21.1.2021

Kallioperän merkitys porapaalutuksen suunnitteluun

Esitelmä, Teräspaalupäivä 21.1.2021

KALLIOPERÄN MERKITYS PORAPAALUTUKSEN SUUNNITTELUUN

Porapaalurakenteiden suunnittelussa oletetaan kallioperän olevan rakenteeltaan ja laadultaan homogeeninen niin, että paalun kärjen alla ei tapahdu siirtymiä.

Kallioperän laatu, kallionpinnan muoto yms. vaihtelee. Tämän takia selvitettiin kallioperän vaikutusta porapaalutuksen suunnitteluun ja tarvittavia kallioperätutkimuksia eri tapauksissa.

Porapaalun kärjen alla mahdollisesti tapahtuviin kallioperän siirtymiin vaikuttavat mm. seuraavat tekijät:

- Kallionpinnan muoto
  - kaltevuus
  - portaittaisuus
- Kallioperän laatu
  - kivilaji
  - kallioperän rakenne ja kalliorakojen lukumäärä
- Kallioperän lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet
  - yksiaksiaalinen puristusmurtolujuus
    - yleensä 150 MPa … 250 Mpa
    - joissain tapauksissa 25 MPa … 150 Mpa
    - alhaisimmillaan noin 5 Mpa
  - taivutusvetolujuus
  - kimmomoduli
  - poissonin luku
- Kallioraot ja niiden ominaisuudet sekä kaltevuus
  - rakopintojen karkeus / liukkaus
  - rakotäytteet
  - rakopintojen leikkauslujuus
- Porapaalukuormat



Kairasydän, kalliolaatuluokka GSI 56.



Kairasydän, kalliolaatuluokka GSI 40.



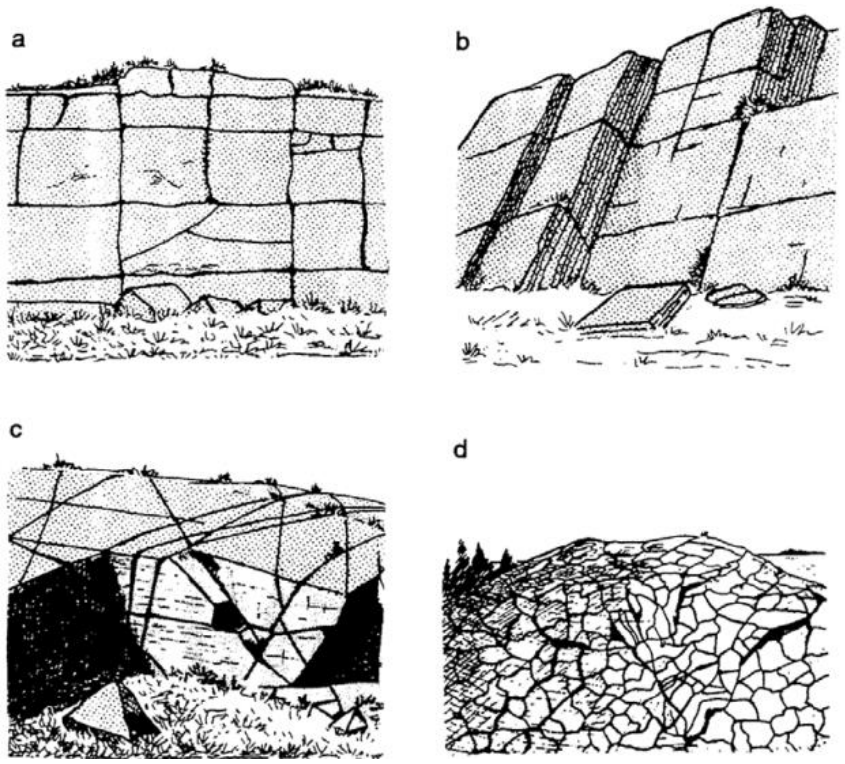
Kairasydän, kalliolaatuluokka GSI 33.



Kairasydän, kalliolaatuluokka GSI alle 23.

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

KALLIOPERÄN MERKITYS PORAPAALUTUKSEN SUUNNITTELUUN



Kallion eri rakoilutyyppejä

a : kuutiorakoilu b : laattarakoilu

c : kiilarakoilu d : sekarakoilu

Porapaalukohteissa kallioperää on tutkittu yleensä porakonekairauksilla, jolloin on saatu tieto kallionpinnan korkeusasemasta. Kallioperän laatua on voitu yleispiirteisesti päätellä porakonekairausten aika-painuma- havainnoista.

Alla on esitetty kallionpinnan muodon, korkeusaseman ja kalliolaadun selvittämiseksi tehtäviä tutkimuksia ja selvitettäviä ominaisuuksia.

- Kallionpinnan muoto ja korkeusasema
  - Porakonekairaukset
  - Kevyet kairaukset => viitteellistä tietoa kallionpinnan ylimmästä mahdollisesta tasosta
  - Tutkimuspisteiden väliset etäisyydet, tutkimusmäärät
  - Kallionpinnan muodon tulkinta
- Kallioperän laatu
  - Yleispiirteinen kalliolaatu
  - Q-luokituksen parametrit
  - Kalliorakojen ominaisuudet
  - Kallioperän lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet
  - Tutkimusmäärät
  - Porakonekairausten aika-painuma –havainnot, hyvin viitteellistä tietoa
  - Vesimenekkikokeet porakonekairausreiässä, hyvin viitteellistä tietoa
  - Porakonekairausreiän videokuvaus
  - Kallionäytekairaus
  - Kairaamalla irrotettujen kallionäytteiden laboratoriokokeet

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

KALLIORAKOJEN OMINAISUUKSIEN VAIKUTUS SIIRTYMIIN

Kun kalliomassassa on vain muutama rako, ohjaa kalliomassan käyttäytymistä nämä yksittäiset raot. Näissä tapauksissa rakojen sijainnit, suunnat, kaltevuudet yms. sekä ehjän kallioperän ominaisuudet tulee selvittää tarkkaan. Kalliolaatu koostuu näissä tapauksissa kalliorakojen ominaisuuksista ja ehjän kallioperän ominaisuuksista.

Ehjän kallion ja yksittäisten rakojen kalliomekaanisia tarkasteluja tehtiin neljällä eri kallioraon kaateella ja kolmella eri rakotyypillä, joita yleisesti esiintyy Suomen kallioperässä. Käytetyt kaateet olivat 20°, 30°, 45° ja 60°. Laskelmissa käytettyjen rakotyyppien ominaisuudet on esitetty oheisessa taulukossa, kuvaukset perustuvat Q-luokitukseen (www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system).

Rakotyyppi	Kuorma (MPa)	Rakokulma (⁰)/siirtymä (mm)			
		20⁰	30⁰	45⁰	60⁰
1	1	0.03	0.037	0.9	2.5
	5	0.2	0.2	5	>16
	10	0.4	0.4	9	>46
2	1	0.07	0.6	2	4.6
	5	0.4	3	16	>34
	10	0.8	7	40	>256
3	1	0.5	1	2.5	6
	5	3.3	>13	>24	>53
	10	8	>88	>190	>430

	< 1 mm
	1…5 mm
	> 5 mm
	Ei tasapainoa

Laskentatapaukset ja siirtymät, porapaalu D711, eri värein esitetty siirtymien suuruus.

Rakotyyppi	Kuvaus: Jr/ Ja	kitkakulma (°)	koheesio (MPa)
1	Karkea, aaltoileva/ muuttumaton, vain pinnan muuttuneisuutta.	35	0.1
2	Karkea, epäsäännollinen, tasomainen/ ohut silttinen tai hiekkainen täyte.	25	0.05
3	Haarniskapintainen, tasomainen/ savi-, kloriitti- tai grafiittitäyte	15	0

Laskennoissa käytetyt rakotyypit ja niiden ominaisuudet.

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

KALLIOPERÄN HUOMIOINTI PORAPAALUTUKSEN SUUNNITTELUSSA

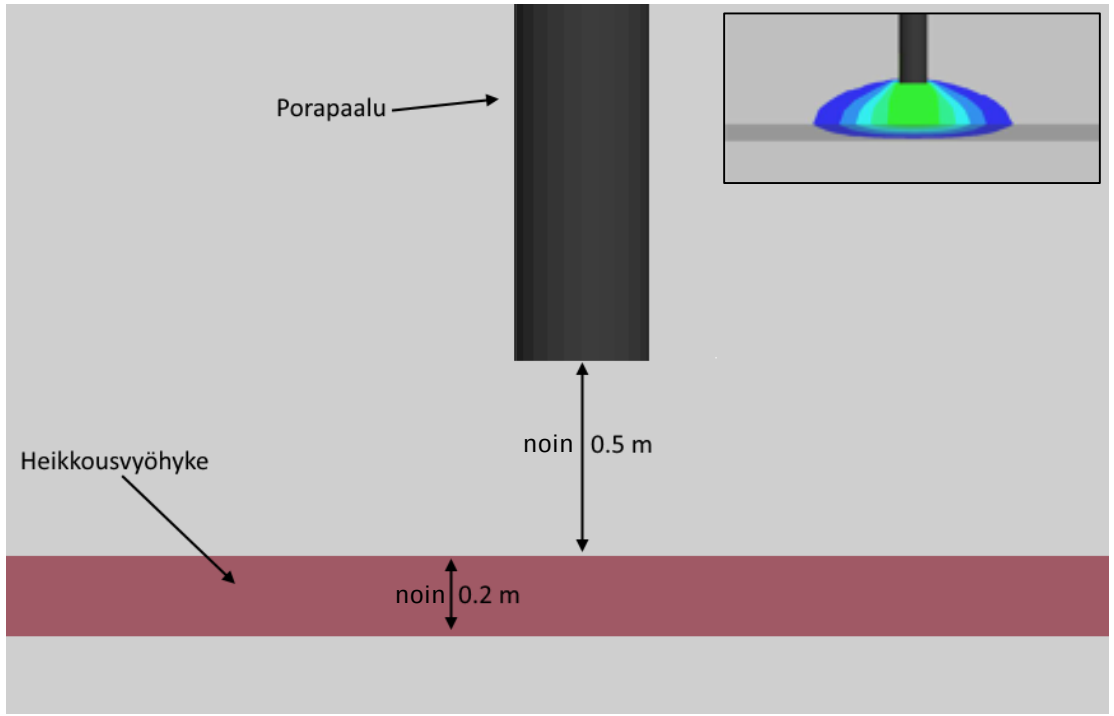
Kalliomekaanisia simulointeja tehtiin porapaaluille, joiden halkaisija D oli 323 mm, 711 mm ja 1220 mm. Tämän oppaan taulukot pätevät niissä esitetyn paalukoon 711 lisäksi myös muille porapaaluille, kun otetaan huomioon paalun halkaisijan vaikutus rasituksiin.

Paalukuormien kasvaessa todennäköisyys kallioperän siirtymille kasvaa. Porapaalujen alapuolisen kallionpinnan ollessa muodoltaan vaaka-asentoinen…loiva, todennäköisyys siirtymille on pienempi. Porapaalujen sijaitessa kalliojyrkänteen reunalla, riskit siirtymille ovat merkittävämmät ja niihin vaikuttaa lisäksi jyrkänteen vieressä olevien maakerrosten ominaisuudet.

Kalliolaadulla sekä kallioperän lujuus- ja muodonmuutos-ominaisuuksilla on merkitystä porapaalujen alapuolisen kallioperän siirtymille.

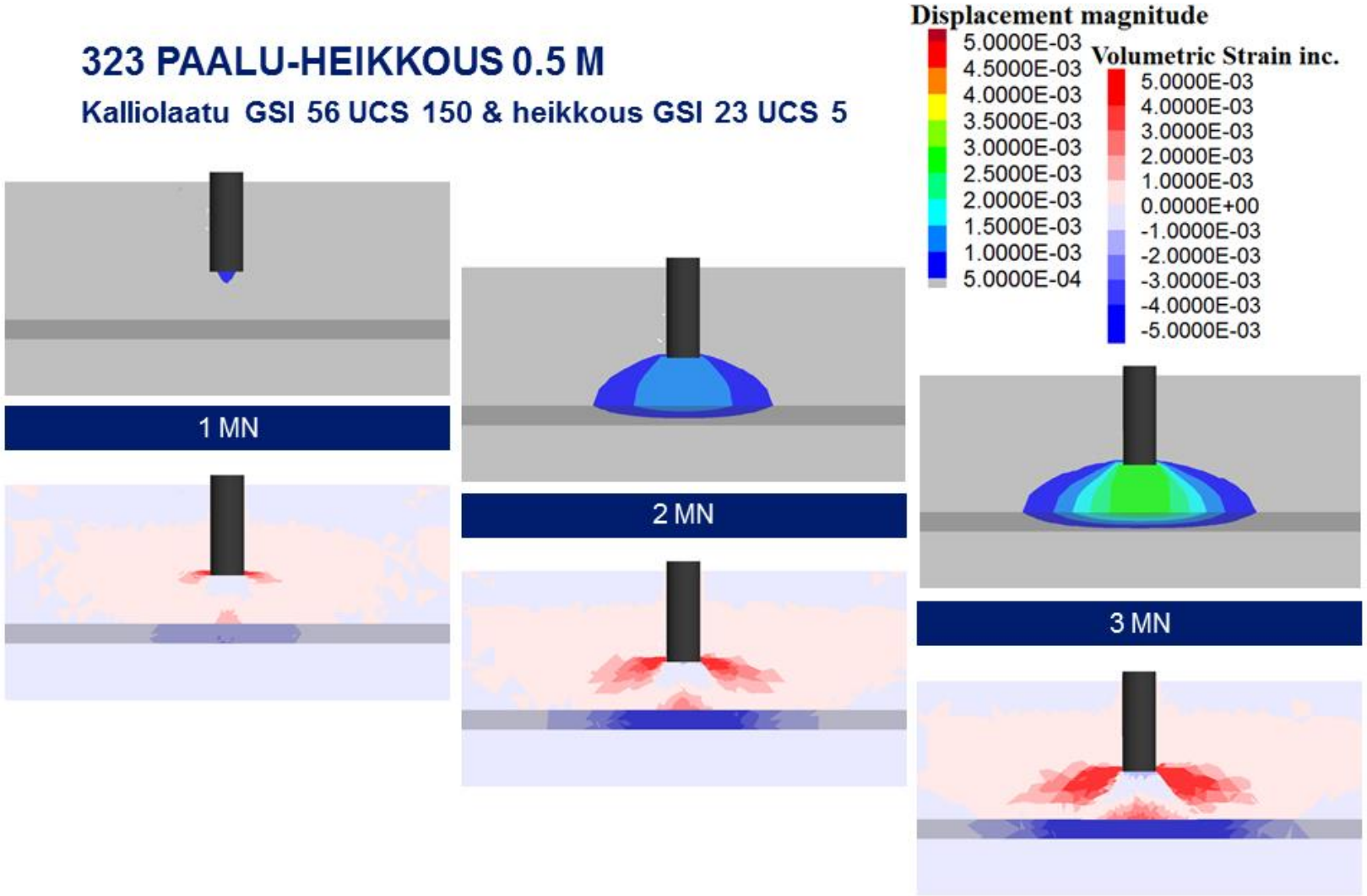
Kallioperän ollessa tiheärakoista tai rikkonaista, riski porapaalujen alapuolisen kallion siirtymille kasvaa.

Tehtyjen kalliomekaanisten simulointien perusteella myös ehjässä kallioperässä olevilla yksittäisillä rikkonaisuusvyöhykkeillä on merkitystä porapaalun ja sen alapuolisen kallioperän siirtymille. Kun yksittäinen noin 0.2 m paksu rikkonaisuusvyöhyke sijaitsi kuvassa 1 esitetyn mukaisesti noin 0.5 m etäisyydellä porapaalun kärjen alapuolella, havaittiin simuloinneissa paikoin noin 3…10 mm suuruisia porapaalujen pystysuuntaisia siirtymiä. Tällaiset siirtymät ovat mahdollisesti esimerkiksi siltarakenteille haitallisia.

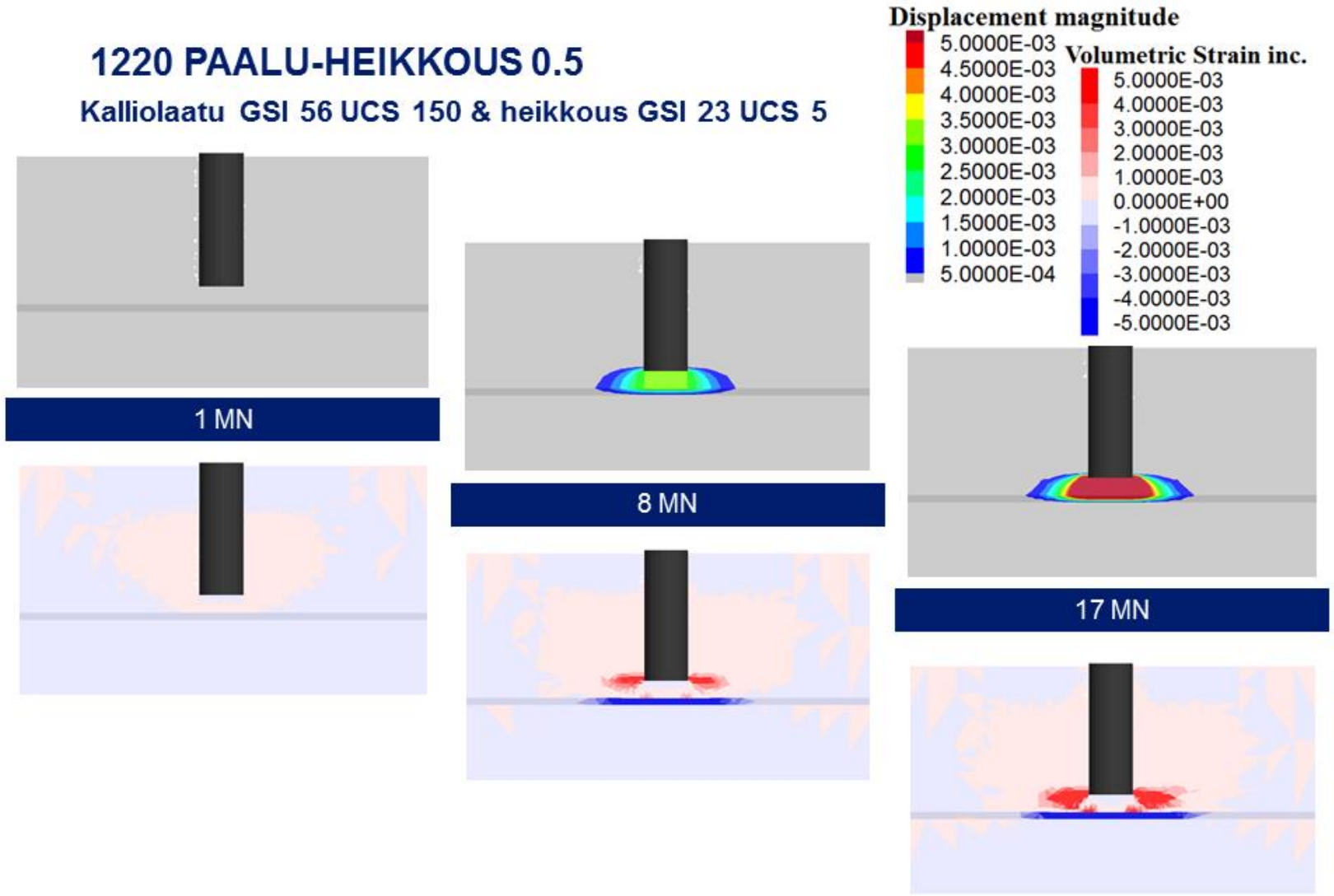


Kuva 1: Porapaalun alla ehjässä kallioperässä oleva yksittäinen rikkonaisuusvyöhyke (GSI25), esimerkki simuloinnilla määritetyistä siirtymistä kuvan yläkulmassa

KALLIOPERÄN HEIKKOUSVYÖHYKKEEN VAIKUTUS SIIRTYMIIN



KALLIOPERÄN HEIKKOUSVYÖHYKKEEN VAIKUTUS SIIRTYMIIN



KALLIOPERÄN JA PAALUKUORMAN VAIKUTUS PAALUN SIIRTYMIIN

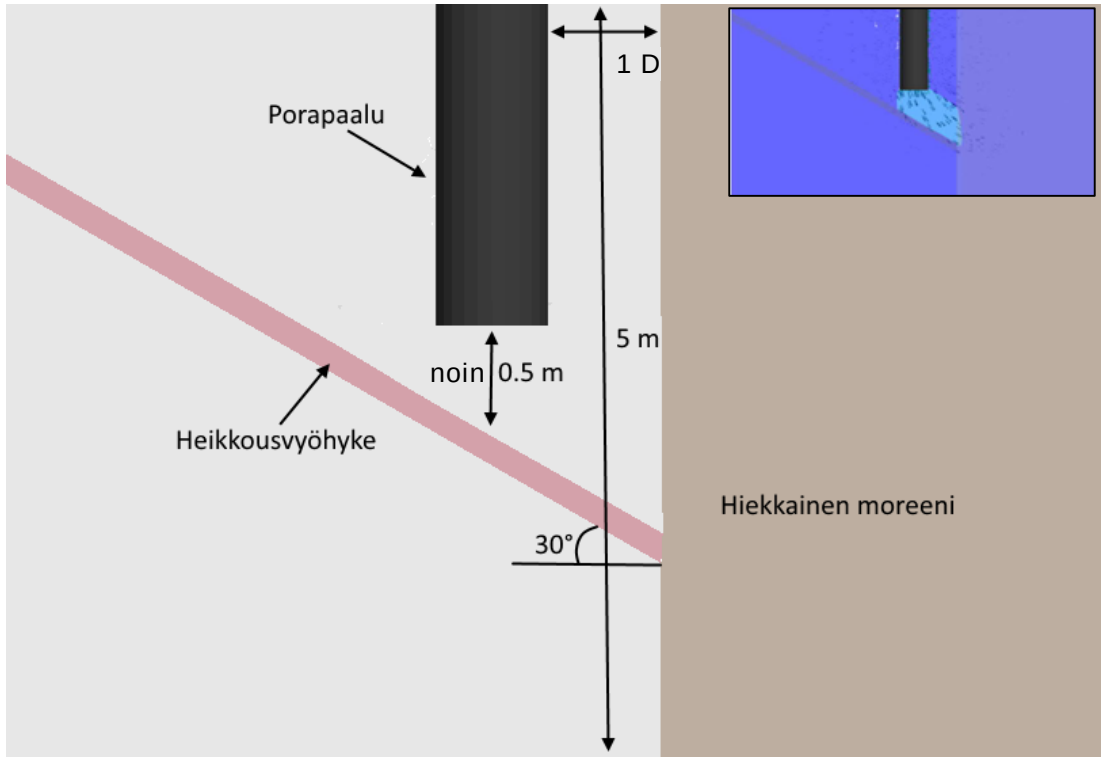
Kallioraoilla, rakojen kaltevuuskulmilla sekä rakopintojen ominaisuuksilla kuten kitkakulmalla ja koheesiolla on vaikutusta porapaalujen alapuolisen kallioperän siirtymiin.

Kun kalliorakojen kaltevuus on loiva (esimerkiksi < 20°), riski kalliolohkojen siirtymälle rakopintoja pitkin pienenee ja todennäköisyys porapaalujen siirtymille on pienempi.

Kun kalliorakojen kaltevuus on suurempi tai kun rakopinnat ovat liukkaita (esimerkiksi savi-, kloriitti- tai grafiittitäytteisiä), riski kalliolohkojen siirtymille rakopintoja pitkin on suurempi ja todennäköisyys porapaalujen siirtymille kasvaa varsinkin kuvan 2 mukaisissa tapauksissa, kun kallionpinnan muoto on kalteva tai kallio rajautuu maakerroksiin.

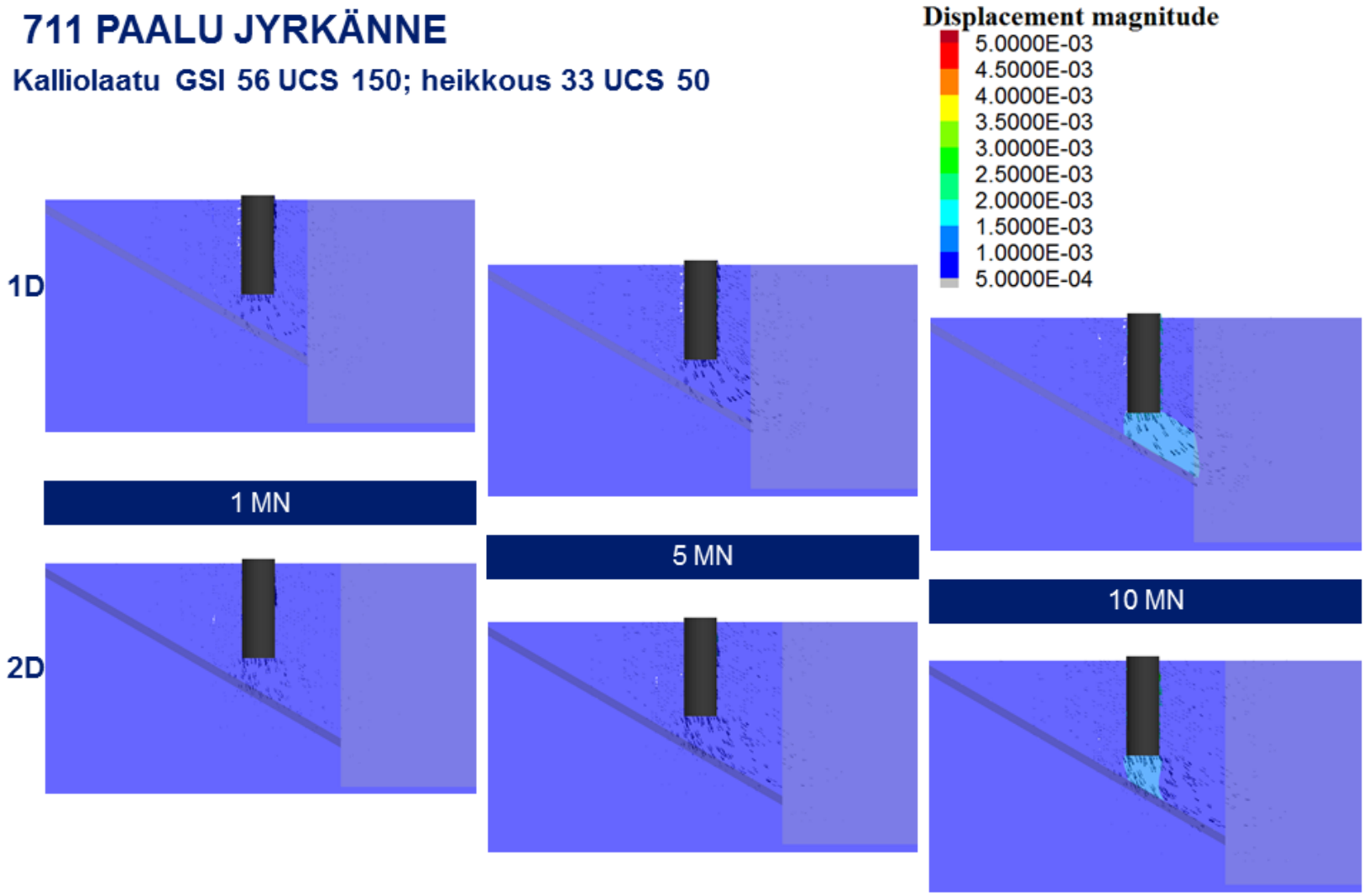
Porapaaluja ja niihin liittyviä yläpuolisia rakenteita suunniteltaessa kannattaa lisäksi selvittää, millaisia siirtymiä porapaaluille ja niille perustetuille rakenteille voidaan sallia.

Kun kallioperäolosuhteet on tutkimuksin selvitetty ja edellä mainituilta haasteellisilta kallioperäolosuhteilta ei voida välttyä, saattaa joissain tapauksissa osoittautua kustannustehokkaimmaksi ratkaisuksi suunnitella porapaaluihin perustuva rakenne niin, että rakenteelle kohdistuu rajallisia siirtymiä.

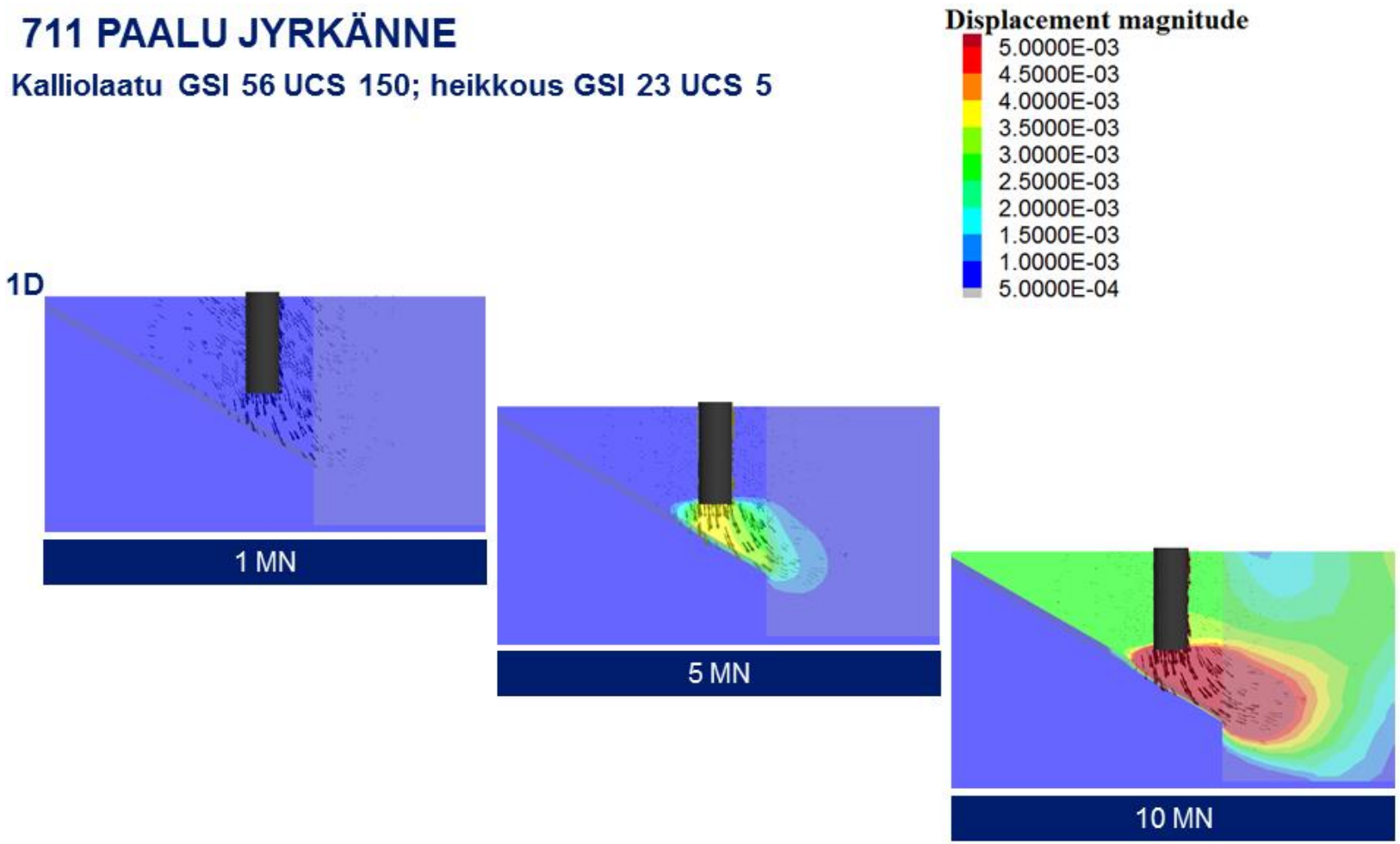


Kuva 2: Porapaalu kallion reunalla ja kallioperässä yksittäinen kalteva rikkonaisuusvyöhyke, esimerkki simuloinnilla määritetyistä siirtymistä kuvan yläkulmassa

KALLIOPERÄN JA PAALUKUORMAN VAIKUTUS PAALUN SIIRTYMIIN



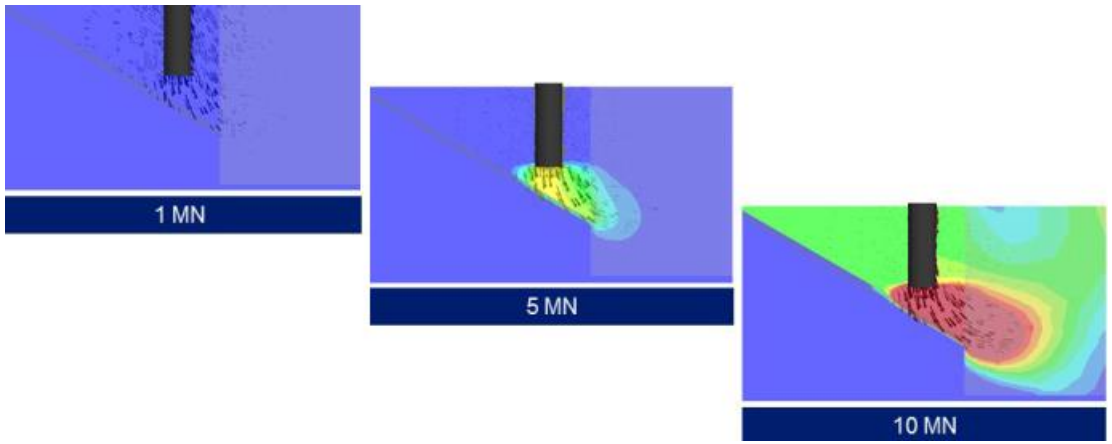
KALLIOPERÄN JA PAALUKUORMAN VAIKUTUS PAALUN SIIRTYMIIN



KALLIONPINNAN MUODON SELVITTÄMINEN

Tehtyjen kalliomekaanisten simulointien perusteella kallionpinnan muodolla on vaikutusta porapaalukuormien mahdollisesti aiheuttamiin kallioperän siirtymiin. Oheisessa taulukossa 1 on esitetty tutkimusperiaatteet ja -menetelmät kallionpinnan muodon selvittämiseksi eri tapauksissa.

Taulukossa 1 esitetyt tutkimukset esitetään tehtäväksi vaiheittain eri suunnitteluvaiheissa siten, että kaikki tutkimustiedot ovat käytettävissä viimeistään rakennussuunnitteluvaiheessa. Tietoa kallionpinnan korkeusasemasta saadaan mahdollisesti myös, mikäli kohteessa tehdään tutkimuksia kallion laadun selvittämiseksi.



Kuva 3: Kalliomekaanisilla laskennoilla määritettyjä siirtymiä, kun porapaalu sijaitsee kaltevalla pinnalla/jyrkänteellä

Taulukko 1: Kallionpinnan muodon selvittäminen

Porapaalujen kuormat	Kallionpinnan arvioitu muoto		
	tasainen kallionpinta kaltevuus $\leq 20^0$	kalteva kallionpinta kaltevuus 20^0…45^0	jyrkänne / portaittainen kallionpinta
Maltilliset kuormat (esim. porapaalulla D=711 mm 3-6 MN)	A	A B	A B C
Tavanomaiset kuormat (esim. porapaalulla D=711 mm 8-10 MN)	A	A B C	A B D

Taulukossa käytetyt merkinnät

A : Porakonekairaukseen perustuva tieto kallionpinnan korkeusasemasta porapaalun kohdalla

B : Porakonekairaukseen perustuva tieto kallionpinnan korkeusasemasta tukilinjojen välistä

C : Porakonekairaukseen perustuva tieto kallionpinnan korkeusasemasta tukilinjojen ylä- ja alarinteen puolella

D : Porakonekairaus jokaisen porapaalun vieressä ylä- ja alarinteen puolella

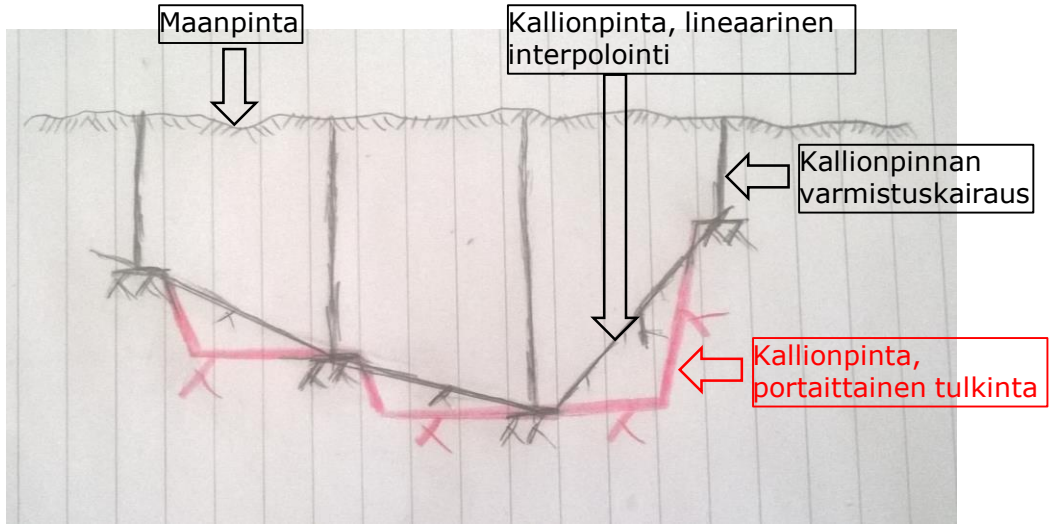
Porakonekairaus ulotetaan aina ehjään kallioon paalun kärjen tason alapuolelle (kts. NCCI7).

KALLIONPINNAN MUODON TULKINTA

Oheisessa taulukossa 2 on esitetty periaatteita kallionpinnan muodon tulkitsemiseksi tehtyjen tutkimusten perusteella.

Yleisesti kallionpinnan muoto tulkitaan interpoloimalla kallionpinnan korkeusasema kallionpinnan varmistamiseksi tehtyjen tutkimuspisteiden (kuten porakonekairaus) välillä lineaarisesti, tästä on käytetty taulukossa 2 termiä lineaarinen interpolointi. Tehtyjen kalliomekaanisten simulointien perusteella muutamissa tapauksissa on tarpeen tehdä kallionpinnan muodon portaittaista tulkintaa, jossa tutkimuspisteen kohdalla kallionpinta vastaa tutkimustietoa ja tutkimuspisteen vieressä kallionpinta on seuraavan tutkimuspisteen mukaisella alemmalla tasolla.

Esimerkki lineaarinen interpolointi vs portaittainen tulkinta



Taulukko 2: Kallionpinnan muodon tulkintaperiaatteet eri tapauksissa

Kallionpinnan muodon tulkintaperiaate	
Vain lineaarinen interpolointi	Lineaarinen interpolointi ja portaittainen tulkinta
tutkimustulosten perusteella kallionpinnan kaltevuus $\leq 20^{o}$	tutkimustulosten perusteella kallionpinnan kaltevuus $> 20^{o}$
tutkimuspisteiden perusteella kallionpinnan korkeusero tuen alueella $\leq$ 2 m	tutkimuspisteiden perusteella kallionpinnan korkeusero tuen alueella > 2 m
	porapaalun suunniteltu päättymistaso ylempänä kuin kallionpinta porapaalun vieressä olevan tutkimuspisteen kohdalla
	kohteen kallioperä laadultaan heikkoa tai huonompaa, Q $\leq$ 4
	porapaalun alapuolisessa kallioperässä yksittäisiä rikkonaisuusvyöhykkeitä, joiden Q $\leq$ 0.4

KALLION LAADUN SELVITTÄMINEN

Tehtyjen kalliomekaanisten simulointien perusteella kallioperän laadulla on vaikutusta porapaalukuormien mahdollisesti aiheuttamiin kallioperän siirtymiin. Taulukossa 3 on esitetty tutkimusperiaatteet ja menetelmät kallion laadun selvittämiseksi eri tapauksissa.

Kalliorakojen ominaisuuksilla tarkoitetaan rakotiheyttä, rakojen kaadesuuntia ja -suuruuksia sekä rakojen kitkakulmia.

Kallioperän lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksilla tarkoitetaan yksiaksiaalista puristusmurtolujuutta, Poissonin lukua, kimmomodulia ja kallioraon leikkauslujuutta.

Alla on esitetty muutamia yleispiirteisiä kalliolaatuluokkiin heikko…erittäin heikko liittyviä tunnistamistekijöitä. Tulkinta tulee tehdä kallioperäasiantuntijan, kuten geologi, toimesta.

— savikko- ja peltoalueet
— jokien ja vesistöjen läheisyydessä olevat kohteet
— kalliomäkien reuna-alueet
— porakonekairausten aika-painuma -havainnoissa selkeää vaihtelua
— useissa porakonekairauksissa alhaisia aika-painuma -havaintoja
— kallion päällä olevien maakerrosten paksuus > 10 m
— kalteva kallionpinta
— Rakennusgeologisen kallioluokituksen luokat RiIII, RiIV, RiV
— Geologian Tutkimuskeskuksen (GTK) lineamenttitulkinnat

Taulukko 3: Kallion laadun tutkimusperiaatteet

Pora-paalujen kuormat	Arvioitu / selvitetty kallioperä-olosuhde	Selvitettävät kalliolaatuparametrit ja soveltuvat tutkimusmenetelmät			
		Yleispiirteinen kalliolaatu	Q-luokituksen parametrit RQD, J_n, J_r, J_a	Kalliorakojen ominaisuudet	Kallioperän lujuus- ja muodonmuutos-ominaisuudet tarvittaessa
Maltilliset kuormat (esim. pora-paalulla D=711 mm 3-6 MN)	kohtalainen tai parempi Q>4	porakone-kairausten aika-painuma -havainnot	-	-	-
	heikko … varsin heikko 0,4≤Q≤4	porakone-kairausten aika-painuma -havainnot	edustavan porakonekairaus-reiän videokuvaus ja videokuvaustulosten geologinen tulkinta ja raportointi		-
	varsin heikko… erittäin heikko Q<0,4	porakone-kairausreikien videokuvaus ja niiden geologinen tulkinta kallionäyte-kairaukset	kallionäyte-kairauksen geologinen tulkinta ja raportointi	kallionäyte-kairauksen geologinen tulkinta ja raportointi	kairaamalla irrotettujen kallio-näytteiden laboratoriokokeet
Tavan-omaiset kuormat (esim. pora-paalulla D=711 mm 8-10 MN)	kohtalainen tai parempi Q>4	porakone-kairausten aika-painuma -havainnot	tarvittaessa edustavan porakonekairausreiän videokuvaus ja videokuvaustulosten geologinen tulkinta		
	heikko … varsin heikko 0,4≤Q≤4	porakone-kairausreikien videokuvaus ja niiden geologinen tulkinta kallionäyte-kairaukset	kallionäyte-kairauksen geologinen tulkinta	kallionäyte-kairauksen geologinen tulkinta	kairaamalla irrotettujen kallio-näytteiden laboratoriokokeet
	varsin heikko… erittäin heikko Q<0,4	kattavat kallionäyte-kairaukset	kallionäyte-kairausten geologinen tulkinta	kallionäyte-kairausten geologinen tulkinta	kairaamalla irrotettujen kallio-näytteiden laboratoriokokeet

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

GSI-LUVUN HYÖDYNTÄMINEN KALLION LAADUN SELVITTÄMISESSÄ

GSI-luku (www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2013-Quantification-of-the-GSI-Chart.pdf) on Hoek et al esittelemä kallion laatua kuvaava suure. Kalliomekaanisissa simulointiohjelmissa GSI-lukua käytetään yleisesti kalliomassan lujuusominaisuuksien kuvaamisessa ja Hoek-Brown – murtokriteerin parametrien määrittämisessä.

GSI-luvun mukainen kalliolaatu määritetään kentällä visuaalisesti huomioiden kalliomassan kiinteys ja rakopintojen ominaisuudet. Kuvassa 8 on esitetty tätä varten määritystaulukko.

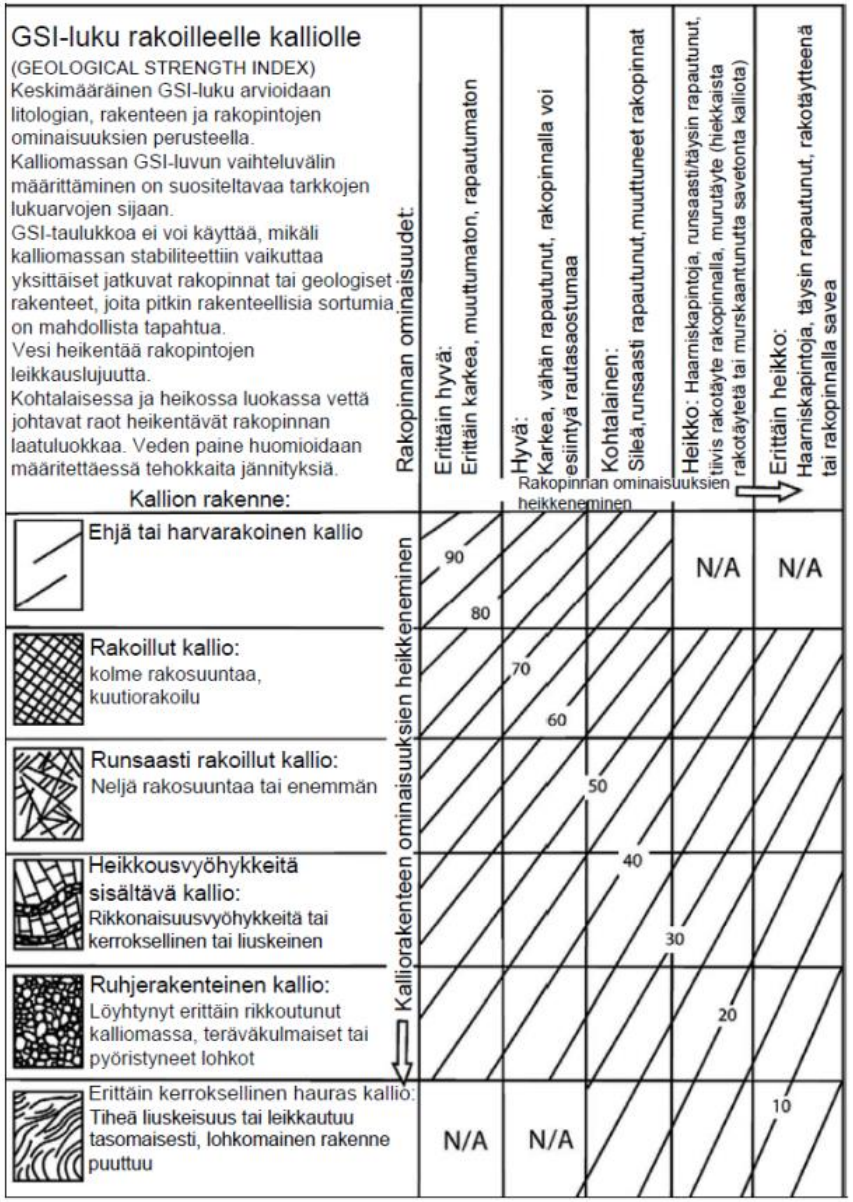
GSI-luku voidaan myös laskea Q'–luvusta seuraavalla kaavalla:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \text{ (Hoek et al. 1995)}$$

Q'- luvun määrityksessä jätetään huomioimatta Q-luvun parametrit J_w ja SRF, muilta osin Q'- luvun määritys on Q-luvun mukainen. GSI luvun arvo vaihtelee välillä 0-100.

Esimerkki kallion laadun vaikutuksesta ehjän kiven ja kalliomassan muutamiin ominaisuuksiin.

Kalliolaatu	Q'		4	0,65	0,3	0,2	0,1
	GSI	100	56	40	33	29,5	23
Ehjän kiven puristus-murtolujuus (MPa)		180	150	80	50	25	5
Kalliomassan puristus-murtolujuus (MPa)		180	12,8	2,7	1,1	0,4	0,05
Ehjän kiven kimmokerroin (MPa)		70 000	62 000	54 000	25 000	8 125	875
Kalliomassan kimmokerroin (MPa)		69 600	26 665	8 621	2 478	640	47



Kuva 8: GSI-luvun määritystaulukko

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

KALLIOPERÄTUTKIMUKSISSA HUOMIOITAVAA

Väyläviraston ohjeessa Kalliotunnelin kalliotekninen suunnitteluohje (28/2019) on esitetty kallionäytekairauksen sydännäytteestä määritettävät ominaisuudet ja muut vaatimukset mm. raportoinnin osalta. Ohjeessa on esitetty myös reiän kuvantamisessa määritettävät ominaisuudet.

Sekä kallionäytteen että sen kuvausaineiston raportoinnissa tulee kiinnittää erityisesti huomiota rikkonaisuusvyöhykkeisiin ja laajoihin yksittäisiin rakopintoihin. Jokaisen rikkonaisuusvyöhykkeen ja raon syvyys, leveys, suunta ja kaltevuus tulee yksityiskohtaisesti raportoida ominaisuuksien lisäksi. Raportointi tulee aina tehdä yksityiskohtaisesti kalliolaatuosuuksittain. Raportoinnissa tulee ottaa huomioon, että yksittäisenä toimivan porapaalun (halkaisija D=400…1200) siirtymiin vaikuttaa oleellisesti kallion ehjyys ja laatu paalun kärjen alapuolella syvyyteen 2…3 x D, hyvin heikossa kalliossa tätäkin syvemmälle.

Porakonekairauksen aika-painuma –tiedon perusteella voidaan karkeasti arvioida kallioperää ja sen ominaisuuksia. Jotta porapaalun kärjen alapuolisesta kallioperästä saadaan viitteellistä tietoa, tulee porakonekairaukset aina ulottaa vähintään 2 m porapaalun suunnitellun kärjen alapuolelle. Porakonekairauksen kalliovarmistuspituutena on yleisesti käytetty 3.0 m. Varsinkin kun suunnitellaan käytettäväksi halkaisijaltaan suurempia porapaaluja kuin D=500 mm, tulee edellä mainittua porakonekairauksen kalliovarmistuspituutta kasvattaa niin että kalliokairaus ulottuu vähintään 2 m porapaalun kärjen alapuolelle.

Mahdollisen ankkuroinnin vaatima tutkimussyvyys määritetään kohdekohtaisesti. Porakonekairauspiste sijoitetaan n. 1 m etäisyydelle paalun suunnitellusta sijainnista.

Tutkittaessa kalliolaatua tarkemmin esimerkiksi kallionäyte-kairauksella tai kairareiän sisäpuolisella videokuvauksella, ulotetaan tutkimus vähintään 2 m porapaalun suunnittelun pohjan alapuolelle. Tutkimuspisteen pituutta määritettäessä tulee myös huomioida, että tutkimuspisteen päättymistasosta 2 m ylöspäin kallio on ehjää eli kalliomassa on Q-luokituksen mukaiselta laadultaan kohtalaista tai parempaa.

Kairasydännäytteen etu kuvantamiseen verrattuna on se, että kairasydännäytteellä voidaan määrittää myös rakoparametrit. Näytteestä saadaan tietoa kalliorakojen pinnan ominaisuuksista, kalliorakojen täytteistä ja niiden ominaisuuksista sekä kalliorakojen pinnan muuttuneisuudesta. Näytteestä voidaan tehdä myös laboratoriokokeita. Kuvantamalla nähdään vain raon leikkauspinta kairareikään nähden.

Porakone- ja kallionäytekairausrei’issä voidaan tehdä myös vesimenekkikokeita. Tässä yhteydessä on huomioitava, että pintakalliossa vesimenekit ovat yleisesti avoimista kallioraoista johtuen suuria ja heikkousvyöhykkeissä tyypillisesti esiintyvät savirakenteet parantavat kallion tiiveyttä johtaen pieniin vesimenekkeihin. Pieniä vesimenekkejä esiintyy myös laadultaan hyvässä ja harvarakoisessa kalliossa.

Edellä mainituin perustein suositellaan tehtäväksi videokuvausta vesimenekkikokeiden sijaan ellei kyseessä ole esimerkiksi ankkurin injektoitavuuteen liittyvä tutkimus.

SILTALASKELMAT

Sillan suunnittelussa normaali mitoitusoletus on, että porapaalun kärki ei painu. Paalupainuman vaikutusta sillan rakenteisiin ja voimasuureisiin selvitettiin muutamissa tapauksissa.

Selvitykset tehtiin rakennelaskelmin Sofistik-laskentaohjelmalla. Painumina oli 3…10 mm. Paalupainumissa oletettiin, että mikä tahansa sillan paalusta voi painua. Paalupainumien voimasuureet redusoitiin murtorajatilassa NCCI 2 taulukon 5.2 mukaisella tukisiirtymien redusointikertoimella E_{cm} / 3.

Laskelmat tehtiin kahdelle erityyppiselle sillalle, jotka olivat:

- Ratasilta : kaksipalkkinen jännitetty betoninen jatkuva ulokepalkkisilta, jännemitat (1,5) + 15,5 + 20,9 + 15,5 + (1,5) m
  - pohjapiirustus sekä pituus- ja poikkileikkaus esitetty kuvassa 9
- Alikulkusilta : jännitetty betoninen ulokekaukalopalkkisilta, jännemitat (2,0)+24+(2,0) m
  - pohjapiirustus sekä pituus- ja poikkileikkaus esitetty kuvassa 10

Ratasillan voimasuureiden lisäykset 3…10 mm paalupainumista olivat :

- tukimomentti 6…21 %
- kenttämomentti 2…8 %
- vääntömomentti 19…62 %
- leikkausvoima 4…12 %

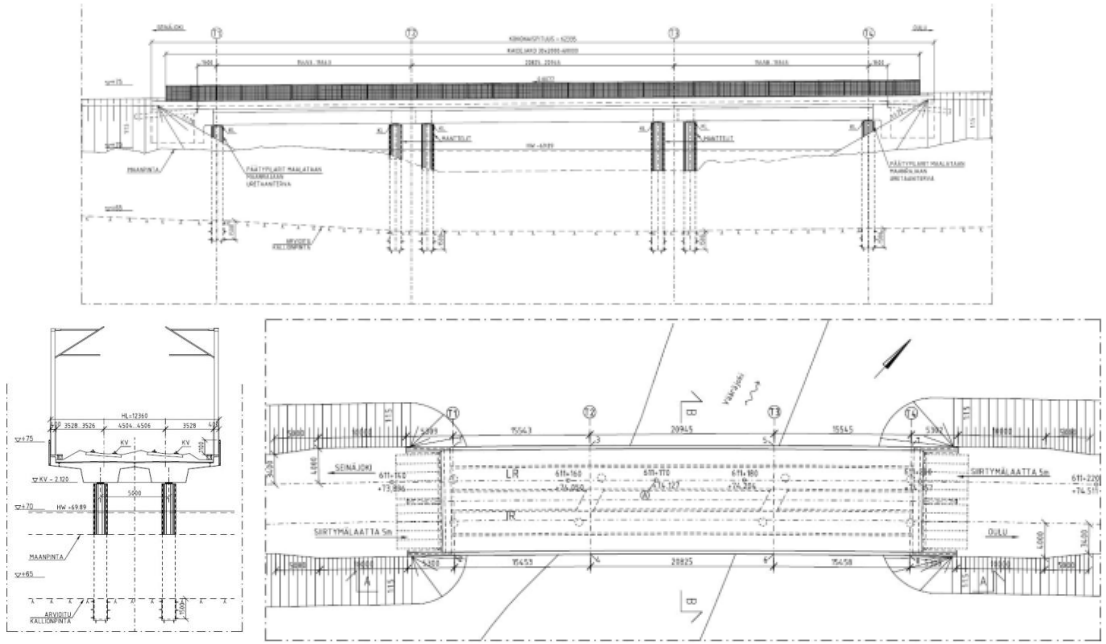
Alikulkusillan voimasuureiden lisäykset 3…10 mm paalupainumista olivat :

- tukimomentti 2…6 %
- kenttämomentti 0,1…0,3 %
- vääntömomentti 5…18 %
- leikkausvoima 1…5 %

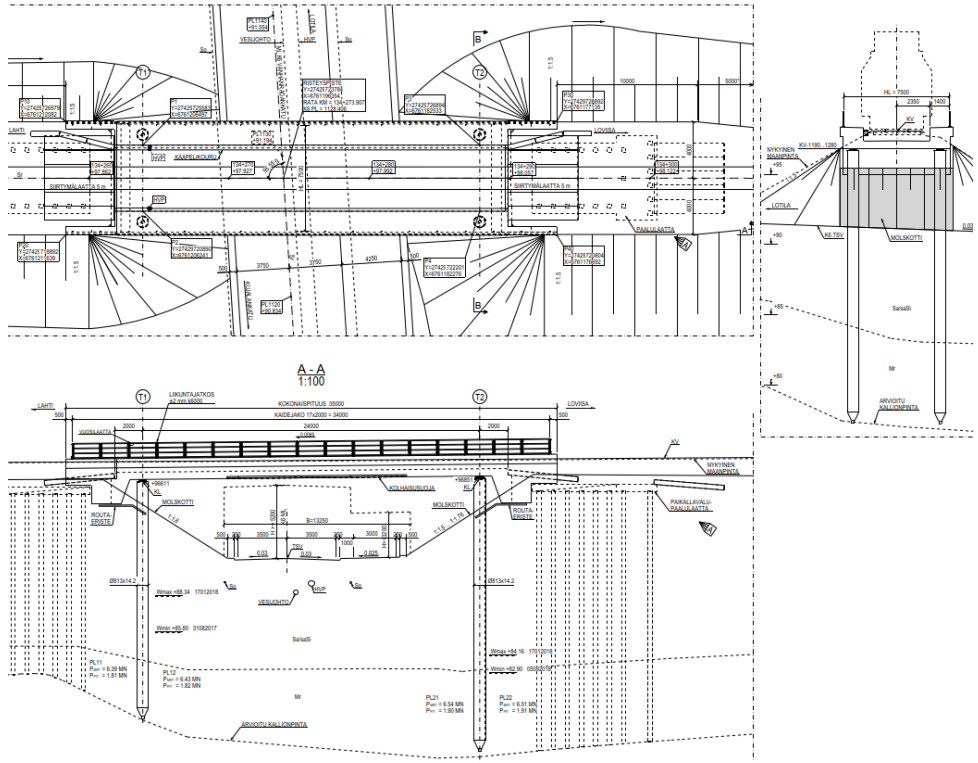
Painumien aiheuttamat voimasuureiden lisäykset olivat merkittäviä ja niillä olisi mahdollisesti ollut mitoittavaa merkitystä varsinkin ratasillan tapauksessa. Välttämättä mitoittavat vaikutukset eivät olisi niin merkittäviä kuin voimasuureiden lisäykset, koska lisäykset ovat ääriarvoja ja jännitetyllä sillalla on kapasiteettia jäljellä.

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY

SILTALASKELMAT



Kuva 9 : Ratasillan pohjapiirustus, pituus- ja poikkileikkaus.



Kuva 10 : Alikulkusillan pohjapiirustus, pituus- ja poikkileikkaus.

KIITOKSIA

www.vayla.fi/tietoa-meista/julkaisut/oppaat

www.afry.fi



Väylävirasto
Trafikledsverket

Kallioperän merkitys porapaalutuksen suunnitteluun

Väyläviraston oppaita 2/2020

VÄYLÄ AFRY ÅF PÖYRY