

PAINUMA-, SIVUSIIRTYMÄ- JA HUOKOSPAINEMITTAUSTEN TARKKUUS

**Markku Savolainen
Hannu Halkola**



Julkaisu 83/2001

PAINUMA-, SIVUSIIRTYMÄ- JA HUOKOSPAINEMITTAUSTEN TARKKUUS

**Markku Savolainen
Hannu Halkola**

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia geoteknisellä osastolla käytössä olevien eri erikoismittauslaitteiden tarkkuutta ja verrata erilaisia mittausmenetelmiä. Työ jaettiin aiheittain kolmeen osaan; painumamittaukset, sivusiirtymämittaukset sekä huokospainemittaukset. Pääpaino oli painumamittauksiin liittyvissä tutkimuksissa.

Geoteknisellä osastolla käytettävien painumamittauslaitteilla tehtyjen empiiristen mittausten tuloksena selvisi, että tutkittujen laitteiden sisäinen tarkkuus oli erittäin hyvä. Absoluuttinen tarkkuus oli tarkkavaaituslaitteiston osalta tyydyttävä, takymetrin osalta vaihteleva. Sekä absoluuttisen- että toistotarkkuuden kannalta mittausmenetelmillä ja olosuhteilla oli olennainen vaikutus.

Tutkimustuloksien perusteella esitetään painumamittausten jakamisesta kolmeen tarkkuusluokkaan geoteknisen osaston laatujärjestelmää varten:

- Tarkkuusluokka A, tarkkavaaitus (sallittu keskivirhe $< 0,2\text{mm}$)
- Tarkkuusluokka B, jonovaaitus (sallittu keskivirhe $< 0,4\text{mm}$)
- Tarkkuusluokka C, perusvaaitus (sulkuvirhe $< 1,5\text{mm}$)

Käytännön mittaustarkkuus on kokemusten mukaan n. +/- 3–5 kertaa sallittu keskivirhe/sulkuvirhe.

Luokat on määritelty mittaustarkkuuden, -menetelmien sekä käytettävien laitteiden avulla. Jokaisessa luokassa mittausmenetelmiä on kuvattu tietyin ominaispiirtein. Ehdotuksen lähtökohtina olivat geoteknisen osaston suunnittelijoiden tarpeet ja henkilökunnan kokemukset. Aineistona käytettiin ensisijaisesti työn empiirisistä mittauksista saatuja tuloksia sekä tehtyjä havaintoja. Näkökulman laajentamiseksi haastateltiin myös osaston ulkopuolisia maanmittaus- sekä rakennusalan ammattilaisia.

Sivusiirtymämittausten osalta työssä selvitettiin mittausten periaatteita sekä toteutusta. Koekohteissa tutkittiin myös geoteknisellä osastolla käytössä olevan inklinometrilaitteiston tarkkuutta, kuinka lämpötilan tasaantuminen tulee ottaa sivusiirtymämittauksissa huomioon sekä havaintosuuntien lisäämisen vaikutusta mittaustarkkuuteen.

Tutkimuksen mukaan käytettävän inklinometrin sisäinen tarkkuus oli hyvä, $< 2\text{mm}/20\text{m}$ ja absoluuttinen tarkkuus oli kohtalainen $< 4\text{mm}/20\text{m}$. Lämpötilatasaantumisen vaikutus mittaustarkkuuteen oli tutkimusten mukaan vähäinen, mutta huomioarvoinen. Lämpötilaeron ollessa noin 20 celsiusastetta tulee lämpötilatasaantumiseen varata aikaa vähintään 10 minuuttia. Havaintosuuntien lisäyksen osalta huomattiin, että lisäämisellä oli myönteinen vaikutus ainoastaan toisen mittaussuunnan tarkkuuteen, jolloin tuloksien keskihajonta pieneni selvästi.

Huokospainemittauksissa selvitettiin kahden mittauskäytännön, geoteknisen osaston oman sekä valmistajan suosittelman, eroja. Bat-laitteistoa käytettäessä on valmistajan mittaustapa selkeästi suositeltavampi, jolloin mittaustarkkuus on yleensä $< 0,2\text{m}$ (2kPa).

SAMMANDRAG

Arbetets ändamål var att utreda mättningsnoggrannheten för den specialmättningsapparat som geotekniska avdelningen använder, samt jämföra olika mättningsmetoder. Arbetet uppdelades i tre delar; vertikalmätningar, horisontalmätningar samt portrycksmätningar. Huvudtrycket sattes på undersökningar av vertikalmätningar.

Empiriska mätningar visade att den inre precisionen för geotekniska avdelningens vertikalmättningsapparat var mycket god. Den absoluta noggrannheten för precisionsavvägningsapparens del var tillfredsställande och för takymeterns del växlande. Både den absoluta och repeteringsnoggrannheten påverkades märkbart av omständigheter och mättningsmetod.

På basen av forskningsresultaten föreslås att vertikalmätningarna uppdelas i tre precisionsklasser med beaktande av geotekniska avdelningens kvalitetssystem, i praktiken är den största avvikelserna då ca 3-5 gånger tillåtet genomsnittfel:

- Precisionsklass A, precisionsavvägning (tillåtet genomsnittfel <0,2mm)
- Precisionsklass B, kedjeavvägning (tillåtet genomsnittfel < 0,4mm)
- Precisionsklass C, grundavvägning (slutfel < 1,5mm)

Klasserna är definierade på basis av mättningsnoggrannheten, -metoderna och apparaturen. I varje klass har mättningsmetoderna beskrivits med särskilda egenskaper. Som utgångspunkt till förslaget var geotekniska avdelningens planerades och personalens behov och erfarenheter. Materialet som användes baserade sig närmast på arbetets empiriska mättningsresultat samt på iakttagelser som gjorts. För horisontalmätningarnas del utreddes mätningarnas principer och förverkligande. Vid försöksområdena testades också den av geotekniska avdelningen använda inklinometerapparens precision, huruvida temperaturutjämnningen skall beaktas i samband med mätningen, samt förökningen av observeringsriktningarnas verkan på mättningsnoggrannheten.

Forskningen visade att inklinometerns inre precision var god, <2mm/20m, och att den absoluta precisionen var måttlig, <4mm/20m. Forskningen visade att temperaturutjämnningens verkning på mättningsprecisionen var mindre betydande men hade uppmärksamhetsvärde. Då temperaturskillnaden är 20 °C fordras minst 10min tid för temperaturutjämnningen. Ökning av antalet observationsriktningar visade sig ha betydelse för den andra mättriiktningarnas resultat, då i synnerhet standardavvikelsen minskade betydligt.

I samband med portrycksmätning utreddes skillnaden på två olika mättningspraxisen, geotekniska avdelningens egna samt tillverkarens rekommendationer. Vid användning av Bat-anordning är tillverkarens mättningspraxis betydligt bättre, varvid mättningsnoggrannheten i allmänhet är <0,2m (2kPa).

ABSTRACT

The aim of this research was to investigate the actual precision of the measuring devices used in the geotechnical division. It consists of three parts; horizontal measurements, lateral measurements and pore pressure measurements. The main effort was put to investigate the horizontal measurements.

Based on empirical testing it was found that internal accuracies of the measuring instruments used in the geotechnical division (leveling equipment Leica NA3003 and the total station Geodimeter 608S) were good. Instead the absolute accuracy of the precision leveling equipment was moderate, and variable for the total station. The effects of different circumstances and methods on the measuring accuracy were significant.

On the basis of empirical measurements an accuracy classification for settling measurements is introduced mainly to the geotechnical division. It is based on opinions of the staff of the geotechnical division, the results of the empirical testing, literature and interviews of the experts in the field of land surveying. The measurements are classified on three categories:

- Precision category A, (allowed mean error < 0,2mm)
- Precision category B, (allowed mean error < 0,4 mm)
- Precision category C, (allowed closing error < 1,5mm)

In practice the actual error of the results is normally 3-5 times allowed mean error.

The accuracy for vertical measurements was tested using inclinometer devices by measuring how temperature differences affect the results and the effect of increasing measuring directions.

It was found out that both the internal measuring accuracy of the inclinometer were good and the absolute moderate. It was also found out that the affects of the temperature differences were worth noticing. A temperature drift of a temperature difference 20 degrees centigrade takes about ten minutes. Multi-measurement system gave better accuracy only to the other measuring direction when standard deviation of results was significantly smaller.

The accuracy of BAT pore pressure probe was also tested. In the report two measuring practice, a geotechnical division method and the manufacturer method were tested.

Based on the standard deviation of the test results it was found out that using the BAT device, the measuring practice recommended by the manufacturer is clearly better. The error of results is then usually < 0,2m (2kPa).

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	5
SAMMANDRAG.....	6
ABSTRACT	7
ALKUSANAT	11
1. JOHDANTO.....	12
2. RAKENNUSTÖIHIN LIITTYVÄT PAINUMAMITTAUKSET.....	12
2.1 Mittausmenetelmät.....	13
2.1.1 Geodeettiset menetelmät.....	13
2.1.2 Automatisoidut järjestelmät.....	14
2.2 Valvontaverkko	14
2.3 Mittaustarkkuus.....	15
2.4 Painumamittausten laatu.....	15
3. GEOTEKNISEN OSASTON PAINUMAMITTAUSLAITTEET.....	16
3.1 Käytettävä vaaituslaitteisto.....	16
3.1.1 Laitteiston määrittäminen.....	17
3.1.2 Vaaituskojeen seurantalibrointi	17
3.2 Muut korkeuden määrittämiseen soveltuvat laitteet	18
3.2.1 Nykyaikainen takymetri	18
3.2.2 Painumaletku	19
4. TARKKUUSTARKASTELU JA ERI MENETELMIEN ANALYSOINTI..	19
4.1 Vaaitus.....	19
4.1.1 Mittausten suunnittelu ja toteutus.....	20
4.1.1.1 Testi 1: Havaintojen identtisyys.....	20
4.1.1.2 Testi 2: Havaintoetäisyydet.....	21
4.1.1.3 Testi 3: Tarkkuudenmäärittäminen.....	22
4.1.2 Mittaustulokset.....	22
4.1.2.1 Testi 1: Havaintojen identtisyys.....	22
4.1.2.2 Testi 2: Havaintoetäisyydet.....	23
4.1.2.3 Testi 3: Tarkkuuden määrittäminen.....	24
4.1.3 Tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä	25
4.1.3.1 Kompensaattorin toiminta-alueella pysyminen.....	25
4.1.3.2 Laitteiden käyttö.....	28
4.1.3.3 Olosuhteet.....	29
4.1.3.4 Kaksinkertaiset taakse-eteen-havainnot (TEET)	30
4.1.3.5 Vaaitustulosten tasoittaminen	31
4.2 Takymetrimittaus.....	32
4.2.1 Mittausjärjestelyt	32
4.2.1.1 Testi 4: Havaintojen identtisyys.....	32
4.2.1.2 Testi 5: Mittaustarkkuuden määrittäminen	32
4.2.2 Mittaukset ja mittaustulokset.....	33
4.2.2.1 Testi 4: Havaintojen identtisyys.....	33
4.2.2.2 Testi 5: Mittaustarkkuuden määrittäminen	34
4.2.3 Takymetrin soveltuvuus painumamittauksiin.....	37

5.	JOHTOPÄÄTÖKSET PAINUMAMITTAUKSISTA.....	38
6.	EHDOTUS PAINUMAMITTAUSTEN TARKKUUSLUOKITUKSELLE .	38
6.1	Tausta	38
6.2	Tarkkuusluokka A: Tarkkavaaitus.....	39
6.3	Tarkkuusluokka B: Jonovaaitus.....	40
6.4	Tarkkuusluokka C: Perusvaaitus	41
7.	SIVUSIIRTymiEN MITTAAMINEN.....	41
7.1	Järjestelmän osat ja laitteiston periaate.....	41
7.2	Laitteen käyttö	42
7.3	Laitteiston toimintatarkastus	43
8.	TESTI INKLINOMETRIN TARKKUUDEN MÄÄRITTÄMISEKSI	43
8.1	Yleistä.....	43
8.1.1	Sisäinen tarkkuus	43
8.1.2	Absoluuttinen tarkkuus	43
8.2	Lämpötilan muutoksen vaikutus	43
8.3	Havaintosuuntien lisäämisen vaikutus.....	44
9.	INKLINOMETRIN TARKKUUSTESTIN TULOKSET	44
9.1	Inklinometrin tarkkuus.....	44
9.1.1	Sisäinen tarkkuus	44
9.1.2	Absoluuttinen tarkkuus	47
9.1.3	Lämpötilatasaantumisen vaikutus.....	49
9.2	Havaintosuuntien lisääminen.....	50
9.2.1	Vaihe 1	50
9.2.2	Vaihe 2	51
10.	JOHTOPÄÄTÖKSET SIVUSIIRTymÄMITTAUKSISTA	54
11.	HUOKOSPAINEN MITTAAMINEN	54
11.1	Mittausjärjestelmän osat.....	54
11.2	Mittausten toteutus	55
12.	TESTI BAT- LAITTEISTON TARKKUUDEN MÄÄRITTÄMISEKSI.....	56
13.	BAT LAITTEISTON TARKKUUSTESTIN TULOKSET.....	57
14.	JOHTOPÄÄTÖKSET HUOKOSPAINEMITTAUKSISTA.....	59
	LÄHDELUETTELO.....	61
	LIITE 1 ESIMERKKIKOhteET	62
	LIITE 2 LASKUESIMERKKEJÄ.....	63
	LIITE 3 TESTIN 1 MITTAUSPÖYTÄKIRJA	64
	LIITE 4 REFERENSSIMITTAUS	65
	LIITE 5 TESTIN 2 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 1(3)	66
	LIITE 6 TESTIN 2 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 2(3)	67
	LIITE 7 TESTIN 2 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 3(3)	68
	LIITE 8 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 1 (6)	69

LIITE 9 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 2 (6).....	70
LIITE 10 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 3(6).....	71
LIITE 11 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 4(6).....	72
LIITE 12 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 5(6).....	73
LIITE 13 TESTIN 3 MITTAUSPÖYTÄKIRJA 6(6).....	74
LIITE 14 REFERENSSIMITTAUS 1(2)	75
LIITE 15 REFERENSSIMITTAUS 2(2)	76
LIITE 16 TESTIN 5 MITTAUSPÖYTÄKIRJA.....	77

ALKUSANAT

Geoteknisten mittausten tarve on lisääntynyt selvästi rakentamisen painopisteen siirtyessä pohjasuhteiltaan entistä huonommille alueille. Tällaiset alueet saatetaan rakentamiskelpoisiksi esirakentamalla ne etukäteen.

Varsinkin rannoilla on savikerroksen päälle ajettu sekalaisia täyterakenteita, jotka aiheuttavat savikerroksen kokoonpuristumista ja mahdollisesti alueen liikkumista. Suunnittelussa on tärkeää saada luotettavaa tietoa alueen mahdollisista liikkeistä sekä ennen että jälkeen rakentamisen. Usein muodonmuutokset ovat pieniä ja tapahtuvat hitaasti, jolloin mittausten tarkkuuksiin kohdistuu suuria vaatimuksia. Viime vuosina on varsinkin sivusiirtymä- ja painumamittausten tarkkuutta pidetty joissakin tapauksissa riittämättömänä.

Koska geoteknisten mittalaitteiden valmistajien omat käsitykset edustamiensa laitteiden tarkkuuksista ovat yleensä optimistisia ja perustuvat yleensä lukematarkkuuteen päätettiin geoteknisellä osastolla käynnistää selvitys osastolla käytettävien tärkeimpien geoteknisten mittausten menetelmien todellisesta tarkkuudesta. Tämä julkaisu perustuu painumamittausten osalta pääosin Markku Savolaisen insinööriyöhön, joka on tehty toimistopäällikkö Hannu Halkola ohjauksessa. Insinööriyön valvoja oli Reijo Aalto Mikkelin Ammattikorkeakoulusta. Sivusiirtymä- ja huokospainemittausten osalta työ perustuu geoteknisellä osastolla tehtyihin kokeisiin.

Helsingissä joulukuussa 2001

Ilkka Vähäaho
osastopäällikkö

1. JOHDANTO

Asiakkaiden kasvavat tarpeet ovat luoneet paineita sekä mittauslaitteiden valmistajille että mittauspalveluja tuottaville yrityksille. Osa asiakkaista vaatii erittäin tarkkoja tuloksia. Saamastaan palvelusta he ovat valmiita maksamaan työn vaativuuden mukaisesti.

Ainakin korkeudensiirron osa-alueella tarkempia laitteita on kehitetty ja niitä on saatavissa käyttäjien tarpeiden mukaan. Sen sijaan mittauspalveluja tarjoavissa yrityksissä asiakkaiden tarpeet otetaan edelleen vaihtelevasti huomioon. Liian usein mittaukset hoidetaan yhden laitteen avulla ja aina saman toimintamallin mukaisesti, jolloin mittaustarkkuus ei ole paras mahdollinen.

Mittauspalveluja tarjoavissa yrityksissä asiakkaiden toiveisiin voitaisiin vastata jakamalla mittaukset eri tarkkuusluokkiin. Tarkkuusluokat määrittäisivät mittauksille tietyt tarkkuudet sekä toimintamallit ja samalla määräytyisivät mittauksen hinnoitteluperusteet.

Tutkimuksessa selvitettiin osaston tarkkavaaituskojeen (Leica NA3003) ja takymetrin (Geodimeter 608S) korkeudensiirtotarkkuus. Koska mittaustarkkuuteen eivät vaikuta ainoastaan käytettävät laitteet, vertaillaan myös erilaisten työmenetelmien vaikutuksia.

Vastaukset tutkimuksen ongelmiin ja kysymyksiin selvitettiin empiirisen näytön pohjalta testimittauksin. Testien toteutus ja tulosten analysointi on kuvattu yksityiskohtaisesti.

Testimittauksen pohjalta tutkimuksessa on selvitetty laitteiden soveltuvuutta painumamittauksiin. Päätelmien perusteella esitetään julkaisussa myös tarkkuusluokitus pääasiassa geoteknisen osaston omaan käyttöön.

Työssä on käytetty SI-järjestelmästä poikkeavia kulman yksiköitä, joita kuitenkin edelleen käytetään yleisesti käytännön mittauksissa ja -ohjelmissa.

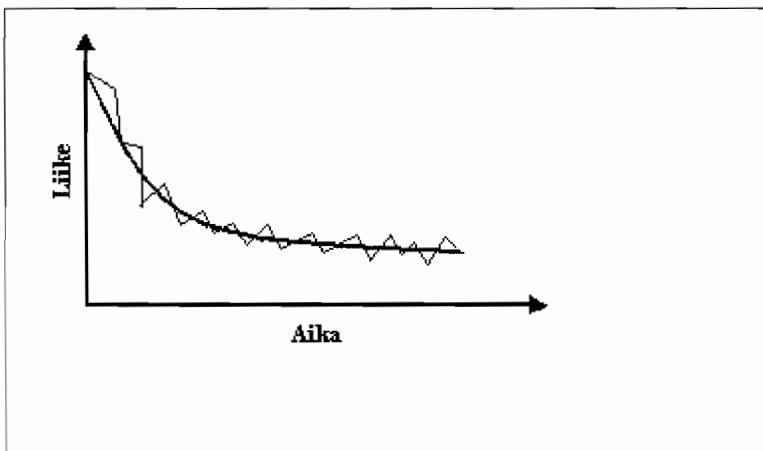
2. RAKENNUSTÖIHIN LIITTYVÄT PAINUMAMITTAUKSET

Erilaisilla rakennustöihin liittyvillä painumamittauksilla seurataan kohteiden muutoksia ajan, kuormituksen jne. funktiona. Syitä mittauksille ovat esimerkiksi vaaratilanteiden estäminen, oikeudellisten kysymysten selvitys sekä tutkimukset, joissa seurataan täytemaiden käyttäytymistä.

Tarkkailtavat kohteet voivat olla joko rakennettuja tai rakentamattomia. Esimerkkeinä voidaan mainita rakennukset ja rakennelmat, penkereet, putkistot, täyttöalueet tai erilaiset suunnittelu- ja tarkkailualueet. Rakennetuilla alueilla painumaseuranta liittyy usein olemassa olevien rakennusvaurioiden sekä rakenteiden toiminnan tarkkailuun ja rakentamattomilla rakennettavuusselvityksiin.

Myös kohteiden muutosten eli deformaatioiden syyt voivat olla hyvin monenlaisia. Usein maaperän geoteknisillä ominaisuuksilla on näihin olennainen vaikutus. Maapohjan liikkeet johtuvat esimerkiksi pohjavedenoton aiheuttamasta vajoamisesta, massojen ja rakenteiden siirtymisestä tai murtumisesta, rakentamisen aiheuttamasta massojen liikkeestä tai kuormituksen aiheuttamasta ns. konsolidaatiopainumisesta. Rakennusten ja rakennelmien liikkeet puolestaan voivat johtua esim. kantavien rakenteiden väsymisestä tai rakennusperusteiden pettämisestä tärinän yms. johdosta. Vaikka painumamittauksilla tyypillisesti seurataan kohteen vajoamista, on joissain tapauksissa mahdollista myös kohteen kohoaminen. Esimerkkeinä tällaisesta voidaan mainita maanotto ja siihen liittyvä kuormituksen väheneminen tai routiminen, joiden seurauksena maanpinta kohoaa.

Tarkkailtavat deformaatiot voivat olla millimetristä kymmeniin senttimetreihin (ks. liite 1), joskus tarkkailtava kohde ei liiku lainkaan. Yksinkertaisessa tilanteessa liike on selvästi havaittavissa ja se on tasaista. Toisinaan liikkeet voivat tapahtua äkillisesti, mutta lopulliseen asettumiseen kuluu kauan. Kuvan 1 mukaisesti kohteessa saattaa ilmetä myös lyhytaikaista satunnaisliikettä, jolloin liike on vuorottelevasti painuvaa sekä kohoavaa.



Kuva 1. Painumisen yhteydessä tapahtuvaa satunnaisliikettä

2.1 Mittausmenetelmät

Eri painumamittausmenetelmiä on vaikea jakaa tiettyihin ryhmiin, koska toisistaan poikkeavia menetelmiä on lukuisia. Seuraavassa kerrotaan hiukan yleisimmistä rakennustöihin liittyvistä, eli geodeettisista sekä automatisoiduista mittausjärjestelmistä. Näiden lisäksi on olemassa mm. fotogrammetrisia menetelmiä sekä erityismenetelmiä, kuten GPS -mittaus, liikuteltava hydrostaattinen vaaitus sekä distometrimittaus, jne.

2.1.1 Geodeettiset menetelmät

Rakennustöihin liittyvät /painumat tapahtuvat yleensä hitaasti, joten geodeettiset mittausmenetelmät ovat niiden tarkkailuun soveltuvia. Geodeettisia mittausmenetelmiä ovat mm. vaaitus, takymetrimittaus sekä kolmiulotteinen teodoliittimittaus.

Yleisin geodeettisista menetelmistä on vaaitus. Siinä tallennettavia tietoja ovat vaakatahtäyksistä saadut korkeuslukemat. Takymetrillä tapahtuva korkeudensiirto sen sijaan perustuu pystykulmien sekä matkojen havainnointiin. Jos käytössä on kaksi takymetriä tai vaihtoehtoisesti kaksi teodoliittia, voi korkeudensiirto tapahtua kulmia havainnoimalla. Koska nykyisellä teknologialla kulmat pystytään määrittämään huomattavasti tarkemmin kuin matkat, on tällöin mahdollista saavuttaa tuloksia, jotka ovat lähellä tarkkavaaitustarkkuutta.

Koska geodeettisten mittausten yhteydessä havainnointi ei voi olla jatkuvaa, ajoitetaan mittaukset tiettyyn ajalliseen rytmiiin, jossa aikavälin pituus riippuu muutoksen nopeudesta. Vaikka geodeettisin menetelmin on mahdollista saavuttaa tarkkoja tuloksia, niiden huonona puolena voidaan pitää sitä, ettei mittausten välillä tapahtuneista liikkeistä saada minkäänlaista tietoa. Usein niiden oletetaan tapahtuneen lineaarisesti, vaikka välttämättä näin ei todellisuudessa ole.

2.1.2 Automatisoidut järjestelmät

Automatisoituja järjestelmiä ovat mm. hydrostaattiset mittaussysteemit, venymäliuskat sekä pituusanturit. Järjestelmissä kohteeseen kiinnitetään anturit, jotka havainnoivat esimerkiksi hydrostaattista painetta, sähköistä vastusta, tai sähköistä jännitettä (1, s. 54-63). Kohteiden liikkeistä saadaan tietoa, kun kyseiset suureet muunnetaan laskennallisesti geometrisiksi suureiksi.

Automatisoiduissa järjestelmissä havainnointi voi olla jatkuvaa tai se voi tapahtua ohjelmoidusti tietyn ajanjaksoin. Järjestelmä voidaan rakentaa myös niin, että se antaa automaattisesti hälytyksen, jos kohteen liike ylittää tietyn raja-arvon. Automatisoitujen järjestelmien etuina on etenkin mahdollisuus jatkuvaan havainnointiin sekä henkilöstötarpeen väheneminen.

2.2 Valvontaverkko

Painumamittausten perustan luo niin sanottu valvontaverkko, joka muodostuu vähintään yhdestä kiintopisteestä ja yhdestä kohdepisteestä. Kiintopisteet ovat liikunta vyöhykkeen ulkopuolella sijaitsevia, stabiileina pidettäviä pisteitä. Niiden korkeus voi olla sidottu johonkin yleiseen korkeusjärjestelmään tai ne voivat olla paikallisia kiintopisteitä, joille määritetään sisäinen korkeus.

Kiintopisteeltä korkeus siirretään tarkkailtaville kohdepisteille. Tarkoissa mittauksissa tämä tapahtuu esimerkiksi tarkkavaaituslaitteiston tai tarkkavaaitusletkun avulla. Vaaitessa on lisäksi tärkeää, että korkeus suljetaan aina kiintopisteelle, kun kohdepisteiden korkeus on määritetty. Tällöin mittausten tuloksena muodostuu vaaitus-jonoja, jotka alkavat ja päättyvät tunnetulle pisteelle. Kun kiintopisteet ovat toistuvasti samoja, voidaan mittauksista havaita mahdolliset karkeat virheet.

Tarkkailtavan kohteen ollessa rakennus tai rakennelma, toimii kohdepisteenä yleensä siihen kiinnitetty painumapultti. Maanpinnan painumista mitatessa kohdepisteenä puolestaan toimii niin sanottu painumalevy tai -nasta. Kohdepisteiden määrä riippuu kohteen muodosta sekä odotettavissa olevan liikkeen suuruudesta. Kohdepisteitä tulee kuitenkin sijoittaa niin, että kahden pisteen välillä liike on suuruudeltaan ja suunnaltaan yhtäläinen.

Vaikka painumamittausten lähtökohtana on oletama, kiintopisteiden stabiliteetista, voi liikettä silti ilmetä. Tästä syystä vaaituslenkkiin kannattaa ottaa mukaan vähintään kaksi kiintopistettä. Tällöin yksittäisen kiintopisteen liikkeitä saadaan selville, kun korkeuskoordinaatteja verrataan aikaisempiin mittaustuloksiin. Jos liike oli tilapäistä, liikuneelle kiintopisteelle annetaan uudet koordinaatit, joita käytetään jatkossa. Jos taas liike jatkuu kiintopiste joko hylätään tai sen liikkeille määritetään toleranssit, jotka huomioidaan mittausten tasoituksessa.

2.3 Mittaustarkkuus

Painumamittauksissa tarkkuus määritellään tyypillisesti joko pistekeskivirheen avulla (mm) tai millimetreinä kilometriä kohti (mm/km). Tarkkuusvaatimukset riippuvat odotettavissa olevan liikkeen suuruudesta. Kohteesta riippuen mittausten tarkkuusvaatimukset vaihtelevat muutamasta promillesta kymmeniin prosentteihin mitattavan kohteen oletetusta painumasta, mutta yleissääntönä voidaan pitää noin 20-25 %:ia (2, s. 19). Tarkkuus määritellään myös usein suurimpana sallittuna poikkeamana todellisesta arvosta. Suurinta poikkeamaa ei voida kuitenkaan arvioida mittaustuloksista, mutta poikkeaman voidaan arvioida olevan n. 3-5 kertaa pistekeskivirhe.

Hyvät tulokset edellyttävät painumamittauksissa sekä tarkkuutta että luotettavuutta. Tuloksista tulee selvästi erottaa kohteiden liike ja mittausten epävarmuus. Usein on tarpeellista arvioida lopputuloksen tarkkuutta ja mittausmenetelmien luotettavuutta yksityiskohtaisesti etukäteen.

2.4 Painumamittausten laatu

Painumamittausten laatua voidaan kuvata jakamalla yrityksen mittaukset eri tarkkuusluokkiin, eli niin sanottuihin laatuluokkiin. Tällöin painumamittausten tarkkuuksien ja kustannusten välille määritellään optimisuhde. Asiakkaalle annetaan mahdollisuus valita laatuluokka, jonka mukaisesti mittaukset tulee suorittaa. Samalla määrittyy mittausten hinta. Vaadittava tarkkuus täytyy pystyä takaamaan, mutta resursseja ei tule uhrata suotta.

Painumamittausten laatuluokitusjärjestelmää rakennettaessa huomio kiinnitetään mm. käytettäviin laitteistoihin, menetelmiin, itse kohteisiin, kiintopisteiden määrään, saavutettaviin tarkkuuksiin sekä kustannuksiin. Samanaikaisesti yrityksen sisällä tulee väistämättä tilanne, jossa joudutaan miettimään olemassa olevia työ- ja toimintatapoja sekä työn laatuun liittyviä seikkoja. Esiin tulee epäkohtia, jotka huonontavat työn tuottavuutta tai laatua. Tarkoituksena ei kuitenkaan ole etsiä syyllisiä, vaan ehkäistä ongelmakohtia ja kehittää työtapoja.

Yhtenäinen käytäntö painumamittauksia suorittavassa organisaatiossa luodaan laatu- ja järjestelmään sisällytetyillä toimintaohjeilla. Ne kertovat laitteista ja menetelmistä, joilla vaadittavat tarkkuudet saavutetaan.

3. GEOTEKNISEN OSASTON PAINUMAMITTAUSLAITTEET

3.1 Käytettävä vaaituslaitteisto

Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla on käytössään kuvan 2 mukainen Leica NA3003 -elektroninen tarkkavaaituskoje (nro.281355), joka mittaa ja tallentaa lattalukemat automaattisesti. Laitteen toimintaetäisyys on olosuhteista riippuen 1-60 m. Sen toiminta perustuu digitaaliseen matriisikameraan ja kaksiulotteiseen kuvankäsittelyyn. Matriisikamera mittaa latvan viivakoodisignaalin, ja prosessori vertaa sitä muistiin tallennetun koodin kuvaan. Tätä kautta laite määrittää automaattisesti tarkan lattalukeman sekä laskee latan välisen vaakaetäisyyden.



Kuva 2. Leica NA3003 -elektroninen tarkkavaaituskoje

Tarkan (asettumistarkkuus 0,4"), sisäisen kompensaattorin, avulla NA3003:n tähtäysakseli asetetaan vaakasuoraan. Kompensaattori toimii painovoiman avulla, mutta sen toiminta-alue on rajallinen. Moitteeton toiminta edellyttää rasiatasaimen toimintaa, jonka avulla suoritetaan kojeen karkea tasaus. Kuten yleensä kaikissa vaaituskojeissa, myös tässä mallissa on säätöruuvit, joiden avulla rasiatasain voidaan säätää.

Asetusvalikot ovat NA3003:ssa monipuolisia. Mittaaja voi määritellä mm. mittayksiköt, tulosten näyttöajan, näytettävät tiedot jne. Asetusten kautta otetaan käyttöön myös tarvittavat korjausparametrit, kuten kaarevuuskorjaus. Lämpötilan ja ilmanpaineen vaikutus vaaitukseen on vähäinen, sillä ne vaikuttavat merkittävästi vain etäisyydenmittaukseen (huom. Olosuhteet 4.1.3.3). NA3003:ssa tietojen syöttömahdollisuutta ei ole.

Geoteknisen osaston tarkkavaaituskalustoon kuuluu Leican 3,05 metriä ja 2,0 metriä pitkät invarlatat, mallia GPCL3 sekä GPCL2. Invarlattojen lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin pienet, joten ne soveltuvat hyvin tarkkavaaitukseen. Lattojen kalibroinnista

sekä pidemmän latan ominaisuuksista enemmän kohdassa 3.1.1 Laitteiston määrityskalibrointi.

3.1.1 Laitteiston määrityskalibrointi

Geoteknisen osaston tarkkavaaituslaitteisto on hankittu vuonna 1997 ja sen jälkeen vaaituskoje on muutaman kerran huollettu maahantuoajalla.

Koska tutkimuksessa tarkasteltiin tarkkavaaituskojeen mittaustarkkuutta, päätettiin laite tänä vuonna antaa puolueettomaan tarkasteluun. Vaaituskoje toimitettiin Teknillisen korkeakoulun Geodesian laboratorioon. Siellä laitteelle suoritettiin optisen mikrometrin toimintakunnon tarkistus sekä vaaituskojeen pääehdon (tähtäyssäde vaakasuorassa) tarkistus ja säätö. Toimenpiteiden jälkeen kojeen horisonttitason todettiin yhtyvän riittävällä tarkkuudella pääsuuntakollimaattorin määrittämään referenssihorisonttiin. (TKK:n pääsuuntakollimaattorissa horisontin epävarmuus alle 0,03 mgon)

Kolmen metrin viivakoodilatalle määrityskalibrointi suoritettiin kansallisessa mittanormaallaboratoriossa Geodeettisella laitoksella. Tutkimuksissa määritettiin latan jaoitusviivojen paikkavirhe. Tämä suoritettiin niin sanotussa pystylattakomparaattorissa. Tutkimusten tuloksena saatiin selville, että kyseisessä latassa korjaus viivojen paikoissa oli enimmillään suuruusluokkaa $30 \cdot 10^{-5}$ metriä. Virheiden eliminoimiseksi laadittiin kalibrointikorjaukselle kaava, joka on muotoa:

$$y = 0,0064x + 11,355 \quad (1)$$

y = havainnon korjaus (μm)

x = viivan paikka latan pohjasta (mm)

Yhden havainnon osalta poikkeama ei ole suuri. Pitkässä jonovaaituksessa virheet saattavat kuitenkin kasautua. Syntyvä virhe voi tällöin olla jo suuruusluokkaa kymmenesosamillimetrejä. Tästä syystä tarkoissa, pitkissä jonomittauksissa korjaus tulee laskennallisesti huomioida.

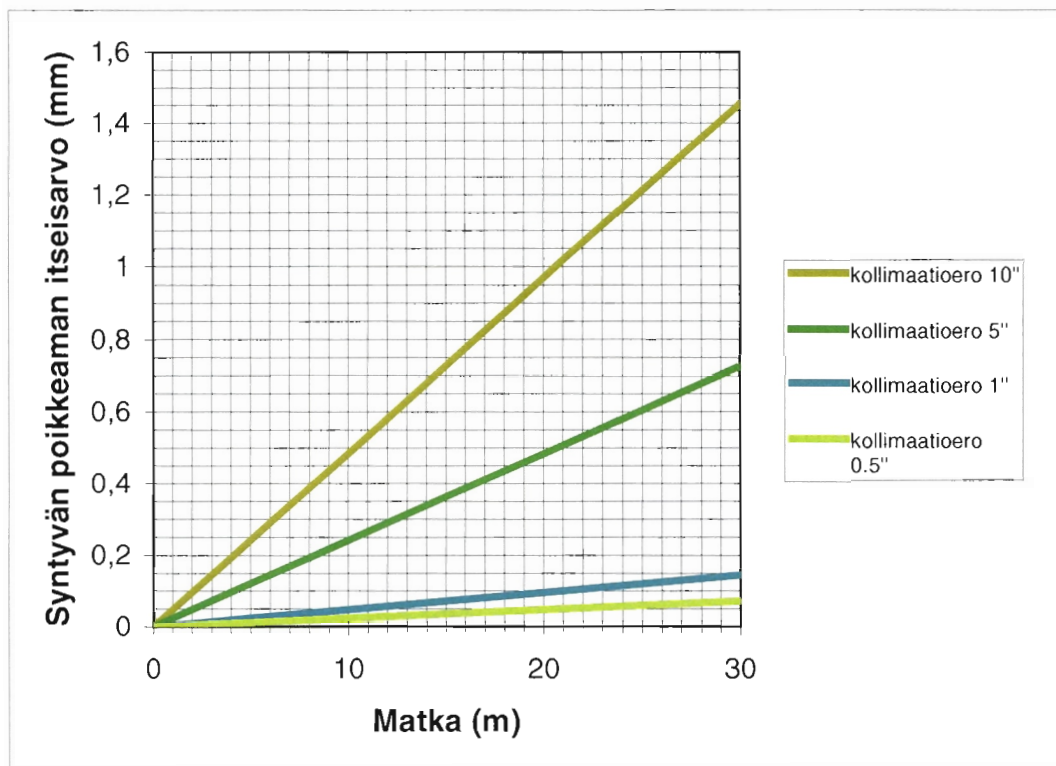
3.1.2 Vaaituskojeen seurantakalibrointi

NA3003 -tarkkavaaituskojeessa on sisäinen kalibrointiohjelma, jonka avulla laitteen horisonttitason kaltevuus, eli kollimaatio voidaan määrittää. Tarkistus suoritetaan niin sanotulla kahden pultin testillä. Tällöin tarvitaan kaksi tukevaa latta-alustaa, esimerkiksi kallioon kiinnitettyjä pultteja tai tukevalle alustalle poljettuja "kilpikonnia". Pisteiden välinen etäisyys tulee olla 45-60 metriä. Kojeasemat sijoitetaan tälle linjalle 1/3 ja 2/3 -kohdille. Testissä havaintoja tehdään yhteensä neljä, kaksi kappaletta kummaltakin kojeasemalta. Kun havainnot on suoritettu, lasketaan kollimaatio. Tätä verrataan vanhaan kollimaatioarvoon. Kalibrointi-arvolla ei elektronisen mittaustarkkuuden kannalta ole niinkään merkitystä, vaan huomio kiinnitetään uuden ja vanhan kalibrointi-arvon eroon.

Koska uusien kalibrointi-arvojen tallentaminen perustuu yksittäiseen mittausprosessiin, olisi testi syytä suorittaa kahteen kertaan uusia arvoja talletettaessa. Näin saadaan varmistus kalibroinnin toistotarkkuudesta. Jos kollimaatioero on suuri ja kah-

desta erillisestä mittauksesta saadaan samankaltaisia tuloksia, on uusien arvojen tallentaminen perusteltua.

Kuvasta 3 ilmenee syntyvä korkeuspoikkeama eri tähtäysetäisyyksillä kojeen kollimaatioeron ollessa 10, 5, 1 tai 0,5 sekuntia. Kuva korostaa yhtä pitkien taakse-eteen havaintojen tarpeellisuutta. Käytännön esimerkkinä voidaan ajatella esimerkiksi tapaus, jossa havainto taakse on 40 metriä ja havainto eteen 50 metriä. Etäisyyksien poikkeama on siis 10 metriä. Ajatellaan kojeen vanhan ja nykyisen horisonttitason poikkeaman olevan 5 sekuntia. Kuten kuvasta ilmenee korkeusvirhe, joka havaintoparista tällöin aiheutuu on noin $\pm 0,25$ mm. (Esimerkki yksittäisestä laskutoimituksesta liitteessä 2.)



Kuva 3. Kollimaation vaikutus eri tähtäysetäisyyksillä

Tutkimuksen empiirisiä mittauksia ja myöhempiä toimintatarkastuksia varten rakennettiin geoteknisen osaston läheisyyteen rata, jossa vaaituskojeiden tarkastukset voidaan suorittaa.

3.2 Muut korkeuden määrittämiseen soveltuvat laitteet

3.2.1 Nykyaikainen takymetri

Geoteknisellä osastolla on käytössään myös Geodimeter 608S takymetri. Laite edustaa nykyaikaista ja tarkkuusominaisuuksiltaan keskinkertaista mittauskalustoa. Osastolla laitetta on käytetty vain merkintä- ja kartoitusmittauksissa, mutta painumamittauksissa sitä ei ole juurikaan hyödynnetty. Vaaituskojeeseen verrattuna takymetrin käyttöön liittyy joitain etuja, esimerkkinä pystykulmien havainnointi. Tässä tutki-

muksessa takymetrin soveltuvuutta painumamittauksiin tutkittiin tapauksissa, joissa korkeuden siirto tapahtui pisteeltä toiselle käyttäen yhtä kojeasemaa.

3.2.2 Painumaletku

Rakennusteknisten painumamittausten ns. erityislaitteisiin kuuluva (ks. 2.1) painumaletku hankittiin geotekniselle osastolle noin kymmenen vuotta sitten. Vaikka laitetta käytetään harvoin, se on vakiinnuttanut paikkansa. Sillä tarkkaillaan putkilinjojen, kuten viemärien painumista, joita ei voida suorittaa osaston muilla laitteilla.

Laitteen toiminta perustuu hydrostaattiseen mittaukseen. Liikuttelemalla putken päässä olevaa anturia, nestepaine putkessa muuttuu ja koje ilmoittaa anturin suhteellisen korkeuden. Laitteen toimintaetäisyys, eli letkun pituus on 80 metriä. Luke-matarkkuus laitteessa on yksi millimetri. Laitevalmistaja lupaa painumaletkulle sisäisen tarkkuuden ± 1 mm, mutta käytännössä laitteen tarkkuudeksi on geoteknisellä osastolla todettu ± 2 cm.

Tarkkavaaituskojeeseen ja takymetriin verrattuna painumaletkun käyttö on huomattavan monimutkaista. Heikkoja ominaisuuksia ovat myös saavutettava tarkkuus ja lyhyt toimintaetäisyys.

4. TARKKUUSTARKASTELU JA ERI MENETELMIEN ANALYSOINTI

4.1 Vaaitus

Vaaituksen osalta testimittaukset toteutettiin kolmessa osassa. Testien avulla havainnollistettiin erilaisia mittaustekniikkaan liittyviä ilmiöitä ja hankittiin tietoa vaaituslaitteiston ominaisuuksista. Aluksi tutkittiin kuinka eri mittaiset havaintoparit vaikuttavat vaaitustuloksiin. Tämän jälkeen tarkasteltiin, onko kojeasemien lisäyksellä/vähentämisellä suoranaista yhteyttä vaaitustarkkuuteen, ja millaiset olisivat optimaaliset havaintoetäisyydet. Lopuksi suoritettiin NA3003:n tarkkuustarkastelu, jonka tuloksena arvioitiin laitteen sisäistä ja absoluuttista tarkkuutta.

Testimittaukset suoritettiin eri puolilla Helsinkiä ajalla 20.2.-29.3.2001. Ajankohdan olosuhteet olivat hyvin talviset, mikä ilmenee myös mittauspöytäkirjojen merkinnöistä (liitteet 3-7). Luonnollisesti olosuhteet täytyi ottaa huomioon mittauksia tehtäessä. Lämpötilojen tasaantuminen varmistettiin asettamalla laitteet ulkoilmaan noin puoli tuntia ennen mittausten suorittamista. Kojearmat pystytettiin vähälumisille paikoille ja kolmijalkojen kärjet sekä kilpikonnat poljettiin tukevasti alustaansa.

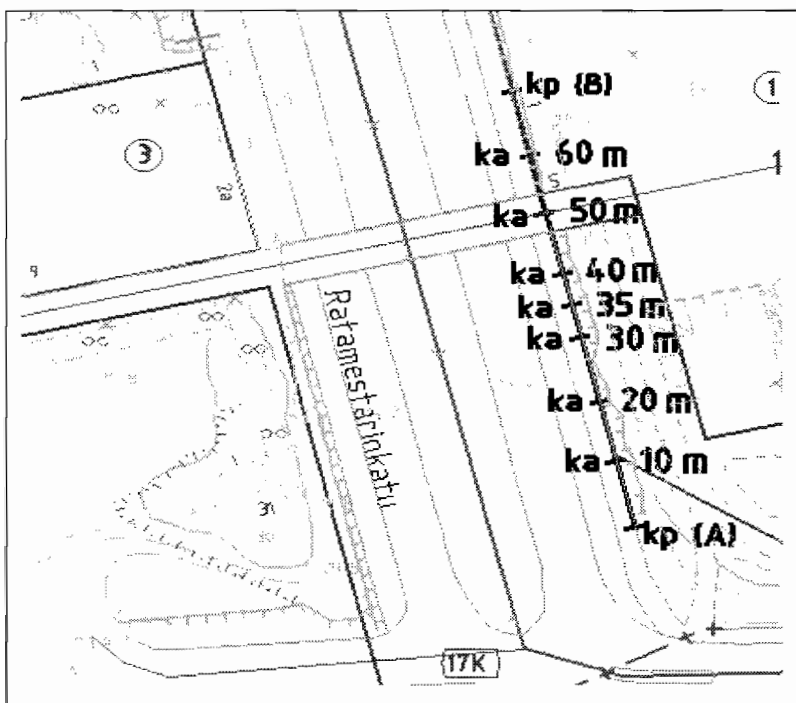
Koska tutkimuksissa haluttiin tarkastella myös vaaituskojeen absoluuttista tarkkuutta, lainattiin Helsingin kaupungin kaupunkimittausosastolta referenssikojeeksi Zeiss'in Dini T10 -tarkkavaaituskoje. Laite oli tarkasteltavaan kojeeseen nähden astetta tarkempi, sillä kompensattorin tarkkuus oli laitevalmistajan mukaan 0,2". Tarkkavaaitus kolmannen testin radalla toi kuitenkin ilmi eroja laitteiden välisissä tuloksissa. Tästä syystä Uudenmaan maanmittaustoimistolta lainattiin toinen referenssikoje; Leican NA3000, jonka tarkkuus oli tarkasteltavaan kojeeseen nähden samaa tasoa. Vertaamalla NA3003:n ja referenssikojeiden tuloksia päästiin analysoimaan tarkasteltavan kojeen absoluuttista tarkkuutta.

Tutkimuksen referenssimittaukset suoritettiin yleisiin tarkkavaaituksesta annettuihin ohjeisiin pohjautuen (3, s. 22 sekä 4, p. 11-13). Yleisistä ohjeista poiketen mittauksissa käytettiin vain yhtä invarlattia. Tämä johtui siitä, että lattamiehiä oli rajallisesti. Latta-alustoina käytettiin kahta metallista kilpikonaa. Havaintoetäisyydet olivat suhteellisen lyhyitä, noin 20 metrisiä ja taakse-eteen havaintojen pituudet mitoitettiin metrin tarkkuudella yhtä pitkiksi. Lattahavainnot tehtiin järjestyksessä taakse-eteen / eteen-taakse (TEET). Tehtyään ensimmäisen havainnon eteenpäin havaitsija hiukan pyöräytti kaukoputkea ja suoritti tähtäyksen uudestaan. Jokaisella kojeasemalla havaintoja seurattiin laskemalla havaintojen välinen erotus. Tulosten raja-arvona pidettiin 0,25 millimetriä, jonka ylittyessä havainnot uusittiin. Referenssilaitteiden tarkistus tapahtui päivittäin ennen tarkkavaaitusten suorittamista.

4.1.1 Mittausten suunnittelu ja toteutus

4.1.1.1 Testi 1: Havaintojen identtisyys

Ensimmäisessä vaaitustestissä tarkasteltiin kuinka eri mittaiset taakse-eteen -havainnot vaikuttavat vaaitustarkkuuteen. Testiä varten rakennettiin rata, jossa kaksi metallipulttia kiinnitettiin tukevasti kallioon 70 m:n etäisyydelle toisistaan. Tämän jälkeen asfaltoidulle alustalle, pulttien (kp) väliin merkittiin mittanauhaa apuna käyttäen kuusi kojeaseman paikkaa (ka), kymmenen metrin välein sekä yksi linjan puoliväliin (kuva 4).



ka = kojeasema

kp = korkeuspiste

10 m = etäisyys metreinä korkeuspisteeseen A

Kuva 4. Ensimmäisen testiradan kaaviokuva

Testimittaukset suoritettiin Ratamestarinkadun kevyenliikenteenväylällä, Itä-Pasilassa kahtena eri päivänä, 20.02.-01 sekä 01.03.-01. Varsinaisen testin ensimmäisenä toimenpiteenä pulttien välinen korkeusero määritettiin luvussa 4.1 kuvattujen toiminto-

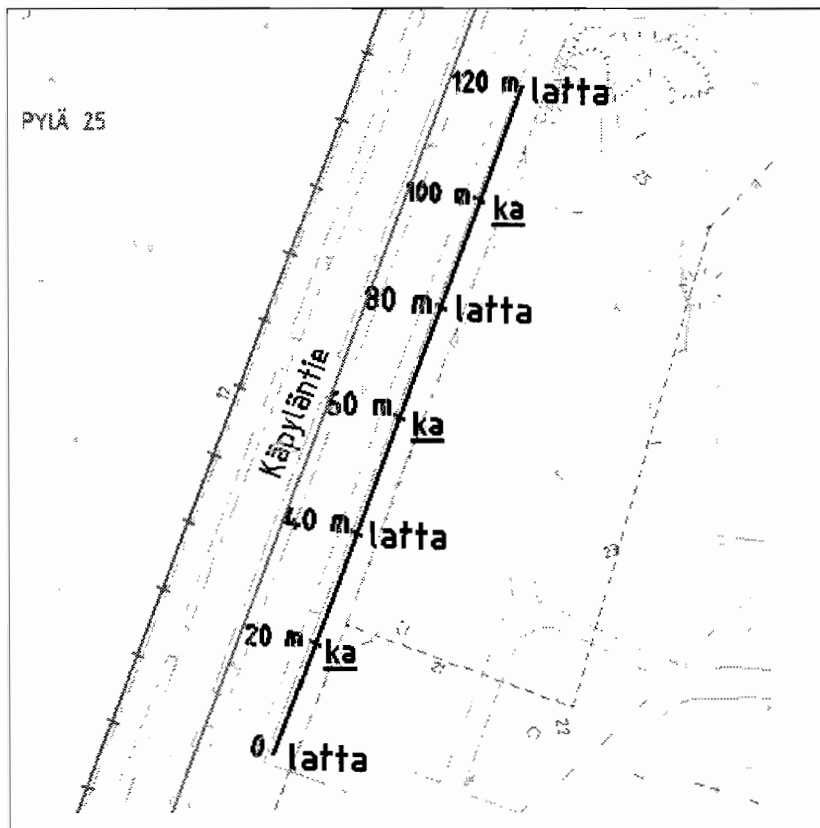
mallien mukaisena tarkkavaaituksena. Korkeuseroksi saatiin NA3003:lla 1835,7 millimetriä (mittauspöytäkirja liitteessä 4).

Tarkkavaaituksen jälkeen suoritettiin varsinainen mittaus. Havainnot tehtiin kunkin merkinnän (ka) kohdalta (kuva 4) havaitsemalla taakse (kp A:lle) sekä eteen (kp B:lle). Havaintoparien avulla kojeasemilta pystyttiin määrittämään pulttien väliset korkeuserot. Linjan ensimmäiseltä ja viimeiseltä kojeasemalta vaakasuoria vaaitushavaintoja ei kuitenkaan voitu tehdä, koska pulttien välinen korkeusero oli liian suuri.

4.1.1.2 Testi 2: Havaintoetäisyydet

Toisessa testissä määritettiin optimaaliset tähtäysetäisyydet. Testiä varten rakennettiin rata Käpylään, Käpyläntien vieressä kulkevalle tasaiselle kevyenliikenteenväylälle. Mittaukset suoritettiin 6.3, 10.3. sekä 26.03.2001.

Asfaltoidulle alustalle rakennettiin 120 metriä pitkä mittalinja, jonka päihin lyötiin metallipultit. Pulttien välinen korkeusero määritettiin jokaisena mittauspäivänä vaaitsemalla linja kolmeen kertaan edestakaisin NA3003:lla. Tähtäysetäisyydet vaihtelivat eri mittauskerroilla. Ne olivat 10, 20 ja 30 -metrin pituisia. Kuvasta 5 ilmenee koje- ja latta-asemien sijoittuminen 20 -metrin havaintoetäisyyksillä. Vastaavasti mittalinjalle muodostui yhdensuuntaisessa mittauksessa 10 ja 30 -metrin tähtäyksillä kojeasemia 6 ja 2 kappaletta sekä latta-asemia 7 ja 3 kappaletta. Havainnot tehtiin yksinkertaisin taakse-eteen havainnoin.



ka = kojeasema

latta = latta-asema

20 m = etäisyys metreinä lähtöpisteeseen

Kuva 5. Koje- ja latta-asemien sijoittuminen 20m havaintoetäisyyksillä

4.1.1.3 Testi 3: Tarkkuudenmäärittäminen

Kolmannessa testissä määritettiin tarkkavaaituskaluston sisäinen tarkkuus. Tämän lisäksi tuloksia verrattiin referenssilaitteistoilla saatuihin mittaustuloksiin. Vertailun avulla päästiin tarkastelemaan laitteen absoluuttista tarkkuutta.

Tarkkuuden lisäksi testissä tutkittiin latan tukemisen vaikutusta mittaustarkkuuteen. Ensimmäisenä mittauspäivänä latan tukemisessa ei käytetty apuvälineitä. Toisena päivänä tukena käytettiin muovista linjaseivästä. Tutkimustulokset eivät tältä osin tietenkään kerro absoluuttista totuutta latan tukemisesta, mutta suuntaa-antavasti tulokset ovat mielenkiintoisia. Lattamiehelle ei etukäteen kerrottu tutkimuksen tarkoituksista.

Mittaukset suoritettiin kahdessa osassa 14. ja 15.3.2001. Testi toteutettiin kansainvälisen ISO 8322-3 -standardin (Optical leveling instruments) mukaisesti (5). Sitä varten Käpylään, Käpyläntien suuntaiselle kevyenliikenteen-väylälle rakennettiin 250 metriä pitkä mittalinja, jonka päihin asetettiin tukevat kiintopisteet. Tässä tapauksessa käytettiin asfalttiin upotettuja, metallisia kiiloja.

Kuten mittauspöytäkirjoista ilmenee (liite 6), vaaitustarkkuuden kannalta olosuhteet olivat testin molempina päivinä hyvät. Myöskään lumi ja jää eivät häirinneet työskentelyä, sillä asfaltti oli sula. Tarkkuuden kannalta selvä häiriötekijä oli liikenne. Liikennealue sijoittui neljän ja kahdenkymmenenviiden metrin etäisyydelle linjasta. Mittausaikana liikennettä oli keskimäärin neljäsataa ajoneuvoa tunnissa.

Kumpanakin mittauspäivänä pulttien välinen korkeusero vaaittiin viiteen kertaan edestakaisin. Havainnot tehtiin yksinkertaisina taakse-eteen havaintoina. Havaintoetäisyyksien määrittämisessä käytettiin niin sanottua ”askelmittaa”. Etäisyydet olivat alle 20 metrisiä.

Testiradalla kojeasemat sijoituivat suhteellisen tarkasti linjan samoilta kohdille mittauksia toistettaessa. Vaikka alusta oli asfaltoitu, voitiin maapohjan suhteen huomata eroavaisuuksia. Liikenteen aiheuttaman tärinän pystyi aistimaan mittauksia tehtäessä. Tietyillä kojeasemilla tärinä oli tavallista suurempaa. Havaitisijalle tämä ilmeni latan heilumisena kaukoputken viivaristikon suhteen. Tästä syystä havaitisijan täytyi koko havainnointihetken seurata latan liikkeitä. Tarpeen mukaan epäilyttävät havainnot uusittiin.

4.1.2 Mittaustulokset

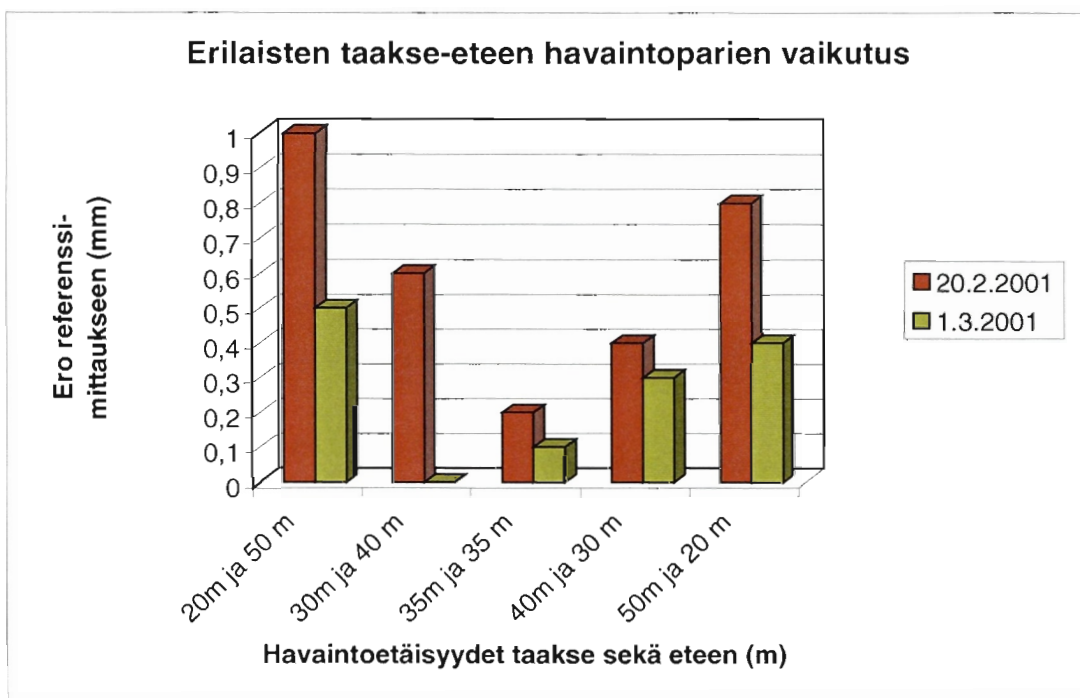
4.1.2.1 Testi 1: Havaintojen identtisyys

Testin 1 mittaukset toistettiin kahteen kertaan ja tulokset ovat molemmilta päiviltä samansuuntaiset. Niistä voidaan tulkita kuinka eri mittaiset havaintoparit vaikuttavat mittaustarkkuuteen.

Tulokset ilmenevät tiivistetysti kuvasta 6 (mittauspöytäkirjat liitteessä 3 ja 4). Kuvan vaakarivi ilmoittaa havaintoetäisyydet metreissä jokaiselta kojeasemalta. Pystyakseli kertoo syntyneen poikkeaman itseisarvon referenssimittaukseen nähden (mm). Referenssinä, eli nolla-arvona pidetään tarkkavaaituksesta saatua tulosta.

Kuvasta 6 on selvästi havaittavissa, että eri mittaisia havaintopareja käytettäessä vaaitustulokset vääristyvät. Syntyvä virhe johtuu mittaussäteen taittumisesta, eli refraktiosta sekä vaaituskojeen horisonttitason epävarmuudesta, eli kojevirheestä (ks. 3.1.2 laitteiston seurantakalibrointi). Mittaustulosten vaihtelut eri päivinä johtunevat osaltaan refraktion vaihtelusta, muuttuneesta kojevirheestä sekä mittausten epävarmuudesta.

Vaikka tulosten mukaan poikkeamien suuruus on kymmenesosamillimetristä millimetriin, eivät tulokset tietenkään kerro absoluuttisia virhearvoja, joita voisi soveltaa yleisesti. Tähän on syynä olosuhteiden ja kojevirheen yksilöllisyys. Tuloksista on kuitenkin selvästi havaittavissa, että havaintoetäisyyksien lähestyessä toisiaan tulokset paranevat. Virhelähteiden vaikutus ei tällöin katoa, vaan syntyvät virheet kumoavat toisensa.



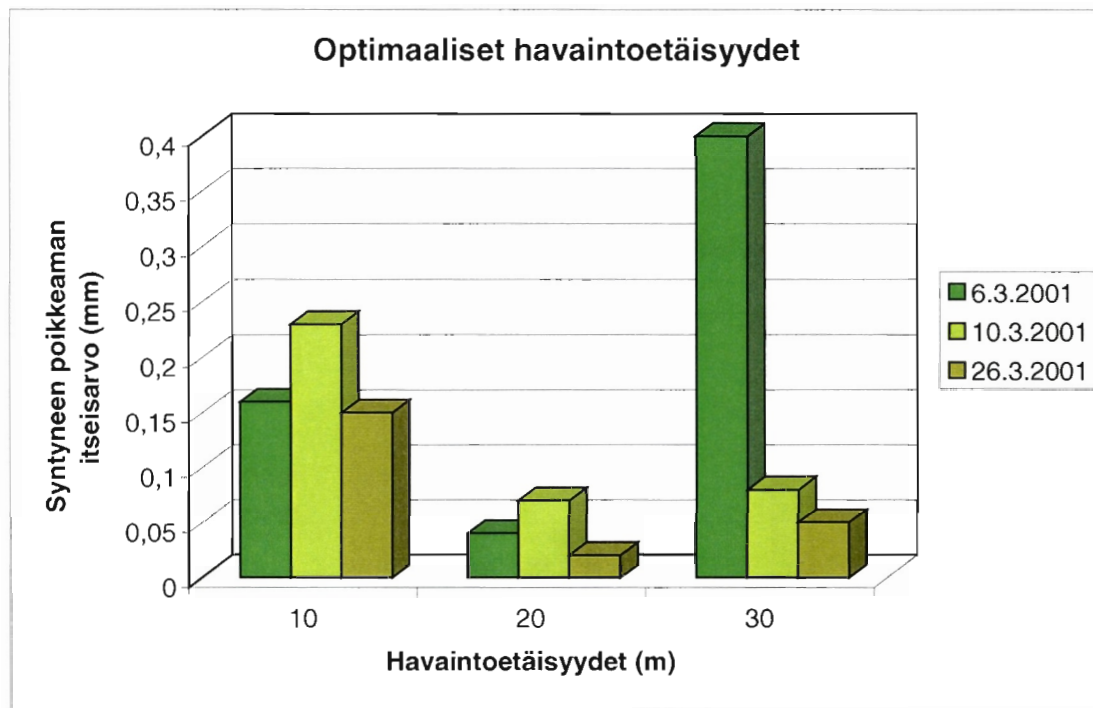
Kuva 6. Havaintoetäisyyksien vaikutus mittaustuloksiin

4.1.2.2 Testi 2: Havaintoetäisyydet

Testissä kaksi edestakaisen mittauksen osia käsitellään erillisinä. Tällä tavoin päästään tarkastelemaan mittausten sisäistä tarkkuutta. Mittaustulosten analysointi tapahtuu arvioimalla yksittäisen mittauksen poikkeamaa edestakaisen mittauksen keskiarvoon.

Testin tulokset ilmenevät kuvasta 7 (mittauspöytäkirjat liitteestä 5). Mittaustulokset ovat kolmelta eri päivältä. Kuvan vaakarivi ilmoittaa metreissä eri mittauskerroilla käytetyt havaintoetäisyydet. Pystyriivillä kerrotaan syntyneen poikkeaman itseisarvo metreissä.

Tuloksista on nähtävissä, että jokaisena päivänä kymmenen metrin tähtäyksillä poikkeamien itseisarvo on keskimäärin hiukan alle 0,2 mm. Vastaavasti kahdenkymmenen metrin havaintoetäisyyksillä poikkeamat mittausten keskiarvosta ovat hyvin pieniä, tässä tapauksessa selvästi alle kymmenesosamillimetrin luokkaa. Kolmenkymmenen metrin tähtäyksillä hajonta ovat kahdessa viimeisessä mittauksessa selvästi alle kymmenesosamillimetrin. Ensimmäinen mittaus tekee kuitenkin poikkeuksen. Siinä hajonta on neljä kymmenystä. Hajonta johtunee jostain ulkoisesta tekijästä, kuten latan kallistumisesta tai tärinästä.



Kuva 7. Tarkkuuden vaihtelu eri havaintoetäisyyksillä

Otoksen perusteella voidaan päätellä, että kahdenkymmenen metrin tähtäysetäisyyksillä sisäinen toistotarkkuus on parhaimmillaan. Tulokset vastaavat laitevalmistajan suosituksia, joiden mukaan tarkkavaaituksessa tähtäysetäisyyksien tulee olla alle 30-metrisiä (4, p. 13). Tulosten luotettavuutta voitaisiin lisätä toistamalla koe useita kertoja.

4.1.2.3 Testi 3: Tarkkuuden määrittäminen

Testin tulokset ilmenevät kahden seuraavan sivun taulukoista 1a ja 1b (mittauspöytäkirjat liitteessä 6). Molempien päivien mittauksista tuotettiin erilliset laskelmat. Taulukoissa kerrotaan aluksi mittausajankohdan olosuhteista. Tämän jälkeen taulukoiden toisesta sarakkeesta löytyy pulttivälin korkeusero kussakin edestakaisessa mittauksessa. Edestakaisten mittausten osia on tällöin käsitelty erillisinä. Kolmannesta sarakkeesta ilmenee mittausten keskiarvo kyseisenä päivänä. Sarakkeesta neljä puolestaan löytyy yksittäisten mittausten poikkeama päivän keskiarvosta ja sarakkeesta viisi mittausten varianssi.

Mittausten perusteella ilmenee, että laitteella saavutettu sisäinen tarkkuus on erittäin hyvä. Laittevalmistaja lupaa yleisesti, että NA3003:lla saavutetaan edestakaisessa vaaituksessa sisäinen tarkkuus 0,4 mm/km. Vastoin ennako-odotuksia, näihin tarkkuusarvoihin päästiin myös geoteknisen osaston tarkkavaaituskojeella liikenteen aiheuttamasta tärinästä huolimatta. Keskimääräinen kilometrikeskivirhe (S_7) oli parhaimmillaan hiukan alle 0,4 mm/km.

Zeiss'in Dini T10:llä tarkkavaaittuna pulttien väliseksi korkeuseroksi saatiin 1497,6 mm. Eroa oli NA3003:lla saatuihin tuloksiin +1,3 mm. Maanmittauslaitoksen NA3000:lla mitattuna korkeusero oli 1495,5 mm. Eroa vastaavasti -0,8 mm. NA3003:lla saadut tulokset vastaavat melko tarkasti näiden tulosten keskiarvoa. Tarkkavaaitustulosten lisäksi myös tutkimusmittausten viidennen testin tuloksia voidaan käyttää NA3003:n referenssinä. Kyseisessä testissä sama korkeusero määritettiin takymetrillä useita kertoja. Tulokset löytyvät kohdasta 4.2.2.2 ja mittauspöytäkirjat liitteestä 8.

Erot kojeiden välisissä tuloksissa olivat odotettavissa. Eroja voidaan selittää osaltaan mittausten epävarmuudella ja osaltaan laitteiden välisillä eroilla. Jos painumamittauksia tehdään toistuvasti vain yhdellä laitteistolla, ei kojeen absoluuttisella tarkkuudella ole juurikaan väliä. Ongelmia tulee silloin, kun mittauskalustoa jostain syystä joudutaan vaihtamaan. Tällöin tulisi mahdollisuuksien mukaan järjestää mittauksille niin sanottu siirtymäkausi, jolloin mittaukset suoritettaisiin sekä vanhalla että uudella kalustolla.

Testitulokset kertovat myös monenlaista suuntaa-antavaa tietoa latan tukemisen vaikutuksista. Kuten taulukoista 1a ja 1b nähdään, korkeuserojen keskihajonta (s_k) on ilman tukia reilusti suurempaa kuin tukien kanssa. Tämän seurauksena keskimääräinen kilometrikeskivirhe (s_7) on suurempi ilman tukia. Eri päiviltä mittaustulosten keskiarvot ovat silti sadasosamillimetrin tarkkuudella samat. Tulosten luotettavuutta voitaisiin lisätä toistamalla testi uudestaan erilaisissa olosuhteissa sekä latan tukien kanssa että ilman.

4.1.3 Tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä

4.1.3.1 Kompensaattorin toiminta-alueella pysyminen

Kokemus on osoittanut, että vaaituskojeen kompensaattori pysyy parhaiten toiminta-alueellaan silloin, kun taakse-eteen havaintoparit tehdään suorassa linjassa kuvan 8 mukaisesti. Kuvassa näkyvät palkit kuvaavat lattojen paikkaa, rastit kojeasemia ja suorat viivat tähtäyssäteiden suuntaa. Kuvan mukaisessa tilanteessa kojeen karkeatasaus aloitetaan normaalisti kaukoputken osoittaessa kohti takana olevaa lattiaa. Tämän jälkeen kojetta pyöräytetään vaaka-akselinsa ympäri 180°. Tässä asennossa suoritetaan tasauksen toinen vaihe, jolloin mahdollinen rasiatasaimessa esiintyvä kuplan poikkeama puolitetaan.

ISO 8322-3 : 1989 (E)

Taulukko 1a) –Maastohavainnot ja laskelmat

Päiväys: 14.3.2001.....
Paikka: Käpylä.....
Henkilöstö: Savolainen kojeessa ja Silvennoinen lattamiehenä.....
Laitteisto: Leica NA3003.....
Olosuhteet: +1 aste lämmintä, aamupäivällä tyynä, kahden viimeisen sarjan aikana tuuli hiukan, pilvinen
Sarjat:.....
Muuta: Latta pidettiin pystyssä ilman tukisauvaa, asfaltti jäätön ja lumeton.....

Mittaus	Korkeusero mm	Keskiarvo mm	Poikkeama (v) mm	Varianssi (v ²) mm ²
1	2	3	4	5
1. Mennessä	1495,98		-0,327	0,107
1. Tullessa	1495,31		-0,997	0,994
2. Mennessä	1496,64		+0,333	0,111
2. Tullessa	1496,06		-0,247	0,061
3. Mennessä	1496,80		+0,493	0,243
3. Tullessa	1496,54		+0,233	0,054
4. Mennessä	1497,00		+0,693	0,480
4. Tullessa	1496,41		+0,103	0,011
5. Mennessä	1496,50		+0,193	0,037
5. Tullessa	1495,83		-0,477	0,228
		1496,307	$\Sigma v = 0,000$	$\Sigma v^2 = 2,326$

$$s_k = \sqrt{(2,326/10)} = 0,48 \text{ mm}$$

$$s_1 = \sqrt{(2,33/9)} = 0,51 \text{ mm}$$

$$s_1(km) = 2,0 \cdot 0,51 \text{ mm} = 1,02 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 1,02 \text{ mm} / \sqrt{2} = 0,72 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 0,7 \text{ mm}$$

ISO 8322-3 : 1989 (E)

Taulukko 1b) –Maastohavainnot ja laskelmat

Päiväys: 15.03.2001.....
Paikka: Käpylä
Henkilöstö: Savolainen ja Silvennoinen
Laitteisto: Leica NA3003.....
Olosuhteet: +1 aste lämmintä, aamupäivällä hieman tuulta, iltapäivällä tyyntä, pilvinen
Sarjat:
Muuta: Latta tukemisessa käytettiin linjaseivästä, asfaltti jäätön ja lumeton.....

Mittaus	Korkeusero mm	Keskiarvo mm	Poikkeama (v) mm	Varianssi (v ²) mm ²
1	2	3	4	5
1. Mennessä	1496,53		+0,214	0,0458
1. Tullessa	1496,53		+0,214	0,0458
2. Mennessä	1496,35		+0,034	0,0012
2. Tullessa	1496,21		-0,106	0,0112
3. Mennessä	1496,68		+0,364	0,1325
3. Tullessa	1495,81		-0,506	0,2560
4. Mennessä	1496,29		-0,026	0,000676
4. Tullessa	1496,07		-0,246	0,0605
5. Mennessä	1496,48		+0,164	0,0269
5. Tullessa	1496,21		-0,106	0,0112
		1496,316	Σv=0,000	Σv ² = 0,592

$$s_k = \sqrt{(0,592/10)} = 0,24 \text{ mm}$$

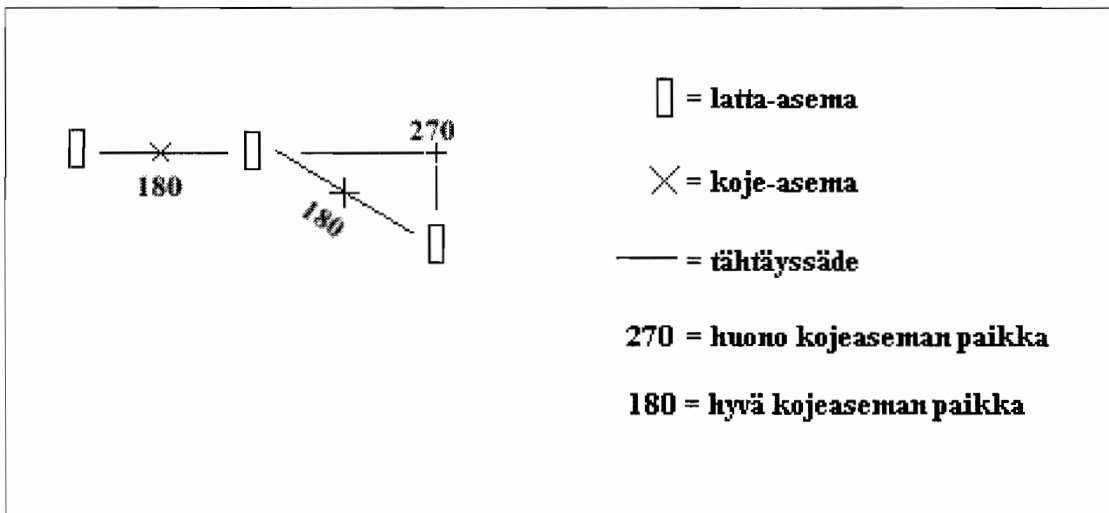
$$s_1 = \sqrt{(0,59/9)} = 0,26 \text{ mm}$$

$$s_1(km) = 2,0 \cdot 0,26 \text{ mm} = 0,52 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 0,52 \text{ mm} / \sqrt{2} = 0,37 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 0,4 \text{ mm}$$

Kuvaan 8 on toiselle kojeasemalle piirretty myös vaihtoehtoinen paikka (muodostuva kulma $\neq 180^\circ$). Kyseistä asettelua kannattaa välttää, koska tällöin kuplan poikkeamaa on vaikea korjata.



Kuva 8. Kojemasien asemat latta-asemiin nähden

4.1.3.2 Lattojen käyttö

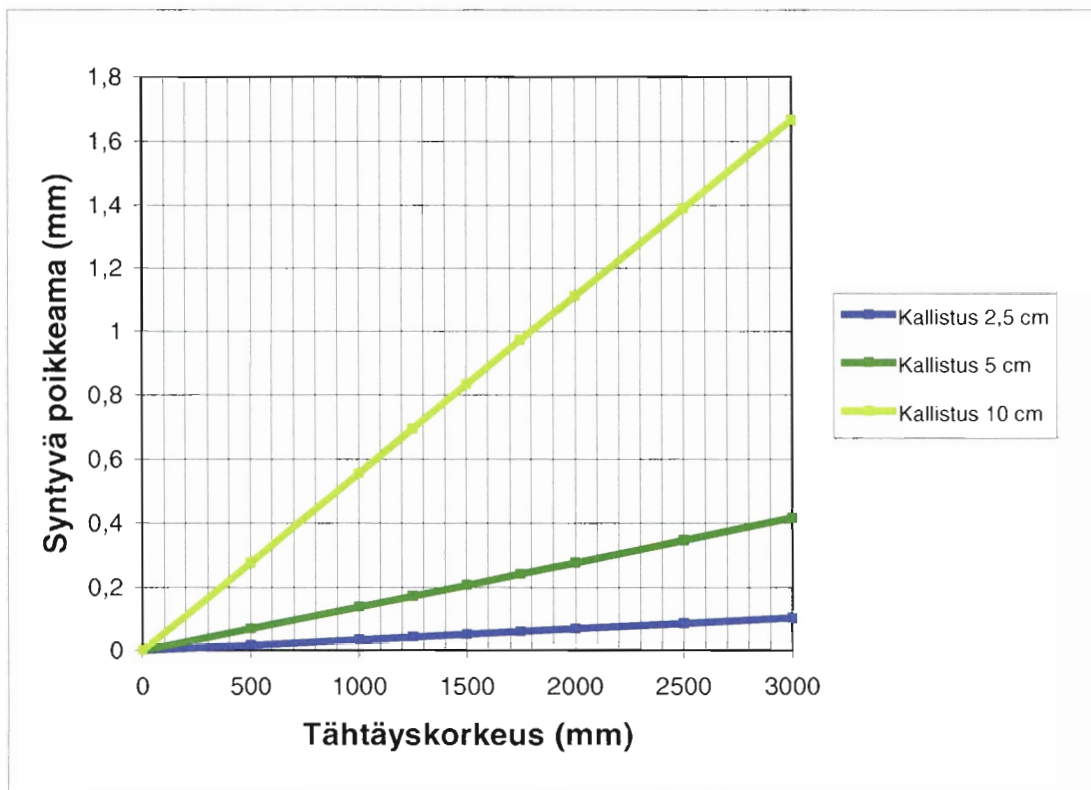
Latan asento

Mittauskohteesta ja keliolosuhteista riippuen lattaa ei aina pystytä pitämään aivan suorana. Painumamittauksissa ongelma ilmenee usein. Vaikeita kohteita ovat esimerkiksi seinään kiinnitetyt tarkkailupisteet ja betonirenkain suojatut painumalevyt. Mittaustarkkuuden kannalta asialla on olennainen merkitys, koska koje ei tunnista latan kallistuneisuutta. Kuvasta 9 ilmenee yhden tähtäyksen osalta poikkeaman itseisarvo, kallistettaessa kolme metriä pitkää lattaa eteen / taaksepäin. (Esimerkki yksittäisestä laskutoimituksesta liitteessä 2.)

Kuten kuvasta 9 näkyy latan kallistaminen voi aiheuttaa vaaitustuloksiin suuria poikkeamia. Jonomittauksessa pienet kallistuksen poikkeamat voivat kasautua, latta täytyy siis tukea. Väitettä puoltavat empiirisistä mittauksista saadut tulokset kohdassa 4.1.2.3.

Kahden latan käyttö

Geoteknisellä osastolla mittaukset suoritetaan aina yhdellä latalla. Yleisesti mittaus- tekniikassa suositellaan kahden latan käyttöä. Yleisen käytännön kannalla on myös Jukka Takalo Geodeettiselta laitokselta. Hänen mielestä "yhden latan käyttö ei metodisesti ole suositeltavaa" (6). Väitteensä hän perustelee menetelmän epävarmuudella. "Kahden latan käyttö nopeuttaa vaaitusta,



Kuva 9. Kolme metriä pitkän latan kallistamisesta aiheutuva poikkeama

jolloin koje sekä latta-alustat ovat vähemmän aikaa alttiina esimerkiksi sulamiselle ja painumiselle.” Myös kaksinkertaisten havaintojen teko (ks. 4.1.3.4) on kahden latan avulla huomattavasti helpompaa kuin yhdellä. Lopuksi Takalo korostaa lattojen kalibroinnin merkitystä (ks. 3.1.1 Laitteiston määrityskalibrointi).

Yleisestä käytännöstä riippumatta yhden latan käytössä on myös hyötyjä. Pienemmästä henkilöstömäärästä ja pienemmistä kalustoinvestoinneista johtuen mittauskustannukset ovat oleellisesti pienemmät.

4.1.3.3 Olosuhteet

Painumaseurannan mittauksia toistettaessa olosuhteiden tulisi eri mittauskerroilla olla samankaltaiset. Olosuhteet tarkoittavat tässä yhteydessä käytettäviä lähtö- ja sulkupisteitä (ks. luku 2, valvontaverkko), mittausten suorittamista sekä säätäkijöitä.

Sääolosuhteiden vaikutus vaaitustarkkuuteen on merkittävä. Mittaaja voi huomioida sääolosuhteet valitsemalla vaaitusajankohdat järkevästi sekä tunnistamalla eri säätäkijöiden vaikutukset. Esimerkkeinä erilaisista säätäkijöistä voidaan mainita mm. tuuli ja lämpötilaeroista johtuva refraktio.

Tuuli

Painovoiman avulla toimivan kompensattorin kannalta tuulinen sää on erittäin ongelmallista silloin, kun tuulen aiheuttamana koje sekä jalusta heiluvat eikä kompen-

saattori pysty tasaantumaan. Liikkeen takia tähtäyssäteen suunta poikkeaa vaakasuorasta tasosta ja näin havaintoon aiheutuu virhettä. Testimittausten yhteydessä huomattiin, että NA3003:lla mitatessa tuulen aiheuttama poikkeama oli kahden havainnon välillä suurimmillaan muutamia kymmenesosamillimetrejä. Vaikutus on hyvin samankaltaista ja samaa suuruusluokkaa kuin liikenteen vaikutus.

Havaintosijalle tuulen aiheuttamat liikkeet ilmenevät selkeimmin kaukoputken viivaristikon ja latan välisenä heilumisena. Tuulisella säällä havaintosijan tulisi koko havainnoinnin ajan seurata liikkeitä katseellaan. Epäilyttävät havainnot tulisi aina uusia.

Refraktio

Osaltaan ilmamassojen lämpötilaeroista ja liikkeistä johtuen kaukoputkesta lähtevä tähtäyssäde ei aina kulje aivan vaakasuorassa tasossa. Lävistäessään liikkuvia lämpökerroksia tai kohdatessaan erilaisten ilmamassojen rajapintoja tähtäyssäde taittuu. Jos taittuminen on erisuuruista taakse-eteen havaintojen välillä, syntyy virhettä.

Myös refraktion hättävää vaikutuksia voidaan torjua valitsemalla vaaitusajankohdat järkevästi. Säiden puolesta paras ajankohta on hiukan pilvisellä tai sateisella hetkellä, jolloin ilman väreily on vähäistä. Yleisten oppien mukaan vaaitusta ei tulisi suorittaa muutamina tunteina auringon nousun ja laskun eikä kuumimman keskipäivän aikoihin, jolloin ilman ja maan väliset lämpötilaerot ovat suurimmillaan (4, p. 11 sekä 6, s. 318).

Yhtä pitkien taakse-eteen havaintoparien tärkeyttä voidaan korostaa myös refraktion osalta. Asiaa havainnollistaa työn ensimmäisestä vaaitustestistä saadut tulokset (ks. 4.1.2.1). Eri mittaisilla tähtäysetaisyysilla syntynyt virhe johtuu osittain juuri refraktiosta. Jos tähtäysetaisyydet ovat yhtä pitkiä, ja refraktion suunta ja suuruus on sama koko havaintoparin osalta, kumoutuu virheiden vaikutus.

Poikkeus yhtä pitkille havaintoetaisyyksille on mäkinen tai alustaltaan vaihteleva maasto. Tällöin refraktion suuruus saattaa vaihdella. Vaaitushenkilökunnan tulisi huomioida, että havaintoparien taakse-eteen havaintoja ei tulisi tehdä erilaisten alustojen päällä. Esimerkkinä mainitaan vaikka asfaltti ja heinikko. Asfaltin päällä ilman väreily on huomattavasti suurempaa kuin heinikon päällä. Tällöin taittuminen on erisuuruista ja havaintoparin osalta syntyy virhettä.

4.1.3.4 Kaksinkertaiset taakse-eteen-havainnot (TEET)

Kaksinkertaisten havaintojen teolla on osaltaan tarkoituksena varmistaa vaaitustyön korkea laatu. Tämä tarkoittaa sitä, että havaintojen teolle määritellään ennakolta toistovaatimukset eli toleranssit. Käytännössä menetelmän avulla voidaan riittävän aikaisin eli mittaushetkellä havainnoida ulkopuolisia häiriötekijöitä, kuten sulamisen aiheuttamaa painumista, latan heilumista, tärinää, jne.

Metodisesti kaksinkertaisten havaintojen teko onnistuu kaikkein parhaiten kahta lattaa käyttämällä, mutta kuten tutkimustuloksista nähdään, se voidaan suorittaa myös yhden latan avulla. Lattamieheltä vaaditaan kuitenkin erityistä varovaisuutta laskiessaan latan uudelleen takana olevalle latta-alustalle.

Tämän tutkimuksen osalta kaksinkertaisten havaintojen merkitystä voidaan tutkia tarkkavaaitusten mittauspöytäkirjoista (liitteet 4 sekä 7). Sieltä ilmenee, että hyväksyttyjen kaksinkertaisten havaintojen erot ovat alle 0,15 mm. Ennakoon asetettiin toleranssiksi 0,25 millimetriä. Jos tämä olisi ylitetty, havainnot olisi uusittu.

4.1.3.5 Vaaitustulosten tasoittaminen

Vaaitustulosten tasoittaminen tarkoittaa yksinkertaisimmillaan virheiden jakamista tasapuolisesti kaikille tuntemattomille pisteille. Jaon perusteena käytetään tehtyjä mitauksia. Esimerkkinä vaaitus, joka suljetaan lähtöpisteeseen. Kun lähtökorkeutta ja sulkukorkeutta verrataan toisiinsa, saadaan sulkuvirhe. Tämä virhe tasoitetaan pisteiden etäisyyksien (etäisyys lähtöpisteeseen) suhteessa jonon pituuteen, jolloin jokainen piste saa korjauksen.

Pidemmälle viedyssä esimerkissä lisätään tulosten luotettavuutta mittaamalla vaaitusreitti kahteen kertaan tai edestakaisin. Tällä tavoin saadaan toisistaan riippumattomia havaintoja, joita vertaillaan keskenään.

Tarkkavaaitukseen liittyy oleellisesti tulosten tasoittaminen. Tämä jälkikäsitteily tapahtuu varsinaisten maastomittausten jälkeen. Yleensä tasoittaminen tapahtuu tietokoneavusteisesti erilaisia tasoitusohjelmia apuna käyttäen. Periaate eri tasoitusohjelmissä on yleensä sama. Tasoitus tapahtuu pienimmän neliösumman periaatteen mukaisesti. Laskutavasta riippuen ohjelmien lopputulokset kuitenkin poikkeavat yleensä hieman toisistaan. Esimerkki yksittäisestä tasoitusohjelmasta on X-position – verkkotasoitushjelma.

Kuten aikaisemmin todettiin vaaitusjonot ovat solmupisteiden välisiä osia. Painumamittauksissa on yleistä, että osa tarkkailtavista pisteistä mitataan niin sanotulla pinta-vaaitusohjelmalla. Tällöin jonon keskeltä tehdään yksittäinen havainto sivussa olevalle kohteelle. Metodisesti toimenpide on epäilyttävä, koska mitatulle pisteelle ei saada minkäänlaista kontrollia. Lisäksi vaikeutena on se, että tasoitusohjelmat eivät kykene määrittämään tasoitettua korkeutta tällaiselle pisteelle. Tilanteelta kuitenkin välttyään, jos kaikki pisteet mitataan jono-ohjelmalla. Mikäli samalta kojeasemalta havaitaan usealle pisteelle, tulee näille pisteille tehdä sekä eteen että taakse havainnot.

Sulkuvirhe ilmoittaa sisältyykö mittauksiin karkeita virheitä, mutta mittauksen varsinaisesta tarkkuudesta se kertoo hyvin suppeasti. Vaaitustarkkuuden selvittämiseksi on tarkasteltava useampia tarkkuutta kuvaavia arvoja. X-position - verkkotasoitushjelmaa käytettäessä tulee tarkastella ainakin seuraavia (8):

- Karkeat virheet
- Redundanssit
- Absoluuttinen tarkkuus (keskivirheet)

Karkeiden virheiden testaus ja poistaminen on olennainen osa mittauksen laadunvalvontaa. Karkeat virheet ovat havaintojoukkoon tilastollisesti sopimattomia havaintoja, siis keskimääräistä suurempia tai pienempiä arvoja. Huonot havainnot poistetaan tasoituksesta tuhoamalla tai deaktivoimalla ne.

Redundanssi luo perustan vaaitusverkon luotettavuudelle. Sitä kuvataan arvolla, joka on nollan ja yhden välillä. Mitä suurempi arvo, sitä parempi on verkon rakenne ja kyky vastustaa kaikkien häiriötekijöiden vääristävää vaikutusta. Esimerkiksi arvo 0,76 kertoo, että jäännösvirheissä nähdään keskimäärin 76% havaintojen todellisesta virheestä. Mahdolliset karkeat virheet ovat tällöin helposti löydettävissä.

Tasoitettujen koordinaattien tarkkuutta, eli absoluuttista tarkkuutta visualisoidaan virhepalkein. Ne kertovat satunnaisten virheiden kasautumisesta pienimmän neliösumman tasoituksessa (PNS). Tyypillisesti absoluuttista tarkkuutta kuvataan piste-keskivirheen avulla eli 68 %:n varmuustasolla, mutta se voidaan ilmoittaa myös 95:n ja 99 %:n varmuustasolla.

Absoluuttiseen tarkkuuteen liittyen voidaan mittauksille asettaa tietty tavoitetarkkuus. Laskettuja tarkkuuden arvoja tarkastellaan tällöin vertaamalla niitä suurimpiin sallittuihin arvoihin.

4.2 Takymetrimittaus

4.2.1 Mittausjärjestelyt

Testeissä neljä ja viisi tutkittiin geoteknisen osaston takymetriä. Tietoa hankittiin laitteen mittausominaisuuksista ja –tarkkuudesta, ja siten selvitettiin takymetrimittausten sijoittuminen painumamittausten laatuluokkiin.

Mittauksissa käytettiin prismaa, jonka sauva oli 1,5 metriä pitkä. Ennen mittauksia sauvan kiristin pyöräytettiin tiukalle, ettei korkeudessa tapahtuisi muutoksia. Mitattavalla pisteellä prismamies asetti sauvan kärjen aina pultin/kiilan korkeimmalle kohdalle. Sauvan tukemisessa käytettiin apuna linjaseivästä.

Geoteknisen osaston takymetrissä on ns. autolock –ominaisuus, joka tarkoittaa, että koje tekee tähtäyksen prismaan automaattisesti. Tutkimusmittauksissa käytettiin em. automaattitähystä, koska näin pystyttiin eliminoimaan havaitsijasta johtuvat virheet.

4.2.1.1 Testi 4: Havaintojen identtisyys

Testissä tutkittiin eri mittausten taakse-eteen havaintojen vaikutuksia takymetrillä tehtävään korkeudensiirtoon (vrt. 4.1.2.1 Testi 1: Havaintojen identtisyys). Paikka Ratamestarinkadun kevyenliikenteenväylä Itä-Pasilassa ja mittaukset suoritettiin yhdessä osassa 1.3.2001. Koska testi on laitteistoa lukuun ottamatta identtinen ensimmäisen vaaitustestin kanssa (ks. 4.1.1), toimivat aikaisemmin saadut tulokset (ks. 4.1.2.1) referenssinä tälle testille.

4.2.1.2 Testi 5: Mittaustarkkuuden määrittäminen

Takymetrin mittaustarkkuutta tutkittiin ISO 8322-3 -standardin mukaisesti (5). Vaikka kyseinen standardi on tarkoitettu vaaituskojeiden testaukseen, soveltui se myös takymetrin sisäisen toistotarkkuuden määrittämiseen. Absoluuttista tarkkuutta analysoitiin vertailemalla testin tuloksia kolmannen testin tuloksiin (ks. 5.1.2.3).

Tarkkuuden lisäksi testissä tutkittiin kuinka erimittaiset taakse-eteen havainnot vaikuttavat takymetrin korkeudensiirtotarkkuuteen. Testin ensimmäisessä osiossa koje pystytettiin linjan puolivälin (125m) kohdalle. Toisessa osiossa havainnot taakse päin olivat 180 metriä pitkiä ja vastaavasti eteen 70 -metrisiä.

Mittaukset suoritettiin kahdessa osassa 30.03.2001 sekä 5.04.2001 Käpylässä, Käpylätien kevyenliikenteenväylällä. Ennen havaintojen tekoa syötettiin takymetrille sääkorjaukset. Havaintojen teossa käytettiin apuna automaattista tähtäystä ja korkeudensiirto pisteeltä toiselle tapahtui yhdeltä kojeasemalta. Havaintojen teossa mitattiin ensin kymmenen kappaletta taakse tähtäyksiä. Tulosten luotettavuuden vuoksi kunkin tähtäyksen välillä prismaosuus nostettiin irti pultista ja asetettiin sen päälle uudelleen. Myös kojeen tähtäyssäde käännettiin pois prismasta ja koje suoritti uuden kohdistuksen. Eteen –havaintoja tehtäessä havaintoja tehtiin vastaavasti kymmenen kappaletta, mutta prisma nostettiin pultista irti joka toisen havainnon jälkeen.

Taulukko 2. Erimittaisten havaintojen vaikutus takymetrin mittaustuloksiin

Ensimmäinen päivä:

TAAKSE		KORKEUSERO LASKETTUNA	
Eteen		yksittäisistä havaintopareista (mm):	Eron itseisarvo (mm):
10	60	1836	0
20	50	1835	1
30	40	1836	0
35	35	1836	0
40	30	1836	0
50	20	1836	0
60	10	1837	1
Tarkkavaahtuna NA3003:lla:		1835,7 mm	

4.2.2 Mittaukset ja mittaustulokset

4.2.2.1 Testi 4: Havaintojen identtisyys

Taulukosta 2 ilmenevät tiivistetysti testin tulokset. Ensimmäinen ja toinen pystyrivi ilmoittavat havaintoetäisyydet jokaiselta kojeasemalta. Kolmas pystyrivi ilmoittaa pulttien välisen korkeuseron havaintopareista laskettuna. Neljänneltä riviltä ilmenee korkeuseron poikkeama referenssilaitteen tuloksiin verrattuna.

Takymetrin lukematarkkuudesta johtuen tulosten analysointi on vaikeaa. Vertaamalla testituloksia ensimmäisen vaaitustestin tuloksiin (ks. liite 3), löydetään mittausten väliltä yhdenmukaisuutta. Taulukosta 2 nähdään, että linjan alkupäästä löytyy havaintopari, jonka mukaan pulttien välinen korkeusero on 1835 mm, eli keskiarvoa pienempi. Loppupäästä vastaavasti 1837 mm, eli keskiarvoa suurempi. Vaaitustestin tulokset ovat samansuuntaisia. Linjan alku päässä poikkeama on (-) -merkkinen keskiarvon suhteen ja loppupäässä vastaavasti (+) -merkkinen. Poikkeama johtunee mittaussäteen taitumisesta eli refraktiosta.

4.2.2.2 Testi 5: Mittaustarkkuuden määrittäminen

Kahden seuraavan sivun taulukoissa 3a ja 3b esitetään, tutkittavan takymetrin tarkkuusominaisuuksia suuren otoksen perusteella (mittauspöytäkirjat liitteessä 8). Taulukoissa kerrotaan aluksi mittausajankohdan olosuhteista. Tämän jälkeen taulukoiden toisesta sarakkeesta löytyy pulttivälin korkeusero jokaisessa edestakaisessa mittauksessa. Edestakaisten mittausten osia on tällöin käsitelty erillisinä. Kolmannesta sarakkeesta ilmenee mittausten keskiarvo kyseisenä päivänä. Sarakkeesta neljä puolestaan löytyy yksittäisten mittausten poikkeama päivän keskiarvosta ja sarakkeesta viisi mittausten varianssi.

Sisäinen toistotarkkuus eli tässä tapauksessa edestakaisen korkeudensiirron kilometrikeskivirhe keskimääräinen kilometrikeskivirhe (s_r) on alle yhden millimetrin. Tulokset ovat samansuuntaisia molemmilta mittauspäiviltä. On kuitenkin huomattava, että kyseisen toistotarkkuuden saavuttaminen edellyttää mittausten välillä yhtä pitkiä havaintoetäisyyksiä. Käytännön kenttätöyssä tämä toteutuu helpoimmin käyttämällä eri mittauseroilla samoja koje- ja tähtäysasemien paikkoja.

Kyseisen takymetrin absoluuttisen tarkkuus on yllättävän hyvä käytettäessä yhtä pitkiä havaintoja. Tarkkuus kuitenkin huononee huomattavasti havaintoetäisyyksien ollessa eri mittaisia. Tämä voidaan todeta vertailemalla keskenään takymetrillä sekä tarkkavaaituskojeella saatuja tuloksia pulttien välisistä korkeuseroista. Taulukosta 4 nähdään takymetrillä (30.03.2001 sekä 5.04.-2001) saatujen mittaustulosten keskiarvot sekä NA3003:lla (15.03.2001) mitattujen tulosten keskiarvo. Suuresta otoksesta laskettuna ero on referenssiin verrattuna ensimmäisenä päivänä kymmenesosamillimetrin suuruusluokkaa ja toisena kaksi millimetriä.

ISO 8322-3 : 1989 (E)

Taulukko 3a) –Maastohavainnot ja laskelmat

Päiväys: 30.3.2001.....
Paikka: Käpylä.....
Henkilöstö: Savolainen kojeessa ja Suomi prismamiehenä.....
Laitteisto: Geodimeter 608 S.....
Olosuhteet: +3 astetta, tyyni, aurinkoinen asfaltti jäätön ja lumeton
Sarjat:.....
Muuta: Prisma tuettiin tukisauvalla, sääkorjaukset huomioitiin, havaintoetäisyydet 125 metriä pitkiä.....

Mittaus	Korkeusero mm	Keskiarvo mm	Poikkeama (v) mm	Varianssi (v ²) mm ²
1	2	3	4	5
1. Mennessä	1496		-0,20	0,04
1. Tullessa	1496		-0,20	0,04
2. Mennessä	1496		-0,20	0,04
2. Tullessa	1497		0,80	0,64
3. Mennessä	1497		0,80	0,64
3. Tullessa	1496		-0,20	0,04
4. Mennessä	1496		-0,20	0,04
4. Tullessa	1496		-0,20	0,04
5. Mennessä	1497		0,80	0,64
5. Tullessa	1495		-1,20	0,04
		1496,2	$\Sigma v = 0,0$	$\Sigma v^2 = 3,60$

$$s_k = \sqrt{(3,60/10)} = 0,6 \text{ mm}$$

$$s_1 = \sqrt{(3,60/9)} = 0,63 \text{ mm}$$

$$s_1(km) = 2,0 \cdot 0,63 \text{ mm} = 1,26 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 1,26 \text{ mm} / \sqrt{2} = 0,89 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 1 \text{ mm}$$

ISO 8322-3 : 1989 (E)

Taulukko 3b) –Maastohavainnot ja laskelmat

Päiväys: 05.04.2001.....
Paikka: Käpylä.....
Henkilöstö: Savolainen kojeessa ja Silvennoinen prismamiehenä.....
Laitteisto: Geodimeter 608 S.....
Olosuhteet: +3 astetta, tuulta hiukan, pilvinen, asfaltti jäätön ja lumeton
Sarjat:.....
Muuta: Prisma tuettiin tukisauvalla, sääkorjaukset huomioitiin, käytettiin erimittaisia tähtäysetäisyyksiä, taakse 180 m, eteen 70 m

Mittaus	Korkeusero mm	Keskiarvo mm	Poikkeama (v) mm	Varianssi (v ²) mm ²
1	2	3	4	5
1. Mennessä	1495		+0,7	0,49
1. Tullessa	1494		-0,3	0,09
2. Mennessä	1495		+0,7	0,49
2. Tullessa	1494		-0,3	0,09
3. Mennessä	1493		-1,3	1,69
3. Tullessa	1494		-0,3	0,09
4. Mennessä	1494		-0,3	0,09
4. Tullessa	1495		+0,7	0,49
5. Mennessä	1494		-0,3	0,09
5. Tullessa	1495		+0,7	0,49
		1494,3	Σv= 0,0	Σv ² = 4,1

$$s_K = \sqrt{(4,1/10)} = 0,64 \text{ mm}$$

$$s_1 = \sqrt{(4,1/9)} = 0,67 \text{ mm}$$

$$s_1(km) = 2,0 * 0,67 \text{ mm} = 1,35 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 1,35 \text{ mm} / \sqrt{2} = 0,95 \text{ mm}$$

$$s_1(km \text{ edestakainen vaaitus}) = 1 \text{ mm}$$

Taulukko 4. Havaintoetäisyyksien vaikutus absoluuttiseen tarkkuuteen

	<u>korkeusero (mm)</u>	<u>ero (mm)</u>
<u>NA3003</u>	1496,3	
<u>Geodimeter</u>		
Yhtä pitkät havainnot (125 m)	1496,2	0,1
Eri pituiset havainnot (180 & 70 m)	1494,3	2,0

Vaikka testi suoritettiin poikkeusjärjestelyin, oli se hyvin lähellä tilannetta, jossa havainnot olisi tehty normaalisti edestakaisena korkeudensiirtona. Tulosten luotettavuuden kannalta uusi kojeasema olisi täytynyt pystyttää aina, kun edellinen havaintopari saatiin mitattua. Tällä tavoin tuloksiin olisi saatu mukaan myös kojeen pystyttämisestä ja tasauksesta aiheutuvat muutokset. Tulosten kannalta toimenpiteen vaikutus olisi hyvin pieni.

4.2.3 Takymetrin soveltuvuus painumamittauksiin

Empiiriset testit osoittavat geoteknisen osaston käyttämän takymetrin soveltuvan joihinkin mittauksiin vaaituskojetta paremmin. Esimerkkinä voidaan tarkastella mm. testejä yksi (4.1.2.1) ja neljä (4.2.2.1). Havainnot, joita ei vaaituskojeella pystytty tekemään, voitiin pystykulmia hyväksikäyttämällä mitata takymetrin avulla.

Myös viidennessä testissä (4.2.2.2) takymetri osoitti etunsa. Korkeus siirrettiin takymetrin avulla 250 metrin päähän lähtöpisteestä. Linjan puoliväliin pystytettiin yksi kojeasema. Koska NA3003 -tarkkavaaituskojeen mittausetäisyys on enimmillään kuusikymmentä metriä, olisi korkeudensiirto tässä tapauksessa vaatinut vähintään kaksi kojeasemaa.

Koska painumamittauksissa on oleellista saavutettava suhteellinen tarkkuus, soveltuu kyseinen takymetri näihin mittauksiin. Varsinkin väljemmissä laatuluokissa ja vaikeissa olosuhteissa sen käyttö on perusteltua. Kuten empiiriset mittaukset osoittavat takymetrimittauksissa mittajaan taidot korostuvat. Mittaajan täytyy ensinkin tietää onko kyseessä absoluuttisten vai suhteellisten tulosten mittaaminen. Toiseksi erilaisten häiriötekijöiden vaikutus tulee tuntea ja ne täytyy minimoida (ks. 4.2.2.1 sekä 4.2.2.2).

Takymetrin lukematarkkuudesta sekä tulosten hajonnasta johtuen tulee mittauksia toistaa useita kertoja. Matemaattisesti ajateltuna mittaukset muodostavat tällöin otoksen, jossa tulokset paranevat otoksen kasvaessa. Suuressa otoksessa yksittäisen mittauksen vaikutus on pieni. Esimerkiksi ± 1 mm vaihteluvälillä, kahden mittauksen otoksessa yksi mittaaminen vaikuttaa enimmillään millimetrin mittaustulosten keskiarvoon. Vastaavasti kuuden mittauksen otoksessa 0,33 mm.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET PAINUMAMITTAUKSISTA

Empiiriset mittauksilla saatiin tietoa laitteiden tarkkuuksista ja eri mittausmenetelmien vaikutuksista. Tarkkavaaituskojeen sisäinen tarkkuus oli laitevalmistajan lupausten mukainen. Takymetrin osalta hankittu tieto oli aivan uutta. Tulosten mukaan laitteella voidaan saavuttaa tarkkoja sekä sisäisiä että absoluuttisia mittaustuloksia kunhan menetelmät ovat tietyt ja mittaukset toistetaan riittävän useita kertoja. Mittausmenetelmillä oli merkittävä vaikutus sekä tarkkavaaitus- että takymetrimittausten tarkkuuteen.

Tulosten odotettavuuden kannalta NA3003:n mittaustarkkuus oli odotettua parempi. Edelleen ennakko-odotusten vastainen oli myös takymetrin absoluuttinen mittaus-tarkkuus, joka oli tiettyjä menetelmiä käytettäessä yllättävän hyvä. Mittausmenetelmien vaikutuksista geoteknisen osaston henkilökunta tiesi osittain jo aikaisemmin, mutta vaikutusten suuruusluokka oli tuntematon. Empiiristen mittausten pohjalta syntyi myös aivan uusia ideoita tarkkuuden parantamiselle.

Ongelmanratkaisukeinona laitteiden ja mittausmenetelmien testaus kokein osoittautui hyväksi, koska tulokset olivat käytännönläheisiä. Toisaalta eri häiriötekijät, kuten liikenteen aiheuttama värinä, sääolosuhteet, sulamisesta aiheutuva painuminen, jne. veivät pohjaa tutkimuksen tieteellisyydeltä. Tarkkuusluokitusta varten täytyi kuitenkin saada reaaliaikaista tietoa laitteiden ominaisuuksista, nimenomaan autenttisissa olosuhteissa. Tällöin ei tahdottu pohjautua laboratorio-olosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin eikä laitevalmistajien antamiin tietoihin.

Tarvittaessa täydentäviä tutkimuksia voitaisiin tehdä takymetrimittauksiin liittyen. Tällöin voitaisiin tarkastella mittausten absoluuttista tarkkuutta suoritettua laajemmin ja selvittää paraneeko tarkkuus lineaarisesti taakse-eteen havaintoetäisyyksien lähestyessä toisiaan. Kehitettävää löytyisi myös seinäpisteiden rakentamisessa. Painumapulttien tulisi ulottua riittävän pitkälle seinälinjoista, jolloin latan kääntäminen ilman pystykulman muutoksia olisi mahdollista. Samanaikaisesti pulttien täytyisi kuitenkin olla tukevia. Tutkimuksissa voitaisiin vertailla erilaisten pulttimateriaalien ja –kokojen ominaisuuksia. Painumamittauksissa käytetään varsinkin kaduilla ns. painumanastoja, joiden tarkkuus ei vastaa painumapultteja.

6. EHDOTUS PAINUMAMITTAUSTEN TARKKUUSLUOKITUKSELLE

6.1 Tausta

Ehdotuksessa mittaukset jaetaan kolmeen tarkkuusluokkaan:

- Tarkkuusluokka A tarkkavaaitus
- Tarkkuusluokka B jonovaaitus
- Tarkkuusluokka C perusvaaituksiin.

Luokitus perustuu eri luokkiin soveltuviin laitteistoihin, mittausten toteutukseen sekä mittaustarkkuuksiin. Laitteistojen osalta ehdotus käsittelee geoteknisen osaston nykyistä kalustoa ja on muilta osin suuntaa-antava. Toimintatapojen suhteen eri laatu-luokissa korostetaan jokaiselle luokalle ominaisia piirteitä. Mittaustarkkuutta kuvataan perusvaaitusluokassa sulkuvirheen avulla ja muissa pistekeskivirheen avulla. Jono- ja tarkkavaaitusluokissa tuloksia kuvataan tarkkuuden lisäksi termillä luotettavuus.

Lähtökohtina olivat geoteknisen osaston tarpeet ja henkilökunnan mielipiteet. Esille nousseita seikkoja olivat mm. nykyisten toimintatapojen osittainen säilyttäminen, mikä toteutettiin perusvaaitusluokkana. Toisaalta taas tuotiin esille, että ongelmana on joissain tapauksissa todellisten liikkeiden erottaminen mittaustarkkuudesta. Asia otettiin huomioon jakamalla mittaukset eri luokkiin pistekeskivirheen perusteella.

Aineistona käytettiin ensisijaisesti työn empiirisistä mittauksista saatuja tuloksia sekä tehtyjä havaintoja. Lähdeaineistona toimivat lisäksi yleiset vaaitusta käsittelevät ohjeet (mm. 3 & 4).

Näkökulman laajentamiseksi haastateltiin maanmittaus- sekä rakennusalan ammattilaisia. Ammattilaiset korostivat mittausmenetelmien merkitystä vaaitustarkkuuteen. Hannu Salmenperä kuvaili tarkkavaaituksen olevan tosi ammattimiehen puuhaa, jossa tärinä, sääolosuhteet, laitteiston kunto ja mittaajan taito ovat ratkaisevia (lähde 9). Jukka Hakala sekä Jaakko Santala korostivat lisäksi jälkilaskennan merkitystä tarkkuuteen (lähde 8 & 10). Kaikkien mielestä tarkoissa mittauksissa vaaitus täytyy suorittaa edestakaisin tai vaihtoehtoisesti kahteen kertaan.

Korkeudenmittauksessa tarkkuutta arvioidaan usein millimetreinä kilometriä kohti (mm/km). Hakalan mielestä perinteiseen jonomittaukseen tämä soveltuu hyvin, mutta painumamittausten tarkkuutta kuvaa paremmin pistekeskivirhe (mm). Myös deformaatioiden erottaminen mittausvirheistä on Hakalan mukaan helpompaa, kun tarkkuuksia kuvataan pistekeskivirheiden avulla. Edelleen Hakalan mukaan jopa 0,10 millimetrin pistekeskivirhe on kohtuudella saavutettavissa geoteknisen osaston nykyisellä tarkkavaaituslaitteistolla.

6.2 Tarkkuusluokka A: Tarkkavaaitus

Tarkkavaaitusluokassa mittaustarkkuus ja kohteiden todelliset liikkeet tulee erottaa toisistaan, joten tuloksilta edellytetään sekä tarkkuutta että luotettavuutta. Lähtökohdina ovat osaava henkilökunta sekä toimivat, tehtävään soveltuvat laitteet. Laitteiden toiminta varmistetaan seurantakalibroinnin avulla aina ennen tarkkavaaituksen suorittamista. Muuten seurantakalibrointi suoritetaan vähintään joka toinen kuukausi.

Tarkkavaaitusluokan mittaukset suoritetaan geoteknisellä osastolla Leican NA3003 tarkkavaaituslaitteen sekä siihen kuuluvien invarlattojen (GPCL3 sekä GPCL2) avulla. Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää tarkkuusominaisuuksiltaan muita vastaavia laitteistoja. Tällöin on kuitenkin huolehdittava riittävän pitkistä siirtymäkaudesta, jolloin mittaukset suoritetaan samanaikaisesti molemmilla laitteistoilla. Näin voidaan selvittää mahdollinen laitteiden välinen systemaattinen ero.

Tarkkavaaitusluokassa on tyypillistä mittauksen suunnitelmallisuus, kriittisyys ja viimeistelty työtulos. Käytännössä suunnitelmallisuus tarkoittaa mittauksen huolellista suunnittelua, jossa huomioidaan mm. vaaitusreitti, havaintoetäisyydet ja niiden identtisyys, havaintogeometria, sekä olosuhteet. Vaaituksen lähtökohtina pidetään tukeva reittiä sekä lähimmän kiintopisteen sijaitsemista alle 0,5 kilometrin etäisyydellä tarkkailtavista pisteistä. Vaaitessa havaintoetäisyyksien tulee olla alle kolmekymmentä metriä ja latta-asemat on sijoitettava niin, että taakse-eteen havainnot ovat yhtä pitkiä. Lisäksi latta-asemat pyritään asettamaan suoralle linjalle jokaiseen kojeasemaan.

nähdessä. Kriittisyys edellyttää mittausten objektiivista seuranta ja ylimääräisiä havaintoja. Tulosten luotettavuutta lisätään suorittamalla vaaitukset aina edestakaisin tai vaihtoehtoisesti kahteen kertaan. Viimeistelyyn työtulokseen liittyy mittausten tasoittaminen. Tarpeen mukaan lisämittauksilla poistetaan tasoituksessa ilmenneet karkeat virheet.

Sallittu pistekohtaisen keskivirhe on tarkkavaaitusluokassa suurimmillaan 0,2 mm. Karkeita virheitä ei saa esiintyä ja niin sanottujen redundanssi-arvojen, jotka X-Position -verkkotasoitushjelmassa kuvaavat vaaitusverkon laatua sekä jäännösvirheiden löytymistä, tulee olla välillä 0,5-1,0. On kuitenkin otettava huomioon, että käytännön mittaustarkkuus (yksittäisen havainnon suurin poikkeama oikeasta arvosta) on n. 3-5 kertaa keskivirhe.

Lähtökohtien ollessa vaaituksen kannalta epäsuotuisat (etäisyys kiintopisteeseen yli 0,5 km, huono alusta esim. nurmikko) on työn toimeksiantajalle tehtävä selväksi, ettei kyseistä tarkkuutta välttämättä saavuteta. Tällöin tarkkuusrajoja on redusoitava tilanteen mukaisesti.

Tarkkavaaituksissa täytyy mitattavien pulttien olla riittävän pitkällä mitattavasta rakenteesta sekä riittävän tukevia, jotta pultti ei taitu. Painumanastoja ei saa käyttää tarkkavaaituksessa.

6.3 Tarkkuusluokka B: Jonovaaitus

Geoteknisen osaston jonovaaituksissa käytetään Leica NA3003 -tarkkavaaituslaitetta sekä vähintään yhtä siihen kuuluvaa invarlatistaa. Laitteistoina voidaan käyttää myös tarkkuusominaisuuksiltaan hiukan kevyempiä laitteistoja, esimerkkinä Leican NA2000:a. Tällöin on huolehdittava mittausten riittävästä siirtymäkaudesta.

Jonovaaitusluokassa korostuu suunnitelmallisuus, huolellisuus sekä viimeistely. Tarkkavaaituksiin verrattuna suunnitelmallisuus on rajoittuneempaa. Huomio kiinnitetään vaaitusreittiin sekä havaintoetäisyyksien identtisyyteen. Reitin tulee olla tukeva ja sen tulee mahdollistaa yhtä pitkät taakse-eteen havainnot. Huolellisuus edellyttää objektiivista näkökulmaa mittausmenetelmiä kohtaan. Tarpeen mukaan epäilyttävät havainnot tulee uusida. Vaaitusten perusrakenne on aina jonomittaus, joten ns. piikkimittaukset ovat kiellettyjä. Tulosten luotettavuutta lisätään ylimääräisin havainnoin, jotka tehdään kiintopisteeltä esimerkiksi jonon keskelle. Mittausten viimeistelyvaiheessa vaaitustulokset tasoitetaan.

Jonovaaituksissa sallittu pistekohtainen keskivirhe on enimmillään 0,4 mm. Yksinkertaisesta vaaituksesta johtuen redundanssiarvot ovat tyypillisesti alhaiset, noin 0,4. Käytännön mittaustarkkuus on n. 3-5 kertaa keskivirhe.

Myöskin jonovaaituksessa on kiinnitettävä huomiota mitattavien painumapulttien tukevuuteen, painumanastoja saa käyttää katumittauksissa.

6.4 Tarkkuusluokka C: Perusvaaitus

Perusvaaitusten osalta geoteknisen osaston mittauskalustoon kuuluu Leican NA3003 -tarkkavaaituslaite sekä vähintään yksi invarlaatta. Projektikohtaisesti voidaan käyttää osaston takymetriä (Geodimeter 608S). Vaaituskojeen osalta, myös esimerkkilaitteistoa kevyempien laitteiden käyttö on sallittua, mutta tällöin on huolehdittava riittävästä siirtymäkaudesta.

Perusvaaituksia kuvataan sanoilla suunnitelmallisuus ja nopeus. Tässä yhteydessä suunnitelmallisuus tarkoittaa vaaitusreittein suunnittelua. Hyvä vaaitusreitti on alustaltaan tukeva. Perusvaaituksissa mittausprosessi käydään läpi nopeasti ja huolellisesti. Vaikka mittauksen perusmenetelmä on jonomittaus, ovat yksittäiset piikkimittaukset sallittuja.

Perusvaaitusluokan takymetrimittauksissa havaintopaikan täytyy mittauksia toistettaessa olla aina sama. Tällöin havaintomatkat ja -kulmat ovat toistuvasti samaa suuruusluokkaa. Mittauksen luotettavuutta voidaan lisätä huomattavasti toistomittauksiin.

Koska perusvaaitusten yhteydessä yksittäiset sivulle tähtäykset eli ns. piikkimittaukset ovat sallittuja, ei mittauksen tarkkuutta piikkien osalta voida yksiselitteisesti arvioida. Sama koskee takymetrimittauksia. Perusjonon osalta tuloksia seurataan sekä sulkuvirheen avulla että vertailemalla tuloksia aikaisempiin mittauksiin. Sulkuvirheen tulee perusvaaituksissa olla alle 1,5 mm, jolloin käytännön mittaustarkkuus on noin 5 kertaa sulkuvirhe.

7. SIVUSIIRTUMIEN MITTAAMINEN

7.1 Järjestelmän osat ja laitteiston periaate

Sivusiirtymämittausjärjestelmä koostuu mittauslaitteistosta, eli inklinometristä sekä kiinteästi maahan upotetuista sivusiirtymäputkista. Laitteistoon kuuluu rekisteröintilaitte, kaapeli sekä mittausanturi. Sivusiirtymäputki on yleensä joko muovi-, rauta- tai alumiiniputki, johon on tehty urat anturin kulkua varten.



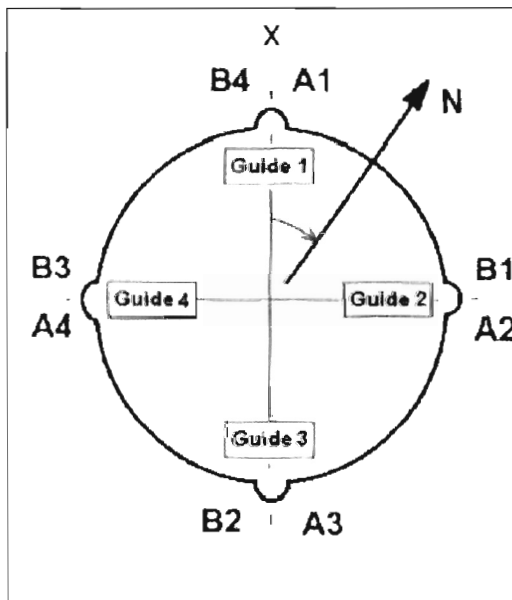
Kuva 10. Inklinometrilaitteisto sekä sivusiirtymäputki

Geoteknisellä osastolla sivusiirtymien mittaus tapahtuu servo-akselometri inklinometrien avulla (kuva 10). Inklinometrin toiminta perustuu kulmien määrittämiseen. Liikuttaessa laitteen anturia inklinometriputkessa kulma-arvot tallentuvat kojeen muistiin. Koska anturin liikkeen suuruus tiedetään (mittaus tapahtuu 0,5 m välein), voidaan inklinometriputken kaltevuus määrittää olemassa olevien tietojen avulla.

Inklinometrissä laitteen kaltevuus mitataan kahdella kiihtyvyyssanturilla samanaikaisesti. Anturit mittaavat kärjenkaltevuutta toisiaan vasten kohtisuorassa tasossa.

7.2 Laitteen käyttö

Sivusiirtymämittauksissa havainnot suoritetaan kuvan 11 mukaisesti. Ensimmäisessä mittaussuunnassa (Guide 1) koje rekisteröi arvot A1 ja B1, jolloin saadaan selville anturin sijainti suunnissa X sekä Y (sijainti putken alapäähän nähden). Tulosten tarkkuutta lisätään mittaamalla vastakkainen suunta (Guide 3). Tällä tavoin saadaan systemaattiset virheet poistettua, koska lopullinen mittaustulos on vastakkaisten mittaustulosten keskiarvo. Edelleen tarkkuutta voidaan parantaa mittaamalla kaikki neljä suuntaa (Guide 1,2,3 ja 4), jolloin kummallakin kiihtyvyyssanturilla mitataan kaikki mahdolliset suunnat.



Kuva 11. Havaintojärjestys

Yleensä sivusiirtymätuloksia analysoidaan käyttäen hyväksi mittausputken suhteellista kaltevuutta, eli eroja edellisiin mittauksiin. Kuitenkin esimerkiksi paalujen suoruutta mitattaessa myös absoluuttisen kaltevuuden määrittäminen on tärkeää.

7.3 Laitteiston toimintatarkastus

Geoteknisellä osastolla inklinometrien toiminta tarkastetaan säännöllisesti. Tämä tapahtuu 21 metriä syvässä, muovisessa testiputkessa. Putken liikkumattomuus on varmistettu poraamalla se kallioon.

Toimintatarkastus perustuu suhteellisten tulosten mittaamiseen, koska testiputken absoluuttista profiilia ei ole määritetty. Referenssiaineiston muodostavat tarkastusajankohtaa aikaisemmin tehdyt mittaukset. Jos mittaustulokset poikkeavat merkittävästi aikaisemmista, tarkastettava inklinometri toimitetaan huoltoon, jossa laite kalibroidaan huollon jälkeen.

Toimintatarkastusten lisäksi testiputken avulla voidaan tarkastella myös sivusiirtymälaitteistojen välisiä eroja. Tällöin pyritään määrittämään systemaattisten erojen suunta ja suuruus. Toimenpiteen tarpeellisuus ilmenee etenkin laitteiston vaihdostilanteissa sekä huollon/korjauksen jälkeen.

8. TESTI INKLINOMETRIN TARKKUUDEN MÄÄRITTÄMISEKSI

8.1 Yleistä

8.1.1 Sisäinen tarkkuus

Inklinometrin sisäisen tarkkuuden tutkiminen tapahtui toistokokein. Testiputkessa 1 toistettiin mittauksia, joissa havainnoitiin suunnat (guide) 1 ja 3 (ks. kuva 2). Mittausmenetelmän olivat toistuvasti samat. Ennen havaintojen lukemista anturi laskettiin putken pohjalle ja lämpötilan annettiin tasaantua. Tasaantumisaika oli viisi minuuttia. Tämän jälkeen havainnot luettiin puolen metrin välein. Mittaus toistettiin yhteensä kuusi kertaa.

8.1.2 Absoluuttinen tarkkuus

Inklinometrin absoluuttista tarkkuutta tutkittaessa suoritettiin testimittauksia sekä tarkasteltavalla laitteella että vertailulaitteella. Vertailulaitteena toimi geoteknisen osaston toinen, tarkkuusominaisuuksiltaan vastaavan tasoinen inklinometri (koje 1).

Mittaukset suoritettiin testiputkessa 1 ja havainnot otettiin kahdessa suunnassa (suunnat 1 ja 3, kuva 2). Ennen havaintojen lukemista anturi laskettiin putken pohjalle ja lämpötilan annettiin tasaantua viisi minuuttia. Mittaukset toistettiin molemmilla mittareilla viisi kertaa.

8.2 Lämpötilan muutoksen vaikutus

Lämpötilan tasaantumista tutkittiin kolmen mittauksen otoksella kalibroitiputkessa, eli testiputkessa 1. Testissä tutkittiin yhden havaintosuunnan avulla kuinka inklinometrin antamat arvot muuttuvat lämpötilan muuttuessa. Lopuksi saadut arvot muutettiin pituusyksiköiksi (mm).

Ennen jokaista mittausta anturin lämpötila nostettiin +31 °C:een. Tämän jälkeen anturi laskettiin nopeasti syvyyteen -12 m (putken yläpäähän nähden), jossa veden lämpötila oli +8 °C. Anturin laskeutuessa putken vesi jäähdytti sen lämpötilaa. Jäähdyttä-

vän vaikutuksen oletettiin kuitenkin olevan pieni, koska laskeutuminen tapahtui nopeasti.

Ensimmäiset mittauslukemat otettiin välittömästi anturin laskeuduttua tavoitesyvyys-teen. Tästä eteenpäin lukemat tallennettiin minuutin väliajoin viiteentoista minuuttiin asti.

8.3 Havaintosuuntien lisäämisen vaikutus

Testissä tarkasteltiin kuinka havaintosuuntien lisääminen vaikuttaa sivusiirtymämittausten tarkkuuteen. Koska käytettävissä ei ollut minkään kohteen riittävän tarkkoja absoluuttisia mittauservoja eikä tarkasteltavaa inklinometriä tarkempia laitteita, analysoitiin mittaustuloksia keskihajonnan perusteella sekä vertaamalla tuloksia aivan vastaavalla laitteella saatuihin tuloksiin.

Testi suoritettiin kahdessa erillisessä putkessa. Molempien syvyys oli noin 21 metriä, mutta putkien kaltevuudet poikkesivat toisistaan. Myös putkissa oleva vedenpinta oli putkien yläpäähän nähden eri syvyydellä. Putkessa 1 se oli noin 6,5 metrin syvyydellä, putkessa 2 syvyys oli vastaavasti 8,5 m.

Testiajankohdan ulkolämpötila oli noin +20 °C. Vesi putkien pohjalla oli +8 asteista, joten lämpötilaeroa oli yli kymmenen astetta. Erosta johtuen anturin lämpötilan annettiin tasaantua laskemalla anturi putken pohjaan muutamaksi minuutiksi ennen mittausten aloittamista. 1. putkessa tasaantumisaika oli viisi minuuttia, 2. putkessa kaksinkertainen, eli kymmenen minuuttia. Testiputkissa anturi laskettiin 21 metrin syvyyteen, eli sitä ei laskettu aivan putken pohjalle. Syynä oli mitoituskäytäntö, joka geoteknisellä osastolla on puolen metrin välein.

Testeissä tarkasteltiin aluksi mittausten keskihajonnan eroavaisuuksia kahden sekä neljän erillisen havaintosuunnan mittauksessa. Paikkana oli testiputki 1. Kahden suunnan mittauksessa havaittavia suuntia (guide) olivat 1 ja 3 (kuva 2). Neljän suunnan mittauksessa vastaavasti 1,2,3 ja 4. Otoksen koko oli molemmissa tapauksissa viisi erillistä mittausta.

Mittausten keskihajontaa tarkasteltiin myös toistamalla neljän havaintosuunnan mittauksia molemmissa testiputkissa. Kahden havaintosuunnan tulokset saatiin tällöin poistamalla suoritetuista mittauksista ylimääräiset havainnot. Myös tällöin otoksen koko oli viisi mittausta.

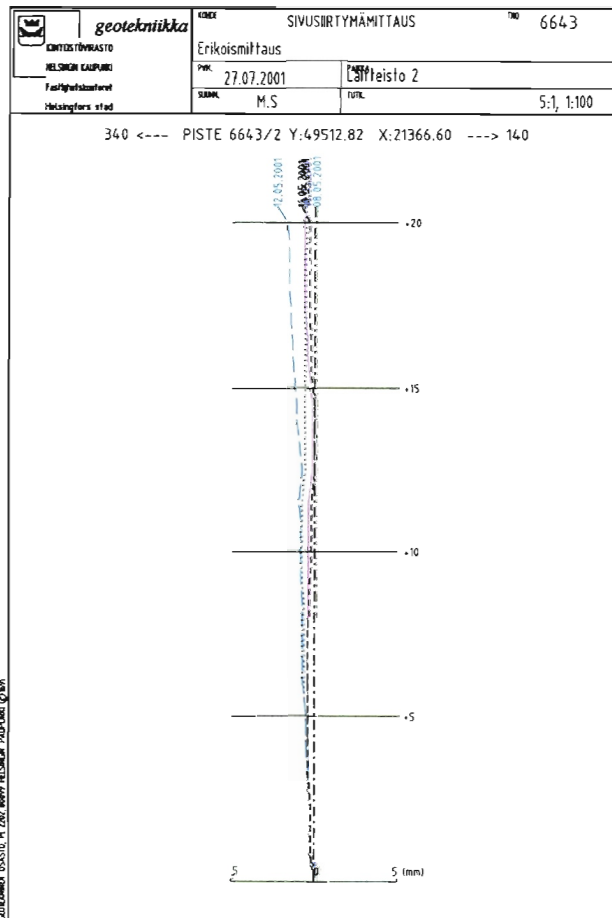
9. INKLINOMETRIN TARKKUUSTESTIN TULOKSET

9.1 Inklinometrin tarkkuus

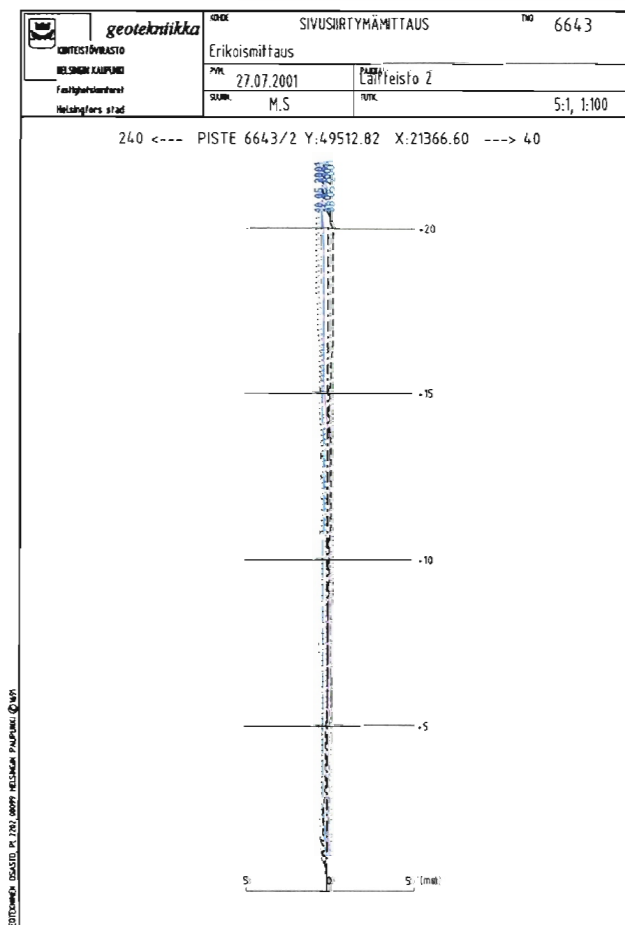
9.1.1 Sisäinen tarkkuus

Inklinometrin sisäistä tarkkuutta voidaan tarkastella seuraavan kahden sivun kuvista 12A ja 12B, joissa esitetään mittausten suhteelliset tulokset. Kuvien pystyasteikko ilmoittaa metreissä suhteellisen korkeustason mittauksen lähtöpisteeseen nähden. Vaaka-asteikko ilmoittaa kuvassa 12A millimetreinä suhteellisen siirtymän x-suunnassa ja vastaavasti kuvassa 12B y-suuntaisen siirtymän (vrt. kuva 11). Kuvien referenssimittaus on 08.05.2001 mittarilla 2 tehty mittaus.

Kuvista ilmenee, että tulosten hajonta on hyvin pientä. Kun mitattu matka on 21 metriä, on tulosten hajonta X-suunnassa suurimmillaan noin 2 mm ja vastaavasti Y-suunnassa noin 1 mm. Hajonta on 12.05.2001 tehtyä mittausta lukuun ottamatta hyvin tasaista.



Kuva 12A.



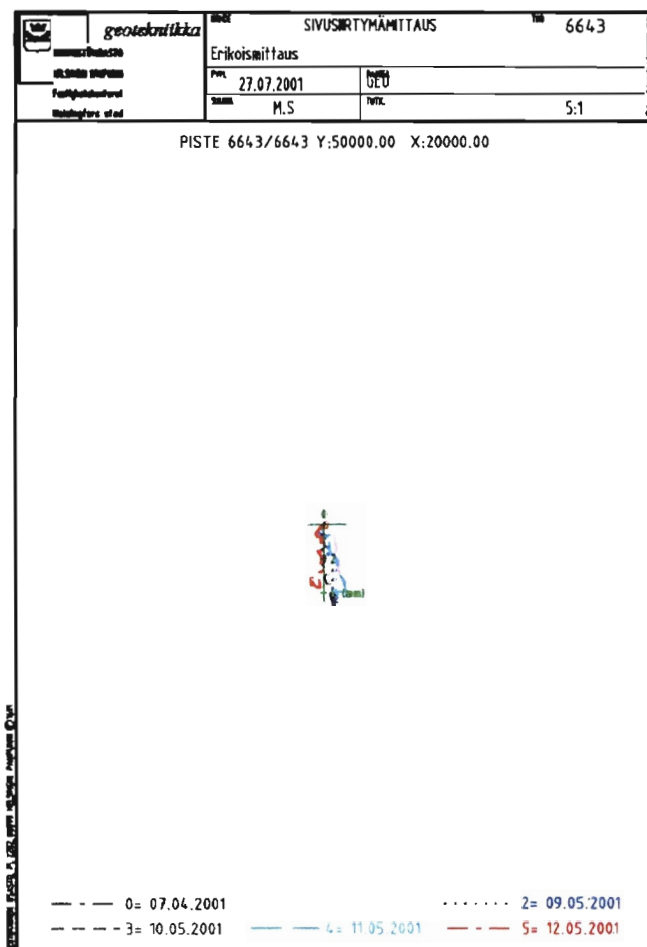
Kuva 12B.

9.1.2 Absoluuttinen tarkkuus

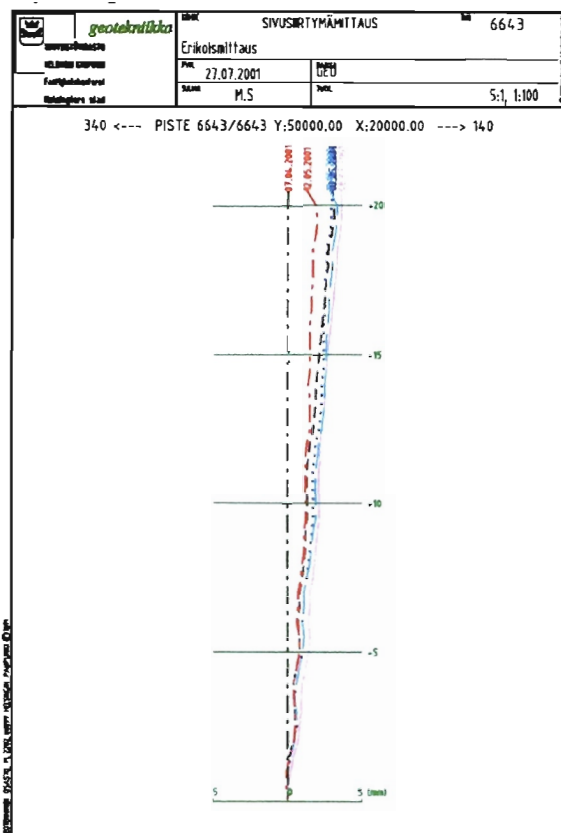
Inklinometrin absoluuttista tarkkuutta voidaan karkeasti tarkastella kuvista 13 A, B ja C. Kuvassa 13A kertoo esitetään kahden mittarin suhteellisen poikkeaman x ja y – suunnissa ylhäältä katsottuna (mm). Kuvista 13B (x-suunta) ja 13C (y-suunta) esitetään mittarien suhteellinen kaltevuus sivusta päin katsottuna.. Kuvien referenssimittaukseksi on valittu mittaus 07.04.2001, joka edustaa 1-mittarilla saatujen tulosten keskiarvoa (otos viisi mittausta) jota verrataan 2 –mittarilla tehtyihin viiteen erilliseen mittaukseen (kaikki tehty samana päivänä toisin kuin kuvien selitteessä).

Kuvista 13 A,B ja C ilmenee, että pientä satunnaisliikettä lukuun ottamatta tulosten hajonta kasvaa mittausetäisyyksien kasvaessa. Tämä johtuu virheiden kasaantumisesta. Suurimmillaan tulosten hajonta on x ja y-suunnissa noin 4 mm, x-suunnassa tulosten hajonta on suurempaa y-suuntaan verrattuna. Tulokset eroavat selkeästi referenssimittauksesta.

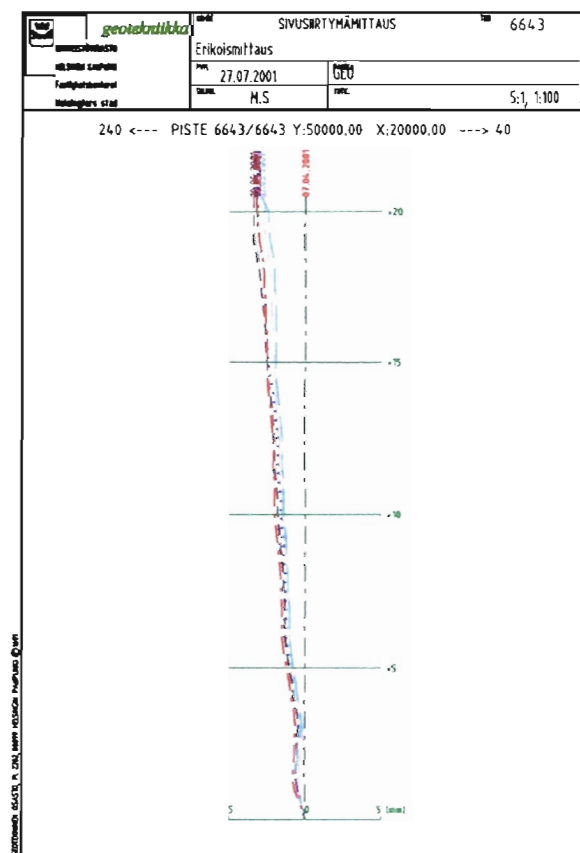
Inklinometrin todellista absoluuttista tarkkuutta ei kuvatulla koejärjestelyillä voida mitata. Absoluuttinen tarkkuus vaihtelee mitattavan putken kaltevuuden mukaan satunnaisesti ja laitteistokohtaisesti. Inklinometrin absoluuttinen tarkkuus on kuitenkin keskimäärin huonompi suhteelliseen tarkkuuteen verrattuna ja voidaan arvioida olevan käytetyllä laitteistolla < 5mm/10m.



Kuva 13A.



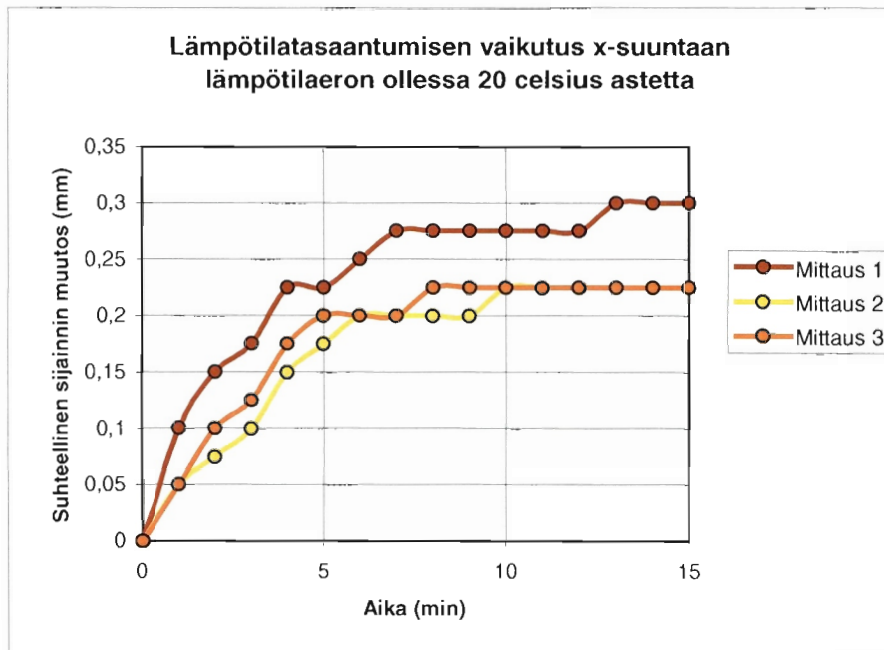
Kuva 13 B.



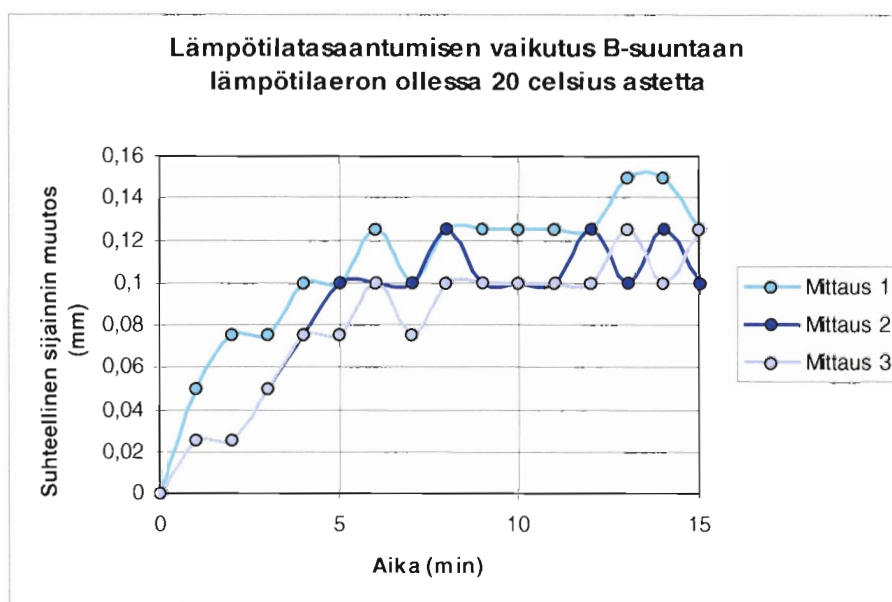
Kuva 13 C.

9.1.3 Lämpötilatasaantumisen vaikutus

Testin tulokset esitetään kuvissa 14A ja 14B. Kokeessa mitattava kärki oli mittausputken pohjalla, jolloin tuloksessa ei ole mukana kaltevuusmuutoksista aiheutuvaa hajontaa. Mittauksessa tutkittiin lämpötilatasaantumisen vaikutusta yhden suunnan mittauksessa. Käytännössä mittaukset tehdään aina vähintään kahteen suuntaan, jolloin lämpötilavaikutus on keskiarvo kahdesta mittauksesta. Koejärjestely kuvaa kuitenkin riittävän hyvin myös tavallista mittaustilannetta.



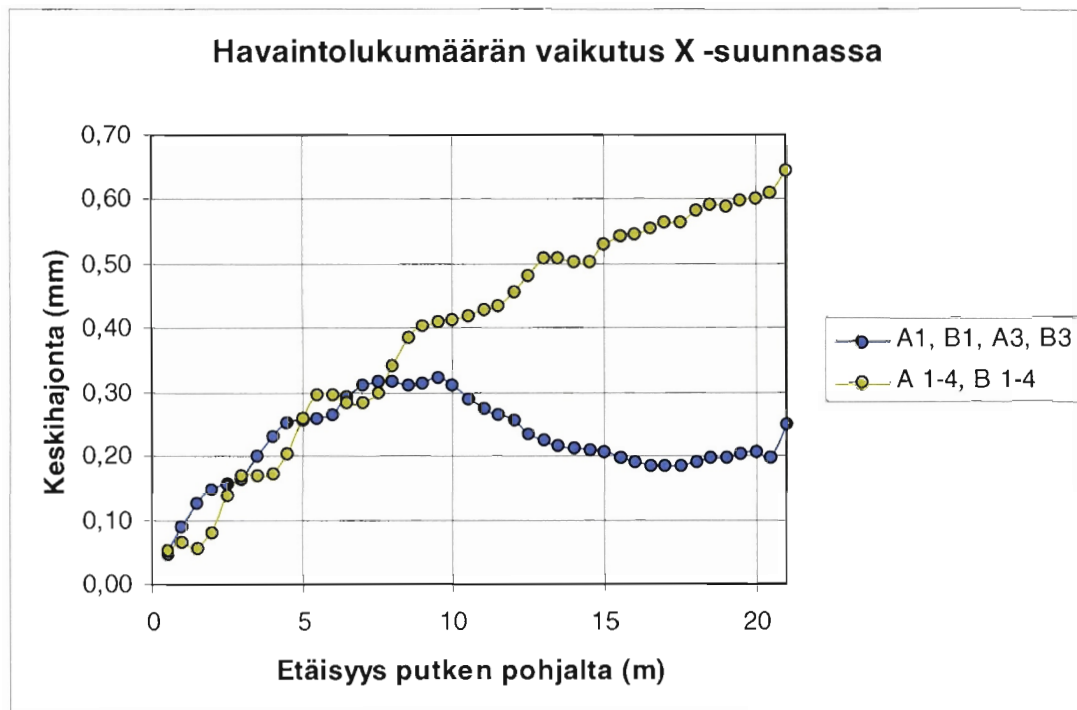
Kuva 14A. Lämpötilatasaantumisen suhteellinen vaikutus suunnassa A



Kuva 14B. Lämpötilatasaantumisen suhteellinen vaikutus suunnassa B

Kuvista havaitaan, että noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:een lämpötilamuutos vaikutti keskimäärin $0,25\text{ mm} / 0,5\text{ m}$ sivusiirtymämittarin A -suunnan tuloksiin. Vastaavasti B -suunnassa muutos oli vain noin $0,12\text{ mm} / 0,5\text{ m}$. A -suunnassa tulosten tasaantumisajaksi riitti selvästi 10 minuuttia. B -suunnan tuloksissa ilmeni pientä hajontaa loppuun asti.

Tulosten mukaan lämpötilatasaantumisen vaikutus on merkittävä. Käytännössä lämpötila tasautuu mittausten aikana, jolloin virhe pienenee putken yläpään mennessä. Lämpötilan vaikutus tulee huomioida kannattaa kuitenkin.



Kuva 15A. Havaintosuuntien lisäyksen vaikutus tulosten keskihajontaan

huomioida mittauksia tehtäessä. Lämpötilatasaantumisen vaikutus näkyy merkittävimmin viiden ensimmäisen minuutin aikana, jolloin mittauksia ei tule tehdä. Tulosten mukaan kahdenkymmenen asteen lämpötilaeroissa riittävä odotusaika on viidestä kymmeneen minuuttia.

Käytettäessä esimerkiksi vibrating-wire kiihtyvyyssantureilla varustettuja inklinometrilaitteistoja on lämpötilan tasaantumisen vaikutus oleellisesti suurempi.

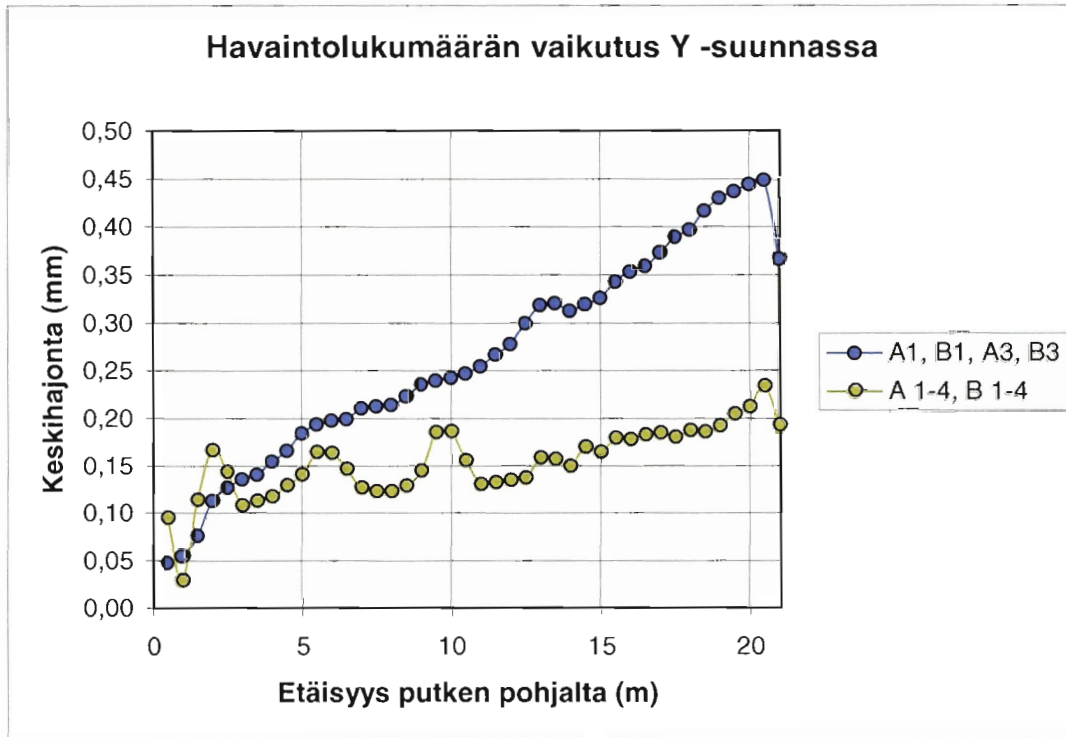
9.2 Havaintosuuntien lisääminen

9.2.1 Vaihe 1

Testin ensimmäisen vaiheen tulokset ilmenevät kuvista 15A ja 15B. Kuvista näkyy kuinka havaintosuuntien lisäys vaikuttaa tulosten otoskeskihajontaan, otoksen ollessa viisi mittausta. Tulosten keskihajonta on laskettu metrin välein syvyyksille 1-21 m. Kuvien oikeanpuoleisista sarakkeista ilmenevät havaitut suunnat (vrt. kuva 11).

Kuvan 15A mukaan havaintosuuntien lisäyksellä ei ole mittaustarkkuutta lisäävää vaikutusta vaan odotuksen vastaisesti havaintosuuntien lisääminen kahdesta neljään lisäsi tulosten keskihajontaa selvästi.

Kuvan 15B mukaan y-suunnassa tulokset ovat edelliseen verrattuna vastakkaiset. Havaintosuuntien lisäys paransi huomattavasti mittaustarkkuutta. Kun mitattu matka oli 20 metriä, kahden suunnan mittauksessa tulosten hajonta oli n. 0,45 mm ja vastaavasti neljän suunnan mittauksessa n. 0,25 mm.



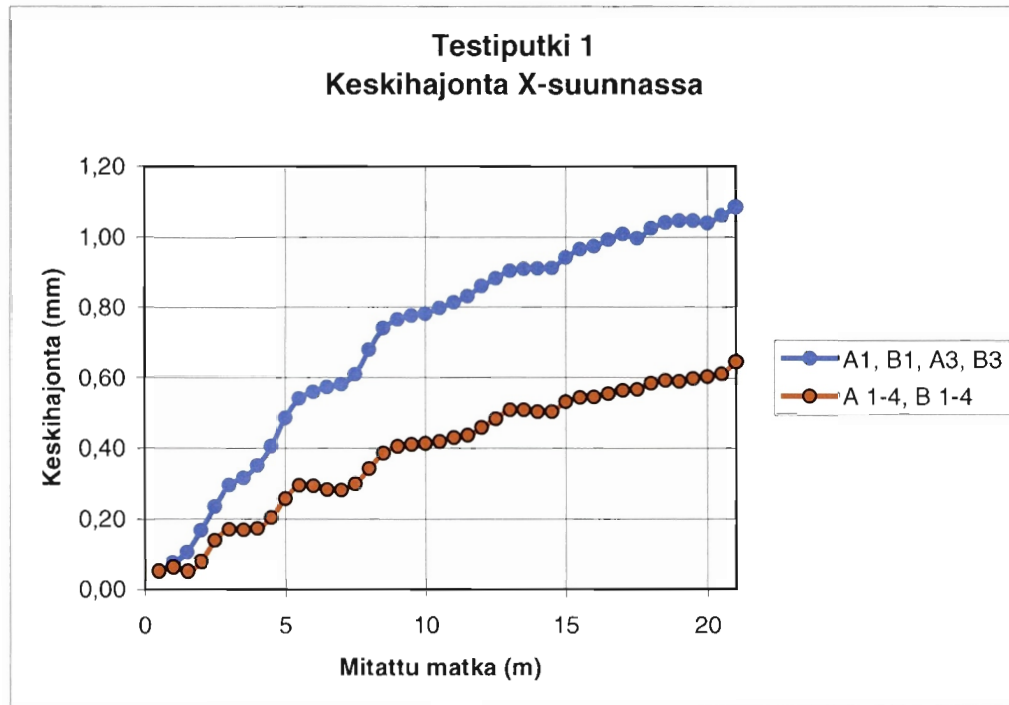
Kuva 15B. Havaintosuuntien lisäyksen vaikutus tulosten keskihajontaan

Testin ensimmäisessä osiossa X –suunnan tulokset ovat teoreettisten tulosmallien vastaiset. Teoriassa neljän suunnan mittauksissa tulosten keskihajonnan tulisi olla puolet pienempää kuin kahden suunnan mittauksissa. Ilmiön syy johtunee inklinometrin sisäisestä tarkkuudesta (ks. 8.1 Inklinometrin tarkkuus). Sisäinen tarkkuus johtuu useasta eri tekijästä (esim. antureiden toiminta ja asettumiskohta, jne.), ja lämpötilataantumisen vaikutus tähän on verrattain pieni.

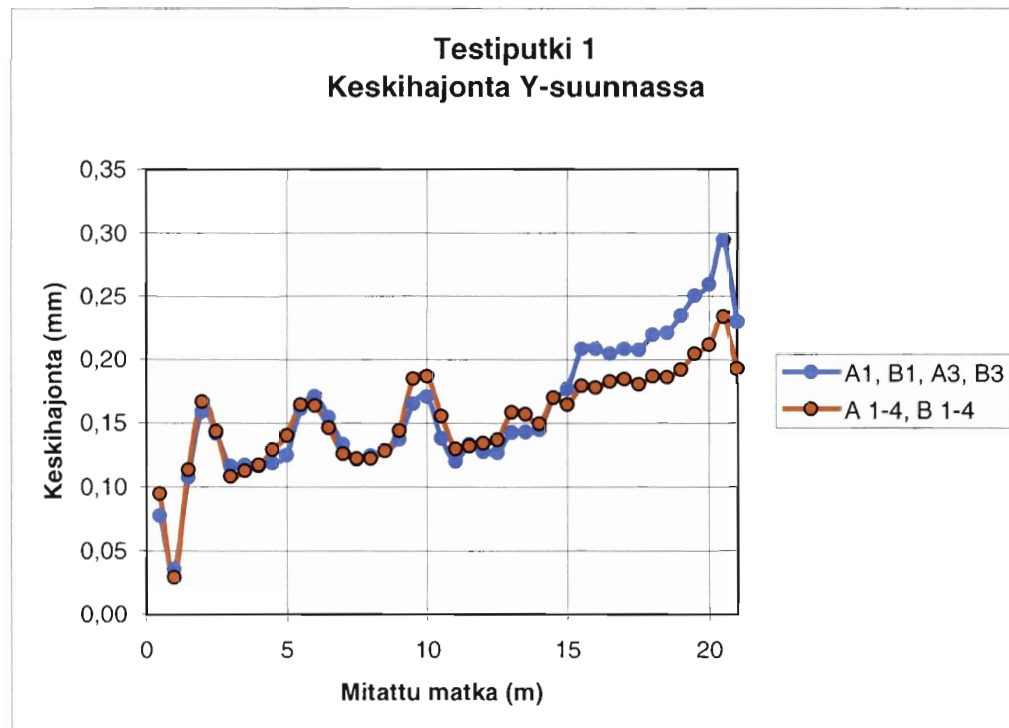
9.2.2 Vaihe 2

Testin toisessa osiossa kahden suunnan mittaustulokset hankittiin neljän suunnan mittaustuloksista poistamalla ylimääräiset havainnot. Tällöin lopullisiin tuloksiin vaikuttivat osittain samat häiriötekijät. Testit suoritettiin kahdessa erillisessä testiputkessa, koska putken kaltevuudella epäiltiin olevan vaikutusta mittaustuloksiin.

Kuvista 16A ja 16B nähdään, kuinka havaintosuuntien lisääminen vaikutti mittaustulosten keskihajontaan. x-suunnassa havaintosuuntien lisäys paransi tarkkuutta huomattavasti, y-suunnassa merkittävää eroa ei ole. Yleisesti ottaen tulosten keskihajonta oli suurempia x-suunnassa.

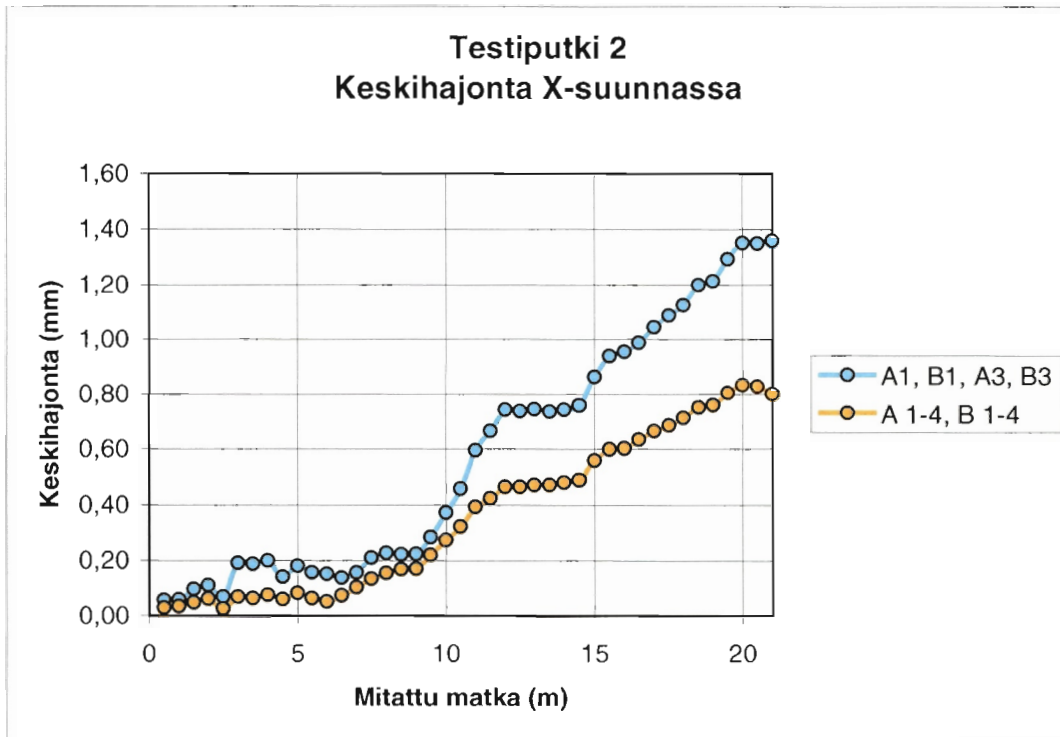


Kuva 16A. Havaintolukumäärän vaikutus mittausten keskihajontaan

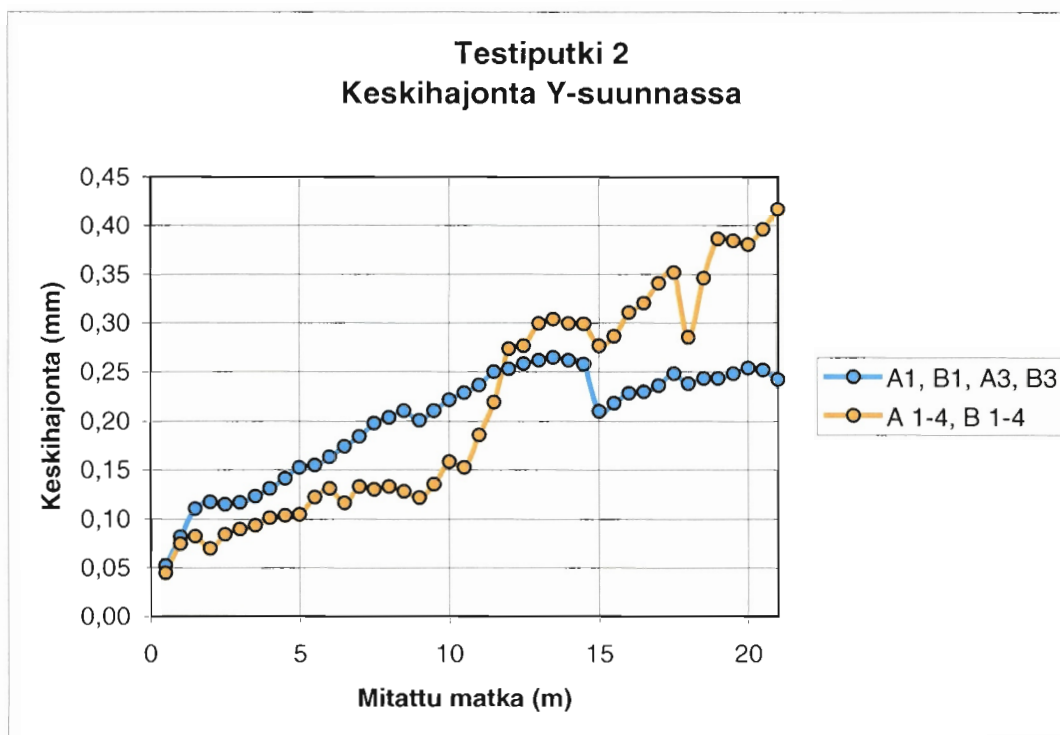


Kuva 16B. Havaintolukumäärän vaikutus mittausten keskihajontaan

Testiputkessa 2 mittaustulokset ovat sekä x- että y-suunnissa samansuuntaiset kuin putkessa 1. Kuvan 17A mukaan x-suunnassa havaintolukumäärän lisäys paransi merkittävästi tarkkuutta. Kuvan 8B mukaan y-suunnassa havaintolukumäärän lisäys paransi tarkkuutta noin kymmeneen metriin asti. Tämän jälkeen havaintosuuntien li-säyksellä oli tarkkuutta huonontava vaikutus.



Kuva 17A. Havaintolukumäärän vaikutus mittausten keskihajontaan



Kuva 17B. Havaintolukumäärän vaikutus mittausten keskihajontaan

Testiputken kaltevuudella ei tutkimustulosten mukaan näytä olevan merkittävää vaikutusta mittaustulosten keskihajontaan. Suuruusluokaltaan hajonta oli hiukan suurempaa testiputkessa 2, mutta mittaustulosten suunta on putkien välillä identtinen.

Sekä testiputkessa 1 että 2 mittausten keskihajonta on Y-suunnassa selvästi suurempaa kuin X-suunnassa. X –suunnassa tulosten hajonta näyttää olevan lähellä teoreettista tulosmallia. Sen mukaan neljän suunnan mittaukset antavat arvoja, joiden otoskeskihajonta on puolet vastaavista kahden suunnan mittaustuloksista.

10. JOHTOPÄÄTÖKSET SIVUSIIRTYMÄMITTAUKSISTA

Geoteknisellä osastolla käytettävä inklinometrilaitteisto osoittautui erittäin tarkaksi osastolla normaalisti käytettävällä mittausten menetelmällä, jossa sivusiirtymät mitataan aina kahteen kertaan kiertämällä anturia 200⁹ ensimmäisen mittauksen jälkeen. Suoritettujen kokeiden perusteella inklinometrin sisäisen tarkkuudesta aiheutuva tulosten suhteellinen tarkkuus on yleensä parempi kuin 1mm 10m mittausmatkalla (havainnot 0,5m välein).

Tulos edellyttää kuitenkin, että inklinometrin havaintoputki mitataan aina samalla laitteella. Mikäli mittausta suoritetaan toisella laitteella on tarkkuus selvästi heikompi inklinometrin huonommasta absoluuttisesta tarkkuudesta johtuen. Käytännön mittauksissa on todettu, että mitattaessa eri laitteistolla on laitteistojen ero jopa 10mm 10m matkalla.

Odotuksien vastaisesti ei mittaussuuntien lisäämisellä ollut merkittävää vaikutusta mittaustarkkuuden parantumiseen. Syynä on todennäköisesti kärjessä olevien anturien tarkkuuserot. Kummallakin tutkitulla inklinometrillä oli mittaustarkkuus selvästi parempi toiseen mittaussuuntaan, jolloin 100⁹ kierto huononsi ”paremman” suunnan tuloksia.

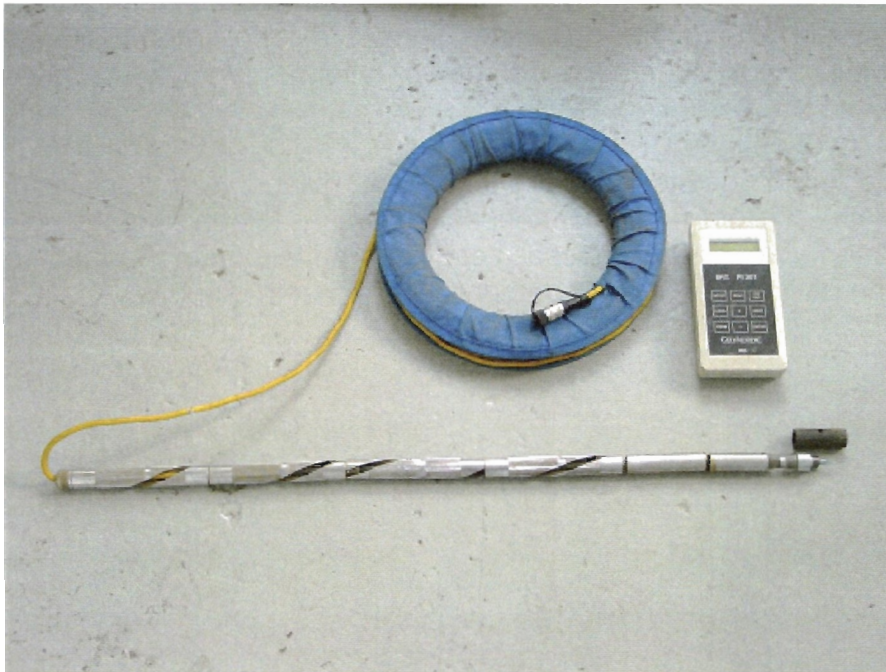
Lämpötilan tasaantumisen vaikutus tulee eliminoida antamalla laitteen sisäisen lämpötilan tasautua mittausputken lämpötilaan n. 5 – 10 min ajan ennen ensimmäistä mittausta. Tarvittavat tasautumisaika riippuu käytännössä inklinometrilaitteiston säilytyslämpötilasta (ulkoilman ja mittaussuuntien lämpötilasta).

Edellä kuvatut tarkkuudet edellyttävät myös mittausputkien korkeaa laatua. Putkimateriaalin vaikutusta ei selvitetty tässä tutkimuksessa, mutta todennäköisesti yleisesti käytetyissä ns. huonekaluputkiprofiilissa ei päästä samoihin tarkkuuksiin kuin varsinaisissa inklinometriputkissa, joiden materiaalina on muovi tai alumiini.

11. HUOKOSPAINEN MITTAAMINEN

11.1 Mittausjärjestelmän osat

Helsingin kaupungin geoteknisellä osastolla huokospaineiden mittaaminen tapahtuu yleisimmin BAT- laitteiston avulla. Järjestelmä koostuu mittaustulostusta (kuva 18) sekä maahan upotetuista huokosputkista.



Kuva 18. BAT -pohjavesimittauslaitteisto

Mittauslaitteistoon kuuluu lukemalaite, kaapelia, teräspainoja sekä neulalla varustettu anturi. Huokosputkien perusosana on maahan painettava huokoskärki (kuva 19), joka sijoitetaan tiiviin teräsputken kärjeksi. Mittaustilanteessa anturin neula lävistää huokoskärjessä olevan kalvon ja määrittää putken ulkopuolisen paineen. Paine ilmoitetaan vastaavina vesipatsaina (m H₂O). Huokoskärjen avulla kaikki mittaukset tapahtuvat tarkasti määritettävällä tasolla.

Geoteknisellä osastolla on käytössä myös vanhempi GI-laitteisto, jossa huokospaineenmittauselektroniikka on huokoskärjessä. Tulos luetaan maanpinnalla olevasta mittauspiiristä (johon mittauslukemat siirtyy sähköjohtimien välityksellä), jolloin paine ilmoitetaan vastaavina vesipatsaina (m H₂O). Johtuen laitteen rajoituksesta ei mittausulos huomio ilmanpaineen muutoksia vaan käyttäjän tulee tallentaa ilmapaine huokospaineen lukemisen yhteydessä ilmapuntarin yhteydessä. Koska GI-huokoskärkiä käytetään erittäin harvoin, ei laitteiston tarkkuutta selvitetty tämän työn yhteydessä. Yleinen käsitys on, että BAT-laitteisto on jonkin verran tarkempi kuin GI-laitteisto, mutta erolla ei käytännössä ole merkitystä.

BAT-huokoskärki on selvästi edullisempi GI-kärkeen verrattuna, mutta edellyttää, että mittaus voidaan tehdä anturin yläpuolella. Lisäksi BAT-kärki voidaan useimmiten nostaa ylös mittausten jälkeen seuraavaa kohdetta varten. GI-huokoskärjen johtoja voidaan sen sijaan vetää jopa useita kymmeniä metrejä sivusuunnassa.

11.2 Mittausten toteutus

Vaikka geoteknisellä osastolla BAT huokospainemittaukset suoritetaan yhden laitteiston avulla, on mittausmenetelmiä käytännössä kaksi. Ensimmäinen menetelmä ei ole laitteiston ohjekirjan mukainen, vaan se on otettu käyttöön kokemuksen myötä.

Ensimmäisessä menetelmässä anturi asetetaan pystyasentoon maanpinnan tasolle, mitattavan putken viereen ja lukemalaite nollataan. Tämän jälkeen anturi lasketaan mitattavan putken pohjalle huokoskärkeen. Painearvo tallennetaan lukemalaitteeseen.

Toisessa menetelmässä anturi nostetaan vielä huokoskärjen yläpuolelle, kun ensimmäinen lukema on kirjattu. Tällöin lukemalaitteeseen ilmestyy toinen lukema, joka vastaa mittausarvoa kärjen yläpuolella, ilmassa. Lopullinen mittausarvo saadaan vähentämällä huokoskärjen painearvosta ilman painearvo, joka usein on nolla.



Kuva 19. BAT huokoskärki

12. TESTI BAT- LAITTEISTON TARKKUUDEN MÄÄRITTÄMISEKSI

BAT-huokospainemittausjärjestelmän tarkastelussa huomio kiinnitettiin eri menetelmien välisiin eroihin sekä mittauslaitteiston sisäiseen tarkkuuteen. Tarkastelu tapahtui yhtenäisenä kokonaisuutena, jossa mittauksia oli yhteensä 45 kappaletta.

Tutkimukset suoritettiin vedellä täytetyssä sivusiirtymäputkessa, jonka sisään työnnettiin tiivis pohjavesiputki sekä huokoskärki. Koska vedenpinta sivusiirtymäputkessa ylettyi aivan huokosputken yläreunaan, kohdistui huokoskärkeen putkipituutta vastaavan vesipatsaan aiheuttama tunnettu paine.

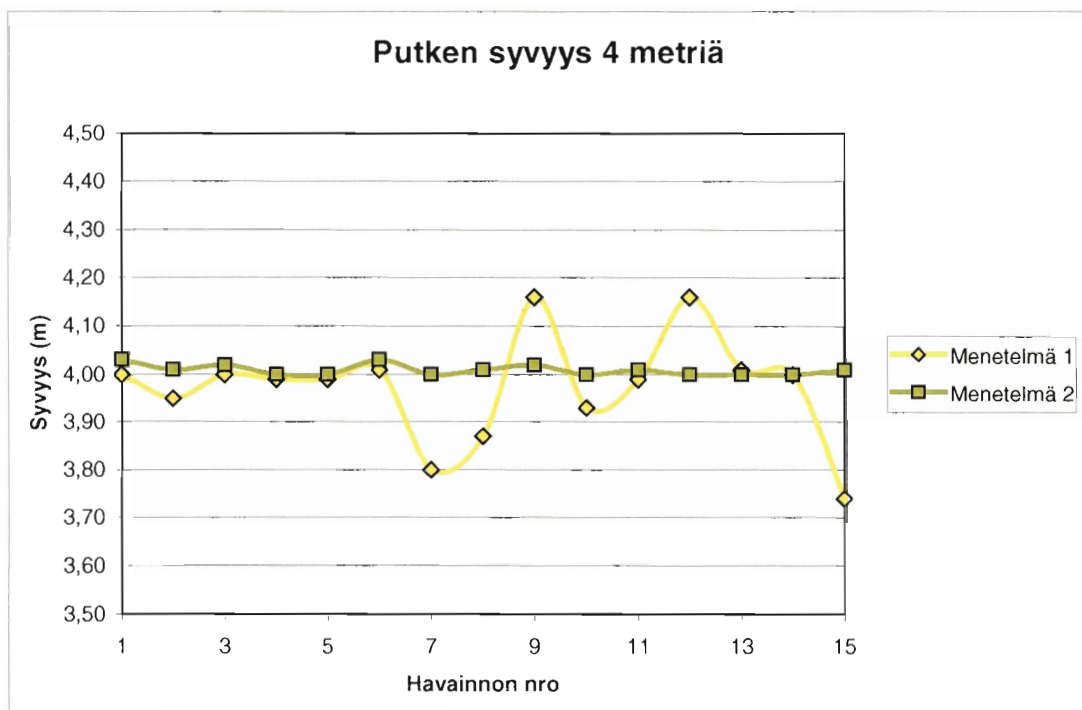
Mittausvyvyksiä oli kolme, kaksi, kolme ja neljä metriä. Ensimmäisenä mittaukset tehtiin neljä metriä syvässä putkessa, jonka jälkeen putkea lyhennettiin metrillä. Kolme- ja neljä metriä pitkissä putkissa jokainen mittaus tehtiin toisista mittauksista riippumattomana. Tällöin anturissa oleva ilma poistettiin täyttämällä ns. sovitekappale vedellä. Ilmauksen jälkeen lukemalaite nollattiin maanpinnan tasossa, huokosputken vieressä. Ensimmäinen mittauslukema kirjattiin ylös muutaman minuutin päästä antu-

rin laskeuduttua huokoskärkeen. Toinen lukema saatiin nostamalla anturia noin viisi senttimetriä.

Kaksi metriä pitkässä putkessa täytettiin sovitekappale vastaavasti vedellä, mutta lukemalaitteen nollaus ainoastaan tarkastettiin varsinaisen nollauksen sijasta. Havaintojen kirjaaminen tapahtui samoin kuin kolme ja neljä metriä pitkissä putkissa.

13. BAT LAITTEISTON TARKKUUSTESTIN TULOKSET

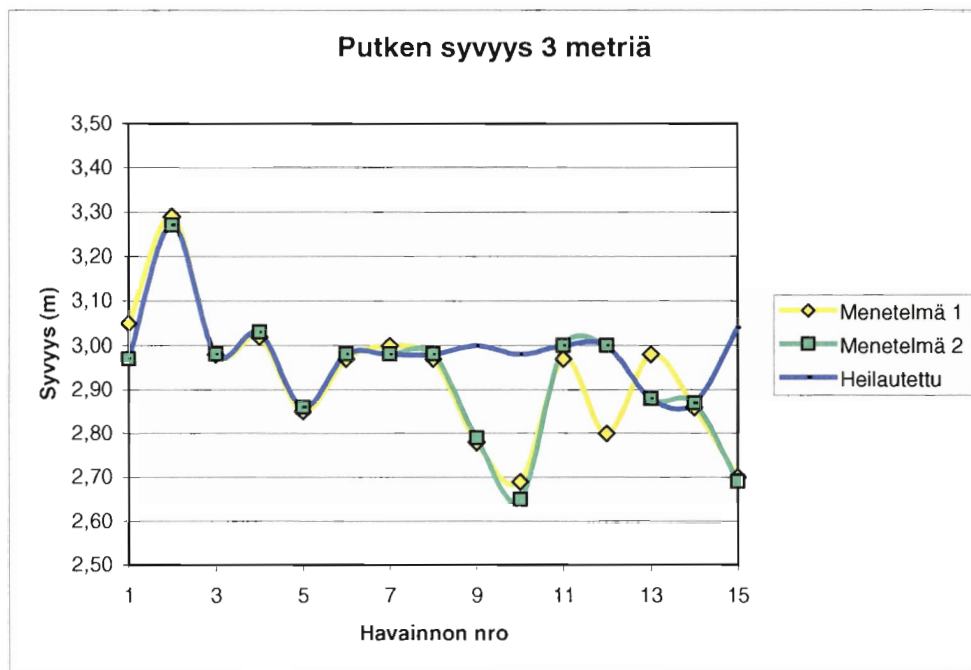
Kuvissa 20A, 20B sekä 20C esitetään menetelmällä 1 (keltainen) sekä menetelmällä 2 (vihreä) saadut tulokset jokaisessa mittauksessa. Lisäksi kuvissa 20B ja 20C esitetään tulokset, jotka saatiin ensimmäisten mittaustulosten jälkeen anturia hiukan heilauttamalla (sininen).



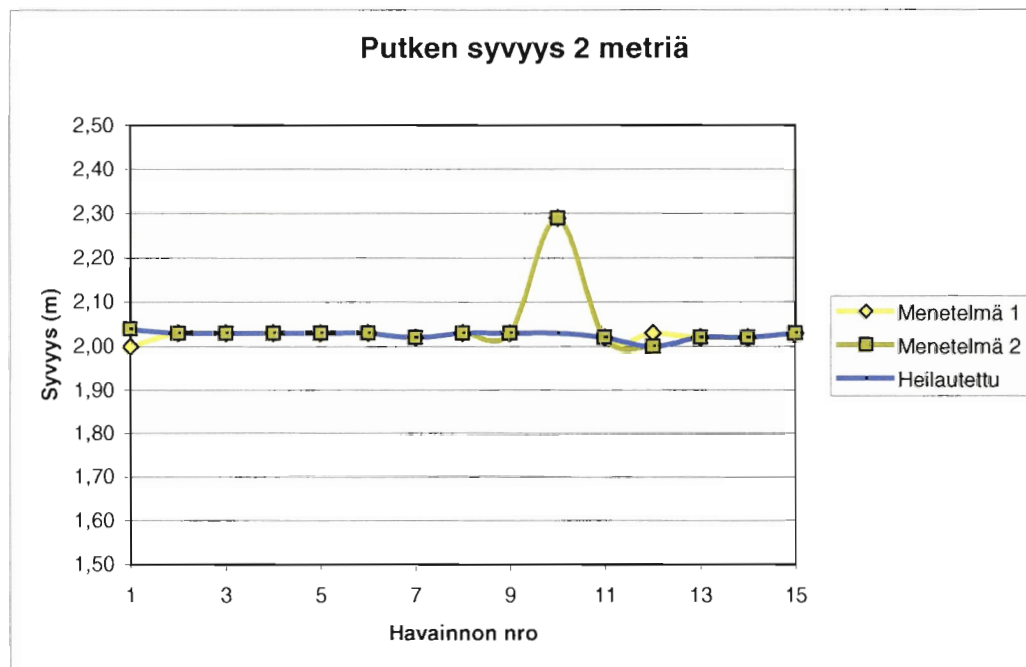
Kuva 20A. Mittaustulokset neljä metriä pitkässä putkessa

Kuvasta 20A on havaittavissa menetelmän 2 edut menetelmään 1 nähden. Lukemalaitteesta saatava huokoskärjen painearvo ei vastannut todellista veden aiheuttamaa painetta, koska lukemalaitteiston nollauksessa tapahtui joidenkin havaintojen kohdalla virhe. Oikea mittausrarvo saatiin vähentämällä huokoskärjen painearvosta kärjen yläpuolella vallitseva ilmanpaineen arvo, joka oli nolasta poikkeava. Menetelmiä vertailtaessa on kuitenkin huomattava, että tutkimuksen muissa mittauksissa vastavaa ilmiötä ei esiintynyt.

Kuvien 20B ja 20C sinisistä käyristä havaitaan, että mittaustulokset paranivat joissain tapauksissa, kun anturia mittaustilanteessa hiukan heilautettiin. Kyse on mittaustilanteen epävarmuudesta. Käytännön kenttätöissä "heilautetut" arvot ovat teoreettisia, koska huokospaineen absoluuttista arvoa ei mittaushetkellä tiedetä.



Kuva 20B. Mittaustulokset kolme metriä syvässä putkessa



Kuva 20C. Mittaustulokset kaksi metriä syvässä putkessa

Menetelmässä 1 yksittäisen havainnon tarkkuus oli $\pm 0,3\text{m}$. Menetelmässä 2 yksittäisen havainnon tarkkuus oli $\pm 0,15\text{m}$ (lukuun ottamatta yhtä mittaustulosta)

BAT huokospainemittarin sisäistä tarkkuutta sekä eri menetelmien välisiä eroja voidaan kuvissa 20A, B ja C esitettyjen tapojen lisäksi havainnollistaa myös matemaattisesti keskihajonnan avulla. Taulukosta 1 ilmenee keskihajonnat, jotka on saatu eri mittausmenetelmillä. Jokainen keskihajonnan arvo on määritetty 15 mittauksen otok-

sesta. Taulukon ensimmäinen pystyrivi ilmoittaa metreissä mittaussyvyyden ja toinen sekä kolmas pystyrivi keskihajontojen arvot.

TAULUKKO 5. BAT- huokospainemittausten keskihajonnat

Syvyys (m)	Menetelmä 1	Menetelmä 2
4 m	0,11 m	0,01 m
3 m	0,15 m	0,15 m
2 m	0,07 m	0,07 m

Taulukosta 1 nähdään, että tulosten keskihajonnat ovat alle 0,2 m. Menetelmän 2 vaikutukset näkyivät selvimmin mittauksissa, jotka tehtiin neljän metrin putkessa. Tällöin tulosten hajonta on erittäin vähäistä.

14. JOHTOPÄÄTÖKSET HUOKOSPAINEMITTAUKSISTA

Tulosten mukaan huokosmittarin sisäinen tarkkuus on hyvä. Keskimäärin tulosten hajonta on alle 0,2 m. Yksittäisten havaintojen kohdalla virheet saattavat kuitenkin olla menetelmästä riippumatta muutamia kymmeniä senttimetrejä. Yksittäisen havainnon osalta tulosta voidaan pitää odotettua huonompana ja vaatii jatkoselvityksiä.

Tutkimuksissa ilmeni, että mittaustulosten kannalta huokosmittarin herkkiä kohtia ovat lukemalaitteen nollaus, tukkoiset anturin neulat, ilman pääsy järjestelmään. Geoteknisen osaston henkilökunta mainitsi lisäksi ongelmiksi vanhojen huokosputkien vuotaminen sekä ruostuminen.

Kyseisessä huokospainemittarissa lukemalaitteen nollaaminen on toisinaan hankalaa, koska arvot ”juoksevat”. Ongelman osalta heräsi kysymys voitaisiinko laite nollata aina tietyissä laboratorio-oloissa, joissa vallitsisi määrätty ilmanpaine. Testimittauksen kaksi metristä putkea mitatessa lukemalaite nollattiin vain ensimmäisen ja toisen mittauksen alussa. Tämän jälkeen laite näytti nolla-arvoa aina, kun anturi asetettiin tiettyyn kohtaan huokosputken vierelle.

Laitteen iän vaikutusta ei selvitetty, mutta arvojen ”juokseminen” viittaa mahdolliseen toimintahäiriöön, joka huokospaineanturissa tai mittalaitteessa.

Anturin ilmaus sekä neulojen puhtaanapito ovat virhetekijöitä, jotka ovat täysin mitaajan vastuulla. Ilma täytyy poistaa anturista ennen jokaista yksittäistä mittausta ja neulojen kuntoa on syytä tarkkailla. Kun puhdas neula pyöritetään anturiin kiinni, vesi kulkee helposti sen läpi eikä kohota painetta huomattavasti.

Kokemusten mukaan vanhoissa huokosputkissa on ongelmana saumojen vuotaminen sekä sisäpinnan ruostuminen. Ruostuminen vaikuttaa puolestaan siten, että huokosputkien sisäpinnalta ruostehiukkaset laskeutuvat kerrostumaksi huokoskärjen päälle. Mittaustilanteessa anturin neulan täytyy läpäistä syntynyt kerros ja samalla ruostetta voi kulkeutua neulan sisään.

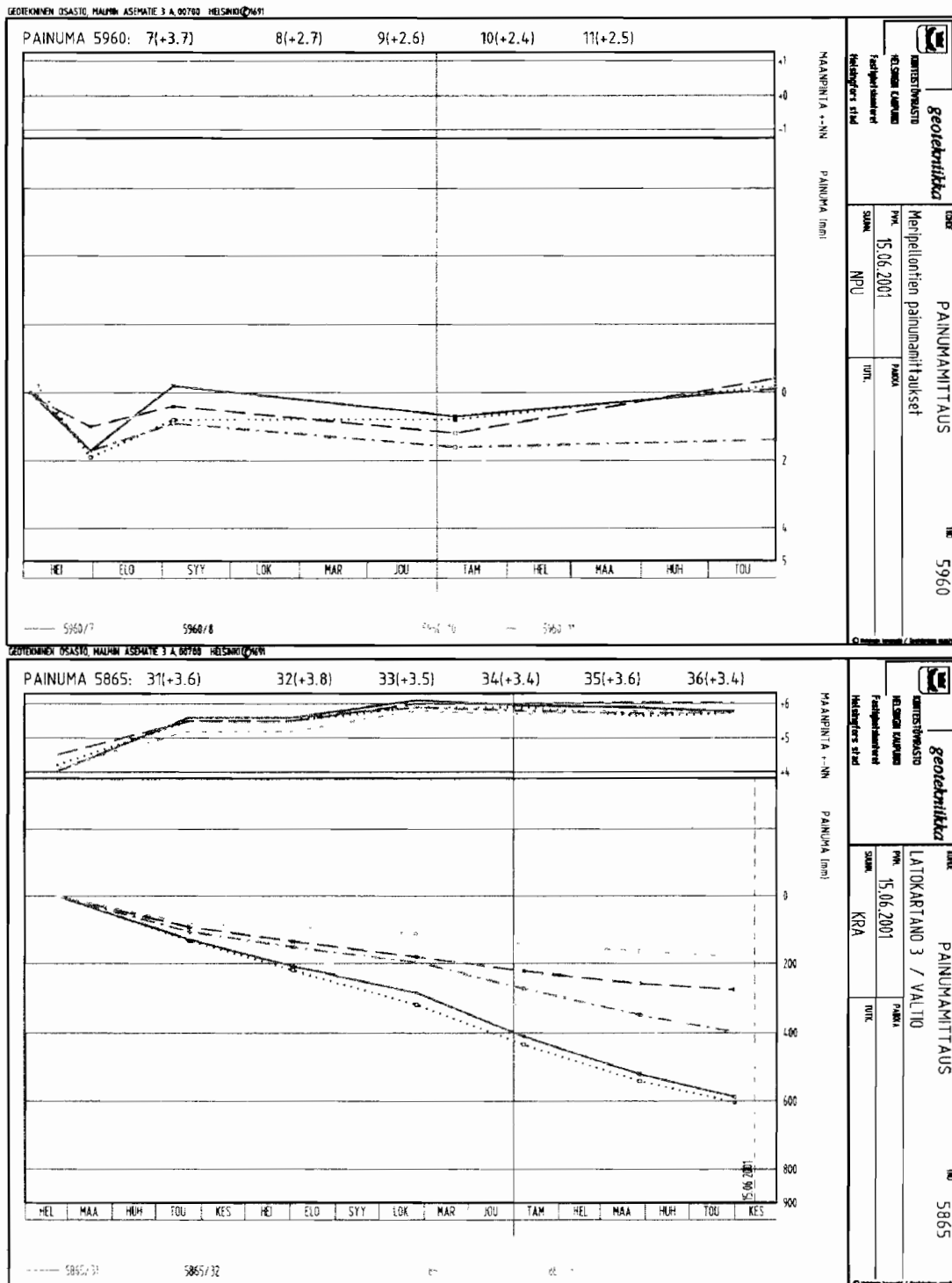
Vuotava vesi saattaa myös aiheuttaa virhettä mittausravoihin. Mikäli huokospaineanturin asennusputkessa on vettä, ei 0-mittausta/mittauksia missään tapauksessa saa suorittaa anturin ollessa vedessä, koska tällöin mitattu paine ei vastaa ilmanpainetta. Huokospaineputkessa oleva vesi havaitaan käytännössä mittarin arvoista anturia putkeen laskettaessa. Mikäli arvo alkaa nousta ennen huokospainekärkeä, on putkessa vettä.

Lämpötilan vaikutusta ei työn yhteydessä tutkittu, mutta aikaisempien kokemusten mukaan on lämpötilan tasaantumisella selvästi vaikutusta mittaustarkkuuteen. Laitteen lukemalaitteen nollaaminen tulisikin tehdä aina mittauskärjen lämpötilaa vastaavassa lämpötilassa.

LÄHDELUETTELO

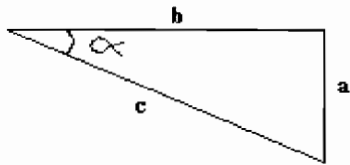
- 1 SALMENPERÄ, HANNU. 1995a. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennustekniikan osasto; geodesia ja fotogrammetria. 79 s. & 2 liitettä.
- 2 SALMENPERÄ, HANNU. 1993. Maa-, vesi ja kalliorakentamisen mittaukset. Tampere: Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennustekniikan osasto; geodesia ja fotogrammetria. ISBN 951-721-947-4
- 3 Numeerisen kartoituksen maastomittausohjeet. 1991. Espoo: Teknillinen korkeakoulu geodesian laitos. Geodesian laboratorion julkaisu n:o 20/1991. 53 s. ISBN 951-22-0544-0
- 4 Leica information. Digital levels NA2002/NA3003 v3.2. 1997. Heerbrugg, Switzerland: Leica Geosystems AG. 88 p.
- 5 ISO 8322-3. Building construction – Measuring instruments – Procedures for determining accuracy in use – Part 3: Optical levelling instruments. International Organization for Standardization, 1989. 9 p.
- 6 TAKALO, MIKKO. Henkilökohtainen tiedonanto 12.2.2001. Puhelinkeskustelu: Geodeettinen laitos.
- 7 TIKKA, MARTTI. 1991. Käytännön Geodesia I: Mittaustekniikan perusteet ja rakennusteknilliset sovellutukset. Helsinki: Kyriiri Oy. 442 s. ISBN 951-672-125-7
- 8 HAKALA, JUKKA Henkilökohtainen tiedonanto 16.4.2001. Espoo: tutustumiskäynti Inpho Technology Oy:n toimitiloissa.
- 9 SALMENPERÄ, HANNU. Henkilökohtainen tiedonanto 16.11.2000. Sähköposti: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- 10 SANTALA, JAAKKO Henkilökohtainen tiedonanto 23.11.2000. Sähköposti: Espoon teknillinen korkeakoulu.

LIITE 1 Esimerkkikohteet



LIITE 2 Laskuesimerkkejä

Esimerkki 1, kollimaatiiovirheen laskeminen:

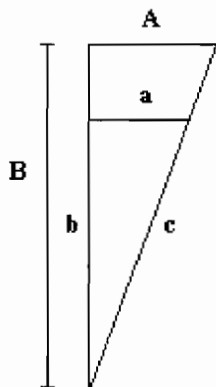


Yksi (1) sekunti on $1/(60 \cdot 60)$ astetta, eli $0,000278^\circ$. 5 sekuntia on siis $0,00139^\circ$

Syntyvän poikkeaman itseisarvo, kun $b=10\,000\text{mm}$:

$$\tan \alpha = a / b \Rightarrow a = \tan \alpha \cdot b$$

$$a = \tan 0,00139^\circ \cdot 10\,000 \text{ mm} \approx 0,24 \text{ mm}$$



Esimerkki laskutoimituksesta, kun kolme metriä pitkää lattaa kallistetaan 5 cm ja tähtäys tehdään 1,75 m korkeudelle.

c:n ja b:n ero = X mm

$$b = 1750 \text{ mm}$$

$$A = 50 \text{ mm}$$

$$B = 3000 \text{ mm}$$

Kolmioiden kulmat ovat yhtä suuria (kkk), eli kolmiot ovat yhdenmuotoisia.

→ a voidaan laskea suhteella.

$$A / B = a / b \Rightarrow a = A \cdot b / B$$

$$\text{eli } a = 50 \text{ mm} \cdot 1750 \text{ mm} / 3000 \text{ mm} \approx 29,17 \text{ mm}$$

$$\text{Pythagoran lause: } c^2 = a^2 + b^2$$

$$c = \sqrt{(29,17^2 + 1750^2)} \approx 1750,24 \text{ mm}$$

Syntyvän virheen itseisarvo tällöin $1750,24 \text{ mm} - 1750 \text{ mm} = 0,24 \text{ mm}$

LIITE 3 Testin 1 mittauspöytäkirja

Testi 1:Havaintojen identtisyys

<u>Havainnot</u>	Ratamestarinkadun kevyenliikenteenväylä, Itä-Pasilassa (20.02.-01).	laite: NA3003
20m ja 50 m	110006+00009999 83..16+00100000 110007+00009999 32..00+00049180 331108+00013814 57....+00000004 110008+00001000 32..00+00020550 332108+00197280 57....+00000004 110009+00001000 573..0+00028630 574..0+00069730 83..06+00081653 410010+?.....1	
30 m ja 40 m	110011+00010000 83..16+00100000 110012+00010000 32..00+00029910 331108+00220493 57....+00000004 110013+00009999 32..00+00039690 332108+00036982 57....+00000004 110014+00009999 573..0-00009780 574..0+00069610 83..06+00118351 410015+?.....1	
35 m ja 35 m	110016+00000035 83..16+00100000 110017+00000035 32..00+00035011 331108+00055632 57....+00000004 110018+00009999 32..00+00034749 332108+00239180 57....+00000004 110019+00009999 573..0-00000400 574..0+00069760 83..06+00081644 410020+?.....1	
40 m ja 30 m	110021+00009999 83..16+00100000 110022+00009999 32..00+00029660 331108+00061817 57....+00000004 110023+00001000 32..00+00039960 332108+00245349 57....+00000004 110024+00001000 573..0-00010300 574..0+00069610 83..06+00081647 410025+?.....1	
50 m ja 20 m	110026+00001000 83..16+00100000 110027+00001000 32..00+00050630 331108+00270119 57....+00000004 110028+00009999 32..00+00019330 332108+00086454 57....+00000004 110029+00009999 573..0+00031290 574..0+00069960 83..06+00118367	
Olosuhteet:	lämpötila -12 astetta, tuulinen, pilvinen	Nimikirjaimet: M.S & H.S

<u>Havainnot</u>	Ratamestarinkadun kevyenliikenteenväylä, Itä-Pasilassa (01.03.-01).	
20m ja 50 m	110036+00000020 83..16+00100000 110037+00000020 32..00+00049190 331108+00015645 57....+00000004 110038+00009999 32..00+00020760 332108+00199169 57....+00000004 110039+00009999 573..0+00028430 574..0+00069940 83..06+00081648 410040+?.....1	
30 m ja 40 m	110041+00009999 83..16+00100000 110042+00009999 32..00+00030000 331108+00222843 57....+00000004 110043+00000030 32..00+00039770 332108+00039274 57....+00000004 110044+00000030 573..0-00009770 574..0+00069770 83..06+00118357 410045+?.....1	
35 m ja 35 m	110046+00000035 83..16+00100000 110047+00000035 32..00+00034680 331108+00053661 57....+00000004 110048+00009999 32..00+00035080 332108+00237220 57....+00000004 110049+00009999 573..0-00000400 574..0+00069760 83..06+00081644 410050+?.....1	
40 m ja 30 m	110051+00009999 83..16+00100000 110052+00009999 32..00+00039980 331108+00247238 57....+00000004 110053+00000040 32..00+00029790 332108+00063639 57....+00000004 110054+00000040 573..0+00010180 574..0+00069770 83..06+00118360 410055+?.....1	
20 m ja 50 m	110056+00000050 83..16+00100000 110057+00000050 32..00+00019880 331108+00085716 57....+00000004 110058+00009999 32..00+00049880 332108+00269324 57....+00000004 110059+00009999 573..0-00030000 574..0+00069760 83..06+00081639	
Olosuhteet:	lämpötila -10 astetta, tyyni, pilvinen	Nimikirjaimet: M.S & H.S

LIITE 4 Referenssimittaus

Referenssi testille 1: Havaintojen identtisyys

Ratamestarinkadun kevyenliikenteenväylä, Itä-Pasilassa (20.02.2001)

Tarkkavaaitus NA3003:lla

110024+00001000 83..16+00100000
 110025+00001000 32..00+00017790 331108+00190294 57....+00000004
 110026+00005000 32..00+00017470 332108+00111333 57....+00000004
 110027+00005000 32..00+00017470 336108+00111332 57....+00000004
 110028+00001000 32..00+00017770 335108+00190291 57....+00000004
 110029+00005000 571..8+00000002 572..8+00000002 573..0+00000310 574..0+00035250 83..06+00107896
 110030+00005000 32..00+00019290 331108+00203386 57....+00000004
 110031+00009999 32..00+00015110 332108+00098762 57....+00000004
 110032+00009999 32..00+00015110 336108+00098760 57....+00000004
 110033+00005000 32..00+00019270 335108+00203372 57....+00000004
 110034+00009999 571..8+00000012 572..8+00000014 573..0+00004480 574..0+00069640 83..06+00118358
 110035+00009999 32..00+00015090 331108+00098780 57....+00000004
 110036+00005001 32..00+00019260 332108+00203383 57....+00000004
 110037+00005001 32..00+00019260 336108+00203374 57....+00000004
 110038+00009999 32..00+00015090 335108+00098769 57....+00000004
 110039+00005001 571..8+00000002 572..8+00000016 573..0+00000310 574..0+00104000 83..06+00107897
 110040+00005001 32..00+00017430 331108+00109162 57....+00000004
 110041+00001000 32..00+00017820 332108+00188110 57....+00000004
 110042+00001000 32..00+00017810 336108+00188122 57....+00000004
 110043+00005001 32..00+00017440 335108+00109148 57....+00000004
 110044+00001000 571..8+00000026 572..8+00000041 573..0+00000070 574..0+00139250 83..06+00100001

Olosuhteet: lämpötila -1 aste
 tyyni keli
 pilvinen

Nimikirjaimet: M.S. & H.S.

Pulttien välinen korkeusero tasoitettuna: 1.8357 m

LIITE 5 Testin 2 mittauspöytäkirja 1(3)

[illegible]

LIITE 6 Testin 2 mittauspöytäkirja 2(3)

Testi 2: Havaintoetäisyydet

Havainnot 10 metrisiä

Mennessä

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
1000		10.00000
	1,81458	
	1,55076	0,2638 10,26382
	1,62897	
	1,52837	0,1006 10,36442
	1,64583	
	1,56973	0,0761 10,44052
	1,65674	
	1,5604	0,0963 10,53686
	1,69212	
	1,47161	0,2205 10,75737
	1,72991	
999	1,50278	0,2271 10,98450
Pisteiden välinen korkeusero:		0,9845

Käpylätien kevyenliikenteenväylä 10.3.2001

Laite: NA3003

Tullessa

Piste	Havainnot	Korkeus(m)
1000		10,00000
	1,5028	
	1,72982	0,22702 10,22702
	1,45761	
	1,67737	0,21976 10,44678
	1,56756	
	1,66338	0,09582 10,54260
	1,55494	
	1,63128	0,07634 10,61894
	1,54583	
	1,64641	0,10058 10,71952
	1,52900	
999	1,79352	0,26452 10,98404
Pisteiden välinen korkeusero:		0,98404

XX

Havainnot 20 metrisiä

Mennessä

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
1000		10.00000
	1,87342	
	1,50821	0,36521 10,36521
	1,67145	
	1,50053	0,17092 10,53613
	1,84657	
999	1,39826	0,44831 10,98444
Pisteiden välinen korkeusero:		0,98444

Tullessa

Piste	Havainnot	Korkeus(m)
1000		10,00000
	1,39829	
	1,84618	0,44789 10,44789
	1,51678	
	1,68926	0,17248 10,62037
	1,52057	
999	1,88478	0,36421 10,98458
Pisteiden välinen korkeusero:		0,98458

XX

Havainnot 30 metrisiä

Mennessä

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
1000		10.00000
	1,92881	
	1,48842	0,44039 10,44039
	1,75721	
999	1,21298	0,54423 10,98462
Pisteiden välinen korkeusero:		0,98462

Tullessa

Piste	Havainnot	Korkeus(m)
1000		10,00000
	1,21299	
	1,75721	0,54422 10,54422
	1,48627	
	1,92652	0,44025 10,98447
Pisteiden välinen korkeusero:		0,98447

Olosuhteet: lämpötila: -4 astetta
tyyni, puolipilvinen

LIITE 7 Testin 2 mittauspöytäkirja 3(3)

[illegible][illegible]

Havainnot 30 metrisiä			
Mennessä			
Piste	Havainnot	Korkeus (m)	
1000		10.00000	
	1.9014		
	1.45906	0.44234	10.44234
	1.78229		
999	1.24769	0.5346	10.97694
Pisteiden välinen korkeusero:		0.97694	

Tullessa			
Piste	Havainnot	Korkeus(m)	
1000		10.0000	
	1.2477		
	1.78226	0.53456	10.53456
	1.4676		
999	1.90989	0.44229	10.97685
Pisteiden välinen korkeusero:		0.97685	

Olosuhteet: lämpötila: +3 astetta
tyyni, puolipilvinen

LIITE 8 Testin 3 mittauspöytäkirja 1 (6)

[illegible]

LIITE 9 Testin 3 mittauspöytäkirja 2 (6)

Kolmas sarja				Tullessa			
Mennessä							
Piste	Havainnot	Korkeus (m)		Piste	Havainnot	Korkeus (m)	
10000		10,00000		9999		10,00000	
	1,8117				1,51803		
	1,46676	0,34494	10,34494		1,66566	-0,14763	9,85237
	1,78988				1,39485		
	1,59137	0,19851	10,54345		1,68843	-0,29358	9,55879
	1,69328				1,5117		
	1,5719	0,12138	10,66483		1,73899	-0,22729	9,3315
	1,60789				1,41703		
	1,43095	0,17694	10,84177		1,58249	-0,16546	9,16604
	1,74054				1,57986		
	1,51852	0,22202	11,06379		1,70567	-0,12581	9,04023
	1,68627				1,58518		
	1,40076	0,28551	11,3493		1,78144	-0,19626	8,84397
	1,66555				1,48289		
9999	1,51805	0,1475	11,4968	10000	1,8234	-0,34051	8,50346
Pisteiden välinen korkeusero:				1,49680 Pisteiden välinen korkeusero:			
				1,49654			

[illegible]

Neljäs sarja				Tullessa			
Mennessä							
Piste	Havainnot		Korkeus (m)	Piste	Havainnot		Korkeus (m)
	10000		10,00000				10,00000
	10000	1,81554		9999	1,54839		
		1,46077	0,35477		1,70749	-0,1591	9,8409
		1,73311			1,42703		
		1,55257	0,18054		1,72254	-0,29551	9,54539
		1,66146			1,51977		
		1,54618	0,11528		1,72967	-0,2099	9,33549
		1,66970			1,45135		
		1,48068	0,18902		1,63125	-0,1799	9,15559
		1,73457			1,58786		
		1,51470	0,21987		1,6995	-0,11164	9,04395
		1,68676			1,55071		
		1,40826	0,2785		1,74475	-0,19404	8,84991
		1,70737			1,46288		
	9999	1,54835	0,15902	10000	1,8092	-0,34632	8,50359
Pisteiden välinen korkeusero:			1,49700	Pisteiden välinen korkeusero:			1,49641

LIITE 10 Testin 3 mittauspöytäkirja 3(6)

Viides sarja

Mennessä				Tullessa			
Piste	Havainnot	Korkeus (m)		Piste	Havainnot	Korkeus (m)	
10000		10,00000		9999		10,00000	
	1,80918				1,50114		
	1,46283	0,34635	10,34635		1,66933	-0,16819	9,83181
	1,76052				1,41427		
	1,58097	0,17955	10,5259		1,6875	-0,27323	9,55858
	1,71714				1,49934		
	1,59555	0,12159	10,64749		1,71927	-0,21993	9,33865
	1,61889				1,4103		
	1,42868	0,19021	10,8377		1,58464	-0,17434	9,16431
	1,72609				1,54504		
	1,52842	0,19767	11,03537		1,67359	-0,12855	9,03576
	1,68789				1,52516		
	1,395	0,29289	11,32826		1,71727	-0,19211	8,84365
	1,66937				1,46272		
9999	1,50113	0,16824	11,4965	10000	1,8022	-0,33948	8,50417

Pisteiden välinen korkeusero:	1,49650	Pisteiden välinen korkeusero:	1,49583
--------------------------------------	----------------	--------------------------------------	----------------

[illegible]

Olosuhteet: +1 aste
Aamupäivällä hieman tuulista, iltapäivällä tyyntä pilvinen

Nimikirjaimet: M.S. & H.S.

Korkeuserojen keskiarvo:	1,49631 m
NA3000:lla mitattuna	1,49546 m
Zeiss Dini T10:llä mitattuna	1,49760 m

LIITE 12 Testin 3 mittauspöytäkirja 5(6)

Kolmas sarja

Mennessä

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
10000		10,00000
	1.81766	
	1.46417	0.35349 10,35349
	1.73155	
	1.55932	0.17223 10,52572
	1.68115	
	1.56579	0.11536 10.64108
	1.63962	
	1.44506	0.19456 10.83564
	1.71325	
	1.52628	0.18697 11.02261
	1.70461	
	1.38462	0.31999 11,3426
	1.75734	
9999	1.60326	0.15408 11.49668
Pisteiden välinen korkeusero:		1,49668

Tullessa

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
9999		10,00000
	1.60327	
	1.7575	-0.15423 9,84577
	1.37767	
	1.69041	-0.31274 9,53303
	1.51313	
	1.72109	-0.20796 9.32507
	1.42243	
	1.61371	-0.19128 9.13379
	1.58273	
	1.70067	-0.11794 9.01585
	1.56181	
	1.72904	-0.16723 8,84862
	1.49608	
10000	1.84051	-0.34443 8.50419
Pisteiden välinen korkeusero:		1,49581

XX

Neljäs sarja

Mennessä

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
10000		10.00000
	1.8405	
	1.49607	0.34443 10,34443
	1.7544	
	1.57957	0.17483 10.51926
	1.69164	
	1.57252	0.11912 10.63838
	1.63114	
	1.43591	0.19523 10.83361
	1.71358	
	1.50665	0.20693 11.04054
	1.69796	
	1.40126	0.2967 11,33724
	1.66154	
9999	1.50249	0.15905 11.49629
Pisteiden välinen korkeusero:		1,49629

Tullessa

Piste	Havainnot	Korkeus (m)
9999		10,00000
	1.50251	
	1.66176	-0,15925 9,84075
	1.38601	
	1.68294	-0,29693 9.54382
	1.52929	
	1.73633	-0.20704 9.33678
	1.4095	
	1.59317	-0.18367 9,15311
	1.55229	
	1.69237	-0.14008 9.01303
	1.59032	
	1.77435	-0,18403 8,829
	1.48308	
10000	1.80815	-0,32507 8.50393
Pisteiden välinen korkeusero:		1,49607

LIITE 14 Referenssimittaus 1(2)

referenssi testille 3: Tarkkuustarkastelu

Käpylä, Käpyläntie 12.03.2001

kevennetty tarkkavaaitus kaksoishavainnoin

laite: Zeiss Dini T10

Piste	taakse	eteen			Korkeus (m)
1000					10,0000
	1,74643	1,44400	0,30243		
	1,74638	1,44408	0,30230	0,302365	10,3024
	1,68648	1,53260	0,15388		
	1,68640	1,53256	0,15384	0,15386	10,4562
	1,62647	1,52064	0,10583		
	1,62643	1,52064	0,10579	0,10581	10,5620
	1,63831	1,41794	0,22037		
	1,63823	1,41790	0,22033	0,22035	10,7824
	1,66706	1,48947	0,17759		
	1,66707	1,48953	0,17754	0,177565	10,9600
	1,66211	1,34301	0,31910		
	1,66205	1,34301	0,31904	0,31907	11,2790
	1,69280	1,47422	0,21858		
999	1,69280	1,47421	0,21859	0,218585	11,4976
Pisteiden välinen korkeusero:					1,4976

olosuhteet: lämpötila +4 astetta
 tiheysade, tyyni

Nimikirjaimet: M.S. & H.S.

LIITE 15 Referenssimittaus 2(2)

referenssi testille 3: Tarkkuustarkastelu**Käpylä, Käpylätien kevyenliikenteenväylä 27.3.2001****laite: Maanmittauslaitoksen NA3000****Piste**

10000 110001+00010000 83..16+00100000
 110003+00010000 32..00+00023640 331108+00179816
 110004+00000001 32..00+00019240 332108+00145701 83..06+00103412
 110005+00000001 32..00+00021400 331108+00167621
 110006+00000002 32..00+00020830 332108+00149810 83..06+00105193
 110007+00000002 32..00+00025170 331108+00165677
 110008+00001000 32..00+00019620 332108+00165778 83..06+00105183
 110009+00001000 32..00+00019940 331108+00185812
 110010+00000003 32..00+00018960 332108+00148664 83..06+00108897
 110011+00000003 32..00+00021050 331108+00165395
 110012+00000004 32..00+00020750 332108+00146678 83..06+00110769
 110013+00000004 32..00+00020780 331108+00180699
 9999 110015+00009999 32..00+00018110 332108+00138816 83..06+00114957

 9999 110029+00009999 83..16+00100000
 110030+00009999 32..00+00019810 331108+00135686
 110031+00000001 32..00+00020280 332108+00179030 83..06+00095666
 110032+00000001 32..00+00019720 331108+00149489
 110033+00000002 32..00+00019860 332108+00166520 83..06+00093963
 110034+00000002 32..00+00020070 331108+00146043
 110035+00001000 32..00+00019840 332108+00183487 83..06+00090218
 110036+00001000 32..00+00020790 331108+00165442
 110037+00000003 32..00+00020250 332108+00163893 83..06+00090373
 110038+00000003 32..00+00020280 331108+00151292
 110039+00000004 32..00+00019710 332108+00163444 83..06+00089158
 110040+00000004 32..00+00024640 331108+00138018
 10000 110041+00010000 32..00+00024230 332108+00179115 83..06+00085048

Olosuhteet: -1 aste
 lumisade
 tyyni

Nimikirjaimet: M.S. & H.S.

X-position verkkotasoitushjelmalla tasoitettuna pulttien välinen korkeusero:

1495.5 mm

Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO PL 2202 00099 HELSINGIN KAUPUNKI PUHELIN (09) 1691, FAX (09) 169 4555 http://www.hel.fi/kv/geo	Julkaisusarja, numero ja julkaisu-aika Geoteknisen osaston julkaisut 83/2001 Joulukuu 2001	
Tekijä(t) Markku Savolainen Hannu Halkola	Projektinnumero(t) 6643	
Julkaisija HELSINGIN KAUPUNKI KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO		
Nimike PAINUMA-, SIVUSIIRTYMÄ- JA HUOKOSPAINEMITTAUSTEN TARKKUUS		
Tiivistelmä Tämän työn tarkoituksena oli tutkia geoteknisellä osastolla käytössä olevien eri erikoismittauslaitteiden tarkkuutta ja verrata erilaisia mittausmenetelmiä. Työ jaettiin aiheittain kolmeen osaan; painumamittaukset, sivusiirtymämittaukset sekä huokospainemittaukset. Pääpaino oli painumamittauksiin liittyvissä tutkimuksissa. Geoteknisellä osastolla käytettävien painumamittauslaitteilla tehtyjen empiiristen mittausten tuloksena selvisi, että tutkittujen laitteiden sisäinen tarkkuus oli erittäin hyvä. Absoluuttinen tarkkuus oli tarkkavaaituslaitteiston osalta tyydyttävä, takymetrin osalta vaihteleva. Sekä absoluuttisen- että toistotarkkuuden kannalta mittausmenetelmillä ja olosuhteilla oli olennainen vaikutus. Tutkimustuloksien perusteella esitetään painumamittausten jakamisesta kolmeen tarkkuusluokkaan geoteknisen osaston laatujärjestelmää varten: • Tarkkuusluokka A, tarkkavaaitus (sallittu keskivirhe < 0,2mm) • Tarkkuusluokka B, jonovaaitus (sallittu keskivirhe < 0,4mm) • Tarkkuusluokka C, perusvaaitus (sulkuvirhe < 1,5mm) Käytännön mittaustarkkuus on kokemusten mukaan n. +/- 3–5 kertaa sallittu keskivirhe/sulkuvirhe. Luokat on määritelty mittaustarkkuuden, -menetelmien sekä käytettävien laitteiden avulla. Jokaisessa luokassa mittausmenetelmiä on kuvattu tietyin ominaispiirtein. Ehdotuksen lähtökohtina olivat geoteknisen osaston suunnittelijoiden tarpeet ja henkilökunnan kokemukset. Aineistona käytettiin ensisijaisesti työn empiirisistä mittauksista saatuja tuloksia sekä tehtyjä havaintoja. Näkökulman laajentamiseksi haastateltiin myös osaston ulkopuolisia maanmittaus- sekä rakennusalan ammattilaisia. Sivusiirtymämittausten osalta työssä selvitettiin mittausten periaatteita sekä toteutusta. Koekohteissa tutkittiin myös geoteknisellä osastolla käytössä olevan inklinometrilaitteiston tarkkuutta, kuinka lämpötilan tasaantuminen tulee ottaa sivusiirtymämittauksissa huomioon sekä havaintosuuntien lisäämisen vaikutusta mittaustarkkuuteen. Tutkimuksen mukaan käytettävän inklinometrin sisäinen tarkkuus oli hyvä, <2mm/20m ja absoluuttinen tarkkuus oli kohtalainen < 4mm/20m. Lämpötilatasaantumisen vaikutus mittaustarkkuuteen oli tutkimusten mukaan vähäinen, mutta huomioarvoinen. Lämpötilaeron ollessa noin 20 celsiusastetta tulee lämpötilatasaantumiseen varata aikaa vähintään 10 minuuttia. Havaintosuuntien lisäyksen osalta huomattiin, että lisäämisellä oli myönteinen vaikutus ainoastaan toisen mittaussuunnan tarkkuuteen, jolloin tuloksien keskihajonta pieneni selvästi. Huokospainemittauksissa selvitettiin kahden mittauskäytännön, geoteknisen osaston oman sekä valmistajan suositteleman, eroja. Bat-laitteistoa käytettäessä on valmistajan mittaustapa selkeästi suositeltavampi, jolloin mittaustarkkuus on yleensä < 0.2m (2kPa).		
Avainsanat geoteknisen mittaukset, tarkkailumittaukset, vaaitus, huokospaine, korkeudenmittaus, rakentaminen, sivusiirtymät		
ISSN 1458-2198	ISBN 951-718-837-4	Luokitus (UDK) 624.13
Kieli suomi, ruotsi, engl. tiivistelmä	Sivuja 61 s. + liitteet	

Published by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION P.O Box 2202 00099 THE CITY OF HELSINKI FINLAND PHONE +358-9-1691, FAX +358-9-169 4555 http://www.hel.fi/kv/geo	Series title, number and date Geoteknisen osaston julkaisut 83/2001 December 2001	
Author(s) Markku Savolainen Hannu Halkola	Project number(s) 6643	Commissioned by HELSINKI CITY REAL ESTATE DEPARTMENT GEOTECHNICAL DIVISION
Title THE ACCURACY OF HORIZONTAL -, VERTICAL - AND PORE PRESSURE MEASUREMENTS		
Abstract The aim of this research was to investigate the actual precision of the measuring devices used in the geotechnical division. It consists of three parts; horizontal measurements, lateral measurements and pore pressure measurements. The main effort was put to investigate the horizontal measurements. Based on empirical testing it was found that internal accuracies of the measuring instruments used in the geotechnical division (leveling equipment Leica NA3003 and the total station Geodimeter 608S) were good. Instead the absolute accuracy of the precision leveling equipment was moderate, and variable for the total station. The effects of different circumstances and methods on the measuring accuracy were significant. On the basis of empirical measurements an accuracy classification for settling measurements is introduced mainly to the geotechnical division. It is based on opinions of the staff of the geotechnical division, the results of the empirical testing, literature and interviews of the experts in the field of land surveying. The measurements are classified on three categories: • Precision category A, (allowed mean error < 0,2mm) • Precision category B, (allowed mean error < 0,4 mm) • Precision category C, (allowed closing error < 1.5mm) In practice the actual error of the results is normally 3-5 times allowed mean error/closing error. The accuracy for vertical measurements was tested using inclinometer devices by measuring how temperature differences affect the results and the effect of increasing measuring directions. It was found out that both the internal measuring accuracy of the inclinometer were good and the absolute moderate. It was also found out that the affects of the temperature differences were worth noticing. A temperature drift of a temperature difference 20 degrees centigrade takes about ten minutes. Multi-measurement system gave better accuracy only to the other measuring di-rection when standard deviation of results was significantly smaller. The accuracy of BAT pore pressure probe was also tested. In the report two measuring practice, a geotechnical division method and the manufacturer method were tested. Based on the standard deviation of the test results it was found out that using the BAT device, the measuring practice recommended by the manufacturer is clearly better. The error of results is then usually < 0.2m (2kPa).		
Keywords Leveling, determination of height, construction, geotechnical measurements, pore pressure		
ISSN 1458-2198	ISBN 951-718-837-4	Class (UDC) 624.13
Language Finnish, Swedish, Engl. Abstr.	Pages 61 p. + app.	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 1(2)

1	<i>Anttikoski, Usko</i>	Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen	1973	•
2	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1973	•
3	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu	1974	•
4	<i>Mäkinen, Reino</i>	Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella	1974	•
5	<i>Saarelma, Matti</i>	Melusojarakenteiden perustamistapaselvitys	1974	
6	<i>Hartikainen, Jorma</i>	Kitkapaalujen kantavuus	1976	
7	<i>Petäjä, Jouko</i>	Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen	1977	
8	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Metrotunnelien injektointi	1977	•
9	<i>Anttikoski, Usko</i>	Kalliotunnelien käyttö varastointiin	1977	•
10	<i>Tikkanen, Heikki</i>	Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa	1978	
11	<i>Arkima, Olli</i>	Kluuvin ruhjeen jäädys	1978	•
12	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Puiset perustusrakenteet	1979	
13	<i>Havukainen, Jorma</i>	Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa	1979	
14	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Pehmeikölle perustettavan pientalon painuminen laskeminen	1979	•
15	<i>Raudasmaa, Pekka</i>	Pohjavesitarkkailu -80	1980	•
16	<i>Anttikoski, Usko</i>	Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunnelikonferenssin kokemusten perusteella	1979	•
17	<i>Roinisto, Jarmo</i>	Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneliin	1981	
18	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa	1981	•
19	<i>Roinisto, Jarmo</i>	Yhteiskäyttötunnelien teknis-taloudellinen selvitys	1981	
20	<i>Vuola, Pekka</i>	Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta	1981	
21	<i>Havukainen, Jorma & Korhonen, Osmo</i>	Tonttialueiden maarakenteet	1981	
22	<i>Havukainen, Jorma</i>	Esimerkkejä jätteen hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä	1981	
23	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa	1982	
24	<i>Latvala, Ahti</i>	Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys	1982	
25	<i>Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Sulamäki, Antti</i>	Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttömahdollisuuksista maarakentamisessa	1982	
26	<i>Halkola, Hannu</i>	Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakentamiskohteet Torppanmäessä	1982	•
27	<i>Paavola, Pertti</i>	Kunnallisteknisten tunnelien louhintakustannus selvitys	1982	
28	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Maarakennusta koskeva mallityöselitys	1982	•
29	<i>Gulin, Kai</i>	Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa	1982	
30	<i>Halkola, Hannu</i>	Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät	1982	
31	<i>Havukainen, Jorma</i>	Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet	1983	
32	<i>Havukainen, Jorma</i>	Användning av stenkolaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar	1983	
33	<i>Havukainen, Jorma</i>	The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines	1983	
34	<i>Salmelainen, Juha</i>	Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta	1983	
35	<i>Havukainen, Jorma</i>	Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista	1983	
36	<i>Hytti, Pekka</i>	Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomiointi urakka-asiakirjoissa	1984	
37	<i>Leinonen, Jukka</i>	Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa	1984	
38	<i>Pinnen, Jussi</i>	Kelluvan rantapenkereen rakentaminen	1984	•
39	<i>Latvala, Ahti</i>	Geotekninen kustannuslaskenta, Geo-kuti	1984	•
40	<i>Korpela, Jaakko & Schüller, Mikael</i>	Jäykkiä liitosjohtojen pohjarakennus selvitys (Jäli-selvitys)	1984	
41	<i>Lahtinen, Eeva-Riitta</i>	Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti)	1985	
42	<i>Korpi, Juha</i>	In Situ -kuormituskoe painumien määrittämiseksi	1985	
43	<i>Havukainen, Jorma</i>	Esirakentamisen kehittäminen	1985	
44	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Jäädysmenetelmän käyttö	1987	
45	<i>Havukainen, Jorma & Hämäläinen, Alpo & Latvala, Ahti</i>	Kivihiilituhkien käyttökokeemukset kunnallistekniikan maarakenteissa	1987	•
46	<i>Julkunen, Arto</i>	Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa	1987	
47	<i>Hutri, Kaisa-Leena</i>	Vuosaaren kivilajien soveltuvuus asfalttipäällysteisiin	1988	
48	<i>Melander, Kari</i>	Puristin-heijarikairaus kairausmenetelmänä	1989	
49	<i>Leppänen, Mikko</i>	Vahvisinkakaiden käyttö Vanhankaupunginlahden ranta-alueen rakentamisessa	1989	
50	<i>Vähäaho, Ilkka & Ryhänen, Hannu</i>	Sulamiskonsolidaation vaikutukset savessa	1989	
51	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Effects of Thaw Consolidation on Geotechnical Properties of Clay	1989	
52	<i>Koskela, Pekka</i>	Routastabiloinnin vaikutus ruoppausmassaan	1989	
53	<i>Saari, Mauri & Korhonen, Osmo</i>	Paalujen dynaaminen koestus PDA-laitteistolla	1990	
54	<i>Saari, Mauri & Volanen, Niilo</i>	Ruoholahden koepaalutus	1990	
55	<i>Yrjölä, Jouni & Korhonen, Osmo</i>	Pystyjoitus Pikku-Huopalahdessa	1991	
56	<i>Niinimäki, Risto & Raudasmaa, Pekka</i>	Viikimäen keskuspuhdistamon rakennusgeologiset kalliotutkimukset	1992	
57	<i>Nieminen, Jarmo & Johansson, Enk & Holopainen, Pekka</i>	Viikimäen keskuspuhdistamon louhinnan aikainen kalliomekaaninen seuranta	1992	
58	<i>Ahola, Jukka & Viitala, Raimo</i>	Lujitus- ja tiivistymäärät Helsingin pientunnelissa	1992	
59	<i>Ravea, Timmo & Korhonen, Osmo</i>	Helsingin tulvapadon rakentamisen edellytykset	1992	
60	<i>Taipale, Hannu & Korhonen, Osmo</i>	Paalutustärinän arviointi kirjallisuuden ja mittausten perusteella	1992	
61	<i>Karlstedt, Paul & Halkola, Hannu</i>	Ylijäämäsavien massastabilointi	1993	

GEOTEKNISEN OSASTON JULKAISUT 2(2)

62	<i>Leiskallio, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Maankäytön geotekninen suunnittelu	1993
63	<i>Anttikoski, Usko & Kumar, Seppo & Saarelainen, Seppo</i>	Kalliokaivanto jätehuollossa (esiraportti)	1993
64	<i>Rekonen, Rita & Halkola, Hannu</i>	Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla	1994
65	<i>Ulmala, Oja & Halkola, Hannu</i>	Puristin-porakonekairaus	1994
66	<i>Havukainen, Jorma</i>	Katsaus ympäristötekniikkaan kansainvälisen kongressin valossa (matkakertomus)	1995
67	<i>Korkeakoski, Pasi & Lehtonen, Jouko</i>	Asuinrakennusten tontti- ja pohjarakennuskustannukset	1996
68	<i>Puumalainen Niina & Havukainen Jorma</i>	Vakuumikonsolidointikoe Helsingin Torpparinmäessä	1996
69	<i>Mehtälä, Jani & Korhonen, Osmo</i>	Puotilan metroaseman pohjavesivaikutusten arviointi numeerisilla menetelmillä	1998
70	<i>Nieminen, Jarmo & Anttikoski, Usko</i>	EU:n rahoitustuki Helsingin kaupungin tutkimustoiminnassa	1996
71	<i>Junnila, Antti & Lehtonen, Jouko</i>	Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96	1996
72	<i>Wegelius, Arto & Viitala, Raimo</i>	Kallioluokitusmenetelmien käyttö tunnelien lujituksessa	1996
73	<i>Vähäaho, Ilkka</i>	Savien stabilointi eri sideaineilla, kenttäkokeiden tulokset	1996
74	<i>Rantala, Kalle & Halkola, Hannu</i>	Paalun kantavuuden arviointi puristin-heijarikairalla	1997
75	<i>Wegelius, Arto & Holopainen, Pekka</i>	Paisuvat kalliosavet	1997
76	<i>Leivo, Pekka & Halkola, Hannu</i>	Maa- ja kallioperätietojen tulkinta porakonekairauksen rekisteröintituloksista	1998
77	<i>Nauska, Jari & Havukainen, Jorma</i>	Esirakentaminen 1998	1998
78	<i>Svanström, Terhi & Raudasmaa, Pekka</i>	Pohjavesi Helsingin kaupunkiympäristössä: esiintyminen, käyttö, suojele ja vaikutus rakentamiseen	1998
79	<i>Pitkänen, Juha & Vähäaho, Ilkka & Raudasmaa, Pekka</i>	Puupaalujen rakenteellisen kantokyvyn tarkastaminen	1999
80	<i>Mikkola, Jannis & Viitala, Raimo</i>	Pitkien vesitunneleiden sortumat ja lujitus	1999
81	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen Ari</i>	Viikin savikatu	2000
82	<i>Mäkelä, Harri & Höynälä Harri & Halkola Hannu & Kettunen Ari</i>	Massastabiloitujen ylijäämäsavien käyttö maarakentamisessa, suunnitteluohjeet, työselitykset ja laatuvaatimukset	2000
83	<i>Savolainen Markku & Hannu Halkola</i>	Painuma-, sivusiirtymä- ja huokospainemittausten tarkkuus	2001
84	<i>Leminen Jenni & Raudasmaa Pekka & Antti Salla</i>	Orgaaniset liuottimet Helsingin maaperässä	2001

GEO 10 K	Kallioperäkarta - Berggrundskarta 1:10.000, Helsinki - Helsingfors	1978
GEO 10 M	Maaperäkarta - Jordmånskarta - Geotechnical Atlas of Soil Deposits 1:10.000, Helsinki - Helsin	1989

*) painos loppuunmyyty

Helsingin kaupunki
Kiinteistövirasto
geotekninen osasto
PL 2202
00099 HELSINGIN KAUPUNKI

Käyntiosoite: Malmi asematie 3 A, Helsinki 70
Vaihde (09) 1691, asiakaspalvelu (09) 169 4559, fax (09) 169 4555
Email geo@hel.fi
http://www.hel.fi/kv/geo