vaurio	20	21	19	15	19	21	20
Tukitaso 2 vaurio	20	22	21	25	21	22	20
Juuritappi vaurio	20	21	27		27	21	20

Juuripalkin lisääminen seinälle vähentää juuritappien leikkausrasitusta huomattavasti. Kuormien uudelleenjakaantuminen juuritappien välillä vaikuttaa kuitenkin olevan samankaltaista. Tämä mahdollisesti johtuu tappien pitkästä etäisyydestä toisistaan ja tappien kapeudesta sekä palkin melko matalasta jäykkyydestä. Tapit välittävät siis kuormansa pienelle alueelle palkkia, joka ei ole tarpeeksi jäykkä siirtämään kuormia muille tapeille, jotka ovat kaukana toisistaan. Juuripalkin momentti- ja leikkausrasitukset näkyvät kuvissa 50 ja 51. Vain tapin vaurioitumisen vaikutus on huomioitu.

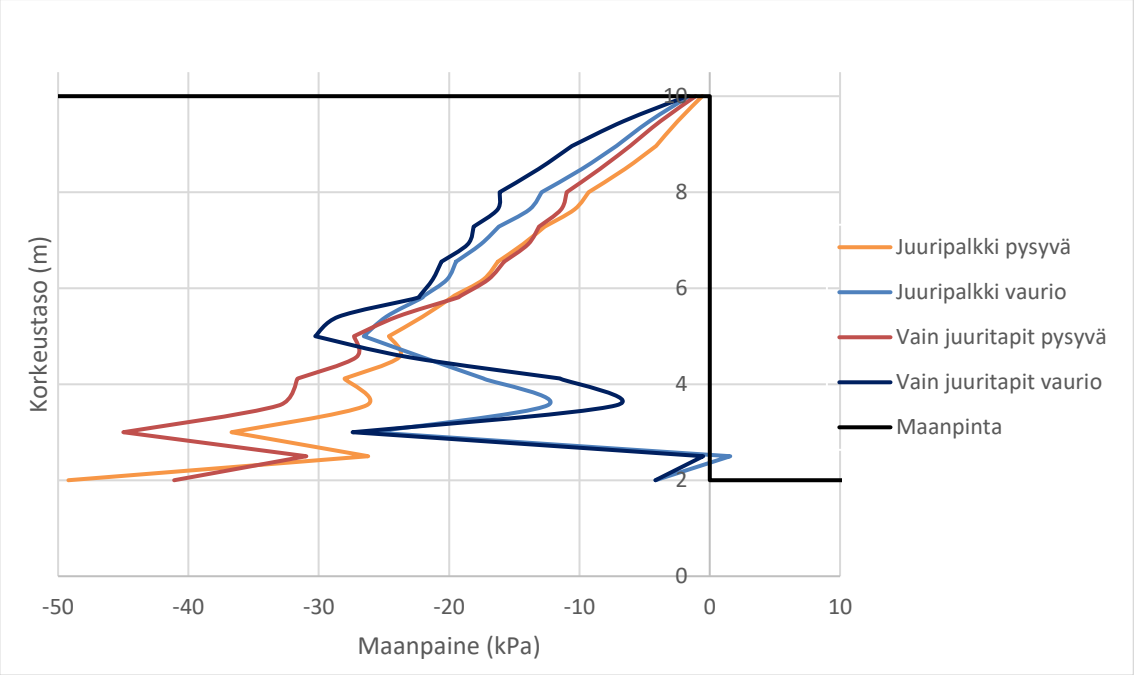


Kuva 50. *Juuripalkin momenttirasitukset pysyvillä kuormilla ja juuritapin vauriotuessa*

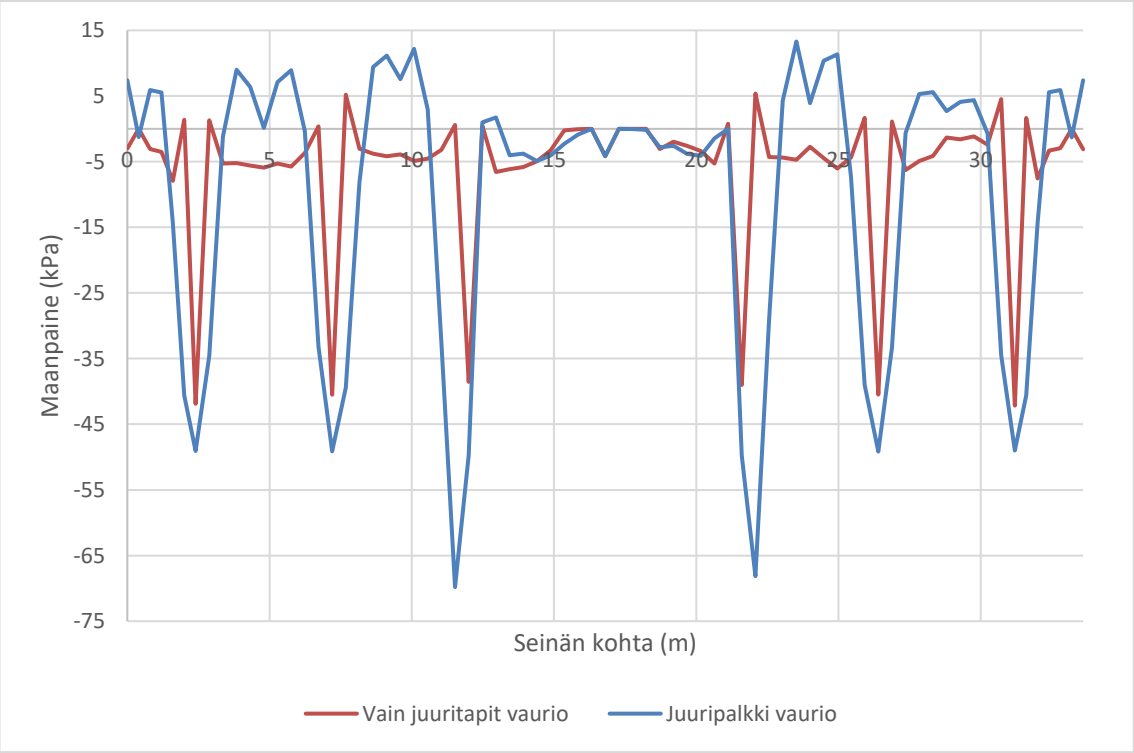
Kuva 51. *Juuripalkin leikkausrasitukset pysyvillä kuormilla ja juuritapin vauriotuessa*

Juuritapin vaurio aiheuttaa juuripalkille vaurioituneen tapin viereisten tappien kohdalla noin 35 % suuruisen lisäyksen leikkausvoimassa. Momenttirasitus juuripalkille kasvaa vaurioituneen tapin viereisten tappien kohdalla noin 54 %. Palkin rasituksissa näkyy myös vaurioituneen tapin kohdalla pieni epäjatkuvuuskohta, joka voi johtua toisen tukitason ankkurista, joka tukee myös tukiseinän avulla osaltaan juuripalkkia.

Seinälle syntyvää maanpainetta haluttiin myös tutkia, sillä nyt seinän alapäällä on mahdollisuus siirtyä, toisin kuin GeoCalc-laskentamallissa. Kun seinä on niveltuettuna alapäästään, eikä siten pääse siirtymään, syntyy suurin maanpaine seinän alapäähän. Plaxis-mallissa seinän alapää pullistuu juuritappien välissä, jolloin maanpaineen jakautuminen seinän alapäässä ei ole tasaista. Kuvissa 52 ja 53 näkyy Plaxis-laskennan maanpaineen arvoja sekä pysty että vaakasuunnassa. Vaakasuuntainen maanpaine on seinän ja kallion rajapinnassa syntyvä maanpaine ja pystysuuntainen on vaurioituvan kalliotapin kohdalla syntyvä maanpaine.



Kuva 52. *Maanpaine juuritapin kohdalla, juuripalkilla ja ilman*



Kuva 53. *Maanpaine seinän alapäässä juuritapin vaurioituessa, juuripalkilla ja ilman*

Kuvaajissa näkyy suuria hypähdyksiä maanpaineen suuruudessa, mikä heikentää tulosten luettavuutta ja luotettavuutta. Kuitenkin voidaan nähdä, että pystysuunnassa juuritapin kohdalla maanpaineet ovat melko samansuuruisia riippumatta siitä, onko seinällä juuripalkkia vai ei. Nähdään myös, että juuritapin vaurioituessa maanpaine lähestyy nol-

laa seinän alapäässä. Todennäköisesti siksi, että seinä pääsee tällöin vapaammin liikkumaan. Vaakasuuntaisesta kuvaajasta ilmenee, että maanpaine jakaantuu seinän alapuolelle laajemmalle alueelle, kun juuritappeja yhdistää juuripalkki. Juuritappien välissä maanpaine myös muuttuu osittain positiiviseksi, mikä viittaa vetojännitykseen.

Juuripalkin mallintamista tällä tavalla olisi hyvä tutkia enemmän. Palkki kiinnitetään usein kallioon raudoitusterästen avulla, jotka porataan kallioon. Palkki ei todennäköisesti todellisuudessa taivu Plaxis-mallin tapaan, vaan pysyy melkein siirtymättömänä. Plaxis-mallissa palkki siirtyy ankkuritapin vaurioituessa noin 14 mm ja ennen vauriota noin 2 mm.

7. LASKENNAN YHTEENVETO

Tähän lukuun on koottu laskennan olennaisimpia tuloksia ja niiden pohjalta tehtyjä havaintoja. Kohdat missä laskentaa voitaisiin kehittää parempaan suuntaan, on myös pyritty tuomaan esiin.

Vaakapalkin vaikutus

Yhdellä tukitasolla palkin jäykkyydellä ei ole merkittävää vaikutusta ankkurivoimien jakaantumiseen onnettomuustilanteessa. Palkin jäykkyys kuitenkin vaikuttaa suuresti syntyviin momenttirasituksiin itse vaakapalkille. Jäykempi palkki rasittuu paljon enemmän ankkurin vaurioituessa, mutta samalla seinän siirtymät pysyvät pienempinä, eli palkki tukee seinää paremmin. Jäykällä palkilla rasitukset ovat silti Plaxis-laskennassa pienempiä verrattuna RFEM-palkkiin onnettomuustilanteessa, koska kuorma jakaantuu pelkän palkin sijasta muille osille seinää Plaxis-mallissa.

Ankkurijaon vaikutus

Ankkurijaon muuttamisella oli suuria ja monipuolisia vaikutuksia tukiseinän rasituksiin, riippuen siitä, miten ankkurijako muuttui sekä mikä kuormitustilanne oli kyseessä. Mitään selkeää vertailtavaa vaikutusta oli kuitenkin hankala löytää, joten voidaan todeta, että ankkurijaon valitseminen on erityisen tapauskohtaista ja sen valitsemisessa on tärkeää huomioida eri kuormitustapaukset.

Ankkurijaon kaksinkertaistaminen GeoCalc-ohjelmassa tuotti samankaltaisen vaikutuksen rakenneosien rasituksille, kuin yhden ankkurin poistaminen Plaxis-ohjelmassa, mutta vain yhden tukitason tapauksessa. Kun tukitasoja oli enemmän kuin yksi muuttuivat rasitukset eri suhteissa.

Pohjamaan vaikutus

Käytettäessä suljetun tilan laskentaa, syntyy GeoCalc-ohjelmassa tukiseinälle aina hydrostaattinen vedenpaine. Tällöin tukiseinälle syntyy suuri paine, riippumatta siitä, onko pohjamaa lujaa vai ei. Kun pohjamaa on tarpeeksi lujaa, syntyy laskennassa koheesiomaan ja tukiseinän väliin rako, jolloin seinälle tuleva paine on tästä kohdasta pelkkää pohjavedenpainetta. Plaxis-ohjelmassa ei seinälle raon kohdalla kuitenkaan synny pohjavedenpainetta, jos pohjamaa on suljetussa tilassa. Tämän takia Plaxis-ohjelmassa koheesiomaa mallinnettiin avoimessa tilassa, jolloin seinälle syntyi pohjavedenpaine.

Koheesiomaalle määritetty passiivipainekerroin on usein myös kitkamaalajeja pienempi, jolloin pohjamaan seinää tukeva vaikutus pienenee. Nämä ominaisuudet synnyttävät tukiseinälle ja sen rakenteille koheesiomaamallissa suurempia rasituksia.

Plastisuuden salliminen vaakapalkille

Kun vaakapalkille syntyi plastisia muodonmuutoksia, rajoittui momenttirasitus plastiseen kapasiteettiin ja rasitukset jakaantuivat tasaisemmin eri osille palkkia. Jos vaakapalkki voidaan olettaa jatkuvaksi, on sillä siis suurempi kapasiteetti onnettomuustilanteessa, jos sille sallitaan plastisia muodonmuutoksia. Ankkurien kohdalla syntyvä momentti, eli tukimomentti, ylitti osittain plastisen kapasiteetin, mikä todennäköisesti johtuu siitä, että Plaxis-ohjelma sallii tietynsuuruisen myötölujittumisen, jotta laskenta saadaan toteutettua loppuun ilman epärealistisia muodonmuutoksia. Plastisuusteorian hyödyntäminen vaatii aina ymmärrystä siitä, miten rakenne tullaan todellisuudessa toteuttamaan, ja sen käyttämisellä oletetaan, että rakenne on jo vaurioitunut

Seinän jäykkyyden vaikutus

Seinän jäykkyyden muuttaminen ei vaikuta ankkurivoimien uudelleenjakaantumiseen samalla tavalla eri laskentaohjelmien välillä. Yhden tukitason vaurioituessa muuttuivat ankkurivoimat pysty- ja vaakasuunnassa eri suhteissa ohjelmien välillä. Ankkurivoimien kasvaminen oli GeoCalc-ohjelmassa yleisesti ottaen suurempaa ankkurin vaurioituessa, verrattuna Plaxis-laskentaan. Seinän jäykkyyden kasvattaminen kuitenkin vähensi ankkurivoimien kasvua onnettomuustilanteessa huomattavasti, mutta myös lisäsi seinän momenttirasitusta.

Juuritappien plastisuus

Jos juuritapeille sallitaan plastinen muodonmuutos syntyvät niille pienemmät leikkausrasitukset. Tällöin seinä myös siirtyy enemmän. Juuritapeille syntyy yleisesti paljon pienemmät rasitukset Plaxis-ohjelmassa, sillä tukiseinä pystyy tappien välissä pullistumaan. GeoCalc-ohjelmassa seinän alapään kiinnitystä kuvaavan jousen jäykkyyttä on kuitenkin mahdollista muuttaa, jolloin voitaisiin paremmin mallintaa juuritappien muodonmuutosta, ja niille syntyvät rasitukset olisivat mahdollisesti pienempiä.

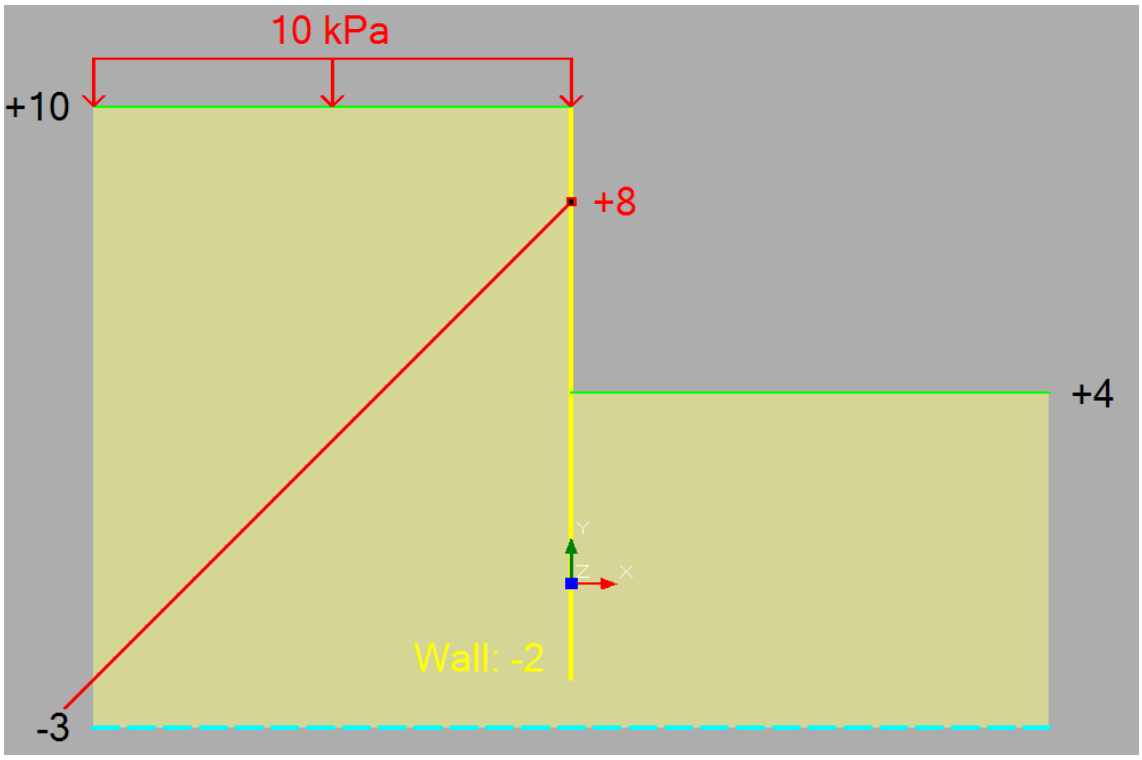
Kallion mallintaminen yhtenäisenä massana ei välttämättä kuvasta suomalaista kallioperää, jossa usein esiintyy rakoilua ja rikkonaisuutta, mutta juotetun juuripultin analysoimiseksi tämä tapa voi olla riittävä.

Juuripalkki

Juuripalkin mallintaminen palkkielementteinä tukiseinän alapäähän ei tuottanut haluttua tulosta. Palkin kiinnittyminen kallioon ei vaikuttanut realistiselta syntyvien muodonmuutosten perusteella. Palkki kuitenkin jäykisti seinän alapäätä, mutta ei vaikuttanut juuritappien kuorman uudelleenjakaantumiseen merkittävällä tavalla. Juuripalkin mallintaminen vaatii siis toisen tavan.

8. VAURIOTILANTEEN MITOITUSESIMERKKI

Tässä luvussa esitetään tapa mitoittaa tukiseinä, sitä tukevat ankkurit sekä vaakapalkki. Ideana on esittää vaihtoehtoinen tapa mallintaa tukiseinän ja sen tukirakenteiden vaurionsietokykyä onnettomuustilanteessa, kun käytetään 2D FEM-laskentaohjelmaa. Tukiseinälaskenta tehdään GeoCalc-ohjelmalla, minkä ankkurivoimia käytetään RFEM-ohjelmassa, vaakapalkin ja ankkurien mitoittamiseksi. Palkki mallinnetaan RFEM-ohjelmassa kahdella eri tavalla, joista toinen ottaa huomioon myös ankkurien jäykkyyden. Tukiseinän ja pohjamaan geometria sekä parametrit vastaavat alaluvun 6.1 tapausta, missä ponttiseinä tuetaan yhdellä vaakapalkilla ja kallioankkureilla, joiden ankkurijako on 4,8 m. GeoCalc-mallin geometria ja 10 kPa hyötykuorma on myös esitetty kuvassa 54. Tukiseinän oletetaan olevan työnaikainen, jolloin mallikertoimen arvo on 1,15.



Kuva 54. *GeoCalc-mallin geometria ja hyötykuorma mitoitusesimerkissä*

GeoCalc-tuloksista on eroteltava pysyvät ja muuttuvat kuormat siten, että muuttuvan kuorman vaikuttaessa saaduista rasituksista erotetaan pysyvien kuormien osuus, jolloin saadaan muuttuvan kuorman vaikutus. Pysyvien ja muuttuvien kuormien vaikutuksiin kohdennetaan sen jälkeen mitoitustavan DA2* mukaan lisäkertoimet, riippuen kuormitusyhdistelystä. Lisäksi rakenneosien mitoittamisessa on käytettävä mallikerrointa, jotka

tässä tapauksessa lisätään vain seinän ja palkin rasituksiin, mutta ei ankkurin rasitukseen. Taulukkoon 21 on koottu pysyvien ja muuttuvien kuormien vaikutukset seinän ja ankkurin rasituksiin sekä rasitusten mitoitusarvot eri kuormitusyhdistelyillä. Kuormitusyhdistelmiin 6.10a ja 6.10b on siis myös lisätty mallikerroin. Taulukossa on lisäksi määritetty viivakuorma RFEM-ohjelmassa laskettavia palkkeja varten, kaavan 6.1 mukaisesti. Onnettomuustilanteen rasitukset määritetään siten, että ankkurijako on GeoCalc-ohjelmassa kaksinkertaistettu. Vauriotilanteen mitoitusarvoissa rasitukset on kerrottu kertoimella 1,1, mutta ei mallikertoimella.

Taulukko 21. *GeoCalc-laskennan tuloksia seinän ja ankkurin rasituksista*

	Pysyvä	Muuttuva +pysyvä	Muuttuva	Vaurio	6.10a	6.10b	Vaurio x1,1
Tukiseinän momentti (kNm)	75	107	32	111	116	154	122
Tukiseinän leikkaus (kN)	43	52	9	50	67	72	55
Ankkurivoima (kN)	182	223	41	263	246	271	-
Ankkurivoima RFEM-palkille (kN/m)	26,9	-	6	13,6	-	-	-

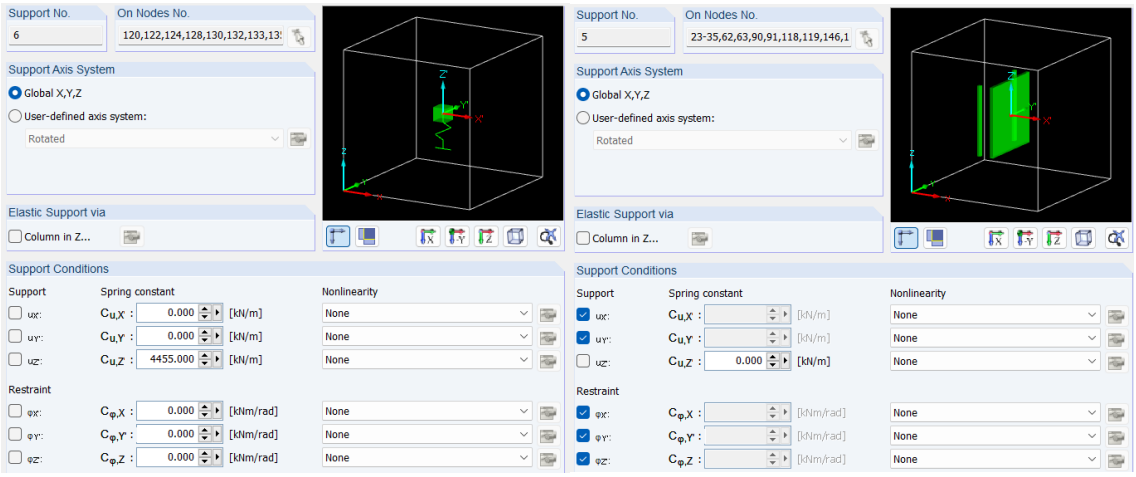
Seinän tapauksessa mitoittavammaksi kuormitusyhdistelyksi tulee 6.10b. Laskentatulokset alaluvuissa 6.2 ja 6.4 osoittivat, että ankkurin vaurion mallintaminen kaksinkertaistamalla ankkurijakoa tuottaa samankaltaisen rasituksen lisäyksen kuin Plaxis-laskennassa. Vauriosta aiheutuvat rasitukset eivät tässä tapauksessa ole seinälle mitoittavia rasituksia, mutta vauriotilanteen ankkurivoimaa käytetään nyt palkin ja ankkurien vauriotilanteen mitoittamisessa. Myöhemmin vertaillaan myös sitä, miten suuri ero palkin rasituksissa on, jos vauriotilanne mitoitettaisiin pysyvien kuormien viivakuormalla.

Vaakapalkki voidaan mallintaa RFEM-laskentaohjelmalla jatkuvana palkkina, joka on tuettu ankkurien kohdalla niveltuilla. Tällainen rakennemalli ei kuitenkaan huomioi sitä, että ankkureilla on myös jokin jäykkyys. Niveltukien sijasta tuet voidaan mallintaa jousina, joiden jäykkyys riippuu käytetyn ankkurin jäykkyydestä ja kulmasta palkkiin nähden. Jos ankkurin kulma on 45° vaakatasosta, voidaan palkkia tukevien jousien jousivakiot k_z laskea kaavalla 7.1, jossa E on ankkurin materiaalin kimmomoduuli, A ankkurin poikkileikkauksen pinta-ala ja L ankkurin vapaa pituus.

$$k_z = \frac{EA}{L*\sqrt{2}} = \frac{210\ GPa * 450\ mm^2}{15\ m*\sqrt{2}} = 4455\ kN/m \tag{7.1}$$

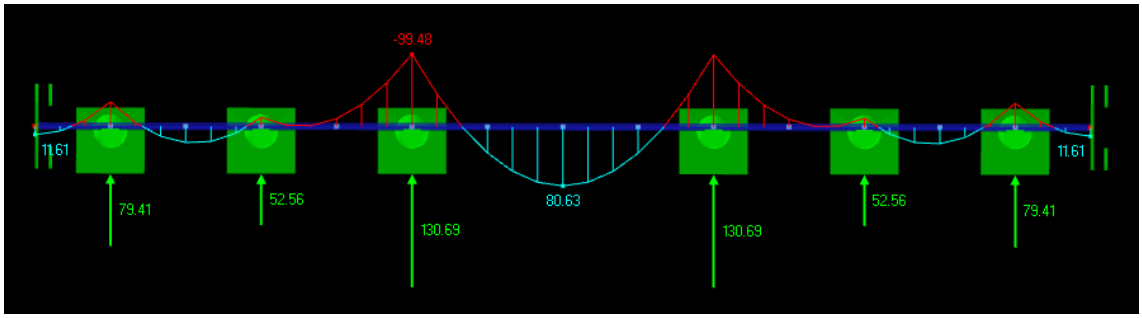
RFEM-laskennassa mallinnettiin kaksi jatkuvaa palkkia, joista yhden välituet olivat tavanomaisia niveltukia. Toisen palkin välituet olivat jousielementtejä, joiden kuorman suuntaiselle akselille on asetettu edellä laskettu jousivakio 4455 kN/m. Kuvassa 55 nä-

kyy määritetyt jousituet sekä palkkien päätyyn määritetyt tuet, jotka tukevat palkkeja toisilla akseleilla. Palkin tukien mallintaminen jousella, joka vastaa ankkurin jäykkyyttä, ei kuitenkaan huomioi esimerkiksi passiivipaineen muutosta tukiseinällä vauriotilanteessa. Jouset eivät siis kuvasta koko tukiseinärakenteen käyttäytymistä.

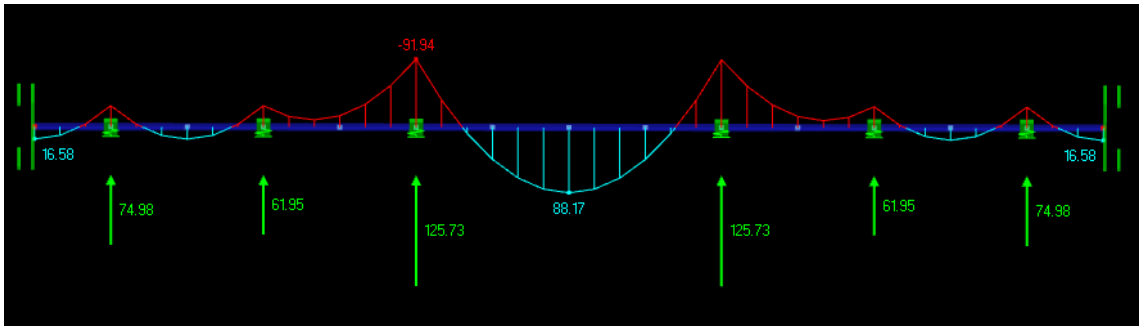


Kuva 55. *Jousituetun palkin jousituet ja palkin päätyjen tuet*

Palkin profiiliksi valittiin HEB 200. Kuvassa 56 ja 57 näkyy eri palkkien momenttirasitus ankkurin vaurioituessa, jolloin keskimmäinen tuista on poistettu. Tällöin palkin viivakuorma on GeoCalc-laskennan vauriotilanteesta määritetty ja kerrottu kertoimella 1,1 Momenttirasitusten arvot vauriotilanteessa näkyvät tarkemmin kuvan 58 kuvaajissa.

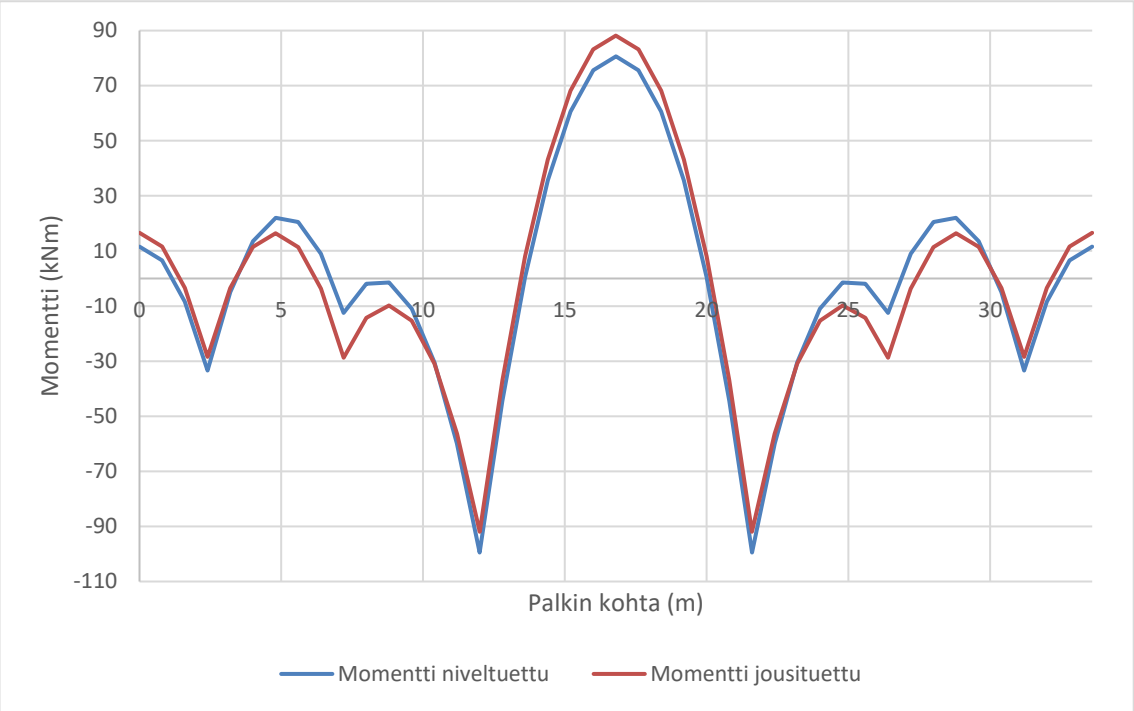


Kuva 56. *Niveltuettu palkki RFEM-ohjelmassa*



Kuva 57. *Jousituettu palkki RFEM-ohjelmassa*

Eri palkkien tukivoimista nähdään, että jousilla tuettu palkki jakaa voimat eri tukien välille tasaisemmin. Tämä vastaa sitä, mikä huomattiin alaluvussa 6.1, kun Plaxis-mallissa ankkurivoimat jakautuivat tasaisemmin palkkien välillä ankkurin vaurioituessa. Plaxis-ohjelmassa vaikuttavana tekijänä oli tietysti myös tukiseinän jäykkyys ja pohjamaassa tapahtuvat muutokset ankkurin vaurioituessa.



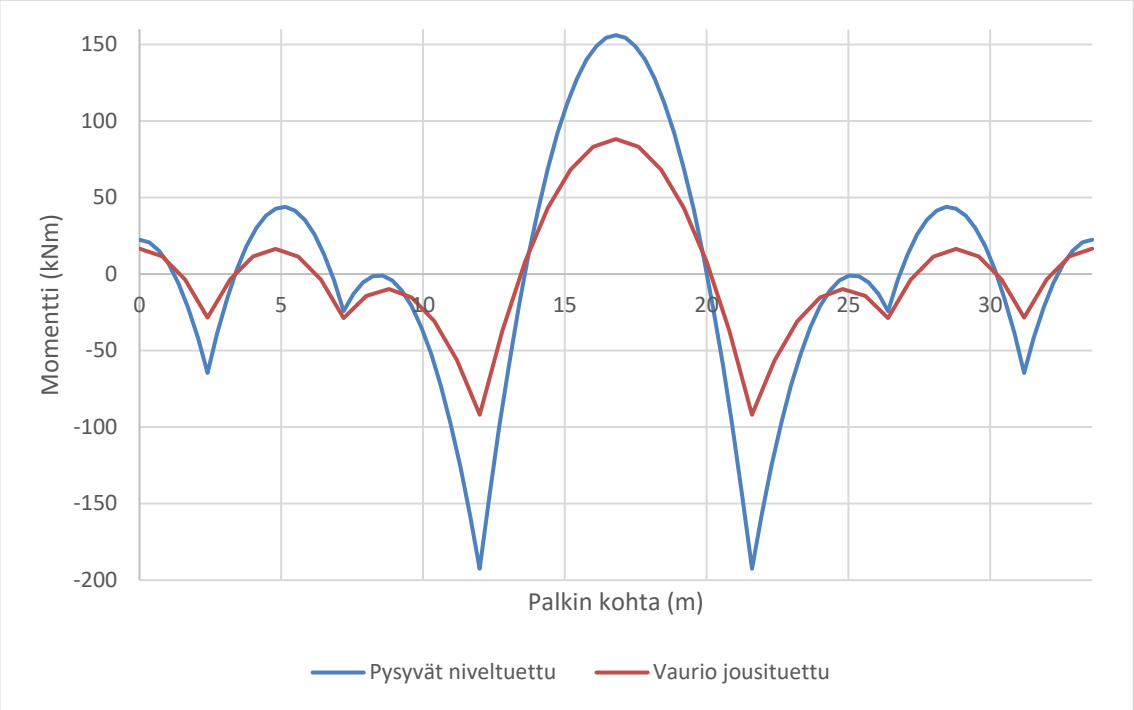
Kuva 58. *Nivel- ja jousituetun HEB 200 palkin momenttirasitus ankkurin vaurioituessa*

Momenttirasituksessa suurimmat arvot syntyvät vaurioituneen ankkurin viereisten ankkurien kohdalle. Jousituetulla palkilla tässä kohdassa syntyvä momenttirasitus on ankkurivoimien tasaisemman jakaantumisen takia pienempi, mutta vaurioituneen ankkurin kohdalla oleva kenttämomentti on niveltuettua palkkia suurempi. Taulukossa 22 on nivel- ja jousituetun palkin rasitusten mitoitusarvot. Murtorajatilan kuormitusyhdistelmiin 6.10a ja 6.10b on lisätty mallikerroin, jolloin tuloksena saadaan lopullinen mitoittava arvo.

Taulukko 22. *Nivel- ja jousituetun palkin mitoitusarvot*

	6.10a	6.10b	Vaurio	Mitoittava	Vaurio pysyvällä kuormalla
Niveltuettu					
Momentti (kNm)	82	90	99	99	193
Leikkaus (kN)	102	113	75	113	145
Ankkurivoima (kN)	252	276	185	276	358
Jousituettu					
Momentti (kNm)	82	90	92	92	178
Leikkaus (kN)	102	113	75	113	145
Ankkurivoima (kN)	252	276	178	276	344

Kun palkki tuetaan jousituilla, on mitoittavissa ankkurivoimassa ja palkin momenttirasituksissa eroa. Tulokset eroavat pelkästään vauriotilanteessa, missä palkilla on epäjatkuvuuskohta vaurioituneen ankkurin kohdalla. Ero rasituksissa on melko pieni, mutta suuremmilla kuormilla ja jäykemmällä palkilla ero ankkurivoimassa voi muuttua huomattavaksi. Tällöin tosin jousituetun palkin momenttirasitus voi kasvaa suuremmaksi kuin niveltuetulla.



Kuva 59. *Momenttirasitusten ero pysyvien ja vauriotilanteen kuormien välillä*

Jos palkin viivakuorma olisi määritetty pysyvien kuormien viivakuormasta on syntyvät rasitukset huomattavasti suurempia ja ne muuttuvat mitoittavaksi arvoksi myös leikkausrasituksen osalta. Kuvassa 59 on esitetty ehdotetun mitoitustavan ja tavanomaisen mitoitustavan erot momenttirasituksen osalta. Ero kuvastaa, kuinka paljon kuorma jakautuu muille osille tukiseinää vauriotilanteessa ja miten suuri vaikutus tällä on muiden rakenneosien rasituksille. Määrittämällä vauriotilanteen kuorma tukiseinälaskentamallista erikseen palkille voi siis muuttaa mitoituksen tuloksia huomattavasti ja tällä tavalla voidaan välttyä ylimitoitukselta.

Mitoitusta tulisi jatkaa tutkimalla eri palkki- ja tukiseinäprofiilien sekä punosmäärien vaikutusta rakennekokonaisuuteen ja mitoittaa rakenneosat tarpeellisessa laajuudessa. Jos palkille määritetään jousituet, on jousien jäykkyydellä ja palkin taivutusjäykkyydellä myös vaikutusta syntyviin rasituksiin, erityisesti ankkurin vauriotilanteessa. Jos rakenne saa-

daan optimoitua, voidaan täten säästää materiaalimenekkiä. Koska tukiseinien mitoittamisessa on usein suuria epävarmuuksia, on rakennekokonaisuuden geometrian ja pohjamaan ominaisuuksien herkkyystarkastelu myös hyvä suorittaa ennen rakenneosien tarkempaa mitoittamista. Tällöin rakenteesta saadaan parempi kokonaiskuva ja rakenteen optimointi helpottuu.

9. PÄÄTELMÄT

GeoCalc- ja Plaxis 3D-laskentaohjelmia vertailtiin, tutkimalla miten tukiseinän mallintaminen, erityisesti vauriotilanteessa eroaa ohjelmien välillä. Vertailtavissa tapauksissa vaihtelivat: tukitasojen määrä, geometria ja rakenneosien sekä pohjamaan ominaisuudet. Tarkemmat havainnot eri laskentatapauksista on käyty luvussa 7. Yleisesti voidaan todeta, että Plaxis 3D-ohjelman monipuolisuus verrattuna GeoCalc-tukiseinämoduuliin, tarjoaa monipuolisemman mahdollisuuden tukiseinän mallintamiseen ja täten myös vaurionsietokyvyn tarkastamiseen. Plaxis-ohjelmassa erilaisten tukirakenteiden mallintaminen oli vapaamuotoisempaa. Niille syntyvät rasitukset saadaan myös selville suoraan mallista, eli esimerkiksi vaakapalkin momentti- ja leikkausrasitusten selvittämiseen ei tarvita erillistä laskentaohjelmaa tai käsin laskentaa.

Kaikissa tapauksissa Plaxis-ohjelman monipuolisuus ei kuitenkaan tuottanut suurta hyötyä verrattuna GeoCalc-ohjelmaan. GeoCalc-ohjelmalla saatiin laskettua samat tapaukset usein paljon tehokkaammin, sillä laskentamoduuli on juuri tukiseinälaskentaa varten tarkoitettu ja täten suoraviivaisempi käyttäjän kannalta. Samalla tulokset ohjelmien välillä olivat hyvin samankaltaisia tapauksissa, missä vauriotilannetta ei mallinneta. Koska tapaukset olivat seinän suunnassa geometrialtaan jatkuvia, ei kolmannen ulottuvuuden hyötyä tullut kokonaan hyödynnettyä. 3D-mallintamisesta olisi siis enemmän apua, jos geometria seinän syvyyssuunnassa myös vaihtuisi, eli jos seinässä olisi esimerkiksi kulmia tai korkeusvaihteluita.

Vauriotilanteen mallintamista 2D-tapauksessa haluttiin parantaa ottamalla vaakapalkin mitoituksessa huomioon myös ankkurien jäykkyydet. Tällöin ankkurivoimien uudelleenjakaantuminen tapahtuu tasaisemmin ankkurien välillä vauriotilanteessa. Tapa ei kuitenkaan huomioi voimien jakaantumista koko tukiseinälle, jolloin maanpaineiden muutokset vähentävät kuormaa vaakapalkille. Palkin mallintamista vauriotilanteessa kokeiltiin myös hyödyntämällä 2D-laskennasta saatua kuormaa, jossa ankkurijako kaksinkertaistetaan. Tällöin palkille syntyvä kuorma on huomattavasti pienempi, sillä ankkurijaon muuttaminen muuttaa ankkurin jäykkyyttä ja täten sille syntyvää kuormaa, koska löysempi tuki saa seinän siirtymää ja täten maanpaineesta aiheutuva rasitus pienenee. Palkille voidaan siis määrittää erikseen vauriotilanteen kuorma 2D-tukiseinälaskentaohjelmasta, kaksinkertaistamalla ankkurijakoa.

Kolmiulotteisesta mallintamista kannattaa harkita silloin, kun halutaan tarkemmin tietää tiettyjen rakenneosien rasitukset. Tällöin kuormien uudelleenjakaantuminen rakenneosien välillä saadaan myös paremmin selvitettyä, esimerkiksi yhden ankkurin vaurioituessa. Kolmiulotteinen mallintaminen kannattaa tietysti myös silloin, kun tukiseinän geometria johtaa 3D-mallintamisessa parempaan tulokseen. Kuitenkin jos laskenta tehdään kaksiulotteisesti, on mahdollista löytää tapoja, millä ankkurin vauriota voidaan mallintaa siten, että vältytään liialliselta ylimitoitukselta. Ennen tarkempaa mitoitusta on kuitenkin harkittava, voidaanko rakennetta oikeasti toteuttaa sellaisella tarkkuudella, millä laskentakin on tehty.

LÄHTEET

Kirjallisuus

Bourne-Webb, P. J. et al. (2007) *Plastic bending of steel sheet piles*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering. 160 (3), 129–140

Knuuti, M. (2015) *Eurokoodin EN 1997 mukainen tukiseinämitoitus - epävarmuustekijät mitoituksessa ja varmuuden kohdentaminen*.

Korhonen, K.-H. & Mäkelä, H. (1990) *RIL 157-2 Geomekaniikka. 2*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

Kujansuu, J. & Suomen rakennusinsinöörien liitto. (2019) *Teräsrakenteisten tukiseinien rakenteellinen mitoitus: RIL 271-2019*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Leino, T. et al. (2017) *Rakenteiden vaurionsietokyvyn varmistaminen onnettomuustilanteessa*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Liimatainen, E. (2020) *Kallioankkureiden ja tartuntaterästen geo- ja rakennetekninen mitoitus.*

Tiainen, T. & Papula, S. (2020) *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 -oppikirja*. Uudistettu painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.

Segerlind, L. J. (1984) *Applied Finite Element Analysis (2nd edition)*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto, John Wiley & Sons 1984.

Ohjelmistojen käyttöohjeet

Bentley Systems (2023 A) *PLAXIS General Information Manual.*

Bentley Systems (2023 B) *PLAXIS Reference Manual 3D.*

Bentley Systems (2024) *PLAXIS Material Models Manual 3D.*

Civilpoint Oy (2017) *GeoCalc Supported Excavation Theory.*

Immonen, T. (2024) *Tukiseinä käyttöesimerkki.* Arkance Systems Finland Oy.

Papavasileiou, S. (2024) *Material parameter datasets for sheetpiles and beams.* Bentley Communities. Saatavilla: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0108936 (viitattu: 18.5.2025)