



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**SILTOJEN TULOPENKEREIDEN 2D- JA 3D-
STABILITEETTILASKENTAMENETELMIEN
VERTAILU**

Hannu Jussila

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**SILTOJEN TULOPENKEREIDEN 2D- JA 3D-
STABILITEETTILASKENTAMENETELMIEN
VERTAILU**

Hannu Jussila

Ohjaajat: Anssi Rauhala

Kauko Kujala

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2019

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Jussila, Hannu		Työn ohjaaja yliopistolla Rauhala, Anssi (DI, FM)	
Työn nimi Siltojen tulopenkereiden 2D- ja 3D-stabiliteettilaskentamenetelmien vertailu			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Huhtikuu 2019	Sivumäärä 72 s., 27 liitettä
Tiivistelmä <p>Siltojen tulopenkereiden stabiliteettilaskenta tehdään pääosin 2D-menetelmällä, jossa laskentapoikkileikkauksen oletetaan jatkuvan äärettömän pitkänä. 2D-laskenta soveltuu kuitenkin penkereen pituussuuntaisen stabiliteetin tarkasteluun huonosti, koska kuormituksen ja penkereen paikallisuutta ei pystytä huomioimaan 2D-mallissa. Diplomityön tavoitteena oli pyrkiä hahmottamaan, kuinka paljon 2D-laskentamenetelmillä saadut tulokset poikkeavat 3D-laskentamenetelmiin verrattuna ja mitkä tekijät vaikuttavat voimakkaimmin eri laskentamenetelmillä saatujen tulosten välisiin eroihin. Lisäksi tavoitteena oli pyrkiä antamaan laskentatulosten perusteella suositus päätyvastuksen huomioimisesta 2D LEM -menetelmässä.</p> <p>Työssä vertailtiin 2D LEM ja 3D LEM -menetelmillä saatujen kokonaisvarmuuskertoimien eroja penkereen pituussuunnassa vaihtelevan muotoisilla liukupinnoilla. Tarkastelu tehtiin vesistö- ja alikulkukohteeseen kolmessa pohjamaatyypissä ja kolmella pengerelevyydellä käyttäen Bishopin yksinkertaistettua menetelmää. Tarkasteltavat penkereet olivat yksi- ja kaksiraiteinen ratapenger sekä leveä moottoritiepenger. Vakavuus laskettiin sekä pelkälle penkereelle että penkereelle, jonka päällä oli pintakuorma. Kahdessa pohjamaatyypissä käytettiin suljetun tilan parametreja (löyhä ja sitkea savi) ja yhdessä avoimen tilan parametreja (siltti). 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimet laskettiin ilman päätyvastusta ja päätyvastuksen kanssa. Valituista tapauksista tehtiin vertailulaskelmat 3D FEM SRM -menetelmällä. Paalulaatan pituuden mitoitusta tutkittiin yhdessä tapauksessa 2D LEM ja 3D LEM -laskentamenetelmien välillä. Vertailulaskelma eurokoodin DA3 MRT -osavarmuuskertoimia soveltaen laadittiin yhdelle laskentatapaukselle.</p> <p>Kapeiden penkereiden tapauksessa 2D- ja 3D-laskentamenetelmillä saatujen varmuuskertoimien välille muodostui suuria eroja kummassakin kohteessa, kun käytettiin suljetun tilan parametrien pohjamaatyyppiä. 2D LEM -menetelmällä saatiin näissä tapauksissa merkittävästi 3D-menetelmiä pienempiä varmuuskertoimia. Suurimmillaan 3D LEM -menetelmällä saatu varmuuskerroin oli yli kaksinkertainen verrattuna 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimeen ilman päätyvastusta. Ilman penkereen päälle tulevaa pintakuormaa, 2D LEM -menetelmällä päätyvastus huomioiden saatiin valituilla parametreilla likimain yhtä suuria varmuuskertoimia kuin 3D LEM -menetelmällä vapaan muotoisilla liukupinnoilla. Kun penkereen päällä oli lisäksi pintakuorma, 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa saatiin pienempiä varmuuskertoimia kuin 3D LEM -menetelmällä vapaan muotoisilla liukupinnoilla. Leveimmällä penkereellä erot eivät olleet enää pääsääntöisesti merkittäviä.</p> <p>Penkereen leveyden vaikutus varmuuskertoimien eroihin oli selkeä: kapeimmalla, yksiraiteisella ratapenkerellä 2D ja 3D -laskentamenetelmien tulosten välinen ero oli suurin ja se pieneni pengerelevyyden kasvaessa. Myös pintakuorma vaikutti varmuuskertoimien erojen suuruuteen kapeimmilla penkereillä: varmuuskertoimien ero oli suurempi penkerellä pintakuorman kanssa kuin penkerellä ilman pintakuormaa. Pohjamaan suuremmalla suljetun leikkauslujuuden arvolla ei ollut selvää vaikutusta laskentamenetelmien välisten varmuuskertoimien erojen pienenemiseen. Siltti-pohjamaatyypillä varmuuskertoimien erot olivat selvästi pienemmät kuin suljetun tilan parametrien pohjamaatyypeillä. Elementtimenetelmällä saatujen vertailulaskelmien varmuuskertoimet noudattelivat kaikissa lasketussa tapauksissa 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisten liukupintojen varmuuskertoimia. Paalulaatan pituustarkastelussa paalulaatan pituudelle tuli merkittäviä eroja, kun pituuden määrittämisen perusteena käytettiin 1,8 kokonaisvarmuuskerroinvaatimusta. Vaadittava paalulaatan pituus vaihteli 10 m ja yli 55 m välillä. Lyhyin paalulaatta olisi vaadittu 3D LEM -menetelmän perusteella ja pisin 2D LEM -menetelmän perusteella ilman päätyvastusta.</p> <p>Varmuuskertoimien ero vaihteli 2D LEM ja 3D LEM -menetelmien välillä kuormitustapauksesta riippuen myös siinä tapauksessa, kun 2D LEM -menetelmässä huomioitiin päätyvastus. Päätyvastuksen laskentaan ei siis ole olemassa yhdenmukaisia vakioparametreja, joilla saataisiin 3D LEM -menetelmää vastaavia varmuuskertoimia kaikissa tapauksissa. Paalulaatan pituustarkastelussa 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa, varmuuskerroin kasvoi jyrkästi paalulaatan pituuden funktiona noustun nopeasti suuremmaksi kuin 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisilla liukupinnoilla.</p> <p>Lisätutkimustarpeena havaittiin muun muassa kerroksellisen maaperän ja maaperän lujuuden vaikutuksen sekä pengerelevyyden ja kuormituksen yhteyden tarkempaa selvittämistä päätyvastusparametrien valintaan. Lisäksi 3D LEM -menetelmän soveltuvuus stabiliteetin laskentaan epäsymmetrisissä tapauksissa vaikeissa pohjaolosuhteissa olisi syytä selvittää.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Master's Programme in Civil Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Jussila, Hannu		Thesis Supervisor Rauhala, Anssi (MSc tech., MSc phys.)	
Title of Thesis Comparison of 2D and 3D slope stability analysis methods in the case of bridge approach embankments			
Major Subject Civil Engineering	Type of Thesis Master's thesis	Submission Date April 2019	Number of Pages 72 p., 27 App.
<p>Abstract</p> <p>Slope stability analysis of bridge approach embankments is done mainly by using 2D methods, which suppose calculation cross section to be infinitely long. However, 2D methods are not ideal for studying the embankment's stability in longitudinal direction, because it is impossible to model the locality of an embankment and loading in a 2D model. The aim of this master's thesis work was to study how much the results of 2D methods diverge compared to more realistic 3D situation, and which factors have the greatest influence on the difference. Another goal was to give recommendations for the definition of end effect in 2D LEM method.</p> <p>In this work, differences in factor of safety were compared in the longitudinal direction of embankment obtained by 2D LEM and 3D LEM methods. Varying slip surface shapes were utilized in a watercourse and an underpass case, using Bishop simplified method with three different soil types and three different embankments widths. The investigated embankments were a single-track railway, a double-track railway, and a wide motorway embankment. Factor of safety was calculated with and without a surface load. Undrained shear strength parameters were used with two soil types (soft and firm clay) and in one case friction and cohesion was used for subsoil (silt). Factor of safety was calculated in 2D LEM method with and without an end effect. For selected cases, reference calculations were performed with 3D FEM SRM method. Dimensioning of pile slab length was studied in one case using 2D LEM and 3D LEM -methods. Reference calculation using Eurocode DA3 MRT partial factors was conducted in one case.</p> <p>There were big differences in the factor of safety between the 2D and 3D methods in both watercourse and underpass cases with the two narrowest embankments, when undrained shear strength soil types were used. In these cases, factor of safety values calculated with a 2D LEM method were significantly lower than with 3D methods. At the maximum, factor of safety calculated with a 3D LEM method was more than twice greater compared to 2D LEM method without an end effect. When there was no surface load on top of the embankment, the factors of safety calculated using a 2D LEM method with an end effect were approximately the same compared to the values obtained with 3D LEM method using non-spherical slip surfaces. When there was a surface load on the top embankment, factor of safety calculated using a 2D LEM method with an end effect was lower than the factor of safety calculated with 3D LEM method using non-spherical slip surfaces. In the wide motorway embankment, the difference was not significant.</p> <p>The impact of embankment width to the differences in factors of safety was obvious: the difference was the greatest in the narrowest, single-track embankment, and it became smaller when the width of the embankment increased. Also, the surface load had an impact on the differences in factors of safety in railway embankments: the difference was greater in an embankment with the surface load than with an embankment without the surface load. An increase of undrained shear strength of soil did not have an explicit impact on the reduction of safety factor difference between calculation methods. In the silt subsoil, the differences in factors of safety were clearly smaller than when utilizing undrained shear strength. Factors of safety calculated using a finite element method were close to the 3D LEM values with non-spherical slip surfaces in all calculated cases. The length of pile supported embankment slab varied a lot when a requirement of 1.8 was used for stability safety factor. The required length of pile slab varied from 10 m to over 55 m. The shortest pile slab length was based on 3D LEM method and the longest based on 2D LEM method without end effect.</p> <p>The difference in safety factor between the 2D LEM and 3D LEM methods varied depending on loading case, also when end effect was considered in the 2D LEM method. Thus, there are no constant parameters in 2D LEM end effect calculation that would produce factor of safety corresponding to 3D LEM method. In a pile slab length study, greater factor of safety values were obtained using 2D LEM method with end effect than with 3D LEM method using non-spherical slip surfaces.</p> <p>More research is needed to determine the impact of stratified soil base, impact of soil strength, as well as impact of loading intensity on determination of end effect calculation parameters. Also, the suitability of 3D LEM method in asymmetric cases in loose soil base should be clarified.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:lle Väyläviraston toimeksiannosta. Työn ohjaukseen osallistuivat Panu Tolla Väylävirastosta, Sakari Lotvonen ja Juho Mansikkamäki Pöyry Finland Oy:stä sekä Anssi Rauhala ja Kauko Kujala Oulun yliopistolta. Työ on ollut mielenkiintoinen ja opettavainen. Haluan esittää suuret kiitokset koko ohjausryhmälle saamastani tuesta ja avusta. Kiitos esimiehilleni siitä, että olette mahdollistaneet työn ja opiskelun joustavan yhteensovittamisen. Kiitän myös perhettäni saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Oulussa, 14.4.2019

Hannu Jussila

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	9
2 STABILITEETTILASKENTAMENETELMÄT	11
2.1 Stabiliateettilaskennan perusteet.....	11
2.2 2D LEM –menetelmät	12
2.3 2D Bishopin yksinkertaistettu menetelmä.....	14
2.4 3D LEM -menetelmä.....	15
2.4.1 Voima- ja momenttitasapaino pylväissä (Morgenstern-Price)	16
2.4.2 Voima- ja momenttitasapaino koko liukupinnalla	23
2.4.3 3D Bishopin yksinkertaistettu menetelmä.....	24
2.4.4 Poikkileikkauksen voima- ja momenttitasapainoon liittyvät ongelmat Morgenstern-Price menetelmässä.....	26
2.5 3D FEM -menetelmä	28
2.5.1 Elementtimenetelmä geotekniikassa	28
2.5.2 SRM-menetelmä (Strength Reduction Method).....	29
2.5.3 FEM- ja LEM-menetelmien erot stabiiliteettilaskennassa	31
3 2D- JA 3D-GEOMETRIAN VÄLINEN ERO	32
4 LASKENTAKOhteet JA -MENETELMÄT	34
4.1 Pohjasuhteet	34
4.1.1 Vesistökohte.....	34
4.1.2 Alikulkukohde.....	35
4.1.3 Pohjamaan materiaaliparametrit	36
4.2 Kuormittavat penkereet	37
4.3 Paalulaatan pituustarkastelu.....	39
4.4 Laskentamenetelmät	40
5 TULOKSET	43
5.1 Vesistökohteen stabiiliteetti.....	43
5.1.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi)	43
5.1.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi)	44
5.1.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti)	45

5.1.4 Paalulaatan pituustarkastelu.....	45
5.2 Alikulkukohteen stabiliteetti.....	46
5.2.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi).....	46
5.2.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi).....	47
5.2.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti).....	48
6 TULOSTEN TARKASTELU.....	50
6.1 Vesistökohteen.....	50
6.1.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi).....	50
6.1.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi).....	51
6.1.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti).....	52
6.2 Alikulkukohteen.....	53
6.2.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi).....	53
6.2.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi).....	54
6.2.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti).....	55
6.3 Vesistö- ja alikulkukohteen tulosten yhteenveto.....	57
6.4 Paalulaatan pituustarkastelu.....	60
6.5 3D LEM -liukupinnat.....	61
6.6 Päätyvastuksen huomiointi 2D-laskennassa.....	63
6.7 Suositukset penkereen pituussuuntaisen stabiliteetin laskentaan.....	65
7 LASKENTATULOSTEN YHTEENVETO.....	67
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOSUOSITUKSET.....	69
9 LÄHDELUETTELO.....	71

LIITTEET:

- Liite 1. Varmuuskertoimet. Yhteenvetotaulukko.
- Liite 2. Pengerpoikkileikkaukset.
- Liite 3. Vesistökohteen. Poikkileikkausgeometria ja materiaaliparametrit.
- Liite 4. Alikulkukohteen. Poikkileikkausgeometria ja materiaaliparametrit.
- Liite 5. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen. Luonnontila.
- Liite 6. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 1. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 7. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.
- Liite 8. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 1. Moottoritiepennger.
- Liite 9. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 1. Eurokoodi MRT-tarkastelu.
- Liite 10. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 11. Stabiliteettilaskentatulosteet, vesistökohteen pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

- Liite 12. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppe 2. Moottoritiepenger.
- Liite 13. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppe 3. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 14. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppe 3. Kaksiraiteinen ratapenger.
- Liite 15. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppe 3. Moottoritiepenger.
- Liite 16. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.
- Liite 17. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 1. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 18. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 1. Kaksiraiteinen ratapenger.
- Liite 19. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 1. Moottoritiepenger.
- Liite 20. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 2. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 21. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 2. Kaksiraiteinen ratapenger.
- Liite 22. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 2. Moottoritiepenger.
- Liite 23. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 3. Yksiraiteinen ratapenger.
- Liite 24. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 3. Kaksiraiteinen ratapenger.
- Liite 25. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppe 3. Moottoritiepenger.
- Liite 26. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppe 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.
- Liite 27. Stabiliateetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

c	koheesio
F	kokonaisvarmuus
FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
FOS	kokonaisvarmuus (Factor of Safety)
l	lamellin pohjan leveys
LEM	rajatasapainomenetelmä (Limited Equilibrium Method)
S	maan leikkauslujuus
S_u	suljettu leikkauslujuus
SRM	lujuuden pienentämismenetelmä (Strength Reduction Method)
u	huokosvedenpaine
N	normaalivoima
W	lamellin kokonaispaino
γ	tilavuuspaino
τ	maan leikkausjännitys
T	leikkausvoima
φ	kitkakulma
σ	normaalijännitys

1 JOHDANTO

Siltojen tulopenkereiden stabiliteetti mitoitetaan tyypillisesti 2D-laskennalla, jossa laskentapoikkileikkauksen oletetaan jatkuvan äärettömän pitkänä. 2D-mitointi soveltuu kuitenkin penkereen pituussuuntaisen stabiliteetin tarkasteluun huonosti, koska kuormituksen ja penkereen paikallisuutta ei pystytä huomioimaan 2D-mallissa. Erityisesti löyhillä pohjaolosuhteilla olevilla kapeilla penkereillä 2D-laskennan on kokemukseräisesti havaittu tuottavan todellista tilannetta pienempiä varmuuskertoimia penkereen pituussuuntaiselle stabiliteetille.

Tämän vuoksi stabiliteetilaskennassa poikkileikkaukseltaan vakion muotoisen liukupinnan päätyvastus on pyritty laskemaan joko käsin tai ohjelmallisesti 2D-liukupinnasta. Ongelmaksi on muodostunut kuitenkin se, että pengerleveyden ja liukuvan kappaleen leveyden välisestä riippuvuudesta eri pohjaolosuhteissa ja erilaisilla kuormituksilla on vähän tutkittua tietoa, jolloin liukuvan kappaleen leveys on usein määritetty sitomalla se esimerkiksi pengerleveyteen ilman tarkempaa tietoa. Tämä menettelytapa voi kuitenkin antaa todellista tilannetta suuremman varmuuden, mikäli liukuvan kappaleen leveys on määritetty laskennassa liian kapeaksi.

Työn tavoitteena on pyrkiä hahmottamaan, kuinka paljon 2D-laskentamenetelmällä saadut tulokset ilman päätyvastusta ja päätyvastus huomioiden poikkeavat 3D-laskentamenetelmiin verrattuna ja mitkä tekijät vaikuttavat voimakkaimmin eri laskentamenetelmillä saatujen tulosten välisiin eroihin. Lisäksi tavoitteena on pyrkiä antamaan suositus laskentatulosten perusteella 2D-liukupinnan päätyvastuksen huomioimisesta tulopenkereen pituussuuntaisen stabiliteetin laskennassa. Työssä tutkitaan yhdessä laskentatapauksessa paalulaatan pituuden mitoitusta 2D- ja 3D-menetelmien välillä. Vertailulaskelma eurokoodin mitoitustavan DA3 murtorajatilan osavarmuuskertoimia soveltaen laaditaan yhdelle laskentatapaukselle.

Työssä keskitytään vertailemaan tulopenkereen pituussuuntaisen stabiliteetin kokonaisvarmuuskertoimien eroja 2D LEM (Limited Equilibrium Method) ja 3D LEM -laskentamenetelmien välillä vaihtelevan muotoisia liukupintoja käyttäen kolmella eri pohjamaatyypillä ja kolmella eri pengerleveydellä kahdessa tyyppikohteessa.

Valituista tapauksista tehdään vertailulaskelmia 3D FEM (Finite Element Method) -menetelmällä.

Työssä tutkitaan 2D-liukupintoja ilman päätyvastusta ja päätyvastuksen kanssa 2D LEM -menetelmällä sekä todellisen 3D-mallin mukaisia liukupintoja 3D LEM -menetelmällä, jossa keskitytään pääosin vapaan muotoisiin liukupintoihin ilman optimointia. LEM-laskennat tehdään Bishopin yksinkertaistetulla menetelmällä. FEM-laskenta tehdään Mohr-Coulomb-materiaalimallia ja SRM-menetelmää (Strength Reduction Method) käyttäen. FEM-tarkastelussa ei huomioida ajan vaikutusta.

Laskentatapaukset ovat hypoteettisia, yksinkertaistettuja malleja, joiden avulla pyritään saamaan mahdollisimman kattava yleiskuva 2D ja 3D -laskentamenetelmällä saatujen tulosten välisistä eroista. Laskennassa ei huomioida siltarakenteiden vaikutusta stabiliteettiin. Pohjavedenpinta mallinnetaan murtoviivana huomioimatta pohjavedenpinnan asteittaista muutosta luiskan taitteissa. Penkereen pääty mallinnetaan pystysuorana rakenteena. Suotoveden virtauksen vaikutusta stabiliteettiin ei huomioida laskelmissa. Työn oletuksena on, että Mohr-Coulomb -murtokriteeri on voimassa.

2 STABILITEETTILASKENTAMENETELMÄT

2.1 Stabiliateettilaskennan perusteet

Varmuuskerroin määritellään yhtälön 1 mukaisesti maan leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhteena:

$$F = \frac{S}{\tau}, \quad (1)$$

missä F on varmuuskerroin
 S on maan leikkauslujuus
 τ on maan leikkausjännitys.

Maan leikkauslujuus vastaa maassa olevaa todellista lujuutta, kun taas maan leikkausjännitys vastaa vaadittavaa tasapainotilanteen minimijännitystä, jotta tarkasteltava kappale pysyy vakaana. Varmuuskerroin kuvaa siis maassa olevan todellisen leikkauslujuuden ja tasapainotilaan vaadittavan leikkausjännityksen suhdetta ja sitä tarkastellaan tyypillisesti LEM-menetelmällä. (Duncan et al. 2014, s. 81)

Maan leikkauslujuus määritetään tarkasteltavassa murtopinnassa tavallisesti Mohr-Coulombin yhtälön avulla. Kokonaisjännityksiä käyttäen tasapainotilassa maan leikkausjännitys on yhtälön 2 mukainen:

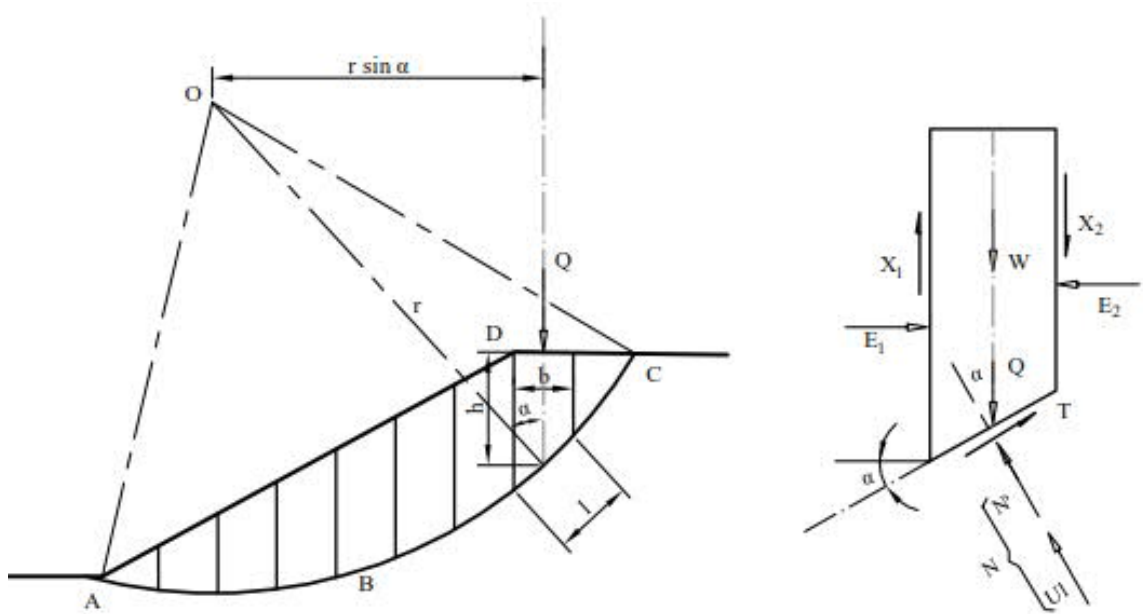
$$\tau = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{F}, \quad (2)$$

missä c on koheesio
 σ on normaalijännitys
 φ on kitkakulma.

2.2 2D LEM –menetelmät

2D-tarkastelussa liukupinta jaetaan pystysuoriin osiin, lamelleihin, joissa tarkastellaan pysty- ja vaakasuuntaisten voimien tasapainoa sekä momenttitasapainoa missä tahansa pisteessä. Liukupinta voi olla joko ympyrän muotoinen tai se voi koostua useista erisäteisistä ympyrän kaarista, murtoviivoista tai näiden yhdistelmistä (GEO-SLOPE 2014, s. 6-14). Kuvassa 1 esitetty liukupinta vastaa ympyrää, jonka säde on r ja keskipiste on O . Liukupinnan yläpuolinen maamassa (ABCD) on jaettu pystysuorissa tasoissa lamelleihin, jossa kunkin lamellin leveys on b . Jokaisen lamellin pohja oletetaan suoraksi. Kunkin lamellin kaltevuuskulma vaakatasosta mitattuna on α ja korkeus keskikohdasta mitattuna h . (Craig 2004, s. 352)

Ulkoisen pistekuorman suuruus on Q . Lamellimenetelmässä on huomioitava, että kuormitus ei jakaannu maaperässä. Siten lamellin pohjalla vaikuttaa yhtä suuri normaalijännitys ulkoisen kuorman johdosta kuin lamellin yläosassa.



Kuva 1. Lamellimenetelmän periaate.

Craigin (2004, s. 352) mukaan lamelliin vaikuttavat seuraavat voimat ulkoisten kuormien lisäksi:

1. Lamellin kokonaispaino, $W = \gamma_{\text{sat}} bh$ (γ_{sat} pohjavedenpinnan alapuolella).
2. Lamellin alapinnan normaalivoima N (σl). Pohjavedenpinnan alapuolella tämä voidaan jakaa kahteen komponenttiin: tehokkaaseen normaalivoimaan N' ($\sigma' l$) ja huokosvedenpaineesta aiheutuvaan normaalivoimaan U (ul), jossa u on huokosvedenpaine lamellin pohjan keskipisteessä ja l on lamellin pohjan leveys.
3. Leikkausvoima lamellin pohjalla, $S = \tau l$.
4. Lamellien väliset normalivoimat E_1 ja E_2 .
5. Lamellien väliset leikkausvoimat, X_1 ja X_2 .

Laskentamenetelmästä riippuen lamelleissa ja liukupinnalla täytyy joko yksi tai useampi tasapainoehto, esimerkiksi momenttitasapainoehto (Duncan et al. 2014, s. 82). Lisäksi laskentamenetelmät eroavat toisistaan lamellien sisäisten normaali- ja leikkausvoimien huomioinnin suhteen (GEO-SLOPE 2014, s. 6). Tasapainoehtojen lukumäärästä riippumatta kaikissa menetelmissä on tuntemattomien muuttujien lukumäärä suurempi kuin tasapainoyhtälöiden lukumäärä. Tämän vuoksi joudutaan tekemään lähtöoletuksia, jotta tasapainoehdot saadaan täytettyä. Vaikka kahden eri menetelmän välillä täytyisi samat tasapainoehdot, ne voivat tuottaa erisuuruisen liukupinnan varmuuskertoimen erilaisista lähtöoletuksista johtuen. (Duncan et al. 2014, s. 82)

Yleisesti käytettäviä laskentamenetelmiä ovat mm. Janbun yksinkertaistettu menetelmä, Bishopin yksinkertaistettu menetelmä, Morgenstern-Price-menetelmä ja Spencerin menetelmä. Bishopin kehittämässä yksinkertaistetussa menetelmässä huomioidaan lamellien väliset normaalivoimat, mutta ei lamellien välisiä leikkausvoimia. Siinä täytyy liukupinnan momenttitasapainoehto, mutta vaakasuuntaisten voimien tasapainoehto lamellissa ja koko liukupinnalla jää toteutumatta. Janbun yksinkertaistettu menetelmä huomioi lamellien väliset voimat Bishopin tapaan, mutta siinä ei täyty momenttitasapaino vaan pelkästään vaakasuuntaisten voimien tasapaino. Morgenstern-Price ja Spencer ovat Bishopin ja Janbun menetelmiin verrattuna kehittyneempiä laskentamenetelmiä, sillä molemmat huomioivat lamellien väliset normaali- ja leikkausvoimat täyttäen samalla sekä voimien että momentin tasapainoehdot. Morgenstern-Price ja Spencer eroavat toisistaan lamellien sisäisten normaalivoimien suunnan oletusten suhteen. (GEO-SLOPE 2014, s. 6-7)

2.3 2D Bishopin yksinkertaistettu menetelmä

Bishopin yksinkertaistettua menetelmää käsittelevä teoria on poimittu lähteestä Duncan et al. (2014, s. 90). Bishopin yksinkertaistetussa laskentamenetelmässä oletetaan, että lamellien välillä ei ole leikkausvoimia. Pystysuuntaisten voimien suhteen vallitsee tasapaino ja niille voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö:

$$N \cos \alpha + S \sin \alpha - W = 0. \quad (3)$$

Positiiviset arvot kuvaavat ylöspäin suuntautuvia voimia. Leikkausvoima S leikkausjännityksen avulla ilmaistuna on:

$$S = \tau l. \quad (4)$$

Kun kaavasta 1 ratkaistaan τ ja sijoitetaan se edelliseen yhtälöön, päädytään yhtälöön:

$$S = \frac{sl}{F}. \quad (5)$$

Kun yllä olevaan yhtälöön sijoitetaan leikkauslujuus Mohr-Coulombin teorian mukaan, päädytään yhtälöön, jossa leikkausjännitys tehokkaiden lujuusparametrien avulla ilmaistuna on seuraava:

$$S = \frac{1}{F} (c'l + N' \tan \phi'). \quad (6)$$

Sijoittamalla edellä saatu lauseke yhtälöön 3 ja ratkaisemalla yhtälö lamellin pohjan normaalivoiman suhteen saadaan yhtälö:

$$N = \frac{W - (1/F)(c'l - ul \tan \varphi') \sin \alpha}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')/F}. \quad (7)$$

Tehokas normaalijännitys lamellin pohjalla saadaan jakamalla normaalivoima N lamellin pohjan leveydellä ja vähentämällä siitä huokospaine:

$$\sigma' = \frac{N}{l} - u. \quad (8)$$

Yhdistämällä yhtälöt 7 ja 8 ja laskemalla momenttitasapainon liukupinnan ympyrän keskipisteen suhteen sekä järjestämällä muuttujat uudelleen saadaan varmuuskertoimeksi tehokkaiden jännitysten avulla ilmaistuna:

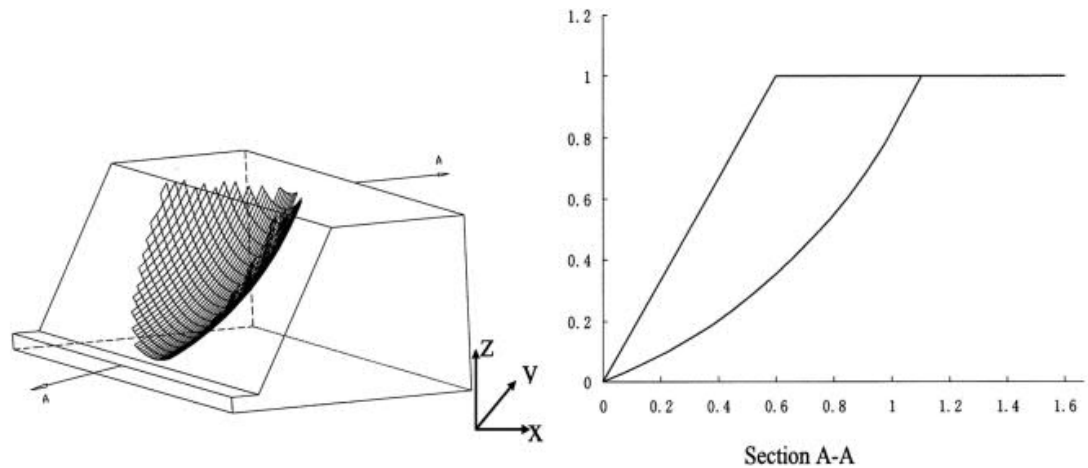
$$F = \frac{\sum \left[\frac{c'b + (W - ub) \tan \varphi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi') / F} \right]}{\sum W \sin \alpha}. \quad (9)$$

Varmuuskertoimen F esiintyessä yhtälön molemmin puolin, se täytyy ratkaista iteratiivisesti. Yleensä alkuoletukseksi yhtälön oikealle puolelle asetetaan $F=1$. Tämän jälkeen uutena oletuksena käytetään yhtälöstä saatua F :n arvoa. Tätä menettelytapaa jatketaan, kunnes yhtälön molemmilla puolilla on sama varmuuskerroin vaaditun toleranssin sisällä. (Helenelund 1967, s. 202)

2.4 3D LEM -menetelmä

Koska liukupintasortumat ovat todellisuudessa aina kolmiulotteisia tapauksia, on 3D-ilmiötä tutkittu jo 1960-luvun lopulta saakka. Vuosikymmenien ajan 3D LEM -menetelmässä on ollut lukuisia rajoitteita, jotka ovat hidastaneet sen hyödyntämistä. Tällaisia rajoitteita ovat olleet mm. oletettu liukupinnan suunta, geometrian ja kuormituksen symmetrisyysvaatimus, poikkisuuntaisen voima- ja/tai momenttitasapainon puuttuminen sekä yksinkertaiset liukupinnan hakumenetelmät. Tämän vuoksi menetelmää on käytetty viime vuosikymmeninä lähinnä sortumatapausten takaisinlaskennassa. (Rocscience 2017)

Kaksiulotteisen lamellimenetelmän periaate on suoraan sovellettavissa kolmiulotteiseen tapaukseen: Kun kaksiulotteisessa tapauksessa liukupinta jaetaan lamelleihin, niin kolmiulotteisessa tapauksessa tarkasteltava maakappale jaetaan poikkileikkaukseltaan neliön muotoisiin pylväisiin. Esimerkki 3D-liukupinnasta on esitetty kuvassa 2, jossa ruudukko kuvaa liukupinnan pylväsjaottelua.



Kuva 2. Liukupinta jaettuna pylväisiin sekä liukupinnan poikkileikkaus (Cheng & Yip 2007).

2D-lamellimenetelmiä, joissa täyttyvät voima- ja/tai momenttitasapainoehdot (Bishop, Janbu, Spencer ja Morgenstern-Price/GLE (General Limit Equilibrium), voidaan soveltaa 3D-pylväsmenetelmään, jossa voimat ja momentit ratkaistaan kahdessa, toisiaan poikkisuorassa suunnissa olevissa tasoissa (Rocscience 2017). Alkuperäisten LEM-menetelmien ollessa kaksidimensionaalisia, kolmannen ulottuvuuden mukaan ottamisen myötä 3D-menetelmissä täytyy tehdä uusia oletuksia, joita ei alkuperäisiin 2D-teorioihin sisälly. Näitä ovat esimerkiksi epäsymmetrinen liukupinnan muoto, liukumissuunta ja kolmannen ulottuvuuden myötä mukaan tulevat pylväiden väliset sisäiset voimat, joita ei esiinny 2D-tapauksissa (Roohollah & Nazri 2013). 3D LEM -menetelmässä kaikkia tasapainoehdoja ei pystytä toteuttamaan epäsymmetrisissä tapauksissa, vaikka se pohjautuisi kaikki tasapainoehdot täyttävään 2D LEM -teoriaan (Cheng & Yip 2007).

2.4.1 Voima- ja momenttitasapaino pylväissä (Morgenstern-Price)

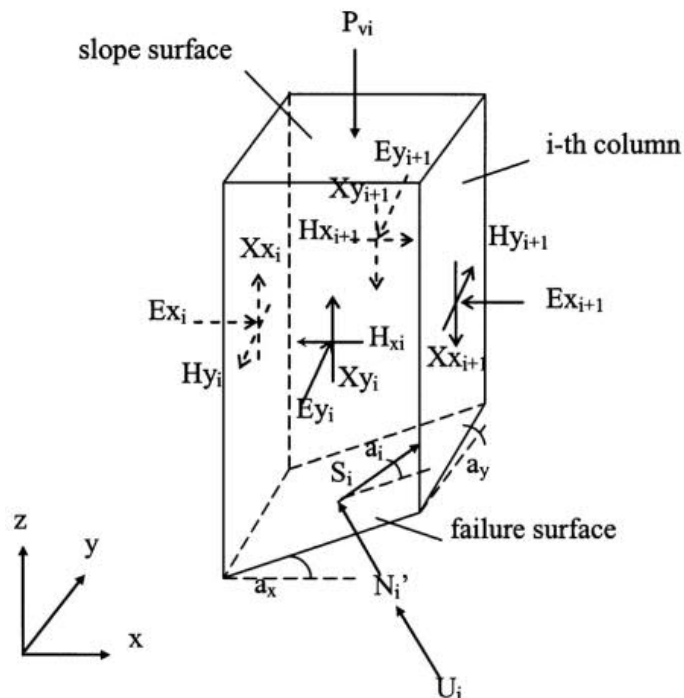
Tästä kappaleesta alkava 3D LEM -teoriaa käsittelevä kokonaisuus on poimittu lähteestä Cheng & Yip (2007). Murtohetken kynnyksellä maamassa oletetaan jäykäksi kappaleeksi. Liukusuunnalle on olemassa kolme vaihtoehtoa ilman ennakkorajoituksia:

1. maakappaleen pylväät liikkuvat samaan suuntaan,
2. maakappaleen pylväät liikkuvat toisiaan kohti ja

3. maakappaleen pylväät liikkuvat toisistaan pois päin.

Vaihtoehtoa 2 ei voida soveltaa, koska se kumoaisi oletuksen jäykästä kappaleesta. Jäljelle jäävät vaihtoehdot 1 ja 3, joista vaihtoehtoa 1 sovelletaan yleisesti. Vaihtoehdon 3 soveltaminen voi johtaa tilanteeseen, jossa varmuuskerrointa ei pystytä ratkaisemaan. Kun murtuminen tapahtuu, pylväät voivat erkaantua toisistaan, mutta sen vaikutuksen varmuuskertoimeen oletetaan olevan pieni. (Cheng & Yip 2007)

Kolmiulotteisessa tapauksessa pylvääseen vaikuttavat voimat tasapainotilanteessa on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Pylvääseen vaikuttavat ulkoiset ja sisäiset voimat tasapainotilanteessa (Cheng & Yip 2007).

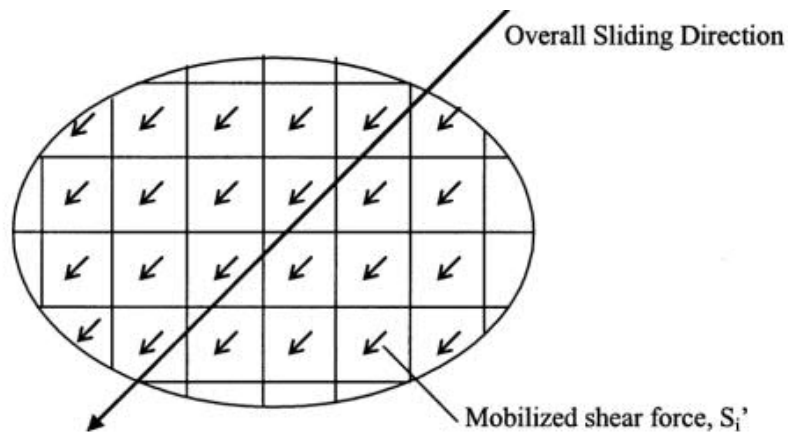
Pylvääseen vaikuttavat seuraavat voimat:

1. liukupinnan suuntakulma x-y-tasoon projisoituna, a
2. pohjan kaltevuuskulma x- ja y-suunnassa mitattuna pylvään keskipisteessä, a_x , a_y
3. pylväiden väliset sisäiset normaalivoimat x- ja y-suunnassa, E_{x_i} , E_{y_i}

4. vaakasuuntaiset pylväiden väliset sisäiset leikkausvoimat x- ja y-suunnassa, H_{xi}, H_{yi}
5. tehokas normaalivoima ja huokosveden paineesta johtuva voima, N_i, U_i
6. ulkoinen pystyvoima ja pylvään pohjan mobilisoitunut leikkausvoima, P_{vi}, S_i
7. pystysuuntaiset pylväiden väliset leikkausvoimat x-y-tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa X_{xi}, X_{yi} . (Cheng & Yip 2007)

Tässä teoriassa käsiteltävä laskentamenetelmä pohjautuu seuraaviin oletuksiin:

1. Mohr-Coulomb murtokriteeri on voimassa.
2. Pylvään painon ja ulkoisen pystykuorman oletetaan vaikuttavan pylväiden keskellä. Tämä ei ole täysin totta, mutta aiheutettu virhe ei ole niin suuri, että se vaikuttaisi oleellisesti laskentatuloksiin. Lisäksi sen myötä laskentayhtälöt yksinkertaistuvat huomattavasti.
3. Morgenster-Price -menetelmässä varmuuskerroin määritellään liukumissuunnan a' perusteella, joka täyttää momentti- ja voimatasapainoehdot.
4. Kaikilla pylväillä oletetaan olevan sama liukumissuunta (kuva 4).



Kuva 4. Pylväiden liukumissuunta x-y-tasossa tarkasteltuna (Cheng & Yip 2007).

Mohr-Coulombin murtokriteeriä ja luvussa 2.1 esitettyä varmuuskertoimen määritelmää soveltaen, varmuuskerroin 3D-tapauksessa tehokkailla parametreilla ilmaistuna on yhtälön 10 mukainen:

$$F = \frac{S_{fi}}{S_i} = \frac{C_i + N_i' \tan \varphi'}{S_i}; \quad C_i = c' A_i, \quad (10)$$

missä S_{fi} on pylvään pohjalla oleva leikkauslujuus
 N_i' on pohjalla vaikuttava tehokas normaalivoima
 c' tehokas koheesio
 A_i pylvään pohjan pinta-ala.

Pohjan leikkausvoima S_i ja pohjan normaalivoima N_i määritetään x-, y- ja z -suuntaisina komponentteina pylväälle i seuraavasti:

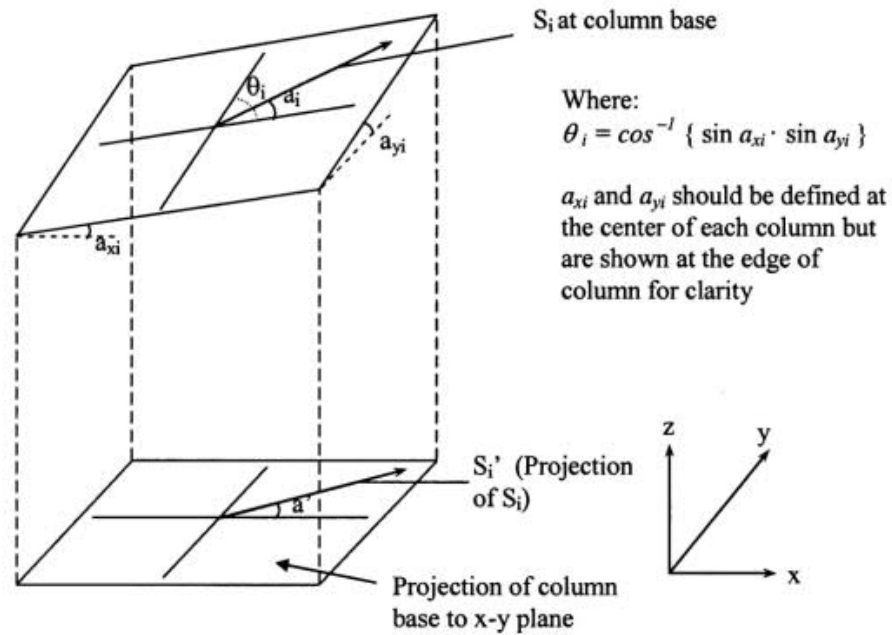
$$\begin{aligned} S_{xi} &= f_1 S_i; & S_{yi} &= f_2 S_i; & S_{zi} &= f_3 S_i, \\ N_{xi} &= g_1 N_i; & N_{yi} &= g_2 N_i; & N_{zi} &= g_3 N_i, \end{aligned} \quad (11)$$

missä f_1, f_2, f_3 ja g_1, g_2, g_3 ovat S_i - ja N_i -voimakomponenttien yksikkövektoreita.

Kun x-y-tasolle projisoitu liukumissuunta on sama kaikilla pylväillä, niin kullekin pylväälle voidaan määrittää leikkauskulma kolmiulotteisessa avaruudessa yhtälön 12 ja kuvan 5 mukaisesti:

$$a_i = \tan^{-1}(\sin \theta_i / (\cos \theta_i + (\cos \alpha_{yi} / \tan a' \cos \alpha_{xi}))) \quad (12)$$

missä θ_i, α_{xi} ja α_{yi} ovat kuvan 5 mukaiset kulmat.



Kuva 5. x-y-tasolle projisoidun ja kolmiulotteisen leikkauskulman suhde pylvään i pohjalla (Cheng & Yip 2007).

Pylväiden välisten leikkaus- ja normaalivoimien välinen suhde on yhtälöiden 13 ja 14 mukainen:

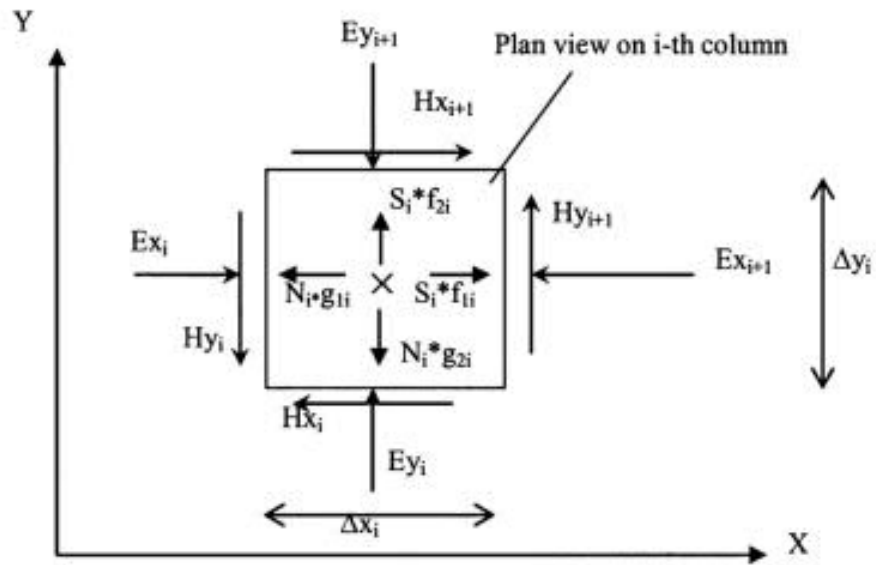
$$X_{xi} = E_{xi}f(x, y)\lambda_x; \quad X_{yi} = E_{yi}f(x, y)\lambda_y, \quad (13)$$

$$H_{xi} = E_{yi}f(x, y)\lambda_{xy}; \quad H_{yi} = E_{xi}f(x, y)\lambda_{yx}, \quad (14)$$

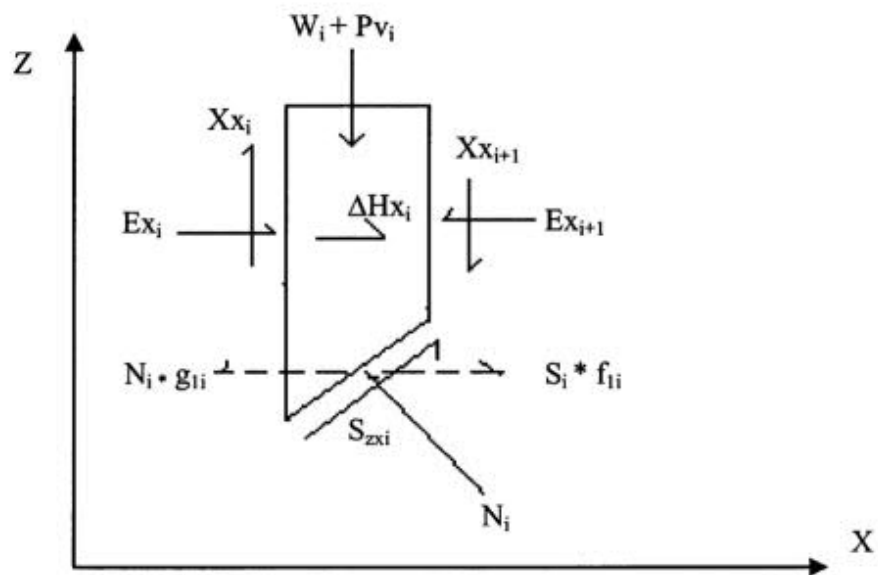
missä λ_x ja λ_y ovat pylväiden välisten leikkausvoimien mobilisaatiokertoimet x- ja y -suunnassa.

λ_{xy} ja λ_{yx} ovat pylväiden välisten leikkausvoimien mobilisaatiokertoimet xz- ja yz-tasoissa.

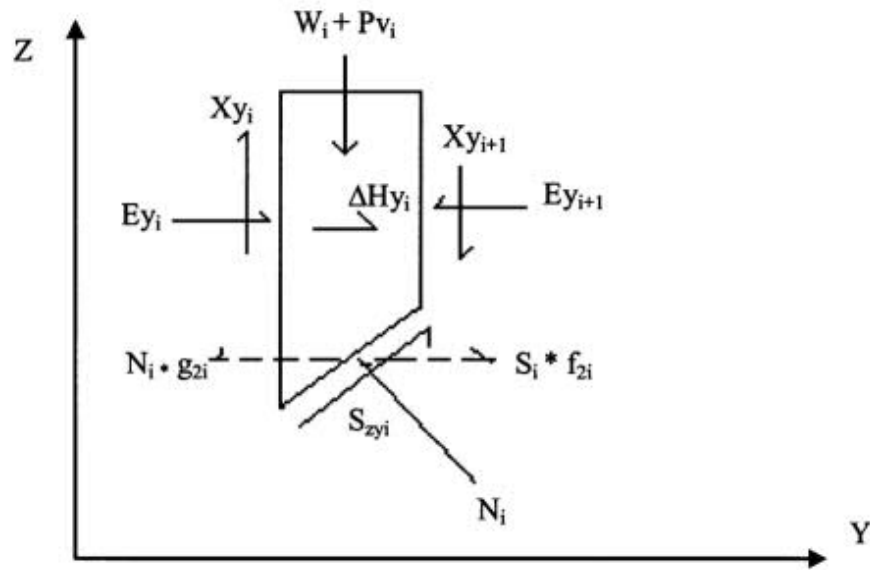
Pylvääseen vaikuttavat voimat tasotarkasteluna on esitetty kuvissa 6, 7 ja 8.



Kuva 6. x-y-tasossa vaikuttavat voimakomponentit (Cheng & Yip 2007).



Kuva 7. z-x-tasossa vaikuttavat voimakomponentit (Cheng & Yip 2007).



Kuva 8. z-y-tasossa vaikuttavat voimakomponentit (Cheng & Yip 2007).

Tasapainoyhtälöt x-, y- ja z-suunnassa pylväessä i ovat täten kaavojen 15, 16 ja 17 mukaiset:

$$\sum F_z = 0 \rightarrow N_i g_{3i} + S_i f_{3i} - (W_i + P_{vi}) - (X_{xi+1} - X_{xi}) - (X_{yi+1} - X_{yi}) = 0, \quad (15)$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow S_i f_{1i} - N_i g_{1i} - H_{xi} + H_{xi+1} - E_{xi+1} + E_{xi} = 0, \quad (16)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow S_i f_{2i} - N_i g_{2i} - H_{yi} + H_{yi+1} - E_{yi+1} + E_{yi} = 0. \quad (17)$$

Pohjan leikkaus- ja normaalivoimat voidaan ratkaista yhtälöistä 10, 13 ja 15, jolloin saadaan yhtälöt 18 ja 19:

$$N_i = A_i + B_i S_i; \quad S_i = \frac{C_i + (A_i - U_i) \tan \phi_i}{F \left[1 - \left(\frac{B_i \tan \phi_i}{F} \right) \right]}, \quad (18)$$

$$A_i = \frac{W_i + P_{vi} + \Delta E_{xi} \lambda_x + \Delta E_{yi} \lambda_y}{g_{3i}}; \quad B_i = -\frac{f_{3i}}{g_{3i}}, \quad (19)$$

missä U_i on $u_i A_i$

u_i on keskimääräinen huokosvedenpaine pylvään i pohjalla

ΔE_{xi} on $E_{xi+1} - E_{xi}$

ΔE_{yi} on $E_{yi+1} - E_{yi}$.

2.4.2 Voima- ja momenttitasapaino koko liukupinnalla

Kokonaisvoimatasapaino x-suunnassa muodostuu pylväiden välisistä x-suuntaisista leikkausvoimista ja pylväiden pohjalla vaikuttavista leikkaus- ja normaalivoimista pylväiden välisten x-suuntaisten normaalivoimien (E_x, E_{x+1}) kumoutuessa:

$$-\sum H_{xi} + \sum N_i g_{1i} - \sum S_i f_{1i} = 0. \quad (20)$$

Käyttämällä x-suuntaista varmuuskerrointa yhtälöissä 10 ja 18 ja järjestämällä uudelleen ne yhtälöön 20 voidaan x-suuntainen varmuuskerroin määrittää yhtälön 21 avulla:

$$F_x = \frac{\sum[(N_i - U_i) \tan \phi_i + C_i] f_{1i}}{\sum N_i g_{1i} - \sum H_{xi}}, 0 < F_x < \infty. \quad (21)$$

Momenttitasapainoyhtälö x-akselin suunnassa muodostuu voimien pystykomponenttien ja x-akselin suuntaisten momenttivarsien tulojen sekä voimien x-suuntaisten komponenttien ja pystysuuntaisten momenttivarsien tulojen summasta:

$$\sum (W_i + P_{vi} - N_i g_{3i} - S_i f_{3i}) R_X + \sum (N_i g_{1i} - S_i f_{1i}) R_Z = 0, \quad (22)$$

missä R_X ja R_Z ovat voimien momenttivarsia.

y-akselin suunnassa voimatasapainoehto on yhtälön 23 mukainen:

$$-\sum H_{yi} + \sum N_i g_{2i} - \sum S_i f_{2i} = 0. \quad (23)$$

Käyttämällä y-suuntaista varmuuskerrointa yhtälöissä 10 ja 18 sekä järjestelemällä ne uudelleen yhtälöön 23, saadaan y-akselin suuntaiseksi varmuuskertoimeksi:

$$F_y = \frac{\sum[(N_i - U_i) \tan \phi_i + C_i] f_{2i}}{\sum N_i g_{2i} - \sum H_{yi}}, 0 < F_y < \infty. \quad (24)$$

Momenttitasapainoyhtälö y-akselin suunnassa muodostuu voimien pystykomponenttien ja y-akselin suuntaisten momenttivarsien tulojen sekä voimien y-suuntaisten komponenttien ja pystysuuntaisten momenttivarsien tulojen summasta:

$$\sum (W_i + P_{vi} - N_i g_{3i} - S_i f_{3i}) RY + \sum (N_i g_{2i} - S_i f_{2i}) RZ = 0. \quad (25)$$

Varmuuskertoimen iterointi alkaa liukupinnan suuntakulman alkuoletuksen määrittämisellä. Tämän jälkeen iteroidaan x-akselin suuntainen momenttitasapaino tavoitteena määrittää sellainen leikkausvoimien mobilisaatiokertoimen λ_x -arvo, että yhtälön 21 x-akselin suuntainen varmuuskerroin saavuttaa arvon, joka täyttää x-akselin suuntaisen momenttitasapainon yhtälössä 22. Vastaavalla tavalla menetellään y-akselin suuntaisen leikkausvoimien mobilisaatiokertoimen λ_y -arvoa iteroidessa. Mikäli F_y - ja F_x -varmuuskertoimet eroavat toisistaan, iteroidaan liukupinnalle uusi suuntakulma, kunnes varmuuskertoimet F_y ja F_x ovat samansuuruiset ja täyttävät voima- ja momenttitasapainoehdot. (Cheng & Yip 2007)

Leikkausvoimien mobilisaatiokerrointa yz-tasossa eli termiä λ_{xy} ei ole olemassa 2D-menetelmässä. Tämän vuoksi 3D-tilanne vaatii uusia oletuksia, jotta vaakasuuntaiset pylvään leikkausvoimat pystytään ratkaisemaan. Yksi lähestymistapa asian ratkaisemiseksi on valita sellainen mobilisaatiokerroin λ_{xy} , joka tuottaa pienimmän varmuuskertoimen. Kertoimen käyttö ei ole kuitenkaan ongelmattonta, sillä sen käytön myötä laskeminen muodostuu raskaammaksi ja hitaammaksi. Kertoimen arvon kasvaessa liian suureksi yhtälöiden ratkaiseminen voi käydä mahdottomaksi. Toisaalta kertoimen vaikutuksen kokonaisvarmuuteen on todettu olevan pieni, joten leikkausvoimien mobilisaatiokertoimen λ_{xy} -arvon voi asettaa nolaksi ilman ongelmia useimmissa tapauksissa. (Cheng & Yip 2007)

2.4.3 3D Bishopin yksinkertaistettu menetelmä

Bishopin menetelmässä ei huomioida 3D-tapauksessa pylväiden välisiä vaaka- ja pystysuuntaisia leikkausvoimia. Menetelmässä huomioidaan vain momenttitasapaino, mutta vaakasuuntaiset voimat eivät ole tasapainossa. Tarkastellaan koko liukuvan kappaleen momenttitasapainoa x-suunnassa akselin suhteen, joka kulkee

palloliukupinnan keskipisteen kautta (x_0, y_0, z_0) y-akselin suuntaisesti. Käyttämällä F_{my} -termiä yhtälössä 10 ja järjestämällä yhtälö 22 uudestaan päädytään yhtälöön:

$$F_{my} = \frac{\sum\{K_{yi}(f_{1i}RZ_i + f_{3i}RX_i)\}}{\sum(W_i + P_{vi})RX_i + \sum N_i(g_{1i}RZ_i - g_{3i}RX_i)} \quad (26)$$

missä

$$K_{yi} = \frac{C_i + \frac{W_i + P_{vi}}{g_{3i} - U_i} \tan \phi_i}{1 + \frac{f_{3i} \tan \phi_i}{g_{3i} F_{my}}}$$

Vastaavasti F_{mx} voidaan määrittää yhtälön 25 avulla:

$$F_{mx} = \frac{\sum\{K_{xi}(f_{2i}RZ_i + f_{3i}RY_i)\}}{\sum(W_i + P_{vi})RY_i + \sum N_i(g_{2i}RZ_i - g_{3i}RY_i)} \quad (27)$$

missä

$$K_{xi} = \frac{C_i + \frac{W_i + P_{vi}}{g_{3i} - U_i} \tan \phi_i}{1 + \frac{f_{3i} \tan \phi_i}{g_{3i} F_{mx}}}$$

Tarkastellaan koko liukuvan kappaleen momenttitasapainoa x:n suunnassa akselin suhteen joka kulkee palloliukupinnan keskipisteen kautta (x_0, y_0, z_0) z-akselin suuntaisesti:

$$\sum(-N_i g_{1i} + S_i f_{1i})RY + \sum(N_i g_{2i} - S_i f_{2i})RX = 0. \quad (28)$$

Käyttämällä F_{my} -termiä yhtälössä 10 ja järjestämällä yhtälö 28 uudelleen päädytään yhtälöön 29:

$$F_{mz} = \frac{\sum\{K_{zi}(f_{2i}RX_i - f_{3i}RY_i)\}}{\sum N(g_{2i}RX_i - g_{1i}RY_i)} \quad (29)$$

missä

$$K_{zi} = \frac{C_i + \frac{W_i + P_{vi}}{g_{3i} - U_i} \tan \phi_i}{1 + \frac{f_{3i} \tan \phi_i}{g_{3i} F_{mz}}}$$

Tarkasteltaessa epäsymmetristä tapausta momenttitasapainon toteuttavassa pisteessä, akselien suuntaiset varmuuskertoimet F_{mx} , F_{my} ja F_{mz} ovat yhtä suuret. Täten koko liukuvan kappaleen varmuuskerroin F_m on seuraavan yhtälön mukainen:

$$F_m = F_{mx} = F_{my} = F_{mz}. \quad (30)$$

Liukuvan kappaleen suuntakulmaa iteroidaan siihen saakka, kunnes akselien suuntaiset varmuuskertoimet muodostuvat yhtä suuriksi. Todellisuudessa tasapainoa ei voida saavuttaa Bishopin menetelmässä kaikessa kolmessa suunnassa, koska yhtälö 28 on staattisesti epämääräinen. Sen vuoksi kyseinen yhtälö voidaan jättää hyödyntämättä, sillä varmuuskertoimen määrittämiseen riittää yhtälöiden 26 ja 27 ratkaiseminen. Yhtälön 28 vasemman puoleista osaa voidaan nimittää ns. tasapainottomaksi momenttitermiksi, joka symmetrisissä tapauksissa on aina nolla, jolloin tasapaino automaattisesti saavutetaan. Mikäli geometrian ja/tai kuormituksen epäsymmetrisyys on pientä, termi on tyypillisesti pieni. Yhtälön 28 vaatimuksen toteutumattomuus muodostaa kuitenkin 3D Bishop -menetelmälle rajoitteen epäsymmetrisissä kuormitustapauksissa.

2.4.4 Poikkileikkauksen voima- ja momenttitasapainoon liittyvät ongelmat Morgenstern-Price menetelmässä

Epäsymmetrisissä tapauksissa 3D Morgenstern-Price menetelmä on vahvasti staattisesti epämääräinen, jonka myötä poikkileikkauksittain tarkasteltuna momentti- ja voimatasapainoa ei voida yhtäaikaaisesti toteuttaa. 3D LEM -menetelmän suurimpia ongelmia onkin staattisesti epämääräisten yhtälöiden huomattavasti suurempi määrä 2D-tapaukseen verrattuna. 2D Morgenstern-Price menetelmässä yksittäisten lamellien voimatasapaino muodostetaan eksplisiittisten yhtälöiden avulla, jolloin vaakasuuntaisten voimien voimatasapaino toteutuu kaikissa lamelleissa. Samaa periaatetta ei voida soveltaa kuitenkaan 3D-menetelmässä, sillä siinä varmuuskerroin määräytyy poikkileikkauksen sijasta tarkasteltavan kappaleen kokonaistasapainon

perusteella yhtälöiden 20 ja 22 mukaisesti. Tämän myötä vaakasuuntaisten voimien tasapainoa ei voida toteuttaa kaikissa tarkasteltavissa poikkileikkauksissa. Myös momenttitasapainon suhteen kohdataan sama ongelma, sillä momenttitasapaino ei toteudu kaikissa poikkileikkauksissa, koska momenttitasapaino määräytyy koko kappaleen tasapainoehdon mukaisesti. Edellä mainitut puutteet ovat yhteisiä ongelmia kaikille 3D LEM -menetelmille.

Jotta vaakasuuntaisten voimien tasapainoehto saadaan täytettyä, vaaditaan seuraavia lisäoletuksia:

1. Mobilisaatiokerroin λ_x tai λ_y on x:n tai y:n funktio.
2. Varmuuskertoimen arvo täytyy vaihdella kussakin poikkileikkauksessa x- ja y-suuntaisten voima- ja momenttitasapainoehtojen mukaisesti.

Koska mobilisaatiokerroimien λ_x tai λ_y arvojen määrittämiseksi ei ole olemassa teoreettista, tutkittua taustatietoa ja arvojen iterointi poikkileikkauksen tasapainon saavuttamiseksi on erittäin työlästä, ensimmäinen oletus jätetään tekemättä 3D analyyseissä. Toisen oletuksen täyttäminen vaatii myös runsaasti iterointia ja uusia lisäoletuksia. Edellisen ohella kokonaisvarmuuskertoimen määrittäminen on hankalaa alati poikkileikkauksittain muuttuvan varmuuskertoimen myötä. Lisäksi vaaditaan, että sortumahetkellä koko kappaleen on liikuttava. Tämä ei kuitenkaan toteutuisi, mikäli varmuuskertoimen arvo vaihtelisi liukupinnan eri poikkileikkaukskohdissa.

Poikkileikkauksen vaakasuuntaisten voimien tasapaino pystytään saavuttamaan Chengin & Yipin (2007) mukaan myös poikkileikkauksen tasapainoehdon perusteella ratkaisemalla ensin viimeisen tai ensimmäisen pylvään pohjan leikkaus- ja normaalivoima x:n suunnassa yhtälöiden (15) ja 16 avulla, ja y:n suunnassa yhtälöiden (15) ja 17 avulla. Tällä tavoin menetellessä poikkileikkauksen tasapaino pystytään määrittämään vain joko x:n tai y:n suunnassa mutta ei yhtä aikaa molemmissa suunnissa. Uusien tasapainoehtojen ja rajoitteiden mukaan ottamisen myötä ratkaisun konvergointi tulee haastavammaksi ja ratkaisun löytyminen tietyissä tapauksissa voi olla mahdotonta. Niissä tapauksissa, joissa ratkaisu on pystytty konvergoimaan poikkileikkausten tasapainoehto toteuttaen, on varmuuskerroin ollut kuitenkin käytännöllisesti katsoen sama verrattuna ratkaisuun, jossa ei ollut vaadittu

poikkileikkauksen tasapainoehdon toteutumista. Tämän myötä poikkileikkauksen tasapainoehdon vaatimusta ei ole nähty oleellisena. Poikkileikkauksen tasapainoehdon toteutumattomuuden vuoksi muodostuu kappaleeseen jäännösmomentti z-akselin suhteen eli kokonaismomenttitasapaino z-akselin suhteen ei toteudu täysin.

2.5 3D FEM -menetelmä

2.5.1 Elementtimenetelmä geotekniikassa

Elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä, jolla voidaan ratkaista monentyyppisiä geoteknisiä ongelmia. Perinteiset laskentamenetelmät perustuvat yleensä yksinkertaistettuihin oletuksiin, jonka myötä kaikkia tekijöitä ei voida huomioida ja laskentatulosten tarkkuus sen vuoksi kärsii. Elementtimenetelmässä ei ole tätä ongelmaa. FEM-menetelmällä pystytään käsittelemään muun muassa monimutkaisia vaihtelevia kuormitustilanteita, epälineaarista materiaalin käyttäytymistä ja maaperän ja siihen yhteydessä olevan rakenteen yhteiskäyttäytymistä. (USACE 1995, s.5)

Tyypillisesti elementtimenetelmällä tehdyt analyysit mallinnetaan useassa vaiheessa, joiden tarkoitus on simuloida todellisia rakentamisvaiheita, esimerkiksi vaiheittain tehtävää kaivantoa tai tiepengertä. Vaiheittain tehtävällä analyysillä on kaksi selkeää etua:

1. Geometriaa voidaan muuttaa vaiheiden välillä lisäämällä tai poistamalla elementtejä esimerkiksi kaivannon tai tiepenkereen rakentamisen vuoksi.
2. Maaperän ominaisuudet voivat muuttua mallinnettavalla aikavälillä jotka aiheutuvat maaperän jännitystilän muuttumisen myötä. (U.S Army Corps Of Engineering 1995, s. 5)

Elementtimenetelmän edut korostuvat epälineaaristen ongelmien ratkaisussa, sillä ne ovat useimmiten vaikeasti ratkaistavia ongelmia. Epälineaariset ongelmat ovat luonteeltaan iteratiivisia, koska materiaaliominaisuudet ja/tai tarkasteltavan mallin geometria ovat itsessään ratkaisun funktioita. Stabiliateetilaskenta on yksi osa-alue, jossa epälineaarista ratkaisutapaa voidaan soveltaa FEM-menetelmällä. (Griffits & Lane 1999, s. 388)

2.5.2 SRM-menetelmä (Strength Reduction Method)

Elementtimenetelmässä varmuuskerroin määritetään useimmiten lujuuden pienentämismenetelmällä, josta käytetään yleisesti lyhennettä SRM (Strength Reduction Method). Menetelmässä käyttäjän määrittämiä lujuusparametreja pienennetään vaihe vaiheelta niin kauan, kunnes murtotila saavutetaan:

$$F = \frac{\tan\varphi_{input}}{\tan\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}}. \quad (31)$$

Yhtälössä osoittajana olevat termit ovat käyttäjän ohjelmaan määrittämät lujuusparametrit ja nimittäjänä olevat termit vastaavat varmuuskertoimella jaettuja lujuusparametreja. (Plaxis 2018, s. 287)

Varmuuskertoimen laskenta tehdään Mohr-Coulomb materiaalimallilla ja menetelmän periaate on Rocsciencen (2004) mukaan seuraava:

Vaihe 1: Elementtimallin rakentaminen ohjelmistoon käyttäjän määrittämien muodonmuutos- ja lujuusparametrien perusteella. Mallin laskenta ja luiskan maksimimuodonmuutoksen laskeminen.

Vaihe 2: Kertoimen F arvon kasvattaminen (yhtälö 2) ja kerrointa vastaavien Mohr-Coulomb -materiaaliparametrien uudelleen määrittäminen malliin. Mallin laskenta ja luiskan maksimimuodonmuutoksen laskeminen.

Vaihe 3: Vaiheen 2 toistaminen käyttäen systemaattisesti kasvavaa F:n arvoa siihen pisteeseen saakka, kunnes ratkaisu ei ole enää laskettavissa.

Lujuusparametreja siis pienennetään iteratiivisesti siihen saakka, kunnes luiska sortuu. Viimeinen laskettu kriittinen F:n arvo ennen murtumista vastaa luiskan varmuuskerrointa. (Rocscience 2004)

Laskennan aluksi maamassan oletetaan olevan kimmoisessa tilassa. Painovoiman generoinnilla luodaan elementteihin solmuvoimat, jotka vaikuttavat pystysuorassa

suunnassa. Tämän jälkeen normaali- ja leikkausjännitykset määritetään elementtiverkon solmupisteisiin, joita verrataan Mohr-Coulombin murtokriteeriin. Mikäli jännitykset tarkasteltavassa pisteessä sijaitsevat Mohr-Coulombin murtosuoran alapuolella, sen oletetaan säilyvän kimmoisessa tilassa. Solmupiste, jossa jännitykset sijaitsevat murtosuoralla tai sen yläpuolella, oletetaan myötäväksi eli plastiseksi. Murtuma tapahtuu, kun riittävä määrä elementtiverkon solmupisteitä on saavuttanut plastisen tilan. (Griffits & Lane 1999, s. 389)

Elementtimenetelmän stabiliteettilaskenta perustuu iteratiiviseen muunneltuun Newton-Raphson -menetelmään jota kutsutaan viskoplastiseksi algoritmiksi. Algoritmi pyrkii jakamaan plastisessa tilassa olevan vyöhykkeen murtosuoran ylittävät jännitykset viereisille solmupisteille, joilla on vielä lujuuskapasiteettia jäljellä. Jännitysten uudelleenjakautumisprosessi saavutetaan algoritmilla, joka tuottaa itse tasapainottavia solmuvoimia niihin elementteihin, joissa Mohr-Coulomb-murtokriteeri ylittyy. Itse tasapainottavat voimat eivät muuta elementtiverkkoon kohdistuvaa kokonaispainovoimaa vaan ne vaikuttavat pelkästään jännityksiin paikallisesti. Jännitysten uudelleen jakautumisen myötä siis alue, joka on alun perin kimmoisessa tilassa, voi muuttua plastiseksi. Iterointia jatketaan siihen saakka, kunnes sekä tasapainotila että murtokriteeri täyttyvät kaikissa solmupisteissä vaaditun toleranssin sisällä. Kun algoritmi ei pysty täyttämään edellä mainittuja vaatimuksia kaikissa plastisessa tilassa olevissa pisteissä, murtuman oletetaan tapahtuvan. Murtumaan liittyy yleensä huomattavan suuria siirtymiä. (Lechman & Griffiths 1999, s. 444)

FEM menetelmän suurimmat edut varmuuskertoimen laskennassa ovat Griffits & Lanen (1999, s. 388-389) mukaan:

1. Ennakko-oletuksia liukupinnan sijainnin ja muodon suhteen ei tarvita, sillä liukupinta muodostuu ”automaattisesti” vyöhykkeelle, jossa maan leikkauslujuus ei ole riittävä suhteessa leikkausjännitykseen.
2. Koska FEM:ssä ei jaeta maakappaletta lamelleihin, niin sen myötä ei myöskään tarvitse tehdä oletuksia liittyen lamellien välisiin voimiin. Tasapainotila säilyy siihen saakka, kunnes murtuma tapahtuu.

3. Realistisia materiaalin kokoonpuristuvuusparametreja käytettäessä pystytään arvioimaan lisäksi muodonmuutoksia todenmukaisien kuormitustasojen mukaisissa tilanteissa.
4. FEM-menetelmä tunnistaa leikkausmurtuman progressiivisen kehittymisen ja lujuuden mobilisoitumista voidaan tarkastella liukupinnan eri osissa.

2.5.3 FEM- ja LEM-menetelmien erot stabiliteetilaskennassa

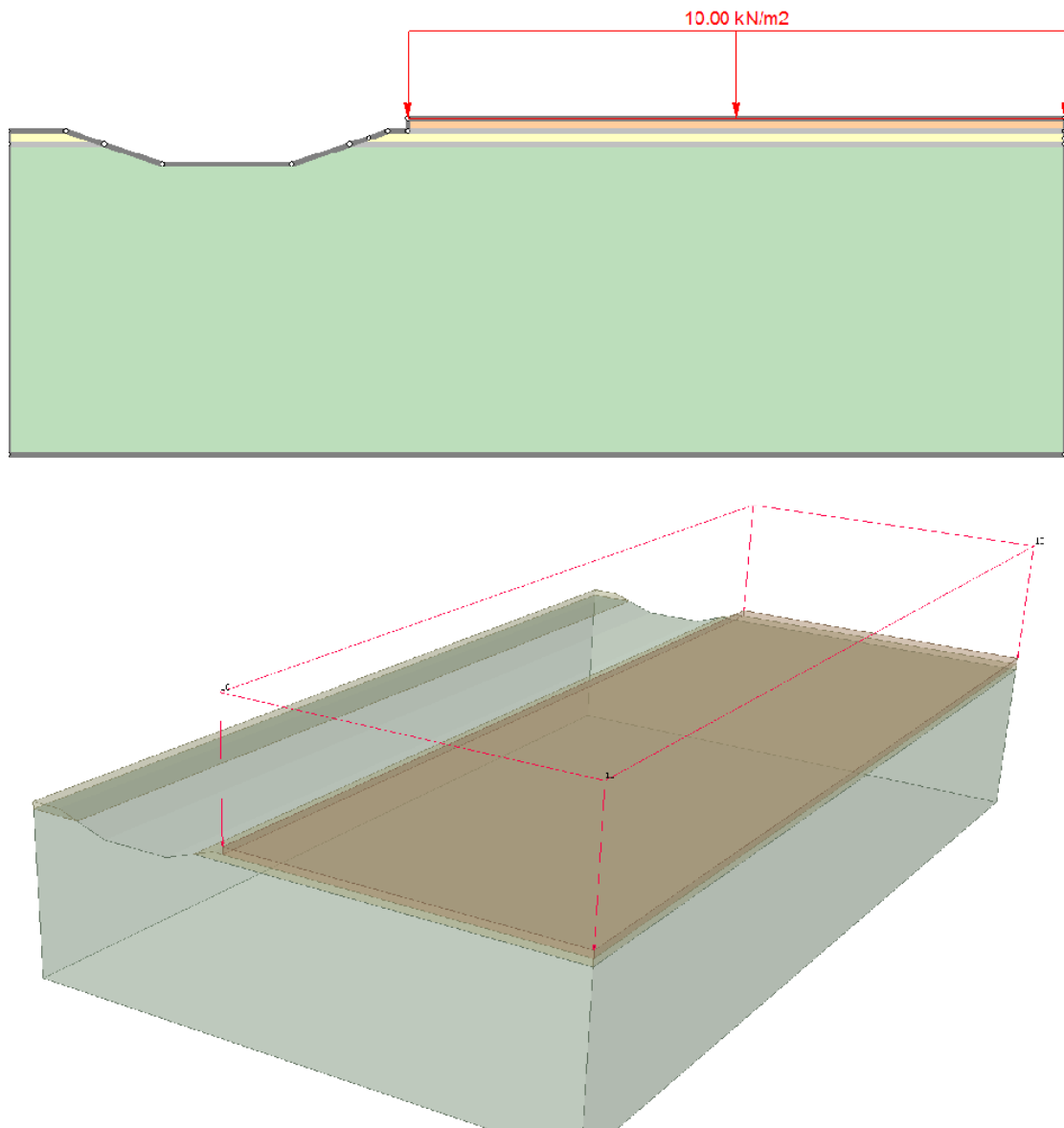
Todellisuudessa varmuuskerroin liukupinnan eri osissa vaihtelee, jolloin LEM-menetelmän oletus liukupinnan vakiovarmuuskertoimesta eli vakiosuuruisesta leikkauslujuuden ja leikkausjännityksen suhteesta koko liukupinnalla ei päde (Wright et al 1973). FEM-menetelmällä siis pystytään simuloimaan todellista jännitystilaa LEM-menetelmää tarkemmin, sillä elementtimenetelmässä varmuuskerroin voi vaihdella liukupinnan eri osissa.

FEM-menetelmä vaatii lamellimenetelmään verrattuna enemmän lähtöarvoja laskentaa varten Mohr-Coulomb-materiaalimallia käytettäessä. LEM-menetelmässä lähtöarvoina vaaditaan pelkästään materiaalin tilavuuspaino (γ), sekä avoimen tilan lujuusparametrit kitkakulma (ϕ) ja koheesio (c) tai suljetun tilan leikkauslujuus (S_u). Elementtimenetelmän SRM-menetelmässä tarvitaan edellisten lisäksi kimmomoduuli (E), Poissonin luku (ν) ja dilataatiokulma (ψ). Kimmoisen tilan muodonmuutosparametreilla ja plastisen tilan muodonmuutoksiin vaikuttavalla dilataatiokulmalla on todettu olevan kuitenkin hyvin pieni vaikutus SRM-menetelmällä saatujen varmuuskertoimien arvoon. Näiden vaikutus varmuuskertoimeen on todettu olevan muutaman prosentin luokkaa (Cheng et al 2007, s. 146-147).

Stabiliteetin laskenta elementtimenetelmällä on huomattavasti hitaampaa kuin LEM-menetelmällä. Ero korostuu entisestään 3D-mitoituksessa. Sen vuoksi elementtimenetelmää käytetään yleensä vain vaativimpien tapausten laskennassa.

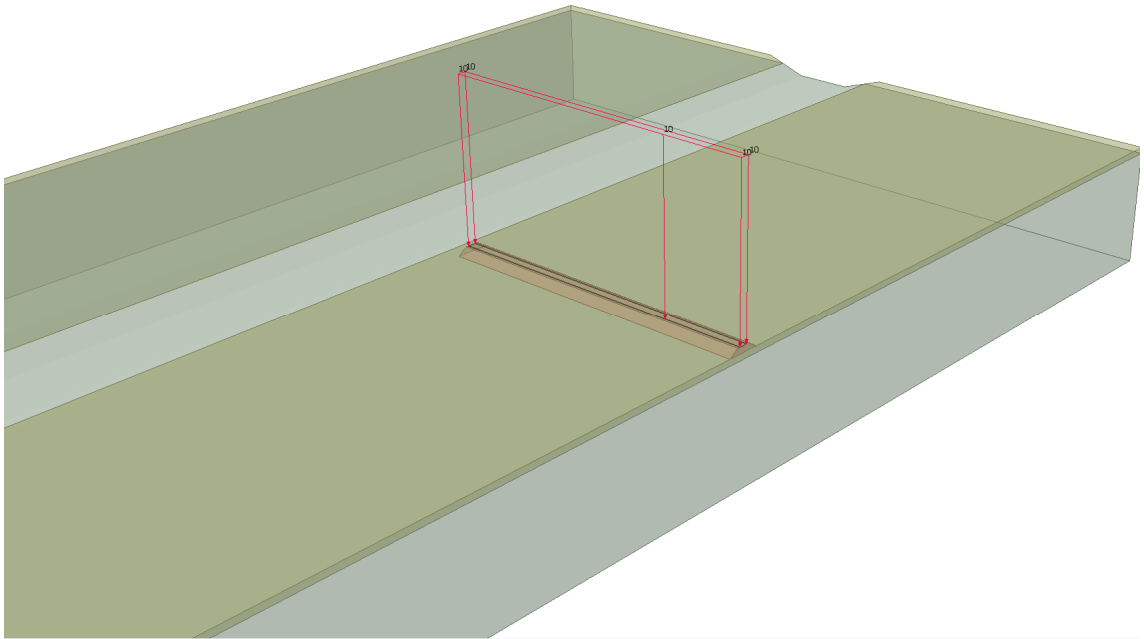
3 2D- JA 3D-GEOMETRIAN VÄLINEN ERO

2D-malli perustuu oletukseen, että mallinnettava rakenne jatkuu äärettömän pitkänä tason syvyysuunnassa. Tämän myötä sillä ei pysty mallintamaan paikallista geometriaa, esimerkiksi pituussuuntaista tiepengertä tai paikallista kuormitusta. 3D-mallissa vastaavaa ongelmaa ei ole, sillä kolmannen ulottuvuuden mukaan ottamisen myötä geometria on mahdollista mallintaa todellisten mittasuhteiden mukaisesti. Esimerkki tienkereen 2D-poikkileikkauksesta, jonka päällä on pintakuorma ja sitä vastaavasta 3D-mallista on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. 2D-poikkileikkaus ja sitä vastaava 3D-malli.

Mikäli mallinnettava penger on kapea, 2D-malli vääristää geometriaa huomattavasti. Vastaavasti 3D-ohjelmistolla mallinnettu paikallinen tiepenger, jonka päällä on pintakuorma, on esitetty kuvassa 10. Tämän tyyppistä 3D-mallin mukaista kuormitustilannetta ei ole mahdollista mallintaa 2D-ohjelmistolla.



Kuva 10. Paikallinen tiepenger mallinnettuna 3D-ohjelmistolla.

4 LASKENTAKOhteet JA -MENETELMÄT

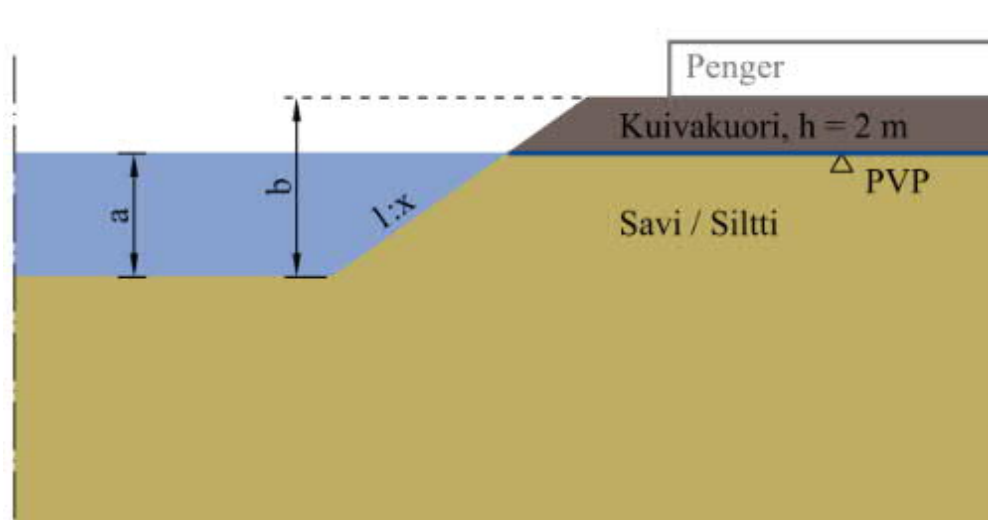
Laskentaan on valittu kaksi tyyppikohdetta: vesistö- ja alikulkukohde. Kummassakin kohteessa on kolme pohjamaatyyppeä: pohjamaatyyppi 1 on pehmeä savi, pohjamaatyyppi 2 on sitkeä savi ja pohjamaatyyppi 3 on siltti. Pehmeä ja sitkeä savi on laskettu suljetun tilan parametreilla, siltti avoimen tilan parametreilla. Kaikissa tapauksissa on pinnassa kuivakuorikerros, jonka lujuus on sama kaikissa pohjamaatyyppissä. Laskentamallit on pyritty rakentamaan siten, että vesistötapauksessa luonnontilan mukaisen ja alikulkukohteessa leikkauksen mukaisen tilanteen stabiliteetin kokonaisvarmuus olisi vähintään 1,5.

Vesistö- ja alikulkukohteessa kullakin pohjamaatyyppillä on tutkittu pengerialueiden vaikutusta penkereen pituussuuntaiseen stabiliteettiin kolmella eri pengerialueella. Pengerialueiden vakavuus on laskettu ilman liikennekuormaa ja liikennekuorman kanssa.

4.1 Pohjasuhteet

4.1.1 Vesistökohteet

Vesistökohteen poikkileikkauksen geometria vaihtelee pohjamaatyyppin mukaan. Poikkileikkaus on esitetty kuvassa 11. Vesistökohteessa vesisyvyys vaihtelee pohjamaatyyppin perusteella 3-5 m välillä. Pohjamaatyyppissä 1 luiskakaltevuus on 1:3 ja pohjamaatyypeissä 2 ja 3 puolestaan 1:2. Uoman kokonaisvyvyys vaihtelee 5-8 m välillä ollen matalin pohjamaatyyppissä 1. Vedenpinnan korkeus uomassa on kuivakuorikerroksen alapinnan tasossa lukuun ottamatta pohjamaatyyppi 3:a, jossa vedenpinta on 1 m kuivakuorikerroksen alapintaa alempana. Pohjavedenpinta on kaikissa pohjamaatyypeissä kuivakuorikerroksen alapinnassa. Uoman pohjan leveys on 20 m kaikissa tapauksissa. Yhteenveto poikkileikkauksen muuttujista on esitetty taulukossa 1.



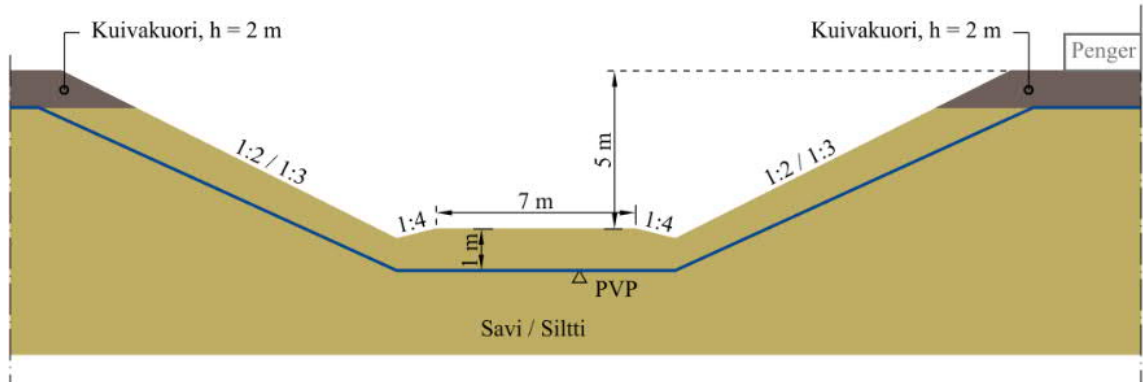
Kuva 11. Vesistökohteen poikkileikkauksen geometria ja muuttujat.

Taulukko 1. Vesistökohteen poikkileikkauksen muuttujat pohjamaatyypeittäin.

<i>Muuttuja</i>	<i>Pohjamaatyyppi 1</i>	<i>Pohjamaatyyppi 2</i>	<i>Pohjamaatyyppi 3</i>
Luisakaltevuus, 1:x	3	2	2
Vesisyvyys, a (m)	3	5	5
Kokonaissyvyys, b (m)	5	7	8

4.1.2 Alikulkukohde

Alikulkukohteessa leikkauksen syvyys on mitoitettu 6 m alikulkukorkeuden mukaan ollen vakio kaikilla pohjamaatyypeillä. Alittavan tien leveys on 7 m. Tien molemmin puolin on 1 m leveä oja-painanne, jonka sisäluisikan kaltevuus on 1:4. Pohjamaatyypissä 1 leikkausluiskan kaltevuus on 1:3, pohjamaatyypissä 2 ja 3 kaltevuus on 1:2. Pohjavedenpinta on leikkausluiskan ulkopuolella kuivakuorikerroksen alapinnassa ja leikkauksessa olevan tien kohdalla 1m syvyydellä tien pinnasta. Pohjavedenpinnan kaltevuus on hieman leikkausluiskaa loivempi. Tien rakennekerroksia ei ole mallinnettu. 3D-mallissa alittavan tien pituuskaltevuus on 5 %. Alikulkukohteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Alikulkukohteen poikkileikkaus.

4.1.3 Pohjamaan materiaaliparametrit

Pohjamaatyypissä 1 kuivakuorikerroksen alapuolella olevan saven suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on 10 kPa ja pohjamaatyypissä 2 minimiarvo on 25 kPa. Molemmissa pohjamaatyypeissä saven suljettu leikkauslujuus kasvaa 1 kPa/m, vesistökohteessa kerrospaksuuden funktiona ja alikulkuohteessa tason funktiona kuivakuorikerroksen alapinnasta alkaen. Kaikissa pohjamaatyypeissä pinnassa olevan kuivakuorisaven suljettu leikkauslujuus on vakio, 30 kPa. Pohjamaatyypeissä 1 ja 2 käytetyt tärkeimmät materiaaliparametrit käyvät ilmi taulukosta 2.

Taulukko 2. Pohjamaatyypien 1 ja 2 tärkeimmät materiaaliparametrit.

<i>Materiaali</i>	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	S_u (kPa)		ΔS_u (kPa/m)
			<i>Pohjamaa- tyyppi 1</i>	<i>Pohjamaa- tyyppi 2</i>	
Kuivakuorikerros	16	-	30	30	0
Savi	16	17	10	25	1

Pohjamaatyypissä 3 kuivakuorikerroksen alla on silttiä, jonka koheesio on 3 kPa ja kitkakulma 25° (taulukko 3). Penkereen rakentamisesta aiheutuvan huokosvedenpaineen kasvun on oletettu olevan purkautunut (konsolidoitunut tilanne), eikä liikennekuormituksen johdosta aiheutuvaa huokosvedenpaineen kasvua huomioida silttikerroksessa, koska kuormituksen on oletettu olevan lyhytaikaista.

Elementtimenetelmässä käytetyt kimmoisen tilan materiaaliparametrit Mohr-Coulomb-materiaalimallissa on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 3. Pohjamaatyypin 3 tärkeimmät materiaaliparametrit.

<i>Materiaali</i>	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	S_u (kPa)	C (kPa)	ϕ (°)
Kuivakuorikerros	16	-	30	-	-
Siltti	17	19	-	3	25

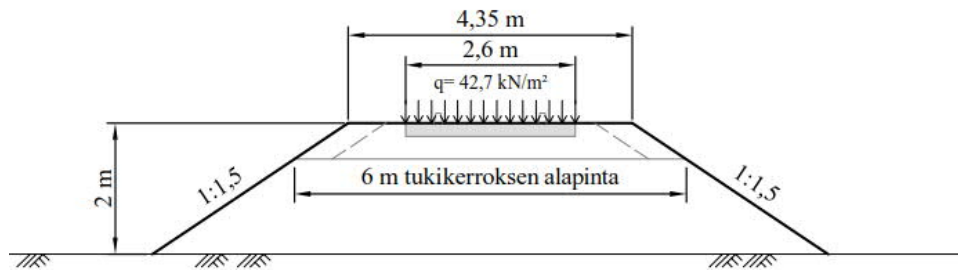
Taulukko 4. Elementtimenetelmässä käytetyt Mohr-Coulombin materiaalimallin kimmoisen tilan materiaaliparametrit.

<i>Materiaali</i>	E (kN/m^2)	ν
Kuivakuorikerros	16 000	0,495
Savi, pohjamaatyypin 1	2 400	0,495
Savi, pohjamaatyypin 2	2 400	0,495
Siltti	15 000	0,35
Pengertäyttö	30 000	0,35

4.2 Kuormittavat penkereet

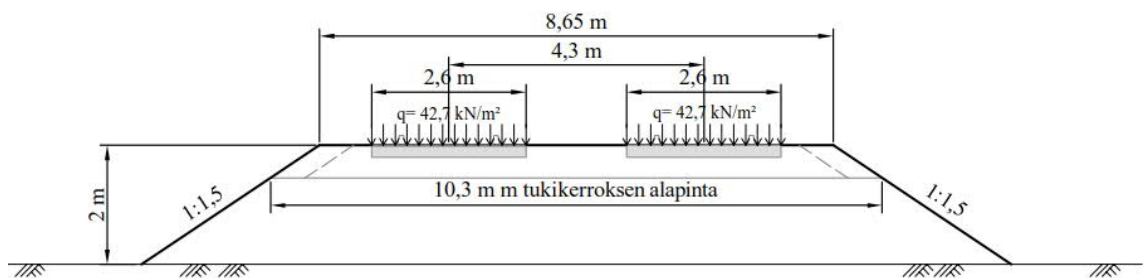
Laskentaan on valittu kaikkiaan kolme leveydeltään erilaista pengerpoikkileikkausta, joista kaksi edustaa ratapoikkileikkausta ja yksi tiepoikkileikkausta. Pengerkorkeus on kaikissa tapauksissa 2 m ja luiskakaltevuus 1:1,5. Pengerleveyksien vaihteluväli on valittu suureksi, jotta pengerleveyden vaikutuksesta laskentatulosten välisiin eroihin saataisiin mahdollisimman selkeä käsitys.

Yksiraiteisen ratapenkereen harjan leveys on 4,35 m ilman jätkänpolkua ja pintakuormituksen leveys 2,6 m. Pengerpoikkileikkaus on esitetty kuvassa 13



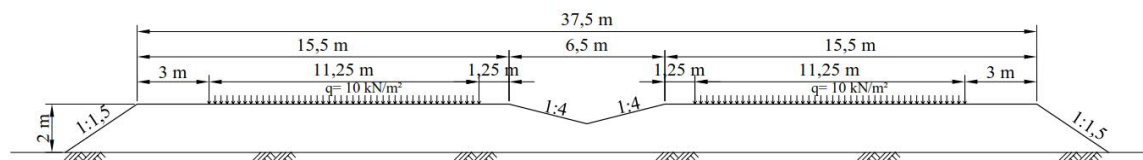
Kuva 13. Yksiraiteisen ratapenkereen poikkileikkaus.

Kaksiraiteisen ratapenkereen harjan leveys on 8,65 m ilman jätkänpolkua. Raiteiden etäisyys keskeltä keskelle on 4,3 m. Kaksiraiteisen ratapenkereen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Kaksiraiteisen ratapenkereen poikkileikkaus.

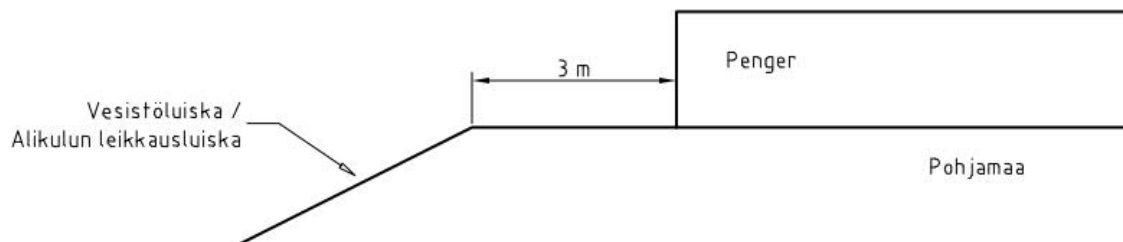
Moottoritien poikkileikkaukseksi valittiin kolmikaistainen moottoritie, jonka maksimijonopeus on 120 km/h. Ajoradan ja pientareiden yhteisleveys on 15,5 m ja keskialueen leveys 6,5 m. Keskialueen luiskakaltevuus on 1:4. Penkereen yläpinnan kokonaisleveys on 37,5 m (kuva 15).



Kuva 15. Moottoritien poikkileikkaus.

Ratapoikkileikkauksissa pintakuormitus vastaa 25 tn akselikuormaa kuormakaaviolla LM71-25 ohjeen *RATO 3 Radan rakenne* mukaisesti (nauhakuorman ominaisarvo 111 kN/m). Työssä on käytetty 2D-stabiliteetilaskennassa käytettäviä liikennekuorman arvoja myös 3D-laskennoissa, jotta saadaan vertailukelpoisia tuloksia keskenään. Moottoritietapauksessa liikennekuormituksen pintakuorma ajoradoilla on 10 kN/m².

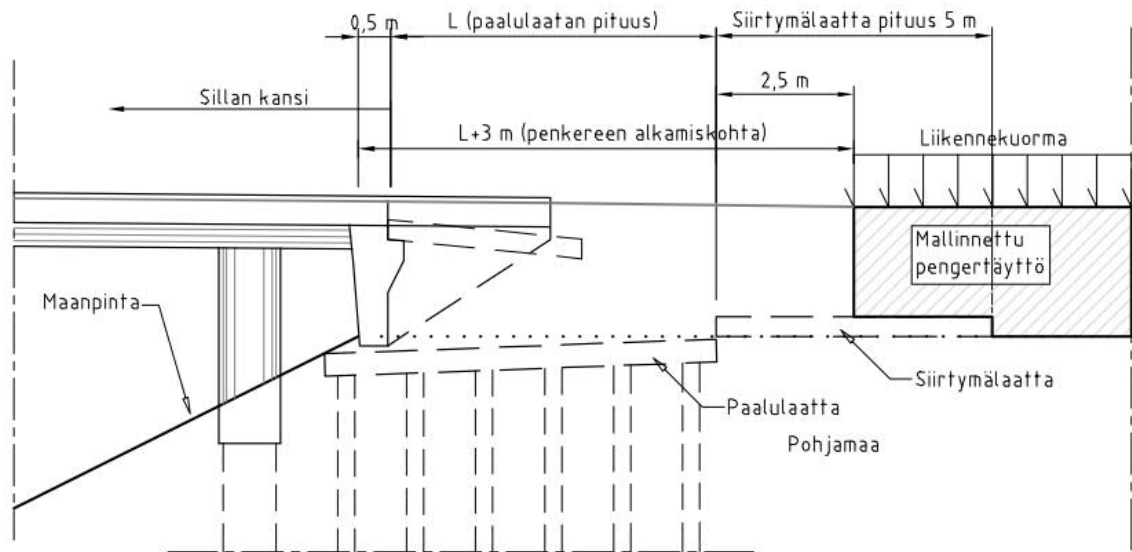
Penger on mallinnettu laskennoissa homogeenisena kerroksena, jonka tilavuuspaino on 19 kN/m³ ja kitkakulma 36°. Penkereen päättymiskohta stabiliteetilaskelmissa on ollut 3 m etäisyydellä vesistöluiskan/alikulun leikkausluiskan reunasta, vastaten likimain sillan päädyssä olevan 5 m pituisen siirtymälaatan keskikohtaa. Pääty on mallinnettu pystysuorana (kuva 16).



Kuva 16. Penkereen päädyn sijoittuminen suhteessa leikkausluiskaan.

4.3 Paalulaatan pituustarkastelu

Paalulaatan pituustarkastelun mittaperiaate on esitetty kuvassa 17. Penkereen ja liikennekuorman alkamiskohta laskentaohjelmissa on 5 m pituisen siirtymälaatan keskellä. Paalulaatta alkaa 0,5 m päästä luiskan yläreunasta, jolloin etäisyydeksi siirtymälaatan keskelle muodostuu paalulaatan pituus $L + 3$ m. Pengerkorkeus siirtymälaatan päällä on 2 m.



Kuva 17. Paalulaatan pituustarkastelun mittaperiaate.

4.4 Laskentamenetelmät

Tyypikohteiden laskennassa käytettiin neljää eri ohjelmistoa: Rocscience Slide 6.0, Rocscience Slide³ 2017, Novapoint GeoCalc 3.1 ja Plaxis 3D. LEM-menetelmässä käytettiin kaikissa ohjelmistoissa yksinkertaistettua Bishopin menetelmää.

Rocscience Slide 6.0 pohjautuu 2D LEM-menetelmään. Liukupintojen muotoina käytettiin sekä vapaan että ympyrän muotoisia liukupintoja. Ympyrän muotoiset liukupinnat haettiin määrittämällä liukupintojen keskipisteen grid-verkko, jonka perusteella ohjelma generoi kullekin pisteelle vaarallisimman liukupinnan. Vapaan muotoiset liukupinnat määritettiin ”Path Search” -toiminnolla kaikissa tapauksissa lukuun ottamatta paalulaatan pituustarkastelua, jossa vapaat liukupinnat generoitiin käyttäen ”Simulated Annealing” -toimintoa. Kaikki vapaan muotoiset liukupinnat olivat optimoimattomia. Kuivakuorikerroksen vetolujuus tarkistettiin kaikissa tapauksissa ja eliminoitiin tarvittaessa määrittämällä kuivakuorikerrokseen vetohalkeamakerros (Tension Crack).

Rocscience Slide³ 2017 on kolmiulotteinen ohjelmisto, joka perustuu kappaleessa 2 käsitelyyn 3D LEM -menetelmään. Liukupinnan muotoina käytettiin pääosin vapaan

muotoisia liukupintoja ilman optimointia. Liukupinnan optimoinnissa pienimmän varmuuskertoimen omaavan liukupinnan geometriaa optimoidaan siten, että varmuuskertoimen arvoksi saadaan matemaattinen minimi. Optimoinnin myötä liukupintaan saattaa muodostua äkillisiä suunnanmuutoksia, jotka eivät ole välttämättä kinemaattisesti mahdollisia. Tämän vuoksi liukupinnan optimointi päätettiin jättää tekemättä työn edetessä. Säännöllisen pallon muotoisia liukupintoja käytettiin tietyissä tapauksissa, jotka generoitiin Slide 6.0 -ohjelmistoa vastaavalla tavalla kolmiulotteisen grid-verkon määrittämien palloliukupintojen keskipisteiden perusteella. Liukupintojen muodot määrättiin symmetrisiksi penkereen keskilinjan suhteen kaikilla liukupinnan muodoilla. Vapaan muotoiset liukupinnat generoitiin ”Cuckoo Search” -algoritmin mukaisella hakumenetelmällä.

Novapoint Geocalc 3.1 pohjautuu 2D LEM -menetelmään. Ohjelmalla laskettiin ympyrän muotoisen liukupinnan varmuuskerroin päätyvastus huomioiden (2D LEM + päätyvastus). Pohjamaatyypeissä 1 ja 2 lepopaine kerroin K_0 oli 1, ja pohjamaatyypissä 3 kertoimen arvo oli 0,58. Kertoimet määritettiin lepopaineen laskukaavalla materiaalin kitkakulman perusteella. Lepopainekertoimen arvo vaikuttaa liukuvan kappaleen oletetun päädyn maanpaineeseen. Mitä suurempi on maanpainekertoimen arvo, sitä suurempi lujuus päätyvastuksesta mobilisoituu, mikäli käytetään avoimen tilan materiaaliparametreja. Suljetun tilan parametreilla laskettaessa lepopainekertoimen arvolla ei ole vaikutusta päätyvastuksen suuruuteen, sillä siinä tapauksessa lujuus muodostuu pelkästään maaperän jännityksistä riippumattomasta suljetusta leikkauslujuudesta. Päätyvastuksen varmuuskerroin oli 2, joka on yleisesti käytetty varmuuskertoimen arvo päätyvastuksen laskennassa. Lepopaineen ja lujuusparametrien perusteella saatava päätyvastuksen arvo siis jaettiin tässä tapauksessa 2:lla, jolloin laskennallisesta päätyvastuksesta hyödynnettiin puolet. Liukuvan kappaleen leveys oli kaksi kertaa penkereen alareunan leveys. Penger mallinnettiin maakerroksena, jolloin sen lujuus tuli huomioiduksi päätyvastuksen laskennassa. Alikulkukohteessa kuivakuorikerroksen alapuolinen savi mallinnettiin puolen metrin paksuisina kerroksina leikkaustasoon saakka.

Plaxis 3D on 3D FEM -ohjelmisto. Elementtityyppinä oli 10-solmuinen elementti ja materiaalimallina käytettiin kimmoplastista Mohr-Coulomb-materiaalimallia. Suljetun

tilan materiaalit mallinnettiin Undrained c -tyypillä. Materiaaleille ei sallittu vetolujuutta. Penkereen pintaan mallinnettiin puoli metriä paksu koheesiopitoinen kerros ($c = 5 \text{ kPa}$, $\varphi = 36^\circ$) penkereen sivuluiskaan muodostuvien murtopintojen eliminoimiseksi. Penkereen vesistön/alikulun puoleisessa päädyssä oli 1 m paksuinen jäykkä maakerros Linear Elastic -materiaalimallilla. Laskentavaiheiden väliset kimmoiset muodonmuutokset nollattiin. Ajan sekä suotoveden virtauksen vaikutusta ei huomioitu. Pintakuorma lisättiin Surface Load -toiminnolla.

5 TULOKSET

5.1 Vesistökohteen stabiliteetti

5.1.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi)

Pohjamaatyypin 1:n varmuuskertoimet on esitetty taulukossa 5. Tässä tapauksessa kuivakuorikerroksen alapuolisen saven suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on 10 kPa ja se kasvaa 1 kPa/m kerrospaksuuden funktiona. Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 5-9.

Taulukko 5. Kokonaisvarmuuskertoimet: vesistökohte, pohjamaatyypin 1. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

Laskentamenetelmä	Luonnon tila	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
		Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	1,62	1,03	0,67	1,03	0,67	1,03	0,91
2D LEM vapaa liukupinta		<u>1,00</u>	<u>0,62</u>	<u>0,98</u>	<u>0,62</u>	<u>1,00</u>	<u>0,88</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,44	0,83	1,31	0,78	1,11	0,98
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu		1,48	1,25				
3D LEM vapaa liukupinta		1,51	1,39	1,4	1,08	1,1	1,09
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		46	27	23	19	50	56
3D LEM palloliukupinta		1,68	1,5				
3D FEM SRM*		1,7	1,51				
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta		47 %	107 %	36 %	61 %	7 %	20 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		5 %	67 %	7 %	38 %	-1 %	11 %

*Saven suljettu leikkauslujuus kasvaa 3D FEM-mallissa kuivakuoren alapinnasta alkaen lineaarisesti poiketen LEM-malleista, joissa suljettu leikkauslujuus kasvaa kerrospaksuuden funktiona.

1-raiteisesta tapauksesta laskettiin lisäksi eurokoodin murtorajatilan osavarmuuskertoimilla stabiliteetti 2D LEM ja 3D LEM -menetelmillä. Tulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Eurokoodin MRT-osavarmuusmenetelmän mukaiset varmuuskertoimet. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

<i>Laskentamenetelmä</i>	<i>Penger</i>	<i>Penger+ kuorma</i>
2D LEM ympyrä liukupinta	0,73	0,44
2D LEM vapaa liukupinta	<u>0,71</u>	<u>0,41</u>
3D LEM vapaa liukupinta	1,07	0,95
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	47 %	116 %

5.1.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi)

Pohjamaatyypin 2:n varmuuskertoimet on esitetty taulukossa 7. Tässä tapauksessa kuivakuorikerroksen alapuolisen saven suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on 25 kPa ja se kasvaa 1 kPa/m kerrospaksuuden funktiona, Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 5 ja 10-12.

Taulukko 7. Kokonaisvarmuuskertoimet: vesistökohte, pohjamaatyypin 2. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

<i>Laskentamenetelmä</i>	<i>Luonnon tila</i>	<i>1 raide</i>		<i>2 raidetta</i>		<i>Moottoritie</i>	
		<i>Penger</i>	<i>Penger+ kuorma</i>	<i>Penger</i>	<i>Penger+ kuorma</i>	<i>Penger</i>	<i>Penger+ kuorma</i>
2D LEM ympyrä liukupinta	2,66	1,6	1,08	1,6	1,08	1,6	1,43
2D LEM vapaa liukupinta		<u>1,48</u>	<u>0,98</u>	<u>1,48</u>	<u>0,98</u>	<u>1,48</u>	<u>1,32</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		2,53	1,42	2,24	1,35	1,81	1,61
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu		2,3	2,03			1,64	1,54
3D LEM vapaa liukupinta		2,42	2,13	2,19	1,87	1,72	1,57
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		25	12	40	22	48	53
3D LEM palloliukupinta		2,71	2,46			1,98	1,85
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä		51 %	97 %	37 %	73 %	8 %	10 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		-4 %	50 %	-2 %	39 %	-5 %	-2 %

5.1.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti)

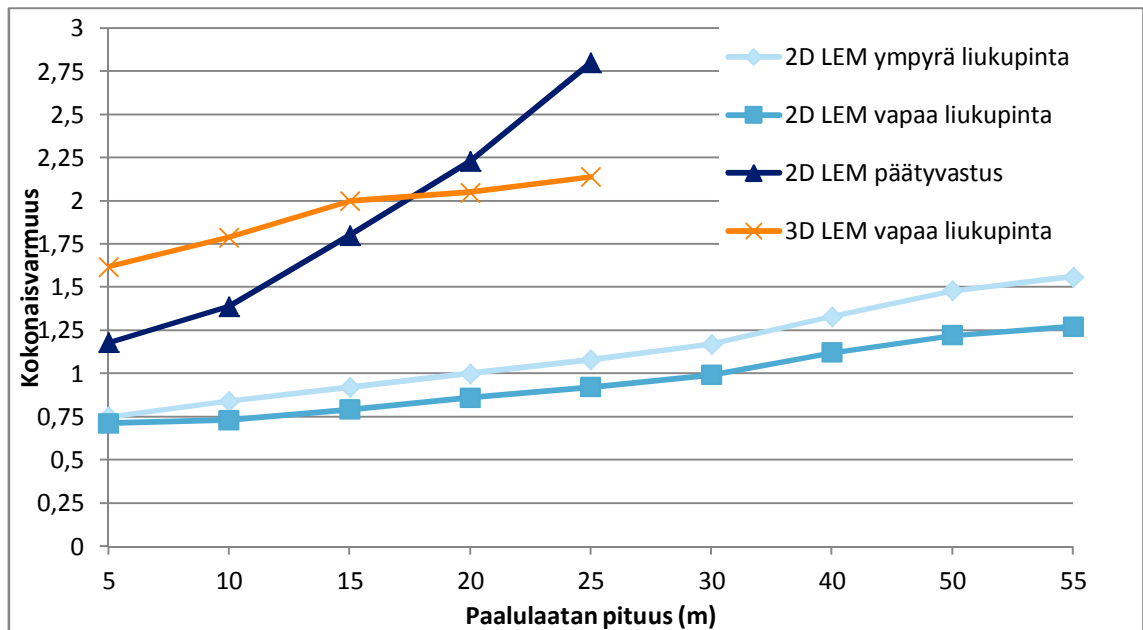
Pohjamaatyypin 3:n varmuuskertoimet on esitetty taulukossa 8. Tässä tapauksessa kuivakuorikerroksen alapuolinen maakerros on silttiä, jonka koheesio on 3 kPa ja kitkakulma 25°. Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 5 ja 13-15.

Taulukko 8. Kokonaisvarmuuskertoimet: vesistökohteeseen, pohjamaatyypin 3. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

Laskentamenetelmä	Luonnon tila	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
		Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	1,22	1,21	0,97	1,21	0,97	1,21	1,15
2D LEM vapaa liukupinta	1,2	1,21	<u>0,96</u>	1,21	<u>0,96</u>	1,21	<u>1,14</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,28	1,02	1,26	1,01	1,21	1,15
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu							
3D LEM vapaa liukupinta	<u>1,19</u>	<u>1,2</u>	1,18	<u>1,18</u>	1,16	<u>1,19</u>	1,16
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		58	98	80	25	52	41
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	-2 %	-1 %	22 %	-2 %	20 %	-2 %	1 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		-6 %	16 %	-6 %	15 %	-2 %	1 %

5.1.4 Paalulaatan pituustarkastelu

Paalulaatan pituustarkastelu tehtiin 2D LEM -menetelmällä ilman päätyvastusta ja päätyvastus huomioiden sekä 3D LEM -menetelmällä vesistökohteeseen pohjamaatyypin 1:ssä. Liukupintojen alkamiskohta rajattiin tässä siten, että liukupintojen alkamispiste oli siirtymälaatan puolivälissä tai sen takana. Tulokset on esitetty kuvassa 18. Laskentatulosteet ovat liitteessä 27.



Kuva 18. Laskentamenetelmien kokonaisvarmuuskertoimet paalulaatan pituuden perusteella.

5.2 Alikulkukohteen stabiliteetti

5.2.1 Pohjamaatyyppi 1 (pehmeä savi)

Pohjamaatyyppi 1:n varmuuskertoimet alikulkukohteen tapauksessa on esitetty taulukossa 9. Alikulkutapauksessa pohjamaatyyppissä 1 kuivakuorikerroksen alapuolisen saven suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on 10 kPa ja se kasvaa kuivakuorikerroksen alapinnan tasosta alkaen 1 kPa/m. Pohjamaatyyppi ei ole identtinen vesistökohteen vastaavan pohjamaatyyppin kanssa, sillä ne eroavat toisistaan lujuuden kasvun suhteen. Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 16-19.

Taulukko 9. Kokonaisvarmuuskertoimet: alikulkukohde, pohjamaatyyppe 1. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

Laskentamenetelmä	Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
		Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	1,13	0,87	0,61	0,87	0,61	0,87	0,8
2D LEM vapaa liukupinta	<u>1,03</u>	<u>0,79</u>	<u>0,56</u>	<u>0,79</u>	<u>0,56</u>	<u>0,79</u>	<u>0,73</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,16	0,78	1,07	0,72	0,93	0,84
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu	1,19	1,11	1,06				
3D LEM vapaa liukupinta	1,2	1,15	1,1	1,09	0,97	0,94	0,9
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		40	28	30	21	54	49
3D LEM palloliukupinta	1,42	1,25	1,17				
3D FEM SRM	1,31	1,23	1,18			1,02	<1
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	6 %	32 %	80 %	25 %	59 %	8 %	13 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		-1 %	41 %	2 %	35 %	1 %	7 %
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta	9 %	7 %	7 %			9 %	< 11%

5.2.2 Pohjamaatyyppe 2 (sitkeä savi)

Pohjamaatyyppe 2:n varmuuskertoimet on esitetty taulukossa 10. Alikulkutapauksessa pohjamaatyypissä 2 kuivakuorikerroksen alapuolisen saven suljetun leikkauslujuuden minimiarvo on 25 kPa ja se kasvaa kuivakuorikerroksen alapinnan tasosta alkaen 1 kPa/m. Pohjamaatyyppe ei ole identtinen vesistökohteen vastaavan kanssa, sillä pohjamaatyypit eroavat toisistaan lujisuuden kasvun suhteen. Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 16 ja 20-22.

Taulukko 10. Kokonaisvarmuuskertoimet: alikulkukohde, pohjamaatyyppe 2. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

Laskentamenetelmä	Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
		Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	2,07	1,47	1,03	1,47	1,03	1,47	1,34
2D LEM vapaa liukupinta		<u>1,33</u>	<u>0,92</u>	<u>1,33</u>	<u>0,92</u>	<u>1,33</u>	<u>1,21</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,87	1,23	1,74	1,15	1,53	1,38
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu							
3D LEM vapaa liukupinta		1,95	1,73	1,83	1,54	1,53	1,45
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		32	16	40	21	49	50
3D LEM palloliukupinta							
3D FEM SRM						1,67	1,59
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä		33 %	68 %	24 %	50 %	4 %	8 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		4 %	41 %	5 %	34 %	0 %	5 %
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta						9 %	10 %

5.2.3 Pohjamaatyyppe 3 (siltti)

Pohjamaatyyppe 3:n varmuuskertoimet on esitetty taulukossa 11. Tässä tapauksessa kuivakuorikerroksen alapuolinen maakerros on silttiä, jonka koheesio on 3 kPa ja kitkakulma 25°. 1-raiteisessa tapauksessa laskettiin myös varmuuskerroin 2D LEM -menetelmällä päätyvastus huomioiden, jossa liukuvan kappaleen leveys on 1,5 kertaa penkereen alareunan leveys. Laskentatulosteet löytyvät liitteistä 16 ja 23-25.

Lisäksi tässä tapauksessa tehtiin herkkyystarkastelu 1-raiteiselle tapaukselle, jossa liikennekuormitus aiheuttaa huokosveden ylipaineen silttikerroksessa. LEM-menetelmässä huokosveden ylipaineen kerroin oli 0,7. Tulokset on esitetty taulukossa 12 ja laskentatulosteet liitteessä 26.

Taulukko 11. Kokonaisvarmuuskertoimet: alikulkukohde, pohjamaatyypäi 3. Kunkin tapauksen pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu.

Laskentamenetelmä	Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
		Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	1,44	1,34	1,04	1,34	1,04	1,34	1,26
2D LEM vapaa liukupinta	<u>1,29</u>	<u>1,26</u>	<u>1,01</u>	<u>1,26</u>	<u>1,01</u>	<u>1,26</u>	<u>1,19</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,35 ⁽¹⁾	1,04 ⁽²⁾	1,32	1,02	1,29	1,21
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu		1,33	1,25				
3D LEM vapaa liukupinta	1,39	1,42	1,4	1,4	1,28	1,3	1,29
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		31	20	32	22	60	47
3D LEM palloliukupinta	1,67	1,61	1,56				
3D FEM SRM	1,52	1,51	1,51				
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	-3 %	6 %	35 %	4 %	23 %	-3 %	2 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		5 %	35 %	6 %	25 %	1 %	7 %
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta	9 %	6 %	8 %				

Liukuvan kappaleen leveys 1,5 x penkereen alareunan leveys: varmuuskerroin 1) 1,38, 2) 1,05

Taulukko 12. Kokonaisvarmuuskertoimet: alikulkukohde, pohjamaatyypäi 3. Liikennekuormitus aiheuttaa huokosveden ylipaineen. Pienin arvo on alleviivattu ja suurin arvo lihavoitu

Laskentamenetelmä	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	1,01
2D LEM vapaa liukupinta	<u>0,96</u>
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus	1,01
3D LEM vapaa liukupinta	1,39
3D FEM SRM	1,46
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	38 %
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta	5 %

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Vesistökohte

6.1.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi)

2D LEM ja 3D LEM -laskentamenetelmien välille muodostuu kapeilla penkereillä suuria varmuuskerroineroja. Varmuuskertoimen ero 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisella liukupinnalla ja 2D LEM -menetelmän ympyrän muotoisen liukupinnan välillä on suurimmillaan yli kaksinkertainen kapeimmalla, 1-raiteisella penkereellä, jonka päällä on liikennekuorma. Pintakuormitetulla 2-raiteisella penkereellä varmuuskertoimien ero kyseisten menetelmien välillä on 61 %. Leveimmällä penkereellä (moottoritie) menetelmien välinen ero supistuu pienimmillään alle 10 %:iin. Ilman pintakuormaa olevilla penkereillä tulosten välinen ero pienenee.

Varmuuskertoimet 2D LEM + päätyvastus -menetelmällä valituilla parametreilla ovat lähellä 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisen liukupinnan varmuuskertoimia kuormittamattomilla penkereillä, mutta ero kasvaa suuremmaksi, kun penkereen päällä on myös pintakuorma. Pintakuormitustapauksissa suurin ero verrattuna 3D LEM -menetelmään syntyy kapeimmalla penkereellä. Ero pienenee pengerialueiden kasvaessa eli leveimmällä penkereellä ero on pienin. Varmuuskertoimien välinen ero vaihtelee 11...67 % menetelmien välillä, kun penkereen päällä on pintakuorma. Ilman pintakuormaa olevissa tapauksissa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on -1...7 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmässä päätyvastus huomioiden.

Eurokoodin murtorajatilan osavarmuusmenettelyä soveltaen LEM-menetelmien välinen ero säilyy samansuuruisena kapeimmalla penkereellä ilman pintakuormaa, kun sitä vertaa kokonaisvarmuusmenetelmällä laskettuihin arvoihin. Sen sijaan penkereen ja pintakuorman yhdistelmä osavarmuusmenetelmällä tuottaa hieman suuremman eron varmuuskertoimeen kuin kokonaisvarmuusmenetelmä. Laskettujen tapauksien perusteella ero säilyy siis pääpiirteissään samansuuruisena verrattuna

kokonaisvarmuusmenetelmään, mutta tarkkojen johtopäätösten tekeminen ei ole kuitenkaan mahdollista näiden laskelmien perusteella.

3D LEM -menetelmässä varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla laskee hienokseltaan luonnonmukaiseen tilanteeseen verrattuna 1-raiteisen penkereen vaikutuksesta. Varmuuskerroin laskee edelleen hieman 1-raiteiselle penkereelle lisätyn 42,7 kPa pintakuorman johdosta. Leveimmällä penkereellä 10 kPa pintakuorma pienentää varmuuskerrointa vain marginaalisesti vapaalla liukupinnalla. Penkereen leveyden kasvaminen huonontaa stabiliteettia 3D LEM -menetelmässä. Optimoitu liukupinta tuottaa pienimmän ja pallon muotoinen liukupinta suurimman varmuuskertoimen kussakin tapauksessa 3D LEM -menetelmässä. Ero vapaan muotoisen liukupinnan varmuuskertoimeen on alle 10 % kummallakin liukupinnan muodolla.

3D FEM SRM ja 3D LEM (vapaa liukupinta) -menetelmien välinen varmuuskertoimen ero kapeimmalla, 1-raiteisella penkereellä on noin 9 % (penger) tai 13 % (penger ja pintakuorma). Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä FEM -mallissa kuivakuorikerroksen alapuolisen saven suljettu leikkauslujuus kasvaa tason funktiona toisin kuin LEM-mallissa, jossa lujuus kasvaa kerrospaksuuden funktiona. 3D FEM:iä vastaavalla mallilla 3D LEM -varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on 1-raiteisella penkereellä ilman pintakuormaa 1,57 ja pintakuorman kanssa 1,47, jolloin menetelmien välinen ero on noin 8 % (pelkkä penger) tai 3 % (penger ja pintakuorma).

6.1.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi)

2D LEM ja 3D LEM -laskentamenetelmien väliset erot säilyvät pohjamaatyypissä 2 suuruusluokaltaan samansuuruisina kuin pohjamaatyypissä 1. Suurin ero syntyy kapeimmalla penkereellä pintakuorman kanssa, jossa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on noin kaksinkertainen 2D LEM -menetelmän ympyrän muotoisen liukupinnan varmuuskertoimeen verrattuna. 2-raiteisella penkereellä vastaavassa kuormitustapauksessa ero on 73 %. Moottoritietapauksessa ero supistuu ollen maksimissaan 10 %:n luokkaa. Mikäli penkereen päällä ei ole liikennekuormaa, laskentamenetelmien väliset erot supistuvat.

Päätyvastusta käytettäessä varmuuskerroin nousee 2D LEM -menetelmässä kauttaaltaan suuremmaksi kuin 3D LEM -menetelmässä ilman pintakuormaa olevilla penkereillä (vapaan muotoinen liukupinta), mutta ero muuttuu päinvastaiseksi ja suuremmaksi liikennekuormitetuilla raidepenkereillä. Kapeimmalla, 1-raiteisella penkereellä liikennekuorman kanssa saadaan 3D LEM -menetelmällä 50 % suurempi varmuuskerroin kuin 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa, ja 2-raiteisella penkereellä vastaavasti 39 % suurempi varmuuskerroin, kun penkereen päällä on liikennekuorma. Varmuuskerroinero ei siis oleellisesti muutu ratapenkereillä verrattuna pohjamaatyypin 1. Sen sijaan leveimmällä penkereellä liikennekuorman kanssa ero supistuu pohjamaatyypin 1 verrattuna, sillä pohjamaatyypin 2 tapauksessa 2D LEM -menetelmä päätyvastus huomioiden antaa suuremman varmuuskertoimen kuin 3D LEM menetelmä vapaan muotoisella liukupinnalla.

3D LEM -menetelmällä saadaan suurimmat varmuuskertoimet. 3D LEM -menetelmässä pallon muotoinen liukupinta tuottaa jokaisessa lasketussa tapauksessa suurimman varmuuskertoimen.

Tuloksista on havaittavissa, että pohjamaan lujuuden kasvu ei pienennä tässä tapauksessa yhtäläisesti menetelmien välisten tulosten eroja, vaan tietyissä tapauksissa ero saattaa olla jopa suurempi kuin löyhillä pohjaolosuhteilla.

6.1.3 Pohjamaatyypin 3 (siltille)

2D ja 3D laskentamenetelmien väliset erot pienenevät selvästi pohjamaatyypissä 3. Edeltävien pohjamaatyypien tapaan suurin ero syntyy kapeimmilla penkereillä (ratapenkereillä) liikennekuorman kanssa, joissa molemmissa tapauksissa 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisen liukupinnan varmuuskerroin on noin 20 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmällä ympyrän muotoisella liukupinnalla. Leveimmällä penkereellä varmuuskertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan. Koska valituilla pohjaolosuhteilla penkereen ja kuormituksen vaikutus stabiliteettiin on suhteellisen vähäinen, myös laskentamenetelmien väliset erot pienenevät.

Tarkasteltaessa 1- ja 2-raiteista pengertä ilman liikennekuormaa, varmuuskerroin nousee päätyvastusta käytettäessä keinotekoisesti suureksi, jopa yli luonnontilan

varmuuden. Tämä ei voi olla kuitenkaan mahdollista, sillä varmuuskerroin ei voi nousta päätyvastuksen kanssa yli luonnontilan varmuuden. Valitut päätyvastusparametrit eivät ole siten soveltuvia kyseisiin tapauksiin. Päätyvastuksen vaikutus on tässä pohjamaatyypissä huomattavasti pienempi kuin muissa pohjamaatyypeissä. Moottoritietapauksessa päätyvastus ei kasvata enää varmuuskerrointa 2D LEM menetelmän ympyrän muotoisiin liukupintoihin verrattuna.

3D LEM -menetelmässä luonnontilainen stabiliteetti on määräävä tekijä myös kapeimmilla penkereillä, 1- ja 2-raiteisissa tapauksissa ilman liikennekuormaa, sillä vaarallisin liukupinta sijoittuu näissä tapauksissa penkereen ja vesistöluiskan väliin sivuamatta lainkaan pengertä. Moottoritiepengertä sivuavan liukupinnan varmuuskerroin on hyvin lähellä luonnontilan varmuuskerrointa.

Tapauksissa, joissa luonnontila määrittää stabiliteetin, varmuuskertoimissa on hienoista vaihtelua kokonaisvarmuuden 1,2 molemmin puolin. Vaihtelu johtuu ohjelmiston satunnaisuuteen perustuvasta liukupinnan hakumenetelmästä, jolloin vaarallisin liukupinta voi jäädä löytymättä, vaikka liukupinnan hakukriteerit ja rajoitteet ovat kaikissa tapauksissa samat. Virhe on tässä tapauksessa tosin pieni. Kokonaisvarmuuskerroin 1,18 pätee siis myös luonnontilan sekä yksiraiteisen penkereen stabiliteettiin, jossa ei ole pintakuormaa.

6.2 Alikulkukohte

6.2.1 Pohjamaatyypin 1 (pehmeä savi)

Alikulkukohteessa pohjamaatyypissä 1 on havaittavissa sama ilmiö kuin vesistökohteen pohjamaatyypillä 1, jossa 2D LEM ja 3D LEM-menetelmien välinen varmuuskerroinero on huomattavan suuri etenkin kapeimmilla penkereillä liikennekuormatapauksissa. Kapeimman, 1-raiteisen liikennekuormitetun penkereen tapauksessa 3D LEM -menetelmällä ja vapaan muotoisella liukupinnalla saadaan 80 % suurempi varmuuskerroin kuin 2D LEM -menetelmällä ja ympyrän muotoisella liukupinnalla. Vastaavassa 2-raiteisessa tapauksessa varmuuskerroin on 59 % suurempi 3D LEM:ssä vapaan muotoisella liukupinnalla. Pelkällä penkereellä ero on selkeästi pienempi.

Leveimmällä penkereellä ero supistuu selvästi kapeampiin raidepenkereisiin verrattuna: liikennekuormitettulla penkereellä varmuuskerroinero pienenee 13 %:iin ja ilman liikennekuormaa olevalla penkereellä 8 %:iin.

Varmuuskertoimien ero 2D LEM + päätyvastus ja 3D LEM -menetelmän välillä kasvaa 1- ja 2-raiteisilla penkereillä pintakuorman vaikutuksesta samaan tapaan kuin vesistökohteessa. Kapeimmalla ratapenkereellä liikennekuorman kanssa 3D LEM -menetelmällä saadaan 41 % suurempi varmuuskerroin kuin 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa. 2-raiteisella penkereellä saadaan vastaavasti 35 % suurempi varmuuskerroin, kun penkereiden päällä on liikennekuorma. Leveimmällä penkereellä, jonka päällä on liikennekuorma, ero supistuu 7 %:iin. Ilman liikennekuormaa menetelmien varmuuskertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan.

Leikkaus-tapauksessa 2D LEM ja 3D LEM -menetelmien välillä ei ole suurta eroa varmuuskertoimessa lukuun ottamatta 3D LEM palloliukupintaa, joka tuottaa huomattavasti suuremman varmuuskertoimen kuin muut LEM-menetelmät. Koska alittavan tien leikkaus on paikallinen, 3D-menetelmillä saadut varmuuskertoimet ovat hieman suurempia kuin 2D LEM-menetelmässä.

Elementtimenetelmällä saadut varmuuskertoimet ovat lähellä 3D LEM -menetelmän varmuuskertoimia vapaan muotoisella liukupinnalla, elementtimenetelmän varmuuskertoimien ollessa kauttaaltaan hieman suurempia. 3D FEM SRM ja 3D LEM (vapaa liukupinta) -menetelmien välinen varmuuskerroinero on kaikissa laskentatapauksissa alle 11 %. Varmuuskerroin moottoritiepenkereellä pintakuorman kanssa jää alle 1:n elementtimenetelmällä laskettaessa, joten tarkkaa varmuuskertoimen arvoa ei pystytty siinä tapauksessa määrittämään. Muissa tapauksissa ero vaihtelee 7...9 %:n välillä 3D LEM -menetelmän vapaan muotoiseen liukupintaan verrattaessa.

6.2.2 Pohjamaatyypin 2 (sitkeä savi)

LEM-menetelmien välillä erot ovat pääsääntöisesti pienemmät kuin alikulkukohteen pohjamaatyypissä 1. Suurin ero muodostuu kapeimmalla penkereellä pintakuorman kanssa, jossa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on noin 70 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmän varmuuskerroin ympyrän

muotoisella liukupinnalla. Ero supistuu penkereen leveyden kasvun myötä: 2-raiteisella penkereellä pintakuorman kanssa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on 50 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmässä ympyrän muotoisella liukupinnalla ja leveimmällä penkereellä ero jää alle 10 %:iin.

Varmuuskertoimet 2D LEM -menetelmässä yhdessä päätyvastuksen kanssa ovat lähellä 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisten liukupintojen varmuuskertoimia kuormittamattomilla penkereillä, mutta kapeimmilla penkereillä ero kasvaa, kun penkereen päällä on myös liikennekuorma. Yksiraiteisella penkereellä liikennekuorman kanssa 3D LEM -menetelmällä saadaan 41 % suurempi varmuuskerroin kuin 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa. Vastaavalla kuormituksella kaksiraiteisella penkereellä ero on 34 %. Moottoritiepenkereellä ero supistuu 5 %:iin.

Moottoritietapauksesta tehtiin lisäksi vertailulaskelma elementtimenetelmällä. 3D FEM:llä laskettu varmuuskerroin on penkereellä ilman pintakuormaa 9 % suurempi ja penkerellä pintakuorman kanssa 10 % suurempi kuin 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla.

6.2.3 Pohjamaatyypin 3 (siltti)

LEM-menetelmien väliset erot alikulkukohteessa siltti-pohjamaatyypillä ovat suuremmat kuin vastaavalla pohjamaatyypillä vesistökohteessa. 2D LEM -menetelmässä varmuuskerroin laskee selvästi kuormitetuilla penkereillä, kun taas 3D LEM -menetelmässä vapaan muotoisilla liukupinnoilla varmuuskerroin pysyy leikkauksen mukaisessa varmuudessa 1-raiteisella penkereellä molemmissa kuormitustapauksissa ja 2-raiteisella penkereellä ilman liikennekuormaa. Varmuuskertoimien välinen ero on 2...35 %:n menetelmien välillä, kun penkereen päällä on pintakuorma. Ilman pintakuormaa olevissa tapauksissa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla on -3...4 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmän varmuuskerroin ympyrän muotoisella liukupinnalla. Leveimmällä penkereellä ilman pintakuormaa 2D LEM -menetelmällä saadaan siis hieman suurempi varmuuskerroin ympyrän muotoisella liukupinnalla kuin 3D LEM -menetelmällä vapaan muotoisella liukupinnalla, mutta vastaavalla 2D LEM -menetelmällä vapaan

muotoisella liukupinnalla varmuuskerroin on hieman pienempi 3D LEM -menetelmän vapaan muotoiseen liukupintaan verrattuna.

2D LEM -menetelmän varmuuskertoimet päätyvastus huomioiden ovat hyvin lähellä 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimia ilman päätyvastusta, ja paikoitellen jopa hieman pienemmät kuin 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimet ilman päätyvastusta ympyrän muotoisella liukupinnalla. Yksi syy tähän voi olla se, että GeoCalc-ohjelma, jolla päätyvastus laskettiin, jättää lamellien väliset normaalivoimat huomioimatta yksinkertaistetussa Bishopin menetelmässä. 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimet ilman päätyvastusta laskettiin Rocscience Slide 6.0 -ohjelmistolla, joka huomioi alkuperäisen Bishopin yksinkertaistetun teorian mukaisesti lamellien väliset normaalivoimat. Ohjelmistot voivat siis antaa eri varmuuskertoimen arvon täsmälleen samalle liukupinnalle ilman päätyvastusta johtuen laskentamenetelmien välisistä eroista.

1-raiteiselle penkereelle laskettiin varmuuskerroin myös tapaukselle, jossa liukuvan kappaleen leveys on puolitoistakertainen pengerveeyteen verrattuna. Varmuuskertoimien arvo nousi tämän muutoksen myötä 1...2 % verrattuna varmuuskertoimen arvoon tilanteessa, jossa liukuvan kappaleen leveys on kaksinkertainen pengerveeyteen nähden. Koska päätyvastuksen vaikutus tässä tapauksessa on muutenkin pieni, ei liukuvan kappaleen leveyden muutoksen vaikutuksesta varmuuskertoimeen voi tehdä tarkkoja johtopäätöksiä.

3D LEM -menetelmässä vapaan muotoisilla liukupinnoilla leikkauksen mukaisen tilanteen stabiliteetti määrittää stabiliteetin myös molemmissa 1-raiteisissa tapauksissa sekä 2-raiteisessa tapauksessa ilman liikennekuormaa. Näillä liukupinnoilla on havaittavissa sama ilmiö kuin vastaavalla pohjamaatyypillä vesistökohteessa luonnontilaan verrattuna: varmuuskerroin 1-raiteisille tapauksille ja 2-raiteiselle penkereelle ilman liikennekuormaa voi olla suurempi kuin leikkauksen mukaisessa tilanteessa, vaikka kaikissa tapauksissa leikkaustilanteen mukainen liukupinta olisi tuottanut pienimmän varmuuskertoimen. Mallin geometrian muuttumisen myötä siis satunnaisuuteen perustuva hakumenetelmä ei välttämättä onnistu löytämään kaikkein vaarallisinta liukupintaa, ellei liukupinnan ja iteroinnin oletusparametreja muuteta. Suurin varmuuskerroin tulee 3D LEM -menetelmässä palloliukupinnalla, jolla tulee

noin 10... 20 % suurempia varmuuskertoimia kuin 3D LEM menetelmällä vapaan muotoisilla liukupinnoilla.

Elementtimenetelmällä tehty vertailulaskenta osoittaa, että 1-raiteinen pengeri ei kummassakaan kuormitustapauksessa käytännössä heikennä leikkaustilanteen mukaista stabiliteettia. Tämä tulos on hyvin linjassa 3D LEM -menetelmän tuloksien kanssa vapaan muotoisilla liukupinnoilla. Varuuskertoimien ero 3D FEM SRM -menetelmän ja vapaan muotoisia liukupintoja käyttävän 3D LEM -menetelmän välillä säilyy käytännössä samansuuruisena muihin tapauksiin verrattuna.

Huokosveden ylipaineen vaikutus stabiliteettiin on pieni liikennekuormitetulla 1-raiteisella penkereellä. Kaikissa lasketuissa menetelmissä varmuuskerroin laskee hieman verrattuna tilanteeseen, jossa liikennekuormitus ei aiheuta huokosveden ylipainetta. Huokosveden ylipaineen vaikutus on tässä tapauksessa vähäinen, koska vaarallisimpien liukupintojen alkamispiste on lähellä penkereen päätyä, jonka myötä huokosveden ylipaine vaikuttaa vain pienellä osalla liukupintaa.

6.3 Vesistö- ja alikulkukohteen tulosten yhteenveto

Laskentatulosten perusteella voidaan päätellä, että 2D LEM -menetelmällä saatiin kapeilla penkereillä suljetun tilan parametreilla huomattavasti 3D-menetelmiä huonompia varmuuskertoimia penkereen pituussuuntaista stabiliteettia tarkasteltaessa. Pengerleveyden yhteys 2D- ja 3D-laskentamenetelmillä saatujen varmuuskertoimien välisiin eroihin on selvästi havaittavissa: kapeimmalla penkereellä laskentamenetelmien välille syntyi suurin ero, jossa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin oli jopa yli kaksinkertainen 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimeen verrattuna. Kaksiraiteisella penkereellä erot olivat pienempiä kuin kapeimmalla, yksiraiteisella ratapenkereellä. Kohtuullisia eroja syntyi myös leveimmällä penkereellä (moottoritie) pohjamaatyypeillä 1 ja 2, mutta menetelmien väliset tulokset eivät käytännössä enää eronneet pohjamaatyypillä 3.

Lisäksi kuormituksen yhteys kapeimmilla pengerleveyksillä 2D- ja 3D-laskentamenetelmien välisten tuloksien eroihin oli selvä: Laskentamenetelmien

välinen ero oli huomattavasti suurempi penkereellä pintakuorman kanssa kuin saman levyisellä penkereellä ilman pintakuormaa. Leveimmällä penkereellä (moottoritie) pintakuorman vaikutus ei ollut enää yhtä suuri kuin ratapenkereillä. Moottoritiepenkereellä pintakuorman suuruus on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin raidepenkereillä, joten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään.

Pohjamaan suurempi suljettu leikkauslujuus ei pienentänyt 2D- ja 3D-laskentamenetelmien välisiä eroja kapeimmilla penkereillä. Sen sijaan erot pienenevät hieman leveimmällä penkereellä, jonka päällä oli lisäksi pintakuorma. Pohjamaatyypissä 3 erot olivat kauttaaltaan pienempiä kuin muissa pohjamaatyypeissä. Yhteenvedo eri tekijöiden vaikutuksesta 2D- ja 3D-laskentamenetelmillä saatujen tulosten välisiin eroihin on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 13. Eri tekijöiden vaikutus 2D- ja 3D-laskentamenetelmillä saatujen tulosten välisiin eroihin.

<i>Tekijä</i>	<i>Vaikutus</i>
Pengerleveyden kapeneminen	+
Pintakuorman lisääminen	+
Pohjamaan suljetun leikkauslujuuden arvo	0
+ = 3D-menetelmän laskennallinen varmuus suhteessa 2D-menetelmään kasvaa	
0 = Ei selvää vaikutusta laskentamenetelmien välisiin tulosten eroihin	

Laskentatulokset osoittivat myös, että päätyvastuksen oikeanmukaiseen soveltamiseen 2D LEM -menetelmässä ei ole olemassa sellaisia vakioparametreja, jotka tuottaisivat kaikissa lasketuissa tapauksissa 3D LEM -menetelmää vastaavia varmuuskertoimia. Kun liukuvan kappaleen leveys oli kaksinkertainen pengerialueen verrattuna, varmuuskerroin pelkällä penkereellä ilman pintakuormaa vastasi likimain 3D LEM -menetelmän varmuuskerrointa valituilla parametreilla. Sen sijaan kapeimmilla penkereillä, joissa oli lisäksi pintakuorma, 2D LEM -menetelmä yhdessä päätyvastuksen kanssa antoi 3D LEM -menetelmää pienempiä varmuuskertoimia. Pintakuorman suuruudella oli siis selvä vaikutus varmuuskertoimien välisiin eroihin. Pengerleveyden kasvaessa 2D LEM -menetelmän varmuuskerroin yhdessä päätyvastuksen kanssa lähenee 3D LEM -menetelmän varmuuskerrointa.

2D LEM -päätyvastuslaskennan liukuvan kappaleen leveyden määrittämisessä on huomioitava, että käytettäessä 3D LEM -menetelmää vastaavaa liukuvan kappaleen leveyttä, varmuuskerroin ei ole sama kuin 3D LEM -menetelmässä, sillä 2D LEM -menetelmässä laskentapoikkileikkauksen oletetaan jatkuvan äärettömän pitkänä. Siten mallien väliset geometriat poikkeavat olennaisesti osin toisistaan etenkin kapeilla penkereillä. Lisäksi on huomioitava, että 3D LEM -menetelmässä liukupinnan poikkileikkaus ei ole vakio toisin kuin 2D LEM -menetelmässä, mikä aiheuttaa myös merkittävän eron menetelmien välille.

3D FEM SRM -menetelmällä saadut tulokset olivat hyvin linjassa 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisten liukupintojen kanssa. Ero näiden menetelmien välillä säilyi kauttaaltaan suuruusluokaltaan samanlaisena riippumatta pohjaolosuhteista tai kuormitustapauksista. Menetelmillä saatiin kuitenkin hieman erisuuruiset varmuuskertoimien arvot samoista tapauksista, koska varmuuskertoimien laskentametodit poikkeavat toisistaan. 3D FEM SRM -menetelmän varmuuskerrointa kasvatti hieman penkereen pintaan mallinnettu koheesiopitoinen 0,5 m paksu maakerros, joka tarvittiin, jotta penkereen luiskaan muodostuvat liukupinnat saatiin eliminoitua. Koheesiopitoista kerrosta ei ollut 3D LEM -malleissa, joten tältä osin mallit poikkesivat toisistaan. Tuloksista voidaan todeta, että ns. 3D-ilmion vaikutus stabiliteettiin alkaa selkeästi vähentyä leveimmällä lasketulla penkereellä eli moottoritieillä. Tämä on selkeästi todettavissa varmuuskertoimien perusteella. Ilman pintakuormaa 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin oli maksimissaan 8 % suurempi kuin 2D LEM -menetelmän varmuuskerroin ympyrän muotoisella liukupinnalla. Pintakuorman vaikuttaessa erot olivat pääosin samaa luokkaa lukuun ottamatta vesistökohteen pohjamaatyyppejä 1, jossa eroa syntyi tulosten välille 20 %. Varmuuskertoimien ero ei kuitenkaan pysynyt vakiona samalla penkereellä eri pohjamaatyyppeiden välillä, joten tulosten erot ovat riippuvaisia myös geometriasta ja pohjaolosuhteista.

Vaikka absoluuttisesti oikeaa varmuuskerrointa ei voida määrittää, tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että elementtimenetelmällä saadut tulokset tukevat 3D LEM -menetelmän tuloksia vapaan muotoisilla liukupinnoilla. Lisäksi molempien 3D-menetelmien tuloksien perusteella voidaan päätellä, että 2D

LEM-laskentamenetelmät ilman päätyvastusta tai päätyvastuksen kanssa voivat antaa huomattavasti 3D -menetelmiä pienempiä varmuuskertoimia. On kuitenkin huomioitava, että päätyvastusparametreilla on suuri vaikutus 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimeen ja siten väärin valituilla päätyvastusparametreilla voi laskentamenetelmien välinen ero kääntyä nopeasti päinvastaiseksi.

6.4 Paalulaatan pituustarkastelu

Paalulaatan pituudelle tulisi merkittäviä eroja laskentamenetelmien välillä, mikäli mitoitusperusteena käytettäisiin 1,8 kokonaisvarmuuskerrointa. Lyhin paalulaatta saataisiin 3D LEM -menetelmän perusteella ja pisin paalulaatta 2D LEM -menetelmällä ilman päätyvastusta (kuva 18).

2D LEM -menetelmässä ilman päätyvastusta varmuuskerroin muuttuu hitaasti paalulaatan pituuden funktiona. Alhaisimmat varmuuskertoimet saadaan vapaan muotoisilla liukupinnoilla 2D LEM -menetelmässä ilman päätyvastusta. Kun paalulaatan pituus on 5 m, varmuuskerroin on alle 0,8 sekä vapaan että ympyrän muotoisella liukupinnalla. 55 m pituisella paalulaatalla kokonaisvarmuuskertoimet jäävät ympyrän ja vapaan muotoisella liukupinnalla vielä alle 1,8:n, kun käytetään 2D LEM -menetelmää ilman päätyvastusta.

3D LEM -menetelmässä vapaan muotoisella liukupinnalla 10 m pituisella paalulaatalla varmuuskerroin on 1,79, joten 1,8 varmuustason mukainen paalulaatan pituus olisi hieman yli 10 m. Jo 5 m pituisella paalulaatalla 3D LEM -menetelmässä vapaan muotoisella liukupinnalla varmuustaso on suurempi kuin 55 m pituisella paalulaatalla 2D LEM -menetelmässä ilman päätyvastusta, joten laskentatulosten välillä on merkittävä ero. 3D LEM -menetelmässä varmuustason nousu paalulaatan pituuden funktiona on huomattavasti maltillisempi kuin 2D LEM:ssä päätyvastuksen kanssa.

Päätyvastus huomioiden 2D LEM -menetelmällä saavutetaan kokonaisvarmuuskerroin 1,8 noin 15 m pituisella paalulaatalla. 5 m pituisella paalulaatalla varmuuskerroin on noin 1,2, josta varmuuskerroin alkaa nousta jyrkästi paalulaatan pituuden kasvaessa. 20 m pituisella paalulaatalla varmuustaso on jo suurempi kuin 3D LEM -menetelmässä

vapaan muotoisella liukupinnalla ja ero kasvaa edelleen suuremmaksi paalulaatan pituuden kasvaessa. Kuvasta 18 on nähtävissä selkeästi päätyvastuksen käytön ongelma: Kun liukuvan kappaleen leveys on määritetty kapeaksi suhteessa liukupinnan pituuteen, menetelmällä saadaan todellisuutta huomattavasti suurempia varmuuskertoimia. Epäsuhtaisilla liukuvan kappaleen mittasuhteilla päätyvastuksen osuus siis korostuu huomattavasti ja sen myötä varmuus kasvaa nopeasti liian suureksi. Tämä on nähtävissä selkeästi kuvaajasta: kun 3D LEM -menetelmässä ja 2D LEM -menetelmässä ilman päätyvastusta varmuuskerroin kasvaa likimain samalla kulmakertoimella lineaarisesti paalulaatan pituuden funktiona, varmuuskerroin 2D LEM -menetelmässä päätyvastuksen kanssa muuttuu epälineaarisesti suhteessa paalulaatan pituuteen, mikä ei ole loogista.

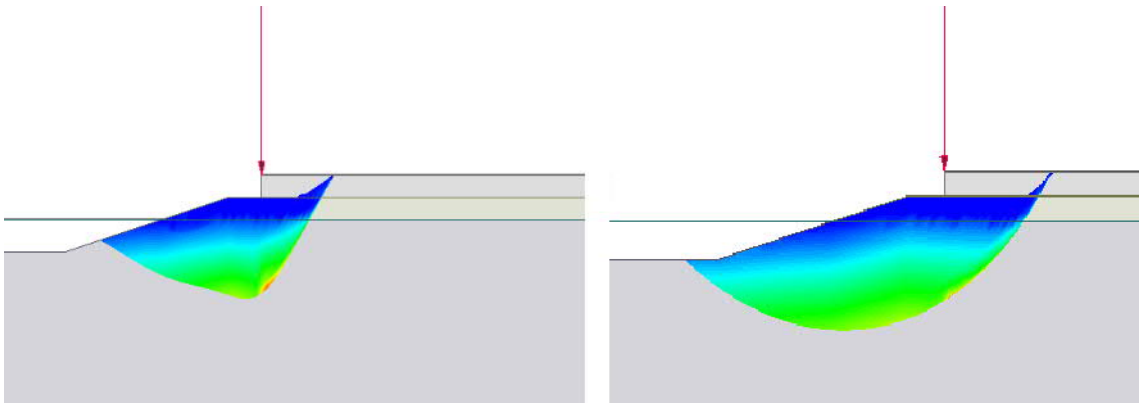
6.5 3D LEM -liukupinnat

Diplomityössä käytetyllä 3D LEM -ohjelmistolla on mahdollista määrittää säännöllisen pallon muotoisia tai vapaan muotoisia liukupintoja. Vapaan muotoisissa liukupinnoissa mittasuhteet voi määrittää ellipsoidin tai pallon muotoa mukaileviksi. Lisäksi liukupintoja on mahdollista optimoida lukuun ottamatta säännöllisen pallon muotoista liukupintaa, jolloin ohjelma iteroi liukupinnan geometriaa siten, että se tuottaa liukupinnan varmuudeksi matemaattisen minimin. Liukupinnan muodosta riippuen muodostui eroja erimuotoisten liukupintojen varmuuskertoimien välille.

Suurimmat varmuuskertoimet saatiin 3D LEM:ssä säännöllisen pallon muotoisilla liukupinnoilla ja pienimmät vapaan muotoisilla optimoiduilla liukupinnoilla. Lasketuissa tapauksissa säännöllisen pallon muotoisella liukupinnalla varmuuskerroin oli keskimäärin noin 10 % suurempi kuin vapaan muotoisella liukupinnalla, suurimmillaan ero oli noin 20 %. Optimoiduilla, vapaan muotoisilla liukupinnoilla saatiin lasketuissa tapauksissa keskimääräisesti muutaman prosentin pienempiä varmuuskertoimia vapaan muotoisiin liukupintoihin verrattuna. Suurimmillaan optimoidun liukupinnan varmuuskerroin oli noin 10 % vapaata liukupintaa pienempi.

Optimoidun liukupinnan havaittiin kuitenkin tuottavan tietyissä tapauksissa epärealistisen muotoisia liukupintoja, joissa oli jyrkkiä suunnanmuutoksia. Esimerkkinä

tästä on kuvassa 19 esitetty liukupinta vesistökohteessa pohjamaatyypillä 1. Kun tarkastellaan liikennekuormitetun 1-raiteisen penkereen poikkileikkausta, liukupintaan muodostuu jyrkkä suunnanmuutos penkereen ja liikennekuormituksen päättymiskohdan alapuolelle. Tästä pisteestä liukupinta hakeutui lyhyintä reittiä pitkin kohti luiskaa. Liukupinnan ns. kaatava osuus siis muodostui tässä tapauksessa mahdollisimman jyrkäksi ja ns. tukeva osuus mahdollisimman lyhyeksi, jolloin varmuuskerroin minimoitui. Samassa kuvassa on esitetty myös vertailukohtana vapaa liukupinta (ilman optimointia), jossa liukupinnan muoto on huomattavasti laakeampi. Varmuuskerroin optimoidulla liukupinnalla oli 1,25 ja vapaan muotoisella liukupinnalla 1,39.



Kuva 19. Optimoidun ja vapaan muotoisen liukupinnan poikkileikkaus. Laskentatapaus: vesistökohte, pohjamaatyyppe 1, 1-raiteinen pengeri, jossa liikennekuorma.

Säännöllisen pallon muotoinen liukupinta asettaa eniten lähtökohtaisia rajoituksia liukupinnan mittasuhteille, jolloin liukupinnan leveyden ja syvyyden suhde on selvästi määritelty. Tämän myötä säännöllisen pallon muotoinen liukupinta antoi 3D LEM -menetelmässä suurimmat varmuuskertoimet, sillä mittasuhterajoitteen vuoksi säännöllisen pallon muotoinen liukupinta ei pystynyt hakeutumaan alhaisimman varmuuskertoimen tuottavaan kohtaan.

Elementtimenetelmällä tehdyt vertailulaskennat osoittavat, että liukupinnan muoto on homogeenisessa maaperässä kaareva ilman jyrkkiä suunnanmuutoksia. Vapaan muotoisten liukupintojen (ilman optimointia) todettiin olevan lähimpänä elementtimenetelmän liukupintojen muotoa. Sen vuoksi työn edetessä jätettiin

tarkastelun ulkopuolelle säännöllisen pallon muotoiset ja optimoidut liukupinnat ja laskennassa keskityttiin vapaan muotoisiin liukupintoihin.

Pohjamaatyypillä 3 alhaisimman varmuuskertoimen omaavan liukupinnan hakeminen tietyissä pengertapauksissa oli haastavaa, vaikka lähtötilanteen liukupinta olisi tuottanut kaikissa tapauksissa alhaisimman varmuuskertoimen. Vaarallisimman liukupinnan löytäminen voi siis tietyissä tapauksissa vaatia ohjelmiston oletuslaskentaparametrien muuttamista ja tarkempaa liukupinnan rajaamista vaarallisimman liukupinnan löytämiseksi.

6.6 Päätyvastuksen huomiointi 2D-laskennassa

Saadut laskentatulokset osoittavat, että 2D LEM -päätyvastuksen oikeanmukaiseen soveltamiseen ei ole olemassa sellaisia yhdenmukaisia parametreja, jotka tuottaisivat kaikissa lasketuissa tapauksissa 3D LEM -menetelmää vastaavia tuloksia. Päätyvastuksen kanssa lasketut liukupinnat alkavat läheltä penkereen päätyä, jolloin liukupinnat ovat suhteellisen lyhyitä ja liukuvan kappaleen leveyden suhde liukupinnan pituuteen on kohtuullisen suuri myös kapealla penkereellä. Mikäli liukupinta olisi pidempi, päätyvastuksen osuus varmuuskertoimeen korostuisi. Tämä voisi johtaa pahimmillaan liian suureen varmuuskertoimen arvoon kuten paalulaatan pituustarkastelu osoittaa. Päätyvastuksen laskennassa liukuvan kappaleen leveyden sitominen pengerialueeseen ei ole siis välttämättä oikea menettelytapa, vaan liukuvan kappaleen leveys pitäisi pystyä sitomaan ensisijaisesti järkevässä suhteessa liukupinnan pituuteen.

Koska 2D-ohjelmassa ei pystytä mallintamaan todellista kuormitusilannetta, myös pintakuorman suuruus on yksi tekijä, joka täytyy ottaa huomioon päätyvastuksen soveltamisessa. Tässä työssä käytetyillä parametreilla varmuuskertoimet 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa olivat lähellä 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisen liukupinnan varmuuskertoimia, kun tarkasteltiin penkereitä ilman pintakuormaa. Kun raidepenkereen päälle lisättiin pintakuorma 42,7 kPa, ero kasvoi 3D LEM -menetelmään verrattuna selvästi. Mikäli pintakuorman suuruus olisi ollut pienempi, myös varmuuskertoimen ero suhteessa 3D LEM -menetelmään olisi ollut

vastaavasti pienempi. Tämän myötä päätyvastuksen soveltamisessa joko päätyvastuksen parametrissa määritettävän varmuuskertoimen tai liukuvan kappaleen leveyden tulisi olla tietyssä suhteessa pintakuorman suuruuteen pengerveveys huomioiden, jotta saavutettaisiin yhdenmukaisia tuloksia 3D LEM -menetelmän kanssa.

Mikäli pengeri mallinnetaan maakerroksena, myös penkereen lujuus vaikuttaa päätyvastukseen, vaikka liukuva kappale olisi pengervevyttä suurempi. Korkeilla penkereillä päätyvastus voi nousta sen vuoksi kohtuuttoman suureksi. Lähtökohtaisesti turvallisinta tapa mallintaa pengeri päätyvastuksen laskennassa on mallintaa se kuormana, jolloin penkereen lujuus ei ole lainkaan mukana päätyvastuksessa. Korkeilla penkereillä on aina syytä tehdä herkkyystarkastelu penkereen vaikutuksesta stabiliteettiin; esim. mallintamalla pengeri sekä kuormana että maakerroksena ja tekemällä sen perusteella johtopäätöksiä penkereen vaikutuksesta päätyvastukseen ja liukupinnan varmuuskertoimeen.

Päätyvastusparametreilla on tietyissä tapauksissa suuri vaikutus varmuuskertoimeen. Väärin valituilla parametreilla päätyvastuksen osuus helposti ylikorostuu, jolloin lopputuloksena on liian suuri varmuuskerroin. Päätyvastuslaskennan yksi selkeä ongelma on se, että tulosten oikeellisuutta on lähes mahdotonta arvioida, mikäli todellisen 3D-mallin mukaisia vertailulaskelmia ei ole käytettävissä. Siinä tapauksessa voidaan vain tutkia päätyvastusparametrien vaikutusta varmuuskertoimeen varioimalla muuttujien arvoja sekä niiden suhteellisesta vaikutuksesta stabiliteettiin.

Kaikissa laskentatapauksissa saatua tulosta on aina verrattava lähtötilanteen 2D-varmuuteen ilman pengertä. Suljetun tilan parametreilla laskettaessa varmuuskerroin penkereen kanssa ilman pohjanvahvistustoimenpiteitä ja päätyvastus huomioiden ei voi olla lähtötilanteen varmuuskerrointa suurempi. Mikäli saatu varmuuskerroin on suurempi kuin lähtötilanteessa, on päätyvastuksen vaikutus huomioitu siinä tapauksessa liian suureksi.

Päätyvastuksen käsin laskemista jälkeinpäin 2D-liukupinnan perusteella on syytä välttää, sillä siinä tapauksessa päätyvastuksen osuus varmuuteen voi korostua huomattavan paljon. Mikäli liukupinnan päätyvastuksen vaikutus ei ole mukana

liukupintojen generoinnissa, vaarallisimpien liukupintojen geometriat 2D-menetelmässä ilman päätyvastusta ja päätyvastuksen kanssa voivat poiketa toisistaan huomattavasti. Tavallisesti 2D-liukupinnat ilman päätyvastusta ovat pidempiä etenkin suljetun tilan parametreilla, jolloin myös liukupinnan pinta-ala kasvaa.

6.7 Suositukset penkereen pituussuuntaisen stabiliteetin laskentaan

Stabiliteetin laskenta on syytä aloittaa aina lähtötilanteen stabiliteetin määrittämisellä 2D LEM -menetelmällä ilman päätyvastusta. Tämä tulos toimii hyvänä vertailupohjana penkereen stabiliteetin laskennassa niin päätyvastuksen kuin 3D LEM -menetelmällä saatujen tulosten tulkinnassa.

Päätyvastuksen soveltamisen ohjeistaminen 2D LEM -menetelmässä tehtyjen laskentojen perusteella on haastavaa, sillä stabiliteettiin vaikuttavia tekijöitä on paljon ja niiden vaikutuksen suuruutta varmuuskertoimeen ei vielä tarkasti tiedetä. Siten esimerkiksi liukuvan kappaleen leveyden sitominen pengerleveyteen on ongelmallista. Päätyvastuksen vaikutusta varmuuskertoimeen pitäisi kuitenkin aina verrata lähtötilanteen lisäksi saman laskentatapauksen 2D LEM -menetelmän varmuuskertoimeen ja tehdä sen perusteella johtopäätöksiä päätyvastuksen vaikutuksesta varmuuskertoimeen.

Vaikka tässä työssä 2D LEM menetelmän varmuuskerroin yhdessä päätyvastuksen kanssa jäi tietyissä tapauksissa selvästi pienemmäksi kuin 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin, voi ero varmuuskertoimien välillä olla samassa kuormitustapauksessa erityyppisellä poikkileikkausgeometrialla ja pohjaolosuhteilla päinvastainen. Sen vuoksi tässä työssä käytettyä liukuvan kappaleen leveyden suhdetta pengerleveyteen ei voi soveltaa kaikissa tapauksissa, vaan se pitäisi pystyä määrittämään tapauskohtaisesti.

3D LEM -menetelmässä on tarkasteltava useiden erimuotoisten liukupintojen varmuuskertoimet ellipsoidin ja pallon muotoa mukailevilla mittasuhteilla sekä symmetrisillä ja epäsymmetrisillä liukupinnoilla. Tarkastelun perusteella on valittava kyseiseen tilanteeseen soveltuvin liukupinnan muoto. 3D LEM -menetelmästä on saatu vasta vähän kokemuksia, joten laskentatuloksiin on syytä suhtautua kriittisesti erityisesti

epäsymmetrisissä tapauksissa sekä haastavissa pohjaolosuhteissa. Työssä saatujen kokemusten perusteella jo yksinkertaisissa malleissa vaarallisimman liukupinnan löytyminen oli paikoitellen haastavaa, joten liukupinnan variointi ja analysointi on tehtävä 3D-tarkasteluissa huolellisesti. Lisäksi on huomioitava, että mikäli stabiliteettilaskenta tehdään 3D:nä, myös kuormitus on valittava 3D-tapauksen mukaisesti.

Koska 3D LEM:ssä momenttitasapaino ei välttämättä toteudu kaikissa suunnissa, voimakkaasti epäsymmetrisissä kuormitustapauksissa voi aiheutua laskentaan virhettä, jonka suuruutta ei tällä hetkellä tarkalleen tiedetä. Menetelmän rajoitteiden vuoksi laskentamalleja on syytä yksinkertaistaa kulloiseenkin tilanteeseen sopivaksi, jottei laskennasta tulisi liian monimutkaista. Yksinkertaistettujen mallien kautta myös tulosten tulkinta on helpompaa.

Vaikeissa ja monimutkaisissa sekä voimakkaasti epäsymmetrisissä laskentatapauksissa tulokset on syytä tarkistaa 3D FEM -menetelmällä, sillä se ei sisällä LEM -menetelmässä olevia lähtöoletuksia tai keinotekoisia rajoituksia. Pehmeässä savessa myötöpehmenemisen on todettu pienentävän varmuutta noin 10 %, mitä LEM-menetelmät tai FEM SRM -menetelmä eivät huomioi. Mikäli myötöpehmeneminen halutaan ottaa huomioon, on käytettävä elementtimenetelmän kyseiseen tarkoitukseen soveltuvaa materiaalimallia. 3D-tapausten laskeminen on elementtimenetelmällä hidasta ja vaatii tyypillisesti paljon tutkimuksia, joten menetelmää ei kannata soveltaa kuin erityistapauksissa.

7 LASKENTATULOSTEN YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin siltojen tulopenkereiden pituussuuntaista stabiiliteettia 2D ja 3D LEM -menetelmillä perustuen Bishopin yksinkertaistettuun menetelmään. Vertailulaskelmia tehtiin 3D FEM SRM -menetelmällä. Tutkittavat tapaukset olivat yksi- ja kaksiraiteinen ratapenger sekä leveä moottoritiepenker vesistö- ja alikulkukohteessa. Pengerleveydet valittiin siten, että pengerialueiden vaikutuksesta laskentamenetelmien välisiin varmuuskerroineroihin saataisiin mahdollisimman hyvä käsitys. Pengerkorkeus oli kaikissa tapauksissa 2 m. Pohjamaatyyppejä oli kolme: löyhä savi (pohjamaatyyppi 1), sitkeä savi (pohjamaatyyppi 2) ja siltti (pohjamaatyyppi 3). 2D LEM -menetelmässä varmuuskerroin laskettiin ilman päätyvastusta ja päätyvastuksen kanssa. Päätyvastuksen laskennassa liukuvan kappaleen leveys oli kaksinkertainen pengerialueiden nähden ja päätyvastuksen varmuuskerroin oli 2. 3D LEM -menetelmässä käytettiin pääosin vapaan muotoisia liukupintoja ilman optimointia.

2D- ja 3D-laskentamenetelmillä saatujen tulosten välille muodostui merkittäviä eroja suljetun tilan parametrien pohjamaatyypeillä vesistö- ja alikulkukohteessa kapeimmilla penkereillä. 2D LEM -menetelmä antoi näissä tapauksissa merkittävästi 3D-menetelmiä pienempiä varmuuskertoimia. Suurin ero muodostui vesistökohteessa kapeimmalle penkereelle (1-raiteinen ratapenger) pohjamaatyyppillä 1 (löyhä savi), jonka päällä oli lisäksi liikennekuorma. Siinä 3D LEM -menetelmän varmuuskerroin vapaan muotoisella liukupinnalla oli yli kaksinkertainen 2D LEM -menetelmän ympyrän muotoisen liukupinnan varmuuskertoimeen verrattuna. Pohjamaan suljetun leikkauslujuuden arvo ei selkeästi vaikuttanut laskentamenetelmien välisiin varmuuskertoimien eroihin. Pohjamaatyyppillä 3 (siltti) laskentamenetelmien välisten varmuuskertoimien erot olivat selvästi pienemmät kuin suljetun tilan parametrien pohjamaatyypeillä.

Penkereen leveyden vaikutus varmuuskertoimien eroihin 2D ja 3D LEM- menetelmien välillä oli selkeä: Kapeimmalla, 1-raiteisella ratapenkerellä ero 3D- ja 2D-laskentamenetelmien välillä oli suurin ja se pieneni pengerialueiden kasvaessa, ollen pienin moottoritiepenkerellä, jossa tulosten välillä ei ollut enää merkittävää eroa. Myös

pintakuormalla (42,7 kPa) oli selvä vaikutus varmuuskertoimien eroihin ratapenkereillä: varmuuskertoimien ero oli suurempi ratapenkereillä pintakuorman kanssa kuin ilman pintakuormaa. Moottoritiepenkereellä pintakuorman (10 kPa) vaikutus varmuuskertoimien välisiin eroihin oli selvästi pienempi kuin ratapenkereillä.

Elementtimenetelmällä tehtyjen vertailulaskelmien varmuuskertoimet noudattelivat kaikissa lasketuissa tapauksessa 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisen liukupinnan varmuuskertoimia. 3D FEM SRM -menetelmällä lasketut varmuuskertoimet olivat pääsääntöisesti noin 10 % suurempia kuin 3D LEM -menetelmän varmuuskertoimet vapaan muotoisilla liukupinnoilla. Ero säilyi samansuuruisena kuormituksesta, pohjaolosuhteista tai pengerveveydestä riippumatta.

Liukupinnan muodolla oli selkeä vaikutus varmuuskertoimeen LEM-menetelmissä. Vapaan muotoisella liukupinnalla oli hieman pienempi varmuuskerroin kuin ympyrän muotoisella liukupinnalla 2D LEM -menetelmässä. Säännöllisen pallon muotoinen liukupinta tuotti suurimman varmuuskertoimen 3D LEM -menetelmässä ja vapaan muotoinen optimoitu liukupinta pienimmän varmuuskertoimen. Optimoituihin liukupintoihin muodostui paikoitellen jyrkkiä suunnanmuutoksia, joita ei pidetty kinemaattisesti mahdollisina.

LEM-menetelmillä tarkasteltuna paalulaatan pituudelle tuli merkittäviä eroja, kun pituuden määrittämisessä käytettiin vaatimuksena kokonaisvarmuuskerrointa 1,8. Lyhyin paalulaatta olisi vaadittu 3D LEM -menetelmän vapaan muotoisen liukupinnan perusteella, jossa riittävä paalulaatan pituus olisi ollut hieman yli 10 m. 2D LEM -menetelmällä päätyvastus huomioiden vaadittava paalulaatan pituus olisi ollut 15 m. 2D LEM -menetelmällä ilman päätyvastusta riittävän suurta varmuuskerrointa ei saavutettu vielä 55 m pituisella paalulaatalla. Pituustarkastelu myös osoitti päätyvastuksen käyttöön liittyvän ongelman: liukupinnan poikkileikkauksen pinta-ala kasvoi nopeasti liukupinnan pituuden kasvun myötä. Tämä aiheutti nopean varmuuskertoimen kasvun päätyvaikutuksen kasvamisen myötä. Ilmiön seurauksena varmuuskerroin nousi 2D LEM -menetelmällä päätyvastuksen kanssa yli 20 m pituisella paalulaatalla korkeammaksi kuin 3D LEM -menetelmällä vapaan muotoisella liukupinnalla.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOSUOSITUKSET

Työssä tehdyt tarkastelut osoittivat, että pengerleveydellä on selkeä vaikutus 2D- ja 3D-laskentamenetelmien varmuuskertoimien välisiin eroihin penkereen pituussuuntaista stabiiliteettia tarkasteltaessa, kun pohjamaalle käytettiin suljetun tilan parametreja. Suurimmat erot syntyivät kapeimmalla penkereellä ja ero pieneni pengerleveyden kasvaessa. Kapeilla penkereillä saadut varmuuskertoimet olivat 2D LEM -menetelmällä huomattavasti pienempiä kuin kuormitustilannetta tarkemmin kuvaavilla 3D-laskentamenetelmillä. Leveimmällä penkereellä tulosten ero 2D- ja 3D-laskentamenetelmien välillä oli pienin. Leveällä penkereellä ero on pienempi kuin kapealla penkereellä, koska geometrioiden välinen ero 2D- ja 3D-mallin välillä pienenee pengerleveyden kasvaessa.

Pintakuormalla oli selkeä vaikutus varmuuskertoimien välisiin eroihin suljetun tilan parametrien pohjamaatyypeillä etenkin kapeimmilla penkereillä: Kun penkereen päällä oli liikennekuorma 42,7 kPa, 2D- ja 3D-laskentamenetelmien välinen ero oli selkeästi suurempi kuin penkereellä ilman liikennekuormaa. Pintakuorman vaikuttaessa 2D-menetelmällä saatiin selvästi huonompi varmuuskerroin kuin 3D-menetelmällä. Ero kasvaa pintakuorman vaikutuksesta, koska 2D-ohjelmistossa pintakuorman paikallisuutta ei pystytä mallintamaan toisin kuin 3D-ohjelmistossa.

Pohjamaan suljetun leikkauslujuuden suuruudella ei havaittu olevan selvää vaikutusta 2D- ja 3D-laskentamenetelmien varmuuskertoimien välisiin eroihin: pehmeän saven ja sitkeän saven pohjamaatyypeillä tulosten välinen ero 2D- ja 3D-menetelmien välillä säilyi suurusluokaltaan samana tutkituilla pengerleveyksillä.

Laskentatulokset osoittivat myös, että päätyvastuksen laskentaan 2D LEM -menetelmässä ei ole olemassa sellaisia vakioparametreja, jotka tuottaisivat vaihtelevan tyyppisissä kuormitustilanteissa 3D LEM -menetelmää vastaavia varmuuskertoimia. Oletetulla 2D-liukupinnan päätyvastuksella ei siis voida korjata menetelmän todellisen geometrian mallintamiseen liittyviä puutteita. Pahimmillaan väärin valittujen päätyvastusparametrien myötä voidaan saada liian suuria varmuuskertoimia 2D LEM -menetelmässä.

Työn pohjalta tunnistettiin jatkotutkimustarpeita etenkin päätyvastuksen laskentaan liittyen, mutta myös 3D LEM -menetelmästä olisi hyvä saada lisää tietoa. Selvityksiä olisi tarpeen tehdä mm. seuraavista asioista:

- pengerleveyden ja kuormituksen yhteys 2D LEM -menetelmän päätyvastusparametreihin,
- maaperän lujuuden vaikutus 2D LEM -menetelmän päätyvastusparametrien valintaan,
- kerroksellisen maaperän vaikutus 2D LEM -menetelmän päätyvastuksen suuruuteen,
- päätyvastuksen liukuvan kappaleen mittasuhteiden määrittäminen 2D LEM -menetelmässä,
- 3D LEM -menetelmän soveltuvuus epäsymmetrisiin kuormitustapauksiin vaikeissa pohjaolosuhteissa.

9 LÄHDELUETTELO

Cheng Y.M. & Yip C.J., 2007. Three-Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Janbu's and Morgenstern-Price's Techniques. *Journal of Geotechnical Engineering*, 133(12), s. 1544-1555.

Cheng Y. M., Lämsivaara T., & Wei W. B., 2007. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics* (34), s. 137-150.

Craig R.F., 2004. *Craig's Soil Mechanics*. Seventh edition. London and New York. Spon Press, 458 s. ISBN 0-203-57441-9.

Duncan J. M., Wright S. G. & Brandon T. L., 2014. *Soil Strength and Slope Stability*. Second Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 317 s. ISBN 978-1-118-65165-0.

GEO-SLOPE International, 2014. *Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology* [verkkodokumentti]. September 2014 Edition. Calgary. Saatavissa: <https://bit.ly/2T4eLFK> [Viitattu 27.11.2018]. 248 s.

Griffiths D. V. & Lane P. A., 1999. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique* 49 (3), s. 387-403.

Helenelund K. V., 1967. *Maarakennusmekaniikka 137*. Espoo. Otakustantamo. 278 s. ISBN 951-671-060-3.

Lechman J. B. & Griffiths D. V., 1999. Analysis of progressive failure of earth slopes by finite elements. Twelfth regional conference for Africa on Soil mechanics and geotechnical engineering (Vol.12), s. 443-449.

Plaxis, 2018. *Plaxis 3D 2018. Reference manual*. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://bit.ly/2Xh2zkj>. [Viitattu 28.11.2018]. 516 s.

Roohollah K. & Nazri A., 2013. A Review of Three-Dimensional Slope Stability Analyses based on Limit Equilibrium Method. *Computers and Geotechnics* (18), s.119-134.

Rocscience, 2017. *Slide3 – 3D Limit Equilibrium Slope Stability Overview*. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://bit.ly/2GxTG0B>. [Viitattu 30.11.2018]. 9 s.

Rocscience, 2004. *A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique*. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://bit.ly/2E0bygy>. [Viitattu 14.12.2018]

USACE. 1995. *U.S Army Corps of Engineers - Engineering and Design: Geotechnical Analysis by the Finite Element Method*. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://bit.ly/2Hc4u43>. [Viitattu 27.2.2019]

Wright S.G., Kulhawy F. G. & Duncan J. M., 1973. Accuracy of equilibrium slope stability analysis. *J. Soil Mech. and Found. Div.* vol 1, s. 65-79.

Liite 1. Varmuuskertoimet. Yhteenvetotaulukko

Laskentamenetelmä	Kokonaisvarmuuskerroin, vesistökohde																				
	Pohjamaatyyppi 1							Pohjamaatyyppi 2							Pohjamaatyyppi 3						
	Luonnon-tila	1 raide		2 raidetta		Moottoritie		Luonnon-tila	1 raide		2 raidetta		Moottoritie		Luonnon-tila	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma		Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma		Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	
2D LEM ympyrä liukupinta	1,62	1,03	0,67	1,03	0,67	1,03	0,91	2,66	1,6	1,08	1,6	1,08	1,6	1,43	1,22	1,21	0,97	1,21	0,97	1,21	1,15
2D LEM vapaa liukupinta		1	0,62	1	0,62	1	0,88		1,48	0,98	1,48	0,98	1,48	1,32	1,2	1,21	0,96	1,21	0,96	1,21	1,14
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,44	0,83	1,31	0,78	1,11	0,98		2,47	1,42	2,24	1,35	1,81	1,61		1,28	1,02	1,26	1,01	1,21	1,15
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu		1,48	1,25						2,3	2,03			1,64	1,54							
3D LEM vapaa liukupinta		1,51	1,39	1,4	1,08	1,1	1,09		2,42	2,13	2,19	1,87	1,72	1,57	1,19	1,2	1,18	1,18	1,16	1,19	1,16
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		46	27	23	19	50	56		25	12	40	22	48	53		58	98	80	25	52	41
3D LEM palloliukupinta		1,68	1,5						2,71	2,46			1,98	1,85							
3D FEM SRM**		1,7	1,51																		
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä		47 %	107 %	36 %	61 %	7 %	20 %		51 %	97 %	37 %	73 %	8 %	10 %		-1 %	22 %	-2 %	20 %	-2 %	1 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		5 %	67 %	7 %	38 %	-1 %	11 %		-2 %	50 %	-2 %	39 %	-5 %	-2 %		-6 %	16 %	-6 %	15 %	-2 %	1 %

*2D LEM päätyvastuksen parametrit: K0=1 (pohjamaatyyppi 1 ja 2), 0,58 (pohjamaatyyppi 3) , Fos= 2, liukuvan kappaleen leveys= 2 x penkereen alareunan leveys

**Saven suljettu leikkauslujuus kasvaa 3D FEM-mallissa kuivakuoren alapinnasta alkaen lineaarisesti poiketen LEM-malleista.

Laskentamenetelmä	Kokonaisvarmuuskerroin, alikulkukohde																				
	Pohjamaatyyppi 1							Pohjamaatyyppi 2							Pohjamaatyyppi 3						
	Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie		Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie		Leikkaus	1 raide		2 raidetta		Moottoritie	
	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma		Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma		Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	Penger	Penger+kuorma	
2D LEM ympyrä liukupinta	1,13	0,89	0,62	0,89	0,62	0,89	0,81	2,07	1,47	1,03	1,47	1,03	1,47	1,34	1,44	1,34	1,04	1,34	1,04	1,34	1,26
2D LEM vapaa liukupinta	1,03	0,8	0,57	0,8	0,57	0,8	0,74		1,33	0,92	1,33	0,92	1,33	1,21	1,29	1,26	1,01	1,26	1,01	1,26	1,19
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus		1,16	0,78	1,07	0,72	0,93	0,84		1,87	1,23	1,74	1,15	1,53	1,38		1,35 (1)	1,04 (2)	1,32	1,02	1,29	1,21
3D LEM vapaa liukupinta optimoitu	1,19	1,11	1,06													1,33	1,25				
3D LEM vapaa liukupinta	1,2	1,15	1,1	1,09	0,97	0,94	0,9		1,95	1,73	1,83	1,54	1,53	1,45	1,39	1,42	1,4	1,4	1,28	1,3	1,29
-Liukuvan kappaleen leveys (m)		40	28	30	21	54	49		32	16	40	21	49	50		31	20	32	22	60	47
3D LEM palloliukupinta	1,42	1,25	1,17												1,67	1,61	1,56				
3D FEM SRM	1,31	1,23	1,18			1,02	<1						1,67	1,59	1,52	1,51	1,51				
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä		29 %	77 %	22 %	56 %	6 %	11 %		33 %	68 %	24 %	50 %	4 %	8 %		6 %	35 %	4 %	23 %	-3 %	2 %
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä liukupinta + päätyvastus		-1 %	41 %	2 %	35 %	1 %	7 %		4 %	41 %	5 %	34 %	0 %	5 %		5 %	35 %	6 %	25 %	1 %	7 %
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta	9 %	7 %	7 %			9 %	< 11%						9 %	10 %	9 %	6 %	8 %				

*2D LEM päätyvastuksen parametrit: K0=1 (pohjamaatyyppi 1 ja 2), 0,58 (pohjamaatyyppi 3) , Fos= 2, liukuvan kappaleen leveys= 2 x penkereen alareunan leveys

Liukuvan kappaleen leveys 1,5 x penkereen alareunan leveys: varmuuskerroin 1) 1,38, 2) 1,05

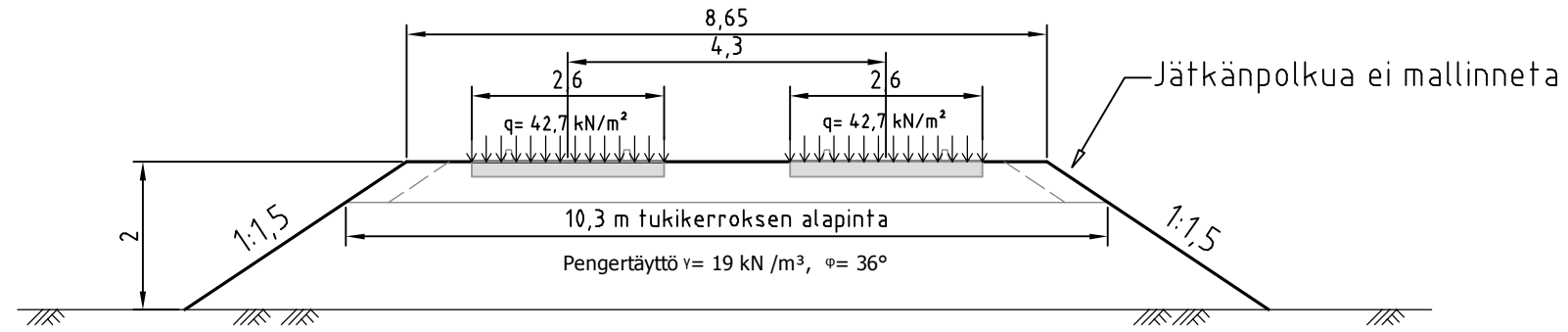
Liite 1. Varmuuskertoimet. Yhteenvetotaulukko

Vesistökohte, Eurokoodi MRT-tarkastelu		
Laskentamenetelmä	Pohjamaatyyppi 1 1 raide	
	Penger	Penger+ kuorma
2D LEM ympyrä liukupinta	0,73	0,44
2D LEM vapaa liukupinta	0,71	0,41
3D LEM vapaa liukupinta	1,07	0,95
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	47 %	116 %

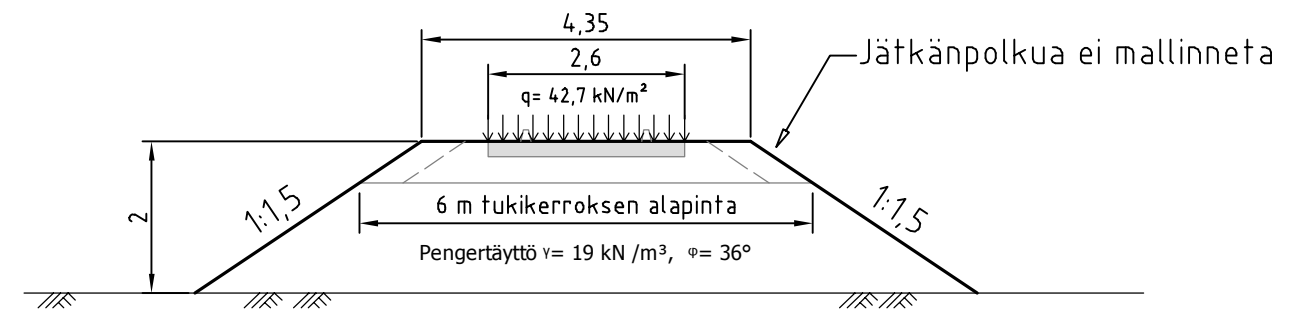
<i>Alikulkukohte. Liikennekuormitus aiheuttaa huokosveden ylipaineen. LEM-menetelmässä kerroin 0,7.</i>		
Laskentamenetelmä	Pohjamaatyyppi 3 1 raide	
	Penger+ kuorma	
2D LEM ympyrä liukupinta	1,01	
2D LEM vapaa liukupinta	0,96	
2D LEM ympyrä liukupinta+ päätyvastus	1,01	
3D LEM vapaa liukupinta	1,39	
3D FEM SRM	1,46	
Varmuuskertoimen ero 3D LEM vapaa liukupinta vs 2D LEM ympyrä	38 %	
Varmuuskertoimen ero 3D FEM SRM vs 3D LEM vapaa liukupinta	5 %	

Liite 2. Pengerpoikkileikkaukset.

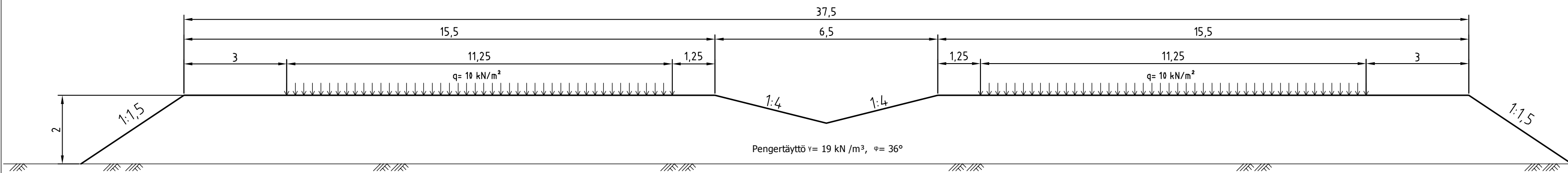
Kaksiraiteinen rata:



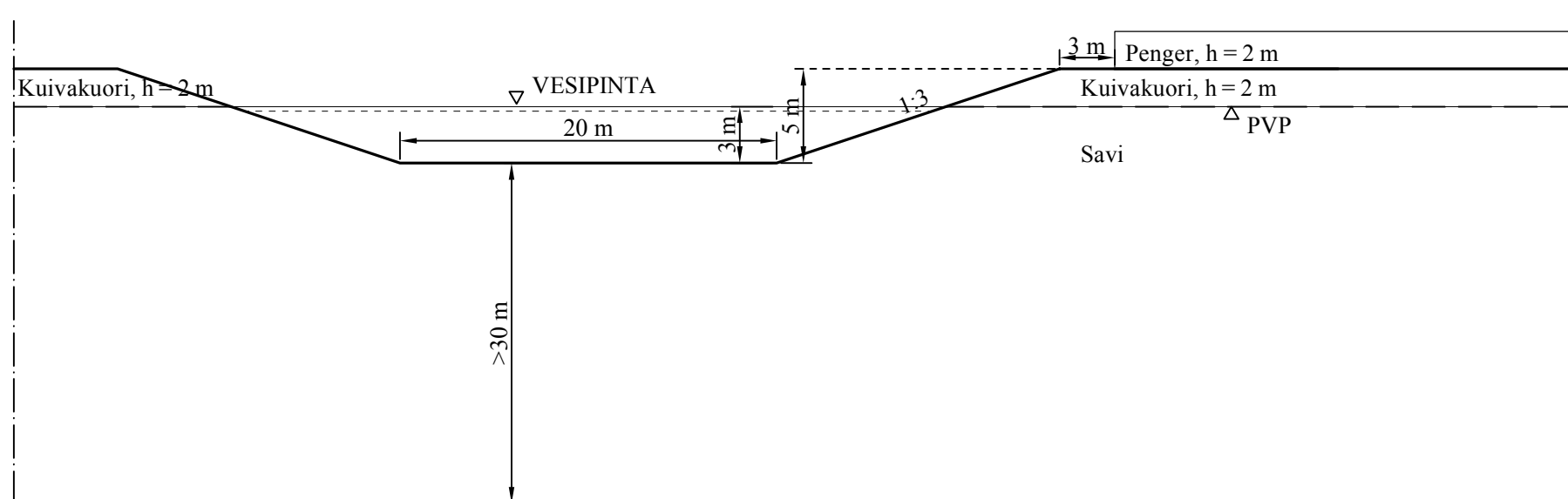
Yksiraiteinen rata:



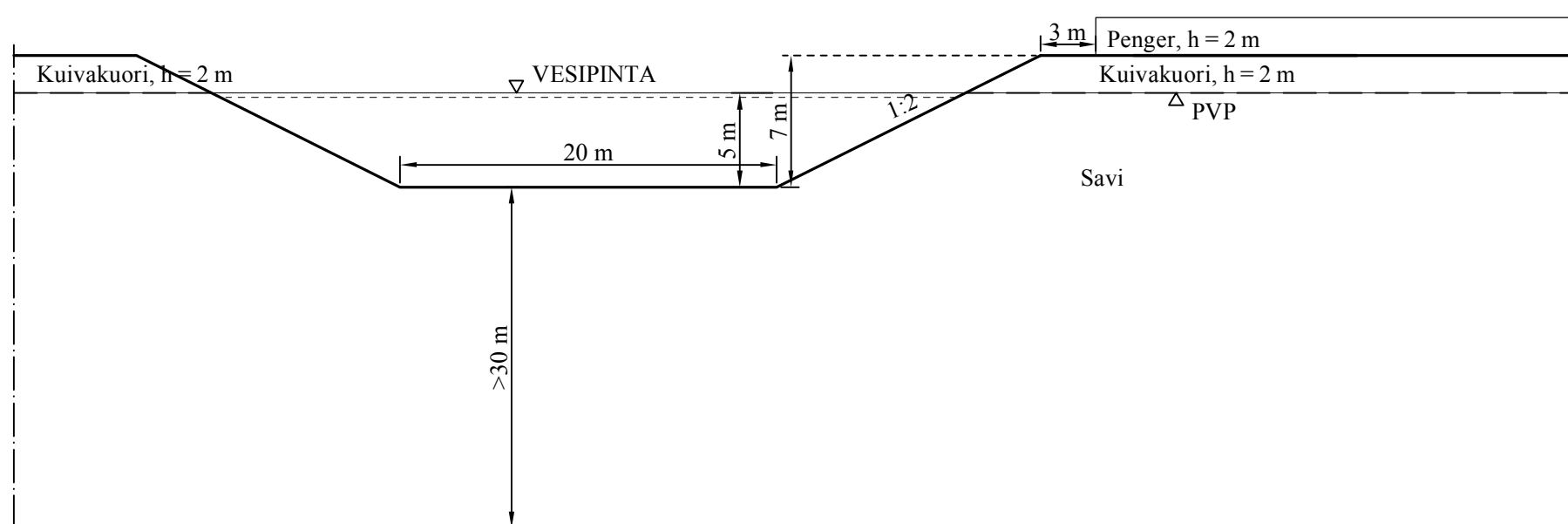
Leveä moottoritie (<120 km/h)
2x (15,5/11,25)+KA



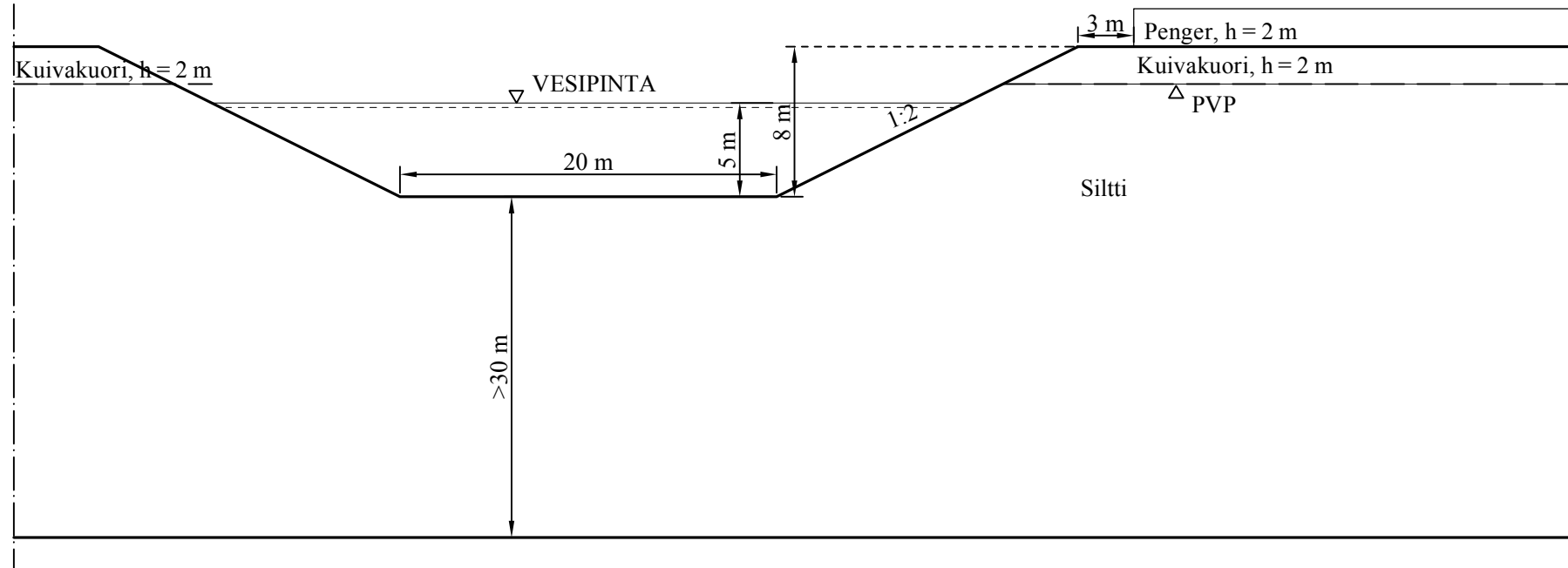
Poikkileikkaus, pohjamaatyypin 1



Poikkileikkaus, pohjamaatyypin 2



Poikkileikkaus, pohjamaatyypin 3



Materiaaliparametrit:

Materiaaliparametrit, pohjamaatyypin 1

Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	S_u (kPa)	Δs_u (kPa/m)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	0	-
Savi	16	17	10	1*	-

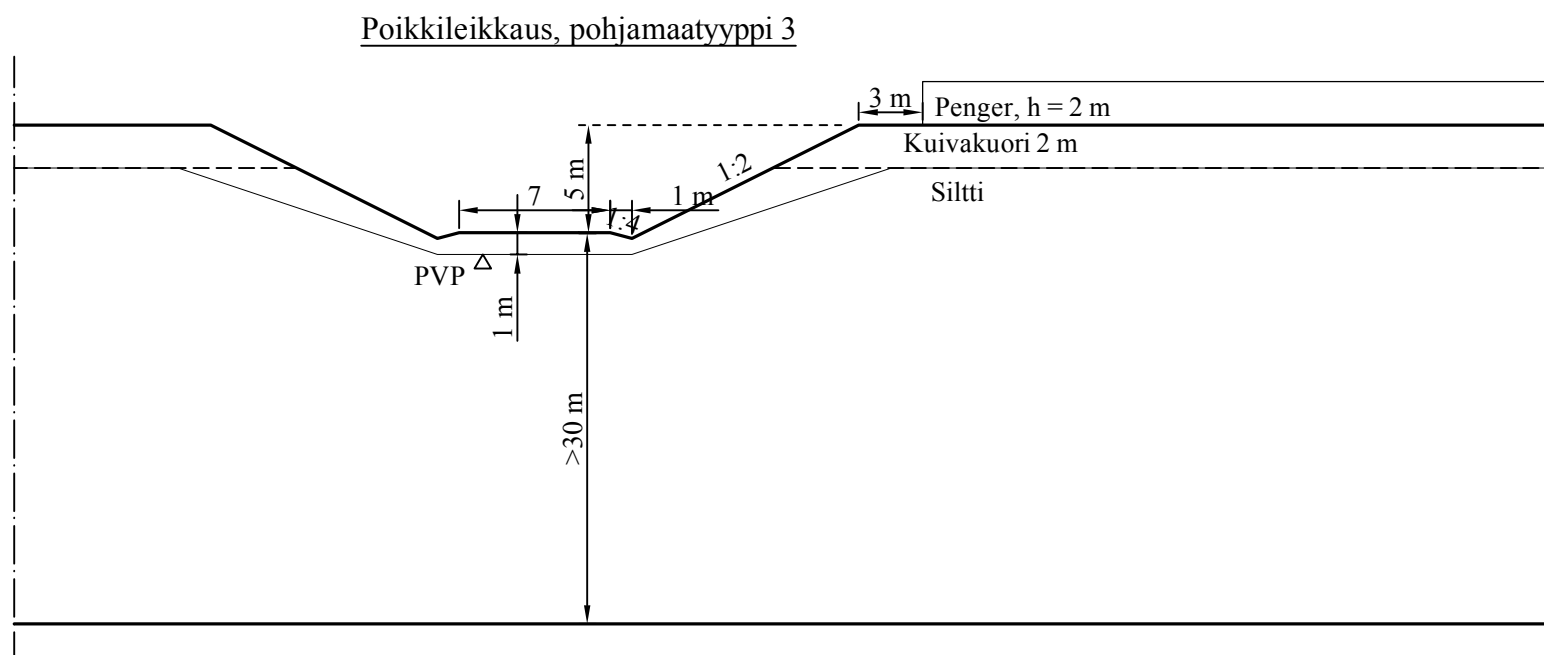
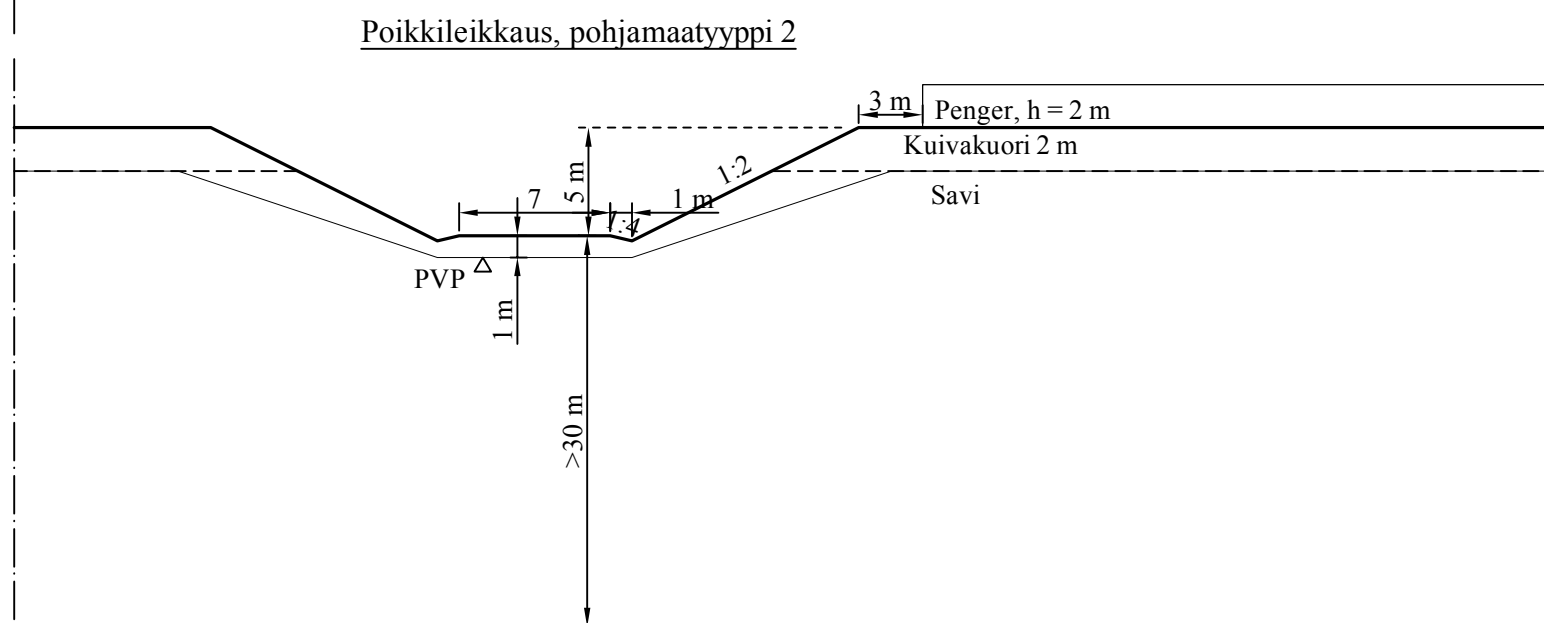
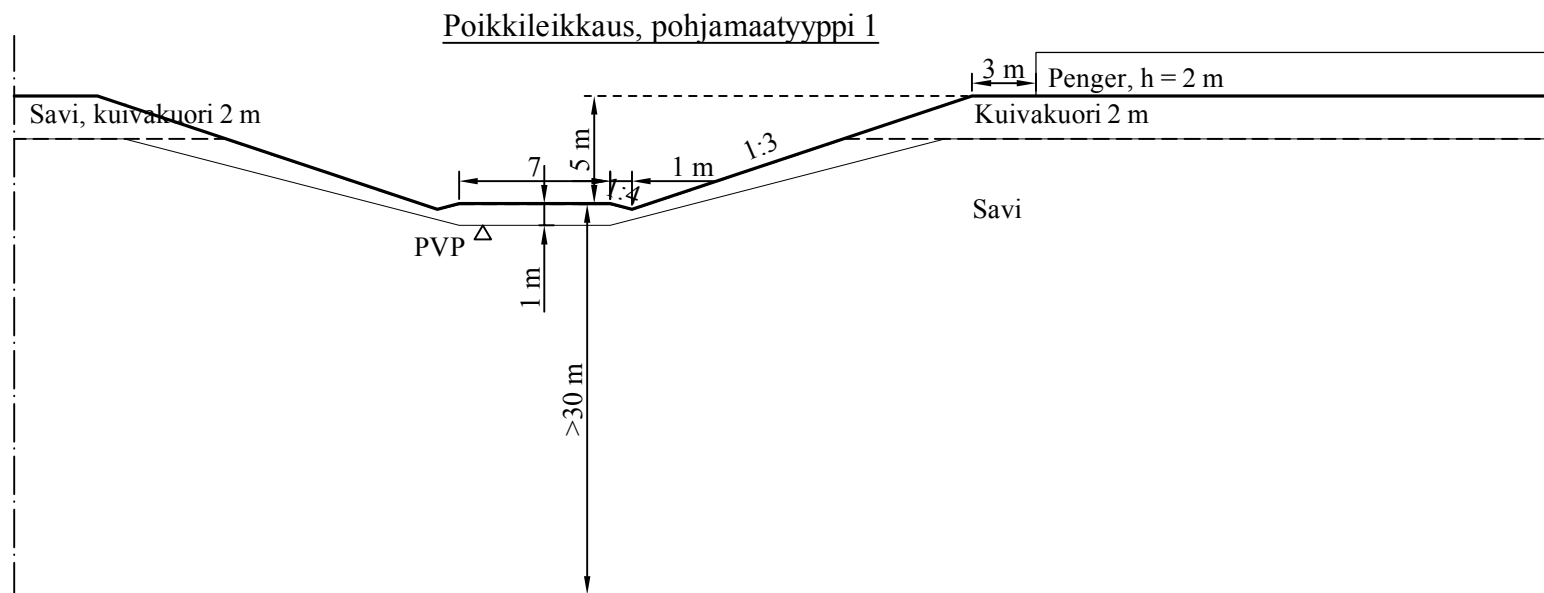
Materiaaliparametrit, pohjamaatyypin 2

Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	S_u (kPa)	Δs_u (kPa/m)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	0	-
Savi	16	17	25	1*	-

Materiaaliparametrit, pohjamaatyypin 3

Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	S_u (kPa)	C (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	-	-
Siltti	17	19	-	3	25

* suljettu leikkauslujuus kasvaa kerrospaksuuden funktiona



Materiaaliparametrit:

Materiaaliparametrit, pohjamaatyyppi 1

Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	Su (kPa)	Δsu (kPa/m)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	0	-
Savi	16	17	10	1*	-

Materiaaliparametrit, pohjamaatyyppi 2

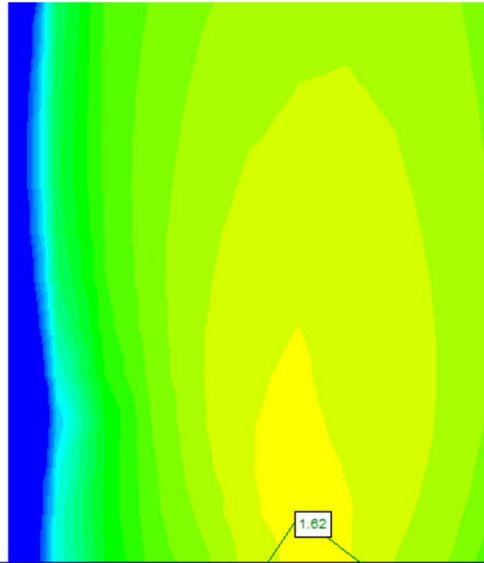
Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	Su (kPa)	Δsu^* (kPa/m)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	0	-
Savi	16	17	25	1*	-



Materiaaliparametrit, pohjamaatyyppi 3

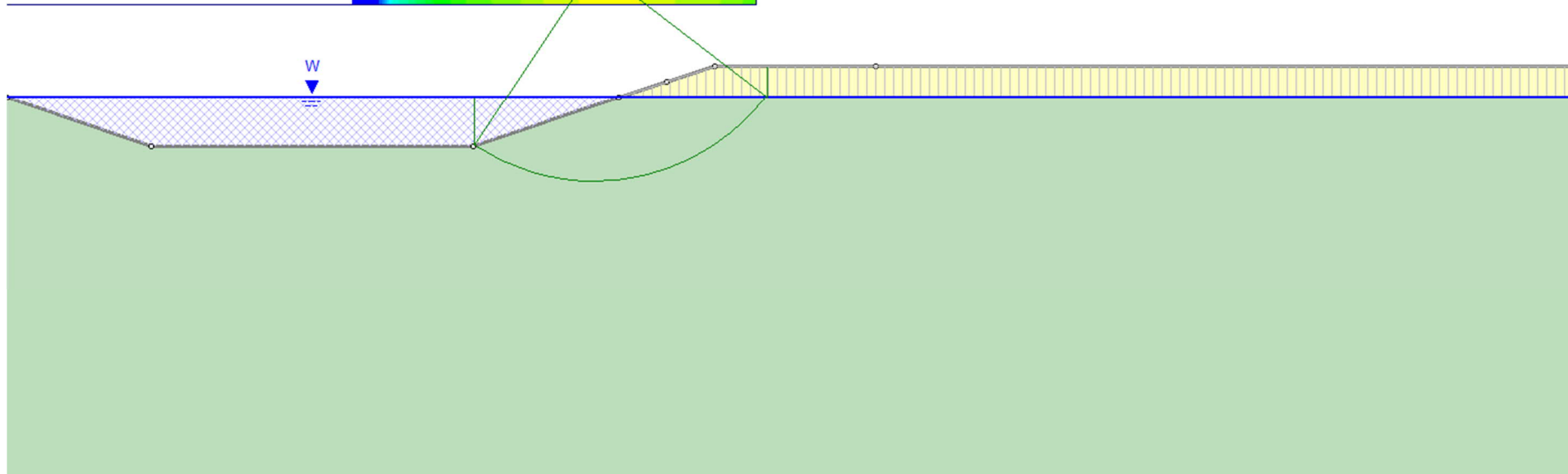
Materiaali	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	Su (kPa)	C (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Pengertäyttö	19	-	-	-	36
Kuivakuorikerros	16	-	30	-	-
Siltti	17	19	-	3	25

* suljettu leikkauslujuus kasvaa kuivakuorikerroksen alapinnan tasosta alkaen

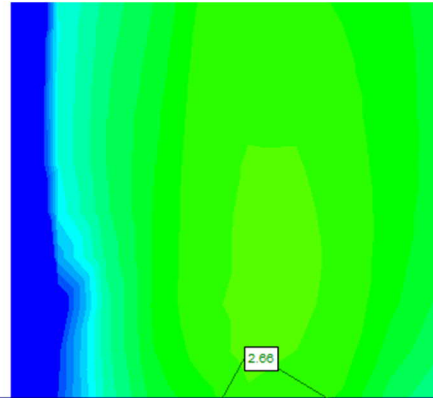
Liite 5. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte. Luonnontila.





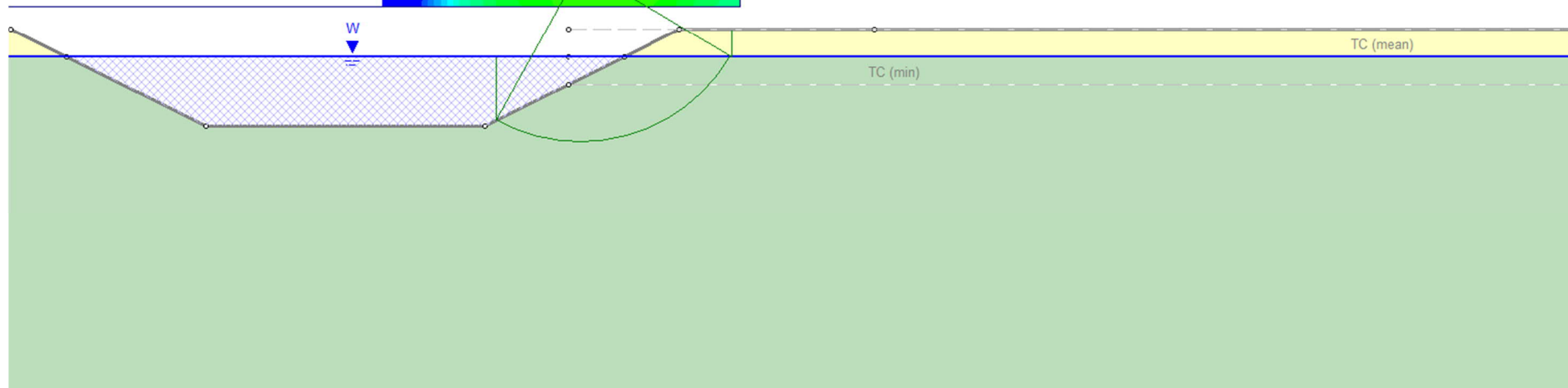
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Cohesion Type	Water Surface	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30	Constant	None	0
savi		16	17	Undrained	10	FDepth	None	0



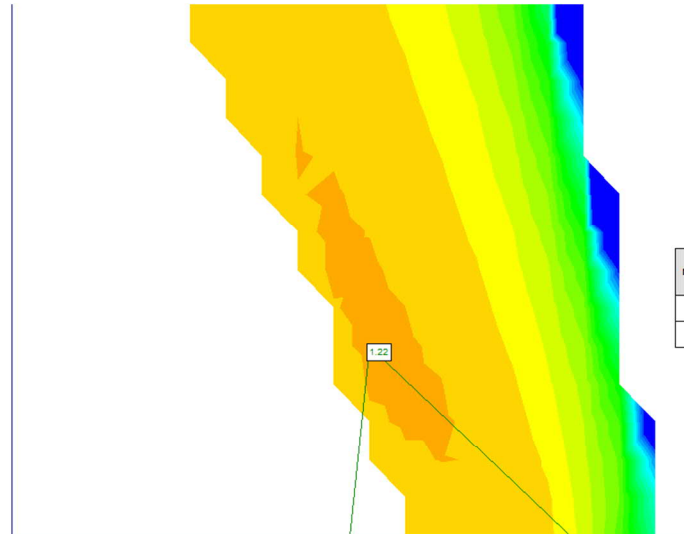
Liite 5. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte. Luonnontila.



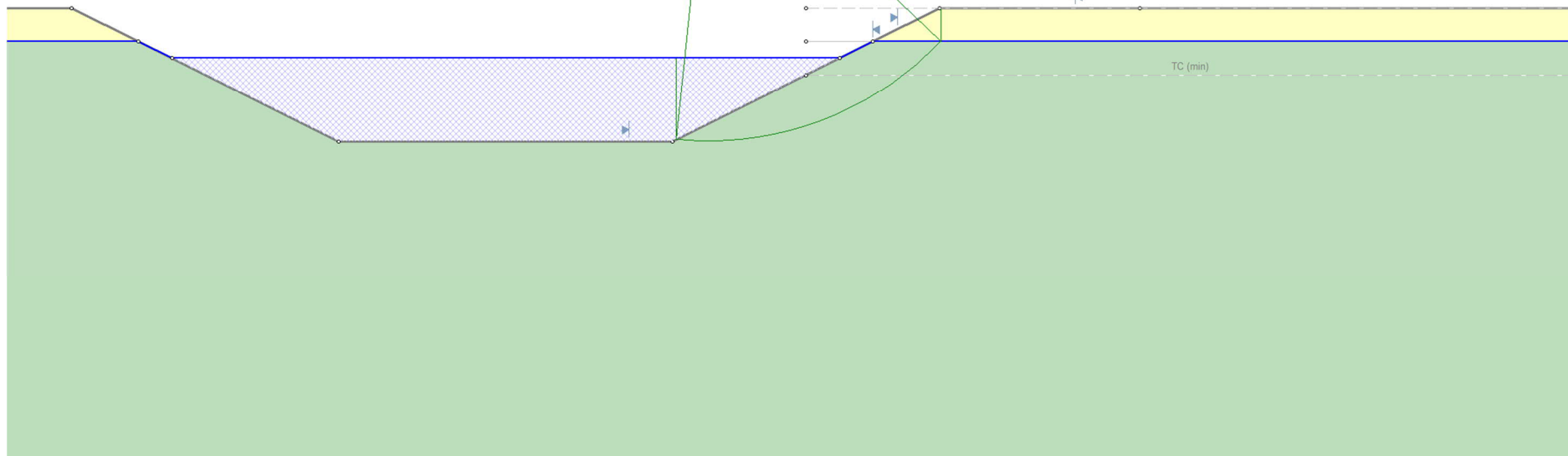
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30	Constant		None	0
savi		16	17	Undrained	25	FDepth	1	None	0



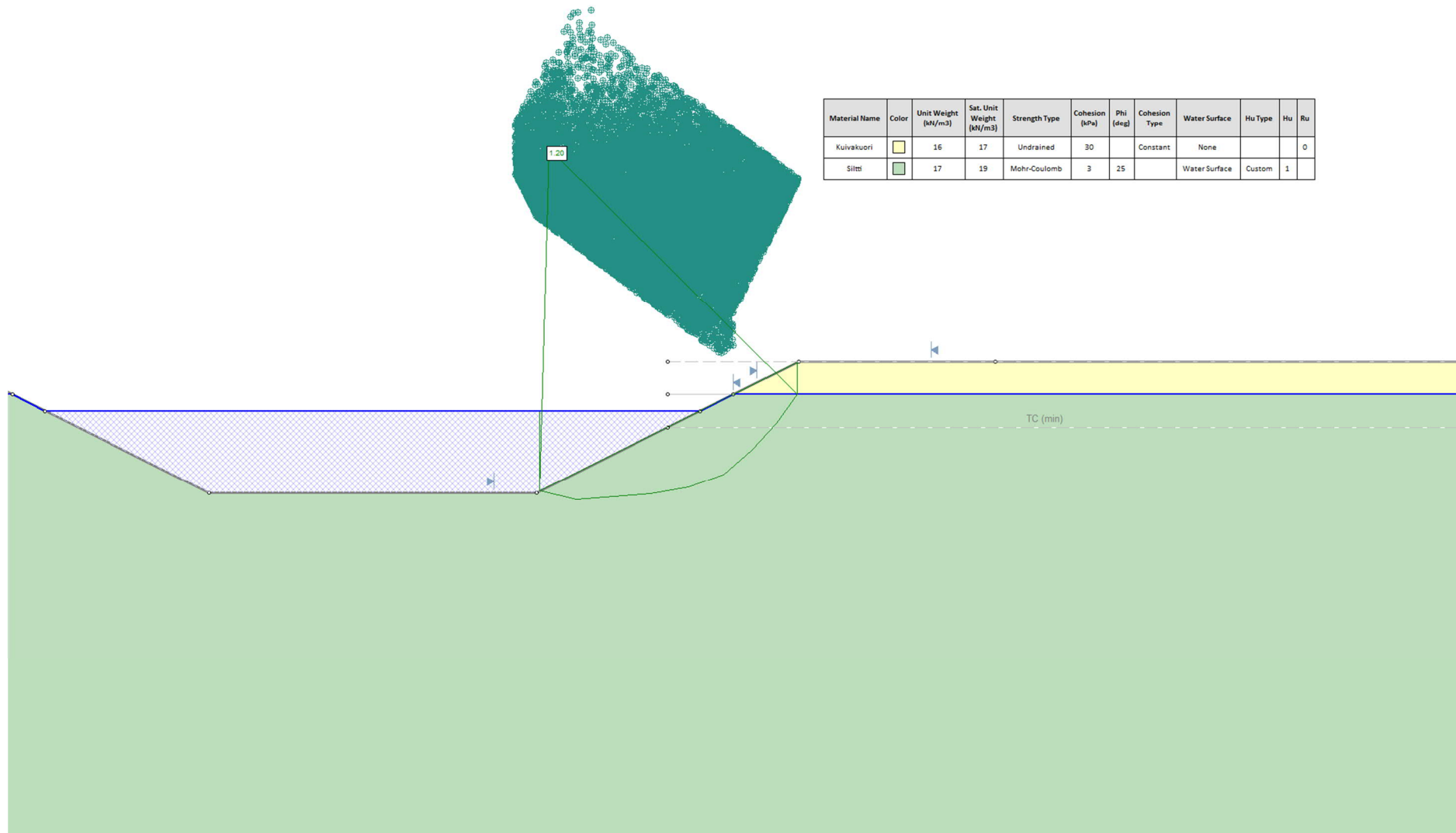
Liite 5. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte. Luonnontila.



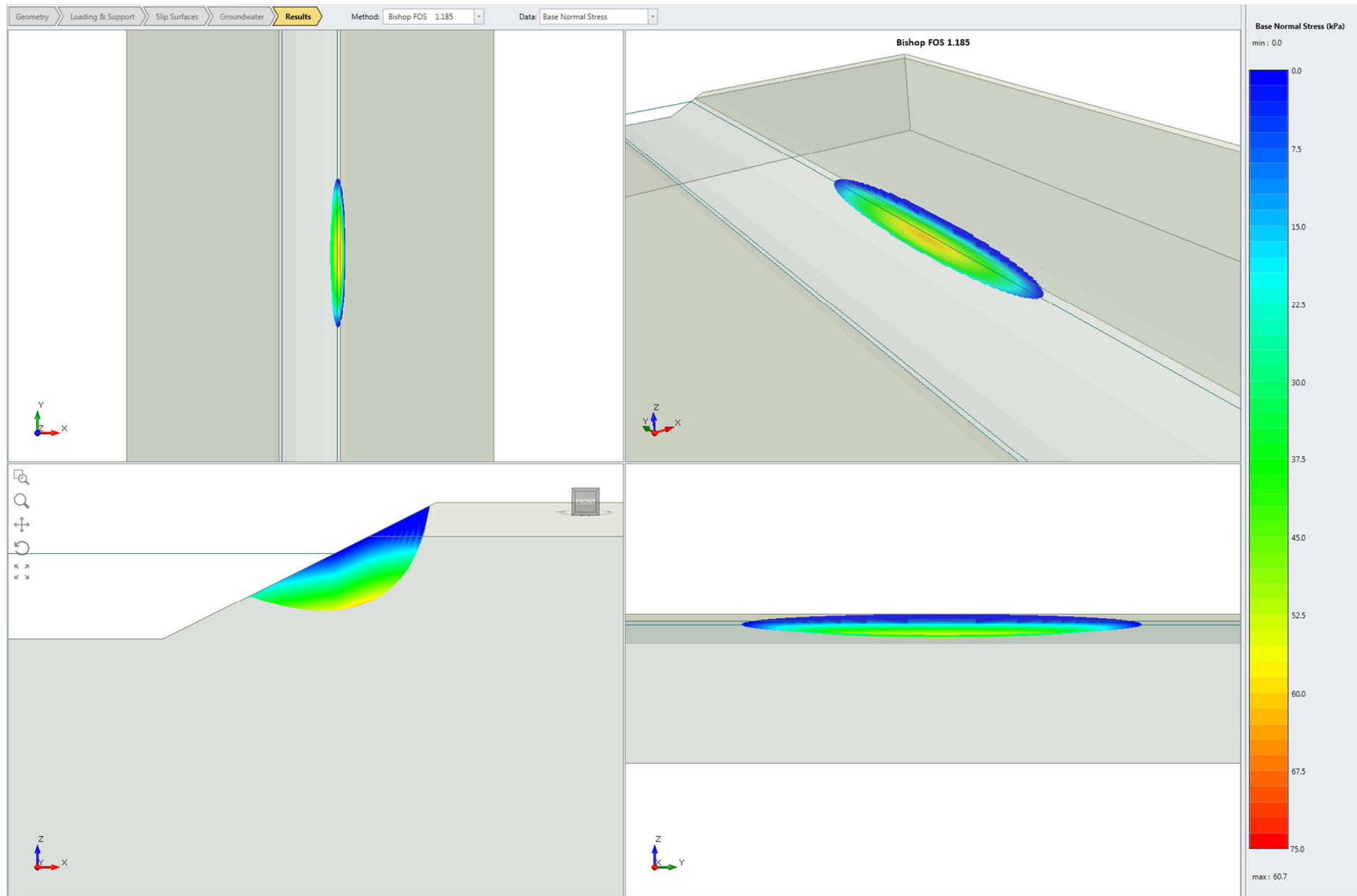
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Silti	Green	17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	



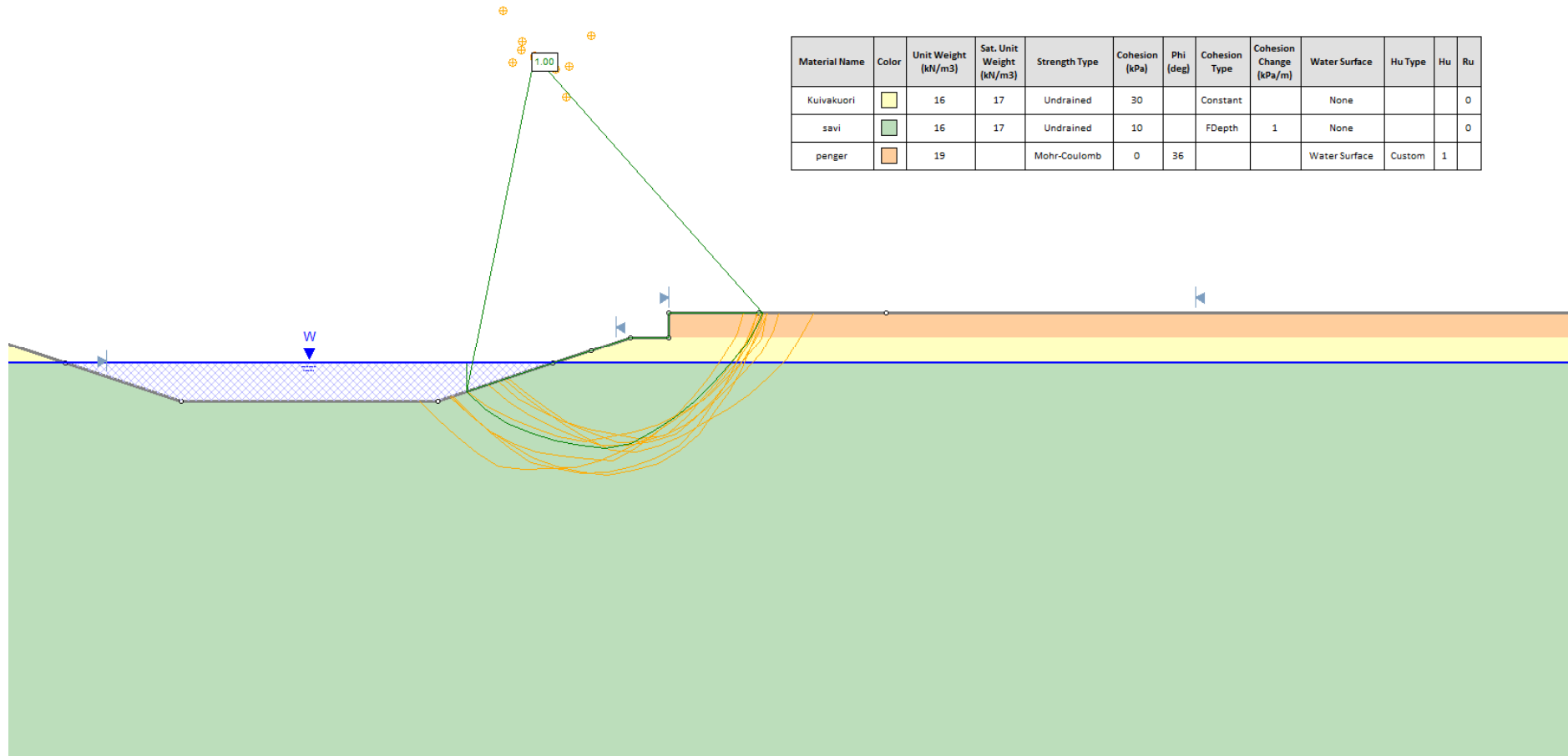
Liite 5. Stabiilettilaskentatulosteet, vesistökohte. Luonnontila.



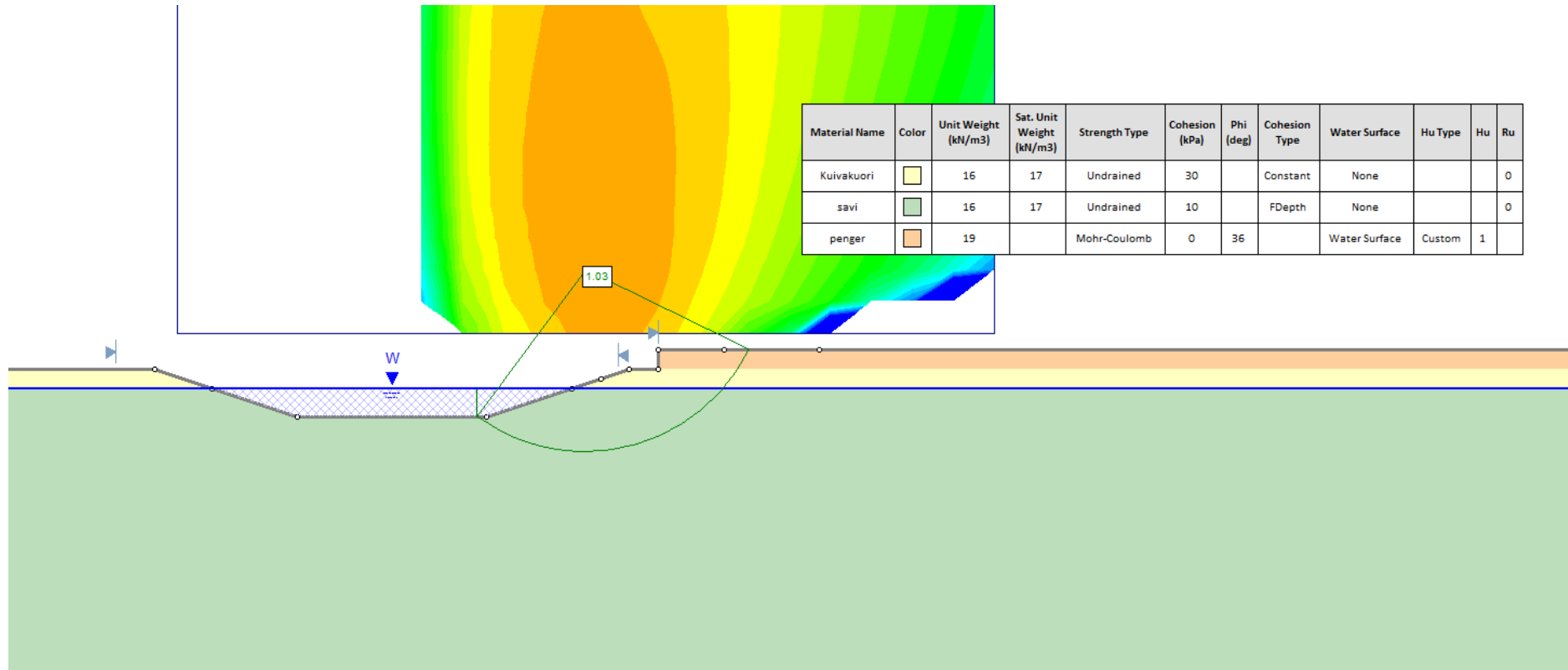
Liite 5. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte. Luonnontila.



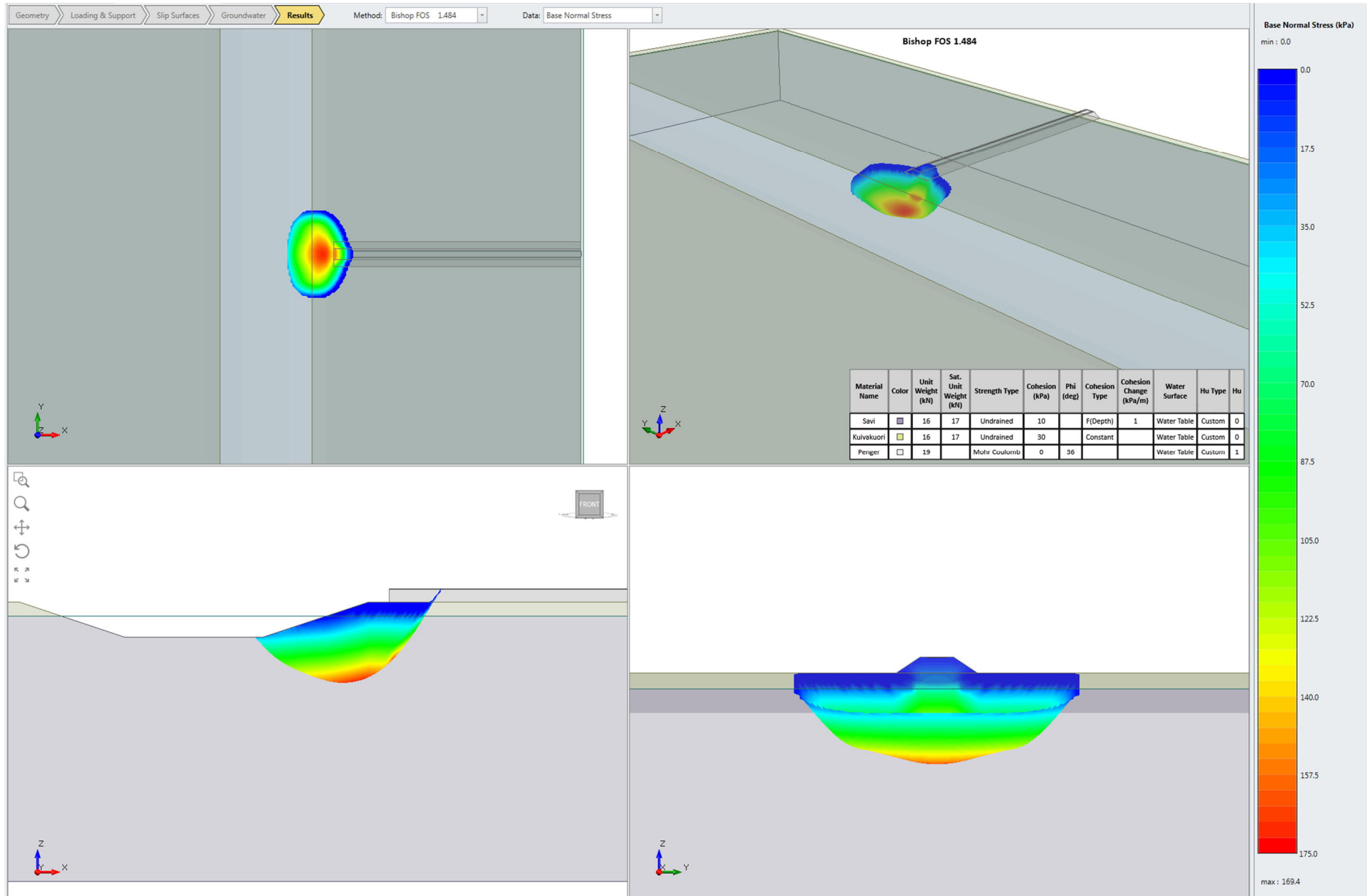
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



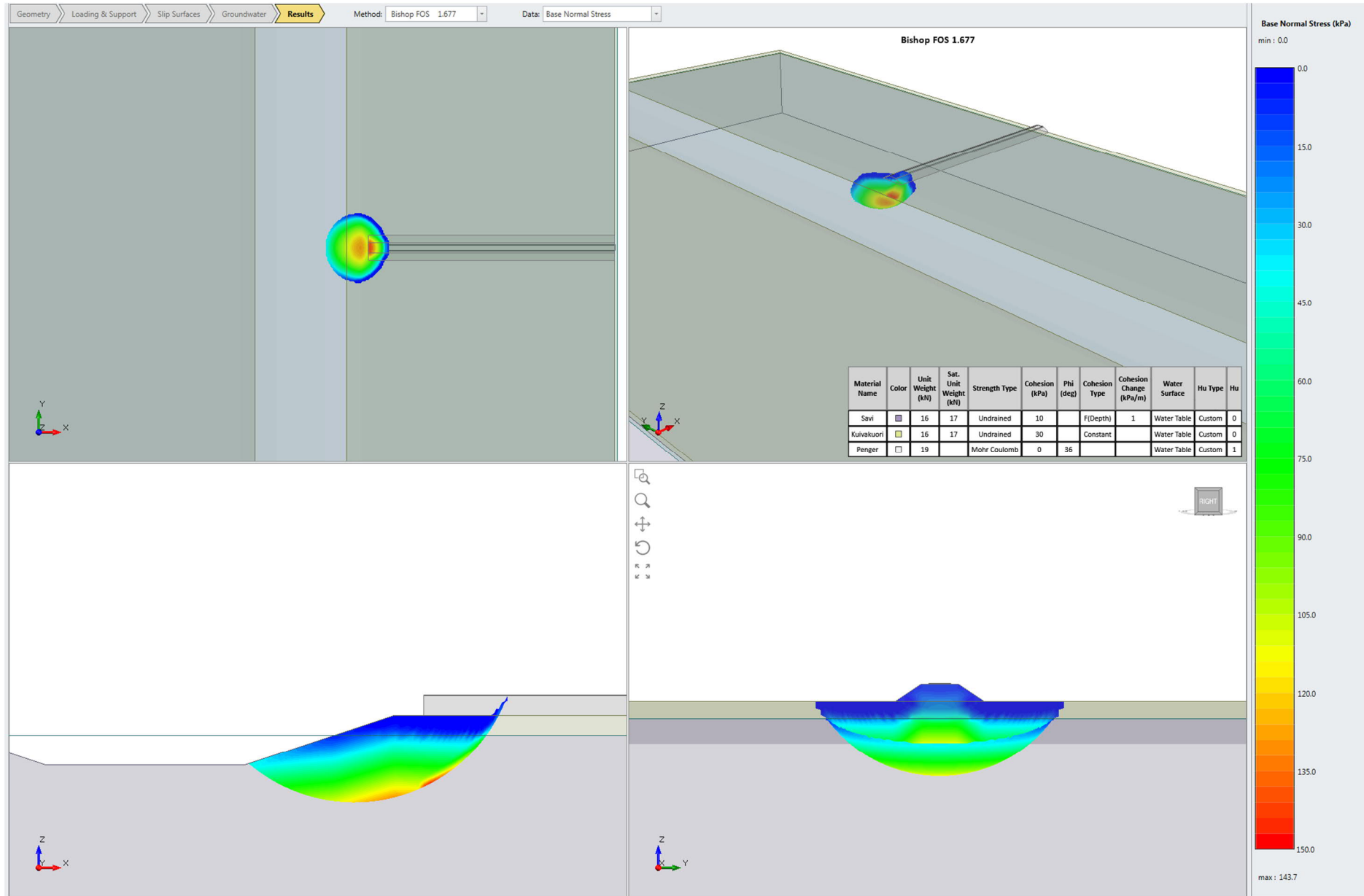
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



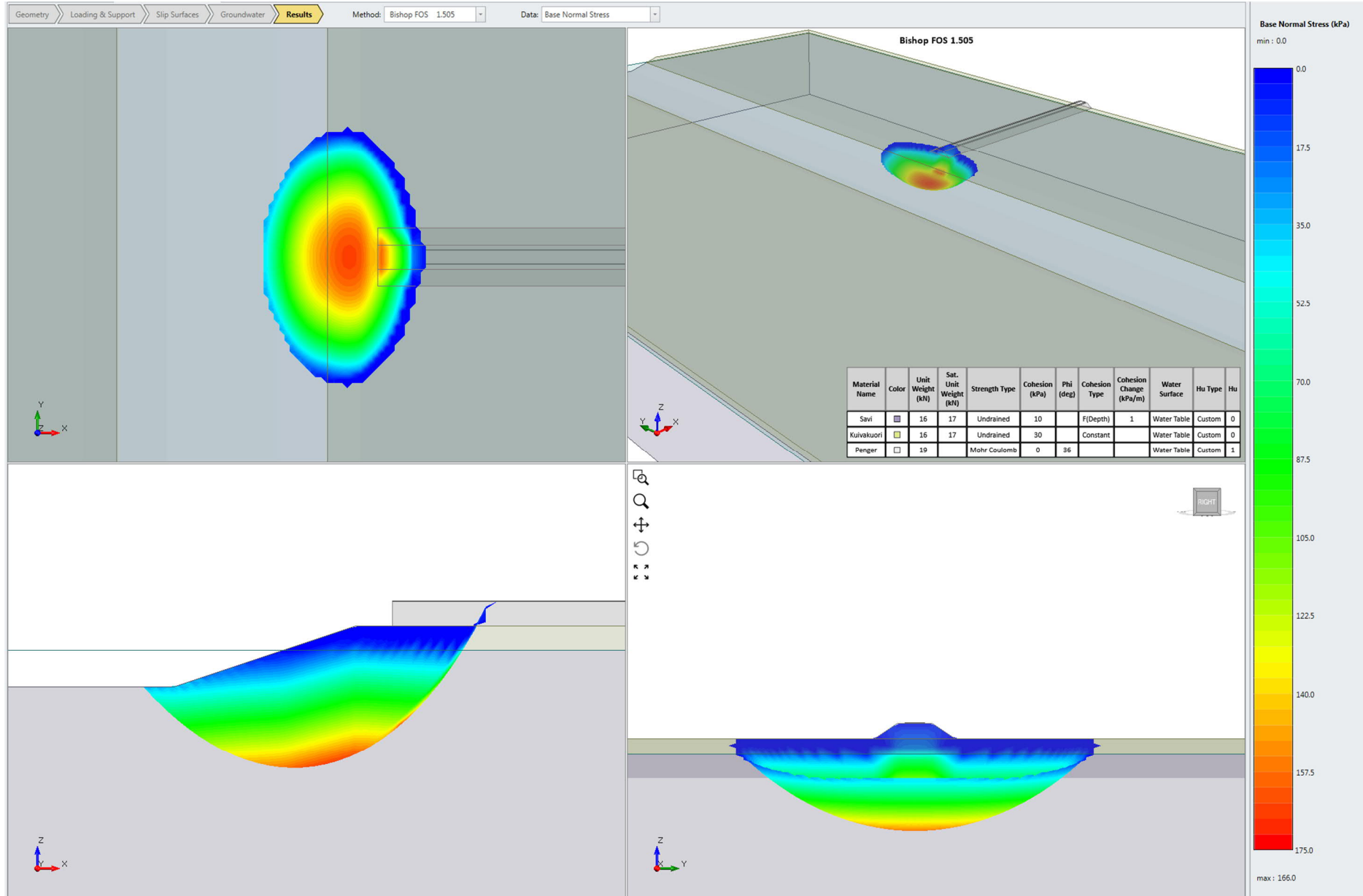
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



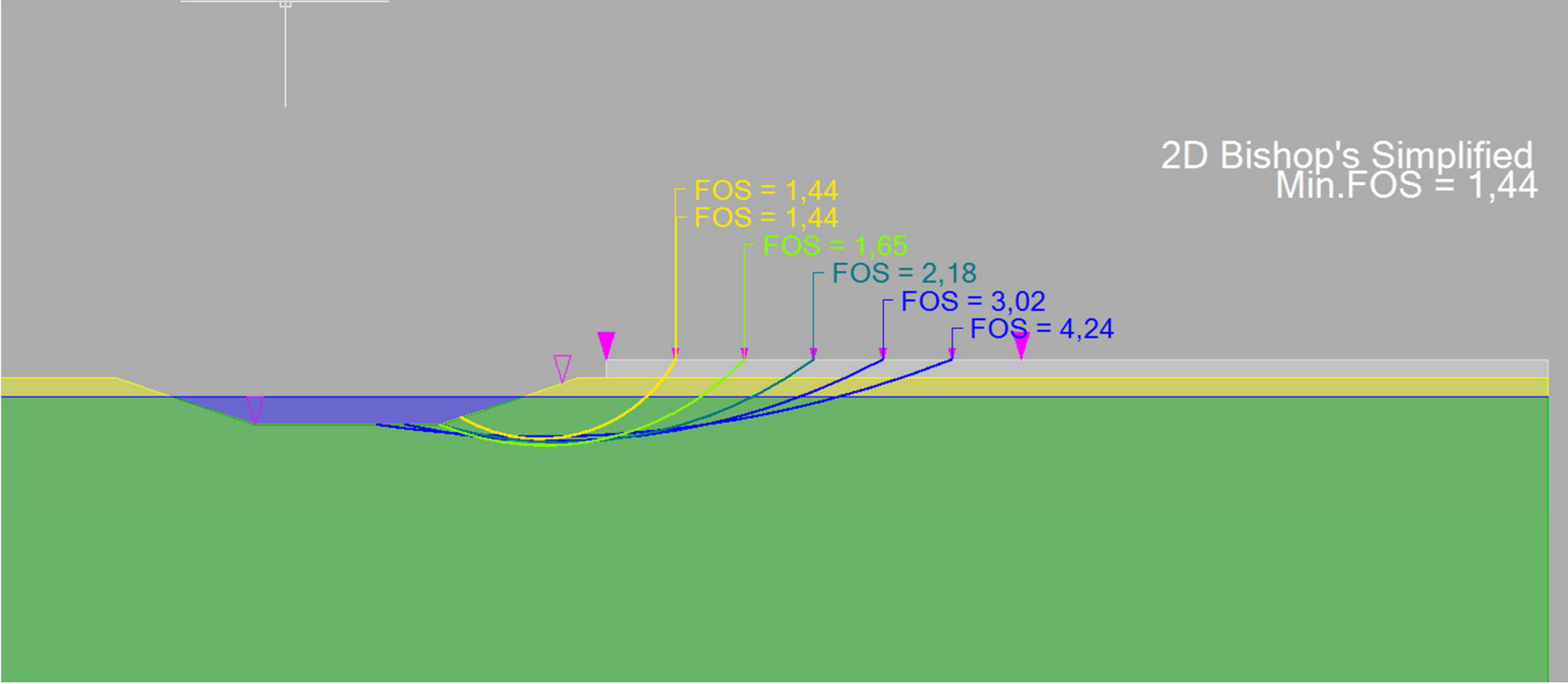
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

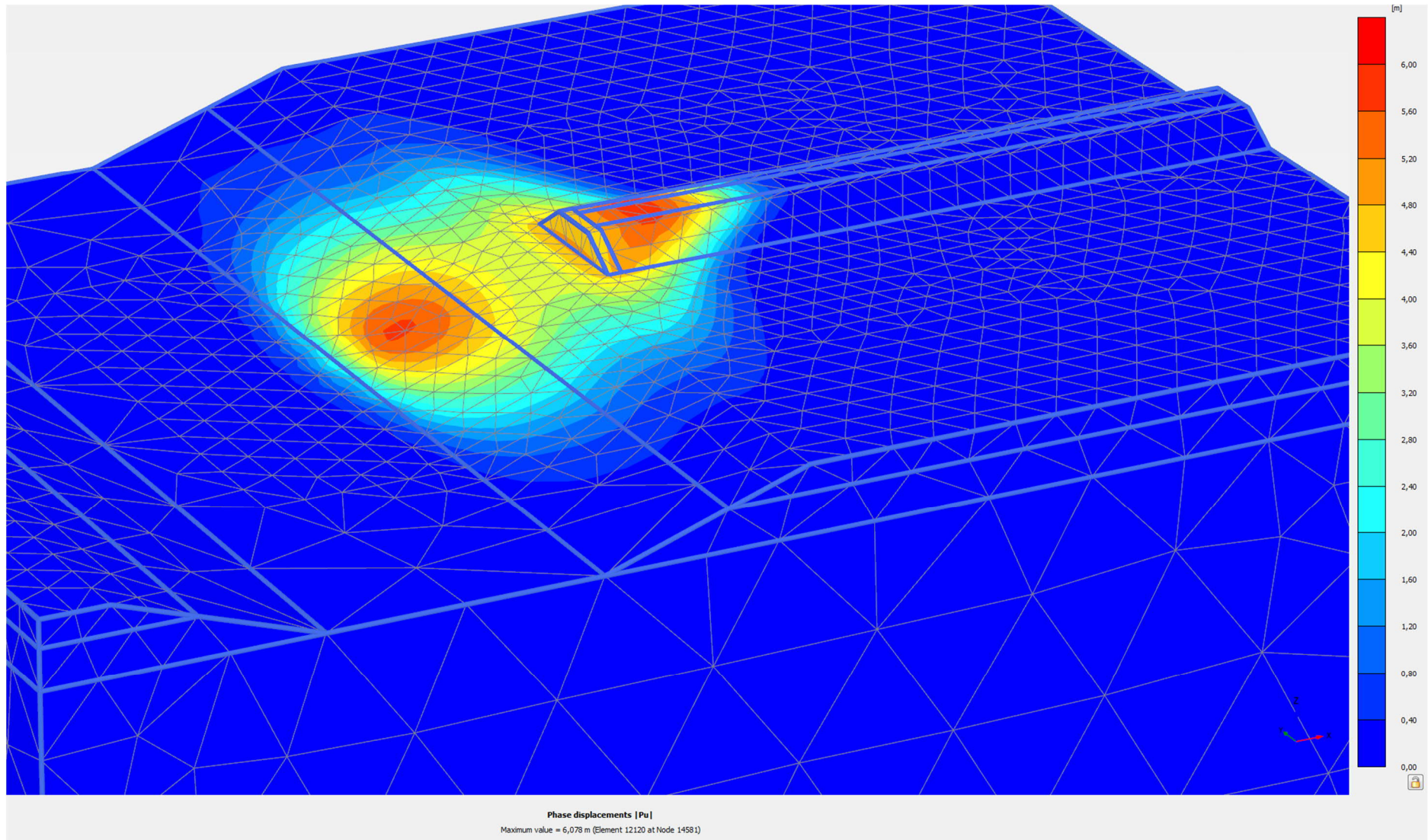


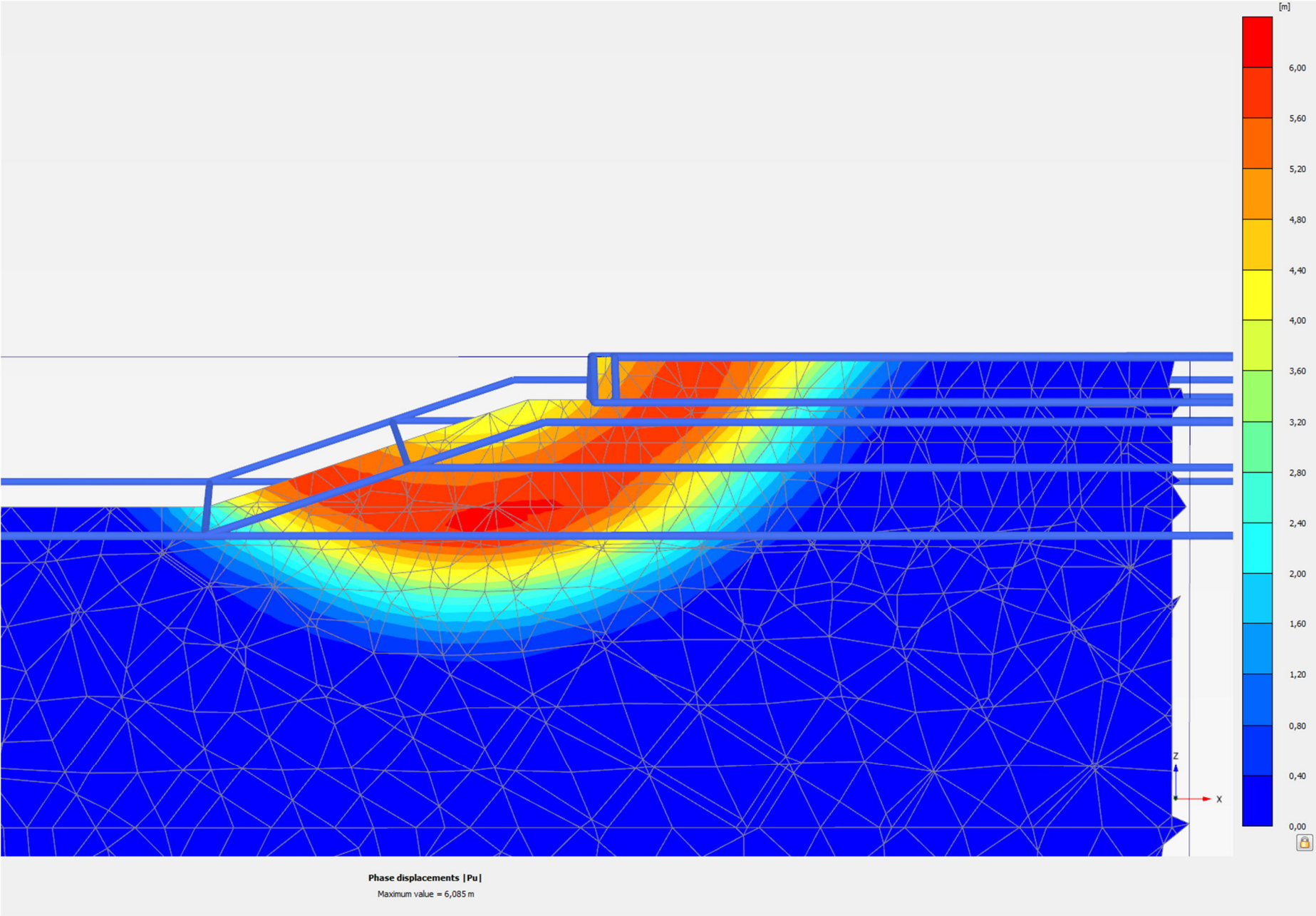
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.






Liite 6. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Yksiraiteinen ratapenger.

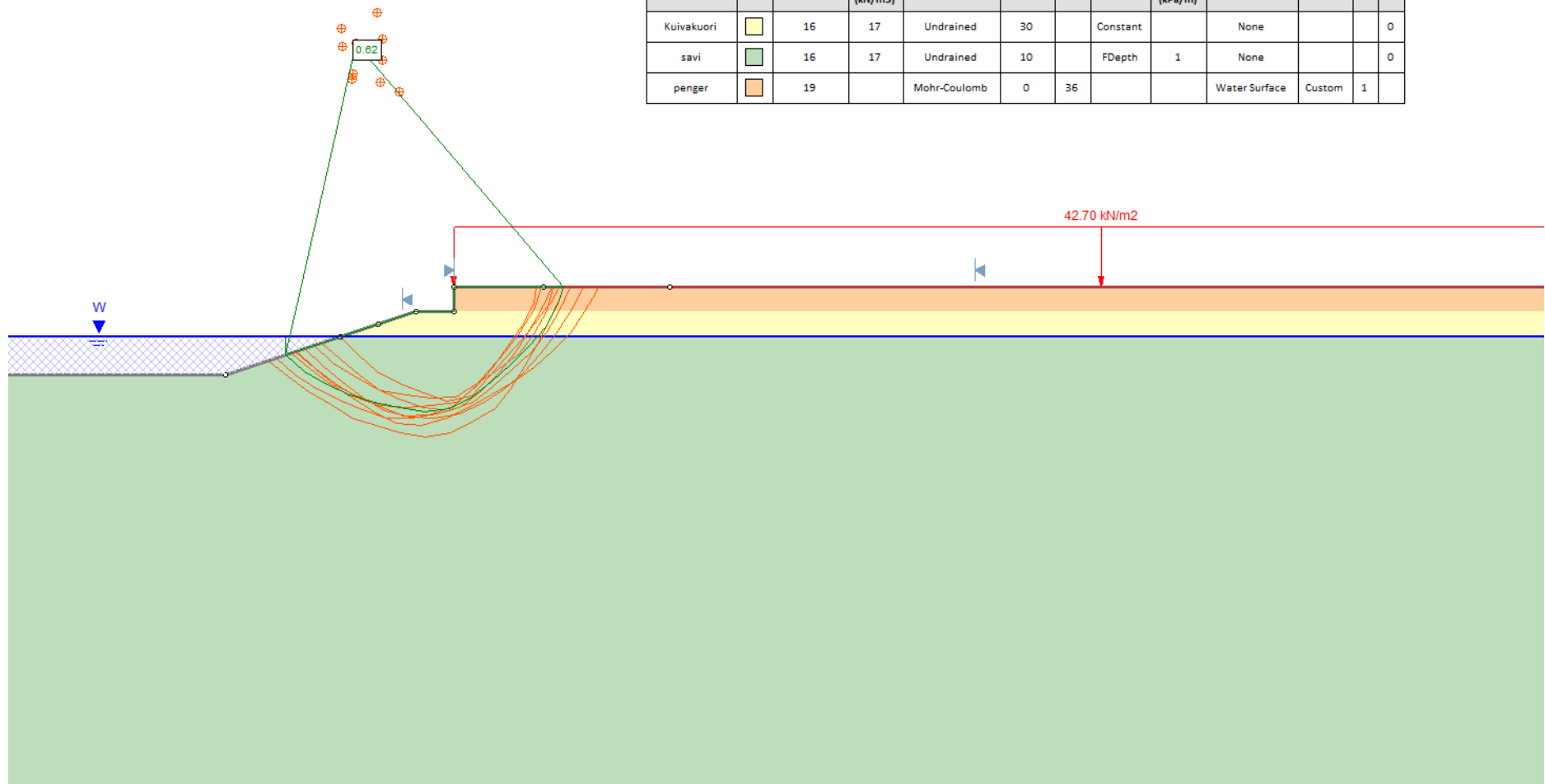




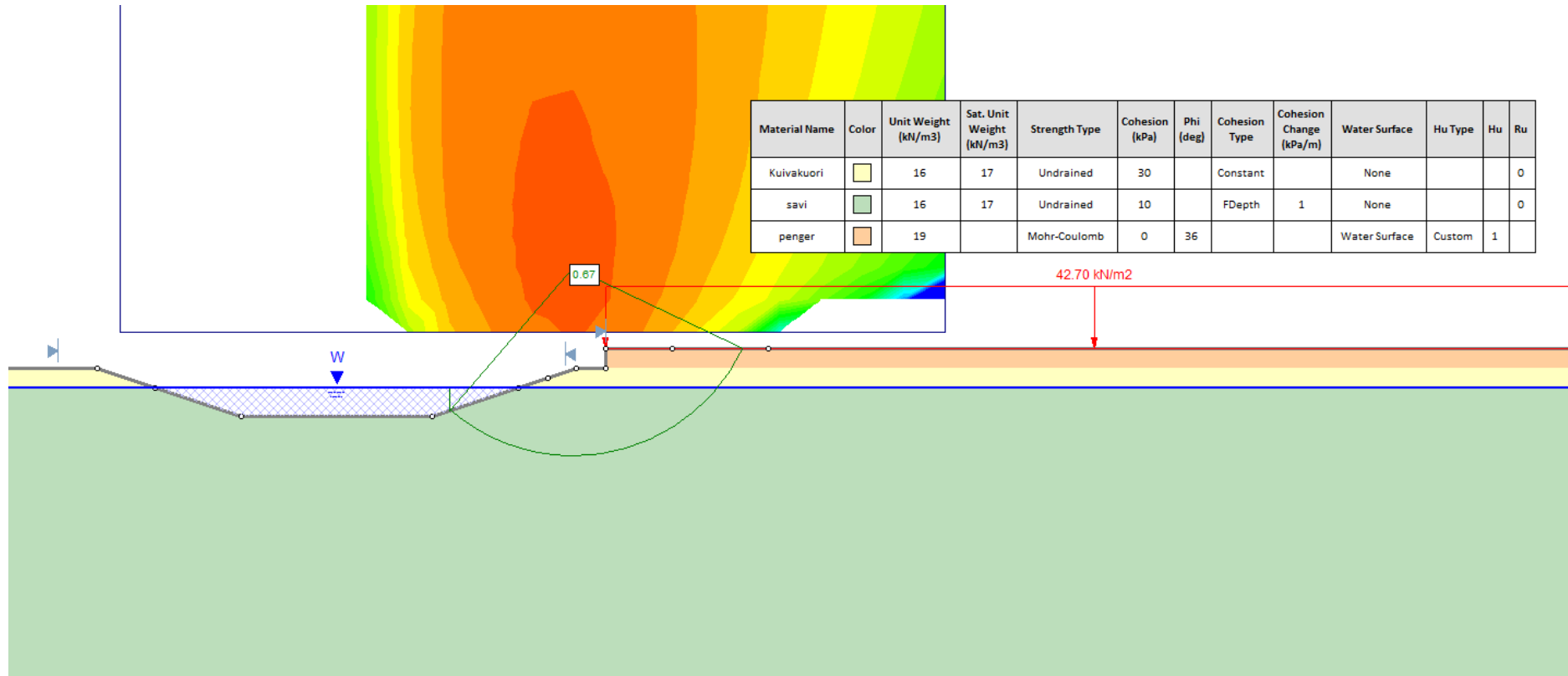


Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Yksiraiteinen ratapenger.

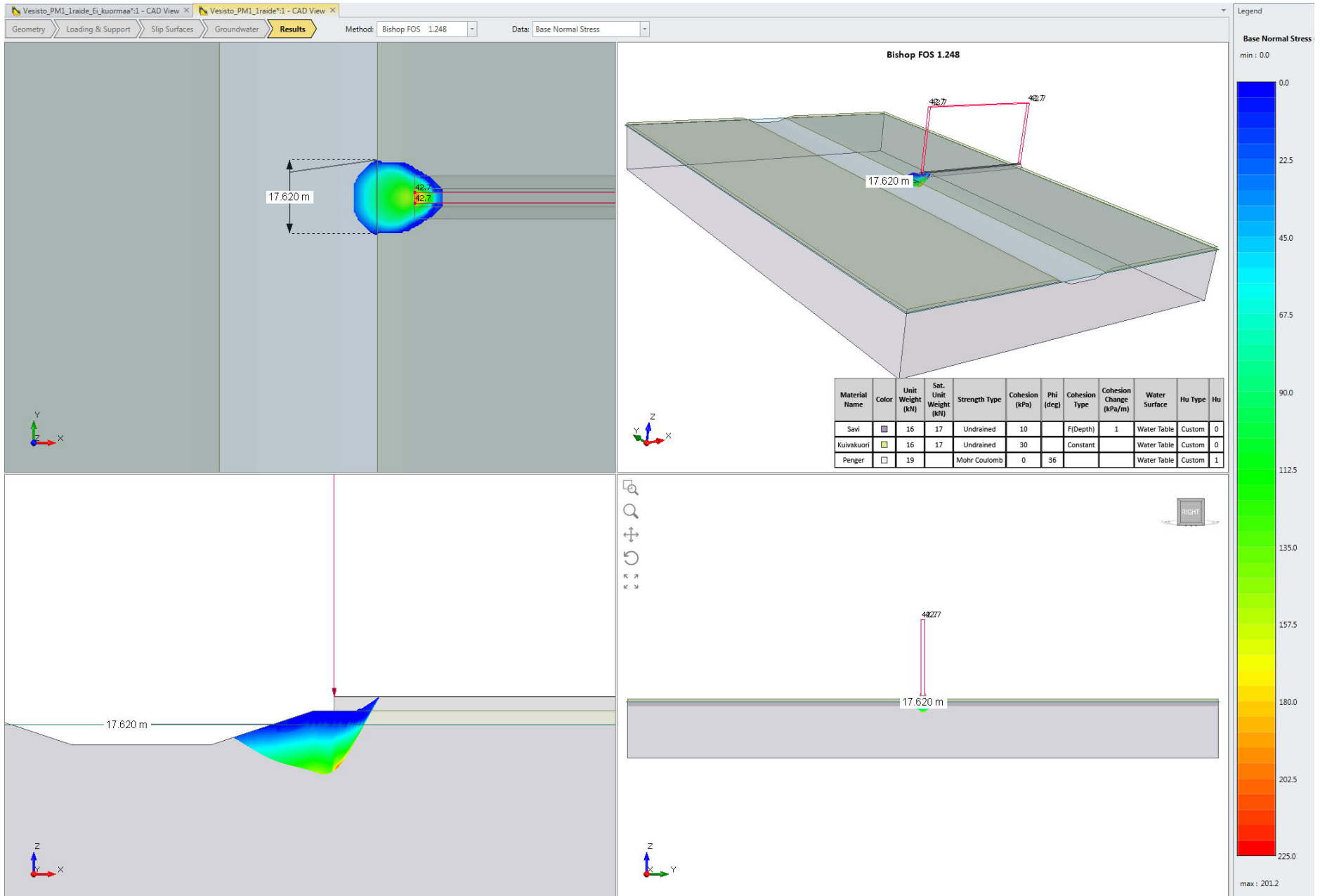
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
pengeri		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



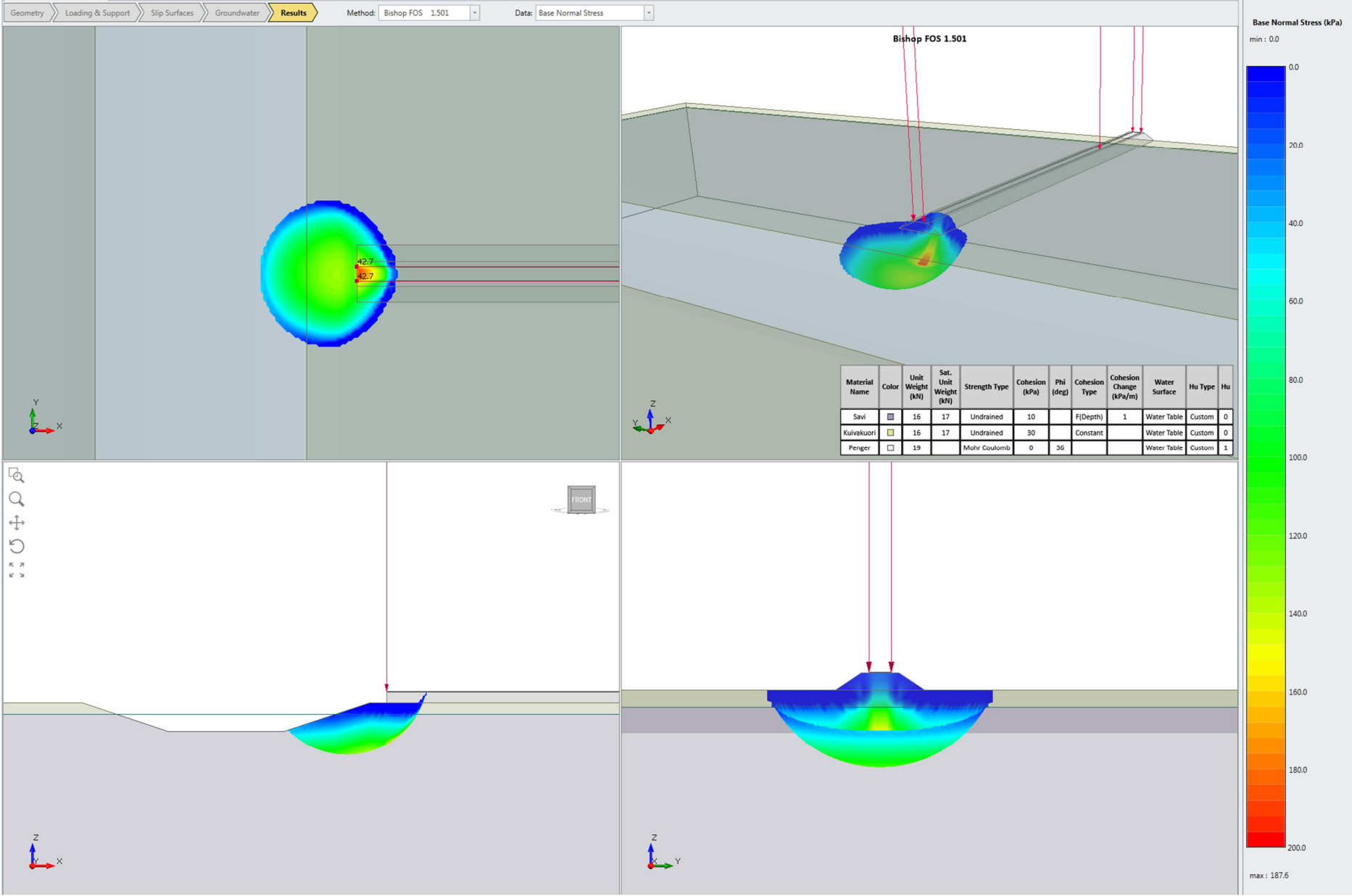
Liite 6. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Yksiraiteinen ratapenger.



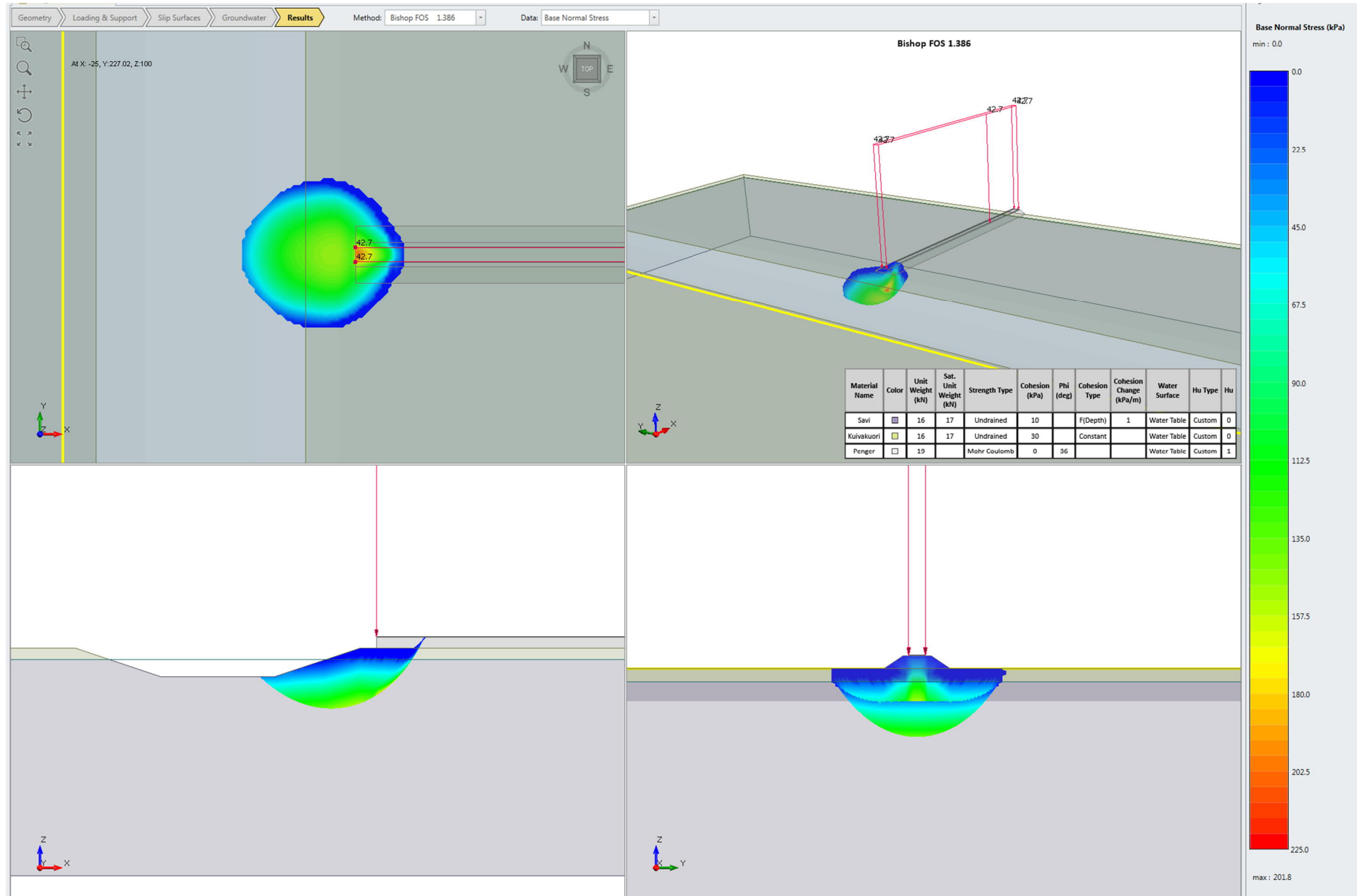
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



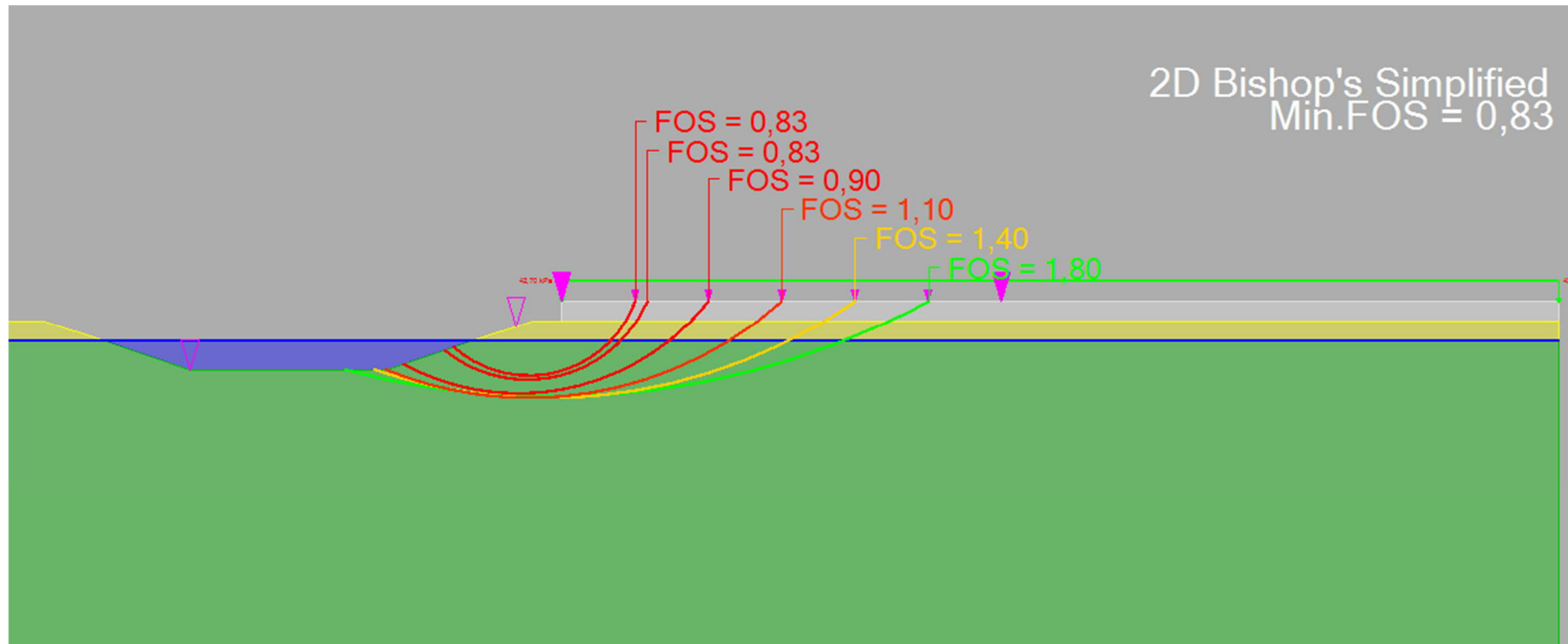
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



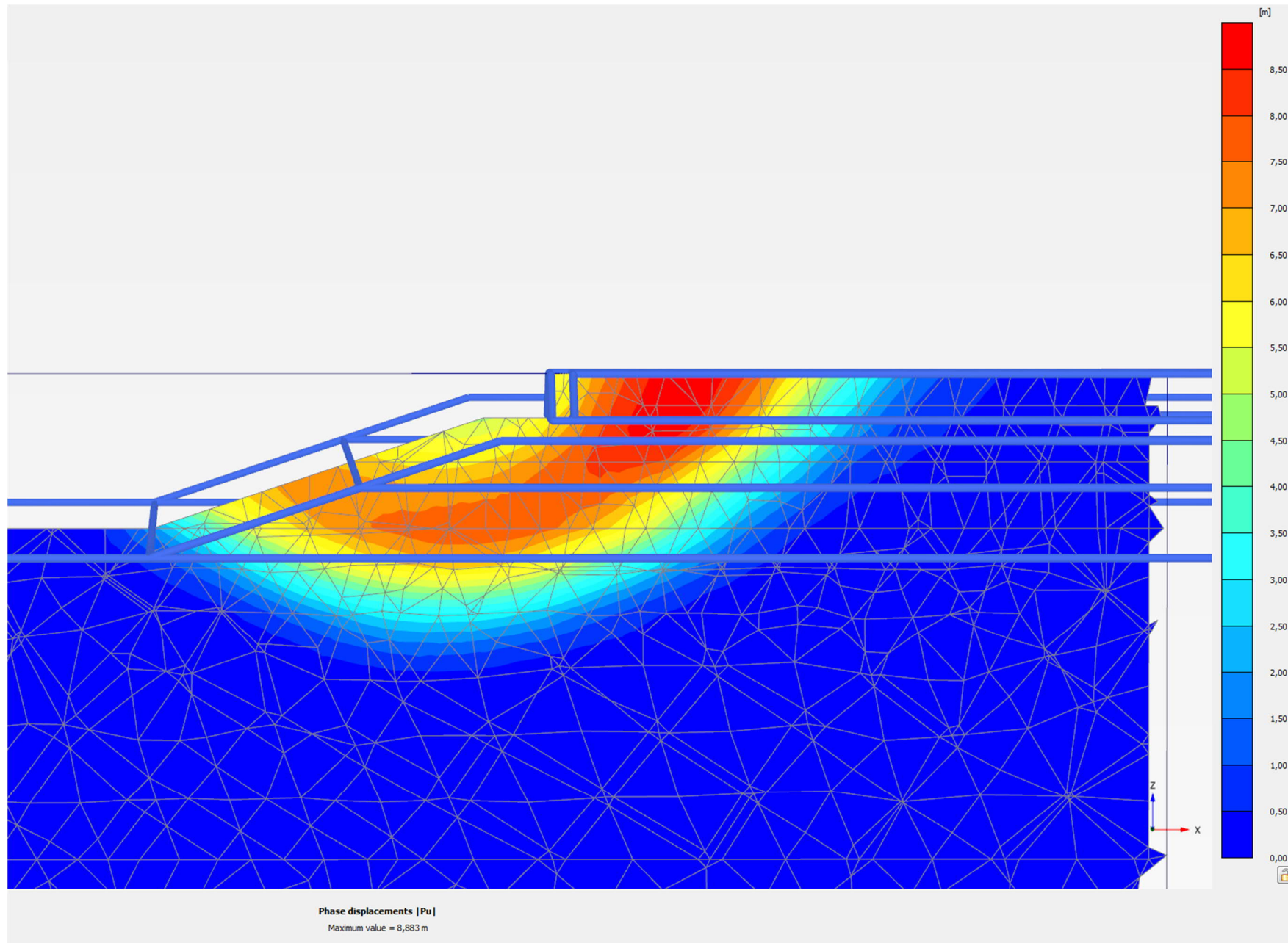
Liite 6. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

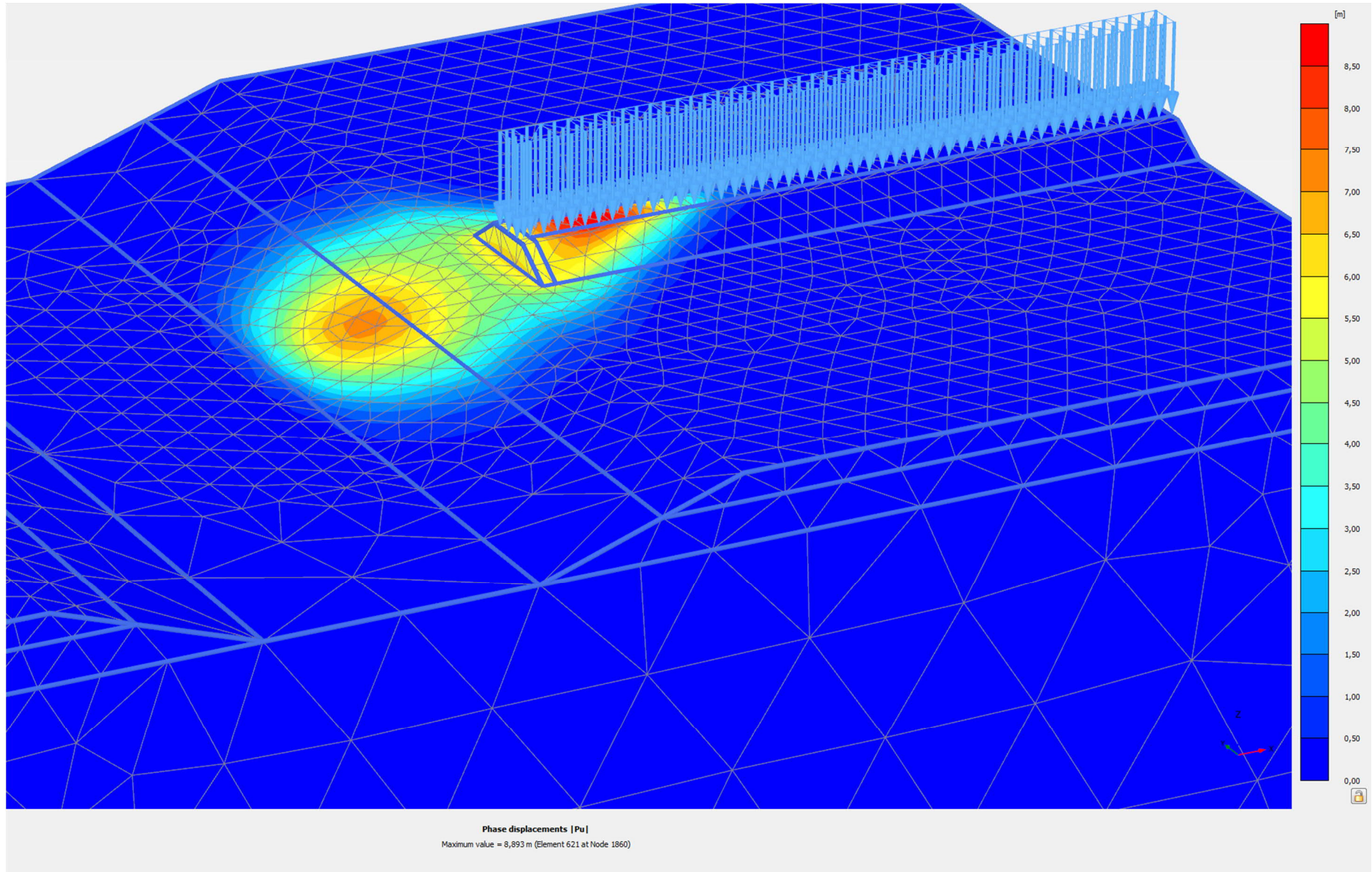


Liite 6. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

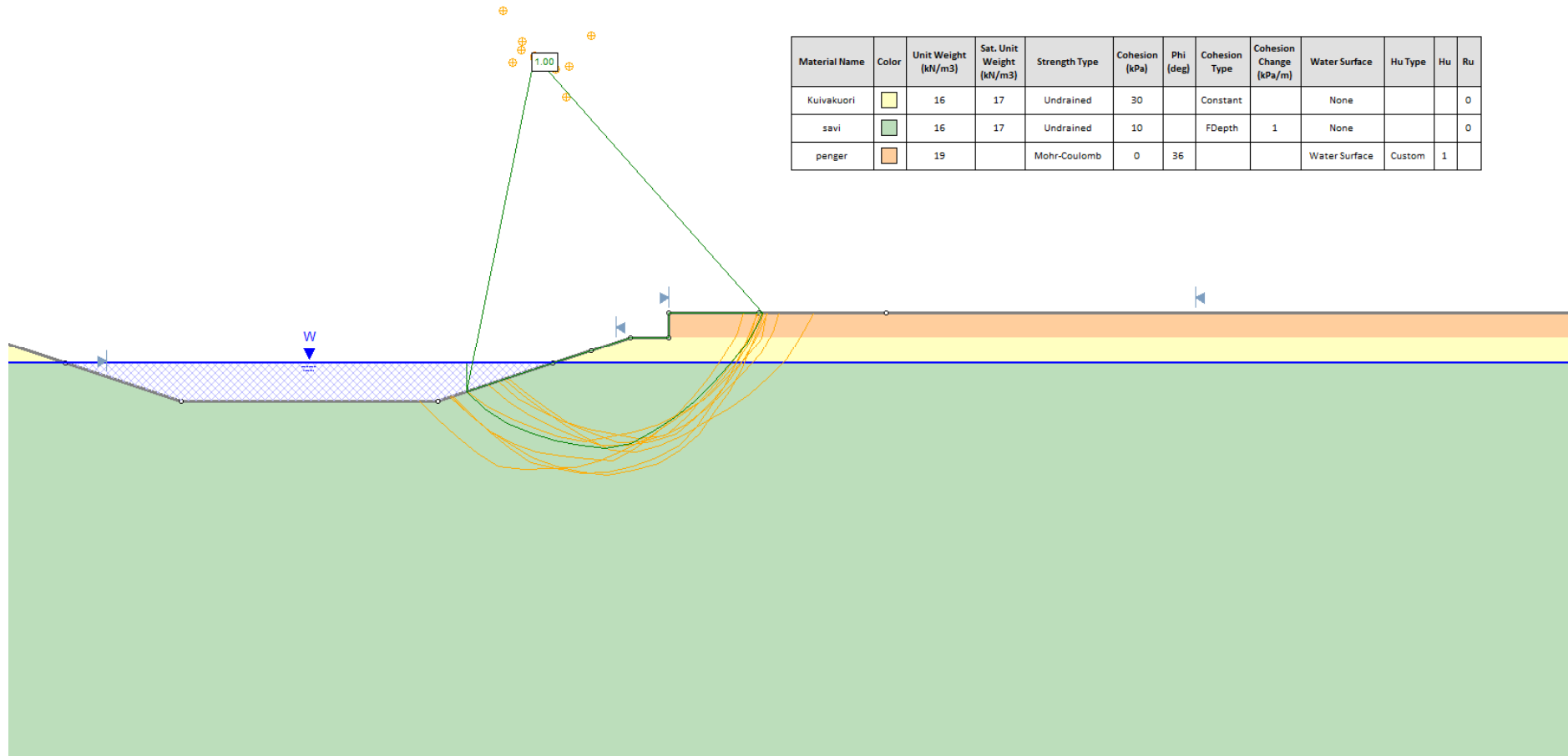


Liite 6. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Yksiraiteinen ratapenger.



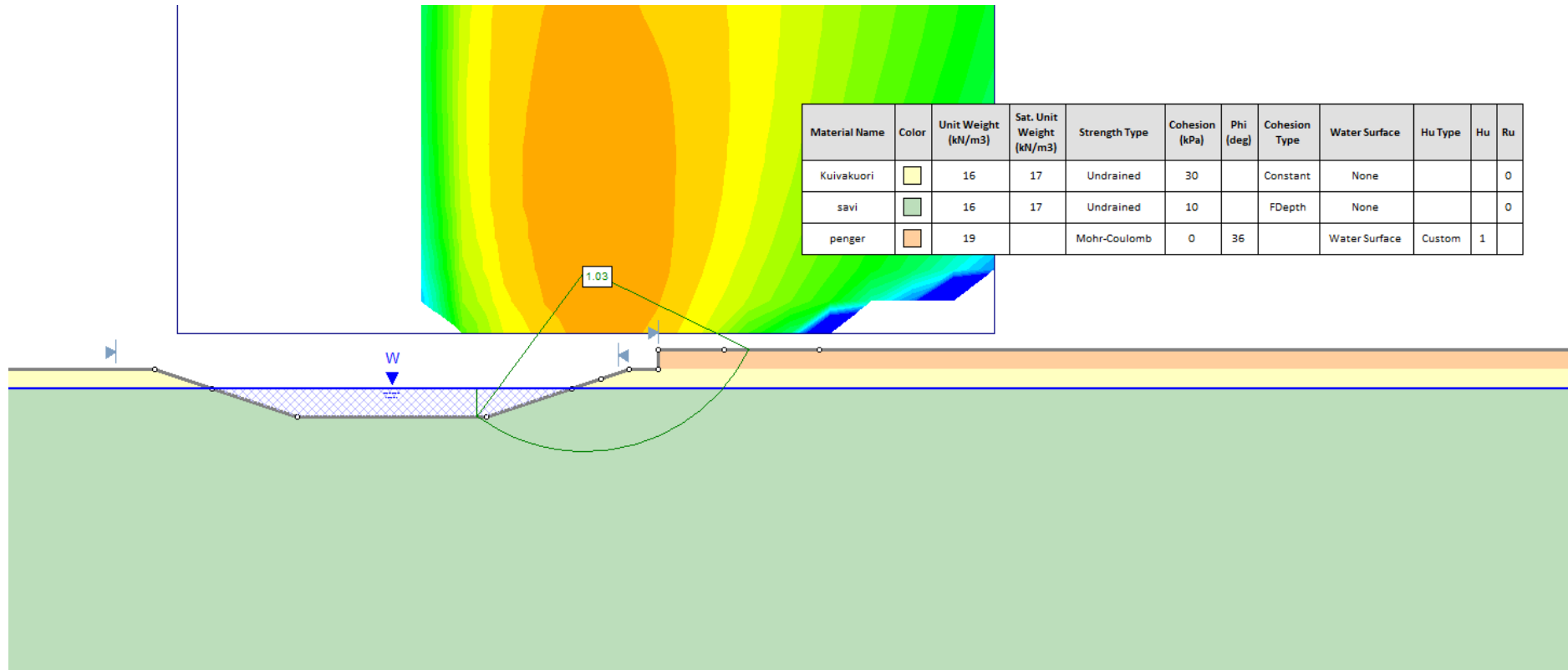


Liite 7. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

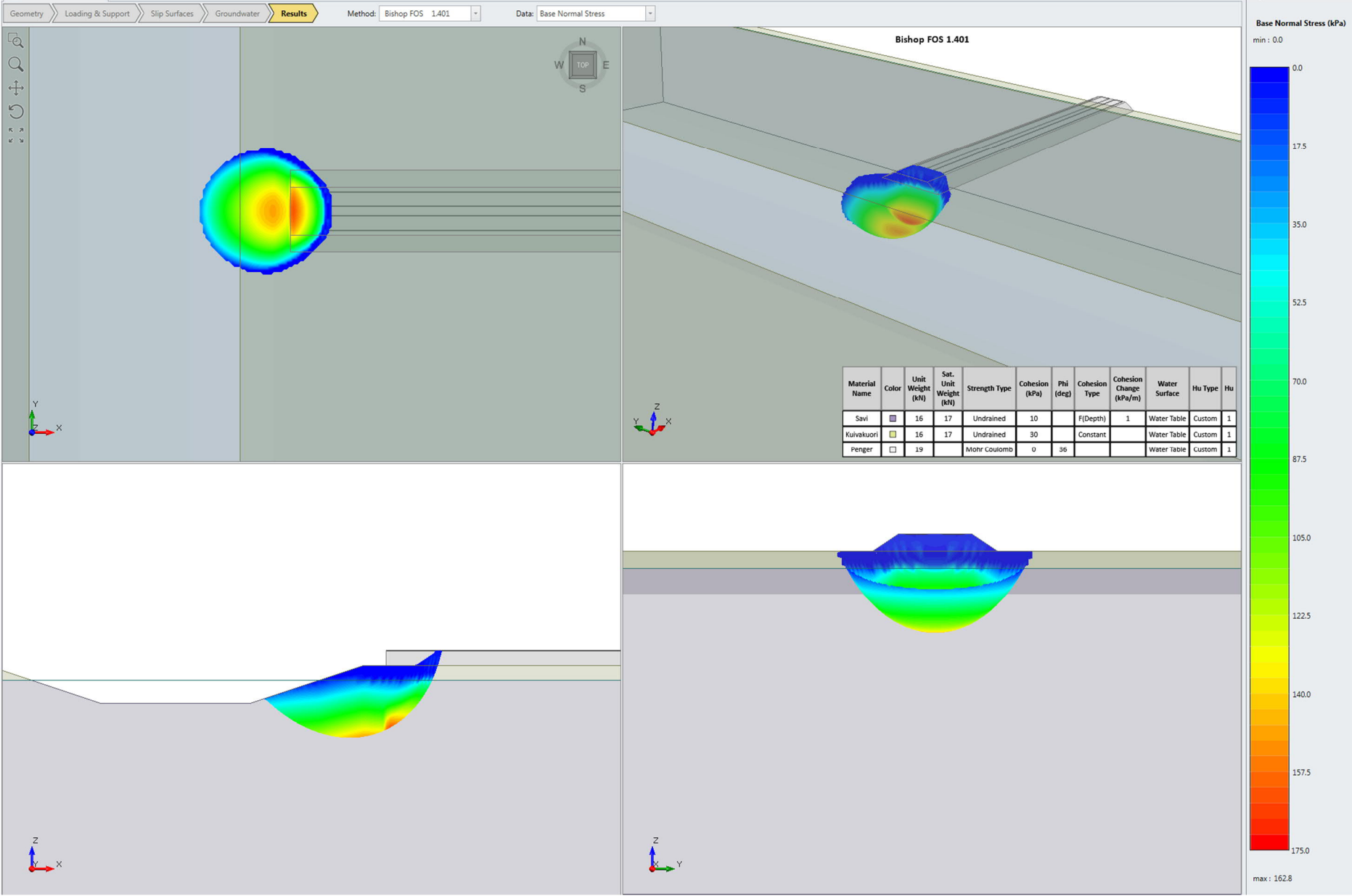


Liite 7.

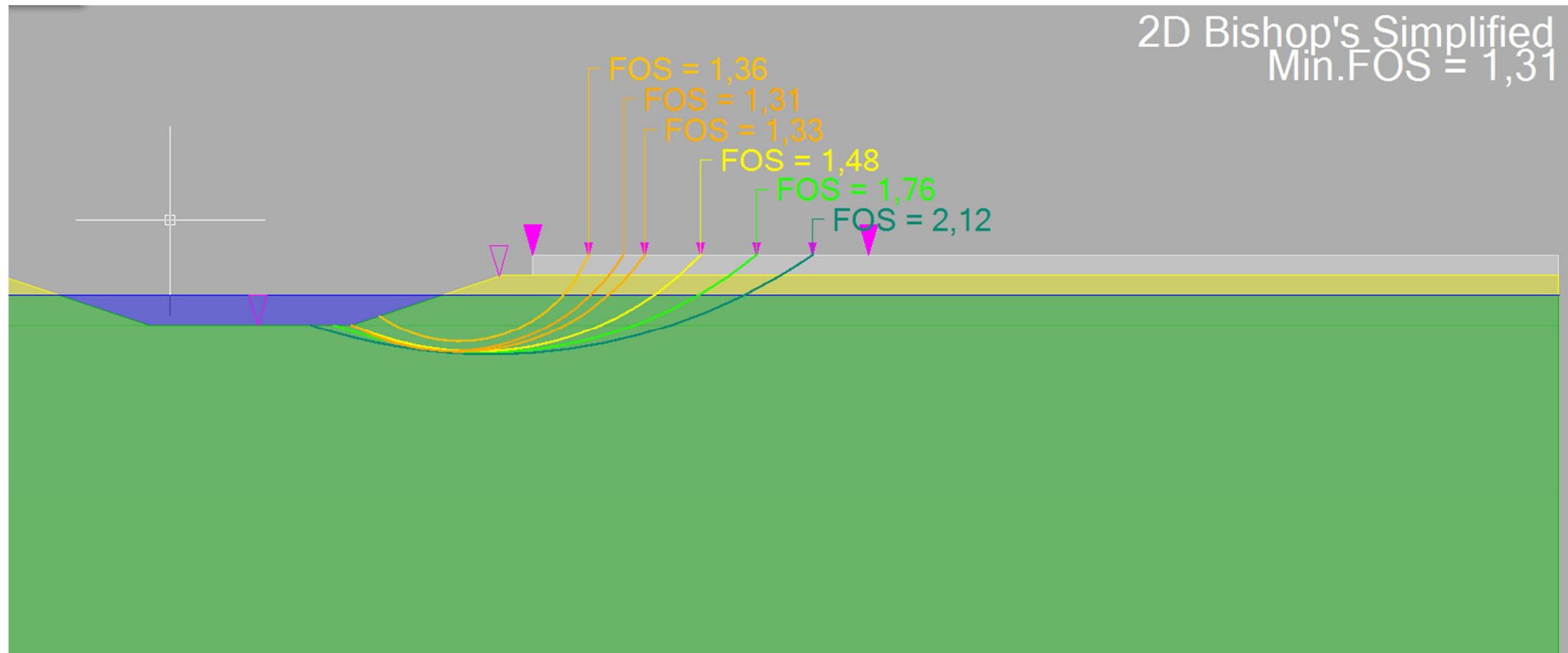
Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.






Liite 7. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

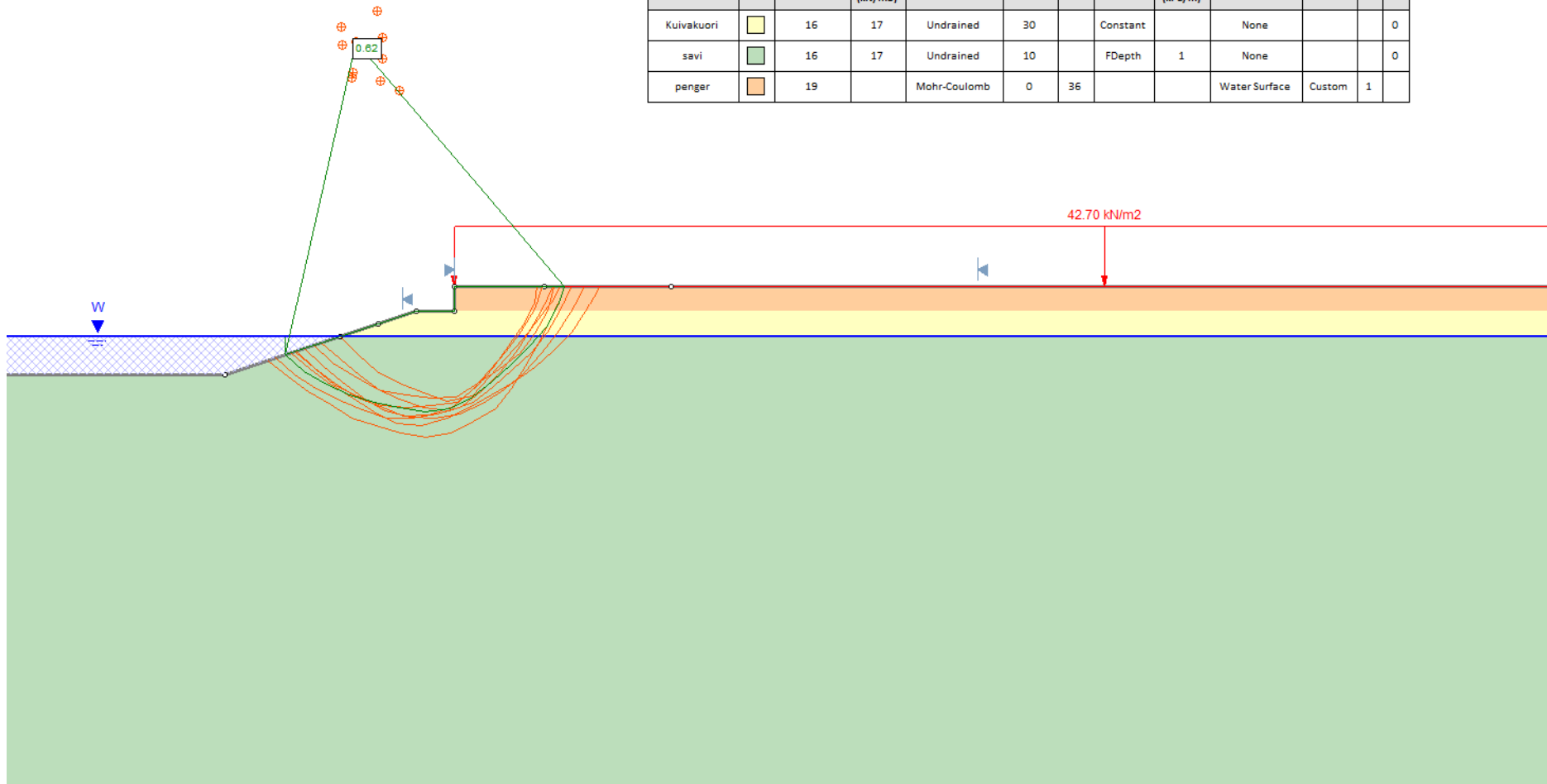


Liite 7. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.



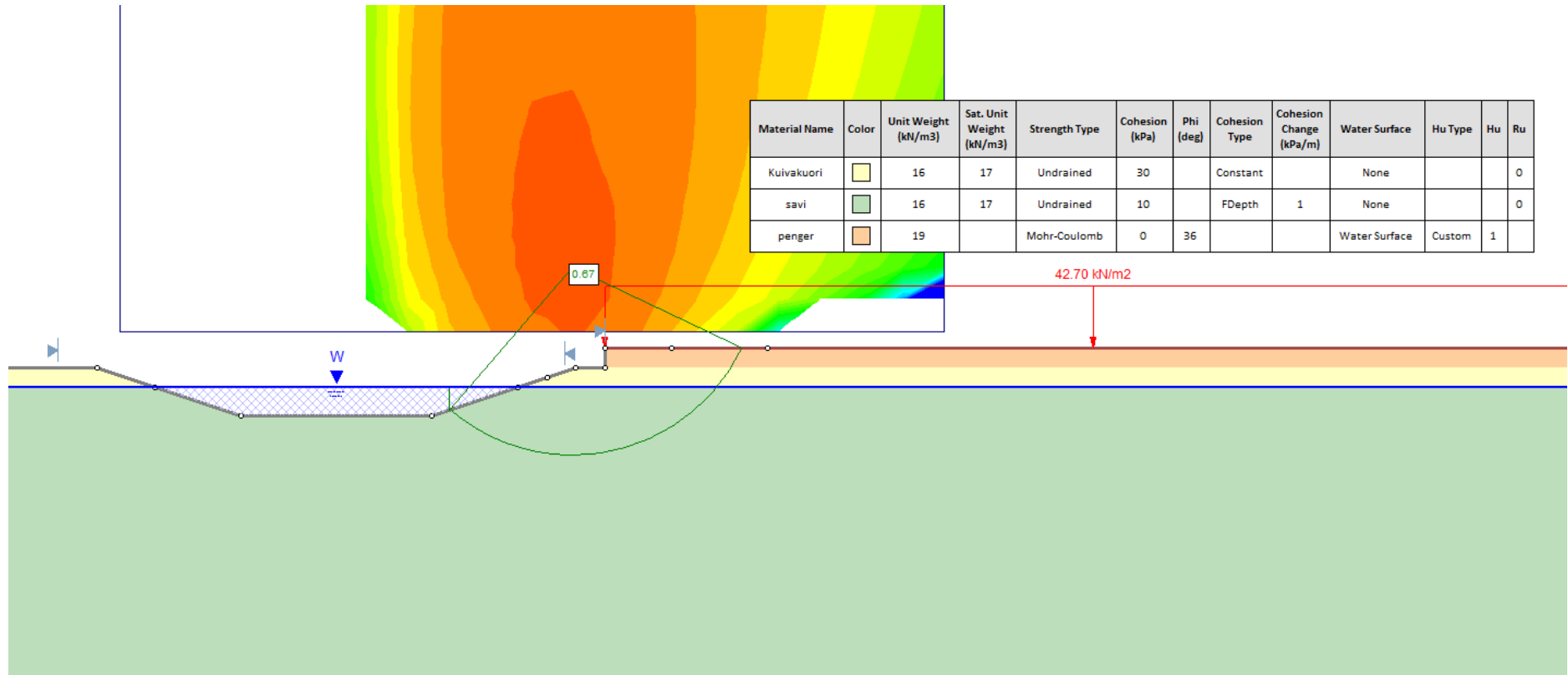
Liite 7. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
pengeri		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	

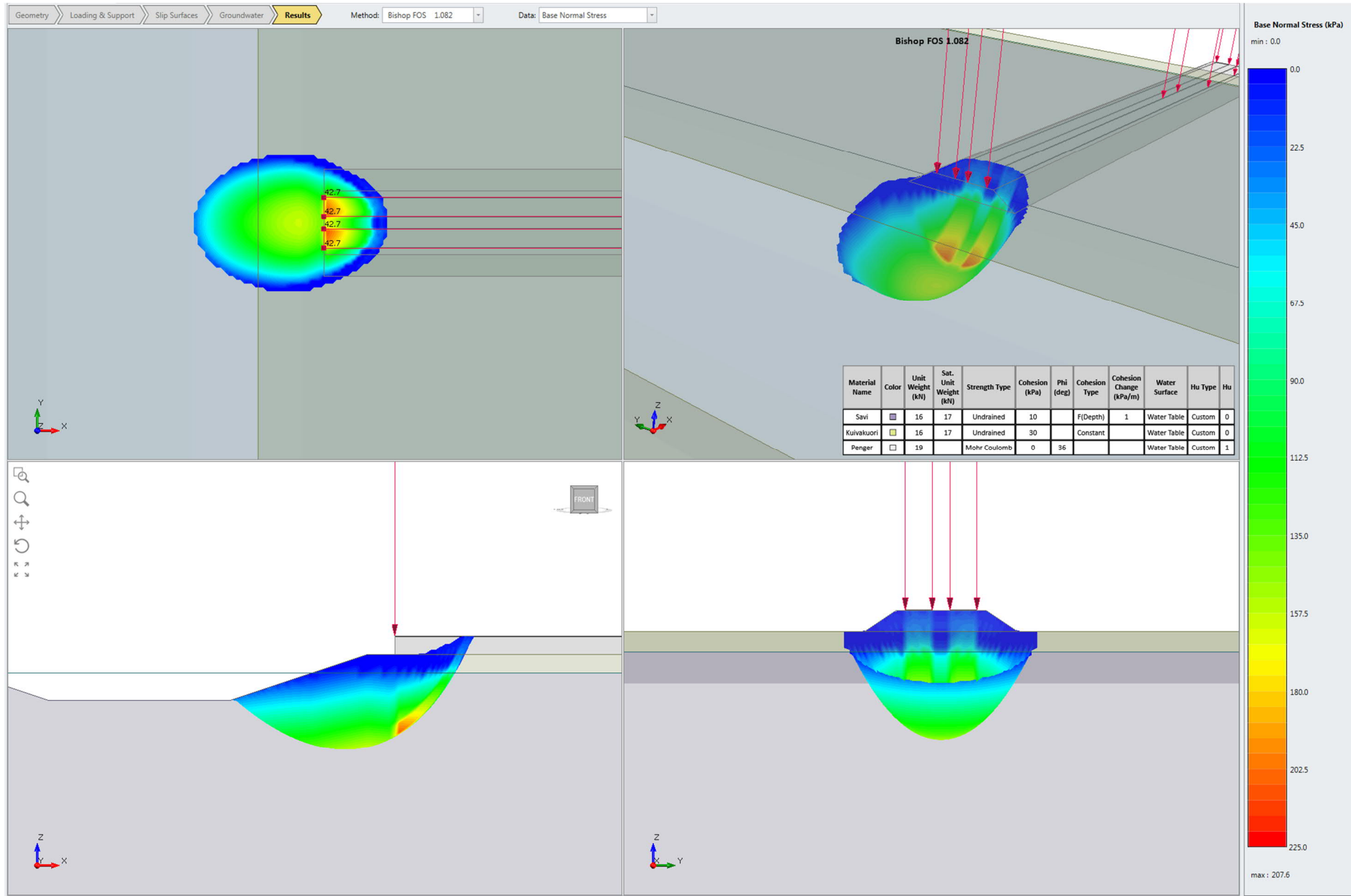


Liite 7.

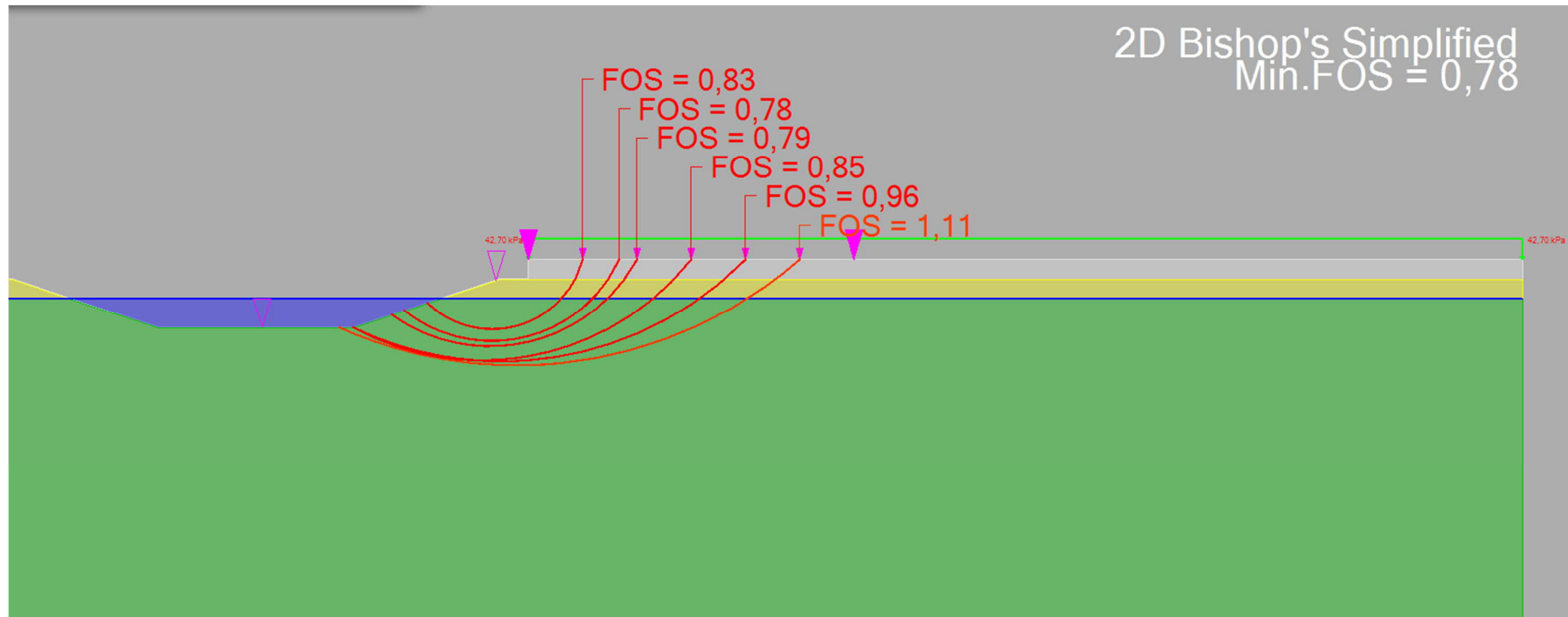
Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.



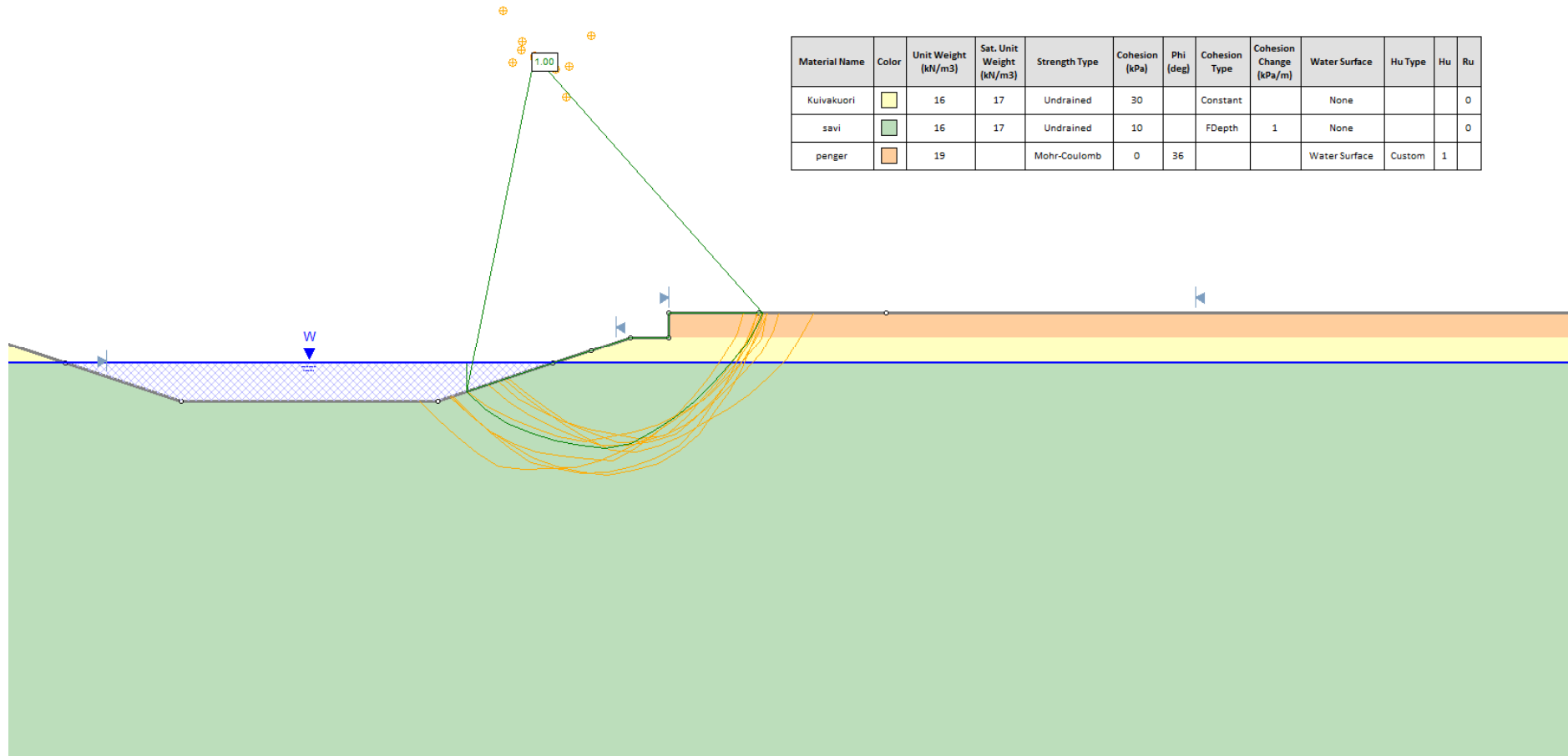
Liite 7. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.



Liite 7. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

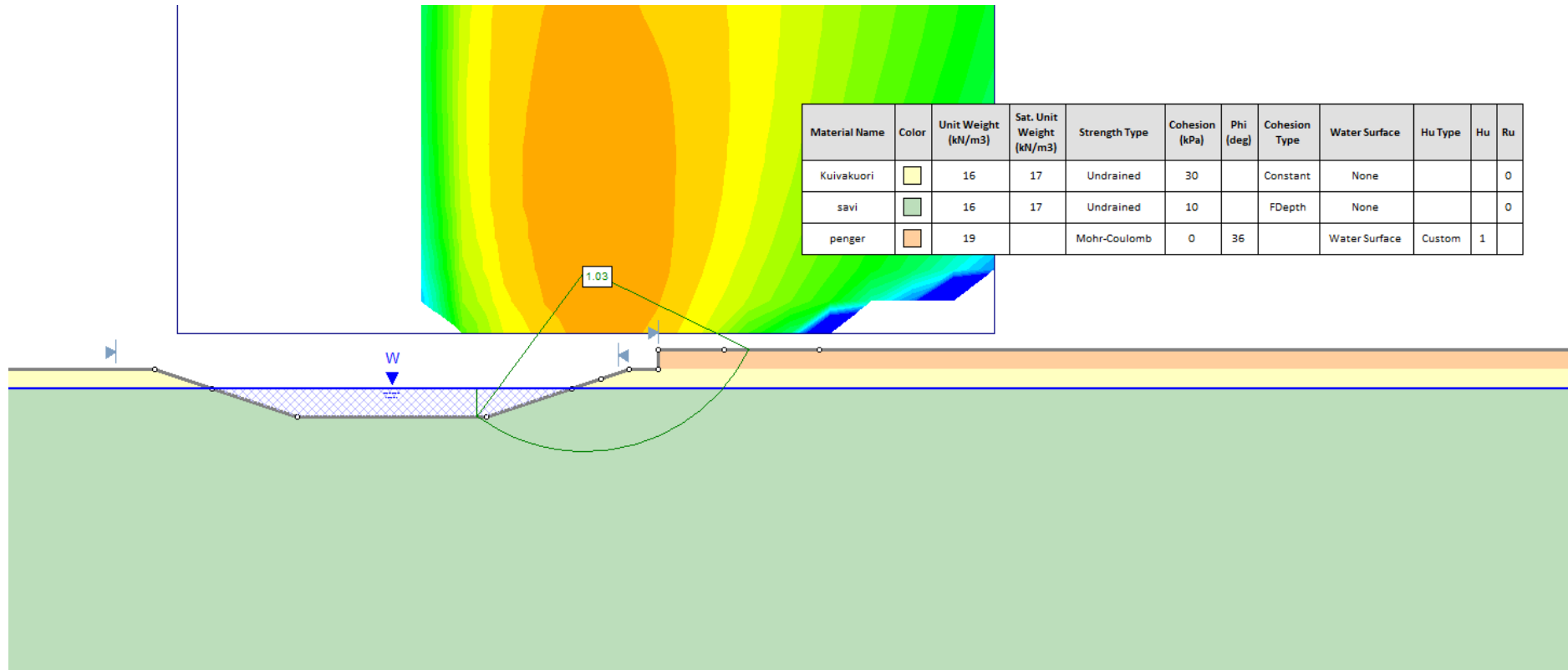


Liite 8. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyppi 1. Moottoritiepenger.

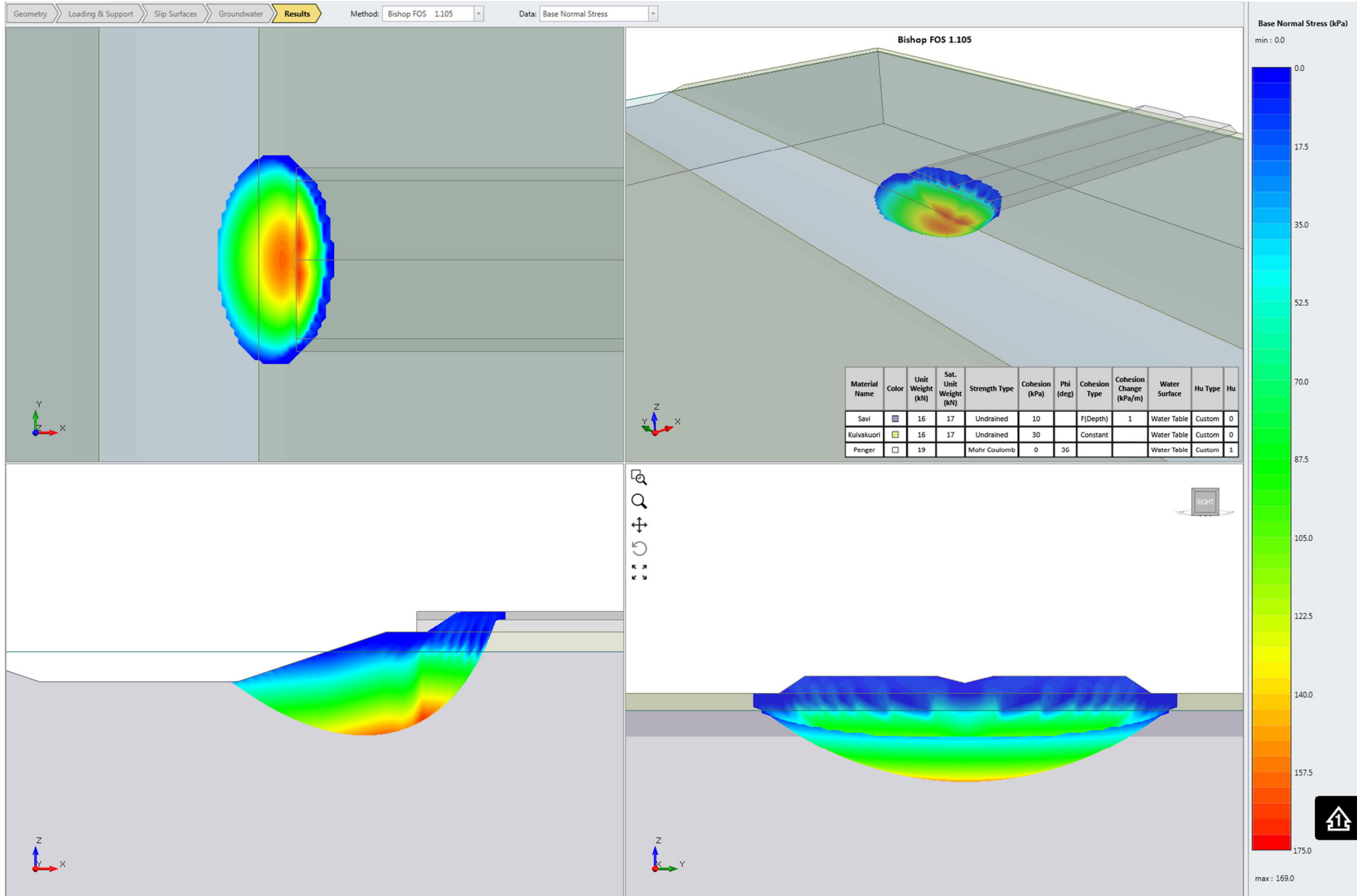


Liite 8.

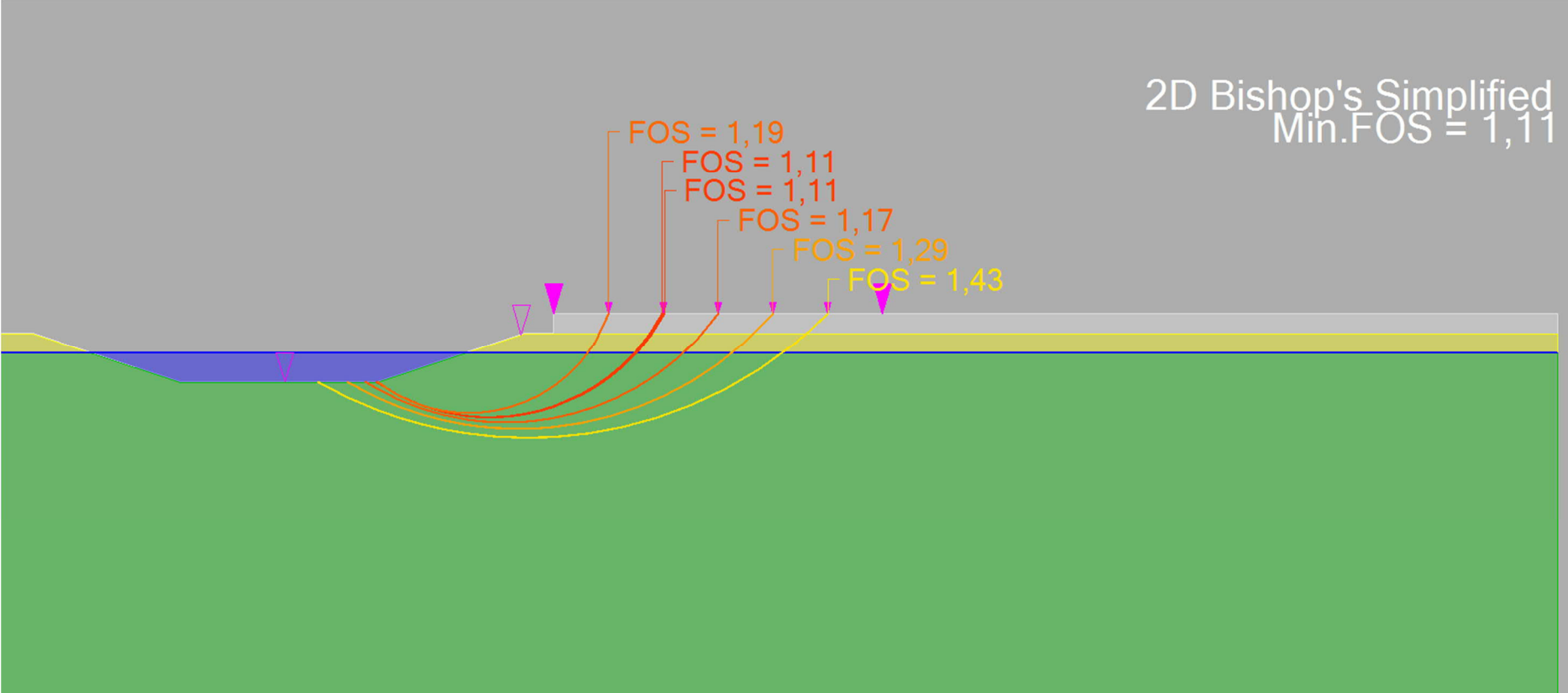
Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepengeri.



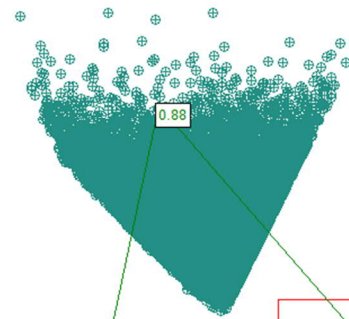
Liite 8. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepenger.






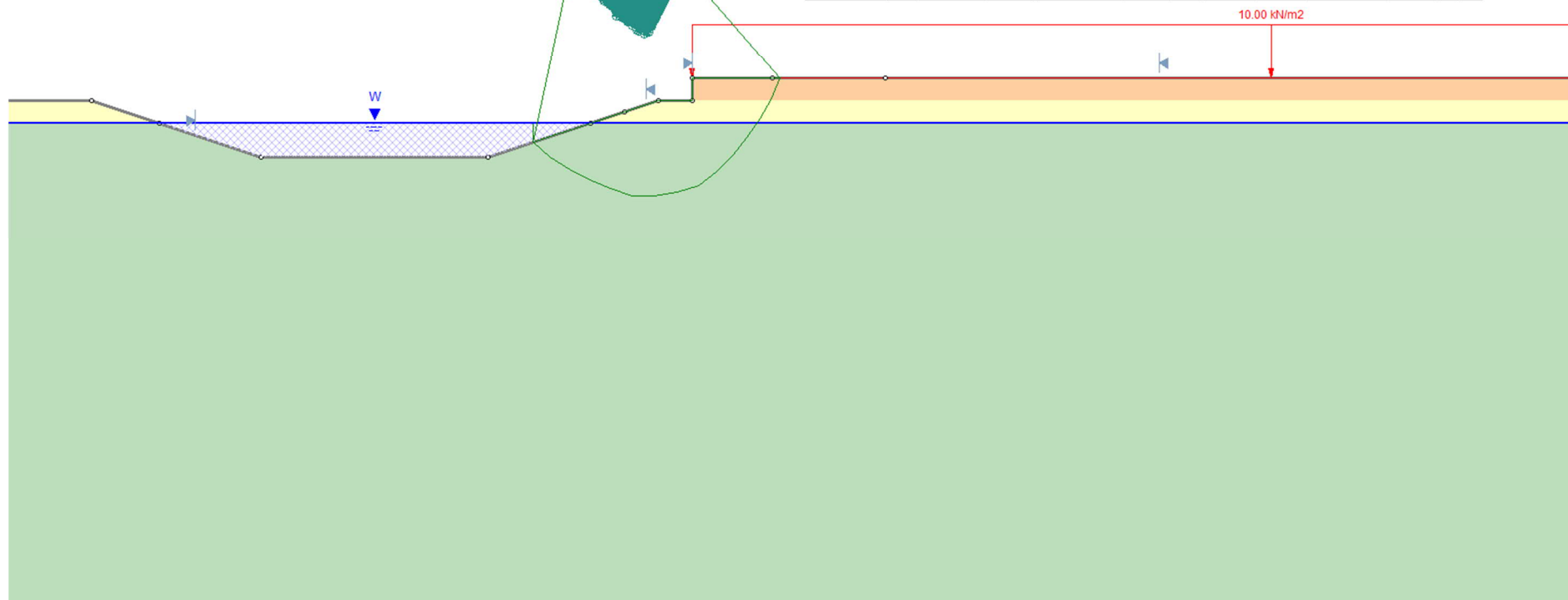
Liite 8. Stabiilitetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Moottoritiepenget.



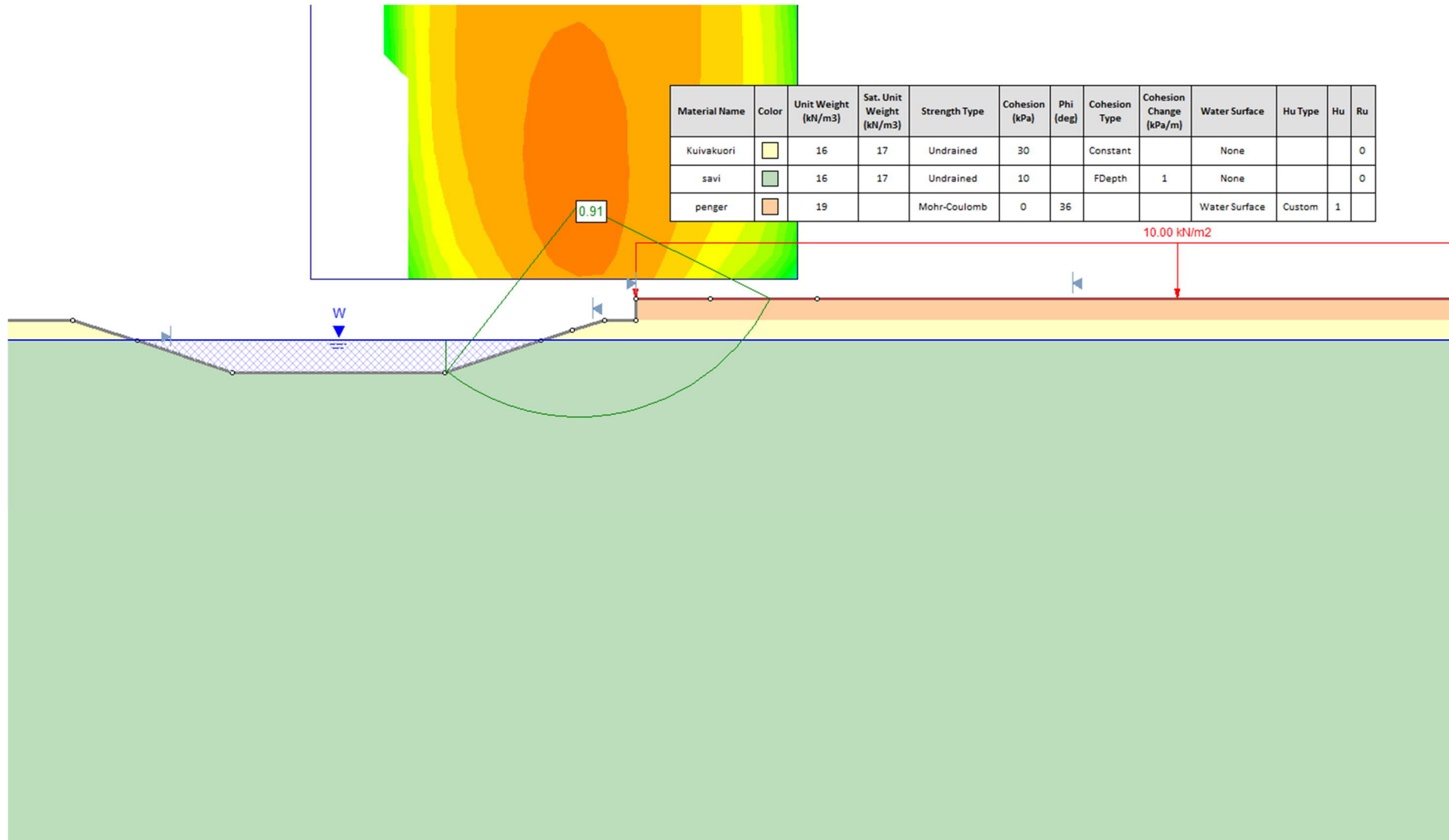
Liite 8. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Moottoritiepenget.



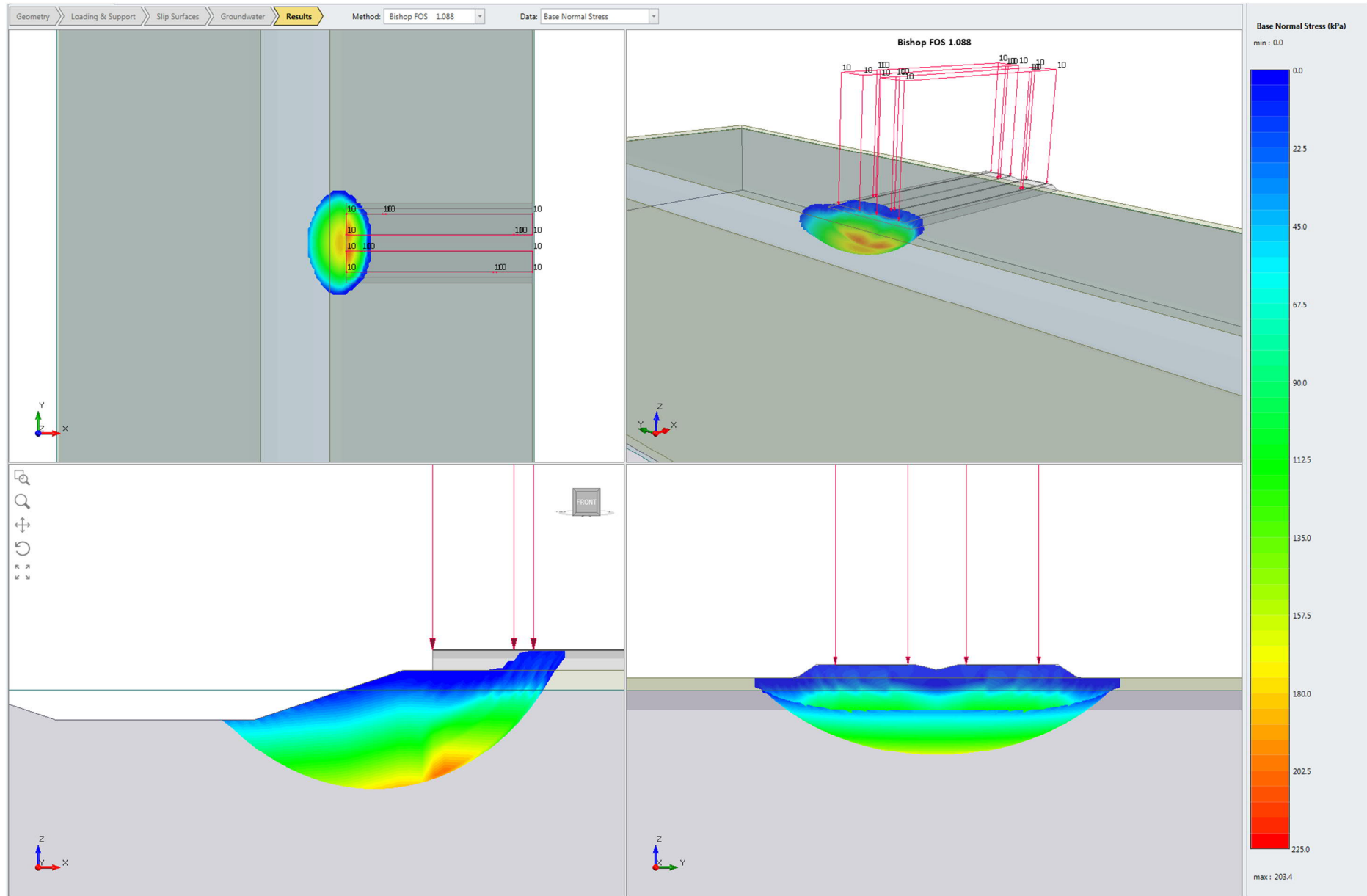
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



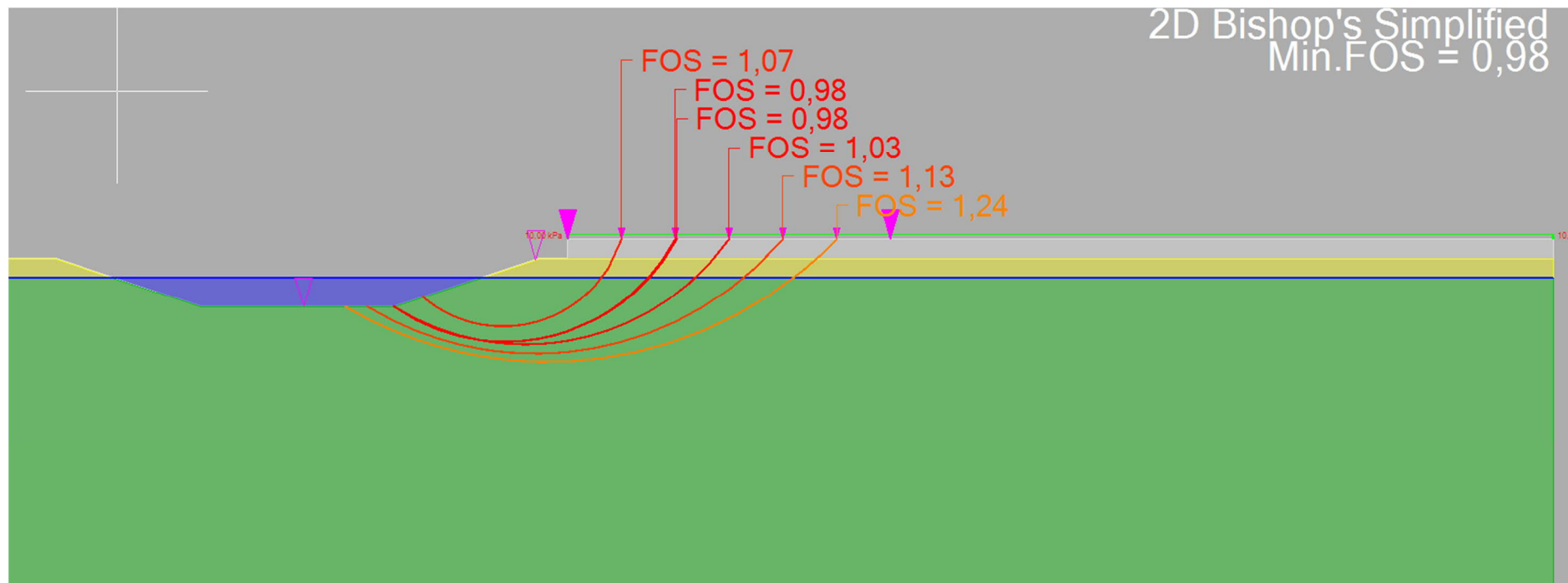
Liite 8. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Moottoritiepenget.



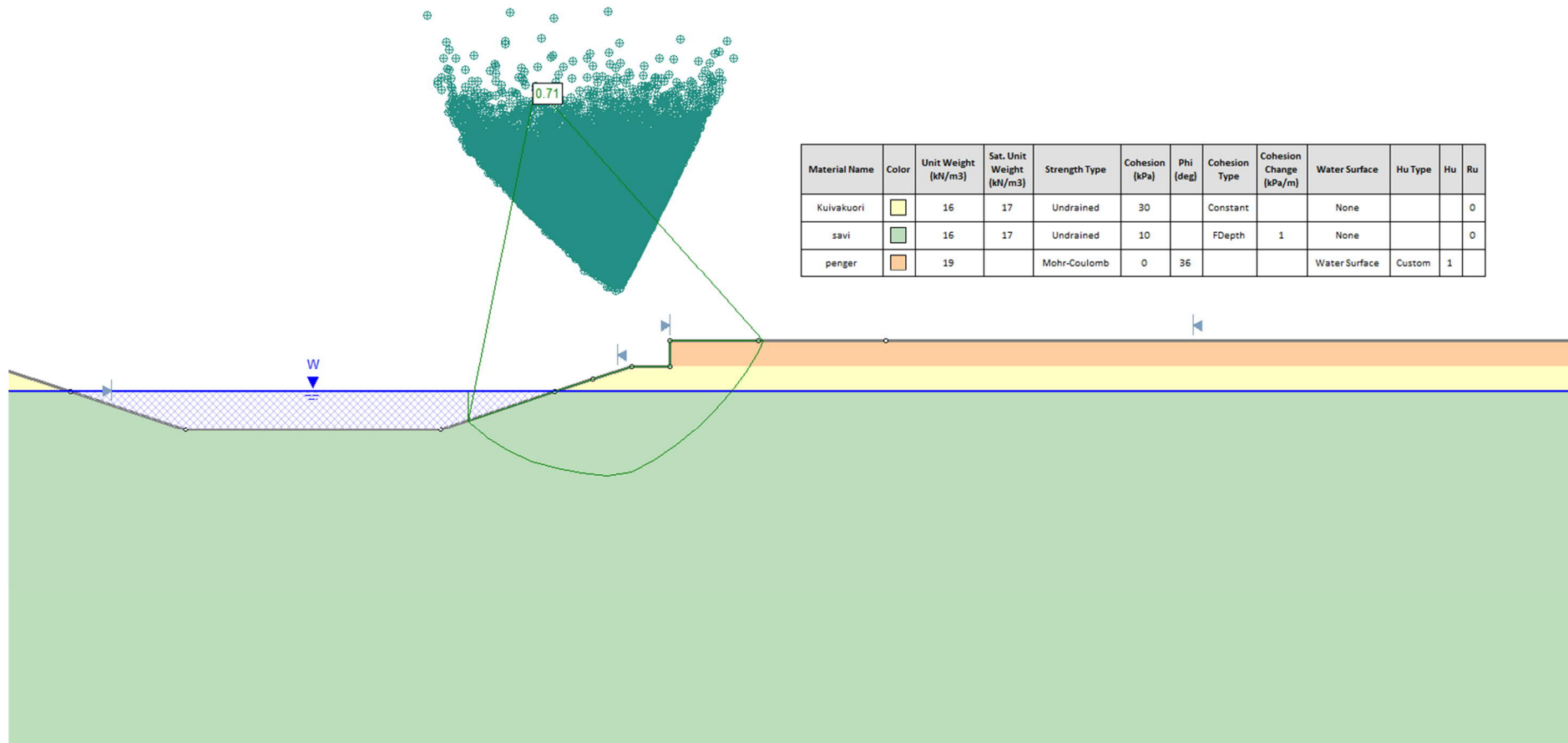
Liite 8. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepenger.

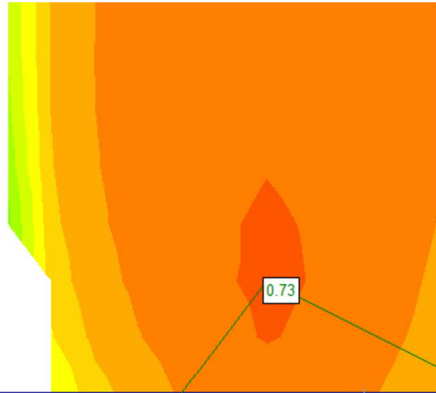


Liite 8. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 1. Moottoritiepenger.

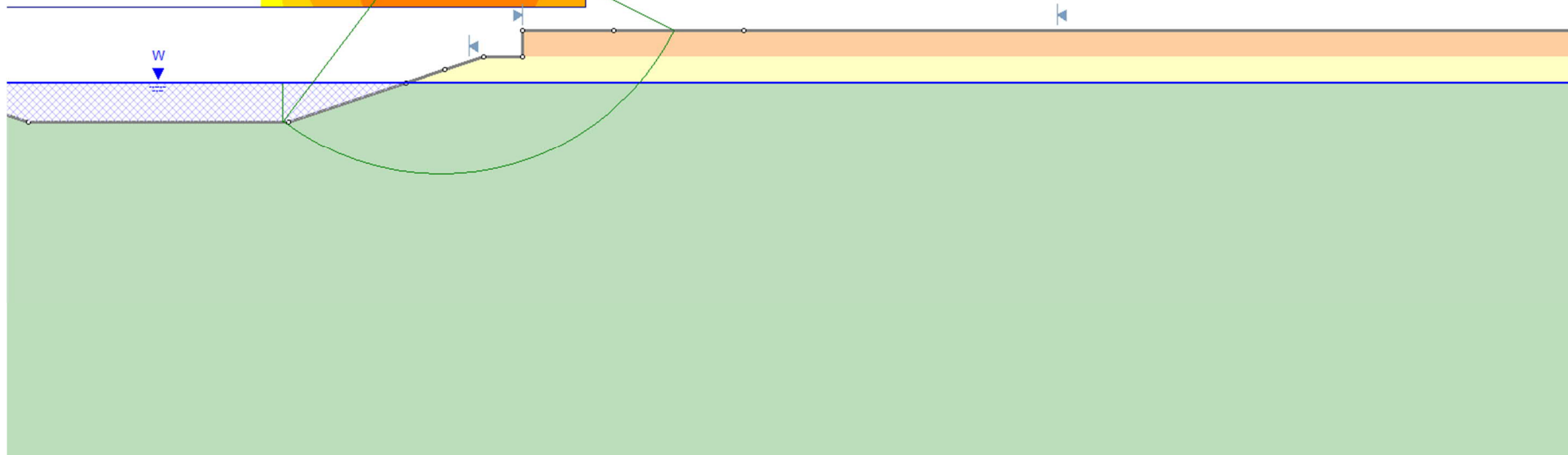


Liite 9. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1, eurokoodi MRT-tarkastelu

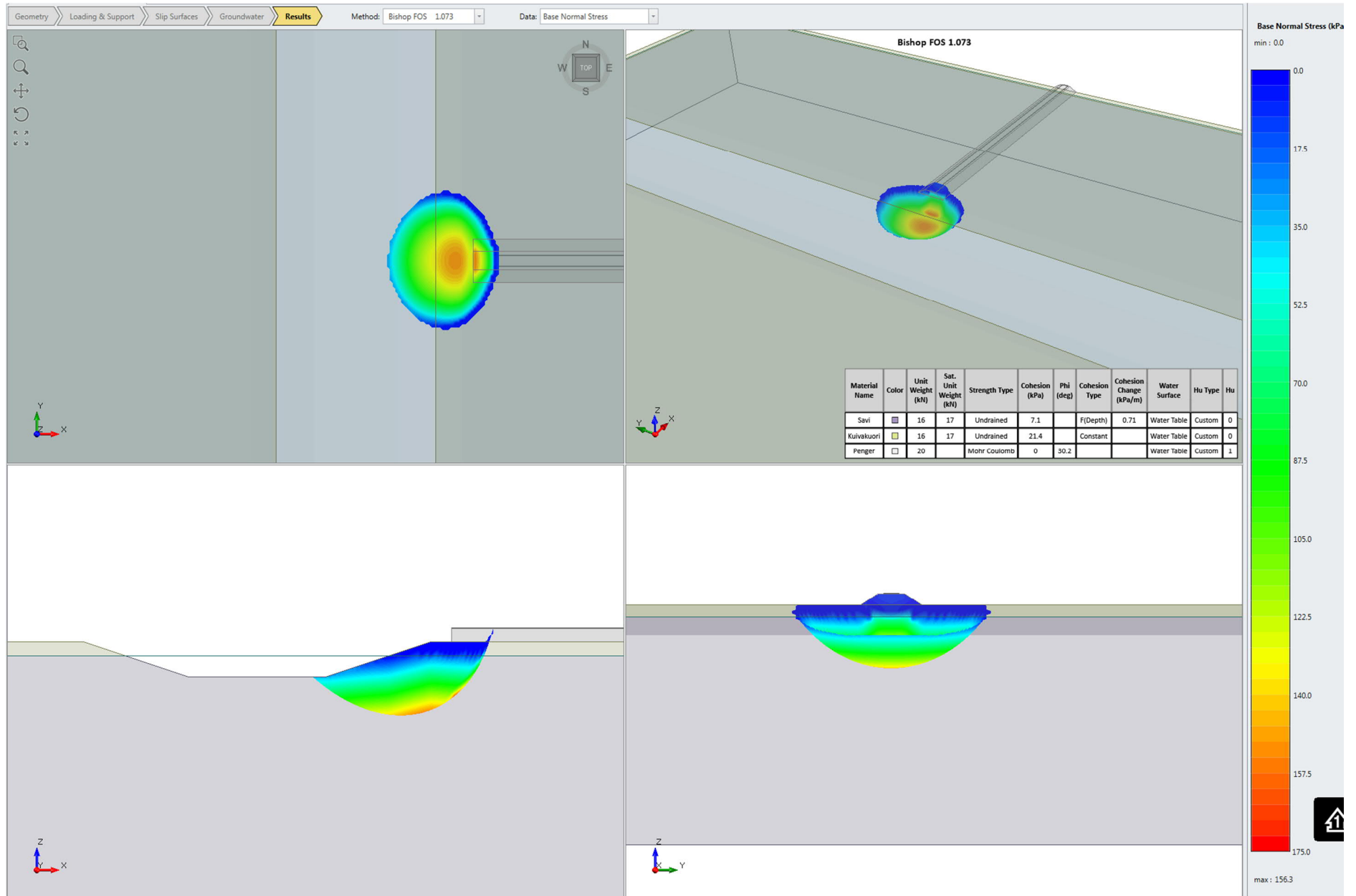


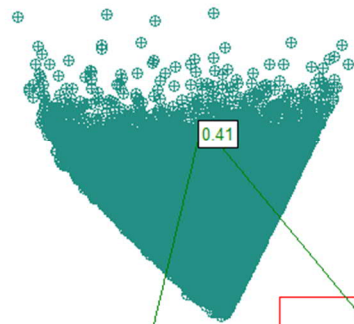





Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



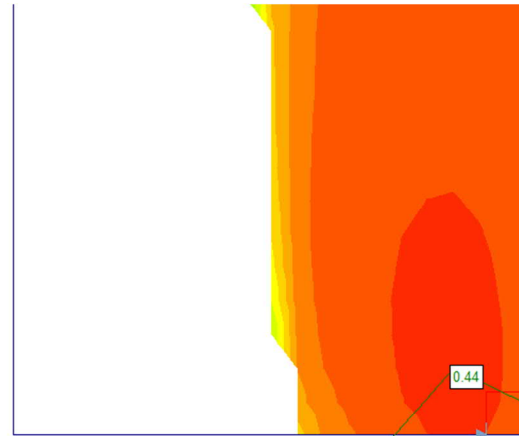
Liite 9. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 1, eurokoodi MRT-tarkastelu



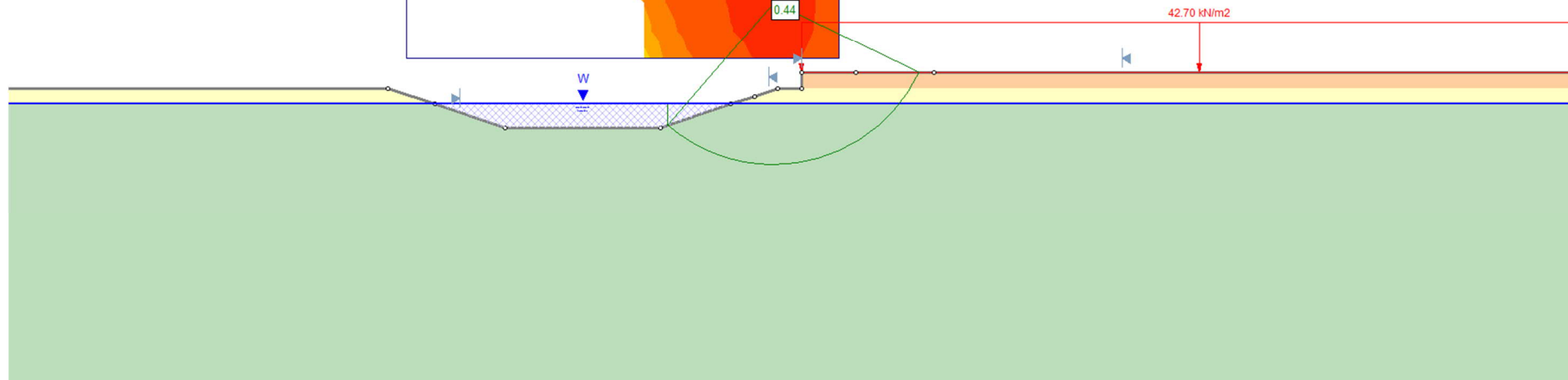


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	

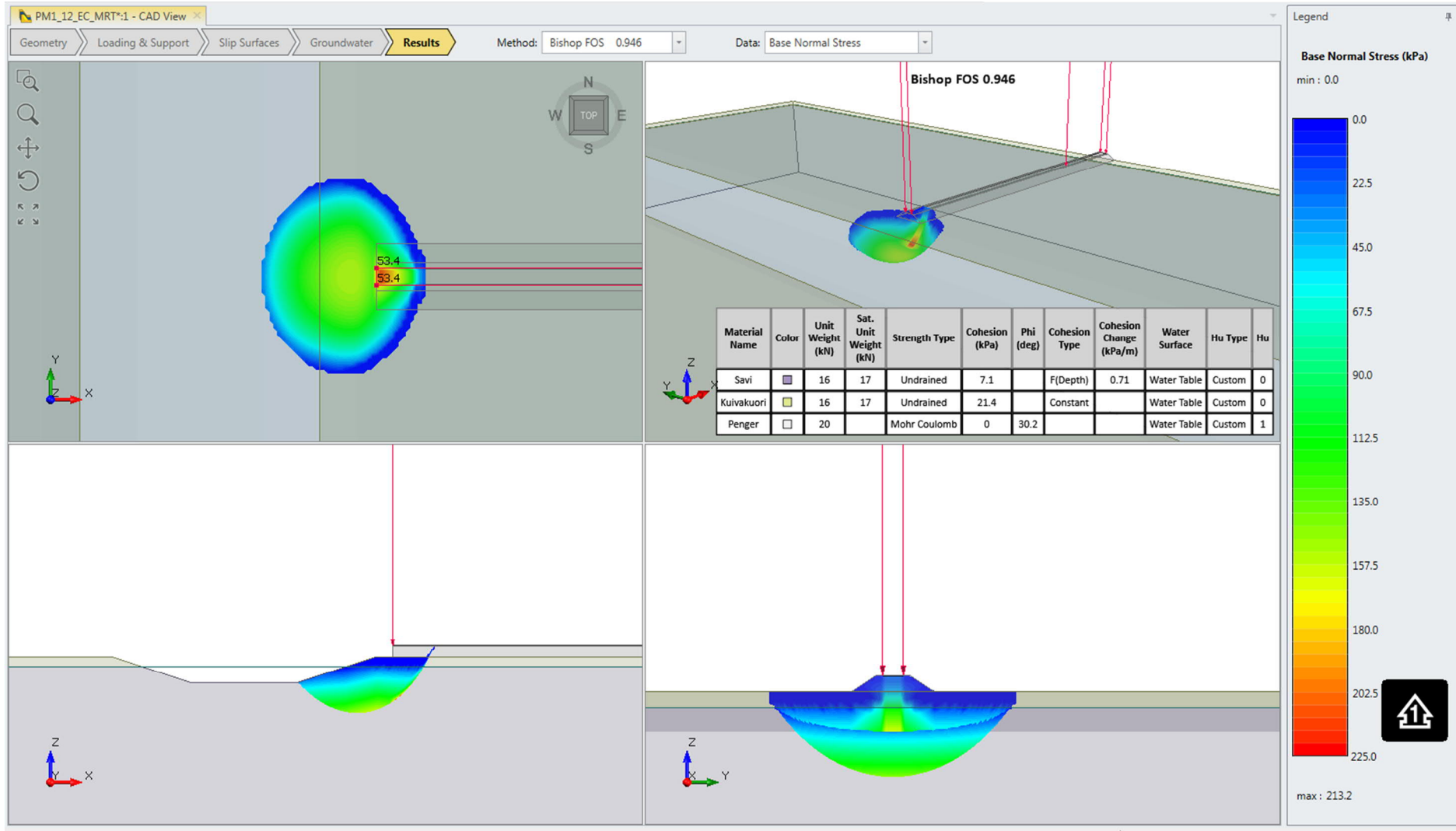




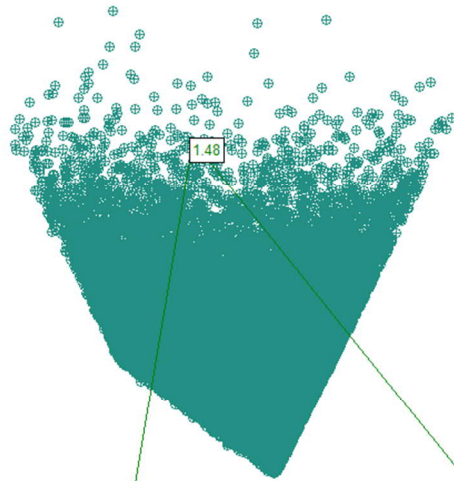
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi	Green	16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger	Orange	19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	






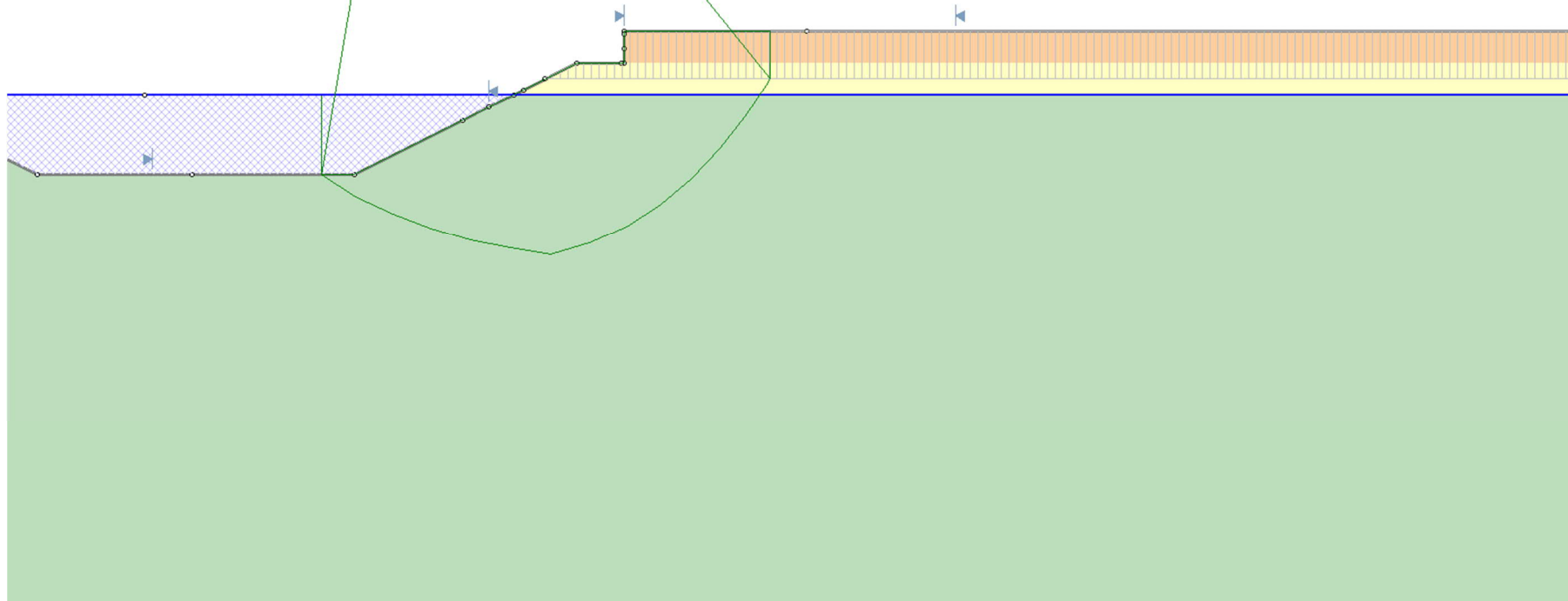
Liite 9. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 1, eurokoodi MRT-tarkastelu



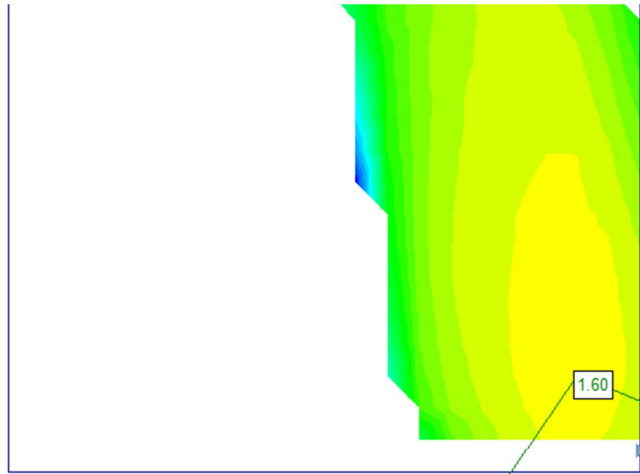
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.






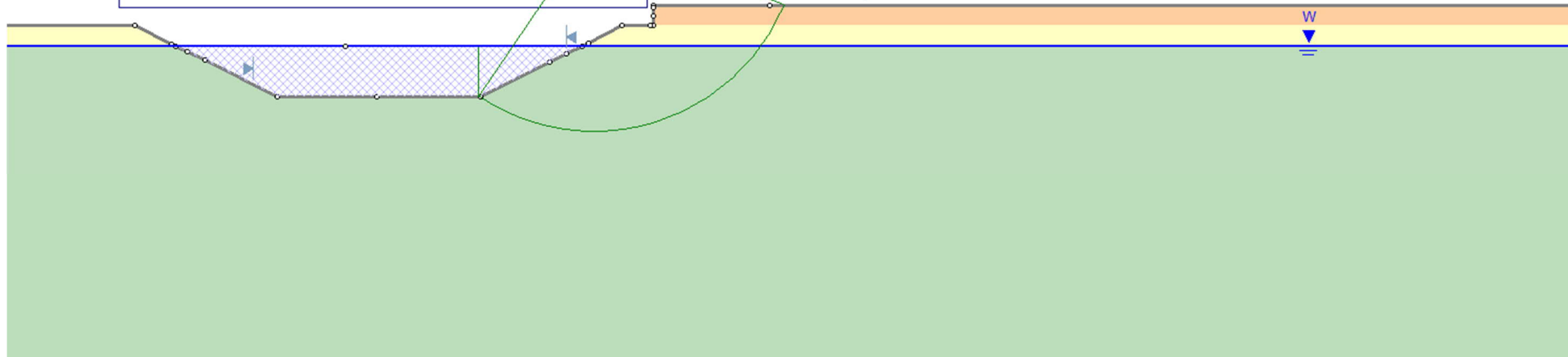
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



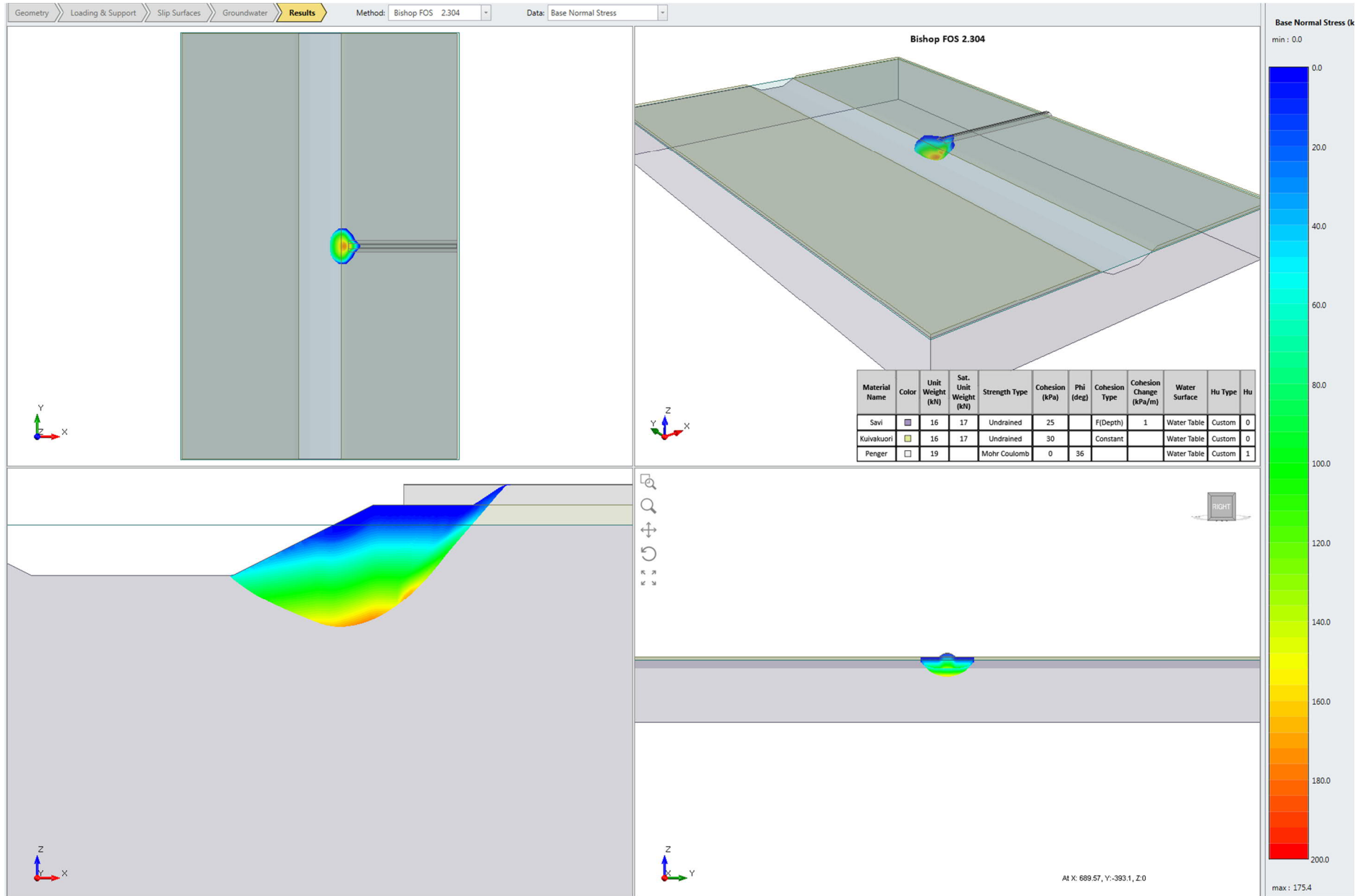
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.



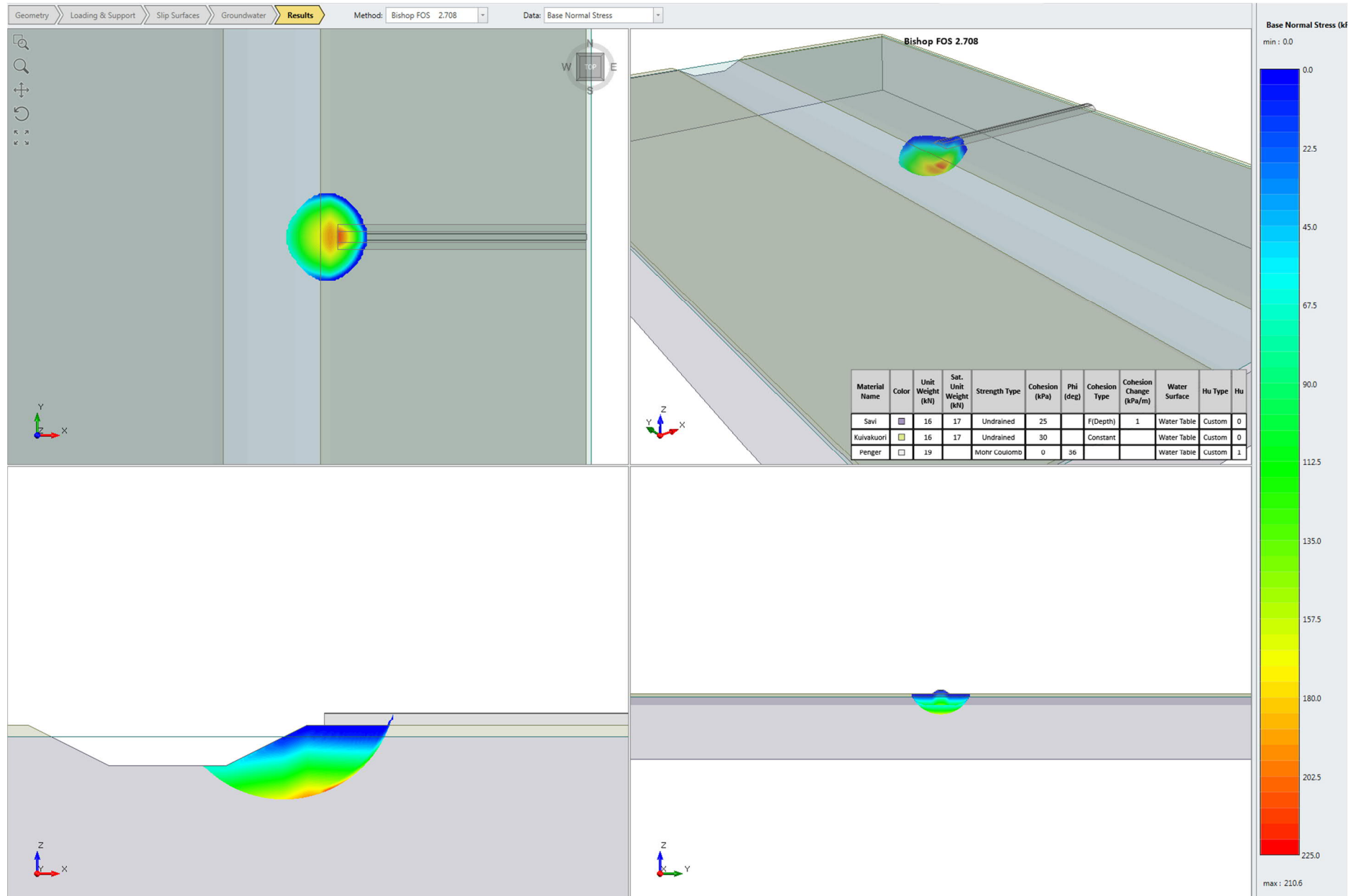
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



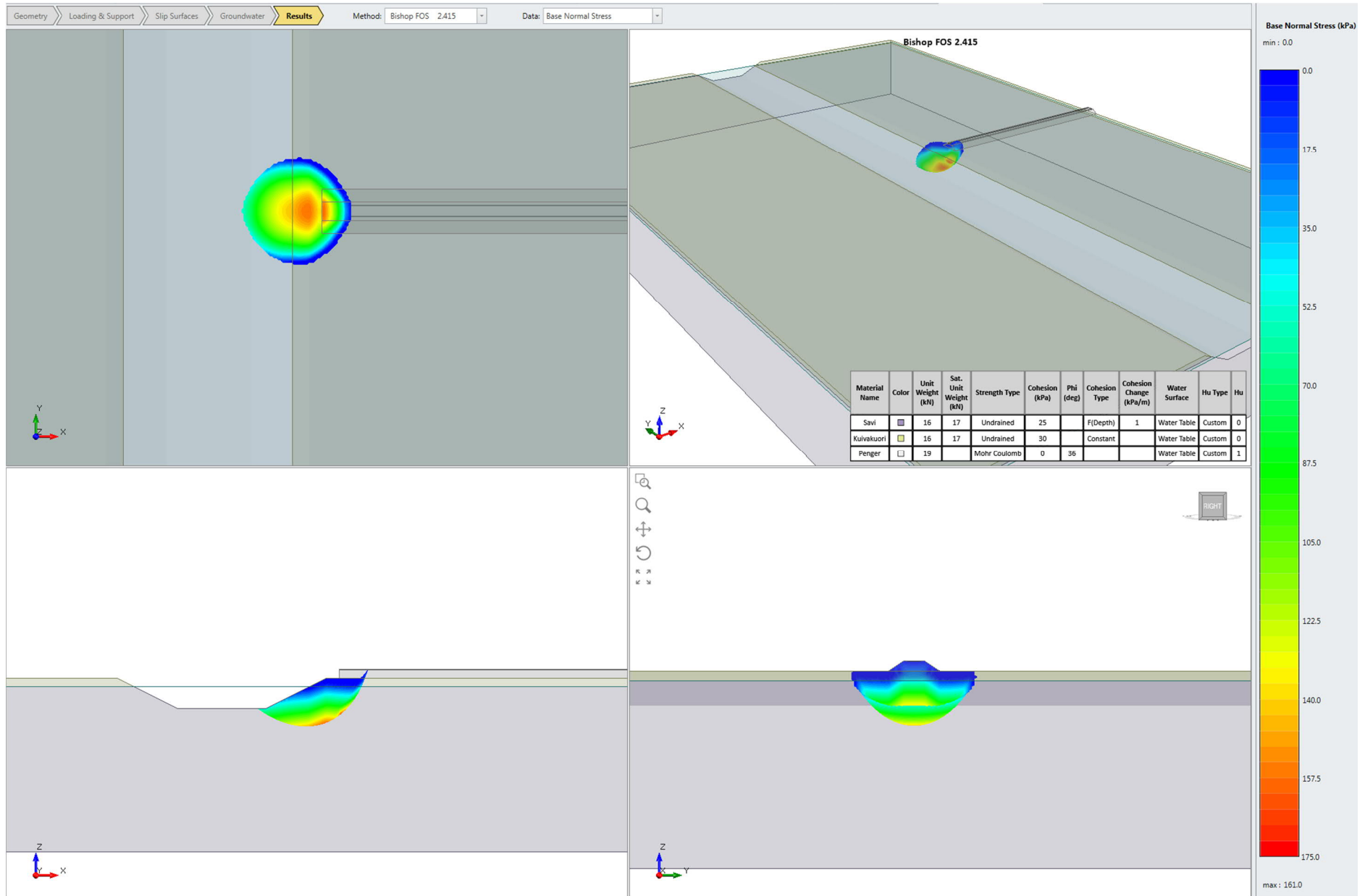
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.



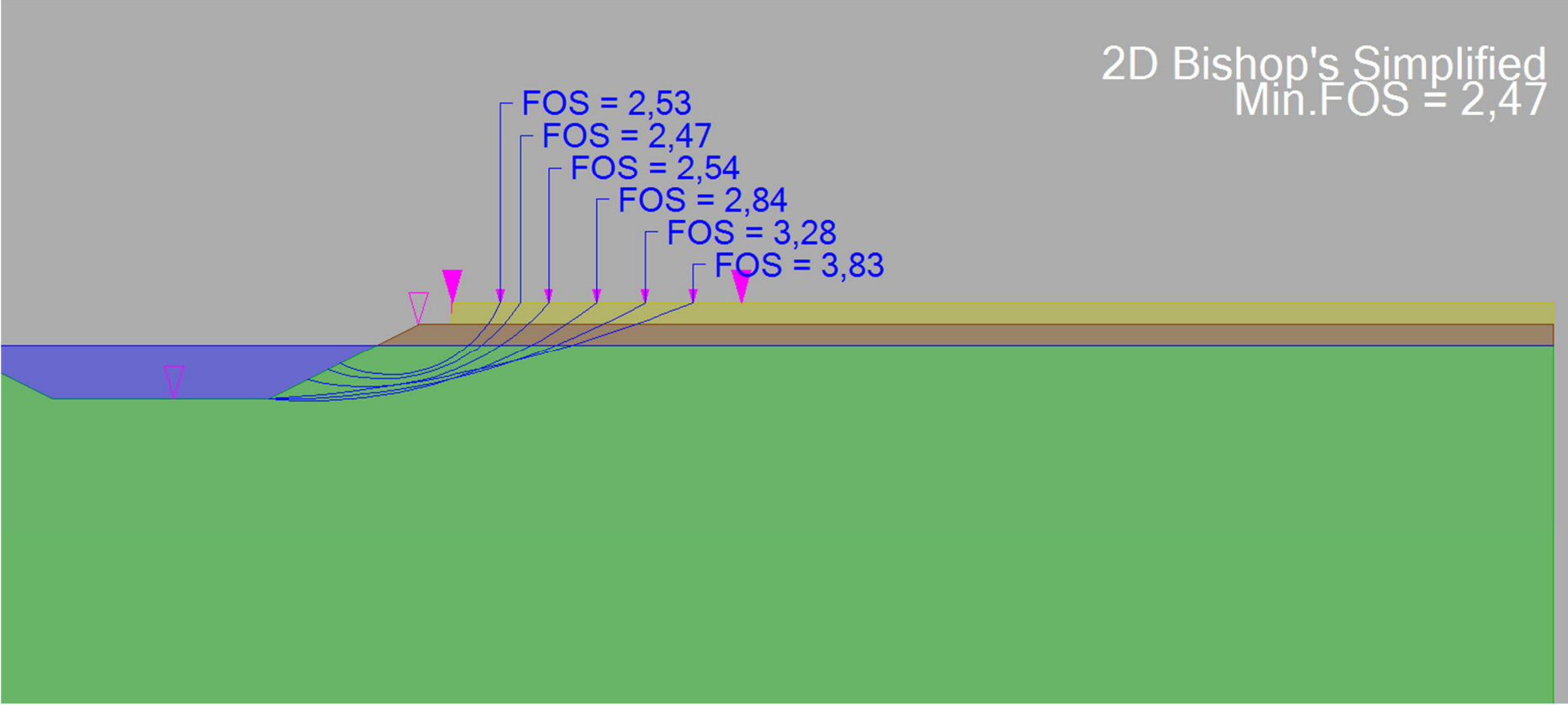
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.



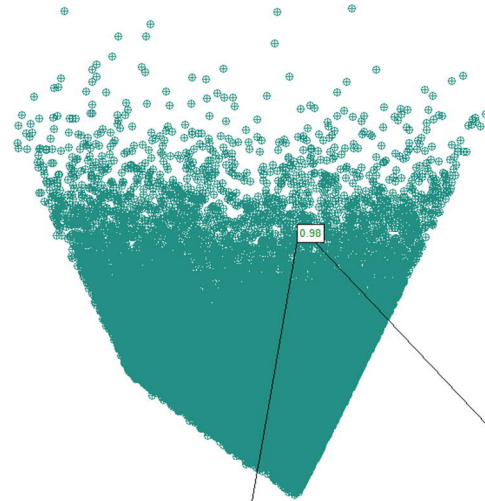
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.



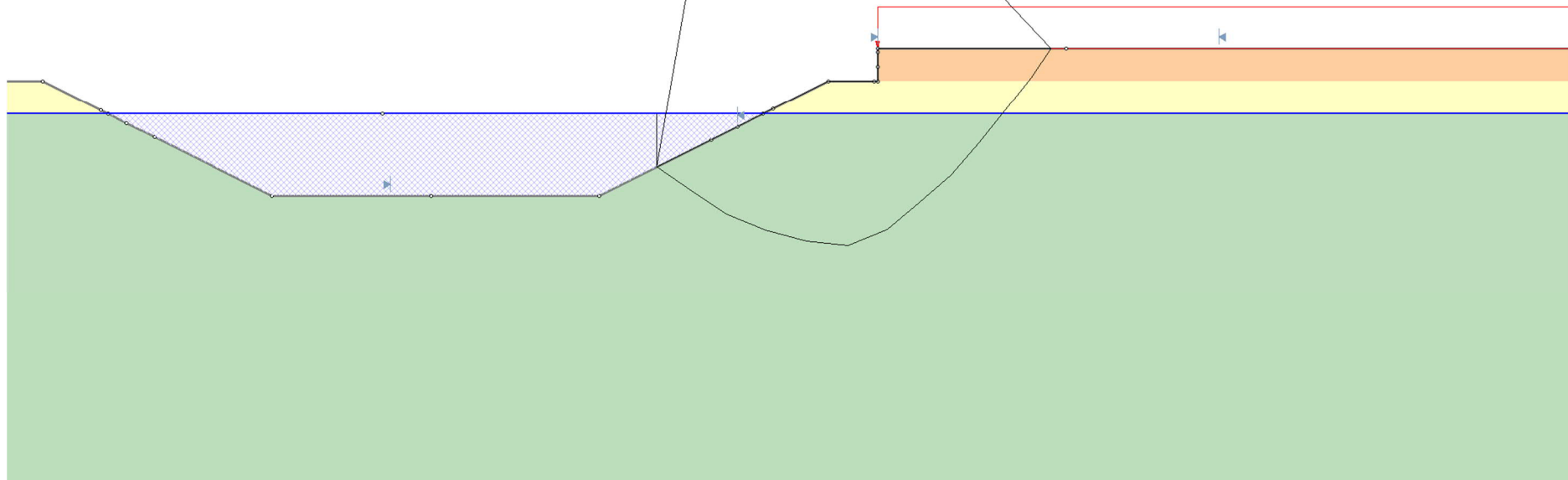
Liite 10. Stabiilitelaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.



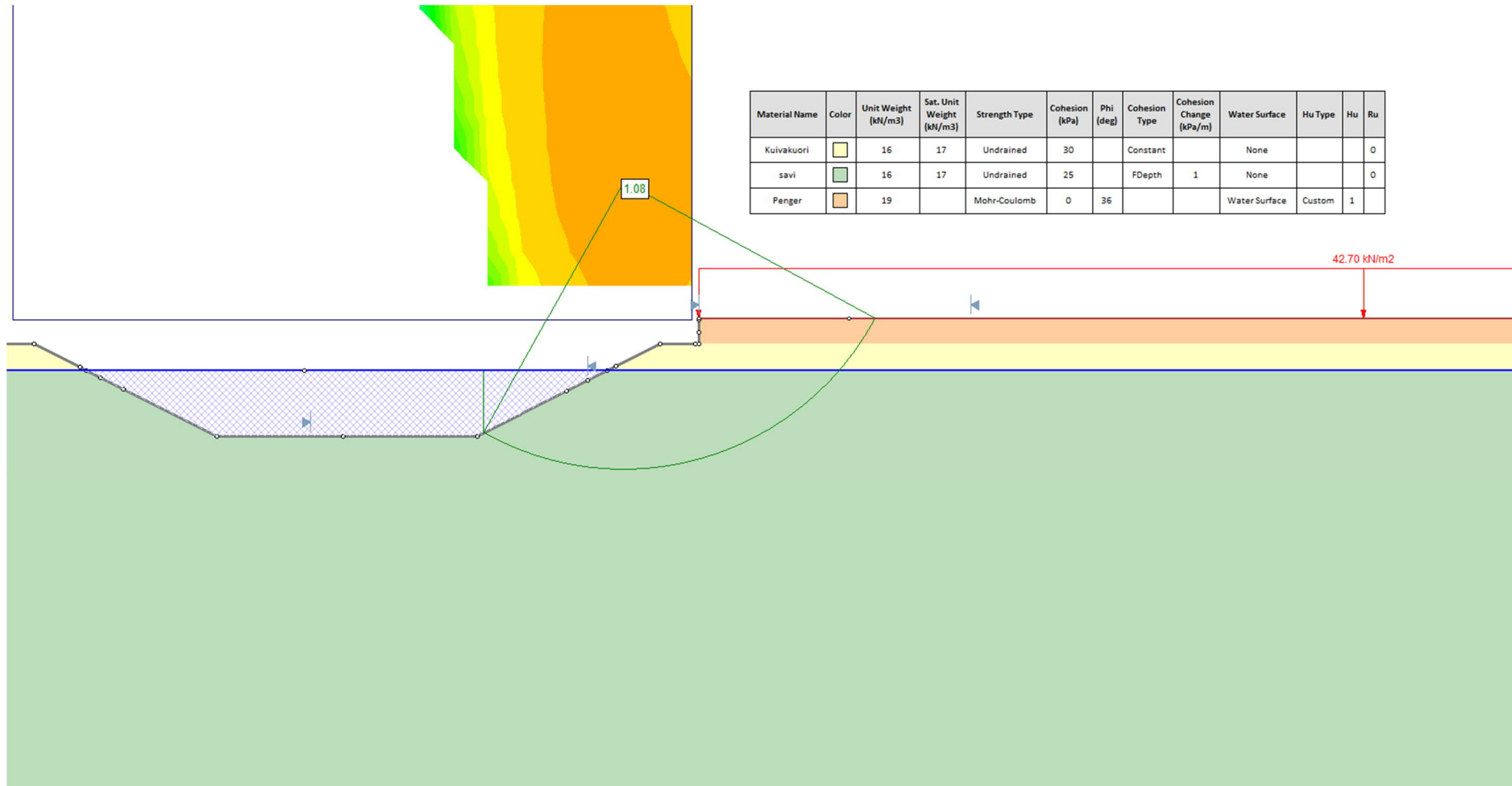
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.



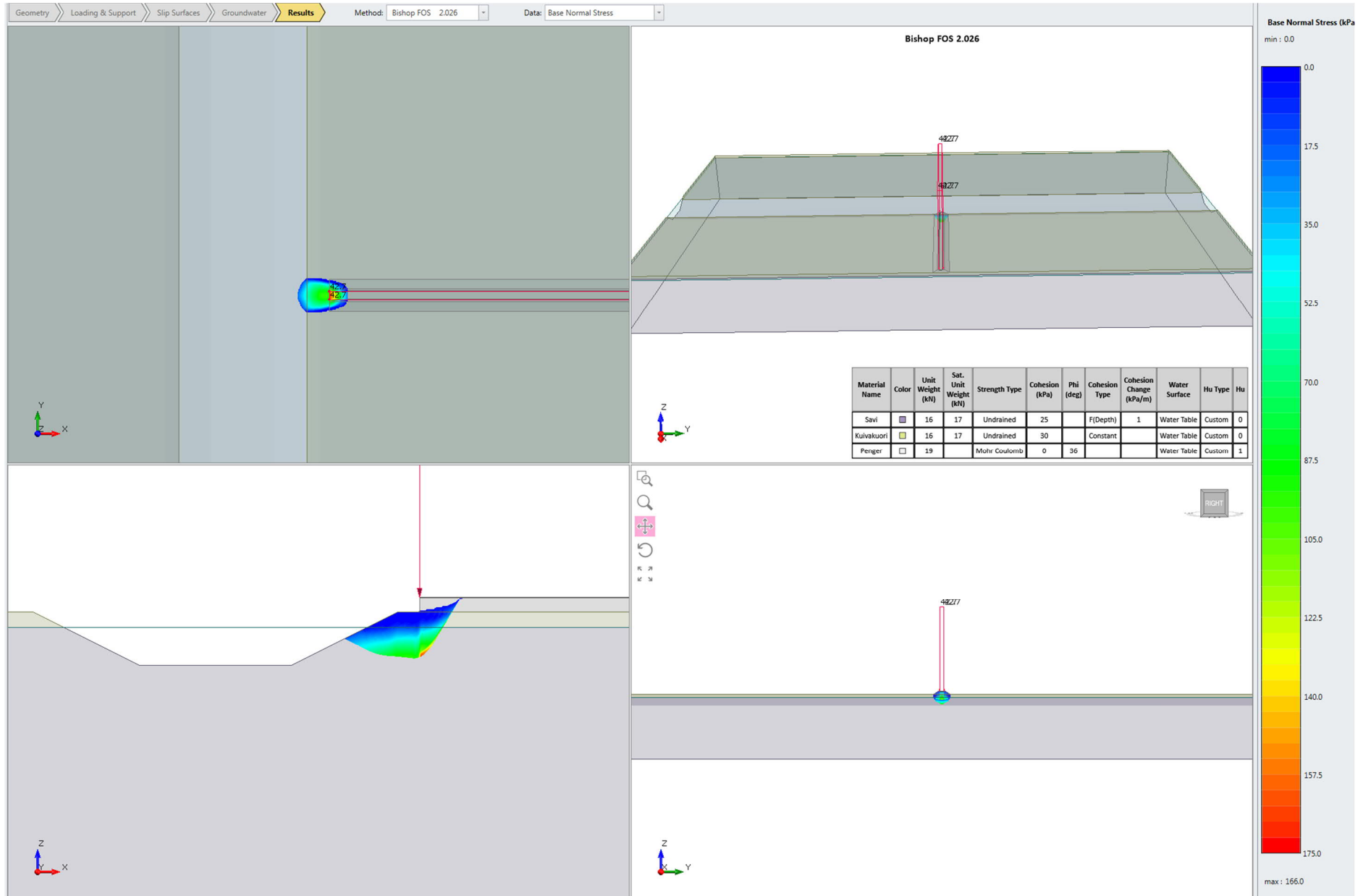
Material Name	Color	Unit Weight [kN/m ³]	Sat. Unit Weight [kN/m ³]	Strength Type	Cohesion [kPa]	Phi [deg]	Cohesion Type	Cohesion Change [kPa/m]	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi	Green	16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger	Orange	19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



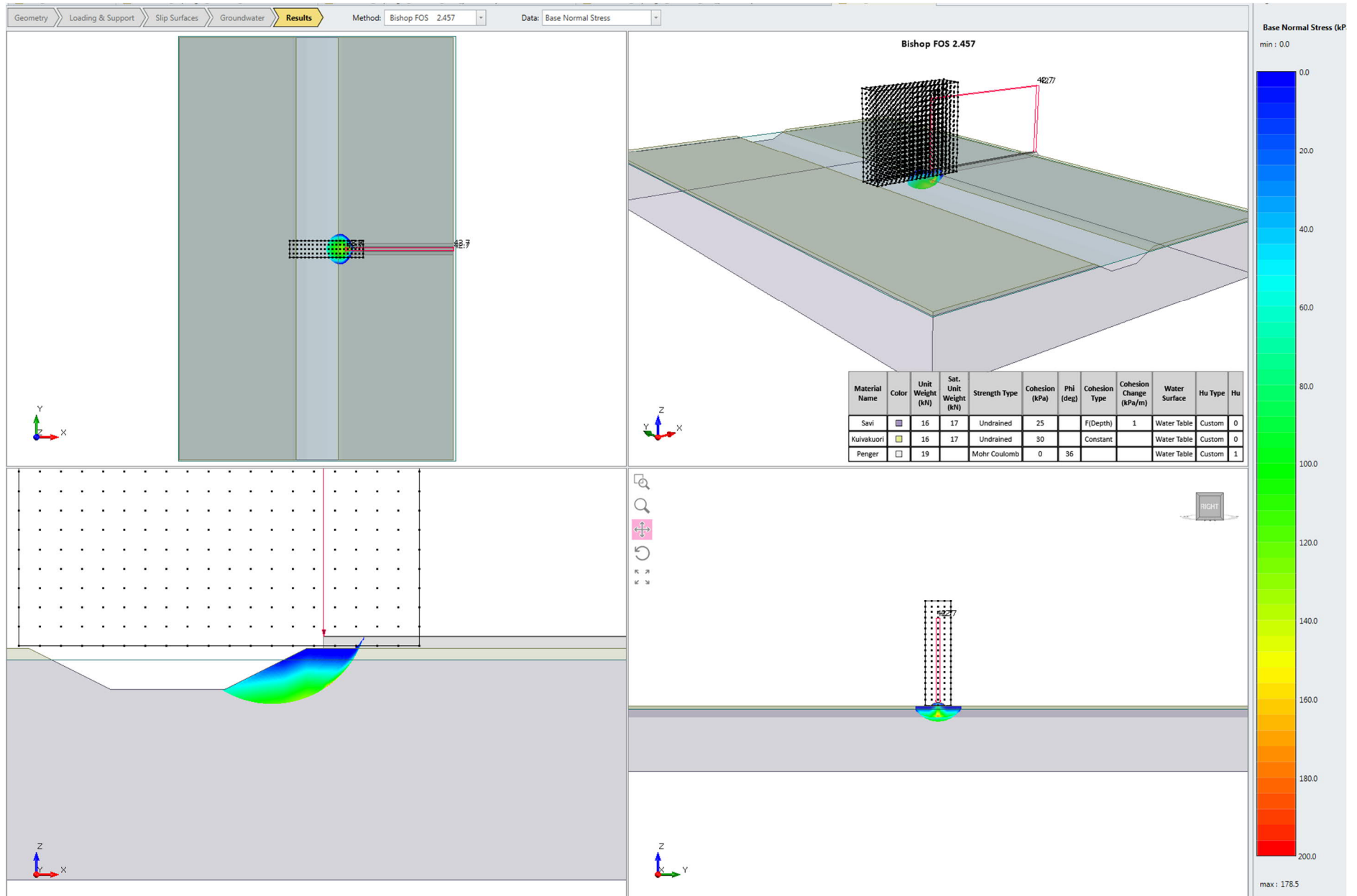
Liite 10. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.



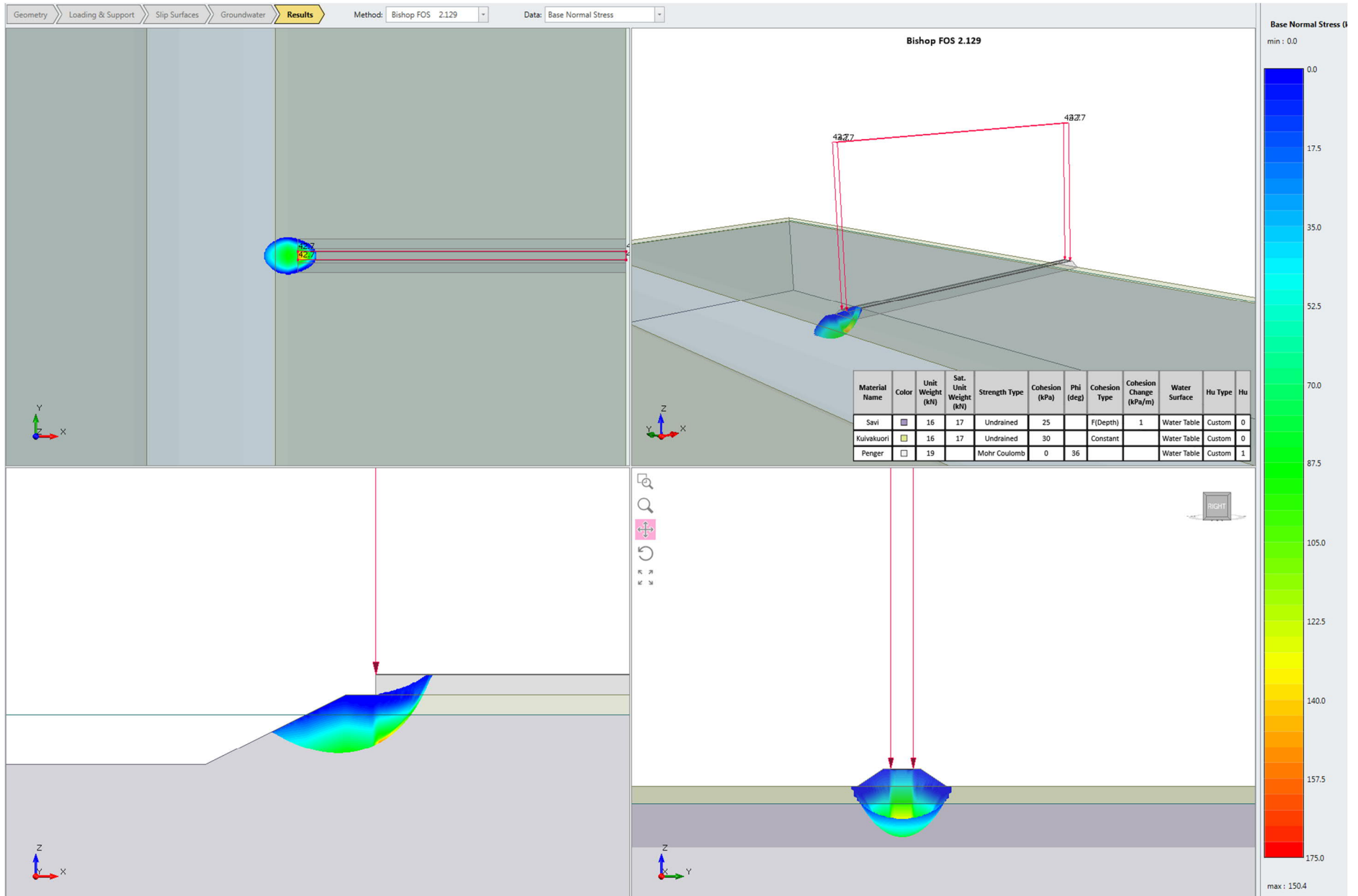
Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.



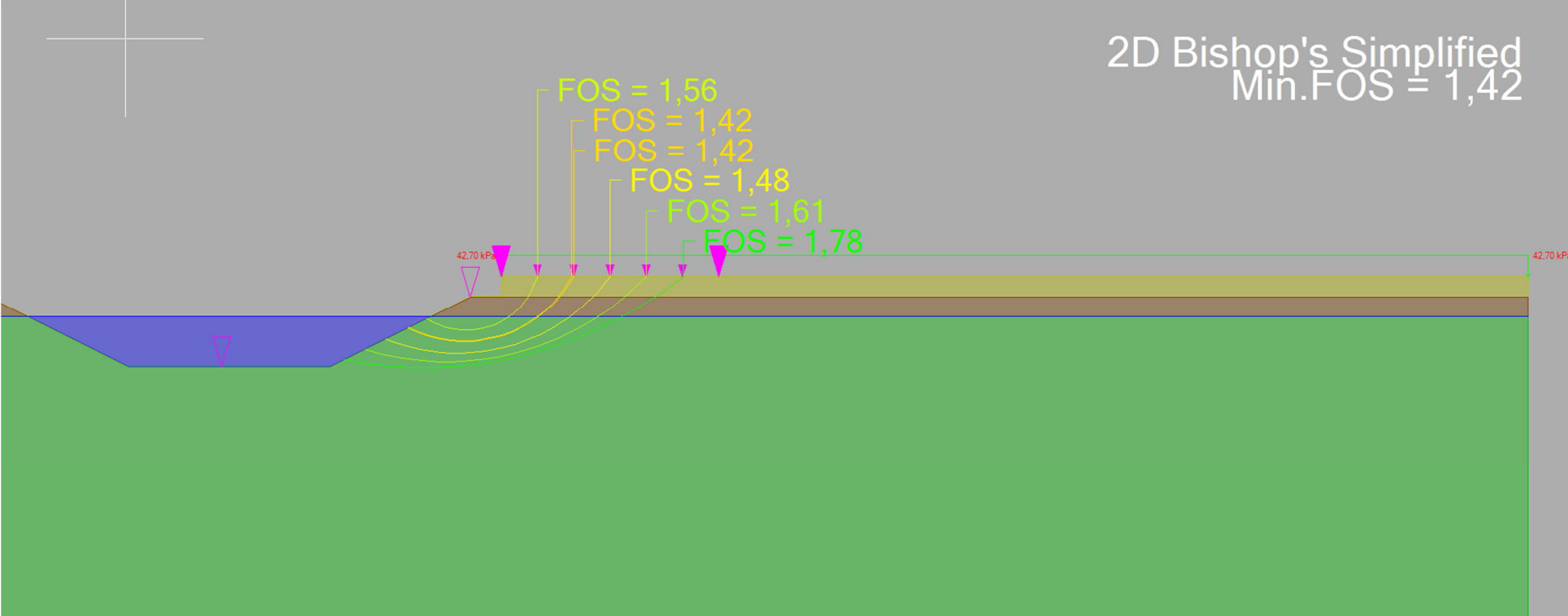
Liite 10. Stabiiiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.



Liite 10. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

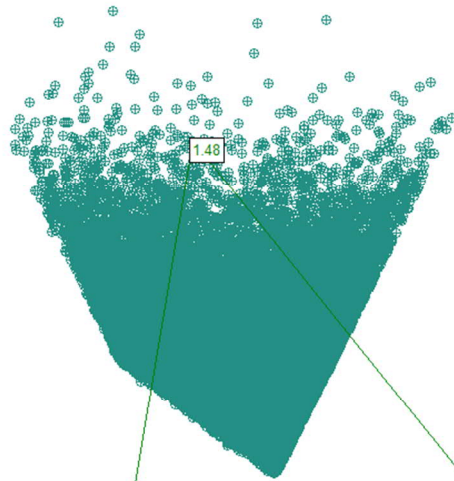





Liite 10. Stabiilitelaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Yksiraiteinen ratapenger.

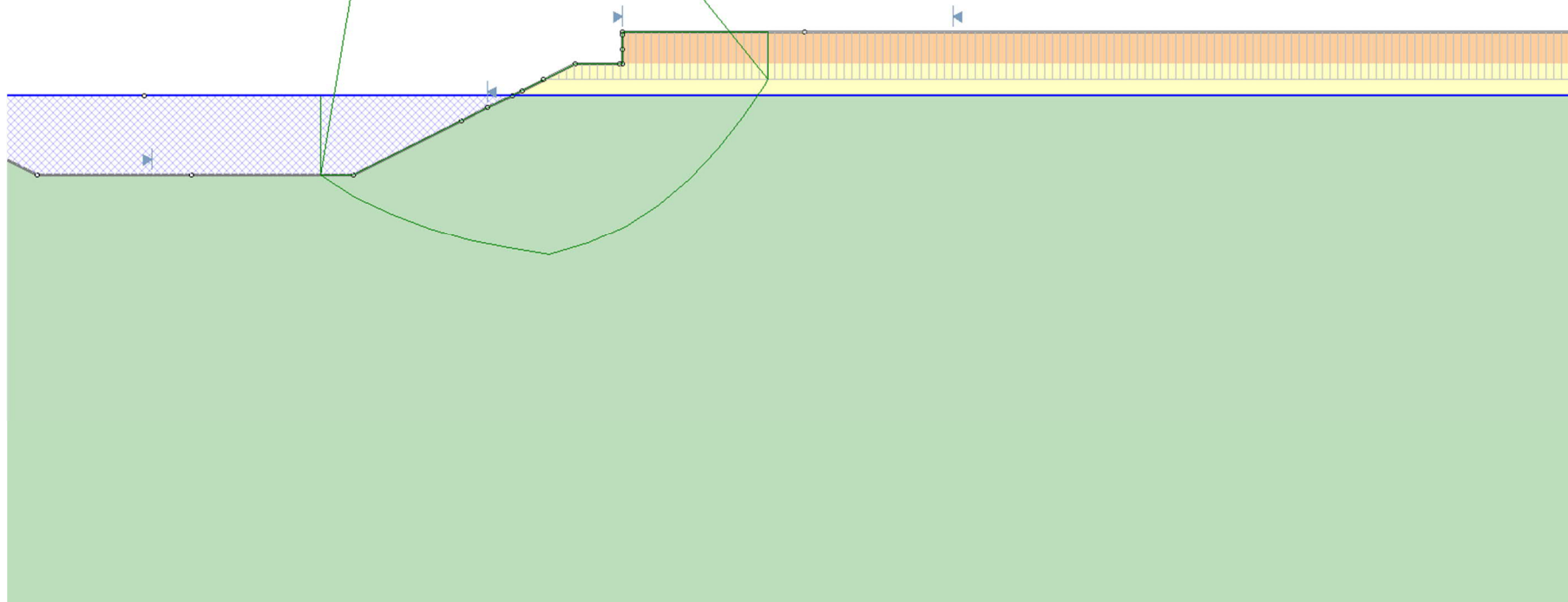


Liite 11.

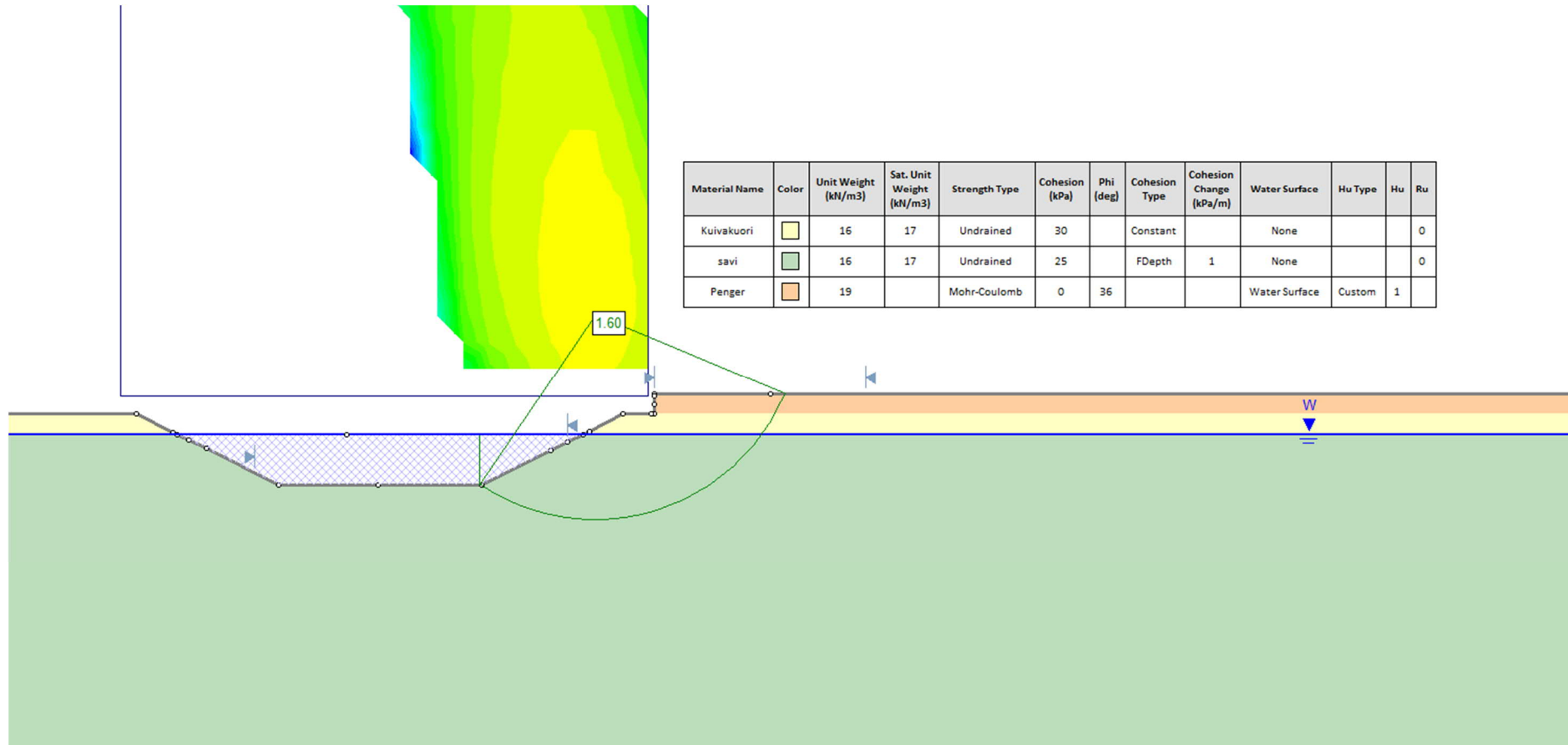
Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



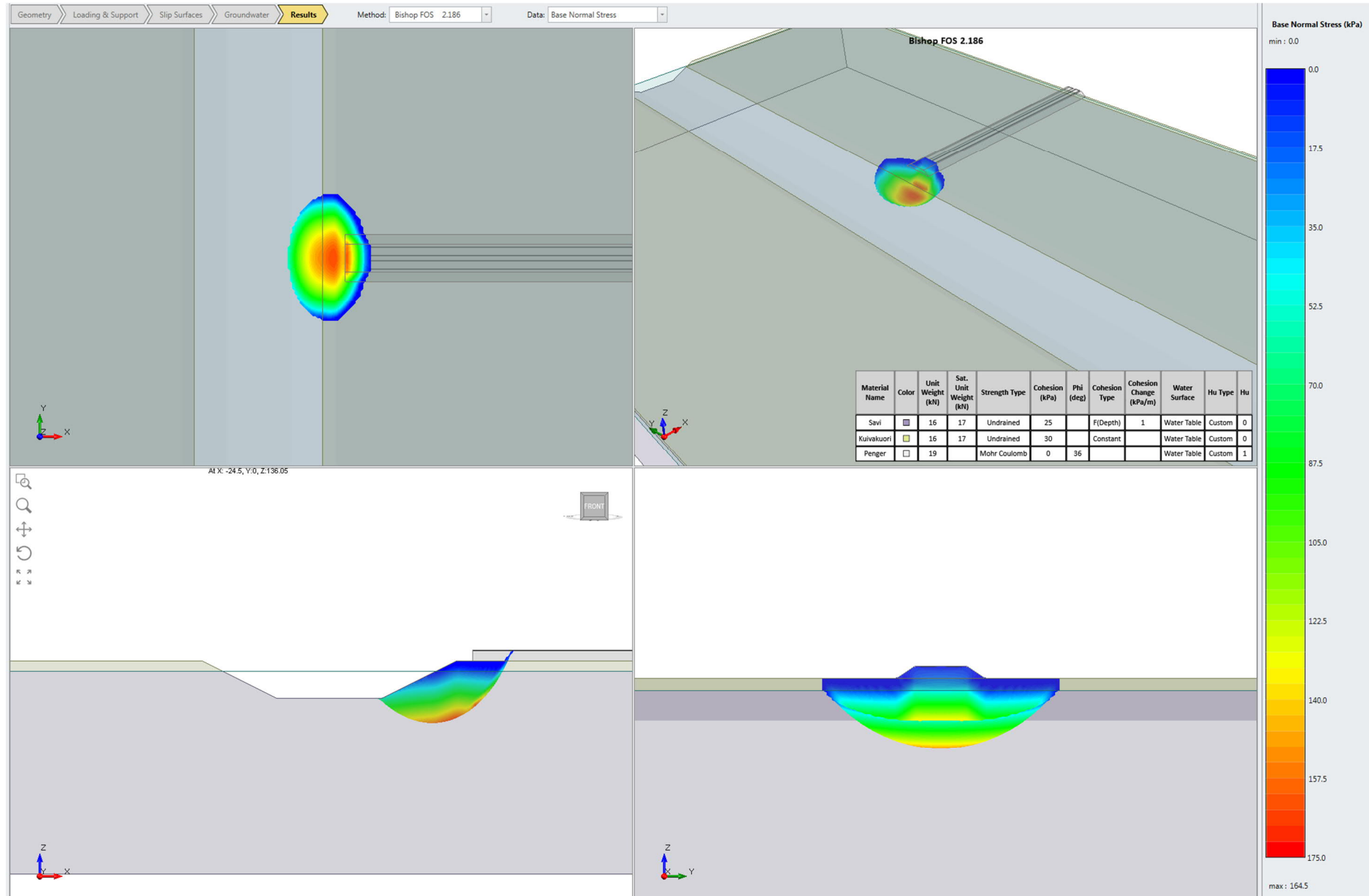
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



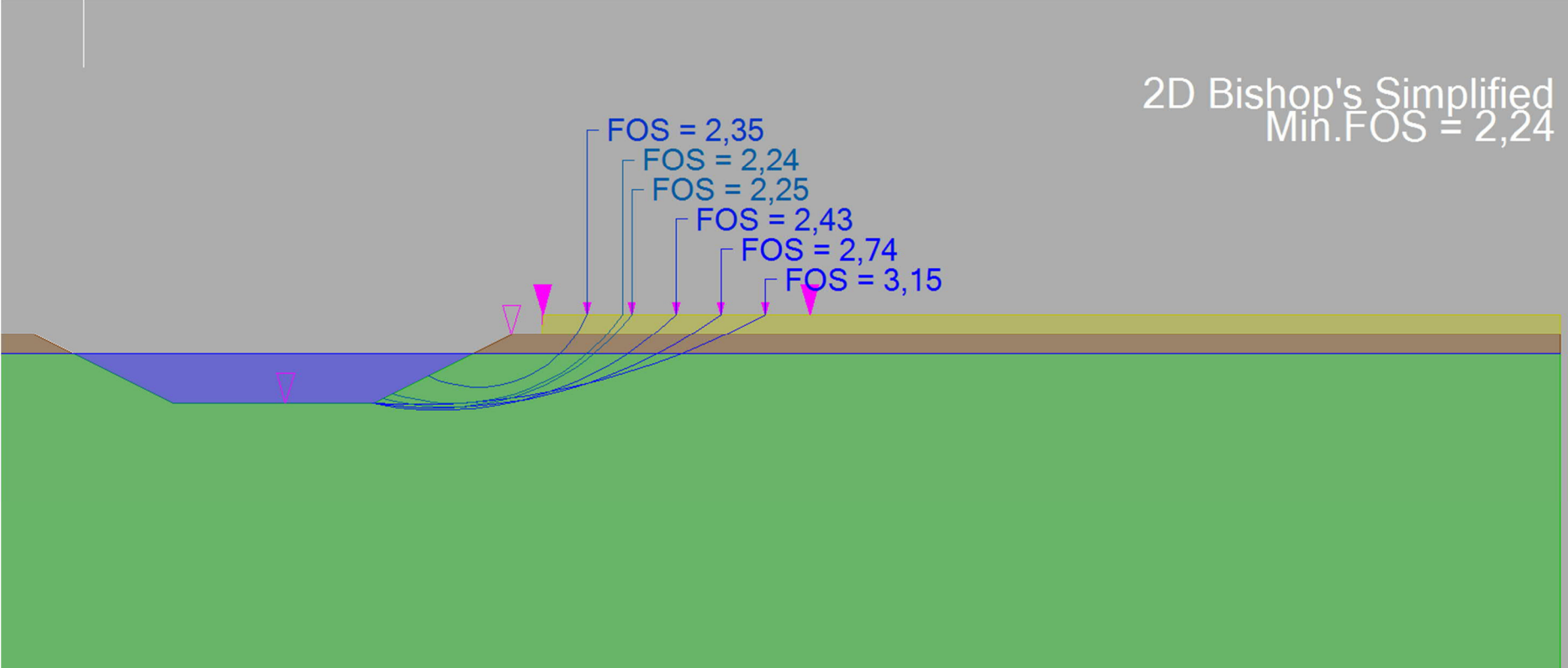
Liite 11. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



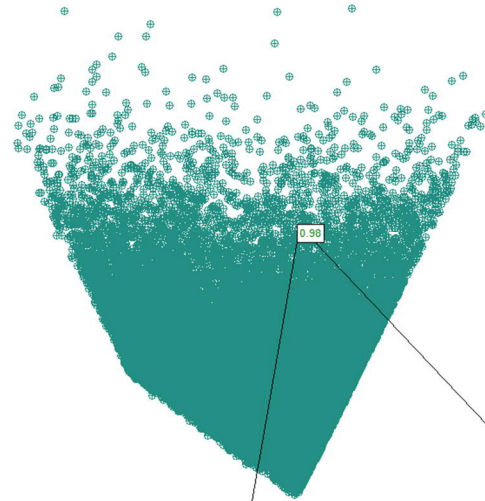
Liite 11. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



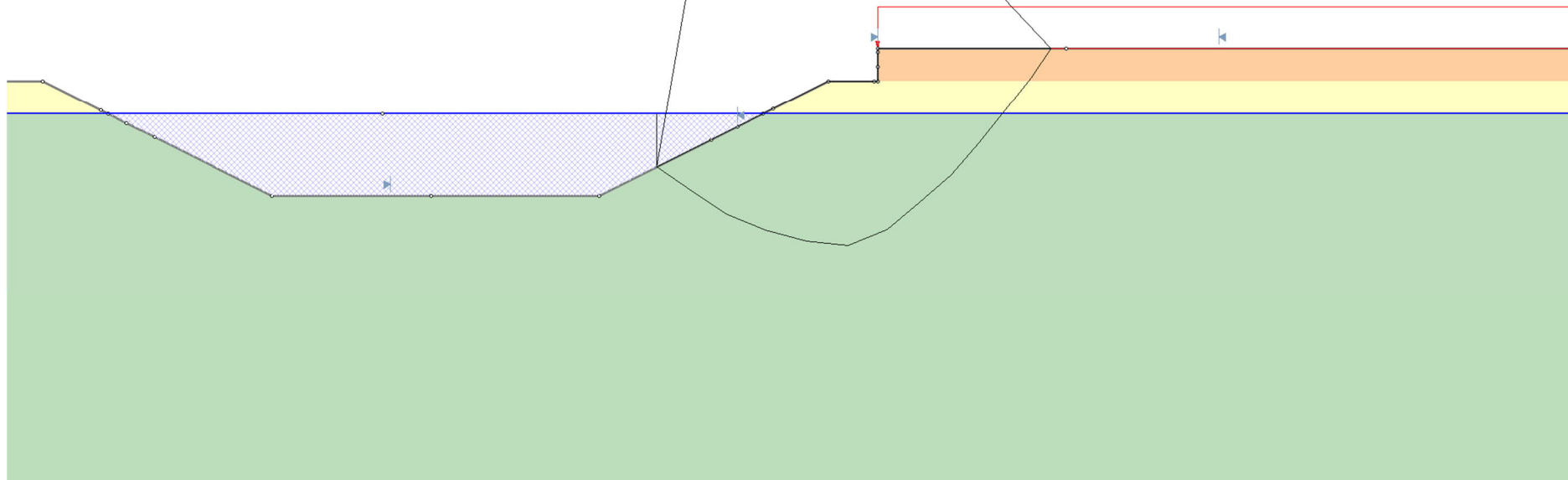
Liite 11. Stabiilitelaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



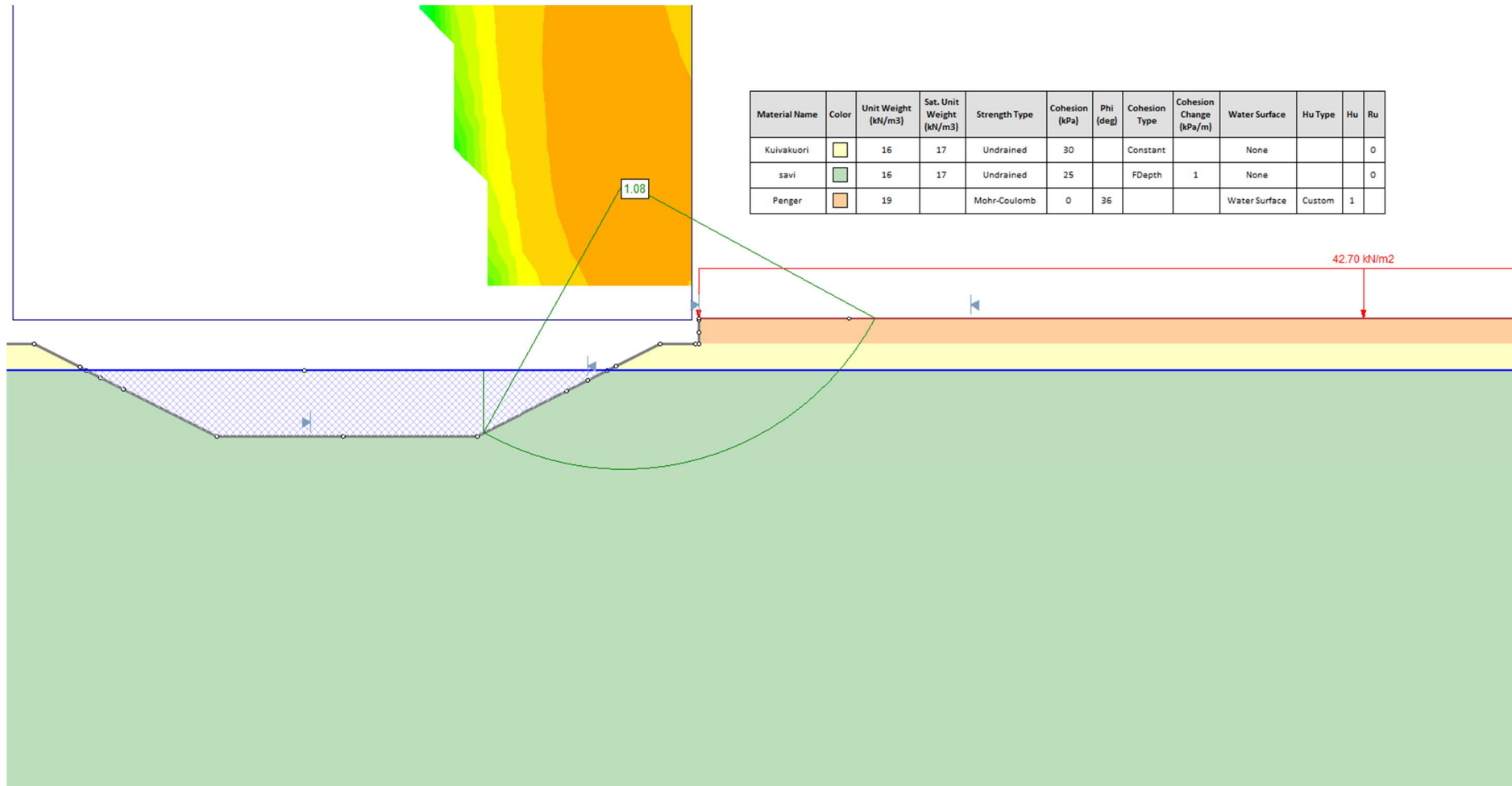
Liite 11. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



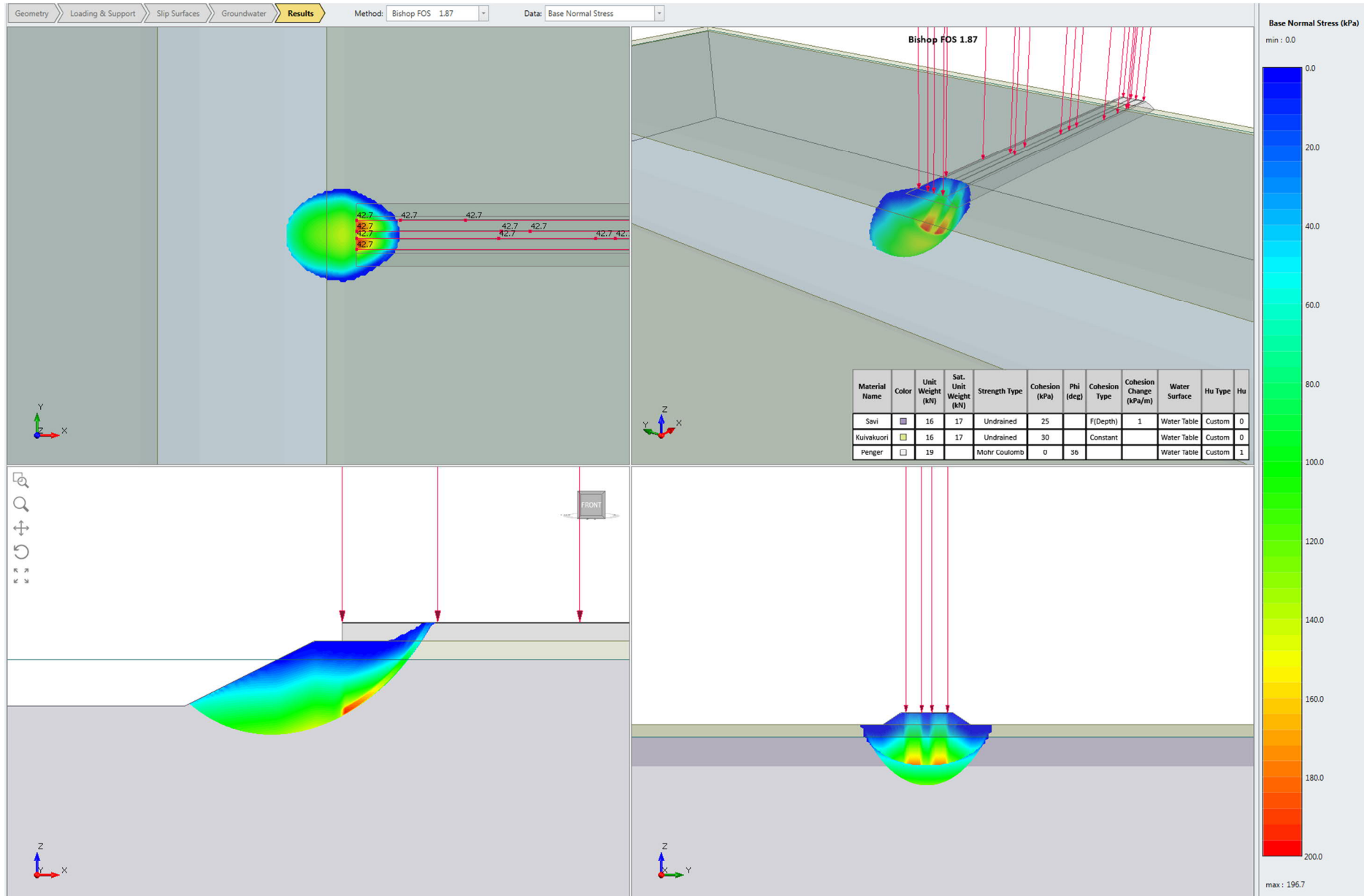
Material Name	Color	Unit Weight [kN/m ³]	Sat. Unit Weight [kN/m ³]	Strength Type	Cohesion [kPa]	Phi [deg]	Cohesion Type	Cohesion Change [kPa/m]	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	■	16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi	■	16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger	■	19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



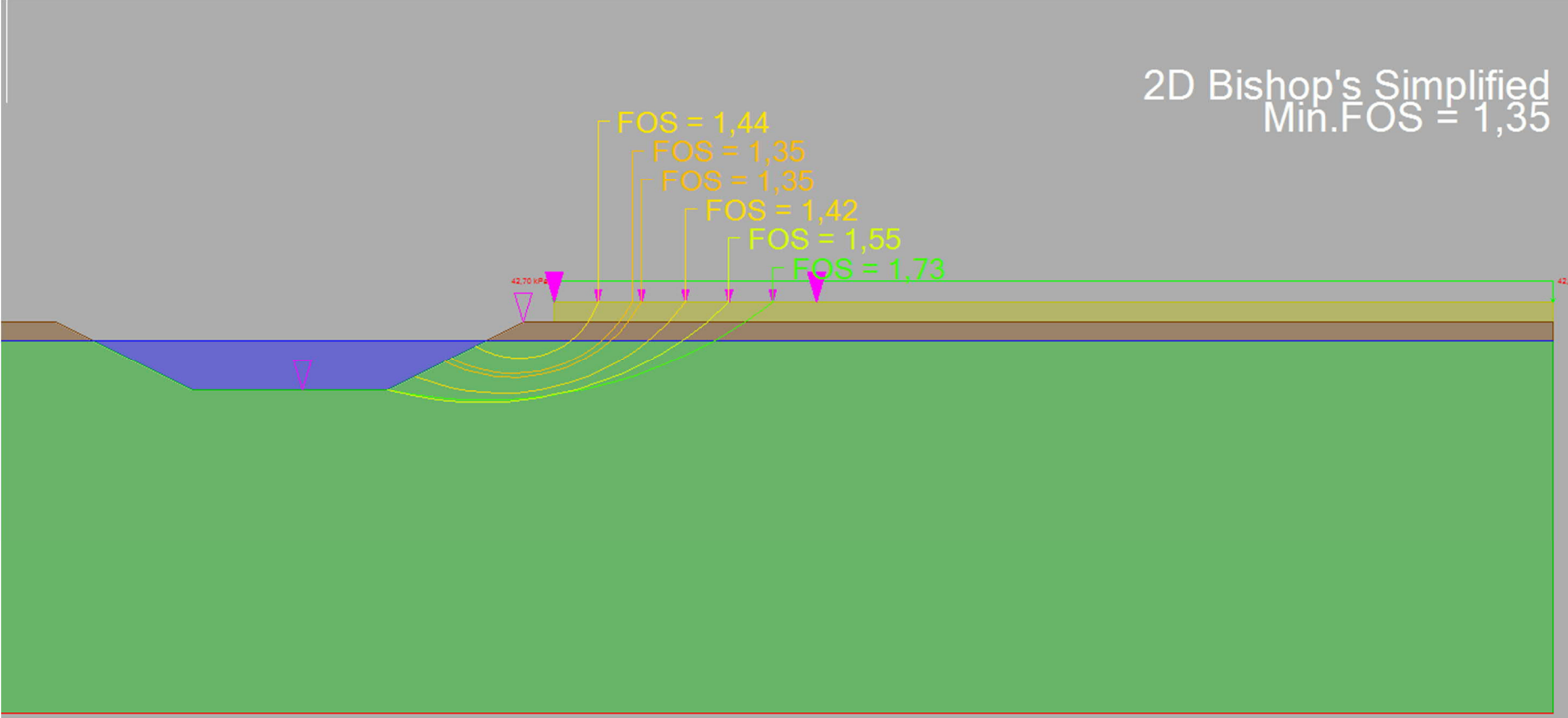
Liite 11. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



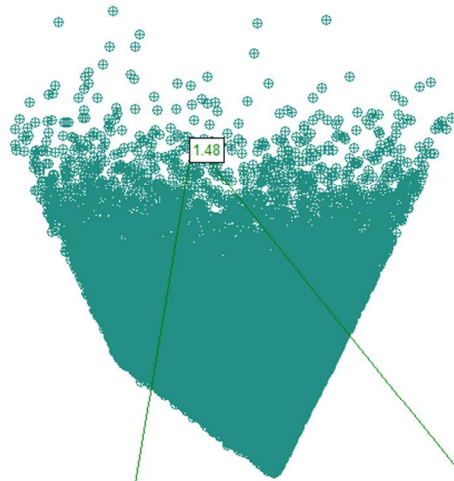
Liite 11. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.






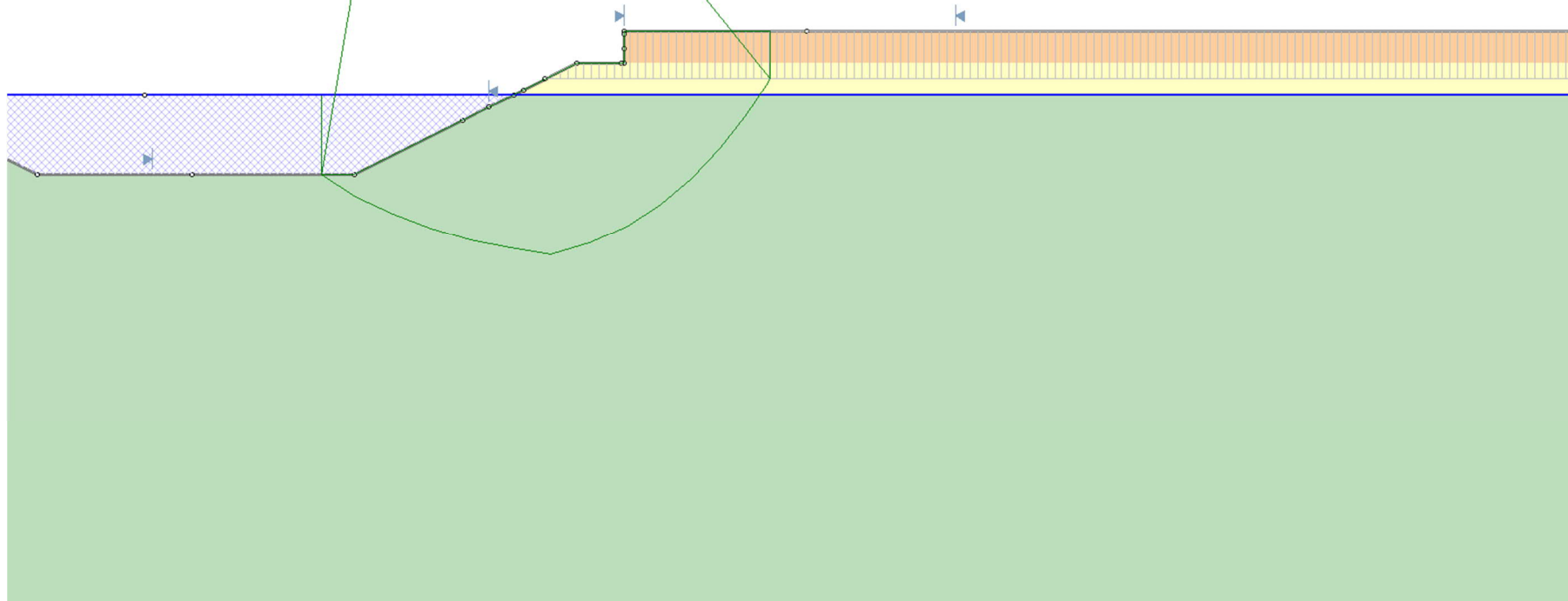
Liite 11. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



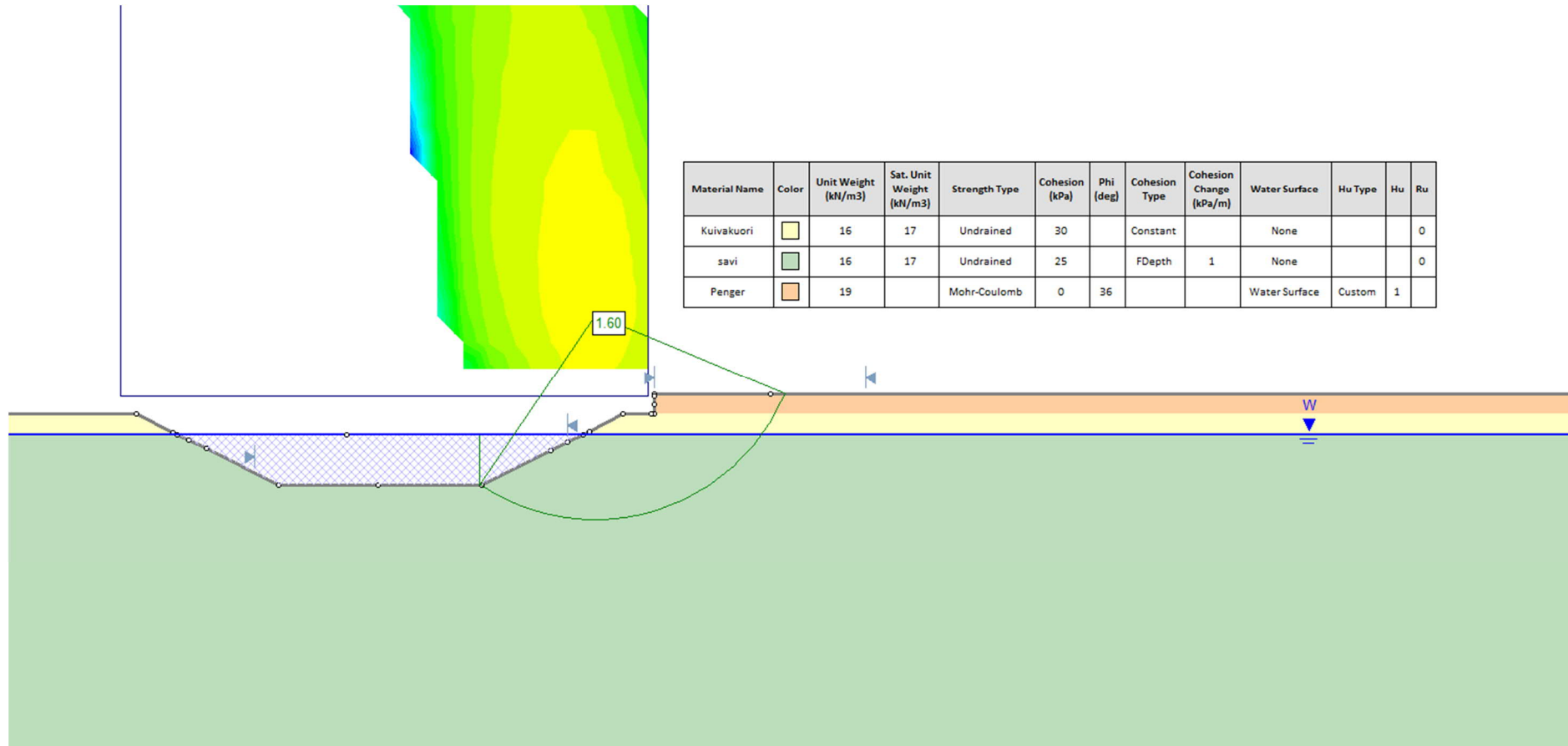
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 2. Moottoritiepenget.

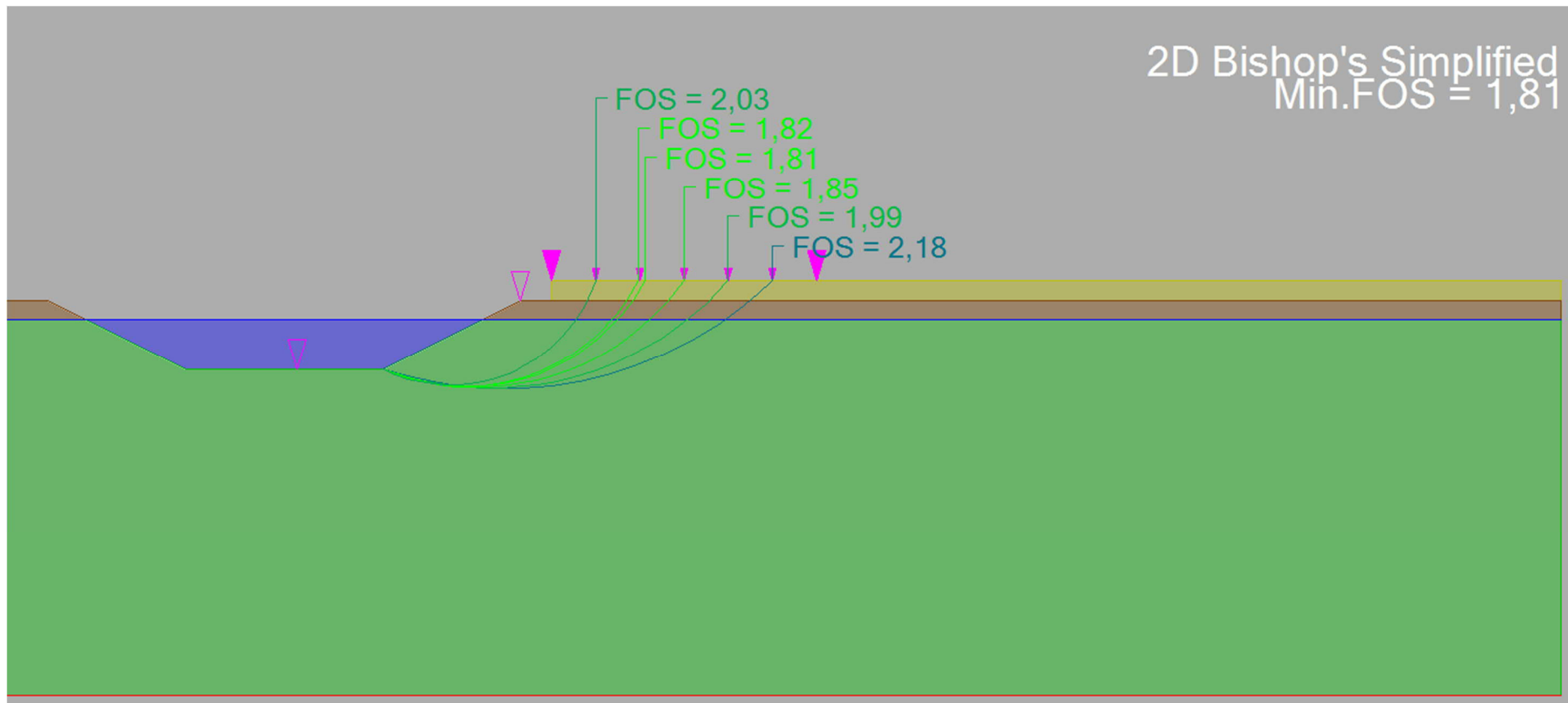


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	25		FDepth	1	None			0
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	

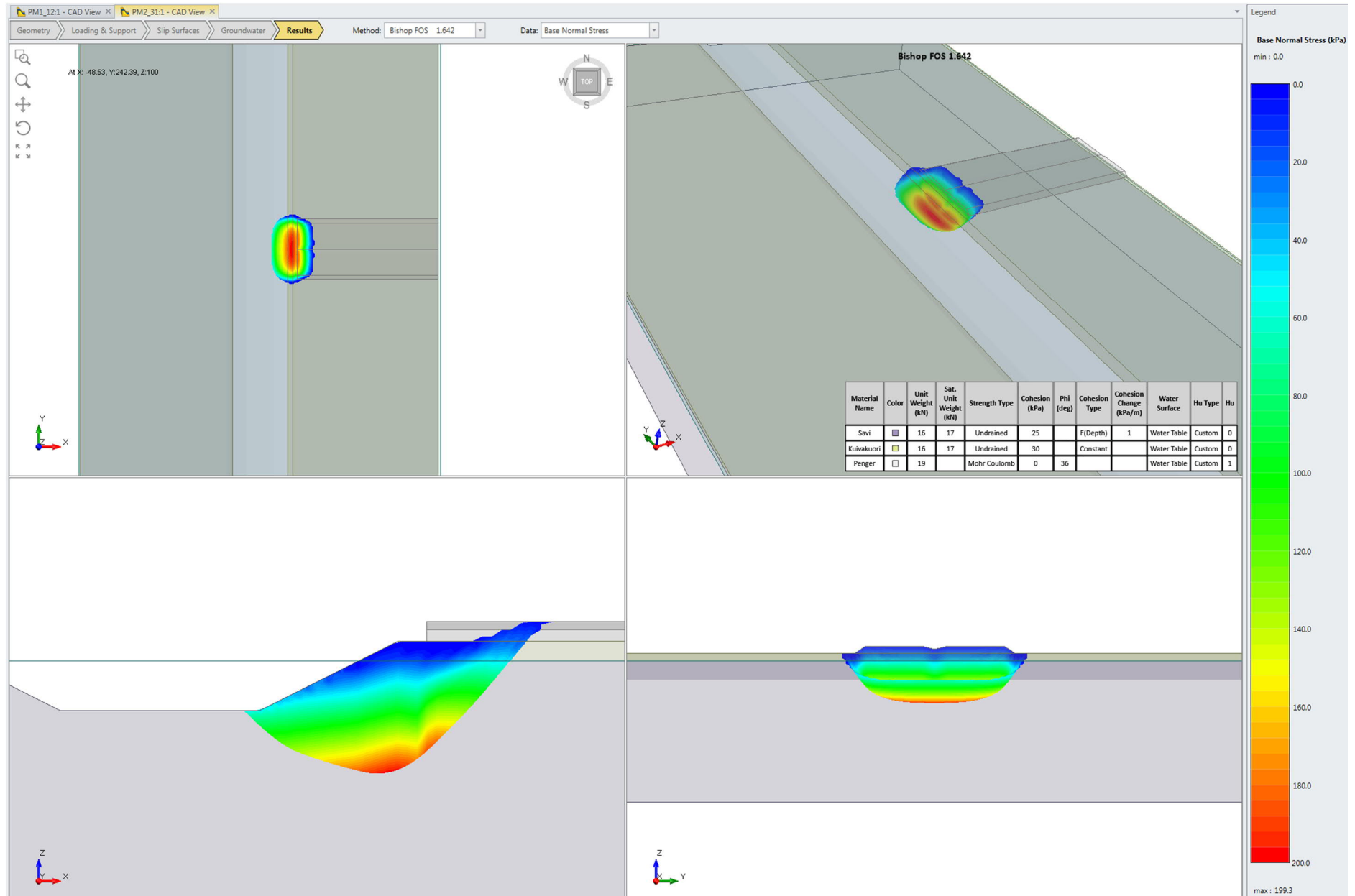


Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepengeri.

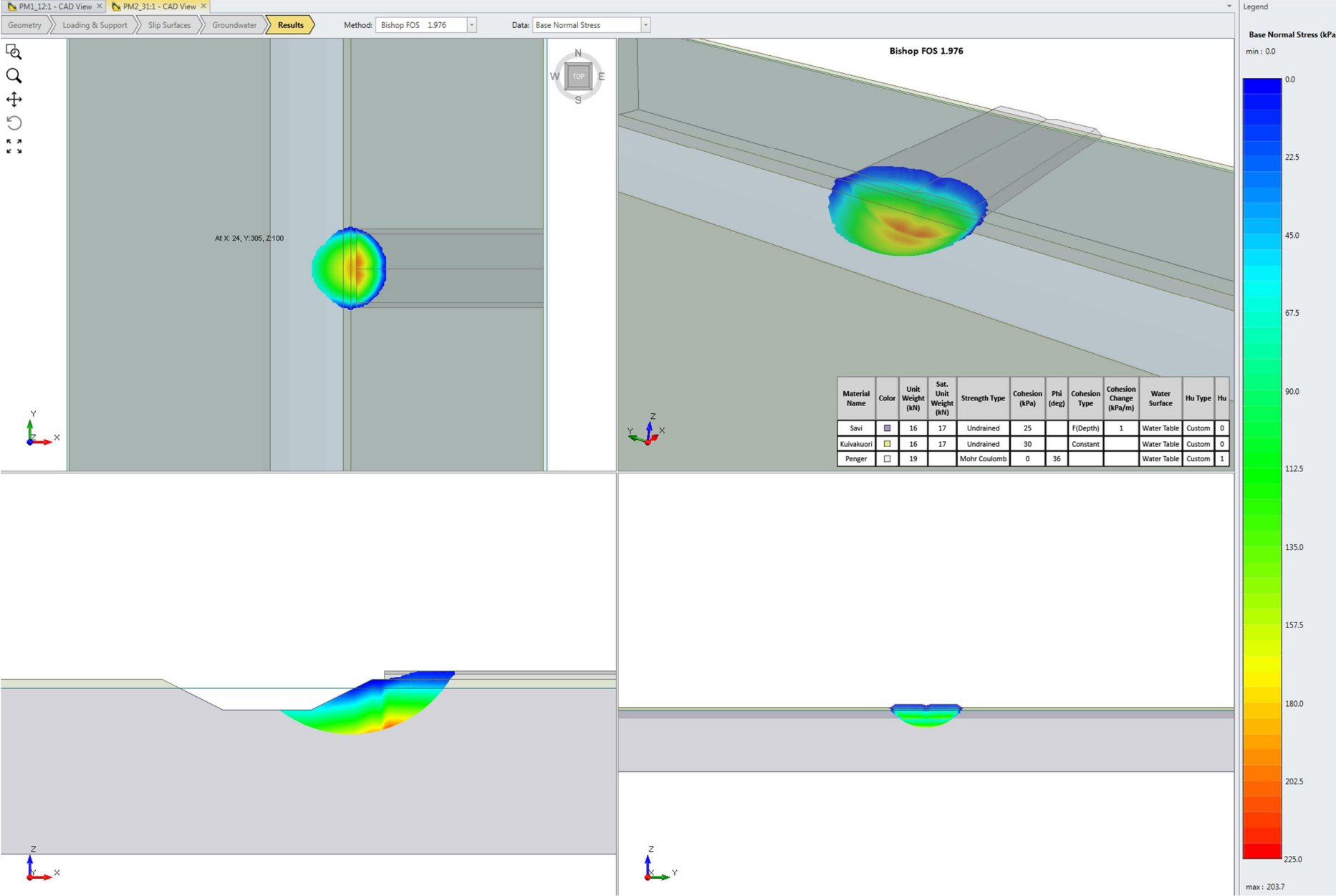




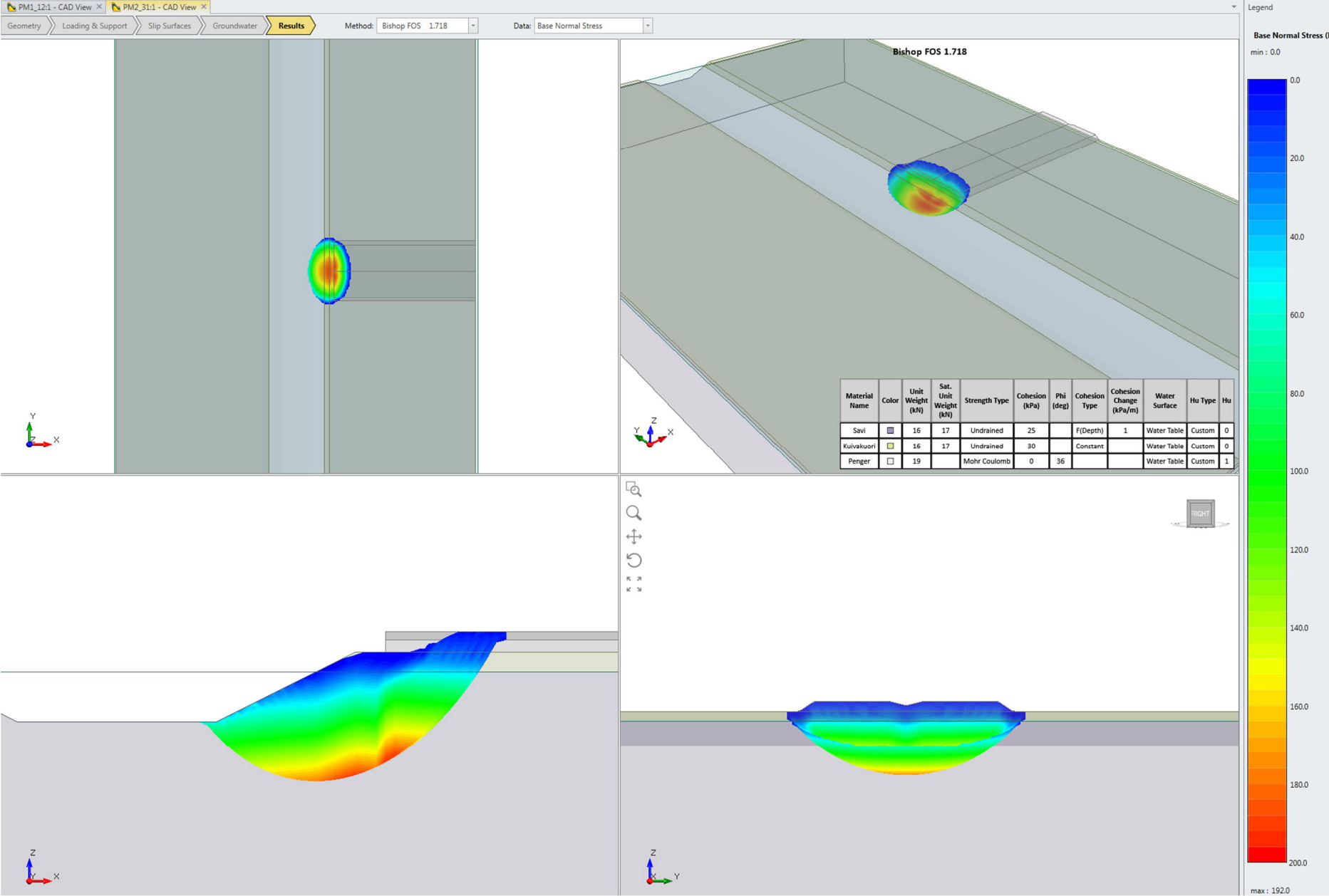
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.



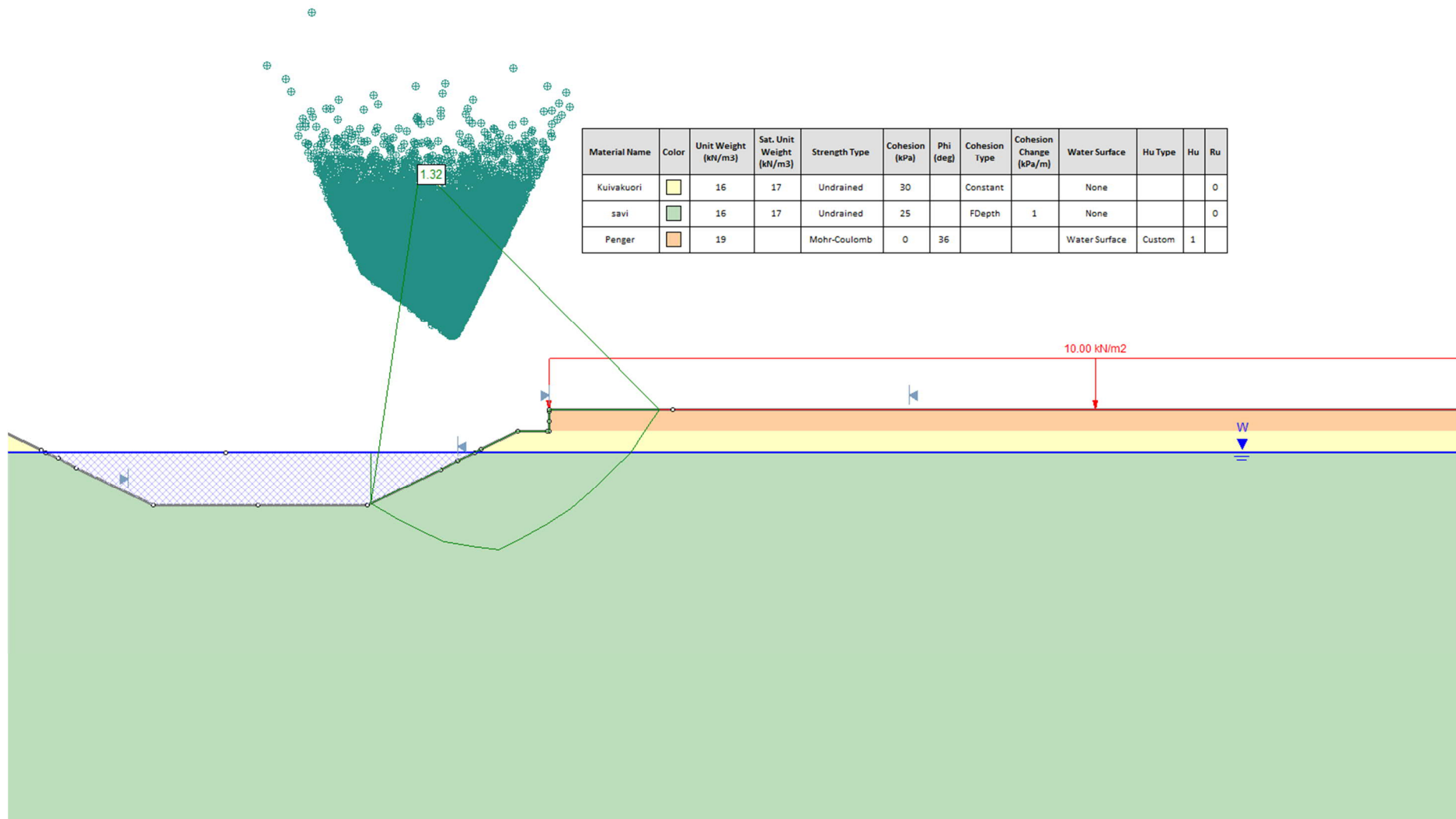
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.



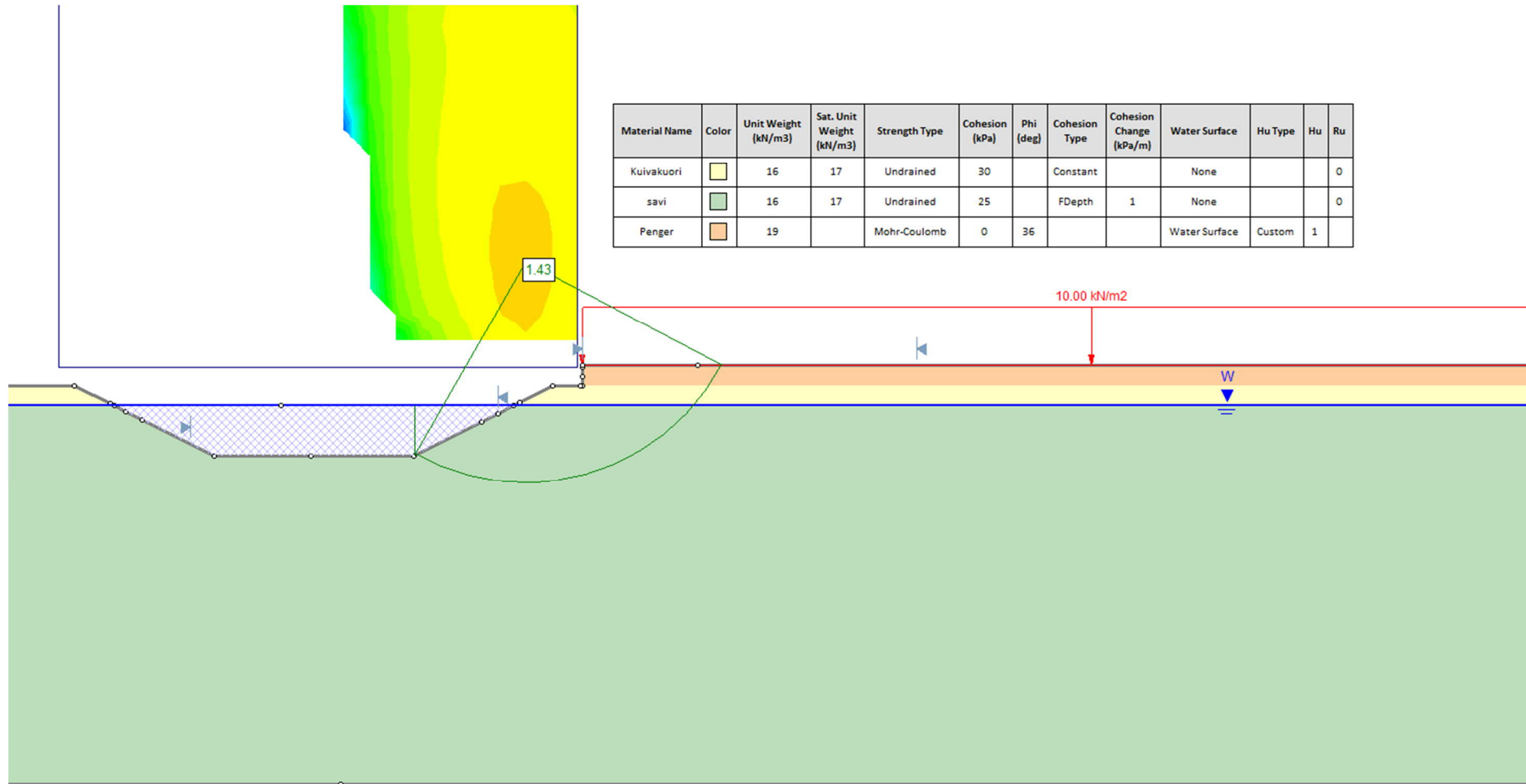
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.

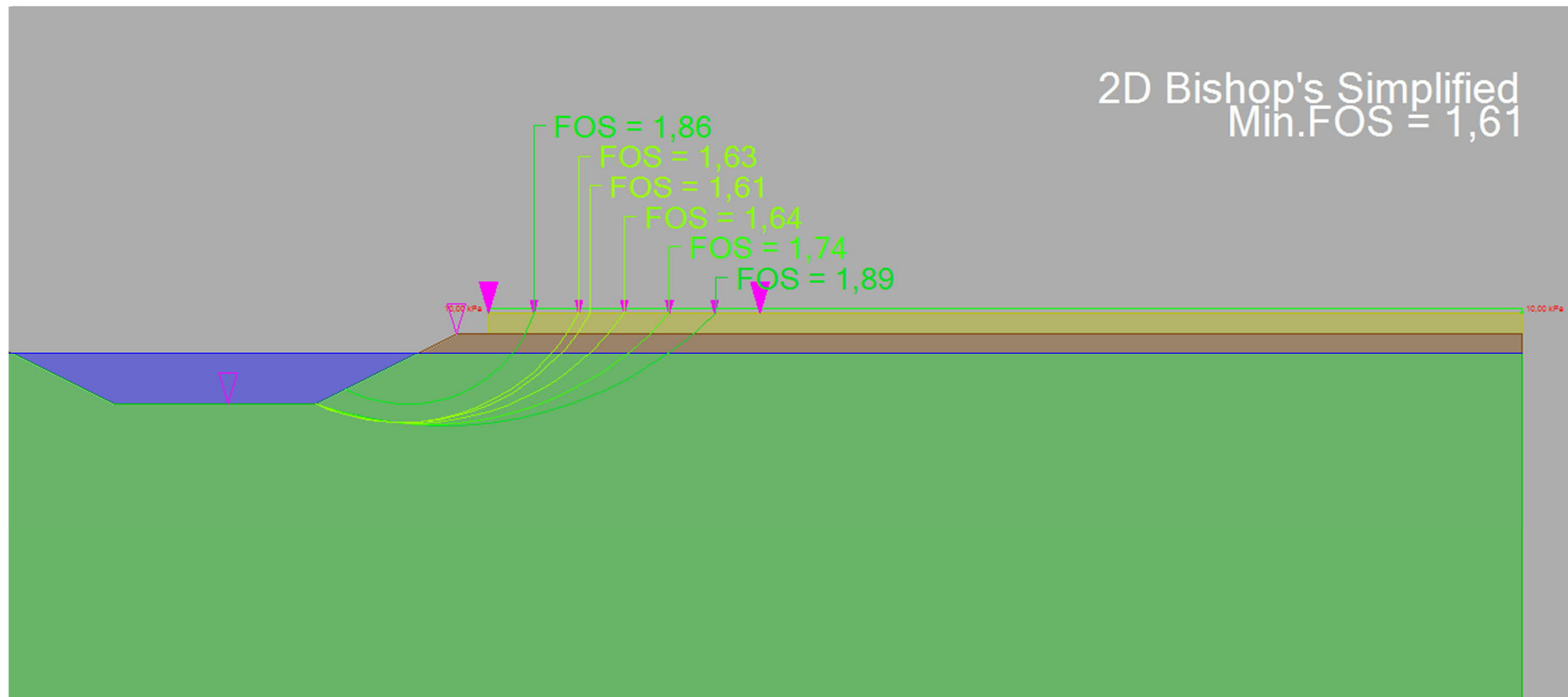


Liite 12. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyypin 2. Moottoritiepenget.

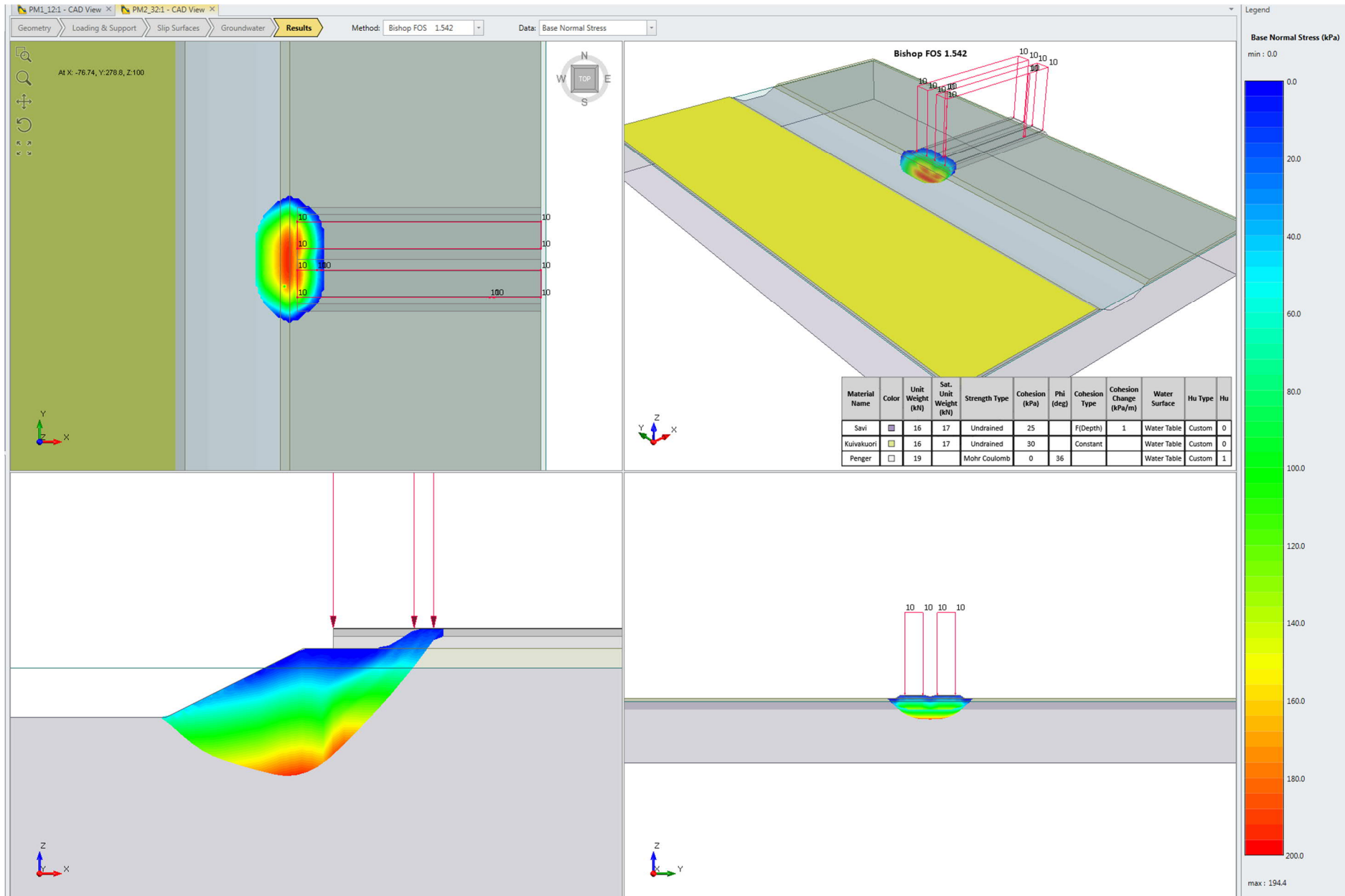


Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.

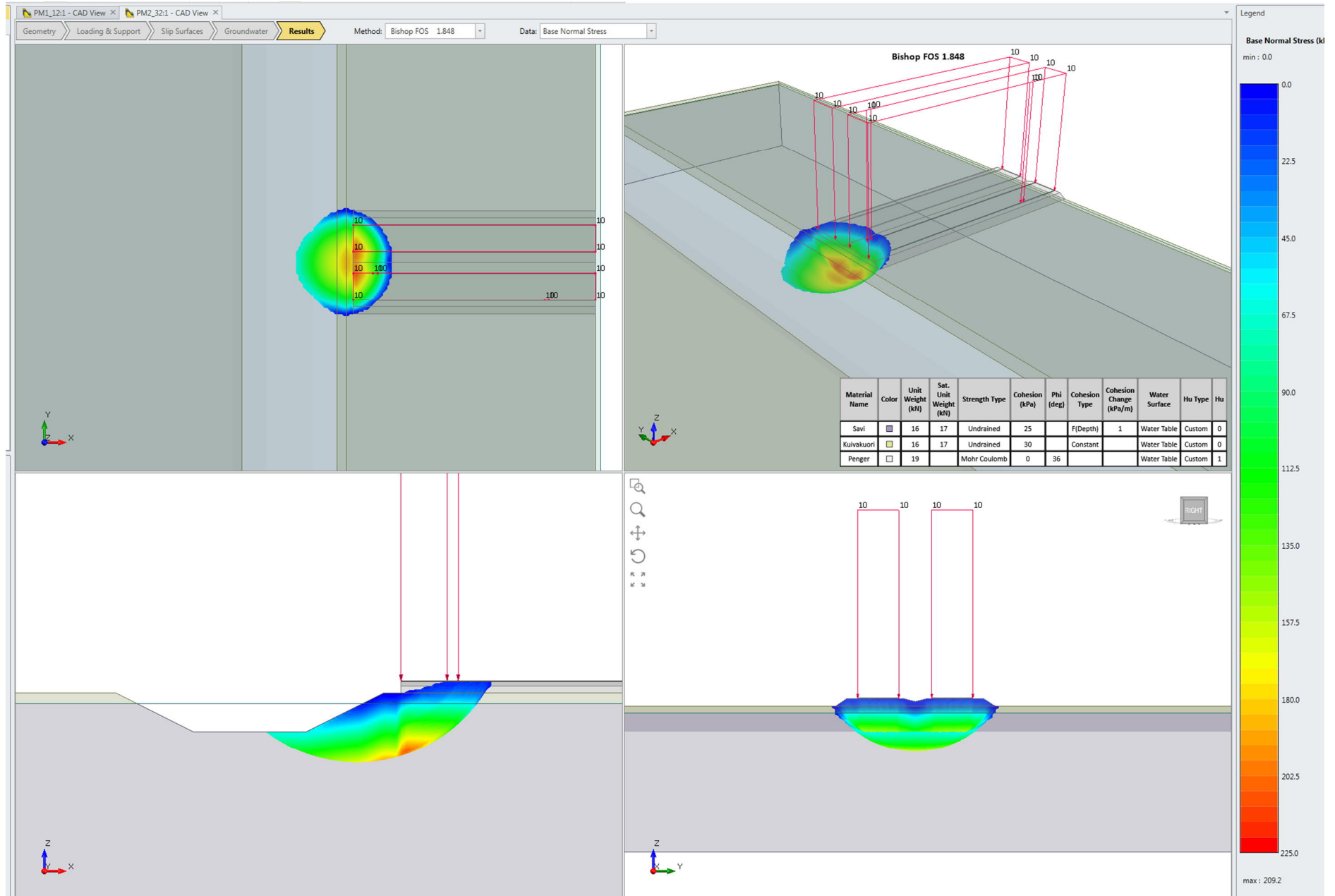




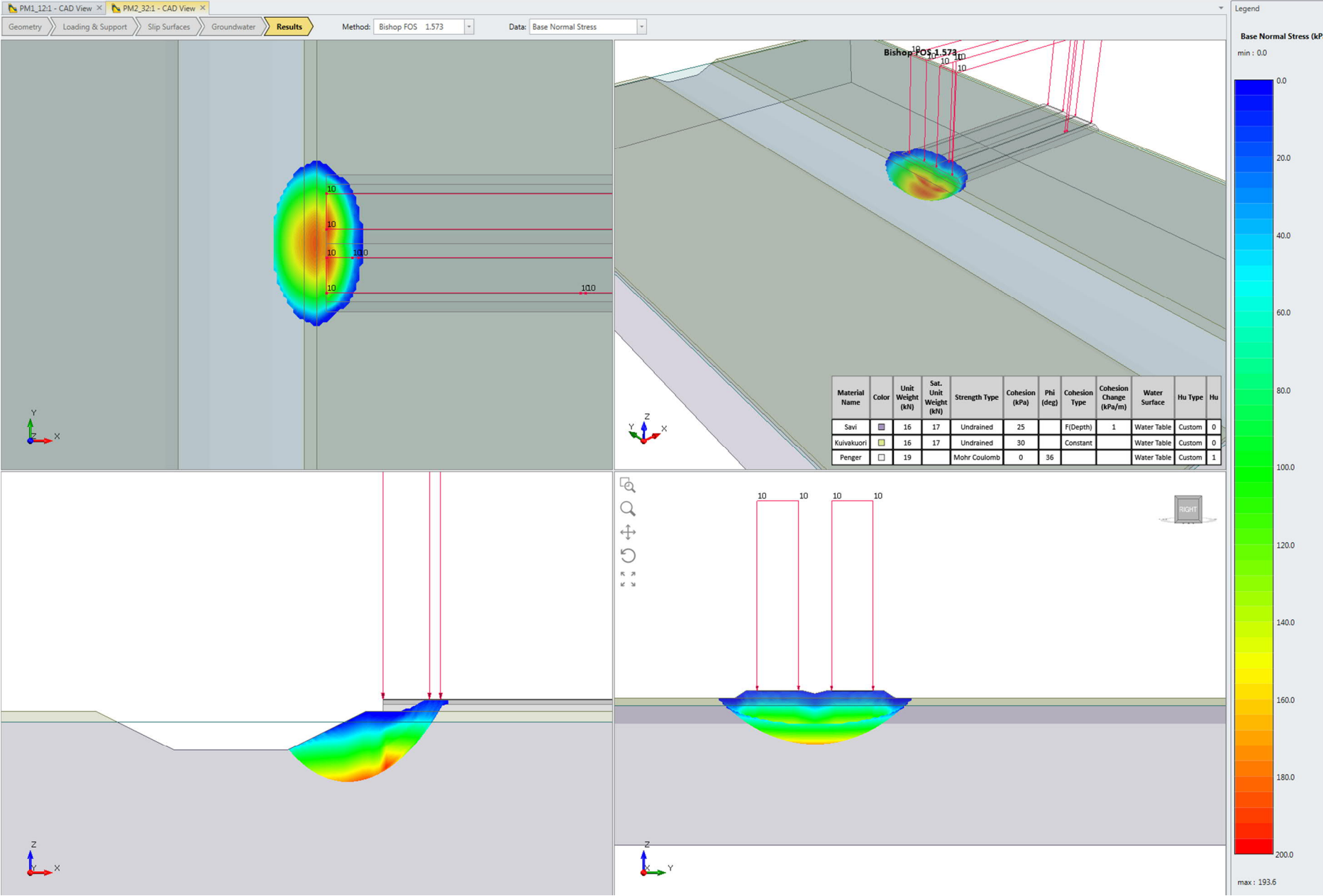
Liite 12. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyppi 2. Moottoritiepengeri.



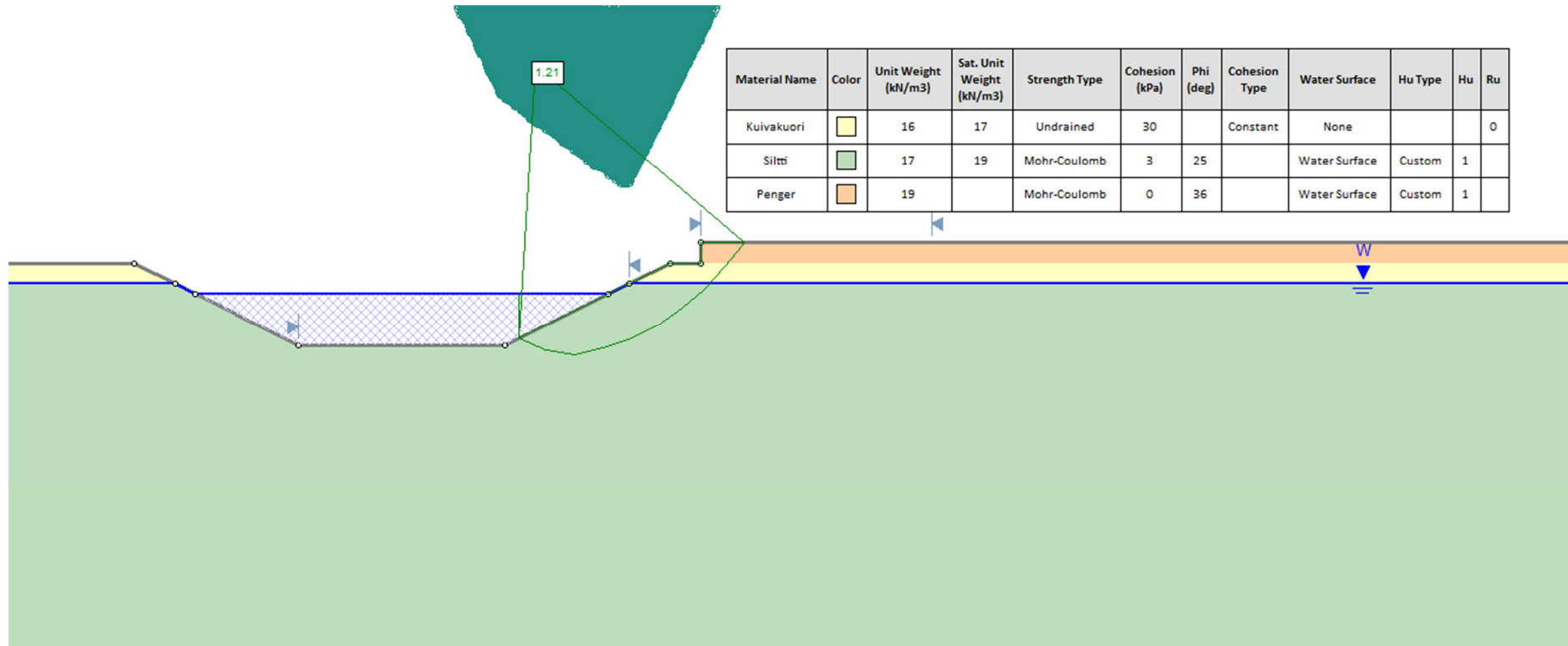
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepengerr.



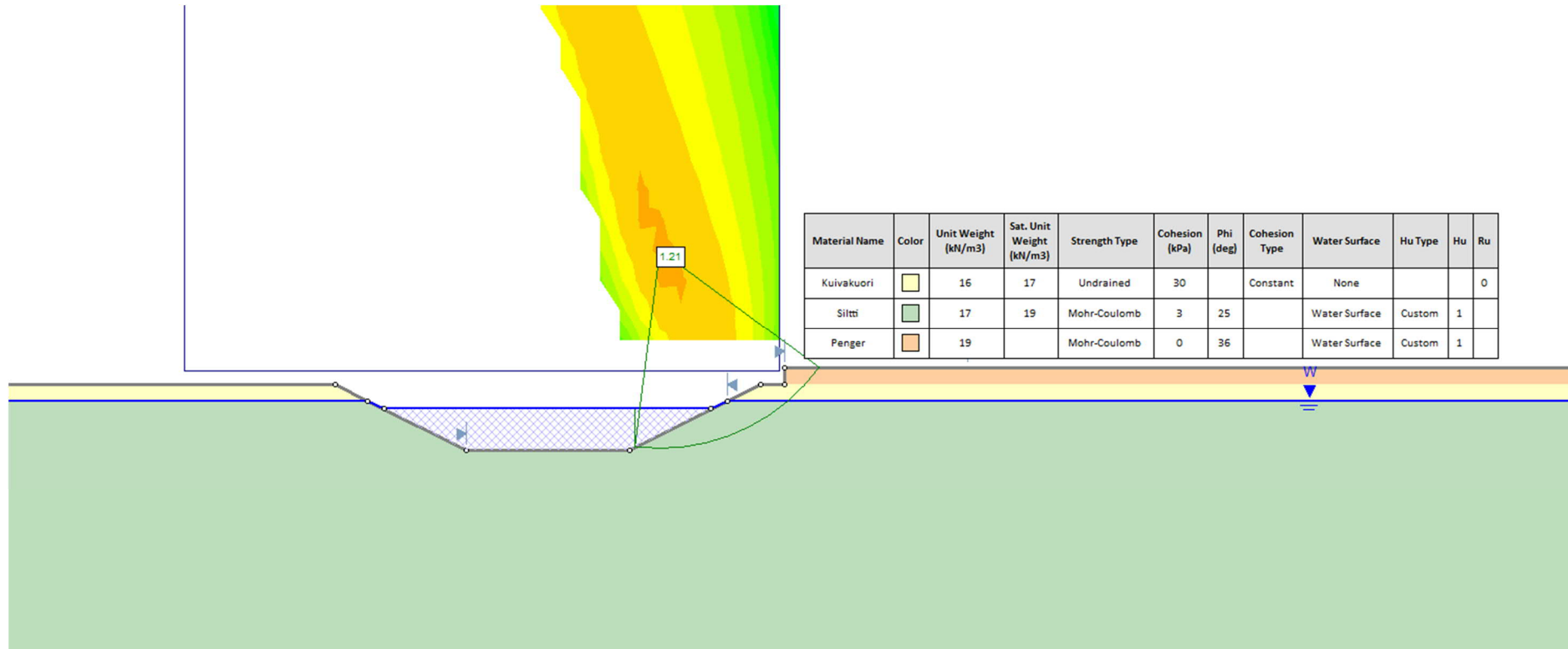
Liite 12. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.



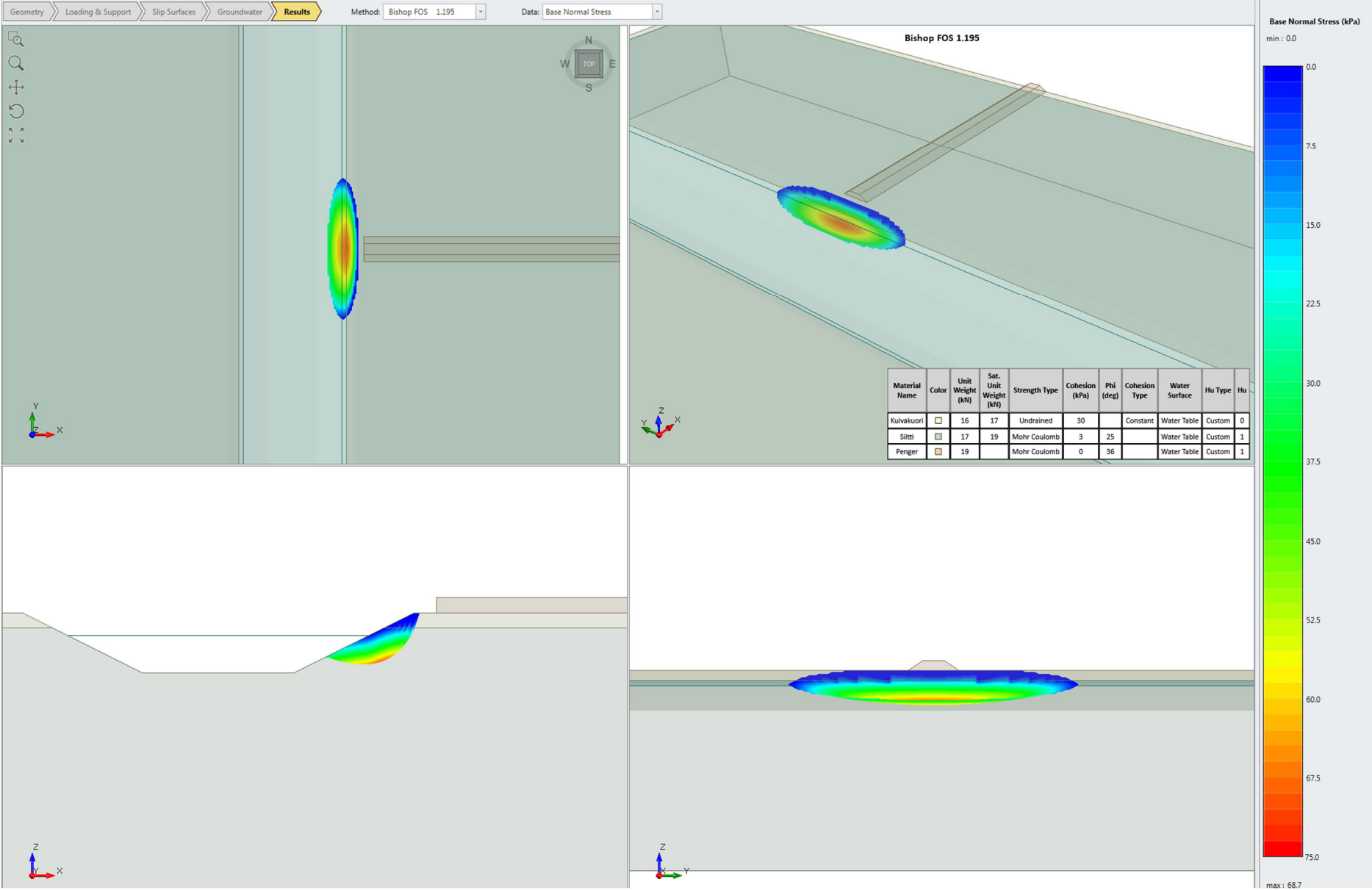
Liite 13. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Yksiraiteinen ratapenger.

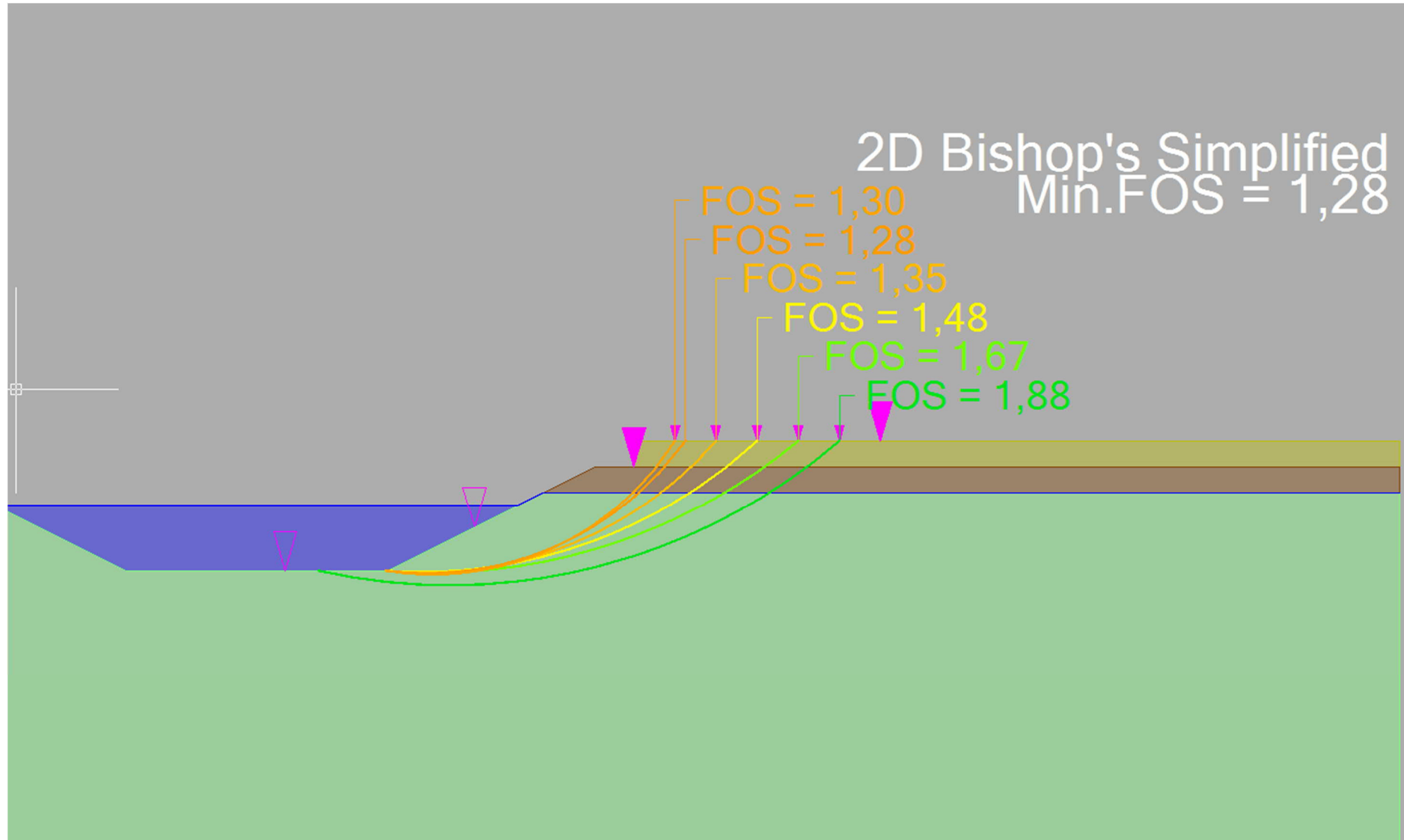


Liite 13. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

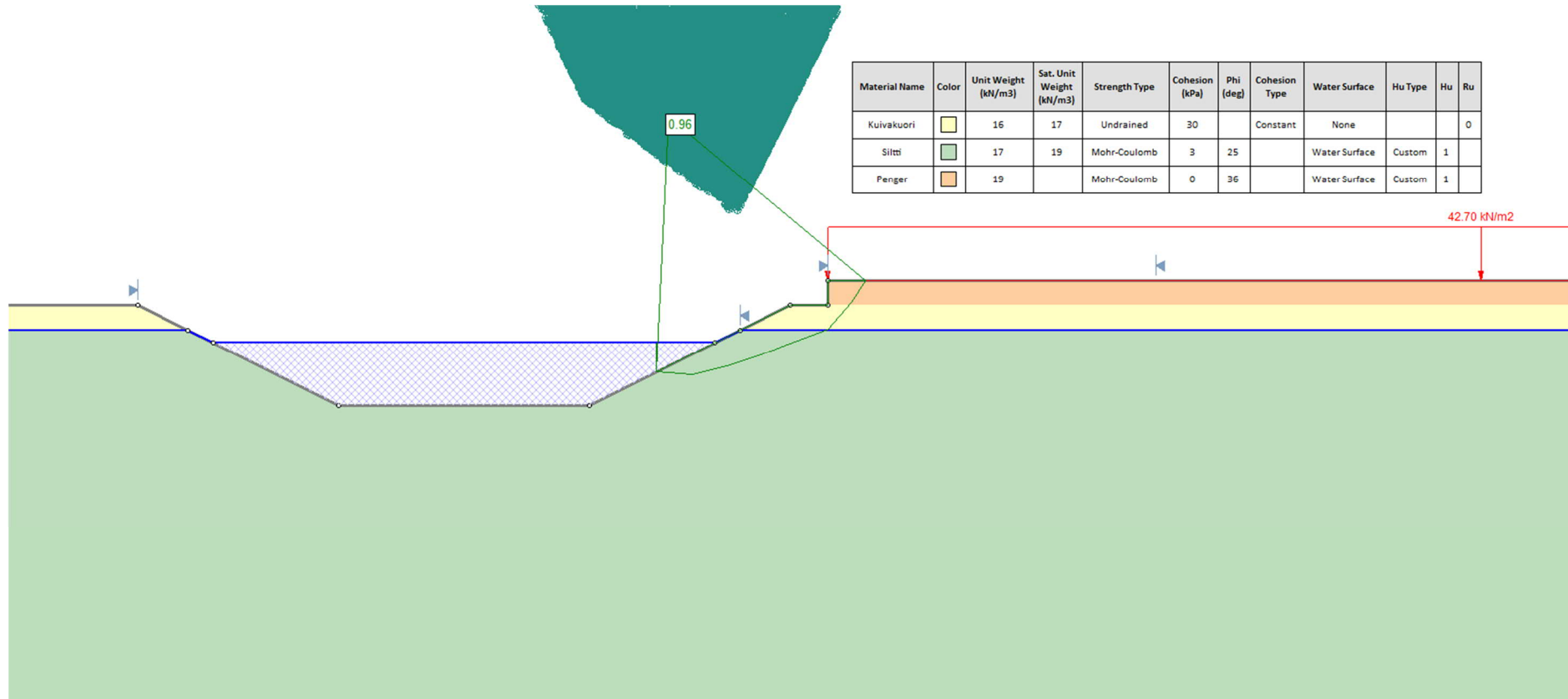


Liite 13. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

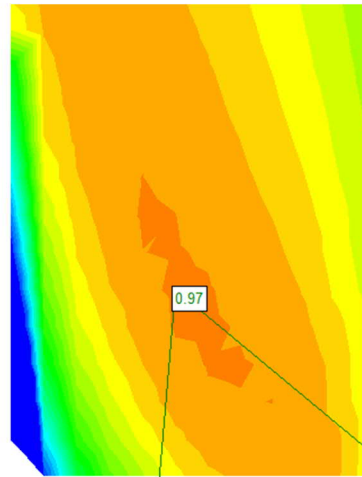




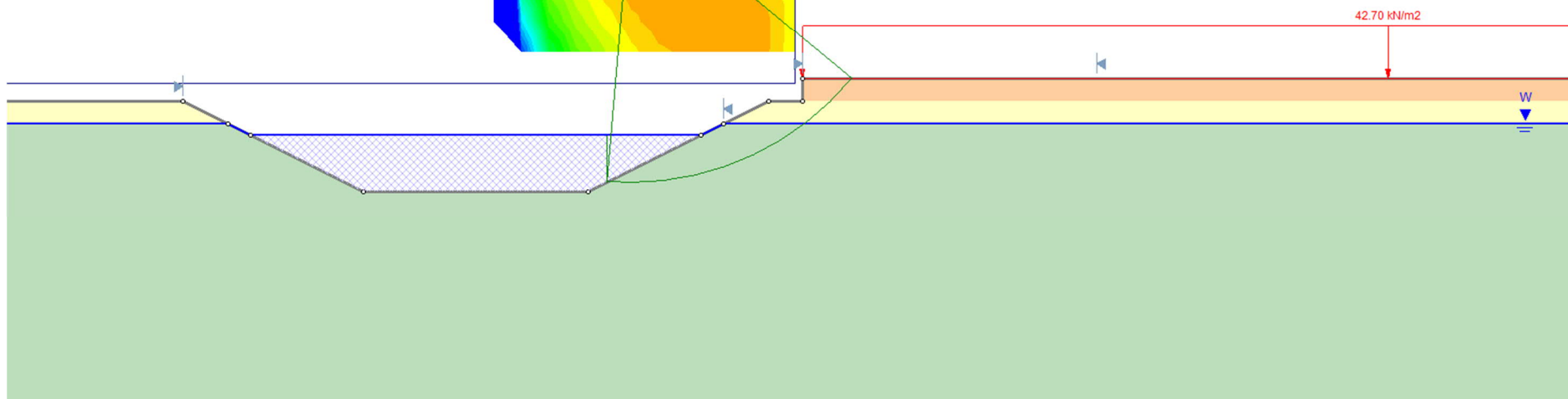
Liite 13. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Yksiraiteinen ratapenger.



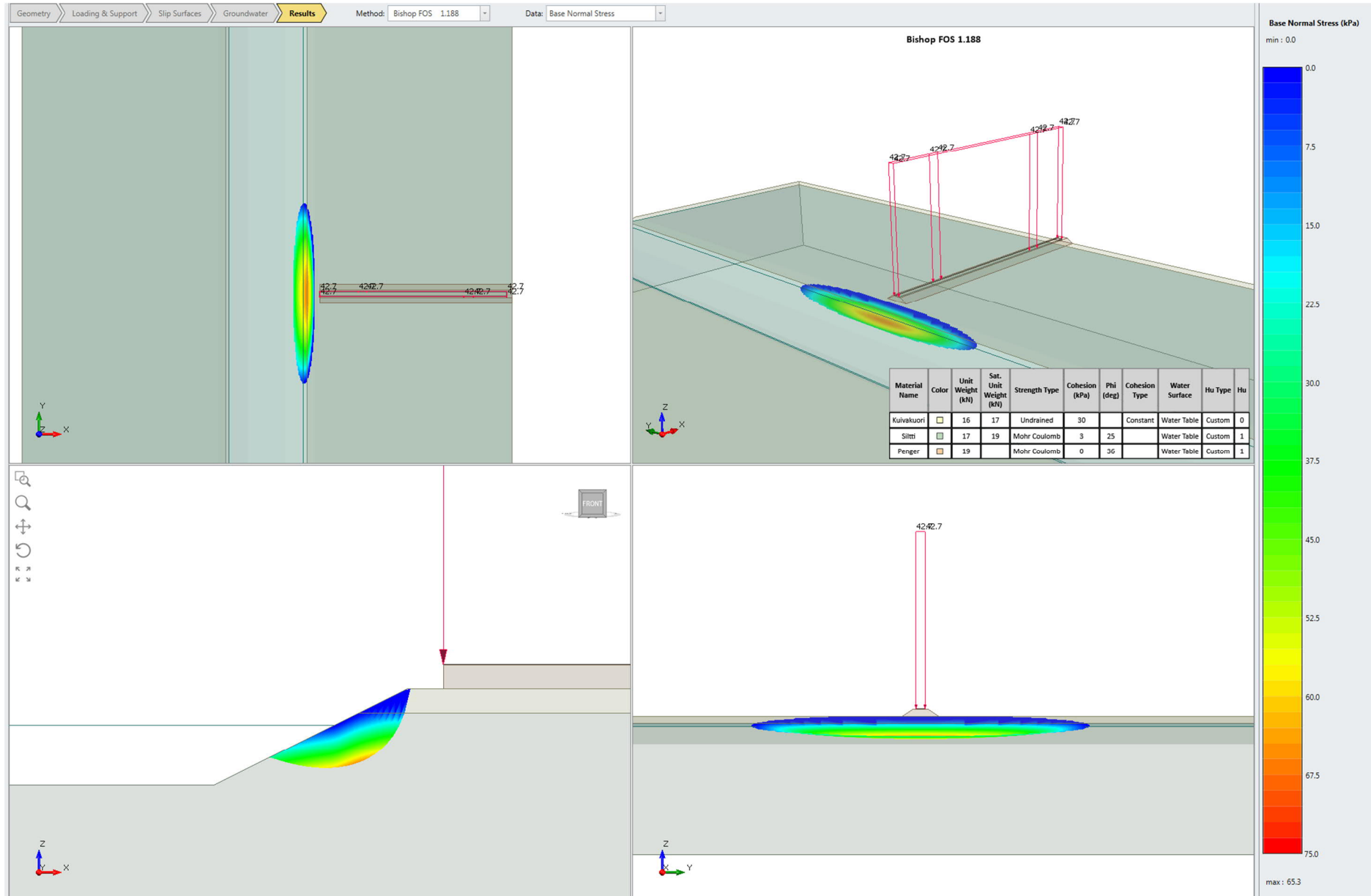
Liite 13. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

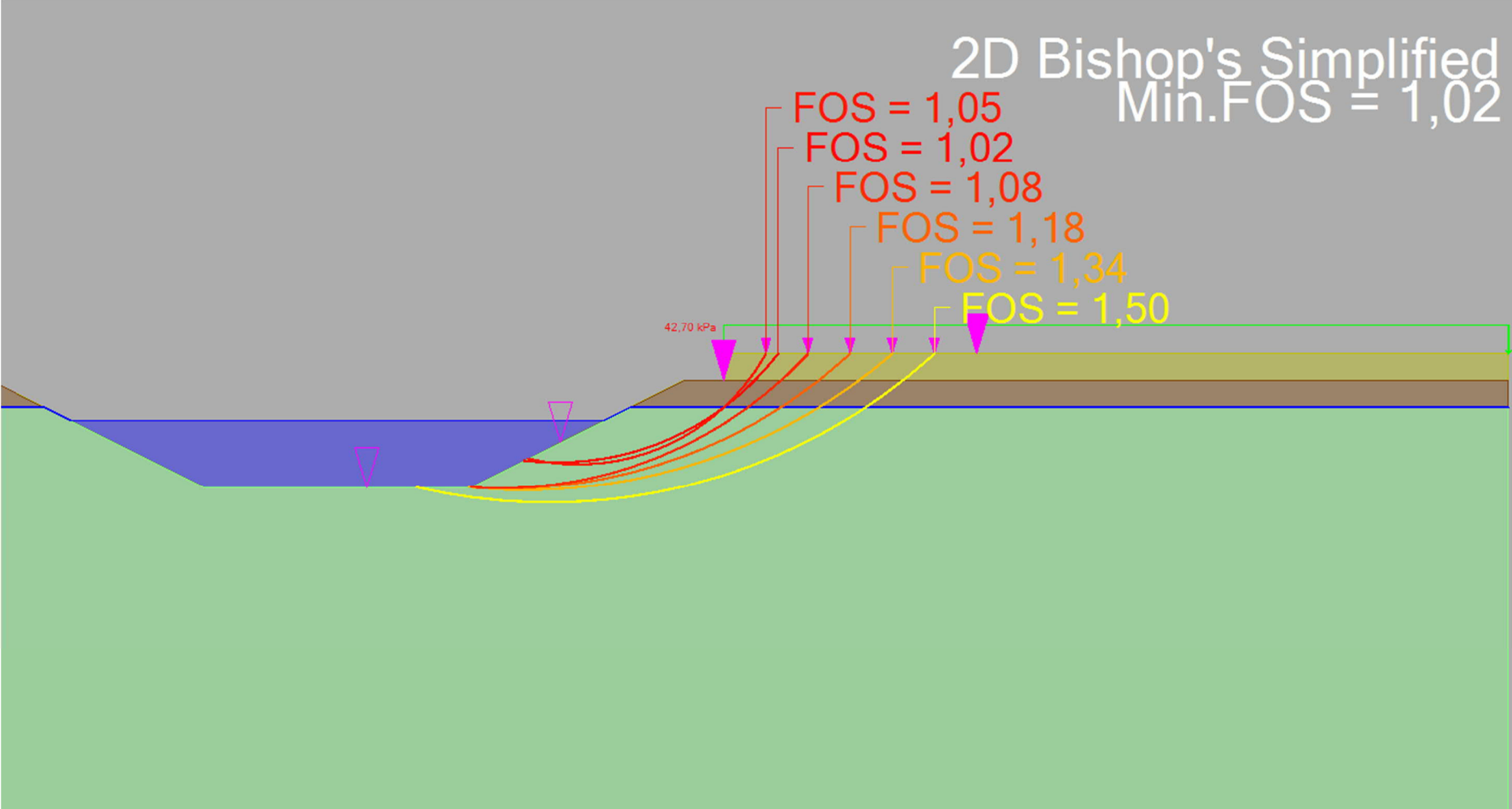


Material Name	Color	Unit Weight [kN/m ³]	Sat. Unit Weight [kN/m ³]	Strength Type	Cohesion [kPa]	Phi [deg]	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Siltti		17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36		Water Surface	Custom	1	

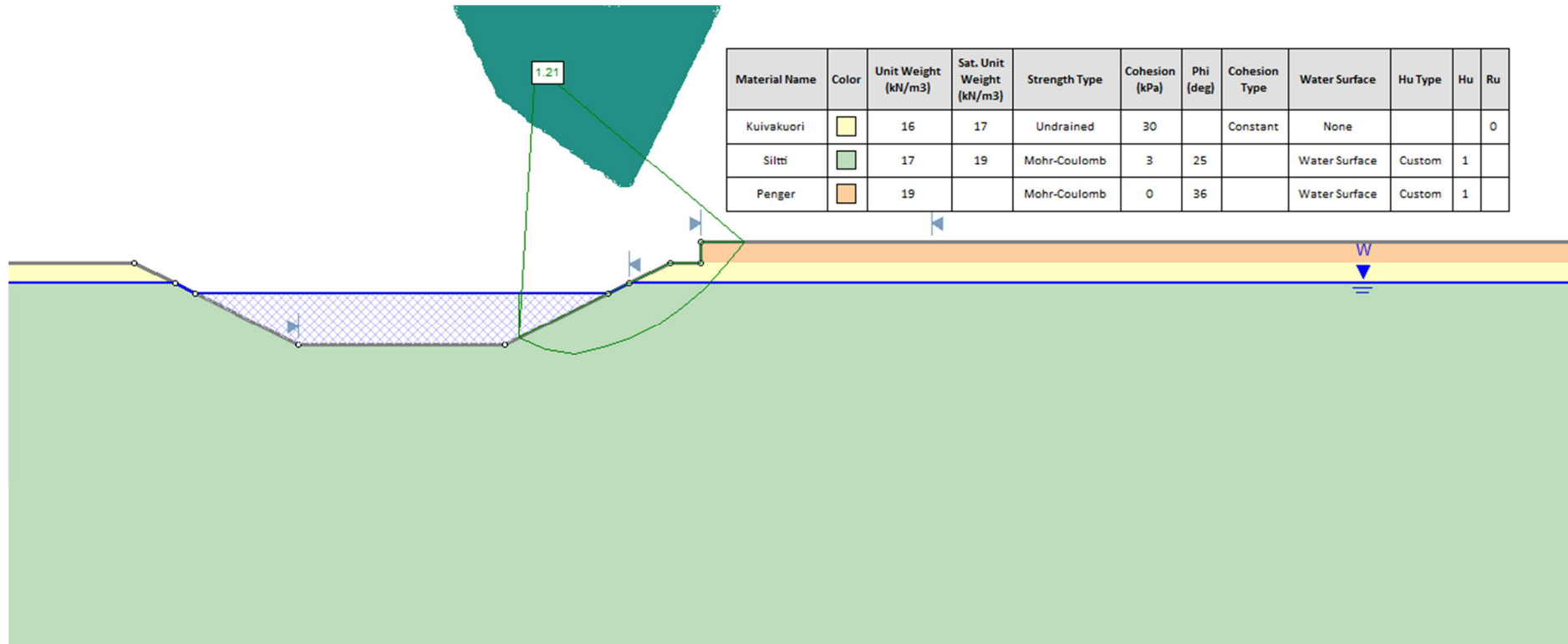


Liite 13. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyypin 3. Yksiraiteinen ratapenger.

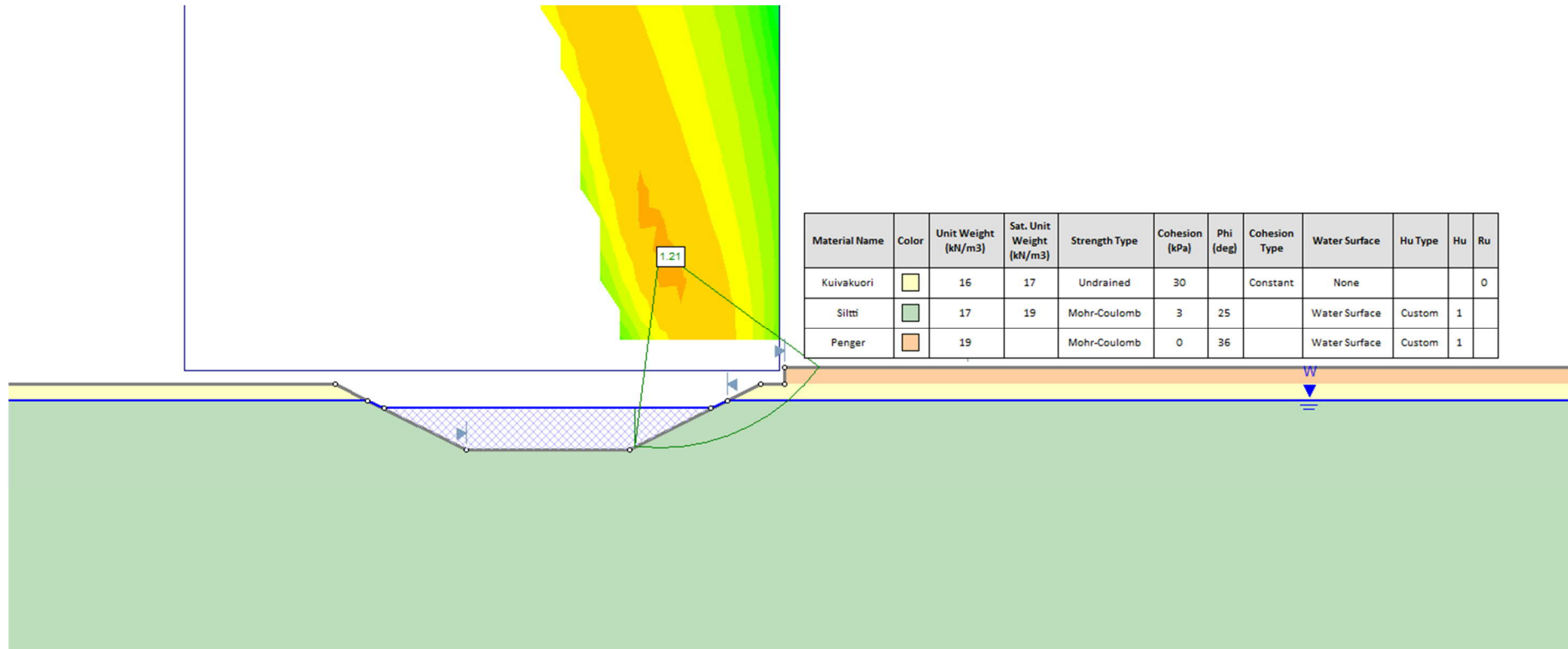


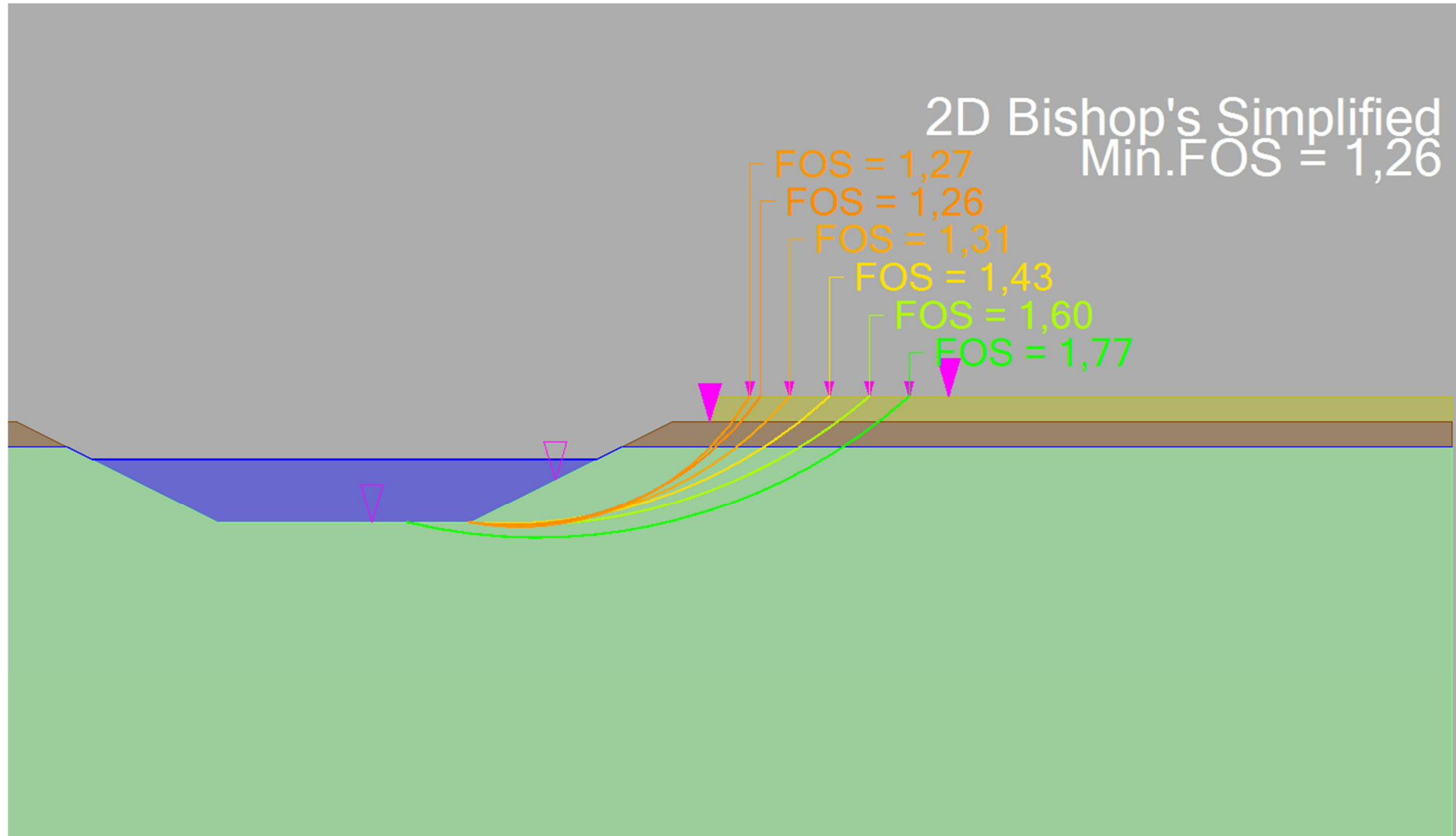


Liite 14. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

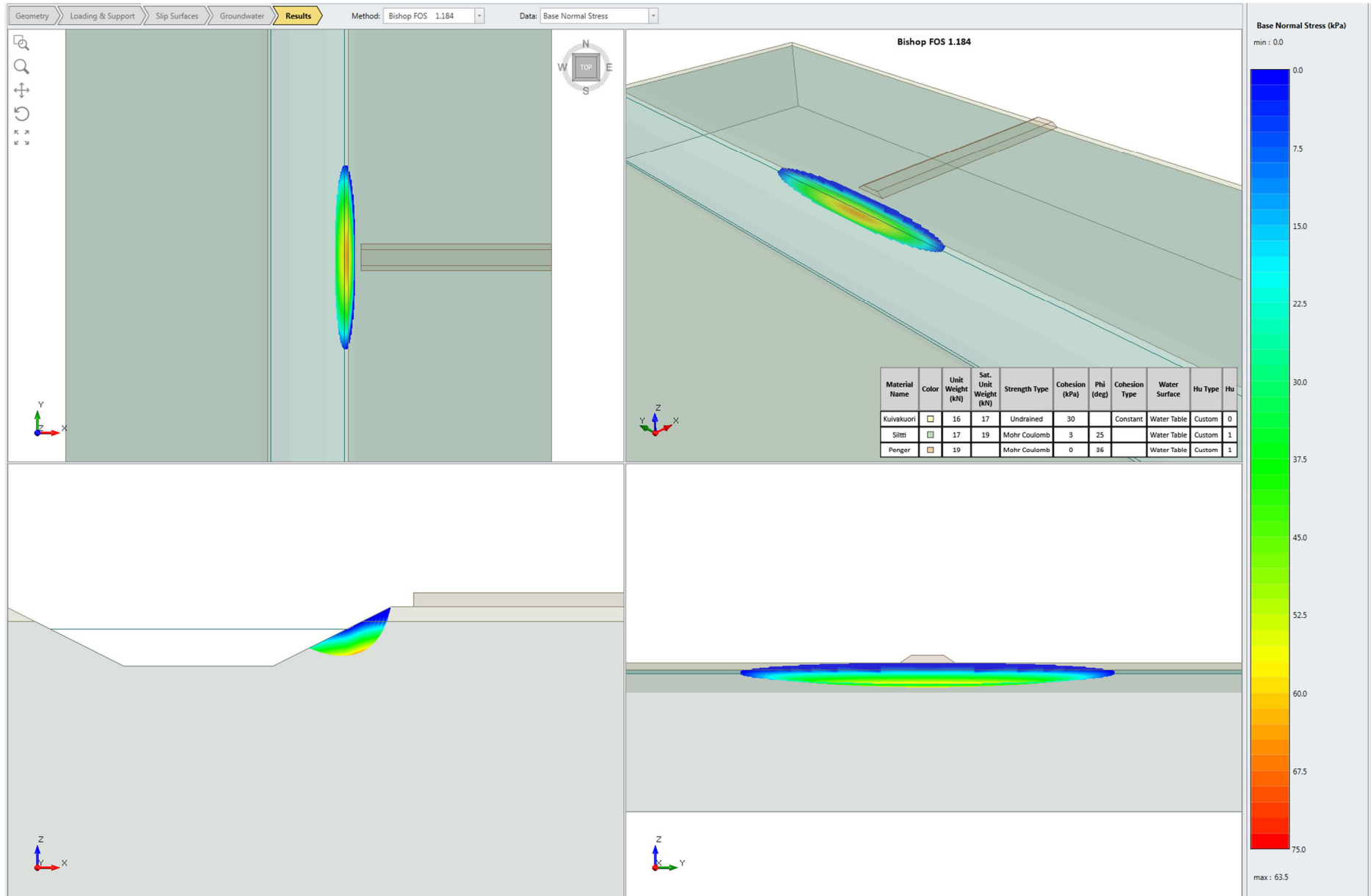


Liite 14. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

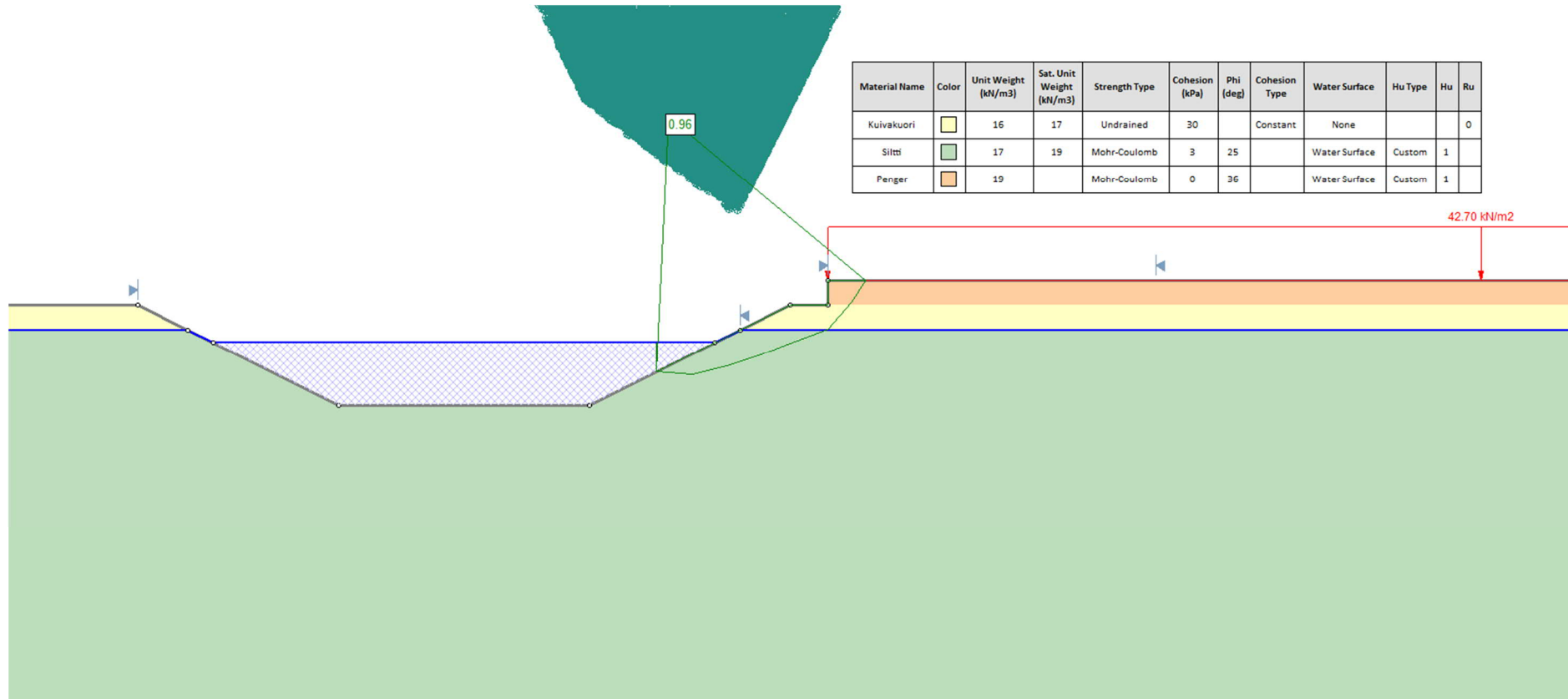




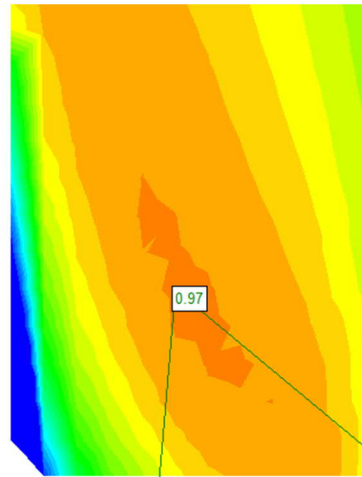
Liite 14. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.






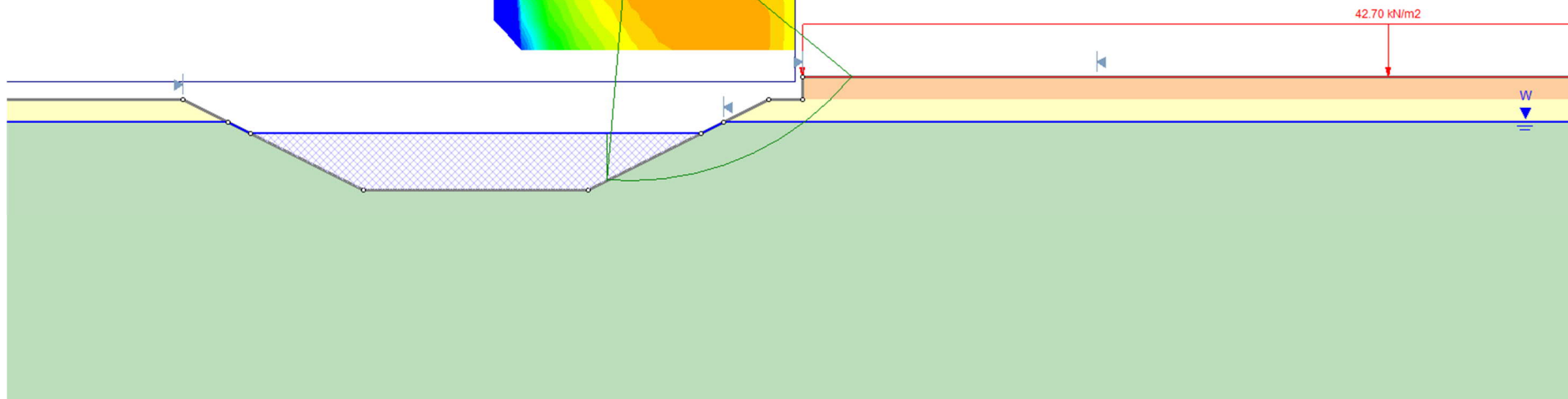
Liite 14. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Kaksiraiteinen ratapenger.



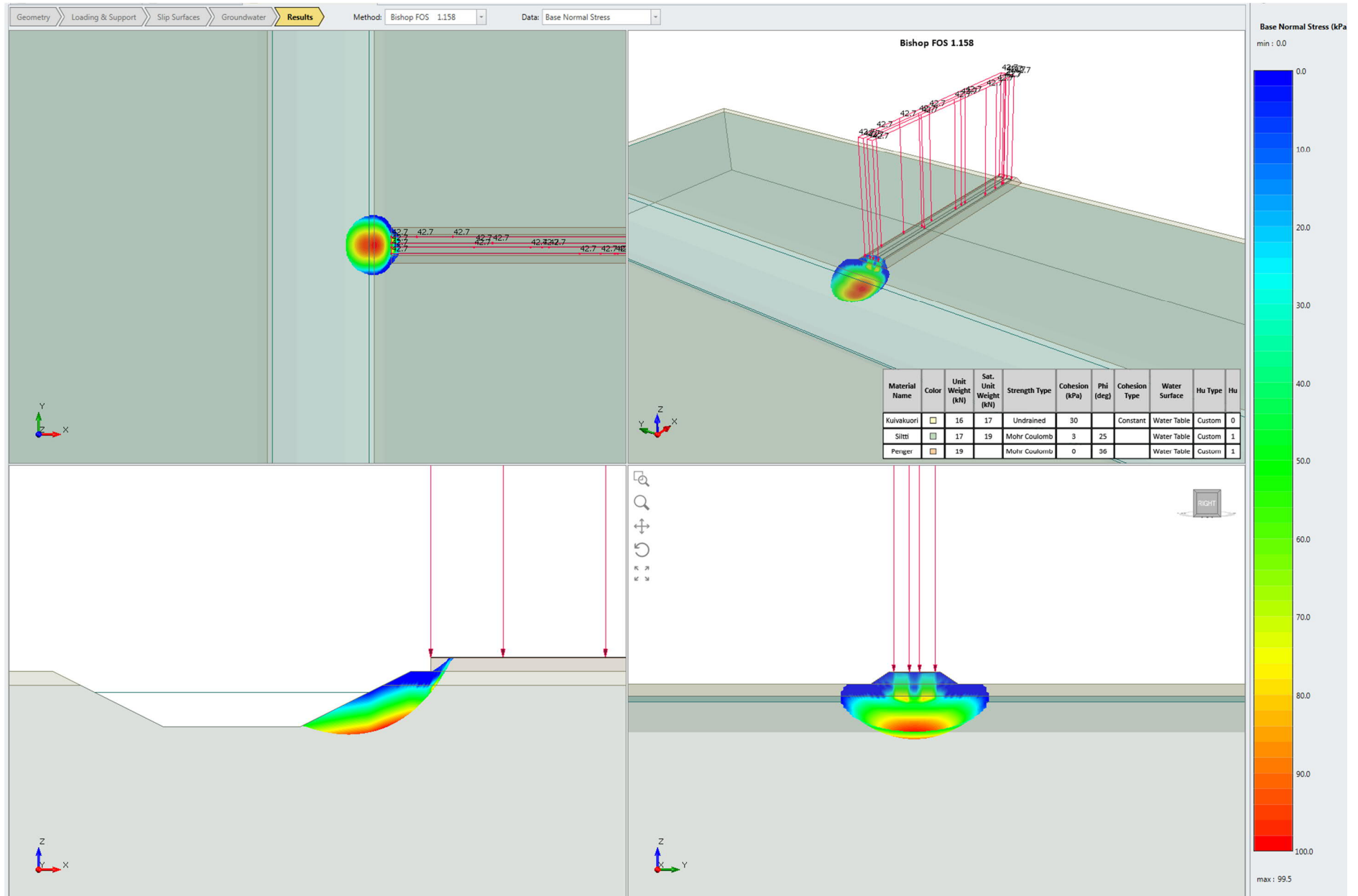
Liite 14. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

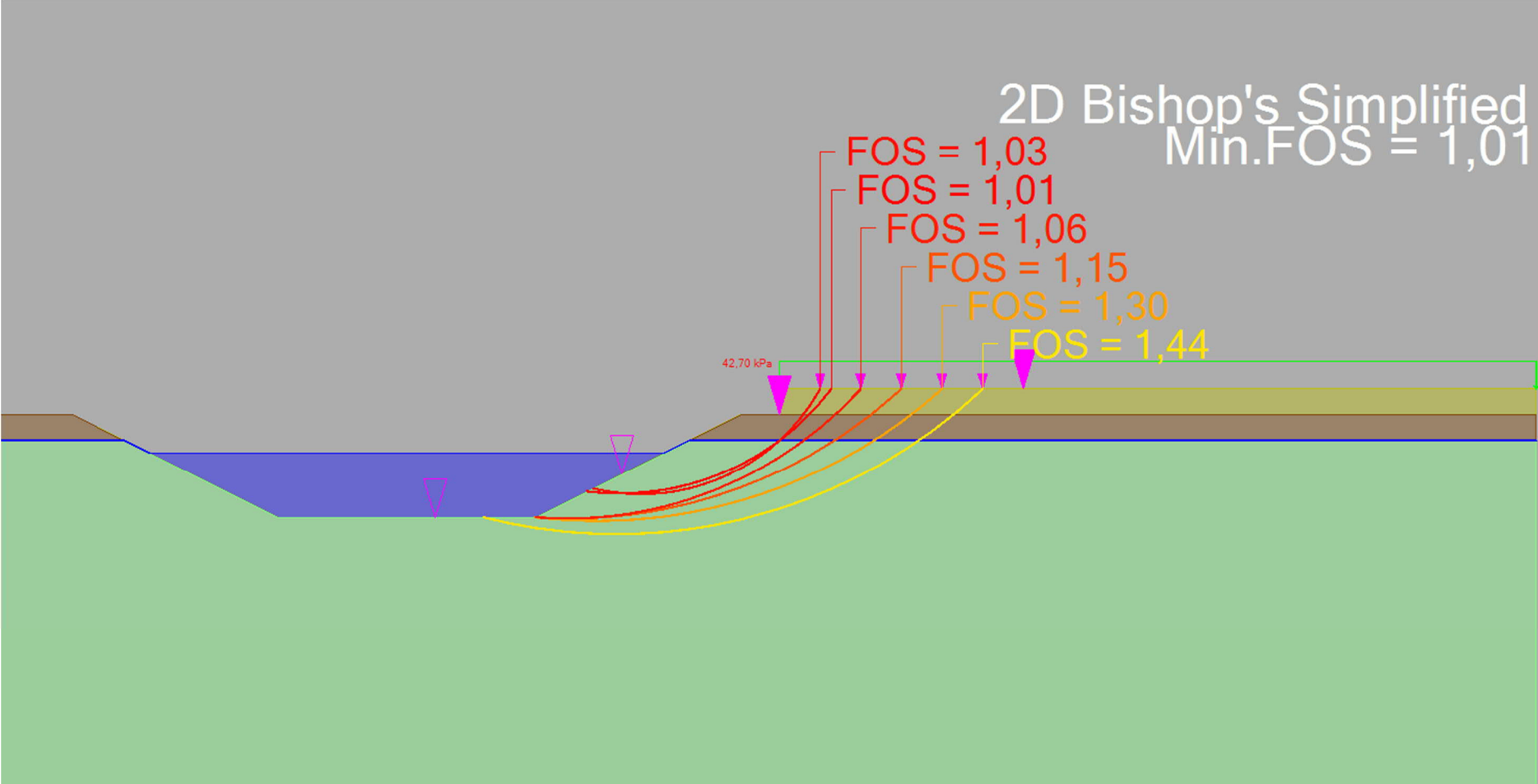


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Siltti		17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36		Water Surface	Custom	1	

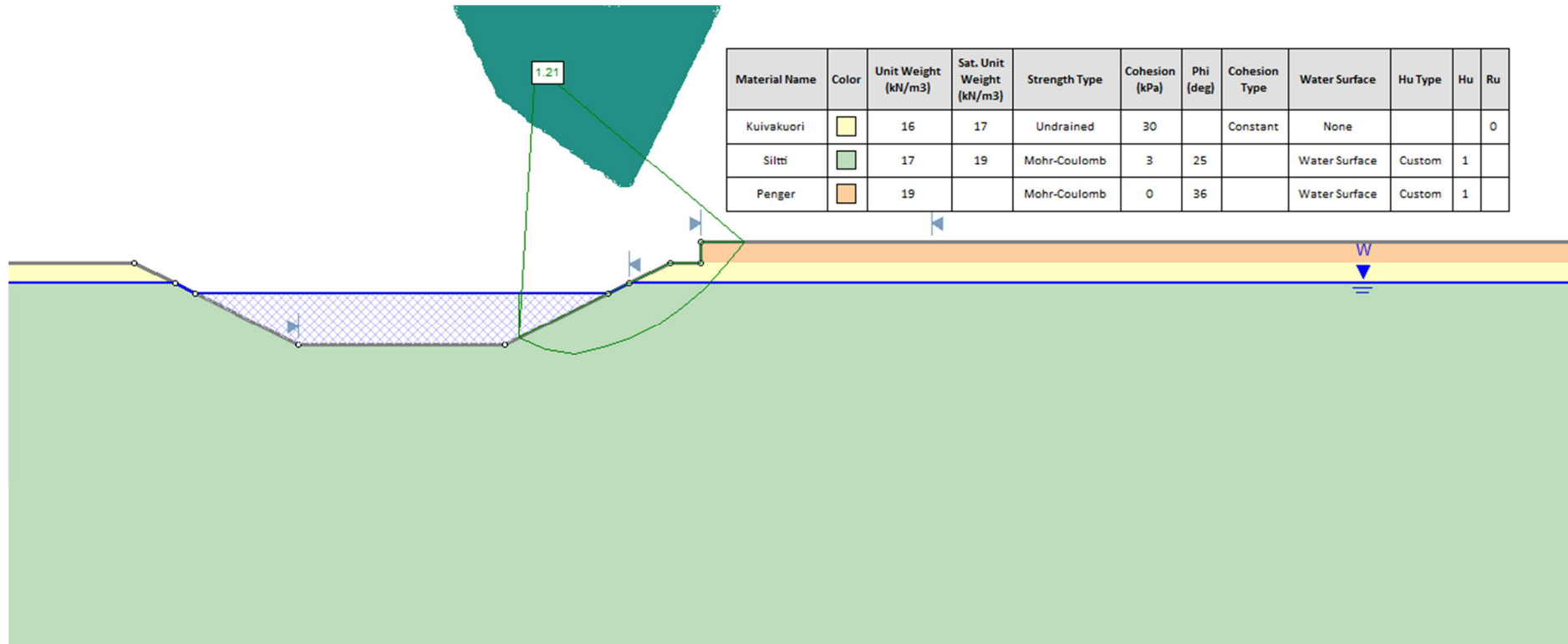


Liite 14. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyypin 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

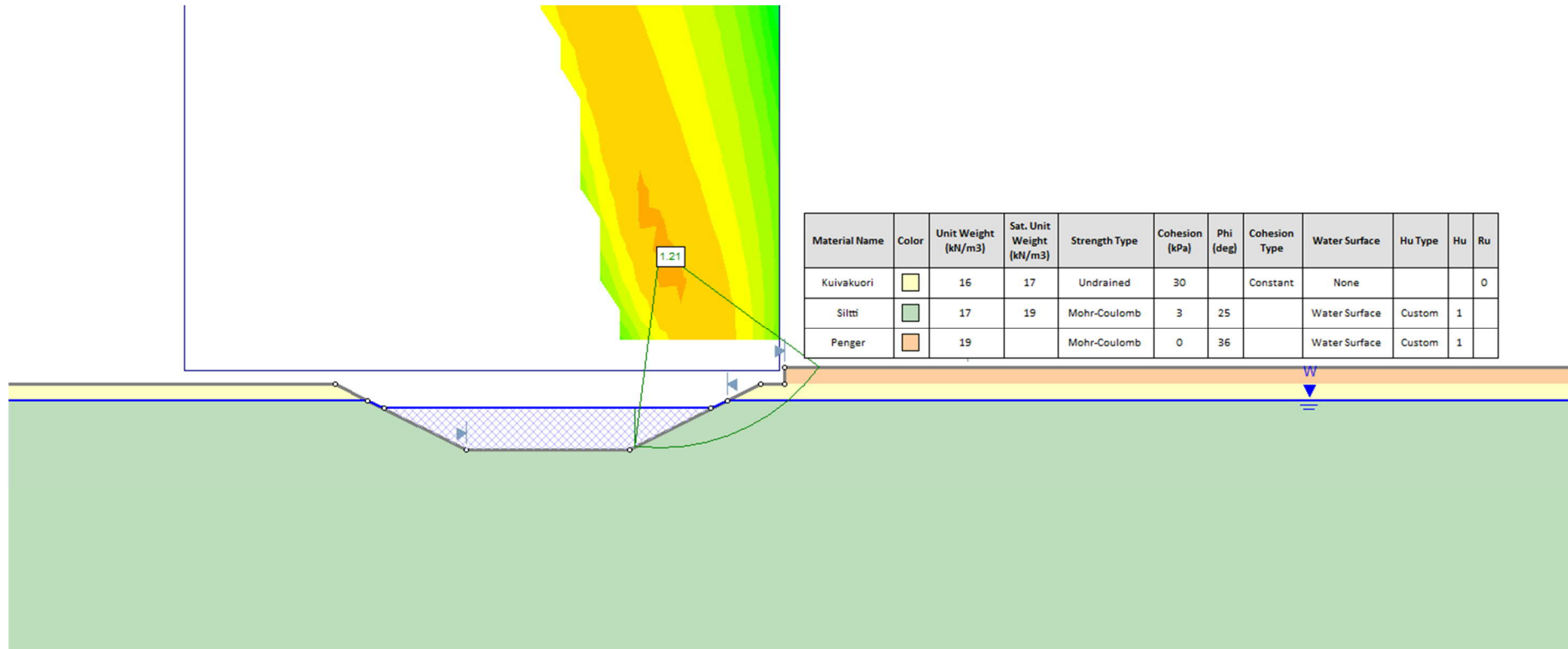




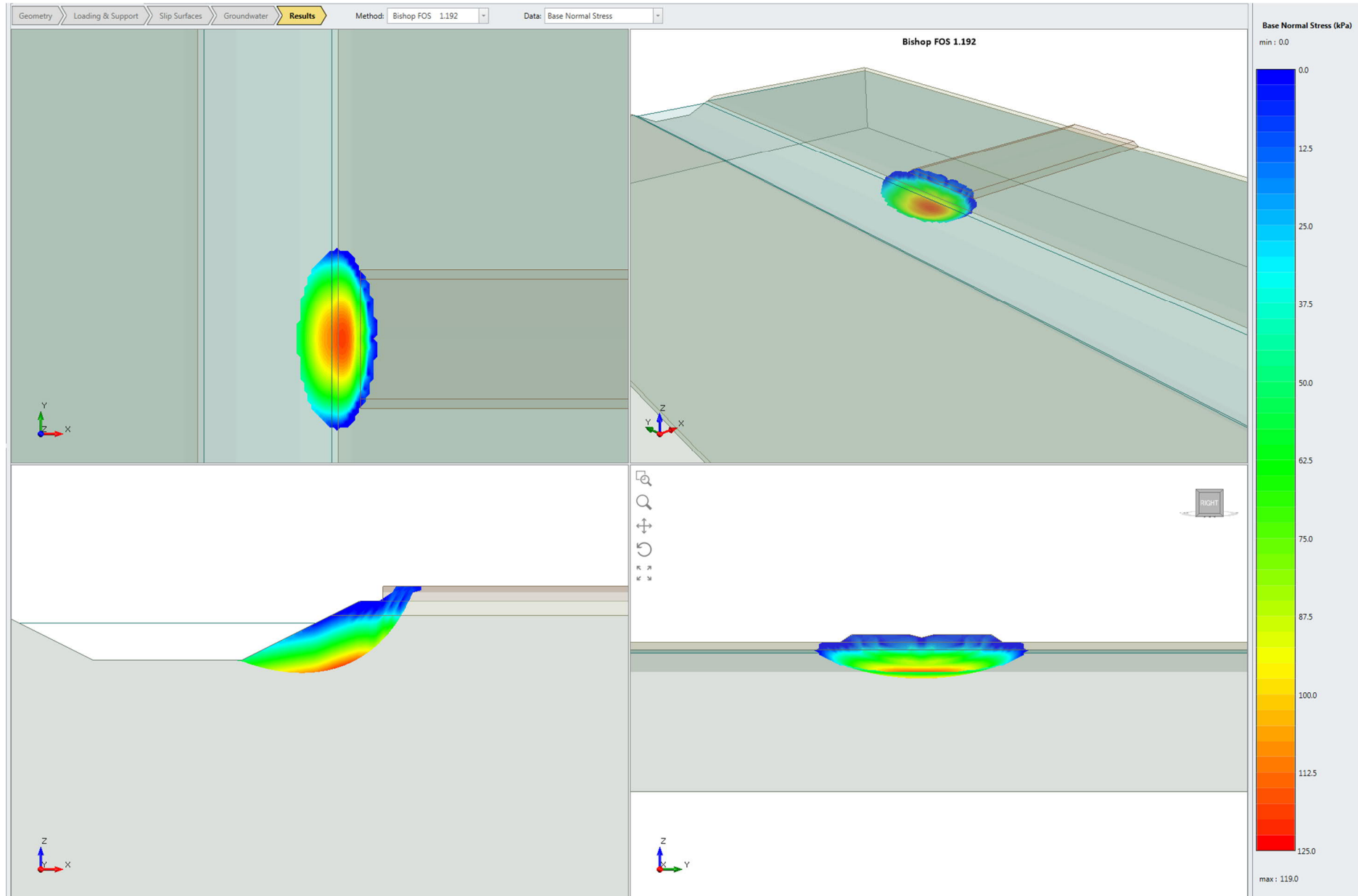
Liite 15. Stabiliateetilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Moottoritiepenget.

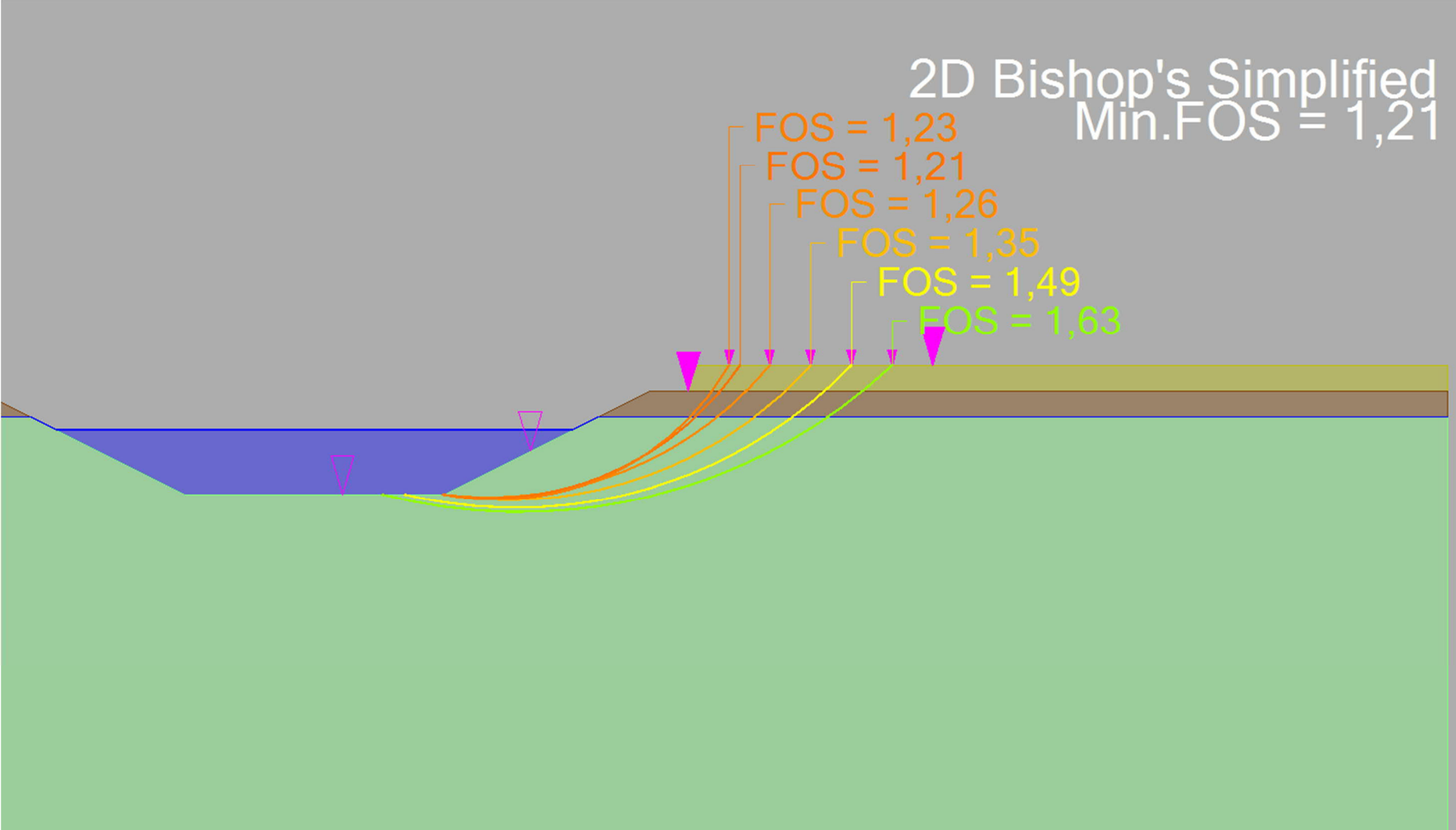


Liite 15. Stabiliateettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Moottoritiepenget.

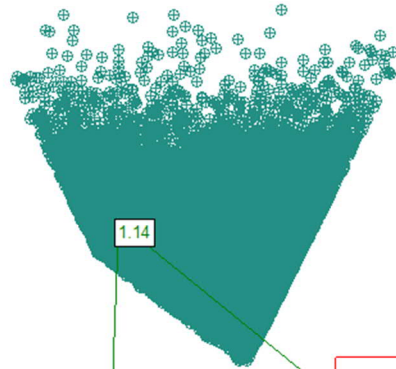





Liite 15. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 3. Moottoritiepenger.

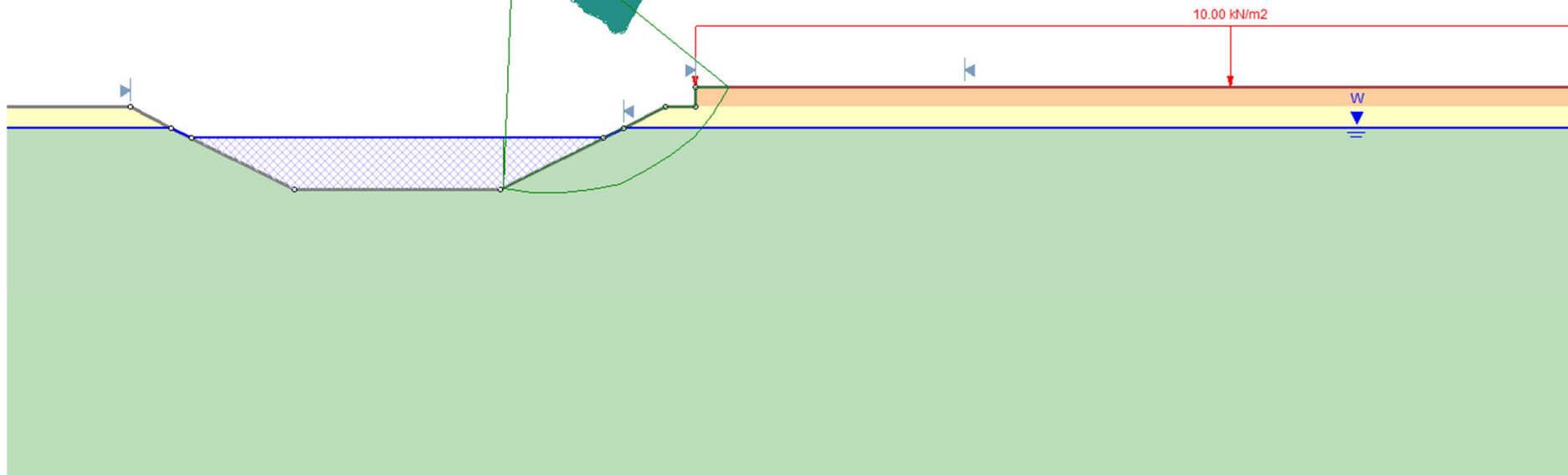




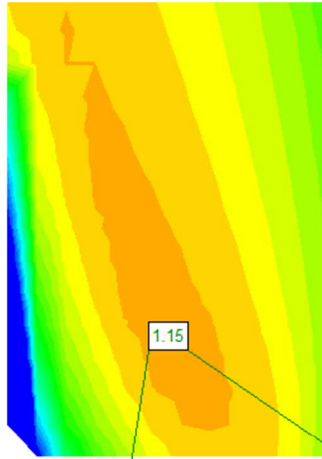
Liite 15. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohde pohjamaatyyppi 3. Moottoritiepenger.






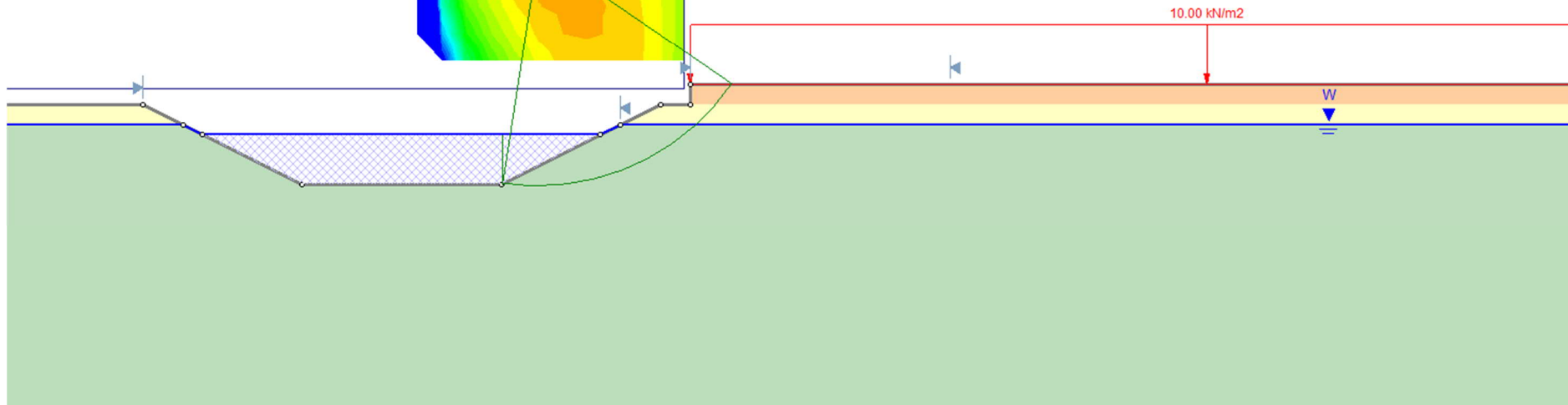
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Siltä		17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36		Water Surface	Custom	1	



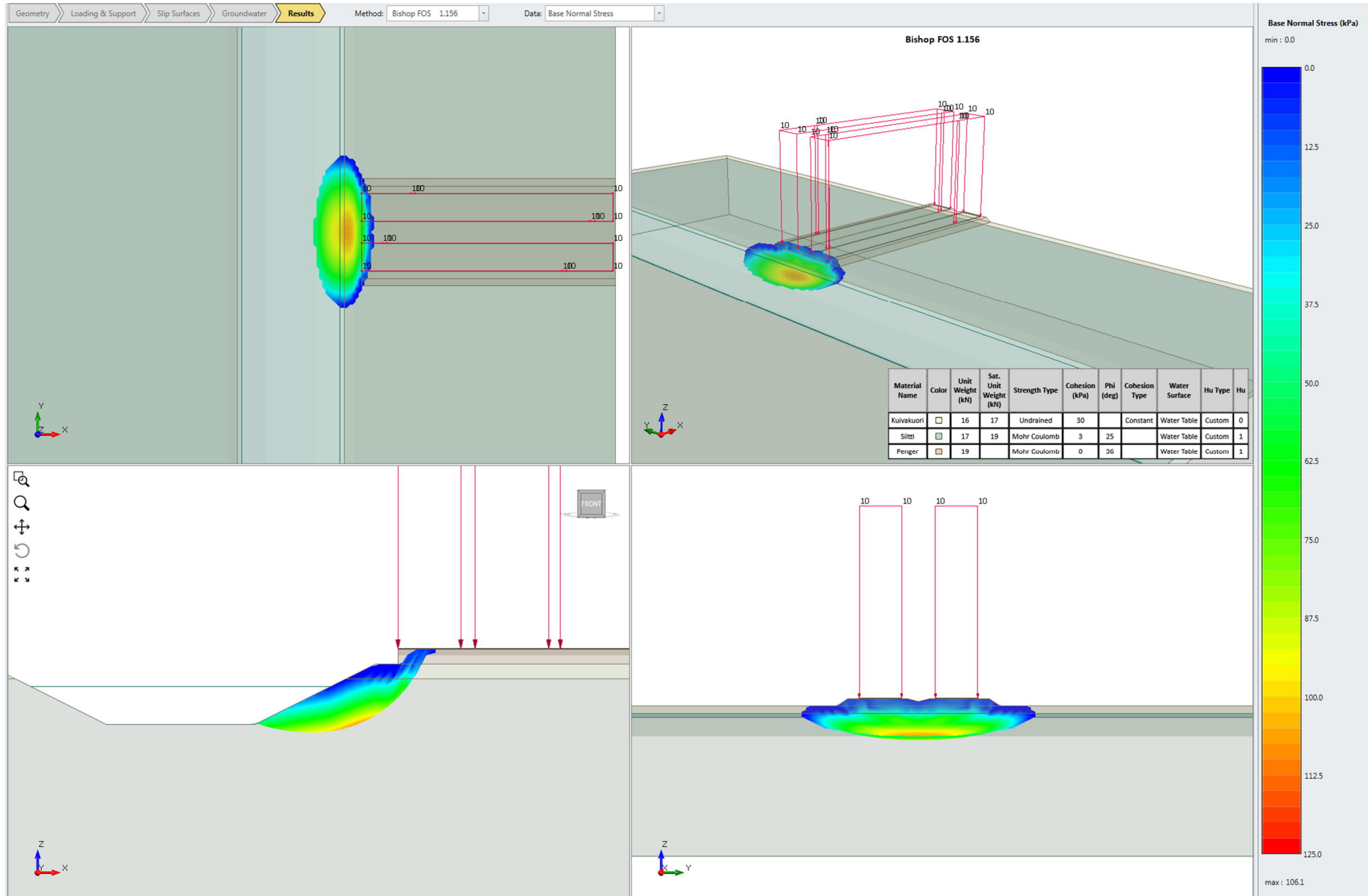
Liite 15. Stabiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyypin 3. Moottoritiepenget.

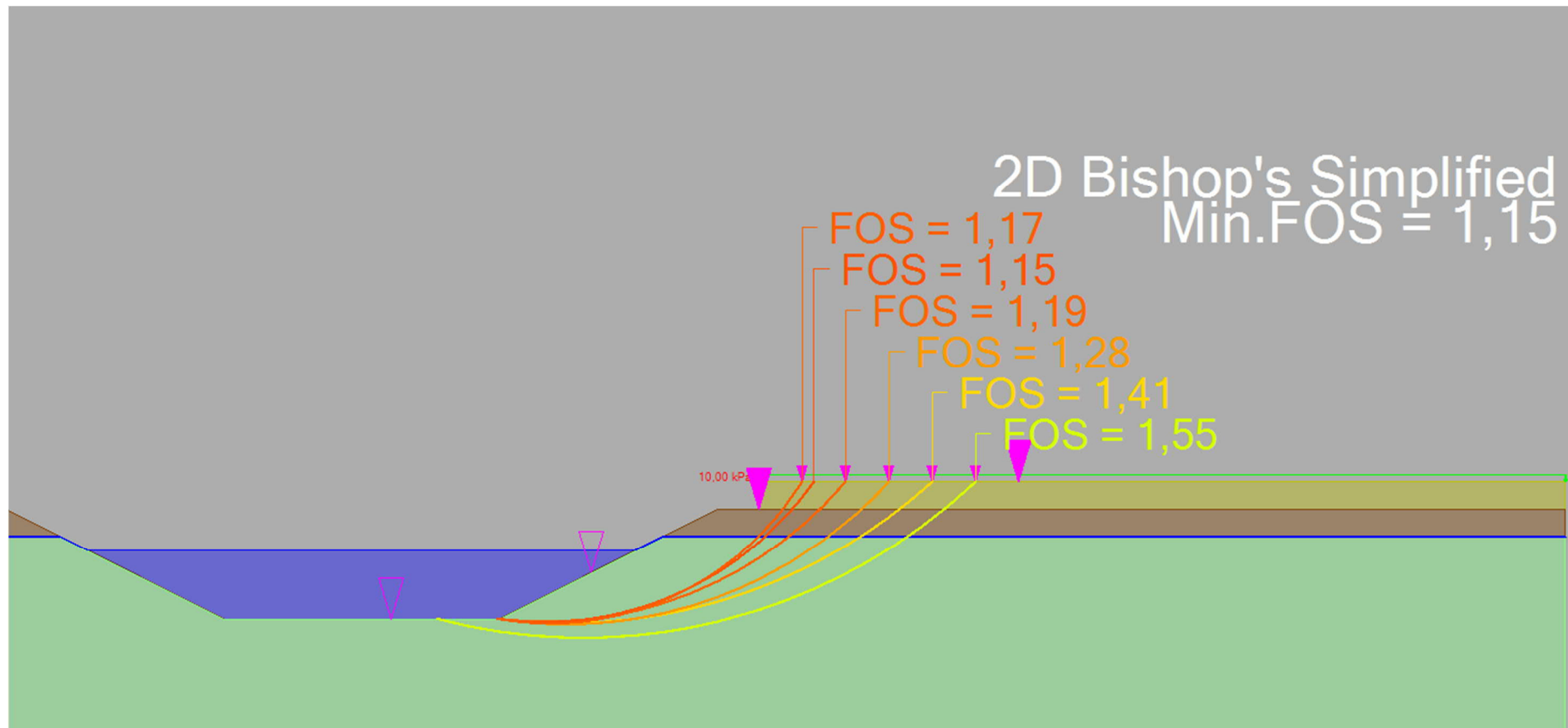


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Siltti		17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36		Water Surface	Custom	1	

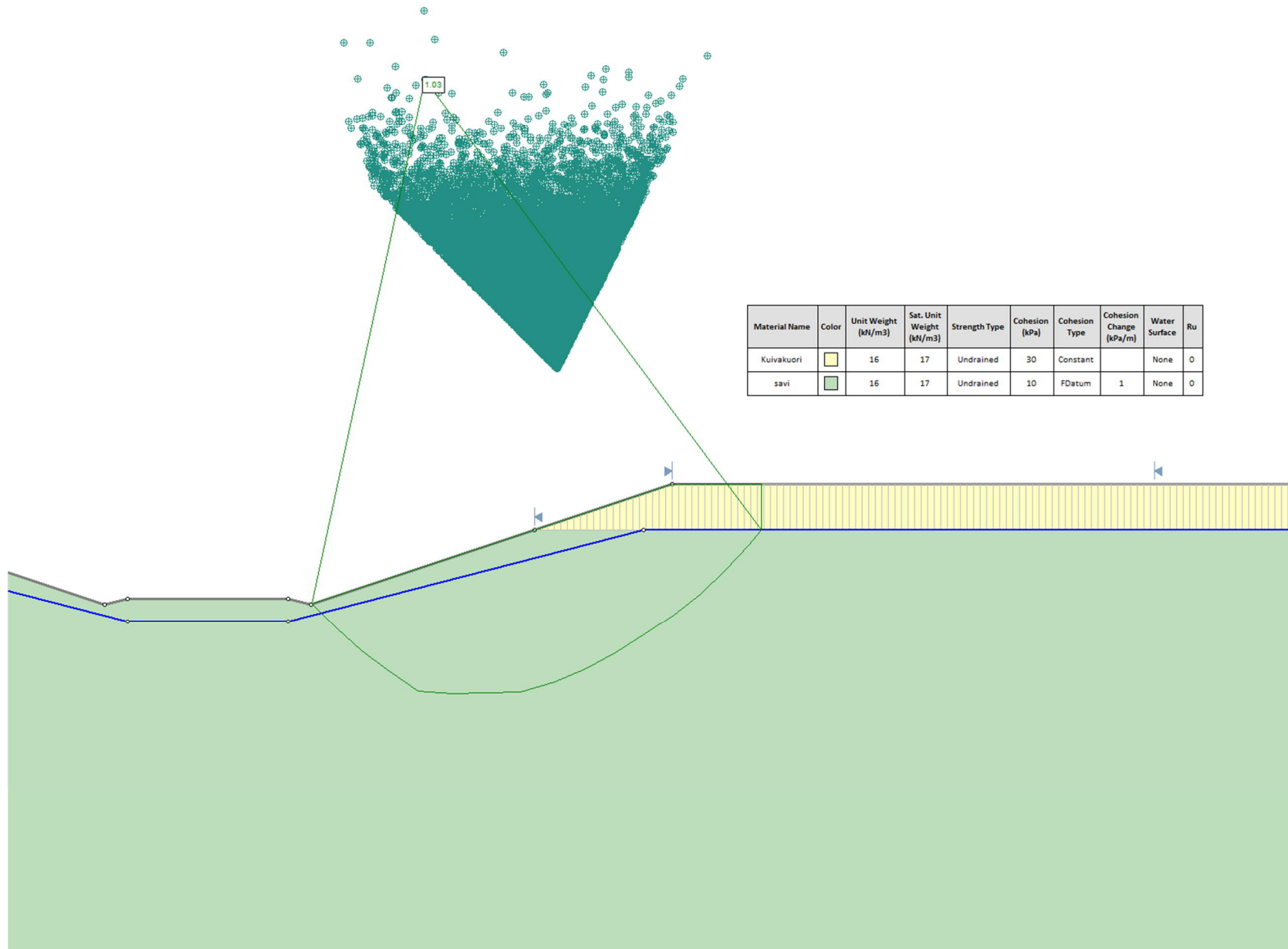


Liite 15. Stabiiteettilaskentatulosteet, vesistökohte pohjamaatyyppi 3. Moottoritiepengeri.

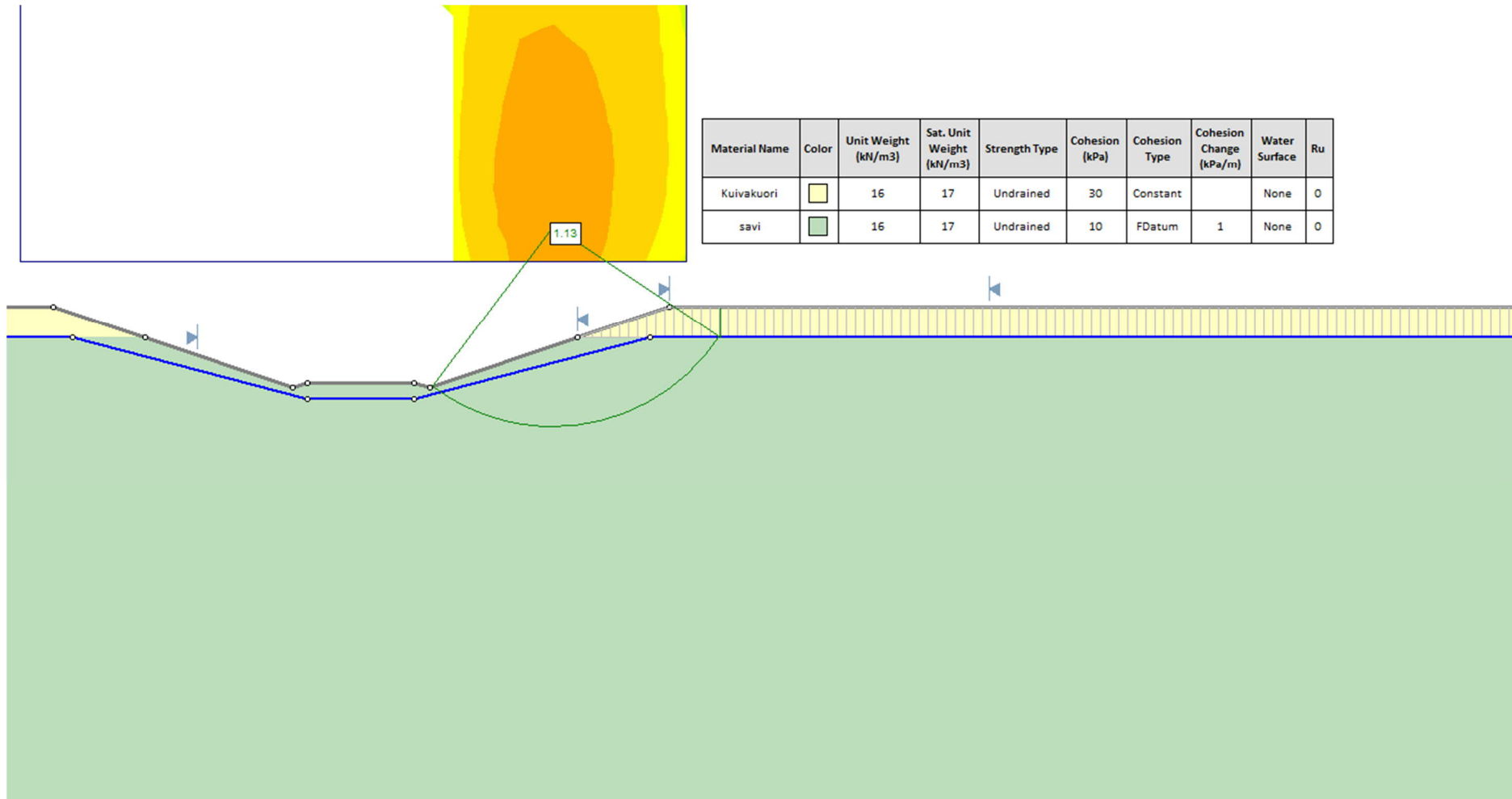




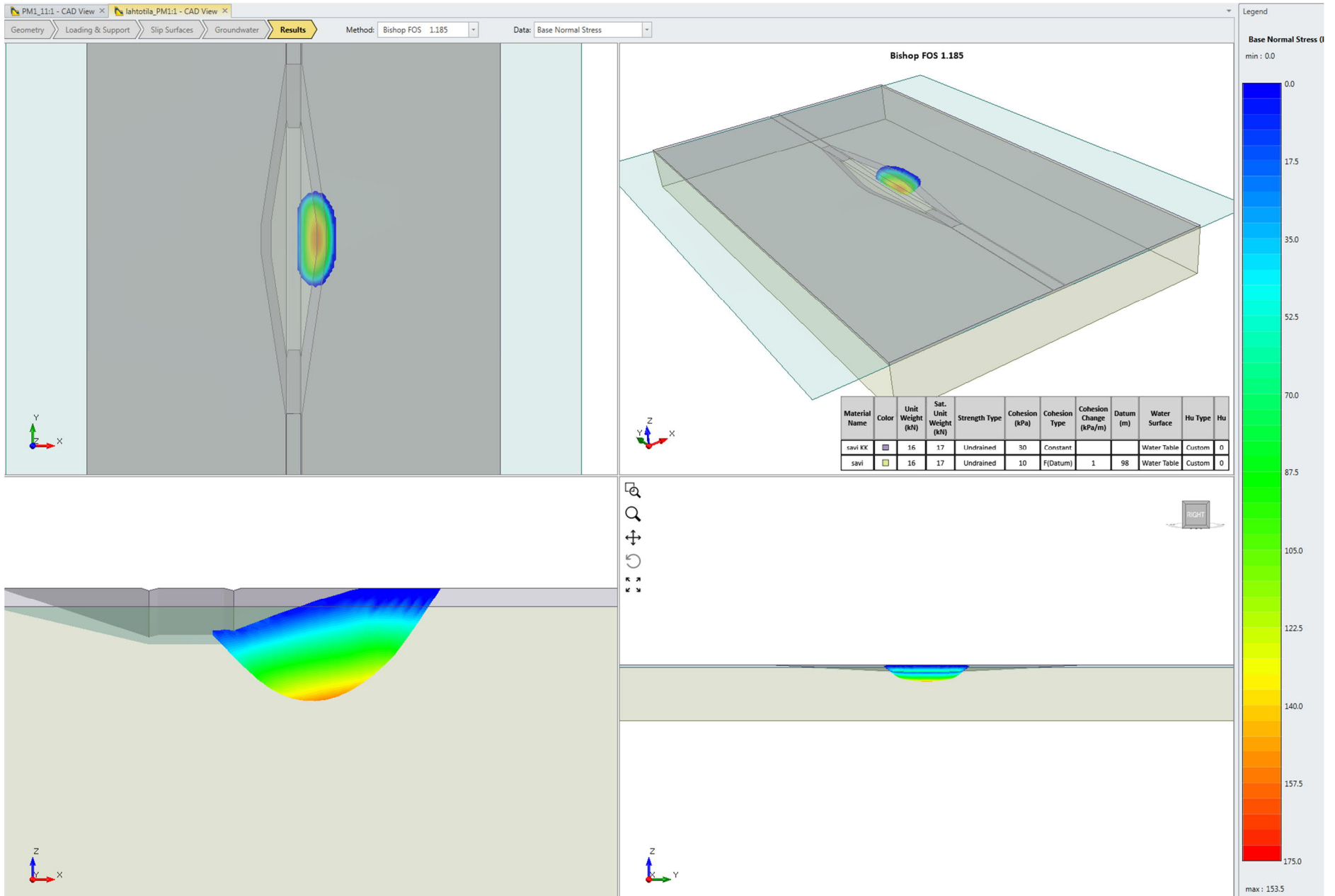
Liite 16. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.



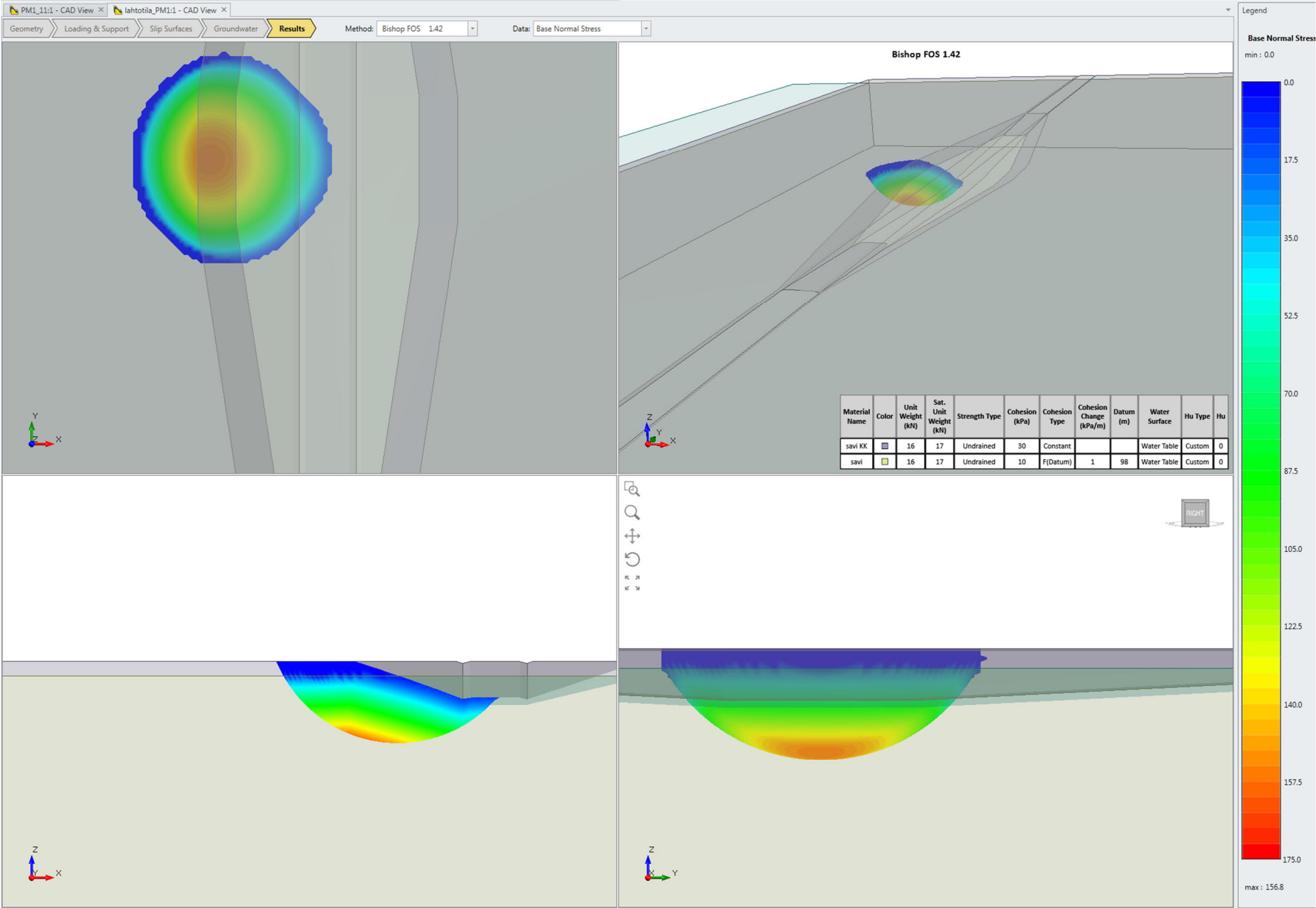
Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.



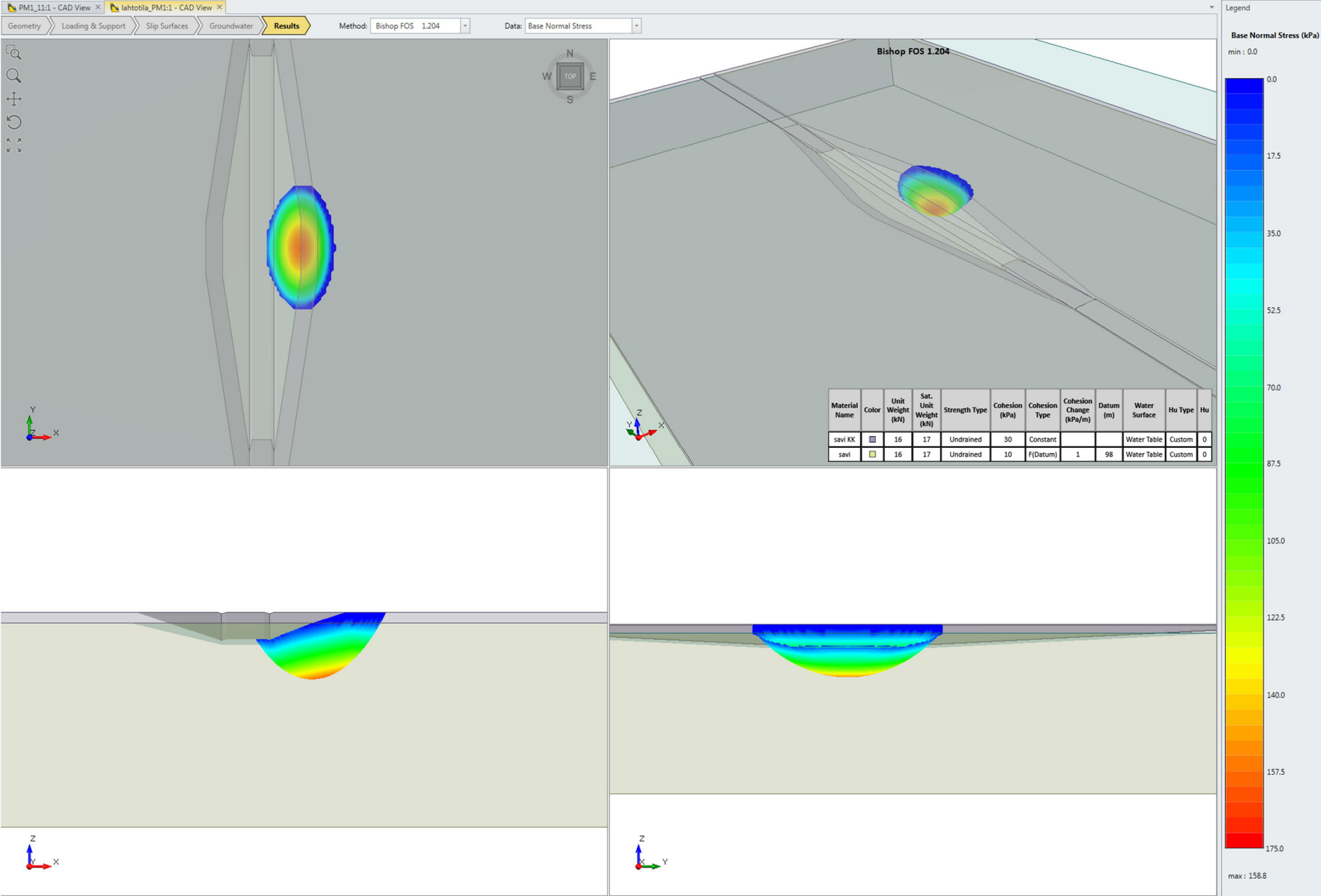
Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

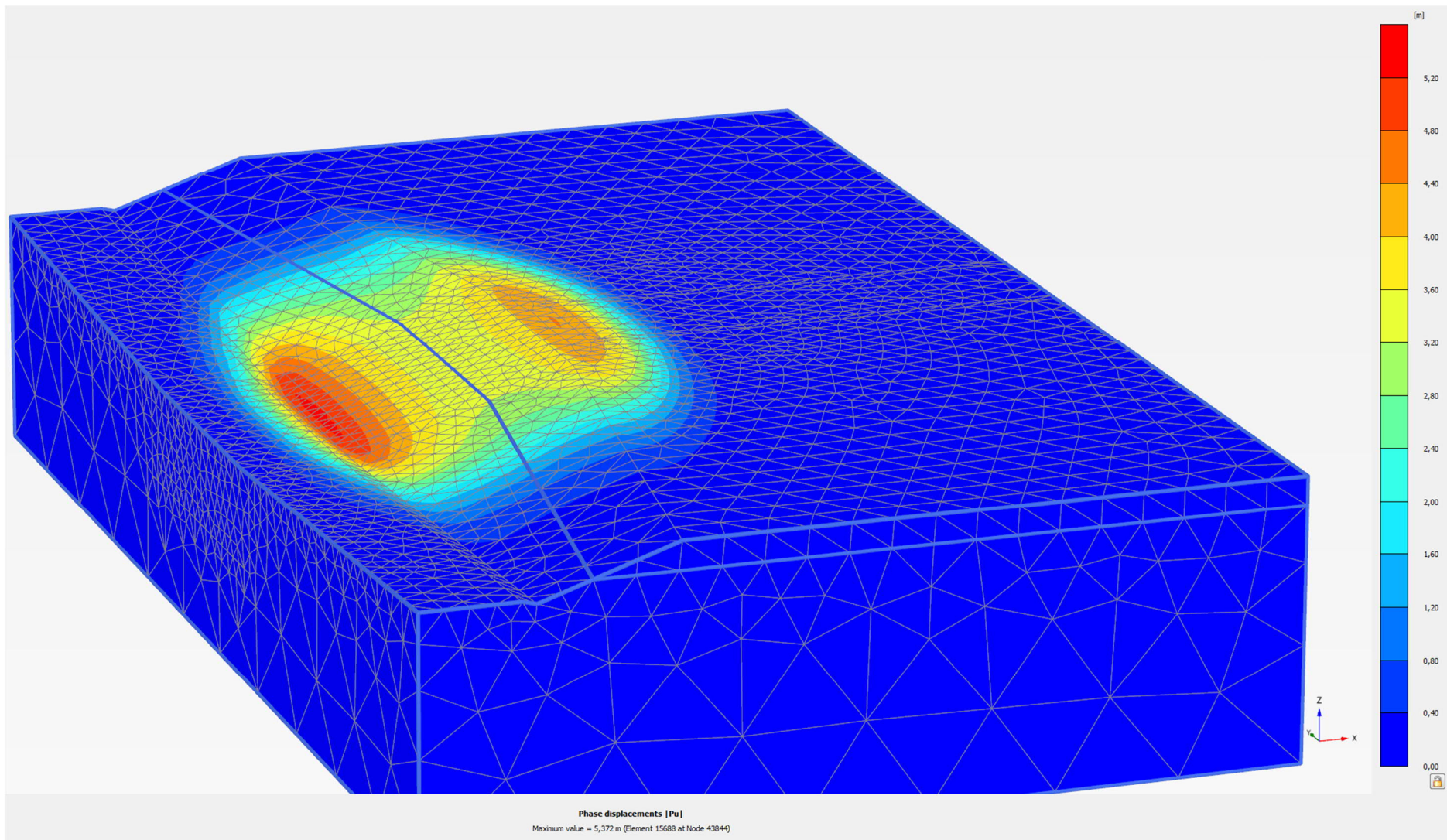


Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

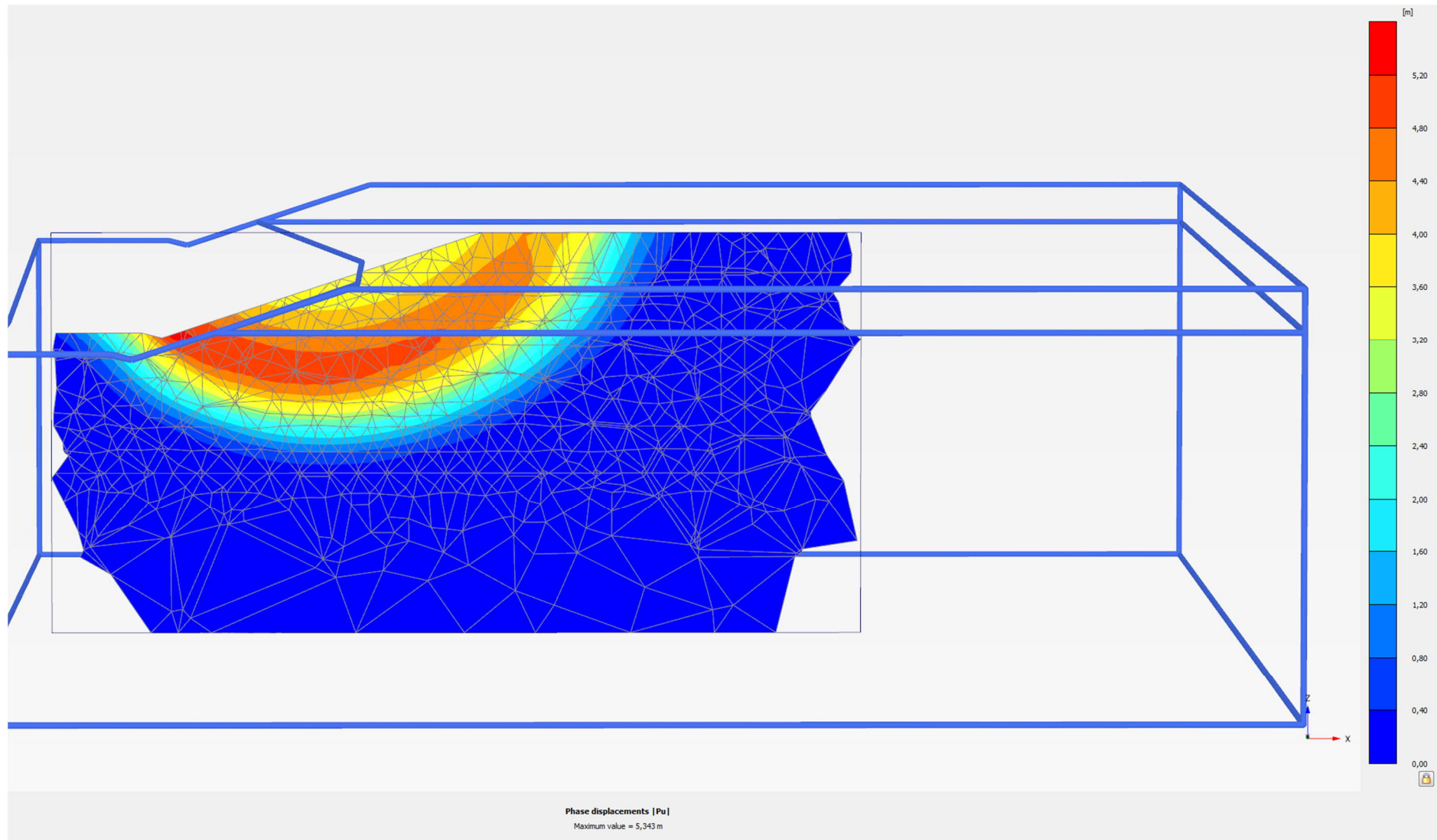


Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

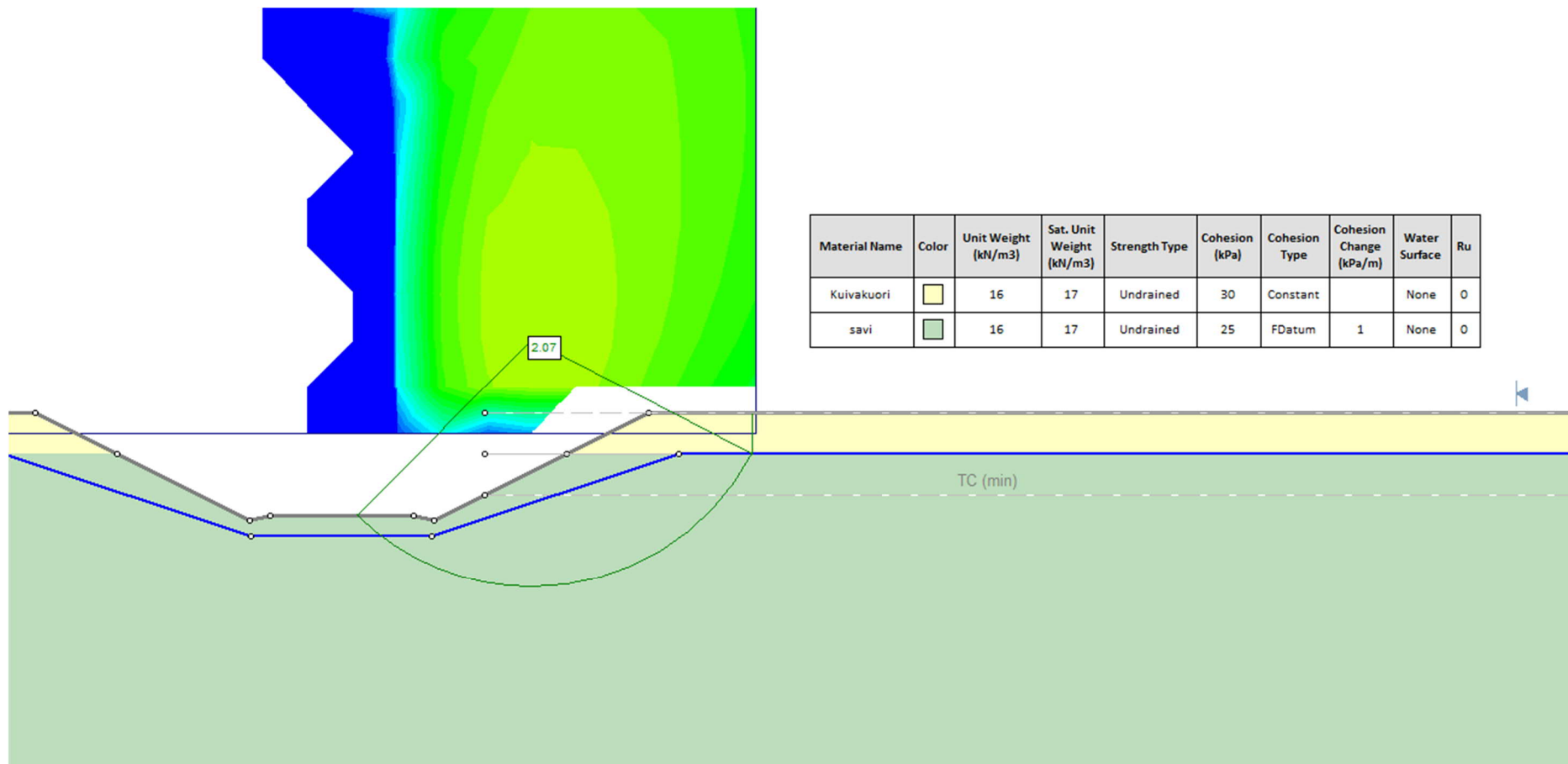




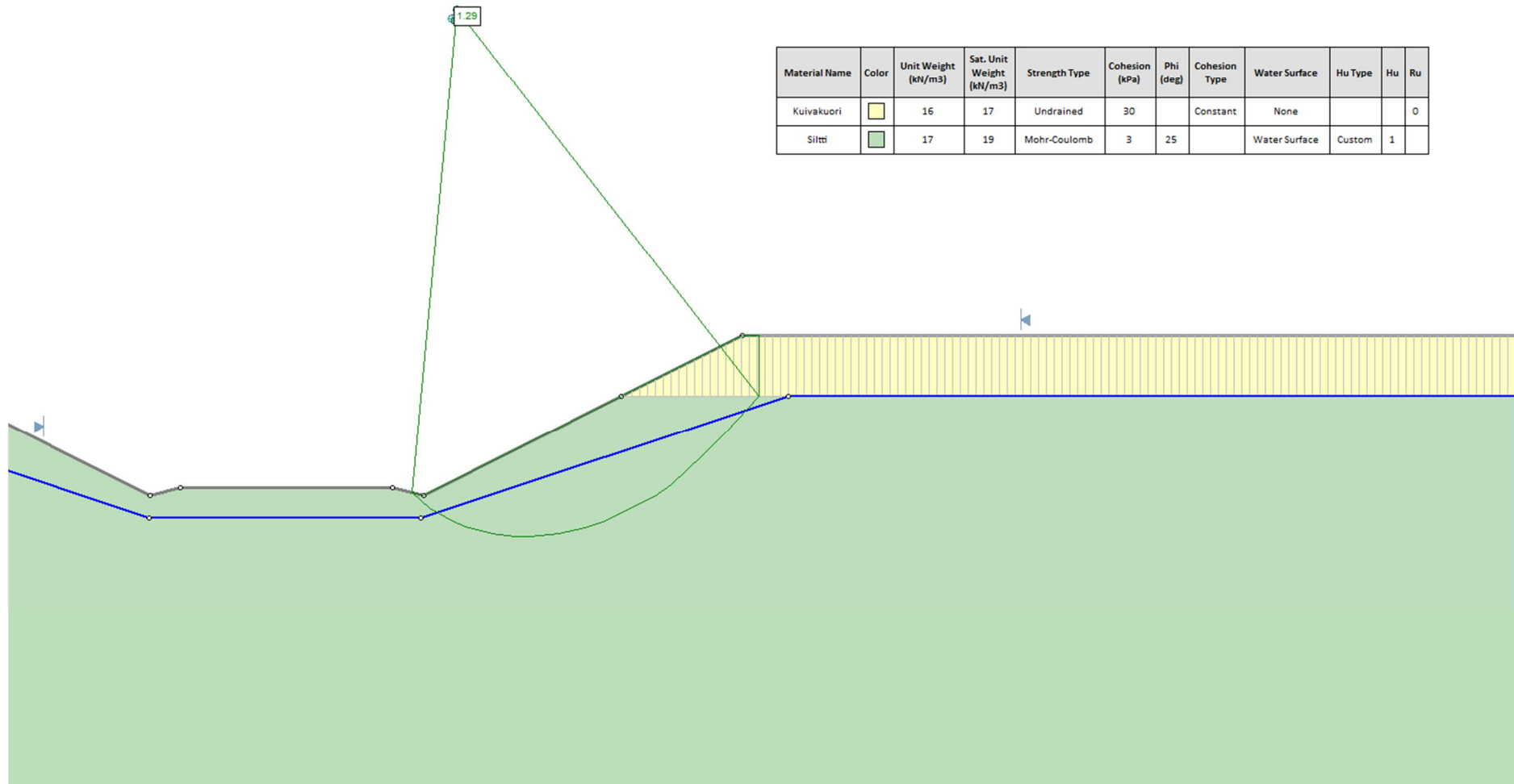
Liite 16. Stabiilettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.



Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

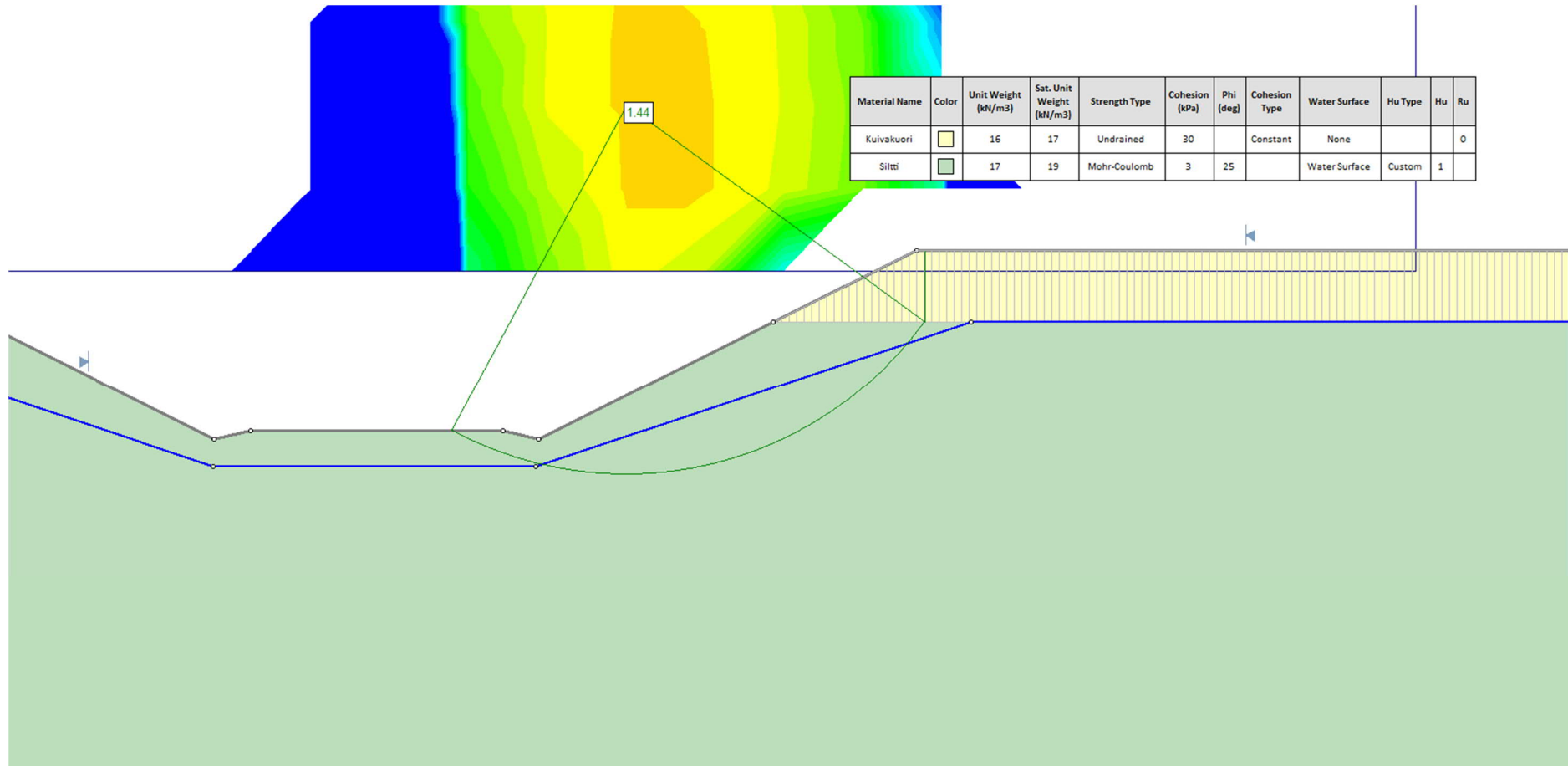


Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

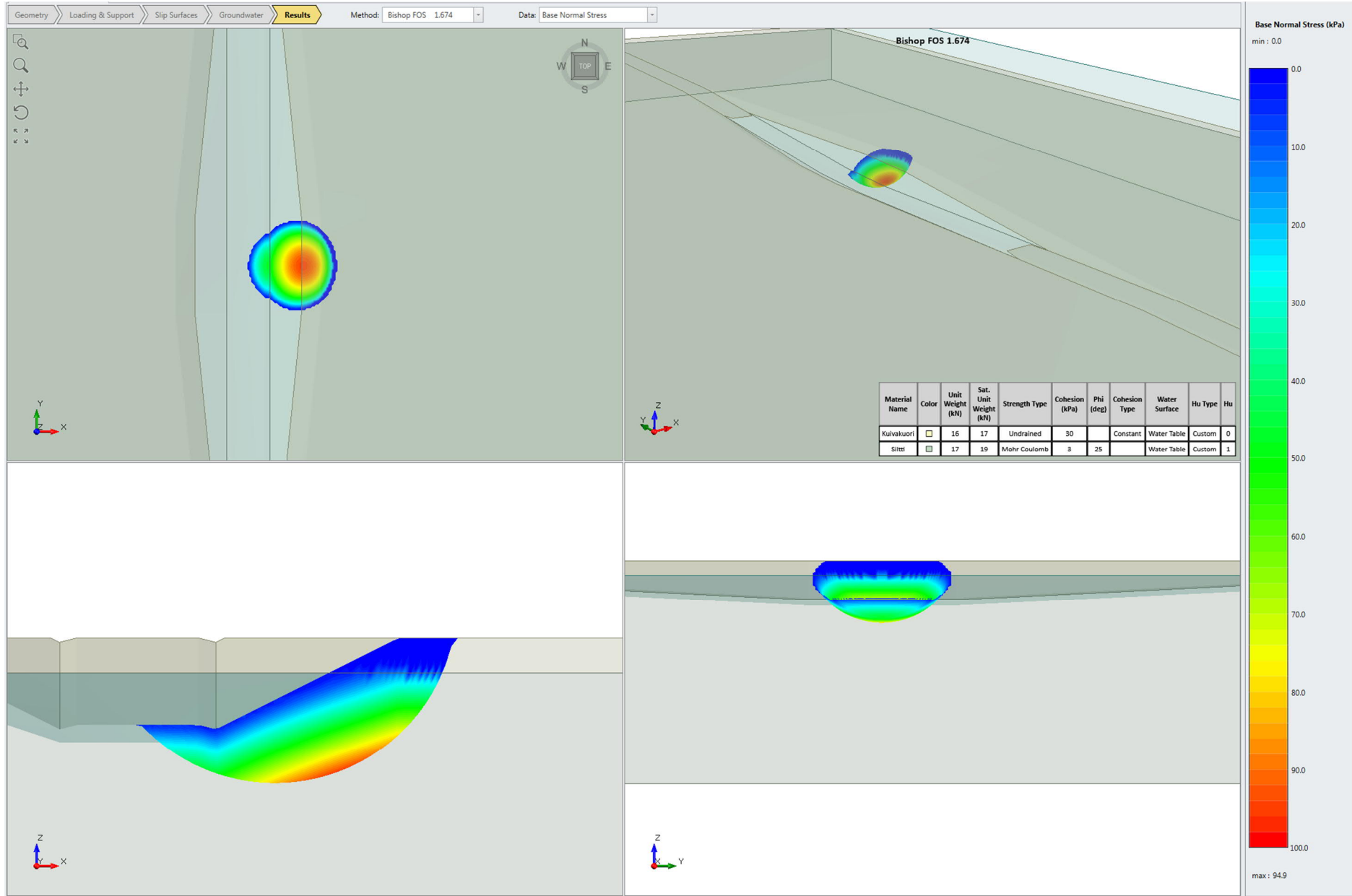


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant	None			0
Siltä	Green	17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1	

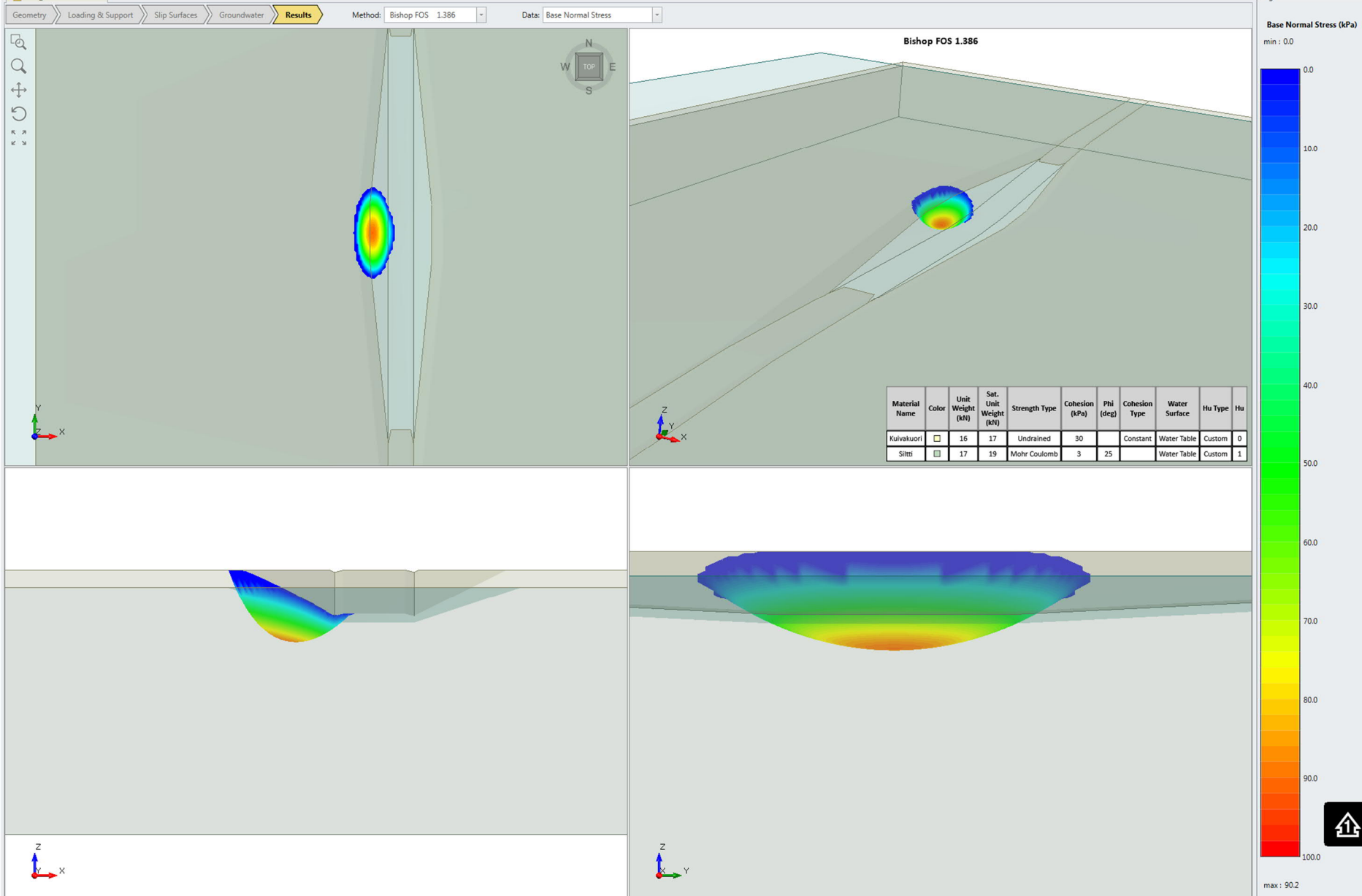
Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.



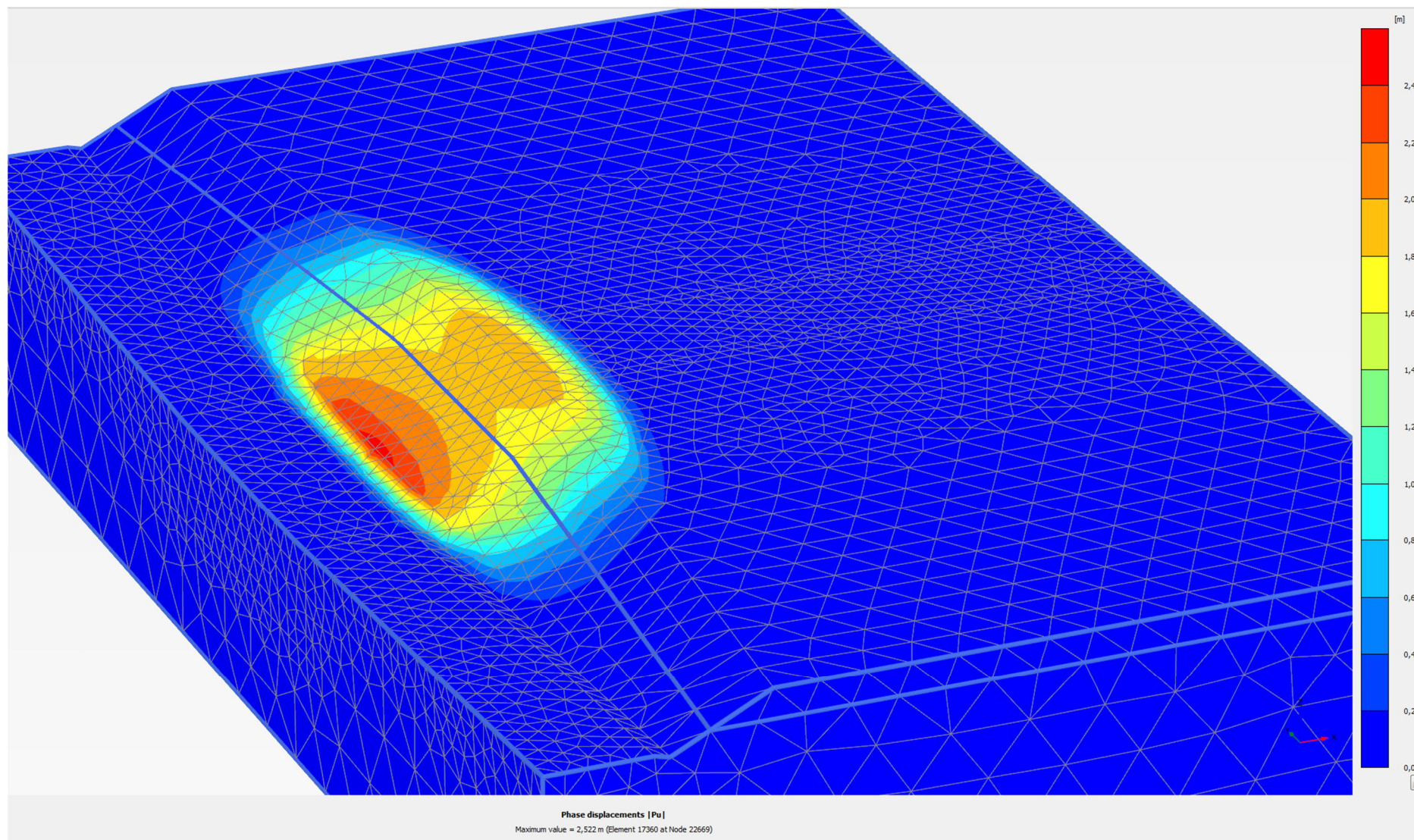
Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

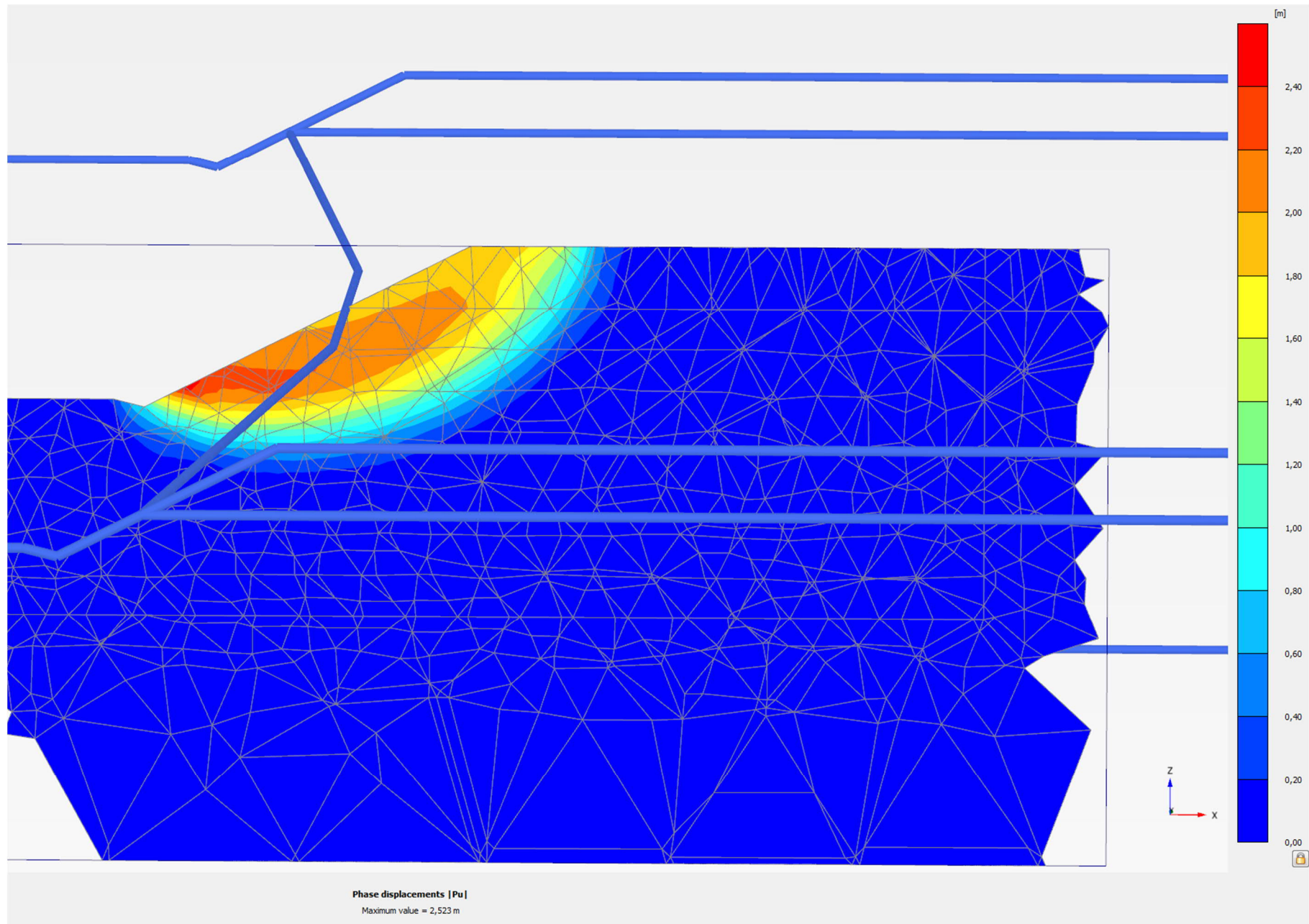


Liite 16. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

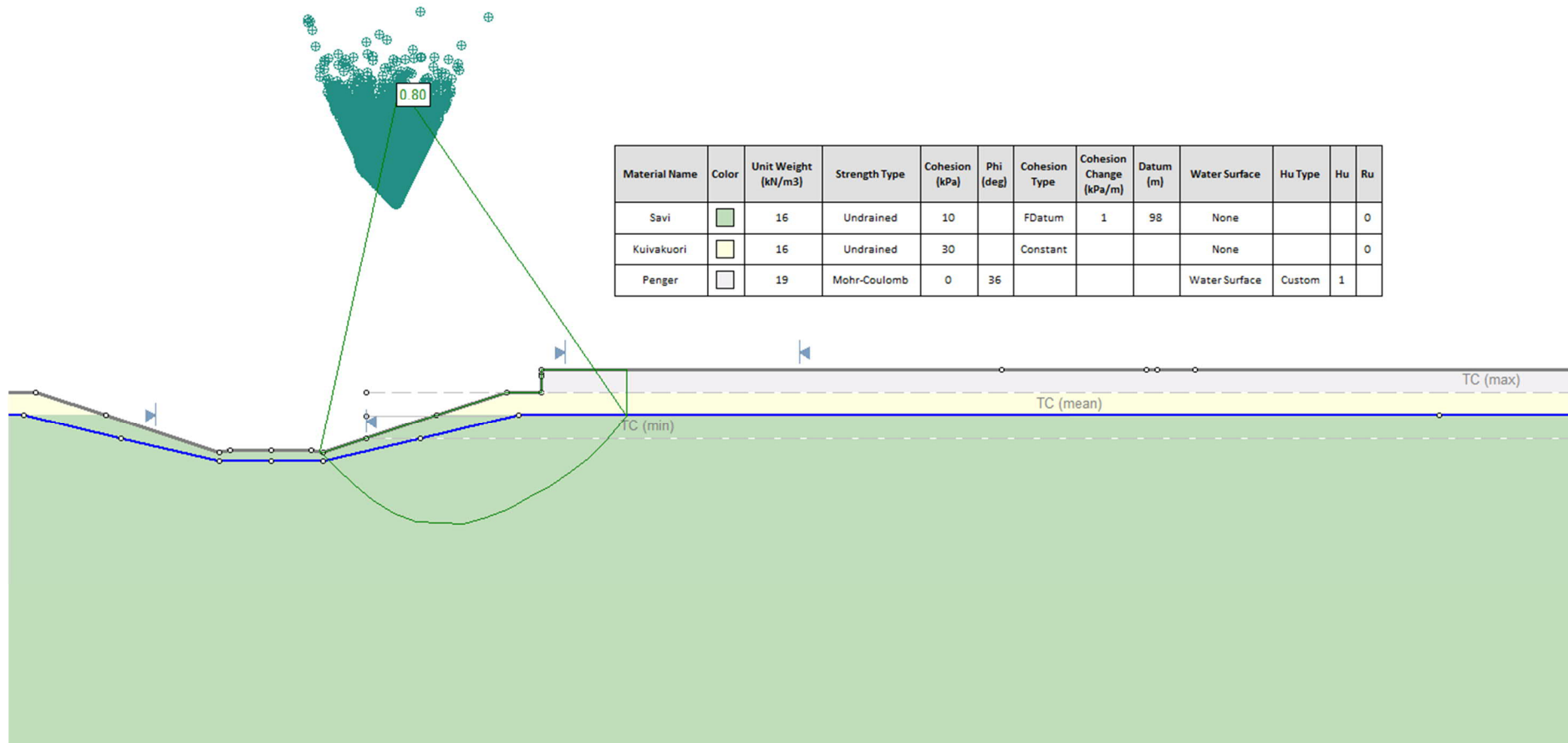


Liite 16. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde. Leikkaus.

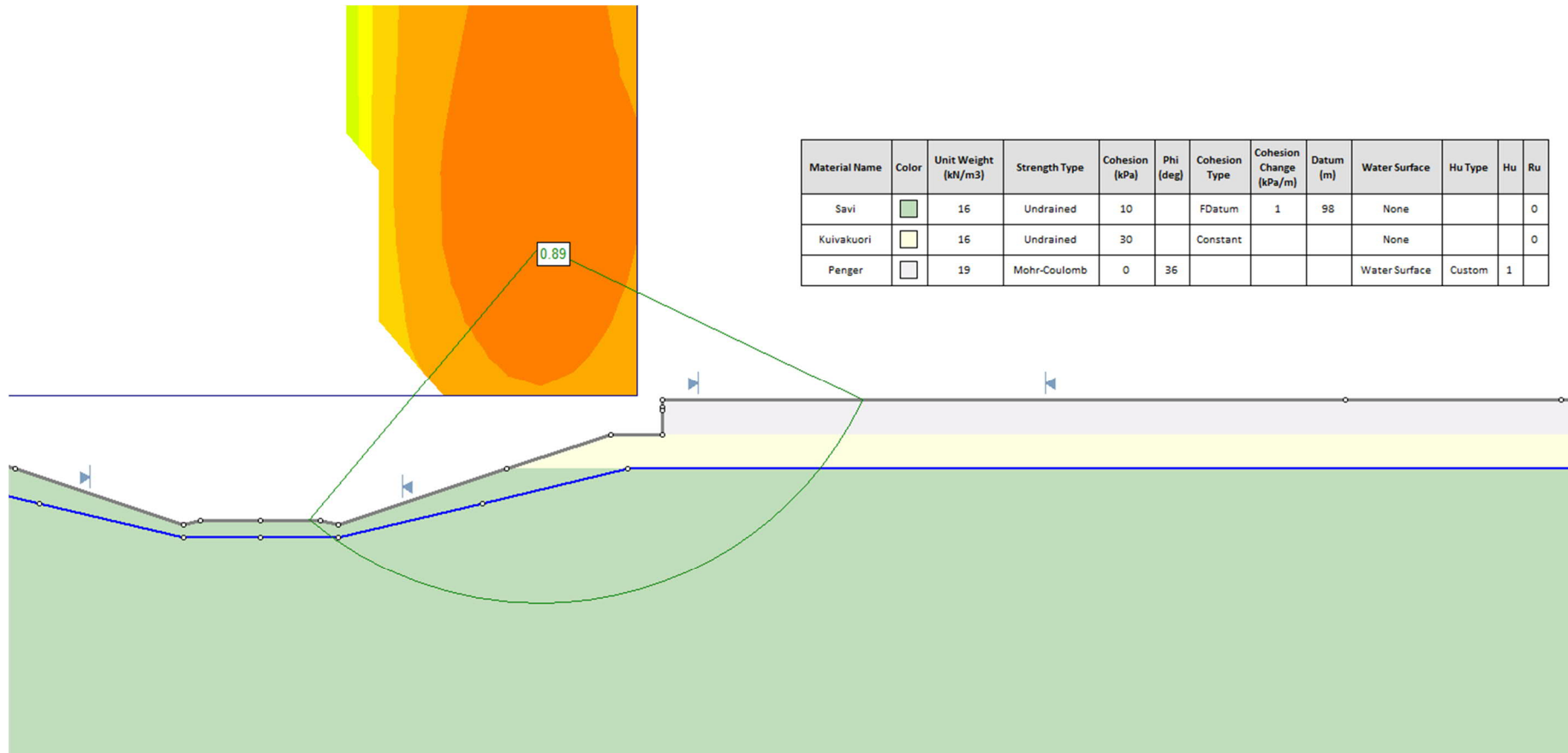




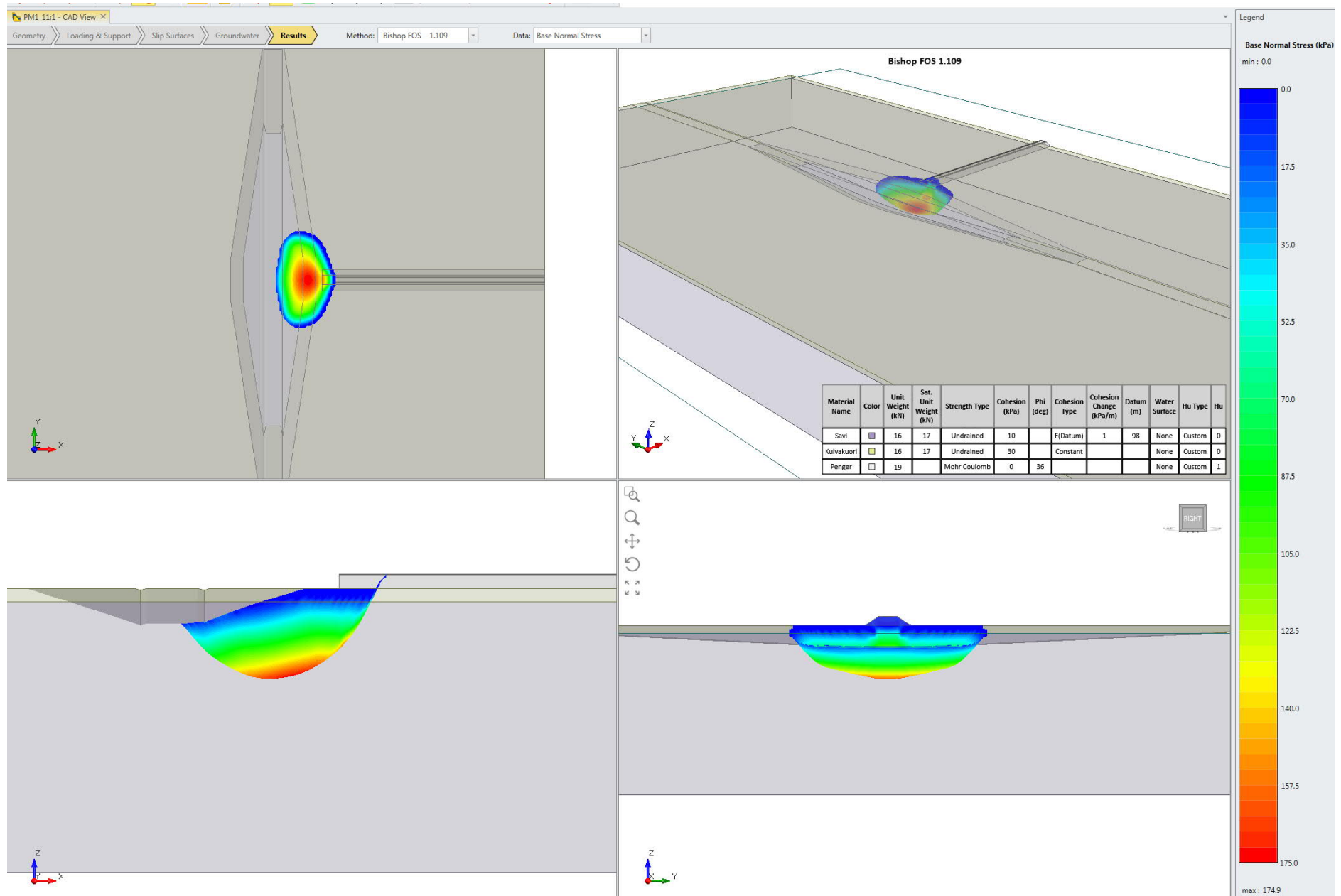
Liite 17. Stabiliateettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



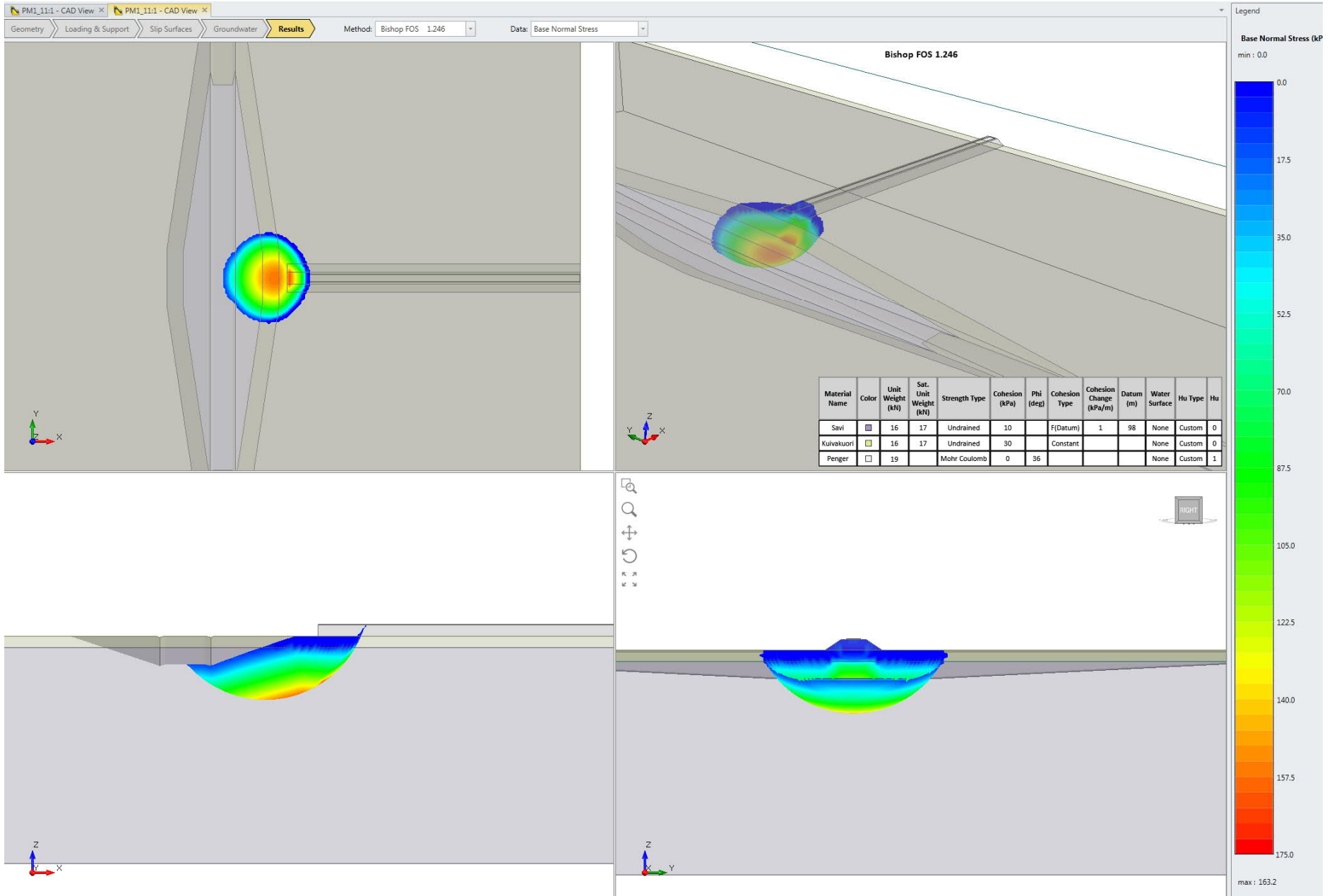
Liite 17. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



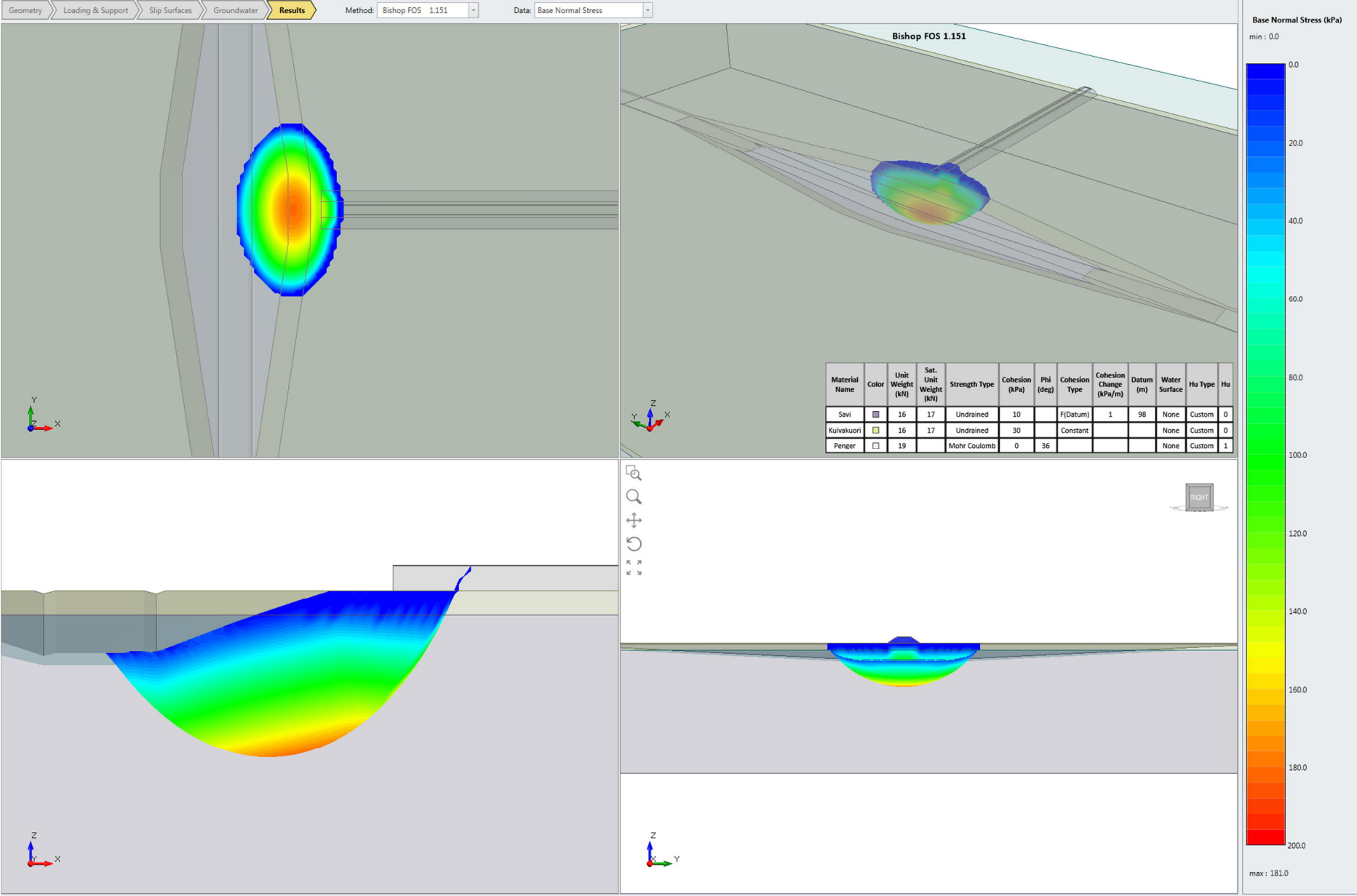
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

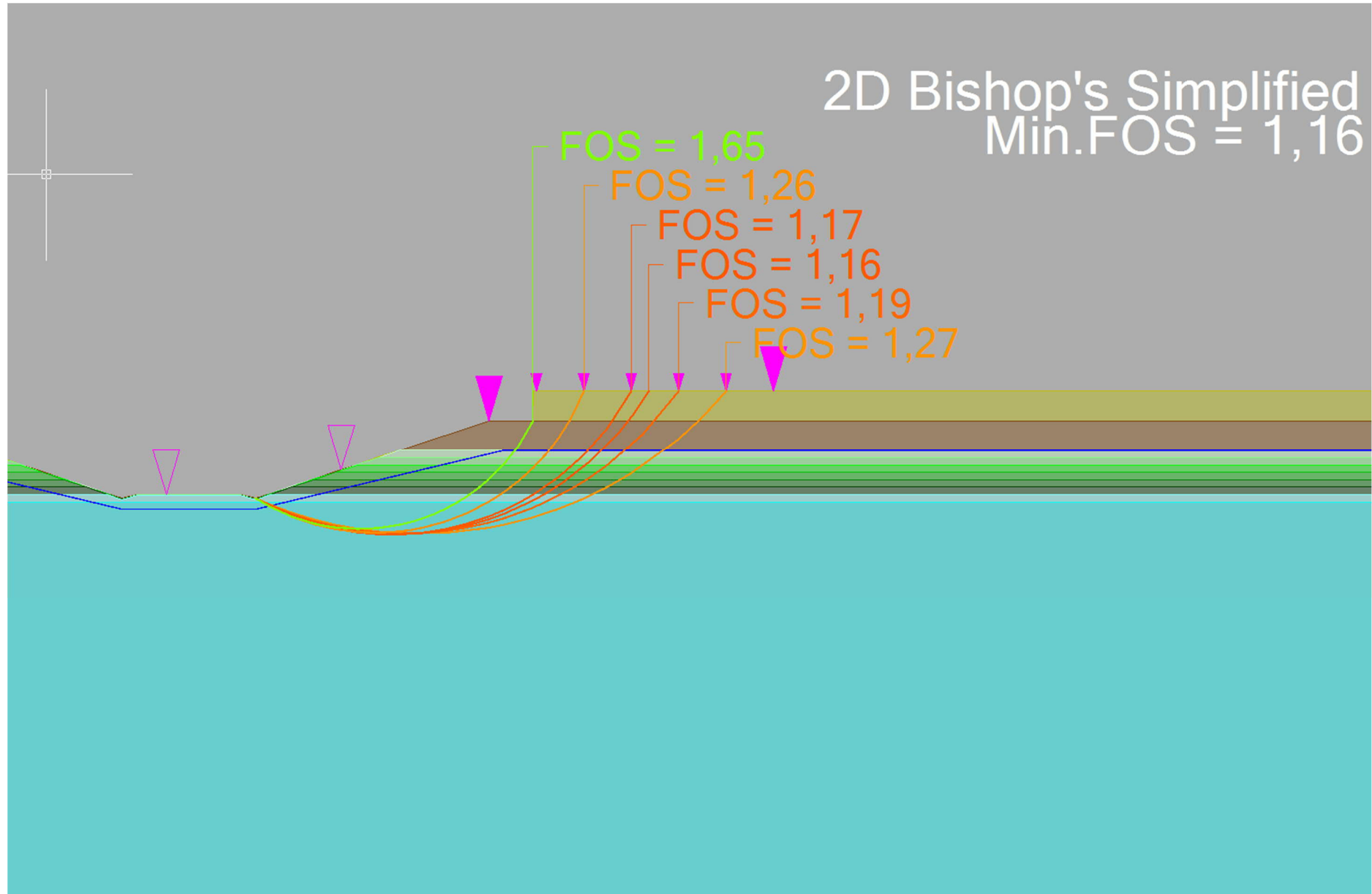


Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

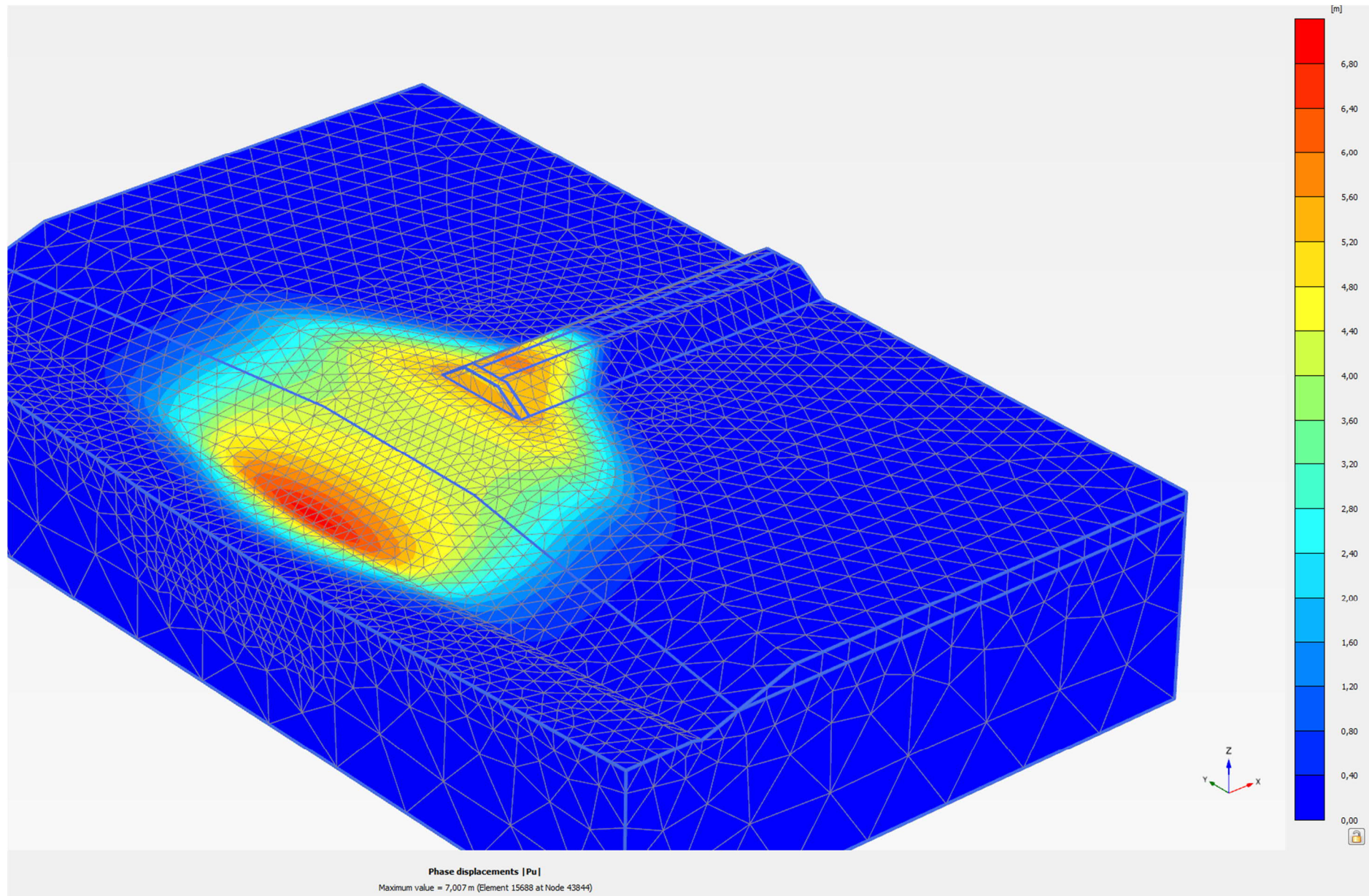


Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

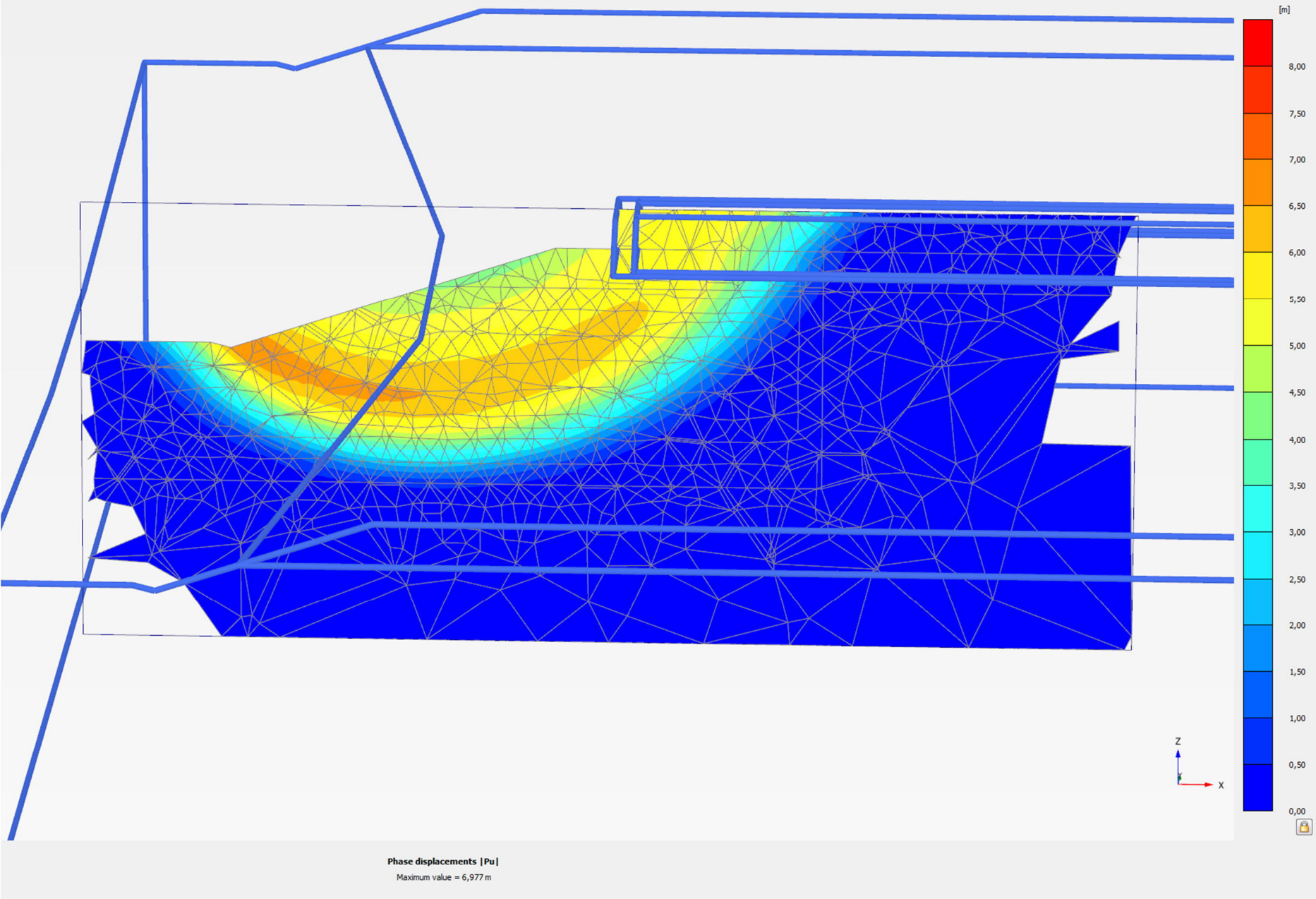




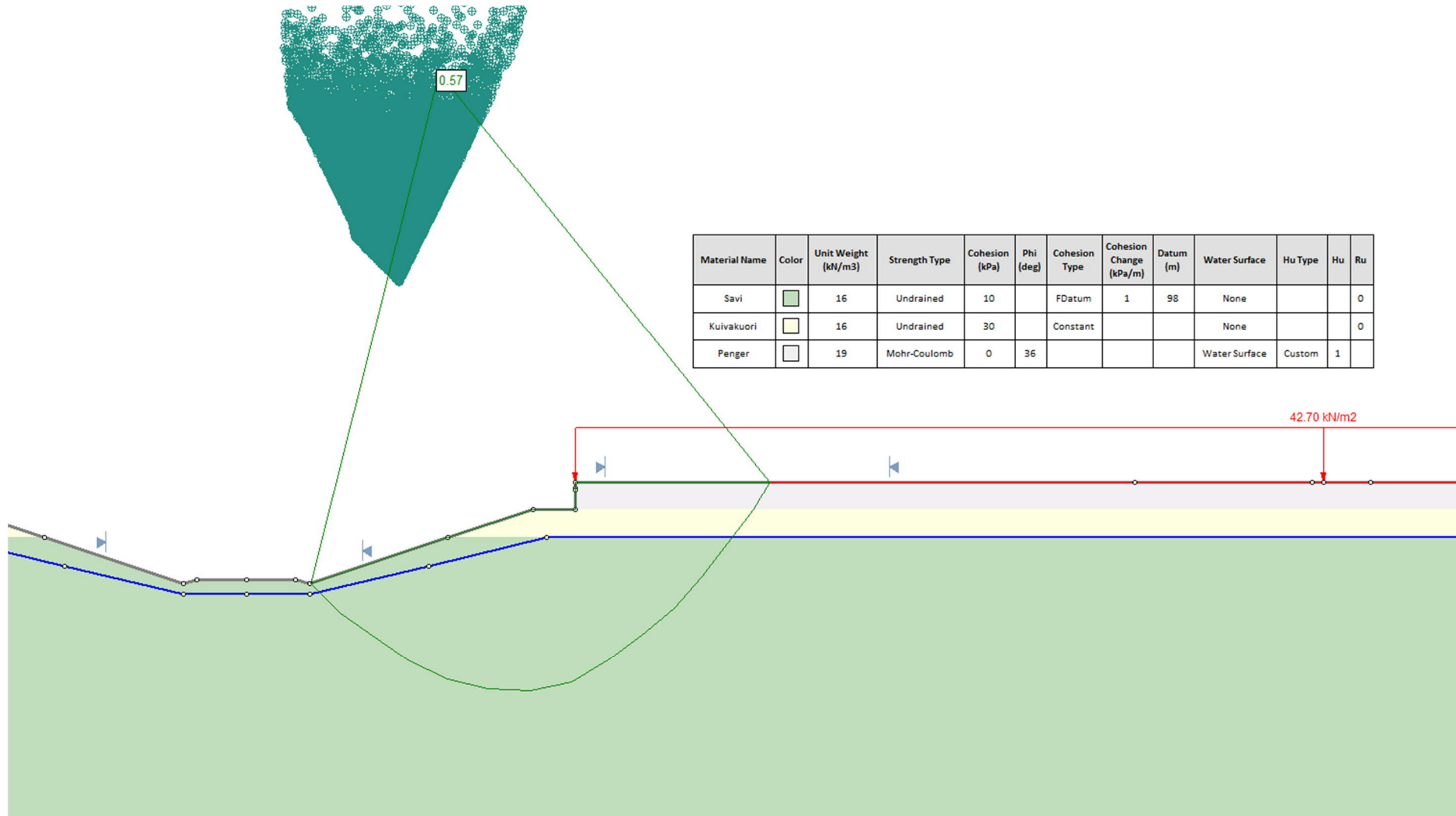
Liite 17. Stabiilitetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



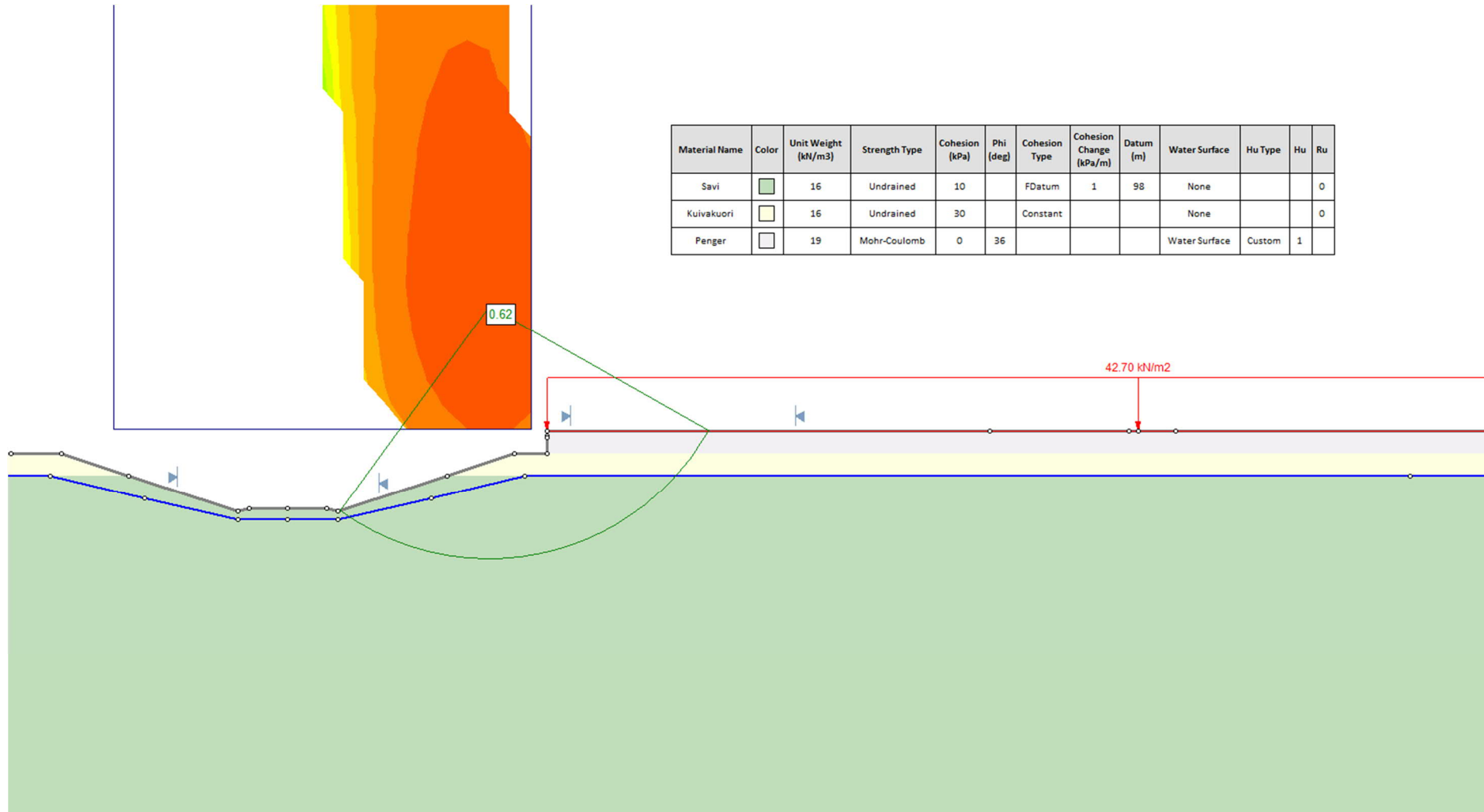
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohte pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



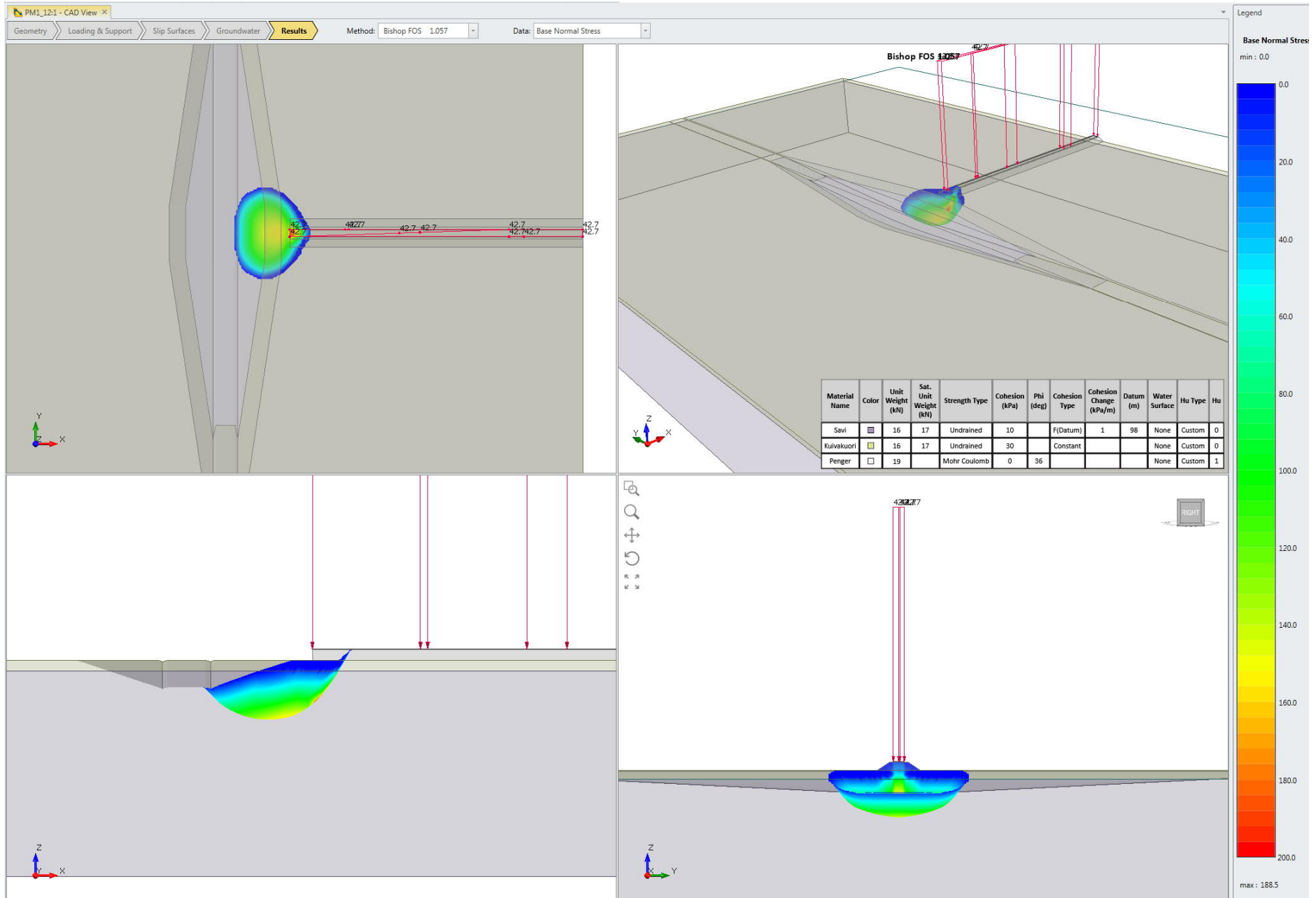
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



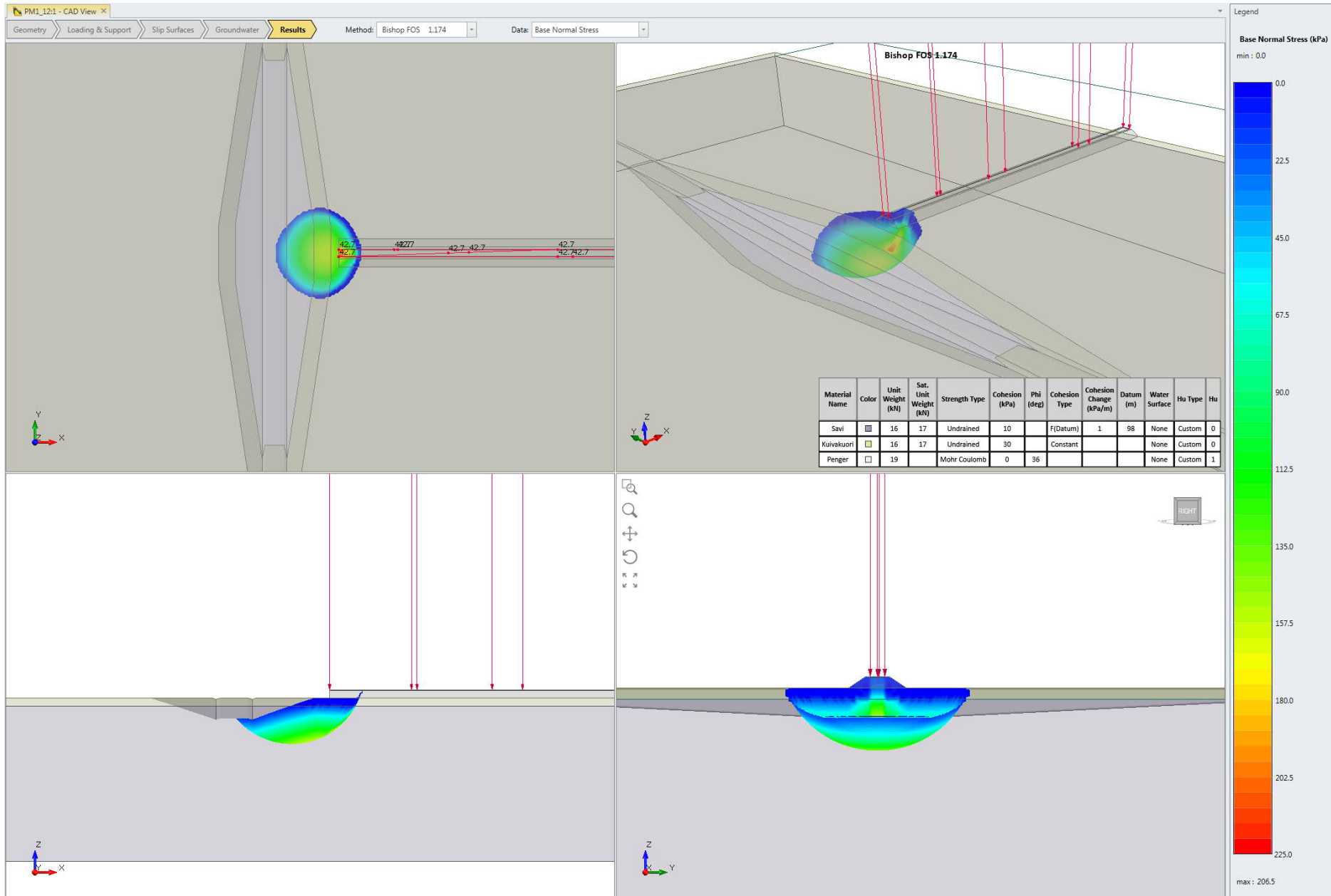
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



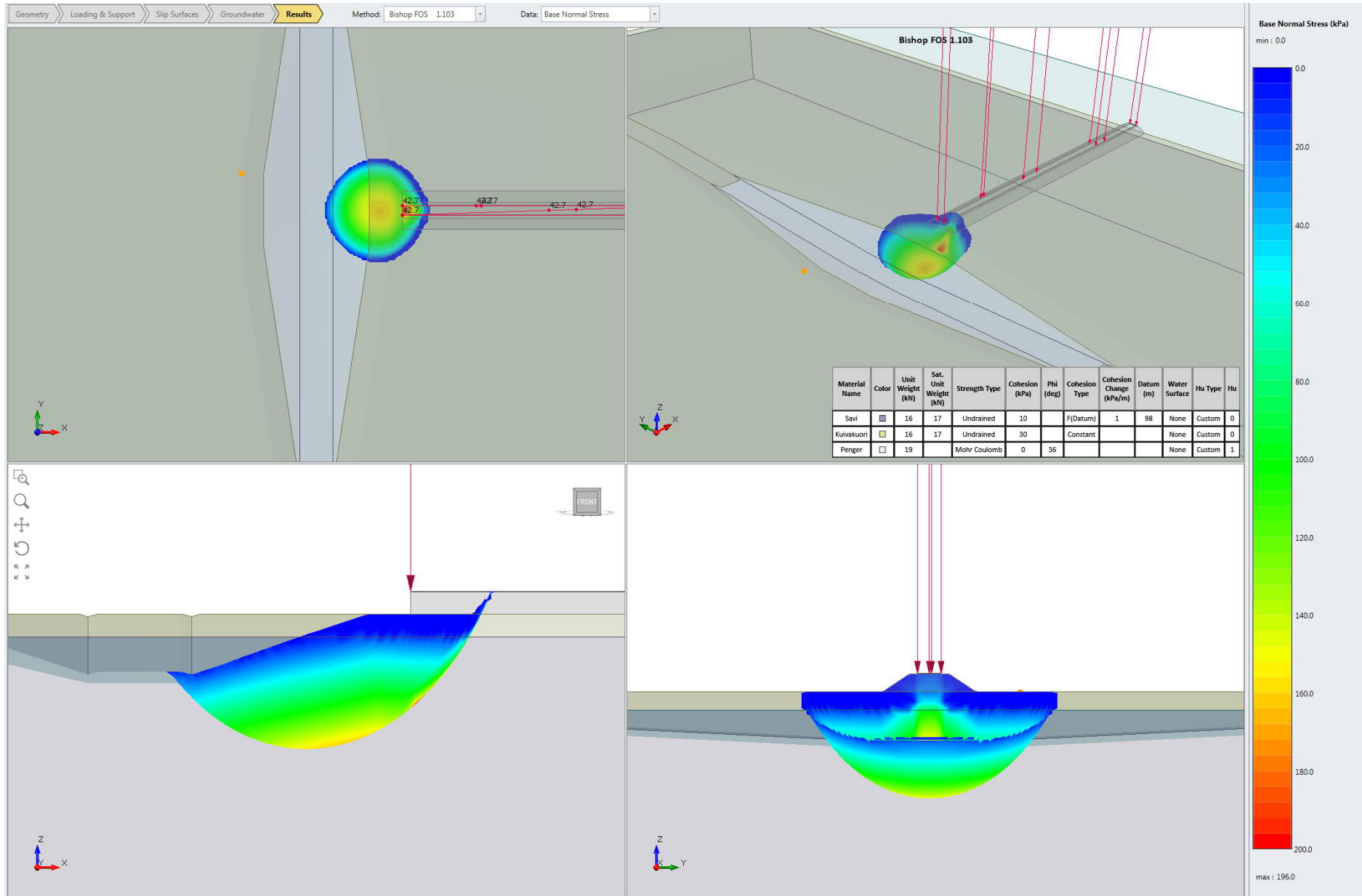
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

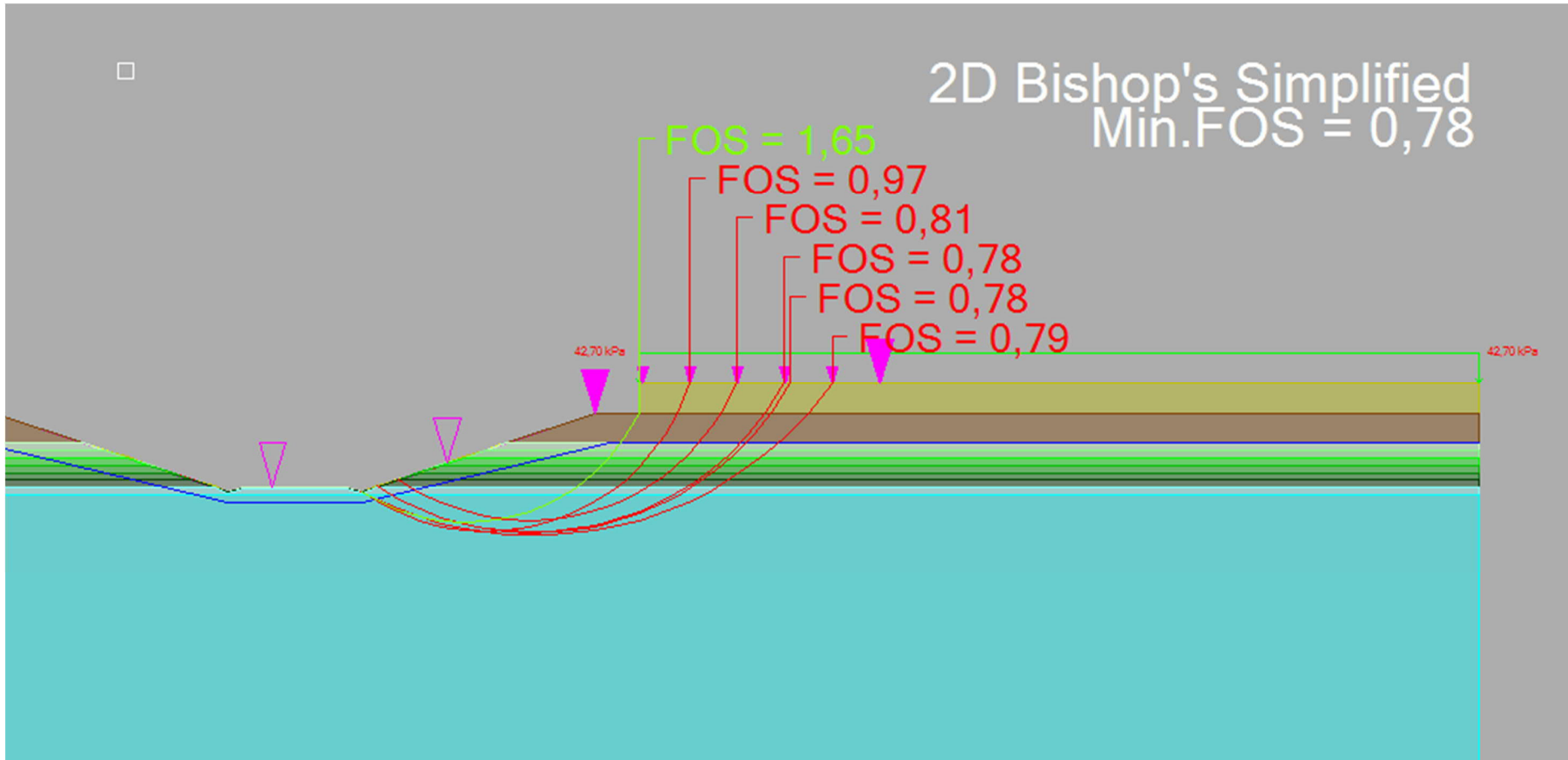


Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

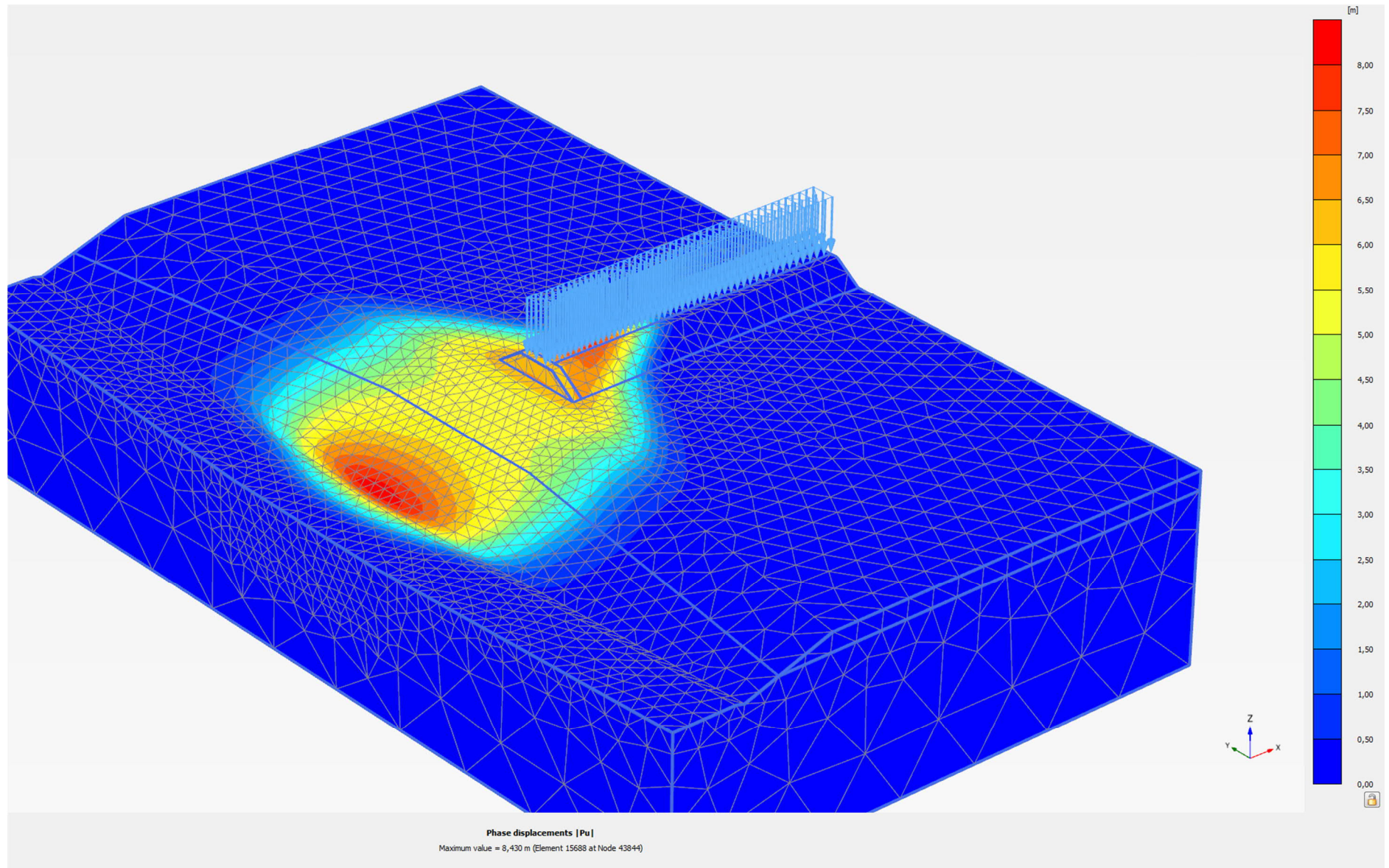


Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.

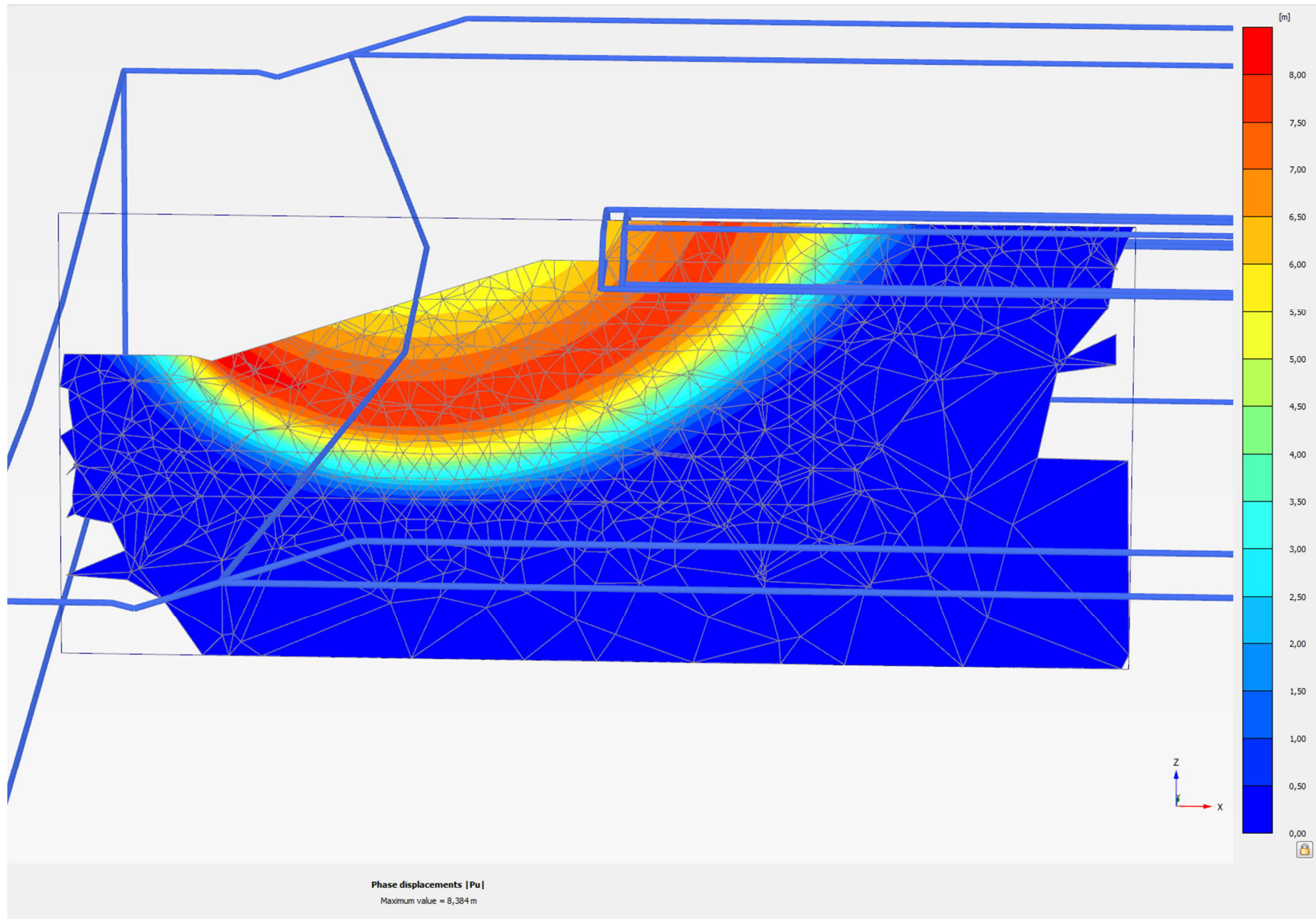




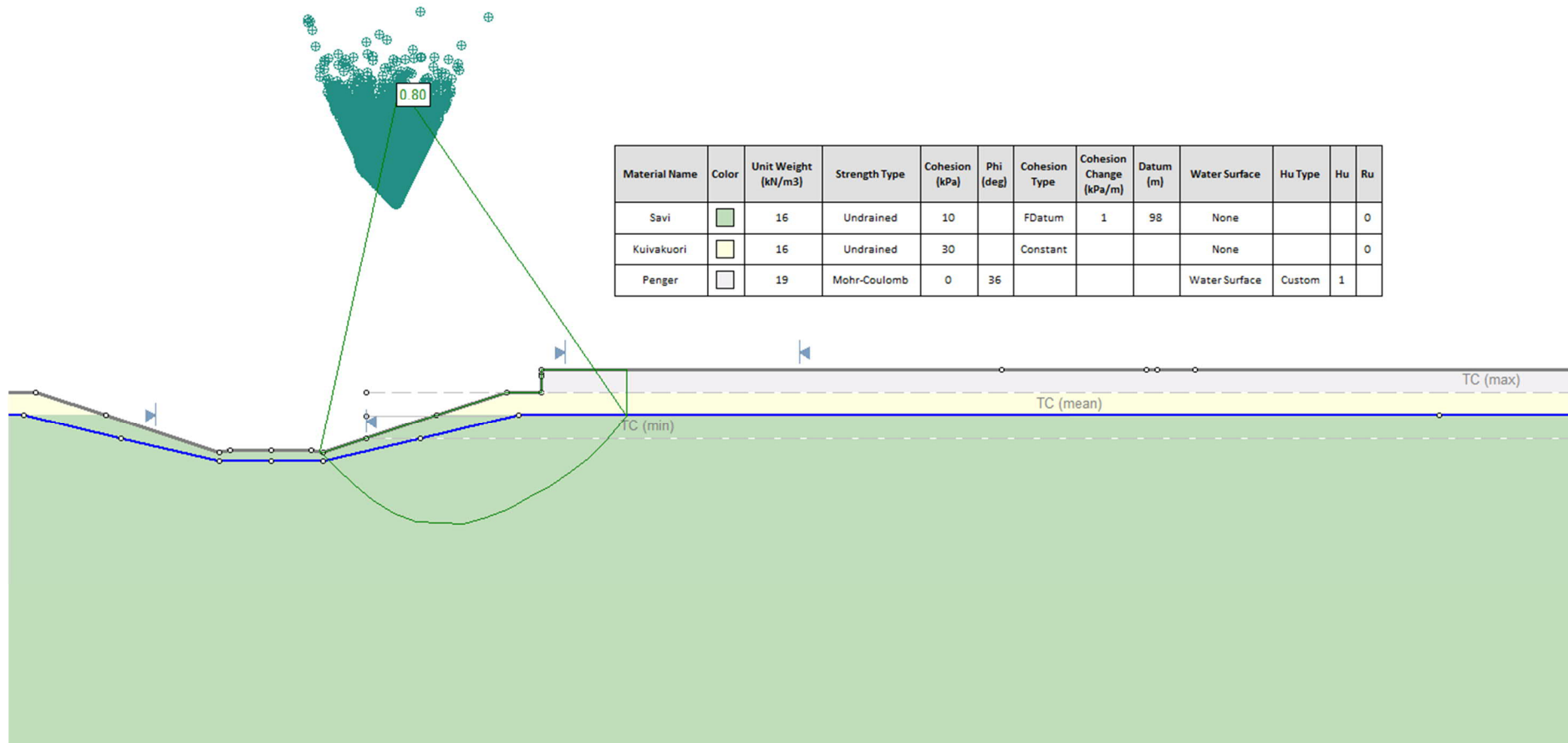
Liite 17. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



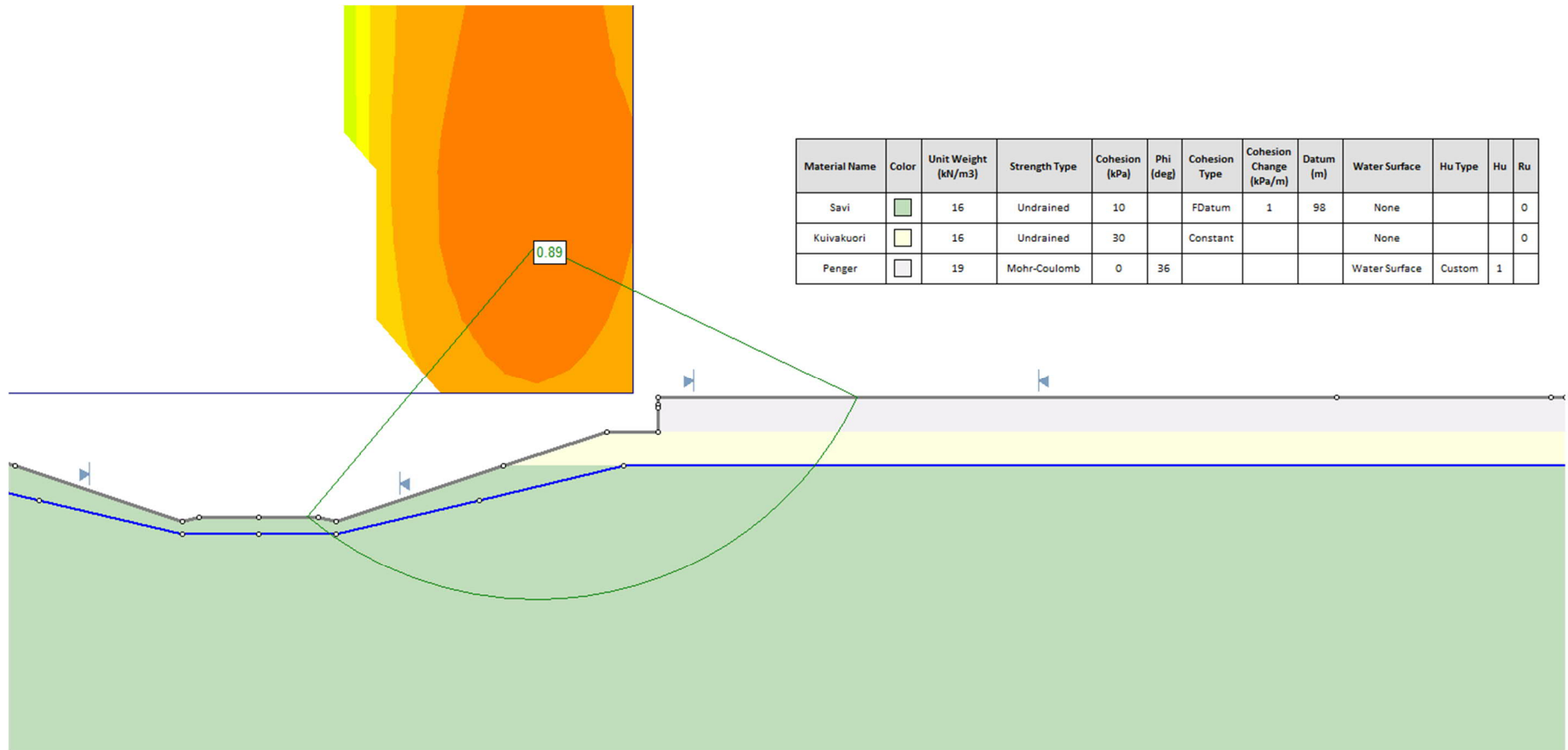
Liite 17. Stabiiteetilaskentatulosteet, alikulkukohte pohjamaatyyppi 1. Yksiraiteinen ratapenger.



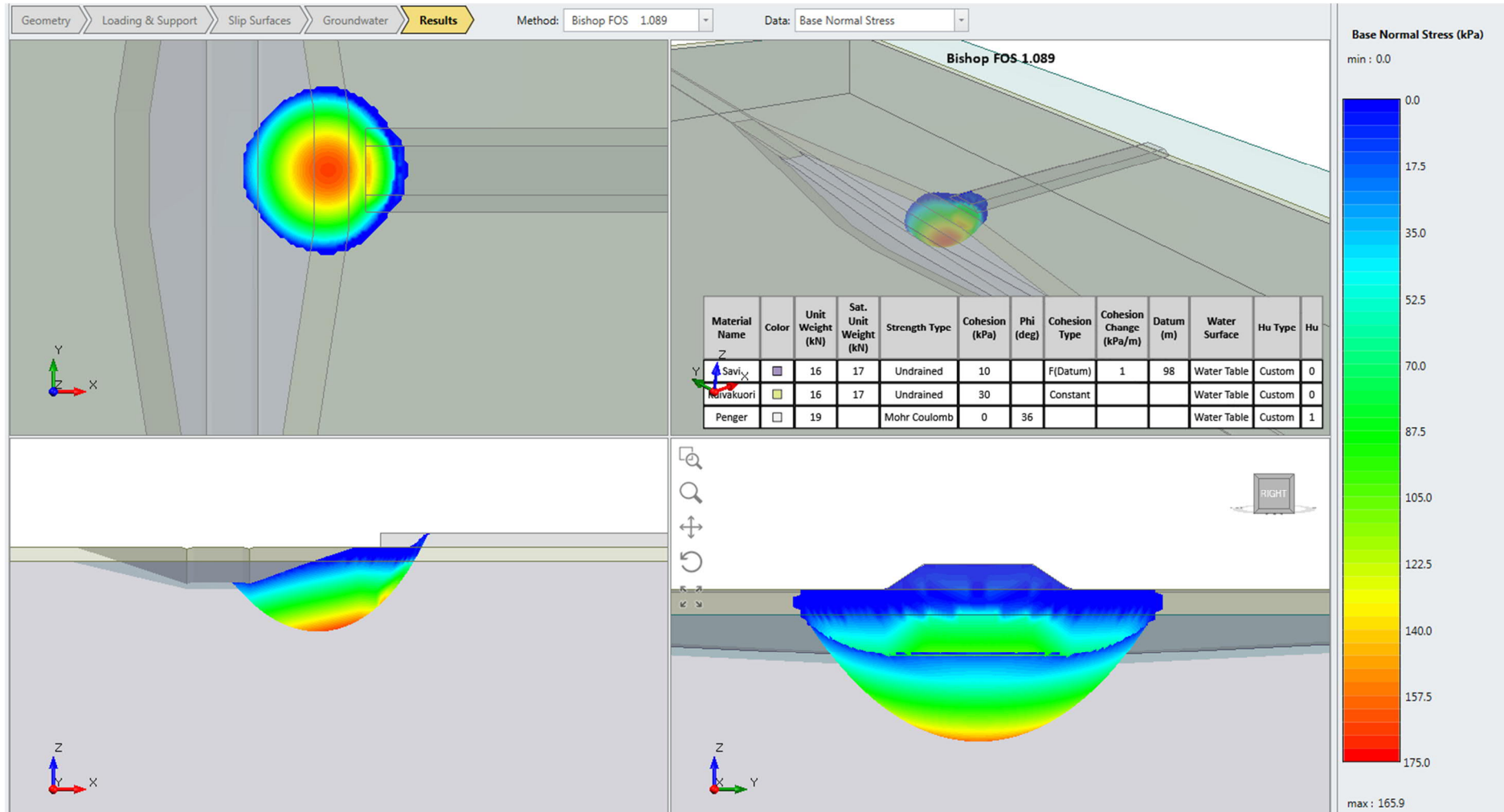
Liite 18. Stabiliateettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

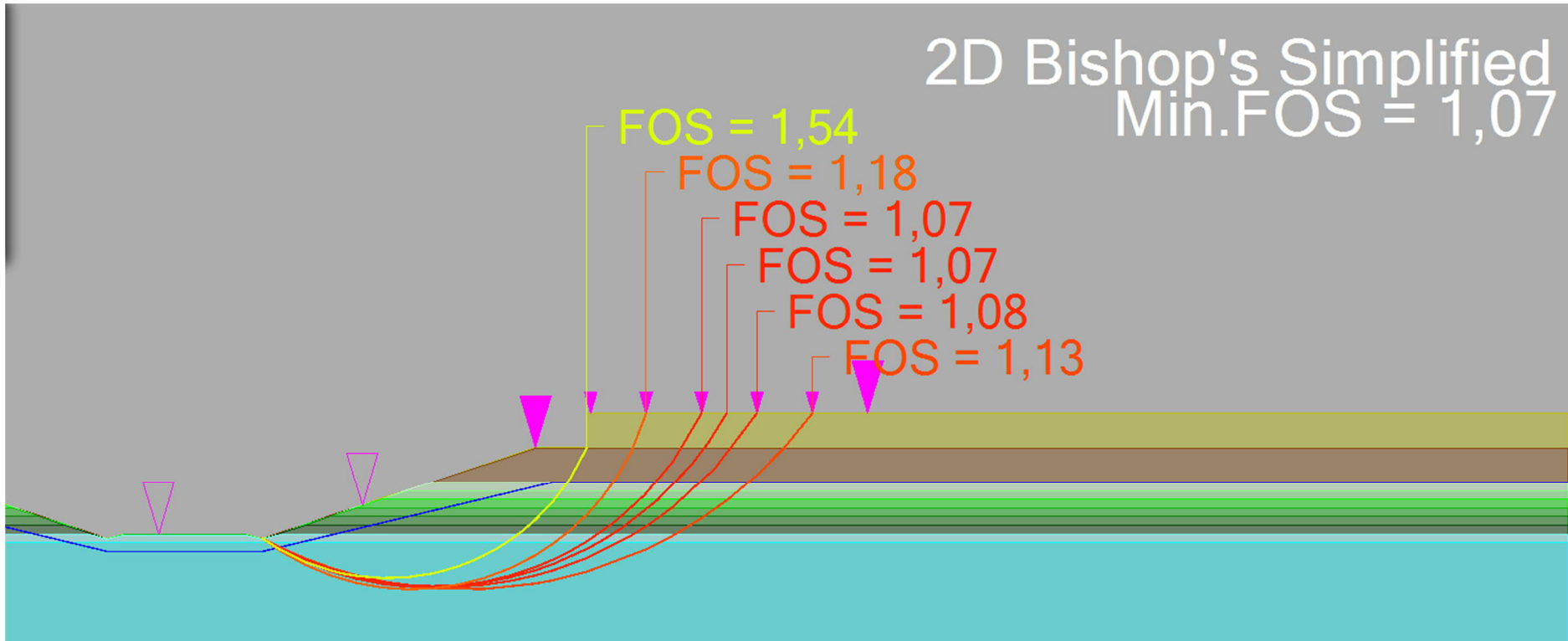


Liite 18. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

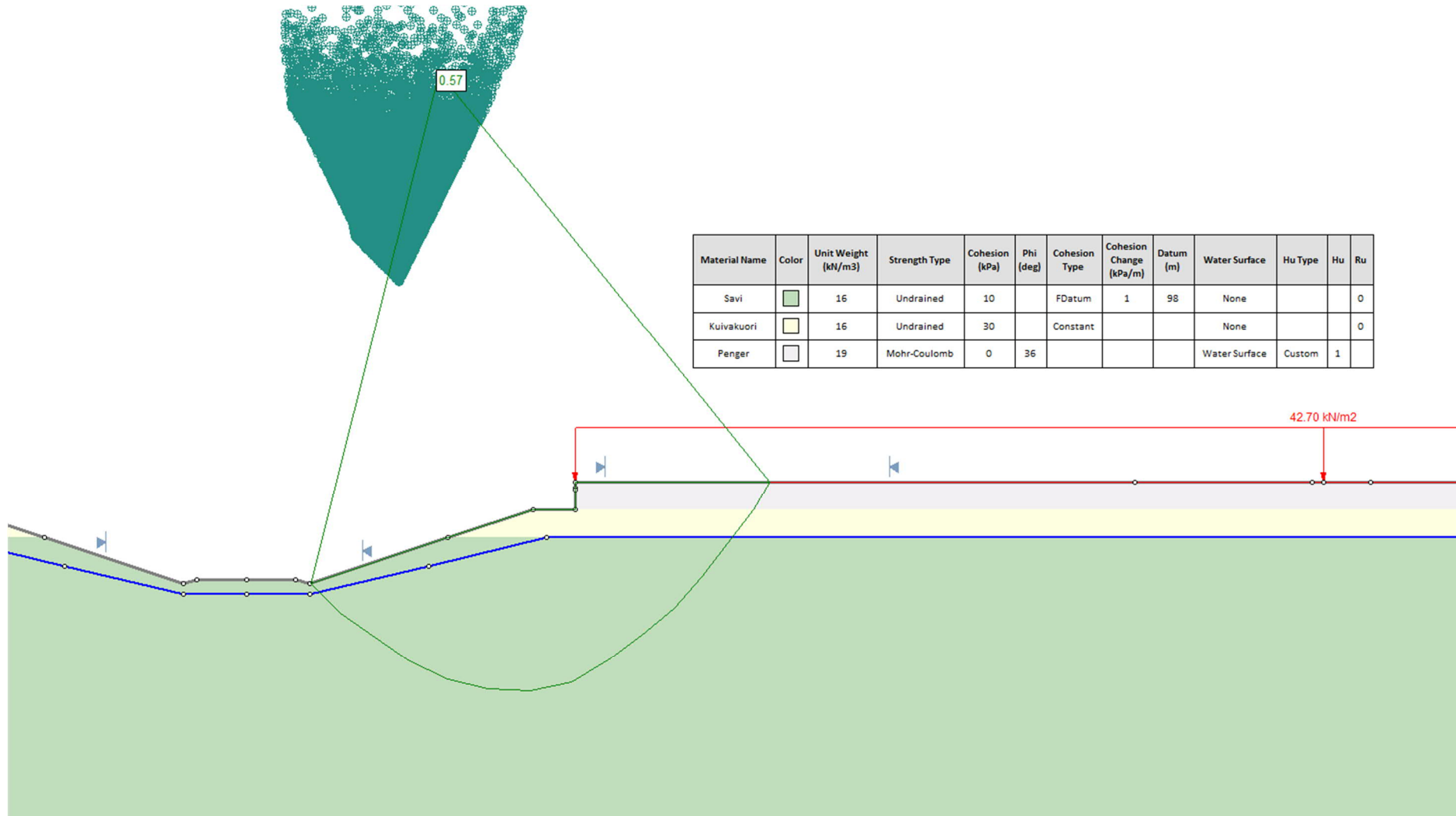


Liite 18. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

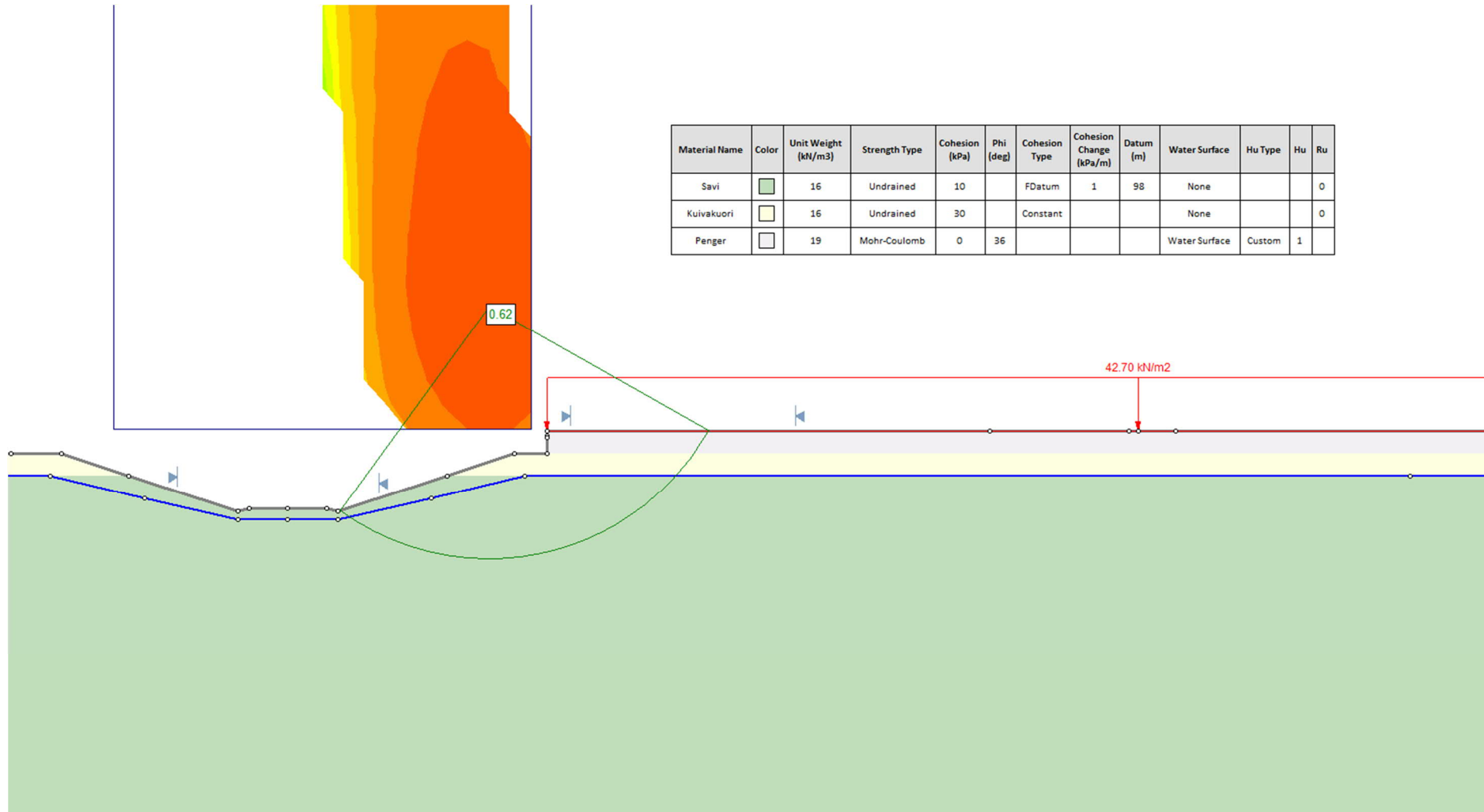




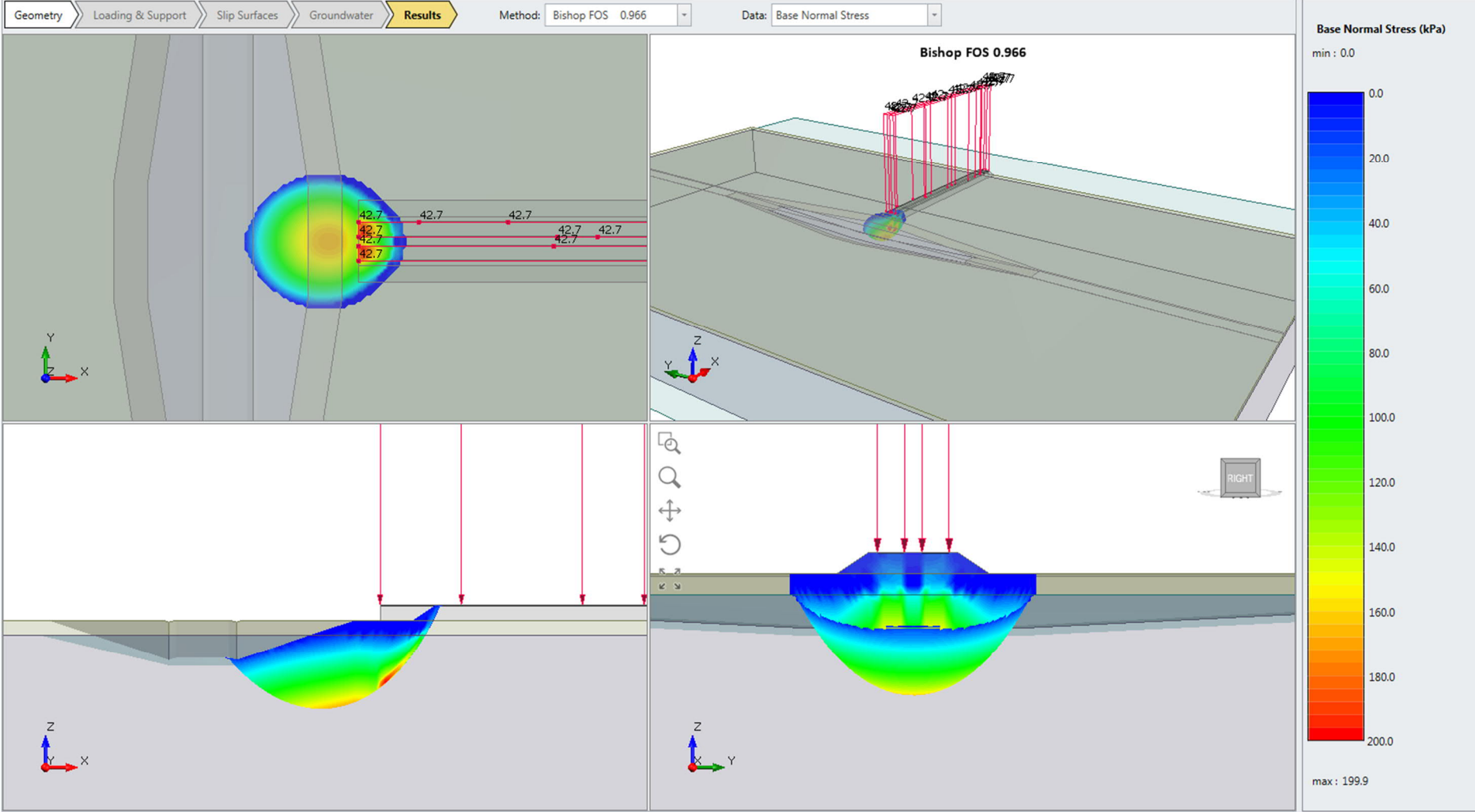
Liite 18. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

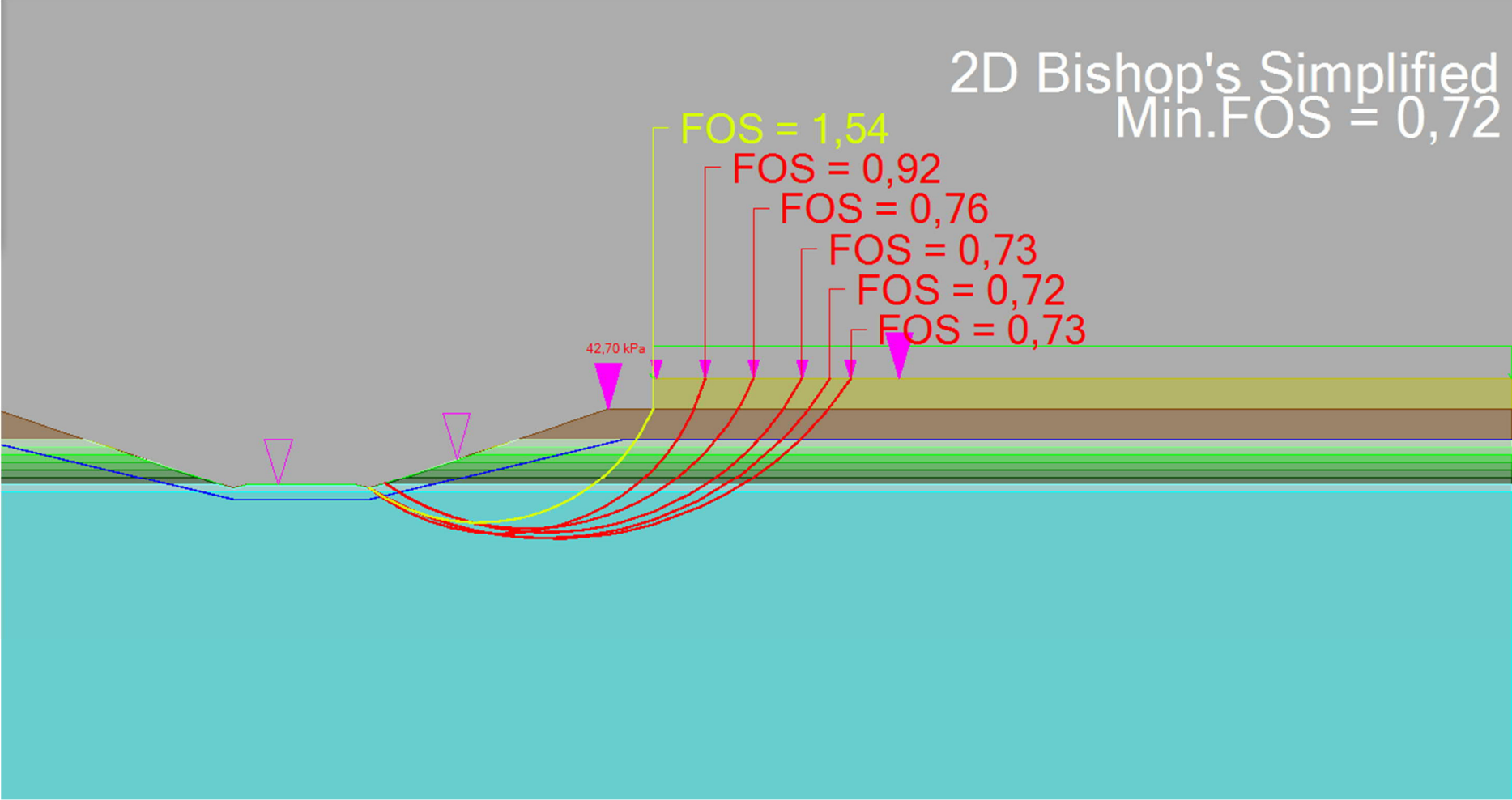


Liite 18. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

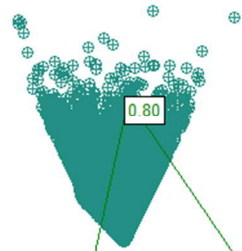


Liite 18. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Kaksiraiteinen ratapenger.

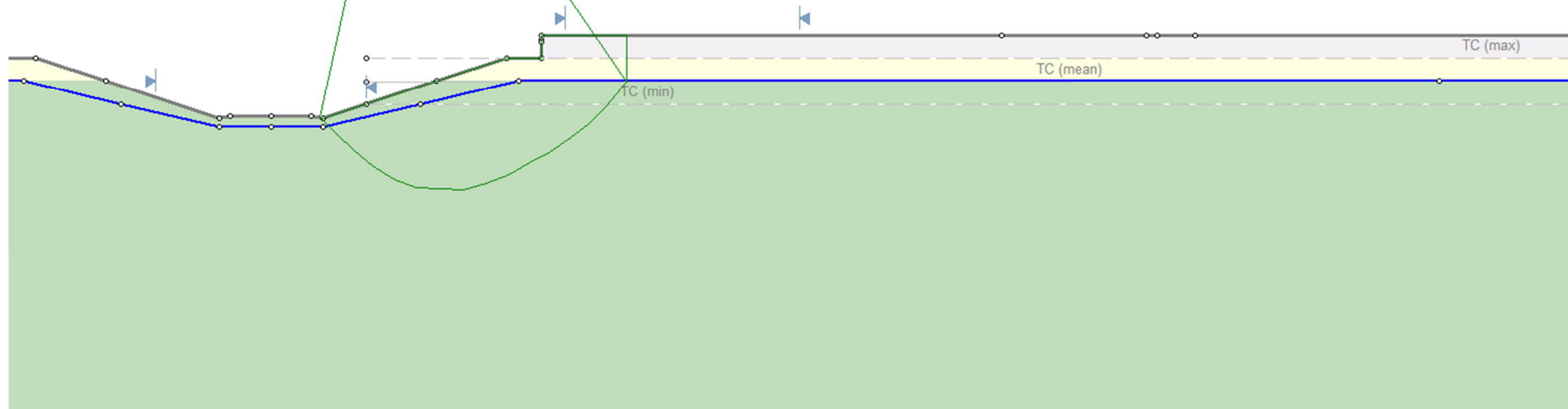




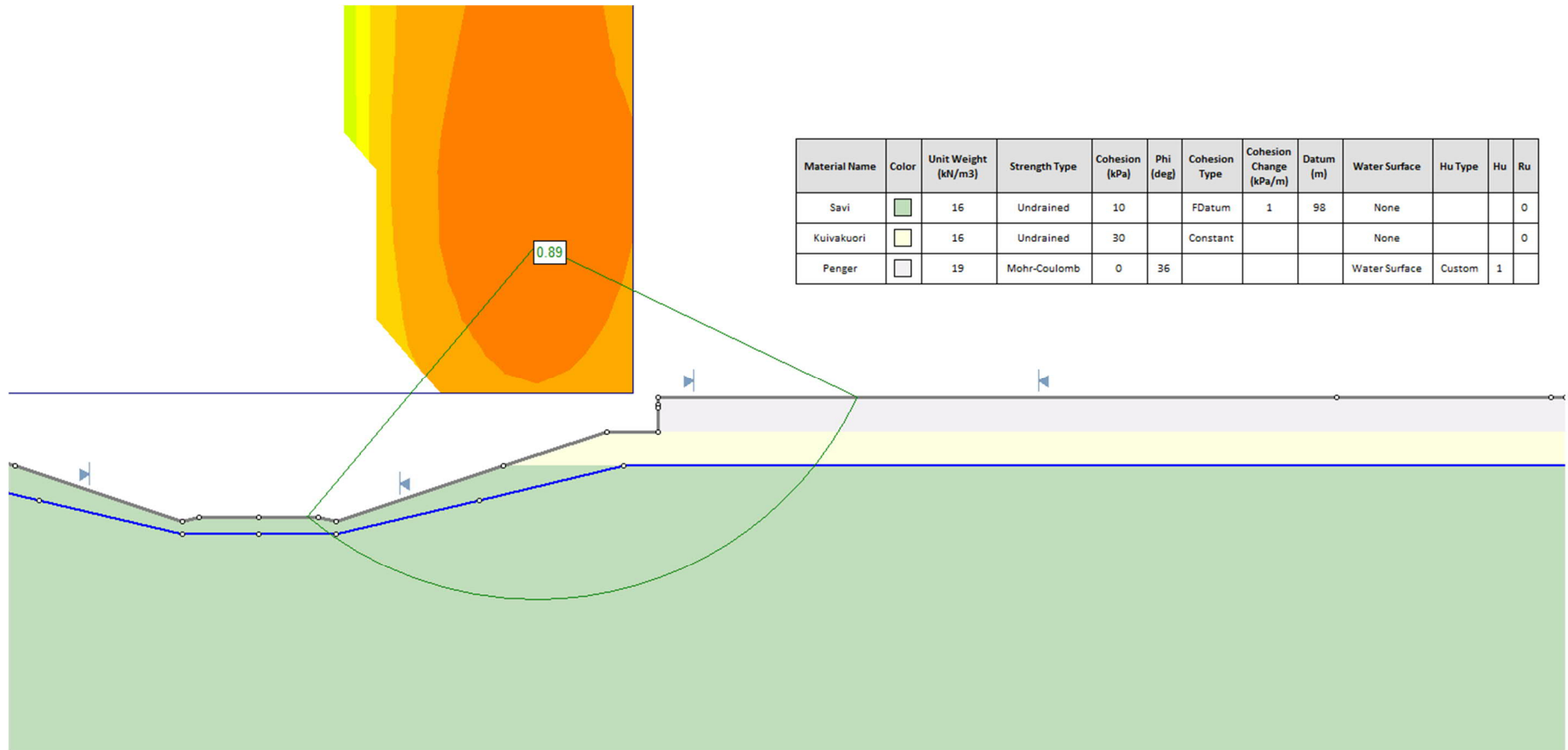
Liite 19. Stabiliateettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Moottoritiepenger.



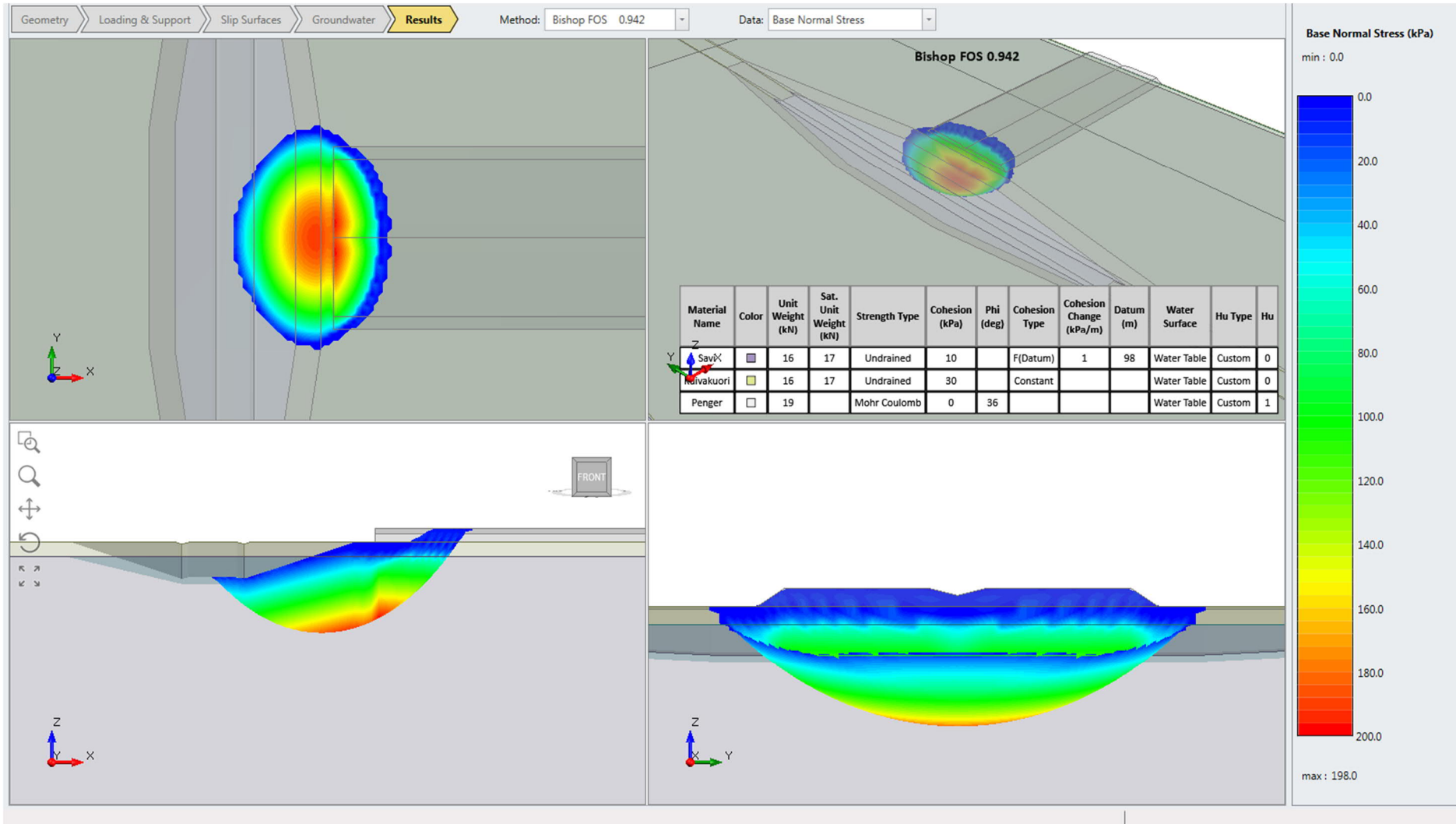
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Savi	■	16	Undrained	10		FDatum	1	98	None			0
Kuivakuori	■	16	Undrained	30		Constant			None			0
Penger	■	19	Mohr-Coulomb	0	36				Water Surface	Custom	1	

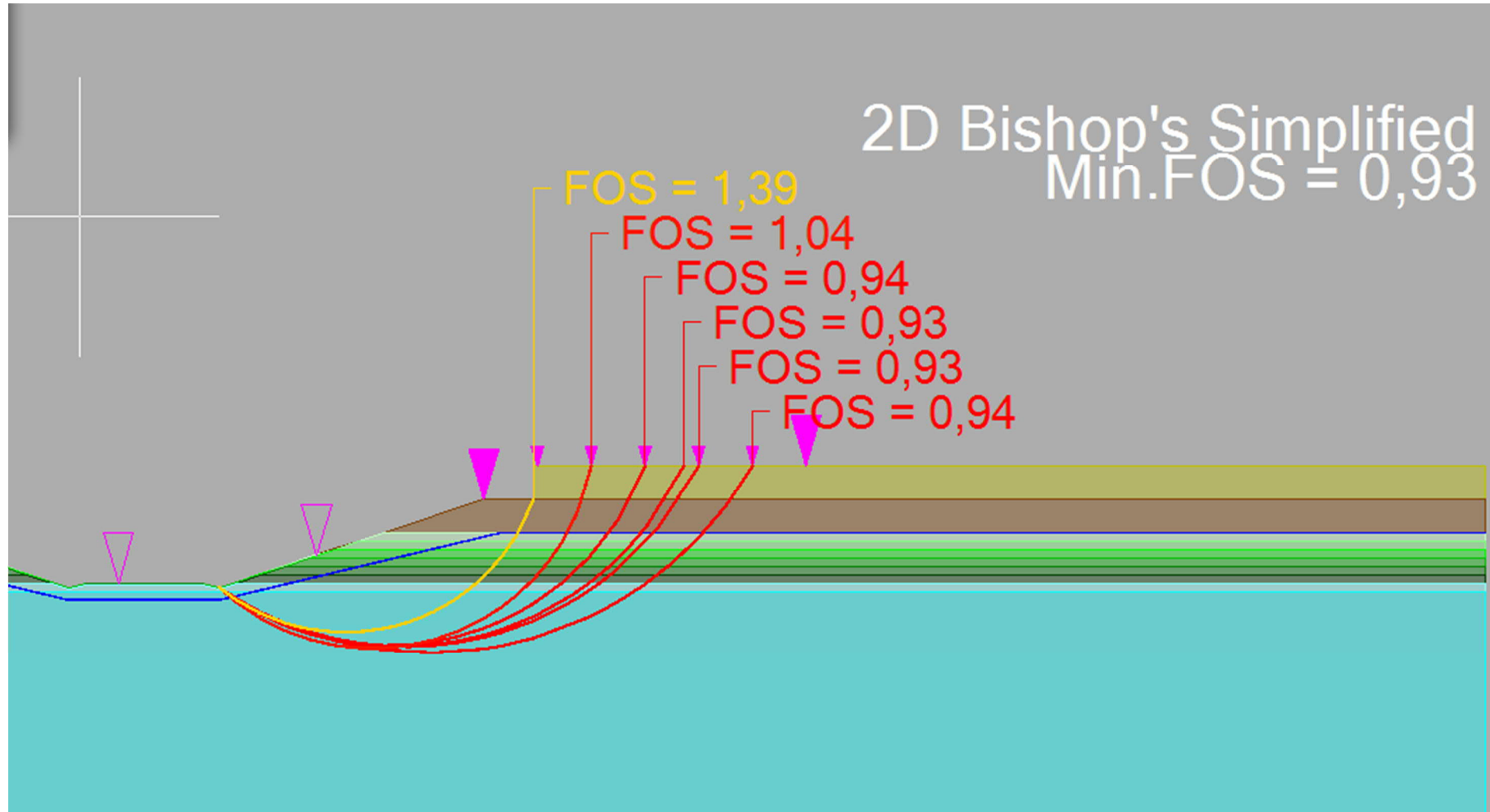


Liite 19. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Moottoritiepengeri.

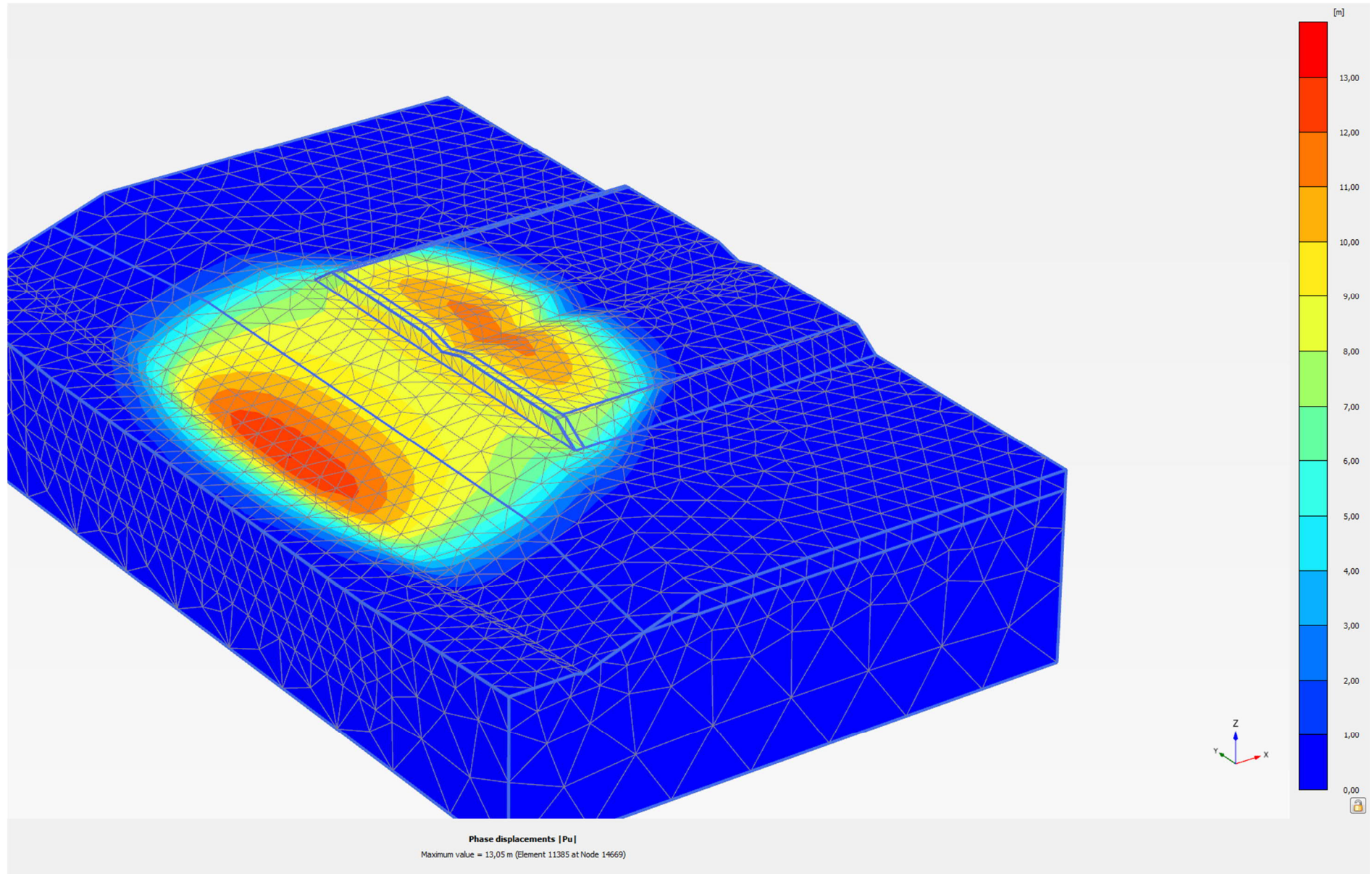


Liite 19. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 1. Moottoritiepengeri.

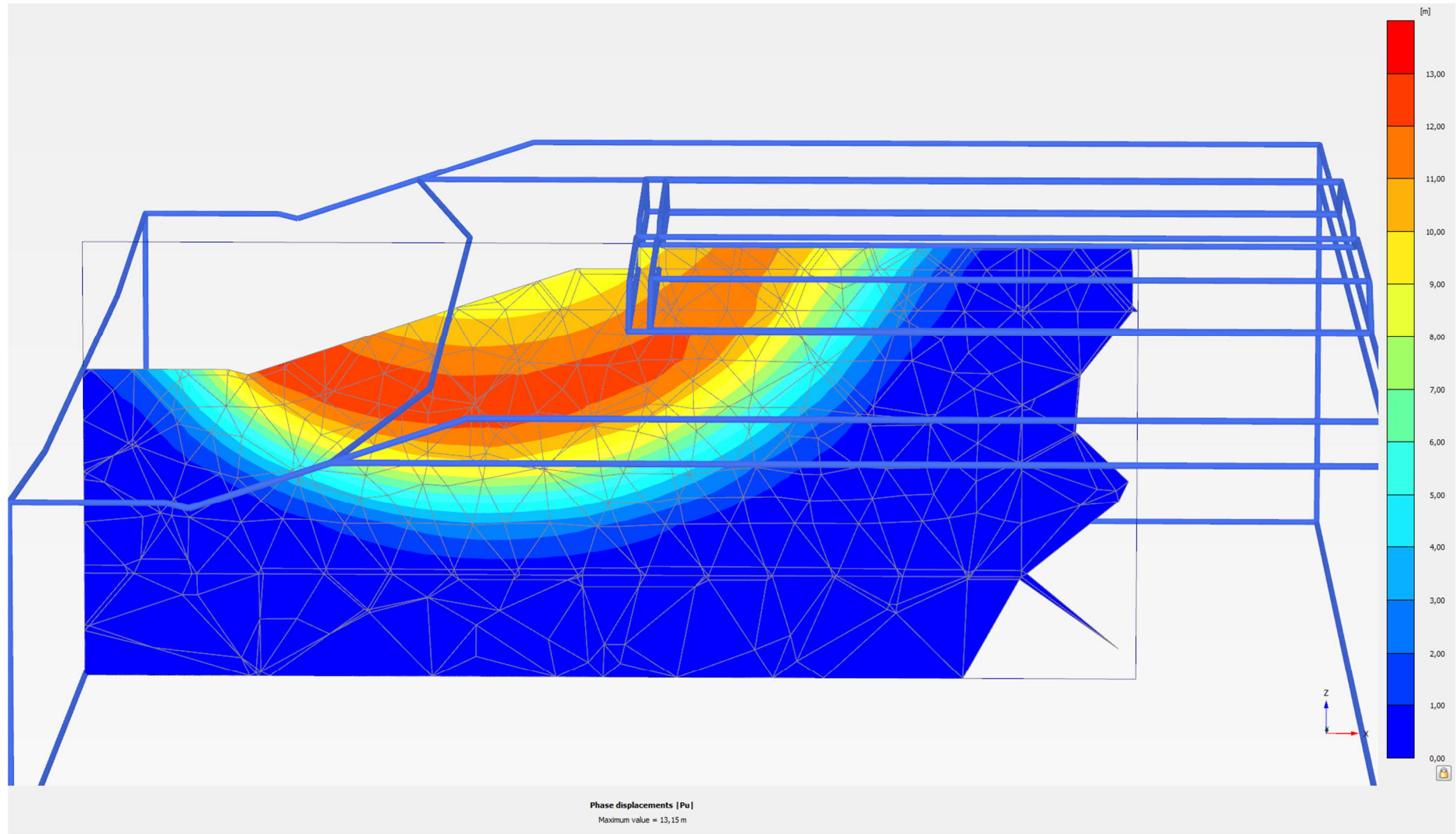




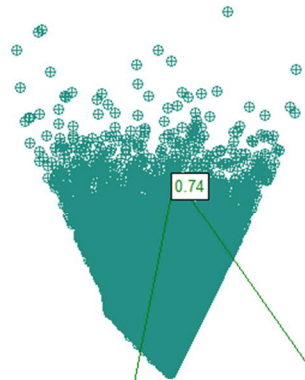
Liite 19. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepenger.



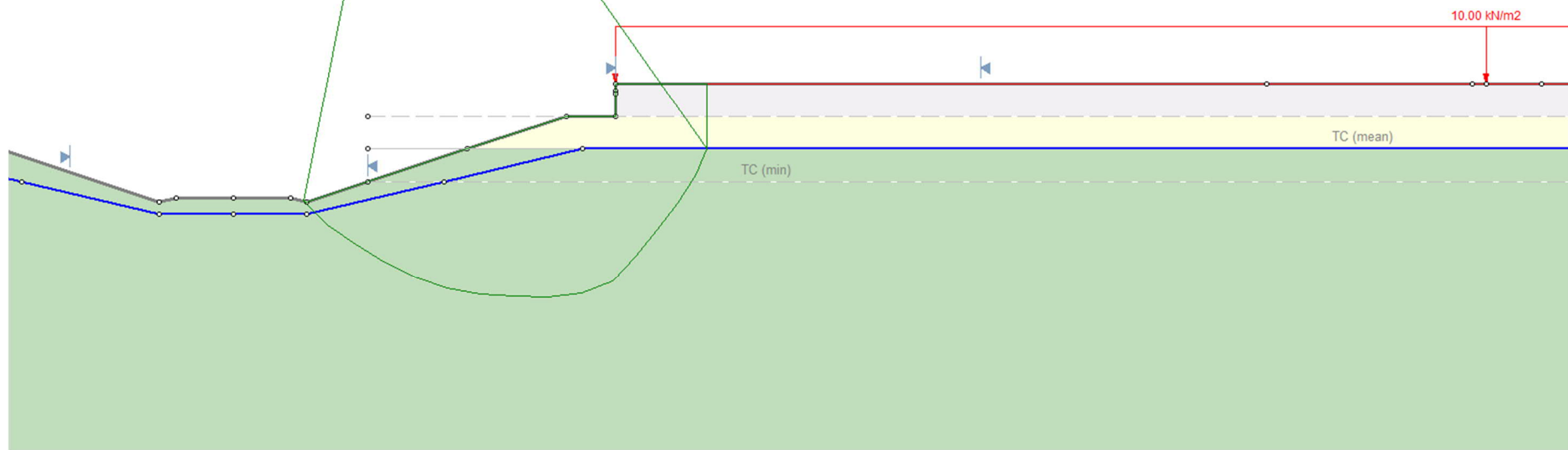
Liite 19. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepenger.



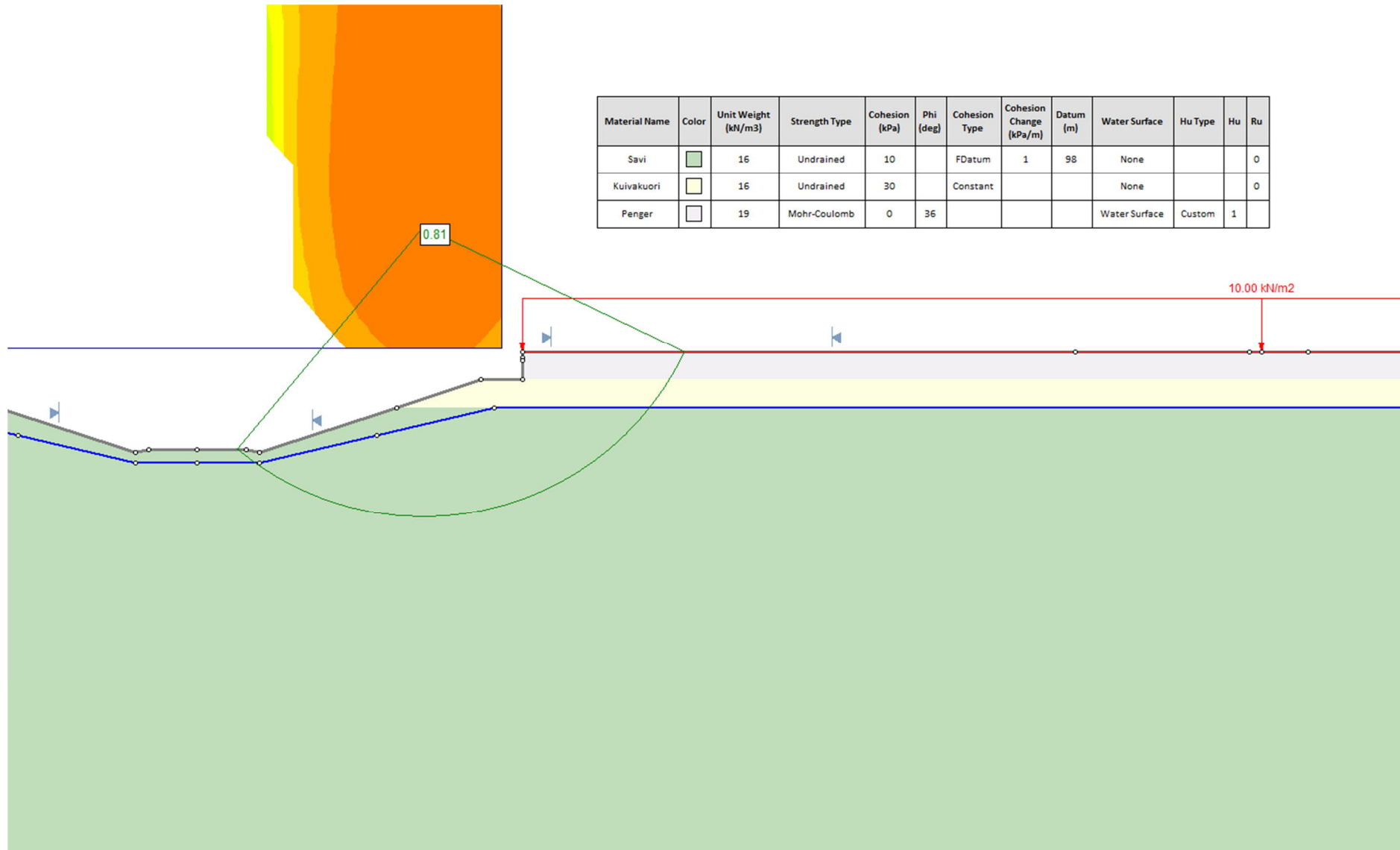
Liite 19. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 1. Moottoritiepenget.



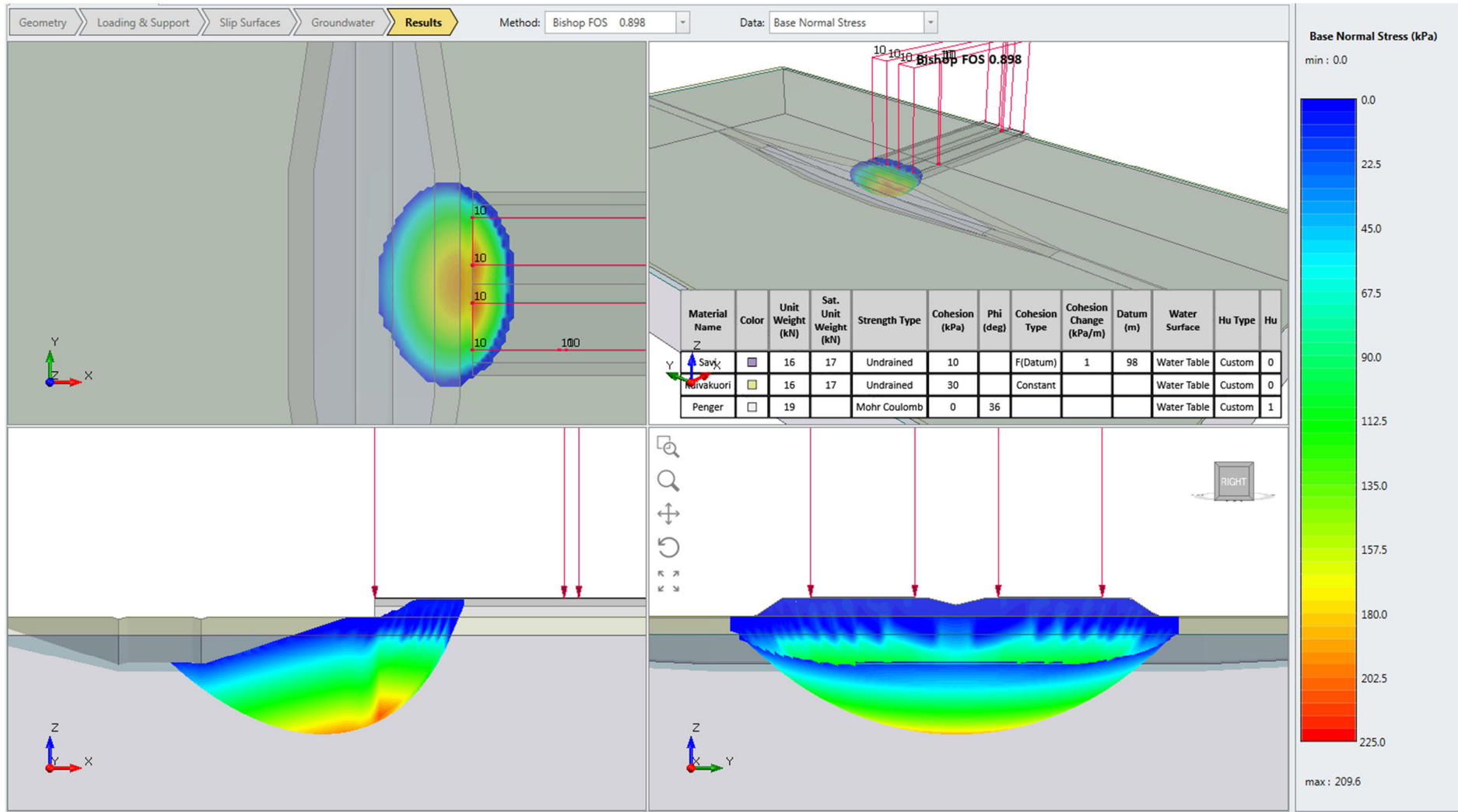
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Savi	■	16	Undrained	10		FDatum	1	98	None			0
Kuivakuori	■	16	Undrained	30		Constant			None			0
Penger	■	19	Mohr-Coulomb	0	36				Water Surface	Custom	1	

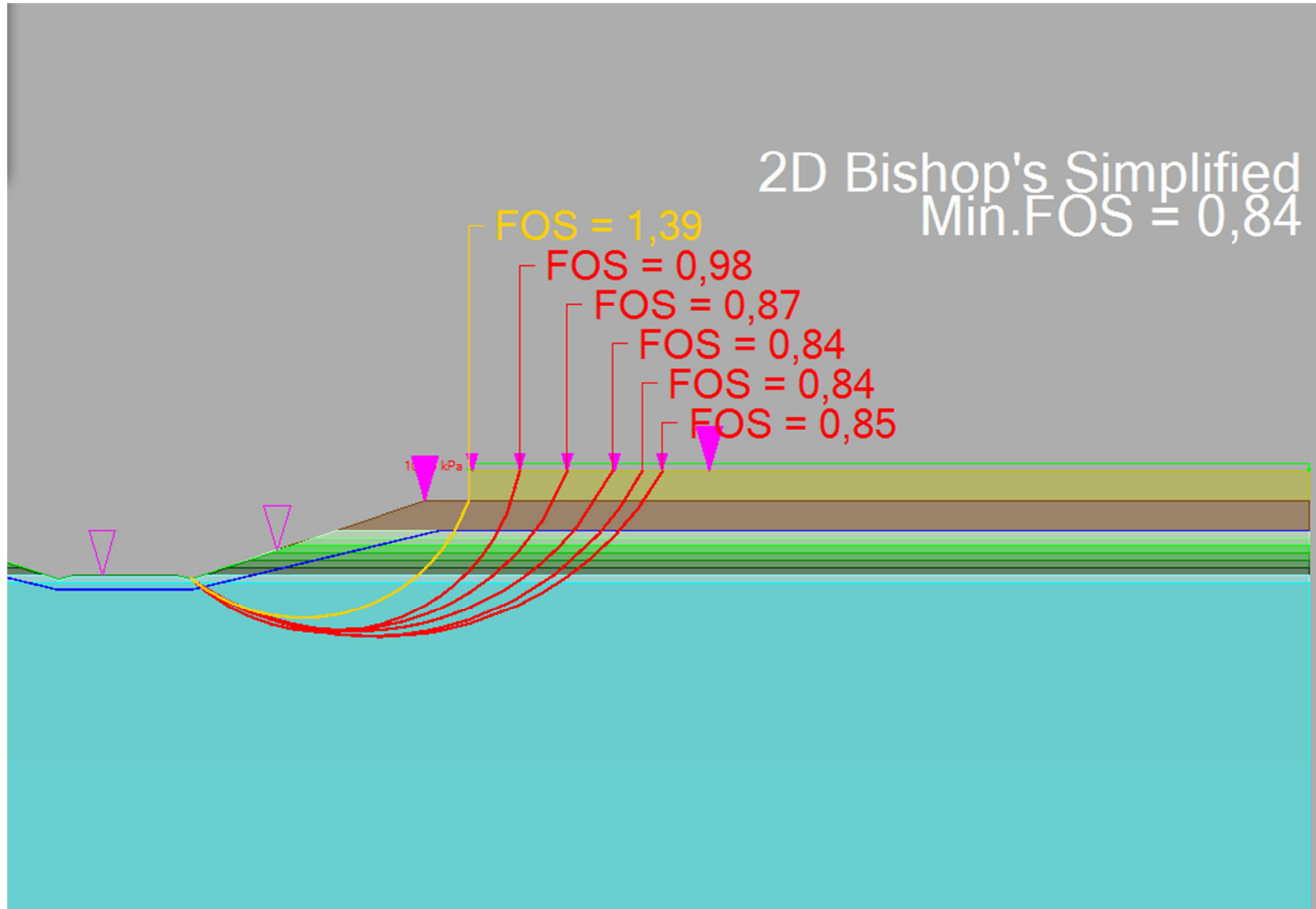


Liite 19. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepenger.

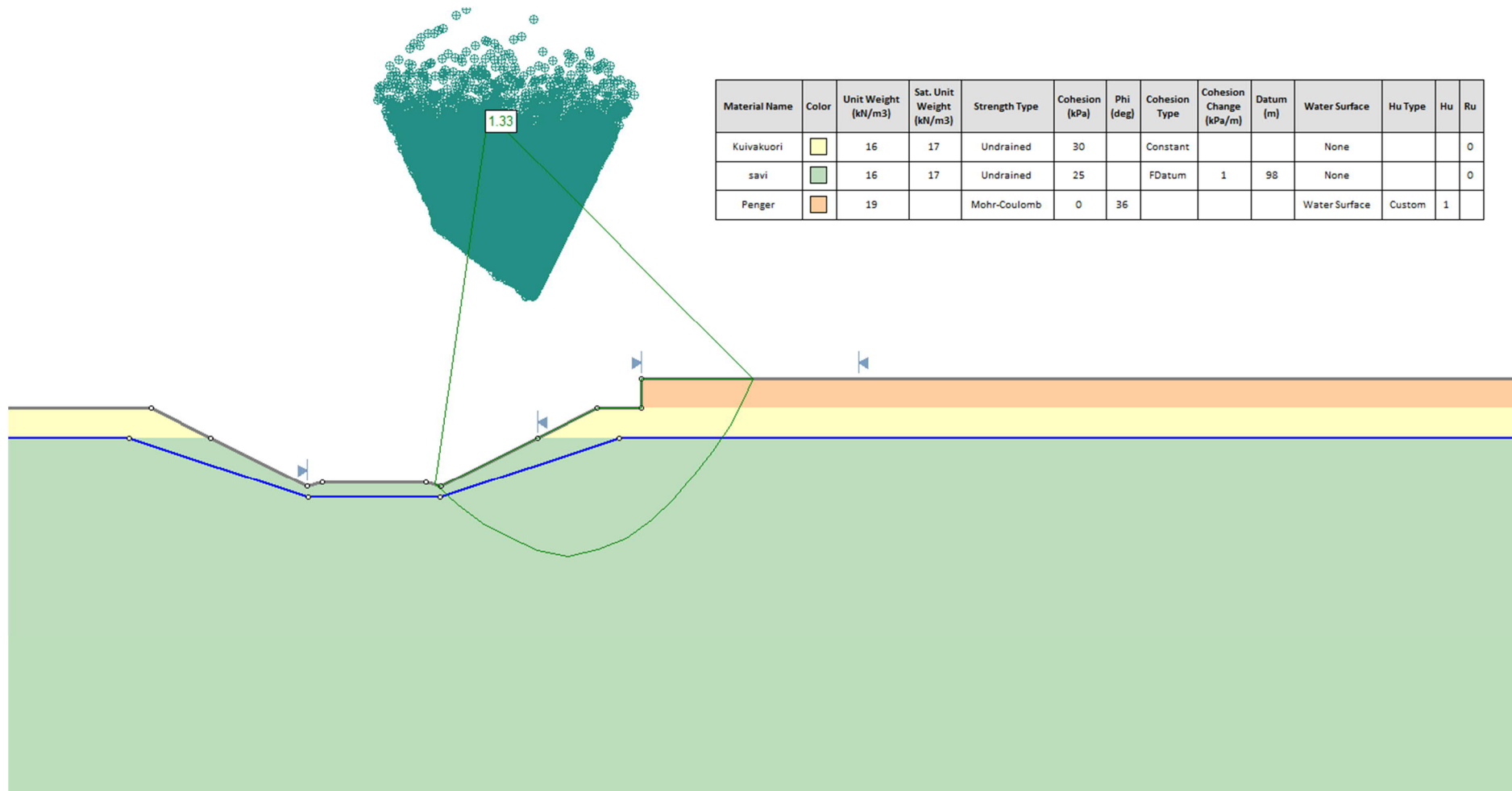


Liite 19. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 1. Moottoritiepennger.

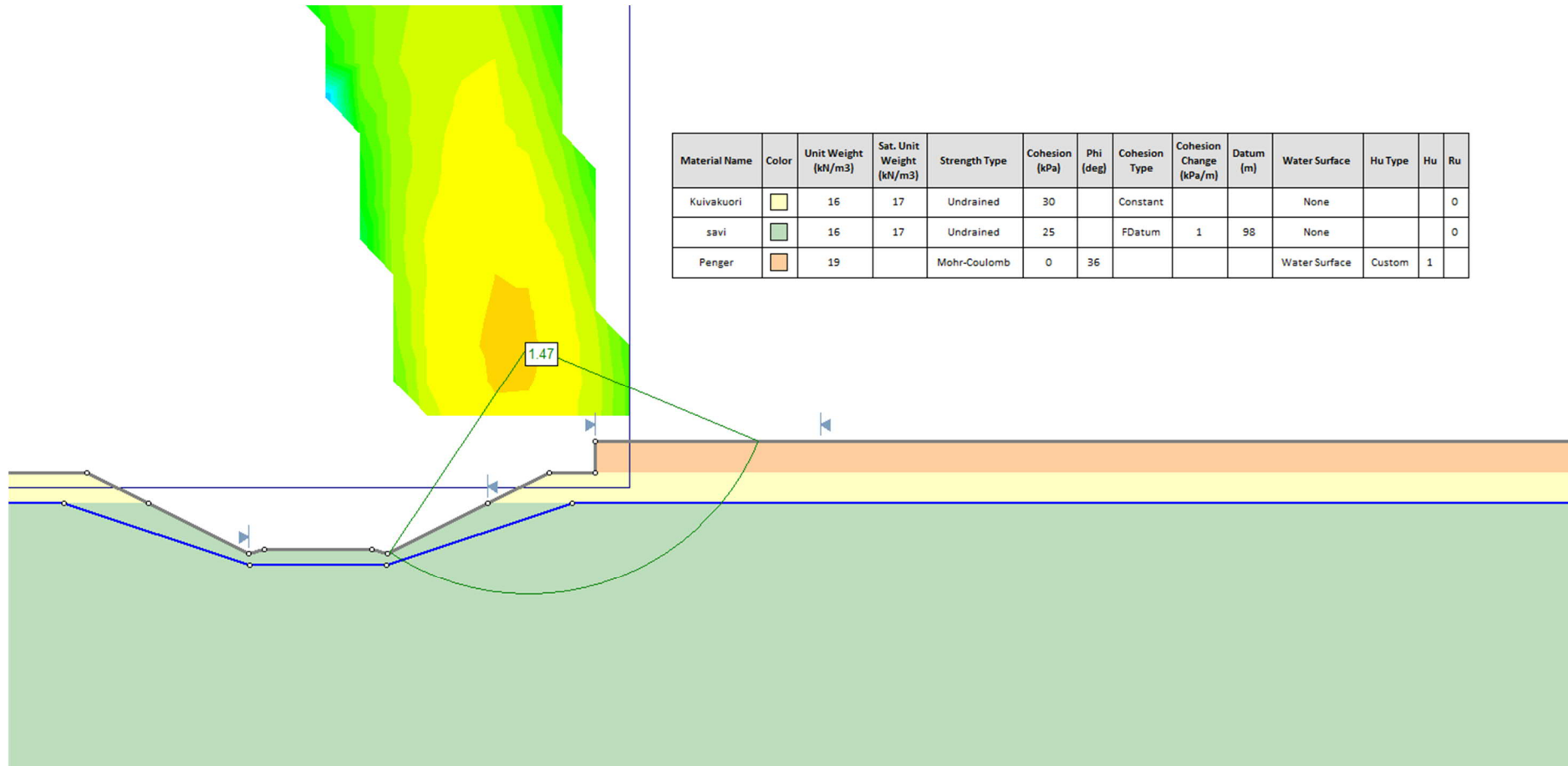




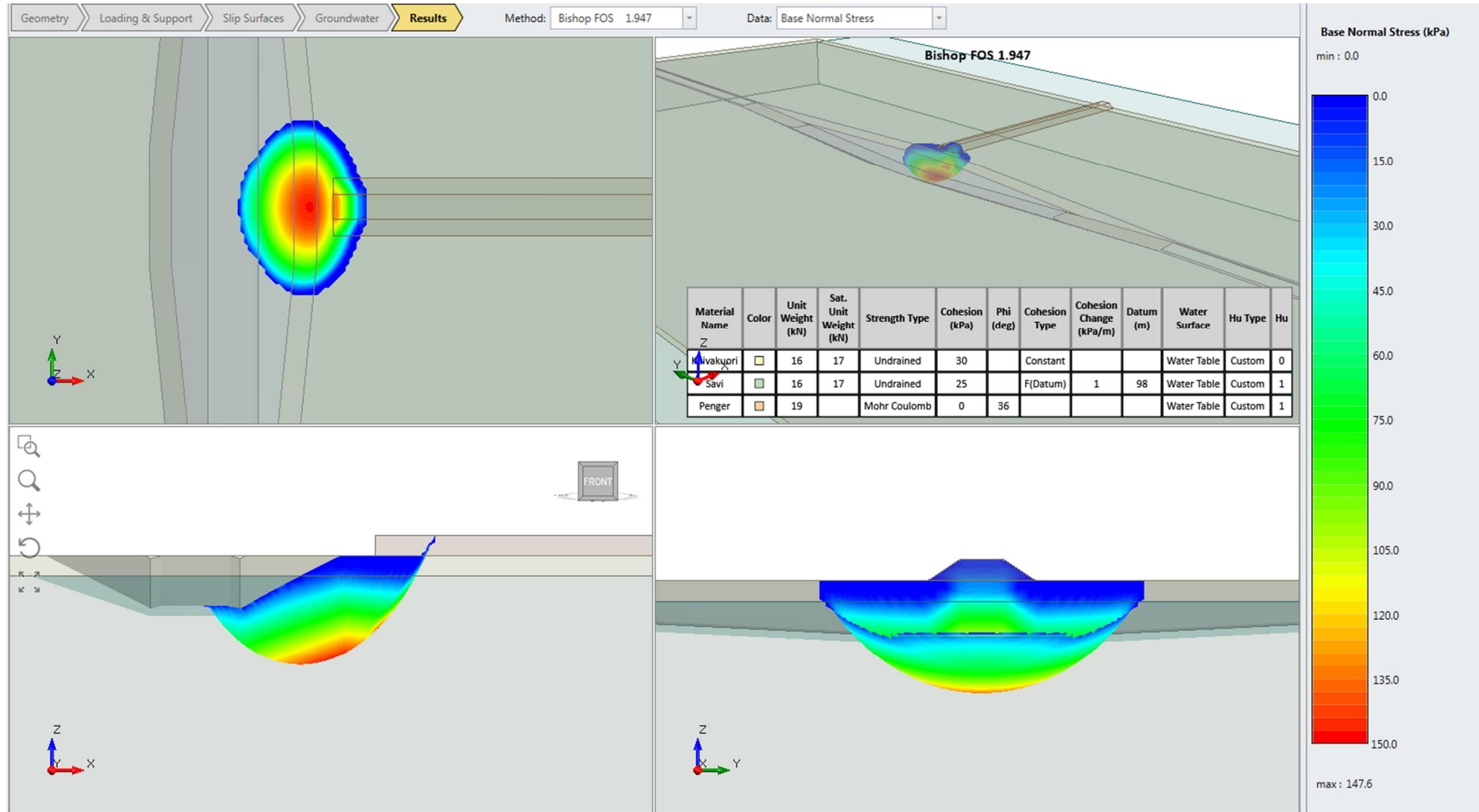
Liite 20. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

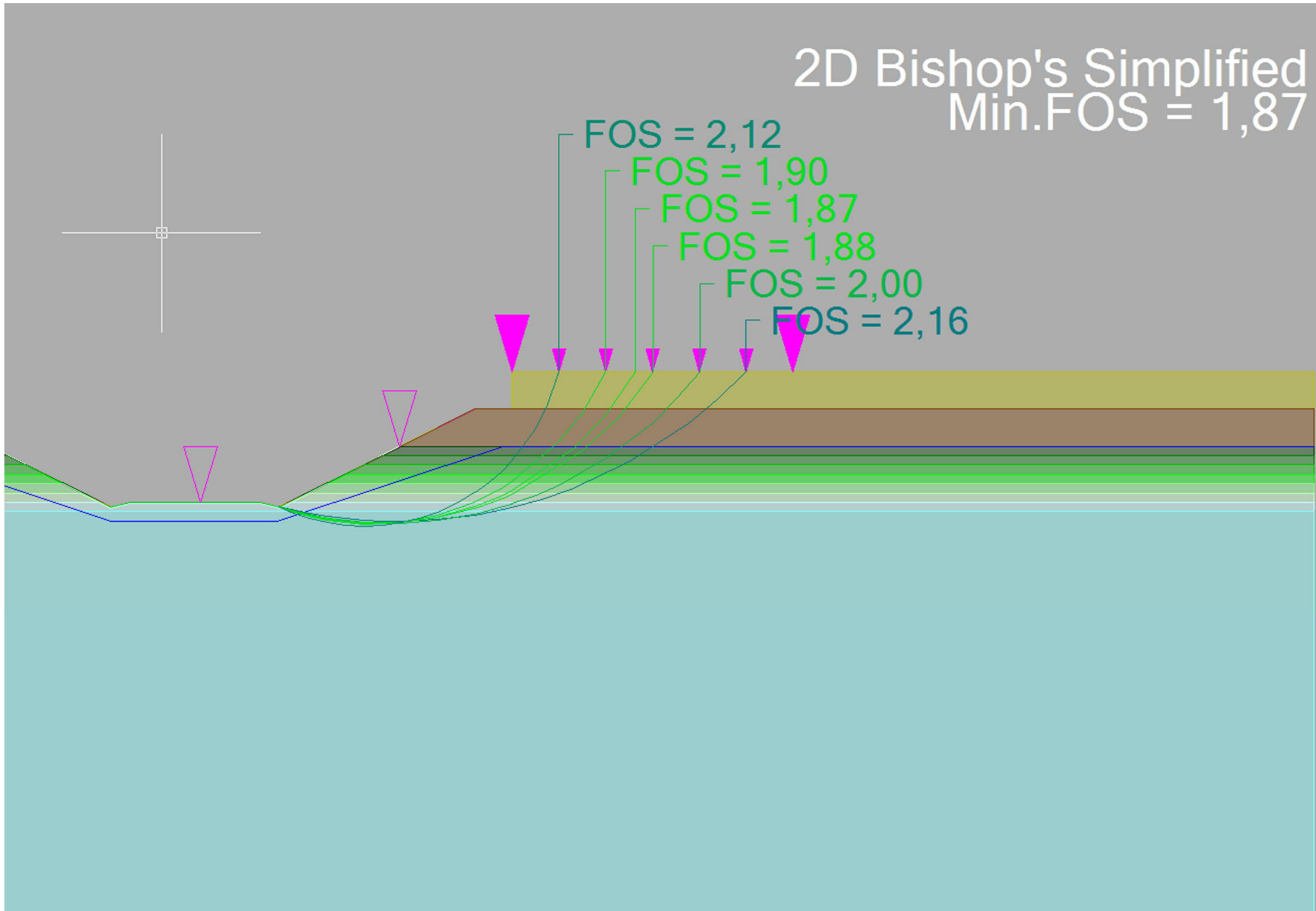


Liite 20. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

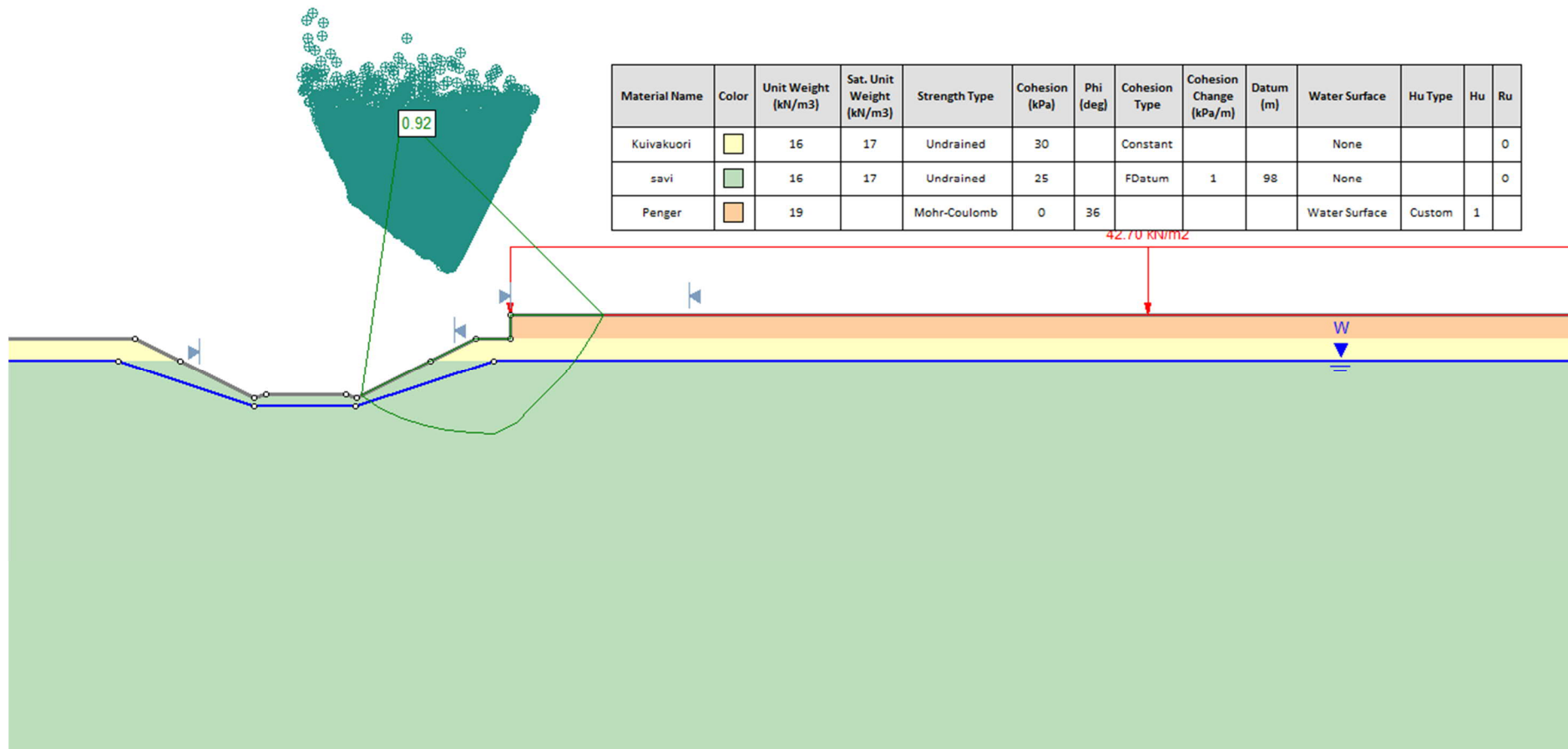


Liite 20. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

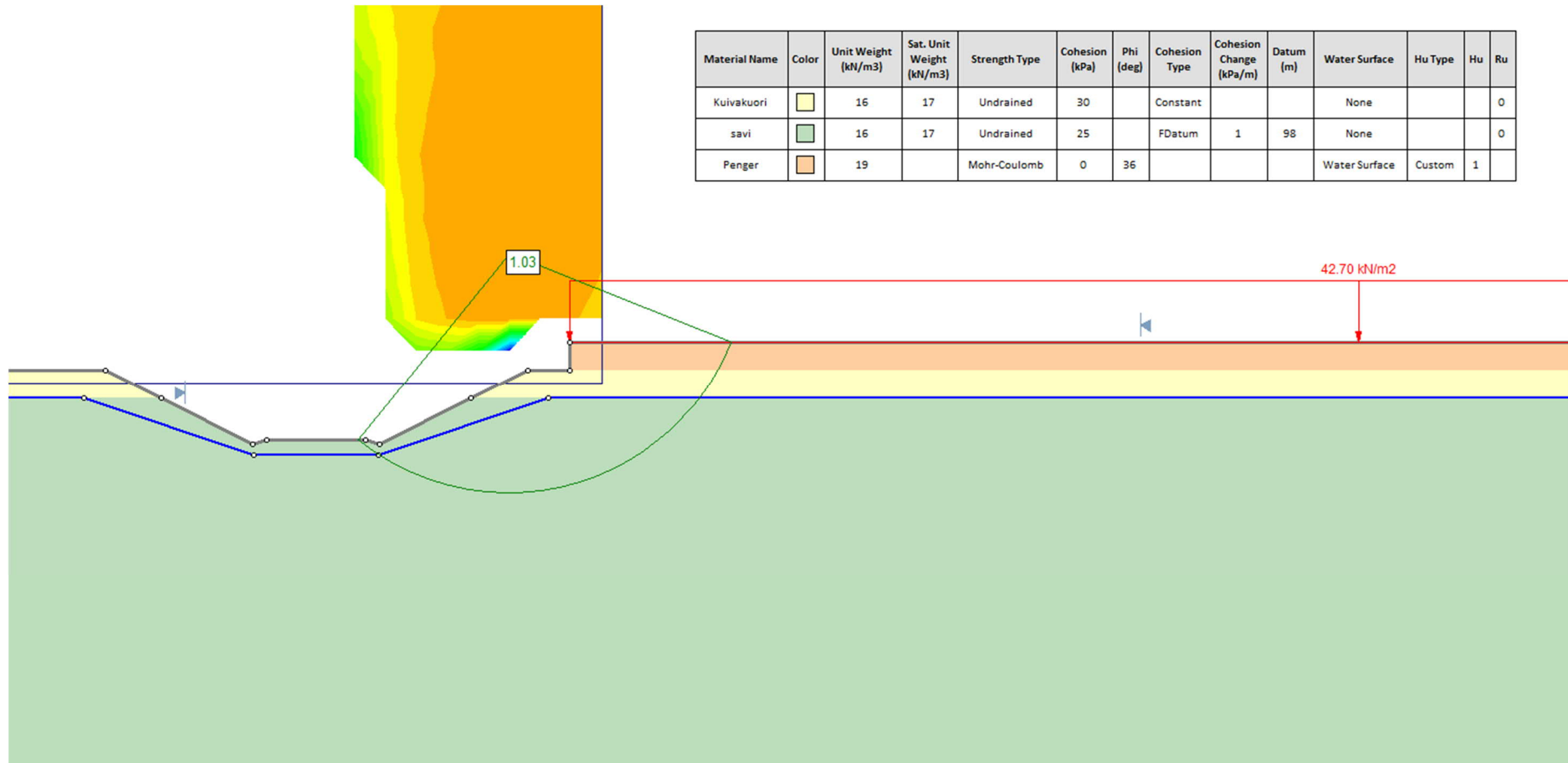




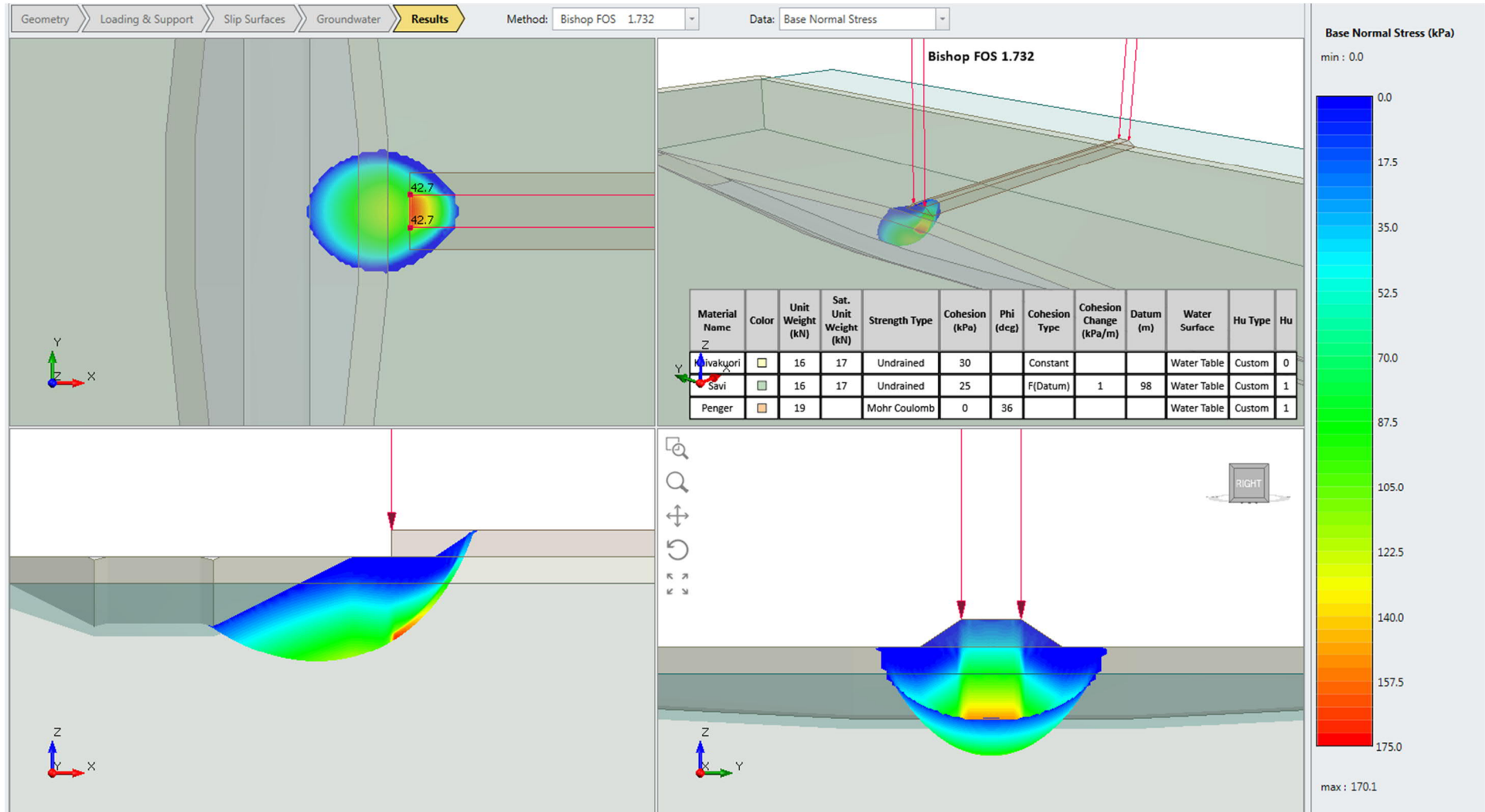
Liite 20. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

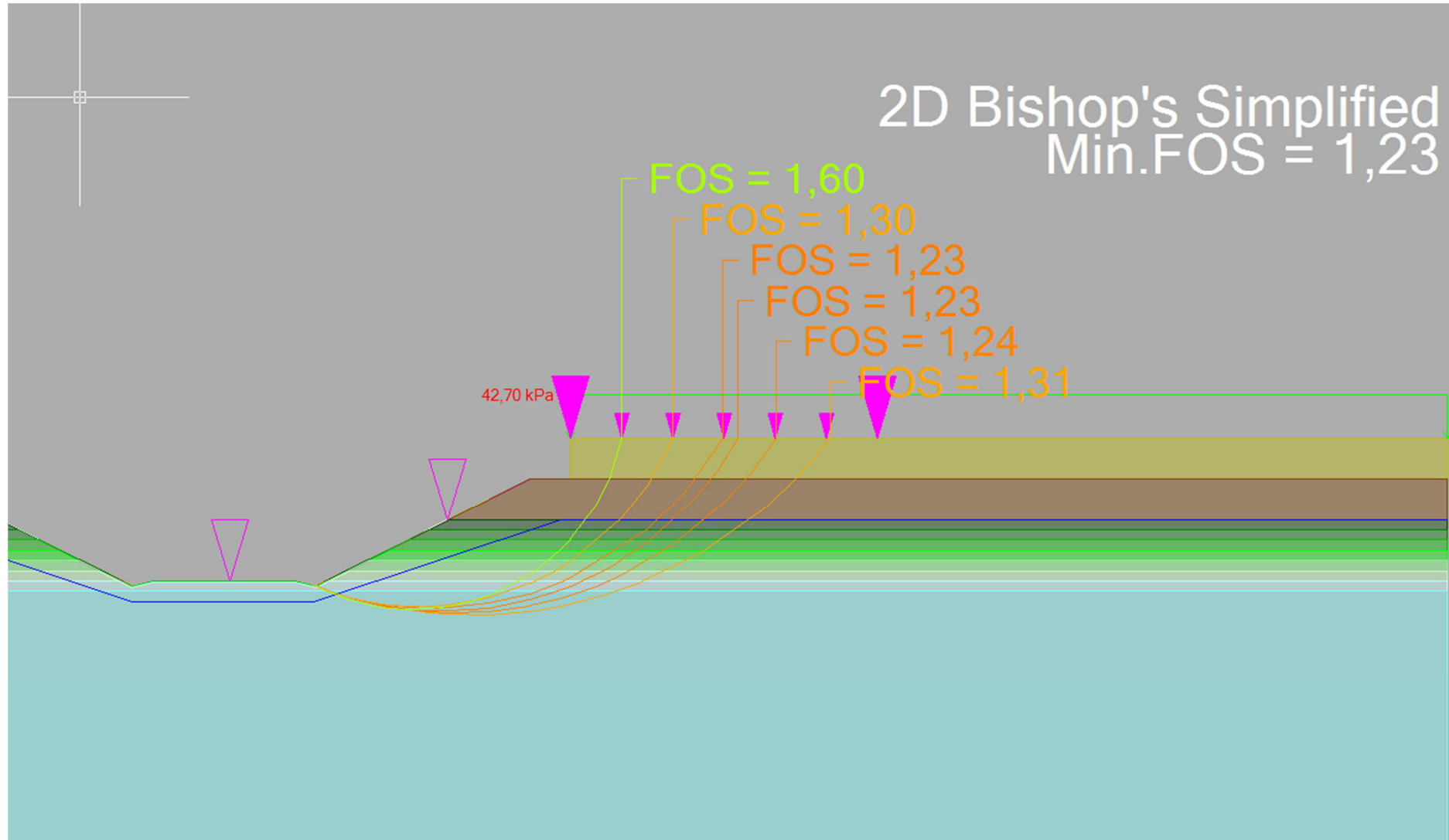


Liite 20. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

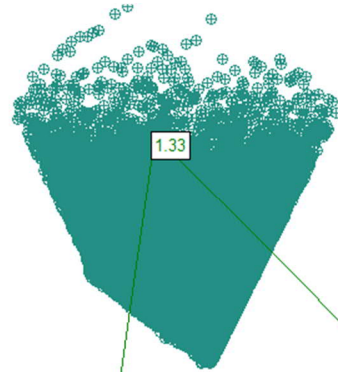


Liite 20. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Yksiraiteinen ratapenger.

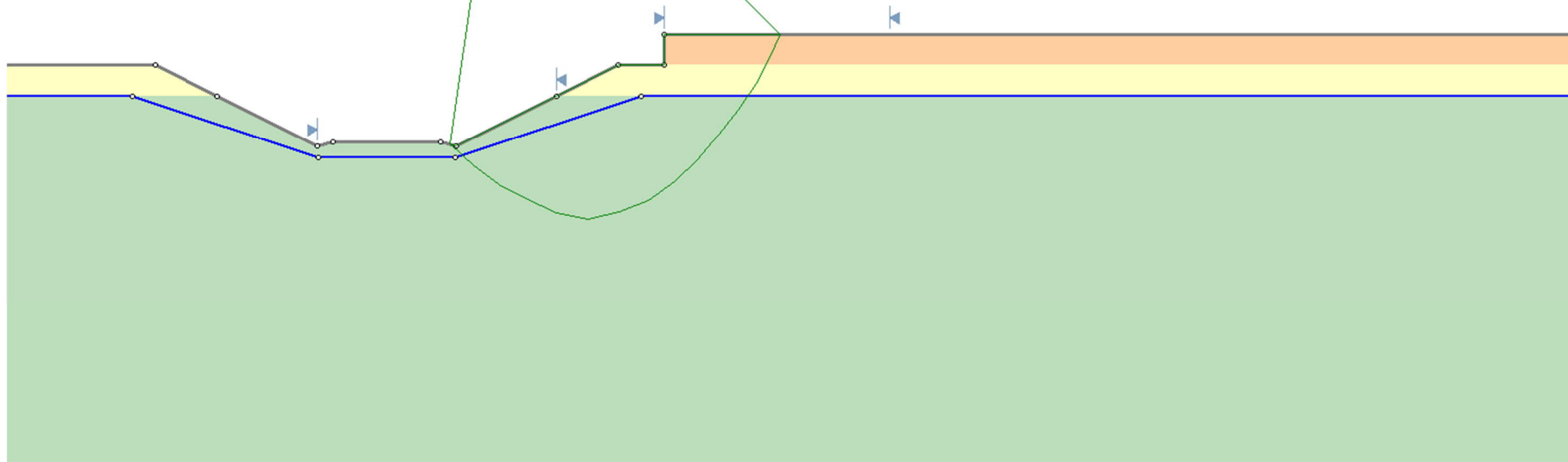




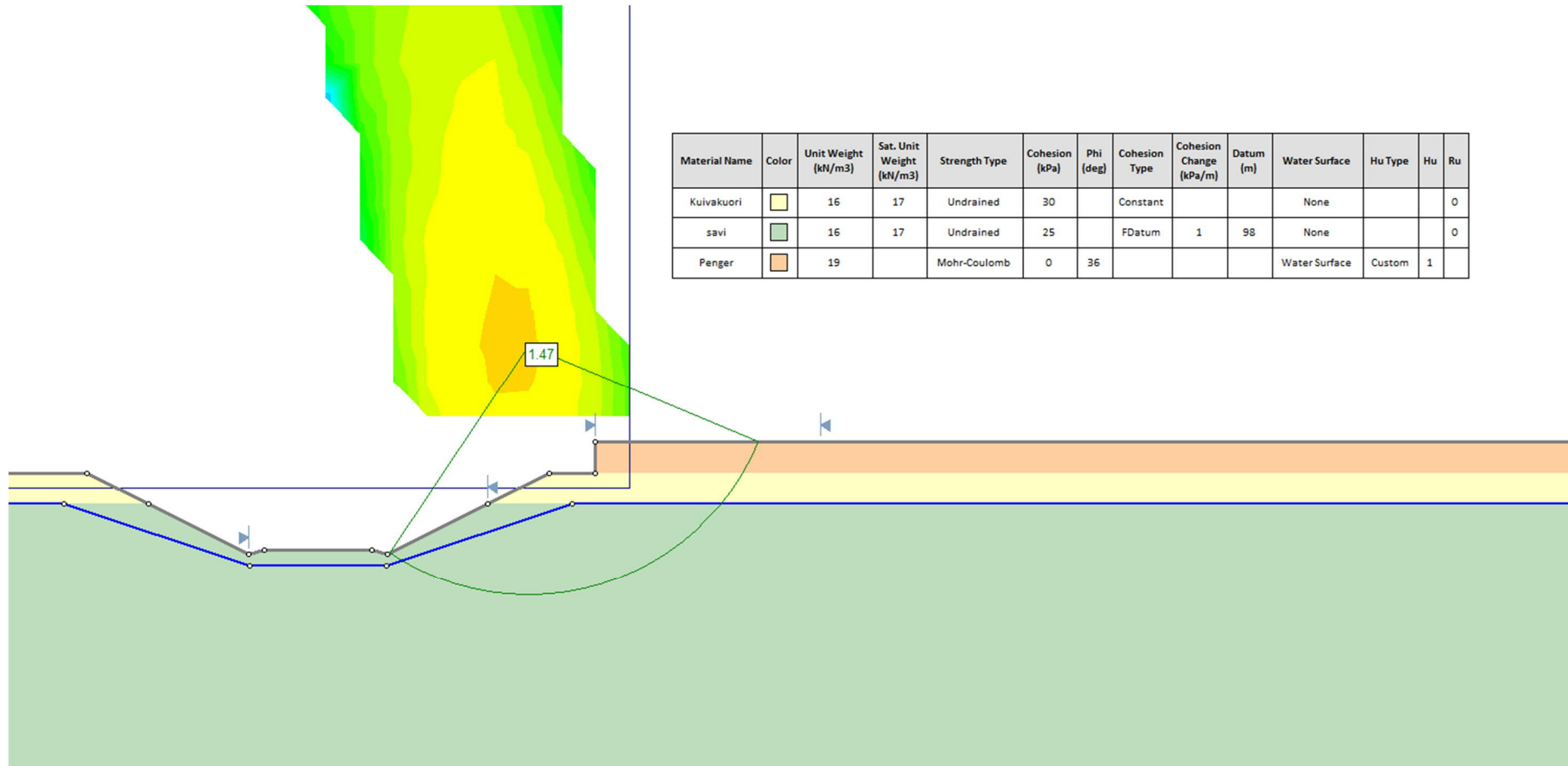
Liite 21. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.



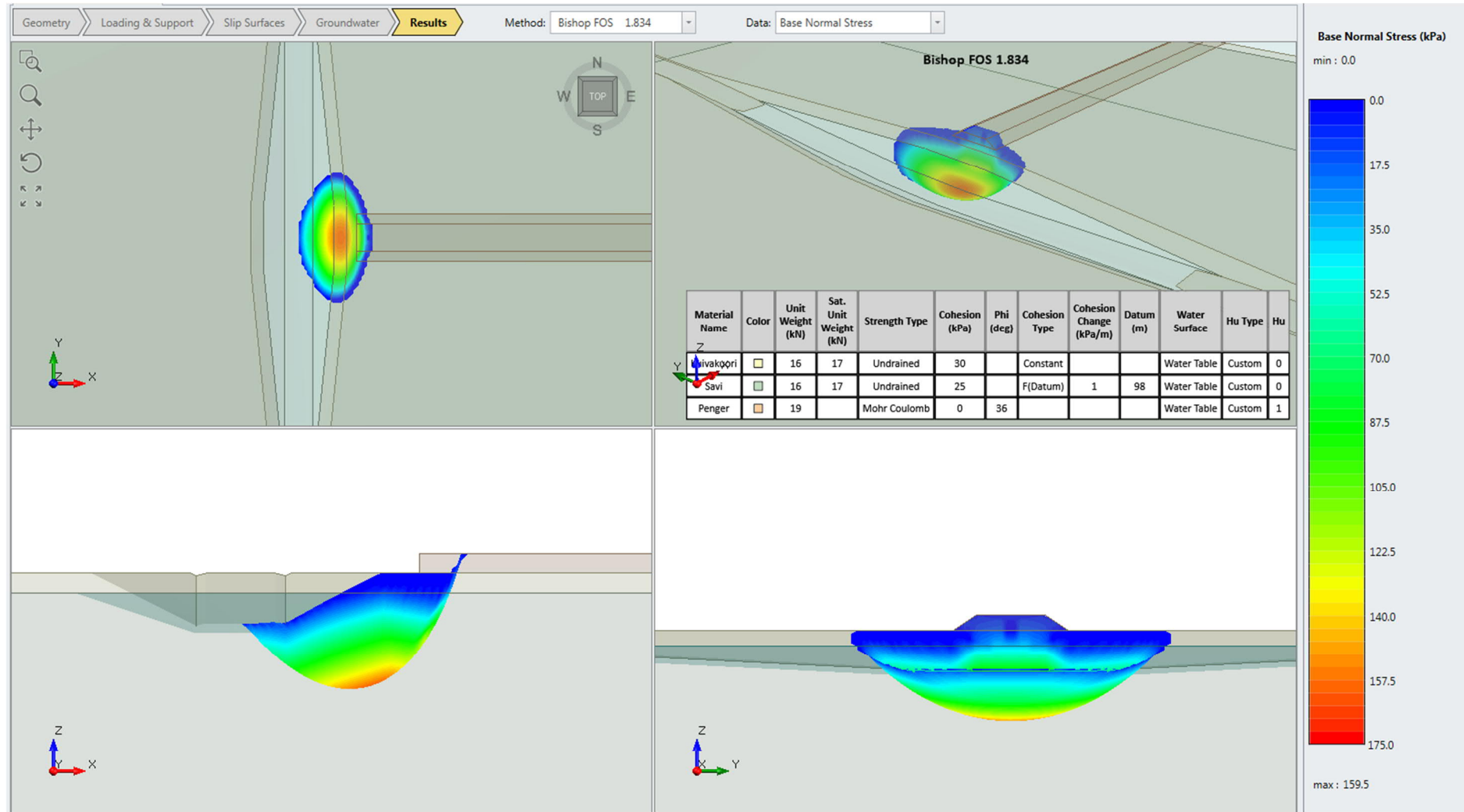
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant			None			0
savi	Green	16	17	Undrained	25		FDatum	1	98	None			0
Penger	Orange	19		Mohr-Coulomb	0	36				Water Surface	Custom	1	

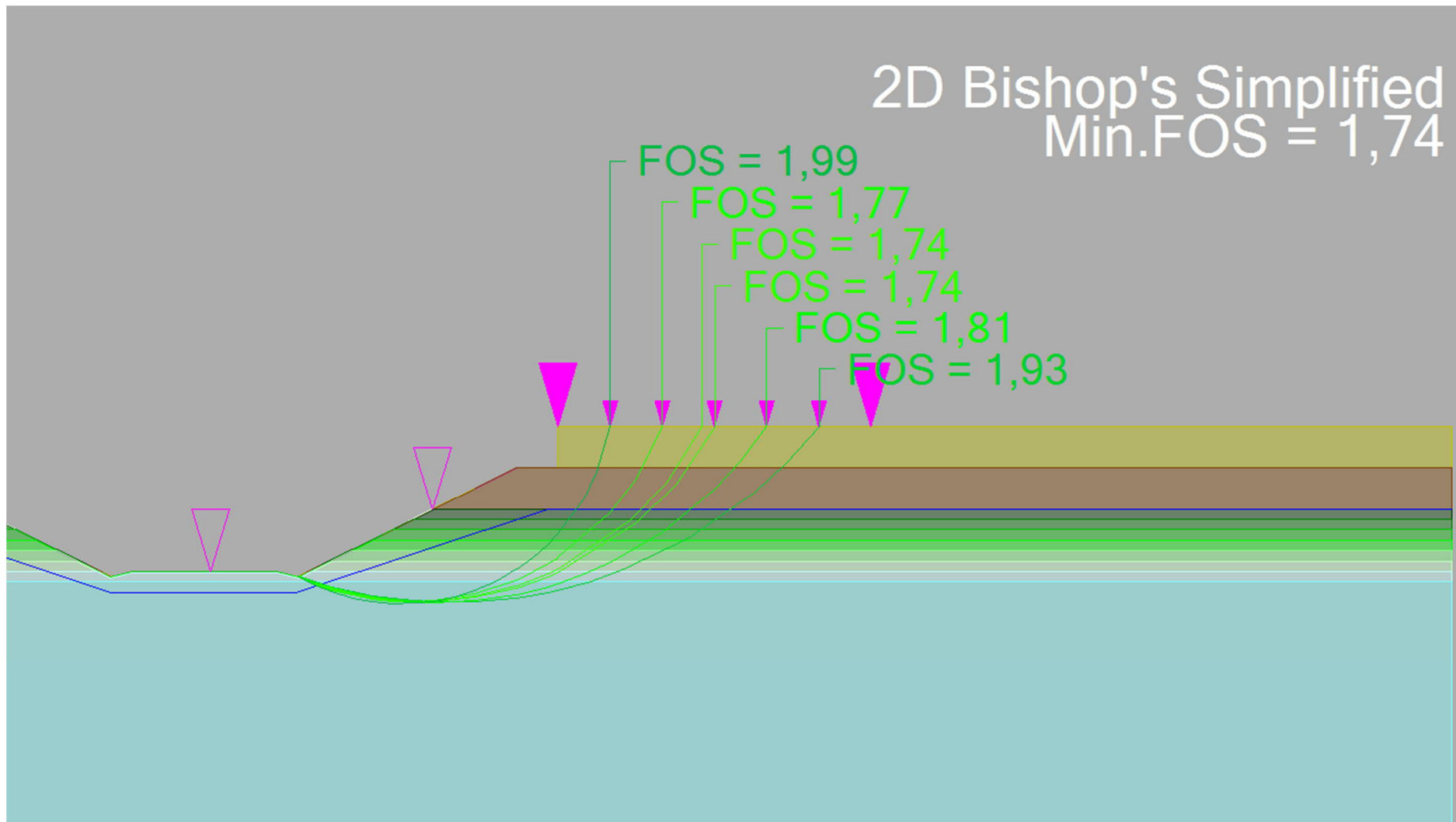


Liite 21. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

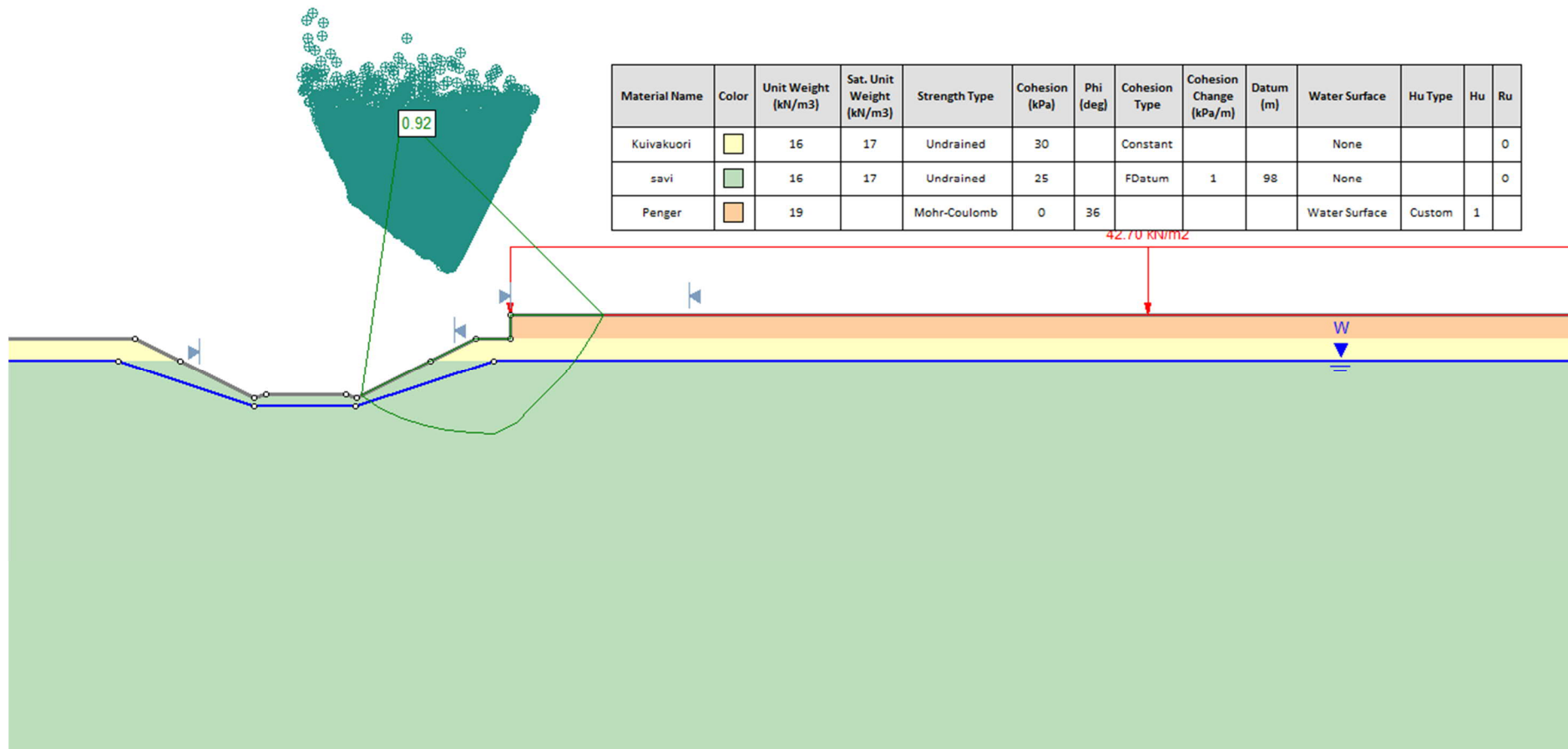


Liite 21. Stabiilettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

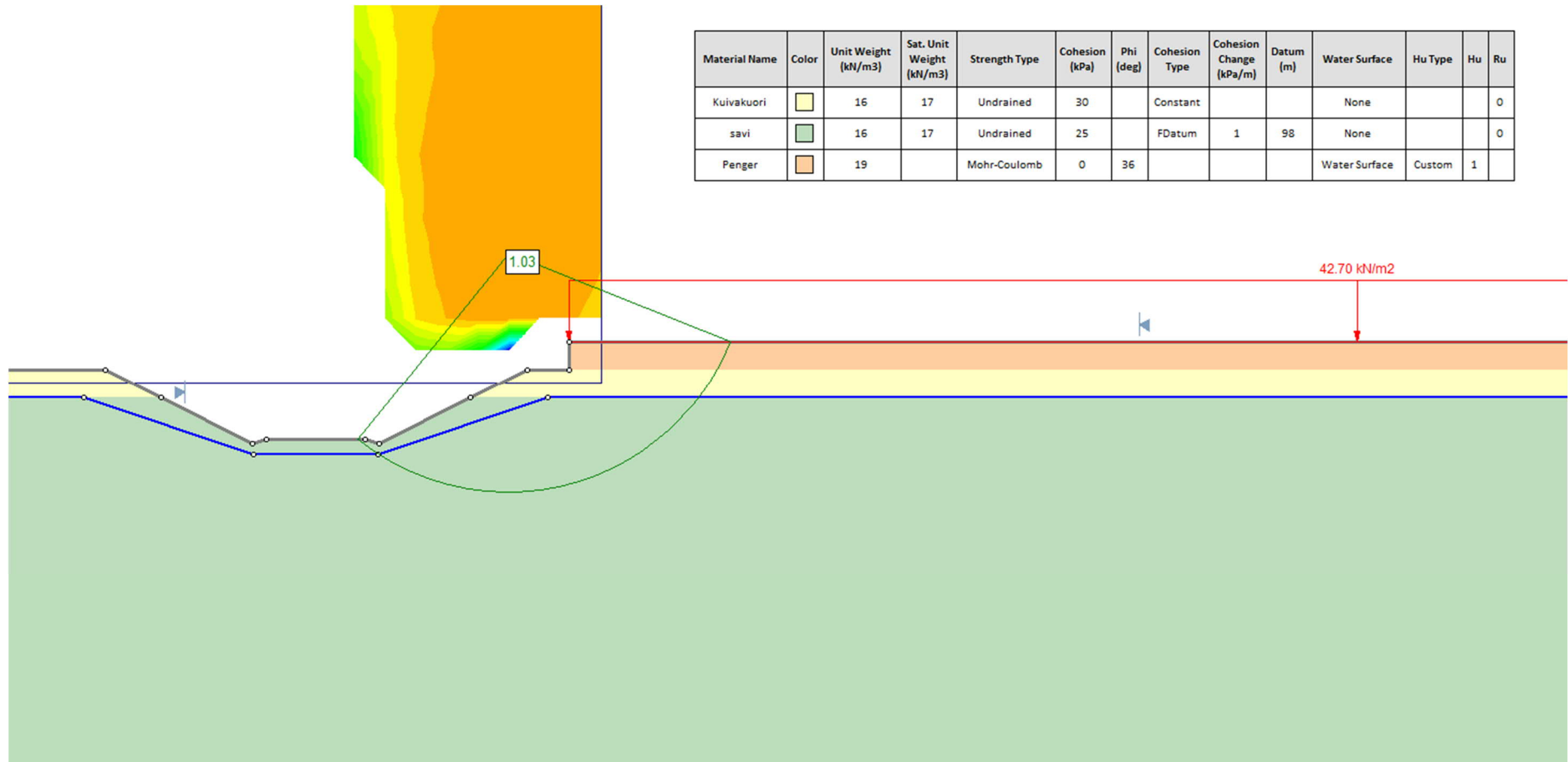




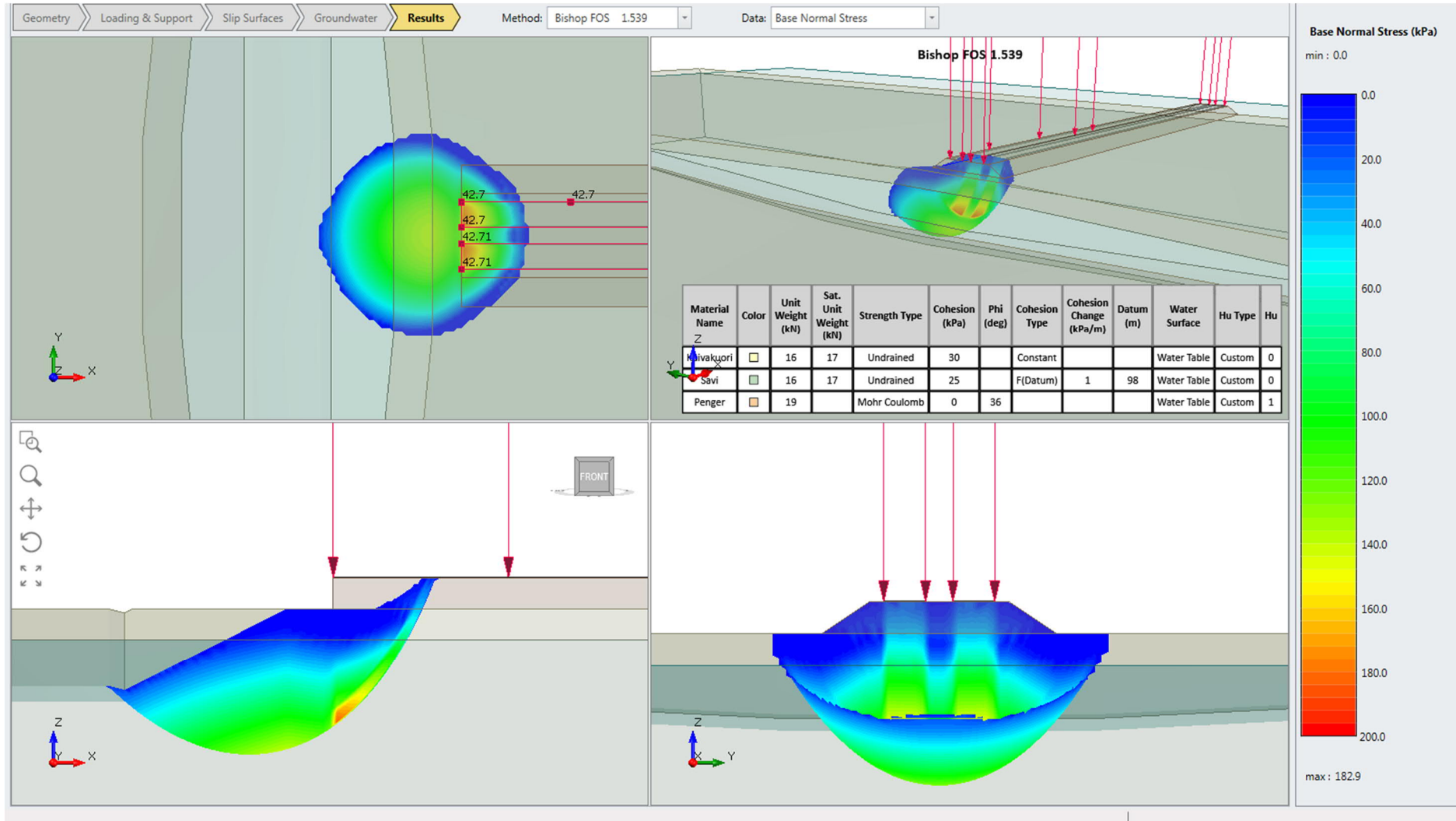
Liite 21. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

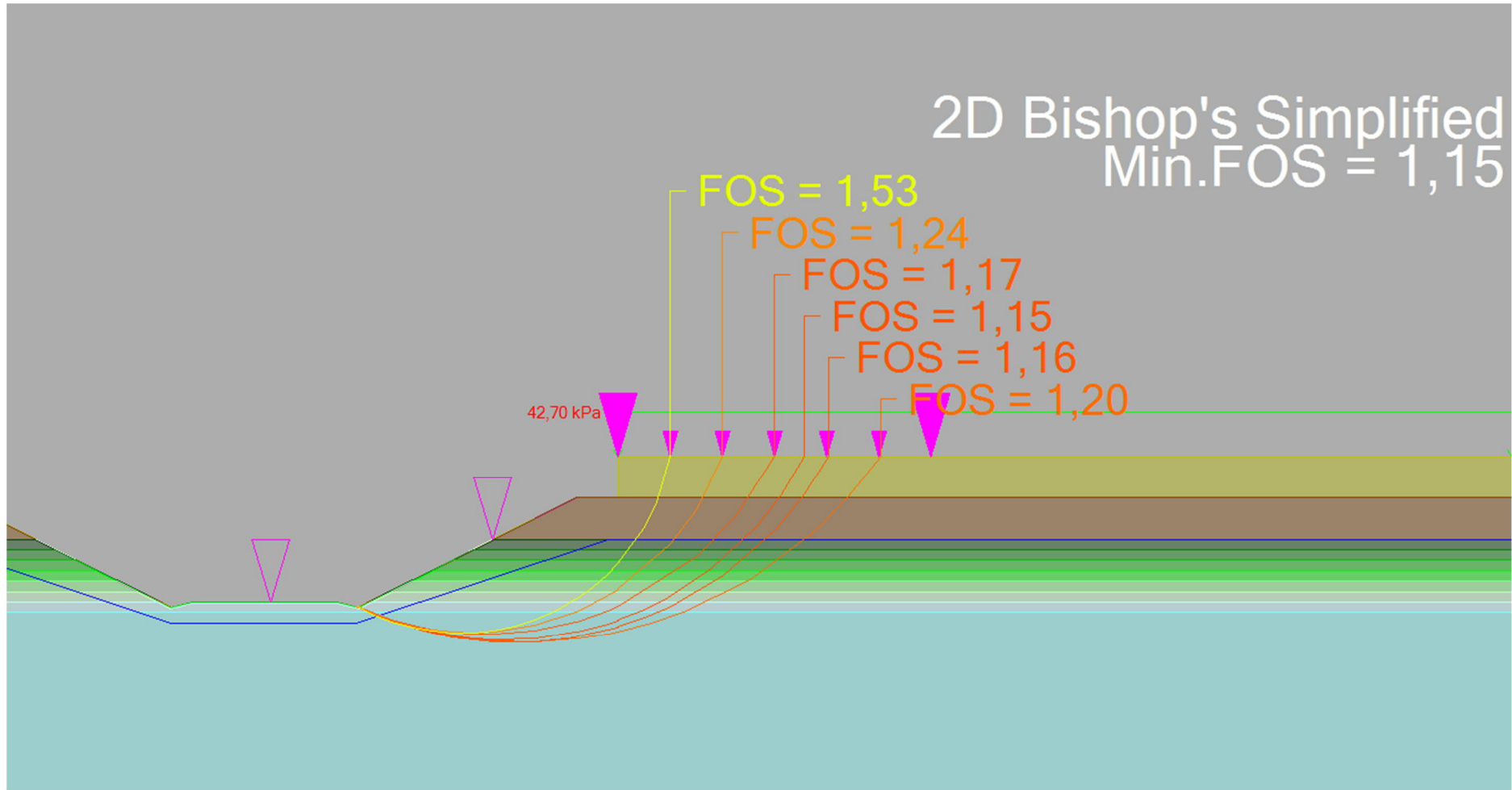


Liite 21. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

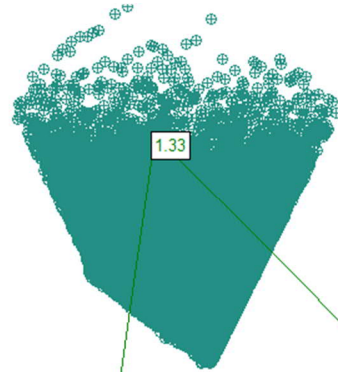


Liite 21. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Kaksiraiteinen ratapenger.

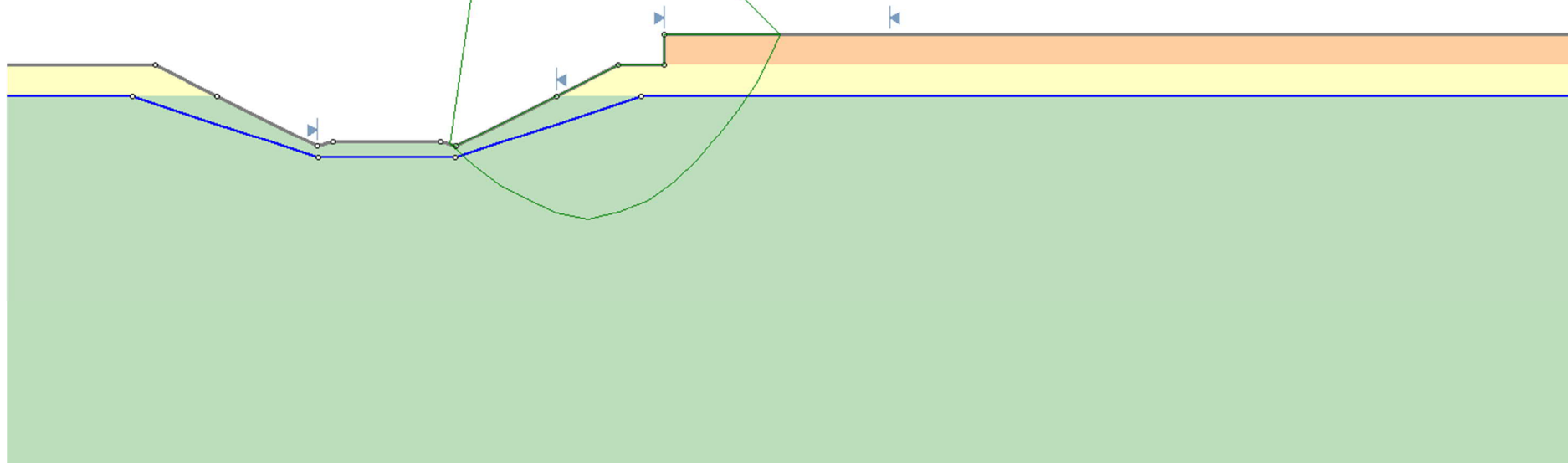




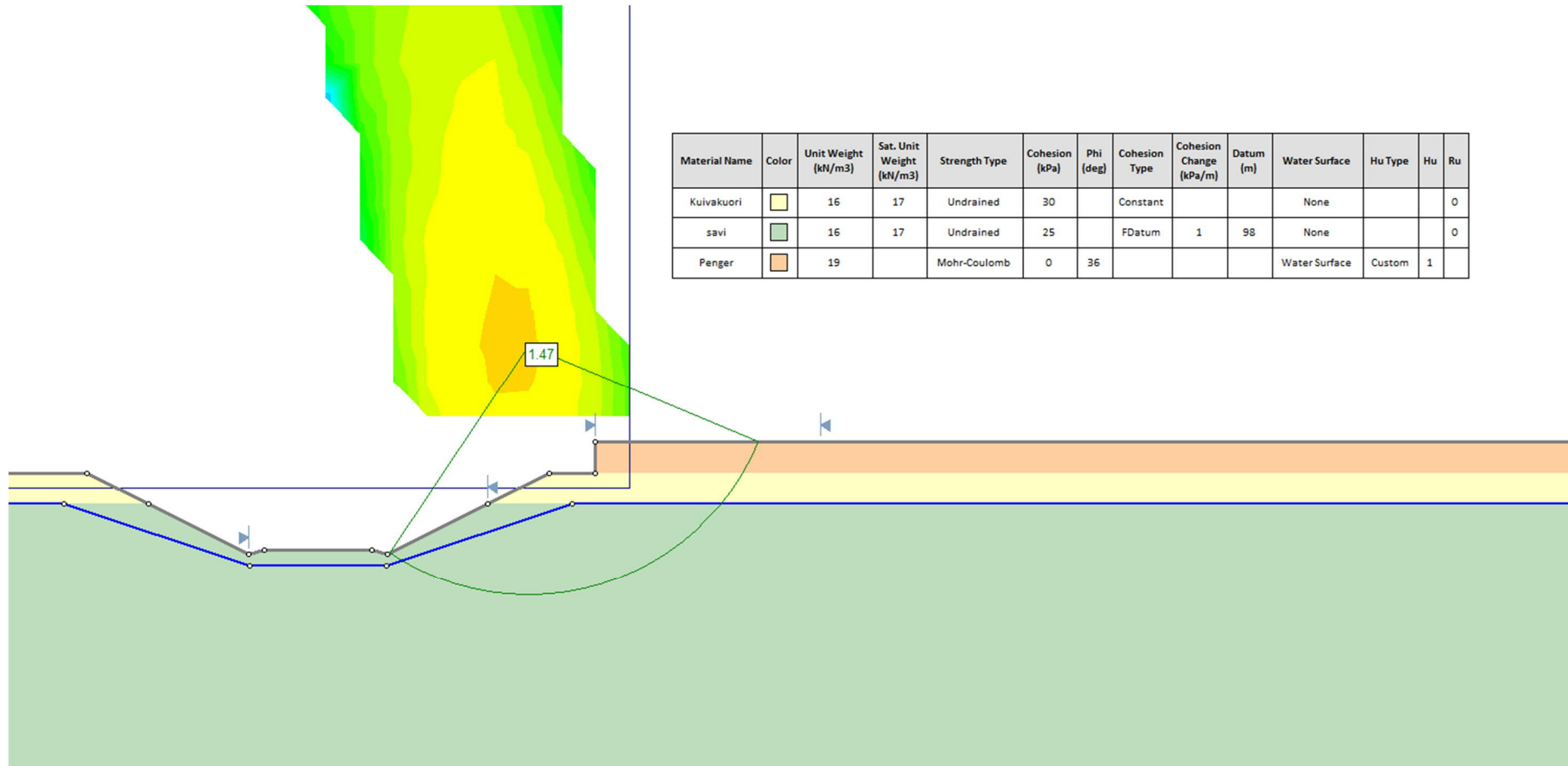
Liite 22. Stabiilitilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 2. Moottoritiepengeri.



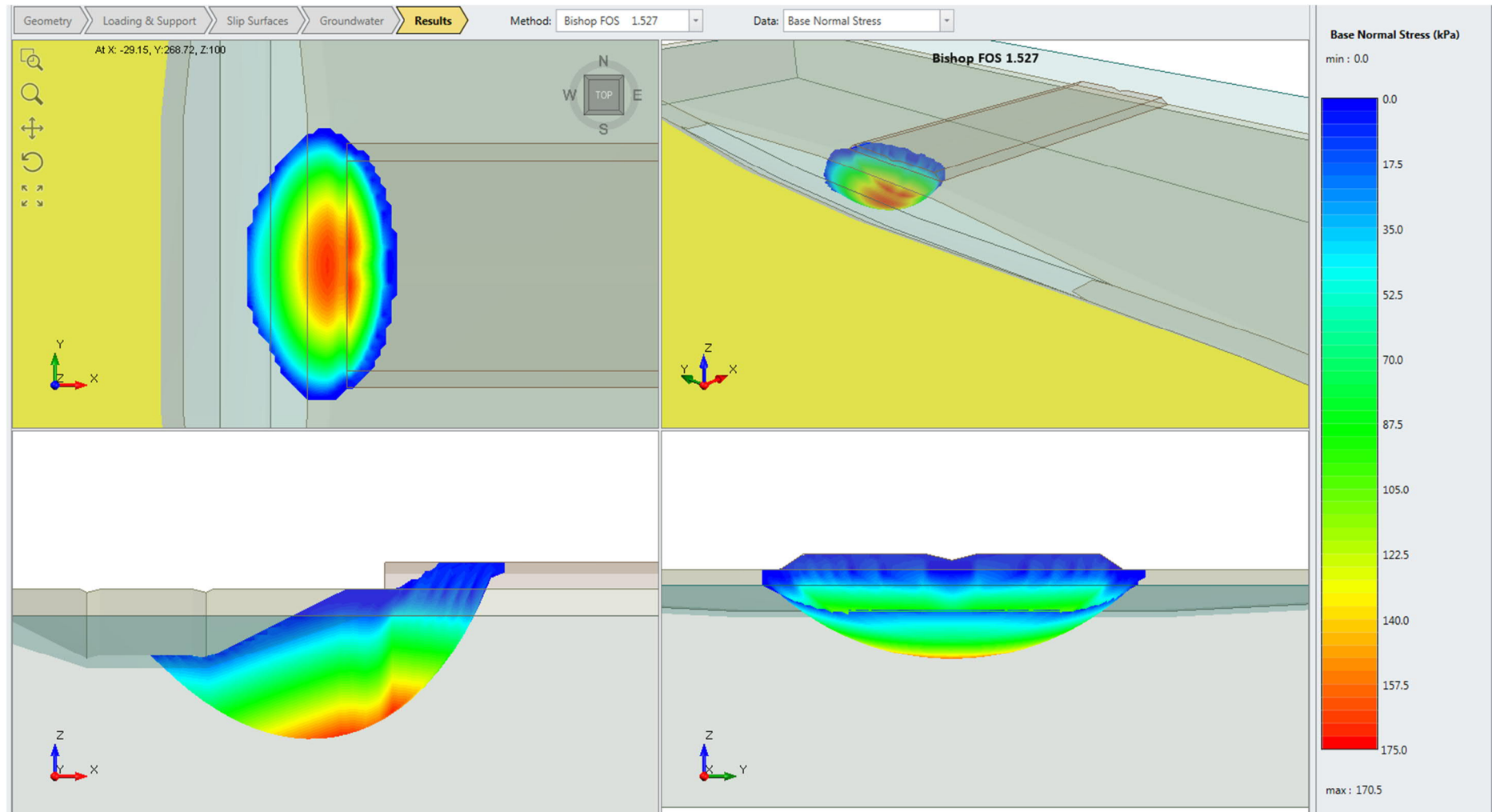
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant			None			0
savi	Green	16	17	Undrained	25		FDatum	1	98	None			0
Penger	Orange	19		Mohr-Coulomb	0	36				Water Surface	Custom	1	

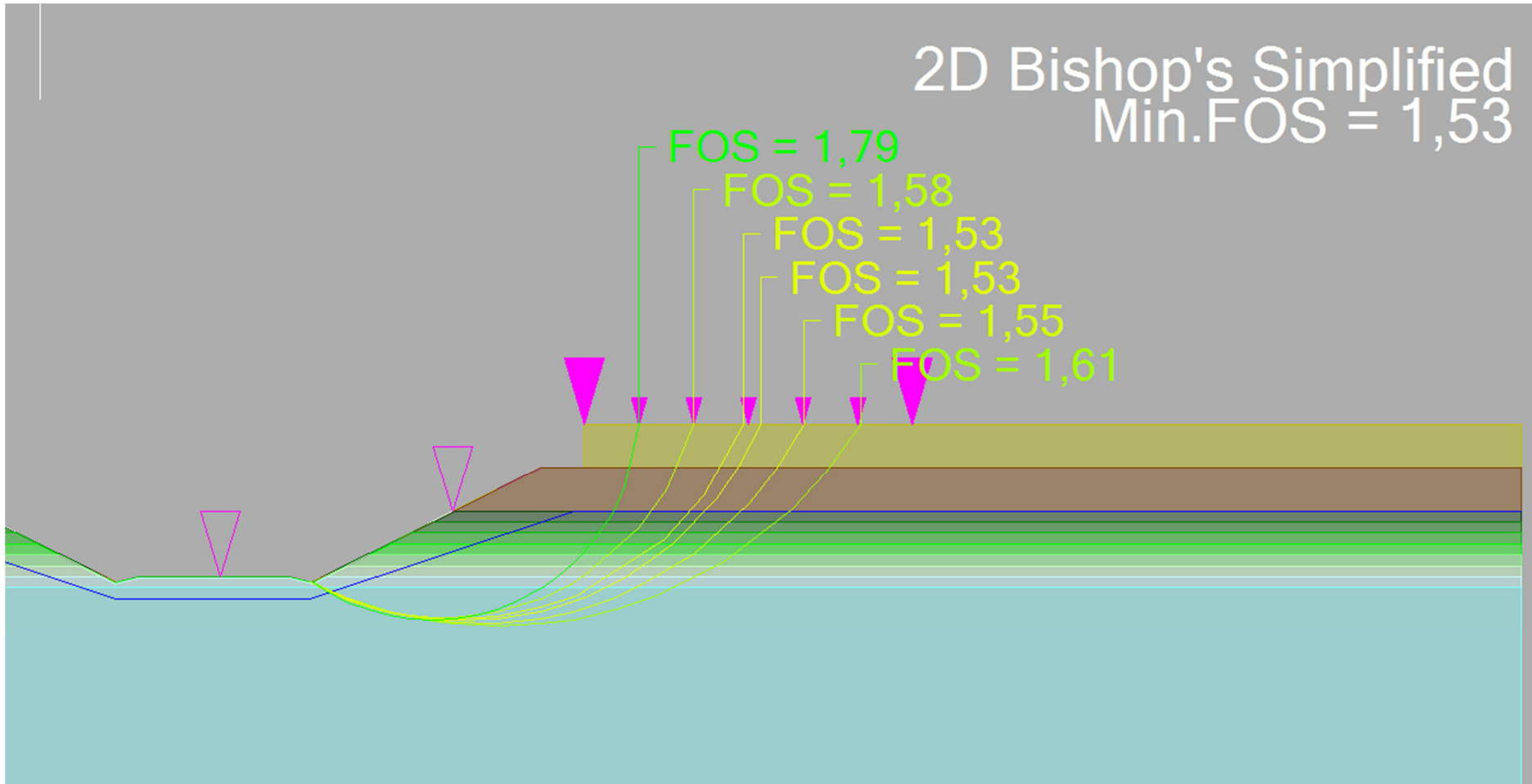


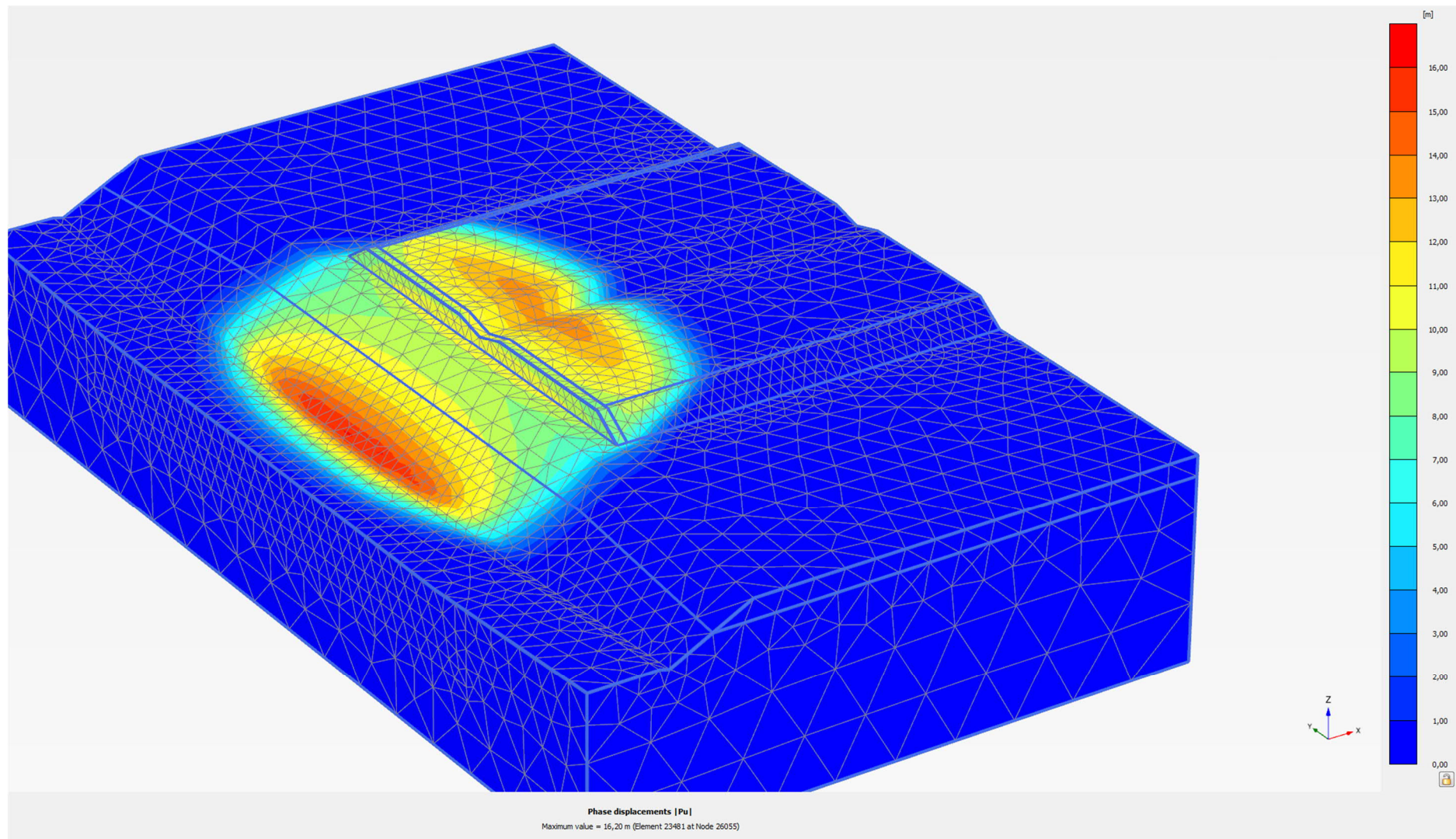
Liite 22. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Moottoritiepenger.

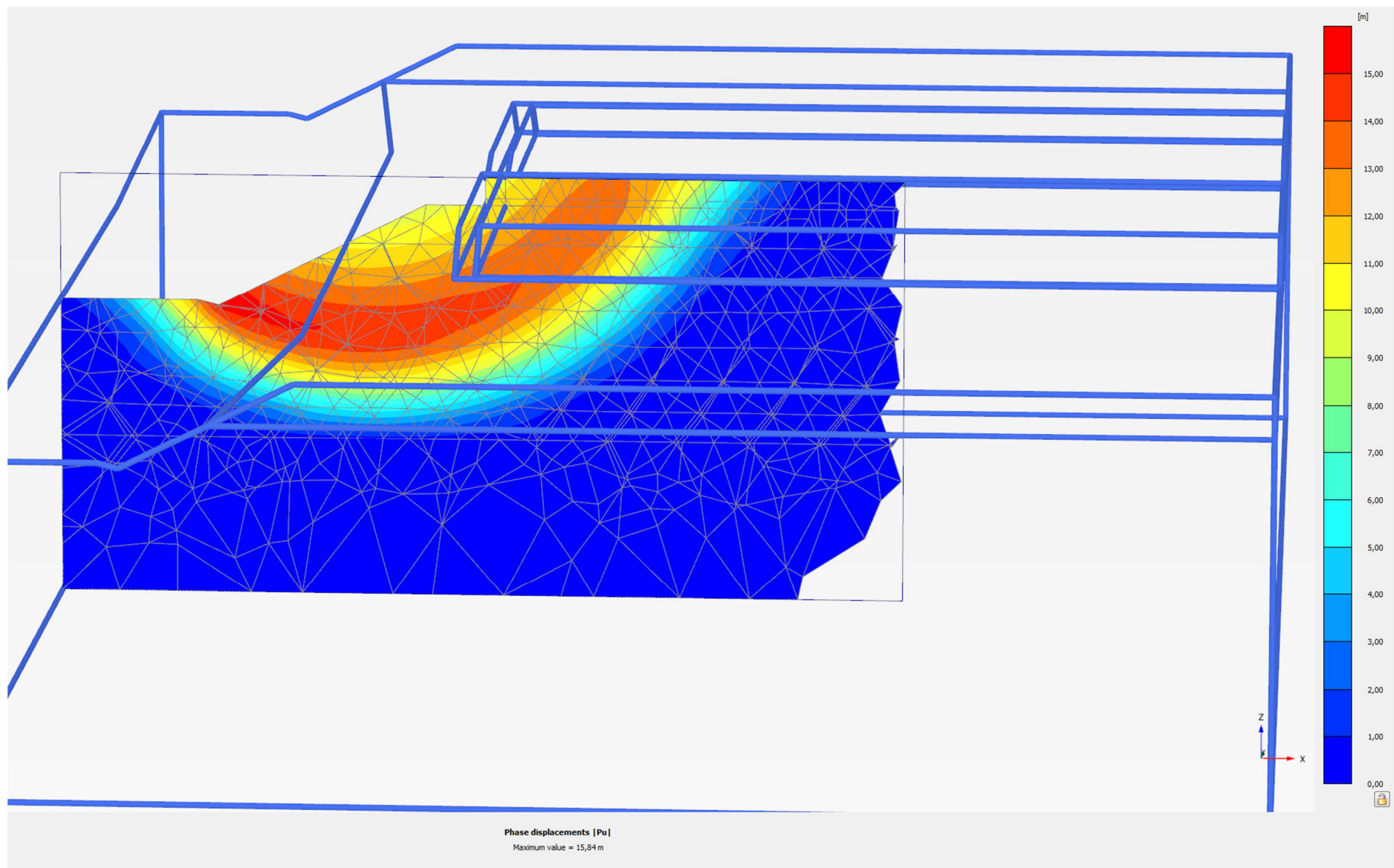


Liite 22. Stabiilettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.

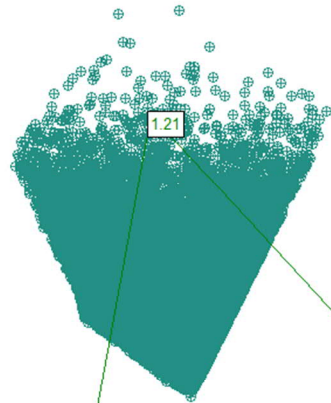







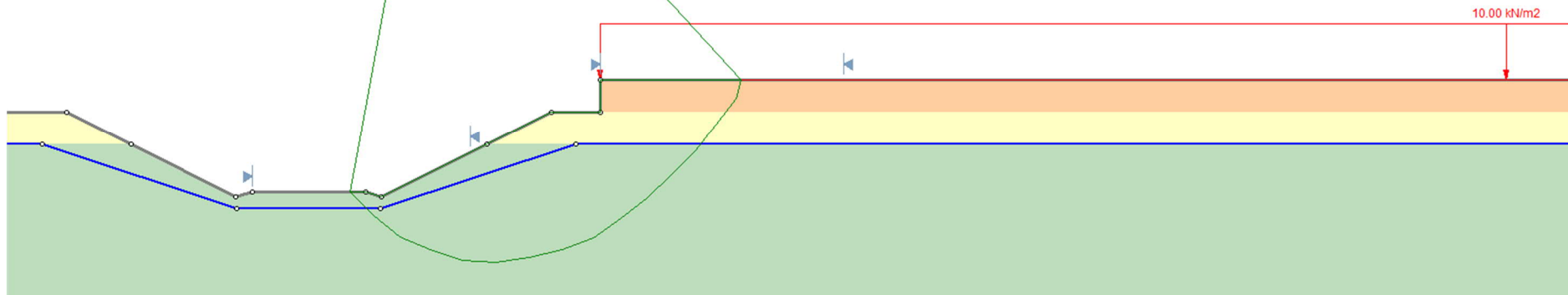




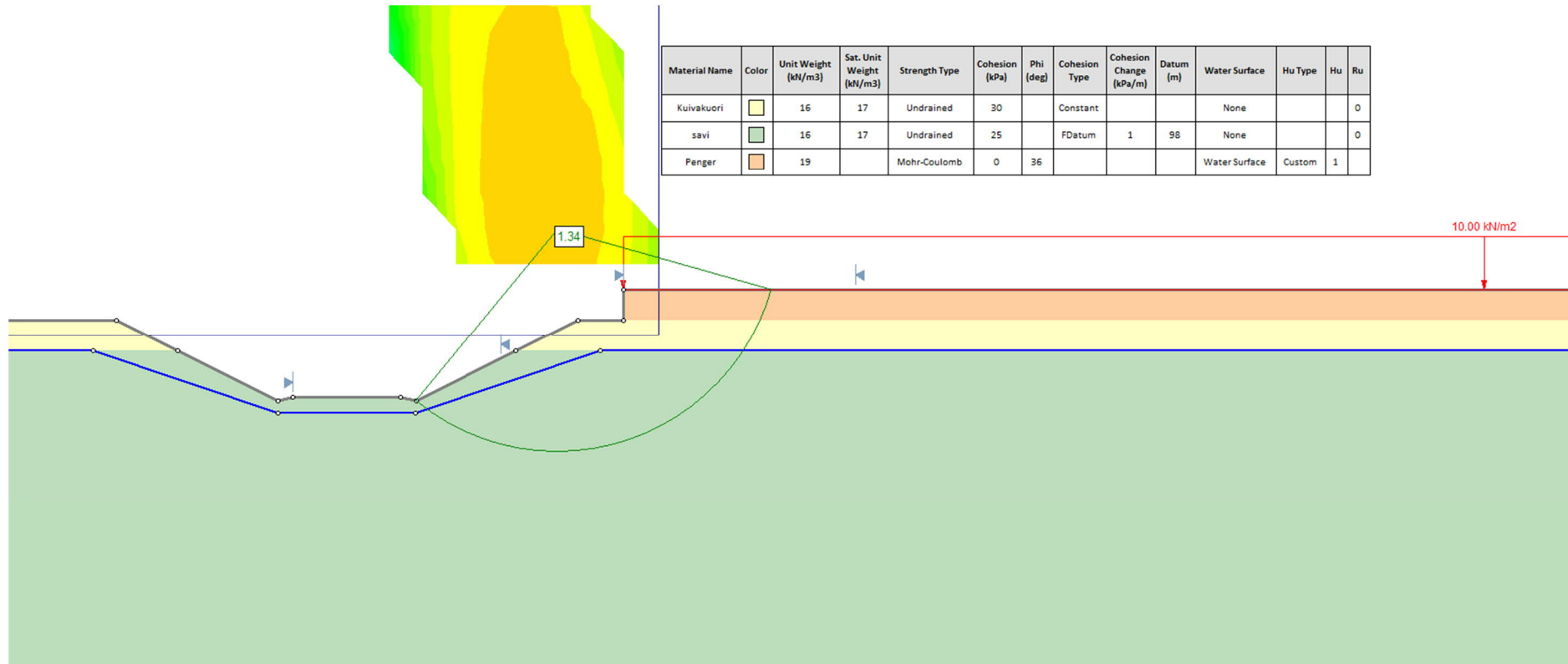
Liite 22. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 2. Moottoritiepenget.



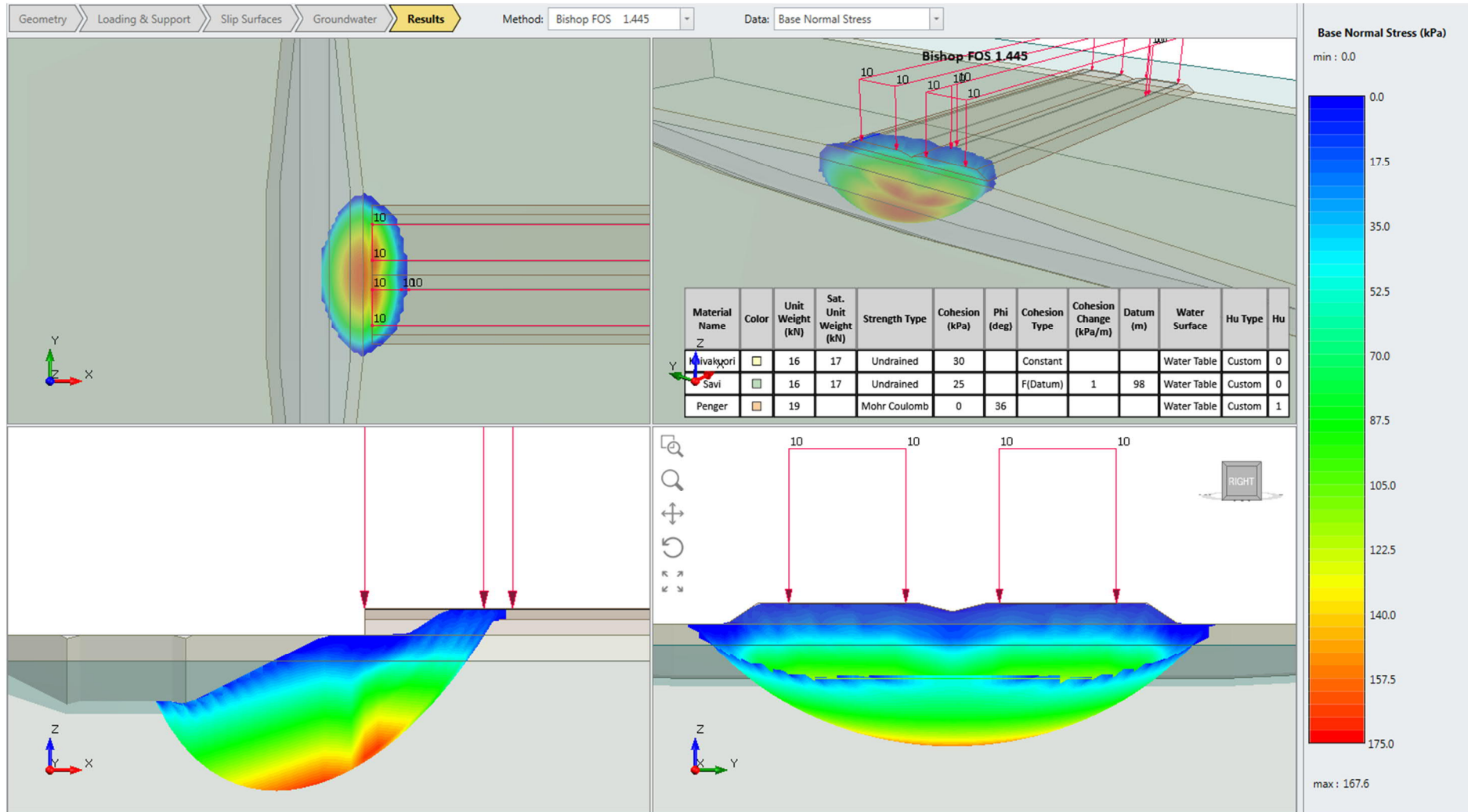
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Datum (m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant			None			0
savi		16	17	Undrained	25		FDatum	1	98	None			0
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36				Water Surface	Custom	1	

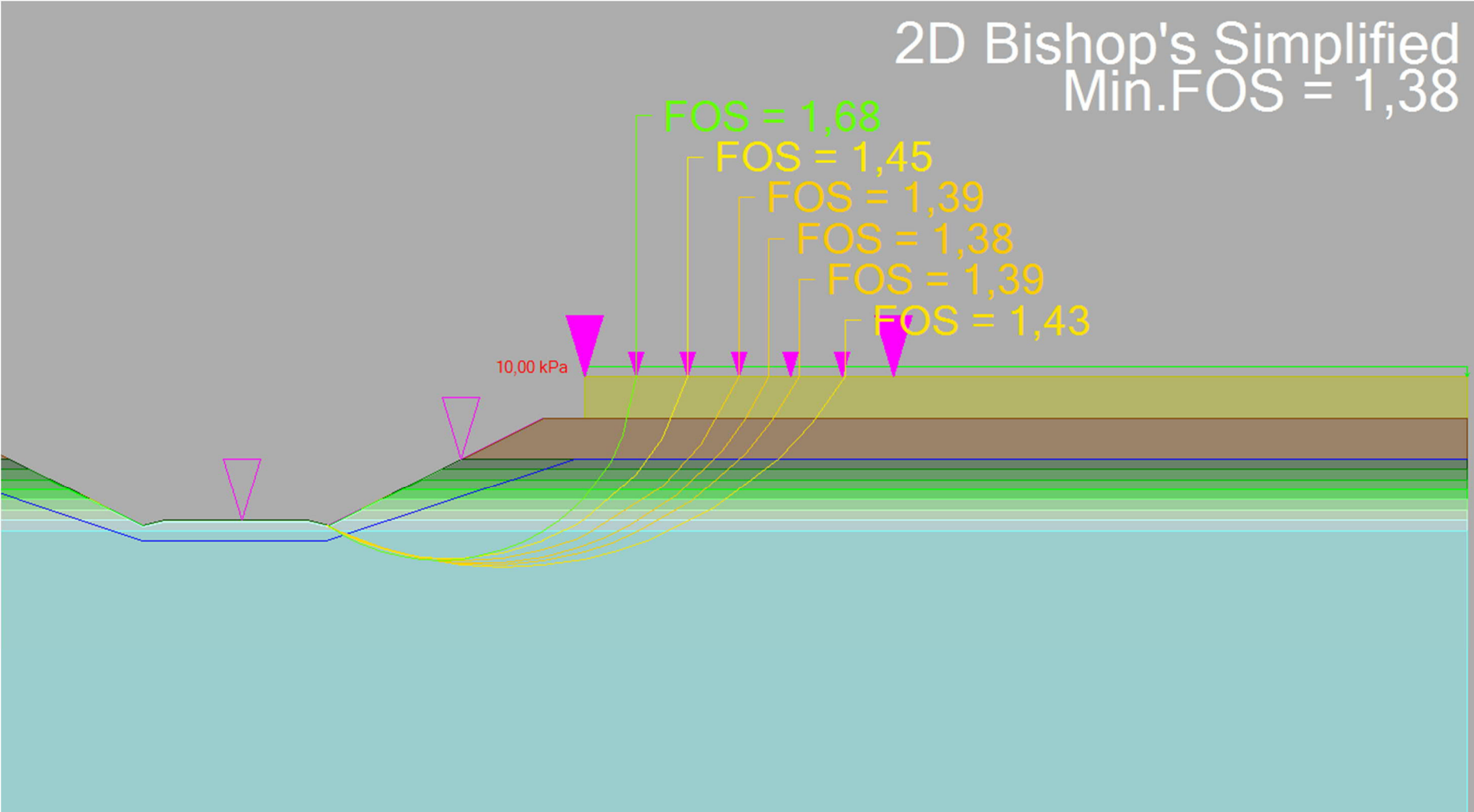


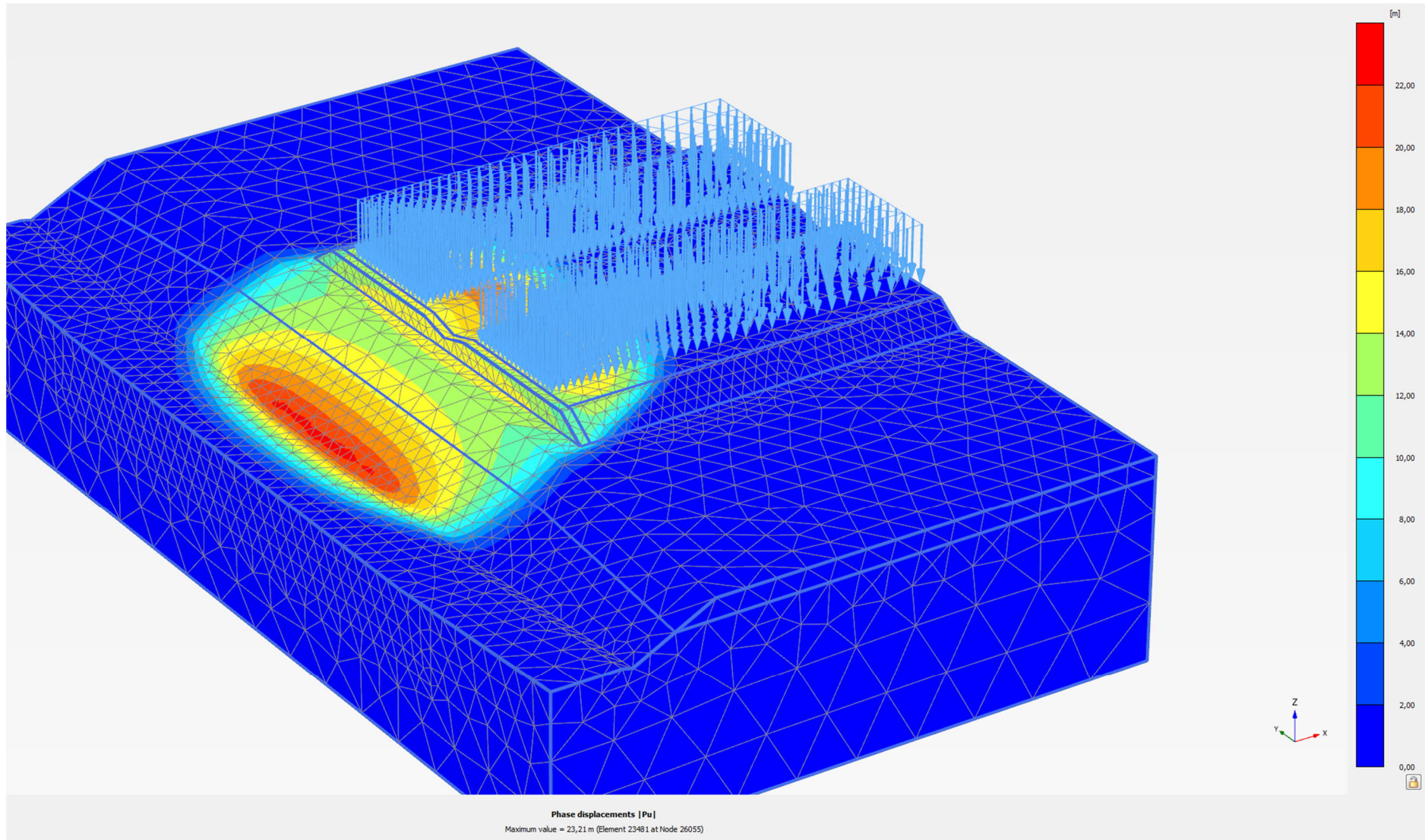
Liite 22. Stabiilitelaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 2. Moottoritiepenger.



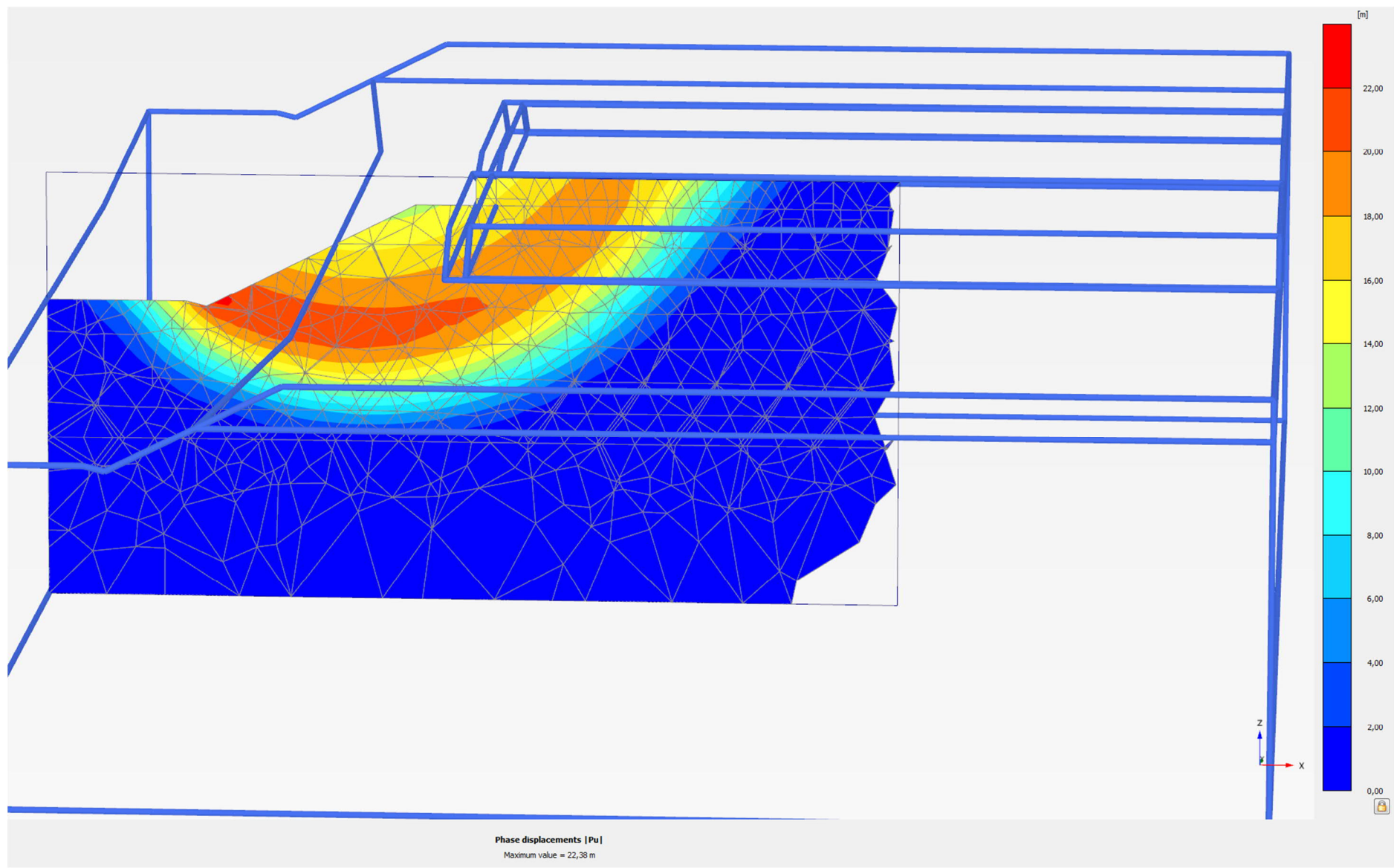
Liite 22. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepengeri.

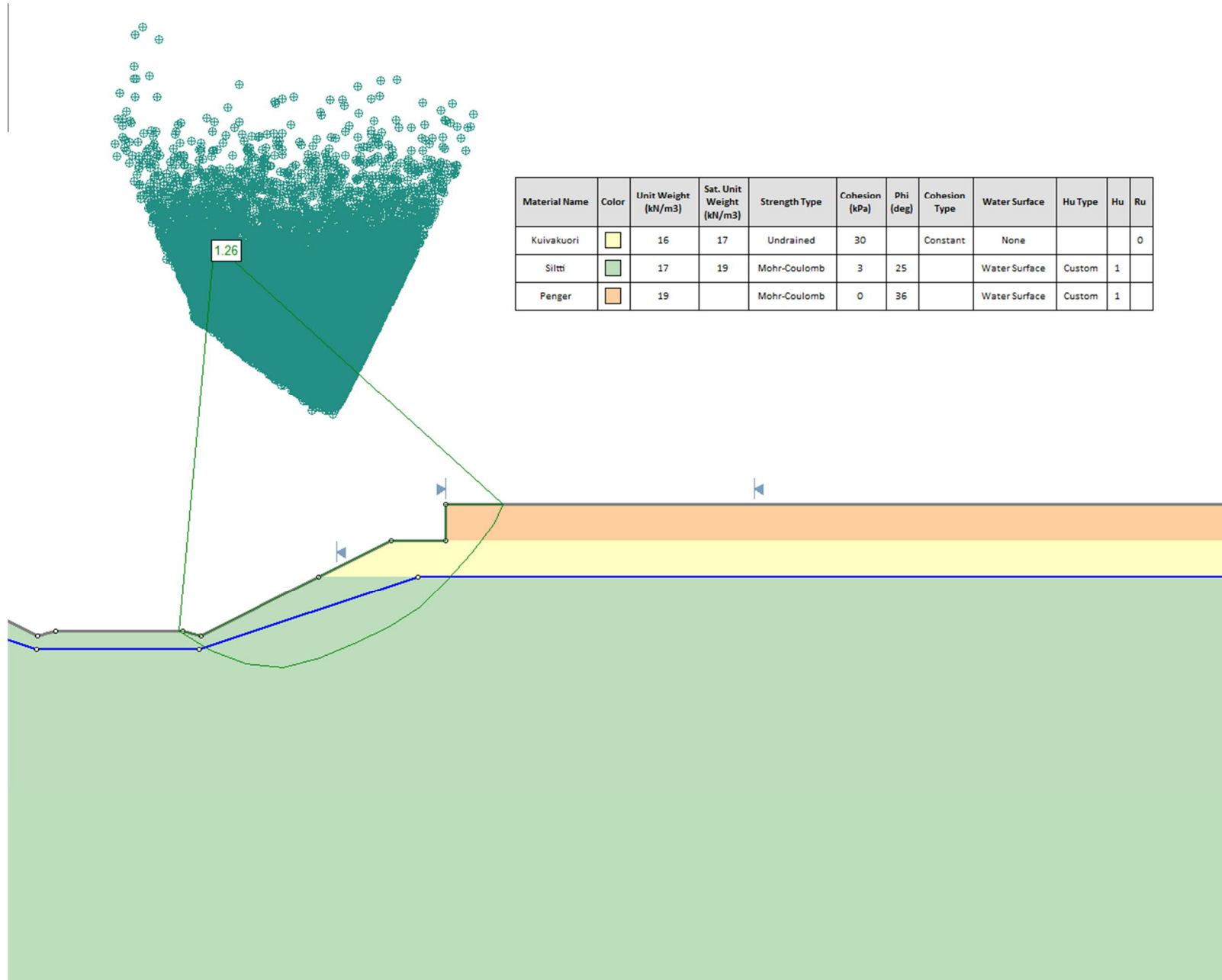




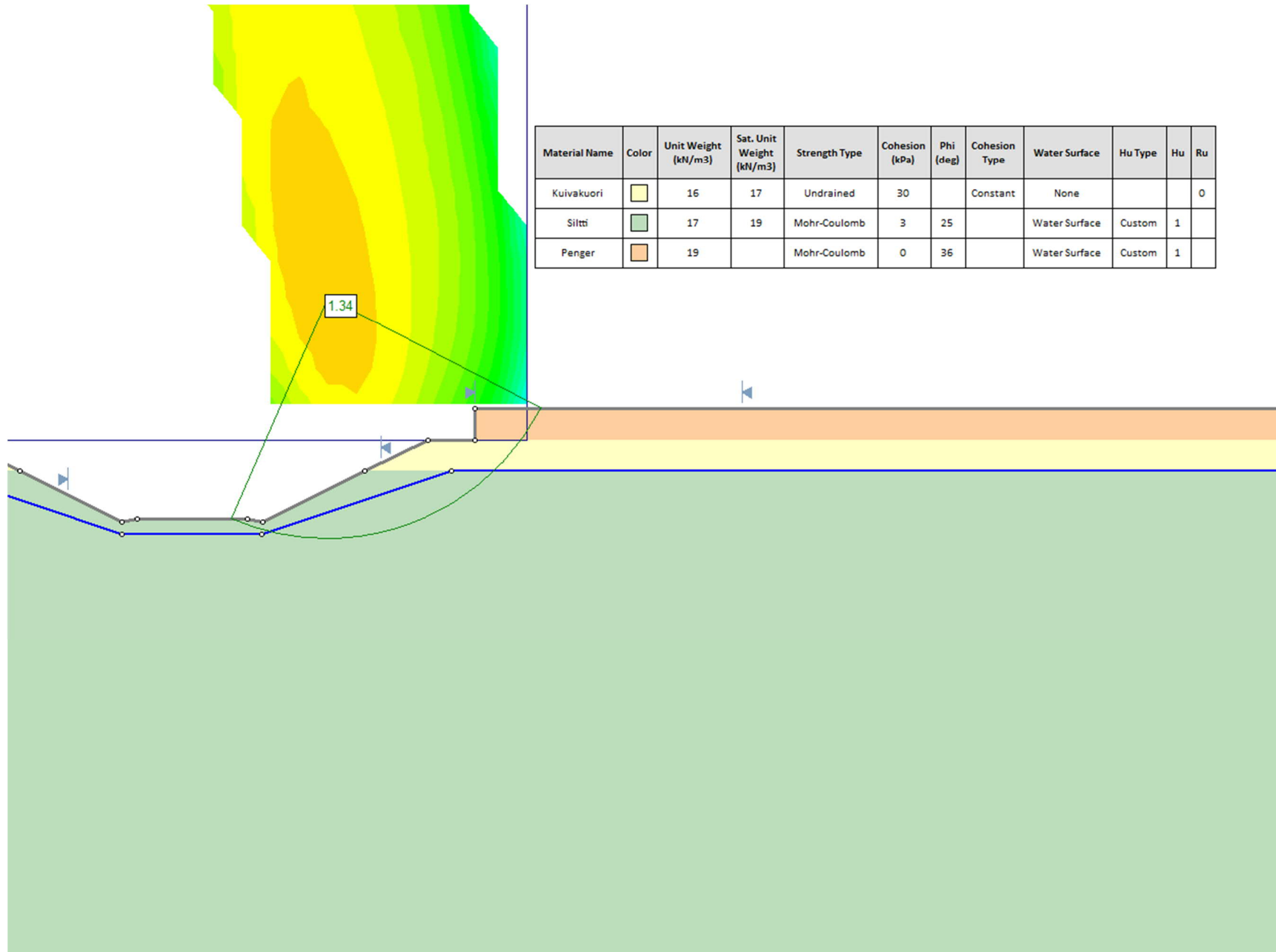


Liite 22. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 2. Moottoritiepenger.

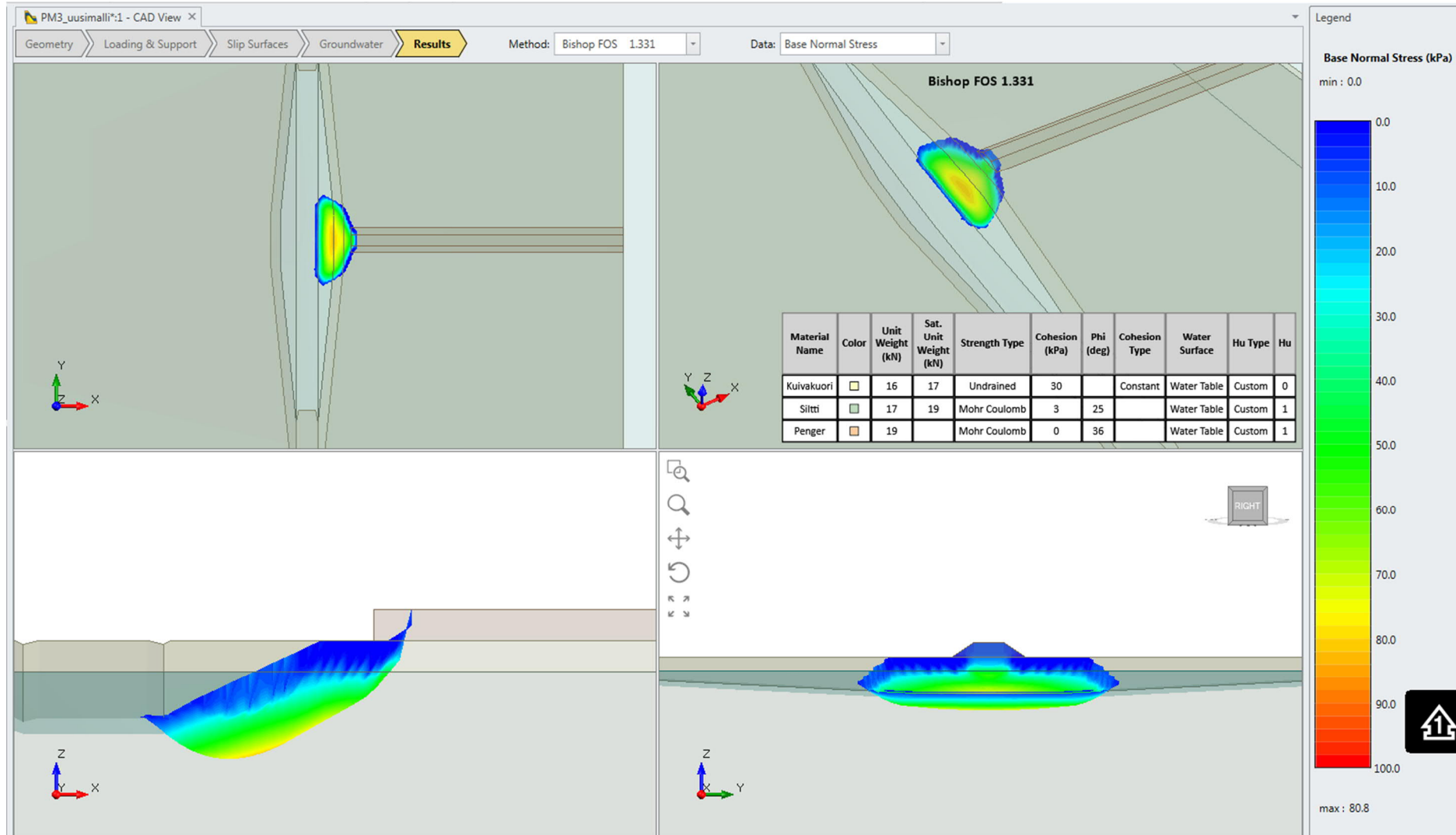




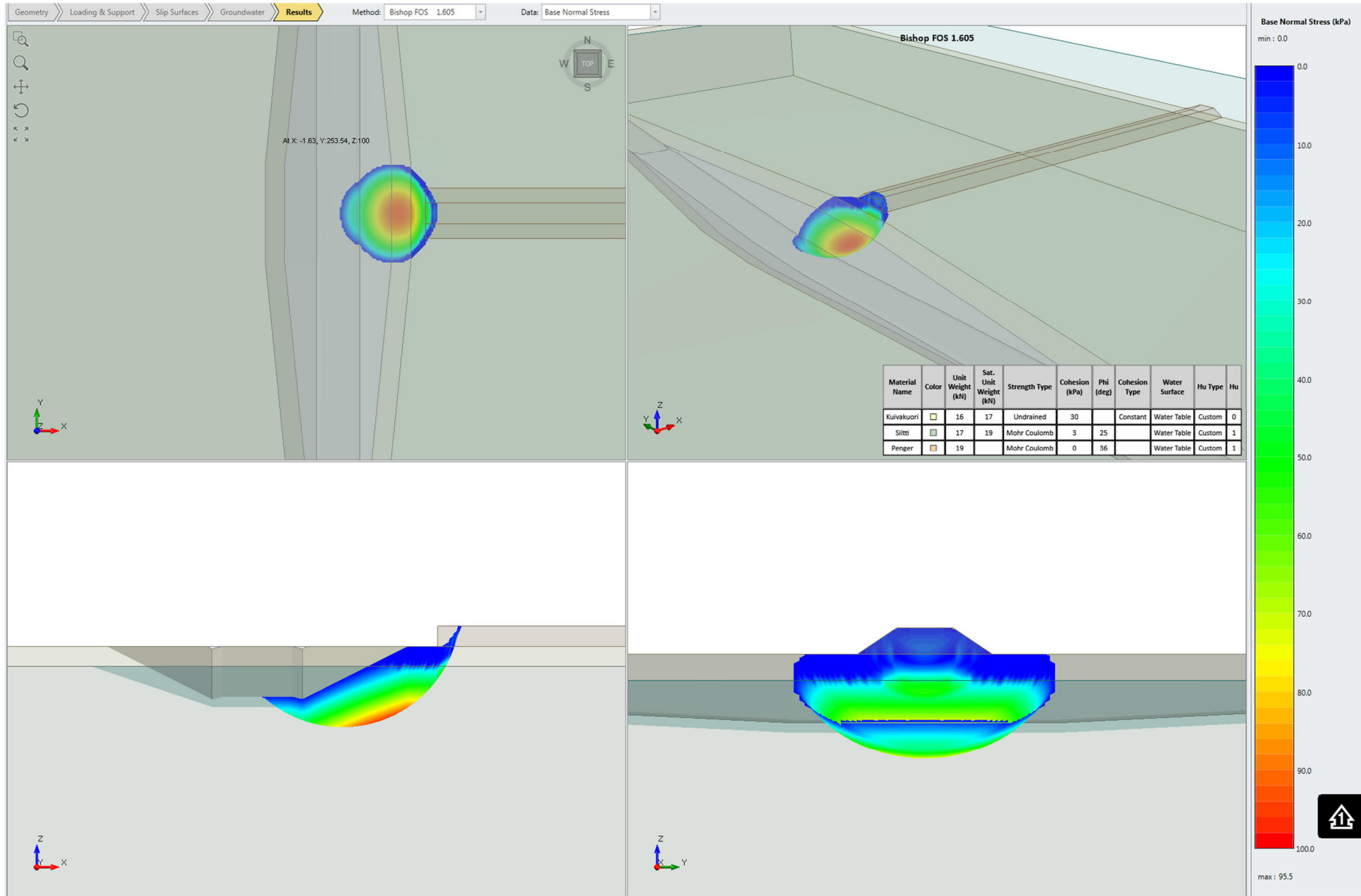
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.



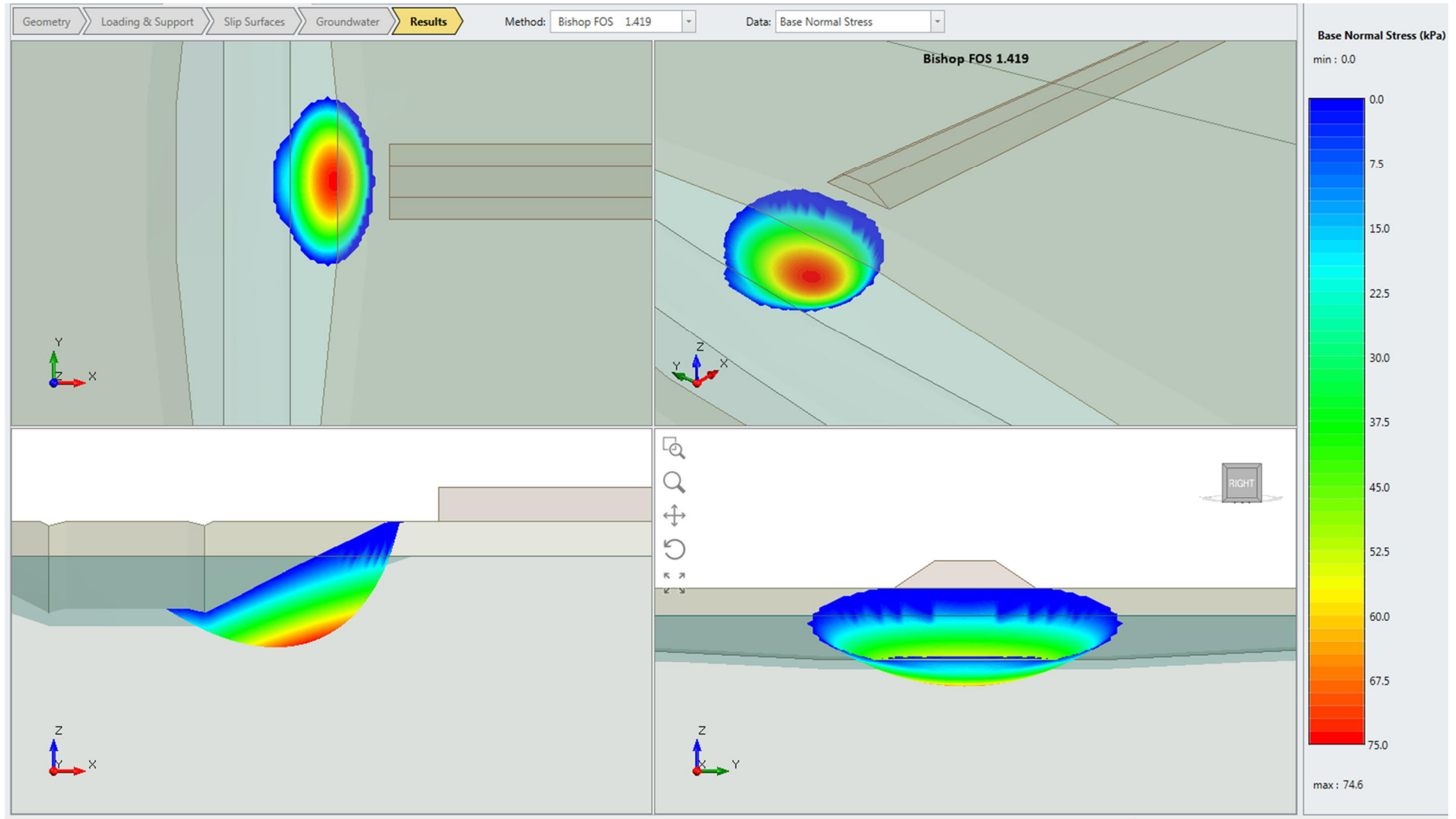
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

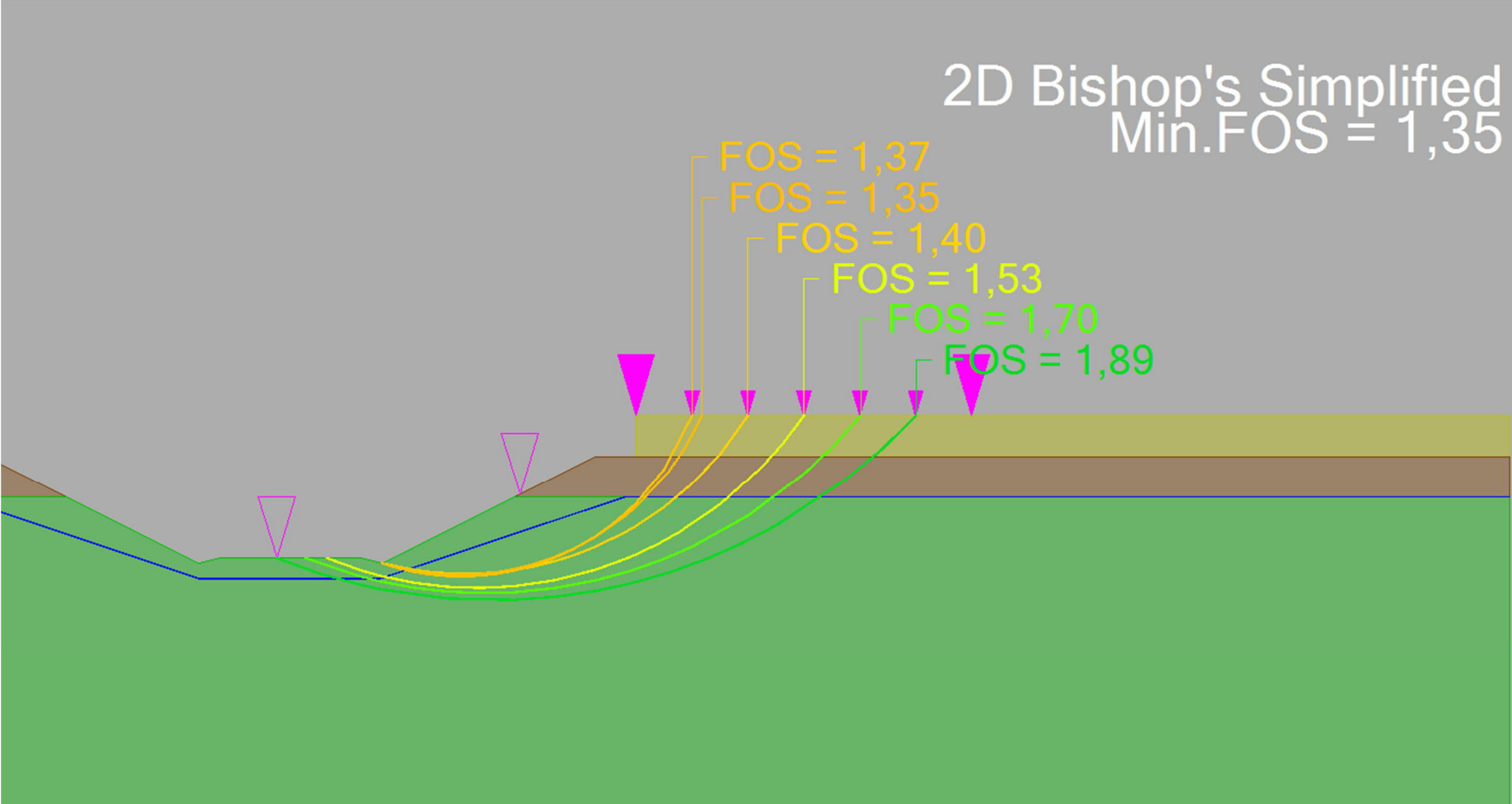


Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

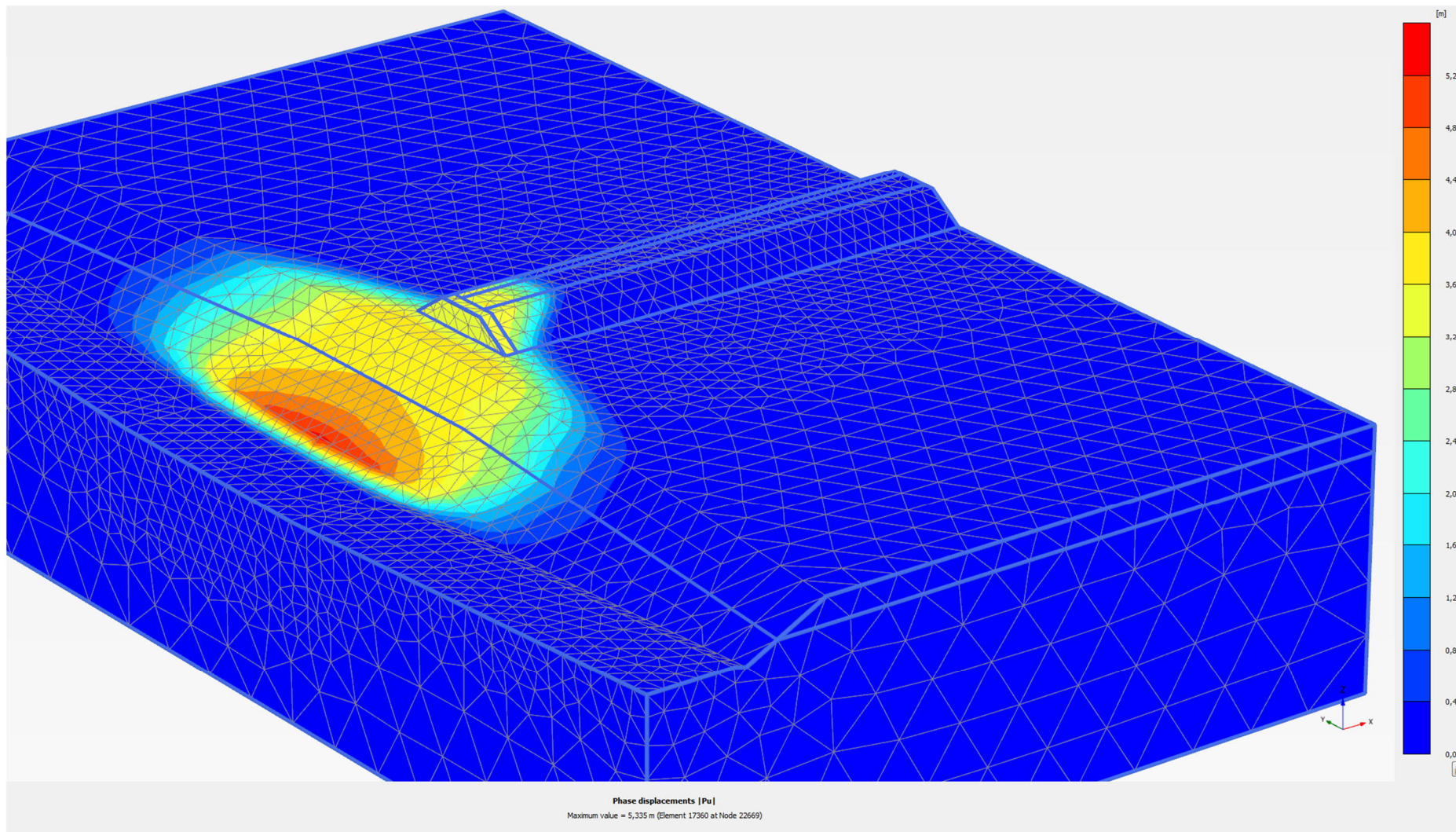


Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

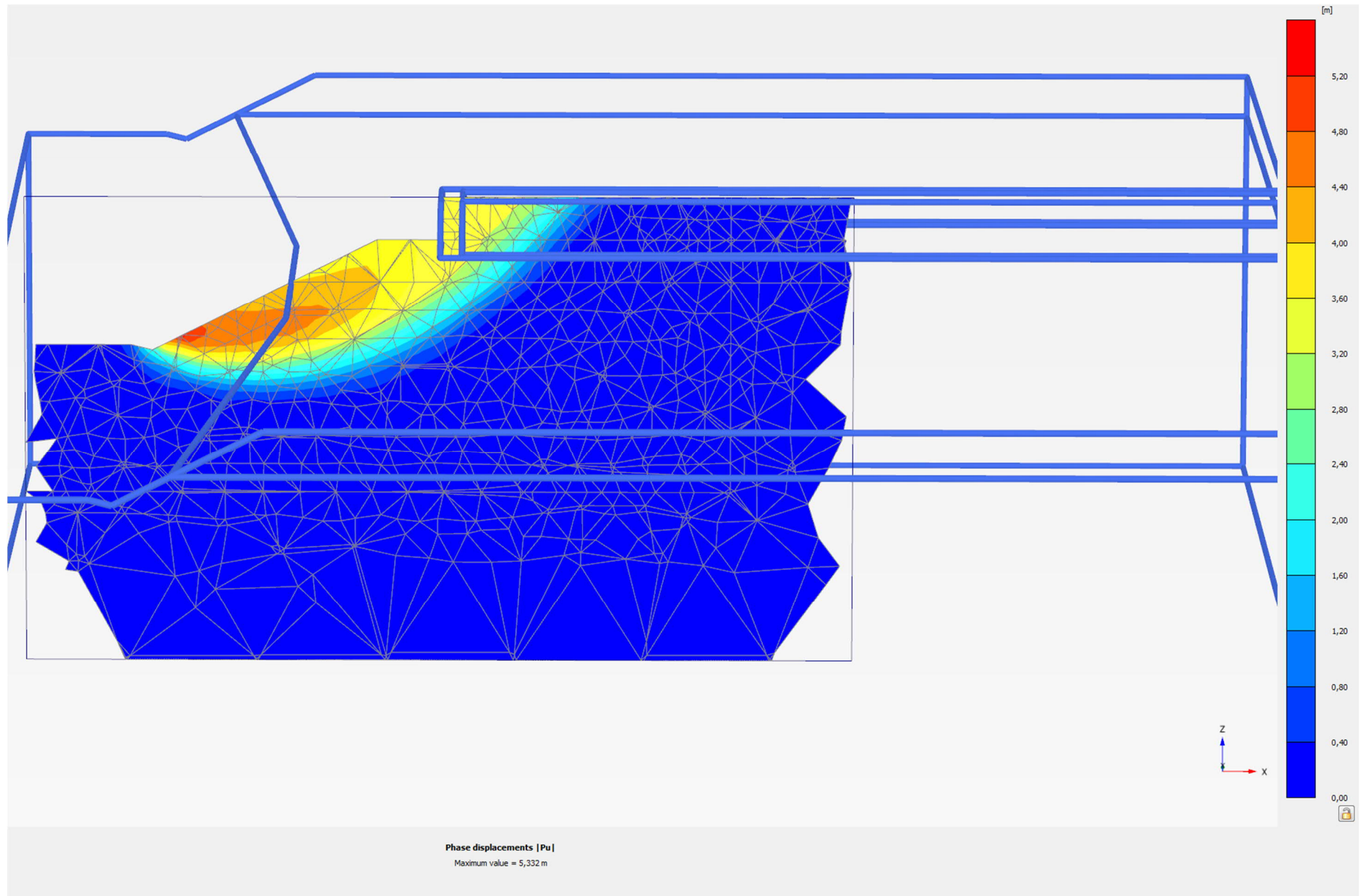




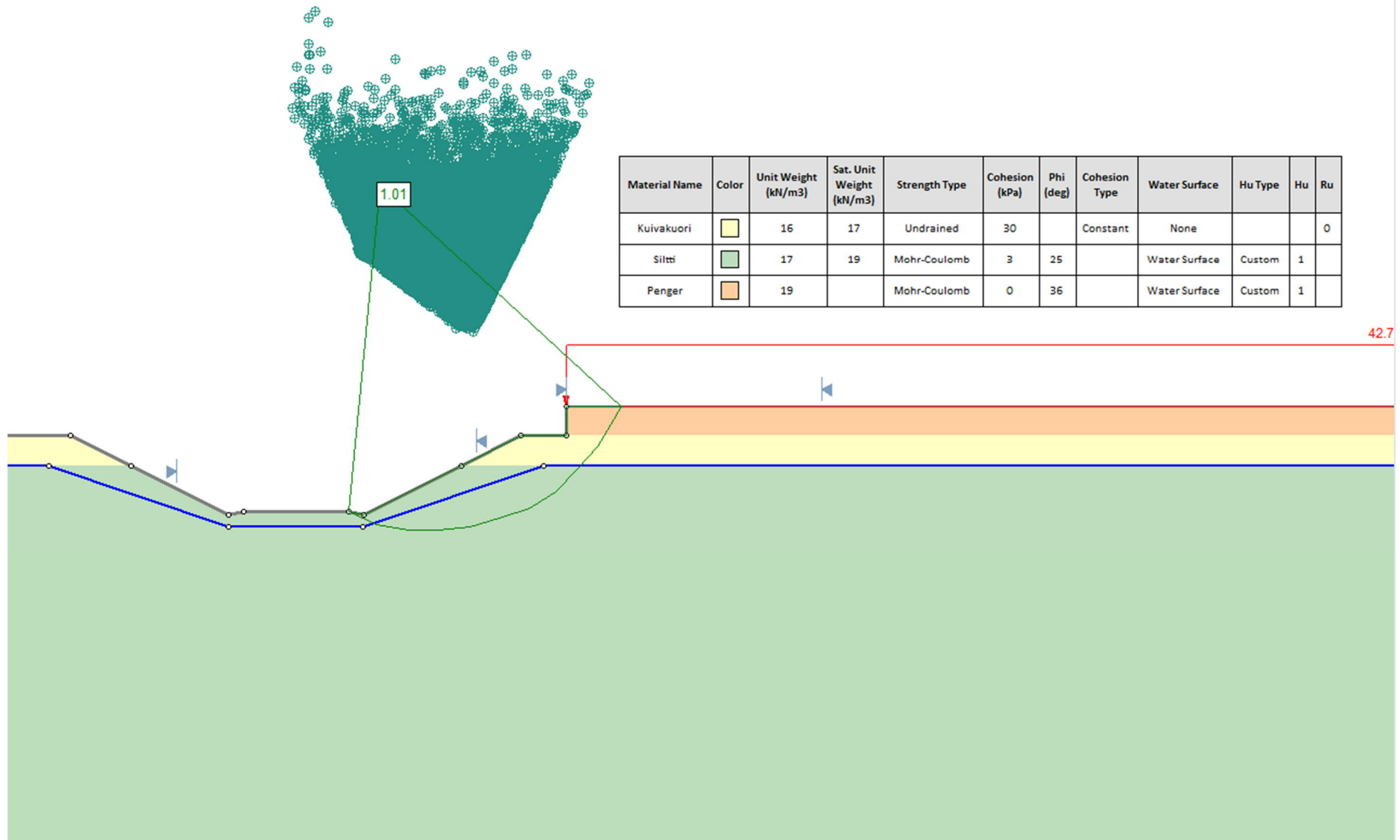
Liite 23. Stabiilettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.



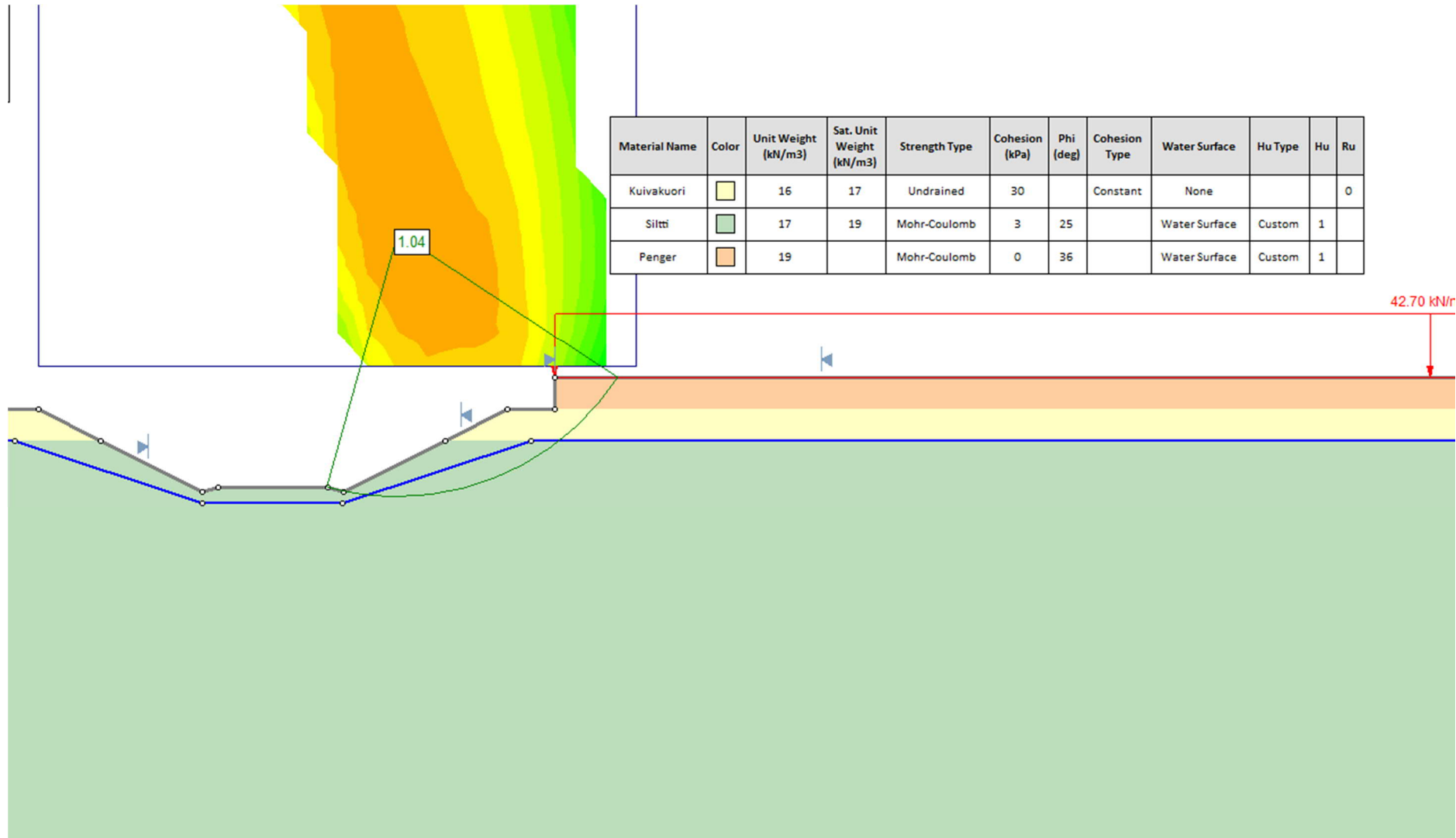
Liite 23. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.



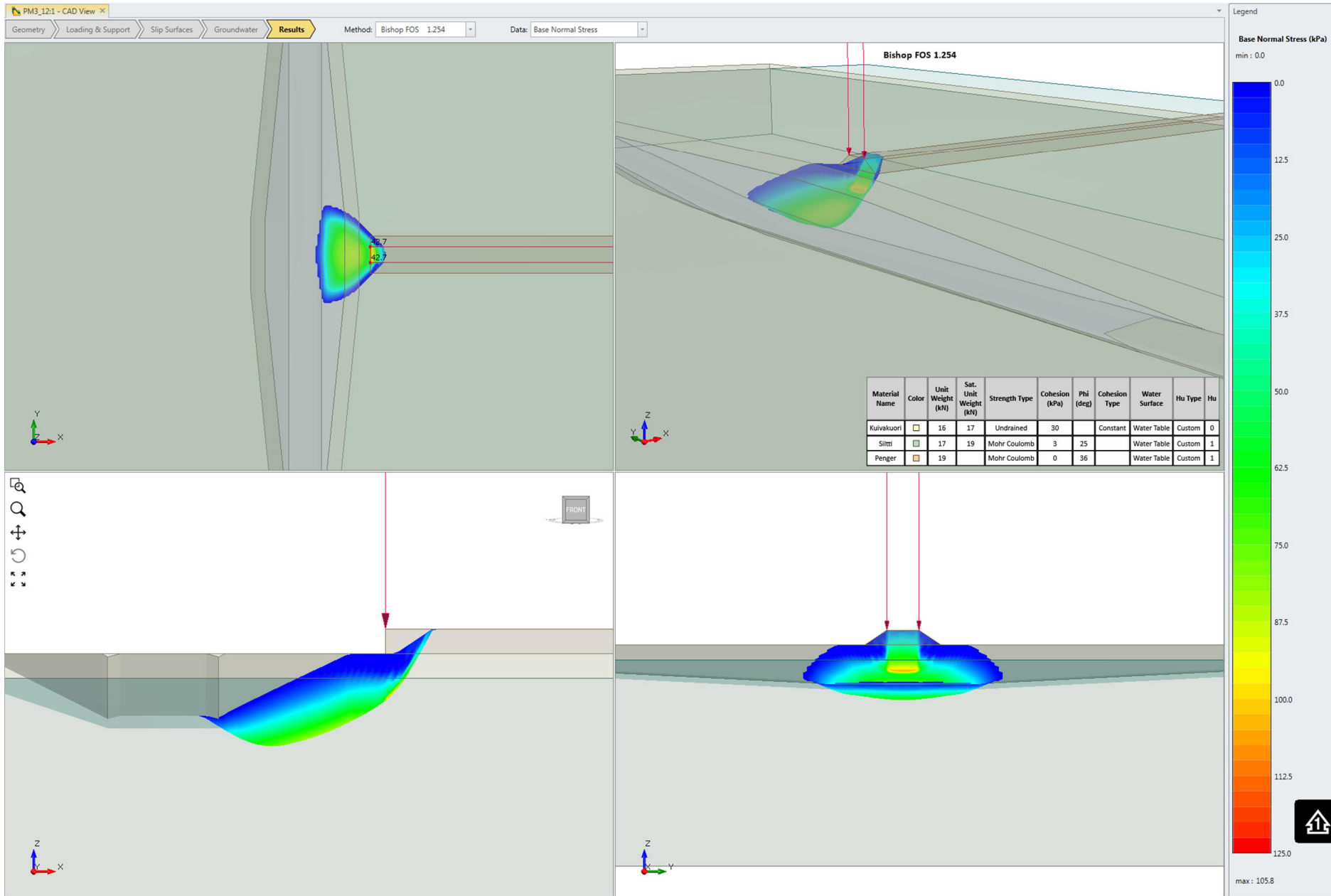
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.



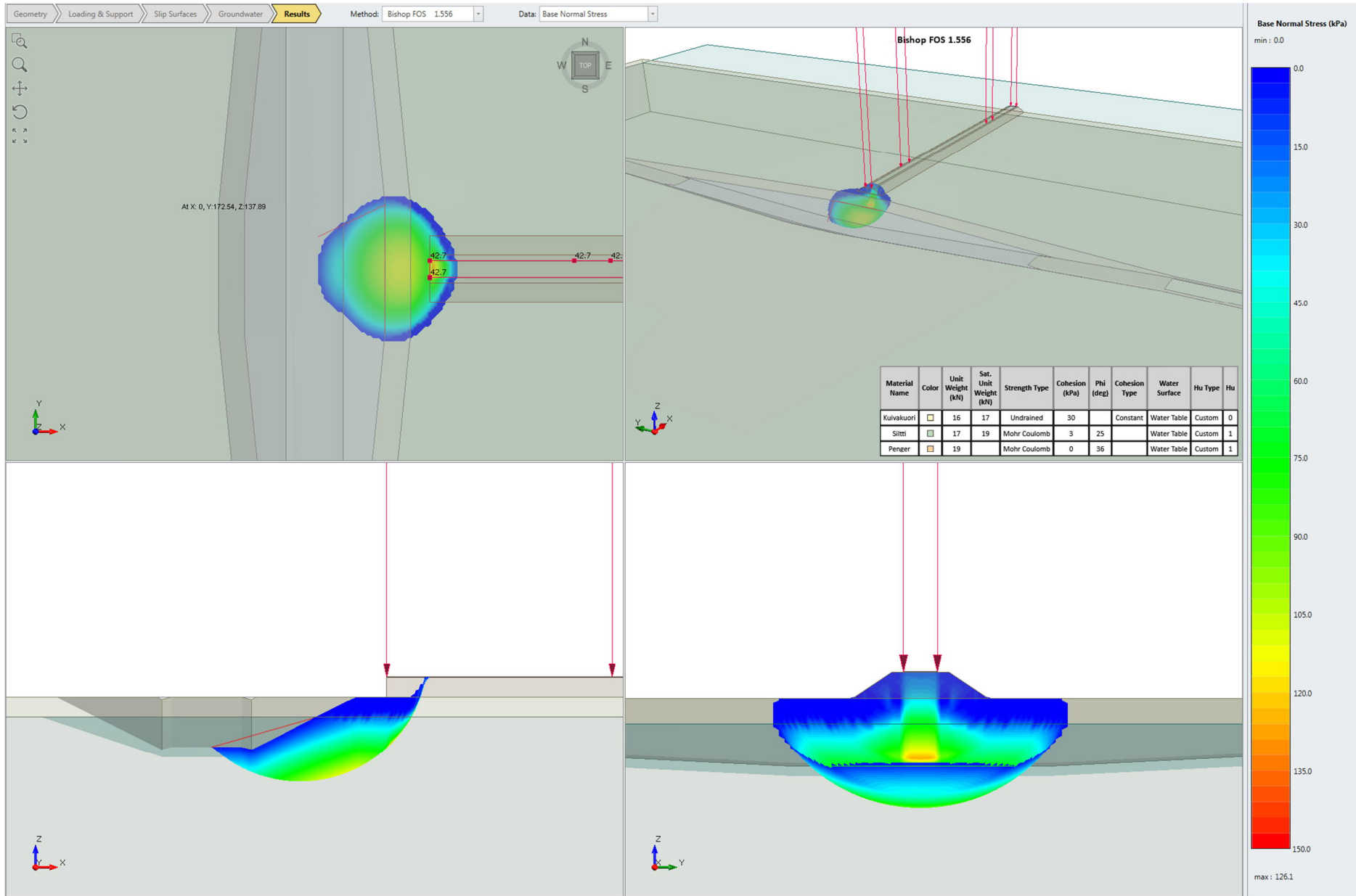
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 3. Yksiraiteinen ratapenger.



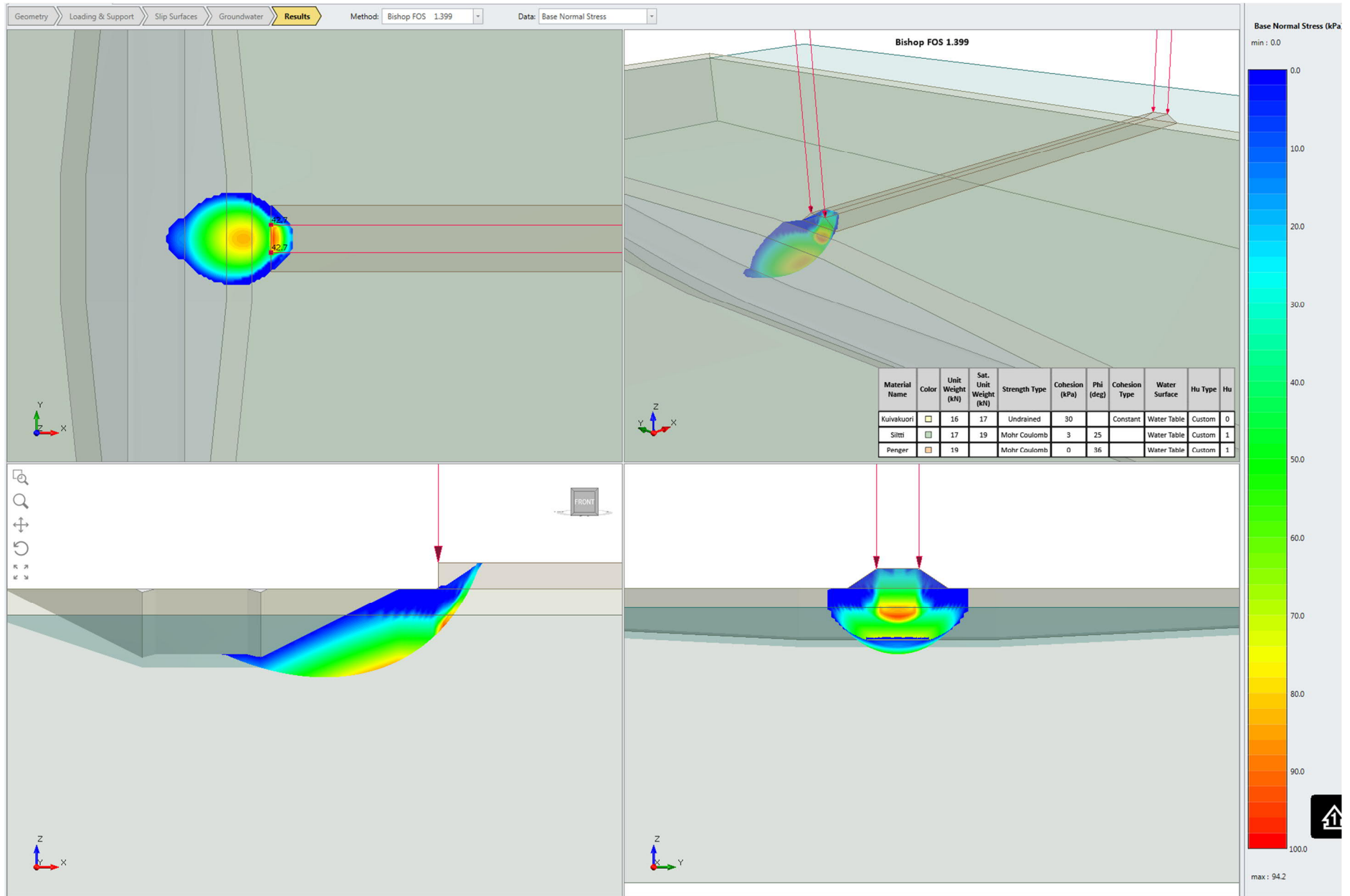
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

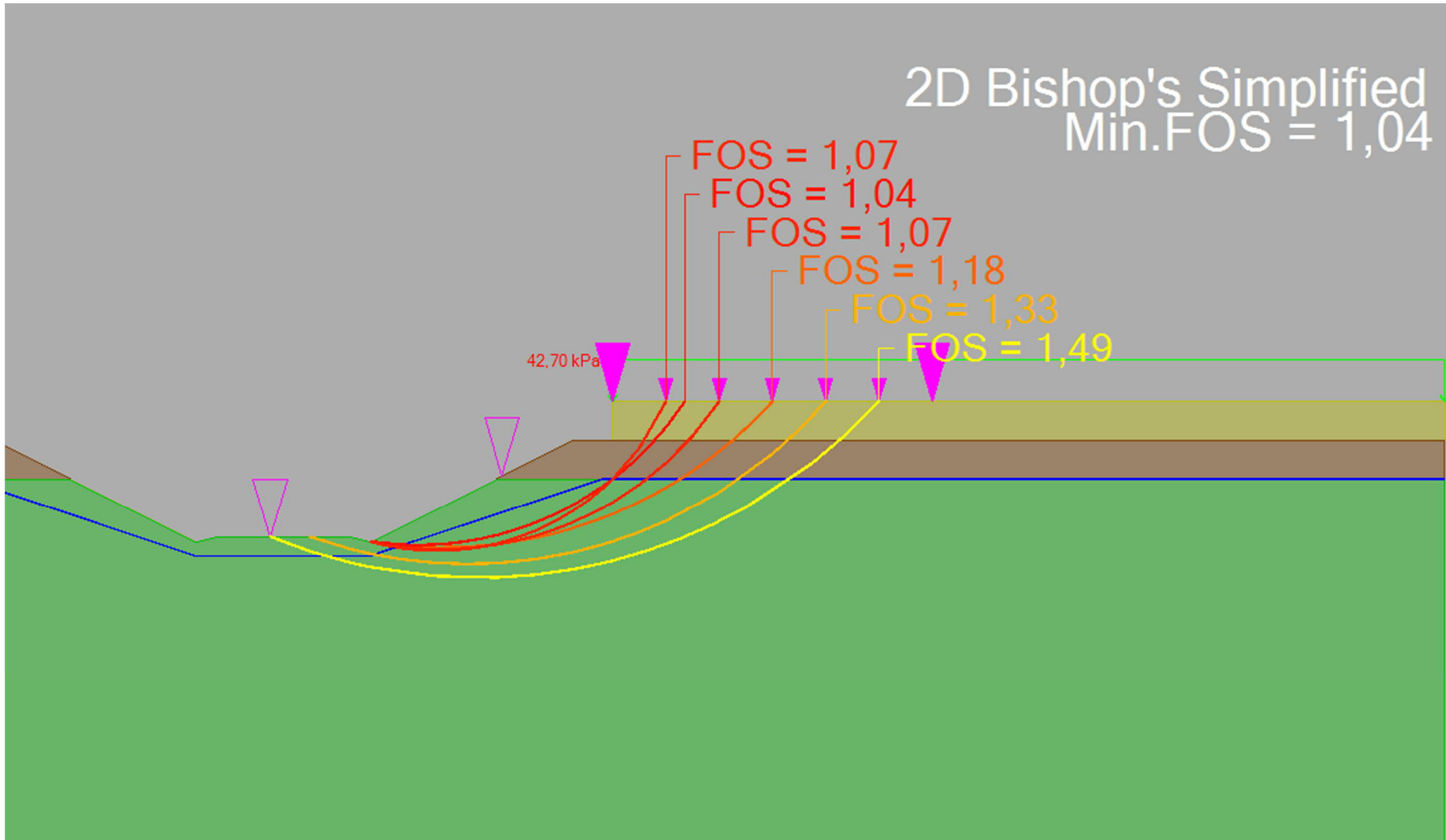


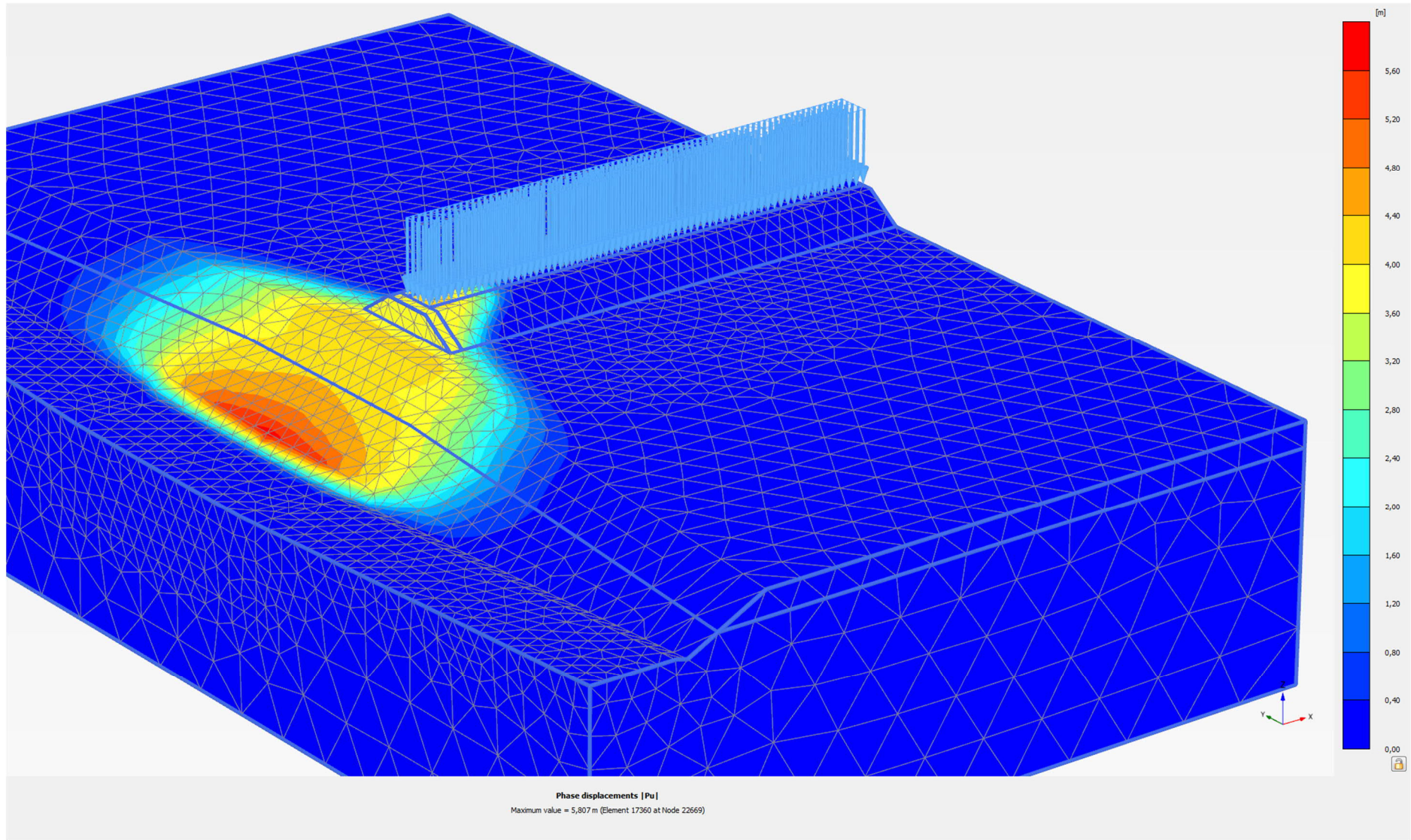
Liite 23. Stabiileettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.



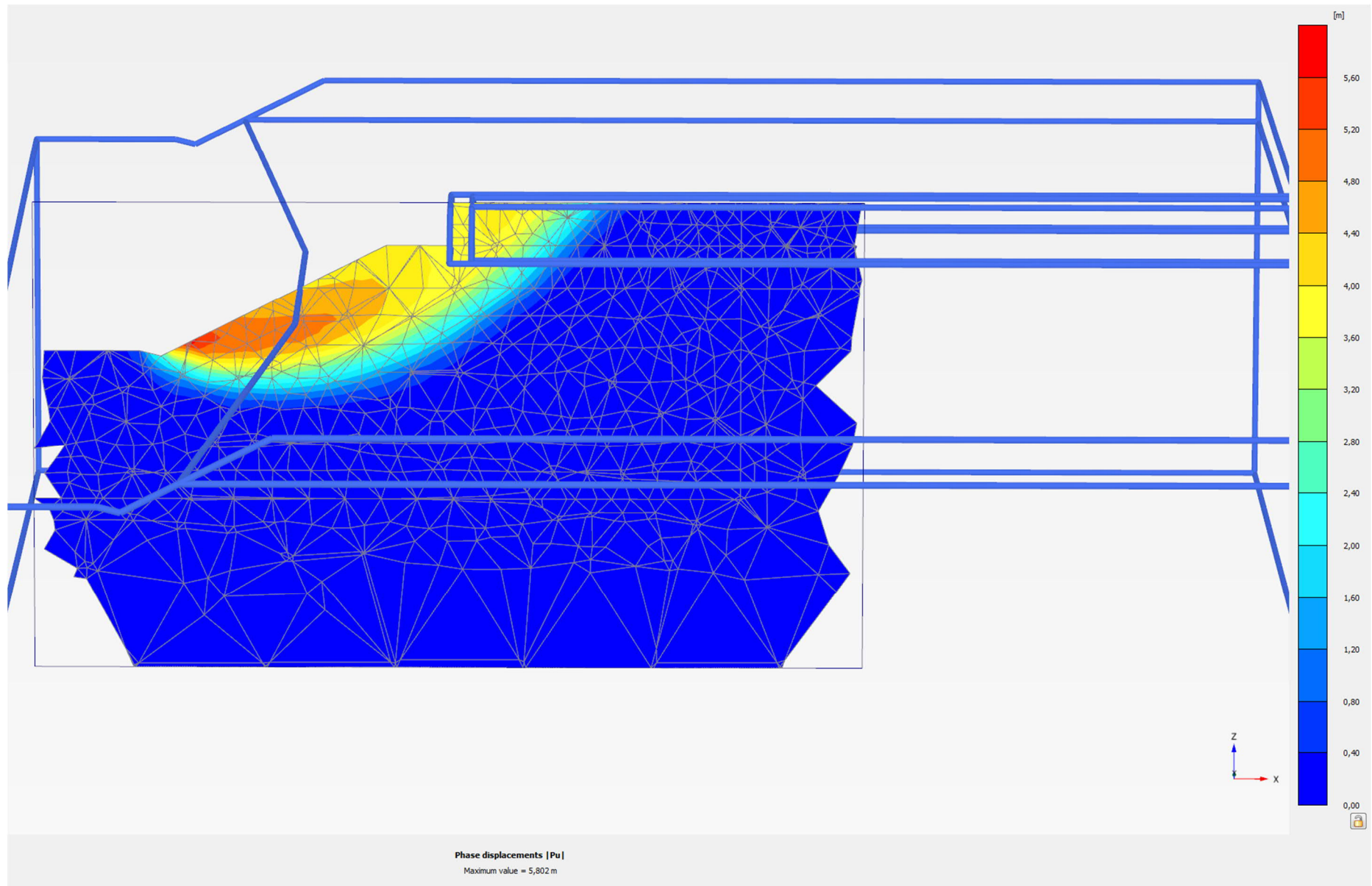
Liite 23. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

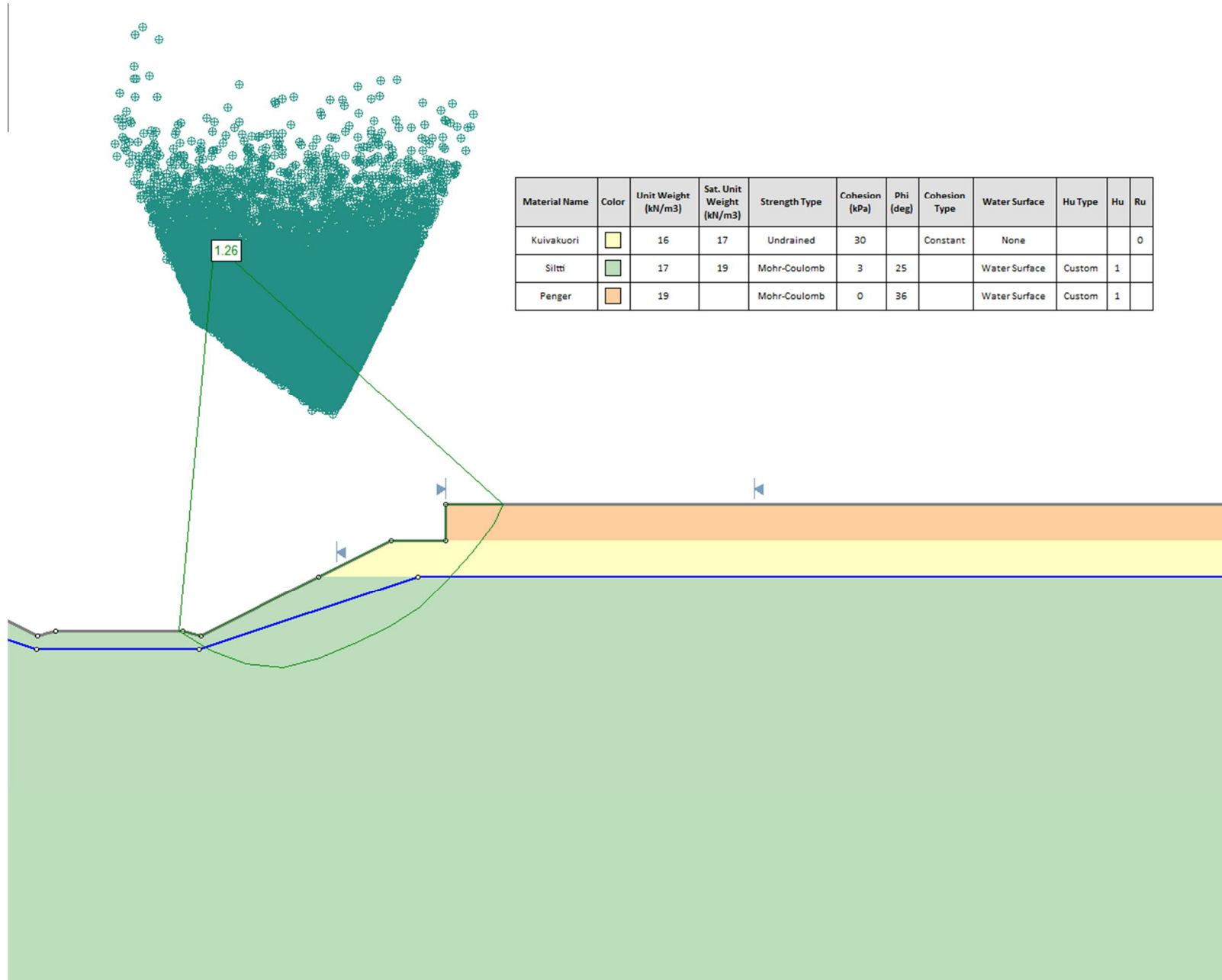




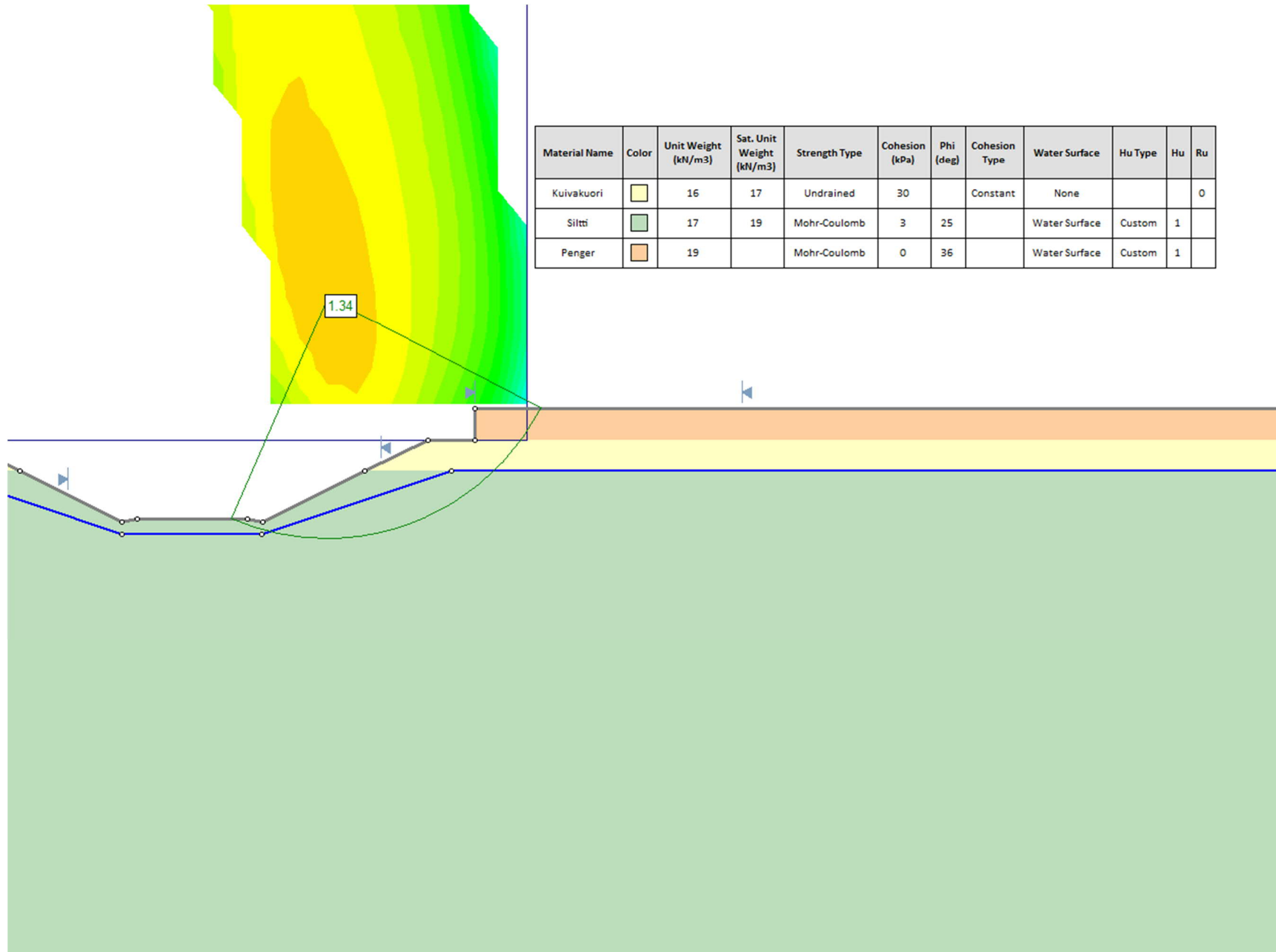


Liite 23. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Yksiraiteinen ratapenger.

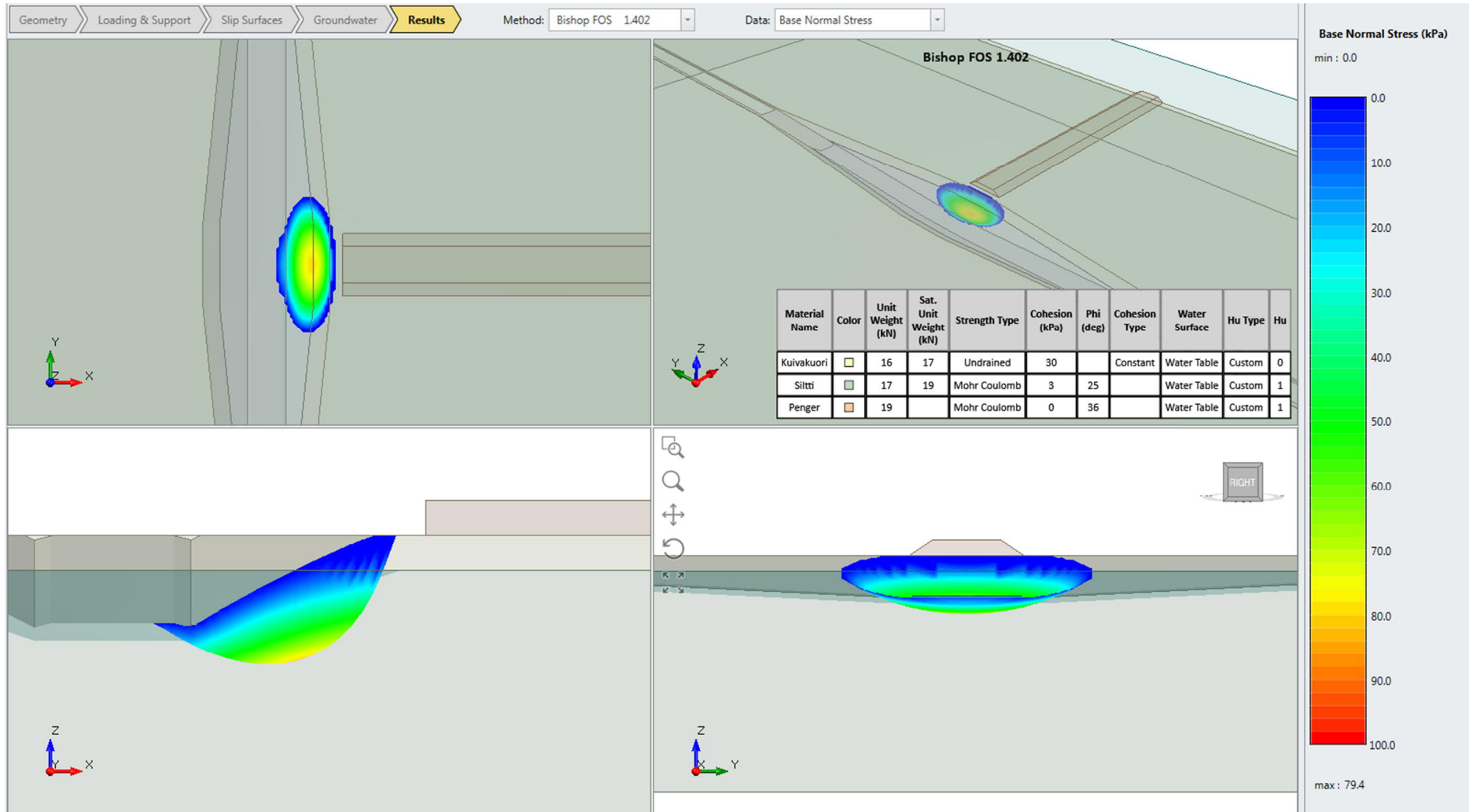


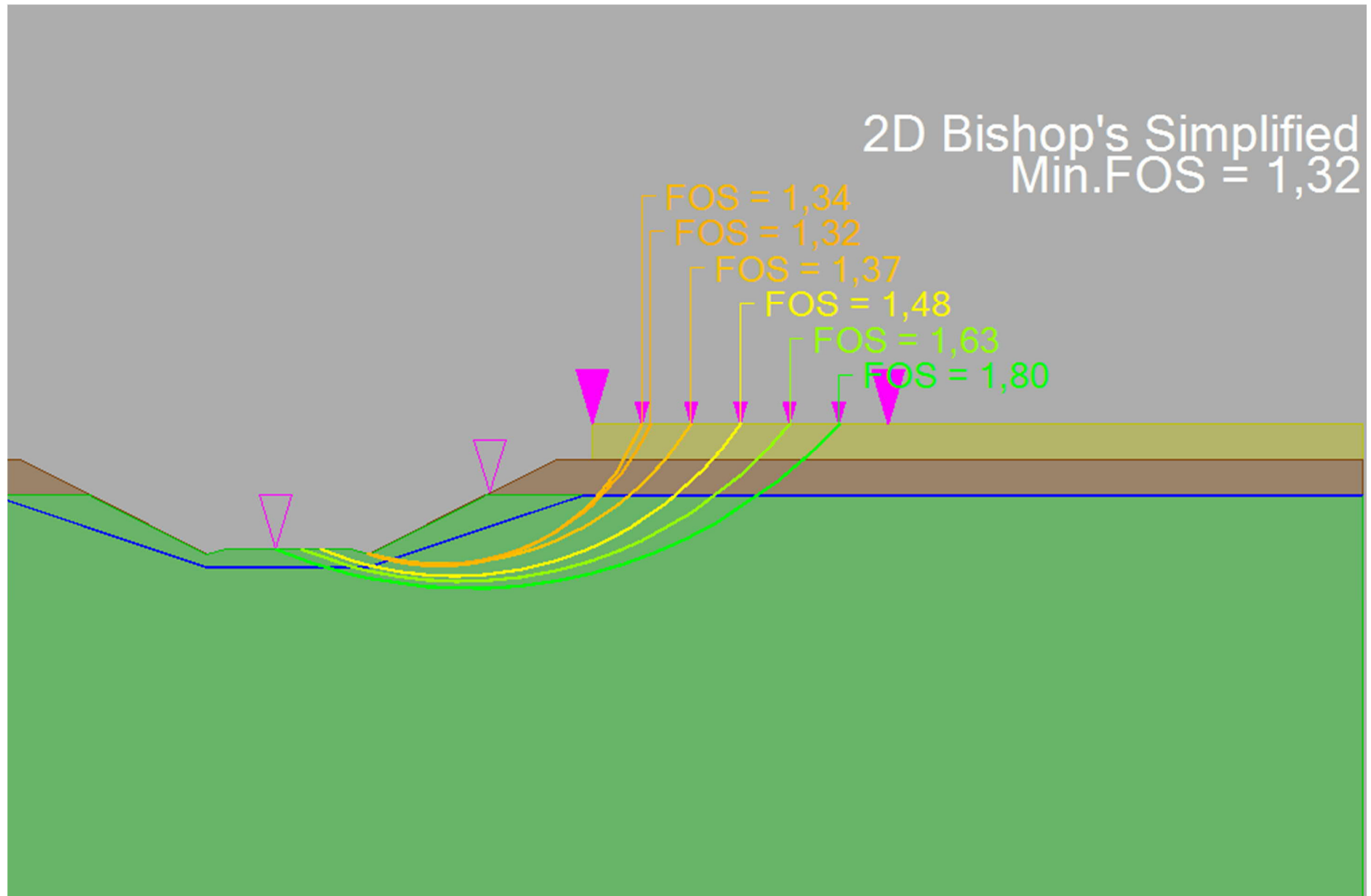


Liite 24. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

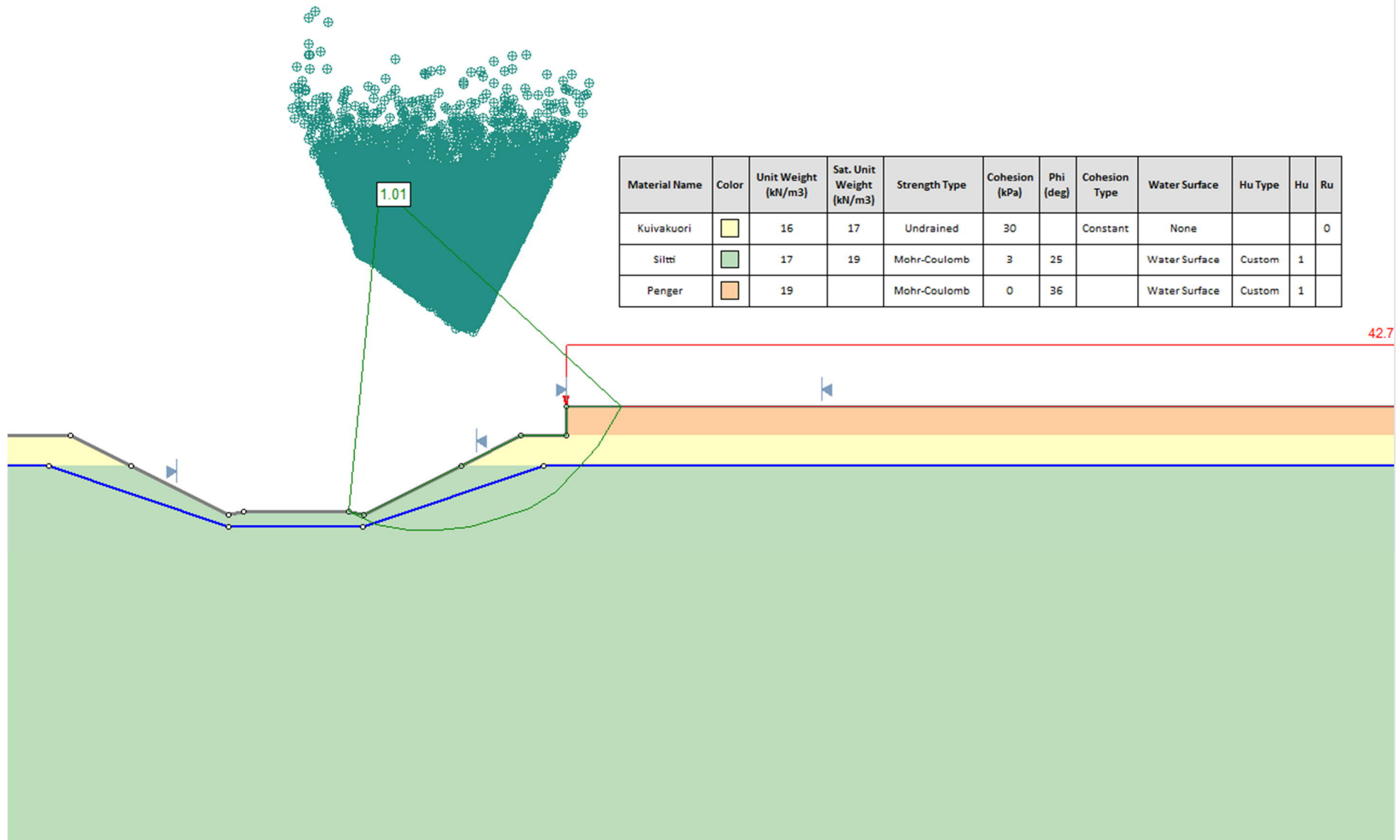


Liite 24. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

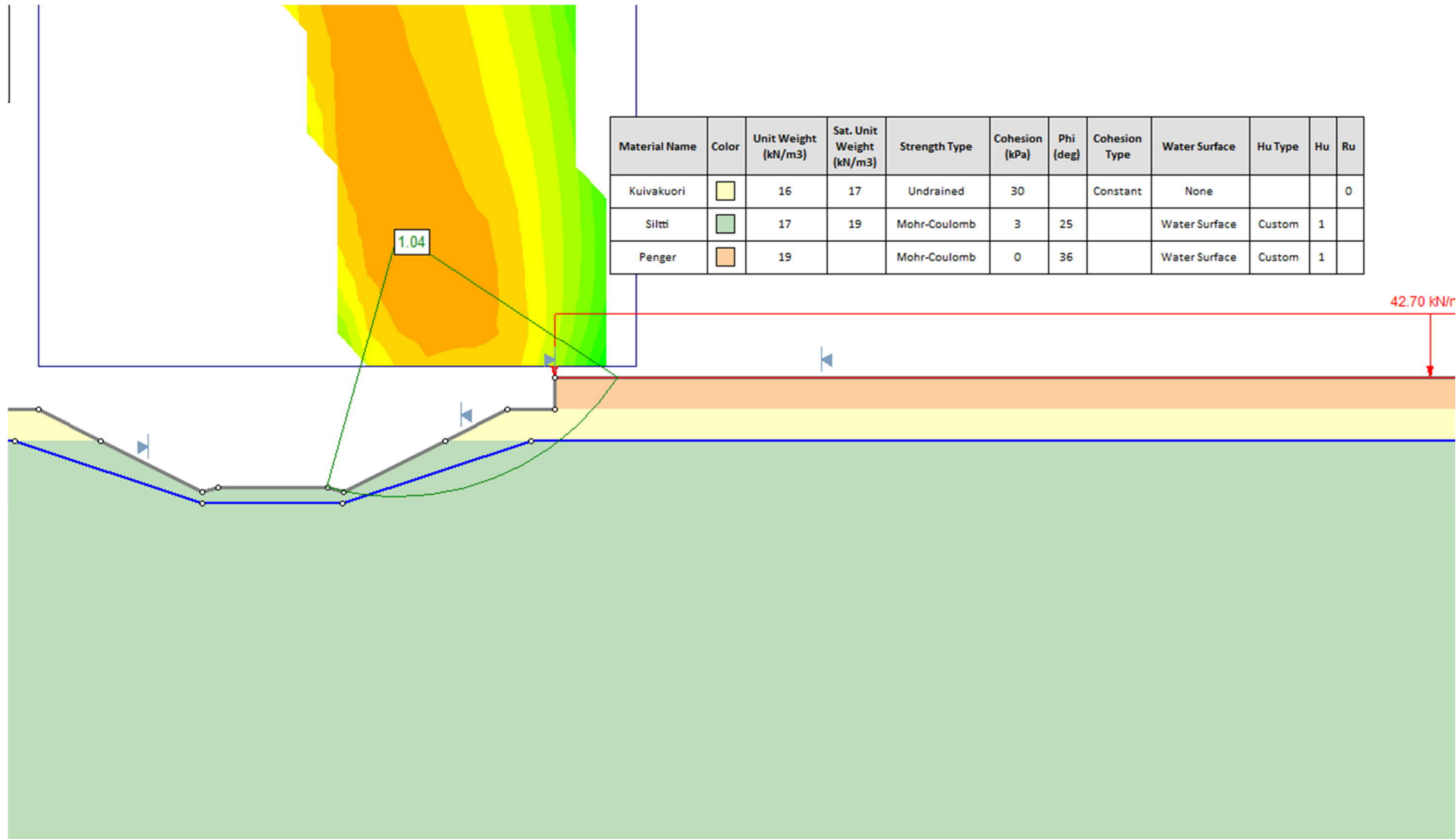




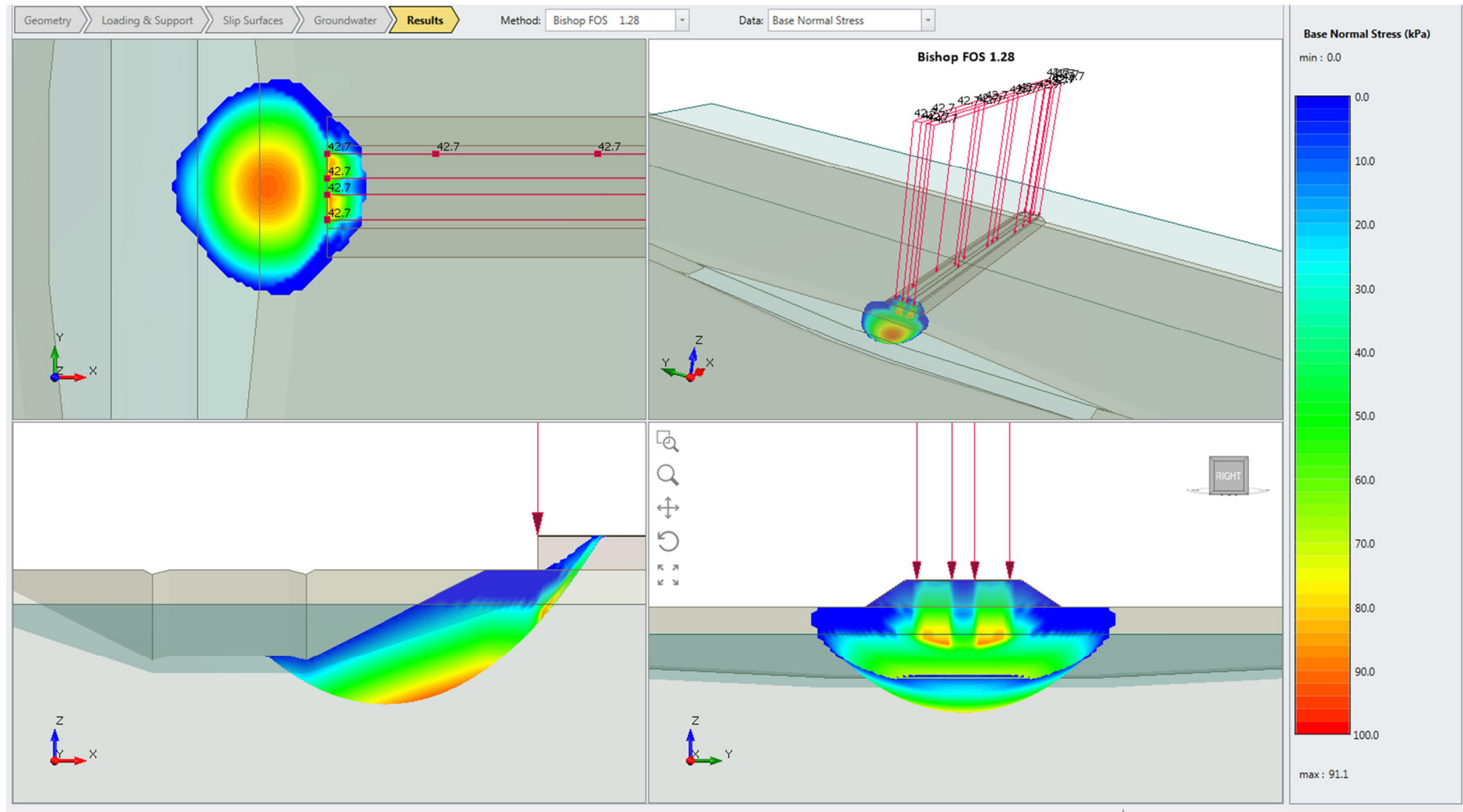
Liite 24. Stabiilitelaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

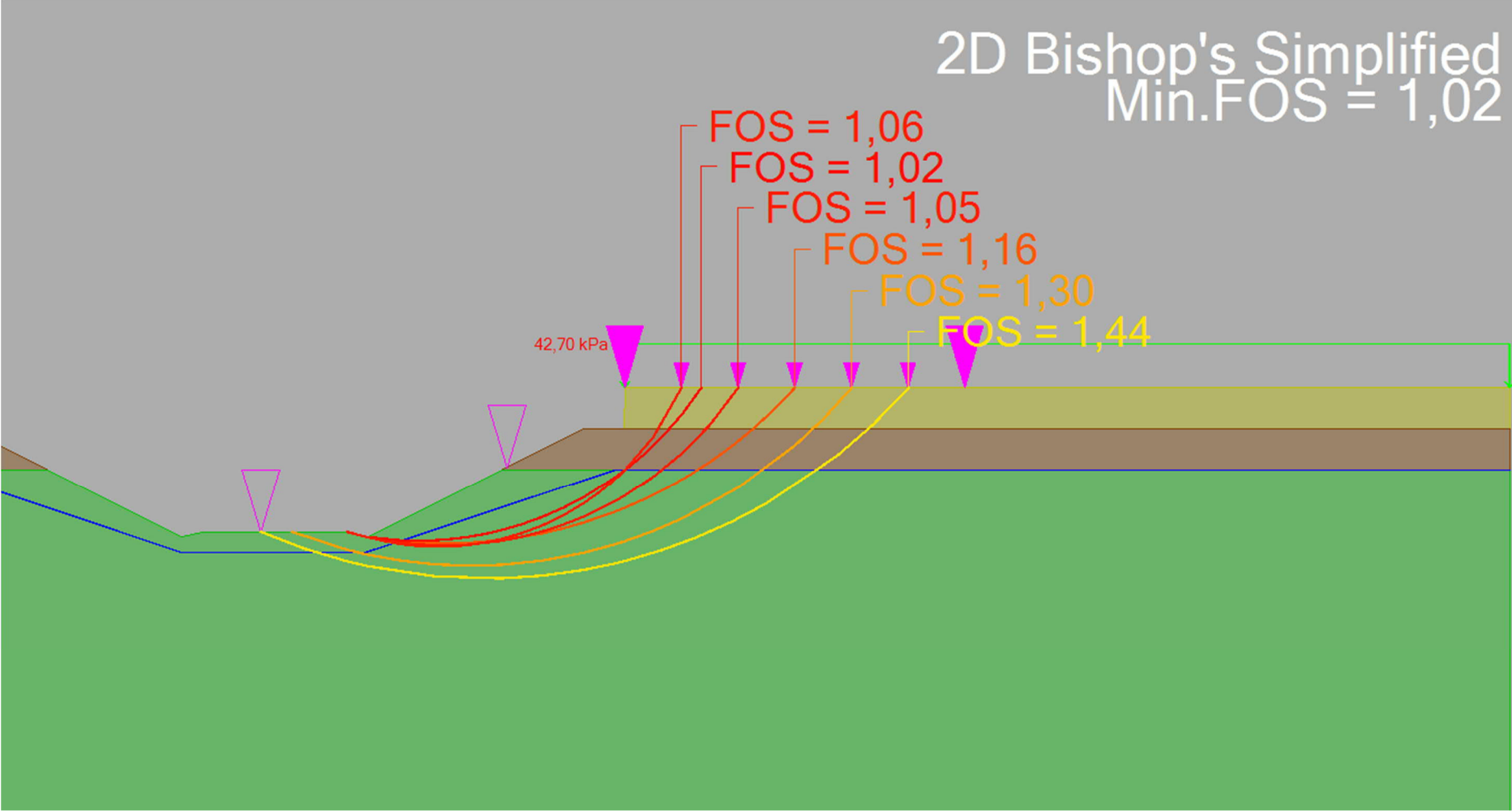


Liite 24. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

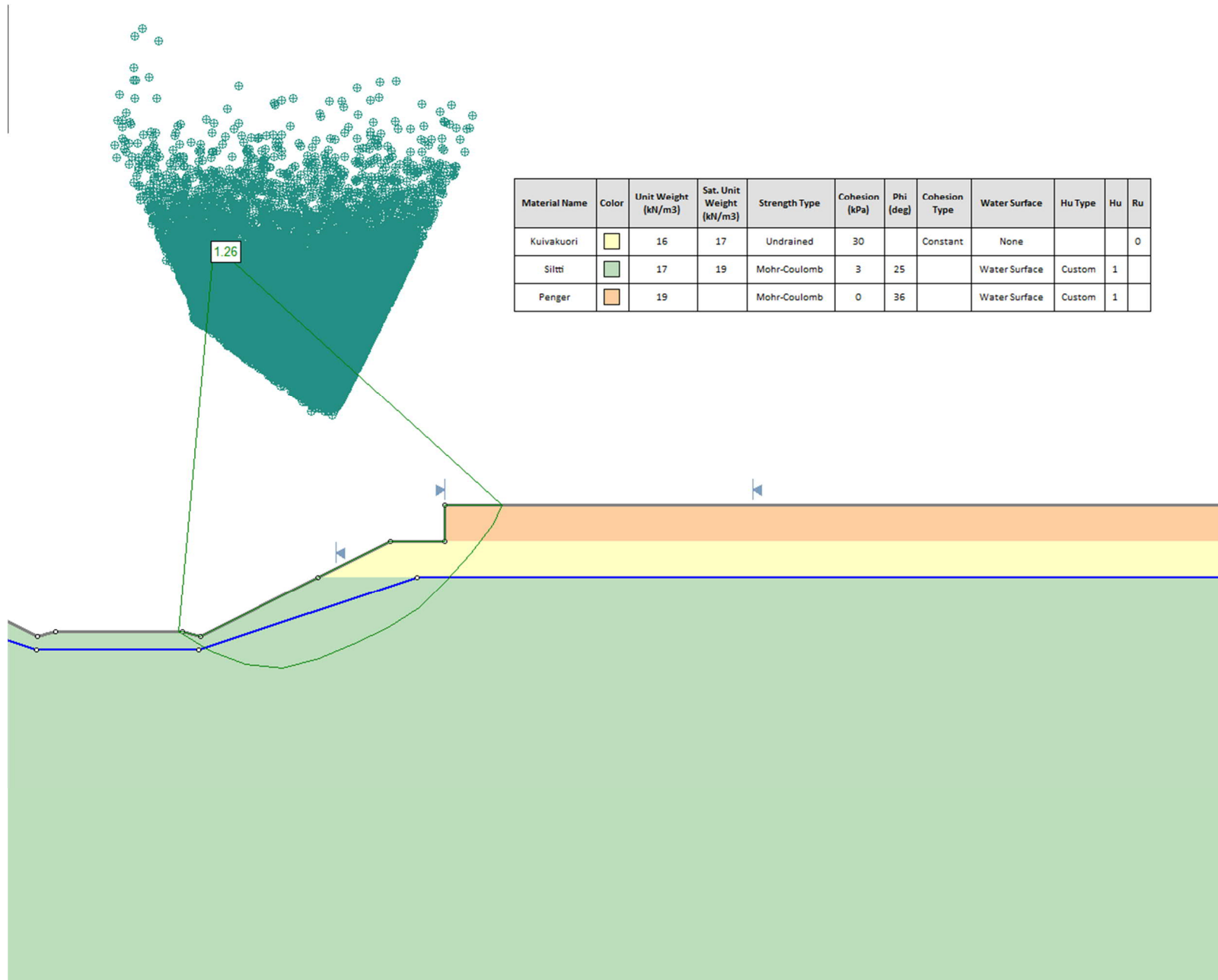


Liite 24. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Kaksiraiteinen ratapenger.

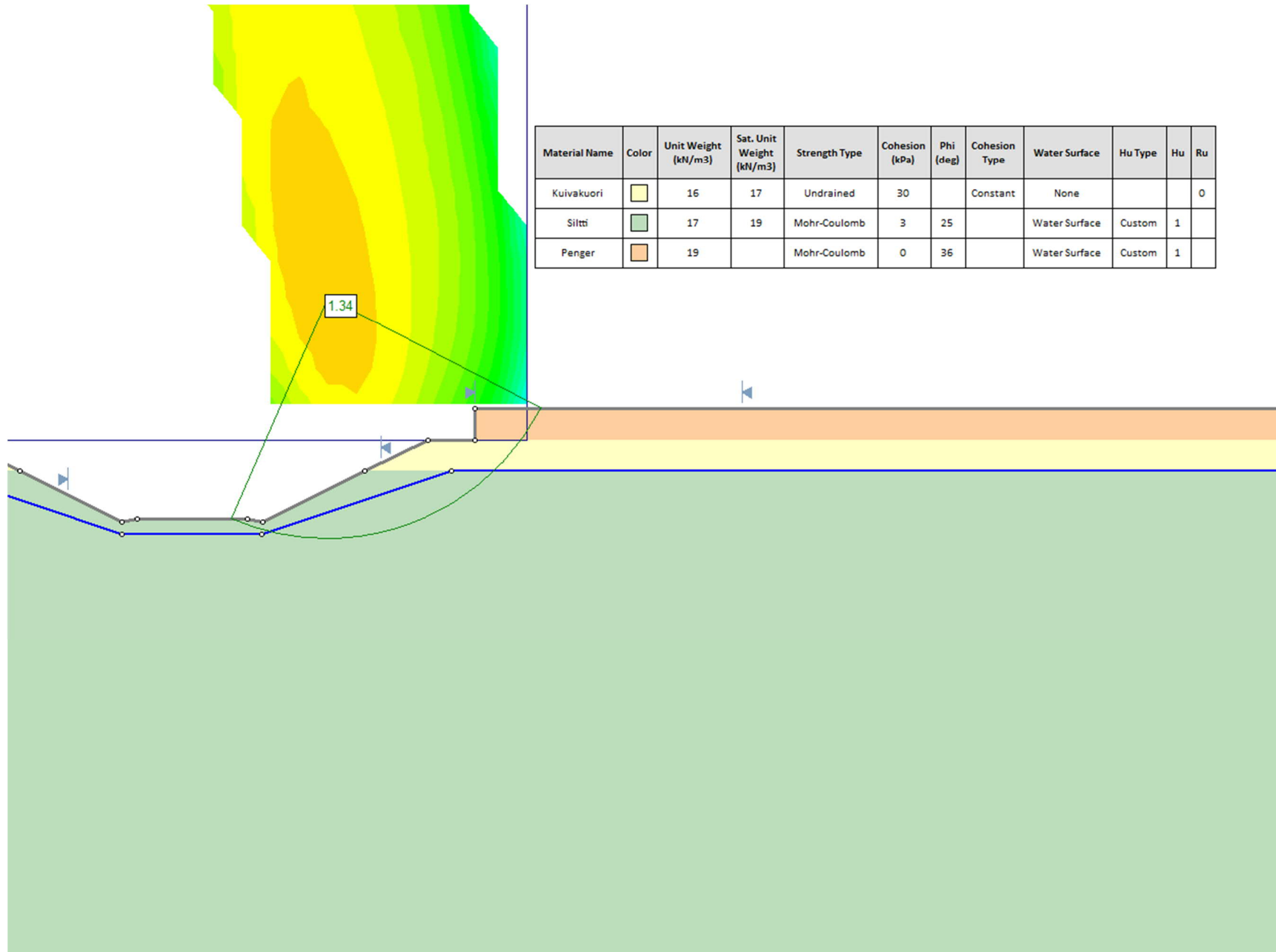




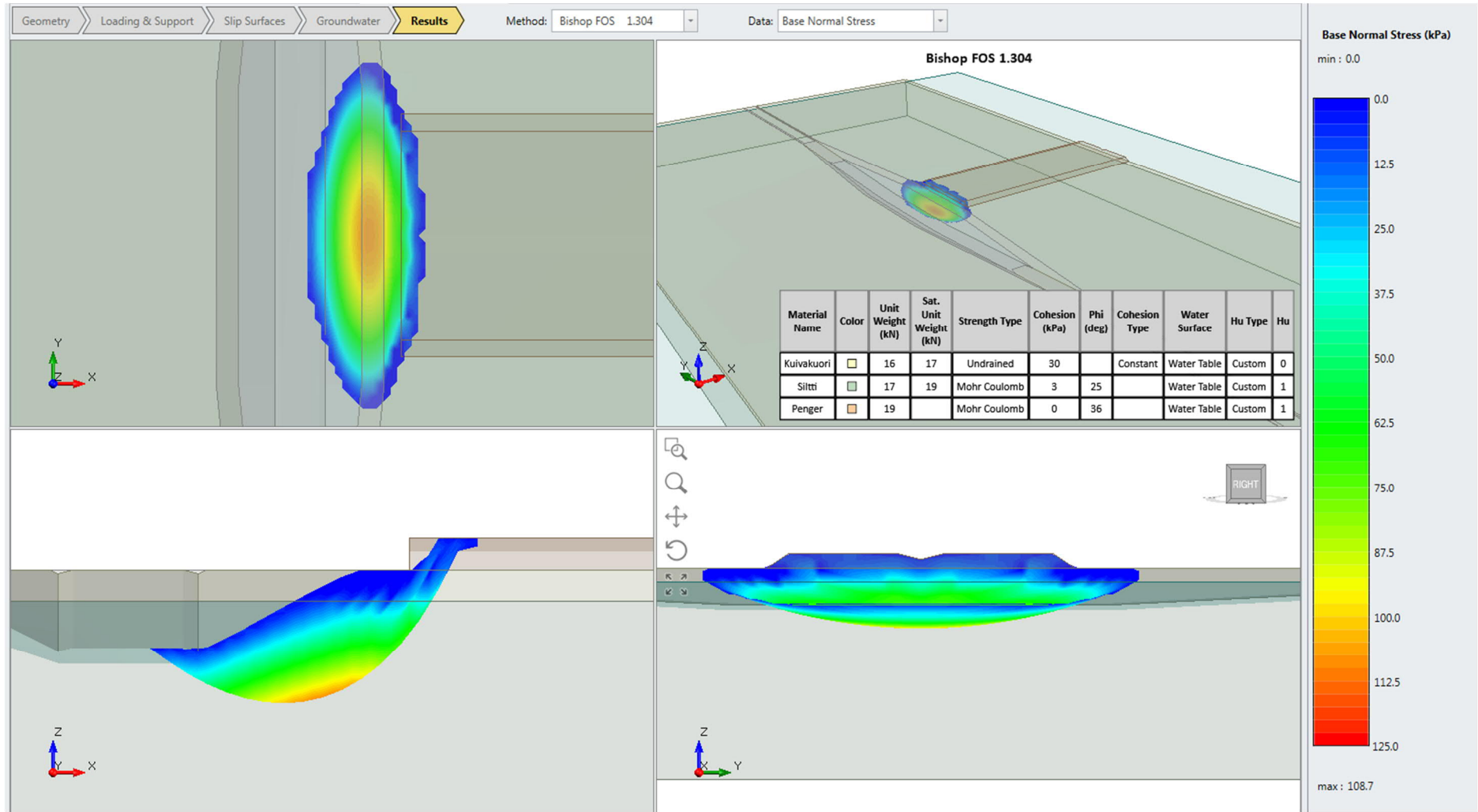
Liite 25. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Moottoritiepenget.

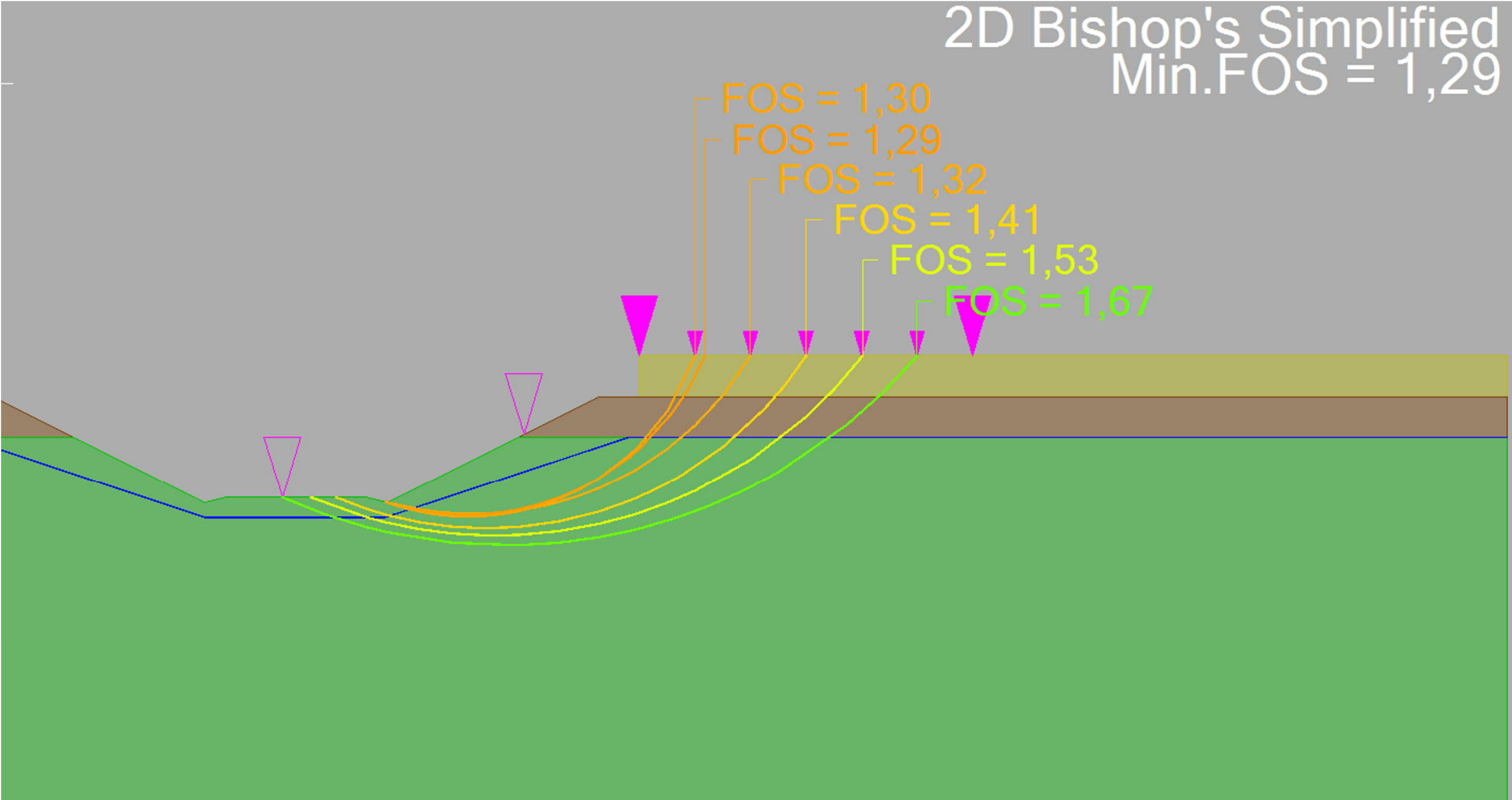


Liite 25. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Moottoritiepengeri.

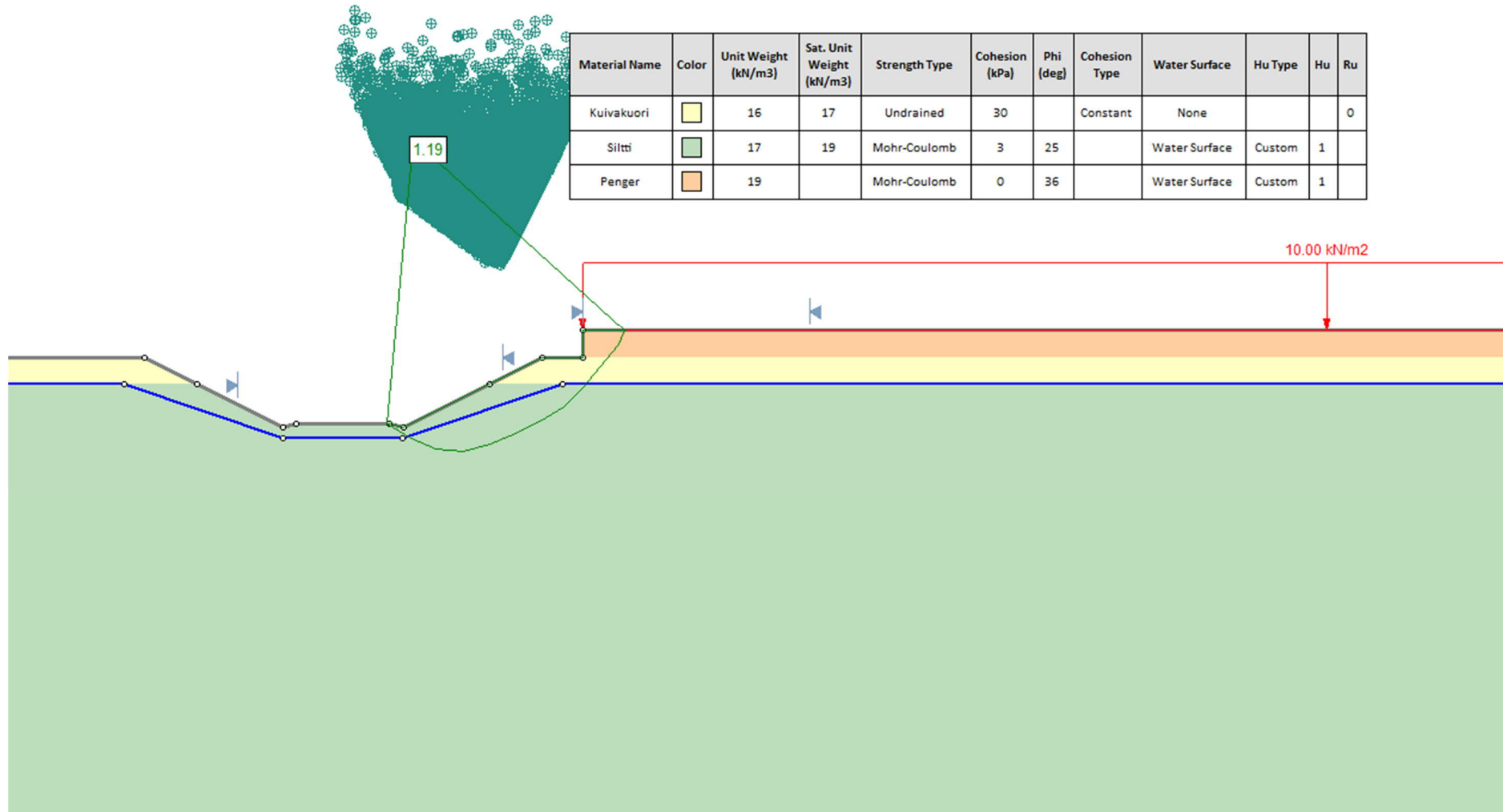


Liite 25. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Moottoritiepenger.

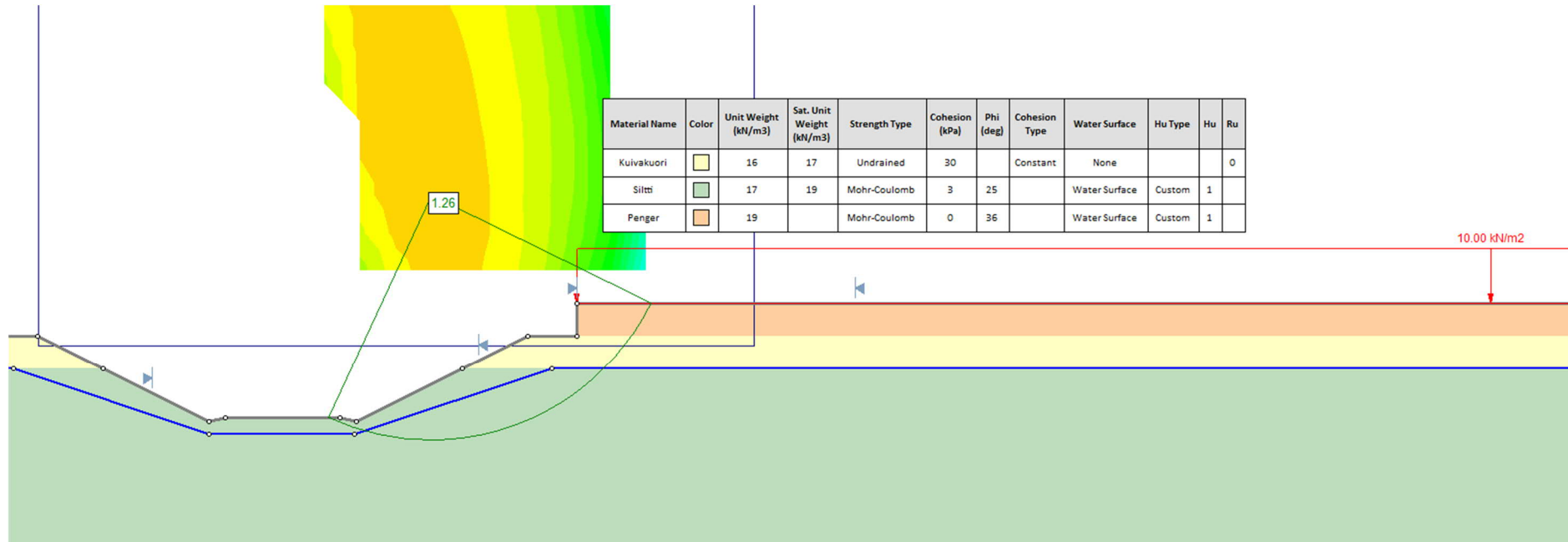




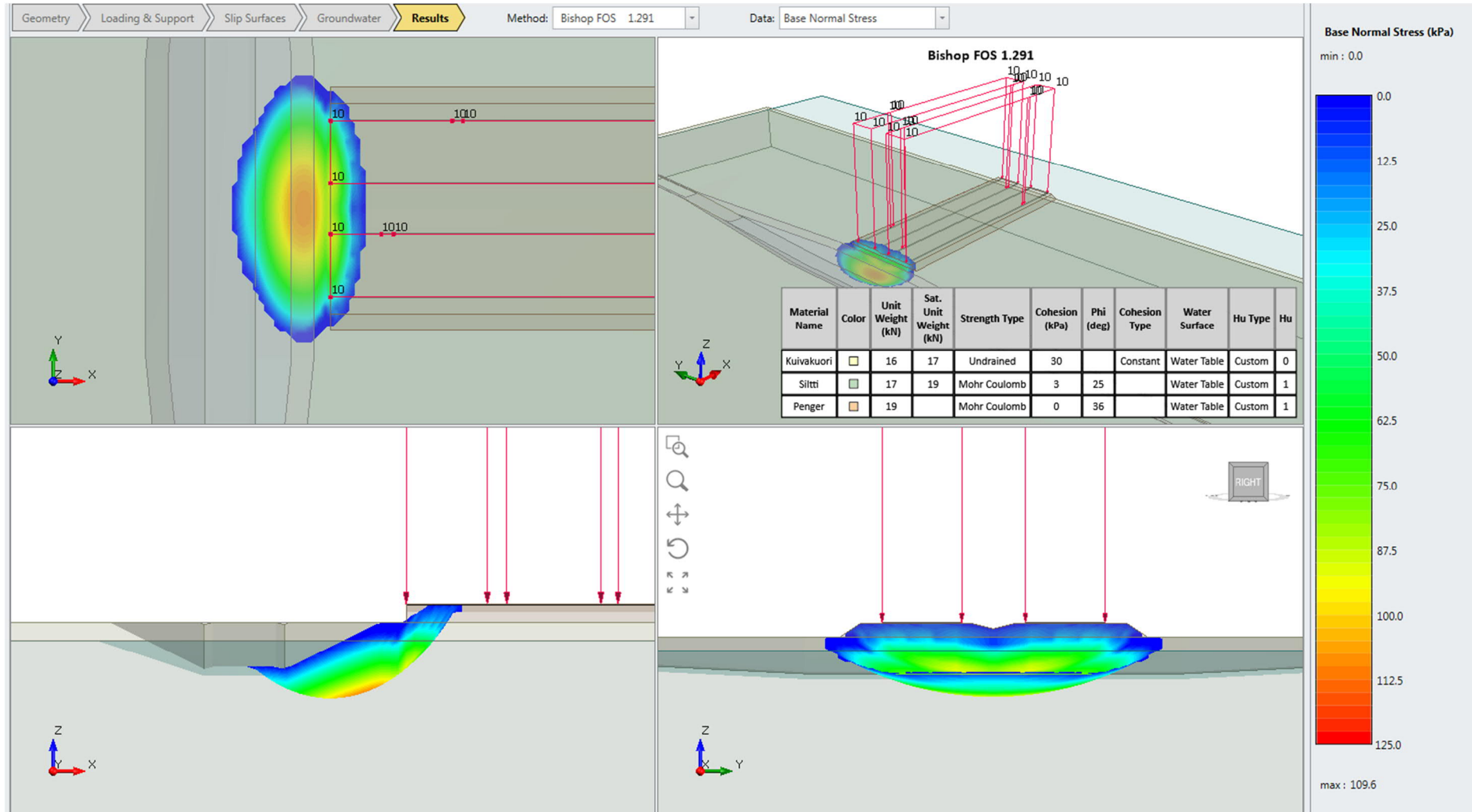
Liite 25. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyypin 3. Moottoritiepenget.

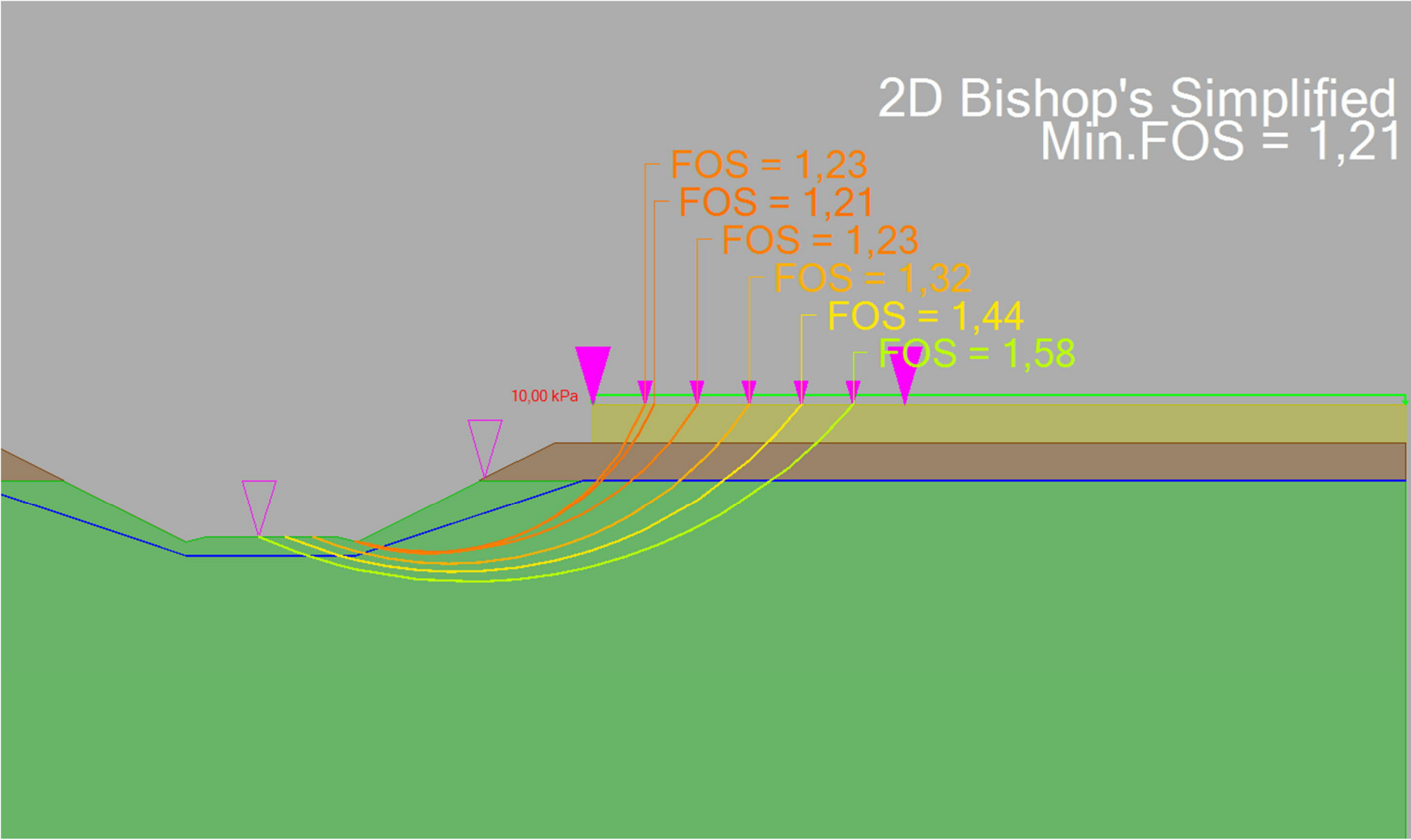


Liite 25. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyppi 3. Moottoritiepengeri.



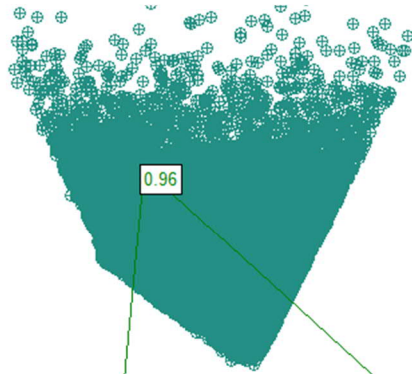
Liite 25. Stabiiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde pohjamaatyyppi 3. Moottoritiepengerr.






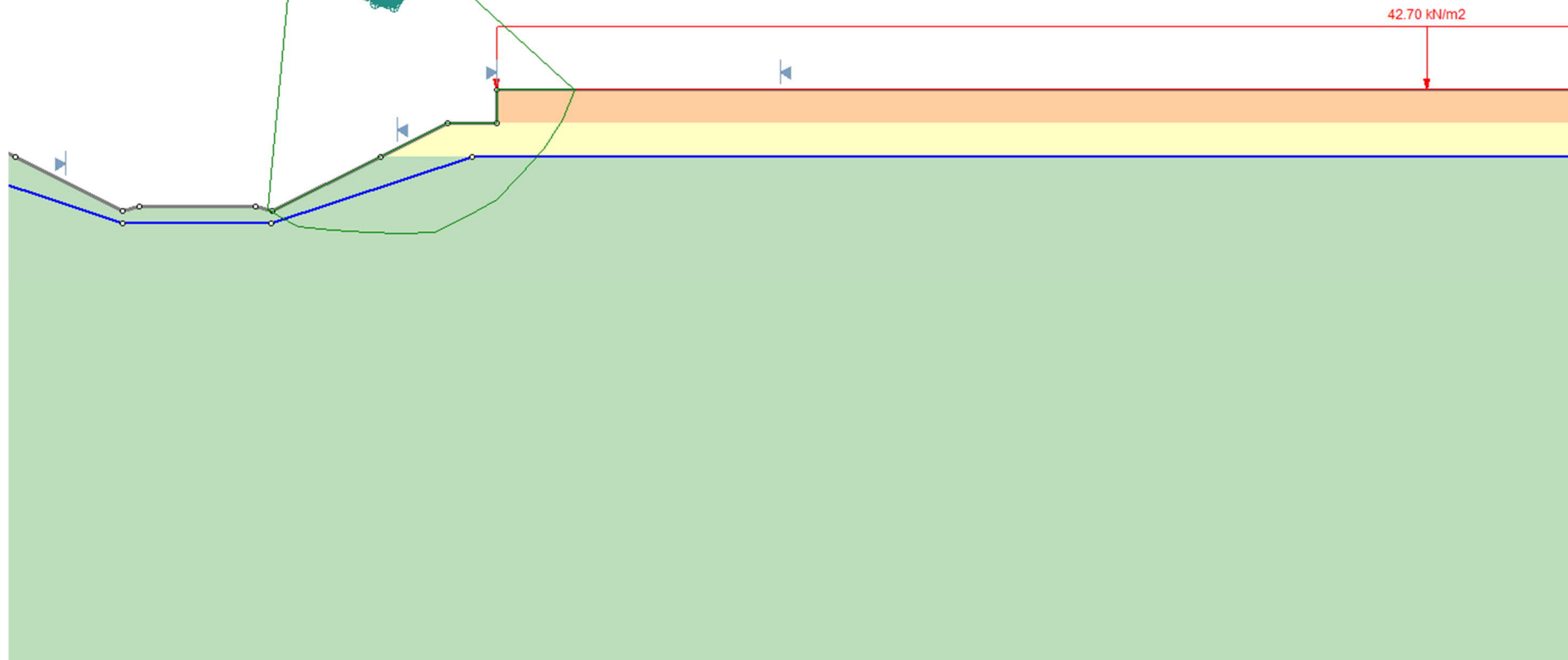


Liite 26.

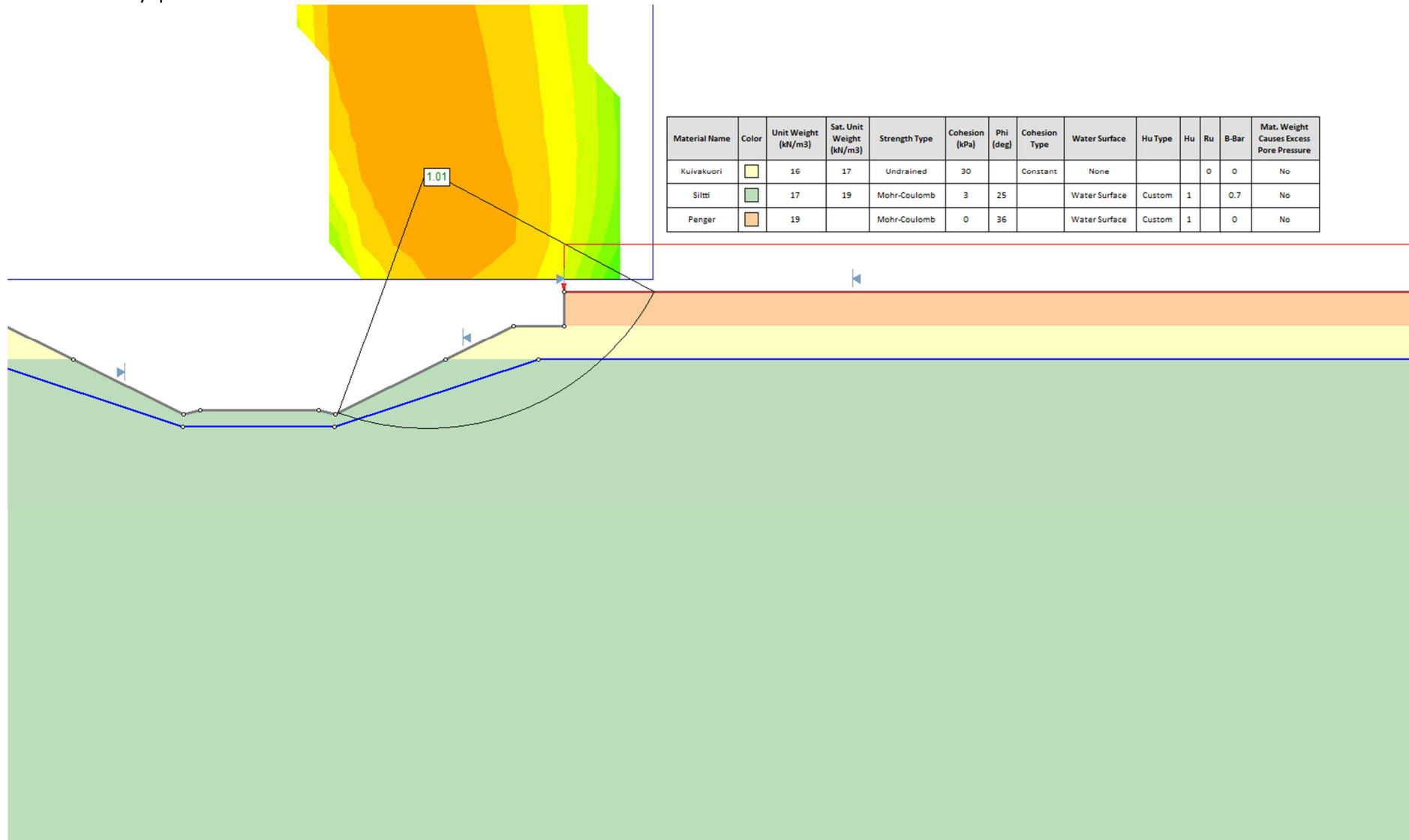
Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.



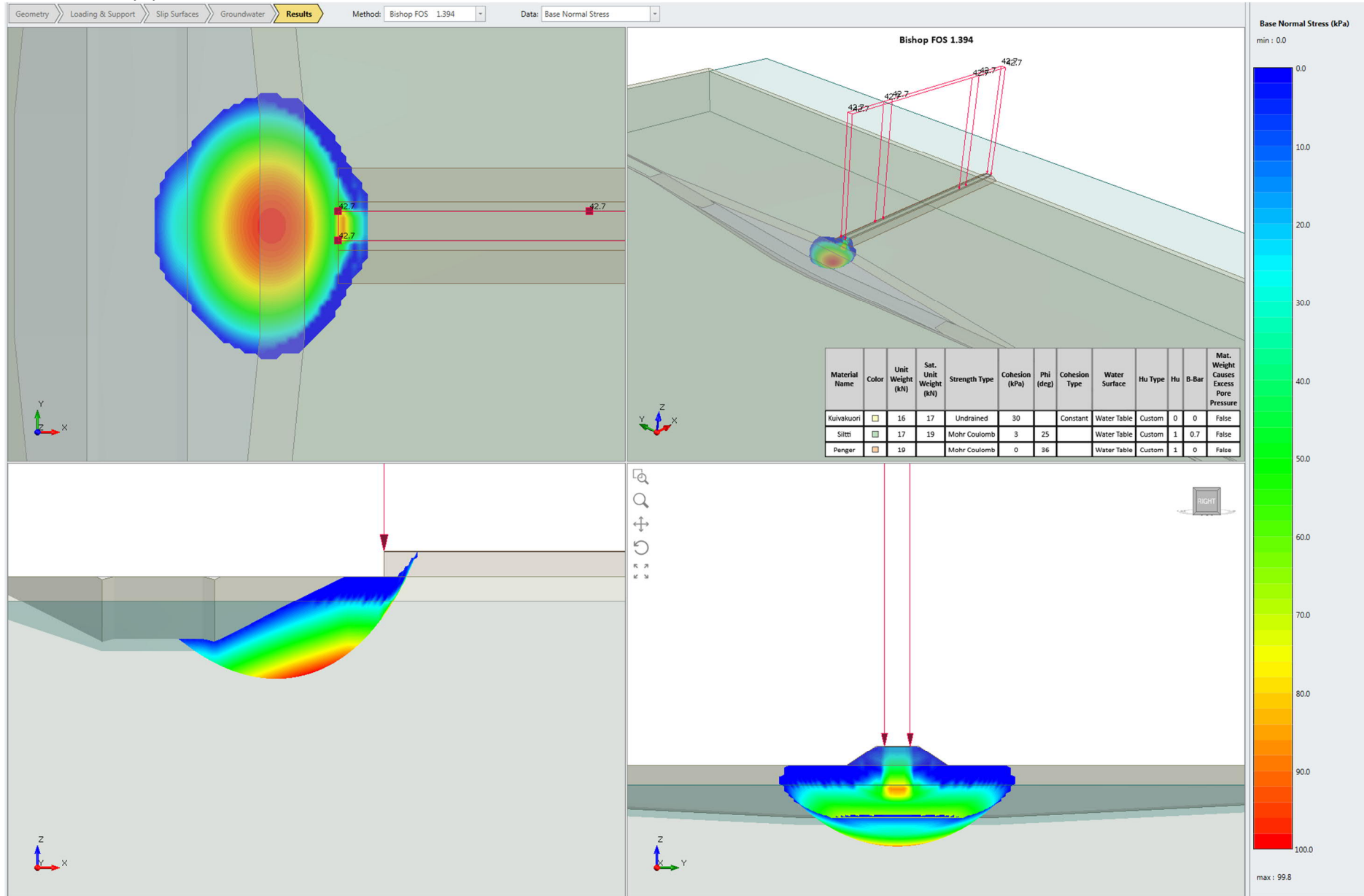
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru	B-Bar	Mat. Weight Causes Excess Pore Pressure
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant	None			0	0	No
Siitti		17	19	Mohr-Coulomb	3	25		Water Surface	Custom	1		0.7	No
Penger		19		Mohr-Coulomb	0	36		Water Surface	Custom	1		0	No



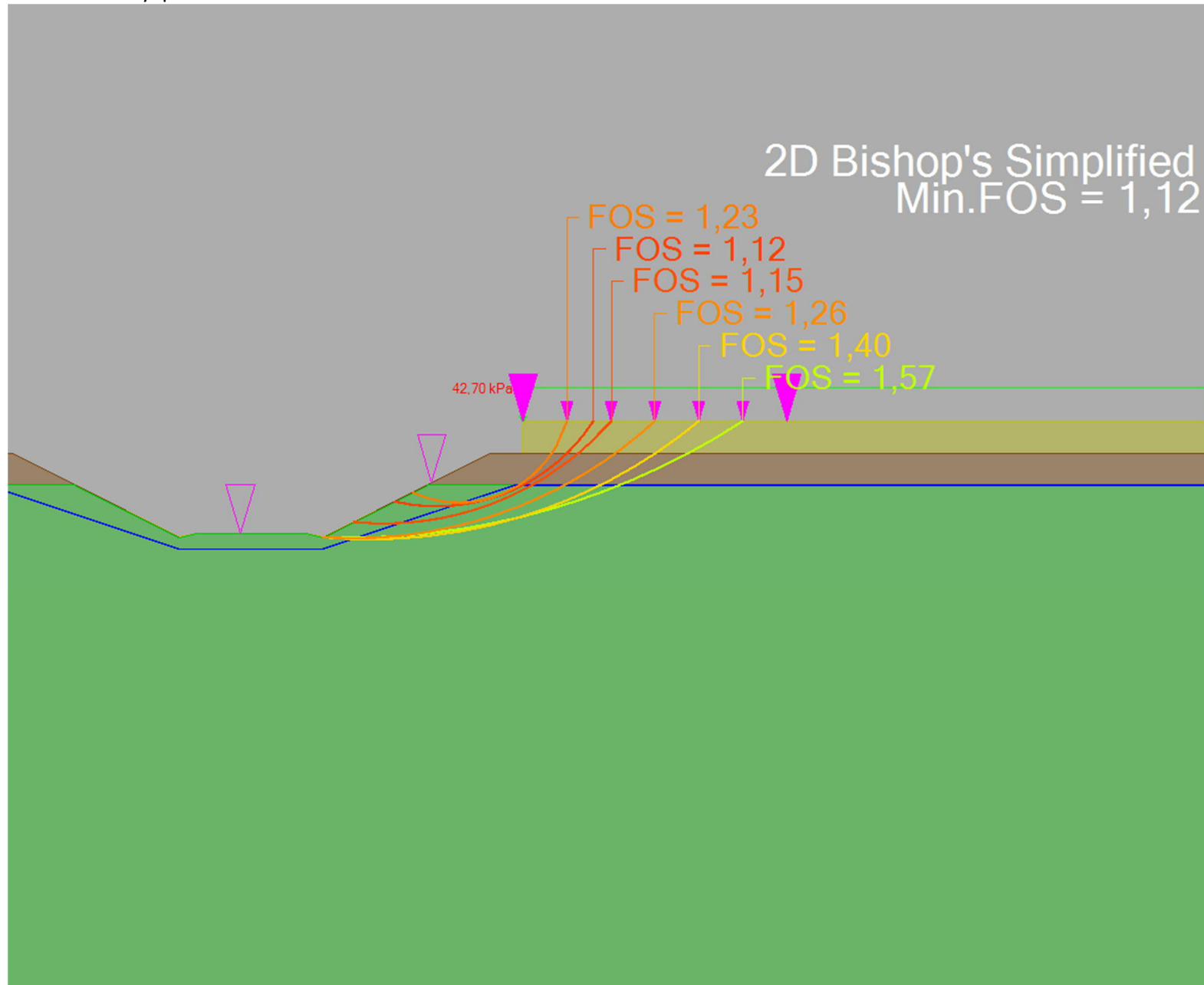
Liite 26. Stabiliateetilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.



Liite 26. Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.

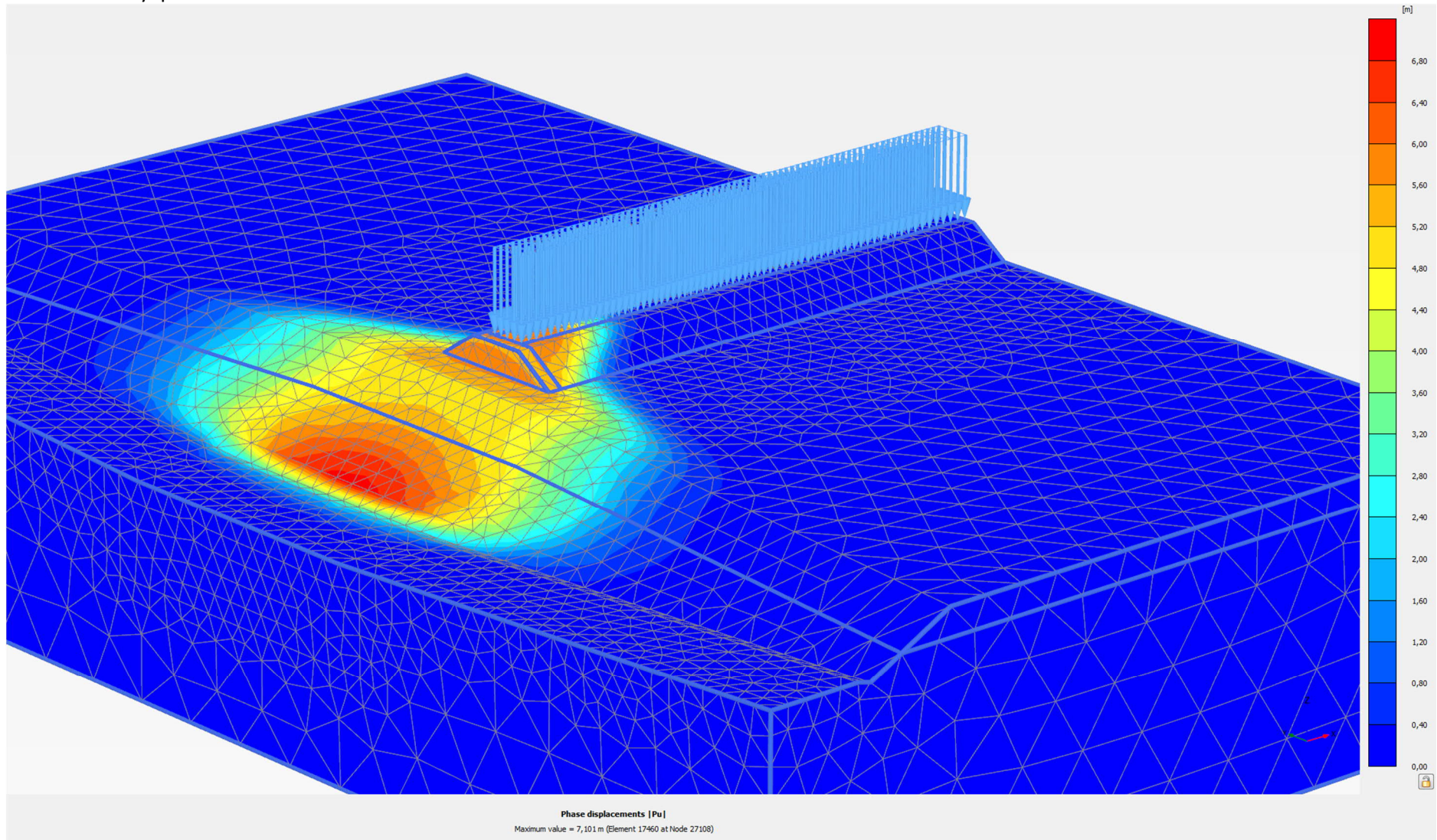


Liite 26. Stabiliateettilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.



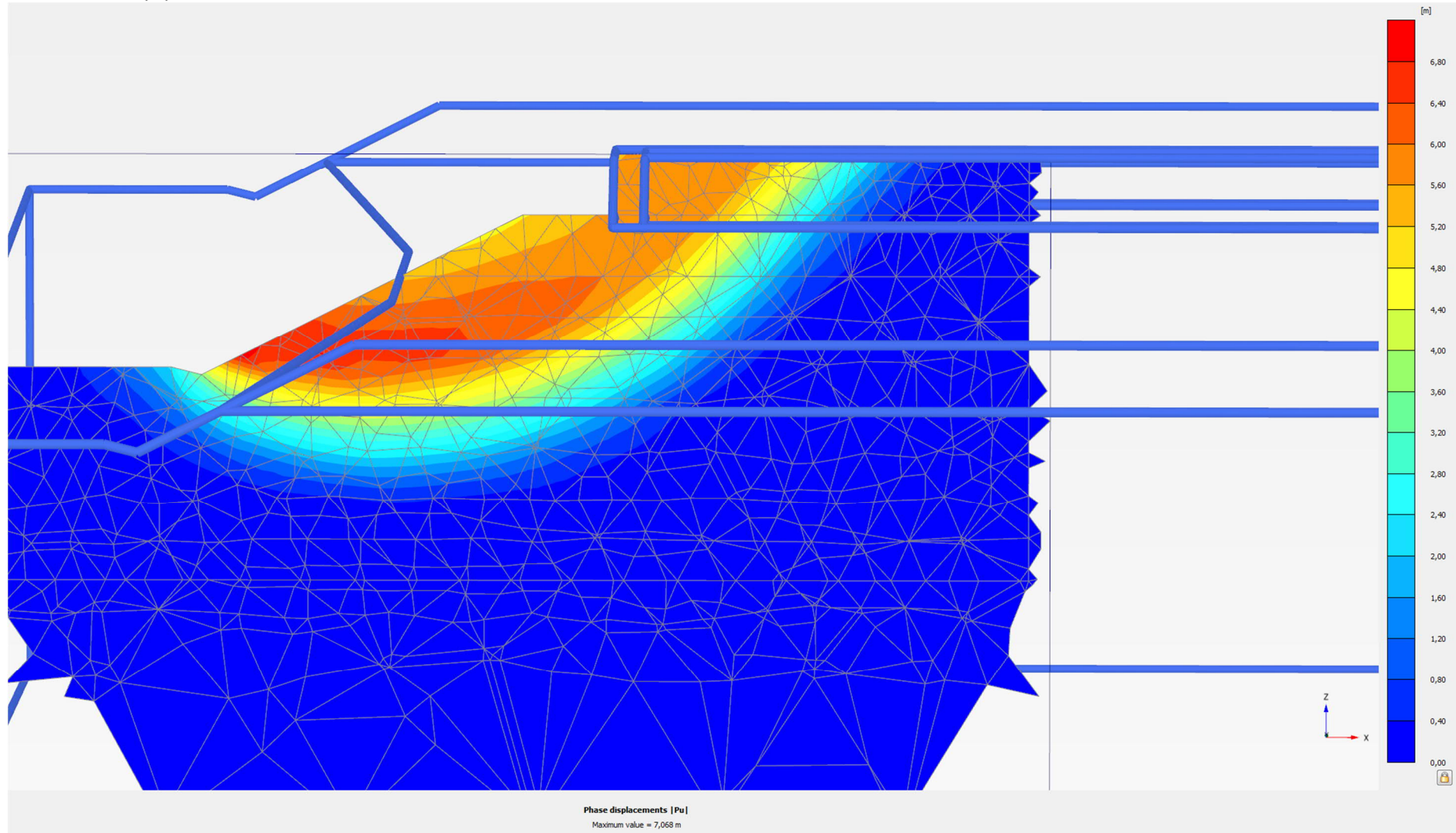
Liite 26.

Stabiteettilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.

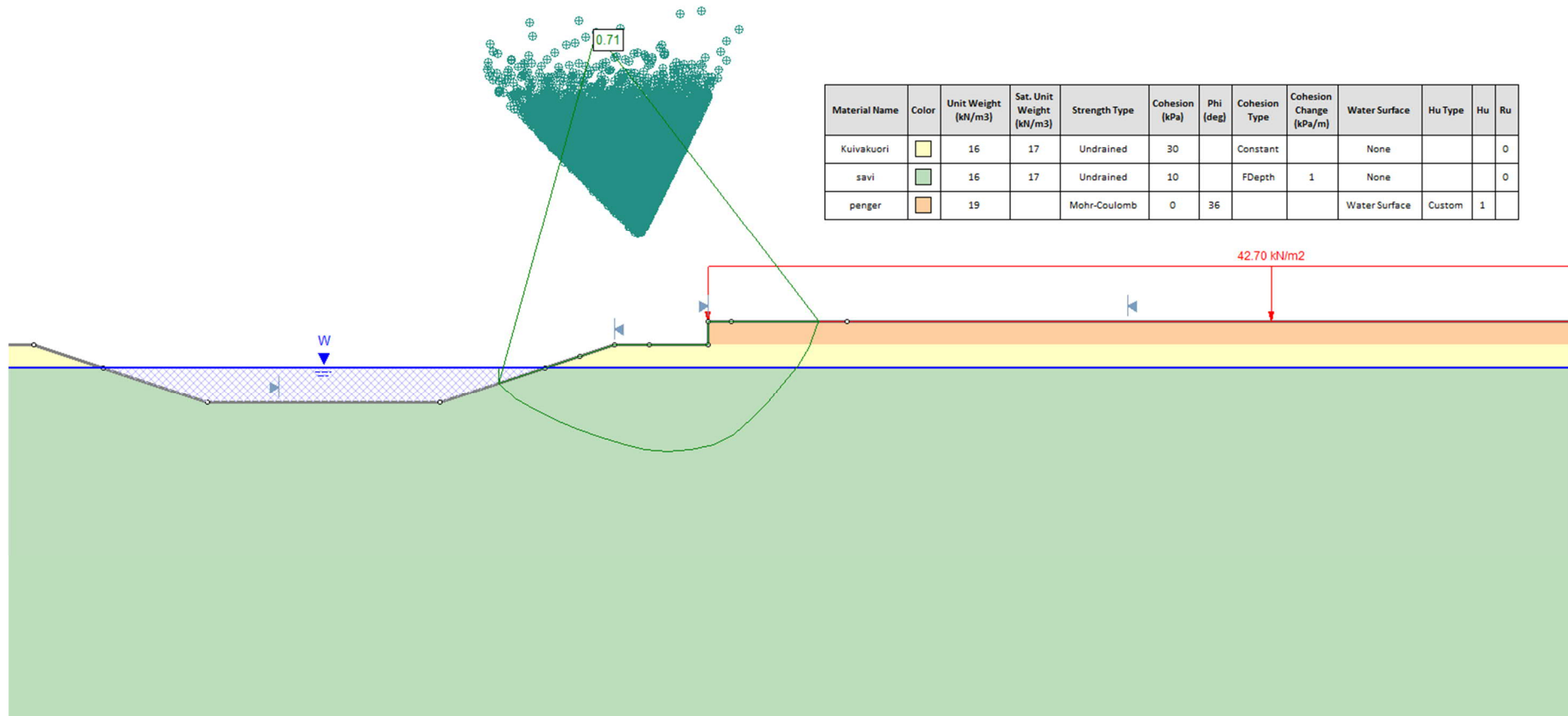


Liite 26.

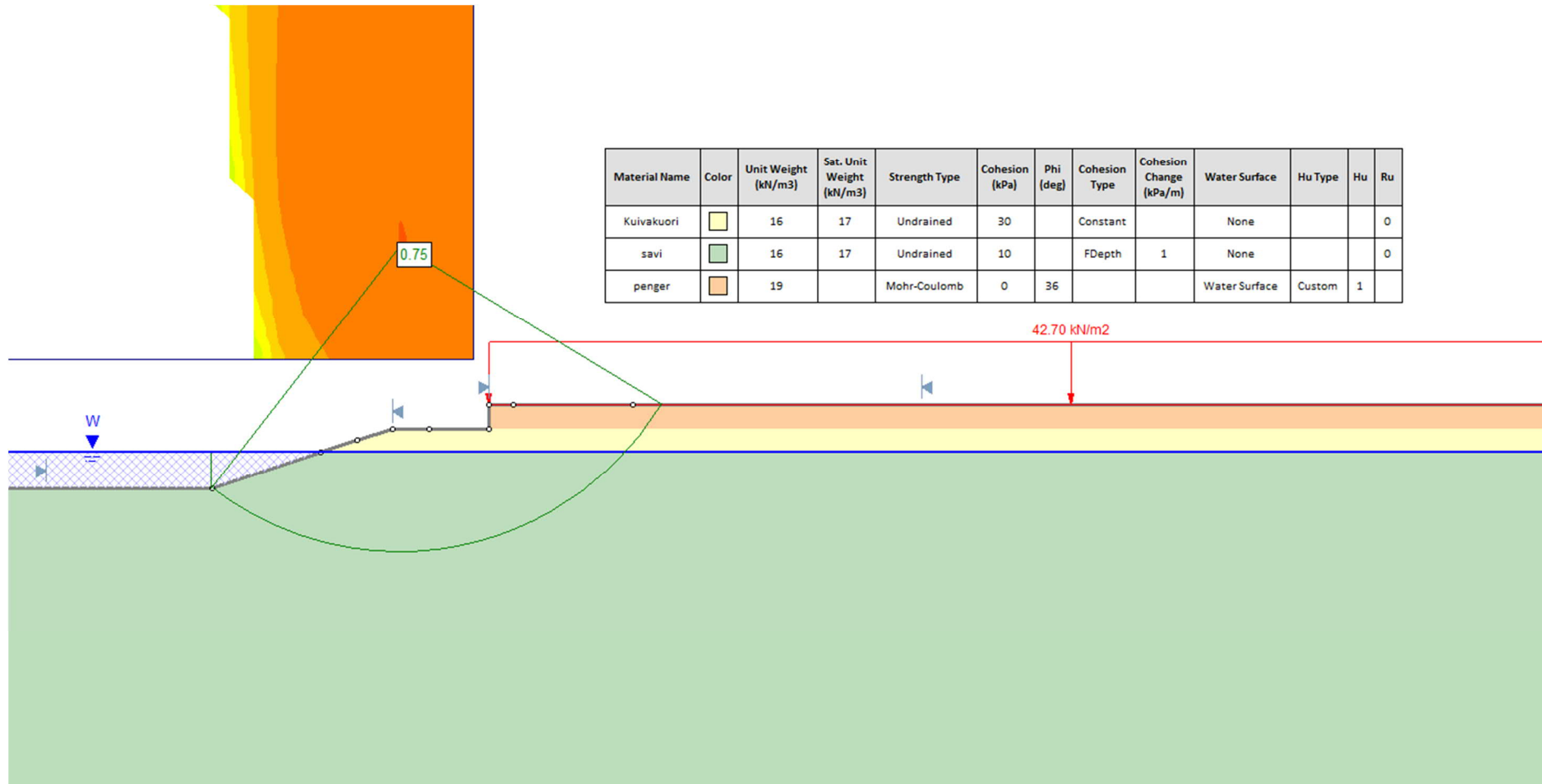
Stabiliateettilaskentatulosteet, alikulkukohde, yksiraiteinen ratapenger, pohjamaatyyppi 3. Liikennekuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine.



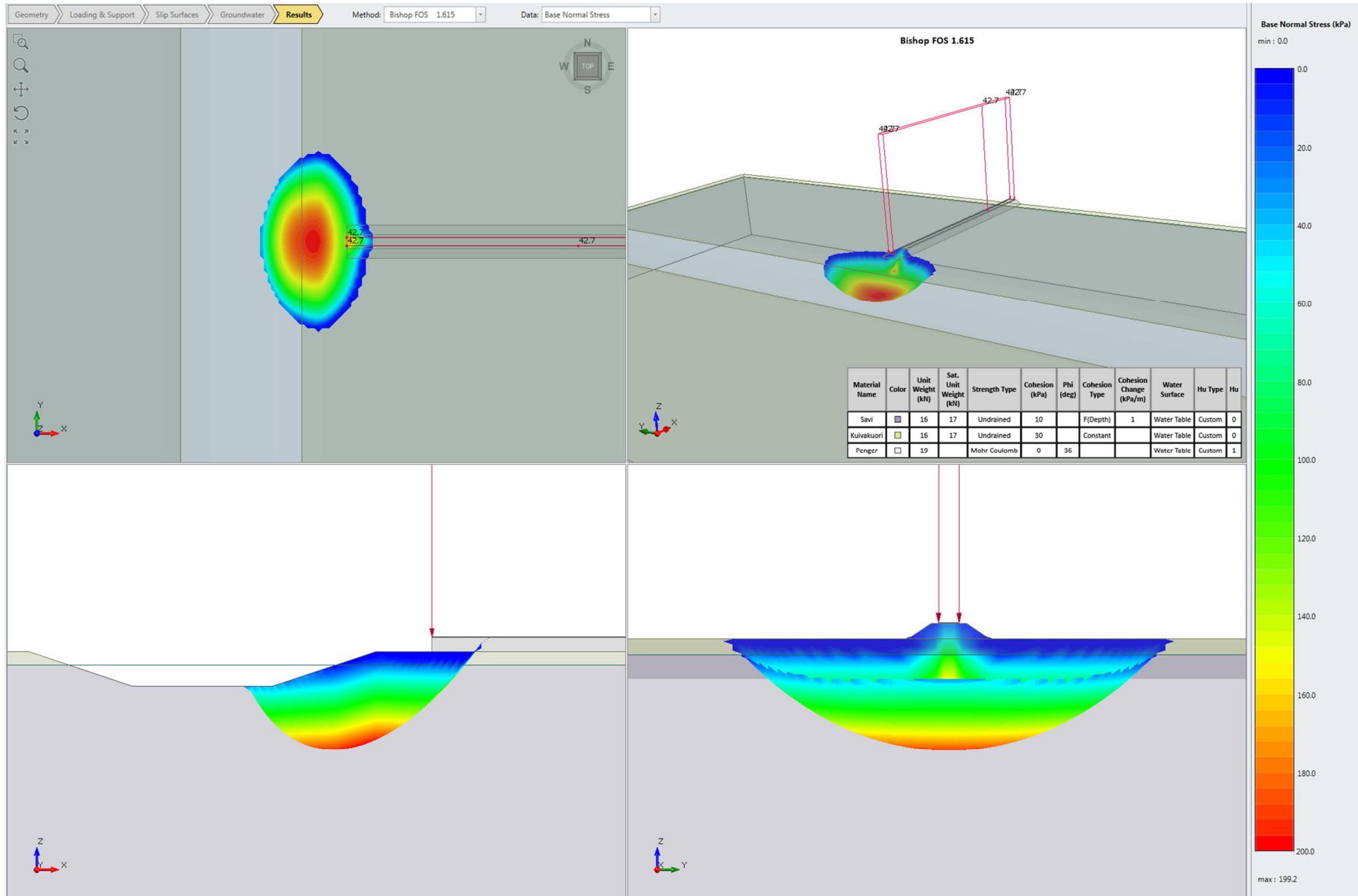
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



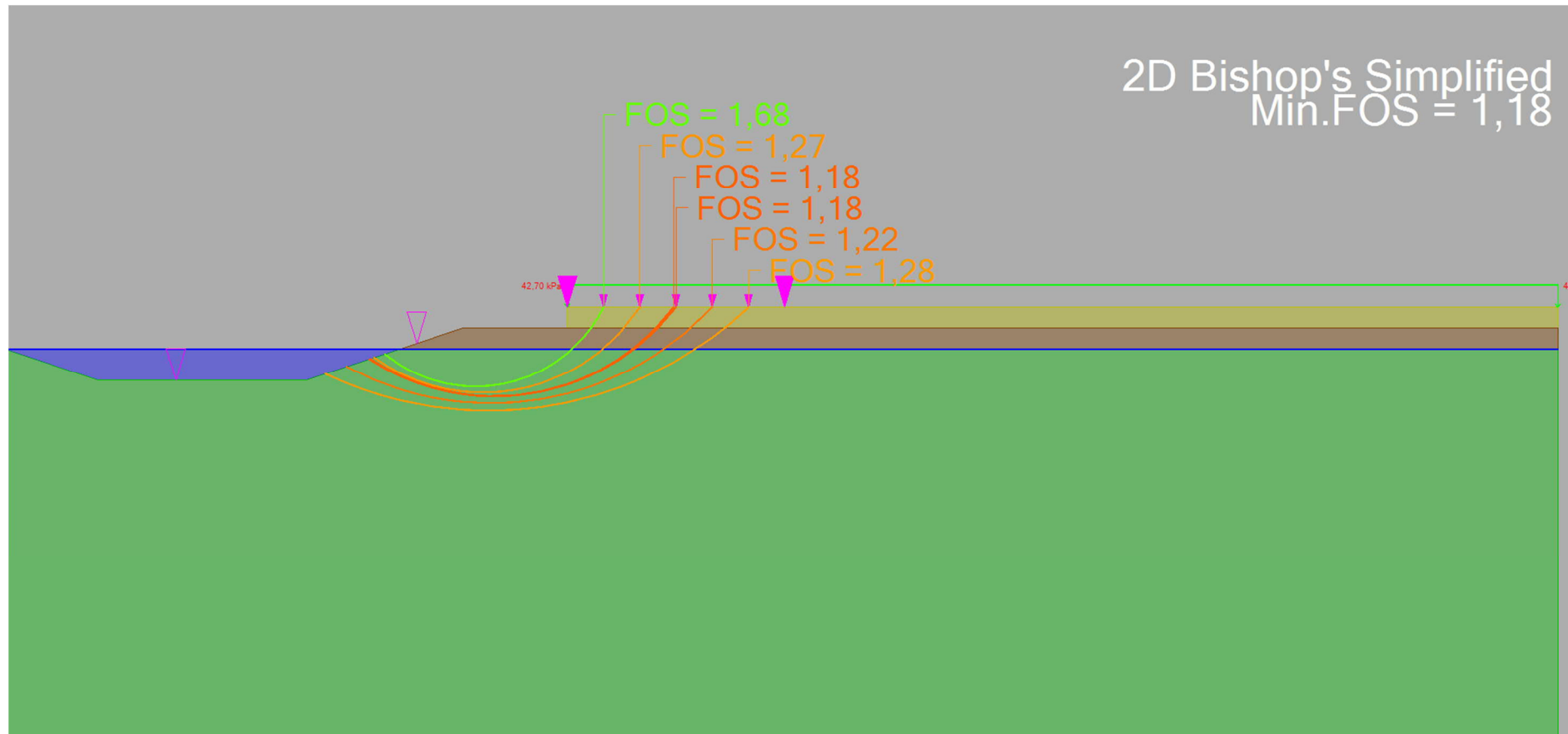
Liite 27. Stabiiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



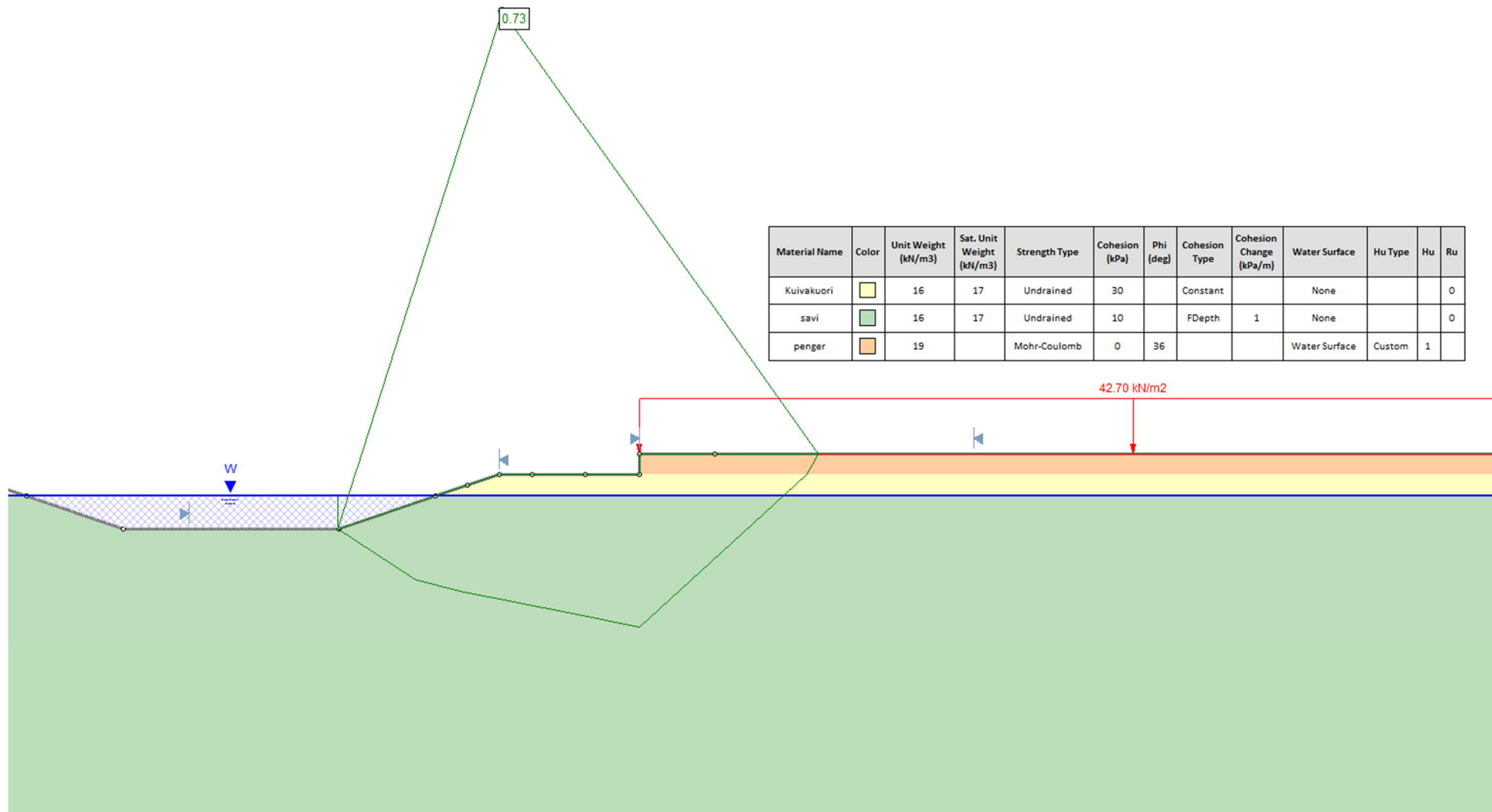
Liite 27. Stabiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



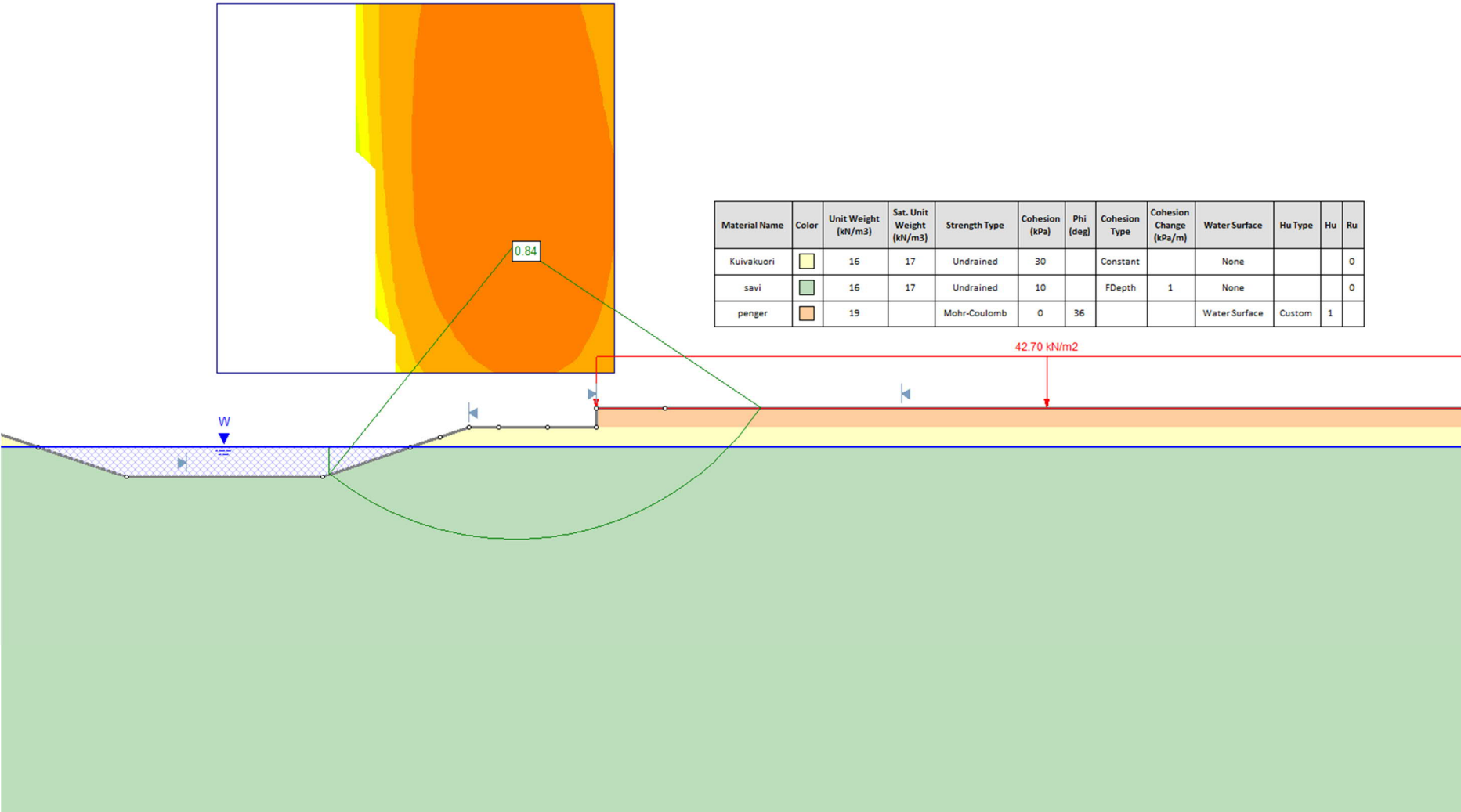
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



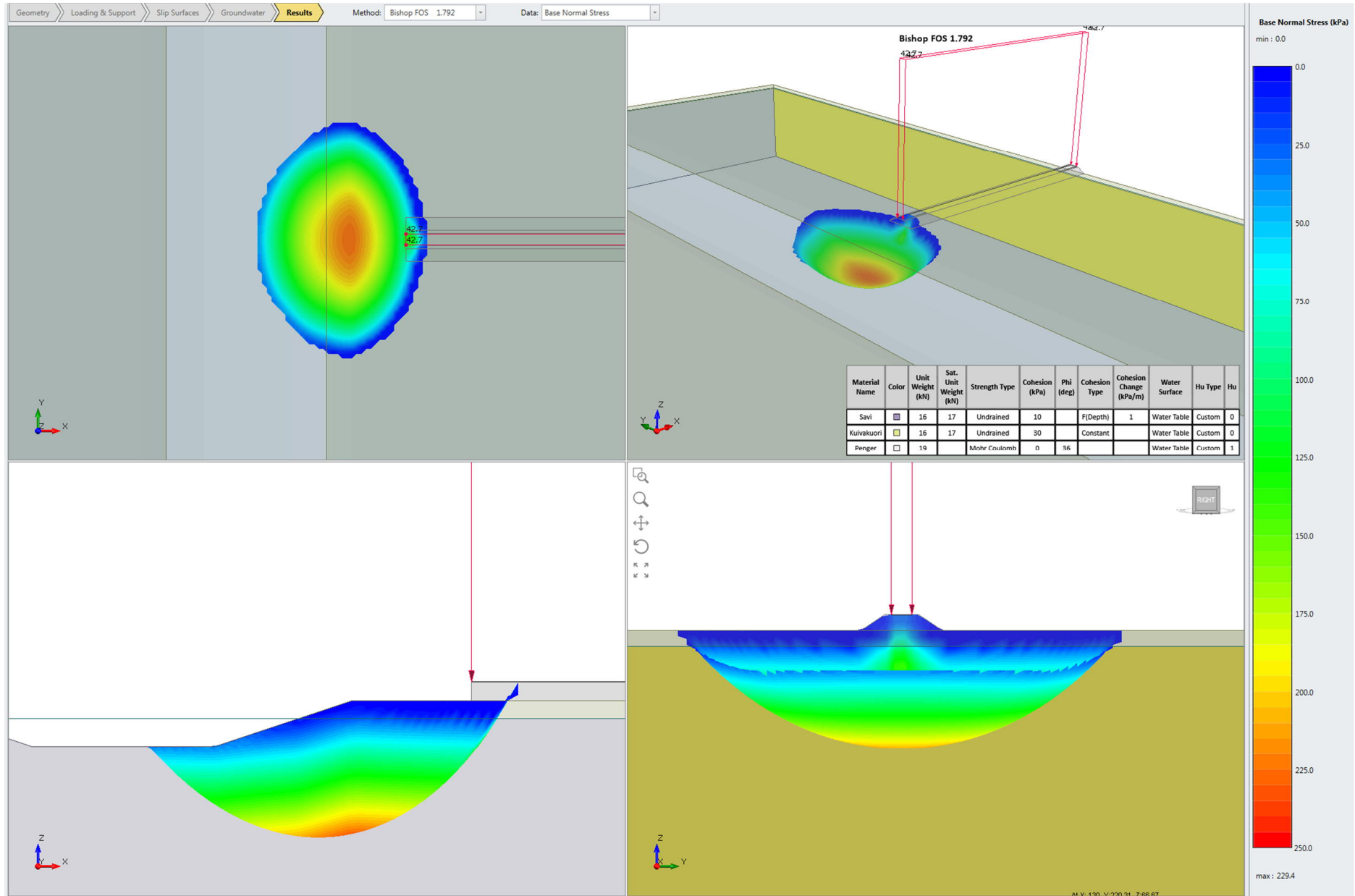
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



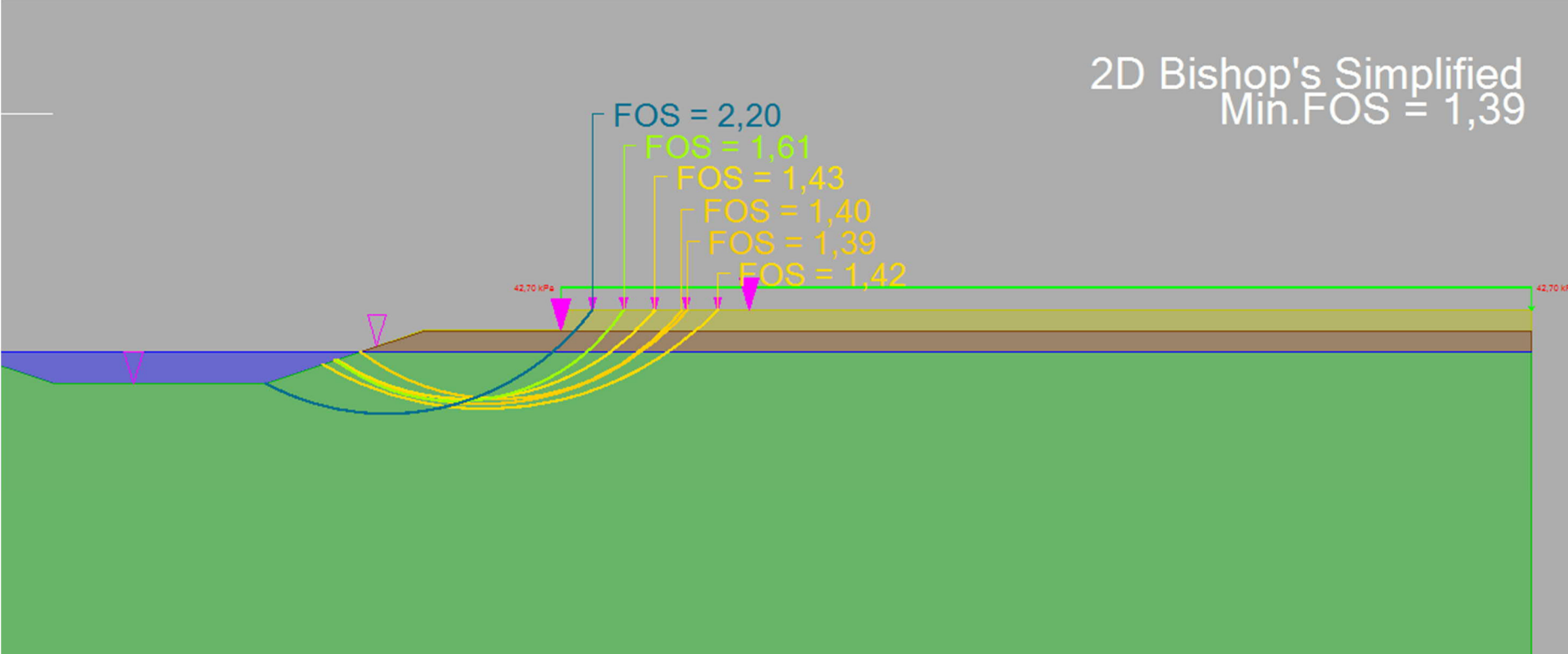
Liite 27. Stabiliateettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



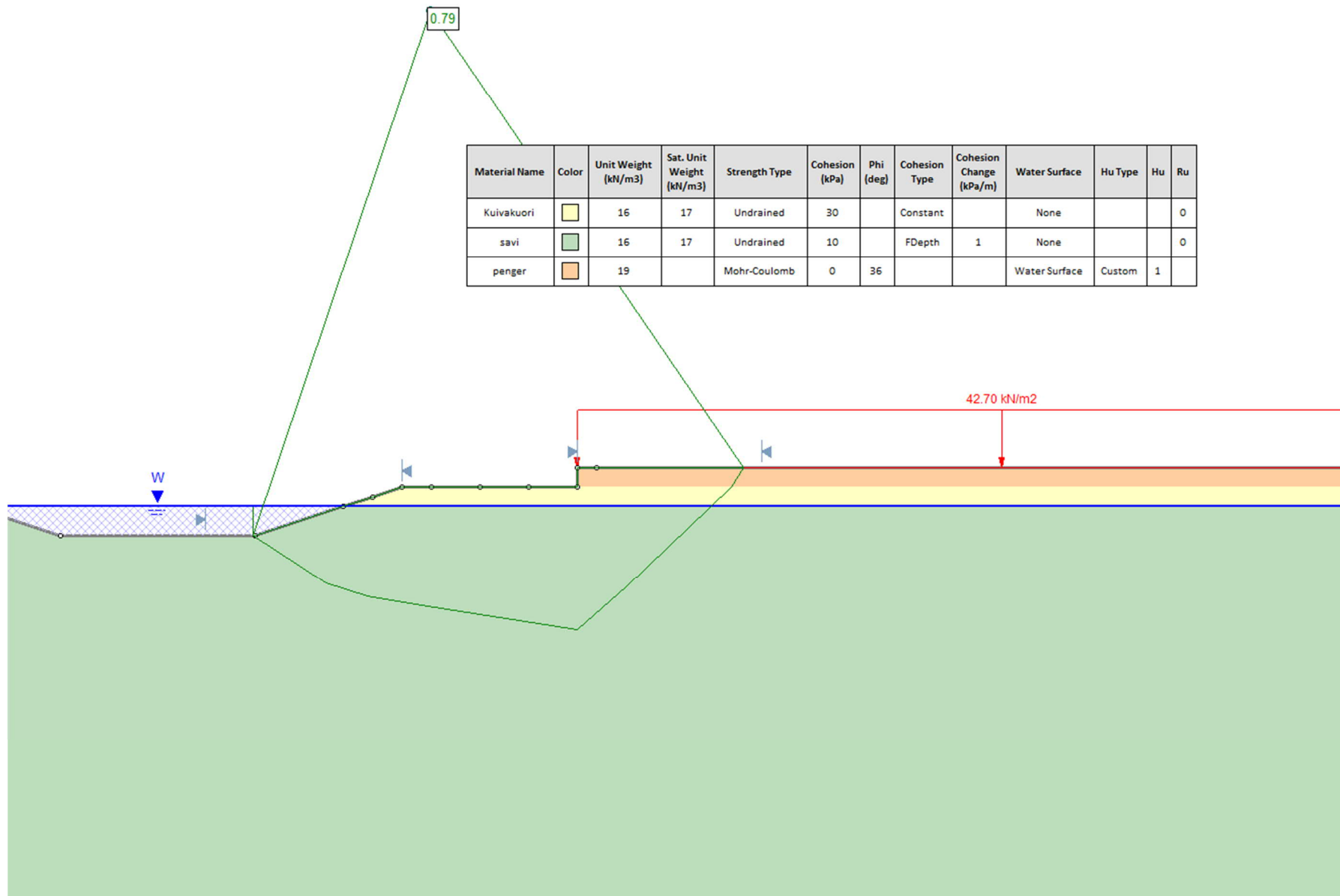
Liite 27. Stabiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



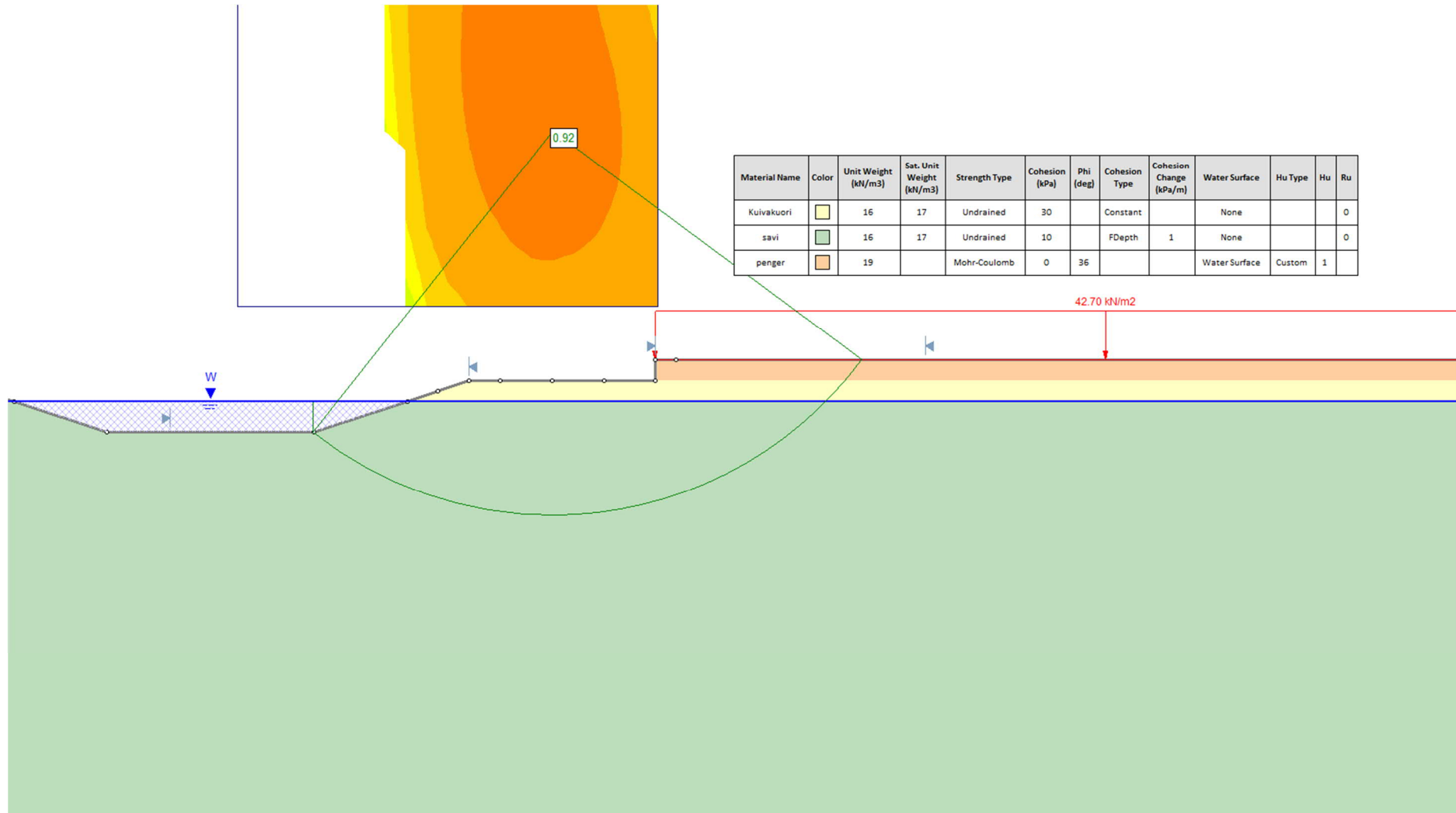
Liite 27. Stabiilitetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



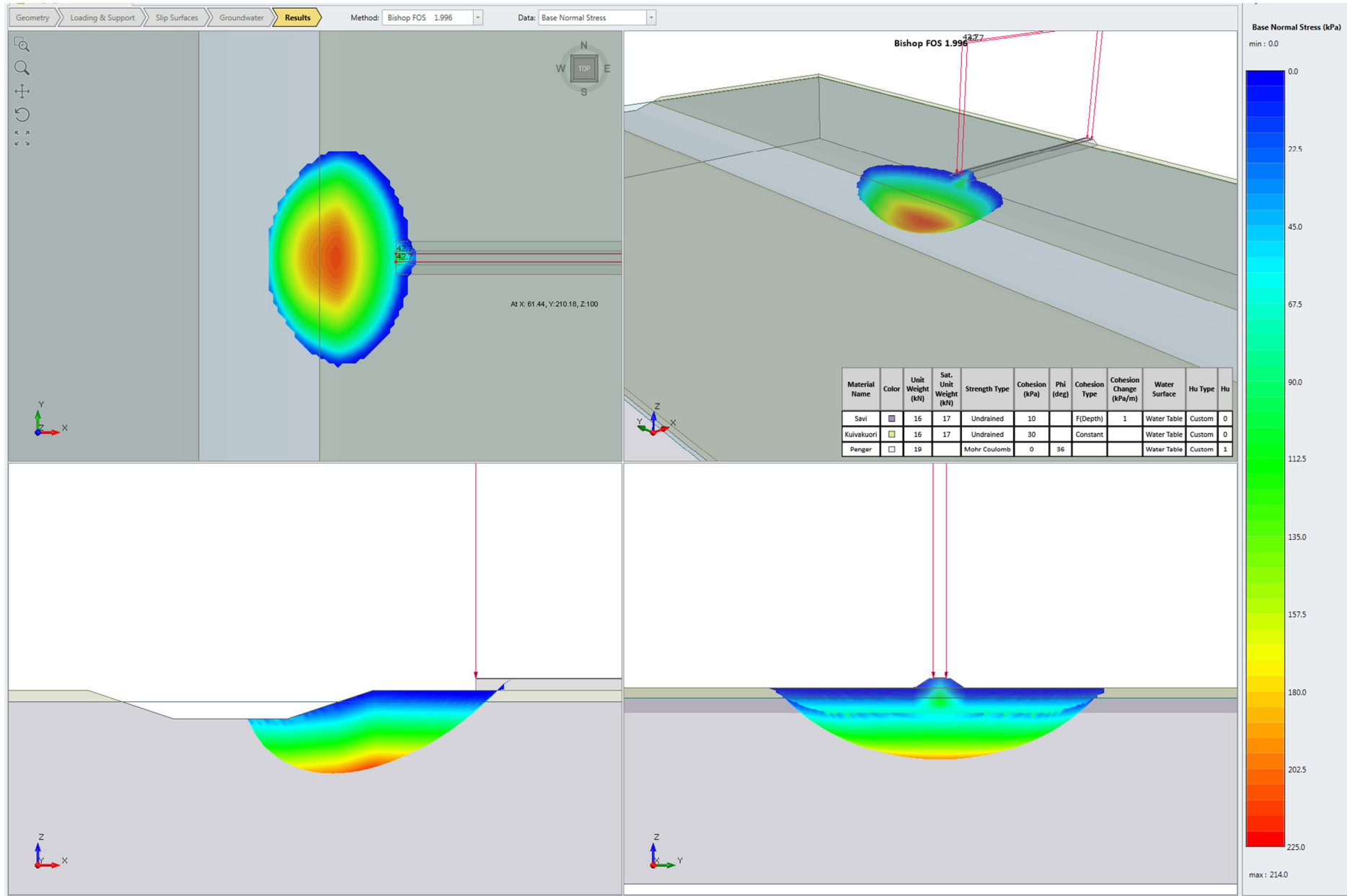
Liite 27. Stabiliateettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



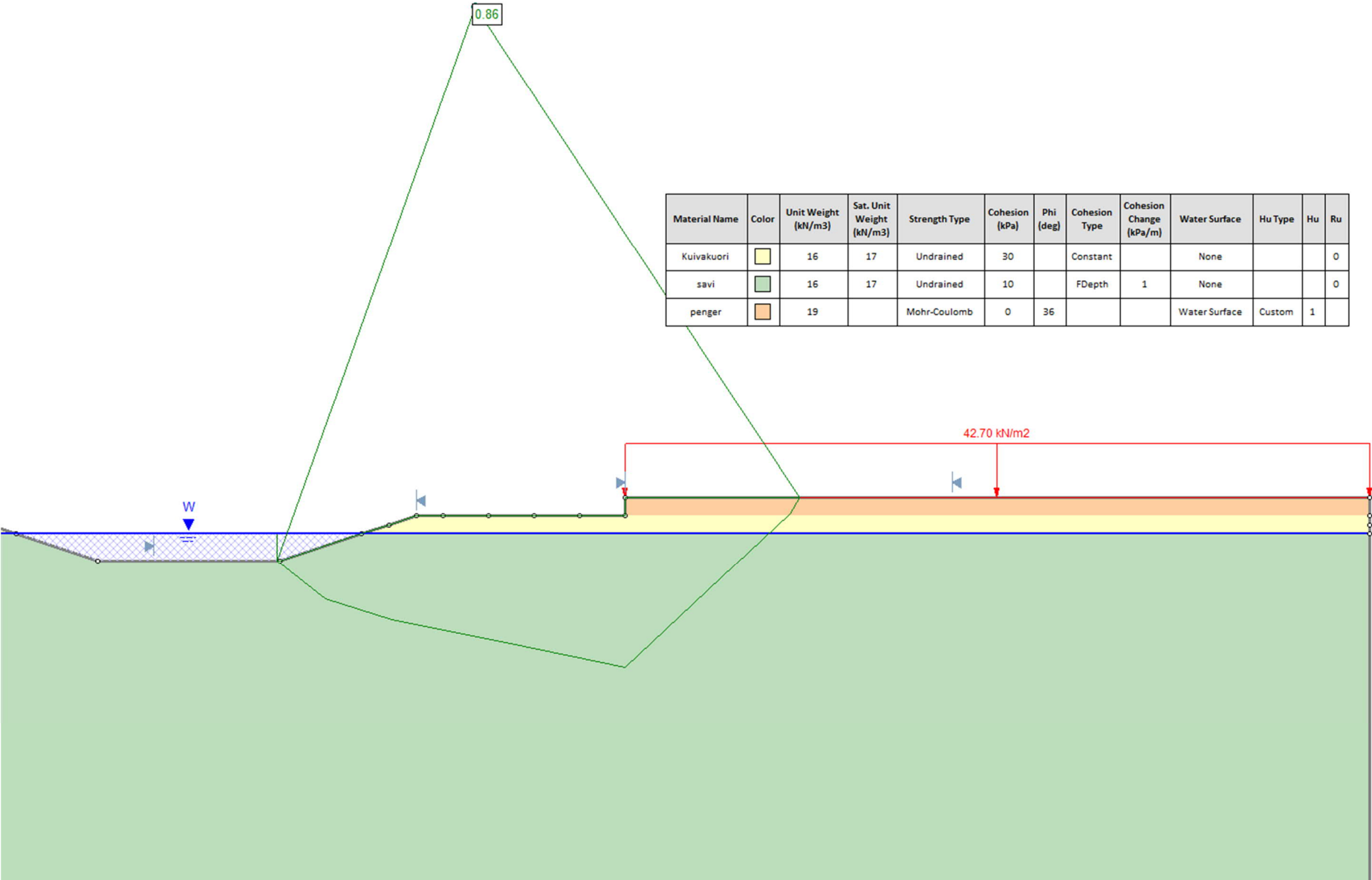
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



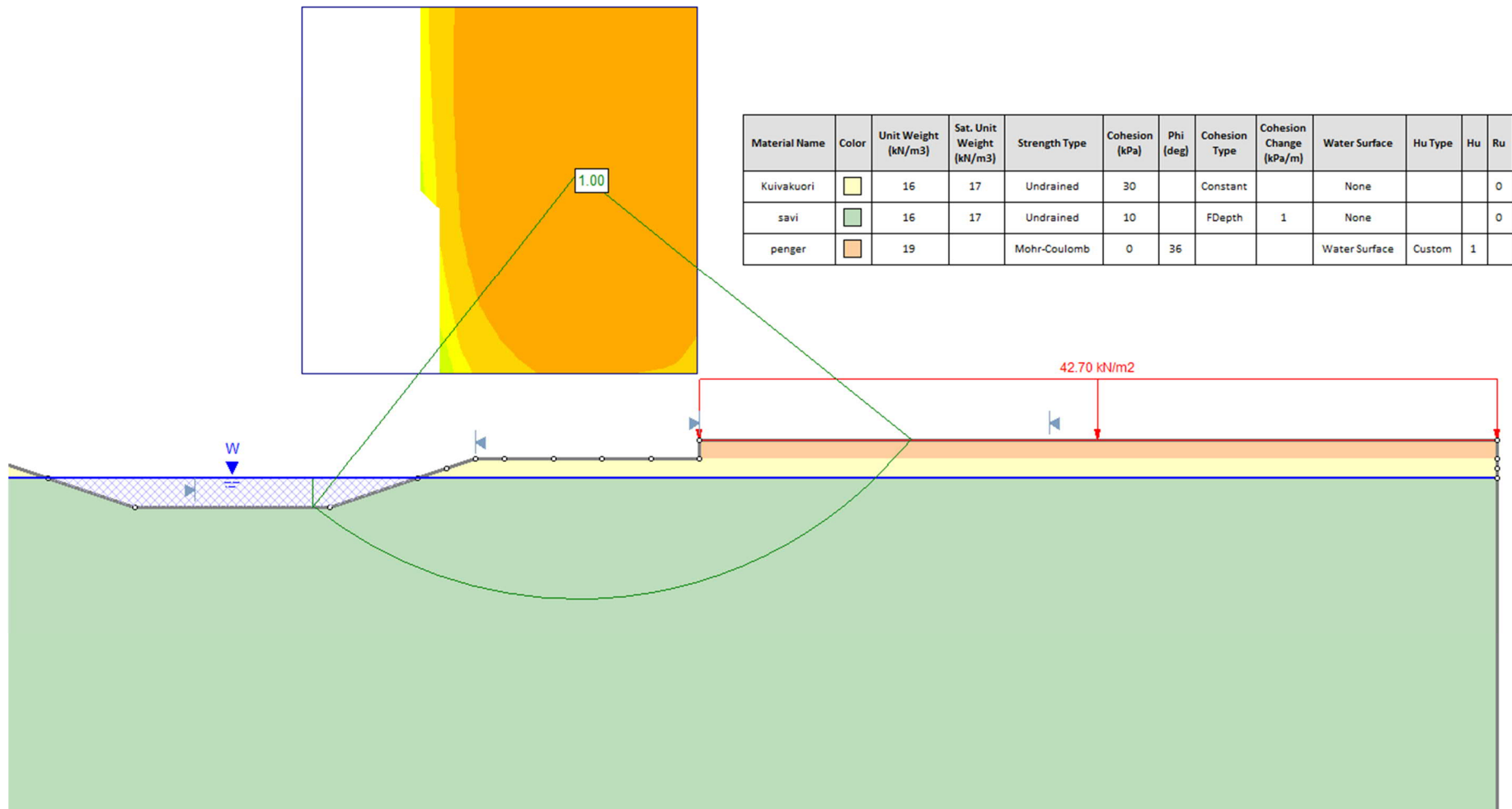
Liite 27. Stabiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



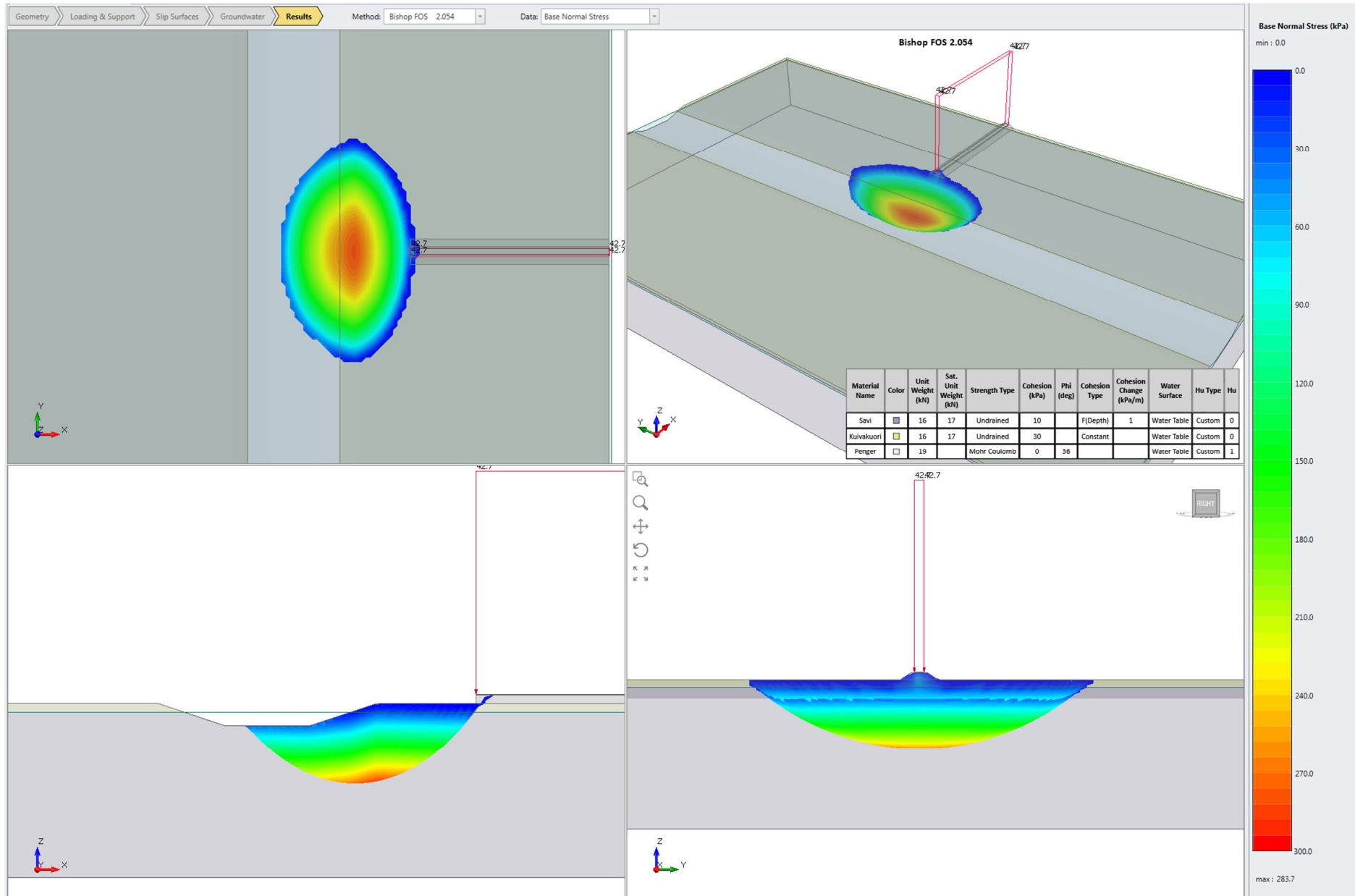
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



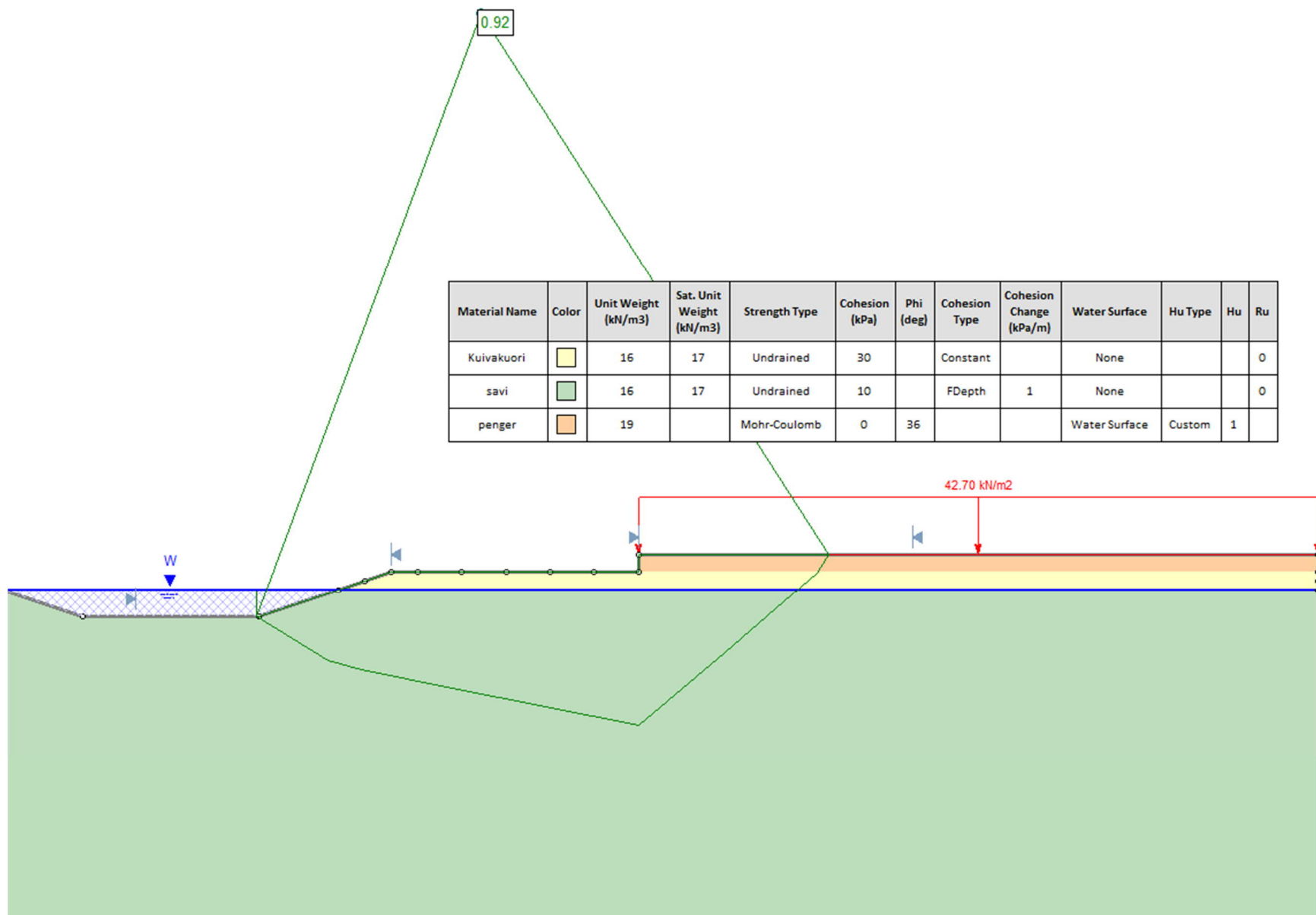
Liite 27. Stabiliateetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



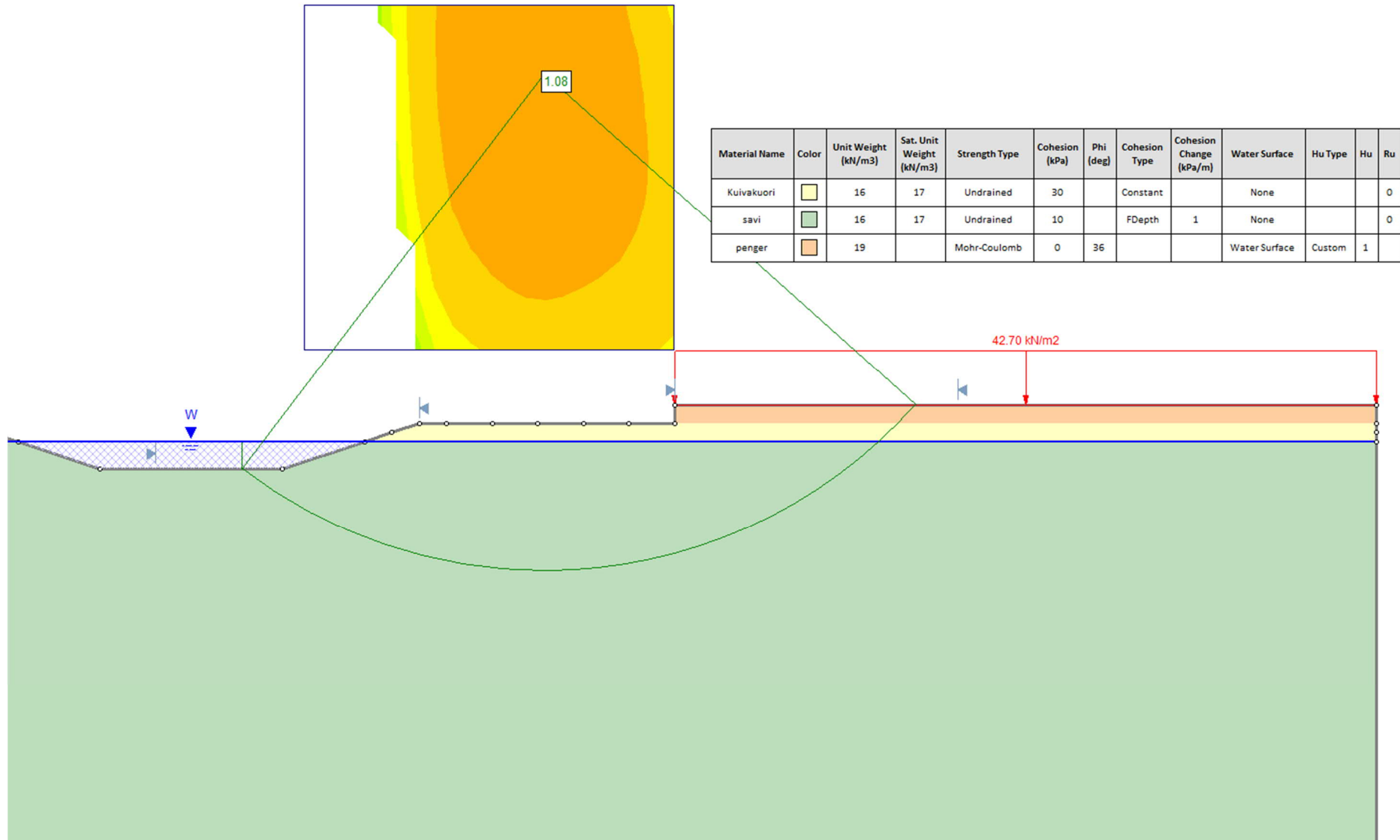
Liite 27. Stabiileettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



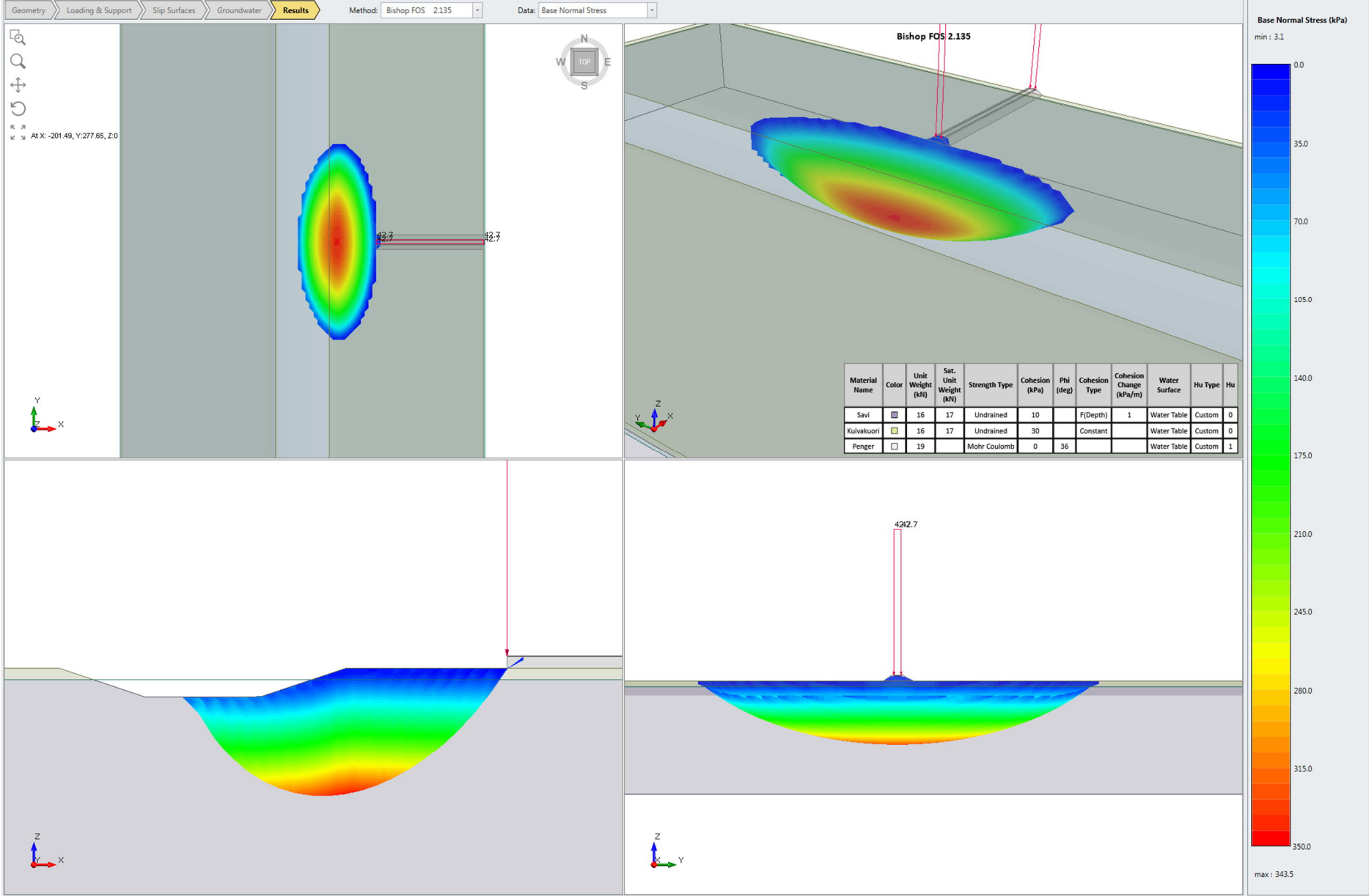
Liite 27. Stabiiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



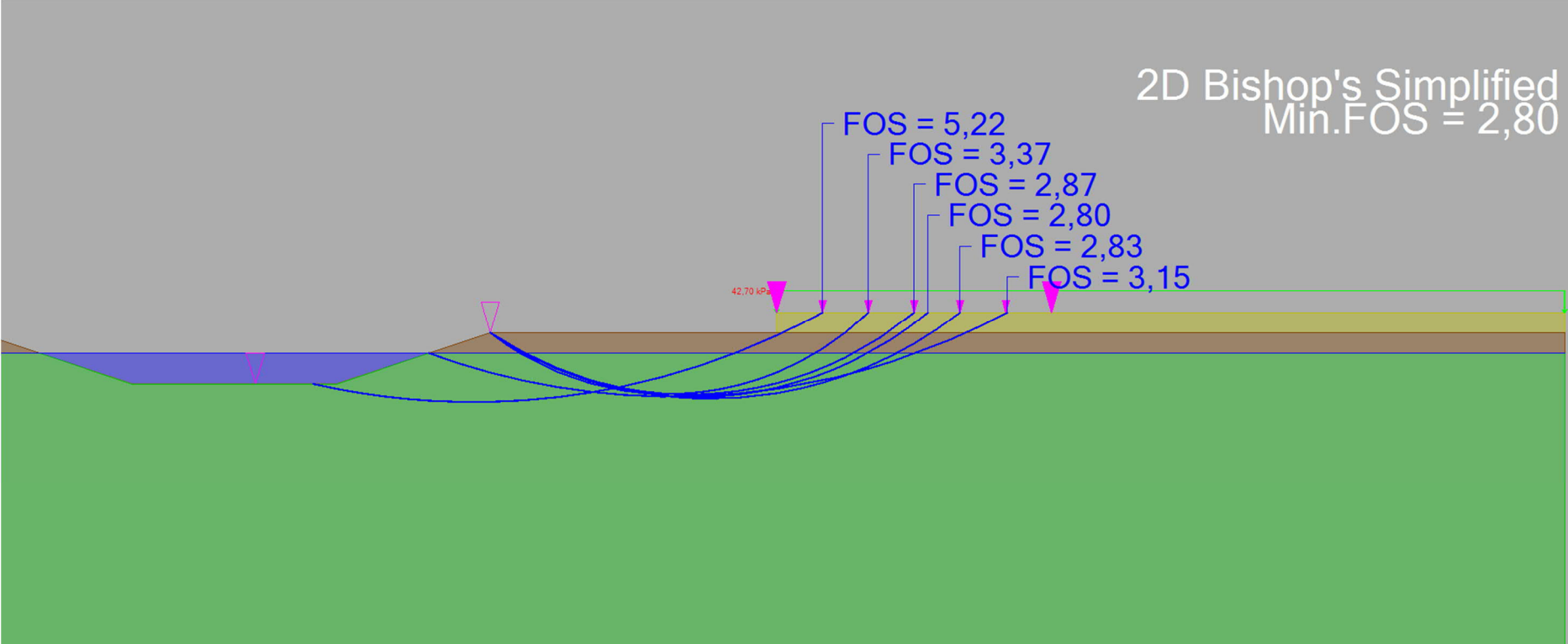
Liite 27. Stabiilettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



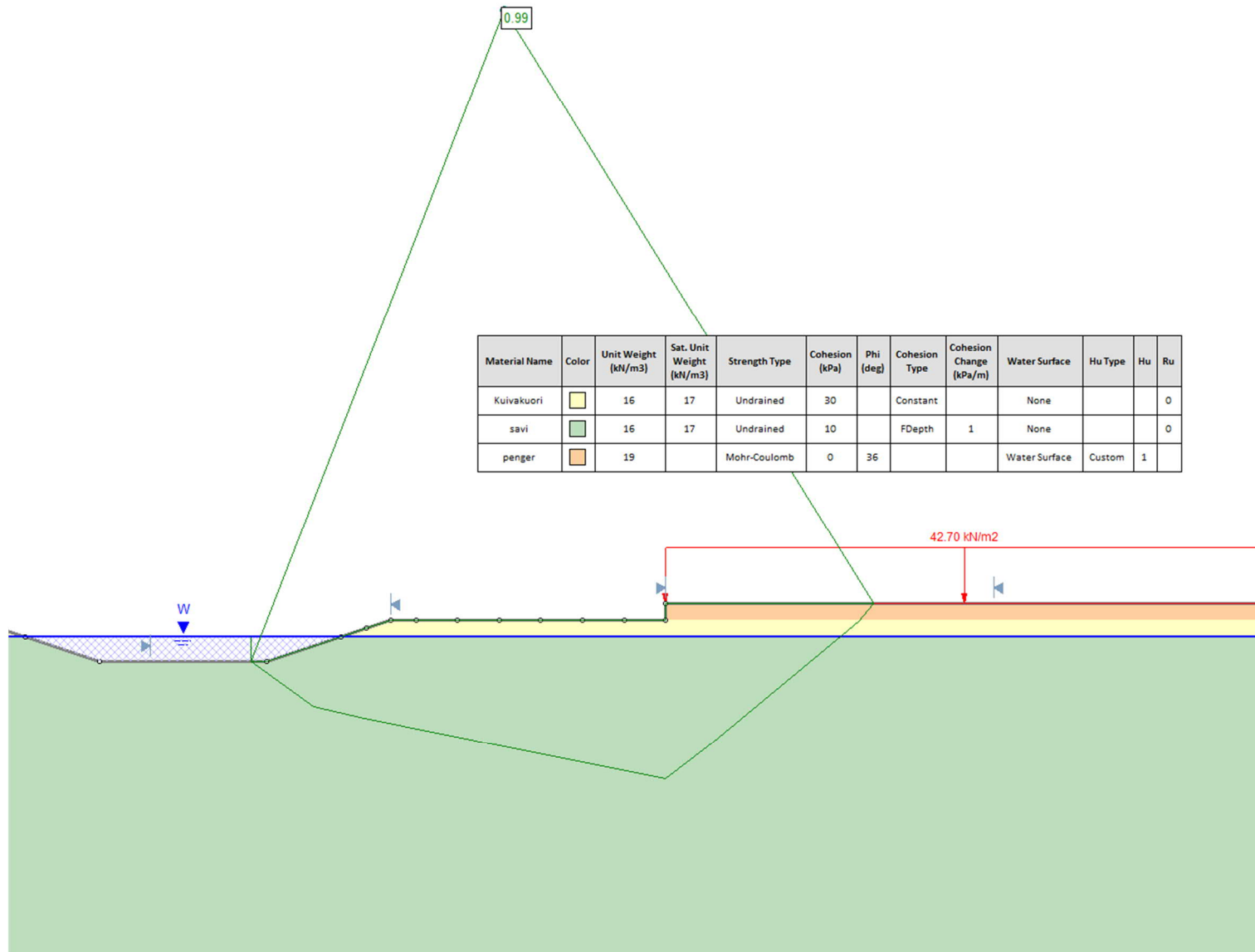
Liite 27. Stabiteettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



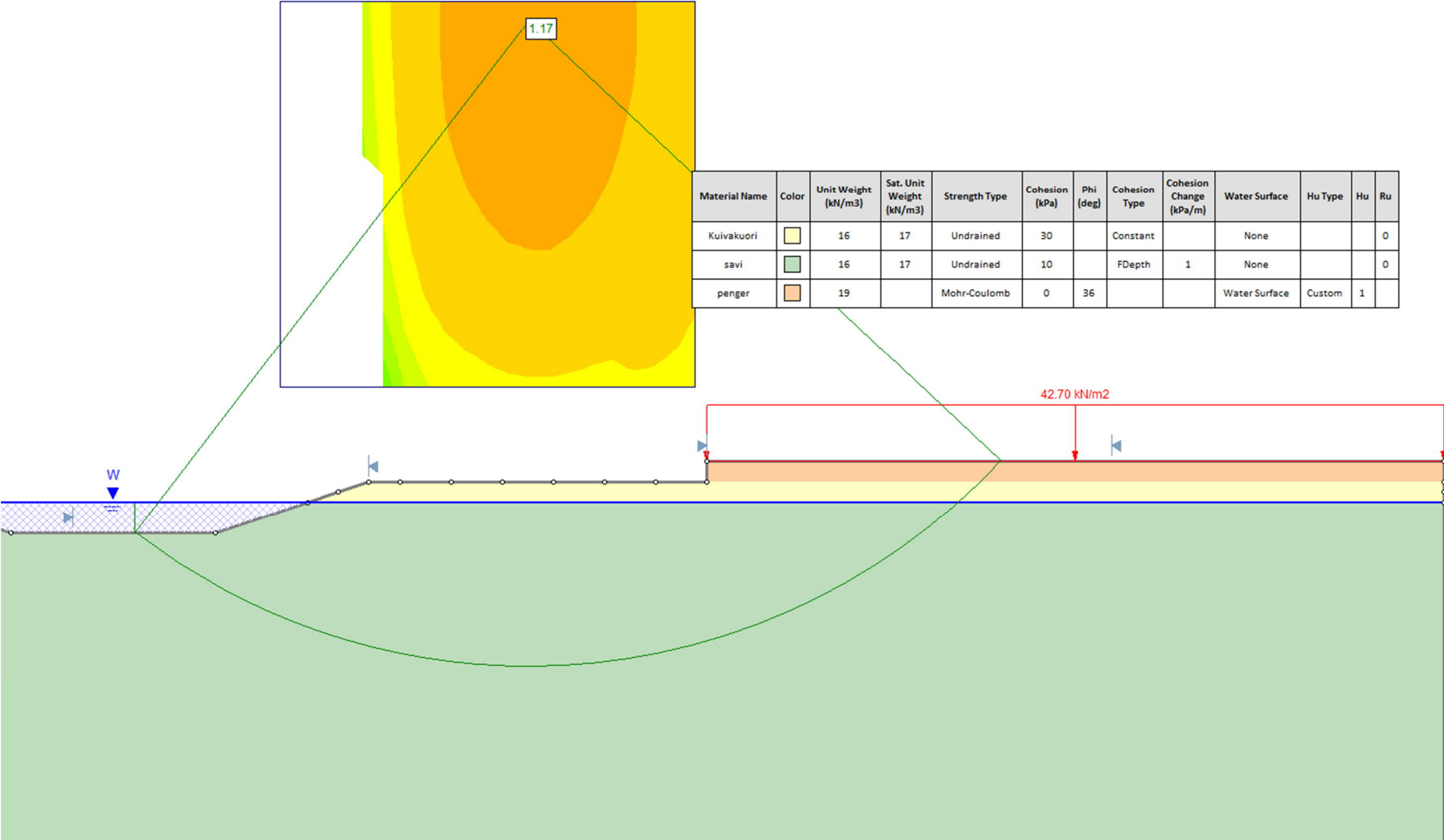
Liite 27. Stabiliateetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



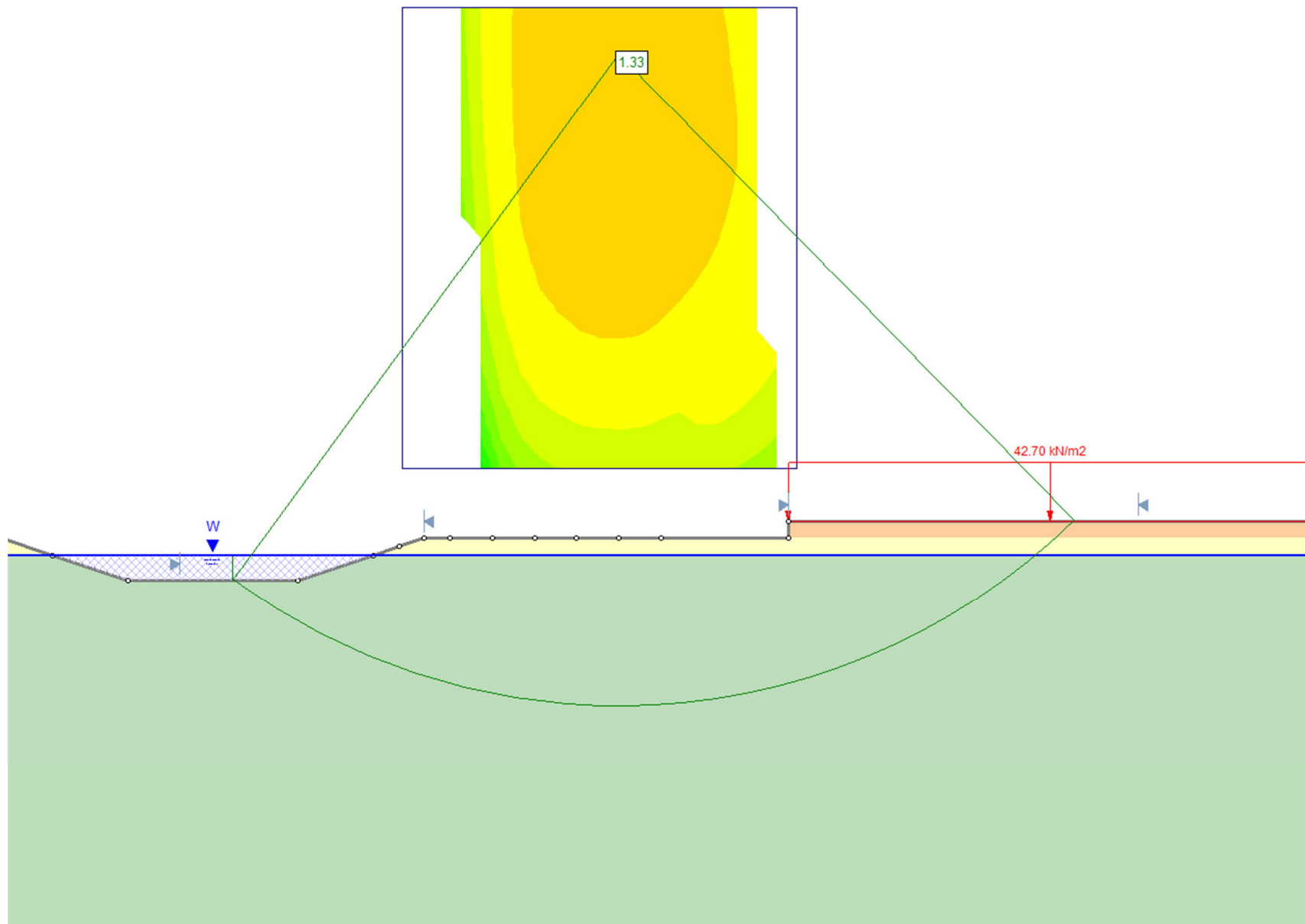
Liite 27. Stabiliateetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



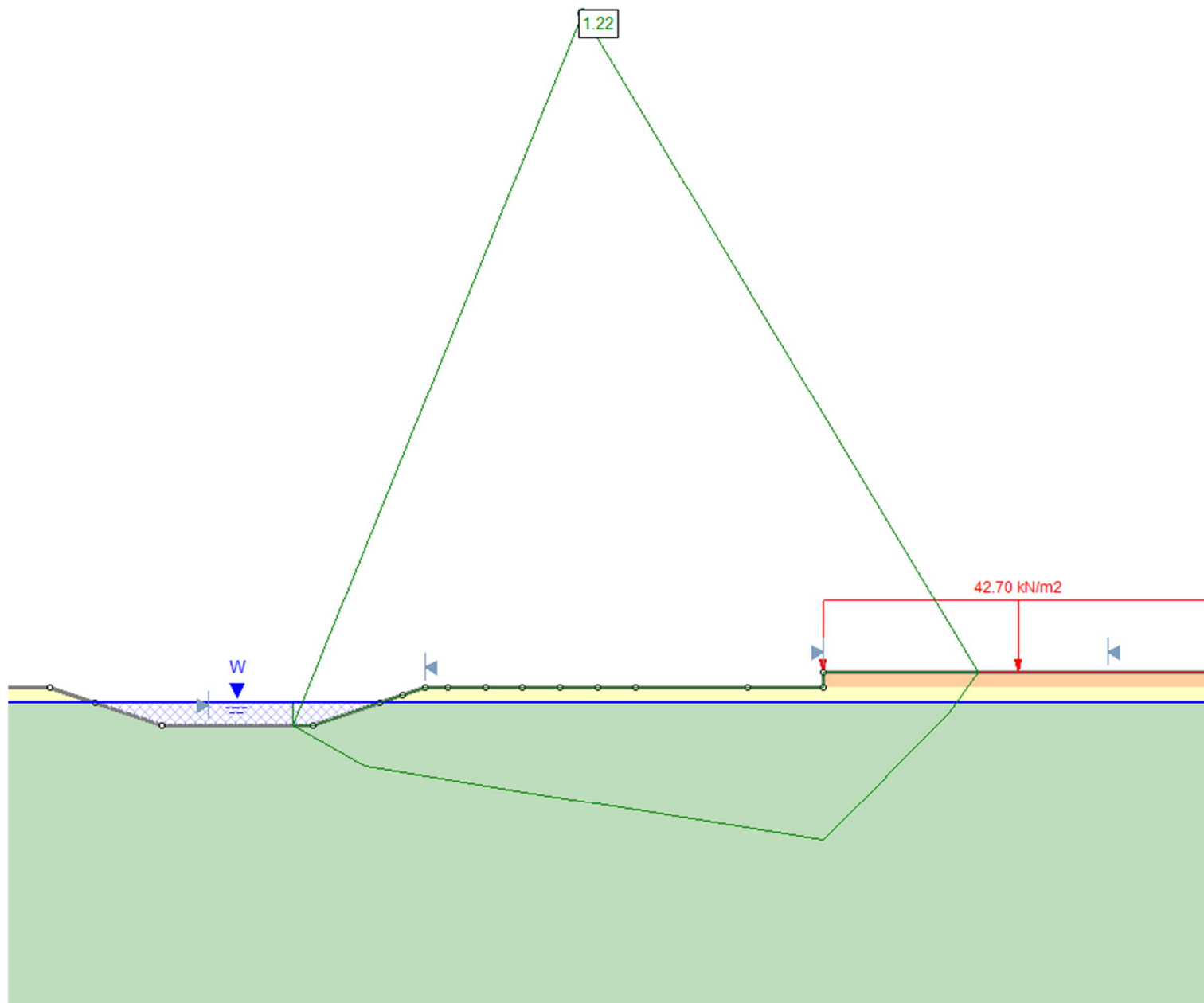
Liite 27. Stabiilettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



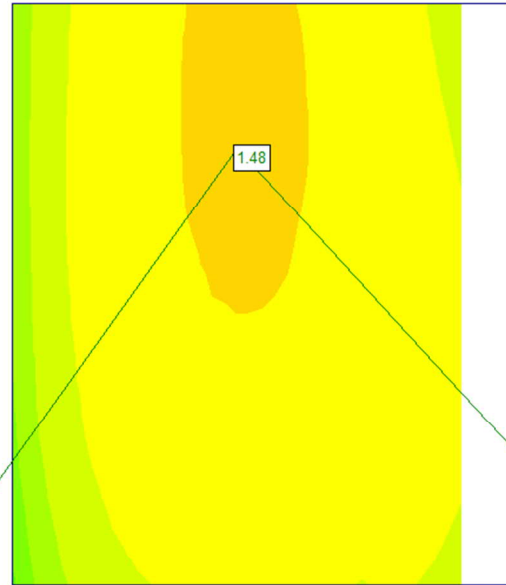
Liite 27. Stabiileittilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



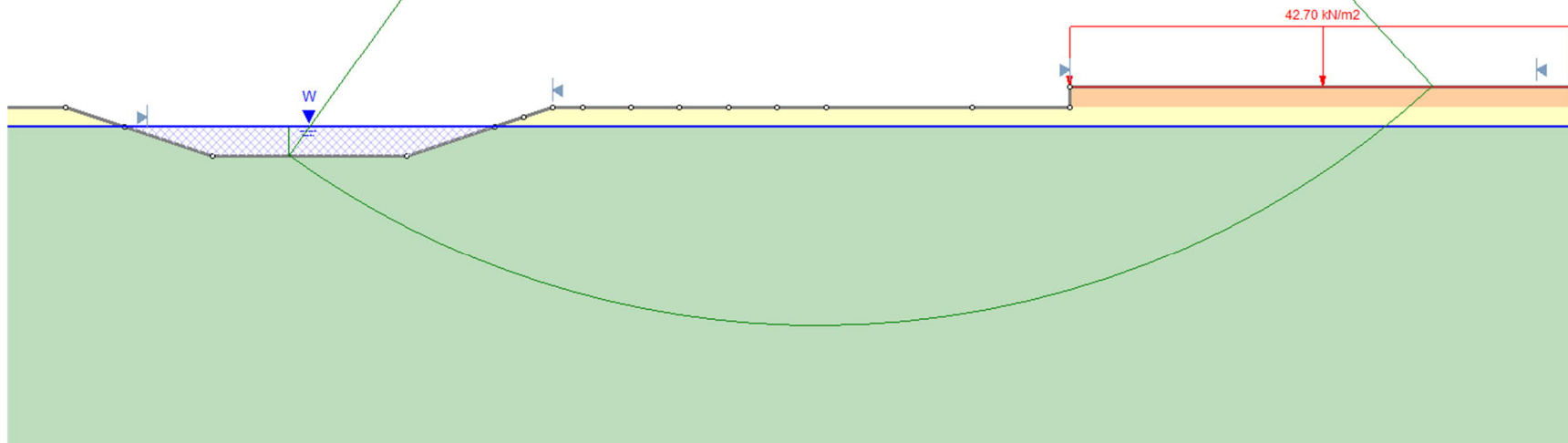
Liite 27. Stabiiteetilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



Liite 27. Stabiliateettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.






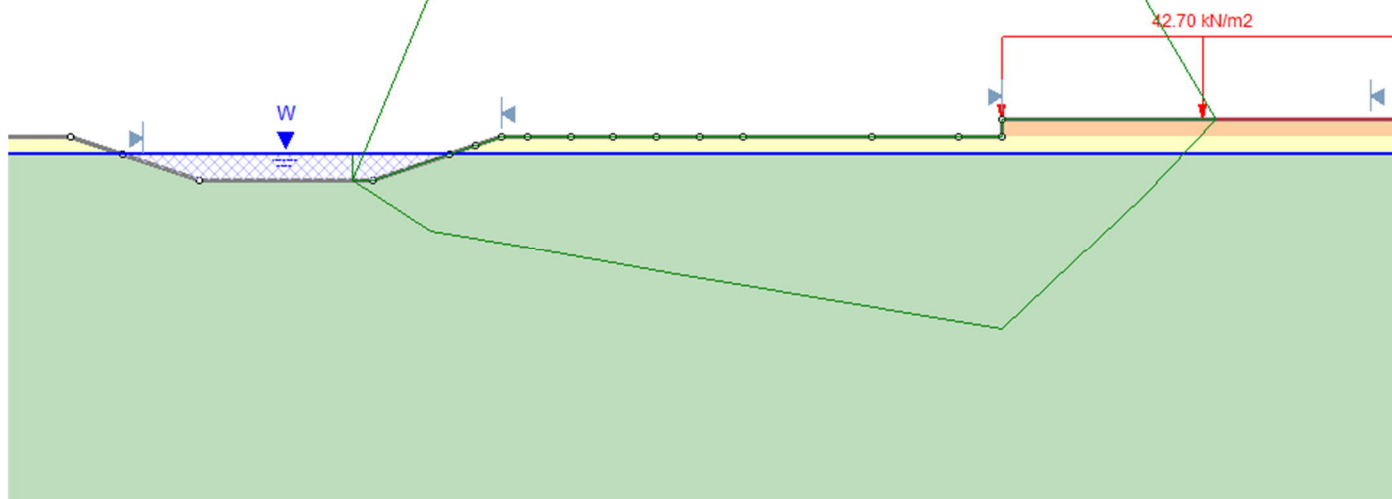
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori	Yellow	16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi	Green	16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger	Orange	19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



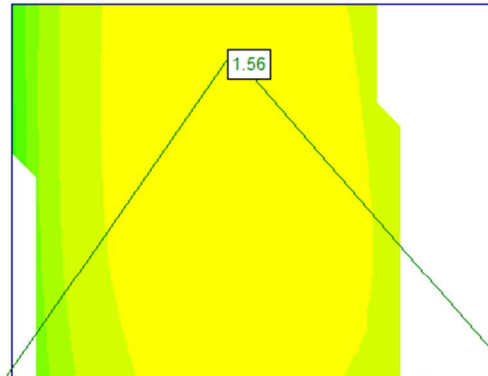
Liite 27. Stabiliateettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.




1.27

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	



Liite 27. Stabiliateettilaskentatulosteet, paalulaatan pituustarkastelu.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Sat. Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Cohesion Change (kPa/m)	Water Surface	Hu Type	Hu	Ru
Kuivakuori		16	17	Undrained	30		Constant		None			0
savi		16	17	Undrained	10		FDepth	1	None			0
penger		19		Mohr-Coulomb	0	36			Water Surface	Custom	1	

