

# **SÄHKÖISEN SIIPIKAIRAN**

## **KELPOISUUS**

Juho Kalliokuusi

Opinnäytetyö  
Lokakuu 2012  
Rakennustekniikka  
Infrarakentaminen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

KALLIOKUUSI JUHO,  
Sähköisen siipikairan kelpoisuus

Opinnäytetyö 47 sivua  
Lokakuu 2012

---

Tämä opinnäytetyö käsittelee uudentyyppisen sähköisen GM 4W -siipikairan toimivuutta kairaustyössä. Tutkimuksessa käsitellään laitteen tuomia hyötyjä käyttäjälle verrattuna nykyisin käytössä oleviin siipikairoihin. Laitte on suomalaisen Geomachine Oy:n valmistama. Työssä selvitetään yleisiä toimintatapoja siipikairauksessa ja kairaustuloksiin vaikuttavia virhelähteitä. Siipikairausmenetelmän kehitystä tähän päivään asti käsitellään kirjallisuustutkimusten kautta. Työn tilaajina olivat A-Insinöörit Geotesti Oy ja Liikennevirasto.

Tutkimusmenetelminä olivat kirjallisuustutkimus, avoimet haastattelut ja kenttätutkimukset siipi- ja puristinheijarikairalla. Työn teoreettinen viitekehys muodostuu maan leikkauslujuuden määrittämisestä siipikairalla. Menetelmän nykyiset ohjeet ovat Suomen Geoteknillisen yhdistyksen kairausoppaassa 2. Teoriaosuudessa käydään läpi siipikairausohjeet, kairauksen tekeminen ja tuloksiin vaikuttavat virhelähteet. Lisäksi työssä perehdytään valmisteilla olevan eurostandardin asettamiin vaatimuksiin siipikairaukselle. Muista leikkauslujuuden määrittämismenetelmistä esitellään kartiokoe ja kolmiaksiaalikoe.

Tutkimuksen lopputuloksena todettiin sähköisen siipikairalaitteen käyttökelpoisuus. Laitteen toiminnasta saatiin käyttäjälle hyödyllistä tietoa. Eurostandardin luonnosversiossa on esitetty erityisesti kairalaitteille tiukempia ehtoja. Näihin ehtoihin sähköinen siipikaira soveltuu vanhoja kairalaitteita paremmin. Kehityskohteena havaittiin tarve yhtenäistää toimintatapoja siipikairauksen tekemisessä. Jatkotoimenpiteenä tulisi selvittää, miten työsaavutuksia voidaan parantaa ilman tulosten heikkenemistä.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Construction Engineering  
Civil Engineering

**KALLIOKUUSI JUHO,**  
Eligibility of the electrical field vane apparatus

Bachelor's thesis 47 pages  
October 2012

---

This thesis deals with a new type electrical GM4W –field vane. The thesis discusses this new device advantages compared with the currently used types of field vanes. GM4W is manufactured by Finnish company Geomachine Oy. The study outlines common practices of field vane testing and the sources of error in the result of a measurement. A history of field vane test is a one part of the study. The study is ordered by A-Insinöörit Geotesti Oy and Finnish Transport Agency.

Used research methods were literature study, open interviews and field tests with field vane and static-dynamic penetration test. The theoretical context of this study based on the in-situ measurement of the undrained shear strength using the field vane. The present directive of method has published in the Finnish Geotechnical Society (SGY) publication, guidebook 2. The theoretical part of study deals with field vane test standards, practical fieldwork and the sources of error in the test results. The study also presents a draft version of international standard for the field vane. For other methods to measure shear strength, a fall cone test and a triaxial test are presented in this study.

Results of the research show electrical field vane apparatus utility. Operation of this device was useful information to the users. International standard will set more requirements for devices. These requirements, the GM4W field vane is more suitable than old devices. Development target could be to unify practical working methods. Further actions should be study how to get better work achievements.

---

Key words: FVT - field vane test, electrical field vane, GM 4W, Nilcon

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
1.1	Työn tausta .....	5
1.2	Työn tavoitteet .....	5
1.3	Työn rajaukset.....	6
2	LEIKKAUSLUJUUDEN MÄÄRITTÄMISTAVAT .....	7
2.1	Siipikairaus .....	7
2.1.1	Yleistä .....	7
2.1.2	Sensitiivisyys.....	8
2.1.3	Maan anisotropia .....	9
2.1.4	Tulosten redusointi .....	10
2.2	Kartiokoe .....	13
2.3	Kolmiaksiaalikoheet.....	15
3	SIIPIKAIRAUSMENETELMÄ .....	17
3.1	Historia .....	17
3.2	Kalusto.....	18
3.3	Kairaustyö ja valmistelut.....	19
3.4	Eriyistutkimukset .....	21
4	SÄHKÖINEN SIIPIKAIRA GM4W .....	22
4.1	Yleistä.....	22
4.2	Kairauksen tekeminen .....	23
4.2.1	Valmistelut .....	23
4.2.2	Häiriintymätön mittaus .....	23
4.2.3	Häiritty mittaus.....	24
4.3	Kairaustulokset .....	24
4.3.1	Yleistä .....	24
4.3.2	Tulosten tulkitseminen.....	26
5	VIRHELÄHTEIDEN VAIKUTUS TULOSSIIN .....	29
5.1	Siiven koko ja muoto.....	29
5.2	Odotusajan vaikutus .....	30
6	SIIVEN KIERTÄMISNOPEUS .....	33
6.1	Käytettävät kiertonopeudet.....	33
6.2	Kiertonopeuden vaikutus eri maalajeilla.....	33
7	REFERENSSIKOHDE.....	36
8	KÄYTTÖKOKEMUKSET SÄHKÖISESTÄ SIIPIKAIRALAITTEESTA.....	38
8.1	Yleistä.....	38
8.2	Laitteen etuja.....	38
8.3	Havaitut kehittämismahdollisuudet.....	39
9	EUROSTANDARDI .....	40
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET .....	44
	LÄHTEET.....	46

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Työn tausta

Suomessa on jo pitkään ollut käytössä Nilcon-merkkinen siipikaira. Näitä siipikairoja hankittiin Ruotsista 1980-luvulla Suomeen. Nilcon siipikairoja ei ole valmistettu yli 20 vuoteen. A-Insinöörit Geotesti Oy on hankkimassa uutta sähköistä siipikairakalustoa korvaamaan vanhat Nilcon-kairalaitteet.

Hankittava sähköinen siipikairalaite on suomalaisen Geomachine Oy:n valmistama GM4W –siipikaira. Kairalaitteen etuihin kuuluu mm. sähköinen vakiokierrosnopeusmoottori, joka antaa siivelle tasaisen kiertymisnopeuden kuormituksesta riippumatta. Hankittavan uuden kairalaitteen käyttökelpoisuutta on tarve selvittää.

### 1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia sähköisen siipikairalaitteen toimivuutta ja etuja verrattuna Nilconin kairaan. Työhön kerätään käyttökokemuksia ja parannusehdotuksia laitteesta. Työn teoreettisessa osuudessa käsitellään leikkauslujuuden määrittämismenetelmistä siipikairauksen lisäksi kartiokoe ja kolmiaksaalikokeet.

Alkujaan Nilcon-siipikairaa kierrettiin käsiveivin avulla, mutta myöhemmin veivin tilalla alettiin käyttää erillisiä sähkömoottoreita. Käytettävien sähkömoottoreiden antamasta kiertämisnopeudesta ei ole täyttä varmuutta, koska moottoreita on alustavien selvitysten mukaan käytössä eri malleja, eikä niille vaadita kalibrointitodistuksia. Suomen Geoteknillisen yhdistyksen vuonna 1995 julkaiseman siipikairausoppaan mukaan käytettävä kiertämisnopeus tulee olla  $0,1^\circ$  sekunnissa (SGY 1995, 5). Kiertonopeuden vaikutusta saatuihin leikkauslujuuden arvoihin on tarve selvittää.

Tutkimuksessa perehdytään siipikairauksessa mahdollisesti tehtäviin tulkintavirheisiin, kuten:

- maan ominaisuuksien vaikutus
- vaippakitkan ottaminen huomioon
- vapaaliikekytkimentoimivuus
- odotuksen vaikutus
- kiertonopeuden vaikutus eri maalajeilla (Tielaitos 1998.)

Tavoitteena on myös tutkia valmisteilla olevan eurostandardin (preEN 22476-9, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 9: Field vane test.) tuomia muutoksia siipikairausmenetelmään. Nykyinen siipikairausmenetelmä noudattaa Suomen Geoteknillisen yhdistyksen (SGY 1995) laatimaa kairausopasta II: siipikairaus.

### **1.3 Työn rajaukset**

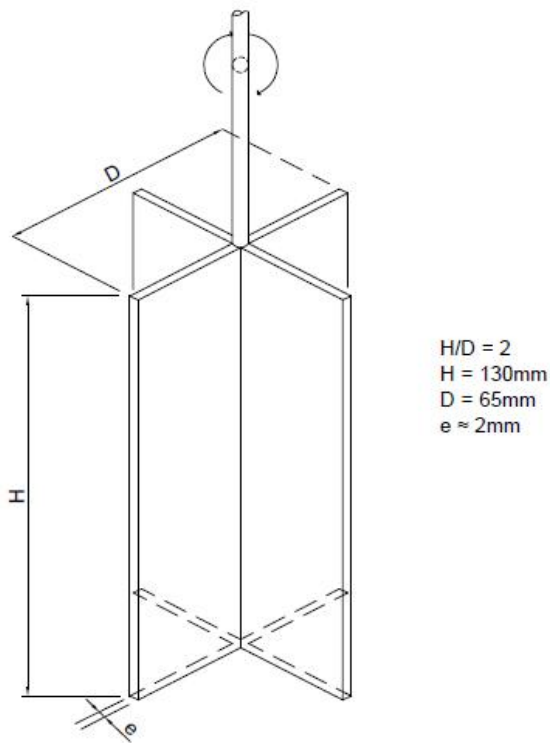
Aineiston rajallisuuden takia tässä työssä ei tehdä tilastollista tulosten vertailua perinteisen ja sähköisen siipikairan välillä. Maan leikkauslujuutta voidaan määrittää likimääräisesti paino- tai puristin-heijarikairan perusteella. Kyseisiä menetelmiä ei käydä läpi työn rajallisuuden takia.

## 2 LEIKKAUSLUJUUDEN MÄÄRITTÄMISTAVAT

### 2.1 Siipikairaus

#### 2.1.1 Yleistä

Siipikairaus soveltuu maan suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen savi- ja liejusavi- maissa, liejussa sekä maatuneessa turpeessa. Siipikairalla voidaan yleensä määrittää leikkauslujuutta savessa, hieno- ja keskisiltissä sekä suuntaa antavasti maatumattomassa turpeessa ja karkeasiltissä. (SGY 1995, 1.)



KUVA 1. Siiven tyypilliset mitat

Siiven kärkien kautta oletetaan muodostuvan sylinterinmuotoinen leikkaantumispinta, jossa maan suljetun leikkaantumislajuuden oletetaan saavuttavan suurimman arvonsa.

Standardisiivellä (kuva 1), jossa siiven halkaisijan  $D$  ja korkeuden  $H$  suhde on 1:2, leikkauslujuus  $S_v$  määritetään yleisesti kaavalla (1). Häiritty leikkauslujuus  $S_{vr}$  voidaan määrittää samalla kaavalla käyttämällä häirityn mittauksen maksimimomentin arvoa (SGY 1995, 6-7). Kaavassa oletetaan pysty- ja vaakasuuntaiset leikkauslujuudet samoiksi.

$$S_v = \frac{6}{7} \times \frac{M_T}{\pi \times D^3} \quad (\text{kaava 1})$$

Kaavassa on

$S_v$	siipikairausleikkauslujuus
$M_T$	suurin mitattu vääntömomentti
$D$	siiven halkaisija.

### 2.1.2 Sensitiivisyys

Hienorakeisten maakerrosten lujuuden alentumista eli häiriintymisherkkyttä kuvataan sensitiivisyytenä (Tielaitos 1993, 19). Sensitiivisyys  $S_t$  on häiriintymättömän leikkauslujuuden ( $s_v$ ) suhde häiriintyneeseen lujuuteen ( $s_{vr}$ ), kaava (2) (RIL 1985, 145).

$$S_t = \frac{s_v}{s_{vr}} \quad (\text{kaava 2})$$

TAULUKKO 1. Hienorakeisten maakerrosten sensitiivisyysluokat (Tielaitos 1993, 20).

Nimitys	Leikkauslujuuksien suhde, $s_t$
Vähän sensitiivinen	< 10
Kohtalaisen sensitiivinen	10–30
Hyvin sensitiivinen	> 30



### 2.1.3 Maan anisotropia

Luonnontilaisessa maaperässä jännitystila on yleensä anisotrooppista, joka tarkoittaa suunnasta riippuvaista. Maan lujuusominaisuudet siis eroavat toisistaan pysty- ja vaakasuunnassa. Yleisesti syynä tähän pidetään kaikkien maalajien, myös homogeenisten, muodostumista erilaisten kerrostumisprosessien seurauksena. (Slunga 1990, 98.)

Taulukossa 2 on esitetty Korhosen ja Leskelän (1970) laajemman siipikairatutkimuksen yhteydessä tekemien anisotrooppisuustutkimusten tuloksia. Tulosten perusteella homogeenisissa savissa (mm. Litorina ja Yoldia) vaakasuoran leikkauspinnan lujuus ( $S_{sh}$ ) on yleensä suurempi kuin pystysuoran leikkauspinnan lujuus ( $S_{sv}$ ). Sen sijaan kerrallisissa savissa (mm. Baltian jääjärven savet) vaakasuora lujuus saattaa olla 15–20 % pienempi kuin pystysuora lujuus. Sortumatapauksissa liukupinta seuraa yleensä mahdollisimman pitkään heikkoja vaakasuoria kerroksia. Tästä johtuen jälkimmäiseen anisotrooppisuustyyppiin on kiinnitettävä erityistä huomiota, kun arvioidaan liukupinnalla toimivaa keskimääräistä leikkauslujuutta. (Slunga 1990, 98.)

TAULUKKO 2. Eri-ikäisten sedimenttien anisotrooppisuuden keskiarvot (Korhonen & Leskelä 1970, 71).

OC ylikonsolidoitunut – over-consolidated

NC normaalistikondolidoitunut – normally consolidated

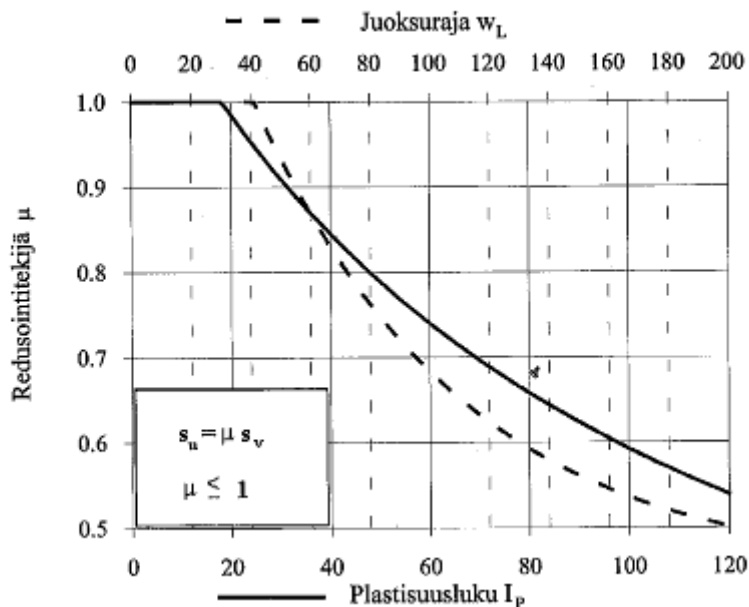
DC kuivakuori – dry crust

Konsolidoitumistila State of consolidation	$S_{sv}/S_{sh}$				
	Litorina	Ancylus	Yoldia	Baltian jääjärvi Baltic Ice Lake	Someron savi Somero clay
OC	0,85	0,89	0,58	1,10	1,31
NC	0,98	0,83	0,87	0,46	0,58
DC	0,39	0,21	-	-	-

### 2.1.4 Tulosten redusointi

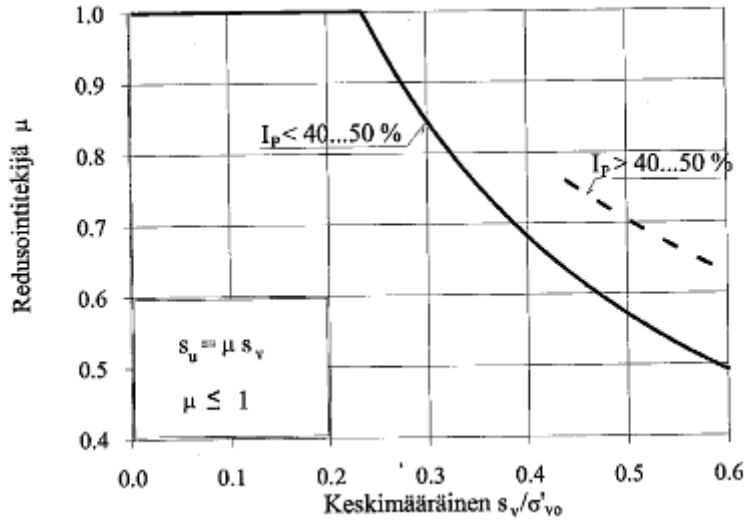
Siipikairalla määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot on aina tarpeen redusoida, sillä mitattuun arvoon vaikuttaa muun muassa maan anisotropisuus, siiven pyörimisnopeus ja maan progressiivinen murtuminen, eivätkä määritetyt arvot näin ollen vastaa luonnossa vallitsevia olosuhteita (Chandler 1988). Tätä varten on kehitetty erilaisia redusointimenetelmiä. Suunnittelija valitsee käytettävän tavan redusointikertoimen määrittämiseksi tapauskohtaisesti (Tielaitos 1994, 15).

Suomen Geoteknillisen yhdistyksen siipikairausoppaassa on esitetty redusointikertoimen määrittäminen menetelmä (kuva 2), jota voidaan käyttää, kun tutkittavan maalajin plastisuusluku  $I_p$  tai juoksuraja  $w_L$  on määritetty (SGY 1995, 7). Plastisuusluku saadaan juoksurajan ja kieritysrajan  $w_p$  erotuksesta  $I_p = w_L - w_p$ . Juoksuraja on vesipitoisuuden arvo, jossa maalaji muuttuu plastisesta juoksevaksi. Kieritysraja on vesipitoisuus, jossa maalaji muuttuu plastisesta puolikiinteäksi.



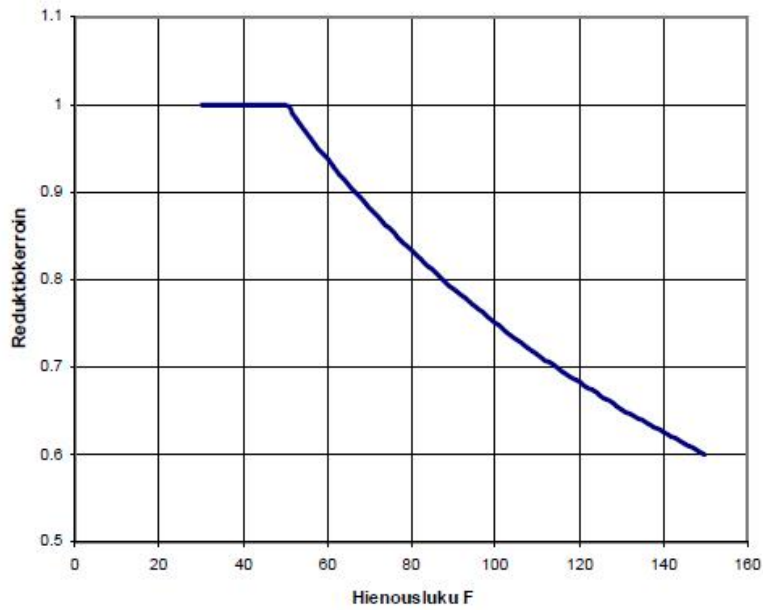
KUVA 2. Siipikairausleikkauslujuuden redusointi plastisuusluvun ja juoksurajan avulla (SGY 1995, 7).

Kairausopas esittelee myös menetelmän (kuva 3), jossa siipikairausleikkauslujuuden arvo redusoidaan maassa vallitsevan tehokkaan jännitystilän avulla. Tätä menetelmää varten selvitetään saven plastisuusluku  $I_p$  ja siipikairausleikkauslujuuden  $s_v$  ja murtopinnalla vallitsevan keskimääräisen tehokkaan pystyjännityksen  $\sigma'_{vo}$  suhde  $s_v/\sigma'_{vo}$ .

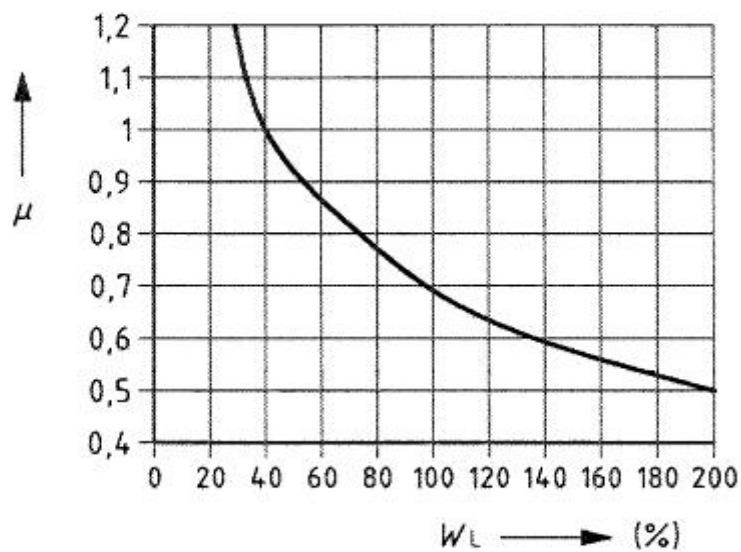


KUVA 3. Siipikairausleikkauslujuuden redusointi mitatun lujuuden  $s_v$  ja tehokkaan pystyjännityksen  $\sigma'_{vo}$  suhteen perusteella (SGY 1995, 8).

Ratahallintokeskuksen julkaisussa B 15 (Radan stabiileetin laskenta, olemassa olevat penkereet) esitetty redusointimenetelmä (kuva 4) soveltuu normaalikonsolidoituneelle tai lievästi ylikonsolidoituneelle savelle. Menetelmää voidaan käyttää siipikairalla tai kartiokojeella määritettyjen suljettujen leikkauslujuuksien redusointiin, kun hienousluku  $F$  on määritetty. (Ratahallintokeskus 2005.) Eurokoodin esittämä menetelmä (kuva 5) on samankaltainen, sillä poikkeuksella, että se mahdollistaa yli ykköstä suuremman redusointikertoimen (Eurokoodi 7, 2007, 108).



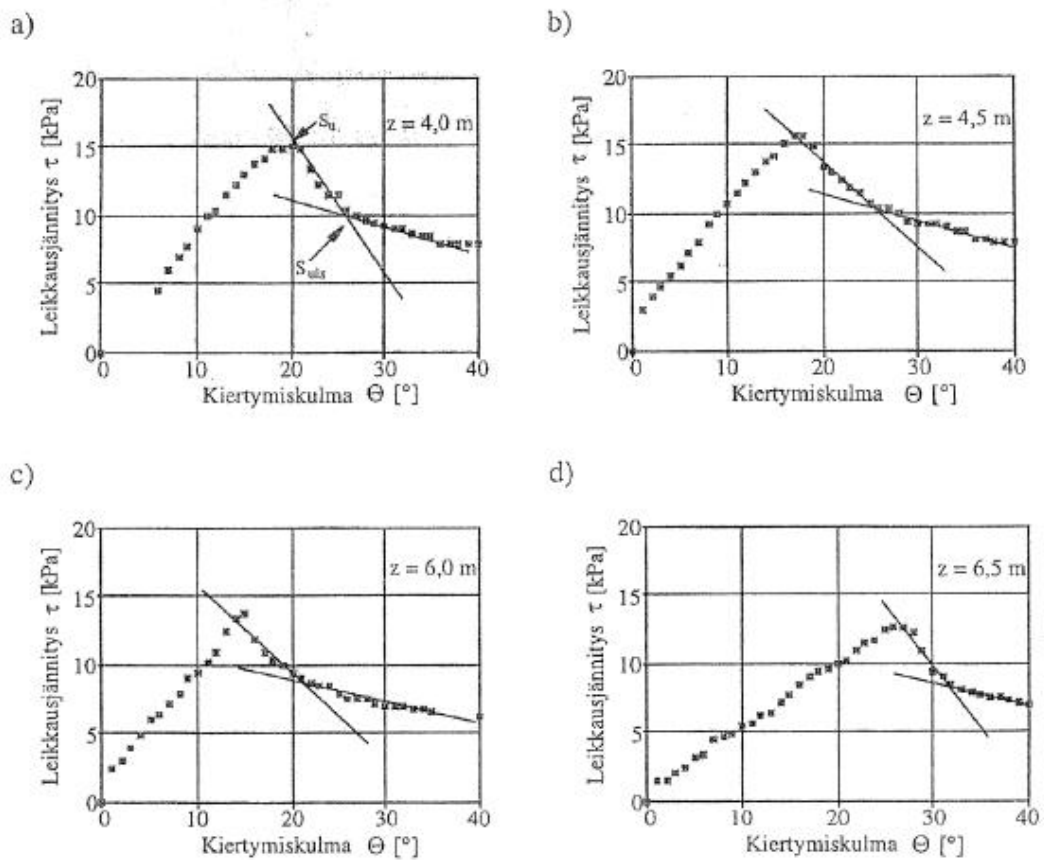
KUVA 4. Siipikairalla ja kartiokokeella määritettyjen suljettujen leikkauslujuuksien redusointi (Ratahallintokeskus 2005, 5).



KUVA 5. Eurokoodin mukainen redusointimenetelmä (Eurokoodi 7 2007, 108).

Suurten muodonmuutosten menetelmä (kuva 6) on yksi tapa leikkauslujuuden redusoinniseksi. Menetelmä perustuu siihen, että kairausta jatketaan riittävän kauan huippulujuuden saavuttamisen jälkeen. Tällöin lujuuskäyrälle saadaan loivasti laskeva häntä, jota tarvitaan tulosten interpolointiin. Menetelmässä piirretään kaksi interpolaatiosuoraa, joista toinen piirretään kohtaan, missä lujuus laskee jyrkimmin huippuarvon saavutettu-

aan ja toinen loivasti laskevan hännän kohdalle. Näin saatujen suorien kohtaamis-  
teestä määritetään suljetun leikkauslujuuden arvo. (Liikennevirasto 2010, 17.)



KUVA 6. Suurten muodonmuutosten menetelmä (Liikennevirasto 2010, 18).

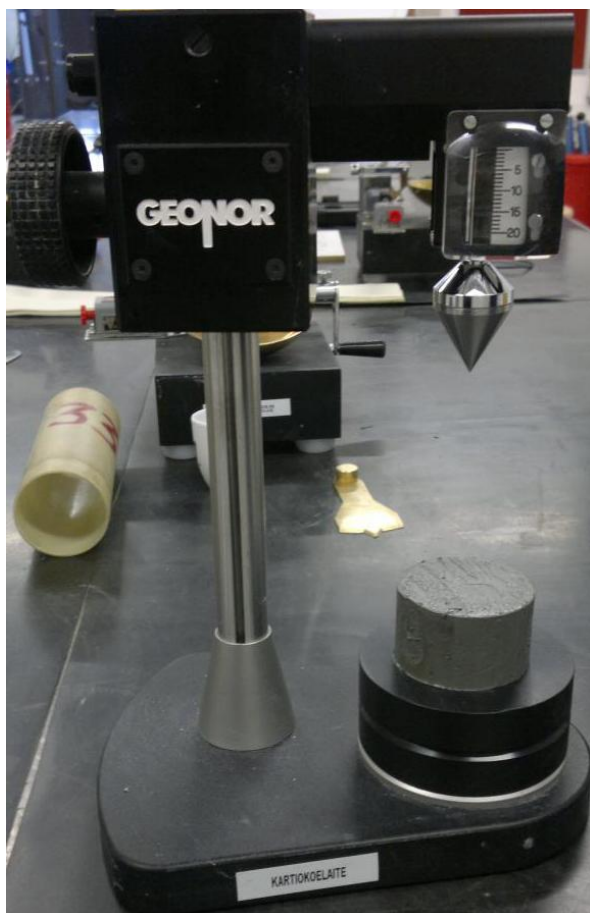
## 2.2 Kartiokoe

Kartiokokeella voidaan määrittää hienorakeisten maiden, saven ja siltin leikkauslujuutta. Menetelmässä eripainoisia ja eri kärkikulman omaavia kartioita asetetaan hipomaan näytteen pintaa ja annetaan niiden pudota omalla painolla näytteeseen. Näytteen leikkauslujuus saadaan kartiopiikin uppoaman perusteella määritettyä suoraan taulukoista tai käyrästä. (Jääskeläinen 2009, 110–111.)

Kokeeseen tarvitaan vähintään 30 mm paksu näyte. Näyte sahataan tasapaksuksi langasahalla ja asetetaan kojeen alustalle. Mittauksessa kartiopiikin painuman tulisi asettua 4-13 mm:n välille. Sopiva kartiokoko valitaan siten, että painumaehto toteutuu. Kartiota pudotetaan 5 kertaa eri kohtiin näytteen pintaa. Pudotuskohtien etäisyys toisistaan ja näytteen reunasta on oltava yli 10 mm. Kartio pudotetaan vapauttamalla kojeessa oleva

sähkömagneettilaukaisin ja uppouma luetaan heti pudotuksen jälkeen, jottei mahdollista lisäpainumista ehdi tapahtua. Tuloksia analysoitaessa pienin ja suurin arvo jätetään huomioimatta ja lopuista lasketaan keskiarvo. Näin saadun keskiarvon perusteella luetaan leikkauslujuuden arvo taulukosta tai käyrästä. Koe on mahdollista tehdä käyttämällä kahta erikokoista kartiota, jolloin lopuksi lasketaan kummallakin koesarjalla saadun tuloksen keskiarvo. (Jääskeläinen 2009, 111.)

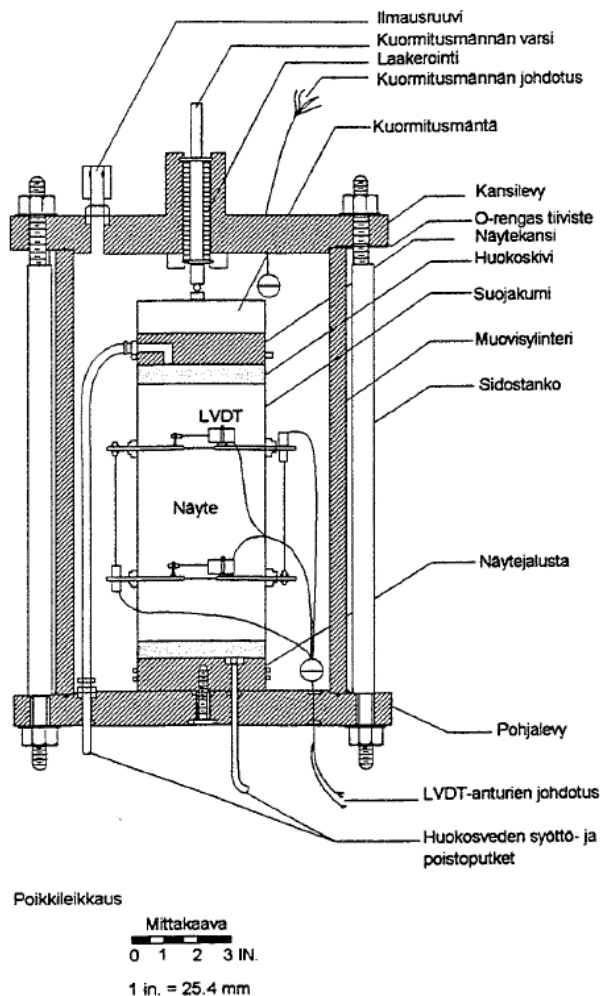
Yleensä kartiokoetta tehtäessä määritetään myös näytteen sensitiivisyys. Kun häiriintymätön näytteen koe on tehty, voidaan leikkauslujuuden määrittäminen tehdä häiriintyneelle näytteenä. Näytettä sekoitetaan voimakkaasti astiassa, tasataan sen pinta ja tehdään kojeessa häiriintyneelle aineelle vastaavat mittaussarjat kuin häiriintymättömälle. (Jääskeläinen 2009, 111.)



KUVA 7. Kartiokoje.

### 2.3 Kolmiakσιαalikokeet

Kolmiakσιαalikoe soveltuu maan suljetun leikkauslujuuden ja jännitys-muodonmuutosominaisuuksien määritysmenetelmäksi. Kokeessa sylinterin muotoista, läpäisemättömällä suojakumilla verhottua näytekappaletta tuetaan veden sellipaineella ja samanaikaisesti kuormitetaan kappaaleen päältä kohtisuorasti pystytangon päässä olevan kuormitusmännän välityksellä. Sellissä oleva vesipaine voidaan mitata ja säätää halutuksi. Myös kuormitusmännän kautta kappaaleeseen kohdistuvaa pystyjännitystä voidaan säätää. Tällöin näytteeseen saadaan kohdistettua erisuuruiset jännitykset vaaka- ja pystyakseleille, jolloin jännitystila vastaa parhaiten luonnossa vallitsevia jännitysolo-suhteita. (Jääskeläinen 2009, 107–108.)



KUVA 8. Kolmiakσιαalilaitteisto.

Hienorakeisen maan leikkauslujuuden määrittämiseen käytetään häiriintymättömiä näytteitä, jolloin kyseessä on ns. suljettu koe. Karkearakeisemmalle maalle tai erityistarkoituksiin kokeet voidaan tehdä rakennetuilla tai täysin häirityillä koenäytteillä, ns. avoin koe. (Eurokoodi 7 2007, 59.) Näytesyvyudet valitaan luokituskoekiden ja muiden pohjatutkimusten perusteella.

Erilaisia kolmiakσιαalikokeita:

CIUC	Isotrooppisesti konsolidoitu suljettu puristus
CAUC	Anisotrooppisesti konsolidoitu suljettu puristus
CAUE	Anisotrooppisesti konsolidoitu suljettu vetokoe (extension)
CADC	Anisotrooppisesti konsolidoitu avoin puristus

Konsolidoinnin tarkoituksena on saada tutkittava näyte haluttuun alkujännitystilaan. Yleensä alkujännitystila pyrkii jäljittelemään sitä jännitystilaa, jonka alaisena näyte on maakerroksessa luonnontilaisena ollut tai jonka alaiseksi se rakentamisen jälkeen tulee. Konsolidointi voidaan tehdä joko isotrooppisesti tai anisotrooppisesti. (Kolisoja 1990, 55.)

Isotrooppisesti konsolidoitaessa näyte saatetaan hydrostaattisen, eli kaikkiin suuntiin samansuuruisen jännityksen alaiseksi. Jännitystila on tällöin yhtä suuri nk. tehokkaan sellipaineen kanssa, joka saadaan laskettua sellipaineen ja kyllästyspaineen erotuksesta. Jos kyllästyspainetta ei käytetä, jännitystila on vastaavasti yhtä suuri käytettävän sellipaineen kanssa. Yleensä isotrooppista konsolidointia voidaan käyttää näytteille, joiden konsolidoitumisaste  $OCR \geq 2,5$ . (Kolisoja 1990, 55.)

Anisotrooppinen jännitystila aiheutuu, kun näytteeseen kohdistetaan hydrostaattisen paineen lisäksi aksiaalinen lisäkuormitus tavallisesti kuormitusmännän varaan asetettavan painotelineen ja sen päälle laitettavien painojen avulla. Aksiaalisen ja vaakasuuntaisen jännityksen suhde pyritään saamaan parhaiten luonnontilaisessa maakerroksessa vallitsevaa tilannetta vastaavaksi. (Kolisoja 1990, 55.)



### 3 SIIPIKAIRAUSMENETELMÄ

#### 3.1 Historia

Siipikairaus on ollut yleinen pohjatutkimusmenetelmä jo usean vuosikymmenen ajan. Ensimmäisen siipikairan suunnitteli ruotsalainen J. Olsson jo vuonna 1918. Sitä käytettiin muun muassa Tukholman lähetyville vuonna 1928 rakennetun Lidingön sillan pohjatutkimuksissa. Kaira patentoitiin vuonna 1929 Saksassa. Maastokäyttöön soveltuvaa siipikairaa ryhdyttiin kehittämään 1940 –luvun loppupuolella, lähinnä Ruotsissa ja Englannissa. (Korhonen & Leskelä 1970, 10.)

Suomen Geoteknillisen yhdistyksen 60-vuotishistoriikissa on käsitelty erilaisten kairausmenetelmien käyttöönottoa Suomessa ja myös siipikairauksen historiaa on sivuttu eri yhteyksissä. Yhtenä sysäyksenä siipikairan kehittymiselle voitaneen pitää Ruotsissa vuonna 1944 perustettua Statens Geotekniska Institut:ia (SGI), jonka toiminta keskittyi aluksi savien geotekniikkaan. Siipikairausmenetelmä teki varsinaisen läpimurtonsa juuri ruotsalaisten Lyman Cadlingin ja Torsten Kallsteniuksen kehittämän maastokäyttöön soveltuvan siipikairan muodossa. Cadling ja Sten Odenstad julkaisivat menetelmää koskevan teoksen ”The Vane Borer: An Apparatus for Determining the Shear Strength of Clay Soils Directly in the Ground” vuonna 1950. Kehitystyön myötä kairan käyttö alkoi levitä maailmanlaajuisesti. (SGY 2011.)

Siipikairausmittauksia on Suomessa tehty 1950-luvulta lähtien. Käytössä on ollut lähinnä Ruotsissa ja Norjassa kehitettyjä kairatyyppejä. Ennen 1970-luvun puoliväliä siipikairausvastusta mitattiin useimmiten momenttiavaimella. Näiden vanhojen siipikairaus-tulosten luotettavuuden arvioinnissa pitää ottaa huomioon, että menetelmä antaa todellista suurempia tuloksia. Suuremmat leikkauslujuusarvot johtuvat 1960-luvun lopulla VTT:n geoteknillisen laboratorion ja Tie- ja vesirakennuslaitoksen tekemien tutkimusten mukaan pääosin siitä, että momenttiavaimella tehdyissä tutkimuksissa momentin lisääntymisnopeus oli 5 - 15 kertaa suurempi kuin tasaisen kiertonopeuden 0,1°/s aiheuttama. (Korhonen & Leskelä 1970.) Momenttiavaimen käytöstä on sittemmin luovuttu, ja vuonna 1995 ilmestyneen siipikairausoppaan mukaan sitä ei tule käyttää.

Nykyiset Nilcon-merkkiset piirturimittarilla (kuva 9) varustetut siipikairat on ostettu Ruotsista Suomeen 1980-luvulla. Kairaa kierrettiin aluksi käsiveivillä, mutta myöhemmin erilaiset sähkömoottorit korvasivat veivin.



KUVA 9. Nilcon-siipikairalaite, erillisellä sähkömoottorilla varustettuna

### 3.2 Kalusto

Tällä hetkellä siipikairauksia tehdään pääosin Nilcon -siipikairalla. Nilcon -siipikairan pääosat ovat piirturimittari, tangot, kulmaliikekytkin ja siipi. Kulmaliikekytkimen avulla voidaan mitata erikseen tangostoon kohdistuva vaippavastus ja erottaa se itse siipivas-  
tuksesta. Kulmaliikekytkin tulee olla laakeroitu ja rakenteeltaan tiivis niin, ettei maa pääse tunkeutumaan kytkimeen. Erillisiä lisälaitteita tarvitaan esimerkiksi tankoliitosten kiinnittämisessä, kairan maahan painamisessa ja nostamisessa. (SGY 1995.)

Kairauksessa käytettävä siipi koostuu neljästä toisiaan vastaan kohtisuoraan olevasta levystä. Levyn paksuus on noin 2 millimetriä. Standardisiivet ovat kooltaan 55x110 mm / 65x130 mm / 80x160 mm. Käyttämällä standardisiipeä suurempaa kokoa, on mahdol-

lista päästä tarkempiin tuloksiin luonnonmaissa. Halkaisijaltaan suuri siipi ei kuitenkaan kestä suurta vääntörasitusta, joten valittavaa siipikokoa pienennetään jäykällä savilla.

Käytettävän kaluston on oltava ehjä. Rikkonaiset siivet tai vääntyneet tangot on aina poistettava käytöstä ja korvattava uusilla. Mittalaite on kalibroitava 1-2 kertaa vuodessa. Säännöllisellä kalibroinnilla pyritään välttämään mittauslaitteesta tuloksiin aiheutuvia virheitä. (SGY 1995.)

### **3.3 Kairaustyö ja valmistelut**

Ennen siipikairausta on tarpeen selvittää pehmeiden maakerrosten paksuus tutkimusalueella. Lisäksi tulee arvioida alustavasti tutkimusalueen maalajit ja kerrosrajat. Alustavien tutkimuksien perusteella osataan valita sopivat kairauspisteet ja käytettävän siiven koko. (SGY 1995.) Hyvän arvion sopivasta siipikoosta ja kerrosrajoista saa esimerkiksi puristin-heijarikairauksella tai painokairauksella.

Siipikairaus tehdään tavallisesti 0,5 m syvyysvälein. Tutkimusväliä voidaan harventaa yhteen metriin homogeenisilla savikoilla suurilla syvyyksillä. Jos kairauksia halutaan tehdä tiheämmin, ne on tehtävä vierekkäisistä rei'istä. Vierekkäisten reikien keskinäinen etäisyys on oltava vähintään 1 metri. (Tielaitos 1998, 21.)

Kaira painetaan tangoista 200 – 500 mm etäisyydelle halutusta syvyydestä. Kaira tulee painaa mahdollisimman suoraan maahan. Vinoon painettu kaira aiheuttaa turhaa rasitusta tangoille ja vääntynyt tanko voi aiheuttaa virheellisiä mittaustuloksia. (SGY 1995.) Joissakin tapauksissa pintamaa voi olla erittäin tiivistä, jolloin siiven maahan painaminen ei onnistu ilman avausreiän tekemistä. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi kairaukset vanhan ratapenkereen päältä tai tutkimusalue, missä on kova luonnon kuivakuori. Avaukseen käytetään tavallisesti halkaisijaltaan 60 mm kierrekairaa (kuva 10). Tarvittaessa kovan kerroksen läpi kairataan putket, joiden läpi siipi saadaan oikeaan mitasyvyYTEEN. (Pynnönen 2012.)



KUVA 10. Kierrekaira.

Kaira painetaan lopulliseen syvyyteen hitaasti ja mahdollisimman tasaisesti. Tämän jälkeen kiinnitetään momentin mittauslaite paikalleen. Kairaajan on vapautettava kulmaliikeytkin ennen mittauksen aloittamista kääntämällä mittasyvyyteen painettuja tankoja  $15^\circ$  vastapäivään. Tankojen kääntämiseen käytetään esim. kiintoavainta. Tankoja kierretään vakionopeudella siten, että tankojen kiertymisnopeus on  $0,1^\circ$  sekunnissa. Jos standardinopeudesta poiketaan, on se kirjattava ylös kairauspöytäkirjaan. Kiertäminen lopetetaan, kun siipi leikkaa maasta sylinterin muotoisen kappaleen. Kiertämisen aikana mitattu maksimimomentti edustaa häiriintymätöntä leikkauslujuutta. Kun häiriintymätön leikkauslujuus on mitattu, siipeä kierretään tangoista vakionopeudella 1 kierros/1-2

sekunnissa 20 kierrosta. Maa sekoittuu, jonka jälkeen voidaan määrittää häiriintynyt leikkauslujuus vastaavalla tavalla kuin häiriintymätön. (Tielaitos 1998, 21.)

Kun huippulujuus ja häiritty lujuus on mitattu, voidaan kairausta jatkaa. Siipi nostetaan takaisin yläasentoonsa ja lukitaan paikalleen. Tämän jälkeen kaira työnnetään seuraavaan mittaussyvyyteen. (SGY 1995.)

### **3.4 Erityistutkimukset**

Erityistarpeita varten voidaan kairaus tehdä joko nopeutettuna tai hidastettuna. Tällaisten mittausten tekeminen on aina suunniteltava erikseen. Normaalista nopeammat kairaukset tehdään normaalilla kalustolla. Hidastettuja siipikairauksia tehtäessä kaira voidaan varustaa suojaputkilla adheesion aiheuttaman vaippahankauksen poistamiseksi. Käytetty kiertonopeus dokumentoidaan. (SGY 1995.)

Erikoistutkimuksissa käytettävän siiven koko voi poiketa normaalimitoista. Tällaisia tutkimuksia ovat esimerkiksi tutkimukset, joilla halutaan arvioida maan anisotropisuutta eli leikkauslujuuden vaihtelua eri suunnissa. (SGY 1995.)



## 4 SÄHKÖINEN SIIPIKAIRA GM4W

### 4.1 Yleistä

Sähköinen siipikaira GM4W on suomalaisen Geomachine Oy:n valmistama uudentyyppinen kairalaite. Laite kerää kairaustiedot sähköiseen muistiyksikköön, mikä nopeuttaa tulosteiden käsittelyä. Laitteessa on elektronisesti ohjattu sähköinen askelmoottori, joka antaa tasaisen kiertonopeuden koko mitta-alueelle. Laitteen rajoitettu maksimivääntömomentti on 10 kg/m. (Geomachine Oy 2010.)

Kairalaitteen saa asennettua vaunuun pikakiinnitystelineellä. Laite on esimerkiksi yhteensopiva Nilcon M70 -telineen kanssa. Tarvittaessa laite voidaan myös kiinnittää erilliseen ankkuroitavaan siipikairaustelineeseen. Virransyöttö saadaan suoraan kairausvaunusta. (Geomachine Oy 2010.)



KUVA 11. Sähköinen siipikaira.

## 4.2 Kairauksen tekeminen

### 4.2.1 Valmistelut

Esivalmistelut tulee tehdä kuten perinteisessäkin menetelmässä. Nämä työvaiheet on kuvattu kappaleessa ”3.3 Kairaustyö ja valmistelut”. Siipi painetaan tangoista haluttuun syvyyteen hitaasti esimerkiksi kairavaunun puomilla, jonka jälkeen käännetään vapaa-liike  $15^\circ$  vastapäivään. Tämän jälkeen voidaan sähköinen siipikairalaite asentaa telineeseen. Laitteen mukana tulee käyttöohje, joka opastaa kairaustyön tekemisessä.

Muistipalikka ja virtajohto kiinnitetään paikoilleen, jonka jälkeen laite voidaan kytkeä päälle. Tangot puristetaan kiinni laitteessa olevalla kiertokuulapuristimella, johon mahduttavat standardikokoiset halkaisijaltaan 20 mm ja 22 mm tangot. Kiertokuulapuristin on oltava auki, kun virrat kytketään päälle, sillä laite tulkitsee tästä mittauksen 0-arvon.

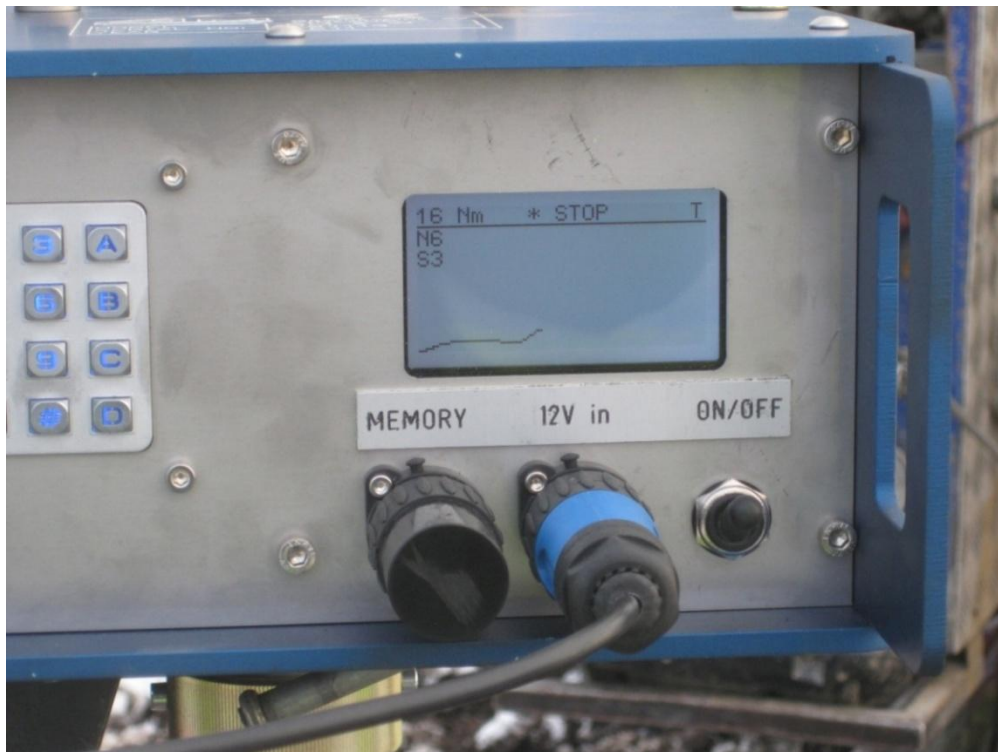
Uutta kairaustutkimusta aloittaessa valitaan asetuksista haluttu kiertämisnopeus ja käytettävä siipikoko. Kiertämisnopeudeksi on valittavana  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  tai  $60^\circ/\text{min}$  eli 0,05-1°/s. Valikosta löytyvät vakio siipikoot 55x110 mm / 65x130 mm / 80x160 mm. Laitteeseen voidaan ohjelmoida erikoisempia nopeuksia tai siipikokoja, jos käyttäjällä on näihin tarvetta (Leino 2012).

### 4.2.2 Häiriintymätön mittaus

Asetusten jälkeen syötetään ohjelmaan uuden tutkimuspisteen tiedot: projektinnumero, tutkimuspisteen numero ja mittaussyvyys. Mittaus voidaan aloittaa, kun asetukset ja lähtötiedot ovat kunnossa. Laitteessa on pieni graafinen näyttö, josta pystyy seuraamaan kairauksen etenemistä. Näyttö kertoo valitun siipikoon, kiertämisnopeuden ja kairausvastuksen. Esimerkiksi kuvassa 12 olevalta näytöltä selviää, että käytettävä siipikoko on 80x160 mm (näytöllä merkintä S3), kairausnopeus on  $6^\circ$  minuutissa (N6) ja kairausvastus kuvaushetkellä on 16 Nm.

### 4.2.3 Häiritty mittaus

Kun häiriintymätön lujuus on mitattu, voidaan tehdä häiritty mittaus samalta tutkimussyvyydeltä. Asetukset (siipikoko, kiertonopeus yms.), jos niiden muuttamiseen on tarvetta, on muutettava ensin halutunlaisiksi. Vasta tämän jälkeen valitaan valikosta ”C - häiritty mittaus”, varmistetaan tutkimussyvyys ja painetaan ”D - jatka mittausta”.



KUVA 12. Mittauskäyrä piiryy näytölle.

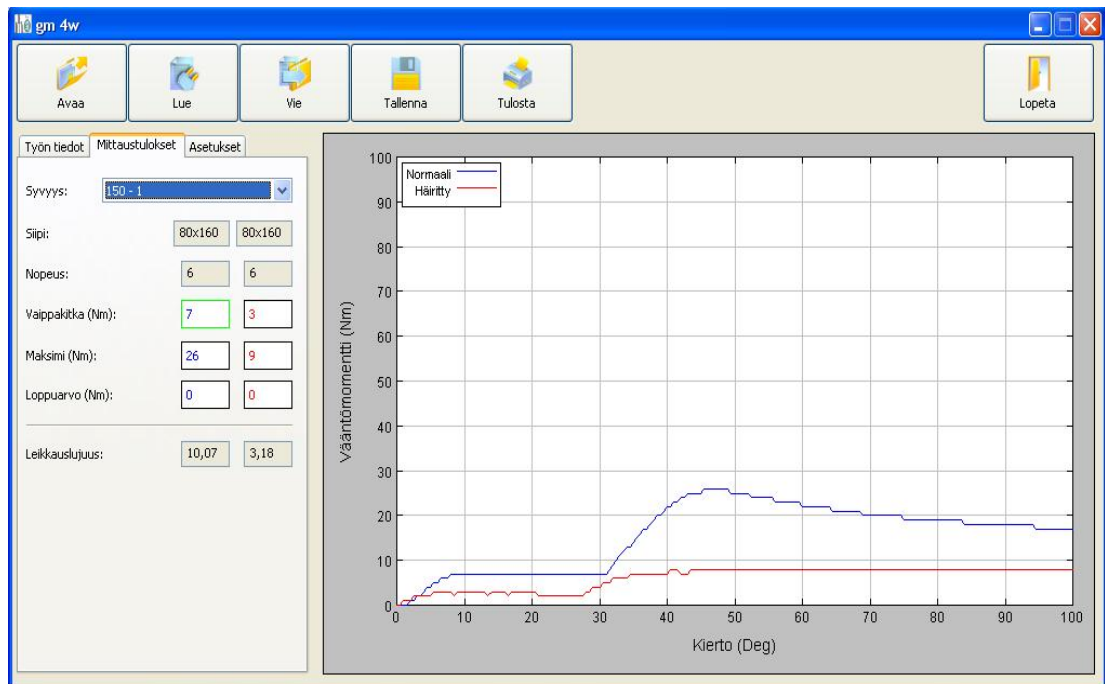
## 4.3 Kairaustulokset

### 4.3.1 Yleistä

Kairaustulokset tallentuvat suoraan laitteeseen kiinnitettyyn muistiyksikköön. Muistiin pystyy tallentamaan noin 100 mittausta. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi kymmentä tutkimuspistettä, joissa kairataan metrin välein 10 metrin syvyyteen. Mittaustulosten purkaminen tapahtuu liittämällä muistiyksikkö tietokoneeseen. Laitteen mukana



tulee oma gm4w -ohjelma, josta saadaan tallennettua ja tulostettua ohjelman laskemat leikkauslujuus ja sensitiivisyys arvot. (Geomachine Oy 2010.)



KUVA 13. gm4w -ohjelma mittaustulosten käsittelyyn.

Kuvassa 14 on purkuohjelmasta tulostettu tutkimuspisteen tekla -tiedosto. Huomautusriviltä löytyvät tiedot käytetyn siiven koosta ja kiertonopeudesta. Viimeinen neljästä pystysarakkeesta ilmoittaa ohjelman laskeman sensitiivisyysluvun. XY-riville lisätään käsin pisteen koordinaatit.

```

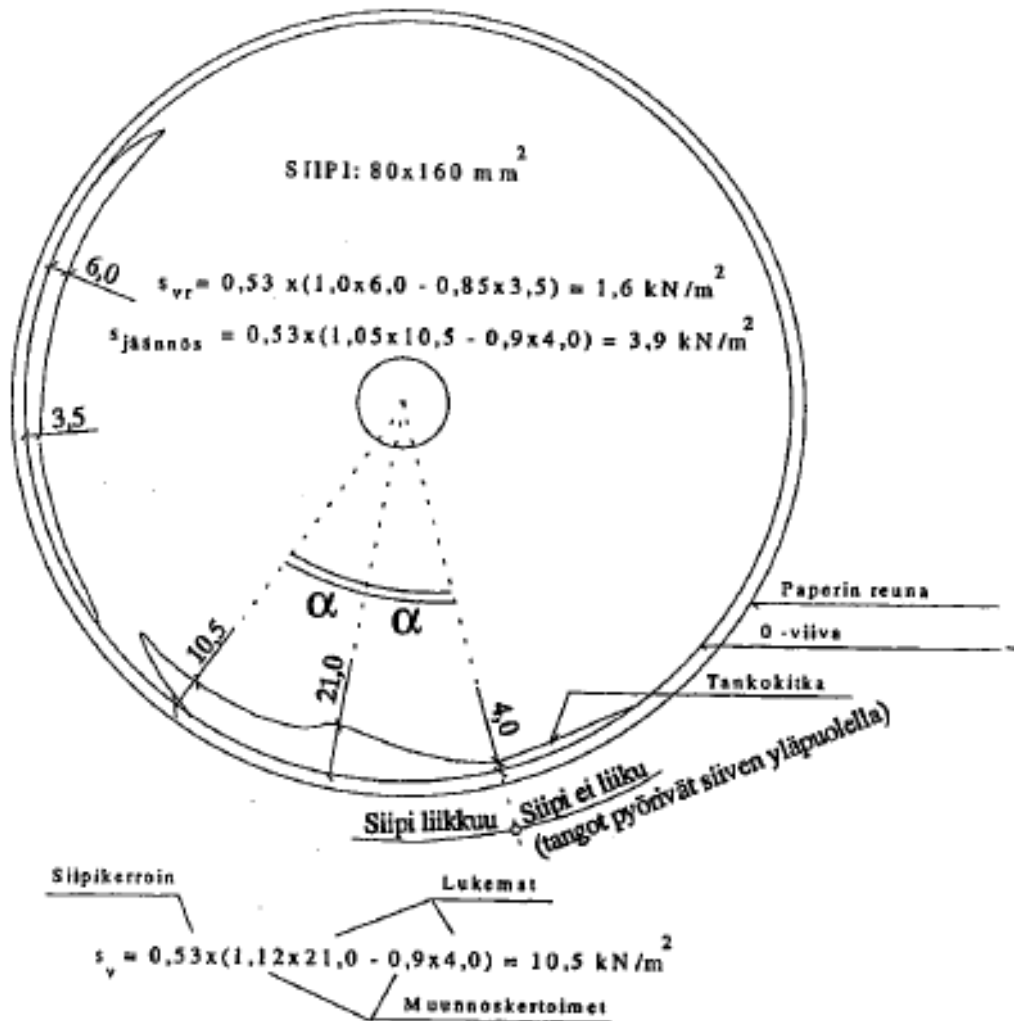
3515.tekla - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
TY 110096
TT SI - 0
HM Siipi: 80x160, Nopeus: 6 astetta/min.
XY 030112 03515
AL 0.00
    1.50      10.07      3.18      3.17
    2.50      7.95       1.06      7.50
    3.50     42.93      6.89      6.23
-1 MS
|

```

KUVA 14. Tekla-tiedosto, sähköinen siipikaira

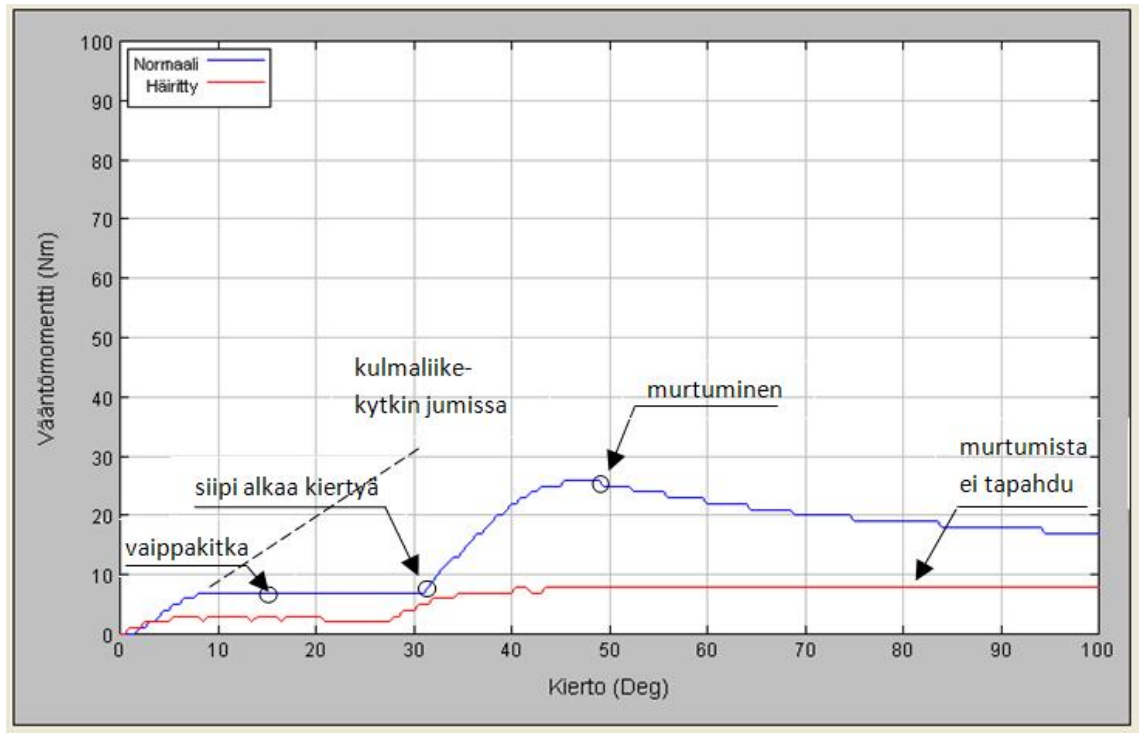
### 4.3.2 Tulosten tulkitseminen

Sähköinen siipikaira ja Nilcon ovat toimintaperiaatteeltaan samantyyppisiä, sillä molemmissa vaippakitka tai toiselta nimeltään tankokitka huomioidaan vapaaliikekytkimellä (sama kuin kulmaliikekytkin). Kuvassa 15 on esitetty Nilconin piirturikiekon tulkitseminen.



KUVA 15. Piirturimittarin tulosten tulkinta (SGY 1995).

Sähköisen siipikairan näytölle kairauksen aikana piirtyvän käyrän tulkitseminen on vastaavanlaista kuin edellä esitetyn piirturikiekon (kuva 16). Tässä tapauksessa mittauskäyrä on avattu tulosten purkuohjelmalla, selkeämmän kuvan aikaansaamiseksi. Aiemmin esitetystä kuvasta 13 näkyvät samalta mittauskäyrältä normaalille ja häiritylle mittaukselle lasketut leikkauslujuuden arvot.



KUVA 16. Mittauskäyrän tulkinta GM4W.

Kulmaliikekytkimen vaikutuksesta itse siipi ei ala kiertyä heti, vaikka tankoja kierretään yläpäädästä. Myöskään tangot eivät aluksi pyöri vapaasti ilman vaippakitkaa, joten pyörittämiseen tarvittava vääntömomentti kasvaa. Vaippakitkan maksimiarvo näkyy käyrällä tasaisena osuutena. Tällöin vaippakitkan eliminoimiseksi vaadittu vääntömomentti on saavutettu ja tangot pyörivät vapaasti. (Leino 2012.)

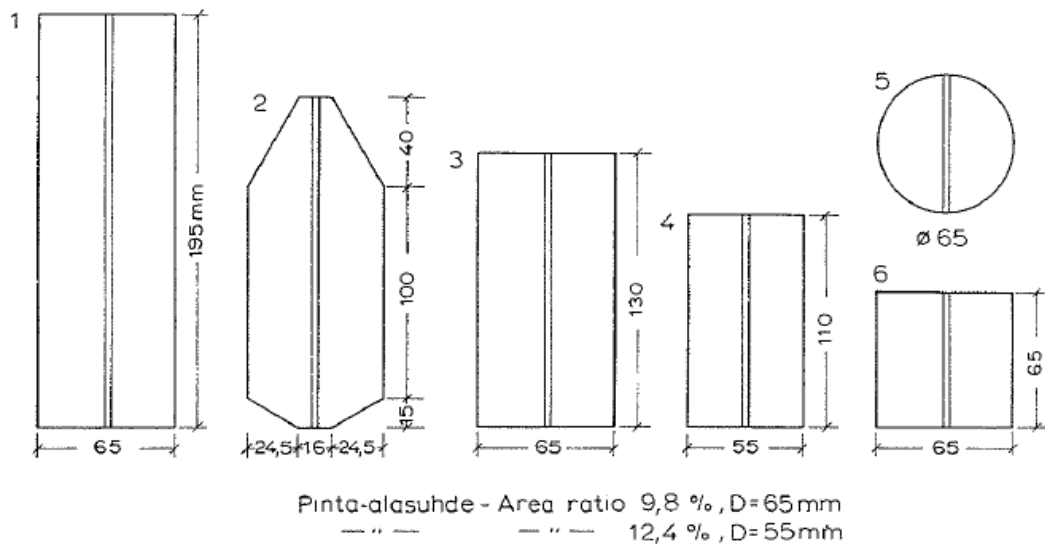
Oletusasetuksena sähköinen siipikaira tulkitsee vaippakitkan arvon 15°:n kiertokulman kohdalta. Kairajaan tai tulosten käsittelijän on havaittava mittauskäyrästä, jos ohjelma on tulkinut vaippakitkan väärin. Kuvassa 16 on katkoviivalla hahmoteltu tilanne, jossa kulmaliikekytkin on jumittunut tai kairaja on unohtanut ennen mittauksen aloittamista määrittää vapaaliikkeen. Tällöin vääntömomentti kasvaa suoraan kohti murtopistettä, eikä tuloksista ole mahdollista erottaa vaippakitkan ja siipivastuksen osuutta toisistaan. (Leino 2012.)

Jos valmistelut on tehty oikein ja kulmaliikekytkin toimii, vapaaliikkeen loputtua kulmaliikekytkin lukkiutuu. Siipi alkaa kiertyä mukana, ja vääntömomentti kasvaa jyrkästi. Kuvassa 16 tämä näkyy taitekohtana ”siipi alkaa kiertyä”. Maan murtuminen on saatu aikaan, kun vääntömomentin arvo kääntyy laskuun. Murtumista ei tapahdu, jos vääntömomentin kasvu ei pysähdy tai käyrä jatkuu suorana, kuten kuvassa 16 häirityn lujuuden käyrä. Ohjelma ei ilmoita, jos murtumista ei tapahdu, vaan tulkinta on kairaajan ja tulosten käsittelijän vastuulla. Kaikilla maalajeilla murtumista ei tapahdu ja myös tällä tiedolla on merkitystä suunnittelun kannalta. (Leino 2012.)

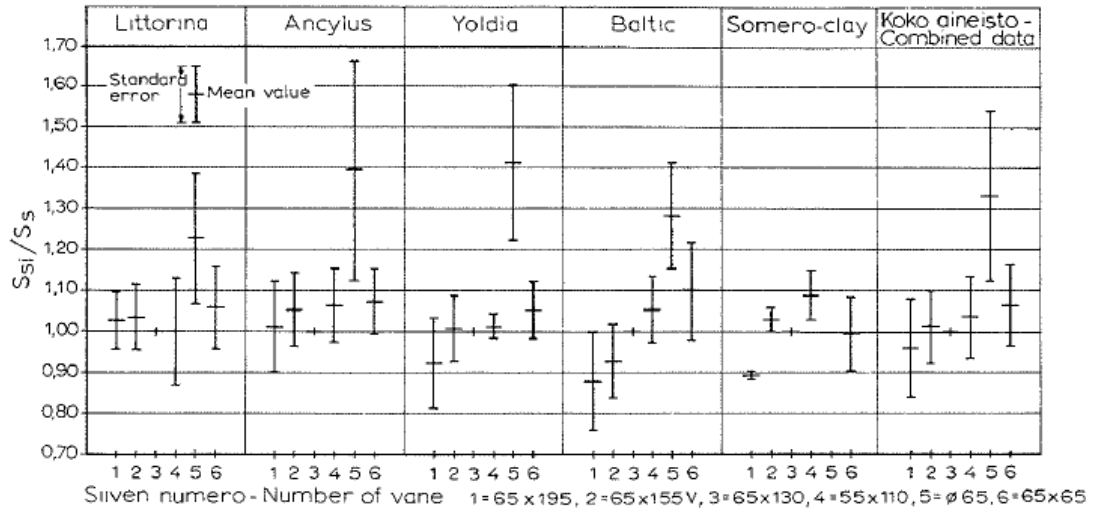
## 5 VIRHELÄHTEIDEN VAIKUTUS TULOSSIIN

### 5.1 Siiven koko ja muoto

Korhonen ja Leskelä (1970) tekivät tutkimuksia siiven koon ja muodon vaikutuksesta siipikairauksella saadun leikkauslujuuden arvoon. Tutkimuksessa käytetyt siivet on esitetty kuvassa 17. Tutkimuksessa havaittiin, että pienellä siivellä saadaan suurempi lujuus kuin suurella siivellä, vaikka siipiä kierretään samalla nopeudella ja olosuhteet ovat samat. Selitys tähän on, että leikkausjännityksen lisääntymisnopeus siiven ympärillä olevassa maakerroksessa on sitä suurempi, mitä pienempi on siiven koko ja sen kiertämiseen tarvittava momentti. Pienempien siipien käyttö (esim. 45 x 90 mm) on perusteltua silloin, kun kalusto ei oletettavasti kestäisi suurien siipien kiertämiseen tarvittavaa momenttia. Tällaisia tutkimuksia ovat esimerkiksi tutkimukset kuivakuorisavissa tai lujissa silttipitoisissa maalajeissa. Lujuusmittausten tuloksia ei voida näissä olosuhteissa yleensä pitää luotettavina. Luotettavuutta voidaan parantaa tekemällä samalla alueella useampia mittauksia. Kuvassa 18 esitetyt tutkimustulokset osoittavat myös, että yleisesti käytettävän siiven muodon ( $H=2D$ ) käyttö on perusteltua. (Korhonen & Leskelä 1970, 41–45.)



KUVA 17. Tutkimuksessa käytettyjä erimuotoisia siipiä (Korhonen & Leskelä 1970, 17).

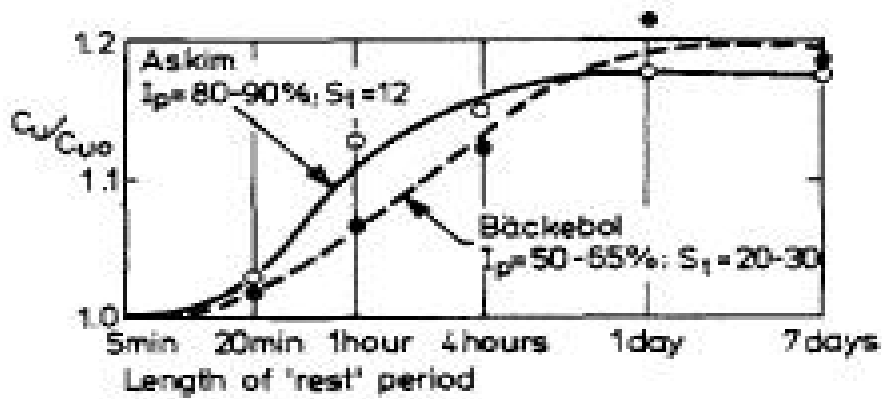


KUVA 18. Erilaisilla siivillä (kuva 17) määritettyjen leikkauslujuuksien suhde eri maajiryhmissä (Korhonen & Leskelä 1970, 44).

## 5.2 Odotusajan vaikutus

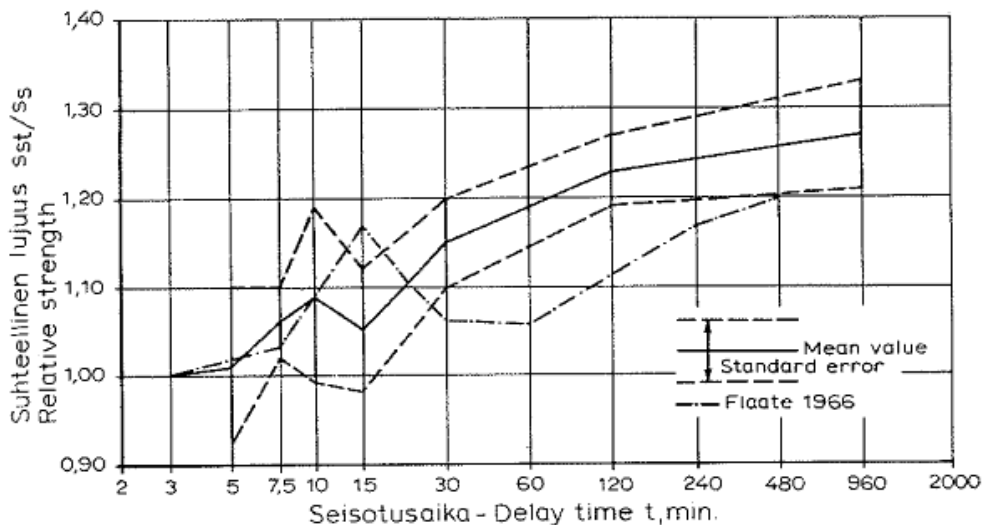
Kairan maahan työntäminen häiriinnyttää maan rakennetta ja syrjäyttää maaperän hiukasia. Siiven ympärille maahan syntyy ylimääräisiä jännityksiä. Maan huokosvedenpaine kasvaa ja maahiukkasten keskinäiset sidokset rikkoutuvat, jolloin maan leikkauslujuus alenee. (Chandler 1988, 18.)

Ruotsissa B.A. Torstensson teki tutkimuksia kahdella eri savella (Askim ja Bäckebo) odotusajan vaikutuksesta leikkauslujuuden palautumiseen. Tutkimuksessa saatuja lujuuksia on verrattu normaaliin maksimissaan viiden minuutin odotusajalla tehtyyn mittaukseen, jossa maan konsolidoituminen ei ehdi vaikuttaa lujuteen. Tutkimus osoittaa, että 90 % seitsemässä vuorokaudessa saadusta lujudesta saavutetaan 10–20 tunnin odotusajalla. Plastisempi kahdesta savesta (Askim) konsolidoitui nopeammin kuin vähemmän plastinen Bäckebo savi. Plastisuutta merkittävämpi tekijä näyttäisi olevan saven sensitiivisyys. (Chandler 1988, 20.) Tulokset on esitetty kuvassa 19.



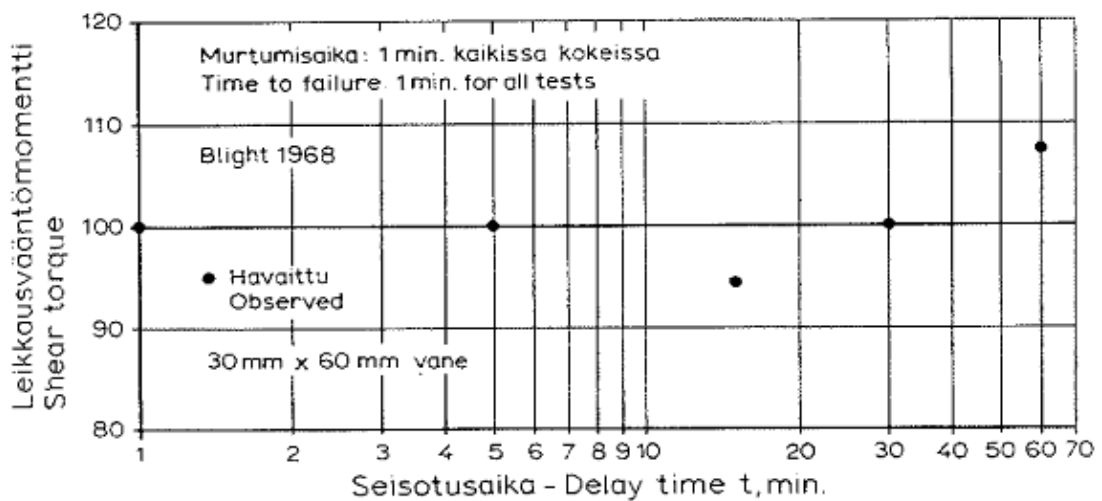
KUVA 19. Ajan vaikutus leikkauslujuuteen (Chandler 1988, 21).

Suomessa valtion teknillinen tutkimuslaitos on myös selvittänyt odotusajan vaikutusta leikkauslujuuteen. Tutkimukset tehtiin vuosina 1967 ja 1968 neljällä eri paikkakunnalla: Espoo, Inkoo, Salo ja Riihimäki. Maalaji edellä mainituissa kohteissa, Riihimäkeä lukuun ottamatta, on pääasiassa humuspitoista postglasiaalista savea. Riihimäellä maalaji on kerrallista myöhäisglasiaalista savea. Odotusajat olivat 3 minuutista 16 tuntiin. Käytettävä siipikoko oli 65x130 mm ja kiertonopeus  $0,1^\circ$  sekunnissa. Tutkimukset osoittavat, että leikkauslujuus kasvaa odotusajan lisääntyessä. Päinvastaisia tuloksia saatiin Riihimäen tutkimuskohteesta, jossa lujuusarvot pienenevät odotusajan lisääntyessä. Tulokset on esitetty kuvassa 20. Samassa kuvassa näkyy myös Flaaten Norjassa vuonna 1965 tekemän tutkimuksen tulokset. Kuvassa ei ole esitetty Riihimäellä tehtyjen mittausten tuloksia. Tuloksista on nähtävissä, että pitkällä odotusajalla saadaan 20–30 % leikkauslujuuden kasvu. (Korhonen & Leskelä 1970, 51–52.)



KUVA 20. Seisotusajan vaikutus leikkauslujuuteen: Flaaten (1966) ja geoteknillisen laboratorion tutkimusten mukaan (Korhonen & Leskelä 1970, 53).

Kuvassa 21 on esitetty Blightin (1968) silttimaalajeilla tehtyjen tutkimusten tulokset. Käytettävä siipikoko oli 30x60 mm. Tuloksista ei ole nähtävissä odotusajan merkittävää lujuutta lisäävää vaikutusta. Blightin mukaan syynä tähän on lähinnä se, että vedenläpäisevyys on silttimaalajissa suuri ( $k \approx 10^{-5}$  cm/s), että siiven maahan työntämisessä muodostunut huokosvedenpaine ehtii hajaantua jo yhden minuutin odotusajalla. Vertailun vuoksi esimerkiksi kuvan 6.2 esittämässä tapauksissa maalajien vedenläpäisevyys on huomattavasti pienempi ( $k \approx 10^{-7} \dots 10^{-8}$  cm/s). (Korhonen & Leskelä 1970, 52–53.)



KUVA 21. Seisotusajan vaikutus leikkauslujuuteen: Blightin (1968) mukaan (Korhonen & Leskelä 1970, 53).

Tutkimukset osoittavat, että häiriintymisen vaikutus pienenee ajan kuluessa ja leikkauslujuus kasvaa odotusajan pidentyessä. Lujuuden palautuminen on hitaampaa sensitiivisillä savilla. Odotuksen aikana tapahtuva lujuuden kasvu on selitettävissä siiven ympärillä olevan maakerroksen konsolidoitumisella, joka aiheutuu siiven tiivistävästä vaikutuksesta ja mahdollisesti tankojen pinnassa tapahtuvasta veden virtauksesta. Huokosveden ylipaine tasaantuu nopeasti hyvin vettä läpäisevissä maalajeissa (silteissä), eikä odotusajalla ole suurta vaikutusta saatuun leikkauslujuuden arvoon. Vastaavasti huonosti vettä läpäisevissä maalajeissa (savissa) odotusajan lujuutta lisäävä vaikutus voi olla 20–30 %. (Korhonen & Leskelä 1970, 52–54.)



## 6 SIIVEN KIERTÄMISNOPEUS

### 6.1 Käytettävät kiertonopeudet

Ruotsalaisen siipikairastandardin mukaan siipeä tulee kiertää tasaisella nopeudella niin, että murtuminen tapahtuu 2-4 minuutin kuluttua siitä hetkestä, kun siipi alkaa kiertyä (SGF 1993). Tämä vastaa myös valmisteilla olevan eurostandardin asettamaa ohjetta kiertonopeuden valinnalle (ISO 2009).

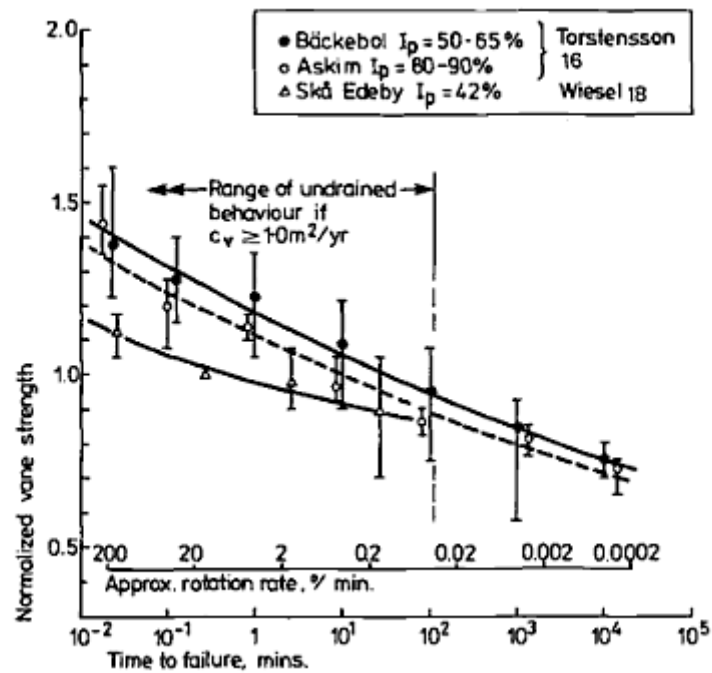
ASTM:n (American Society for Testing and Materials) laatiman siipikairastandardin mukaan kiertonopeus ei saa standardimenetelmässä ylittää 0,1°/s. Standardin mukaan tällä nopeudella murtuminen saavutetaan tavallisesti 2-5 minuutissa lukuun ottamatta erittäin pehmeitä savia, joilla murtuminen voi tapahtua vasta 10–15 minuutin kuluessa. (ASTM 1994.)

### 6.2 Kiertonopeuden vaikutus eri maalajeilla

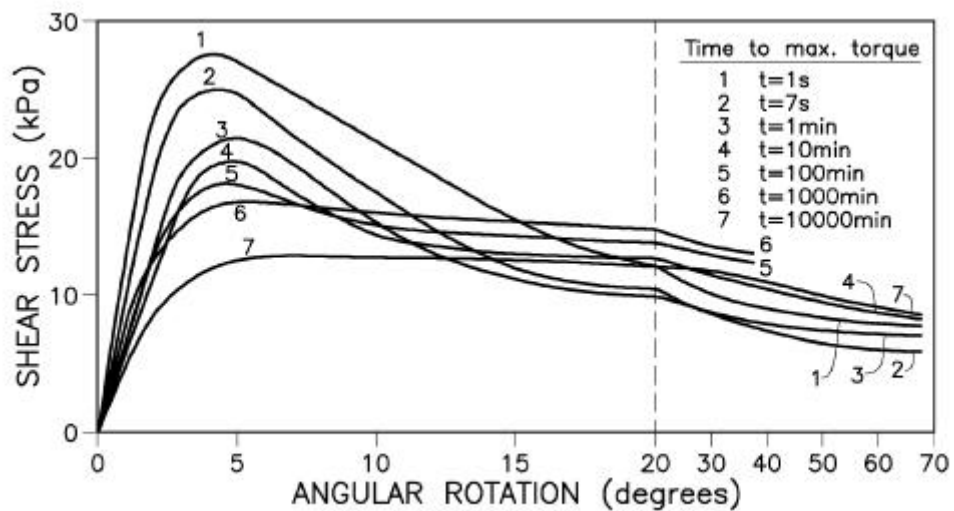
Siipikairauksella murtuminen saavutetaan tyypillisesti muutamassa minuutissa. Luonnontilassa todelliset sortumat tapahtuvat paljon hitaammin. Muodonmuutosnopeuden vaikutusta laskettaessa on kiertonopeuden lisäksi otettava huomioon maan viskositeetti ja maan konsolidoituminen. Viskositeetin vaikutus vaihtelee saven plastisuusluvun mukaan. (Chandler 1988, 21–23.)

Ruotsissa plastisilla savilla tehtyjen tutkimusten, Wiesel (1973) ja Torstensson (1977), tulokset on esitetty kuvassa 22. Tutkimuksissa käytettiin kiertonopeuksia väliltä 200– $2 \times 10^{-4}$  °/min. Kaikki tutkimukset tehtiin 24 tunnin odotuksella siiven maahan painamisesta. Tuloksia on verrattu standardi siipikairamenetelmällä saatuihin leikkauslujuuden arvoihin. (Chandler 1988, 22.)

Kuvassa 23 on esitetty Torstenssonin tutkimuksessa eri kiertonopeuksilla saatuja leikkauslujuuksia. Leikkauslujuudet suurilla kiertonopeuksilla ovat 10–20 % suurempia kuin standardinopeudella saatu (kuvan käyrä 3,  $t = 1$  min.). Seitsemässä vuorokaudessa ( $t = 10000$  min) saatu leikkauslujuus on noin 70 % standardinopeudella tehdyn arvosta.

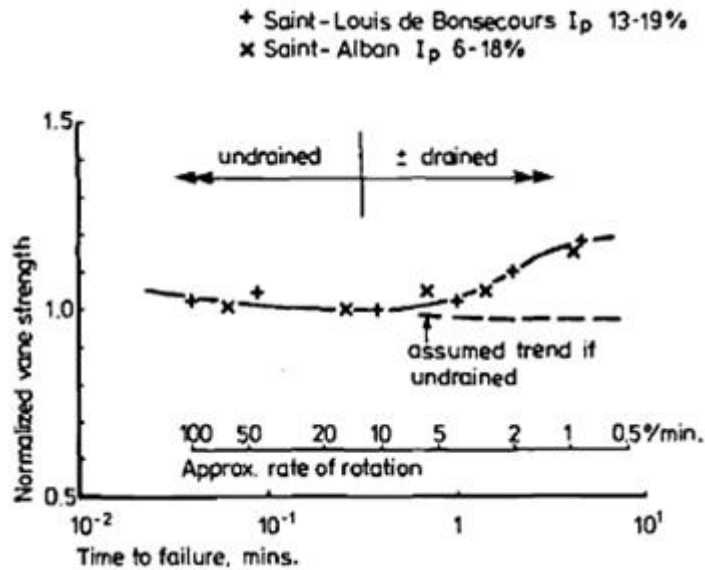


KUVA 22. Kiertonopeuden vaikutus korkean plastisuusluvun omaavilla savilla (Chandler 1988, 23).



KUVA 23. Eri kiertonopeuksilla saatuja leikkauslujuuksia. (Torstensson, 1977.) (Kuva: Pérez-Foguet, Ledesma & Huerta 1997.)

Kanadassa Roy ja Leblanc tekivät tutkimuksia huomattavasti ruotsalaista savea alhaisemman plastisuusluvun omaavilla savilla. Tulokset (kuva 24) osoittavat, että lujuus kasvaa kun kiertonopeutta lisätään yli standardinopeuden. Lujuuden kasvu ei ole yhtä huomattavaa kuin erittäin plastisilla savilla. Vastaavasti, kun kiertonopeutta pienennetään standardinopeudesta, konsolidaation kiertämisen aikana aiheuttama lujuuden kasvu on noin 20 %. (Chandler 1988, 22–23.)



KUVA 24. Kiertonopeuden vaikutus alhaisen plastisuusluvun omaavilla savilla (Chandler 1988, 23).

Käsiteltyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että standardinopeutta suuremmilla kiertonopeuksilla on mahdollista aikaan saada n. 20 % leikkauslujuuden kasvu. Hyvin hitailla kiertonopeuksilla konsolidaation lujuutta lisäävää vaikutusta ei näyttäisi kaikilla maalajeilla tapahtuvan.

## 7 REFERENSSIKOHDE

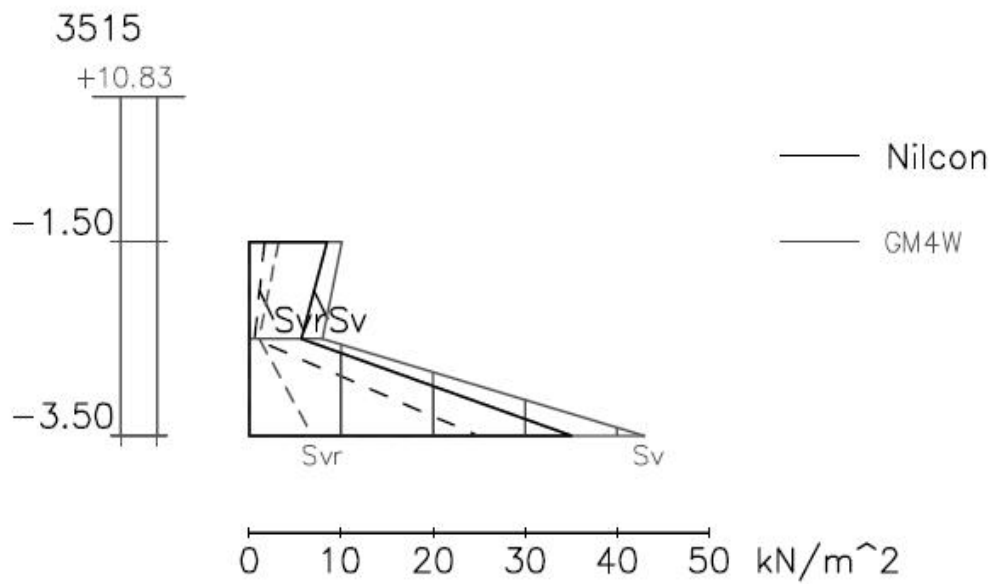
Vertailun vuoksi tehtiin kairauksia sähköisellä siipikairalla ja Nilcon -siipikairalla kolmelta eri syvyydeltä vierekkäisistä rei'istä. Peltoalue, jolla tutkimukset tehtiin, sijaitsee Valtatie 8:n varressa Laitilan keskustan kohdalla. Lisäksi alueella oli syksyllä 2011 tehty A-Insinöörit Geotestin toimesta puristin-heijarikairauksia. Siipikairausten ajankohtana oli tammikuun alkupuoli 2012. Pakkasta oli muutama aste, ja maa oli ohuen lumikerroksen peitossa. Kuvassa 25 on näkymä pellolta. Kairaustyön valmistelut on juuri tehty ja siipi on painettu ensimmäiseen mittasyvyyteen.



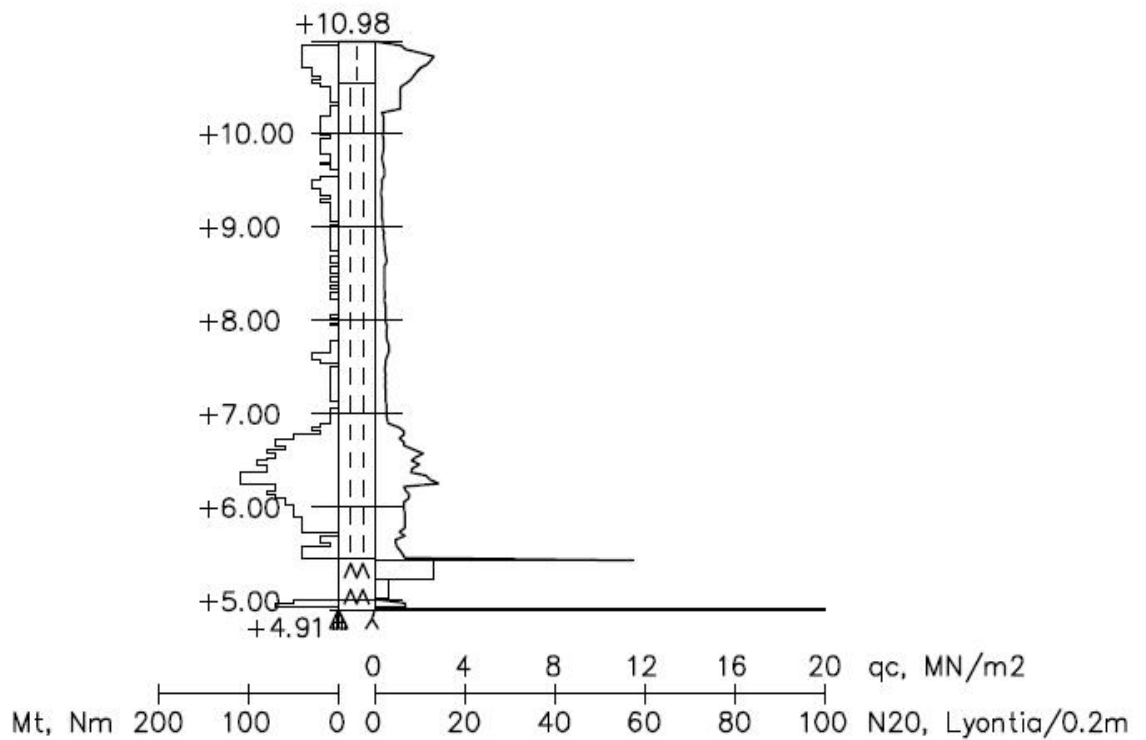
KUVA 25. Kairavaunu Nilcon-kairalaitteella, Laitila.

Kaikki kairaukset tehtiin noin tunnin odotusajalla, muutaman minuutin poikkeamien rajoissa. Reikien välinen etäisyys oli noin kaksi metriä. Tutkimukset tehtiin isolla siivellä (80x160mm). Tuloksista voidaan huomata, että sähköisellä siipikairalla määritetyt leikkauslujuudet ovat kaikilla syvyyksillä hieman suurempia kuin Nilconilla saadut, lukuun ottamatta 3,5 metrin syvyydeltä Nilconilla saatua häirityn leikkauslujuuden arvoa, joka on poikkeuksellisen suuri. Selitystä tälle muista tuloksista poikkeavalle arvol-

le ei keksitty. Muut eroavaisuudet tuloksissa johtuvat oletettavasti Nilcon-piirturikiekon tulkinnan tarkkuudesta, tutkimusreikien eroavasta sijainnista ja tankoja pyörittävästä moottorista.



KUVA 26. Kairaustulokset kahdella eri siipikairalla.



KUVA 27. Puristin-heijarikairaus lähistöltä.

## **8 KÄYTTÖKOKEMUKSET SÄHKÖISESTÄ SIIPIKAIROLAITTEESTA**

### **8.1 Yleistä**

Yksi tämän työn tarkoituksista on kerätä käyttökokemuksia sähköisestä siipikairalaitteesta. Haastatteluissa ja vapaamuotoisissa keskusteluissa kysellään kairaushenkilöiden havaintoja laitteen käytännöllisyydestä ja mittaustulosten oikeellisuudesta. Haastateltavia pyydetään listaamaan sähköisen siipikairan etuja verrattuna Nilcon -kairalaitteeseen. Lisäksi pyritään löytämään mahdollisia kehitysehdotuksia laitteen valmistajalle.

### **8.2 Laitteen etuja**

VR Track Oy:llä on ollut sähköinen kairalaite käytössä noin vuoden. Yrityksen kairausesimies Urho Heikkisen mukaan erityisesti kairaajan vaikutus mittaustuloksiin on vähentynyt verrattuna vanhempiin laitteisiin. Nopeuden seuraamista ja säätämistä kesken kairauksen ei tarvitse enää tehdä, koska ohjelmointi vastaa tasaisesta kiertämisnopeudesta. Laite helpottaa työn dokumentoinnissa, koska pistetiedot täytyy aina syöttää ennen kairauksen aloittamista. Kairaustyö saadaan tehtyä yhtä nopeasti kuin perinteisellä Nilcon -kairalaitteella. Tulosten käsittelyyn ei enää tarvita erillistä käsityötä, vaan tulokset saadaan purettua ohjelman muistista suoraan tietokoneelle. (Heikkinen 2012.)

A-Insinöörit Geotesti Oy:n maastotyönjohtaja Jukka Lahikainen mainitsi lisäksi etuihin laitteen säänkestävyyden. Aikaisemmin sadekelillä siipikairaamista vältettiin, koska Nilcon -laitteessa oleva paperinen piirturikiekko kastui helposti käyttökelvottomaksi. (Lahikainen 2012.) Sähköinen siipikairalaite on rakennettu tiiviin suojakuoren sisään, joten laitteen osalta vesisade ei haittaa tutkimusta.

### 8.3 Havaitut kehittämismahdollisuudet

Laitteesta on mahdollista saada epäselviä tiedostoja, jos ennen varsinaisen mittauksen aloittamista asetuksia muutetaan väärässä kohdassa. Laitteessa havaittiin seuraavan selostuksen mukainen virhemahdollisuus. Päävalikosta aloitetaan uusi tutkimuspiste, jonka tiedot syötetään ohjelmaan ja sen jälkeen palataan päävalikkoon muuttamaan yleisiä asetuksia, esimerkiksi kiertonopeutta. Tämän jälkeen valitaan uudestaan uusi tutkimuspiste, hyväksytään tallentuneet tiedot ja käynnistetään mittaus. Tällöin purkuohjelmassa näkyy, että samalta syvyydeltä olisi tehty kaksi mittausta, vaikka mittausta ei aloitettu kuin jälkimmäisellä kerralla. Purkuohjelma myös tulostaa tekla -tiedostoon oletuksena ensimmäisen ”uusi tutkimuspiste” painalluksen mukaan mittauksen arvoksi 0. Jälkimmäinen valinta, johon asetukset oli vaihdettu ja mittaus oikeasti tehty, näkyy myös purkuohjelmassa. Tekla -tiedosto voidaan korjata sen mukaiseksi, mutta on myös mahdollista, ettei tulosten purkaja havaitse virhettä.

Laitteen käyttöohje ja valikko ovat keskenään hieman epäloogisia, joten virhenäppäilyjä sattuu helposti varsinkin laitteen ensimmäisillä käyttökertoilla. Tuloksia purkaessa olen ollut tarvittaessa yhteydessä kairaajaan ja tarkistanut tekla -tiedoston kuntoon (Lahikainen 2012).

## 9 EUROSTANDARDI

Tässä luvussa perehdytään valmisteilla olevaan eurostandardiin. Standardin tarkoituksena on yhtenäistää pohjatutkimustapoja Euroopan unionin jäsenmaiden osalta. Standardiluonnoksen esittämät vaatimukset siipikairaukselle perustuvat 1950-luvun jälkeen tehtyihin useisiin tutkimuksiin, joiden pohjalta myös nykyiset kansalliset ohjeet on laadittu. Joiltakin osin laatuvaatimukset tulevat kuitenkin tarkentumaan.

Valmisteilla olevan CEN-standardin luonnos (preEN 22476-9, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 9: Field vane test) oli lausuntokierroksella vuoden 2010 alussa, ja lausunnot saatiin kerättyä saman vuoden loppupuolella. Lausuntojen pohjalta luonnos korjataan. Korjatun version hyväksynnästä on tarkoitus äänestää tämän vuoden aikana. Standardi julkaistaan mahdollisesti vuonna 2013 tai 2014. (Salo 2012.)

Standardiluonnos lajittelee siipikairauskokeet neljään käyttöluokkaan, jotka on esitetty taulukossa 3. Käyttöluokat on kehitetty auttamaan suunnittelijoita käyttötarkoitukseen sopivimman testityypin ja mittatarkkuuden valinnassa. Lisäksi on neljä eri luokkaa testityyppejä: FV1 - FV4. Luokissa on määritelty, miten mittaaminen, momentin siirto ja momentin ja kiertokulman rekisteröinti tapahtuu. Suunnittelija valitsee näistä käyttöluokan mukaisen testityypin. Testityypit on esitetty taulukossa 4. (ISO 2009.)



TAULUKKO 3. Siipikairauskokeen käyttöluokat (ISO 2009, 7).

Application class	Test type	Allowable minimum accuracy <sup>a</sup>		Maximum rotation between measurements	Suggested use	
					Soil <sup>b</sup>	Interpretation <sup>c</sup>
1	FV1	Torque Rotation angle Depth of test	0,5 Nm 1° or 1 % 0,1 m or 1%	1°	A to D	H
2	FV1 FV2	Torque Apparent rotation angle Depth of test	1 Nm 5° or 1 % 0,1 m or 1%	2°	A to D	H, H*
3	FV3	Torque Apparent rotation angle Depth of test	2 Nm 10° or 1 % 0,2 m or 1%	5°	A to D	H*
4	FV4	Torque Depth of test	5 Nm 0,2 m or 1%	not relevant	C to D	H*
NOTE For extremely soft soils even higher demands on the accuracy may be needed.						
<sup>a</sup> The allowable minimum accuracy of the measured parameter is the larger value of the two quoted. The relative accuracy applies to the measured value and not the measuring range <sup>b</sup> A Homogeneously bedded soils (typically $c_u < 2$ MPa) B Clays, silts and sands (typically $2 \text{ MPa} \leq c_u < 4$ MPa) C Clays and silts (typically $4 \text{ MPa} \leq c_u \leq 10$ MPa) D Clays and silts (typically $c_u > 10$ MPa) <sup>c</sup> H interpretation in terms of engineering parameters with associated low uncertainty level H* interpretation in terms of engineering parameters with associated high uncertainty level						

NOTE 1 Achievable accuracy is significantly linked with the dimensions of the vane used in the test; use of larger vanes will result in a higher accuracy, but a smaller measuring range (see also annex F).

NOTE 2 Apparent rotation angles are only indicative because rotation measurements are made uphole. The apparent rotation angle cannot be used for interpretation in terms of engineering parameters.

TAULUKKO 4. Testityypit (ISO 2009, 5).

Testityyppi	Mittaaminen	Vääntömomentin siirto	Vääntömomentti ja kiertokulman rekisteröinti
FV1	jatkuva momentin ja kiertymän mittaaminen suoraan siiven yläpuolelta	-	vääntömomentti – todellinen kiertokulma
FV2	jatkuva momentin ja kiertymän mittaaminen tankojen yläpäästä	suojauputkilla suojattuja tankoja pitkin	vääntömomentti – näennäinen kiertokulma
FV3	jatkuva momentin ja kiertymän mittaaminen tankojen yläpäästä	suojaamattomia tankoja pitkin, kulmaliikeytkin	vääntömomentti – näennäinen kiertokulma
FV4	momentin mittaaminen tankojen yläpäästä	suojaamattomia tankoja pitkin, ei kulmaliikeytkintä	maksimi-vääntömomentti

Käyttöluokka 1 on tarkoitettu momentin ja kiertokulman mittaamiseen korkealla tarkkuudella ja tuloksia voidaan käyttää leikkauslujuusparametrien määrittämiseen. Tämä luokka soveltuu erityisesti pehmeille saville ja silteille. Käyttöluokan 1 mukaisissa tutkimuksissa käytetään testityyppiä 1. Testityypissä 1 vaaditaan kairalaitetta, joka mittaa siiven todellisen kiertymän suoraan siiven yläpuolelta (taulukko 4). Tulostarkkuutta lisää luokkaan suositeltu suuri siipikoko,  $d=70\text{--}150\text{ mm}$ . (ISO 2009.)

Käyttöluokassa 2 vaadittava tarkkuus ei ole niin suuri kuin luokassa 1, mutta mittaustuloksia voidaan käyttää leikkauslujuusparametrien määrittämiseen. Käyttöluokka 2 soveltuu pehmeille ja jäykille saville ja silteille. Jäykille saville ja silteille suositellaan pienen siiven käyttöä ( $d = 50\text{ mm}$ ). (ISO 2009.)

Käyttöluokista 3 ja 4 saadut tulokset soveltuvat suljetun leikkauslujuuden määrittämiseen suuntaa-antavasti. Vaatimus tulostarkkuudelle on alhaisempi tai heikko. Soveltuu keskijäykille ja jäykille saville ja silteille. (ISO 2009.)

Luonnoksen mukaan käyttöluokissa 1 ja 2 siiven kierto on aloitettava 2-5 minuutin kuluessa siitä, kun siipi on painettu mittaussyvyYTEEN. Tästä ajasta käytetään myös nimityksiä odotusaika tai seisotusaika. Siiven kiertonopeus on valittava siten, että maksimi vääntömomentti saavutetaan 2-4 minuutissa. Aika lasketaan siitä hetkestä kun siipi itsessään alkaa kiertyä. Käyttöluokkiin 1-3 vaaditaan siiven kiertämiseen laitetta, joka antaa tasaisen kiertonopeuden. Tämä tarkoittaa, että Nilcon-kairalaite erillisellä sähkömoottorilla varustettuna ei sovellu näihin käyttöluokkiin. Käyttöluokan 4 kairaukset voidaan tehdä kiertämällä käsikammella siipeä. (ISO 2009.)

Sähköisellä siipikairalla tehdyt tutkimukset vastaavat taulukon 4 mukaan testityyppiä FV2 tai FV3, riippuen siitä käytetäänkö suojaputkia. Kairalaitteen tulostarkkuus, momentti 1 Nm:n ja havaittu kiertokulma 5°:n tarkkuudella, mahdollistaa sen käytön käyttöluokissa 2 ja 3 (taulukko 3). Käyttöluokkaan 1 pääseminen vaatisi momentin ja kiertokulman suoraan siiven yläpuolelta mittaavan laitteen.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Sähköisen siipikairan käyttö on helposti opittavissa. Olin mukana Geotestille hankitun laitteen ensimmäisellä käyttökerralla Laitilassa ja seurasin yhden päivän sivusta kairatyön tekemistä. Laitteen käyttöohje ja päävalikko tulivat sillä kertaa tutuiksi. Puoli vuotta myöhemmin tein seuraavan maastokäynnin ja laitteen käyttö oli edelleen muistissa.

Vanhan piirturikiekon tulkinta on monella vanhemmalla kairaajalla ja suunnittelijalla hyvin hallussa, mutta digitaalinäytölle piirtyvä käyrä voi aluksi vaikuttaa hieman erilaiselta. Kairaajalla on oltava riittävät perusteet siipikairausmenetelmästä, jotta hän osaa arvioida mittaustyön onnistumista. Lisäksi lähtötietona on oltava puristinheijari- tai painokairaus lähistöltä.

Kairalaite dokumentoi kaikki mittaustiedot, joka helpottaa inhimillisten virheiden ja unohduksien huomaamista tuloksista. Ennen uuden tutkimuspisteen aloittamista on kuitenkin tarkkaan mietittävä, millä asetuksilla (siipikoko ja kiertonopeus) kairaus halutaan tehdä ja tarkastaa ne valikosta. Näin ollen vältytään turhilta tallenteilta, sillä jokainen uuden tutkimuspisteen aloittaminen tallentuu ohjelmaan, vaikkei itse mittausta käynnistettäisi. Purkuohjelma tulkitsee näiden turhien tallenteiden mitatuksi leikkauslujuuden arvoksi 0 ja ne tulostuvat normaalisti tekla -tiedostoon. Lisäksi tulostetussa tiedostossa ei näy kuin yksi leikkauslujuuden arvo jokaista tutkimussyvyyttä kohden. Tämä mahdollistaa sen, että ”tyhjän tallenteen” 0 -arvo näkyy tiedostossa, mutta oikeasti mitattu leikkauslujuuden arvo ei näy. Tulosten käsittelijä voi virheen huomattaessa korvata 0-arvot oikeiksi.

Kirjallisuustutkimusten perusteella standardit ja kairausohjeet siipikairalle ovat samankaltaisia ainakin pohjoismaissa ja Pohjois-Amerikassa. Ohjeet perustuvat pitkälti siipikairatutkimuksiin 1970–80 -luvulta. Nykyisillä laitteilla on mahdollista saada monipuolisempia ja tarkempia tutkimustuloksia.

Parempien työsaavutusten saamiseksi jatkotutkimuksena voisi tutkia, voidaanko kiertonopeutta nostaa nykyisestä. Eurostandardin luonnoksen mukaan siiven kiertämisnopeus on valittava siten, että murtuminen tapahtuu 2-4 minuutissa siiven kiertymisen alkami-

sesta. Teoriassa tämä mahdollistaisi suuremman kiertonopeuden käytön maalajeilla, joilla nykyisellä nopeudella  $6^\circ/\text{min}$  murtumiseen kuluva aika on yli 4 minuuttia.

Odotusajan vaikutus kairaustuloksiin on kirjallisuustutkimuksen perusteella yhtä merkittävä kuin kiertonopeuden vaikutus. Tutkimusten mukaan normaalilla alle 5 minuutin odotusajalla konsolidoitumista ei ehdi tapahtua. Pitkällä, esimerkiksi tunnin odotusajalla tehdyissä tutkimuksissa konsolidoitumisen vaikutus leikkauslujuuden arvoon voi olla 10–20% ja tällaisten tutkimusten tarpeellisuus on hyvä suunnitella etukäteen.

Käytännön työssä siipi painetaan mittaussyvyyteen esimerkiksi kairavaunun puomilla, jolloin tasaisuus ja nopeus ovat kiinni kairaajan ammattitaidosta. Eurostandardin luonnoksessa siiven maahan painamisnopeudeksi esitetään maksimissaan 20 mm/s eli esimerkiksi metrin syvyyteen painaminen kestäisi 50 sekuntia. Omien havaintojeni mukaan siiven maahan painaminen kestää noin puolet esitetystä ajasta. Tämän vaikutusta mittaustuloksiin voisi edelleen tutkia. Kairavaunuun on mahdollista kehittää laite, joka hoitaa painamisen ohjelmoidusti.

## LÄHTEET

ASTM. 1994. D 2573-94. Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil. West Conshohocken, PA, USA. American Society for Testing and Materials.

Chandler, R.J. 1988. The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane. Teoksessa Richards, A.F. Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and laboratory Studies. Baltimore: STP 1014, ASTM, 13–44.

Geomachine Oy. 2010. Siipikaira GM 4W -esite. Internetsivut. Luettu 22.2.2012.  
[http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM\\_4W.pdf](http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM_4W.pdf)

Heikkinen, U. 2012. Kairausesimies. Haastateltu 18.1.2012.

ISO. 2009. preEN 22476-9, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 9: Field vane test. Geneva: International Organization of Standardization.

Jääskeläinen, R. 2009. Geotekniikan perusteet. 1. painos, 2009. Tampere: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy

Kolisoja, P. 1990. Maan mekaanisten ominaisuuksien automatisoitu määrittäyslaitteisto. Licensiaatintyö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Geotekniikan laitos. Rakennustekniikan osasto.

Korhonen, K-H. & Leskelä, A. 1970. Siipikaira pohjatutkimusvälineenä. Vuosik. Sarja III. VTT, Tiedotus. Helsinki.

Lahikainen, J. 2012. Maastotyönjohtaja. Haastateltu 7.8.2012.

Leino, K. 2012. Suunnittelija, sähköisen siipikairan ohjelmointi. Puhelin- ja sähköpostikeskustelut 15.–16.8.2012.

Liikennevirasto. 2010. Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen rataympäristössä. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2010. Helsinki. Internetsivut. Luettu 25.1.2012.  
[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2010-20\\_suljetun\\_leikkauslujuuden\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-20_suljetun_leikkauslujuuden_web.pdf)

Pérez-Foguet, A., Ledesma, A. & Huerta, A. 1997. Analysis of the vane test considering size and time effects. Publication CIMNE No. 122. Barcelona, Spain. Internetsivut. Luettu 4.4.2012.  
[http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/8525/1/perez\\_analysis\\_1999.pdf](http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/8525/1/perez_analysis_1999.pdf)

Pynnönen, J. 2012. Kairaustyöntekijä. Haastateltu 9.8.2012.

Ratahallintokeskus. 2005. Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B15. Helsinki. Internetsivut. Luettu 25.1.2012.  
[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk\\_b15\\_radan\\_stabiliteetin\\_laskenta.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_b15_radan_stabiliteetin_laskenta.pdf)

RIL. 1985. RIL 157-1-1985 Geomekaniikka 1. Helsinki: Suomen rakennusinsinööriliitto r.y.

Roy, M. & Leblanc, A. 1988. Factors Affecting the Measurements and Interpretation of the Vane Strength in Soft Sensitive Clays. Teoksessa Richards, A.F. Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and laboratory Studies. Baltimore: STP 1014, ASTM, 117–128.

Salo, P. 2012. Geoasiantuntija. Sähköpostikeskustelu 10.2.2012.

SFS. 2007. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Vuosik. 2: Pohjatutkimus ja koestus. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki.

SGF. 1993. SGF Rapport 2:93. Rekommenderad standard för vingförsök i fält. Linköping: Svenska Geotekniska Föreningen. Internesivut. Luettu 7.8.2012.  
[http://www.sgf.net/addon/rapporter/SGF\\_R2\\_93.pdf](http://www.sgf.net/addon/rapporter/SGF_R2_93.pdf)

SGY. 1995. Kairausopas II. 2. painos, 1999. Helsinki: Suomen Geoteknillinen yhdistys r.y.

SGY. 2011. Ojakonnista geotekniikan osaajiksi. Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. 60 vuotta. Hyvinkää: T-print Ky. Suomen Geoteknillinen yhdistys ry.

Slunga, E. 1990. Maa- ja kallioluiskien vakavuus. Teoksessa RIL 157-2 Geomekaniikka II. s. 89–114, 118–146. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y.

Tielaitos. 1993. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset, Yleiset perusteet. Helsinki. Internetsivut. Luettu 12.2.2012.  
[http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset\\_perusteet.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf)

Tielaitos. 1994. Maanvarainen tiepenger savikolla, suunnitteluohje. Tielaitoksen selvityksiä 67/1994. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Tielaitos. 1998. Teiden pehmeikkötutkimukset. Tielaitoksen selvityksiä 28/1998. Helsinki. Internetsivut. Luettu 22.2.2012.  
<http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/pehmtutk3200520.pdf>