



Väylävirasto  
Trafikledsverket VÄLIRAPORTTI

# Kitkamaalajien lujuus- ja painumaominaisuudet

Väyläviraston julkaisu  
X/2024

105





Monica Löfman, Joonas Tuisku ja Mika Knuuti

# Kitkamaalajien lujuus- ja painumaominaisuudet

Väli­raportti

Väyläviraston julkaisuja X/2024

*Kannen kuva: Johnny Mckane / Pexels (open access -kuvapankki)*

Verkkajulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-Kirjoita xxx-x

LUONNOS

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
puh. 0295 343 000

**Monica Löfman, Joonas Tuisku ja Mika Knuuti: Kitkamaalajien lujuus- ja painu-  
maominaisuudet - Väliraportti.** Väylävirasto Helsinki 2024. Väyläviraston julkaisu  
X/2024. Kirjoita sivumäärä sivua ja Kirjoita liitemäärä liitettä. ISSN 2490-0745, ISBN 978-  
952-317-Kirjoita tähän.

**Avainsanat:** Kirjoita avainsanat

## Tiivistelmä

Kirjoita tiivistelmäteksti

LUONNOS

**Monica Löfman, Joona Tuisku ja Mika Knuuti:** Kirjoita julkaisun otsikko ruotsiksi. - Kirjoita alaotsikko ruotsiksi.. Trafikledsverket. Helsingfors 2024. Trafikledsverkets publikationer X/2024. Kirjoita sivumäärä sidor och Kirjoita liitemäärä bilagor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-Kirjoita tähän.

## Sammanfattning

Kirjoita tiivistelmäteksti

LUONNOS

**Monica Löfman, Joona Tuisku ja Mika Knuuti:** Kirjoita julkaisun otsikko englanniksi.  
- Kirjoita alaotsikko englanniksi.. Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2024.  
Publications of the FTIA X/2024. Kirjoita sivumäärä pages and Kirjoita liitemäärä appen-  
dices. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-Kirjoita tähän.

## Abstract

Kirjoita tiivistelmäteksti

LUONNOS

## Esipuhe

*Ohjeteksti: Esipuheessa selostetaan lyhyesti julkaisun taustaa ja tarkoitusta ja kerrotaan työhön osallistuneiden henkilöiden ja yhteisöjen osuudet.*

Kirjoita esipuhe

Helsingissä Kirjoita kuukausikuussa 2024

Väylävirasto

Kirjoita vastuuosasto/yksikkö

LUONNOS



# Sisältö

KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT .....	8
1 JOHDANTO.....	10
2 YLEISTÄ KITKAMAALAJEISTA.....	13
2.1 Kitkamaalajit ja niiden rakeisuus.....	13
2.2 Maan tiheys ja huokoisuus .....	14
2.3 Tiiveys .....	15
2.4 Leikkauslujuus .....	17
2.5 Painumaominaisuudet.....	18
2.6 Kitkamaakerrosten kairausmenetelmät.....	19
3 KIRJALLISUUSSELVITYS .....	20
3.1 Kitkamaalajien tiiveys kairausvastuksen perusteella.....	20
3.1.1 Tiiveyden arvioiminen kairausvastuksen avulla .....	20
3.1.2 Kuivatilavuuspainon arvioiminen kairausvastuksen avulla .....	21
3.1.3 Kairauskaluston muutosten vaikutus kairausvastukseen .....	25
3.2 Karkea siltti .....	26
3.2.1 Tilavuuspaino.....	26
3.2.2 Lujuusominaisuudet.....	29
3.2.3 Painumaominaisuudet.....	31
3.3 Hiekka.....	34
3.3.1 Tilavuuspaino.....	34
3.3.2 Lujuusominaisuudet.....	35
3.3.3 Painumaominaisuudet.....	41
3.4 Sora.....	48
3.4.1 Tilavuuspaino.....	48
3.4.2 Lujuusominaisuudet.....	49
3.4.3 Painumaominaisuudet.....	51
3.5 Moreeni.....	55
3.5.1 Tilavuuspaino.....	55
3.5.2 Lujuusominaisuudet.....	58
3.5.3 Painumaominaisuudet.....	64
3.6 Rakennetut louhetäytöt ja murskeet .....	68
3.6.1 Louheen tilavuuspaino .....	68
3.6.2 Louheen lujuusominaisuudet .....	69
3.6.3 Louheen painumaominaisuudet .....	69
3.6.4 Murskeiden ominaisuudet.....	70
4 YHTEENVETO .....	72
LIITTEET	
Liite 1	Taulukkoarvojen historiaa
Liite 2	Tilavuuspainon kirjallisuusarvot
Liite 3	Ruotsalaiset ja norjalaiset taulukkoarvot
Liite 4	Kitkamaalajien ominaisuuksien arviointi kairausvastuksen avulla (erikoistyö, Ida-Maria Savila)

## Käytetyt lyhenteet ja symbolit

Käytetyt maalajilyhenteet (GEO-luokituksen mukaiset maalajit sekä vakiintuneet, epävirallisten maalajien lyhenteet):

Lyhenne	Selite
Hk	hiekkamoreeni
hHk	hieno hiekkamoreeni
huHk	humuksinen hiekkamoreeni
HkMr	hiekkamoreeni
hSi	hieno siltti
hkSi	hiekkainen siltti
ljSi	liejuinen siltti
keHk	keskirakeinen hiekkamoreeni
keSi	keskirakeinen siltti
kaHk	karkea hiekkamoreeni
kaSi	karkea siltti
saHkMr	savinen hiekkamoreeni
Si	siltti
siHk	silttinen hiekkamoreeni
siHkMr	silttinen hiekkamoreeni
SiMr	silttimoreeni
Sr	sora
SrMr	soramoreeni

Symbolit:

	Selite	Yksikkö
$c$	koheesio	kPa
$C_u$	raekokosuhte	–
$D$	tiiveysaste	%
$D_r$	suhteellinen tiiveys	–
$E$	kimmomoduuli	kPa, MPa
$e$	huokosluku	–
$e_{max}$	huokosluku löyhimmässä tilassa	–
$e_{min}$	huokosluku tiiveimmässä tilassa	–
$e_0$	alkuhuokosluku eli huokosluku kokeen alussa	
$M$	moduuli (kokoonpuristuvuusmoduuli)	kPa, MPa
$m$	moduuliluku	
$q_c$	kärkivastus (puristinkairaus)	MPa
$\beta$	jännitysekspONENTTI	–
$\gamma$	tilavuuspaino	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	tehokas tilavuuspaino (käytetään pohjavedenpinnan alapuolella)	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_d$	kuivatilavuuspaino	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dmax}$	tiiveintä tilaa vastaava kuivatilavuuspaino	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dmin}$	löyhintä tilaa vastaava kuivatilavuuspaino	kN/m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	pystysuuntainen muodonmuutos	– (myös %)
$\rho$	irtotiheys	g/cm <sup>3</sup> (=t/m <sup>3</sup> )
$\rho_d$	kuivatiheys	g/cm <sup>3</sup> (=t/m <sup>3</sup> )
$\sigma'$	tehokas pystysuuntainen jännitys	kPa
$\sigma_0'$	vallitseva tehokas pystysuuntainen jännitys	kPa
$\sigma_v$	vertailujännitys (100 kPa)	kPa
$\nu$	Poissonin luku	
$\tau$	leikkausjännitys (tai leikkauslujuus)	kPa
$\varphi$	kitkakulma eli leikkauskestävyysskulma	°
$\varphi'$	tehokas kitkakulma	°
$\varphi'_{cs}$	kriittistä tilaa vastaava tehokas kitkakulma	°
$\varphi'_r$	jäännöslujuutta vastaava tehokas kitkakulma	°
$\varphi'_p$	huippulujuutta vastaava tehokas kitkakulma	°
$\psi$	dilataatiokulma	°

# 1 Johdanto

Perustettaessa karkearakeiselle pohjamaalle perustusten kantokestävyys määritetään kantavuuskaavalla. Kantokestävyys vaikuttavat maakerrosten kitkakulma (leikkauskestävyyskulma) ja tilavuuspaino sekä lisäksi myös anturan koko, perustamissyvyys ja kuormituksen epäkeskisyys. Perustusten painumamitoitus taas edellyttää tietoa pohjamaan muodonmuutos- eli painumaominaisuuksista.

Suomessa kitkamaiden (karkea siltti, karkearakeiset maalajit ja moreenimaalajit) lujuus- ja painumaominaisuuksille käytetään yleisesti taulukkoarvoja, jotka perustuvat kairausvastukseen ja maalajiin, koska tarkempaa tietoa ei käytännössä voida yksittäisistä suunnittelukohteista hankkia. Nämä **taulukkoarvot** (ks. Taulukot 1–3 alla) on esitetty muun muassa Väyläviraston (2023) ohjeen Liitteessä 6.

Kitkamaiden ominaisuuksien taulukkoarvot ovat olleet käytössä pitkään ja käyttö perustuu vakiintuneeseen käytäntöön. Taulukkoarvojen sisältö on vuosien saatossa muuttunut jonkin verran, ja kooste taulukoiden eri versioista on Liitteessä 1. Taulukkoarvojen taustalla on empiirisiä korrelaatioita, joiden avulla maan lujuus- tai painumaominaisuus arvioidaan epäsuorasti kairausvastuksen perusteella. Taulukkoarvot oletettavasti perustuvat ruotsalaisiin tutkimuksiin sekä 1960- ja 1970-luvuilla tehtyihin VTT:n tutkimuksiin ja myöhemmin tehtyihin jälkilaskentoihin. Käytettävissä ei kuitenkaan ole ollut yhteenvetoa taulukkoarvojen taustatutkimuksista.

Taulukkoarvoja sovelletaan pääasiassa seuraavasti: (1) maalaji tunnistetaan kairajan havaintojen ja/tai näytteiden perusteella; (2) maakerroksen rakenteellinen tiiveys arvioidaan taulukon kairausvastusten avulla; (3) valitaan ks. tiiveyttä vastaavat lujuus- ja painumaominaisuudet laskentaa varten. Maalajin tunnistaminen näytteiden perusteella on huomattavasti luotettavampi menetelmä kuin kairajan arvio, etenkin syvällä sijaitsevilla maakerroksissa.

Tässä raportissa esitetään kirjallisuusselvityksenä toteutettu taulukkoarvojen taustaselvitys. Raportissa taulukkoarvoja verrataan suomalaisen kirjallisuuteen sekä muun muassa Ruotsin ja Norjan suunnitteluohjeiden taulukkoarvoihin. Työn tavoitteena oli siten laatia yhteenveto taulukkoarvojen taustatutkimuksista sekä arvojen vertailun avulla selvittää, edustavatko taulukkoarvojen lujuus- ja painumaominaisuuksien arvot:

- a. Tyypillisiä arvoja, jolloin vastaisivat maaparametrien keskiarvoja
- b. Varovaisia arvoja, jolloin vastaisivat likimain maaparametrien ominaisarvoja

Epäselvyys edellä kuvatusta voi johtaa taulukkoarvojen konservatiiviseen käyttöön ja siten perustusten murtorajatilan ylimitoitukseen. Toisaalta tulee ottaa huomioon, että mikäli perustusten geometriaa optimoidaan murtorajatilamitoituksessa, voi käyttörajatila (painumat) tulla useammin määrääväksi.

Arvon konservatiivisuus riippuu luonnollisesti tarkasteltavasta rajatilasta. Esimerkiksi tilavuuspainon tapauksessa anturan kantavuusmitoitukseen valittaisiin lähtö-

kohtaisesti arvo vaihteluvälin alapäästä, kun taas tukimuurin mitoituksessa konservatiivinen arvo olisi vaihteluvälin suurempi arvo (kun maan tilavuuspaino muodostaa kuorman).

Tässä raportissa taulukkoarvojen sovelluskohteeksi oletetaan anturan kantavuuden mitoitus ja siten anturan alla olevan maan ominaisuuksien arvioiminen.

*Taulukko 1. Karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella (Väylävirasto 2023, Liite 6).*

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku m	Jännityks eksponentti β	Puristin kairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Paino kairaus P <sub>k</sub> /0,2 m	Heijari kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski tiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka d <sub>10</sub> <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keski tiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka d <sub>10</sub> >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keski tiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

*Taulukko 2. Kairausvastukseen perustuva lujuus- ja muodonmuutosparametrien arviointi soralla ja moreenilla (Väylävirasto 2023, Liite 6).*

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Puristuskairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Painokairaus Pk/0,2 m	Heijarikairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keskitiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	> 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100)* 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keskitiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140

\* jos moreeni ei ole ollut jäätikön puristamana

*Taulukko 3. Rakennettujen louhetäyttöjen lujuus- ja muodonmuutosparametrien likimääräinen arviointi (Väylävirasto 2023, Liite 6).*

Louheen raekoko	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> )	Moduulilukum	Jännityksen eksponentti β	Kitkakulman huippuarvo (°)
Esimurskattu louhe 0...150 / 0...300 mm	17 ... 22	500 ... 2000	0,5	38 ... 42 <sup>(1)</sup>
Louhe 0...300 / 0...600 mm	17 ... 22	300 ... 1500	0,5	38 ... 42 <sup>(1)</sup>

(1) Kitkakulman arvona voidaan käyttää arvoa >42° vain, jos voidaan osoittaa täytön kitkakulman olevan esitetyn suuruinen. Täyttöön käytetyn louheen rakeisuus ja tiiveys rakenteessa tulee lisäksi olla selvitettyä.

## 2 Yleistä kitkamaalajeista

### 2.1 Kitkamaalajit ja niiden rakeisuus

Taulukkoarvot koskevat seuraavia maalajeja, joita tässä raportissa kutsutaan *kitkamaalajeiksi* (maalajiryhmät: H = hienorakeiset maalajit; K = karkearakeiset maalajit; M= moreenimaalajit):

- karkea siltti<sup>(H)</sup>
- hieno hiekka<sup>(K)</sup>
- hiekka<sup>(K)</sup>
- sora<sup>(K)</sup>
- moreeni<sup>(M)</sup>
- rakennettu louhetäyttö<sup>(K)</sup>

Kitkamaalajeille on tyypillistä se, että niiden leikkauslujuus muodostuu pääasiassa rakeiden kosketuskohdissa vaikuttavasta kitkasta (Tammirinne 1969). Usein kitkamaalajien määritelmä käsittää yllä olevista vain hienon hiekan, hiekan sekä soran, mutta tässä raportissa termiä käytetään laajemmassa merkityksessä (ml. karkea siltti, moreenimaalajit sekä rakennettu louhetäyttö).

Suomen maaperän ominaisuudet ovat paikallisen geologisen historian tuotosta, joten kitkamaalajien ominaisuuksien osalta kansainvälistä tutkimiskirjallisuutta ei yleensä voida sellaisenaan soveltaa Suomessa (Tammirinne 1969).

Suomessa käytetyn GEO-luokituksen (Korhonen, Gardemeister & Tammirinne 1977) mukaan siltilajitteen raekoko on  $>0,002...0,06$  mm, ja *karkealla siltilillä* (kaSi) raekoko on  $>0,02...0,06$  mm. GEO-luokituksen mukaan silttien hienoainepitoisuus (raekoko  $\leq 0,06$  mm) on  $\geq 50$  paino-% ja savilajitetta (raekoko  $\leq 0,002$  mm) on alle 30 paino-%.

Vastaavasti hiekkalajitteen raekoko on  $>0,06...2,0$  mm, ja hienohiekalla  $>0,06...0,2$  mm. Taulukkoarvoissa erottelu hiekan ja hienon hiekan välillä perustuu  $d_{10}$ -lukuun eli hallitsevaan raekokoon (eli se raekoko, jossa rakeisuuskäyrän läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko sijaitsee), eli:

- hieno hiekka,  $d_{10} < 0,06$  mm
- hiekka,  $d_{10} > 0,06$  mm

Toisin sanoen taulukon hieno hiekka sisältää ainakin 10 % hienoainesta (yleensä siltilajitetta).

GEO-luokituksessa alalajite (esim. hienohiekka) ei kuitenkaan näy maalajin nimessä (esim. hiekka, Hk). Muun muassa pohjatutkimusten infraformaattissa on kuvattu epäviralliset maalajit tunnuksineen, ja näitä tunnuksia on käytetty tässä julkaisussa (esim hienohiekka, hHk).

Käytöstä poistuneen *rakennusteknillisen maalajiluokituksen* karkea hieta vastaa likimain hienoa hiekkaa, ja hieno hieta vastaa karkeaa silttiä.

Kitkamaalajien lajittuneisuuden (tasarakeisuuden) mittana käytetään raekokosuhdetta  $C_u = d_{60}/d_{10}$  (Korhonen, Gardemeister & Tamminne 1977):

- jos  $C_u \leq 5$ , maalaji on tasarakeinen (lajittunut)
- jos  $C_u > 5 \dots 15$ , maalaji on sekarakeinen
- jos  $C_u > 15$ , maalaji on suhteistunut

Raekokosuhte vaikuttaa mm. maalajin huokoisuuteen: sekarakeisessa maalajissa pienet rakeet täyttävät suurempien rakeiden väliset tyhjät tilat ja näin pienentävät huokoisuutta.

## 2.2 Maan tiheys ja huokoisuus

Kitkamaalajien tiheys riippuu niiden mineraalikoostumuksesta, raekokojakaumasta ja vesipitoisuudesta. Maan **tilavuuspaino**  $\gamma$  (yksikkönä  $\text{kN/m}^3$ ) määritetään **irtotiheydestä**  $\rho$  seuraavasti:

$$\gamma = \rho g \quad (2-1)$$

missä  $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys kiihtyvyys ( $=9,81 \text{ m/s}^2$ ). Irtotiheys on luonnonkosteaa maa-aineksen tiheys (yksikkönä  $\text{g/cm}^3$  eli  $\text{t/m}^3$ ). Pohjavedenpinnan alapuolella käytetään **tehokasta tilavuuspainoa**  $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ , missä  $\gamma_w$  on veden tilavuuspaino ( $9,81 \text{ kN/m}^3 \approx 10 \text{ kN/m}^3$ ).

Maan huokokset sisältävät ilmaa ja/tai vettä. Jos maa on kuivaa eli vesipitoisuus  $w = 0 \%$ , maan tilavuuspaino vastaa **kuivatilavuuspainoa**  $\gamma_d$ . Kuivatilavuuspainon määritelmä on muutoin sama kuin tilavuuspainolla sillä erotuksella, että tiheyden laskennassa käytetään maa-aineksen kuivamassaa luonnonkosteaa massan sijasta.

**Kiintotiheys**  $\rho_s$  on maa-aineksen kivrakeiden tiheys, ja Suomessa esiintyville kitkamaalajeille sen arvoksi voidaan yleensä olettaa  $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$  (Valkeisenmäki 1973).

**Huokosluku**  $e$  tarkoittaa huokostilavuuden ja kiinteän maa-aineksen tilavuuden suhdetta. Maan huokosluvun  $e$  ja kuivatilavuuspainon välillä on yhteys  $\gamma_d$ :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\rho_s g}{1+e} \quad (2-2)$$

missä termiä  $\gamma_s$  kutsutaan ominaispainoksi (yksikkö  $\text{kN/m}^3$ ). **Huokoisuus**  $n$  kuvaa huokostilavuuden prosenttiosuutta koko tilavuudesta. Huokosluvun ja huokoisuuden  $n$  välillä on yhteys:  $e = n/(100-n)$ .

Jos luonnonkosteaa maan tilavuuspaino  $\gamma$  ja vesipitoisuus  $w$  ovat tiedossa, voidaan kuivatilavuuspaino  $\gamma_d$  määrittää seuraavan kaavan avulla:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w}{100}} \quad (2-3)$$

Suomen kitkamaalajien vesipitoisuuksia on koostettu mm. julkaisussa Suomen maalajien ominaisuuksia (Ronkainen 2012).



Jos maa on täysin vedellä kyllästynyt (kyllästysaste  $S_r = 100\%$ ), maan vesipitoisuus voidaan laskea huokosluvusta ja kiintotiheydestä:

$$w = \frac{e\rho_w}{\rho_s} \cdot 100\% \quad (2-4)$$

missä  $\rho_w$  on veden tiheys eli  $\rho_w = 0,981 \text{ g/cm}^3 \approx 1,0 \text{ g/cm}^3$ .

Jos maa on osittain kyllästynyt, maan luonnontilainen tilavuuspaino voidaan laskea seuraavasti huokosluvun avulla:

$$\gamma = \frac{(\rho_s + (\frac{S_r}{100\%})e)\gamma_w}{1+e} \quad (2-5)$$

Kuivalle maalle ( $S_r = 0\%$  ja  $w = 0\%$ ) pätee  $\gamma = \gamma_d$ .

Koska maarakeiden tiheys on aina suurempi kuin vedellä, ja vesi on raskaampaa kuin ilma, pätee luonnonkostealle maa-ainekselle seuraava suuruusjärjestys:

$$\gamma_s > \gamma > \gamma_d > \gamma' \cong \gamma_w$$

Täysin vedellä kyllästyneen maan tilavuuspaino  $\gamma$  on suurempi kuin osittain kyllästyneen maan tilavuuspaino.

## 2.3 Tiiveys

Kitkamaalajien leikkauslujuus ja kokoonpuristuvuus riippuvat ratkaisevasti maan tiiveydestä. Tiiveyden tunnuslukuna voidaan käyttää **suhteellista tiiveyttä**  $D_r$ , joka määritellään joko kuivatilavuuspainon  $\gamma_d$  (Helenelund 1966) tai huokosluvun  $e$  perusteella:

$$D_r = \left( \frac{1}{\gamma_{dmin}} - \frac{1}{\gamma_d} \right) / \left( \frac{1}{\gamma_{dmin}} - \frac{1}{\gamma_{dmax}} \right) \quad (2-6)$$

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2-7)$$

missä  $\gamma_{dmax}$  on kuivatilavuuspaino tiiveimmässä tilassa,  $\gamma_{dmin}$  kuivatilavuuspaino löyhimmässä tilassa,  $e_{min}$  on huokosluku tiiveimmässä tilassa ja  $e_{max}$  on huokosluku löyhimmässä tilassa. Kitkamaalajien  $e_{min}$  ja  $e_{max}$  voidaan määrittää esim. Kolbuszewskin kokeella. Maksimikuivatilavuuspaino  $\gamma_{dmax}$  taas määritetään yleensä Proctor-sullontakokeella. Kansainvälisissä koonneissa on havaittu, että kitkamaiden suhteellinen tiiveys  $D_r$  on pääosin alle 0,8 (Tammirinne 1969).

Tiiveyden tunnuslukuna useammin käytetään **tiiveysastetta**  $D$ :

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \cdot 100\% \quad (2-8)$$

Monilajitteisissa maalajeissa, kuten moreeneissa, nämä löyhimmän ja tiiveimmän tilan arvot vaihtelevat verrattain vähän, jolloin pelkkää kuivatilavuuspainoa  $\gamma_{dmin}$  (tai huokoslukua  $e$ ) voidaan käyttää maan tiiveysasteen likimääräisenä arviona (Helenelund 1966). Myös muille kitkamaalajeille on tullut tavaksi käyttää tätä yksinkertaistusta.

Maakerroksen rakenteellinen tiiveys on yleensä sitä suurempi, mikä karkearakeisempi maalaji on kyseessä ja mitä suurempi raekokosuhte  $C_u$ . Myös raemuodolla on jonkinasteinen vaikutus: vakioläpimittaisista rakeista muodostunut kitkamaalaji tiivistyy paremmin kuin litteistä rakeista muodostunut maalaji. Näiden lisäksi tiiveyteen vaikuttaa vesipitoisuus: yleensä kitkamaalajin tiivistyminen tapahtuu parhaiten sen optimivesipitoisuudessa. (Tammirinne 1969).

GEO-luokituksessa (Korhonen, Gardemeister & Tammirinne 1977) karkearakeisten maalajien ja moreenien sekä siltin rakenteellinen tiiveys arvioidaan kuivatilavuuspainon perusteella, ja tiiveydestä käytetään Taulukon 4 mukaisia nimityksiä (taulukkoa sovellettaessa maakerrosten tilavuuspaino määritetään raekooltaan alle 60 mm aineksesta. Jos maakerroksessa on kiviä, pitää tehdä tilavuuspainon korjaus):

*Taulukko 4. Maakerrosten rakenteellinen tiiviys GEO-luokituksen mukaan (Korhonen, Gardemeister & Tammirinne 1977).*

Taulukko 12. Maakerrosten rakenteellinen tiiviys.

Nimitys	Kuivatilavuuspaino $\gamma_d$ , kN/m <sup>3</sup> *)			
	Hiekkainen siltti	Hiekka	Sora	Moreeni
löyhä	≤ 14,0	≤ 16,0	≤ 18,0	≤ 19,0
keskitiivis	> 14,0...16,0	> 16,0...18,0	> 18,0...20,0	> 19,0...21,0
tiivis	> 16,0	> 18,0	> 20,0	> 21,0

\*) 10 kN/m<sup>3</sup> ≈ 1 Mp/m<sup>3</sup>

Helenelund (1966) on esittänyt kitkamaalajien tiiveysluokittelun perustuen suhteelliseen tiiveyteen  $D_r$  (Taulukko 5). Lisäksi Helenelund (1966) esitti kuivatilavuuspainoon  $\gamma_d$  tiiveysluokituksen hiekalle, ja sittemmin luokitusta on käytetty hiekan lisäksi myös muille kitkamaalajeille kuten soralle ja karkealle hietalle (hienolle hiekalle) yleisemmin (Korhonen 1966). Moreenimaalajin tiiveysluokitus on esitetty Helenelundin (1964a) julkaisussa. Nämä 60-luvun julkaisujen luokitukset hieman poikkeavat GEO-luokituksen arvoista.

*Taulukko 5. Kitkamaalajien tiiveysluokituksia.*

Lähde a)	Maalaji(t)	Luokitus- peruste	Hyvin löyhä	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	Hyvin tiivis
A	Hiekka (kitkamaalajit)	$D_r$ (%)	<15	15...35	35...65	65...85	>85
A, B	Hiekka, hieno hiekka ja sora	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	<14	14...16	16...18	18...20	>20
B, C	Moreenimaalajit	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13...15	15...17	17...19	19...21	21...23

a) A = Helenelund (1966); B = Korhonen (1966); C = Helenelund (1964a).

## 2.4 Leikkauslujuus

Maan leikkauslujuus koostuu kitkasta ja koheesiosta. Mohr-Coulombin murtokriteerin mukaan:

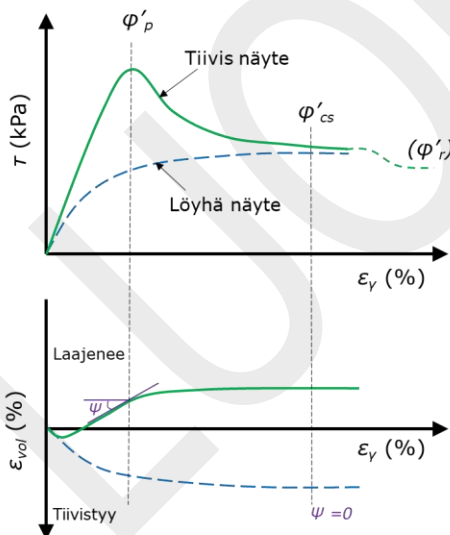
$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad (2-9)$$

, missä  $\tau$  on leikkauslujuus,  $c$  on koheesio,  $\sigma'$  on tehokas normaalijännitys, ja  $\varphi$  on kitkakulma (leikkauskestävyysskulma). Laboratoriossa nämä leikkauslujuusparametrit voidaan määrittää rasialeikkaukskokeella, suoralla leikkaukskokeella tai kolmiakiaalikoikeella.

Kitkamaalajeilla koheesion osuus leikkauslujuudesta on olematon tai vähäinen. Monesti kitkamaalajien koheesioksi oletetaan  $c = 0$ .

Jos kitkamaalaji sisältää vettä, saattaa siinä ilmetä ns. näennäistä koheesiota, joka aiheutuu rakeiden pinnassa olevan veden pintajännityksestä. Siltti- ja moreenimaalajeissa leikkauslujuus muodostuu sekä kitkasta että koheesiosta. (Tamminen 1969).

Toisen sukupolven Eurokoodeissa maaparametrien osavarmuusluvut on määritelty erikseen maan kitkakulmille  $\varphi'_p$ ,  $\varphi'_{cv}$  ja  $\varphi'_r$ . Suomessa ollaan yleisimmin käytetty huippulujuutta vastaavaa tehokasta kitkakulmaa  $\varphi'_p$  (ks. Kuva 1), ja taulukkoarvojen kitkakulmat voidaan olettaa vastaavan näitä arvoja.



**$\varphi'_p$  = huippulujuutta vastaava tehokas kitkakulma**  
Suomessa yleisimmin käytettävä kitkakulman määritelmä.

**$\varphi'_{cs}$  = kriittistä tilaa vastaava tehokas kitkakulma**  
Kriittinen tila = leikkausmuodonmuutosten kasvaessa tilavuudenmuutos lähestyy nollaa.

**$\varphi'_r$  = jäännöslujuutta vastaava tehokas kitkakulma**  
Hienorakeisissa maalajeissa ilmenevä kriittiseen tilaan nähden pienempi jäännöslujuus, joka johtuu maan rakenteen romahtamisesta.

**$\psi$  = dilataatiokulma ( $^\circ$ )**

Määrittää laajenemisen eli dilataation suuruuden maan leikkautuessa. Tyypillisesti dilataatiokulma kasvaa maan tiiveyden kasvaessa.

Kuva 1. Kitkakulmien ja dilataatiokulman määritelmät ( $\epsilon_{vol}$  = tilavuudenmuodonmuutos;  $\epsilon_y$  = leikkausmuodonmuutos).

Tiiviissä maakerroksessa kitkakulma  $\varphi'_p$  voi olla selkeästi suurempi kuin huipun jälkeinen  $\varphi'_{cv}$ . Murtorajatilamitoituksessa huippulujuutta vastaavaa kitkakulmaa  $\varphi'_p$  ei lähtökohtaisesti ole suositeltavaa käyttää, sillä leikkausjännitys ei voi koko liukupinnan matkalta vastata huippuarvoaan samanaikaisesti: tällöin esim.  $\varphi'_{cv}$  on soveltuvampi laskentaparametri. Toisaalta jos leikkausjännityksen muuttuminen

leikkausmuodonmuutoksen funktiona pystytään mallintamaan, voidaan huippulujuus ottaa huomioon mitoituslaskelmissa. (Ladd 1991; Lehtonen 2015).

Tiiviissä kitkamaassa voi ilmetä leikkauksen aikana dilataatiota eli laajenemista (ks. Kuva 1). Etenkin numeerisia menetelmiä käytettäessä on otettava huomioon, että dilataatiikulman suuruus vaikuttaa mallinnettuun leikkauslujuuteen (Krabbenhoft 2023).

## 2.5 Painumaominaisuudet

Kitkamaalajien kokoonpuristuminen (eli painuminen) aiheutuu pääasiassa kolmesta syystä (Tammirinne 1969):

1. Rakeiden uudelleen järjestäytyminen (plastinen eli palautumaton)
2. Rakeiden rikkoutuminen (plastinen eli palautumaton)
3. Rakeiden kokoonpuristuminen (elastinen eli palautuva)

Maanvaraisessa perustamisessa näistä painumalajeista merkitsevä on lähinnä tapaus 1. Kitkamaalajien painuminen riippuukin olennaisesti maakerroksen rakenteellisesta tiiveydestä (Tammirinne 1969). Tapauksen 3 painuma suomalaisilla luonnonkiviaineiksilla on merkityksettömän pientä. Rakeiden rikkoutuminen (Tapaus 2) taas on merkitsevää lähinnä tietyn mineraalikoostumuksen kalliomurskeilla ja louheilla: esimerkiksi kiilteen määrän lisääntyminen kasvattaa kokoonpuristumista. Tämän lisäksi Tammirinteen (1969) mukaan painumaan vaikuttaa kuormitusnopeus (mitä suurempi nopeus, sitä pienempi painuma) sekä kuormituksen laatu (dynaamisella kuormituksella painuma on yleensä suurempi kuin staattisella kuormituksella).

Maanäytteen painumaominaisuudet voidaan laboratoriossa määrittää ödometrikokeella. Kitkamaalajien tapauksessa ödometrikoite tehdään normaalisti ödometrirenkaaseen sulotulle näytteelle, sillä häiriintymättömien maanäytteiden ottaminen kitkamaakerroksista on erittäin vaikeaa. Maakerroksen "luonnontilainen" rakenteellinen tiiveys pitää näin ollen selvittää *in-situ* menetelmillä kuten kairausvastuksen perusteella (Tammirinne 1969), jolloin ödometrikoite näyte sulotetaan vastaavaan haluttuun tiiveyteen.

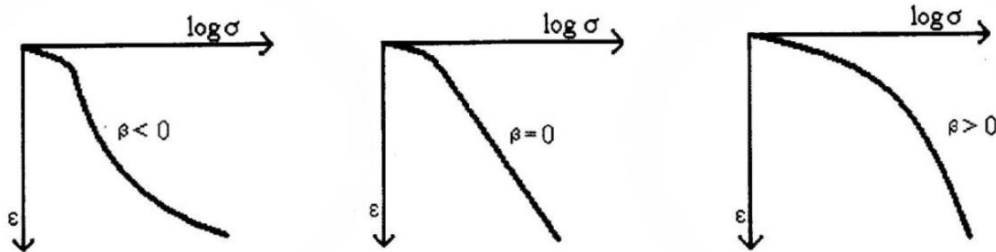
Painumaominaisuuksien osalta taulukkoarvot käsittävät Janbun yhtälön muodonmuutosparametrit moduuliluvun  $m$  ja jännityseksponentin  $\beta$ . Janbun menetelmässä maan kokoonpuristuvuusmoduuli (myöhemmin *moduuli*)  $M$  määritellään seuraavasti:

$$M = m\sigma_v \left( \frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^{1-\beta} \quad (2-10)$$

, missä  $\sigma'$  on tehokas pystyjännitys ja  $\sigma_v$  on vertailujännitys (100 kPa). Janbun menetelmästä käytetään myös nimitystä tangenttimoduulimenetelmä ja Ohde-Janbun menetelmä.

Moduuliluku  $m$  kuvaa kokoonpuristuvuutta samaan tapaan kuin moduuli  $M$ : mitä pienempi luku on, sitä suurempi kokoonpuristuvuus. Jännityseksponentti  $\beta$  kuvaa jännitys-muodonmuutuskäyrän muotoa: kitkamaalajeille on yleensä  $\beta > 0$ , mikä

tarkoittaa kuperaa käyrän muotoa puolilogaritmisella asteikolla (ks. Kuva 2). Tällöin on monesti mahdollista mallintaa koko käyrä yhdellä parametriarilla  $m$  ja  $\beta$  (sitä vastoin savelle pätee yleensä  $\beta = 0$  tai  $\beta < 0$ , jolloin käyrä pitää jakaa kahteen osaan, ylikonsolidoitunut ja normaalikonsolidoitunut). Kun maan jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen on lineaarista,  $\beta = 1$  ja moduuli yksinkertaistuu muotoon  $M = m\sigma_v$ .



Kuva 2. JännitysekspONENTIN  $\beta$  vaikutus jännitys-muodonmuutoskäyrän muotoon.

Kitkamaakerroksen pystymuodonmuutos voidaan laskea Janbun menetelmällä seuraavasti:

$$\varepsilon = \frac{1}{m\beta} \left[ \left( \frac{\sigma'}{\sigma_v} \right)^\beta - \left( \frac{\sigma'_0}{\sigma_v} \right)^\beta \right] \quad \text{kun } \beta \neq 0 \quad (2-11)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{5m} [\sqrt{\sigma'} - \sqrt{\sigma'_0}] \quad \text{kun } \beta = 0,5 \text{ (erikoistapaus)} \quad (2-12)$$

, missä  $\sigma'_0$  on maakerroksen tehokas vallitseva jännitys, jolloin kaava antaa muodonmuutoksen, joka aiheutuu jännityksen muutoksesta arvosta  $\sigma'_0$  arvoon  $\sigma'$ .

Kansainvälisesti Janbun menetelmää huomattavasti yleisimmin käytetään kokoonpuristuvuusindeksimenetelmää. Jos  $\beta = 0$ , menetelmät vastaavat samanlaista jännitys-muodonmuutoskäyttäytymistä ja pätee yhteys:

$$m = \frac{\ln 10(1+e_0)}{c_c} \quad (2-13)$$

, missä  $e_0$  on maan huokosluku ennen muodonmuutoksia ja  $c_c$  on kokoonpuristuvuusmoduuli.

Yllä esitetyt painumaparametrit kuvaavat pystysuuntaista 1D-muodonmuutosta. Kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  ja kimmomodulin  $E$  vallitsee yhteys:

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1-\nu)(1-2\nu)} \quad (2-14)$$

, missä  $\nu$  on Poissonin luku.

## 2.6 Kitkamaakerrosten kairausmenetelmät

Kitkamaakerrokseen soveltuvia kairausmenetelmiä ovat muun muassa painokairaus, heijarikairaus, puristinheijarikairaus sekä puristinkairaus. Yleisimpien menetelmien kuvaukset sekä kehitys vuosien saatossa on kuvattu tarkemmin Liitteessä 4.

## 3 Kirjallisuusselvitys

### 3.1 Kitkamaalajien tiiveys kairausvastuksen perusteella

#### 3.1.1 Tiiveyden arvioiminen kairausvastuksen avulla

Helenelundin (1966) mukaan useat tutkijat ovat suositelleet lyönti-, puristin- tai painokairauksessa havaittuun kairausvastukseen sidottua tiiveysluokitusta. Taulukkoon 6 on koottu hiekan tiiveysluokitus perustuen eri luokitusmenetelmiin. Sinisellä fontilla ne taulukkoarvot, joiden osalta luokitus on yhtenevä. Kairausvastukseen perustuva luokittelu vastaa pitkälti taulukkoarvoja hiekalle. Hienolle hiekalle taulukkoarvo antaa eri tiiveysluokissa suuremman tyypillisen kairausvastuksen, mutta lukemat ovat pääosin linjassa Helenelundin (1966) koosteen arvojen kanssa.

Suhteellisen tiiveyden raja-arvot vastaavat ruotsalaista luokitusta (SGI 2008).

*Taulukko 6. Hiekan tiiveysluokitus (Helenelund 1966, muokattu) erilaisten menetelmien mukaan ja vertailu hiekan taulukkoarvojen kanssa (sinisellä fontilla, perustuen Taulukkoon 1).*

Luokitusperuste	Hyvin löyhä	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	Hyvin tiivis
$D_r$ (%)	<15	15...35	35...65	65...85	>85
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>a)</sup>	<14	14...16	16...18	18...20	>20
Puristinkairaus (Holl.) (MPa) <sup>b)</sup>	<5	5...10 Hk: <6 hHk: <10	10...15 Hk: 6...14 hHk: 10...20	>15 Hk: >14 hHk: >20	N/A
Painokairaus, Pk/0,2 m <sup>c)</sup>	<10	10...30 Hk: 10...30 hHk: 20...50	30...60 Hk: 30...60 hHk: 50...100	60...100 Hk: >60 hHk: >100	>100
Heijarikairaus (Borro), (L/0,2 m)	<5	5...15 Hk: 5...12 hHk: 5...15	15...25 Hk: 12...25 hHk: 15...30	25...40 Hk: >25 hHk: >30	>40

<sup>a)</sup> Likimääräiset arvot, muunnettu yksiköstä kp/dm<sup>3</sup>. Raja-arvot vastaavat GEO-luokitusta hiekalle.

<sup>b)</sup> Muunnettu yksiköstä kp/cm. Luokituksen lähteeksi annettu saksalainen artikkeli.

<sup>c)</sup> Muunnettu yksiköstä Pk/m jakamalla julkaisun luku viidellä.

Taulukkoon 7 on koottu ruotsalaisia tiiveysluokituksia (SGI 2008; Trafikverket 2016) perustuen kairausvastukseen. Kairausvastusten alla on esitetty sinisellä fontilla ne taulukkoarvot, joiden osalta luokitus on yhtenevä. Trafikverketin (2016) arvot koskevat oletettavasti myös silttiä, sillä tiiveyden määrittäminen on esitetty otsikon "Siltin ja kitkamaan lujuus". Selkein vastaavuus oli soran taulukkoarvoilla, mutta myös hiekan osalta kairausvastuksen vaihteluvälit vastasivat pitkälti ruotsalaista menetelmää.

Taulukko 7. Ruotsalaiset tiiveysluokitukset (SGI 2008, Taulukko 12; Trafikverket 2016, kuva 5.2-9; kairausvastuksen perusteella ja vertailu taulukkoarvoihin.

	Lähde	Luokitusperuste	Hyvin löyhä	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	Hyvin tiivis
Puristinkairaus	SGI (2008)	Trycksond (TrS) Spetsmotstånd $q_c$ (MPa)	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	>20
	Trafikverket (2016)	CPT (MPa)	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	>20
	Taulukkoarvot (Taulukot 1–2)	Puristinkairaus $q_c$ (MPa)		Sr: <5,5 Hk: <6	Sr: 5,5...12 Hk: 6...14	Sr: >12 Hk: >14	
Painokairaus	SGI (2008)	Vim (halvvarv/0,2 m)	0-10	10-30	20-50	40-90	>80
	Trafikverket (2016)	Vikt (Hv/0,2 m)	0-10	10-25	25-45	45-80	
	Taulukkoarvot (Taulukot 1–2)	Painokairaus (Pk/0,2 m)		Sr: 10...25 Hk: 10...30	Sr: 25...50 Hk: 30...60	Sr: >50 Hk: >60	
Heijarikairaus	SGI (2008)	Hfa(netto) slag/0,2 m	0-4	2-8	6-14	10-30	25
	Trafikverket (2016)	Hejare $H_{fa}$ (netto)	0-4	4-8	8-12	12-25	45-80
	Taulukkoarvot (Taulukot 1–2)	Heijarikairaus (L/0,2 m)		Sr: 5...10 Hk: 5...12	Sr: 10...20 Hk: 12...25	Sr: >20 Hk: >25	

Yhteenveto (tiiveyden arvioiminen kairausvastuksen perusteella):

- Helenelundin (1966) esittämät kairausvastusten arvot vastaavat hiekan taulukkoarvoja. Arvot vastaavat jossain määrin myös hienon hiekan arvoja.
- Ruotsalaisen kitkamaalajien tiiveysluokituksen (SGI 2008; Trafikverket 2016) kairausvastukset vastaavat parhaiten soran taulukkoarvoja. Arvot vastaavat jossain määrin myös hiekan arvoja.

### 3.1.2 Kuivatilavuuspainon arvioiminen kairausvastuksen avulla

Kuten kuvattu yllä, kitkamaissa tiiveyden mittana on yleisesti käytetty kuivatilavuuspainon  $\gamma_d$  arvoa. Kuivatilavuuspainon arvioimista kairausvastuksen perusteella on kattavasti kuvattu Tammirinteen (1972) julkaisussa. Empiiriset korrelaatiot perustuvat pääosin vuosina 1968–1969 tehtyihin kenttätutkimuksiin. Julkaisussa verrataan paino- ja heijarikairauksia, ja todetaan, että hiekka- ja sora- maalajeissa  $\gamma_d$  voidaan luotettavammin määrittää heijarikairauksella. Hienolle hiekalle ja karkealle siltille taas painokairaus soveltuu paremmin.

Tammirinteen (1972) julkaisun aineistossa on tarkasteltu kolmea eri heijarikairausmenetelmää, joista vapaapudotusheijarikairaus on lähimpänä tämän päivän puristin-heijarikairauksen heijariosuutta. Heijarin massa ja pudotuskorkeus, tan-kojen halkaisija, kärjen kulma sekä poikkipinta-ala ovat samat. Eroavaisuutena

on kärjen pituus (nykykalustolla hieman lyhyempi) sekä kärjen muoto: 60-luvulla käytettiin poikkileikkaukseltaan neliön muotoista kärkeä, ja nykyisessä puristin-heijarikairauksessa sekä heijarikairauksessa käytetään pyöreän poikkileikkauksen kartionmuotoista kärkeä (SGY 1981; 2001).

Tammirinteen (1972) esittämät empiiriset korrelaatiot kuivatilavuuspainolle ovat usean selittävän muuttujan regressiokäyriä. Tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että karkearakeisissa maalajeissa kairausvastuksen ja kuivatilavuuspainon väliseen riippuvuuteen vaikuttavat etenkin seuraavat tekijät:

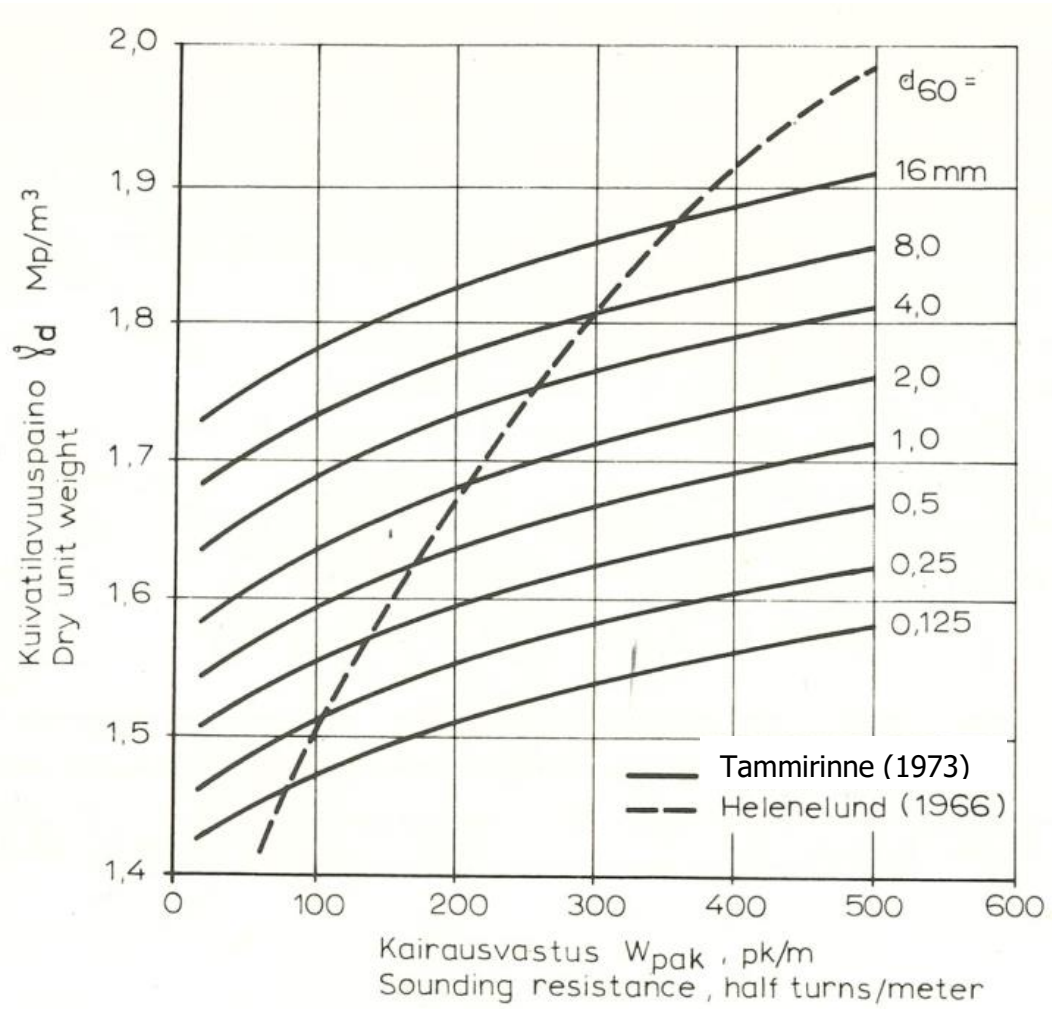
- rakeisuusominaisuudet (esim.  $d_{10}$ )
- kairausvyvyys
- maan vesipitoisuus
- onko maakerros pohjavedenpinnan ylä- vai alapuolella

Tammirinteen (1972) havaintojen perusteella suurin vaikutus kairausvastukseen oli maalajin raekoolla. Raekoon kasvaessa huokoisuus tyypillisesti pienenee, ja luonnonmaalajeissa raekoon kasvaminen myös yleensä suurentaa raekokosuhteita, mikä parantaa maan tiivistymisominaisuuksia (Tammirinne 1969).

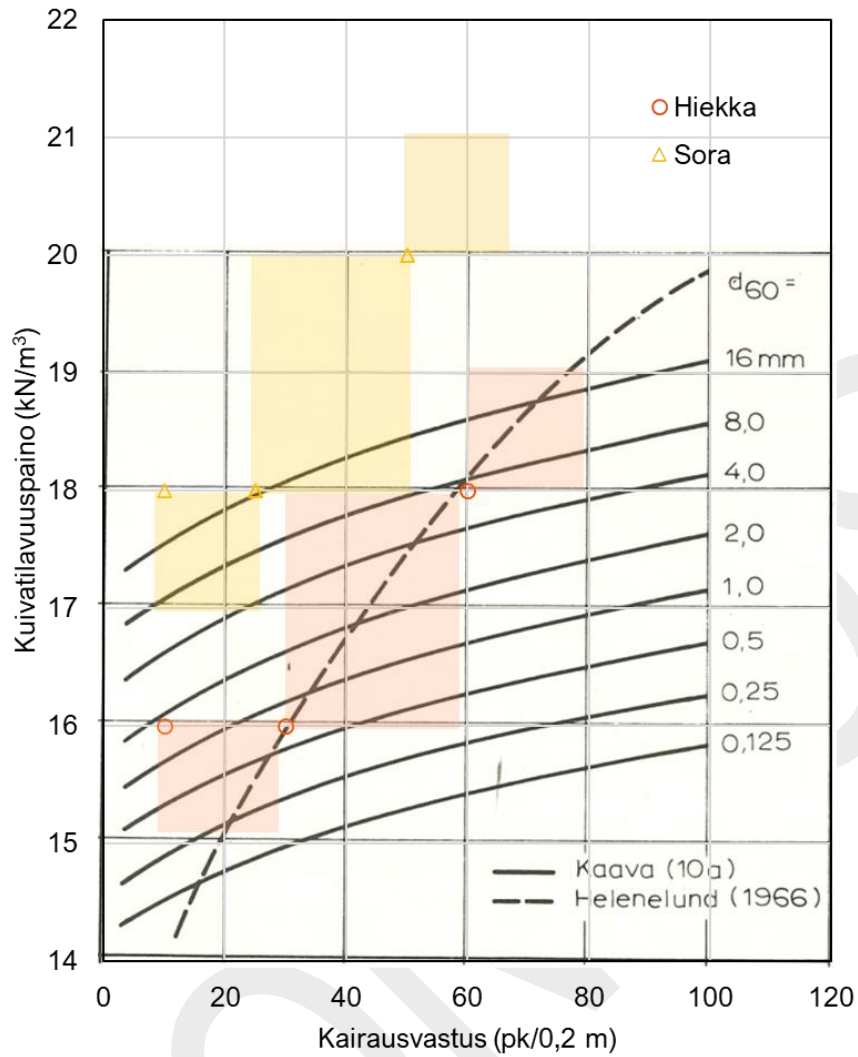
Helenelundin (1966) esittämää yhteyttä voidaan Tammirinteen (1973) mukaan pitää maalajin rakeisuudesta riippumattomana korrelaationa kuivatilavuuspainon ja painokairauksen kairausvastuksen välillä. Kuitenkin Tammirinteen mukaan rakeisuuden vaikutus on niin suuri, että sitä ei voida jättää huomiotta. Kuvassa 3 on esitetty Helenelundin ja Tammirinteen esittämiä suhteita. Tulos osoittaa, että raekoolla on suurempi vaikutus kairausvastukseen kuin kuivatilavuuspainon muutoksella. Painokaira tunkeutuu helpommin karkearakeisempaan kuin saman kuivatilavuuspainon omaavaan hienompaan maalajiin (Tammirinne 1973).

Kuvassa 4 on verrattu Helenelundin ja Tammirinteen esittämiä suhteita taulukkoarvoihin. Hiekan ja soran kuivatilavuuspainot eri tiiveysluokissa on otettu GEO-luokituksesta. Kuvasta nähdään, että Helenelundin (1966) esittämä yhteys istuu hyvin hiekan taulukkoarvoihin. Sitä vastoin soran tapauksessa taulukkoarvot vastaavat Tammirinteen (1973) tulosta vain löyhän hiekan osalta.



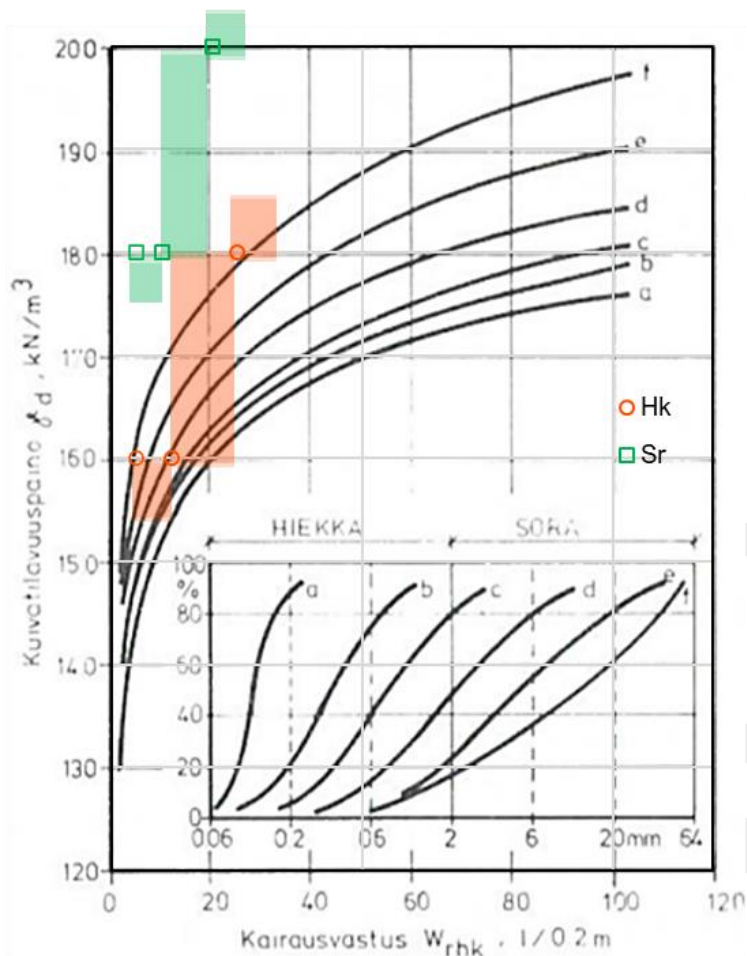


Kuva 3. Kuivatilavuuspainon ja painokairan kairausvastuksen välinen vuorosuhde Tammirinteen ja Helenelundin esittämällä yhteyksillä (Tammirinne 1973).



Kuva 4. Kuivatilavuuspainon ja painokairan kairausvastuksen välinen vuorosuhde Tammirinteen ja Helenelundin esittämällä yhteyksillä (Tammirinne 1973) sekä hiekan ja soran taulukkoarvot, joiden kuivatilavuuspaino perustuu GEO-tiiveysluokitukseen.

RIL:n (1985) julkaisussa on esitetty vapaapudotusheijarin kairausvastuksen ja kuivatilavuuspainon välinen riippuvuus hiekalle ja soralle (ks. Kuva 5). Kun verrataan kuvan vuorosuhteita taulukkoarvojen kanssa, voidaan havaita, että taulukkoarvojen kairausvastuksen arvot ovat selkeästi pienempiä kuin RIL:n (1985) arvot.



Kuva 5. Vapaapudotusheijarikairauksen ja kuivatilavuuspainon vuorosuhde hiekalle ja soralle (Tammirinne 1972; RIL 1985) sekä vertaaminen taulukkoarvojen kanssa. Eri tiiveysluokkia vastaavat kuivatilavuuspainot ovat GEO-luokituksesta.

Yhteenveto (kuivatilavuuspainon arvioiminen kairausvastuksen perusteella):

- Maan rakenteellisen tiiveyden lisäksi kairausvastukseen vaikuttaa maan rakeisuus.
- Tammirinteen (1972) esittämät empiiriset korrelaatiot karkearakeisten maalajien kuivatilavuuspainon arvioimiseksi käsittävät monta eri selittävää tekijää, eikä ole toistaiseksi tiedossa, ovatko tutkimuksen tulokset vaikuttaneet taulukkoarvoihin
- RIL:n (1985) esittämä menetelmä kuivatilavuuspainon arvioimiseen heijarikairauksen vastuksen perusteella poikkeaa selkeästi taulukkoarvojen kairausvastuksista

### 3.1.3 Kairauskaluston muutosten vaikutus kairausvastukseen

Liitteenä 4 on erikoistyö, jonka tavoitteena oli selvittää kirjallisuusselvityksen ja kairausdiagrammien vertailujen perusteella painokairauksen, puristinkairauksen ja puristinheijarikairauksen menetelmämuutoksen vaikutuksia mitattuun kairausvastukseen. Koska kitkamaalajien taulukkoarvot perustuvat pääasiassa 1960- ja 1970-luvulla VTT:ssä tehtyihin tutkimuksiin, voidaan olettaa, että kairausvastukset edustavat pääasiassa 60-lukua edeltävän kaluston mukaisia kairausvastuksia.

Erikoistyön johtopäätökset voidaan tiivistää seuraavasti:

- Suurimmat kairausten muutokset liittyvät tankokokojen ja kairakärjen muotojen muutoksiin. Tankokoko on muuttunut muun muassa painokairauksessa käytetyssä 20 mm halkaisijan tangosta 25 mm halkaisijan tankoon
- Painokairausvastusten vertailujen perusteella voi todeta, että 2000-luvun painokairausvastus on keskimäärin 1,1–2,0 kertaa suurempi kuin vuosien 1937–1950 kairausvastukset hiekkamaakerroksessa.
- Vuoden 1980 heijarikairausten ja 2000-luvun puristinheijarikairausten vertailussa havaittiin, että 2000-luvun kairausvastus oli hiekkamaakerroksessa keskimäärin 0,7-kertainen vanhempaan kairaustulokseen nähden.

Erikoistyössä rajauduttiin muutamaa esimerkkikohteeseen. Eroihin kairausvastuksissa vaikuttavat kalustomuutosten lisäksi myös itse pohjamaa. Esimerkiksi puristinheijarikairauksessa vastus voi tietyissä hiekoissa olla huomattavasti pienempi kuin heijarikairauksella saatava vastaus, mikä taas vaikuttaa esim. kitkapaalun mitoitukseen.

## 3.2 Karkea siltti

Taulukkoarvot sisältävät vain karkean siltin, jonka mekaaninen käyttäytyminen on lähempänä kitka- kuin koheesiomaalajia. Karkea siltti on vähäisen koheesion vuoksi altis mm. eroosiolle. Taulukkoarvoja ei siten voi soveltaa keski- tai hienoraikaiseen silttiin, jotka tyypillisesti sisältävät myös savilajitetta. Taulukkoarvoja ei myöskään voi käyttää liejuiselle siltille (humuspitoisuus > 2..6 paino-%), sillä orgaaninen aines saa siltin käyttäytymään koheesiomaan tavalla ja lisää sen kokoonpuristuvuutta huomattavasti. (Helenelund 1965).

### 3.2.1 Tilavuuspaino

Taulukossa 8 on verrattu karkean siltin tilavuuspainojen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin.

*Taulukko 8. Karkean siltin tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuuden arvoihin.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella			Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella		
		löyhä	keski- tiivis	tiivis	löyhä	keski- tiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 1)	Karkea siltti	14...16		16...18	9...		11
Helenelund (1964b) <sup>a)</sup>	Hieta	16,7...19,6					
Farhadi (ei julkaistu) <sup>d)</sup>	Karkea siltti (Ulvila)	15,3...19,2					
	Karkea siltti (Kouvola)	18,5...20,9					
Trafikverket 2014 <sup>b)</sup>	Silt (Si)	15		17	8		9
Statens vegvesen (2010) <sup>c)</sup>	Silt *	18					
	Silt **	18		19			

<sup>a)</sup> 20 %...80 % fraktiilien vaihteluväli, suomalainen aineisto (lisätietoa Liitteessä 2).

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>c)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitus varten (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>d)</sup> Ulvilan näytemäärä 55 kpl, Kouvolan näytemäärä 3 kpl. Ulvilan siltti oli sulfidista ja hyvin kerroksellista, joten ei täysin vastaa tavanomaisempaa karkeaa silttiä (kuten Kouvola)

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

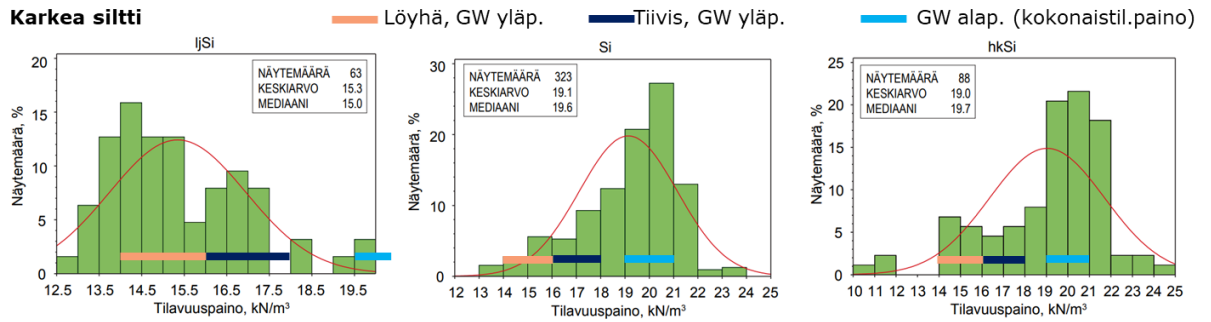
\*\* Sillan maatuen alla.

Helenelundin (1964b) esittämät vaihteluvälit perustuvat suomalaiseen aineistoon. Helenelundin (1964b) taulukkoarvojen taustat ja tilavuuspainojen vertailu on kuvattu tarkemmin Liitteessä 2. Taulukosta nähdään, että hietan tilavuuspainon arvot ovat verrattain suurempia kuin karkean siltin taulukkoarvot. Tämä on odotettavissa, sillä *rakennusteknillisen maalajiluokituksen* hieta käsittää karkean siltin lisäksi myös hienon hiekan. Karkean siltin taulukkoarvot vastaavat parhaiten ruotsalaisia taulukkoarvoja (ominaisarvoja): tilavuuspainot pohjavedenpinnan yläpuolella ovat lähes samat, mutta pohjavedenpinnan alapuolella taulukkoarvot ovat hiekan suuremmat. Sitä vastoin norjalaiset arvot ovat suurempia kuin suomalaiset taulukkoarvot tai niiden yläpäässä.

Kuvassa 6 on verrattu taulukkoarvojen tilavuuspainojen vaihteluvälejä Ronkaisen (2012) julkaisussa esitettyihin jakaumiin. Ronkaisen (2012) aineistossa kitkamaalajien "tilavuuspaino on määritetty – punnitsemalla 1–2 litran suuruisen näytteen paino" (Ronkainen 2012, s. 29). Ronkaisen (2012) aineiston tarkempi kuvaus löytyy Liitteessä 2. Taulukkojen tilavuuspainot pohjavedenpinnan alapuolella on muunnettu kokonaistilavuuspainoiksi ( $\gamma = \gamma' + \gamma_w$ ).

Kitkamaalajien osalta "tilavuuspaino on määritetty – punnitsemalla 1–2 litran suuruisen näytteen paino" (Ronkainen 2012, s. 29).

Karkean siltin osalta taulukkoarvot vastaavat varsin hyvin Ronkaisen (2012) aineistoa: siltin ja hiekkaisen siltin jakaumien tapauksessa taulukkoarvot sijoittuvat keskiarvojen molemmiin puolin. Taulukkoarvot pohjavedenpinnan alapuolella olevan karkean siltin tilavuuspainolle edustavat sitä arvoväliä, jossa frekvenssi on suurin siltin ja hiekkaisen siltin tapauksessa.



Kuva 6. Silttimaalajien tilavuuspainojen jakaumia (Ronkainen 2012) verrattuna karkean siltin taulukkoarvojen vaihteluväleihin.

Yhteenveto (karkean siltin tilavuuspaino):

- Taulukkoarvot vastaavat hyvin ruotsalaisia taulukkoarvoja
- Taulukkoarvot vastaavat pitkälti myös suomalaisen tutkimusaineiston mukaisia vaihteluvälejä (hietan tilavuuspainon vaihteluväli hieman suurempi)

### 3.2.2 Lujuusominaisuudet

#### Kitkakulma tiiveyden perusteella

Taulukkoon 9 on koottu eri lähteissä havaittuja tai suositeltuja arvoja siltin kitkakulmalle eri tiiveysluokissa.

Taulukko 9. Silttimaalajeille esitettyjä kitkakulman arvoja.

Lähde	Kuvaus	Maalaji	Erit- tän löyhä	Löyhä	Keski- tiivis	Tiivis	Erit- tän tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		kaSi		28	30	32	
RIY (1964)	Taulukkoarvot käytettäväksi, mikäli tutkimuksia ei ole tehty	Hieta (hiHk, kaSi)		24...29	30	31...36	
Helenelund (1964b)	20 %...80 % vaihteluväli, suomalainen aineisto	Hieta (hiHk, kaSi)	26...35 (c = 0...5 kPa)				
Helendelund (1965)	Sullottu näyte ja htön näyte, CU-koe	keSi (Jämsä)	25...35 <sup>a)</sup>				
Helendelund (1965)	Sullottu näyte, CU-koe	kaSi (Silvola)			35		
Farhadi (ei julkaistu) <sup>c)</sup>	CU-koe	kaSi (Ulvila)	33,3...48,6 (kun c = 0) 21,2...40,4 (c = 0...20,3)				
Terzaghi & Peck (1948)	Havaittu hitaissa leikkauskokeissa	Si, siHk		27...30		30...35	
SIGI (1998)	Empiirisiä arvoja	Si	26... 29	29...32	32...34	34...37	37... 39
SIGI (2007)	Korrelaatio, painokai- raus	Si		<32	32...36	>36	
	Korrelaatio, Heijarikai- raus	Si		<31	31...35	>35	
	Korrelaatio, CPT	Si		<32	32...34	>34	
Trafikverket (2014) <sup>b)</sup>	Ruotsalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Silt (Si)		26		33	
Statens vegvesen (2010) <sup>b)</sup>	Norjalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Silt*		31			
		Silt**		31		33	

<sup>a)</sup> Havaitun (tyypillisen) vaihteluvälin rajat. Eivät välttämättä edusta absoluuttisia minimejä ja maksimejä.

<sup>b)</sup> Ruotsalaisten ja norjalaisten taulukkoarvojen tarkempi kuvaus sekä koostettu vertailu on esitetty Liitteessä 3.

<sup>c)</sup> Ulvilan siltti on sulfidista ja hyvin kerroksellista, joten ei vastaa täysin perinteistä karkeaa silttiä. Kolmiaksaalikokeiden lukumäärä oli 16 kpl.

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.



Taulukkoarvot vastaavat melko hyvin Helenelundin (1964b; 1965) havaintoja erilaisten silttien kitkakulmalle. Samoin kansainvälisen aineiston kanssa on varsin hyvä vastaavuus (Terzaghi & Peck 1948).

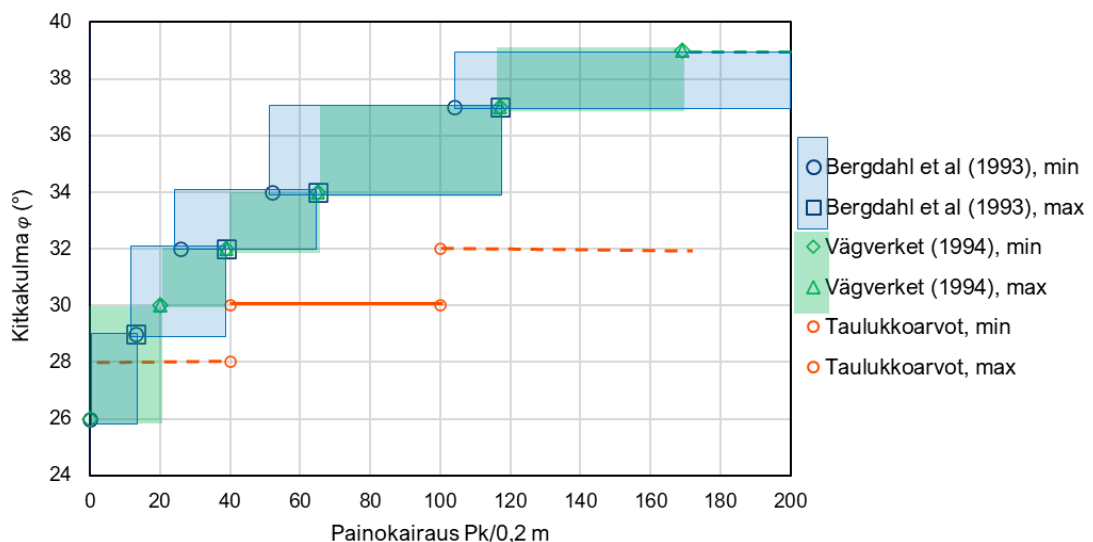
Sen sijaan voidaan havaita, että esimerkiksi SGI:n (1998, Taulukko 4.2) julkaisussa esitetyt arvot ovat kautta linjan suurempia kuin suomalaiset taulukkoarvot. Samoin SGI:n (2007, s. 24) esittämät korrelaatiot kitkakulmalle kairausvastukseen perustuen johtavat taulukkoarvoja suurempiin lukemiin. Ruotsalaisten ominisarvot (Trafikverket) ovat lähempänä suomalaisia taulukkoarvoja, ja löyhän siltin kitkakulma on taulukkoarvoa pienempi. Norjalaiset taulukkoarvot kitkakulman ominisarvolle ovat samoin hieman suurempia.

### Kitkakulma kairausvastuksen perusteella

Taulukossa 10 on esitetty SGI:n (Larsson 1995) esittämät menetelmät (Bergdahl et al. 1993; Vägverket 1994) arvioida karkean siltin kitkakulman painokairauksen tai hejarikairauksen avulla. Näitä arvoja on verrattu taulukkoarvoihin Kuvissa 7–8. Kuvista nähdään, että taulukkoarvot ovat ruotsalaisiin arvoihin nähden konservatiivisempia karkealle siltille. Ainoastaan löyhän karkean siltin taulukkoarvot osuvat ruotsalaisten arvojen alueelle.

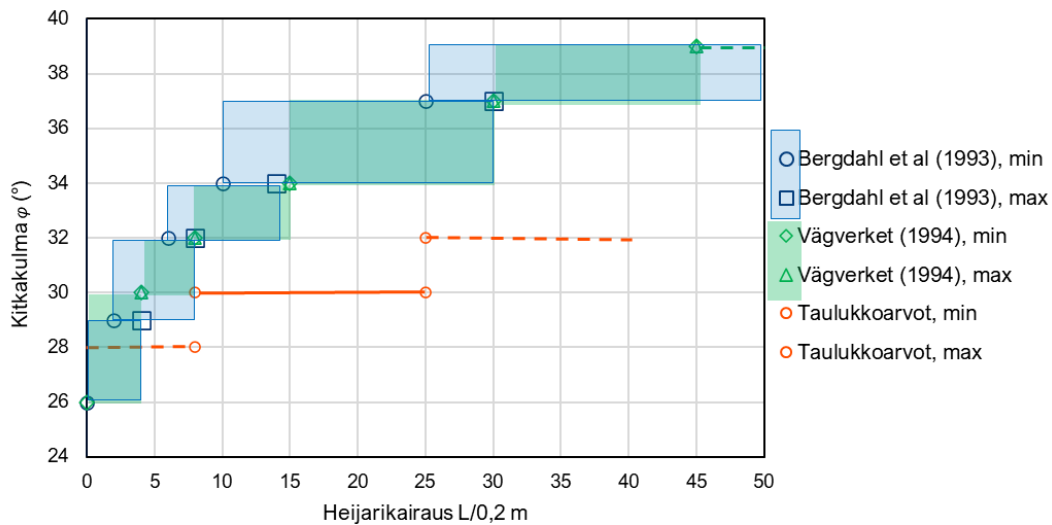
*Taulukko 10. Karkean siltin kitkakulman arviointimenetelmät painokairauksen tai hejarikairauksen avulla (Larsson 1995).*

Viktsond Vim hv/0,2 m Bergdahl et al (Vägverket)	Hejarsond Hfa (netto) sl/0,2 m Bergdahl et al (Vägverket)	Friktionsvinkel $\phi'$ ° Bergdahl et al (Vägverket)
0 - 13	(0 - 20)	0 - 4
13 - 39	(20 - 39)	(4 - 8)
26 - 65	(39 - 65)	(8 - 15)
52 - 117	(65 - 117)	(15 - 30)
>104	(117-169)	(30-45)
	(> 169)	(> 45)



*Kuva 7. Karkean siltin kitkakulma vs. painokairaus: taulukkoarvot ja ruotsalaiset menetelmät.*





Kuva 8. Karkean siltin kitkakulma vs. heijarikairaus: taulukkoarvot ja ruotsalaiset menetelmät.

Yhteenveto (karkean siltin kitkakulma):

- Taulukkoarvot kitkakulmalle eri tiiveysluokissa ovat joko samaa suuruusluokkaa tai pienempiä kuin suomalaisen kirjallisuuden arvot
- Taulukkoarvot kitkakulmalle eri tiiveysluokissa ovat hieman pienempiä kuin ruotsalaiset ja norjalaiset ominisarvot
- Kitkakulman taulukkoarvot ovat pienempiä, kuin mitä vastaava kairausvastus antaisi ruotsalaisten menetelmien perusteella

### 3.2.3 Painumaominaisuudet

Taulukkoon 11 on koottu eri lähteissä esitettyjä arvoja siltin painumaominaisuuksille eri tiiveysluokissa.

*Taulukko 11. Silttimaalajeille esitettyjä tyypillisiä moduuliluvun arvoja.*

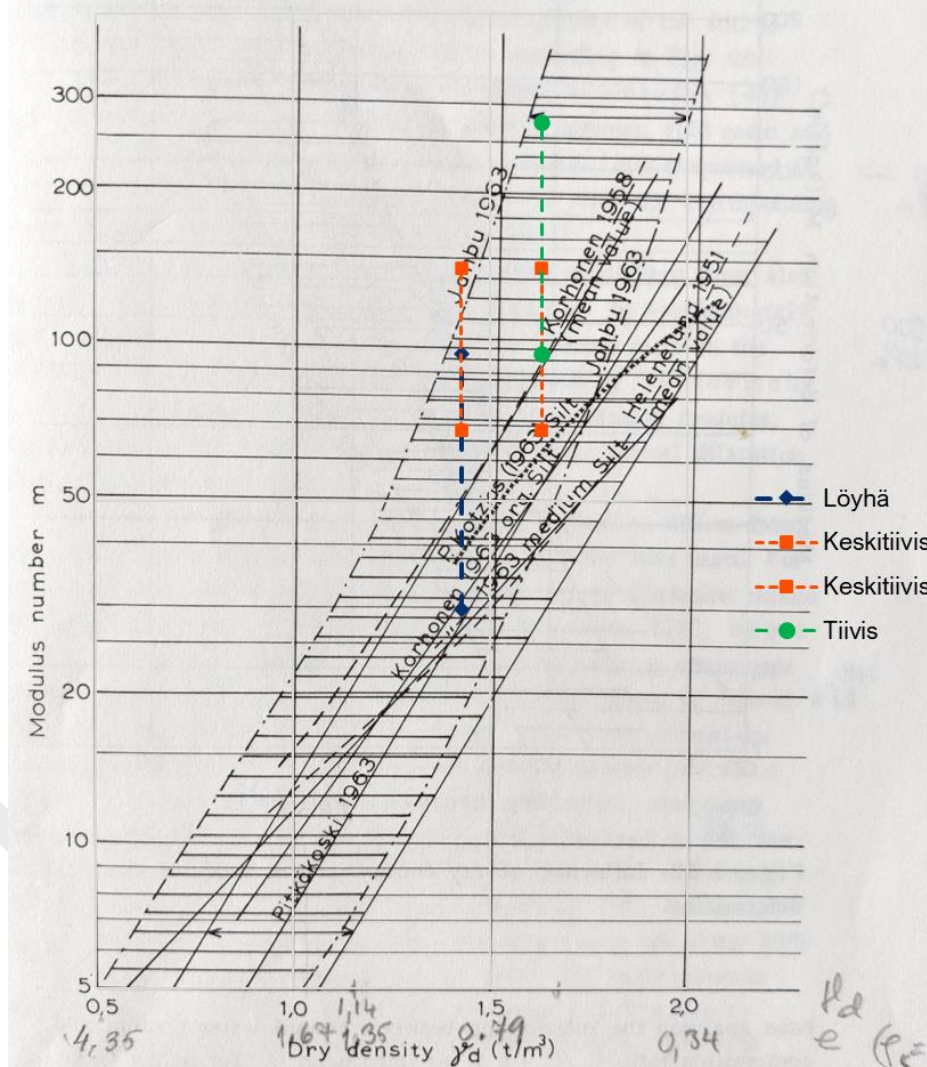
Lähde	Kuvaus	Maalaji	Moduuliluku $m$			Jännitys-
			Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	eksponentti löyhä...tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		kaSi	30...100	70...150	100...300	0,3
Janbu (1963)	Havaintoja huokoisuuden funktiona	Si	80...110			0,30...0,75
Helenelund (1965)	Koonti eri lähteistä <sup>a)</sup>	Si (ml. ljSi)	5...130	15...≥300	≥30...300	
Trafikverket (2014) <sup>b)</sup>	Ruotsalaiset taulukkoarvot, ominisarvoja	Silt (Si)	20...30		100...200	

<sup>a)</sup> Kuvan 21 vaihteluvälit. Tiiveys perustuu hiekkaisen siltin kuivatilavuuspainoon GEO-luokituksen mukaan.

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot on esitetty kimmomoduulille, jonka muunnos moduuliluvuksi on kuvattu tarkemmin Liitteessä 3.

Helenelundin (1965, s. 48) kirjallisuusselvityksessä on esitetty Janbun (1963) julkaisussa annettuja moduuliluvun  $m$  ja jännityseksponentin  $\beta$  arvoja eri maala-jeilla huokoisuuden funktiona (moreeni, hiekka, siltti ja savi). Lisäksi on esitetty eri lähteisiin perustuva kuivatiheyden ja moduuliluvun  $m$  välinen yhteys: Kuvassa 9 on verrattu koontia taulukkoarvojen vaihteluväleihin. Taulukkoarvot sijoittuvat pitkälti vaihteluvälin sisään, mutta suuret moduuliluvun arvot painottuvat. Tämä on odotettavissa, sillä taulukkoarvot kuvaavat karkean siltin moduulilukua, ja Helenelundin koonnissa taas on mukana myös mm. keskisilttiä ja liejuista silttiä.

Taulukosta 11 nähdään, että ruotsalaiset moduuliluvulle ovat hieman pienempiä taulukkoarvoihin nähden. Toisaalta Trafikverket (2014) esittää taulukkoarvot kimmomoduulille, jotka on muunnettu moduuliluvuksi Liitteessä 3 esitettyjen oletusten mukaisesti.



Kuva 9. Moduuliluvun taulukkoarvot karkealle siltille: vertailu Helenelundin (195) Kuvan 21 kirjallisuusarvoihin.

Helenelund (1965) kuvaa ulkomaalaisiin lähteisiin perustuen, että keski- ja karkeakeaisen siltin moduuli  $M$  voidaan arvioida staattisen puristinkairauksen kärkivastuksesta (hollantilaistyyppinen kärki,  $10 \text{ cm}^2$  pinta-alalla):

$$M \approx (1 \dots 2) \cdot p_r \quad (3-1)$$

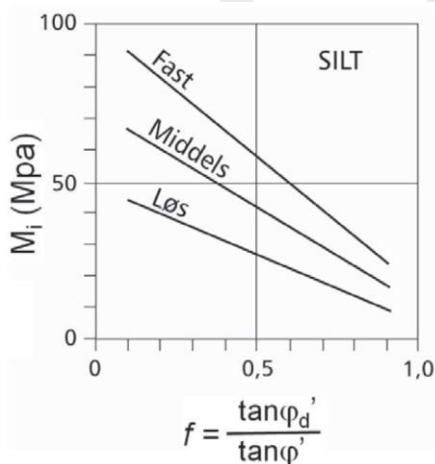
Lisäksi mainitaan siltille suositeltu kaava:

$$M \approx 3p_r^{0.85} \quad (3-2)$$

Kärkivastuksen yksikön ollessa MPa, myös yo. kaavoilla arvioidun moduuliluvun yksikkönä on MPa. Yo. empiirisillä kaavoilla esimerkiksi keskitiiville karkealle siltille (puristuskairauksen kärkivastus  $7 \dots 15 \text{ MPa}$ ) saataisiin moduuliksi  $M \approx 7 \dots 30 \text{ MPa}$ . Helenelundin (1965, Kuva 22) koonnin mukaan keskitiiville siltille  $M \approx 2 \dots 20 \text{ MPa}$ , eli yo. kaavat johtaisivat taulukkoarvoihin nähden suurempaan moduuliin eli siten pienempiin laskennallisiin painumiin.

Helenelundin (1965) mukaan painuma siltissä voidaan karkeasti arvioida käyttäen moduulia, joka on arvioitu kuivatiheyden tai staattisen taikka dynaamisen kairausmenetelmän avulla. Hän kuitenkin huomauttaa, että kairausvastuksen ja moduulin välistä riippuvuutta pitäisi tutkia lisää.

Norjalaisessa suunnitteluohjeessa (Statens vegvesen 2010) on esitetty siltille moduulin  $M_i$  arvoja eri tiiveysluokissa (ks. Kuva 10).  $M_i$  määritetään jännitys-muodonmuutoskuvaajan alkupään arvoista. Karkean siltin moduuliluvun ja jännitysekspONENTIN perusteella saadaan moduuliksi  $M$  (jännitysvälillä  $10 \dots 50 \text{ kPa}$ ) korkeimmillaan  $11,6 \text{ MPa}$ , eli suomalaiset taulukkoarvot sijoittuvat norjalaisen menetellyn alimpaan suuruusluokkaan.



Kuva 10. Moduuli  $M_i$  siltille (Statens vegvesen 2010, s. 96).

Yhteenveto (karkean siltin painumaominaisuudet):

- Moduuliluvun taulukkoarvot vastaavat kirjallisuuden keskimääräisiä arvoja
- JännitysekspONENTIN taulukkoarvo vastaa kirjallisuutta, mutta sijoittuu vaihteluvälin alapäähän

- Ruotsalaiset taulukkoarvot siltin moduulille ovat hieman konservatiivisempia suomalaisiin taulukkoarvoihin nähden, kun taas norjalaiset suunniteluohjeet ehdottavat siltile huomattavasti suurempia moduulin arvoja

### 3.3 Hiekka

Tässä luvussa kuvataan sekä hiekan että hienon hiekan ominaisuuksia. Taulukkoarvojen osalta tulee ottaa huomioon, että maalaji on "Hieno hiekka  $d_{10}<0,06$ ", eli hienoainesta oletetaan olevan ainakin 10 paino-%. GEO-luokituksen mukaisessa hienossa hiekassa (raekoko  $>0,06...0,2$  mm) ei välttämättä ole hienoaineista.

#### 3.3.1 Tilavuuspaino

Taulukossa 12 on verrattu hienon hiekan ja hiekan tilavuuspainojen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin.

*Taulukko 12. Hienon hiekan ja hiekan tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuuden arvoihin.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella			Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella		
		löyhä	keski- tiivis	tiivis	löyhä	keski- tiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 1)	Hieno hiekka $d_{10}<0,06$	15...17		16...18	9...		11
Helenelund (1964b) <sup>a)</sup>	Hieta (kaSi, hHk)	16,7...19,6					
Trafikverket 2014 <sup>b)</sup>	Sand (Hk)	16		18	9		10
Statens vegvesen (2010) <sup>c)</sup>	Sand (Hk) *	18		19			
	Sand (Hk) **	17		18			
Taulukkoarvot (Taulukko 1)	Hiekka $d_{10}>0,06$	16...18		18...20	10...		12
Helenelund (1964b) <sup>a)</sup>	Hiekka	14,7...18,6					
Trafikverket 2014 <sup>b)</sup>	Sand (Hk)	16		18	9		10
Statens vegvesen (2010) <sup>c)</sup>	Sand (Hk) *	18		19			
	Sand (Hk) **	17		18			

<sup>a)</sup> 20 %...80 % fraktiilien vaihteluväli, suomalainen aineisto (lisätietoa Liitteessä 2).

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>c)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitusta varten (lisätietoa Liitteessä 3).

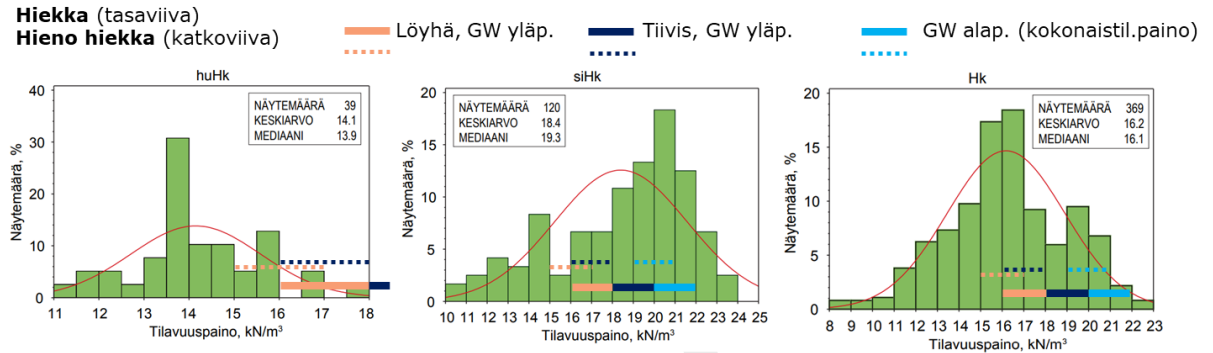
\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.

Taulukosta nähdään, että hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvot vastaavat hyvin ruotsalaisia ja norjalaisia taulukkoarvoja. Tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella on taulukkoarvojen tapauksessa hieman suurempi kuin ruotsalaiset taulukkoarvot. Sen sijaan Helenelundin (1964b) aineiston mukainen vaihteluväli sijoittuu

hiekan taulukkoarvojen alapäähän, ja vastaavasti hietan vaihteluväli sijoittuu hienon hiekan yläpäähän. Norjalaisiin taulukkoarvoihin nähden hiekan taulukkoarvojen vastaavuus on hyvä, mutta hienon hiekan tapauksessa taulukkoarvot ovat joko pienempiä tai suurempia kuin norjalaiset mitoitussarvot.

Kuvassa 11 on verrattu taulukkoarvojen tilavuuspainojen vaihteluvälejä Ronkaisen (2012) julkaisussa jakaumiin.



*Kuva 11. Hiekkamaalajien tilavuuspainojen jakaumia (Ronkainen 2012) verrattuna hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvojen vaihteluväleihin.*

Kuvista nähdään, että hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvot ovat Hk-jakaumaan nähden arvojen yläpäässä. Taulukkoarvot vastaavatkin paremmin siHk-jakaumaa. Toisaalta tulee ottaa huomioon, että Ronkaisen (2012) aineiston kitkamaalajien ”tilavuuspaino on määritetty – punnitsemalla 1–2 litran suuruisen näytteen paino” (Ronkainen 2012, s. 29). Toisin sanoen tilavuuspaino ei vastaa luonnontilaisen maakerroksen tiiveyden mukaista tilavuuspainoa. Tiiviiden maakerrosten osalta näytteenotossa tapahtuu löyhtymistä, joten määritetty tilavuuspaino aliarvioidaan tällaisten maakerrosten tapauksessa. Toisaalta valtaosa karkearakeisista maanäytteistä on Ronkaisen (2012) aineistossa otettu koekuopasta, eli verrattain läheltä maanpintaa.

Lisäksi kuvasta nähdään, että vastaavuus huHk-jakauman kanssa on heikko, mikä viittaa siihen, että taulukkoarvot on tarkoitettu sovellettavaksi epäorgaanisille maakerrostumille.

Taulukkoarvoja verrattiin myös saksalaisiin taulukkoarvoja (Smoltczyk 2002), jotka edustavat havaittuja tyypillisiä arvoja. Vertailu on esitetty Liitteen 4 erikoistyössä (Luku 2.2): havaittiin, että tilavuuspainon taulukkoarvot vastaavat hyvin saksalaisia arvoja hiekalle.

Yhteenveto (hienon hiekan ja hiekan tilavuuspainot):

- Taulukkoarvot vastaavat hyvin ruotsalaisia (sekä saksalaisia) taulukkoarvoja
- Suomalaiseen tutkimusaineistoon nähden taulukkoarvot ovat tapauksesta riippuen keskimäärin pienempiä tai suurempia

### 3.3.2 Lujuusominaisuudet

Helenelundin (1966) mukaan kitkamaalajien kitkakulma  $\varphi$  riippuu ennen kaikkea maan suhteellisesta tiiveydestä. Tämän lisäksi on havaittu, että  $\varphi$  kasvaa jonkin verran raekoon kasvaessa. Kitkakulma riippuu myös raemuodosta ja rakeen pinnan

karkeudesta. Rakeiden pinnan karkeus taas riippuu rakeiden mineraalikoostumuksesta (Valkeisenmäki 1973). Pohjarakennuksen normeissa (RIY 1964, s. 16) on esitetty kitkakulmalle taulukkoarvoja, joita korjataan ylös- tai alaspäin ei vain tiiveyden perusteella vaan lisäksi raemuodon ja raekoostumuksen mukaan.

Taulukkoon 13 on koottu eri lähteissä havaittuja tai suositeltuja ominaisarvoja hiekan kitkakulmalle eri tiiveysluokissa.

*Taulukko 13. Hiekoille esitettyjä kitkakulman arvoja.*

Lähde	Kuvaus	Maalaji	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$	30	33	36
RIY (1964, s. 16)	Taulukkoarvot käytettäväksi, mikäli tutkimuksia ei ole tehty	Hieta (hiHk, kaSi)	24...29	30	31...36
Helenelund (1964b)	20 %...80 % vaihteluväli, perustuen suomalaisen aineistoon	hiHk, kaSi (Hieta)	26...35 ( $c=0...5$ kPa)		
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	Ruotsalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Sand (Hk)	28		35
Statens vegvesen (2010) <sup>a)</sup>	Norjalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Sand *	33		
		Sand **	33		36
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		Hiekka $d_{10} > 0,06$	32	35	38
RIY (1964, s. 16)	Taulukkoarvot käytettäväksi, mikäli tutkimuksia ei ole tehty	Hiekka (keHk, kaHk)	26...31	32	33...38
Helenelund (1964b)	20 %...80 % vaihteluväli, perustuen suomalaisen aineistoon	Hiekka	22...35 ( $c=0$ kPa)		
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	Ruotsalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Sand (Hk)	28		35
Statens vegvesen (2010) <sup>a)</sup>	Norjalaiset taulukkoarvot, ominaisarvoja	Sand *	33		
		Sand **	33		36

<sup>a)</sup> Ruotsalaisten ja norjalaisten taulukkoarvojen tarkempi kuvaus sekä koostettu vertailu on esitetty Liitteessä 3.

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.

RIY:n (1964) kitkakulmat tiiveyteen perustuen on esitetty Taulukossa 13. Voidaan havaita, että RIY:n (1964) arvot ovat pääosin pienempiä kuin taulukkoarvot. Myös Helenelund (1966) arvioi RIY:n (1964) arvoja konservatiivisiksi.

Taulukon vertailun perusteella hienon hiekan taulukkoarvot vastaavat pitkälti kirjallisuuden kitkakulmia muutamien poikkeuksin. Sitä vastoin hiekan osalta muiden

lähteiden kitkakulman arvot ovat yhtä tapausta lukuun ottamatta hieman pienempiä kuin taulukkoarvot.

Helenelund (1966) esitti Suomessa kitkamaalajeille (karkea hieta, hiekka, sora) suoritettujen rasialeikkauskokeiden perusteella määritetyn empiirisen korrelaation kitkakulmalle:

$$\varphi = 20^\circ \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (3-3)$$

, missä veden tilavuuspaino  $\gamma_w = 1,0 \text{ kp/dm}^3$ . Helenelund (1966) huomauttaa korrelaation hajonnasta, ja antaa ymmärtää, että kaava on sovitettu siten, että otoksen alhaisen lujuuden näytteetkin tulevat otetuksi huomioon.

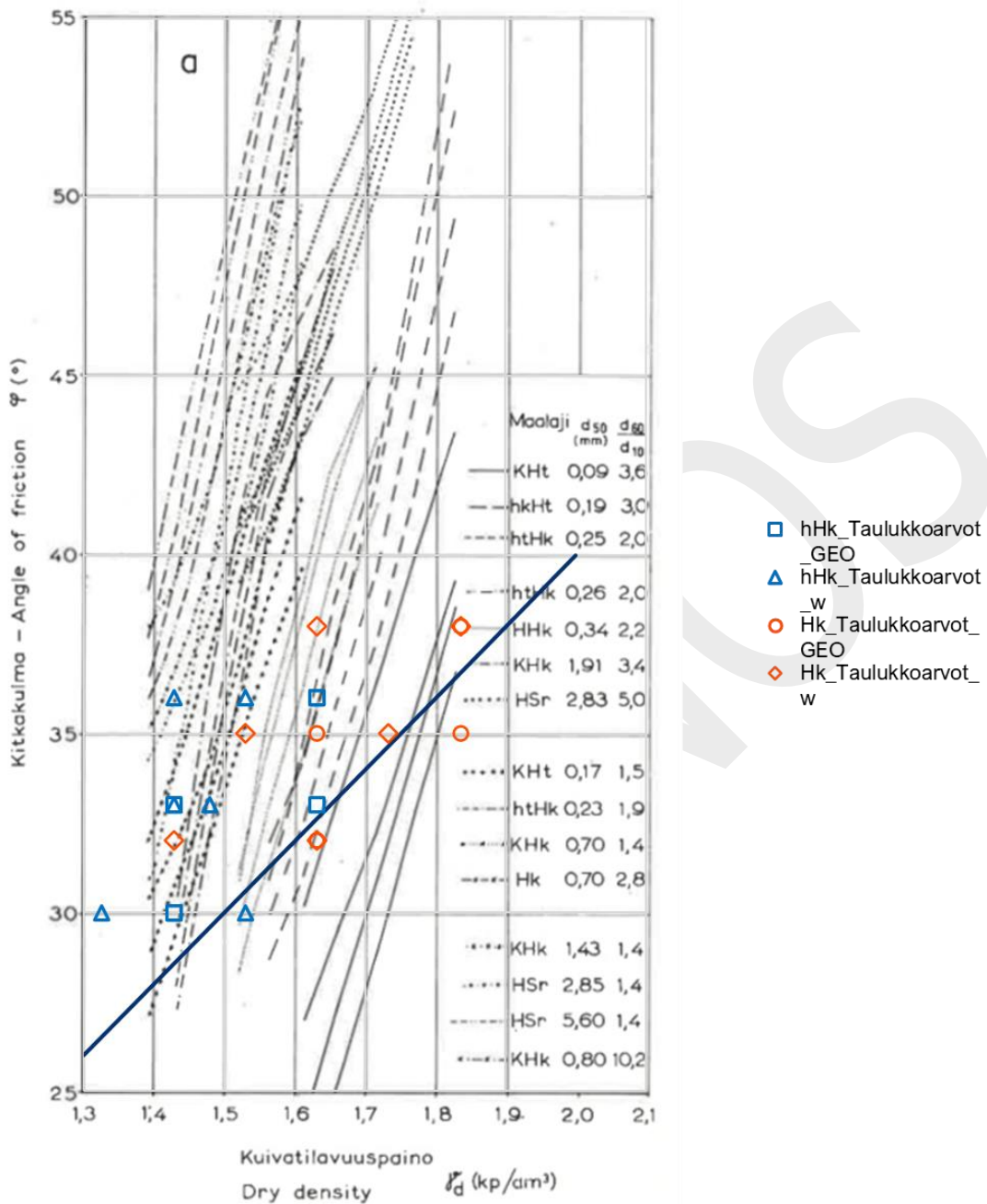
Kuvassa 12 on verrattu hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvoja Helenelundin (1966) rasialeikkauskoekoosteeseen ja korrelaatioon. Kuivatilavuuspaino määritettiin GEO-luokituksen perusteella (löyhä – keskitiivis -tiivis): hienolle hiekalle käytettiin GEO-luokituksen arvoja hiekkaiselle siltille. Vertailu tehtiin myös siten, että taulukkoarvojen tilavuuspainojen perusteella arvioitiin vastaavat kuivatilavuuspainot Kaavalla (2-3). Vesipitoisuuden  $w$  arvona käytettiin Ronkaisen (2012) esittämistä mediaaneista laskettuja keskiarvoja:

- hienolle hiekalle käytettiin hiekan ja silttisen hiekan arvoja
- hiekalle käytettiin hiekan ja soraisen hiekan arvoja

Koska taulukkoarvoissa ei ole esitetty keskitiiviille hiekalle ja hienolle hiekalle tilavuuspainon arvoja, arvoina käytettiin löyhän ja tiiviin tilavuuspainojen keskiarvoja.

Kuvasta nähdään, että Helenelundin (1966) korrelaatio on havaintoihin nähden konservatiivinen. Taulukkoarvot ovat yhteneviä havaintojen kanssa, mutta sijoittuvat havaittujen kitkakulman arvojen alimpaan joukkoon.



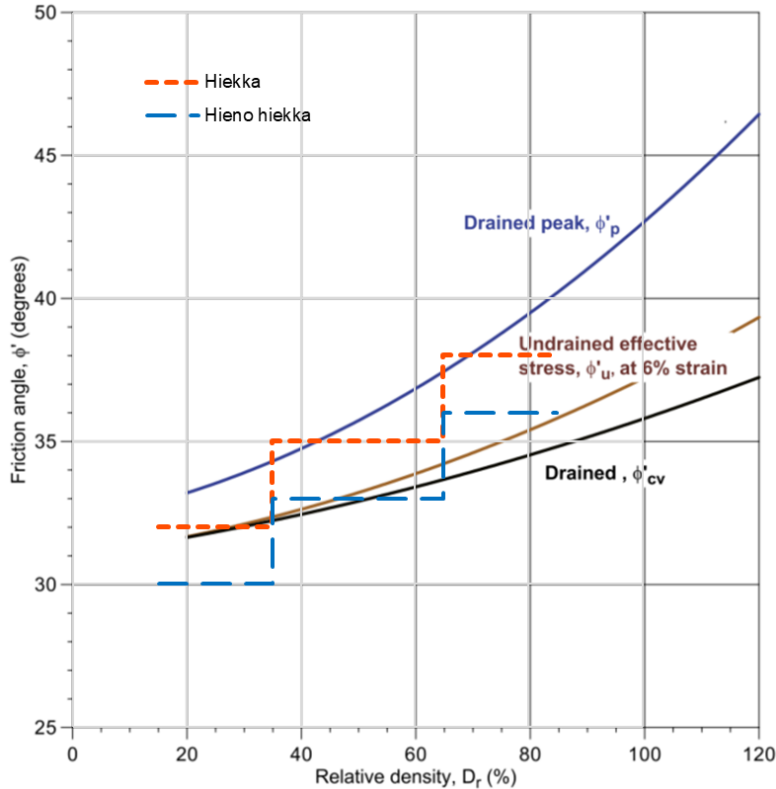


Kuva 12. Hiekan ja hienon hiekan kitkakulman taulukkoarvojen vertaaminen Helenelundin (1966) koosteeseen). Kuivatilavuuspaino on määritetty kahdella menetelmällä: (1) hiekan ja hiekkaisen siltin GEO-luokituksen arvot; (2) taulukkoarvojen tilavuuspainoista ja vesipitoisuuden  $w$  kirjallisuusarvoista lasketut arvot.

Andersen ja Schjetne (2013) ovat verranneet hiekanäytteille määritettyjä eri kitkakulmia (huippulujuutta vastaavaa tehokas kitkakulma  $\varphi'_p$  ja kriittistä tilaa vastaava kitkakulma). Hiekanäytteistä 80 % ei sisältänyt silttiä ollenkaan, ja suurin silttipitoisuus oli 13 %. Vajaa puolet kolmiakσιαalikokeista oli tehty offshore-kohneiden merenpohjan hiekoille. Andersen ja Schjetne (2013) koostivat tuloksia kuvaajan, jossa on esitetty eri kitkakulmien riippuvuus suhteellisesta tiiveydestä. Kuvassa 13 on verrattu hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvoja koosteeseen: kuvasta nähdään, että hiekan taulukkoarvot sijoittuvat pitkälti huippulujuutta vastaavan kitkakulman  $\varphi'_p$  ja kriittistä tilaa vastaava kitkakulman väliin  $\varphi'_{cs}$ . Löyhän hiekan



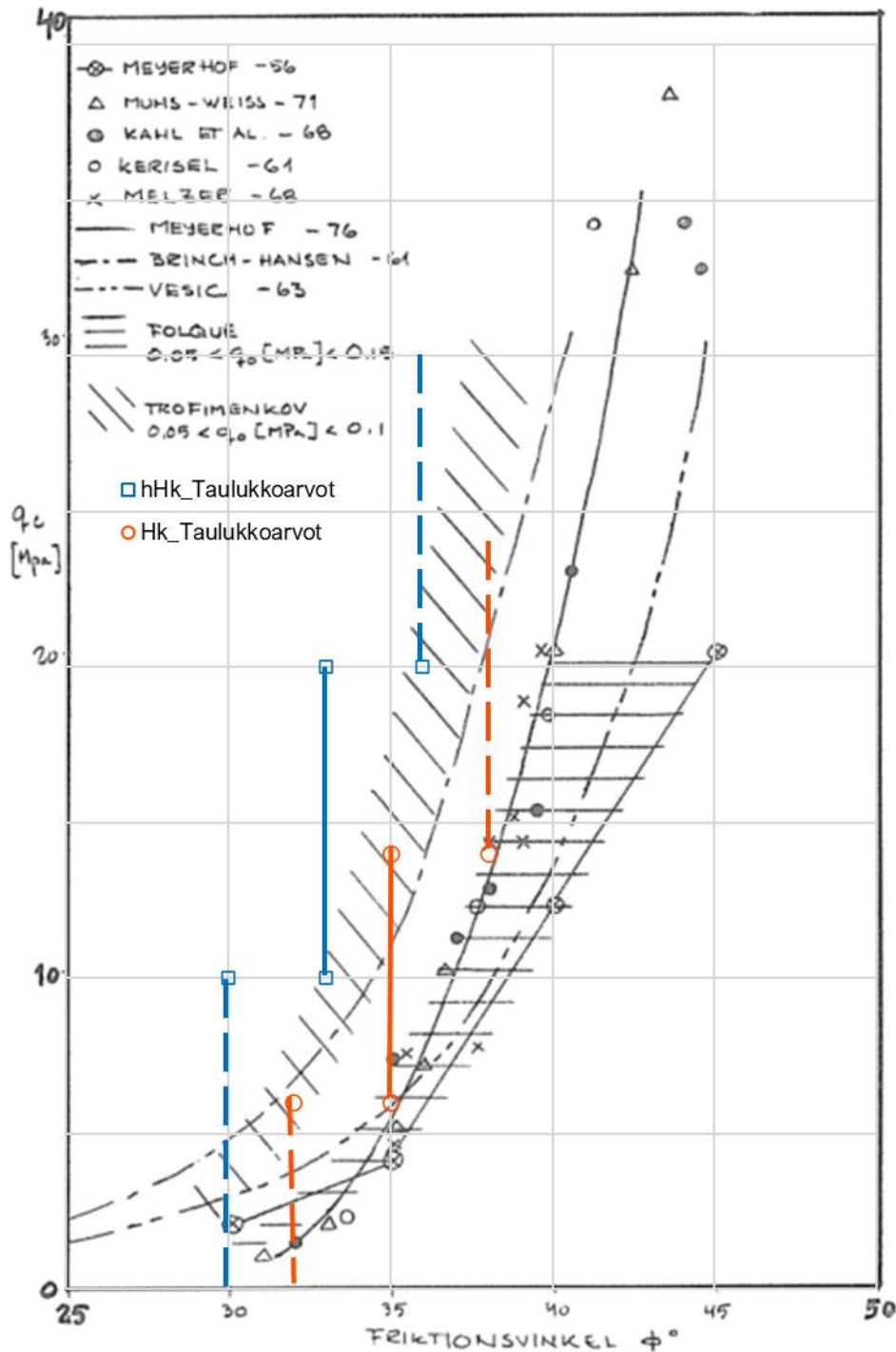
kitkakulma vastaa paremmin kitkakulmaa  $\varphi'_{cs}$ . Hienon hiekan taulukkoarvot taas sijoittuvat lähemmäs kriittisen tilan kitkakulmaa  $\varphi'_{cs}$ . Koska taulukkoarvot vastaavat kitkakulmaa  $\varphi'_{cs}$ , voidaan päätellä, että taulukkoarvot ovat koosteeseen nähden konservatiivisia, etenkin hienon hiekan osalta.



Kuva 13. Hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvojen vertaaminen kansainvälisen tietokannan (Andersen & Schjetne 2013) suhteellinen tiiveys – kitkakulma - riippuvuuksiin.

Samoin saksalaisiin taulukkoarvoihin (Smolczyk 2002) verrattaessa havaittiin, että hiekan taulukkoarvot vastaavat pikemminkin jäännöskitkakulman kuin huippukitkakulman  $\varphi'_p$  arvoja (ks. Liite 4).

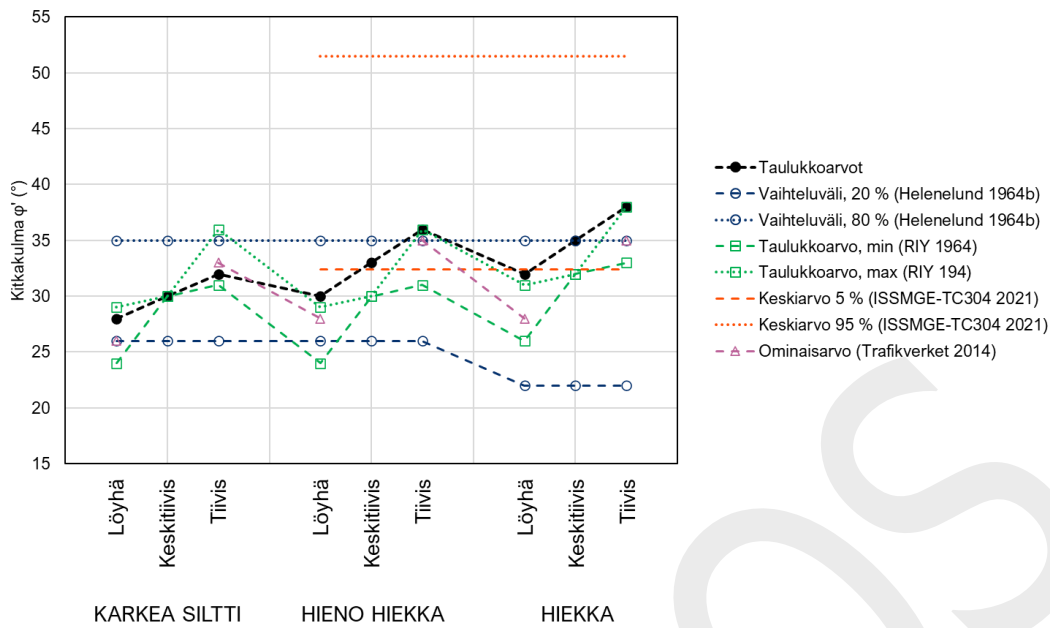
SGI:n julkaisussa (Bergdahl & Eriksson 1983, s. 50) on koostettu hiekan kitkakulman ja puristinkairauksen kärkivastuksen  $q_c$  välisiä empiirisiä korrelaatioita (ks. Kuva 14). Kuvasta voidaan havaita, että hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvot ovat pääosin pienempiä kuin korrelaatioiden mukaiset kitkakulmat.



Kuva 14. Hiekan kitkakulman arvioiminen puristinkairauksen kärkivastuksen avulla (Bergdahl & Eriksson 1983, s. 50) ja vertailu taulukkoarvojen kanssa.

Kansainvälisen koonnin mukaan hiekan kitkakulman keskiarvon 95 % luottamusväli on 32,4°...51,5°, keskiarvon ollessa 38,4° (ISSMGE-TC304 2021). Koosteessa on 23 otosta, joista jokaisessa on 10–136 havaintoa. Taulukkoarvot hienolle hiekalle ja hiekalle (vaihteluväli 30°...38°) sijoittuu siten kansainväliseen koosteeseen nähden keskiarvon alle.

Kuvaan 15 on koostettu osa yllä esitetystä hiekan kitkakulman kirjallisuusarvoista taulukkoarvojen ohella eri tiiveysluokissa. Kuvassa on esitetty myös kirjallisuusarvot karkean siltin osalta.



Kuva 15. Kooste: hiekan taulukkoarvot kitkakulmalle ja kirjallisuusarvoja. Arvot esitetty myös karkealle siltille.

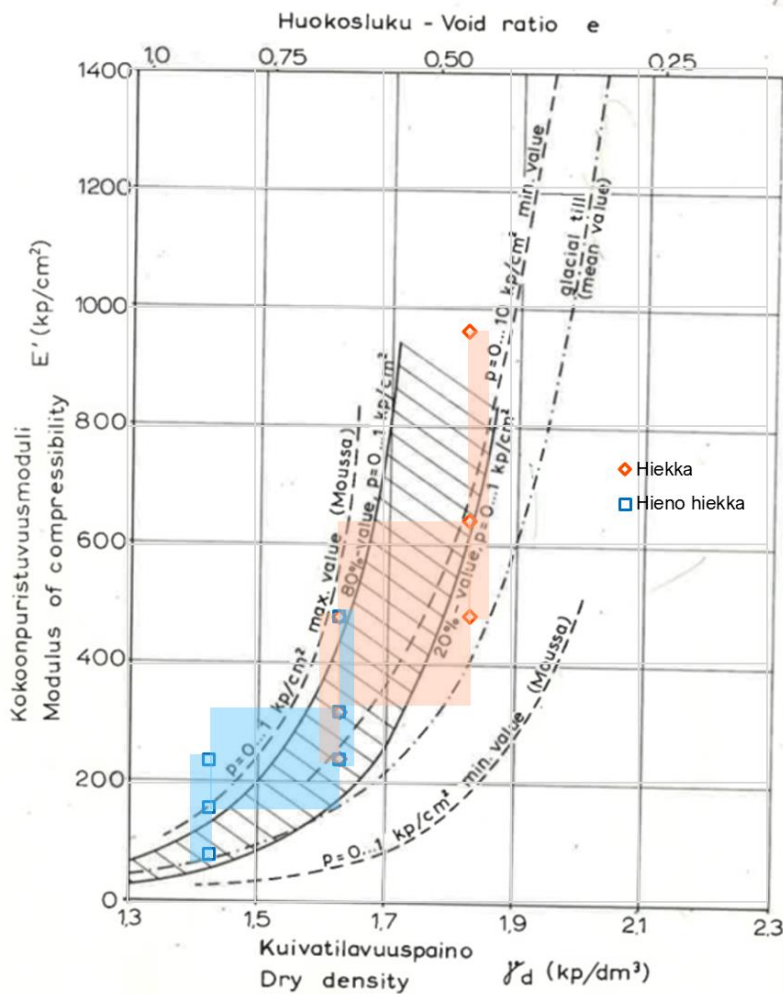
Yhteenveto (hienon hiekan ja hiekan kitkakulmat):

- Taulukkoarvot vaikuttavat olevan muuhun kirjallisuuden nähden joko hieman alhaisempia tai verrattain lähellä keskimääräisiä arvoja. Kansainväliseen koontiin verrattaessa taulukkoarvot sijoittuvat hiekan kitkakulman vaihteluväliin (95 % luottamusväli) alapäähän.
- Verrattuna ruotsalaisiin ja norjalaisiin ominaisarvojen taulukkoarvoihin, suomalaiset taulukkoarvot hiekan kitkakulmalle ovat hieman suurempia

### 3.3.3 Painumaominaisuudet

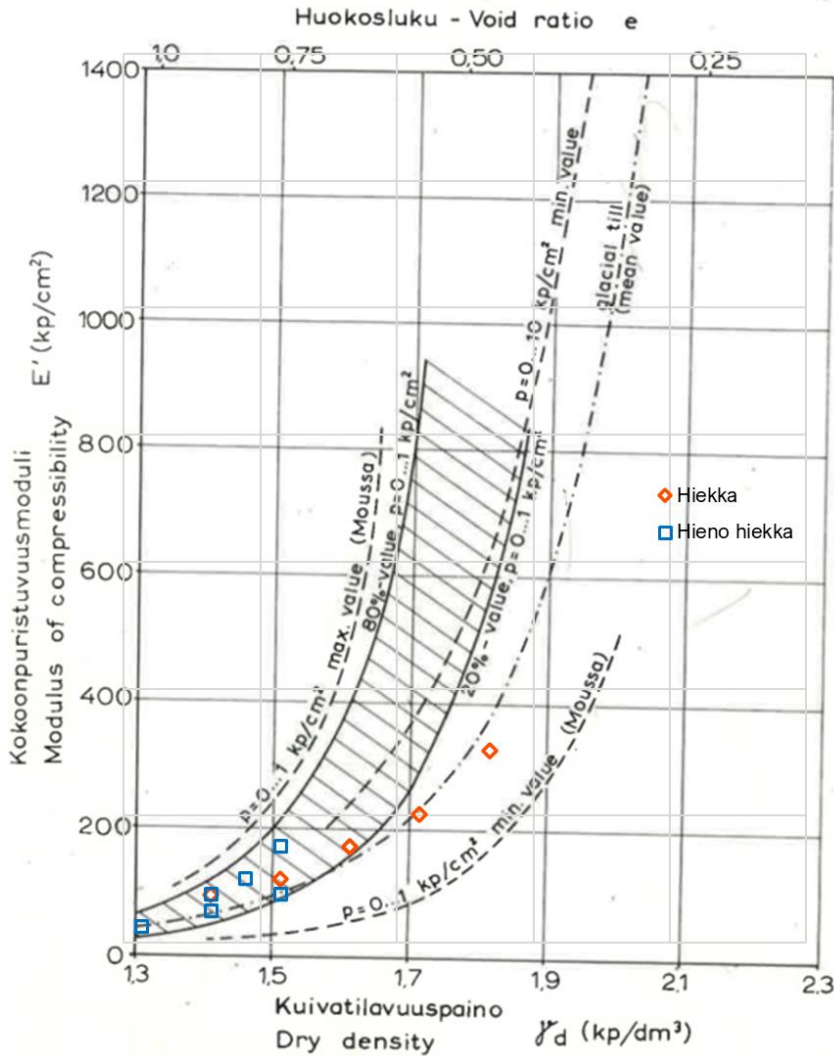
HeleneLund (1966) koosti hienon hiekan, hiekan ja soran moduulin arvoja kuivatilavuuspainon ja huokosluvun funktiona. Koosteen perusteella moduuli kasvaa voimakkaasti kuivatilavuuspainon kasvaessa. HeleneLundin (1966) mukaan eri maalaajien moduulien hajonta pienenee, jos muuttujana käytetään kuivatilavuuspainon sijaan suhteellista tiiveyttä.

HeleneLund (1966) esitti moduulin Ohden yhtälön kautta, joten suoraa vastaavuutta Janbun parametrien kanssa ei ole. Janbun yhtälöllä määritettiin taulukkoarvojen perusteella likimääräinen moduuli hiekalle ja hienolle hiekalle olettaen  $\beta = 0,5$  ja käyttäen jännitysliisäystä  $0 \text{ kPa} \Rightarrow 981 \text{ kPa}$  (vastaten  $0 \dots 10 \text{ kp/cm}^3$ ). Kuivatilavuuspaino määritettiin GEO-luokituksen perusteella (löyhä – keskitiivis – tiivis): hienolle hiekalle käytettiin GEO-luokituksen arvoja hiekkaiselle siltille. Kuvassa 16 verrataan HeleneLundin (1966) koostetta taulukkoarvojen kautta määritetyille likimääräisille moduulin arvoille. Kuvasta nähdään, että taulukkoarvot sijoittuvat HeleneLundin minimiarvojen lähetyville. Mainittakoon, että mikäli jännitysliisäykseksi oletetaan  $0 \text{ kPa} \Rightarrow 98,1 \text{ kPa}$ , arvot sijoittuvat lähelle kansainvälisiä (Moussan) minimiarvoja. Tämän vertailun perusteella hiekan ja hienon hiekan moduuliluku  $m$  on kirjallisuusarvoihin nähden vaihteluvälin alapäässä. Toisaalta tulee ottaa huomioon, että muunnos moduuliluvuksi sekä kuivatilavuuspainon määrittäminen tiiveysluokan perusteella tuovat vertailuun epävarmuutta.



Kuva 16. Hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvojen vertaaminen Helenelundin (1966) Kuvaan 6. Määritys on tehty jännityslisäykselle  $0...10 \text{ kp/cm}^2$  ja kuivatilavuuspaino perustuu GEO-luokitukseen.

Vertailu tehtiin myös siten, että taulukkoarvojen tilavuuspainojen perusteella arviointiin vastaavat kuivatilavuuspainot Kaavalla (2-3), perustuen Ronkaisen (2012) esittämiin vesipitoisuuden kirjallisuusarvoihin. Jännityslisäykseksi oletettiin  $0 \text{ kPa} \Rightarrow 98,1 \text{ kPa}$ . Kuva 17 esittää tulkitut arvot, ja nähdään, että lähes kaikki taulukkoarvot sijoittuvat Helenelundin (1966) koosteen 20% ja 80% arvokäyrien väliin. Näin ollen tämän tulkinnan mukaan taulukkoarvot edustavat tyypillisiä havaittuja arvoja. Poikkeuksena tähän ovat tiiviin hiekan moduulit, jotka ovat Helenelundin koosteeseen nähden alhaisemmat, mutta kansainvälisten minimiarvojen yläpuolella.

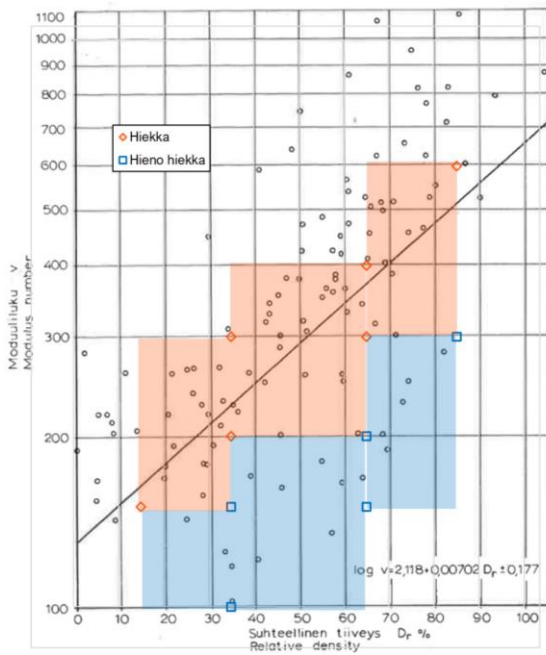


Kuva 17. Hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvojen vertaaminen Helenelundin (1966) Kuvaan 6. Määritys on tehty jännitysliksälle  $0...1 \text{ kp/cm}^2$  ja kuivatilavuuspaino on laskettu taulukon tilavuuspainojen ja vesipitoisuuksien kirjallisuusarvojen perusteella.

Tammirinteen (1969) julkaisuun on koottu (kuivien) kitkamaanäytteiden ödometrikokeita Suomesta ja ulkomailta. Suomalainen aineisto käsittää pääasiassa erilaisia hiekköjä: vain yksi näyte edustaa rakeisuuden osalta hienoa hiekkaa, ja sekin on mineraalijauhetta luonnonmaan sijasta. Tammirinne (1969) vertasi havaintojaan Moussan kansainväliseen aineistoon.

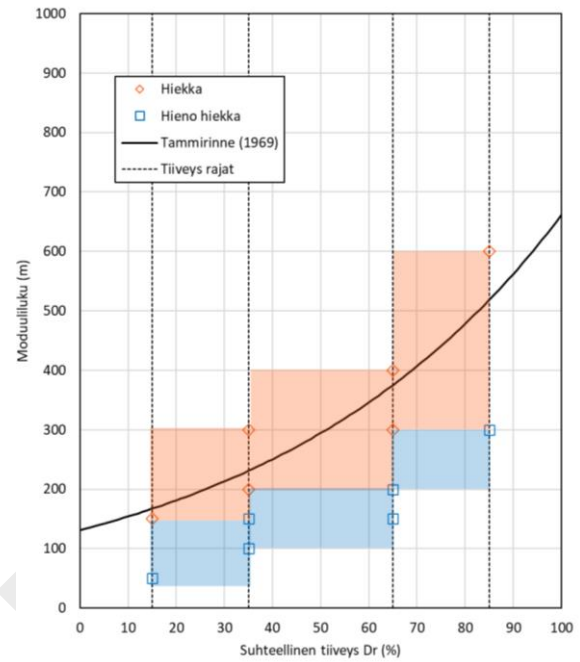
Aineiston mukaan moduuliluku  $m$  riippuu ensisijaisesti maalajin rakenteellisesta tiiveydestä sekä sen lisäksi sen maksimi- ja minimitiiveydestä, joskin hajonta on merkittävää (taulukkoissa on esitetty regression korrelaatiokerroin ja keskimääräinen virhe). Alla olevissa kuvissa (Kuva 18a–b) on verrattu Tammirinteen (1969) aineistoa sekä siihen perustuvaa empiiristä korrelaatiota hiekan ja hienon hiekan taulukkoarvoihin. Taulukkoarvojen osalta suhteellisen tiiveyden arvona käytettiin hiekan arvoja (Taulukko 6).

(a)



Kuva 36. Moduuliluvun  $v$  ja maalaajin suhteellisen tiiveyden  $D_r$  välinen vuorosuhde tässä tutkimuksessa käytetyille maalaajille.

(b)

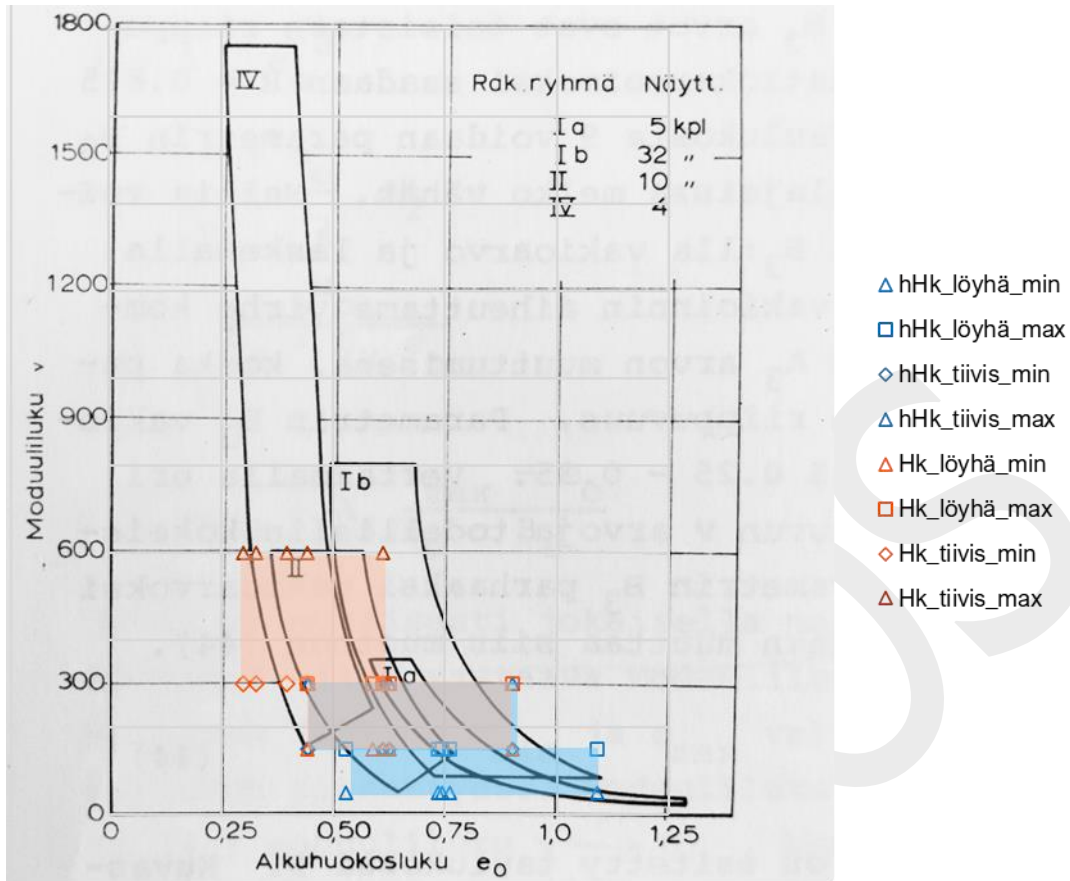


Kuva 18. Moduuliluku  $m$  (kuvassa  $v$ ). Taulukkoarvojen vertaaminen Tammirinteen (1969) aineiston ja korrelaation kanssa: (a) logaritminen asteikko; (b) lineaarinen asteikko ja laajempi moduuliluvun raja.

Kuvista nähdään, että hiekan taulukkoarvot moduuliluvulle vastaavat hyvin Tammirinteen (1969) aineistoa. Taulukkoarvot sijoittuvat havaintojen keskiosiin ja tasaisesti korrelaation ympärille. Sitä vastoin hienon hiekan taulukkoarvot ovat löyhän hiekan osalta Tammirinteen (1969) aineistoon nähden pienempiä. Muutoin taulukkoarvot sijoittuvat aineiston pienempien arvojen joukkoon, ja selkeästi korrelaation alapuolelle. Toisin sanoen tämän vertailun perusteella hienon hiekan taulukkoarvot ovat konservatiivisia.

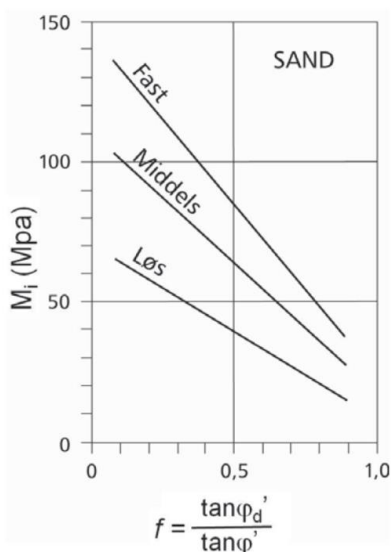
Valkeisenmäki (1973) esitti hiekan ja soran moduuliluvun huokosluvun  $e_0$  funktiona. Kuvassa 19 on verrattu taulukkoarvojen hienon hiekan ja hiekan moduulilukuja Valkeisenmäen koontikuvaajaan. Valkeisenmäen aineistossa näyteryhmä Ia käsitti hienoja hiekkoja, Ib tasarakeisia hiekkoja, II karkeita sekarakeisia hiekkoja ja IV soramaalajeja. Taulukkoarvojen tilavuuspainoista on laskettu  $e_0$  Kaavalla (2-5) olettaen maa pohjavedenpinnan yläpuolella kuivaksi tai osittain kyllästyneeksi ( $S_r = 50\%$ ) ja pohjavedenpinnan alapuolella täysin vedellä kyllästyneeksi. Laskennallisessa huokosluvussa on paljon hajontaa, mutta kuvasta kuitenkin nähdään, että hienon hiekan taulukkoarvot (merkitty sinisellä) vastaavat hyvin Valkeisenmäen havaintoja (näyteryhmä Ia). Hiekan taulukkoarvot (merkitty oranssilla) sijoittuvat pääosin karkeiden sekarakeisten hiekkojen alueelle (ryhmä II), mutta limittymistä myös tasarakeisten hiekkojen kanssa on (ryhmä Ib). Tasarakeisille hiekoille taulukkoarvot olisivat hieman konservatiivisia.





Kuva 19. Hienon hiekan ja hiekan moduulilukujen taulukkoarvojen vertaaminen Valkeisenmäen (1973, kuva 25) aineistoon.

Norjalaisessa suunnitteluohjeessa (Statens vegvesen 2010) on esitetty hiekalle moduulin  $M_i$  arvoja eri tiiveysluokissa (ks. Kuva 20). Hienon hiekan ja hiekan moduulilukujen ja jännitysekspontin perusteella saadaan moduuliksi  $M$  (jännitysvälillä 10...50 kPa) korkeimmillaan 15 MPa ja 31 MPa, eli suomalaiset taulukkoarvot sijoittuvat norjalaisen menettelyn alimpaan suuruusluokkaan.

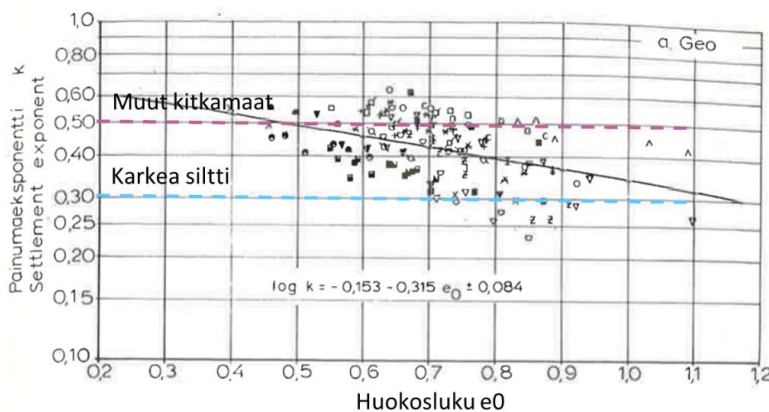


Kuva 20. Moduuli  $M_i$  hiekalle (Statens vegvesen 2010, s. 96).

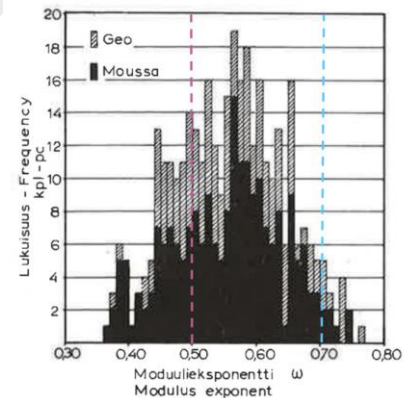
Jännityseksponentin  $\beta$  osalta Tammirinne (1969) osoittaa, että mm. rakenteellinen tiiveys vaikuttaa sen arvoon. Merkitys on kuitenkin verrattain vähäinen, minkä vuoksi monet tutkijat ovatkin ehdottaneet kitkamaalajeille käytettävän  $\beta$  vakioarvoa: Tammirinteen (1969) mukaan Moussa ja Janbu ovat esittäneet arvoksi  $\beta = 0,5$ , mikä vastaa taulukkoarvon lukua kaikille muille maalajeille paitsi karkealle siltille. Kuvissa 21a–b on verrattu Tammirinteen (1969) aineistoa ja huokoslukuun perustuvaa korrelaatiota taulukkoarvojen kanssa. Kuvista nähdään, että kitkamaalajien taulukkoarvo  $\beta = 0,5$  on hieman keskimääräistä arvoa suurempi.

Tammirinteen (1969) aineisto koostui kuiville kitkamaanäytteille tehdyistä ödometrikokeista. Moussan kansainvälisissä tutkimuksissa on osoitettu, että kuivan kitkamaanäytteen painumaominaisuudet vastaavat vedellä kyllästyneen näytteen (pohjavedenpinnan alapuolella). Sitä vastoin osittain kyllästyneen maan tapauksessa kokoonpuristuvuusmoduuli on kapillaarivoimista johtuen suurempi kuin kuivalla maalla olisi. Tästä voidaan päätellä, että ainakin hiekan osalta taulukkoarvot ovat konservatiivisia silloin kun niitä sovelletaan osittain kyllästyneelle maalle (vs. kuiva tai vedellä täysin kyllästynyt).

(a)



(b)



Kuva 41. Ödometrikokeella määritettyjen moduuliekspONENTIN  $\omega$  arvojen jakautuma.

Kuva 21. Jännityseksponentti  $\beta$  (kuvassa  $k$ ). Taulukkoarvojen vertaaminen Tammirinteen (1969) aineiston ja korrelaation kanssa: (a)  $\beta$  huokosluvun funktiona; (b) ModuuliekspONENTIN  $\omega = 1 - \beta$  histogrammit (Geo = suomalainen aineisto).



Taulukkoon 14 on koottu muita, eri lähteissä esitettyjä arvoja hiekan painumaominaisuuksille eri tiiveysluokissa.

Taulukko 14. Hiekalle esitettyjä painumaominaisuuksia.

Lähde	Kuvaus	Maalaji	Moduuliluku $m$			Jännitys- ekspon- nenti
			Löyhä	Keskitiivis	Tiivis	
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		Hieno hiekk $d_{10}<0,06$	50...150	100...200	150...300	0,5
Valkeisenmäki (1973)	Havaittuja arvoja, aineiston ryhmä Ia.	Hieno hiekk				0,25...0,35
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	Ruotsalaiset tau- lukkoarvot, omi- naisarvoja	Sand (Hk)	50...60		200...300	
Janbu (1963)	Havaintoja huokoi- suuden funktiona	Sand (Hk)	70...130	110...500		0,2...0,7
Taulukkoarvot (Taulukko 1)		Hiekka $d_{10}>0,06$	150...300	200...400	300...600	0,5
Valkeisenmäki (1973)	Havaittuja arvoja, aineiston ryhmä Ib	Hiekka				0,35...0,60
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	Ruotsalaiset tau- lukkoarvot, omi- naisarvoja	Sand (Hk)	50...60		200...300	
Janbu (1963)	Havaintoja huokoi- suuden funktiona	Sand (Hk)	70...130	110...500		0,2...0,7

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot on esitetty kimmomoduulille, jonka muunnos moduuliluvuksi on kuvattu tarkemmin Liitteessä 3.

Taulukosta 14 voidaan havaita, että ruotsalaiset taulukkoarvot moduuliluvulle vastaavat paremmin hienon hiekan kuin hiekan taulukkoarvoja. Hiekan taulukkoarvoihin verrattuna ruotsalaiset arvot ovat pienempiä. Sitä vastoin Janbun (1963) havaitsemat hiekan moduuliluvut vastaavat paremmin hiekan kuin hienon hiekan taulukkoarvoja.

Yhteenveto (hiekan ja hienon hiekan painumaominaisuudet):

- Hiekan taulukkoarvot moduuliluvulle vastaavat pitkälti kirjallisuuden keskiarvoja, etenkin suomalaisen aineiston osalta. Näihin aineistoihin nähden hienon hiekan taulukkoarvot ovat pienempiä.
- Kun verrataan taulukkoarvoja kirjallisuuden esittämiin moduulien arvoihin, moduulilukujen taulukkoarvot näyttävät vastaavan suomalaisen ja kansainvälisen aineiston keskiarvoja tai minimiarvoja (muunnoksen oletuksista riippuen).

- Ruotsalaiset taulukkoarvot hiekan moduulille ovat hieman konservatiivisempia suomalaisiin taulukkoarvoihin nähden, kun taas norjalaiset suunnitteluohjeet ehdottavat hiekalle huomattavasti suurempia moduulin arvoja
- Hiekan jännitysekspONENTIN osalta taulukkoarvo vastaa likimain kirjallisuuden havaittua keskiarvoa. Hienolle hiekalle on suomalaisessa aineistossa havaittu taulukkoarvoon nähden pienempiä arvoja (n. 0,3, eli vastaten paremmin karkean siltin taulukkoarvoa).

## 3.4 Sora

### 3.4.1 Tilavuuspaino

Taulukossa 15 on verrattu hienon hiekan ja hiekan tilavuuspainojen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin.

*Taulukko 15. Soran tilavuuspainon taulukkoarvojen vertailu kirjallisuuden arvojen kanssa.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella			Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella		
		löyhä	keski-tiivis	tiivis	löyhä	keski-tiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Sora	17..19		18...20	10...		12
Helenelund (1964b) <sup>a)</sup>	Sora	15,7...19,6					
Trafikverket 2014 <sup>b)</sup>	Grus (Sr)	17		19	11		12
Statens vegvesen (2010) <sup>c)</sup>	Grus (Sr) *	19					
	Grus (Sr) **	18		19			

<sup>a)</sup> 20 %...80 % fraktiilien vaihteluväli, suomalainen aineisto (lisätietoa Liitteessä 2).

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>c)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitusta varten (lisätietoa Liitteessä 3).

Taulukkoarvoissa annetut soran tilavuuspainon luvut asettuvat hyvin yhteen ruotsalaisten ja norjalaisten ohjearvojen kanssa. Sitä vastoin Helenelundin (1964b) aineistossa soran tilavuuspaino oli hieman pienempi taulukkoarvoihin nähden.

Taulukkoarvoja verrattiin myös saksalaisiin taulukkoarvoja (Smoltczyk 2002), jotka edustavat havaittuja tyypillisiä arvoja. Vertailu on esitetty Liitteen 4 erikoistyyssä (Luku 2.2): havaittiin, että tilavuuspainon taulukkoarvot vastaavat hyvin saksalaisia arvoja soralle.

Yhteenveto (soran tilavuuspaino)

- Soran taulukkoarvot vastaavat ruotsalaisia ja norjalaisia taulukkoarvoja
- Taulukkoarvot vastaavat pitkälti myös suomalaisen aineiston mukaisia tyypillisiä arvoja

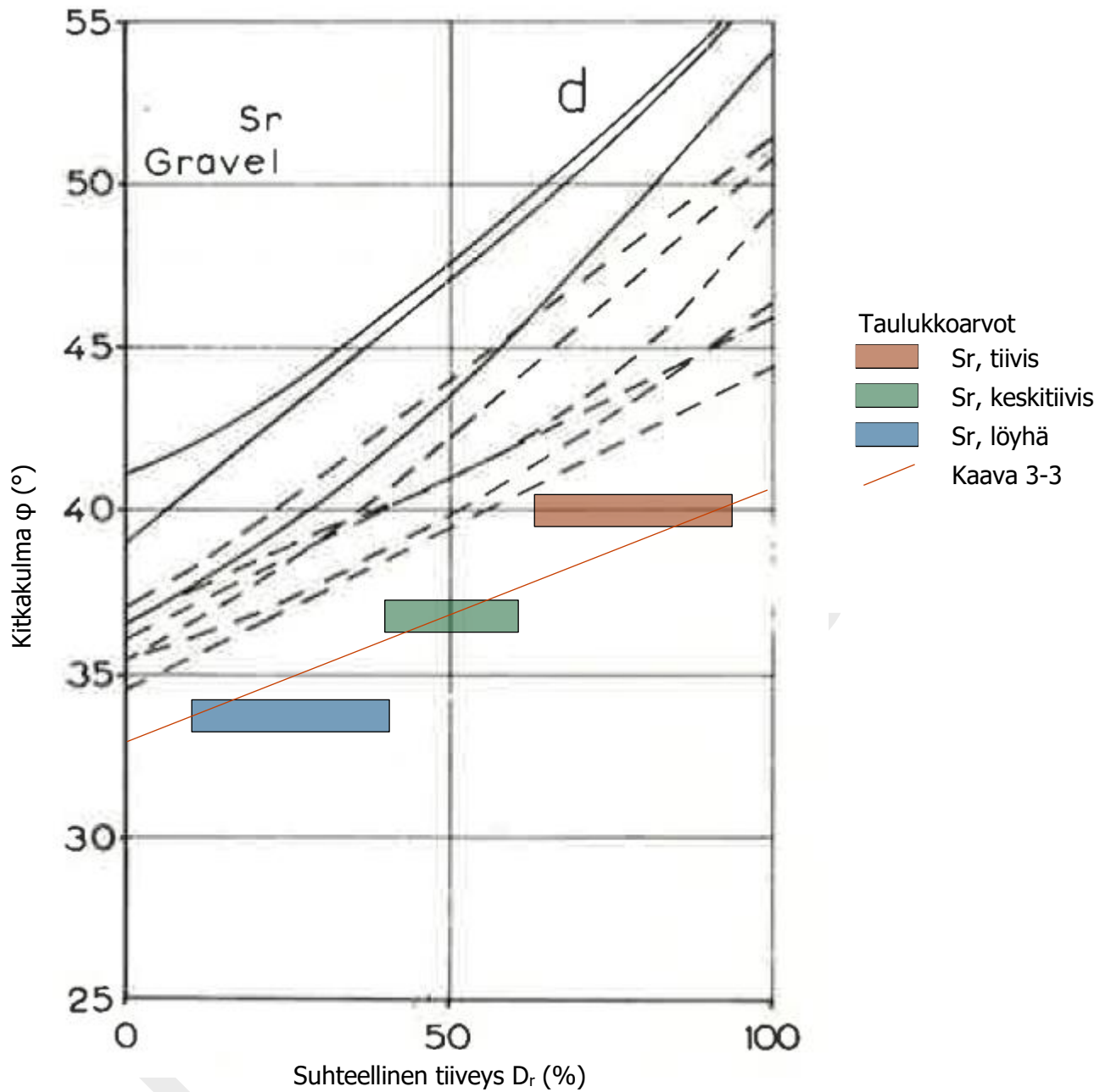
### 3.4.2 Lujuusominaisuudet

Valkeisenmäen mukaan (1974) karkearakeisissa maissa rakeet eivät ”pidä kiinni” toisistaan, vaan sen sijaan tukeutuvat toisiinsa kosketuspisteissä. Tiiviissä maala-  
jissa kosketuspisteitä on enemmän, minkä ansiosta kantavuusominaisuudet para-  
nevat tiiviiden noustessa. Soran lujuus riippuu myös raekoostumuksesta ja rae-  
muodosta. Soralla, jonka rakeet ovat pyörityneitä, on keskimäärin pienempi kit-  
kakulma kuin soralla, jonka rakeet ovat särmikkäitä. Samoin tasarakeinen sora on  
keskimäärin heikompaa kuin sekarakeinen sora. Tätä yhteyttä on kuvattu Taulu-  
kossa 16. Suomessa soran syntyperän vuoksi sorien rakeet ovat yleensä pyörity-  
neitä (Korhonen 1974).

*Taulukko 16. Rakeisuusjakauman ja raemuodon vaikutus soran leikkauskestävyyskulman ominaisarvoon (Liikennevirasto 2012, perustuen RIL 121-1988).*

Maalaji	Rakeisuusjakauman muoto	Raemuoto	Leikkauskestävyyskulman ominais- arvo (°)	
			Löyhä tila	Hyvin tiivis tila
Sora	Lajittunut	Pyöritynyt	32	≤41
		Särmikkäs	35	≤44
	Suhteistunut	Pyöritynyt	32	≤45
		Särmikkäs	35	≤48

Kuva 21 kuvastaa Helenelundin (1966) kokoamaa kitkakulman riippuvuutta soran suhteellisesta tiiveydestä, perustuen Eklundin (1961) diplomityöhön. Kitkakulmien määrityksessä ei ole otettu huomioon dilataation vaikutusta, mikä saa kitkakulman arvot vaikuttamaan korkeammilta kuin ne todella ovat. Kuvassa on esitetty myös soran taulukkoarvot, hyödyntäen Taulukon 5 mukaista tiiveysluokitusta. Kuvasta havaitaan, että soran kitkakulman taulukkoarvot ovat Helenelundin (1966) esittä-  
mään aineistoon nähden pienempiä.



Kuva 22. Kitkakulman riippuvuus maalajin suhteellisesta tiiveydestä laboratoriossa suoritettujen leikkaus- ja kolmiaksaalikokeiden mukaan (Helenelund 1966). Palkit kuvaavat soran taulukkoarvoja. Punainen viiva kuvastaa kaavan 3-3 mukaista yhteyttä.

Taulukossa 17 on esitetty soran taulukkoarvoja eri pohjoismaalaisissa ohjeissa.

*Taulukko 17. Soran kitkakulman vertaaminen pohjoismaalaisten taulukkoarvojen kanssa.*

Lähde	Maalaji	Kitkakulma (°)		
		löyhä	keski- tiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Sora	34	37	40
Trafikverket 2014 <sup>a)</sup>	Grus (Sr)	30		37
Statens vegvesen (2010) <sup>b)</sup>	Grus (Sr) *	35		38
	Grus (Sr) **	36		38/40 ***

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>b)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitusta varten (lisätietoa Liitteessä 3).

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.

Taulukosta voidaan havaita, että suomalaiset arvot ovat löyhän tilan osalta ruotsalaisten ja norjalaisten taulukkoarvojen keskimäästössä, kun taas tiiviin tilan puolesta suomalainen arvo on korkein. Ruotsalainen ohje on suomalaista konservatiivisempi, kun taas norjalainen ohje on tiiviin tilan puolesta sallivampi. Ruotsalaisen ja norjalaisen ohjeen tiiviin tilan ohjearvo istuu paremmin suomalaisen ohjeen keskitiiviiseen tilaan.

Saksalaiseen taulukkoarvoihin (Smoltczyk 2002) verrattaessa havaittiin, että soran taulukkoarvot vastaavat paremmin jäännöskitkakulman kuin huippukitkakulman  $\varphi'_p$  arvoja (ks. Liite 4).

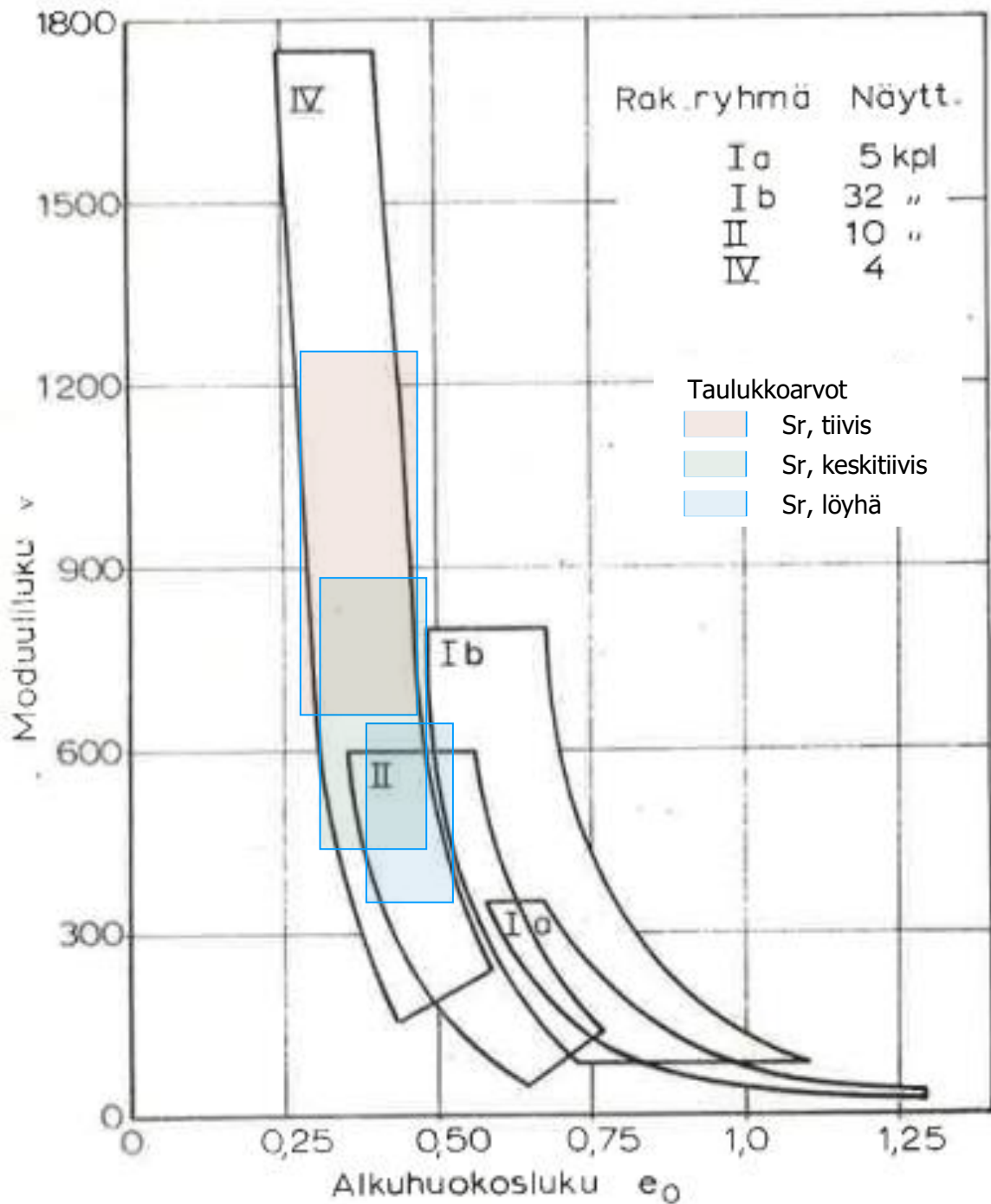
Yhteenveto (soran kitkakulma):

- Soran taulukkoarvot ovat suomalaiseen aineistoon nähden konservatiivisia
- Taulukkoarvot seuraavat läheisesti Helenelundin esittämää varovaisesti määritettyä empiiristä kaavaa (Kaava 3–3)
- Taulukkoarvot ovat lähellä norjalaisia taulukkoarvoja. Ruotsalaiset taulukkoarvot sen sijaan ovat paikoin pienempiä

### 3.4.3 Painumaominaisuudet

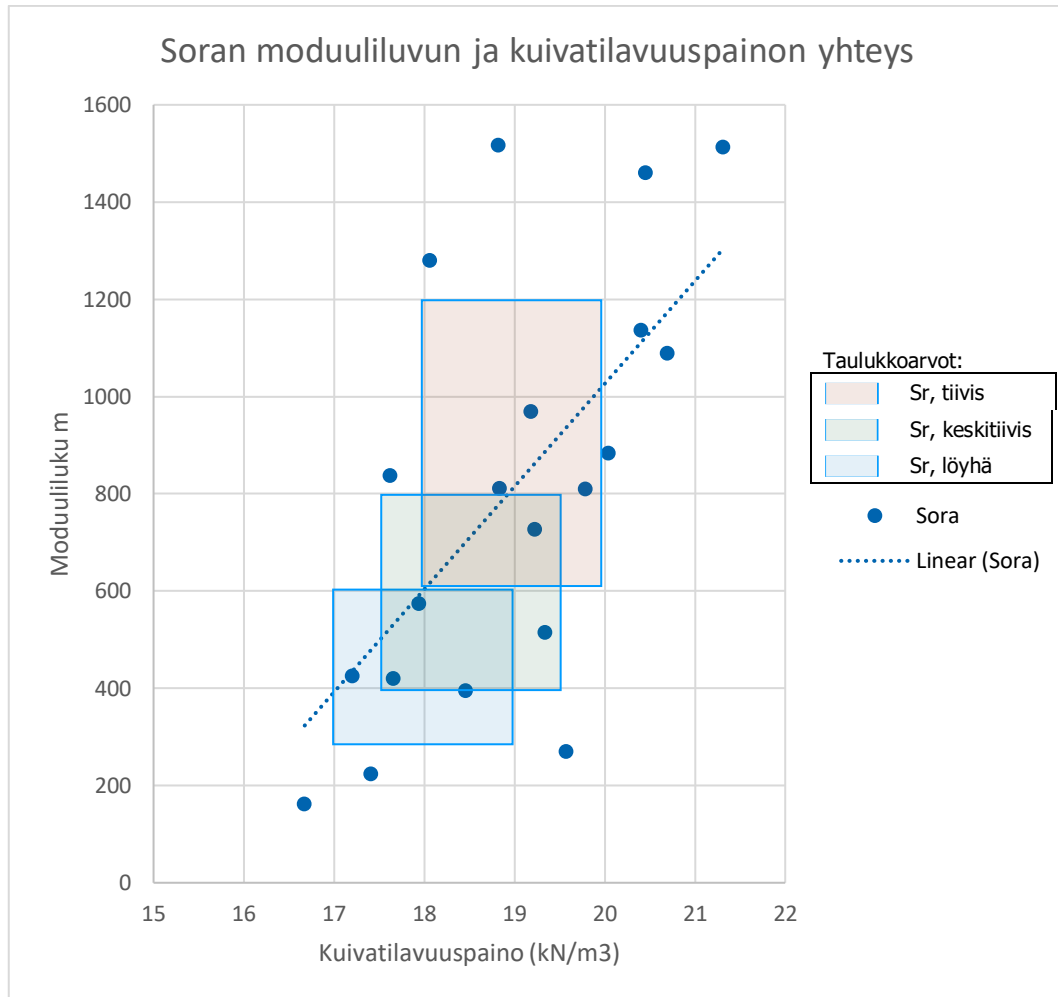
Soralle moduuliluku  $m$  vaihtelee tiiveyden mukaan suuremmin kuin hiekoissa, kuitenkin kasvaen tiiveyden kasvaessa. Kuvassa 20 on esitetty Valkeisenmäen (1973) koostama moduuliluvun ja alkuhuokosluvun suhde eri rakeisuusryhmille. Kuvassa suorakulmiot kuvastavat soran moduuliluvun taulukkoarvoja. Tiiveyttä vastaava kuivatilavuuspaino on muutettu alkuhuokosluvun arvoon Kaavan (2-2) mukaisesti.

Soran mineraalikoostumus on yleisesti sama kuin kallioperässä lähialueella. Suuret rakeet ovat tyypillisesti kovimpia ja eniten kulutusta kestäviä kivilajeja. (Valkeisenmäki 1973). Tämä vähentää soran painumia, kun suuret rakeet eivät murskaudu kuorman alla.



Kuva 23 Moduuliluvun  $m$  (tekstissä  $v$ ) ja alkuhuokosluvun  $e_0$  vastinpisteiden jakautumat eri rakeisuusryhmissä. Rakeisuusryhmä 4 sisältää sekarakeisia soria. (Valkeisenmäki 1973)

Kuvassa 21 on Valkeisenmäen (1973) aineistoon pohjautuen koostettu suhde moduuliluvun ja kuivatilavuuspainon välillä. Alkuperäisestä aineistosta on poistettu yksi poikkeava havainto. Kuivatilavuuspainon arvot on saatu alkuperäisistä alkuhuokosluvun arvoista kaavan 2–3 mukaisesti.



*Kuva 24 Valkeisenmäen (1973) aineistosta kerätty yhteys soran moduuliluvun ja kuivatilavuuspainon välille.*

Taulukossa 18 on esitetty vertailu suomalaisten ja ruotsalaisten taulukkoarvojen välillä soran moduuliluvusta. Ruotsalaiset arvot ovat selkeästi suomalaisia taulukkoarvoja pienempiä, mikä tosin voi osaltaan johtua muunnoksesta kimmomodulista moduuliluvuksi.

*Taulukko 18 Soran moduuliluvun taulukkoarvojen vertaaminen ruotsalaisiin taulukkoarvoihin.*

Lähde	Maalaji	Moduuliluku		
		löyhä	keskitiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Sora	300...600	400...800	600...1200
Trafikverket 2014 <sup>a)</sup>	Grus (Sr)	100...200		400...500

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot on esitetty kimmomodulille, jonka muunnos moduuliluvuksi on kuvattu tarkemmin Liitteessä 3.

Valkeisenmäki (1973) määrittä sekarakeisista sorista muodostuvan ryhmän jännityksen eksponentin  $\beta$  normalistoituna suhteelliseen tiiveyteen 50 %, ja havaitsi että

$\beta = 0,6 \dots 0,8$ . Valkeisenmäen mukaan on kuitenkin mahdollista, että karkearakeisemmillä näytteillä ödometrin pieni koko voi vääristää tulosta. Toisaalta moduuliluvulla on huomattavasti suurempi vaikutus laskennalliseen painumaan kuin jännityseksponentilla.

Andreassonin (1973) mukaan jännityseksponentti  $\beta$  kasvaa rakeen kasvaessa, ja pienenee rakeiden pyörityessä. Andreassonin (1973) mukaan soran  $\beta$  on tyypillisesti yli 0,6.

Yhteenveto (soran painumaominaisuudet)

- Moduuliluvun taulukkoarvot ovat suomalaisen aineistoon nähden lähellä todellista havaittua vaihteluväliä
- Moduuliluvun taulukkoarvot ovat ruotsalaisia ominaisarvoja suurempia
- Jännityseksponentin taulukkoarvo (0,5) on hieman pienempi kuin kirjallisuudessa havaittu tyypillinen vaihteluväli soralle (0,6...0,8)



## 3.5 Moreeni

### 3.5.1 Tilavuuspaino

Taulukossa 19 on verrattu moreenin tilavuuspainojen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin pohjavedenpinnan yläpuolella. Esitetyt kirjallisuusarvot sisältävät kuivatilavuuspainoja sekä tilavuuspainoja, mikäli tilavuuspainoista ei ole mainintaa, ovatko ne pohjavedenpinnan ylä- vai alapuolelta.

Vastaavasti Taulukossa 20 on esitetty moreenin tilavuuspainojen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuusarvoihin pohjavedenpinnan alapuolella.

*Taulukko 19. Moreenin tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuuden arvoihin pohjavedenpinnan yläpuolella.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella				
		hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis	hyvin tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Moreeni	16...19	17...20	18...21	19...23	-
Trafikverket (2014) <sup>c)</sup>	siltimoreeni		18		20	
	hiekkamoreeni		18		20	
	soramoreeni		18		20	
Helenelund 1964a)	Moreeni	...14,7	14,7...16,7	16,7...18,6	18,6...20,6	20,6...
Helenelund (1964a) kolmiakσιαaliko-keet	hiesumoreeni	14,1...17,4 <sup>b)</sup>				
	hietamoreeni	17,7...21,3 <sup>b)</sup>				
	hiekkamoreeni	16,9...20,8 <sup>b)</sup>				
Helenelund (1964b) <sup>d)</sup>	Hiesumoreeni	17,7...20,6				
	Hietamoreeni	18,6...21,6				
	Hiekkamoreeni	17,7...21,6				
Maapatotutkimus (RIY 1959)	Hiekka- ym. moreenit	12,8...21,6 <sup>a)</sup>				
	Soramoreeni	9,8...21,6 <sup>a)</sup>				

<sup>a)</sup> Alaraja-arvo "löysän täytön sullontakokeesta ja yläraja-arvo Proctor-sullonnasta

<sup>b)</sup> Näytteiden lukumäärät: hiesumoreeni 3 kpl, hietamoreeni 17 kpl ja hiekkamoreeni 7 kpl

<sup>c)</sup> Trafikverket (2014) ohjeistaa, että mikäli kitkamaa sisältää yli 15 % kiviä tai lohkareita, kasvatetaan tilavuuspainoa 1 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan yläpuolella) tai 0,5 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan alapuolella): tätä vaikutusta ei ole otettu huomioon vertailutaulukossa.

<sup>d)</sup> Pienempi arvo vastaa 20 % -fraktiilia ja ylempi 80 % -fraktiilia

*Taulukko 20. Moreenin tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuuden arvoihin pohjavedenpinnan alapuolella.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella				
		hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis	hyvin tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Moreeni	10...12	10...12	11...13	11...14	-
Tolla & Hartikainen (1999) <sup>b)</sup>	Vesimoreeni (Raippaluodon silta)	10	11	11	12	
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	silttimoreeni		12		13	
	hiekkamoreeni		11		12	
	soramoreeni		10		11	

<sup>a)</sup> Trafikverket (2014) ohjeistaa, että mikäli kitkamaa sisältää yli 15 % kiviä tai lohkarkeitä, kasvatetaan tilavuuspainoa 1 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan yläpuolella) tai 0,5 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan alapuolella): tätä vaikutusta ei ole otettu huomioon vertailutaulukossa.

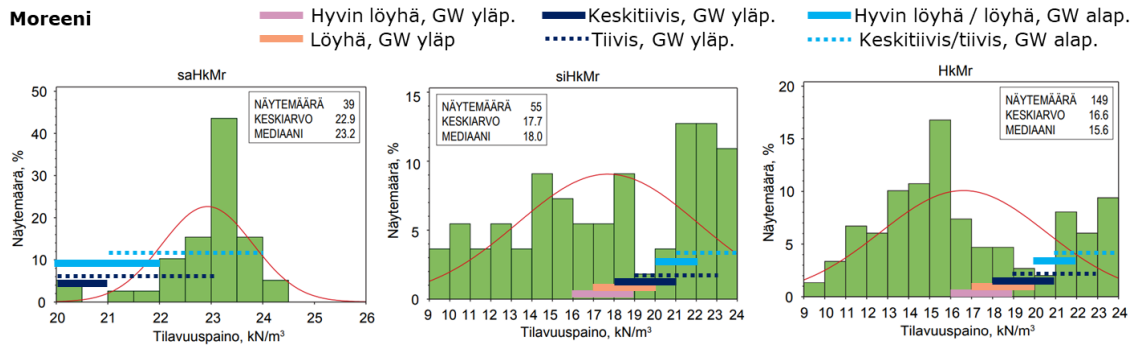
<sup>b)</sup> Keskimääräiset ominaisarvot sillan tuella T12. Vesimoreenilla tarkoitetaan mannerjään sulaessa sen sisältä vapautunutta, tiiviin pohjimoreenin päälle sedimentoitunutta epähomogeenista moreenikerrostumaa.

Taulukoista 19 ja 20 nähdään, että moreenin taulukkoarvot vastaavat hyvin ruotsalaisia taulukkoarvoja. Ruotsalaisissa taulukkoarvoissa moreenin tilavuuspainot on esitetty hieman tarkemmin sen mukaan, mikä on moreenin päämaalaji. Tällä on merkitystä tilavuuspainon arvoon. Samaa jaottelua ei ole tehty suomalaisissa taulukkoarvoissa.

Sen sijaan Helenelundin (1964b) aineiston mukainen vaihteluväli sijoittuu moreenin taulukkoarvojen alapäähän tai jopa alle, osittain johtuen erilaisesta tiiviysluokajaottelusta. Helenelundin (1964b) mukaisessa jaottelussa on lisäksi luokka ”hyvin tiivis”, jota nykyään käytössä olevissa taulukoissa ei ole. Joka tapauksessa, tiiviysluokkien lukumäärästä huolimatta, Helenelund (1964b) arvot ovat konservatiivisempia nykyään käytössä olevien taulukkoarvojen suhteen.

Taulukossa 19 on esitetty lisäksi muutamasta muustakin tutkimuksesta (Helenelund 1964a ja RIY 1954) saatuja tilavuuspainoja moreenille pohjavedenpinnan yläpuolella. Luetuista julkaisuista ei käynyt ilmi, missä tiiveydessä moreeninäytteet ovat olleet, joten taulukossa on esitetty kokonaisvaihteluväli tutkimuksessa käytettyjen moreeninäytteiden tilavuuspainoille. Tutkimuksissa esitetyt tilavuuspainojen vaihteluvälit osuvat jokseenkin hyvin taulukkoarvojen kokonaisvaihteluvälille (hyvin löyhä – tiivis). Tutkimuksista käy myös ilmi, että moreenimaalajin rakeisuudella on merkitystä moreenin tilavuuspainoon (esimerkiksi hiesumoreeni vai hiekkamoreeni), johon myös ruotsalaisessa ohjeistuksessa oli otettu kantaa.

Kuvassa 24 on verrattu taulukkoarvojen tilavuuspainojen vaihteluvälejä Ronkaisen (2012) julkaisussa jakaumiin.



Kuva 25. Moreenimaalajien tilavuuspainojen jakaumia (Ronkainen 2012) verrattuna moreenin taulukkoarvojen vaihteluväleihin.

Kuvasta 24 nähdään, että moreenin taulukkoarvot ovat siHkMr- ja HkMr- ja kaumien yläpäässä verrattaessa Ronkaisen (2012) aineistoon. Tässä tulee ottaa huomioon, että kitkamaalajien ”tilavuuspaino on määritetty – punnitsemalla 1–2 litran suuruisen näytteen paino” (Ronkainen 2012, s. 29). Toisin sanoen tilavuuspaino ei vastaa luonnontilaisen maakerroksen tiiveyden mukaista tilavuuspainoa. Lisäksi tiiviiden maakerrosten osalta näytteenotossa tapahtuu löyhtymistä, joten määritetty tilavuuspaino aliarvioidaan tällaisten maakerrosten tapauksessa. Toisaalta valtaosa karkearakeisista maanäytteistä on Ronkaisen (2012) aineistossa otettu koekuopasta, eli verrattain läheltä maanpintaa.

Vastaavasti Taulukossa 19 Helenelundin (1964a) kolmiaksiaalikoenäytteet sekä RIY (1959) maapatotutkimuksessa koestetut näytteet on otettu lähinnä pintamoreeninista syvyydeltä 0...2 metriä, jolloin ne vastaavat myös oletettavasti tilavuuspainon alaraja-arvoja. Tästä syystä näissä tutkimuksissa esitetyt tilavuuspainojen arvot ovat pienempiä, kuin mitä taulukkoarvot. Helenelund (1964a) sanoo kuitenkin, että luonnossa esiintyvän häiriintymättömän moreenin kuivatilavuuspaino on harvoin alle 16,7 kN/m<sup>3</sup> ja harvoin yli 21,6 kN/m<sup>3</sup>, jolloin taulukkoarvot osuvat hyvin tälle vaihteluvälille.

Maapatotutkimuksen (1959) moreenin tilavuuspainon vaihteluvälin alaraja-arvo on määritetty löysän täytön sullontakokeella (löyhä tila) ja yläraja-arvo Proctor-sullonnalla (tiivis tila). Moreenin tiiveydellä ja vesipitoisuudella on merkitystä moreenin tilavuuspainoon.

Kirjallisuusarvojen mukaan moreenin sisältämällä maalajeilla (hiesu, hieta, hiekka, sora) on vaikutusta niin moreenin tilavuuspainoon kuin sen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiinkin. Lisäksi moreenin tiiveydellä on luonnollisesti vaikutusta moreenin ominaisuuksiin. Esimerkiksi moreenin tiiveyden vaikutus kitkakulmaan on suhteistuneella moreenilla pienempi kuin lajittuneilla kitkamaalajeilla (Helenelund 1964a).

Yhteenvedo (moreenin tilavuuspaino):

- Taulukkoarvot ovat löydettyyn suomalaiseen aineistoon nähden samanlaisia
- Taulukkoarvot vastaavat hyvin ruotsalaisia taulukkoarvoja, joskin ruotsalaisissa taulukkoarvoissa moreenin tilavuuspainot on esitetty hieman tarkemmin sen mukaan, mikä on moreenin päämaalaji
- Suomalaisen aineiston mukaan moreenin rakeisuusjakaumalla on vaikutusta moreenin tilavuuspainoon (sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin)

### 3.5.2 Lujuusominaisuudet

Taulukossa 20 on verrattu moreenin kitkakulman taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin.

*Taulukko 20. Moreenin kitkakulman taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin.*

Lähde	Maalaji	Leikkauskestävyyskulma (kitkakulma) [°]				
		hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis	hyvin tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Moreeni	...34	...36	...38	...40	-
Helenelund (1964a)	Moreeni	25...31	28...34	31...37	34...40	37...43
Trafikverket (2014)	silttimoreeni		33		40	
	hiekkamoreeni		35		42	
	soramoreeni		38		45	
Helenelund (1964a) kolmiaksaaliko- keet <sup>a)</sup>	hiesumoreeni	28,8...38,1 <sup>a)</sup>				
	hietamoreeni	32,0...38,8 <sup>a)</sup>				
	hiekkamoreeni	25,4...37,2 <sup>a),b)</sup>				
Helenelund (1964b)	Hietamoreeni	28...36				
	Hiekkamoreeni	26...35				
Helenelund (1964a) leikkauskokeet rasiakairalla	hietamoreeni (Lautsaari) <sup>c)</sup>	32,5...36,5				
	hiekkamoreeni (Silvoila) <sup>c)</sup>	34,2...37,8				
	hietamoreeni (Otanieni) <sup>d)</sup>	33,5...36,0				
Tolla & Hartikainen (1999) <sup>e)</sup>	Vesimoreeni (Raippaluodon silta)	34	36	38	44	

<sup>a)</sup> Näytelukumäärät: hiesumoreeni 3 kpl, hietamoreeni 17 kpl ja hiekkamoreeni 7 kpl

<sup>b)</sup> Yhden kokeen kitkakulma 50,6° poistettu vaihteluvälistä.

<sup>c)</sup> 3 kpl rasialeikkauksia

<sup>d)</sup> 2 kpl rasialeikkauksia

<sup>e)</sup> Keskimääräiset ominaisarvot sillan tuella T12. Koheesion arvo vaihtelu välillä  $c = 2...5$  kPa. Vesimoreenilla tarkoitetaan mannerjään sulaessa sen sisältä vapautunutta, tiiviin pohjamoreenin päälle sedimentoitunutta epähomogeenista moreenikerrostumaa.

Kirjallisuudessa esitetyt moreenin kitkakulmat ovat samankaltaisia, kuin mitä on esitetty suomalaisessa ohjeistuksessa. Verrattaessa ruotsalaiseen ohjeistukseen (Trafikverket 2014) olennainen ero on, että ruotsalainen ohjeistus jakaa moreenin

moreenimaalajien mukaan kolmeen osaan: silttimoreeni, hiekkamoreeni ja sora-moreeni. Lisäksi ruotsalaisessa ohjeistuksessa on ainoastaan kaksi eri tiiviysluokkaa: löyhä ja tiivis. Lukuarvallisesti kitkakulman arvot ovat yhteneviä. Helenelund (1964a) puolestaan jakaa moreenin viiteen eri tiiviysluokkaan, kuten jo aiemmin tilavuuspainon osalta. Sen lisäksi Helenelund (1964a) jakaa moreenin moreenimaalajien mukaan hiesumoreeniin, hietamoreeniin ja hiekkamoreeniin.

Löydettyjen kirjallisuuslähteiden mukaan moreenin rakeisuus (moreenin sisältämät maalajit) vaikuttavaa oleellisesti moreenin kitkakulmaan. Lisäksi kitkakulmaan vaikuttaa esimerkiksi moreenin vesipitoisuus sekä se, onko kitkakulman määrittämisessä otettu huomioon tehokas koheesio vai ei. Esimerkiksi Taulukon 20 moreenin kitkakulmat Helenelund (1964a) koesarjoista sisältää kitkakulmia, jotka on määriteltä eri vesipitoisuuden, tiiviyssasteen ja tehokkaan koheesio-omaavilta moreeneilta. Lisäksi Taulukon 20 koetuloksista johdettujen kitkakulmien arvoja tarkasteltaessa on syytä muistaa, että kentällä tehdyt rasiakairakokeet sekä kolmiaksaalikoikeissa käytetyt näytteet ovat enimmäkseen 0–2 metrin syvyydeltä pintamoreenista, jolloin niiden voidaan ajatella edustavan varovaisia arvoja. Syvemmillä moreeni on tiiviimpää, jolloin sen voi olettaa olevan myös lujempaa (Helenelund 1964a).

Helenelundin (1964b) mukaan esimerkiksi hietamoreenin tyypillinen tehokas koheesio on 0–7 kPa ja hiekkamoreenin 0–5 kPa.

Moreenimaalajien kitkakulmien perusarvot voidaan määrittää pohjarakennusohjeiden (RIY 1964) mukaan niissä esiintyvän päämaalajin mukaisesti seuraavasti:

- soramoreeni 37°,
- hiekkamoreeni 35°,
- hietamoreeni 32° ja
- hiesumoreeni 31°.

Tämän jälkeen kitkakulmaan lisätään tai siitä vähennetään moreenin tiivyydestä, rakeisuudesta ja raemuodosta riippuva kitkakulman lisäys tai vähennys. Moreenin tiivyyden vaikutus kitkakulmaan on pohjarakennusnormien (RIY 1964) mukaan korkeintaan  $\pm 6^\circ$  (tosin Körkkö (1979) sanoo, että korkeintaan  $\pm 4^\circ$ ). Helenelundin (1964a) suorittamien kenttä- ja laboratoriokokeiden perusteella  $6^\circ$  asteen lisäys tulee kyseeseen ainoastaan hyvin tiiviillä moreenilla.

Käytettäessä Helenelund (1964a) mukaista tiiviysluokitusta, voidaan eri moreenimaalajien edellä esitettyihin kitkakulman perusarvoihin lisästä tai niistä vähentää seuraavat lisäykset ja vähennykset:

- hyvin tiivis moreeni  $+6^\circ$ ,
- tiivis moreeni  $+3^\circ$ ,
- keskitiivis moreeni  $0^\circ$ ,
- löyhä moreeni  $-3^\circ$  ja
- hyvin löyhä moreeni  $-6^\circ$ .

Kuvissa 25–30 on esitetty kirjallisuudesta löydettyä taustamateriaalia. Kuvassa 25 on esitetty hienoaineksen määrän vaikutus moreenimaalajin koheesioon ja kitkakulmaan (Helenelund 1964a). Kuvan 25 mukaan hienoaineksen määrän kasvaessa moreenimaalajin kitkakulma pienenee ja koheesio kasvaa. Kuitenkin suunnittelussa

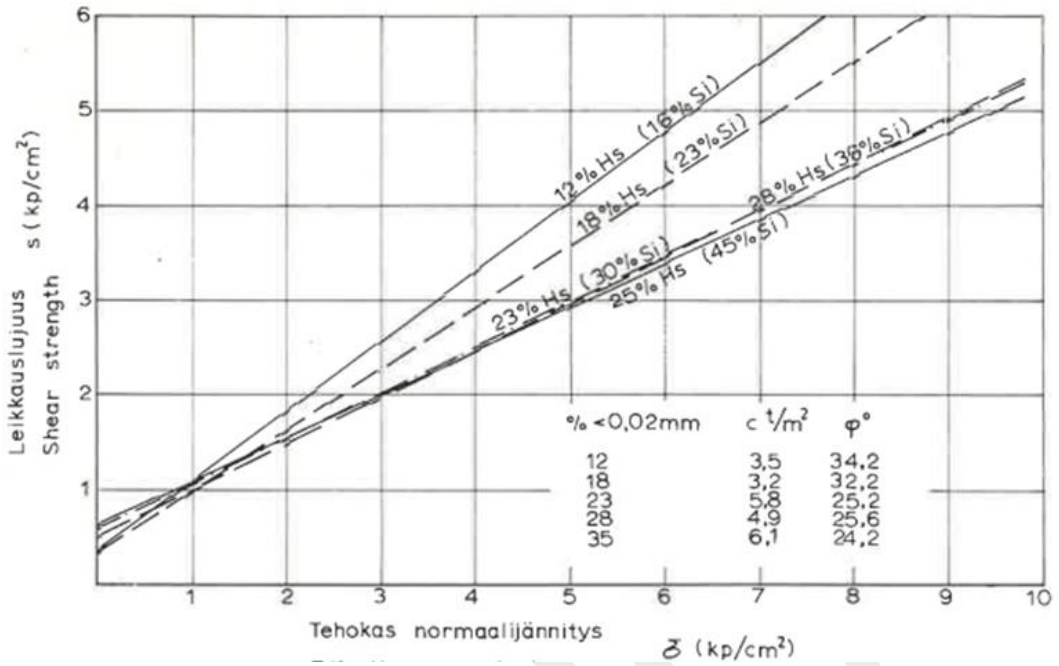
ei yleensä oteta huomioon moreenin koheesiota, sillä moreenin muodonmuutosten oletetaan tapahtuvan pienillä muodonmuutostasoilla, jolloin moreenin voidaan olettaa olevan avoimessa tilassa. Tällöin jos koheesiota ei oteta huomioon, tulee käyttää mahdollisesti suurempaa kitkakulman arvoa. Tähän liittyen kuvassa 26 on esitetty Helenlundin (1964) määrittämät moreenin kitkakulmien arvot kolmiakσιαalikoesarjoihin perustuen. Kuvaan on määritetty samoista kolmiakσιαalikokeista määritetyt moreenin kitkakulman arvot tapauksille, joissa toisessa moreenin koheesio on oletettu nolaksi ja toisessa moreenilla on koheesiota. Kuvasta voidaan huomata, että mikäli moreenin koheesio on nolla, on sen kitkakulma tällöin aavistuksen suurempi.

Kuvassa 27 on esitetty kahden lähde-teen (Helenlund 1964a; Kärkkö 1979) kolmiakσιαalikokeista määritetyt moreenin kitkakulmat kuivatilavuuspainon suhteen, kun moreenin koheesio on oletettu nolaksi. Kärkkön (1979) tekemien kokeiden perusteella moreenin kitkakulma vaikuttaisi kasvavan moreenin kuivatilavuuspainon kasvaessa, joka viittaisi siihen, että moreenin tiivysasteen kasvaessa myös sen kitkakulma kasvaa. Tätä tukee myös Kärkkön (1979) tutkimuksen kuva 30, jossa on laboratorikokeisiin perustuen esitetty moreenin kitkakulman riippuvuus moreenin tiivysasteesta  $D$  kahdessa eri vesipitoisuudessa. Kuvasta 30 nähdään, että moreenin kitkakulma kasvaa, kun moreenin tiivysaste kasvaa.

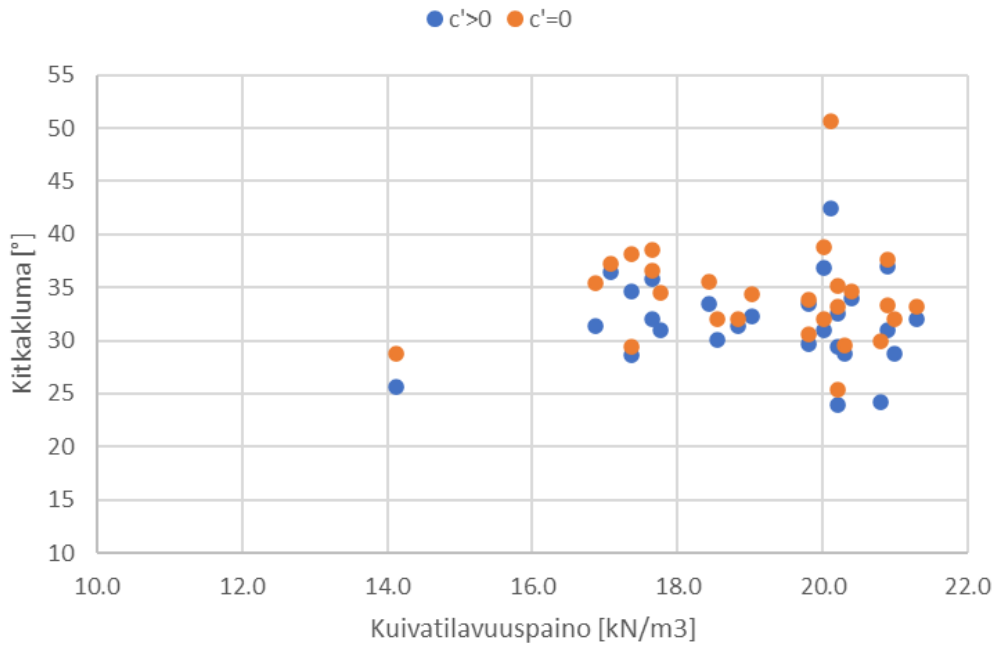
Sen sijaan Helenlundin (1964a) tekemien kolmiakσιαalikokeiden perusteella ei kovin hyvin voida sanoa (kuva 27), että moreenin kitkakulma kasvaisi moreenin kuivatilavuuspainon suhteen.

Kuvassa 28 on esitetty Helenlund (1964a) viisiportainen moreenien tiivysluokitus, jonka päälle on piirretty suomalaisen ohjeistuksen mukaiset taulukkoarvojen vaihteluvälit. Taulukkoarvot mukailevat jokseenkin hyvin Helenlund (1964a) esittämiä arvoja.

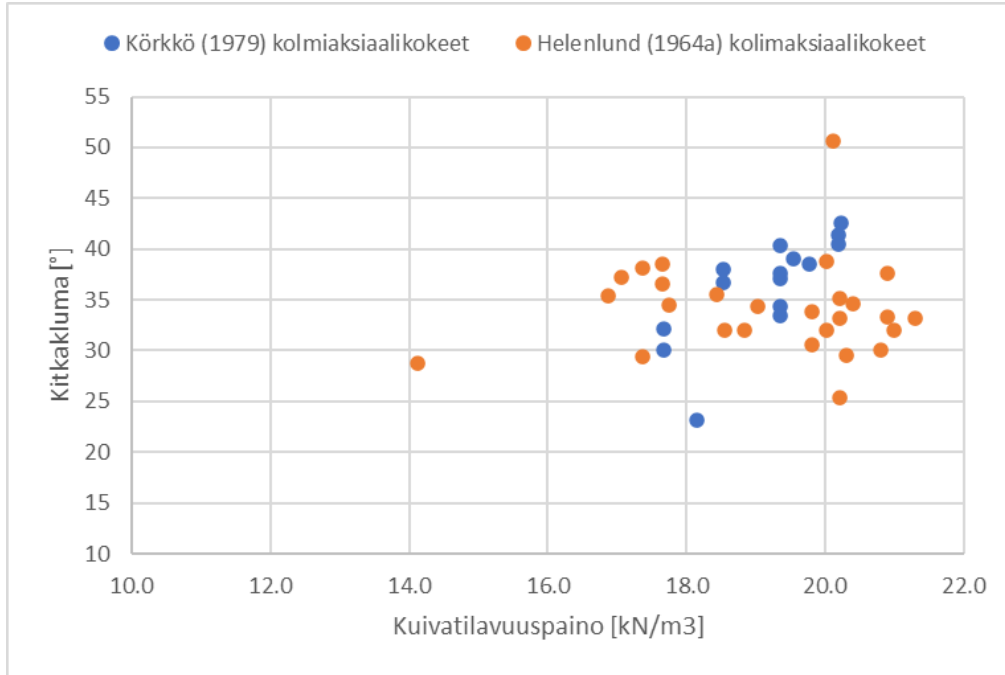
Kuvassa 29 on esitetty Kärkkö (1979) kolmiakσιαalikokeisiin perustuen moreenin vesipitoisuuden vaikutus moreenin kitkakulmaan, kun moreenin tiivysaste on sama. Näiden koetulosten perusteella moreenin kitkakulma näyttäisi pienenevän moreenin vesipitoisuuden kasvaessa.



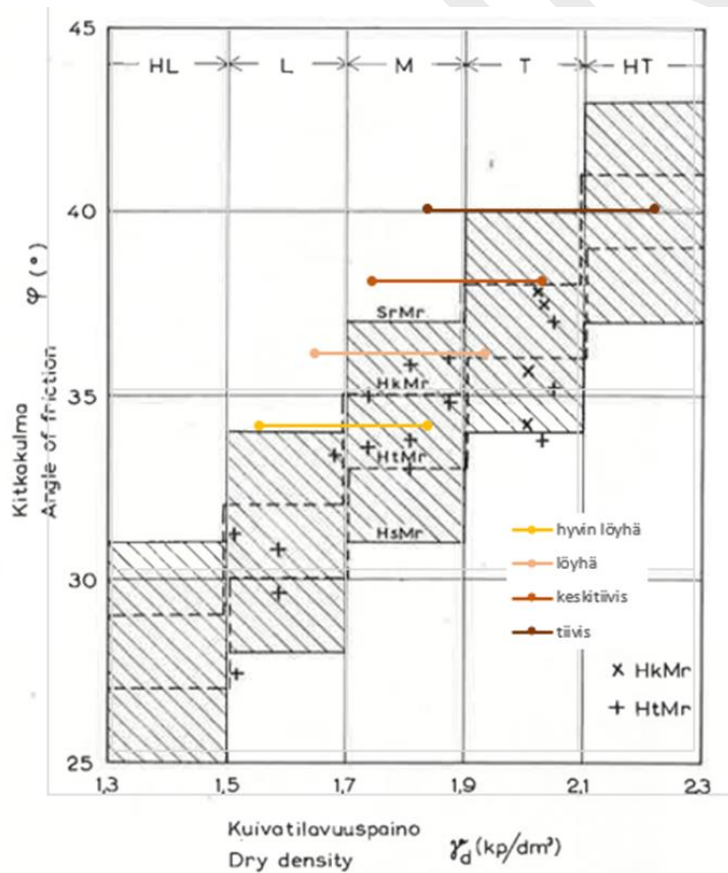
Kuva 25. Hiesu-(siltti)määrän vaikutus monilajitteisen maalajin koheesioon ja sisäiseen kitkakulmaan (Holtz & Willard 1961, kuva otettu lähteestä Helenlund 1964a).



Kuva 26 Helenlundin (1964a) taulukon 1 mukaisen aineiston kitkakulman ja kuivatilavuuspainon välinen riippuvuus. Kuvassa on esitetty kolmiakselikokeista määritetty kitkakulma kahdella olettamuksella: tehokas koheesio on oletettu nolaksi sekä tehokas koheesio on myös määritetty koetuloksista.

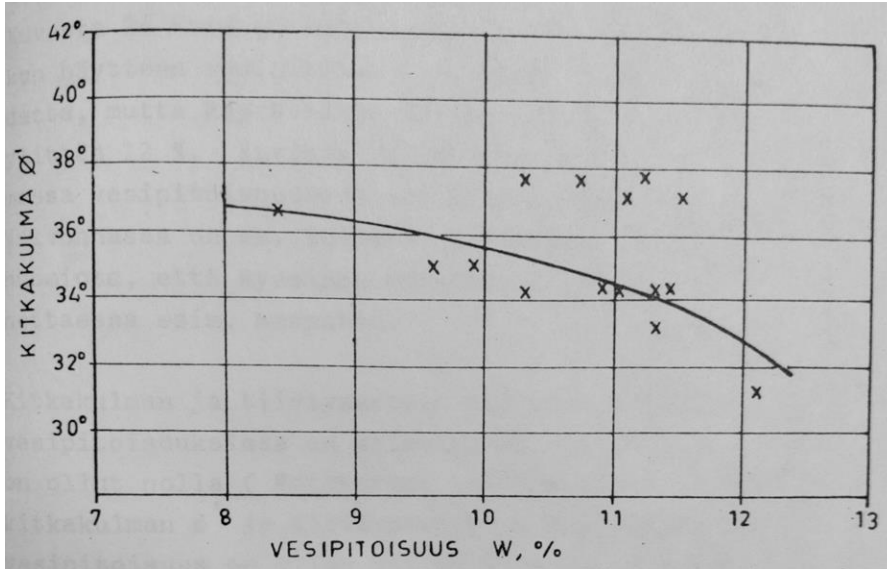


Kuva 27. Helenlund (1964) ja Korkko (1979) tekemien kolmiakiaalikoeketeiden tulokset. Kuvassa on esitetty moreenin kitkakulma ( $c'=0$ ) moreenin kuivatilavuuspainon suhteen.

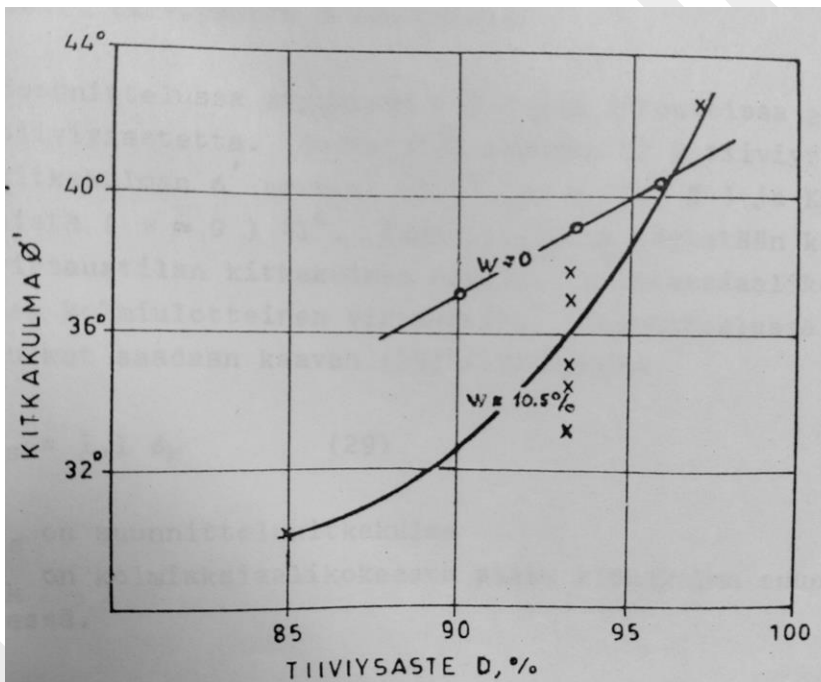


Kuva 28. Kuvassa on esitetty Helenlundin (1964a) mukainen moreenien tiiviytsluokittelu kitkakulman ja kuivatilavuuspainon suhteen. Samaan kuvaan on piirretty taulukkoarvojen vaihteluvälit.





Kuva 29. Moreenin kitkakulman riippuvuus vesipitoisuudesta, kun tiiviysaste  $D=93\%$ . Tulokset perustuvat Körkkö (1979) kolmiaksaalikokeisiin.



Kuva 30. Moreenin kitkakulman riippuvuus moreenin tiiviysasteesta  $D$  kahdessa eri vesipitoisuudessa  $w=0\%$  ja  $w=10,5\%$ . (Körkkö 1979).

Yhteenveto (moreenin lujuusominaisuudet):

- Ruotsalainen ohjeistus antaa suuremmat kitkakulman arvot moreenille, kuin mitä suomalaiset taulukkoarvot ovat. Lisäksi ruotsalaisen ohjeistuksen arvot ovat hyvinkin paljon suurempia, kuin mitä kirjallisuudesta löydettyjen koetulosten perusteella on määritetty, esimerkiksi Helenelund (1964a) hiekkamoreenin osalta
- Oleellinen ero verrattaessa nykyisiä moreenin taulukkoarvoja ruotsalaiseen ohjeistukseen sekä kirjallisuudessa esitettyihin tutkimuksiin on, että moreenimaalajilla on merkitystä moreenin kitkakulmaan. Tätä jaottelua ei ole tehty nykyisessä suomalaisessa ohjeistuksessa

- Lisäksi moreenin kitkakulmaan vaikuttaa se, otetaanko moreenin koheesio huomioon kitkakulmaa määrittäessä ja mikä on moreenin vesipitoisuus. Kirjallisuuden tutkimustulokset sisälsivät vaihtelevasti moreeneja eri rakeisuusilla, vesipitoisuuksilla, koheesioilla ja tiivysasteilla

### 3.5.3 Painumaominaisuudet

Taulukossa 21 on verrattu moreenin moduulilukujen taulukkoarvoja erinäisiin kirjallisuuden arvoihin.

*Taulukko 21. Moreenin moduuliluvun taulukkoarvojen vertaaminen kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin.*

Lähde	Maalaji	Moduuliluku m				
		hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis	hyvin tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 2)	Moreeni	( $\leq 100$ ) * 300...600	(100...250)* 600 ...	800...	1200...	-
Trafikverket (2014) <sup>a)</sup>	silttimoreeni		20...30		100...200	
	hiekkamoreeni		50...60		200...300	
	soramoreeni		100...200		400...500	
Rämö (1990) <sup>b)</sup>	Moreeni	114...719				
Tolla & Hartikainen (1999) <sup>e)</sup>	Vesimoreeni (Raippaluodon silta)	150...300	250...500	400...800	800... 1600	

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot on esitetty kimmomoduulille, jonka muunnos moduuliluvuksi on kuvattu tarkemmin Liitteessä 3.

<sup>b)</sup> Kenttähavainnot painumatutkimuksista 11 kpl. Sisälsivät pääasiassa löyhää moreeni pk/0,2 m < 100

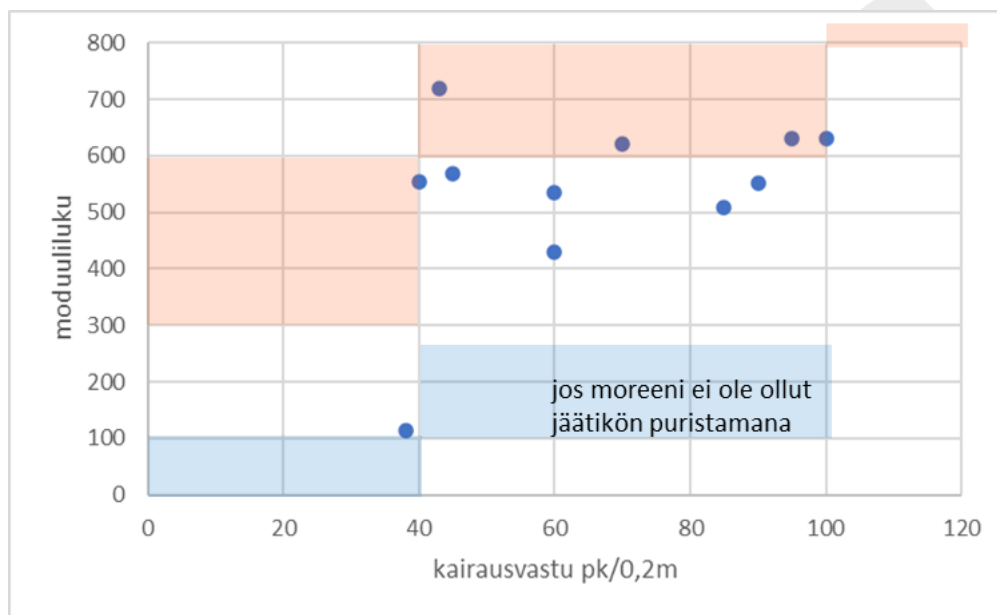
<sup>e)</sup> Määritetty kimmomoduulin ja Poissonin luvun ( $=0,3$ ) keskimääräisistä ominaisarvoista (sillan tuella T12). Vesimoreenilla tarkoitetaan mannerjään sulaessa sen sisältä vapautunutta, tiiviin pohjamoreenin päälle sedimentoitunutta epähomogeenista moreenikerrostumaa.

\* jos moreeni ei ole ollut jäätikön kuormittama

Taulukosta 21 nähdään, että suomalaiset taulukkoarvot ovat hyvin paljon suurempia, kuin mitä on esitetty ruotsalaisessa ohjeistuksessa (Trafikverket 2014). Ero voi osin johtua muunnoksesta kimmomoduulista moduuliluvuksi. Ruotsalaiset ohjearvot moreeneille vaikuttavat hieman varovaisilta, sillä esimerkiksi silttimoreenille ehdotetaan samaa kimmomoduulia kuin siltille.

Myös Helenelund (1964a) mukaan huuhtoutuneen pintamoreenin kokoonpuristuvuus vastaa moreenin keskimääräistä raekokoa vastaavan kitkamaalajin kokoonpuristuvuutta ja hienorakeisen löyhän moreenin kokoonpuristuvuus vastaa silttimaalajien kokoonpuristuvuutta.

Rämön (1990) diplomityössä on esitetty muun muassa 11 erilaisen perustuksen alta määritettyjä kimmomoduulien arvoja moreenille. Nämä kimmomoduulit on muutettu vastaavalla tavalla moduuliluvuksi olettamalla Poissonin luvuksi 0,33 ja jännitysekspONENTIKSI  $\beta = 1$ . Lisäksi tiedettiin perustuksen alla vallinnut jännitys. Rämön diplomityössä oli myös esitetty kairausvastukset painokairasta ja kaikkien 11 moreenikohteen kairausvastukset olivat välillä 38–100 pk/0,2m, joka vastaa taulukoiden mukaan löyhää moreenia. Määritetyt moduulilukujen arvot osuivat hyvin suomalaisessa ohjeistuksessa esitettyihin taulukkoarvoihin löyhän moreenin osalta. Kuvassa 31 on esitetty Rämö (1990) mukaiset moreenien moduuliluvut kairausvastuksen funktiona.

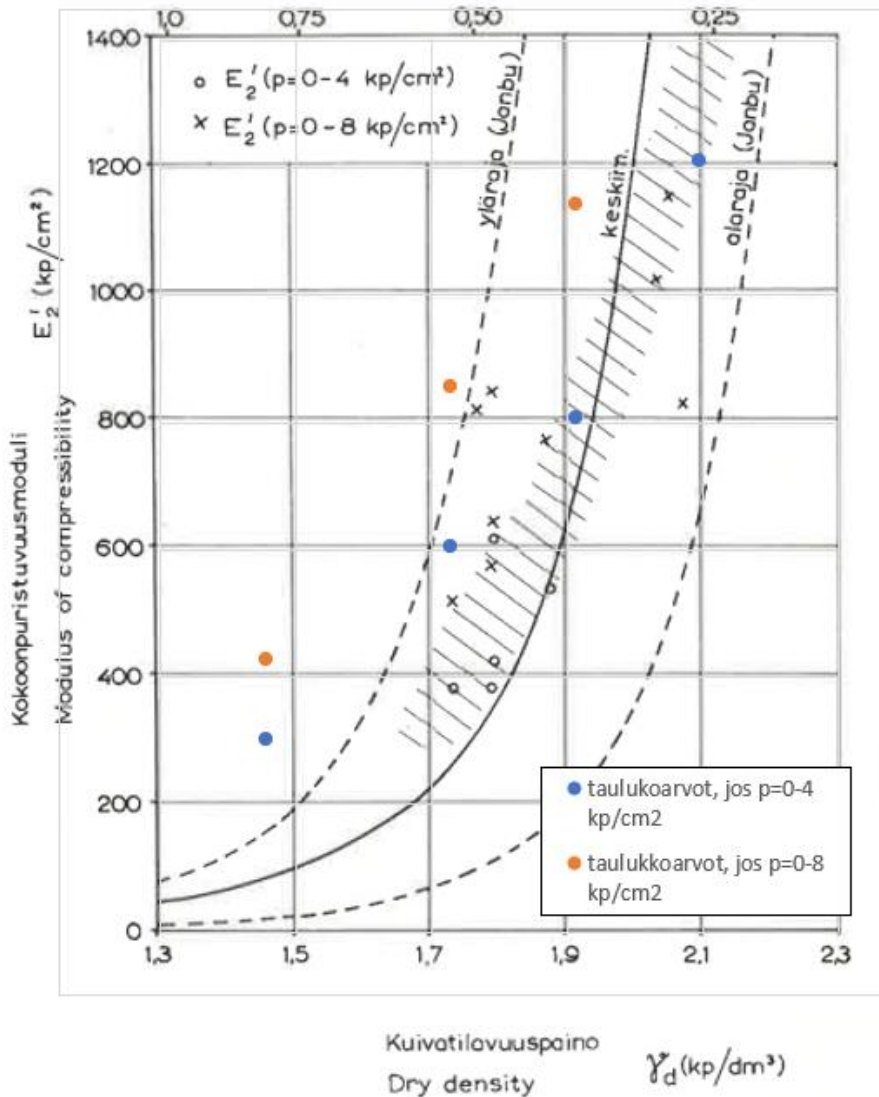


Kuva 31. Rämö (1990) esittämät moreenin moduuliluvut kairausvastuksen suhteen. Nykyluokituksen mukaan kyseessä on löyhä moreeni. Kuvassa esitetty myös moreenin taulukkoarvot (erittäin löyhä, löyhä ja keskitiivis).

Helenelund (1964a) on esittänyt moreenin moduulin arvoja kuivatilavuuspainon ja huokosluvun funktiona. Koosteen perusteella moduuli kasvaa voimakkaasti kuivatilavuuspainon kasvaessa (ks. Kuva 32). Kuvaan 32 on myös lisätty muutamia suomalaisen ohjeistuksen taulukkoarvoja. Taulukkoarvojen tilavuuspainojen perusteella arvioitiin vastaavat kuivatilavuuspainot Kaavalla (2-3), perustuen Ronkaisen (2012) esittämiin vesipitoisuuden jakaumiin. Moreenille käytettiin tässä vesipitoisuuden arvona  $w = 10\%$ . Jännityslisäykseksi oletettiin 0 kPa => 392 kPa sekä 0 kPa => 784 kPa, jotka vastaavat Helenelundin tekemien ödometrikokeiden kuormituslisäykksi 0–4 kp/cm<sup>2</sup> ja 0–8 kp/cm<sup>2</sup>. Taulukkoarvojen kokoonpuristuvuusmoduulit esitettiin Janbun yhtälön avulla, kun taas Helenelundin (1964a) esittämät moduulit on laskettu Ohden yhtälön kautta. Sinällään suoraa vastaavuutta Janbun parametrien kanssa ei ole. Janbun yhtälöä käytettäessä määritettiin taulukkoarvojen perusteella likimääräinen moduuli moreenille eri tiiviyssasteissa olettaen  $\beta = 0,5$ .

Kuvan 32 perusteella hyvin löyhän ja löyhän moreenin taulukkoarvot sijoittuvat Helenelundin (1964a) kuvaajan kokoonpuristuvuusmoduulien yläpäähän (tässä esitetty yläraja 80 % -käyrä). Moreenin kuivatilavuuspainon kasvaessa myös lasketut kokoonpuristuvuusmoduulit asettuvat 20 % ja 80 % käyrien väliin. Tiiville

moreenille laskettiin Janbun yhtälöllä kokoonpuristuvuusmoduuliksi 1700 kp/cm<sup>2</sup>, joka ei näy kuvassa. Tässä on huomioitavaa, että moreenin vesipitoisuudella on merkitystä kuivatilavuuspainon arvoon ja sitä myöten siihen, miten pisteet Helenelundin esittämään kuvaajaan asettuvat. Vesipitoisuuden ollessa lähempänä 0 %, siirtyvät pisteet kuvaajassa oikealle (kuivatilavuuspaino kasvaa). Lisäksi on otettava huomioon, että Helenelundin kuvaajassa esitetty kokoonpuristuvuusmoduuli on toistokuormituksella saavutettu kokoonpuristuvuusmoduuli (merkitään  $E_2'$ ). Helenelundin mukaan juuri toistokuormituksella saavutettu moduuli kuvaa paremmin todellisuutta, sillä moreeninäyte häiriintyy koekappaletta tehdessä, jolloin ensimmäisellä kuormituskerralla saavutettu kokoonpuristuvuusmoduuli on todennäköisesti alhaisempi, kuin mitä luonnontilaisella moreenilla.



Kuva 32 Kokoonpuristuvuusmoduulin riippuvuus moreenin kuivatilavuuspainosta jännitysalueella 0–8 kp/cm<sup>2</sup>. Kuvaajaan on myös piirretty suomalaisen ohjeistuksen taulukkoarvoja eri jännitysalueilla, kun moreenin vesipitoisuudeksi on oletettu 10 %.

Yhteenveto (moreenin painumaominaisuudet):

- Moreenin moduulilukujen arvot vastaavat jokseenkin kirjallisuudesta löydettyjä arvoja. Laajempaa vertailua oli hankala tehdä, sillä aihetta käsittelevää kirjallisuutta on vähän.
- Ruotsalaiset taulukkoarvot ovat selvästi konservatiivisempia, mikäli moduuliluku johdetaan kimmomoduulista. Ruotsalaiset ohjearvot moreeneille vaikuttavat muutenkin varovaisilta, sillä esimerkiksi silttimoreenille ehdotetaan samaa kimmomoduulia kuin siltille,
- Helenelundin (1964a) ödometrikokeisiin verrattuna taulukkoarvot vaikuttaisivat olevan samaa suuruusluokkaa. Vertailu tosin edellytti monien olettamien tekemistä (mm. vesipitoisuuden osalta).

## 3.6 Rakennetut louhetäytöt ja murskeet

Rakennettujen louhetäyttöjen ominaisuudet vaihtelevat suuresti, riippuen tiivistysmäärästä, rakeisuudesta, vesipitoisuudesta ja kivilajista (Tammirinne 1974). Normaalisti louheen lujuus- ja painumaominaisuuksia voidaan arvioida vain sen rakeisuusjakauman ja tiivistilän perusteella. Taulukossa 3 esiintyviä arvoja voidaan käyttää likimääräiseen arviointiin. Kunkin esitetyn ominaisuuden ala-arvon voidaan arvioida olevan löyhän rakeisuusjakaumaltaan lajittuneen louheen ominaisarvo (Liikennevirasto 2012). Louheen ominaisuudet riippuvat ensisijaisesti sen tiivistyksen määrästä ja rakeisuusjakaumasta. Louhetta ei esiinny luonnollisesti, joten sen ominaisuuksia voidaan edesauttaa työllä.

### 3.6.1 Louheen tilavuuspaino

Taulukossa 21 on esitetty pohjoismaisten ohjeiden mukaisia arvoja louheen tilavuuspainolle. Muissa pohjoismaissa esitetyt arvot sijoittuvat suomalaisten arvojen vaihteluvälin alapäähän.

*Taulukko 21. Louheen tilavuuspaino: vertaaminen pohjoismaisten ohjeiden taulukkoarvoihin.*

Lähde	Maalaji	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella	
		löyhä	tiivis	löyhä	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 3)	Esimurskattu louhe / Louhe	17...22			
Trafikverket 2014 <sup>a)</sup>	Grovkrossad sprängsten (esimurskattu louhe)	18	20	10	11
	Sorterad sprängsten (lajiteltu louhe)	16	18	10	11
	Sprängsten (louhe)	16	18	12	13
Statens vegvesen (2010) <sup>b)</sup>	Sprengstein *	19			
	Sprengstein **	19			

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>b)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitusta varten (lisätietoa Liitteessä 3).

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.

**Yhteenveto (louheen tilavuuspaino):**

- Norjalaiset ja ruotsalaiset ohjearvot mahtuvat taulukkoarvojen vaihteluvälin sisään, mutta sijoittuvat sen alapäättyyn.
- Louheen ominaisuudet riippuvat suuresti sen tiivistilasta ja rakeisuusjakaumasta

### 3.6.2 Louheen lujuusominaisuudet

Taulukossa 22 on esitetty pohjoismaalaisia ohjearvoja louheen kitkakulmalle. Suomalaiset taulukkoarvot sijoittuvat muihin arvoihin nähden konservatiiviselle puolelle. Suomalainen käytäntö tuntee kuitenkin myös suurempia ohjearvoja, esimerkiksi Liikennevirasto (2012) on esittänyt huippuarvon olevan jopa 50°.

Taulukko 22. Pohjoismaalaiset ohjearvot louheen kitkakulmalle.

Lähde	Maalaji	Kitkakulma (°)	
		löyhä	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 3)	Esimurskattu louhe / Louhe	38...42 <sup>a)</sup>	
Trafikverket 2014 <sup>b)</sup>	Grovkrossad sprängsten (esimurskattu louhe)	45	
	Sorterad sprängsten (lajiteltu louhe))	45	
	Sprängsten (louhe)	45	
Statens vegvesen (2010) <sup>c)</sup>	Sprengstein *	42	
	Sprengstein **	42/45 ***	

<sup>a)</sup> Rakennettu louhetäyttö tai tiivistetty mursketäyttö. Kitkakulman arvona voidaan käyttää arvoa >42° vain, jos voidaan osoittaa täytön kitkakulman olevan esitetyn suuruinen.

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

<sup>c)</sup> Norjalaiset taulukkoarvot mitoitus varten (lisätietoa Liitteessä 3).

\* Sillan maatuen tai tukiseinän takana tai edessä.

\*\* Sillan maatuen alla.

\*\*\* Korkeampaa arvoa voidaan käyttää, kun tuen alla on hyvälaatuista materiaalia

Louhetäyttöjen stabiiliteettilaskelmissa kitkakulman määrittämisessä tulee ottaa huomioon myös käytettävä laskentamalli. Mobilisoituva leikkauslujuus on varsin erilainen mikäli mallinnetaan yksittäisen lohkareen liikettä, verrattuna tilanteeseen missä malli käsittää paksun louhetäytön pehmeän pohjamaan päällä.

Yhteenveto (louheen lujuusominaisuudet):

- Suomalaiset taulukkoarvot ovat ruotsalaisiin ja norjalaisiin arvoihin verrattuna pääosin pienempiä
- Louheen ominaisuudet riippuvat suuresti sen tiivystilasta ja rakeisuusjakaumasta.

### 3.6.3 Louheen painumaominaisuudet

Tammirinteen mukaan (1974) rakennettujen louhetäyttöjen E-moduulit olivat välillä 379–1139 kp/cm<sup>2</sup> jännityslisäykselle 0–2 kp/cm<sup>2</sup> ja 371–1256 kp/cm<sup>2</sup> jännityslisäykselle 0–6 kp/cm<sup>2</sup>. Moduulin alarajaksi pengertä rakennettaessa tavoitteeksi oli ilmoitettu 350 kp/cm<sup>2</sup>. E-moduulit olivat E<sub>1</sub>-moduuleja, eli ensikuormitukselle määritettyjä. E-moduulit määritettiin levykuormituskokeella, olettaen Poissonin vakiin olevan  $\nu = 0,5$ . Vaihtelu tuloksissa oli suurta, mikä on seikka, joka näkyy myös taulukon 3 arvoissa. Vastaavia suuria vaihteluvälejä on todettu myös muussa kirjallisuudessa (esim. Kolisoja 1993, s. 128).

Taulukossa 23 on esitetty suomalaisten ja ruotsalaisten ohjearvojen eroja. Ruotsalaiset ohjearvot ovat suomalaisten ohjearvojen vaihteluvälin alimmasta päästä.

*Taulukko 23. Moduuliluku: vertailu suomalaisten ja ruotsalaisten ohjearvojen välillä.*

Lähde	Maalaji	Moduuliluku	
		keskitiivis	tiivis
Taulukkoarvot (Taulukko 3)	Esimurskattu louhe	500...2000	
	Louhe	300...1500	
Trafikverket 2014 <sup>a)</sup>	Krossad sprängsten (murskattu louhe)	500...600	
	Sorterad sprängsten (lajiteltu louhe)	500...600	
	Sprängsten (louhe)	500...600	

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot, edustavat ominaisarvoja (lisätietoa Liitteessä 3).

Yhteenveto (louheen painumaominaisuudet)

- Ruotsalaiset taulukkoarvot ovat suomalaisen vaihteluvälin alapäässä
- Louheen ominaisuudet riippuvat suuresti sen tiiviystilasta ja rakeisuusjakaumasta

### 3.6.4 Murskeiden ominaisuudet

Taulukossa 24 on esitetty murskeen kuivatilavuuspainon ja kitkakulman vaihteluvälejä perustuen kolmeen suomalaiseen tutkimukseen (Vuorimies 1992, Kolisoja 2013, Rossi 2014). Kolisojan (2013) ja Rossin (2014) tutkimuksissa on määritetty murskeen kuivatilavuuspainoja ns. riittävän hyvälaatuiselle suomalaiselle kalliomurskeelle, hyvälaatuiselle ruotsalaiselle kalliomurskeelle sekä huonolaatuiselle (kiilteiselle) skotlantilaiselle kalliomurskeelle. Näytemäärät Kolisojan (2013) tutkimuksessa olivat: suomalainen kalliomurske 15 kpl, ruotsalainen kalliomurske 4 kpl ja skotlantilainen kalliomurske 7 kpl. Rossin (2014) tutkimus perustuu samoihin materiaaleihin, kuin Kolisojan (2013) tutkimus, mutta siinä tehtiin omat erilliset kolmiakksiaalikoesarjat. Näytemäärät Rossin (2014) tutkimuksessa olivat: suomalainen kalliomurske 11 kpl, ruotsalainen kalliomurske 4 kpl ja skotlantilainen kalliomurske 6 kpl. Testattujen kalliomurskeiden kuivatilavuuspainot olivat välillä 18,4–22,0 kN/m<sup>3</sup>. Murskeen tilavuuspainojen lukuarvoja ei ole esitetty nykyisessä Väyläviraston (2023) taulukossa, mutta ne ovat samaa suuruusluokkaa kuin aiemmin esitetyt louheen kuivatilavuuspainojen taulukkoarvot.

Taulukossa 24 esitetyt eri murskeiden kitkakulmien arvot perustuvat Rossin (2014) ja Vuorimiehen (1992) tekemiin kolmiakksiaalikoesarjoihin. Näytteiden määrät eri mursketyypeille olivat Vuorimiehen (1992) tutkimuksessa seuraavat: moreeni-murske 4 kpl, soramurske 2 kpl ja kalliomurske 4 kpl. Vastaavasti Rossin (2014) tutkimuksessa: suomalainen kalliomurske 11 kpl, ruotsalainen kalliomurske 4 kpl ja skotlantilainen kalliomurske 6 kpl. Tutkimuksessa jokaiselle näytteelle tehtiin yksi kolmiakksiaalikoesarja joko kolmella tai neljällä eri sellipaineen arvolla. Vuorimiehen (1992) tutkimuksessa kitkakulmien huippuarvot on määritetty olettamalla koheesioksi  $c=0$ . Rossin (2014) tutkimuksessa kolmiakksiaalikoesarjoista on määritetty tehokkaat lujuusparametrit: tehokas koheesio  $c'$  ja tehokas huippukitkakulma



$\phi'$ . Lisäksi Rossin (2014) tutkimuksessa on määritetty erikseen tehokkaat lujuusparametrit sekä löyhässä tilassa että tiiviissä tilassa olevalle materiaalille.

Vuorimiehen (1992) tekemien kolmiakσιαalikoesarjojen mukaiset murskeiden huippukitkakulmat vaihtelivat välillä 41,8–50,1°. Tämän tutkimuksen perusteella hienompijakoista materiaalia sisältävien murskeiden kitkakulman arvo on hieman pienempi, kuin karkeampirakeisten murskeiden. Rossin (2014) tekemien kolmiakσιαalikoesarjojen mukaiset murskeiden huippukitkakulmat vaihtelivat välillä 21,6–537,9° löyhässä tilassa olevalle murskeelle ja välillä 40,1–549,1° tiiviissä tilassa olevalle murskeelle.

Murskeen kitkakulman lukuarvoja ei ole esitetty nykyisessä Väyläviraston (2023) taulukossa. Murskeen kitkakulman arvo vaikuttaa ainakin tämän yhden tutkimuksen perusteella olevan hieman suurempi, kuin esimerkiksi louheelle esitetyt kitkakulman taulukkoarvot.

*Taulukko 24. Murskeen ominaisuuksien vaihteluvälejä perustuen kahteen suomalaiseen tutkimukseen (Vuorimies 1992, Kolisoja 2012).*

Lähde	Maalaji	Kuivatilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> )	
Kolisoja (2013)	Suomalainen murske	19,9...22,0	
	Ruotsalainen murske	18,8...20,0	
	Skotlantilainen murske	19,7...21,5	
Rossi (2014)	Suomalainen murske	19,5...21,7	
	Ruotsalainen murske	18,4...19,6	
	Skotlantilainen murske	19,3...21,1	
		Kitkakulma (°) <sup>b)</sup>	
		löyhä	tiivis
Rossi (2014) <sup>a)</sup>	Suomalainen murske	28,6...37,9	40,1...46,2
	Ruotsalainen murske	36,9...37,5	47,0...49,1
	Skotlantilainen murske	21,6...23,2	40,9...43,0
Vuorimies (1992)	Moreenimurske	41,8...49,7	
	Soramurske	43,4...46,9	
	Kalliomurske	46,2...50,1	

<sup>a)</sup> Kitkakulman lisäksi määritettiin tehokas koheesio. Tehokkaan koheesio arvo vaihteli seuraavasti: suomalainen murske 1,0...55,9 kPa, ruotsalainen murske 11,2...31,4 kPa ja skotlantilainen murske 5,3...12,2 kPa.

<sup>b)</sup> Arvot ovat huippulujuutta vastaavia tehokkaita kitkakulmia.

## 4 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli kartoittaa kitkamaalajien taulukkoarvojen (Taulukot 1–3) taustoja sekä selvittää, vastaavatko taulukkoarvot pikemminkin keskiarvoja vaiko ominaisarvoja (varovaisia keskiarvoja). Vertailussa hyödynnettiin seuraavia aineistoja:

- VTT:n 60- ja 70-luvun julkaisuja (Helenelund 1964a; 1965; 1966; Tammirinne 1969; 1972; Valkeisenmäki 1973)
- Muu suomalainen kirjallisuus (mm., Helenelund 1964b; Ronkainen 2012)
- Ruotsalaiset taulukkoarvot Trafikverket (2014) sekä muu ruotsalainen kirjallisuus (mm. SGI:n julkaisuja)
- Norjalaiset taulukkoarvot mitoitukseen (Statens vegvesen 2010)
- Kansainvälinen kirjallisuus (mm., ISSMGE-TC304 2021; Smoltczyk 2002)

Tehdyt havainnot on koottu Taulukoihin 25–27. Taulukoissa esitetään, kuinka kirjallisuuden arvot vertautuvat suomalaisiin taulukkoarvoihin.

*Taulukko 25. Tilavuuspaino: kuinka kirjallisuuden arvot vertautuvat taulukkoarvoihin (↔ = vastaavat toisiaan; ↑ = kirjallisuuden arvot ovat suurempia; ↓ = kirjallisuuden arvot ovat pienempiä).*

Taulukoiden 1–3 maalaji	Helenelund (1964b)	Muu suomalainen kirjallisuus	Ruotsalaiset taulukkoarvot (ominaisarvoja)	Norjalaiset taulukkoarvot mitoitukseen	Kansainvälinen kirjallisuus
Karkea siltti	↑	↔	↔ <sup>a)</sup>	↑	N/A
Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$	↑	↔	↔ <sup>a)</sup>	↑	N/A
Hiekka $d_{10} > 0,06$	↓	↔	↔ <sup>a)</sup>	↔	↔
Sora	↓	N/A	↔ <sup>b)</sup>	↔	↔
Moreeni	↔	↔/↓	↔	N/A	N/A
Louhe	N/A	N/A	↔/↓	↔	N/A

<sup>a)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot tehokkaalle tilavuuspainolle ovat hieman pienempiä kuin suomalaiset taulukkoarvot.

<sup>b)</sup> Ruotsalaiset taulukkoarvot tehokkaalle tilavuuspainolle ovat osin suurempia.

Tilavuuspainojen osalta taulukkoarvot vastaavat pitkälti ruotsalaisen suunnitteluohjeen ominaisarvoja. Tilavuuspainoon liittyvä luonnollinen vaihtelu on yleensä verratain vähäistä (ks. esim. Löfman 2022), minkä vuoksi tilavuuspainon ominaisarvo on usein lähellä sen keskiarvoa. Lisäksi havaittiin, että vastaavuus suomalaisen kirjallisuuden kanssa oli pääosin hyvä. Vertailun perusteella voidaan arvioida, että tilavuuspainon taulukkoarvot vastaavat keskiarvoja.

*Taulukko 26. Kitkakulma: kuinka kirjallisuuden arvot vertautuvat taulukkoarvoihin (↔ = vastaavat toisiaan; ↑ = kirjallisuuden arvot ovat suurempia; ↓ = kirjallisuuden arvot ovat pienempiä).*

Taulukoiden 1–3 maalaji	VTT:n 60- ja 70-luvun julkaisut	Muu suomalainen kirjallisuus	Ruotsalaiset taulukkoarvot (ominaisarvoja)	Norjalaiset taulukkoarvot mitoitukseen	Kansainvälinen kirjallisuus
Karkea siltti	↔	↔	↑ <sup>a)</sup>	↑	↔/↑ <sup>b)</sup>
Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$	↔/↑	↔	↓	↑/↔	↑ <sup>c)</sup>
Hiekka $d_{10} > 0,06$	↔/↑	↔/↓	↓	↓/↑	↑/↔ <sup>c)</sup>
Sora	↑	N/A	↓	↑/↓	↑/↔ <sup>c)</sup>
Moreeni	↓/↔	N/A	↑/↔ <sup>d)</sup>	N/A	N/A
Louhe	N/A	N/A	↑	↔/↑	N/A

<sup>a)</sup> Kitkakulman ominaisarvo tiiviille siltille on suurempi, kitkakulma löyhälle siltille taas pienempi.

<sup>b)</sup> SGI:n julkaisuissa siltille esitetyt empiiriset arvot ja kitkakulmat kairausvastuksen perusteella ovat selkeästi suurempia.

<sup>c)</sup> Hiekan ja soran kitkakulmien taulukkoarvot ovat lähempänä kirjallisuuden kriittisen tilan lujuutta vastaavaa kitkakulmaa (vs. huippulujuus)

<sup>d)</sup> Ruotsalaiset ominaisarvot ovat etenkin tiiviille moreenille suurempia. Löyhän moreenin arvot taas ovat osittain pienempiä.

Kitkakulmien osalta vastaavuus ruotsalaisten ominaisarvojen ja norjalaisten mitoituservojen kanssa oli vaihtelevaa. Ruotsalaiset taulukkoarvot hienon hiekan, hiekan sekä soran kitkakulmalle olivat pienempiä, kun taas muut arvot olivat pääosin suurempia. Kansainvälisen kirjallisuuden mukaiset tyypilliset kitkakulman arvot olivat varsin systemaattisesti suurempia: taulukkoarvot vastasivat parhaiten kriittisen tilan lujuutta vastaavaa kitkakulmaa  $\varphi'_{cv}$  (vs. huippukitkakulma  $\varphi'_p$ ). Samoin vertaaminen suomalaiseen kirjallisuuteen antoi viitteitä siihen, että taulukoiden kitkakulmat vaikuttavat olevan lähempänä varovaista keskiarvoa kuin tyypillistä arvoa (keskiarvoa). Moreenin ja karkean siltin tapauksessa tosin ero tyypillisiin arvoihin nähden vaikuttaa olevan verrattain pienempi.

Jännityseksponentin  $\beta$  osalta voidaan todeta seuraavaa, mitä tulee vertailuun suomalaisen kirjallisuuden kanssa:

- Karkean siltin taulukkoarvo (0,3) sijoittuu havaitun vaihteluvälin alapäähän
- Hiekan taulukkoarvo (0,5) vastaa kirjallisuudessa havaittua tyypillistä arvoa hiekalle
- Hienon hiekan taulukkoarvo (0,5) on suurempi kuin kirjallisuudessa havaittu tyypillinen arvo (n. 0,3)
- soran taulukkoarvo (0,5) on hieman pienempi kuin kirjallisuudessa havaittu tyypillinen vaihteluväli soralle (0,6...0,8)

*Taulukko 27. Moduuliluku: kuinka kirjallisuuden arvot vertautuvat taulukkoarvoihin ( $\leftrightarrow$  = vastaavat toisiaan;  $\uparrow$  = kirjallisuuden arvot ovat suurempia;  $\downarrow$  = kirjallisuuden arvot ovat pienempiä).*

Taulukoiden 1–3 maa-laji	VTT:n 60- ja 70-luvun julkaisut	Muu suomalainen kirjallisuus	Ruotsalaiset taulukkoarvot (ominaisarvoja)	Norjalaiset taulukkoarvot mitoitukseen	Kansainvälinen kirjallisuus <sup>a)</sup>
Karkea siltti	$\leftrightarrow$	$\leftrightarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$ <sup>b)</sup>	N/A
Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$	$\uparrow/\leftrightarrow$	N/A	$\leftrightarrow$	$\uparrow$ <sup>b)</sup>	$\leftrightarrow/\uparrow$
Hiekka $d_{10} > 0,06$	$\leftrightarrow/\downarrow$	N/A	$\downarrow$	$\uparrow$ <sup>b)</sup>	$\leftrightarrow/\downarrow$
Sora	$\leftrightarrow$	N/A	$\downarrow$	N/A	N/A
Moreeni	$\leftrightarrow$	$\leftrightarrow/\downarrow$	$\downarrow$	N/A	N/A
Louhe	N/A	N/A	$\leftrightarrow$	N/A	N/A

<sup>a)</sup> Janbu (1963)

<sup>b)</sup> Norjalaisessa suunnitteluohjeessa on esitetty moduulin arvioiminen kuvaajan avulla

Moduuliluvun tapauksessa taulukkoarvot vastasivat pitkälti suomalaisen kirjallisuuden arvoja. Vastaavuus ruotsalaisten ominaisarvojen ja norjalaisten mitoituservojen kanssa oli vaihtelevaa. Voidaankin arvioida, että moduuliluvun taulukkoarvot vastaavat likimain keskiarvoja.

Mitä tulee rakenteellisen tiiveyden arvioimiseen kairausvastuksen perusteella, kirjallisuusselvityksen pohjalta johtopäätösten tekeminen on haastavaa. Taulukon kairausvastukset hiekan osalta vastaavat hyvin Helenelundin (1966) esittämiä kairausvastuksia. Soran tapauksessa taas paras vastaavuus oli ruotsalaisen tiiveysluokittelun kanssa. Muiden maalajien tapauksessa kairausvastusten raja-arvojen määrittämisen lähtökohdat eivät selvinneet tämän kirjallisuusselvityksen aikana.

Kairausvastuksen raja-arvojen tarkastelussa tulee lisäksi ottaa huomioon kairauskaluston muutokset vuosien saatossa. Esimerkiksi painokairauksen tankokoon muutos on johtanut arviolta 1,1-2 kertaa suurempiin mitattuihin kairausvastuksiin uudella kalustolla. Nykykalustolla puristinheijarikairauksessa taas arvioitiin mitattavan hieman pienempiä kairausvastuksia heijariosuudessa, kun verrataan vanhaan heijarikairaukseen (keskimääräinen kerroin 0,7).

Yhteenvedon voidaan todeta, että kitkamaiden lujuus- ja painumaominaisuuksien arvioimiseen rakenteellisen tiiveyden perusteella on kirjallisuusselvityksen pohjalta hyvät valmiudet ohjeistaa taulukkoarvojen käyttöön tarkemmin. Sitä vastoin tiiveyden arvioiminen kairausvastuksen perusteella saattaa edellyttää lisätarkasteluita.

## Lähdeluettelo

- Andersen, K. H. & Schjetne, K. 2013. Database of Friction Angles of Sand and Consolidation Characteristics of Sand, Silt, and Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(7), 1140–1155.
- Andreasson, L. 1973. Kompressibilitet hos friktionsjord. Statens institut för byggnadsforskning. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Bergdahl, U., Malmborg, B. S. & Ottosson, E. 1993. Plattgömdläggning. Svensk Byggtjänst, Solna.
- Eklund, P. 1961. Kitkamaalajien leikkauslujuuteen vaikuttavat tekijät. Diplomityö, teknillinen korkeakoulu (ei julkaistu).
- Helenelund, K.V. 1964a. Moreenimaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT, sarja III – rakennus 79. VTT, Helsinki.
- Helenelund, K.V. 1964b. Geotekniikka ja pohjarakennus. VTT, sarja III – rakennus 78. VTT, Helsinki.
- Helenelund, K.V. 1965. Investigations on the bearing capacity and engineering properties of silt. VTT, sarja III – rakennus 83. VTT, Helsinki.
- Helenelund, K.V. 1966. Kitkamaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT, sarja III – rakennus 97. VTT, Helsinki.
- ISSMGE-TC304. 2021. State-of-the-art review of inherent variability and uncertainty. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) – Technical Committee TC304 'Engineering Practice of Risk Assessment and Management', March 2nd., 2021. DOI: 10.53243/R0001.
- Janbu, N. 1963. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proceedings of European Conference on Soil Mechanics. Wiesbaden.
- Kolisoja, P. 2013. Mode 2 Rutting Design Approach: Description of the new ROADDEX design approach for Mode 2 rutting on low volume roads. ROADDEX Implementing Accessibility, Research Report, ROADDEX Project.
- Kolisoja, P. 1993. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Tielaitoksen selvityksiä 38/1993. Tielaitos, Helsinki
- Korhonen, K-H. 1966. Pientalojen perustaminen. VTT, sarja III – rakennus 106. VTT, Helsinki.
- Korhonen, K-H., Gardemeister, R. & Tammirinne, M. 1974. Geotekninen maaluokitus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. VTT, Otaniemi.
- Krabbenhoft, K. 2023. Role of dilation in ULS assessment. Esites konferenssissa NMGE7, Oslo.

- Ladd, C.C. 1991. Stability evaluation during staged construction. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 117, no. 4, pp. 540-615.
- Larsson, R. 1995. Jordmaterialet silt – geotekniska egenskaper och deras bestämning. SGI, Linköping.
- Lehtonen, V. 2015. Modelling Undrained Shear Strength and Pore Pressure Based on an Effective Stress Soil Model in Limit Equilibrium Method. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Liikennevirasto. 2012. Tien geotekninen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 10/2012. Liikennevirasto, Helsinki
- Löfman, M. 2022. Uncertainty quantification for compressibility and settlement response of clays. Väitöskirja, Aalto-yliopisto, Espoo.
- RIL (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto). 1985. RIL 157-I Geomekaniikka I.
- RIY. 1964. Pohjarakennuksen normit. Rakennusinsinööriyhdistyksen julkaisuja A 45. RIY, Helsinki.
- Rossi, J. 2014. Yhteenveto ROADDEX-projektissa Mode 2 urautumisen mitoituksen kehittämiseen tehdyistä laboratoriokokeista ja esimerkkikohteen mitoitus. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Rämö, S. 1990. Kitkamaan varaisesti perustettujen siltöiden painuman laskeminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- SGI (Statens Geotekniska Institut / Swedish Geotechnical Institute). 1998. Siltjordars egenskaper. SGI, Linköping.
- SGI (Statens Geotekniska Institut / Swedish Geotechnical Institute). 2007. Skjuvhållfasthet. SGI, Linköping.
- SGI (Statens Geotekniska Institut / Swedish Geotechnical Institute). 2008. Jordens egenskaper. SGI, Linköping.
- SGY (Suomen Geoteknillinen Yhdistys). 2001. Kairausopas 6: CPTU-puristinkairaus, puristin-heijarikairaus. SGY, Helsinki.
- SGY (Suomen Geoteknillinen Yhdistys). 1981. Kairausopas 1: Painokairaus, Tärykairaus, Heijarikairaus. SGY, Helsinki.
- Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.
- Smolczyk, U. 2002. Geotechnical Engineering Handbook Volume 1 Fundamentals.
- Partanen, M. 1982. Rakeisuuden vaikutus murskesoran kimmomoduuliin. Diplomityö. TKK, Espoo.

- Tammirinne, M. 1969. Kitkamaalajien rakenne ja kokoonpuristuvuus. VTT, sarja III – rakennus 136, Helsinki.
- Tammirinne, M. 1972. Karkearakeisten maalajien ja karkeiden silttimaalajien tiiveyden määrittäminen kairausvastuksen perusteella. VTT, Geotekniikan laboratorio, Helsinki.
- Tammirinne, M. 1974. Louhe rakennuspohjana. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 13, Otaniemi,
- Terzaghi, K. & Peck, R.B. 1948. *Soil mechanics in engineering practice*. New York & London.
- Tiehallitus. 1991. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Tiehallitus, Helsinki.
- Tiehallinto. 2001. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Tiehallinto, Helsinki.
- Tiehallinto. 2007. Sillan geotekniset suunnitteluperusteet. Tiehallinto, Helsinki.
- Tielaitos. 1999. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Tielaitos, Helsinki.
- Tie- ja vesirakennushallitus. 1982. Standardin SFS 4315 pohjarakennusohjeet soveltaminen sillansuunnittelussa. Tie- ja vesirakennushallitus, Helsinki.
- Tolla, P. & Hartikainen, J. 1999. Raippaluodon sillan paalutetut laattaperustukset. Rakennustekniikka.
- Trafikverket. 2014. Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13.
- Trafikverket. 2016. Trafikverkets tekniska råd för geokonstruktioner-TR Geo 13.
- Valkeisenmäki, A. 1973. Rakeisuuden vaikutus hiekan ja soran painumis- ja tiiveysominaisuuksiin. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 10, Otaniemi.
- Vuorimies, N. 1992. Kunnossapitomurskeiden lujuusparametrien määrittäminen kolmiaksiaalikojeella. Erikoistyö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.
- Vägverket. 1994. Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper. Publikation 1994: 15. Vägverket, Borlänge.
- Väylävirasto. 2023. Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Väyläviraston ohjeita 14/2023. Väylävirasto, Helsinki.

## Liite 1: Taulukkoarvojen historiaa

Ensimmäinen versio nykyisenkaltaisista kitkamaalajien taulukkoarvoista julkaistiin vuonna 1982 julkaisussa *Standardin SFS 4315 pohjarakennusohjeet soveltaminen sillansuunnittelussa* (Tie- ja vesirakennushallitus 1982). Arvojen esitetään olevan varovaisia keskiarvoja, joita voidaan käyttää, jos käytettävissä ei ole suoria määrittäviä. Erityisesti kitkakulman arvoja ohjeistetaan selvittämään tarkemmin vaativissa kohteissa. Arvojen kerrotaan olevan peräisin julkaisuista *Moreenimaalajien kantavuusominaisuuksista* (Helenelund 1964), *Kitkamaalajien kantavuusominaisuuksista* (Helenelund 1966), *Kitkamaalajien rakenne ja kokoonpuristuvuus* (Tammirinne 1969) ja *Rakeisuuden vaikutus hiekan ja soran painumis- ja tiiveysominaisuuksiin* (Valkeisenmäki 1973). Vuoden 1982 taulukkoarvot on esitetty taulukossa L1-1. Nykyiseen versioon verratessa kitkakulman arvot ovat pienempiä hiekoille ja soralle, eikä karkeaa silttiä ole esitetty ollenkaan. Kairausvastuksessa eroja on painokairauksessa soran osalta ja heijarikairauksen osalta hiekoissa. Myös louheen arvot poikkeavat nykyisestä. Puristinkairausta ei vielä tällöin ole esitetty.

*Taulukko L1-1. Vuoden 1982 ohjearvot karkearakeisten maalajien ja moreenien ominaisuuksien arviointiin (Tie- ja vesirakennushallitus 1982).*

Maalaji	Tilavuuspaino $\text{kN/m}^3$		Kitkakulma $\phi$	Moduuliluku m	Jännitys- eksponentti $\beta$	Kairausvastus	
	Pohjavedenp. yläpuolella y	Pohjavedenp. alapuolella y'				Painokairaus puolikierr./m	Heijarikairaus lyöntiä/m <sup>1)</sup>
Hiekka $d_{10} \leq 0,06$	HHK L K T	15...17	9...	30°	50...150	100...250 250...500 >500	50...100 100...200 >200
		16...18	11	32°	100...200		
				34°	150...300		
Hiekka $d_{10} > 0,06$	Hk L K T	16...18	10...	32°	150...300	50...150 150...300 >300	25...75 75...125 >125
		17...19	12	34°	200...400		
				36°	300...600		
Sora	Sr L K T	17...19	10...	34°	300...600	50...100 100...200 >200	25...50 50...100 >100
		18...20	12	36°	400...800		
				38°	600...1200		
Moreeni	Mr HL L K T	16...19	10...12	...34°	300...600	200...500 >500 lyömällä	<200 100...300 300...700 >700
		17...20	10...12	...36°	600...		
		18...21	11...13	...38°	800...		
		19...23	11...14	...40°	1200...		
Tiivistetty täyteperustusten alla <sup>2)</sup>	Louhe Murske Sora	15...18	9...11	45°	1200	0,5 0,5 0,5	
		19...22	11...13	42°	1200		
		18...21	11...13	40°	1200		

1) Maalajin tiiviyyttä ei moreeneja lukuunottamatta saa yleensä arvioida pelkkien heijarikairaustulosten perusteella.

2) Näiden arvojen käyttö edellyttää, että työn suoritus ja materiaalit ovat sillanrakennustöiden yleisen työselityksen kohdan 3300: 2.11 mukaiset.

Toinen versio (ks. Taulukko L1-2) julkaistiin vuonna 1991 julkaisussa *Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa* (Tielaitos 1991). Lisäksi julkaisussa esitetään Taulukon L1-3 mukainen kooste, jota voi soveltaa silteille. Edelleen ohjearvojen opastetaan olevan varovaisia keskiarvoja. Edelliseen versioon nähden hiekköjen kitkakulmia on kasvatettu (ks. Taulukko L1-2). Myös kairausvastukset ovat tällöin saaneet nykyiset arvonsa. Edelleenkin puristinkairausta ei ole esitetty, mutta julkaisun toisessa taulukossa (Taulukko L1-3) on puristinkairauksen ja SPT-kairauksen kairausvastukset.



Taulukko L1-2. Karkearakeisten maalajien arviointi rakeisuuden ja kairausvastuksen perusteella (Tielaitos 1991, Taulukko 1).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitka- kulma $\phi$ (ast.)	Moduuli-		Kairausvastukset 1)	
		yläpuol.	alapuol.		luku m	eksp. B	painok. pk/0,2 m	heijarik. L/0,2 m
Hienohiekka $d_{10} \leq 0,06$	hHk L	15...17	9...	30	50... 150	0.5	20... 50	5... 15
	K			33	100... 200	0.5	50...100	15... 30
	T	16...18	11	36	150... 300	0.5	100...	30...
Hiekka $d_{10} > 0,06$	Hk L	16...18	10...	32	150... 300	0.5	10... 30	5... 12
	K			35	200... 400	0.5	30... 60	12... 25
	T	17...19	12	38	300... 600	0.5	60...	25...
Sora	Sr L	17...19	10...	34	300... 600	0.5	10... 25	5... 10
	K			37	400... 800	0.5	25... 50	10... 20
	T	18...20	12	40	600...1200	0.5	50...	20...
Moreeni	Mr HL	16...19	10...12	...34	300... 600	0.5	... 40	... 20
	L	17...20	10...12	...36	600...	0.5	40...100	20... 60
	K	18...21	11...13	...38	800...	0.5	100...	60...140
	T	19...23	11...14	...40	1200...	0.5	lyömällä	140...
2)Tiivistetty täyte perus- tusten alla	Louhe	15...18	9...11	45	1200	0.5		
	Murske	19...22	11...13	42	1200	0.5		
	Sora	18...21	11...13	40	1200	0.5		

- 1) Maalajien tiiviyyttä ei moreeneja lukuunottamatta saa yleensä arvioida pelkkien heijari-kairaustulosten perusteella.
- 2) Näiden arvojen käyttö edellyttää, että työn suoritus ja materiaalit ovat Sillanrakennuksen yleisen työselityksen kohdan 3300, 2.11 /24/ mukaiset.

Taulukko L1-3. Kitkakulmat kairausvastuksen perusteella ohjeen Teräsputkipaalut TIEL 2173448 mukaan (Tielaitos 1991, Taulukko 2).

Taulukko 2. Kitkakulmat kairausvastuksen perusteella ohjeen Teräsputkipaalut TIEL 2173448 mukaan /19/.

Suhteellinen tiiviyys	Heijari- kairaus $N_{20}$ (L/0,2 m)	Puristin- kairaus $q_c$ (MPa)	Paino- kairaus 1) MHT (pk/0,2 m)	SPT- kairaus 3) $N_{30}$ (L/0,3 m)	Kitka- kulma 2) (ast.)	Muodon- muutos- moduuli $E_d$ (MPa)
Hyvin löyhä	< 5	< 2,5	< 10	< 4	29 - 32	< 10
Löyhä	3 - 10	2,5 - 5,0	10 - 30	4 - 10	32 - 35	10 - 20
Keskitiivis	8 - 17	5,0 - 10,0	20 - 50	10 - 30	35 - 37	20 - 30
Tiivis	12 - 36	10,0 - 20,0	40 - 90	30 - 50	37 - 40	30 - 60
Hyvin tiivis	> 30	> 20,0	> 80	> 50	40 - 45	60 - 90

- 1) Ennen suhteellisen tiiviyyden määrittäystä siltissä tulee painokairausvastus jakaa 1,3:lla.
- 2) Annetut arvot pätevät hiekalle. Siltille käytetään 3<sup>o</sup> pienempiä ja soralle 2<sup>o</sup> suurempia arvoja.
- 3) Taulukkoon on lisätty SPT-kairausvastuksen arvot.

---

Taulukon L1-3 (Tielaitos 1991) mukaiset kitkakulman arvot siltille ovat suurempia verrattuna nykyisiin taulukkoarvoihin (Väylävirasto 2023).

Vuoden 1999 ohjearvoissa ei ole muutosta vuoden 1991 versioon (Tielaitos 1991). Taulukot L1-2 ja L1-3 on esitetty julkaisussa yo. muodossaan.

Vuoden 2001 julkaisussa *Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet* (Tiehallinto 2001) on esitetty uusitettu versio taulukosta (ks. Taulukot L1-4, L1-5 ja L1-6). Julkaisussa taulukkoarvojen lähteiksi on annettu edeltävä ohje (Tielaitos 1999), vaikkakin taulukon sisältö on osin muuttunut: taulukkoon on lisätty puristinkairaus, jonka opastetaan olevan paras kairausmenetelmä hiekoille ja siltille. Puristinkairauksen arvot eivät näytä perustuvan myöskään Tielaitoksen (1999) toiseen taulukkoon (Taulukko L1-3).

Tiehallinnon (2001) taulukoissa esitettyjen kitkakulmien raja-arvojen osalta kerrotaan, että ne eivät edusta suurinta mahdollista maalajilla tavattavaa huippuarvoa. Lisäksi ohjeistetaan, että arvoja ei ole tarkoitus käyttää tilanteissa, jossa maakerroksen tiiviystilan aliarviointi johtaa tekniseltä tai taloudelliselta kannalta epävarmaan tai epätaloudelliseen lopputulokseen.

Esitetyt parametrit ovat louheen osalta muutoin nykyisen version kaltaisia, paitsi kitkakulman huippuarvon puolesta. Ohjeessa kerrotaan, että perinteiset määrittämenetelmät eivät sovellu louheelle sen karkearakeisuuden vuoksi. Täten ainoa tapa arvioida louheen parametrejä on sen rakeisuusjakauman ja tiiviystilan kautta. Esitetty taulukko on likimääräistä arviointia varten. "Kunakin ominaisuuden osalta taulukossa esitetyn vaihtelualueen alaraja-arvon voidaan tällöin otaksua edustavan rakeisuusjakautumaltaan lajittuneen louheen löyhän tilan ominaisarvoa ja yläraja-arvon vastaavasti rakeisuusjakautumaltaan suhteistuneen louheen tiiviin tilan ominaisarvoa" (Tiehallinto 2001).

*Taulukko L1-4. Vuoden 2001 ohjeavrot hiekkojen ja karkean siltin ominaisuuksien arviointiin (Tiehallinto 2001).*

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutos-parametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Paino-kairaus Pk/0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski-tiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekka d <sub>10</sub> <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keski-tiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekka d <sub>10</sub> >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keski-tiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

*Taulukko L1-5. Vuoden 2001 ohjeavrot soran ja moreenin ominaisuuksien arviointiin (Tiehallinto 2001).*

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohja-vedenpinnan		Kitka-kulma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutos-parametri		Kairausvastus		
		Ylä-puolella	Ala-puolella		Moduuliluku m	Jännitys-eksponentti β	Puristin-kairaus q <sub>c</sub> (MPa)	Paino-kairaus Pk/0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17 ... 19	10 ...	34	300 ... 600	0,5	< 5,5	10 ... 25	5 ... 10
	Keski-tiivis			37	400 ... 800	0,5	5,5 ... 12	25 ... 50	10 ... 20
	Tiivis	18 ... 20	12	40	600 ... 1200	0,5	> 12	> 50	> 20
Moreeni	Hyvin löyhä	16 ... 19	10 ... 12	... 34	(≤100)* 300 ... 600	0,5	< 10	< 40	< 20
	Löyhä	17 ... 20	10 ... 12	... 36	(100...250)* 600 ...	0,5	> 10	40 ... 100	20 ... 60
	Keski-tiivis	18 ... 21	11 ... 13	... 38	800 ...	0,5	-	> 100	60 ... 140
	Tiivis	19 ... 23	11 ... 14	... 40	1200 ...	0,5	-	Lyömällä	> 140

*Taulukko L1-6. Vuoden 2001 ohjearvot louheen ominaisuuksien arviointiin (Tiehallinto 2001).*

Louheen raekoko	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> )	Moduuliluku m	Jännityseksponentti $\beta$	Kitkakulman huippuarvo (°)
Esimurskattu louhe 0...150 / 0...300 mm	17 ... 22	500 ... 2000	0,5	38 ... 50
Louhe 0...300 / 0...600 mm	17 ... 22	300 ... 1500	0,5	38 ... 50

Vuonna 2007 julkaistu *Sillan geotekniset suunnitteluperusteet* (Tiehallinto 2007) piti arvot muutoin samana, paitsi muutti louheen osalta kitkakulman huippuarvon arvoon 42° (ks. Taulukko L1-7).

*Taulukko L1-7. Vuoden 2007 ohjearvot louheen ominaisuuksien arviointiin (Tiehallinto 2007).*

Louheen raekoko	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> )	Moduuliluku m	Jännityseksponentti $\beta$	Kitkakulman huippuarvo (°)
Esimurskattu louhe 0...150 / 0...300 mm	17 ... 22	500 ... 2000	0,5	38 ... 42 <sup>(1)</sup>
Louhe 0...300 / 0...600 mm	17 ... 22	300 ... 1500	0,5	38 ... 42 <sup>(1)</sup>

(1) Kitkakulman arvona voidaan käyttää arvoa >42° vain, jos voidaan osoittaa täytön kitkakulman olevan esitetyn suuruinen. Täyttöön käytetyn louheen rakeisuus ja tiiveys rakenteessa tulee lisäksi olla selvitettyinä.

Nykyisessä versiossa *Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7* (Väylävirasto 2023) arvot ovat identtiset Taulukkojen L1-4, L1-5 ja L1-7 arvojen kanssa. Arvojen kerrotaan perustuvan rakennetuista silloista tehtyihin jälkiarviointeihin (painumaominaisuuksia siltojen perustuksista on tutkinut mm. Rämö (1990)). Arvoja on ajateltu hyödynnettävän erityisesti alustavassa kantavuustarkastelussa maanvaraisille perustuksille. Tiivistetyille täytöille ohjeistetaan käyttämään louheen osalta esimurskatun louheen arvoja, ja hiekalle ja soralle vastaavia tiiviin hiekan ja soran arvoja.

## Kirjallisuus

- Helenelund, K.V. 1964a. Moreenimaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT, sarja III – rakennus 79. VTT, Helsinki.
- Helenelund, K.V. 1966. Kitkamaalajien kantavuusominaisuuksista. VTT, sarja III – rakennus 97. VTT, Helsinki.
- Rämö, S. 1990. Kitkamaan varaisesti perustettujen siltojen painuman laskeminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- Tammirinne, M. 1969. Kitkamaalajien rakenne ja kokoonpuristuvuus. VTT, sarja III – rakennus 136, Helsinki.
- Tie- ja vesirakennushallitus. 1982. Standardin SFS 4315 pohjarakennusohjeet soveltaminen sillansuunnittelussa. TVH, Helsinki.
- Tiehallinto. 2001. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Tiehallinto, Helsinki
- Tiehallinto. 2007. Sillan geotekniset suunnitteluperusteet. Tiehallinto, Helsinki
- Tielaitos. 1991. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Tielaitos, Helsinki.
- Tielaitos. 1999. Pohjarakennusohjeet sillansuunnittelussa. Tielaitos, Helsinki.
- Valkeisenmäki, A. 1973. Rakeisuuden vaikutus hiekan ja soran painumis- ja tiiveysominaisuuksiin. VTT, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 10, Otaniemi.
- Väylävirasto. 2023. Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Väyläviraston ohjeita 14/2023. Väylävirasto, Helsinki.

## Liite 2: Tilavuuspainon kirjallisuusarvot

Tässä liitteessä kuvataan kootusti kitkamaalajien tilavuuspainon kirjallisuusarvoja sekä esitetään niiden vertailu taulukkoarvojen kanssa. Lisäksi kuvataan vertailussa tehdyt oletukset.

### Helanelundin aineisto

Helanelundin (1964b) käsikirjassa on esitetty maalajeittain tilavuuspainon vaihteluvälit. Aineistona on ollut, myös kitkamaiden osalta, pääasiassa häiriintymättömiä näytteitä. Tutkimukset on tehty maataloushallituksen insinööriosaston vesiteknillisen tutkimustoimiston laboratoriossa v. 1955–1960. Arvot ovat tilavuuspainoja vedenpinnan yläpuolella. Jaottelua tiiveyden perusteella ei ole tehty.

Taulukossa L2-1 on verrattu tilavuuspainojen taulukkoarvoja Helanelundin (1964b) esittämiin vaihteluväleihin, joista pienempi arvo vastaa 20 % -fraktiilia ja ylempi 80 % -fraktiilia. Vertailun perusteella arvot vastaavat hyvin toisiaan moreenien osalta, mutta hiekan tapauksessa Helanelundin (1964b) vaihteluvälit sijoittuvat taulukkoarvojen alapäähän (löyhä tai hyvin löyhä maa). Sitä vastoin hietan tilavuuspainon arvot ovat verrattain suurempia kuin karkean siltin ja hienon hiekan tilavuuspainon taulukkoarvot (vastaavat tiiviin maan arvoja).

*Taulukko L2-1. Tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen Helanelundin (1964a) esittämiin vaihteluväleihin*

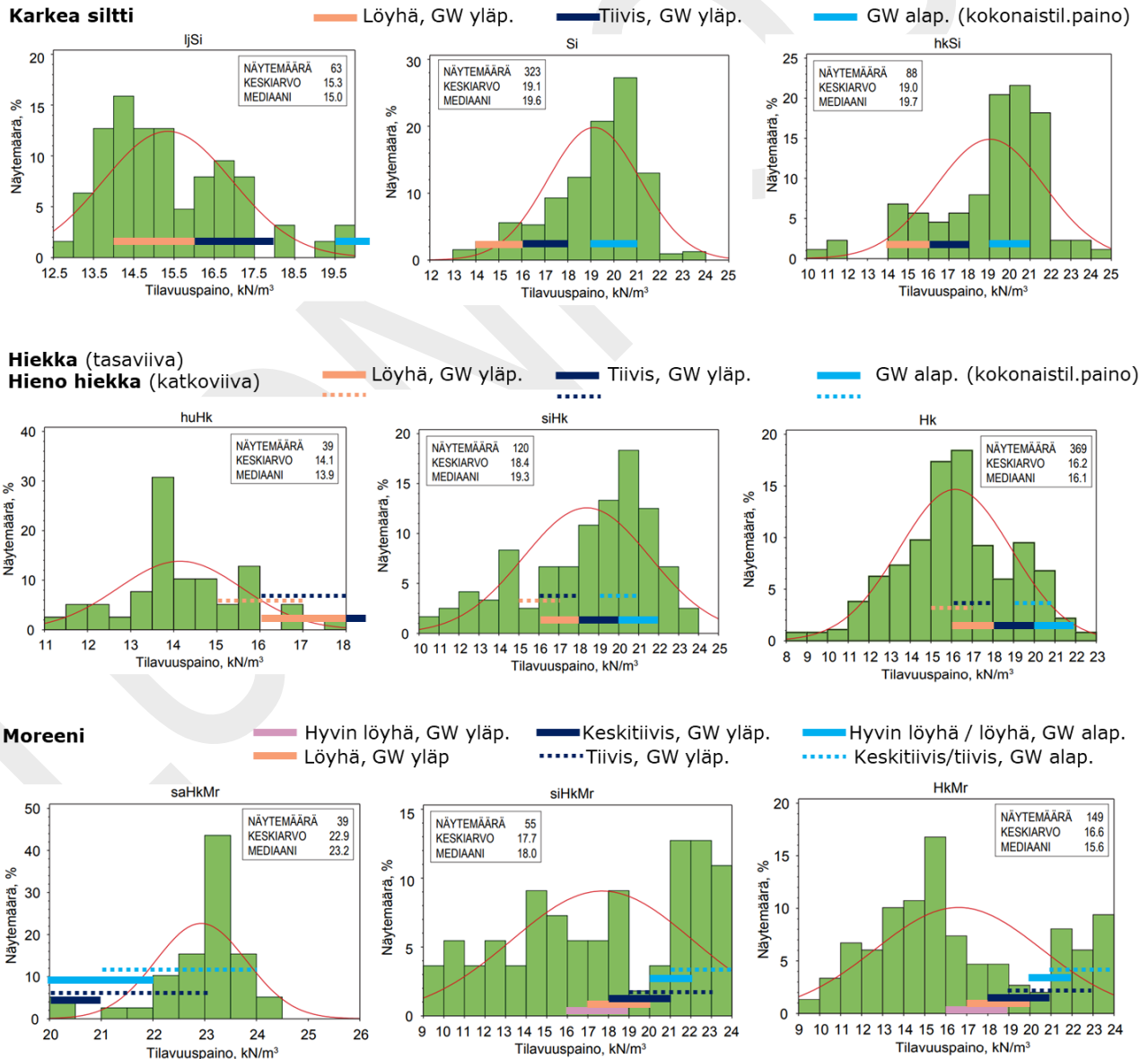
Taulukkoarvot Helanelund (1964b) <sup>a)</sup>	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella			
	hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis
Karkea siltti		14...16		16...18
Hieta	16,7...19,6			
Hieno hiekka d <sub>10</sub> <0,06		15...17		16...18
Hieta	16,7...19,6			
Hiekka d <sub>10</sub> >0,06		16...18		18...20
Hiekka	14,7...18,6			
Sora		17...19		18...20
Sora	15,7...19,6			
Moreeni	16...19	17...20	18...21	19...23
Hiesumoreeni	17,7...20,6			
Hietamoreeni	18,6...21,6			
Hiekkamoreeni	17,7...21,6			

<sup>a)</sup> Arvot muunnettu irtotiheydestä tilavuuspainoksi. Pienempi arvo vastaa 20 % -fraktiilia ja ylempi 80 % -fraktiilia

### Ronkaisen aineisto

Ronkaisen (2012) julkaisussa on esitetty Suomen maalajien ominaisuuksien jakaumia. Kitkamaalajien osalta "tilavuuspaino on määritetty – punnitsemalla 1–2 litran suuruisen näytteen paino" (Ronkainen 2012, s. 29). Toisin sanoen tilavuuspaino ei vastaa luonnontilaisen maakerroksen tiiveyden mukaista tilavuuspainoa. Tiiviiden maakerrosten osalta näytteenotossa tapahtuu löyhtymistä, joten määritetty tilavuuspaino aliarvioidaan tällaisten maakerrosten osalta. Toisaalta valtaosa karkearakeisista maanäytteistä on Ronkaisen (2012) aineistossa otettu koe-kuopasta, eli verrattain läheltä maanpintaa (eniten näytteitä karkearakeisista maa-lajeista ja moreenimaalajeista oli otettu syvyyksiltä 0...3 m).

Kuvassa L1-1 on verrattu Ronkaisen (2012) koosteen tilavuuspainojakaumia taulukkoarvojen kanssa. Taulukon tilavuuspainot pohjavedenpinnan alapuolella on muunnettu kokonaistilavuuspainoiksi ( $\gamma = \gamma' + \gamma_w$ ).



Kuva L1-1. Kitkamaalajien tilavuuspainojen jakaumia (Ronkainen 2012) verrattuna taulukkoarvojen vaihteluväleihin.

Karkean siltin osalta taulukkoarvot vastaavat hyvin Ronkaisen (2012) aineistoa: siltin ja hiekkaisen siltin jakaumien tapauksessa taulukkoarvot sijoittuvat keskiarvojen molemmin puolin. Liejuisen siltinkin osalta taulukkoarvot vastaavat jakaumaa varsin hyvin.

Sitä vastoin hiekan ja hienon hiekan tapauksessa taulukkoarvot ovat Hk-jakaumaan nähden yläkantissa. Taulukkoarvot vastaavat paremmin siHk-jakaumaa. Vastaavuus huHk-jakauman kanssa on heikko, mikä viittaa siihen, että taulukkoarvot on tarkoitettu sovellettavaksi epäorgaanisille maakerrostumille. Hiekkamoreenien jakaumassa hajonta on suurta, mikä voi johtua mittausvirheistä ja näyte- laadun vaihteluista. Taulukkoarvot sijoittuvat pääosin HkMr-jakaumien keskiarvojen yläpuolelle. Sitä vastoin savisen hiekkamoreenin jakauman osalta taulukkoarvot aliarvioisivat tilavuuspainoa.

### **Kirjallisuus**

Helenelund, K.V. 1964b. Geotekniikka ja pohjarakennus. VTT, sarja III – rakennus 78. VTT, Helsinki.

Ronkainen, N. 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.



## Liite 3: Ruotsalaiset ja norjalaiset taulukkoarvot

Tässä liitteessä kuvataan Ruotsin ja Norjan suunnitteluohjeissa esitetyt kitkamaalajien taulukkoarvot sekä niiden vertailu suomalaisien taulukkoarvojen kanssa kaikkien kitkamaalajien osalta. Lisäksi kuvataan vertailussa tarvittujen muunnosten olettamat.

### **Ruotsalaiset taulukkoarvot (Trafikverket)**

Ruotsissa käytettäviä maan ominaisuuden taulukkoarvoja on esitetty Trafikverketin GEO 13 -ohjeessa (Trafikverket 2014). Tilavuuspainojen ominaisarvojen taulukkoarvoja ohjeistetaan käyttämään karkearakeisille maalajeille ja täytöille sekä tutkimustulosten puuttuessa.

Karkearakeisille maalajeille esitetyt tilavuuspainot edustavat Trafikverketin (2014) mukaan empiirisiä keskiarvoja. Taulukossa L3-1 on verrattu ruotsalaisia ominaisarvoja taulukkoarvoihin. Lähes kaikki ruotsalaiset arvot osuvat taulukkoarvojen vaihteluväleihin. Siltin, hienon hiekan ja hiekan osalta tilavuuspaino pohjavedenpinnan yläpuolella on ruotsalaisessa ohjeessa pienempi. Soran tapauksessa taas ruotsalainen ohjearvo löyhälle soralle on pienempi. Eroavaisuudet ovat kuitenkin hyvin pieniä.

Taulukkoon L3-1 on koottu vertailu kitkakulmien osalta. Trafikverketin (2014) mukaan taulukkoarvot edustavat kitkakulman ominaisarvoja (kun käytetään empiiristä menetelmää), ja karkearakeisille maalajeille koheesioksi asetetaan  $c' = 0$  kPa. Trafikverket (2014) esittää kaksi kitkakulman arvoa: löyhälle ja tiiviille maalle, ja ohjeistaa, että maan tiiveys voidaan arvioida kairausvastuksen perusteella (ks. Luku 3.1.1 ).

Taulukosta nähdään, että tiiviiden maakerrosten osalta ruotsalaiset kitkakulman arvot joko vastaavat suomalaisia tai ovat suurempia. Löyhän maan osalta taas ruotsalaiset arvot ovat pääosin pienempiä.

Taulukko L3-1. Tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen ruotsalaisen suunnitteluohjeen (Trafikverket 2014) arvoihin.

Taulukkoarvot / Trafikverket <sup>a)</sup>	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella				Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan alapuolella			
	hyvin löyhä	löyhä	keski-tiivis	tiivis	hyvin löyhä	löyhä	keski-tiivis	tiivis
Karkea siltti		14...16		16...18		9...		11
Silt (Si)		15		17		8		9
Hieno hiekka d <sub>10</sub> <0,06		15...17		16...18		9...		11
Hiekka d <sub>10</sub> >0,06		16...18		18...20		10...		12
Sand (Hk)		16		18		9		10
Sora		17...19		18...20		10...		12
Grus (Sr)		17		19		11		12
Moreeni	16...19	17...20	18...21	19...23	10...12	10...12	11...13	11...14
Grusig mörän (SrMr)		18		20		12		13
Sandig mörän (HkMr)		18		20		11		12
Siltig mörän (SiMr)		18		20		10		11
Esimurskattu louhe / Louhe			17...22 <sup>b)</sup>					
Grovkrossad sprängsten (esimurskattu louhe)	18		20		10		11	
Sorterad sprängsten (seulottu louhe)	16		18		10		11	
Sprängsten (louhe)	16		18		12		13	

<sup>a)</sup> Trafikverket (2014) ohjeistaa, että mikäli kitkamaa sisältää yli 15 % kiviä tai lohkareita, kasvatetaan tilavuuspainoa 1 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan yläpuolella) tai 0,5 kN/m<sup>3</sup> (pohjavedenpinnan alapuolella): tätä vaikutusta ei ole otettu huomioon vertailutaulukossa.

<sup>b)</sup> Rakennettu louhetäyttö tai tiivistetty mursketäyttö.

Taulukko L3-1. Kitkakulman taulukkoarvojen vertaaminen ruotsalaisen suunnitteluohjeen (Trafikverket 2014) arvoihin.

Taulukkoarvot / Trafikverket	Kitkakulma (°)			
	hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis
Karkea siltti		28	30	32
Silt (Si)	26		33	
Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$		30	33	36
Hiekka $d_{10} > 0,06$		32	35	38
Sand (Hk)	28		35	
Sora		34	37	40
Grus (Sr)	30		37	
Moreeni	...34	...36	...38	...40
Grusig mörän (SrMr)	38		45	
Sandig mörän (HkMr)	35		42	
Siltig mörän (SiMr)	33		40	
Esimurskattu louhe / Louhe			38...42 <sup>a)</sup>	
Grovkrossad sprängsten (esimurskattu louhe)	-		45	
Sorterad sprängsten (seulottu louhe))	-		45	
Sprängsten (louhe)	-		45	

<sup>a)</sup> Rakennettu louhetäyttö tai tiivistetty mursketäyttö. Kitkakulman arvona voidaan käyttää arvoa  $>42^\circ$  vain, jos voidaan osoittaa täyden kitkakulman olevan esitetyn suuruinen.

Kimmomoduulien ominaisarvot on samoin annettu eri maalajeille ja täytöille, ja jaottelu löyhiin ja tiiviisiin maihin on tehty samaan tapaan kuin kitkakulman osalta. Kimmomoduuli muunnettiin moduuliluvuksi olettamalla lineaarinen ( $\beta = 1$ ) jännitysmuodonmuutostäyttäytyminen ja Poissonin luvuksi  $\nu = 0,2 \dots 0,3$  (Taulukko L3-3). Mikäli oletetaan suomalaisten taulukkoarvojen mukainen  $\beta = 0,5$  tai  $\beta = 0,3$ , kimmomoduuliin perustuvasta moduuliluvusta tulee (oletetusta jännityslisäyksestä riippuen) yleensä pienempi.

Vertailutaulukon mukaan noin puolet ruotsalaisista arvoista vastaa taulukkoarvoihin nähden pienempää moduulilukua. Suurempia moduulilukuja ei ilmene ollenkaan. Näin ollen pelkästään moduuliluvun perusteella ruotsalaiset taulukkoarvot ovat konservatiivisempia. Toisaalta on syytä ottaa huomioon, että ruotsalaiset ohjearvot moreeneille vaikuttavat varovaisilta, sillä esimerkiksi siltimoreenille ehdotetaan samaa kimmomoduulia kuin siltille.

*Taulukko L3-3. Kimmomoduulien taulukkoarvojen vertaaminen ruotsalaisen suunnitteluohjeen (Trafikverket 2014) arvoihin.*

Taulukkoarvot / Trafikverket	Moduuliluku			
	hyvin löyhä	löyhä	keskitiivis	tiivis
Karkea siltti		30...100	70...150	100...300
Silt (Si)	20...30		100...200	
Hieno hiekka $d_{10} < 0,06$		50...150	100...200	150...300
Hiekka $d_{10} > 0,06$		150...300	200...400	300...600
Sand (Hk)	50...60		200...300	
Sora		300...600	400...800	600...1200
Grus (Sr)	100...200		400...500	
Moreeni	$(\leq 100) *$ 300 ... 600	$(100...250) *$ 600 ...	800...	1200...
Grusig mörän (SrMr)	100...200		400...500	
Sandig mörän (HkMr)	50...60		200...300	
Siltig mörän (SiMr)	20...30		100...200	
Esimurskattu louhe			500...2000	
Louhe			300...1500	
Krossad sprängsten (murskattu louhe)	-		500...600	
Sorterad sprängsten (seulottu louhe)	-		500...600	
Sprängsten (louhe)	-		500...600	

## Norjalaiset taulukkoarvot (Statens vegvesen)

Norjassa käytettäviä maan ominaisuuden taulukkoarvoja on esitetty Statens vegvesen:in "Geoteknikk i vegbygging"-ohjeessa (2010). Taulukkoarvojen kerrotaan olevan hyödyllisiä arvioita varten, mitattujen arvojen kohtuullisuuden arvioimiseksi ja käytännöllisen yleiskuvan luomiseksi. Ohjeessa kerrotaan, että on huonoa ammattikäytäntöä käyttää kokemusperäisiä arvoja mittausdatan sijaan, sillä kokemusperäisiin parametreihin liittyy paljon hajontaa, ja niiden käyttö voi olla riskialtista (Statens vegvesen 2010). Ohjeessa ei kerrota, mihin arvot perustuvat tai sitä, ovatko ne varovaisia arvioita vai keskiarvoja. Taulukkoarvoja kuvataan kuitenkin "arvoina mitoitusta varten", mikä viittaa siihen, että arvot voisivat edustaa ominaisarvoja.

Arvot ovat jaettu taulukoissa kahteen kategoriaan sen mukaan, mihin ne sijoittuvat rakenteessa (ks. Taulukot L3-4 ja L3-5). Ensimmäinen kategoria on maille, jotka ovat sillan maatuen tai tukiseinän edessä tai takana (eli maita, joista aiheutuu maanpainetta). Toinen kategoria on maille, jotka sijoittuvat sillan maatuen alle. Lisäksi nämä kategoriat on jaoteltu kahteen kategoriaan, rakennettuihin täyttöihin ja luonnollisesti esiintyviin maihin. Toisen kategorian arvoja voidaan ohjeen mukaan soveltaa myös muihin konteksteihin. Tämän vuoksi arvot eivät vastaa täysin suomalaisen käytännön taulukkoarvoja.

*Taulukko L3-4. Tilavuuspainon taulukkoarvojen vertaaminen norjalaisen suunnitteluohjeen (Statens vegvesen 2010) arvoihin.*

Taulukkoarvot	Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan yläpuolella		
	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis
Sora	17...19		18...20
Grus (Sr) *	19		
Grus (Sr) **	18		19
Hiekka $d_{10}>0,06$	16...18		18...20
Hieno hiekka $d_{10}<0,06$	15...17		16...18
Sand (Hk) *	18		19
Sand (Hk) **	17		18
Karkea siltti	14...16		16...18
Silt (Si) *	18		
Silt (Si) **	18		19
Louhe / Esimurskattu louhe	17...22		
Sprengstein *	19		
Sprengstein **	19		

\* Sillan maatuen tai tukiseinän edessä tai takana

\*\* Sillan maatuen alla

*Taulukko L3-5. Kitkakulman taulukkoarvojen vertaaminen norjalaisen suunnitteluohjeen (Statens vegvesen 2010) arvoihin.*

Taulukkoarvot	Kitkakulma (°)		
	Löyhä	Keskitiivis	Tiivis
Sora	34	37	40
Grus (Sr) *	35		38
Grus (Sr) **	36		38/40 ***
Hiekka $d_{10}>0,06$	32	35	38
Hieno hiekka	30	33	36
Sand (Hk) *	33		36
Sand (Hk) **	33		36
Karkea siltti	28	30	32
Silt (Si) *	31		
Silt (Si) **	31		33
Louhe / Esimurskattu louhe	38...42 ****		
Sprengstein *	42		
Sprengstein **	42/45 ***		

\* Sillan maatuen tai tukiseinän edessä tai takana

\*\* Sillan maatuen alla

\*\*\* Korkeampaa arvoa voidaan käyttää, kun tuen alla on hyvälaatuista materiaalia

\*\*\*\* Rakennettu louhetäyttö tai tiivistetty mursketäyttö. Kitkakulman arvona voidaan käyttää arvoa  $>42^\circ$  vain, jos voidaan osoittaa täytön kitkakulman olevan esitetyn suuruisen.

## Kirjallisuus

Trafikverket. 2014. Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13.

Vägverket. 1994. Jords hållfasthets- och deformationsegenskaper. Publikation 1994: 15. Vägverket, Borlänge.

Liite 4: Kitkamaalajien ominaisuuksien arviointi  
kairausvastuksen avulla (erikoistyö, Ida-Maria  
Savila)

LUONNOS