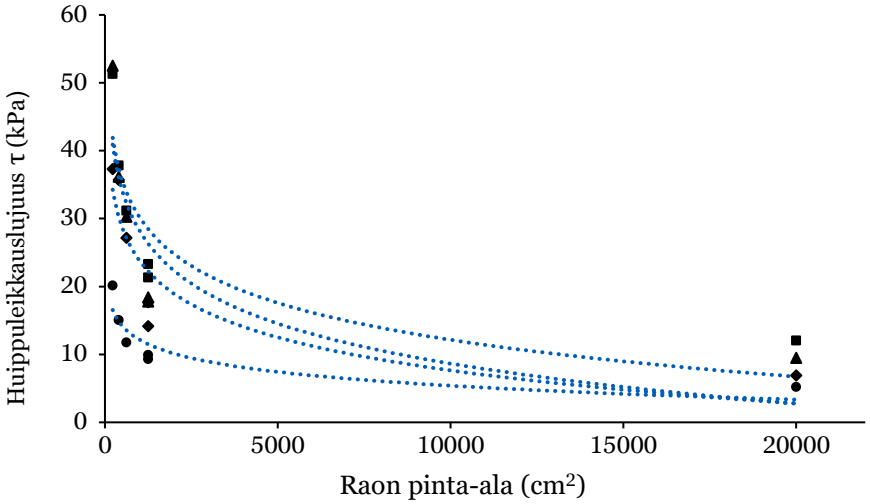
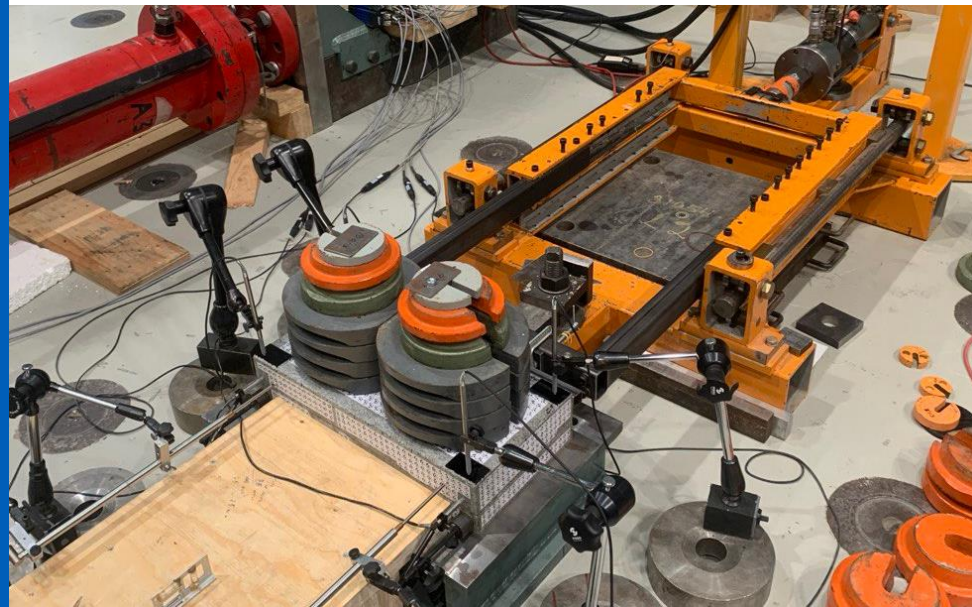
Mittakaavan vaikutus Kuru graniitin rakojen leikkauslujuuteen

Arttu Anttilainen

7.10.2025

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University





Miksi mittakaavavaikutusta tutkitaan?

- Rakoilulla, ja rakojen leikkauslujuudella on suuri vaikutus kalliomassan ominaisuuksiin
- Kalliorakojen leikkauslujuus voi riippua mittakaavasta
- Mittakaavavaikutuksesta tai sen syistä ei ole yhteisymmärrystä
- Rakojen ominaisuuksia on vaikeaa verrata eri olosuhteiden välillä (koko, jännitystila, eri koeolosuhteet: CNL/CNS/luonnontilaiset raot)

Taustaa

- Tämä tutkimus perustuu Lauri Uotisen aiempiin tutkimuksiin, jotka olivat osana MIRKA ja KARMO tutkimusprojekteja.
- Aihe annettiin koululta ja rahoitettiin tutkimusapurahalla.
- Tavoite oli jatkaa tutkimusta, ja tuottaa tuloksia, joista voidaan muodostaa johtopäätöksiä.

Tutkimuskysymykset

- Miten mittakaavavaikutus vaikuttaa Kurun harmaan graniitin tuoreiden, kiilattujen vetomurtumien leikkauslujuuteen?
- Mikä on edustava mittakaava Kuru graniitin raoille, missä näytekoossa mittakaavavaikutus tippuu pois?
- Millä mekanismeilla mittakaavavaikutusta on selitetty kirjallisuudessa? Vastaako kirjallisuuden tutkimusten tulokset ja niiden selitykset meidän kokeellisia tuloksia?
- Mikä rakojen murtokriteeri, ja karkeuden arvioimisen metodi ennustaa parhaiten kokeidemme leikkauslujuuden tuloksia?

Rakenne

1. Kirjallisuuskatsaus
2. Näytteiden rakojen pinnat sekä avauma määritettiin fotogrammetrialla
3. Kokeiden huippuleikkauslujuudet laskettiin kahdella murtokriteerillä:
   Barton-Bandis
   - *JRC* Z_2-menetelmällä,
   - *JRC* Z_2-menetelmällä Bandis et al. (1982) scale reduction factorin kanssa
   - *JRC* muokatulla Z_2'-menetelmällä

   Johansson-Stille conceptual model
   - Grassellin 3D karheusparametrit, avauma, Hurst exponent
4. Viisi leikkauskoetta eri kokoisille näytteille

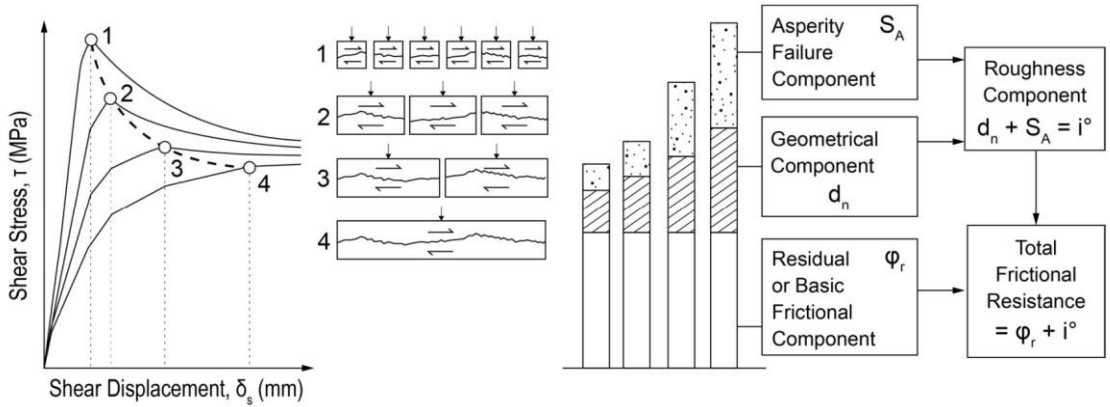
Z_2 on rakoprofiilin keskiarvoisen paikallisen kaltevuuden neliöllinen keskiarvo

Yleisiä mittakaavavaikutuksia

Yleisin tulos (Bandis et al. 1981)

Negatiiviset mittakaavavaikutukset kirjallisuudessa: (Barton & Choubey, 1977), (Yoshinaka et al., 1993), (Fardin, 2008), (Bahaaddini et al., 2014).

- *Leikkauslujuus laskee, varsinkin huippulujuus*
- *Jännittys-siirtymäkäyrän muoto muuttuu hauraasta sitkeäksi*
- *Huippulujuus tapahtuu suuremmissa siirtymissä*
- *Rakojen jäykkyys leikkauksessa laskee*
- *Hajonta leikkauslujuuden sekä leikkausjäykkyyden tuloksissa vähenee*



Kirjallisuuskatsauksen tuloksia

1. Negatiivisen mittakaavavaikutuksen aiheuttaa muutos mobilisoituneen karheuden aallonpituuksissa rakojen koon muuttuessa. (Barton & Choubey, 1977), (Barton & Bandis, 1981), (Bahaaddini et al., 2014), (Huang et al., 2020).

2. Rakopintojen välisen kontaktin alue muuttuu rakokoon kasvaessa. (Yoshinaka et al., 1993), (Barton & Choubey, 1977), (Bandis et al., 1981).

3. Hyvin yhteensopivissa raoissa saattaa olla positiivinen (Kutter & Otto, 1990), tai neutraali mittakaavavaikutus. (Johansson, 2016). Rakojen yhteensopivuus vaikuttaa mittakaavavaikutukseen, hyvin yhteensopivien näytteiden kontaktin ala kasvaa suhteessa näytekoon kasvun kanssa, ja pysyy samana koosta riippumatta täysin yhteensopimattomilla näytteillä (Johansson, 2009).

4. Muita selityksiä on karheuden eri aallonpituuksien erilaiset skaalausominaisuudet sekä karheuden heterogeenisuus.

5. Pienet näytteet kallistuvat herkemmin, jos niiden kierto sallitaan. Tämä lisää leikkausvastusta (Hencher et al., 1993), (Barton & Bandis, 1980). Alhaiset normaalikuormat korostavat kallistumista, ja korkeat normaalikuormat estävät sitä. Bandis et al. (1981) ajattelivat, että tämä vaikutus saattaa nostaa tiheästi rakoutuneiden kalliomassojen leikkauslujuutta, koska pienet lohkot voivat kiertyä, jolloin pienikokoisella karheudella on suurempi vaikutus lujuuteen.

Huippukitkakulman ennustukset

Barton-Bandis peak shear strength criterion (Barton & Choubey, 1977)

Roughness input: *JRC* from Z_2 or Z_2', based on three 2D profiles

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan\left(JRC \log_{10}\frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_b\right)$$

$$JRC = \frac{\arctan(\tau/\sigma_n) - \phi_b}{\log_{10}(JCS/\sigma_n)}$$

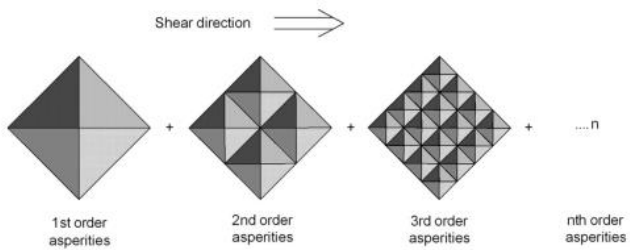


Figure 2.9. Idealised surface roughness in the conceptual model.

Johansson-Stille peak shear strength criterion revised by Rios-Bayona et al.

(Johansson, 2009), (Johansson & Stille, 2014), (Rios-Bayona et al. 2021)

- Pyrkii kuvaamaan rakojen leikkauslujuutta analyyttisesti ja fysiikan lakien kautta
- Karheutta edustaa itseään toistava fraktaali idealisoituja asperiteettejä
- Mittakaavavaikutus riippuu yhteensopivuudesta, joka määrittää miten kontaktin ala kasvaa rakokoon kasvaessa

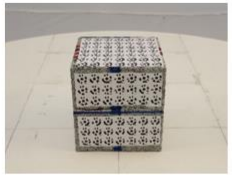
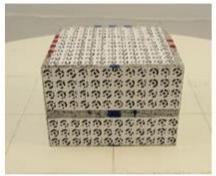
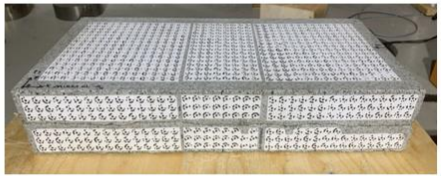
$$k = \frac{\log_{10}\frac{2a}{\tan(i_n)} - \log_{10} L_{asp,g}/2}{\log_{10} L_n/2 - \log_{10} L_g/2} \qquad h_{asp} = aL_{asp}^{H}$$

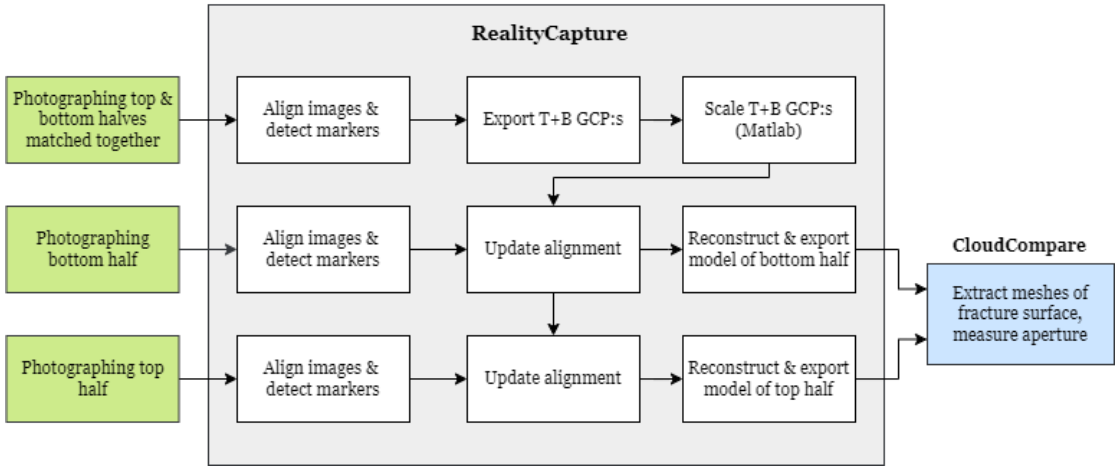
$$i_g = \theta_{max}^{*} - 10^{\frac{\log\frac{\sigma'_n}{\sigma_{ci}} - \log A_0}{C}} \cdot \theta_{max}^{*}$$

$$i_n = arctan\left[\tan(i_g) \cdot \frac{L_n}{L_g}^{kH-k}\right] \qquad \phi_p = \phi_b + i_n$$

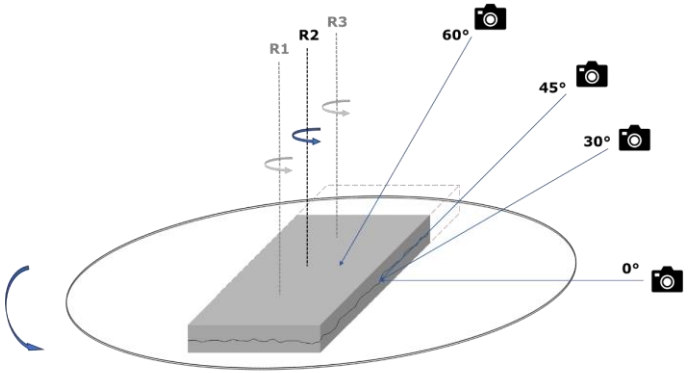
Näytteet

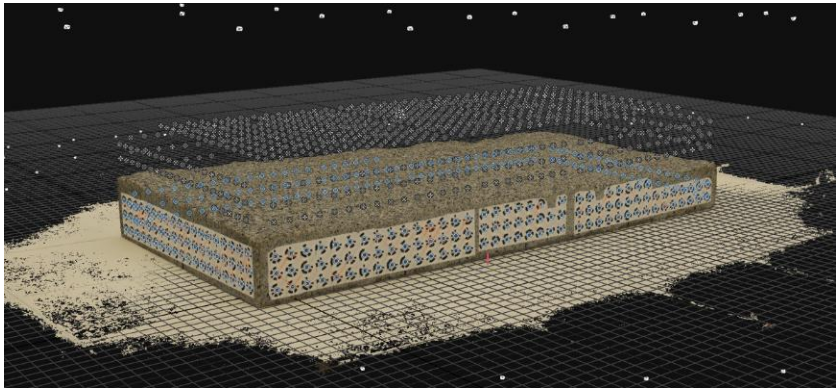
Table 3.3 Photographs of samples.

S1 95 x 95 mm 	*S4 250 x 500 mm*
S2 150 x 150 mm 	*S5 250 x 500* 
S3 200 x 200 mm	*X1 250 x 250*

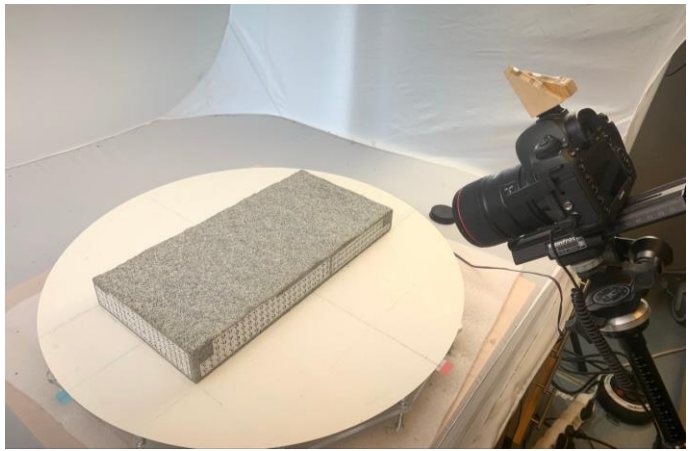


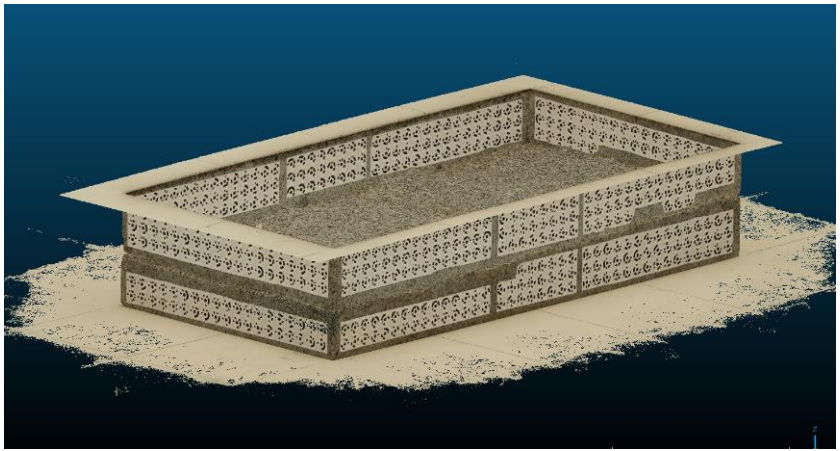
Fotogrammetria





RealityCapture, (Capturing Reality, 2024)





CloudCompare, (Girardeau-Montaut, 2024)

2D Karheusparametrien (*JRC*) määrittäminen

Root mean square method (Z_2)

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L}\int_{x=0}^{x=L}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \mathrm{dx}} = \sqrt{\frac{1}{M(Dx)^2}\sum_{i=1}^{M}(y_{i+1}-y_i)^2}$$

$$JRC = 32.20 + 32.47 \log Z_2$$ (Tse & Cruden, 1980)

Modified root mean square method (Z'_2) (Zhang et al., 2014)

$$Z'_2 = \sqrt{\frac{1}{L}\int_{x=0}^{x=L}\left(max\left(0,\frac{dy}{dx}\right)\right)^2 \mathrm{dx}} = \left[\sum_{i=1}^{M}\frac{(\max(0, y_{i+1}-y_i))^2}{(x_{i+1}-x_i)L}\right]^{1/2}$$

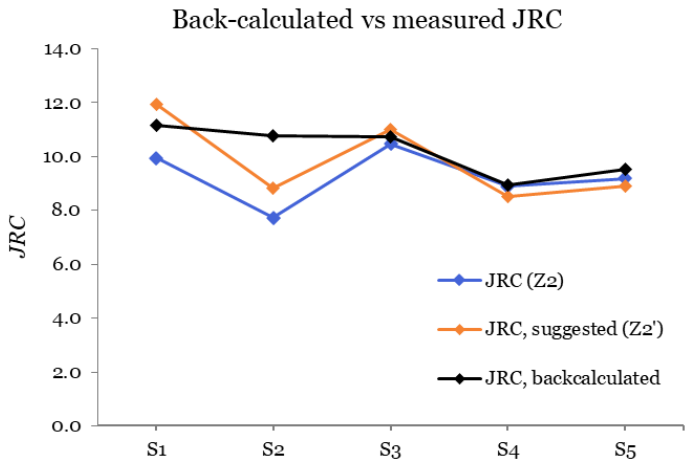
$$h_{av} = \frac{1}{L}\int_{x=0}^{x=L}|y|dx = \sum_{i=1}^{N}\frac{|y_{i+1}+y_i|(x_{i+1}-x_i)}{2L}$$

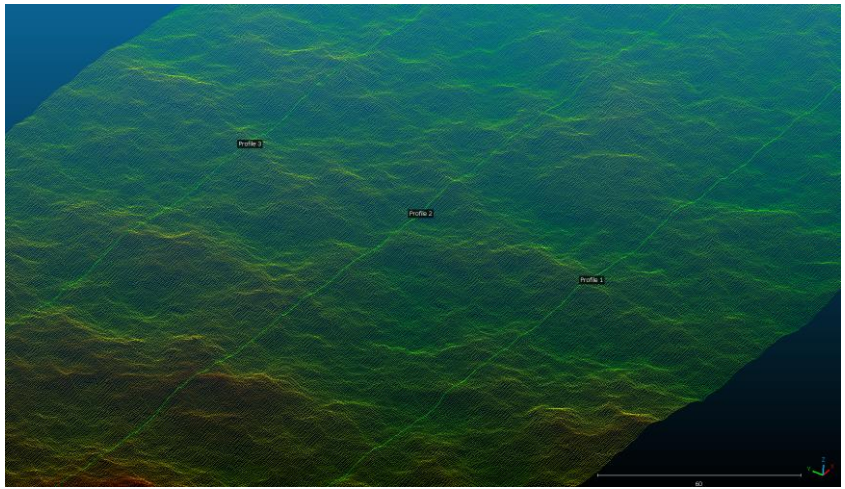
$$\lambda = \left(\frac{h}{L}\right)^{\alpha}(Z'_2)^{1-\alpha}, where\ \alpha = \frac{1}{3}$$

$$JRC_{suggested} = \frac{40}{1+e^{-20\lambda}} - 20$$

$$JRC_{upper} = \frac{40}{1+e^{-30\lambda}} - 20$$

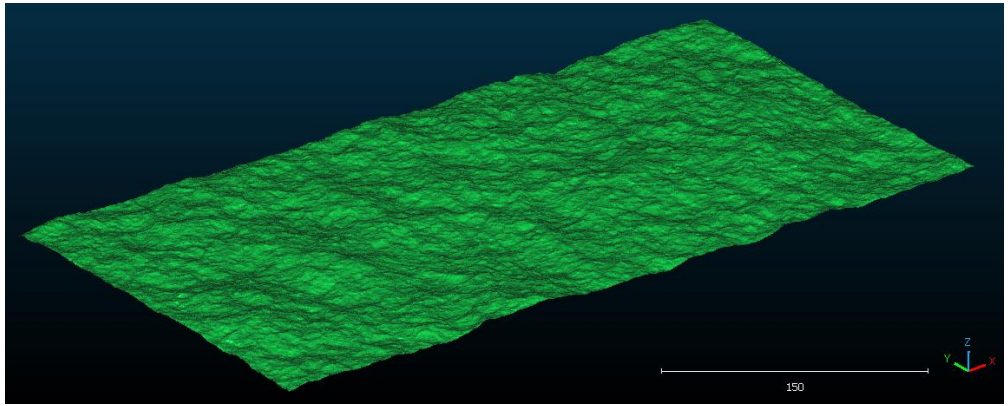
$$JRC_{lower} = \frac{40}{1+e^{-15\lambda}} - 20$$

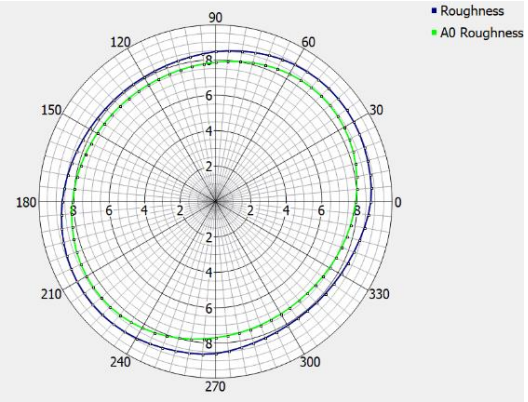




Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

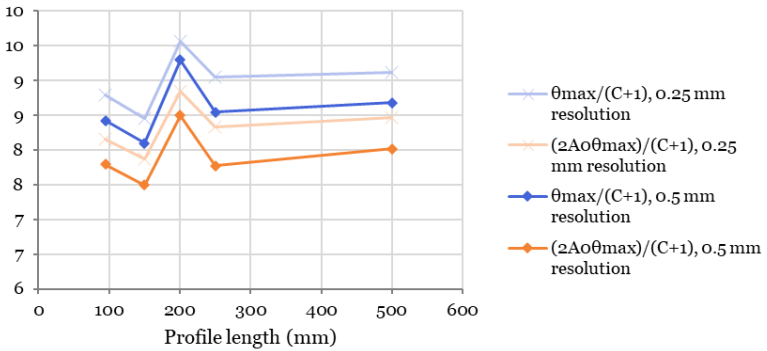
3D Karheusparametrien määrittäminen



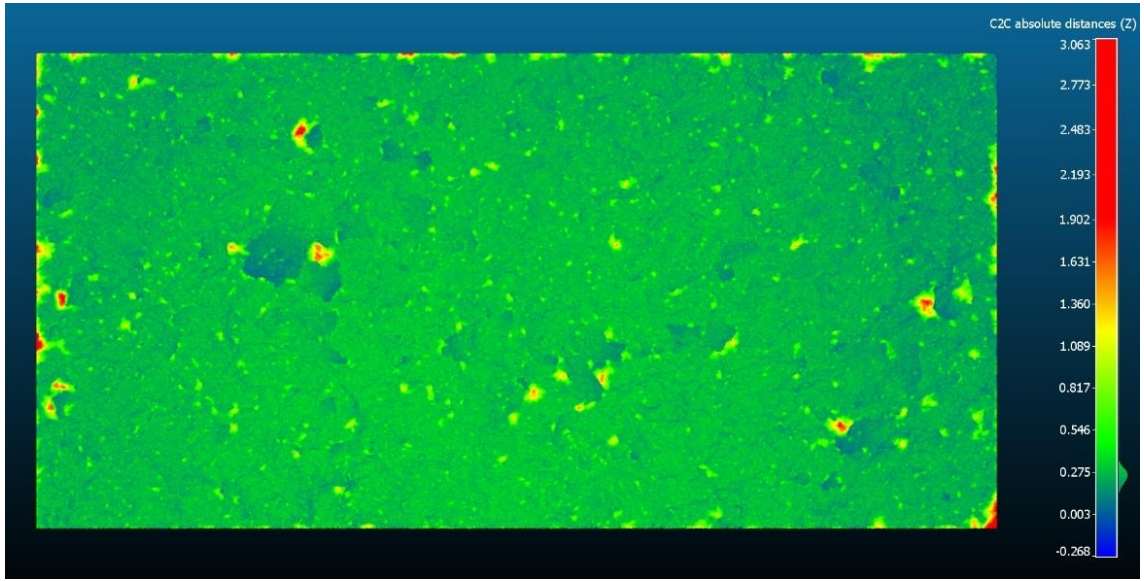


Calculated with Surface Roughness Calculator, (Magsipoc et al., 2020)

Sample ID	Shear direction	C	$\frac{\theta_{max}}{C+1}$	$\frac{2A_0\theta_{max}}{C+1}$	A_0	θ_{max}
S1	+y, 90	4.39	8.42	7.79	0.46	45.4
S2	-x, 180	6.14	8.10	7.49	0.46	57.8
S3	-y, 270	5.70	9.30	8.49	0.46	62.3
S4	+y, 90	5.95	8.54	7.77	0.45	59.4
S5	-x, 180	6.76	8.68	8.01	0.46	67.3



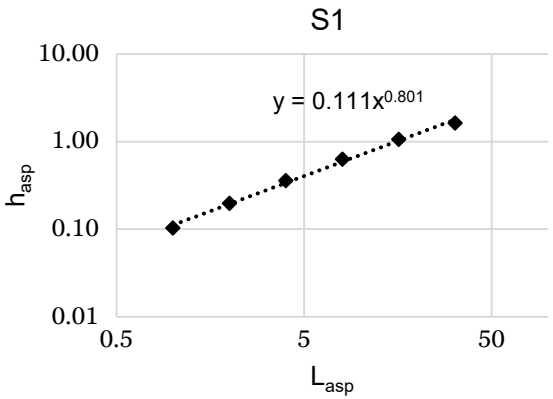
Avauman mittaaminen

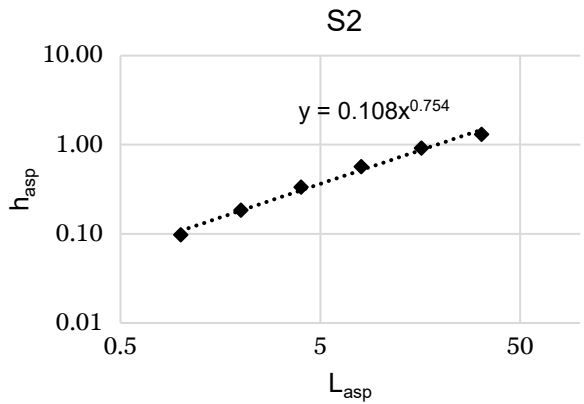


Physical aperture in CloudCompare, (Girardeau-Montaut, 2024)

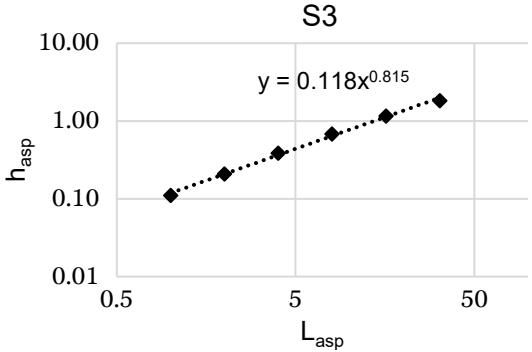
	S1	***S2***	***S3***	***S4***	***S5***
Size (cm)	95x95	150x150	200x200	250x500	250x500
Physical aperture (µm)	150	149	300	271	269

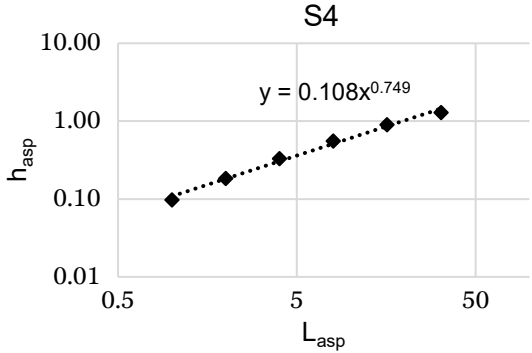
Hurstin eksponentti

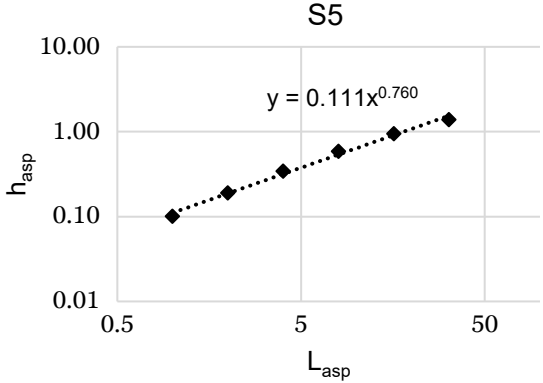




	S1		S2		S3		S4		S5	
L_{asp}	Z_2	h_{asp}	Z_2	h_{asp}	Z_2	h_{asp}	Z_2	h_{asp}	Z_2	h_{asp}
1	0.21	0.10	0.20	0.10	0.22	0.11	0.20	0.10	0.20	0.10
2	0.20	0.20	0.18	0.18	0.21	0.21	0.18	0.18	0.19	0.19
4	0.18	0.36	0.17	0.33	0.19	0.39	0.17	0.33	0.17	0.34
8	0.16	0.63	0.14	0.57	0.17	0.68	0.14	0.56	0.15	0.58
16	0.13	1.06	0.11	0.91	0.15	1.17	0.11	0.90	0.12	0.94
32	0.10	1.63	0.08	1.31	0.11	1.84	0.08	1.29	0.09	1.39
64	0.06	1.84	0.06	1.79	0.08	2.71	0.05	1.68	0.06	1.94







Leikkauskokeet

Jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia aiempiin näytteisiin X1 (250x250 mm) ja X2 (1000x2000 mm), testaus toteutettiin mahdollisimman samalla tavalla (Uotinen et al., 2021).

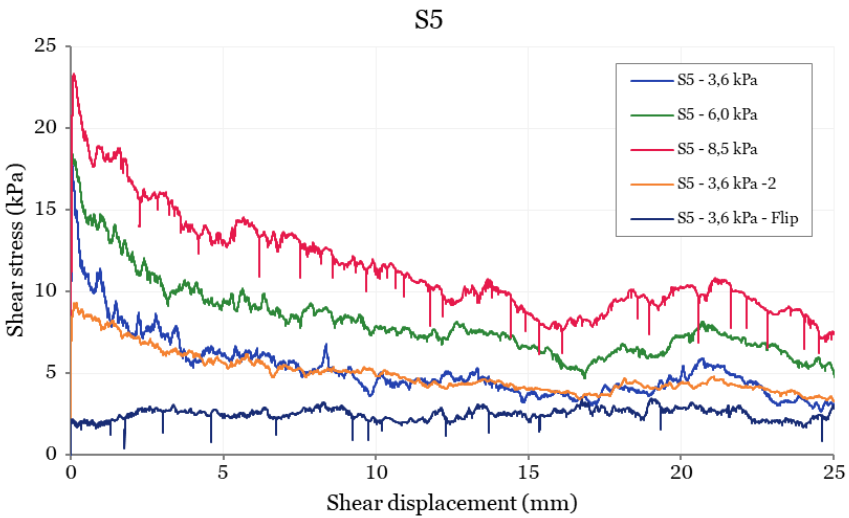
- Neljä LVDT:tä in leikkaussuunnassa, suhteelliset siirtymät
- Näytteille S4 and S5, neljä LVDT:tä normaalisuunnassa
- Constant normal stresses
- 5 vaihetta, ja näytteen aseman resetointi vaiheiden välissä
- Minimi leikkaussiirtymä > 5 % of näytteiden pituudesta
- Leikkausnopeus 0,1 mm/min ennen huippulujuutta, 0,5 mm/min sen jälkeen

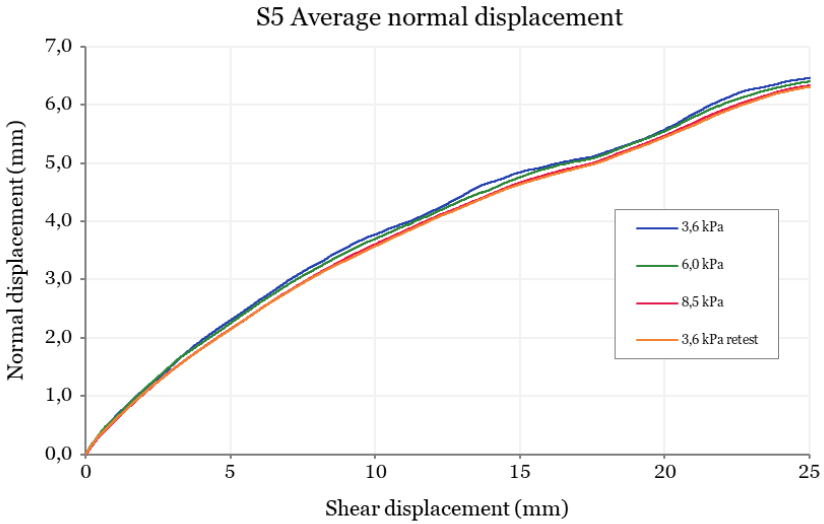
	Normal stress (kPa)	
Stage 1	3,6	
Stage 2	6,0	
Stage 3	8,5	
Stage 4	3,6	Tested again
Stage 5	3,6	Top half flipped 180°

Shear test setup for S5

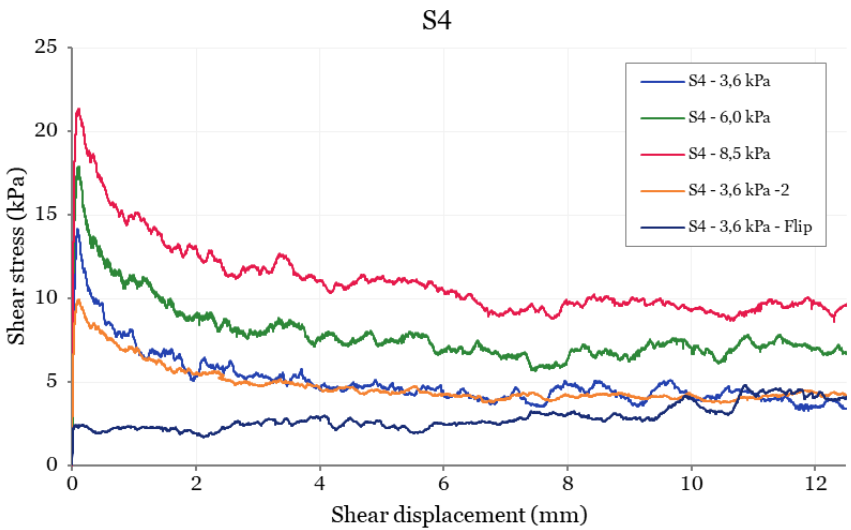
Shear test setup for S2

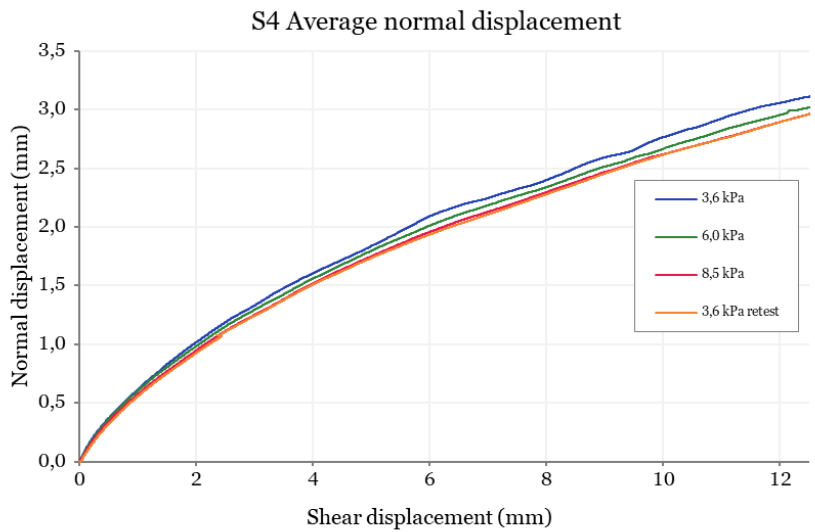
S5 (500 x 250 mm)



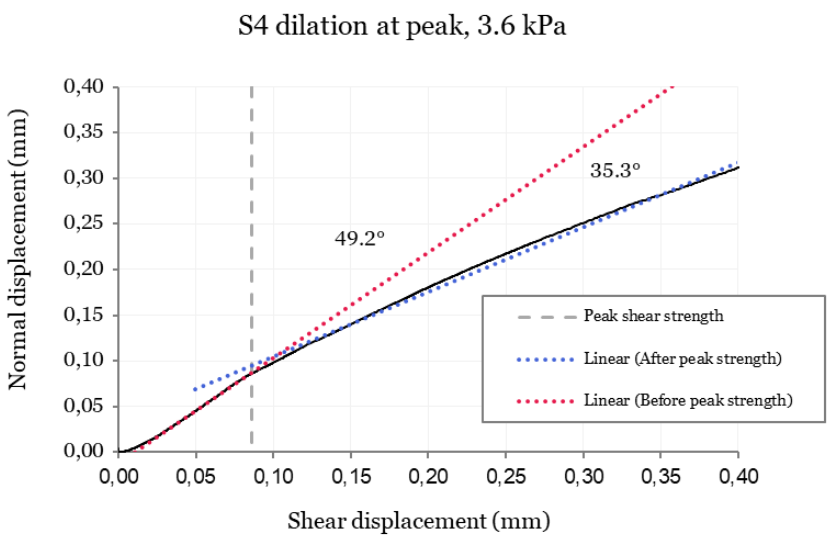


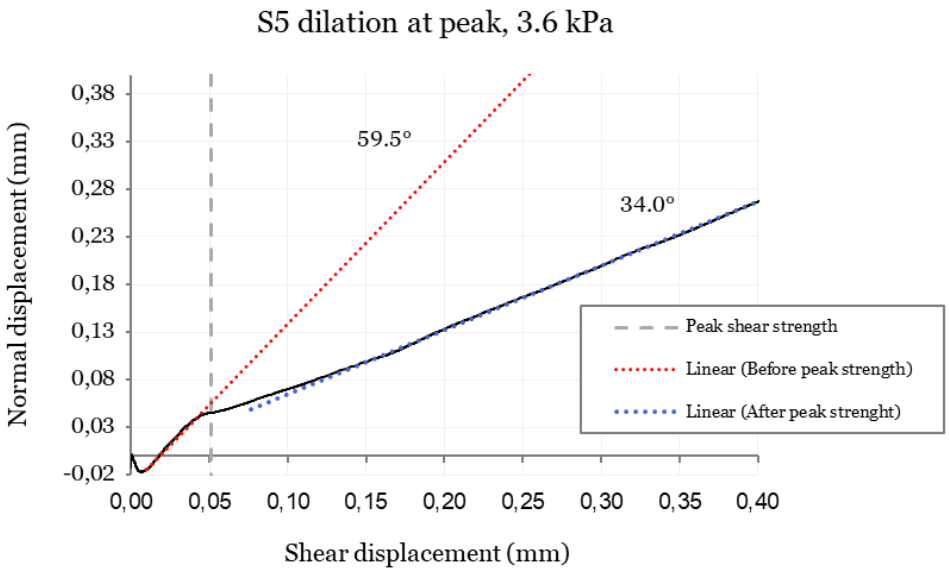
S4 (250 x 500 mm)



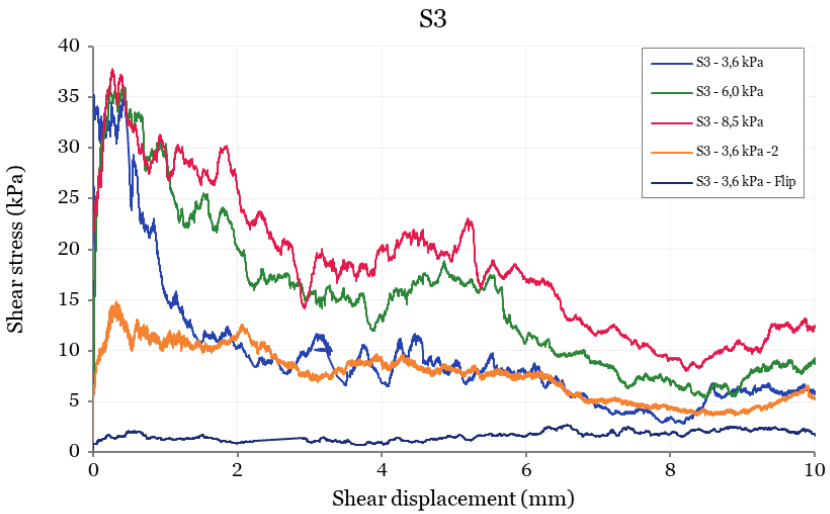


Dilataatio ennen jälkeen huippulujuuden

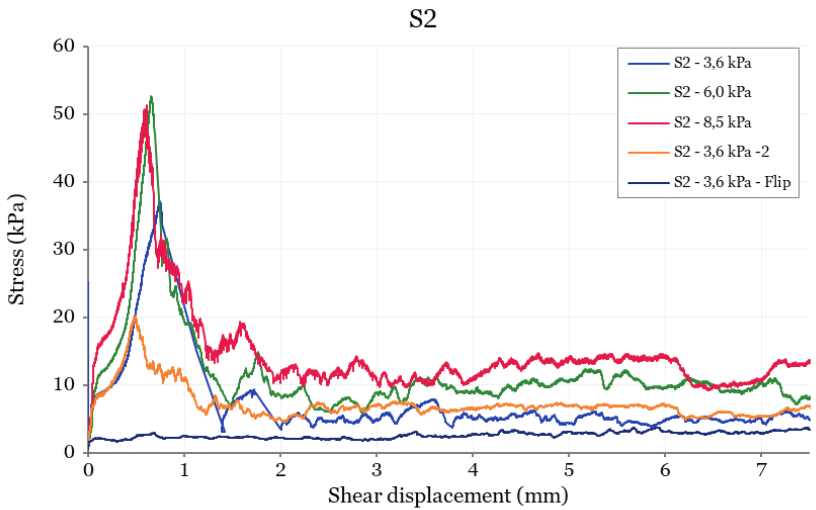




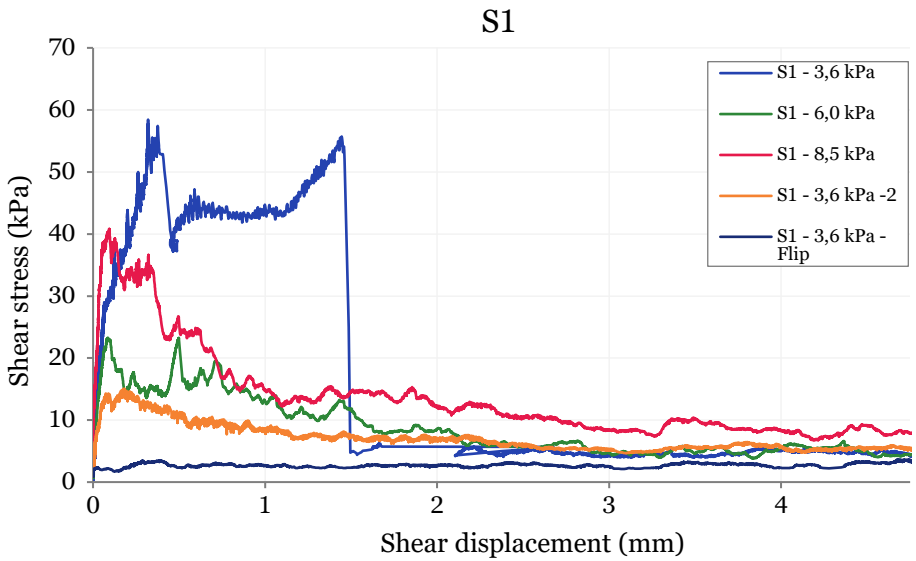
S3 (150x150 mm)



S2 (200x200 mm)



S1 (95 x 95 mm)



Definite tilting during test

Either the whole sample (3,6 kPa), or top half (rest of stages) was tilting during tests

- Displacement measurements unreliable in smaller samples

Leikkauskokeiden tulokset

Peak shear strength of tests τ_{peak} (kPa)

	S1	*S2*	*S3*	*S4*	*S5*	*X1*	*X2*
Sample size (mm)	95x95	150x150	200x200	250x500	500x250	250x250	1000x2000
3,6 kPa	55.4	37.3	35.7	14.2	17.7	27.2	6.9
6,0 kPa	23	52.5	36.2	17.8	18.4	30.3	9.5
8,5 kPa	40.5	51.3	37.8	21.3	23.3	31.1	12
3,6 kPa – 2	15.4	20.1	15	9.9	9.3	11.7	5.2
3,6 kPa – Flip	3.2	3.6	3.1	4.8	3.5	4.1	-

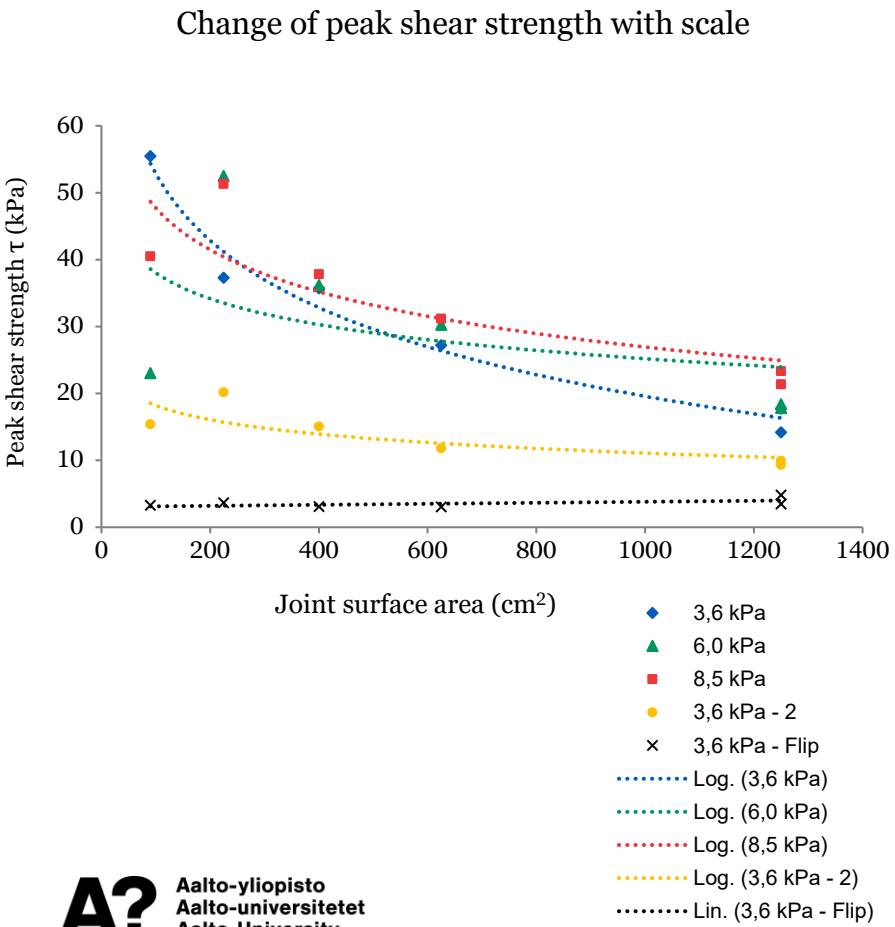
Residual shear strength τ_{res} (kPa)

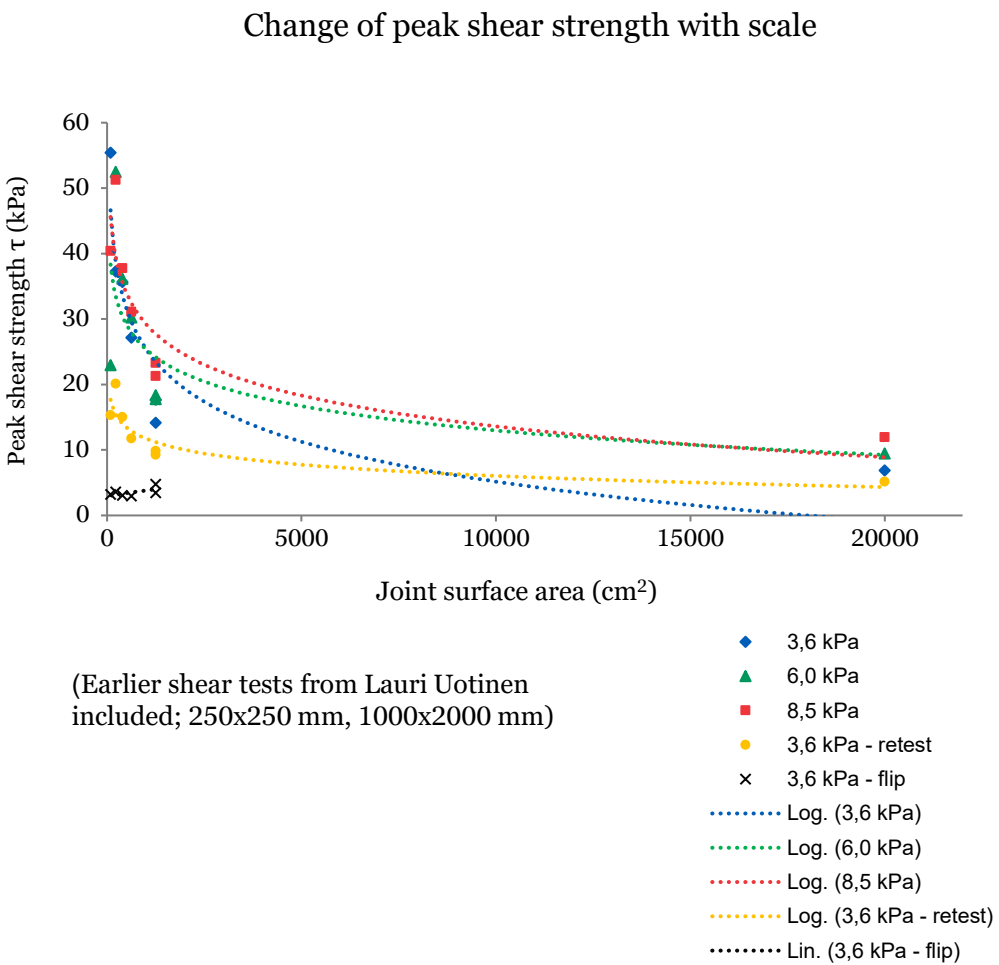
	S1	*S2*	*S3*	*S4*	*S5*	*X1*	*X2*
Sample size (mm)	95x95	150x150	200x200	250x500	500x250	250x250	1000x2000
3,6 kPa	4.7	4.6	5	4.1	4.2	3.6	3.7
6,0 kPa	5	9.6	7.5	7	6.5	5.8	5.4
8,5 kPa	8.3	12.3	10.9	9.5	9.2	7.2	7.9
3,6 kPa - 2	5.5	6.1	4.6	4.1	4.1	3.5	3.2
3,6 kPa - Flip	3	3.1	2.1	3.7	2.5	2.8	2.05

Normal stress	S1 95x95	S2 150x150	S3 200x200	X1 250X250	S4 250x500	S5 500x250	X2 1000x2000
3.6	86	84	84	82	76	79	62
6	75	83	81	79	71	72	58
8.5	78	81	77	75	68	70	55

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)$$

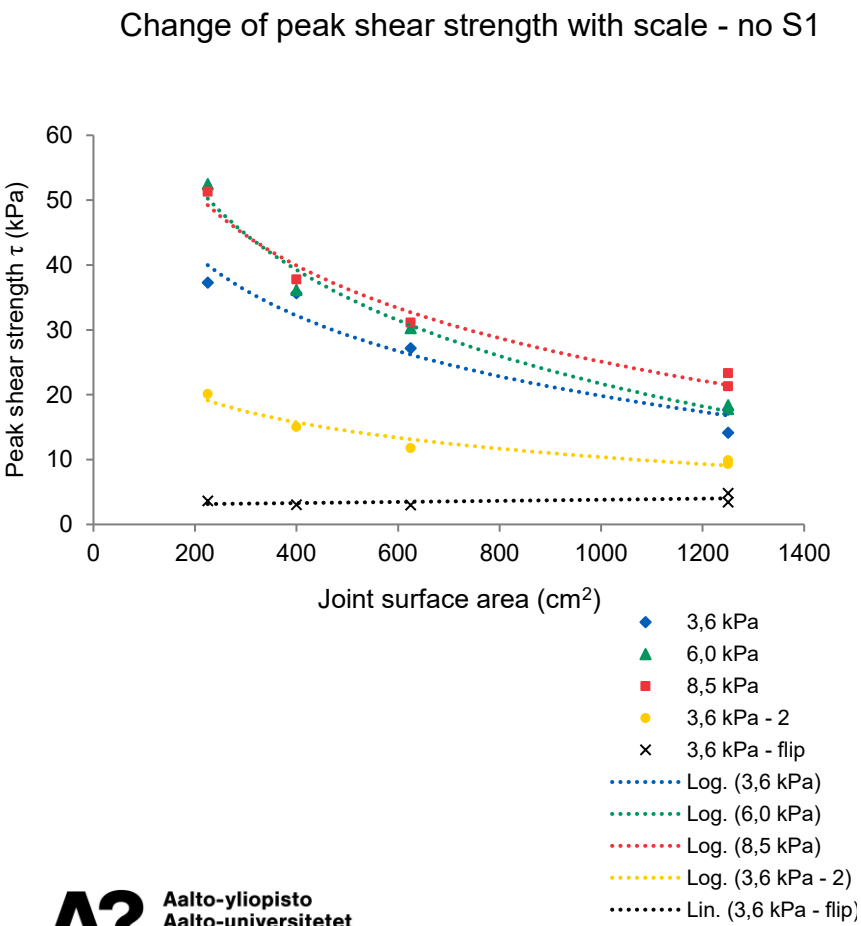
Mittakaavavaikutus huippukitkakulmassa

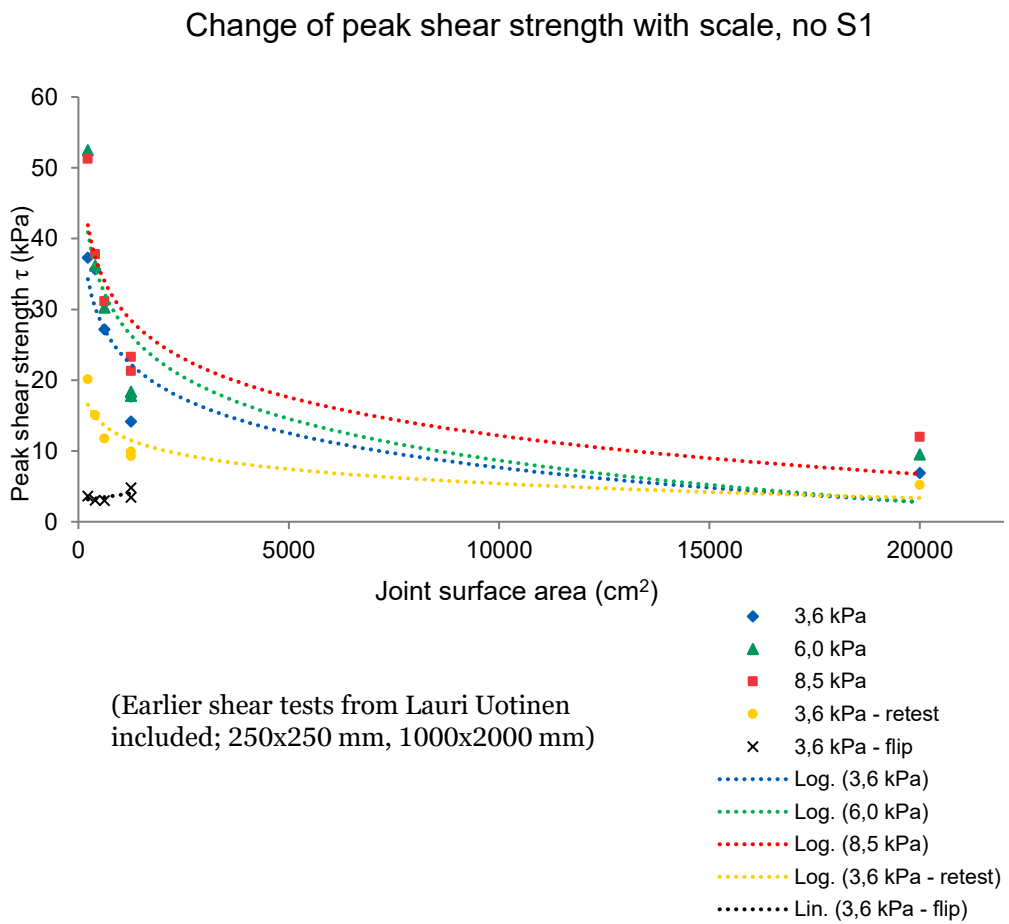




(Earlier shear tests from Lauri Uotinen included; 250x250 mm, 1000x2000 mm)

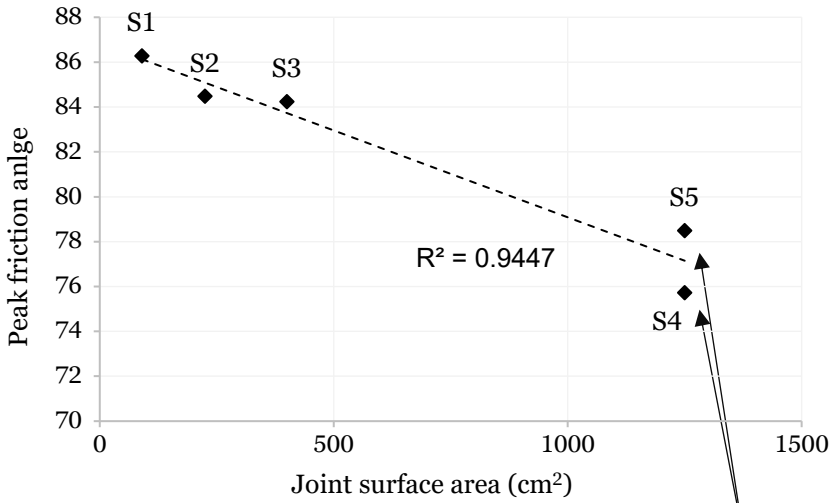
Tulokset ilman S1:tä

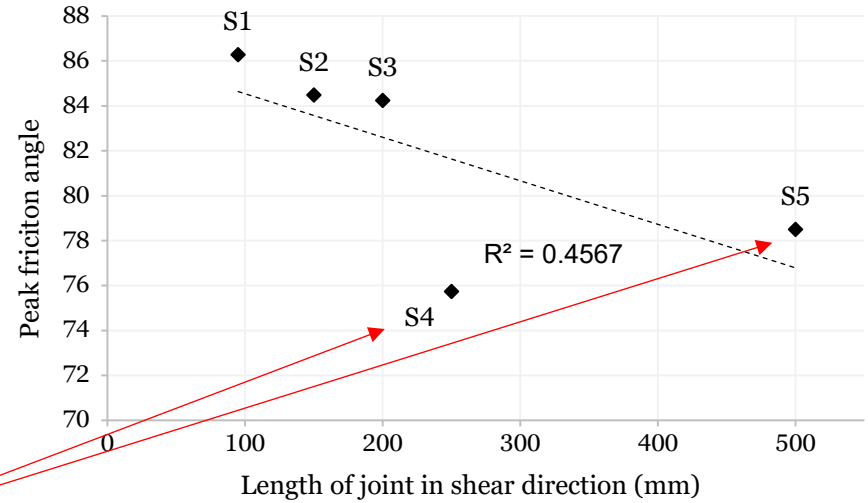




(Earlier shear tests from Lauri Uotinen included; 250x250 mm, 1000x2000 mm)

Raon pinta-ala vs raon pituus

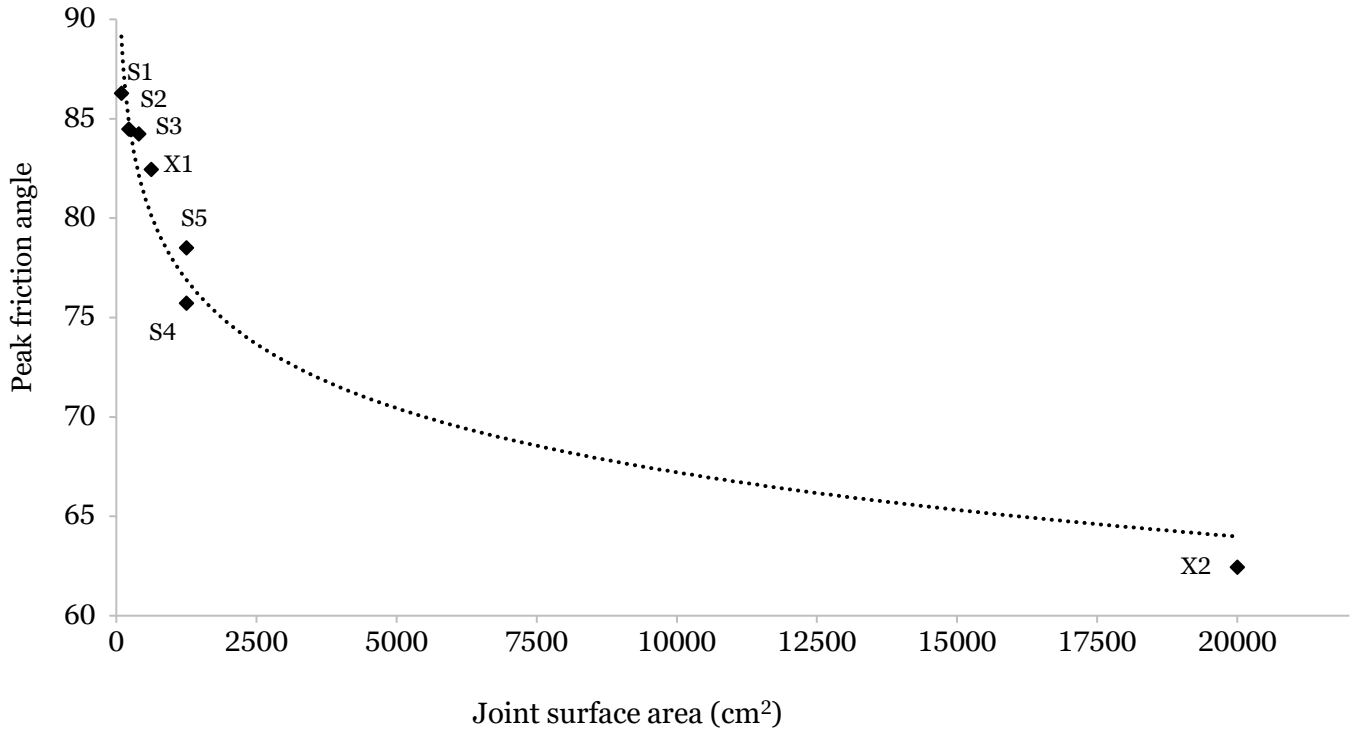




Sama pinta-ala: 250 x 500 mm, eri pituus leikkaussuunnassa

➔ Pinta-ala vaikuttaa relevantimmalta ominaisuudelta kuin pituus

Mittakaavavaikutus huippukitkakulmassa



Samankaltaisia tuloksia kirjallisuudessa

Bandis et al. 1981
Reported mechanism: different sized asperities control the strength of different sized joints. Contact areas changed, dilation decreased

Yoshinaka et al. 1993
Reported mechanism: contact area decreased as joint size increased.

Scale Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints

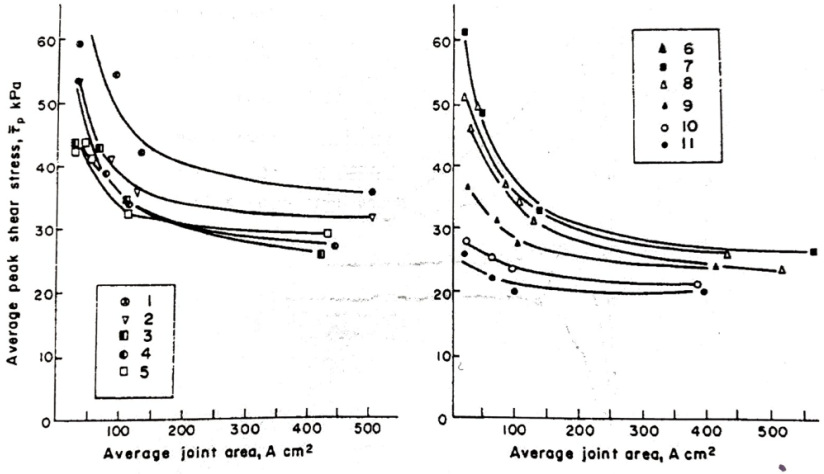


Fig. 10. Variation of average peak shear stress with joint specimen area.

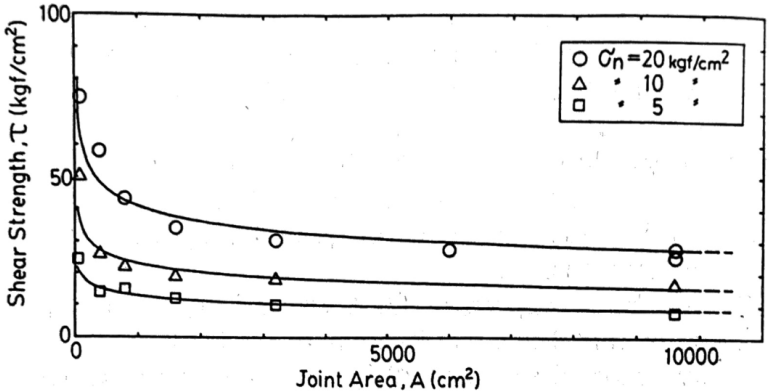


Fig.3 Relationship between peak shear strength and joint area on a regular scale

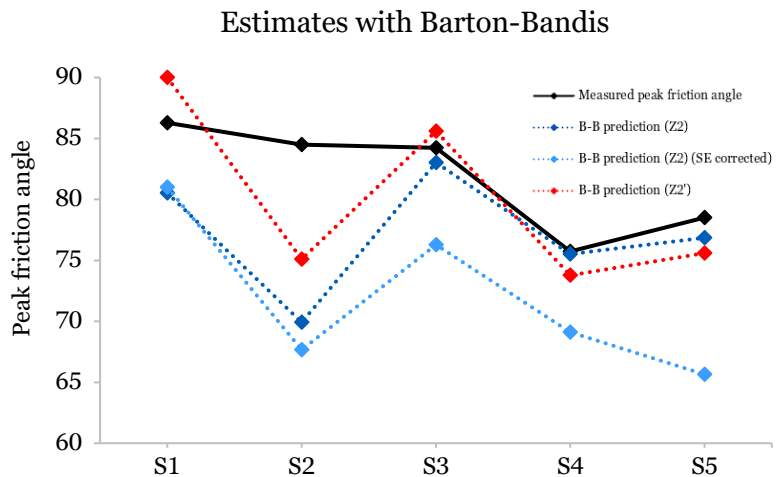
Huippukitkakulman laskut

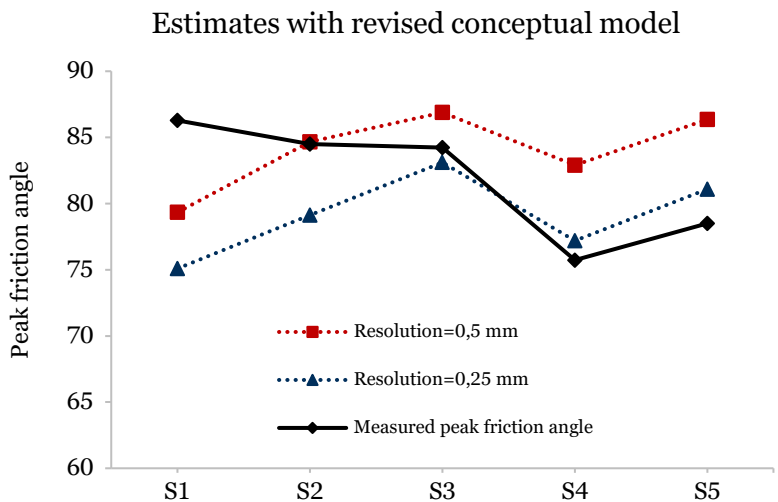
Difference between prediction and test (degrees)

Criterion	*S1*	*S2*	*S3*	*S4*	*S5*
B-B prediction (Z2)	-5,8	-14,6	-1,2	-0,2	-1,6
B-B prediction (Z2) (SE corrected)	-5,3	-16,8	-8,0	-6,6	-12,9
B-B prediction (Z2')	3,7	-9,4	1,3	-2,0	-2,9
Johansson-Stille conceptual model, resolution = 0,5 mm	-6,9	0,2	2,6	7,2	7,9
Johansson-Stille conceptual model, resolution = 0,25 mm	-11,2	-5,4	-1,1	1,5	2,6

Average absolute error between prediction and test (%)

	All samples	*Only S3, S4, S5*
B-B prediction (Z2)	5.5 %	1.3 %
B-B prediction (Z2) (SE corrected)	12.1 %	11.5 %
B-B prediction (Z2')	4.7 %	2.6 %
Johansson-Stille conceptual model, resolution = 0,5 mm	6.2 %	7.5 %
Johansson-Stille conceptual model, resolution = 0,25 mm	5.2 %	2.2 %





Dilataatio positiivisissa ja negatiivisissa mittakaavavaikutuksissa

Positive (a) and negative (b) scale effect (Kutter & Otto, 1990)

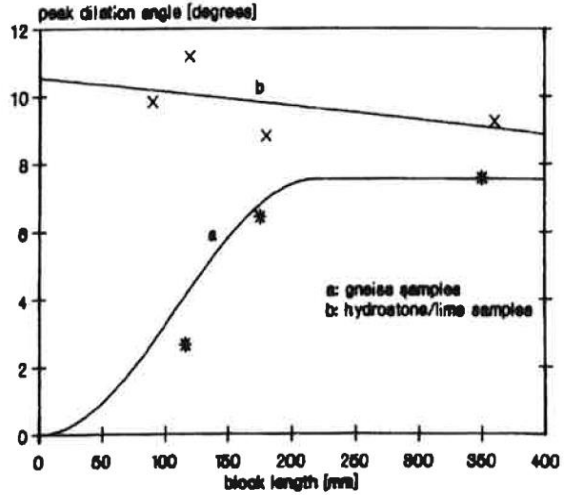


Fig. 5 Variation of peak dilation angle with block length; a) well and b) poorly matching joint surfaces

A strong negative scale effect (Bandis et al. 1981).

S. Bandis, A. C. Lumsden and N. R. Barton

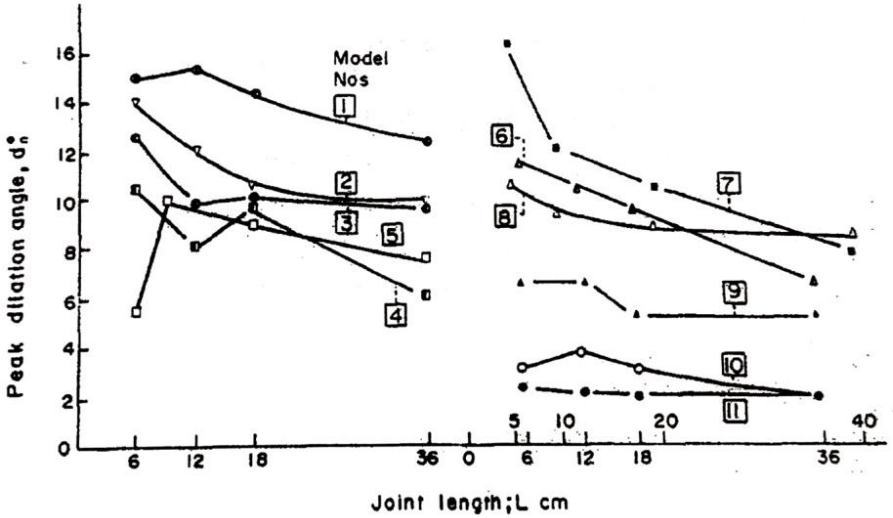


Fig. 15. Variation of peak dilation angles with increasing length of joint specimen.

Dilataatio

Peak shear strength of joints is mainly dictated by their dilation characteristics (Kutter and Otto, 1990).

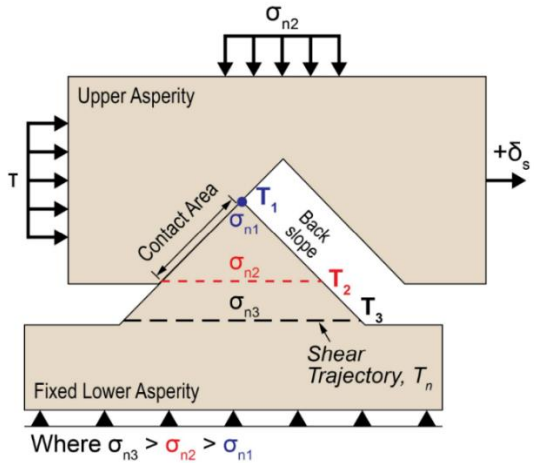
Correcting DST results for strength brought by dilation negated scale effect in study by Hencher et al. (1993).

- Some dilation correction such as the method by Hencher et al. (1995) might tackle scale effects caused by change in geometrical component of strength observed in DST results. It seems a sound idea when considering shear strength of large joints in low stress conditions.
- Further study with proper dilation and contact area measurements would be required to fully explain the results of this thesis, along with bringing validity from multiple results per joint size.

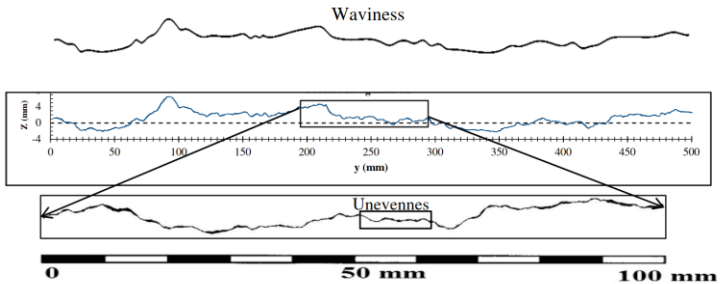
Tulkinta mittakaavavaikutuksesta

Miksi yhteensopivien näytteiden tuloksissa on ristiriitaa?

- Pienen mittakaavan karheuden läpi leikkaaminen suurempien normaalivoimien takia saattaa johtaa erilaiseen leikkauksen mekanismiin sekä suhteessa alhaisempiin dilataatiokulmiin pienemmissä näytteissä sekä mahdollisesti negatiivisten mittakaavavaikutusten negaatioon.
- Alhaisemmat normaalikuomat mahdollistavat enemmän kallistumista, sekä suhteessa huonomman yhteensopivuuden, jotka molemmat saattavat korostaa negatiivisia mittakaavavaikutuksia.
- Kun mittakaava kasvaa, karheuden kompositio muuttuu. Tämä saattaa vaikuttaa kontaktin alaan sekä johtaa erilaisiin murtumistapoihin.



(MacDonald et al., 2023), after (Li et al., 2018)



(Azinfar et al., 2019)

Jatkotutkimuksen aiheita

- Samojen kokeiden toteuttaminen lisänäytteillä. Useampi tulos samalla näytekoolla vahvistaisi tulosten pätevyyttä. Dilataation mittaaminen on tärkeää, ja se auttaisi tämän diplomityön tulosten tulkinnassa.
- Mittakaavavaikutuksen tutkiminen CNS-olosuhteissa, sekä korkeammilla normaalivoimilla.
- Kallistumisen vaikutuksen tutkiminen eri leikkauskoejärjestelyissä
- Miten eri mittakaavavaikutukset esiintyvät luonnonraoissa, ja missä olosuhteissa leikkauskokeet vastaavat rakojen todellista käyttäytymistä
- Automatisoitujen sekä nopeiden menetelmien ja työkalujen kehittäminen karheuden arviointiin fotogrammetriaan tai laserskannaukseen perustuen.

Johtopäätökset

Testit osoittivat selkeästi negatiivisen mittakaavavaikutuksen, jossa huippuleikkauslujuus laskee rakokoon suuretessa.

- Myös hyvin yhteensopivat raot voivat tuottaa vahvasti negatiivisen mittakaavaikutuksen, vaikka aiemmissa tutkimuksissa ne ovat tuottaneet vastakkaisia tuloksia.
- Muutos leikkauslujuudessa korreloi vahvemmin rakojen pinta-alan muutoksen kanssa, kuin rakojen pituuden muutoksen kanssa.
- Kallistuminen näytti vaikuttavan kokeiden tuloksiin sekä kirjallisuuden tutkimusten tuloksiin. Se saattaa aiheuttaa erillisen mittakaavavaikutuksen, koska näytteiden geometria usein muuttuu näytekoon kasvaessa. Se saattaa olla osittain pienten näytteiden suuremman hajonnan takana.
- Barton-Bandis Z_2' –karheudella oli tarkin 4,7 % keskiarvoisella absoluuttisella virheellä kitkakulmassa. Sen virhe näytteille virhe näytteille S3, S4, S5 oli 5,2 %, kun Barton-Bandis:in oli 1,3 %, ja conceptual model:in oli 2,2 %.
- Edustava mittakaava tutkimuksen olosuhteissa on todennäköisesti 70x70 cm - 120x120 cm, mutta lisää dataa vaadittaisiin varmistamaan tämä.

Viittaukset

Azinfar, M. J., Ghazvinian, A. H., & Nejati, H. R. (2019). Assessment of scale effect on 3D roughness parameters of fracture surfaces. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 23(1), 1–28. https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1262286

Ankah, M. L. Y., Sunkpal, D. T., Zhao, X., & Kulatilake, P. H. S. W. (2022). Role of heterogeneity on joint size effect, and influence of anisotropy and sampling interval on rock joint roughness quantification. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 8(3). https://doi.org/10.1007/s40948-022-00413-2

Bahaaddini, M., Hagan, P. C., Mitra, R., & Hebblewhite, B. K. (2014). Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study. Engineering Geology, 181, 212–223. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.018 a

Bandis, S., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1981). Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 18(1), 1–21. https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90262-X

Barton, N., & Bandis, S. (1980). Some effects of scale on the shear strength of joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And, 17(1), 69–73. https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90009-1

Barton, N., & Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. In Rock Mechanics (Vol. 10).

Girardeau-Montaut, D. (2024). CloudCompare, v2.14.alpha. Https://Www.Danielgm.Net/Cc/.

Hencher, S. R. (1995). Interpretation of direct shear tests on rock joints. In S. Daemen (Ed.), 35th US symposium on Rock Mechanics. A A Balkema.

Hencher, S. R., Toy, J. P., & Lumsden, A. C. (1993). Scale dependent shear strength of rock joints . In Pinto da Cunha (Ed.), Scale Effects in Rock Masses (pp. 233–240). Balkema, Rotterdam.

Huang, M., Hong, C., Du, S., & Luo, Z. (2020). Experimental Technology for the Shear Strength of the Series-Scale Rock Joint Model. Rock Mechanics and Rock Engineering, 53(12), 5677–5695. https://doi.org/10.1007/s00603-020-02241-w

Johansson, F. (2016). Influence of scale and matedness on the peak shear strength of fresh, unweathered rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 82, 36–47. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.11.010

Kutter, H. K., & Otto, F. (1990). Influence of parallel and cross joints on shear behaviour of rock discontinuities. In Barton & Stephabnsson (Ed.), International symposium on rock joints (pp. 243–250). Balkema, Rotterdam.

Viittaukset

Li, Y., Song, L., Jiang, Q., Yang, C., Liu, C., & Yang, B. (2018). Shearing performance of natural matched joints with different wall strengths under direct shearing tests. Geotechnical Testing Journal, 41(2), 371–389. https://doi.org/10.1520/GTJ20160315

Li, Y., Yang, H., & Sun, S. (2022). Unveiling the mystery of scale dependence of surface roughness of natural rock joints. Scientific Reports, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-04935-3

MacDonald, N. R., Packulak, T. R. M., & Day, J. J. (2023). A Critical Review of Current States of Practice in Direct Shear Testing of Unfilled Rock Fractures Focused on Multi-Stage and Boundary Conditions. In Geosciences (Switzerland) (Vol. 13, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/geosciences13060172

Yoshinaka, R., Yoshida, J., Arai, H., & Arisaka, S. (1993). Scale effects on shear strength and deformability of rock joints. In Pinto da Cunha (Ed.), Scale effects in rock masses 93 (pp. 143–149).