

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

**POLJINVOIMAN MITTAUSJÄRJESTELY**  
**MEASUREMENT ARRANGEMENT FOR PEDALING FORCE**

Lappeenrannassa 5.5.2011

Tomi Sipilä

0320446

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	2
1. JOHDANTO .....	4
1.1 Tutkimusprojekti.....	4
1.2 Tutkimuksen tavoitteet .....	4
2. TEHON MITTAUSLAITTEET .....	6
2.1 Venymäliuskat .....	6
2.2 Muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset .....	9
2.2.1 Ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset.....	11
2.2.2 Polkimen akselin muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset.....	14
2.2.2.1 MetriGear Vector .....	14
2.2.2.2 Kéo PowerPedal.....	16
2.2.3 Takanavan muodonmuutoksiin perustuva sovellus .....	17
2.3. Ketjun värähtelyyn perustuva sovellus .....	19
2.4. Vastavoimaan perustuva sovellus .....	20
2.5 Ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvan sovelluksen kehittäminen .....	22
3. TEHON MITTAUSLAITTEIDEN VERTAILU.....	24
4. SOVELTUVIMMAN MITTAJÄRJESTELYN VALINTA .....	28
4.1 Tehon mittauslaitteiden vertailu poljinvoiman kannalta .....	28
4.2 Ehdotus mittajärjestelyksi .....	29
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	30
6. YHTEENVETO.....	31
LÄHDELUETTELO .....	33

## SYMBOLILUETTELO

## Latinalaiset

$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$C_d$	vastuskerroin	
$E$	kimmokerroin	[MPa]
$e$	jännite	[μV]
$F$	voima	[N]
$f$	taajuus	[Hz]
$G$	liukukerroin	[N/mm <sup>2</sup> ]
$GI_p$	akselin vääntöjäykkyys	[Nm <sup>2</sup> ]
$GF$	venymäkerroin	
$g$	putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$l$	pituus	[m]
$M_v$	vääntömomentti	[Nm]
$m$	massa	[kg]
$N$	aktiivisten vastuksien määrä sillassa	
$N_f$	normaalivoima	[N]
$n$	akselin pyörimisnopeus	[1/s]
$R$	resistanssi	[Ω]
$r$	säde	[mm]
$s$	poikkeama	[m]
$V$	heräte jännite	[V]
$v$	nopeus	[m/s]
$W$	taivutusvastus	[mm <sup>3</sup> ]
$w$	virtausnopeus	[m/s]

## Kreikkalaiset

$\varepsilon$	suhteellinen venymä	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
$\theta$	tien kaltevuuskulma	[ $^\circ$ ]
$\lambda$	liukuma	[mm]
$\mu$	kitkakerroin	
$\rho$	ilmantiheys	[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\rho_R$	ominaisresistanssi	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\sigma$	jännitys	[MPa]
$\tau$	vääntöjännitys	[ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$\omega$	pyörimisnopeus	[1/s]
$\omega_{chain}$	ketjun värähtelytaajuus	[1/s]

## 1. JOHDANTO

### 1.1 Tutkimusprojekti

Poljinvoiman mittaaminen polkupyörästä soveltamalla tehonmittaukseen suunniteltua sovellusta on osa Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimustyötä, jossa tutkitaan polvinivelen käyttäytymistä liikuntaharjoituksen aikana. Syy tutkimustyöhön on yleistyvät polven nivelrusto-ongelmat. Suomalaisista yli 30-vuotiaista 5-7 % kärsii polven niveltulehduksesta. Niveltulehdusten määrä kasvaa iän myötä ja yli 75-vuotiaista suomalaisista 20–40% prosenttia kärsii vaivasta. Liikunnan tiedetään ehkäisevän nivelrikon riskiä. Liian raskas liikunta voi kuitenkin vastaavasti vahingoittaa niveltä. Liikunnan tulee olla optimoitu, ettei nivel joudu liian kovalle rasitukselle. Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimustyön tavoitteena on simuloida polven käyttäytymistä pyöräilyn aikana ja selvittää polveen kohdistuvia rasituksia. Rasitusten selvittämiseen tarvitaan tieto poljinvoimasta. (Mikkola A. 2010)

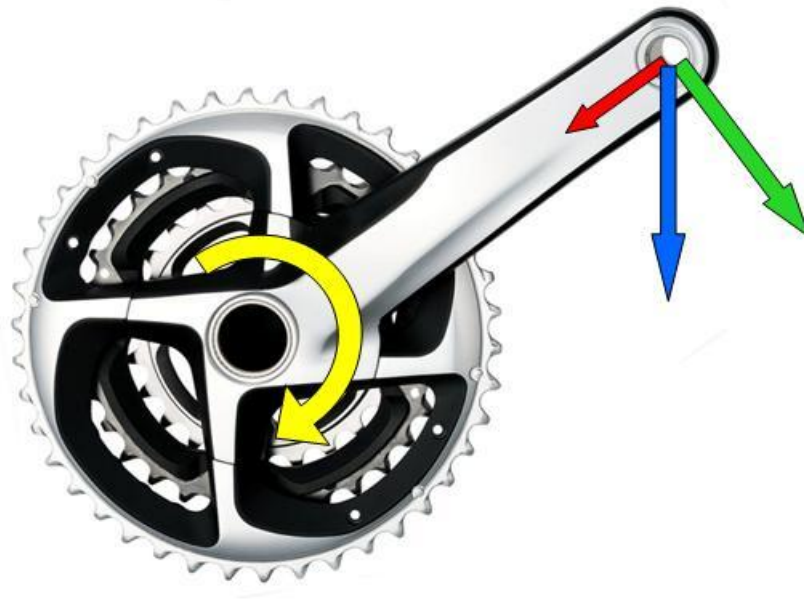


**Kuva 1.** Oikean jalan polvinivel (Mikkola A. 2010).

### 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Polkupyörän liikuttamiseen ja liikkeelle saamiseen tarvitaan tehoa. Polkupyöriin on kehitetty useita eri toimintaperiaatteilla toimivia tehon mittauslaitteita. Mekaanisen tehon yksikkö on watti ja monet pyöräilijät käyttävät watteja apunaan, kun he harjoittelevat. Teho on hyvä yksikkö, koska se kertoo käytetyn työn määrän tietyllä ajan hetkellä. Tiedon

avulla voidaan tehostaa harjoittelua. Fysikaalisesti teho saadaan kun jaetaan tehty työ siihen käytetyllä ajalla. Käytännössä pyörää poljettaessa tämä teho on seurausta poljinvoimasta, jolla pyöräilijä polkee. Tehon mittauslaitteiden avulla voidaan siis tutkia voimaa, jonka pyöräilijä tietyllä ajan hetkellä kohdistaa polkimeen. Kandidaatintyön tavoitteina on tutkia polkupyörään asennettavia tehon mittauslaitteita, selvittää laitteiden toimintaperiaate sekä pohtia mikä laite soveltuu parhaiten poljinvoiman mittaamiseen.

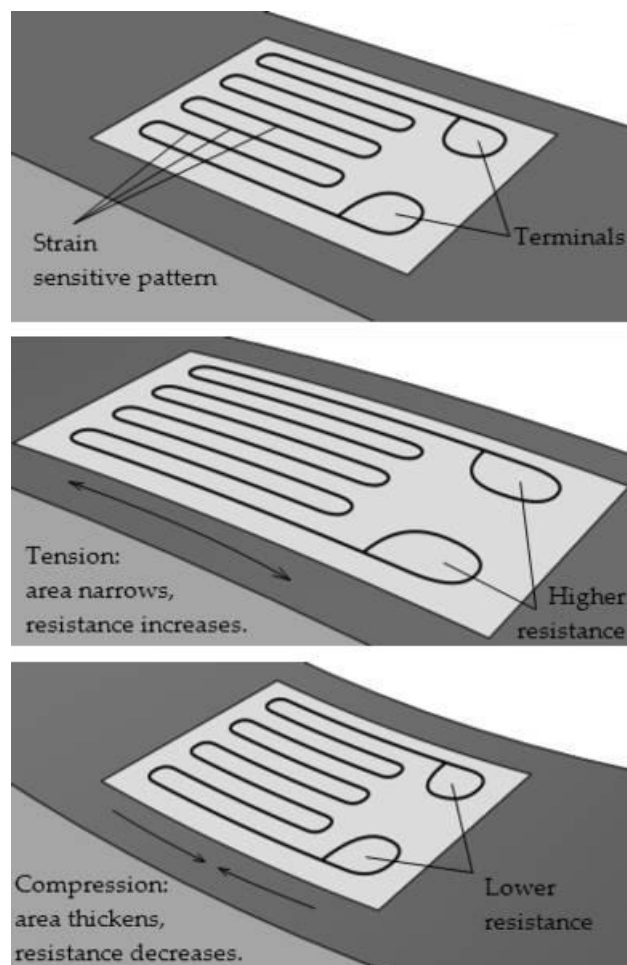


**Kuva 2.** Poljinvoima ja sen voimakomponentit poljinkammen suhteen.

## 2. TEHON MITTAUSLAITTEET

### 2.1 Venymäliuskat

Ensimmäisen kerran vuonna 1856 Lordi Kelvin havaitsi jännityksen vaikuttavan metallisen johteen sähköiseen vastukseen. Resistanssi-venymäliuskojen toiminta perustuu tähän fysikaaliseen ilmiöön. Muita venymäliuskatyyppejä ovat akustinen, kapasitiivinen, induktiivinen, optinen, pietsoresistiivinen ja puolijohtava. Lähes kaikki tehon mittauslaitteet, joissa käytetään venymäliuskoja, käyttävät resistanssi-venymäliuskoja. Tässä kappaleessa tarkastellaan vain metallijohteeseen tai -kalvoon perustuvia venymäliuskoja. Kuvassa 3 on yksinkertaistettu piirros metallijohde-venymäliuska ja sen toiminnasta. (Efunda)



**Kuva 3.** Metallijohde-venymäliuskan toiminta (Gardiff Uni Engin 2009).

Venymäliuskoja käytetään yleisesti kahdella tapaa, mittaamaan suoraan kappaleen muodonmuutoksia tai välillisesti jotain toista fysikaalista suuretta. Venymäliuska mittaa mekaanisia muodonmuutoksia kappaleen pinnalla ja se muuttaa muutoksen sähköiseksi signaaliksi. Venymäliuska on osa sähköistä piiriä ja toimii piirissä vastuksena. Venymäliuskan resistanssi muuttuu jännityksen funktiona, yhtälön 1 mukaan.

$$\frac{\Delta R}{R} = GF\varepsilon \quad (1)$$

Yhtälössä 1  $R$  on resistanssi [ $\Omega$ ],  $GF$  on venymäkerroin ja  $\varepsilon$  on suhteellinen venymä [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ].

Resistanssi-venymäliuskaan kuuluu kiinnityspinta, johtimen kannake, johdinelementti sekä venymäliuskan suojain. Venymäliuskan sisällä oleva metallijohde mukailee kappaleen muodonmuutoksia, jolloin sen resistanssi  $R$  vaihtelee. Metallijohteen resistanssi lasketaan yhtälön 2 mukaan.

$$R = \rho_R \frac{l}{A} \quad (2)$$

Yhtälössä 2  $\rho_R$  on ominaisresistanssi [ $\Omega\text{m}$ ],  $l$  on johteen pituus [ $\text{m}$ ] ja  $A$  on johteen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ].

Yleisesti voidaan sanoa, että venymäliuskojen antamaan tulokseen vaikuttavat päätekijät ovat: lämpötila, aika, taajuus, ilmankosteus sekä venymäliuskan kyky mukautua muodonmuutoksiin kappaleen pinnalla. Tehon mittauslaitteissa käytettävien venymäliuskojen kohdalla riittää, kun tarkastellaan venymäliuskoja, jotka on suunniteltu lämpötiloihin, joita esiintyy maapallon pinnalla. Pyöräily on kesäurheilulaji, joten venymäliuskoilta ei myöskään vaadita kovin suurta lämpötilan vaihteluväliä. (Hannah. R.L, Reed .S.E. 1992 s134, s138) (Efunda)



Venymäliuskan mittaustulokseen vaikuttaa moni parametri kuten aikaisemmin jo mainittiin. Venymäliuskan tarkkuuteen vaikuttaa kuinka hyvin nämä parametrit on otettu huomioon. Venymäliuskan tarkkuutta voi parantaa esimerkiksi valitsemalla metallijohteen materiaalin niin, että sen lämpölaajenemiskerroin on lähellä mitattavan materiaalin kerrointa. Hyvin suunnitellulla mittauksella voidaan venymäliuskan tarkkuudeksi saada  $\pm 2\%$  todellisesta venymästä, jolloin alin suhteellinen venymä on noin  $5\mu\text{m}/\text{m}$ . Tarkempia ja herkempiä tuloksia vaadittaessa täytyy virheitä aiheuttavia parametreja eliminoida tarkemmin. (Hannah. R.L, Reed .S.E. 1992. s.137)

Venymäliuskan kestoikä tulee ottaa huomioon laitteissa, joissa venymäliuskoja on tarkoitus käyttää pidemmän aikaa. Metallijohteen edestakainen liike aiheuttaa johteen väsymistä ja se rajoittaa venymäliuskan kestoikää. Tyypillisillä resistanssi-venymäliskoilla, joiden suhteellinen venymä on luokkaa  $1500\mu\text{m}/\text{m}$ , kestoikä on noin miljoona kiertoa. Johtimen materiaalilla tulisi olla hyvä ominaisresistanssi, jotta saataisiin tarkkoja mittaustuloksia. Usein kuitenkin nämä materiaalit ikääntyvät nopeasti jännityksen tai lämpötilan vaihtelun seurauksena. Ikääntyminen vaikuttaa venymäliuskan antamiin arvoihin, koska johteen resistanssi muuttuu. Jokaisella venymäliuskalla on raja-arvo, kuinka suuria muutoksia sillä voidaan mitata. Yleisessä käytössä olevien venymäliuskojen raja-arvo on noin 10 prosenttia venymäliuskan pituudesta. (Hannah. R.L, Reed .S.E. 1992. s.137)

Ideaalinen venymäliuska mittaisi vain jännityksen suuntaan tapahtuvat muodonmuutokset. Näin ei kuitenkaan ole, jolloin täydelliseen analyysiin tarvitaan tieto vedosta, taivutuksesta ja väännöstä sekä kappaleen Poissonin vakio. Jokainen rasiustapa vaatii omat venymäliuskajärjestelyt. Venymäliuskat on usein kytketty Wheatstonen sillan mukaisesti. Sen avulla vastuksena toimivan venymäliuskan resistanssi voidaan määrittää tarkemmin. Wheatstonen siltaan kytketyn venymäliuskan antama jännite  $e$  voidaan laskea yhtälön 3 mukaisesti.

$$e = \frac{V N \varepsilon GF}{4} \quad (3)$$

Yhtälössä 3  $e$  on sillan jännite [ $\mu\text{V}$ ],  $V$  on heräte jännite [ $\text{V}$ ],  $\varepsilon$  on suhteellinen venymä [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ],  $N$  on aktiivisten vastuksien määrä sillassa. (Hannah. R.L, Reed .S.E. 1992. s.136)

## 2.2 Muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset

Polkupyörän tehoa mittaavista laitteista osa perustuu polkupyörän osissa tapahtuviin muodonmuutoksiin. Näissä sovelluksissa käytetään usein venymäliuskoja. Venymäliuskoilla voidaan mitata hyvin pieniä muodonmuutoksia kappaleen pinnalla. Tehon mittauslaitteissa venymäliuskoja sovelletaan usein kahdella eri tavalla. Niillä mitataan, joko kappaleen taipumista tai kiertymistä.

Kappaleen ollessa taivutuksella on sen toinen pinta vedolla ja toinen puristuksella. Vetojännitykseen perustuvaa yhtälöä 4 voidaan siis soveltaa laskettaessa kappaleeseen vaikuttava taivutusjännitys  $\sigma$ . Vedon ja puristuksen erottaa jännityksen etumerkistä.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Yhtälössä 4  $E$  on kimmokerroin [ $\text{MPa}$ ] ja  $\varepsilon$  on suhteellinen venymä.

Käyttämällä yhtälöä 5 saadaan laskettua kappaletta taivuttava momentti  $M$ .

$$M = \sigma_t W \quad (5)$$

Yhtälössä 5  $\sigma_t$  on taivutusjännitys [ $\text{MPa}$ ] ja  $W$  on taivutusvastus [ $\text{mm}^3$ ].

Polkupyörän tehon mittauslaitteissa taivutuksella oleva kappale on aina pyörivässä liikkeessä, jolloin teho  $P$  voidaan laskea sijoittamalla momentti yhtälöön 6.

$$P = M\omega \quad (6)$$

Yhtälössä 6  $\omega$  on pyörimisnopeus. (Valtanen E. 2007 s.437–439)

Tehon mittaussovelluksissa väännöllä oleva kappale on usein akseli. Tämän akselin pinnalla tapahtuu muodonmuutoksia, joita mitataan venymäliuskoilla. Venymäliuskat asennetaan niin, että voidaan laskea akselin liukukulma  $\gamma$  tai sen kiertymä  $\alpha$ . Liukukulma lasketaan yhtälön 7 mukaisesti.

$$\gamma = \frac{\lambda}{l} \quad (7)$$

Yhtälössä 7  $\lambda$  on liukuma [mm] ja  $l$  on akselinpituus [mm].

Liukuma  $\lambda$  lasketan yhtälön 8 mukaisesti.

$$\lambda = \frac{\pi l}{G} \quad (8)$$

Yhtälössä 8  $\tau$  on vääntöjännitys [N/mm<sup>2</sup>] ja  $G$  on liukukerroin [N/mm<sup>2</sup>].

Käyttämällä kaavoja 7 ja 8 voidaan vääntöjännitys  $\tau$  lausua yhtälön 9 mukaisesti.

$$\tau = \frac{G\gamma}{l^2} \quad (9)$$

Teho  $P$  saadaan laskettua, kun sijoitetaan yhtälöön 10 vääntöjännitys ja pyörimisnopeus.

$$P = \pi^2 r^3 \omega \quad (10)$$

Yhtälössä 10  $r$  on akselin säde[mm] ja  $n$  on akselin pyörimisnopeus [1/s].

Kiertymän ollessa tunnettu, voidaan yhtälöstä 11 ratkaista akseliin vaikuttava momentti. Akseliin vaikuttavan momentin avulla voidaan laskea teho.

$$\alpha = \frac{M_v l}{GI_p} \quad (11)$$

Yhtälössä 11  $M_v$  on vääntömomentti [Nm],  $l$  on akselinpituus [m] ja  $GI_p$  on akselin vääntöjäykkyys [Nm<sup>2</sup>]. (Valtanen E. 2007. s.444–449)

### 2.2.1 Ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset

SRM ja Quarq valmistavat ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvia tehonmittauslaitteita. Tuotteet ovat hieman erilaisia, mutta niiden toimintaperiaate on samanlainen. Kuvassa 4 on SRM:n laite, nimeltä PowerMeter. Siinä venymäliuskat on asennettu alumiinisen ketjurataan keskiöön. Kuvassa 5 on Quarqin valmistama laite nimeltä CinQo. Siinä venymäliuskat ovat eräänlaisen kehärakenteen sisällä, joka kiinnitetään ketjurattaaseen.

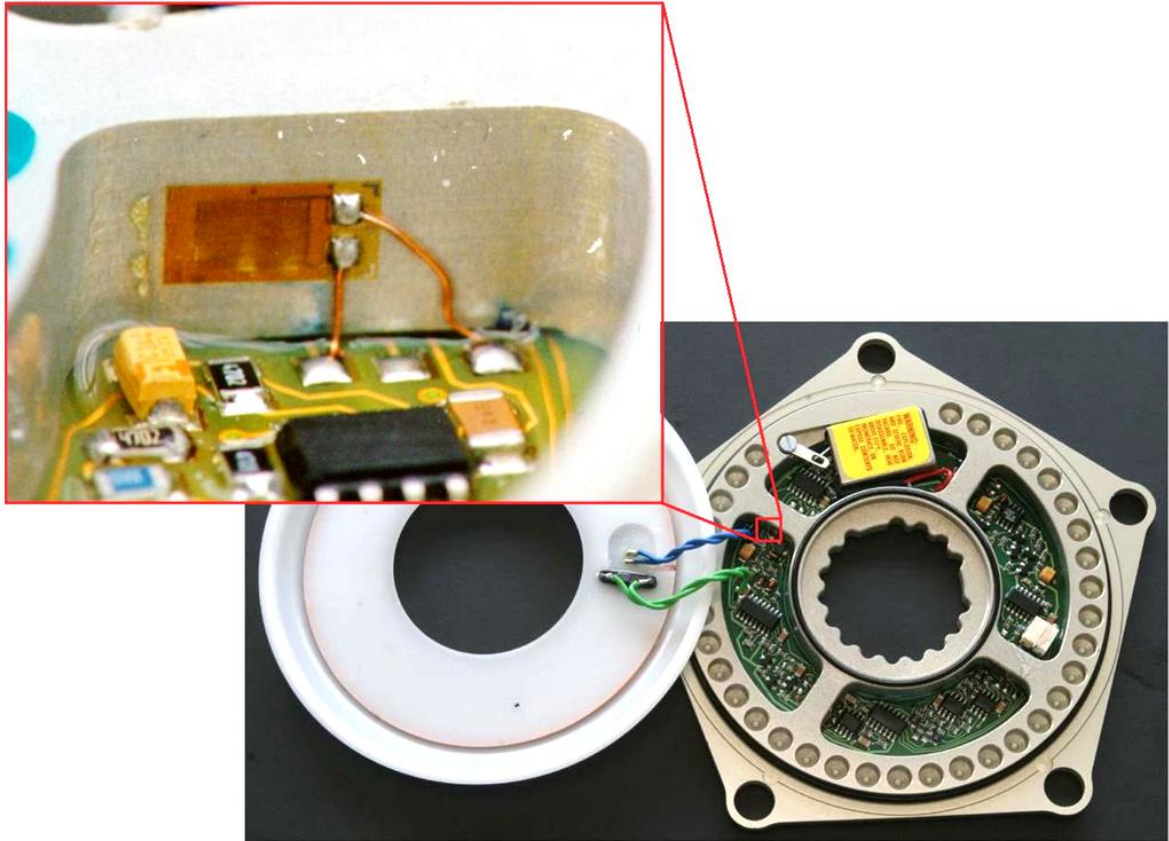


**Kuva 4.** SRM PowerMeter (SRM).



**Kuva 5.** Quarq CinQo (Quarq).

Quarq ei kerro oman tuotteen teknikasta yhtä paljon kuin SRM, joten laitteiden samankaltaisuuden takia tarkastellaan SRM:n PowerMeter tekniikkaa. Muodonmuutoksia mitataan venymäliuskoilla, jotka on asennettu ketjurattaan keskiöön. Kuvasta 6 näkyy kuinka venymäliuska on asennettu ketjurattaan keskiössä olevaan puolaan. Pyöräilijä saattaa ketjurattaan pyörivään liikkeeseen poljinkammen välityksellä. Ketju vastustaa rattaan ulkokehän liikettä, jolloin keskiön puolat joutuvat taivutukselle. Venymäliuskat mittaavat muodonmuutokset puolien pinnoilla. Niiden avulla voidaan laskea puoliin kohdistuvat taivutusmomentit. Taivutusmomentin ja ketjurattaan pyörimisnopeuden tulosta saadaan pyöräilijän käyttämä teho. Ketjurattaan pyörimisnopeus on sama kuin pyöräilijän poljinnopeus ja sen PowerMeter laskee magneetin ja kytkimen avulla. Toimintaperiaate on sama kuin monissa polkupyörän nopeusmittareissa. (Wooles A. 2007. s.92)



**Kuva 6.** Ketjurattaan keskiö ja venymäliuska (Wooles A. 2007. s.92).

Venymäliuskat antavat tiedon venymän suuruudesta voltteina. PowerMeter muuntaa jännitteen taajuudeksi jännite-taajuus muuntimella. Laite yhdistää taajuuden ja poljinnopeuden yhdeksi digitaaliseksi signaaliksi. Ketjurattaan keskiössä oleva lähetin lähettää signaalin polkupyörän runkoon asennetulle vastaanottimelle. Vastaanotin kuljettaa tiedon pyöräilytietokoneelle, joka suorittaa tehon laskennan. Laite laskee tehon  $P$  yhtälöllä 12.

$$P = \frac{(f_{loaded} - f_{zero-offset})v2\pi}{F_{cal} * 60} \quad (12)$$

Yhtälössä 12  $f_{loaded}$  on laitteen antama taajuus tietyllä voimalla [Hz],  $f_{zero-offset}$  on laitteen antama taajuus kun voimaa ei käytetä [Hz],  $v$  on kierrosnopeus [rpm] ja  $F_{cal}$  on kalibrointi vakio [Hz/Nm]. (Wooles A. 2007. s.93)

Uusimmat SRM:n laitteet käyttävät Quarqin tavoin täysin langatonta ANT-protokollaa tiedonsiirrossa. ANT-protokolla perustuu radioaaltoihin ja se toimii 2,4 GHz taajuudella samoin kuin tietokoneen langatonhiiri tai -näppäimistö. Tieto siirtyy ketjurattaasta suoraan pyöräilytietokoneen laskettavaksi. Todennäköisesti SRM:n uusimmat laitteet yhdistävät vanhempien mallien tapaan signaalit yhdeksi, jonka se lähettää pyöräilytietokoneen laskettavaksi. (SRM) (Quarq)

Venymäliuskojen määrä vaikuttaa laitteen tarkkuuteen olennaisesti. SRM:n valikoimasta löytyy keskiöitä, joissa on 2, 4, 8 tai 16 venymäliuskaa ja niiden tarkkuudet vaihtelevat  $\pm 0,5\%$ :sta  $\pm 5\%$ :iin. Yleisin tarkkuus laiteille on  $\pm 2\%$ , jolloin venymäliuskoja on joko 8 tai 16. SRM valmistaa myös keskiöitä, jotka sisältävät, jopa 20 venymäliuskaa. Quarqin CinQon kehärakenteeseen on asennettu 10 venymäliuskaa ja laitteen tarkkuudeksi he ilmoittavat  $\pm 2\%$ . (Wooles A. 2007. s.95) (SRM) (Quarq)

## 2.2.2 Polkimen akselin muodonmuutoksiin perustuvat sovellukset

Polar ja LOOK ovat suunnitelleet yhteistyönä laitteen nimeltä Kéo PowerPedal ja MetriGear on suunnitellut Vector-nimisen laitteen. Molempien laitteiden tehon mittaus perustuu samaan toimintaperiaatteeseen. Poljettaessa polkimen akseli joutuu taivutukselle pyöräilijän siihen kohdistamasta voimasta. Venymäliuskoilla mitataan akselin muodonmuutokset ja lasketaan pyöräilijän teho. Venymäliuskoilla varustetut akselit asennetaan molempiin polkimiin, jolloin saadaan tieto kummankin jalan antamasta tehosta.

### 2.2.2.1 MetriGear Vector

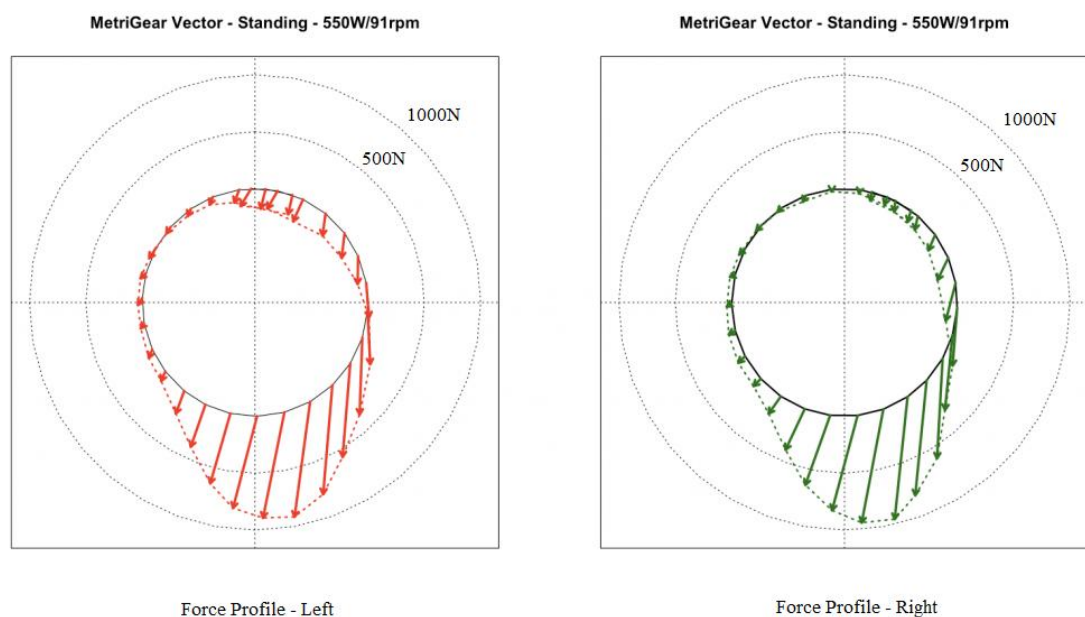
Vector on nelisivuinen kappale, joka asennetaan polkimen akselin sisään, kuva 7. Venymäliuskoja on kappaleessa yli 60 ja ne ovat pietsoresistiivisiä. Vectorissa on kiihtyvyyssanturi, joka antaa tiedon poljinkammen kiertymiskulmasta tietyllä ajanhetkellä. Kiihtyvyyssanturilla voidaan laskea myös poljinnopeus. Tiedonsiirrossa Vector käyttää langatonta ANT-protokollaa. Laitteen kerrotaan tuovan 50 grammaa lisäpainoa

polkupyörään. MetriGear ilmoittaa laitteen tarkkuudeksi  $\pm 1,5\%$  todellisesta voimasta, joka polkimeen kohdistuu. (MetriGear 2010a)



**Kuva 7.** MetriGear Vector ja poljinakselin sisällä oleva venymäliuskakomponentti (MetriGear 2010a).

Vectorin avulla voidaan piirtää voimavektorikuvaaja, josta näkyy poljinvoiman suuruus ja suunta poljinkampeen nähden. Tällainen voimaprofiili voidaan piirtää erikseen kummallekin jalalle. Kuvassa 8 on voimavektorikuvaajat pyöräilijän molemmista jaloista. Pyöräilijä polkee seisten 550 watin teholla ja poljinnopeus on 91 kierrosta minuutissa. (MetriGear 2010b)



**Kuva 8.** Voimaprofiilit vasemmalle ja oikealle jalalle (MetriGear 2010b).



Voimavektorikuvaajassa akselin ajatellaan pysyvän paikallaan ja poljinkampi kiertää ympyrää kellon tapaan. Kello kuudessa poljinkammen radiaalisuuntaan vaikuttava voima pyrkii vetämään poljinkampea, kun taas kello 12 se pyrkii puristamaan sitä. Kammen pyörimisradan tangentialisuuntaan vaikuttava voimakomponentti on siis se voima, joka kuljettaa pyörää eteenpäin. Vector laskee tehon käyttämällä tätä voimakomponenttia, joka on kohtisuorassa kampeen nähden. Laite kertoo voimakomponentin poljinkammen pituudella ja kammen pyörimisnopeudella. (MetriGear 2010b)

#### 2.2.2.2 Kéo PowerPedal

Kéo PowerPedal mittaa Vectorin tapaan myös polkimen akselin muodonmuutoksia. Akselissa on kahdeksan venymäliuskaa ja ne on asennettu vastakkaisille puolille akselin pituus suuntaan nähden. Kuvassa 9 näkyy akselin ylälaidassa toisen puolen venymäliuskat ohuena vihreänä viivana. Polkimessa on magneetti, jonka avulla poljinkampeen asennettava sensori tunnistaa yhden kierroksen tulleen täyteen. Tieto siirtyy polkimista langattomasti Polarin omalla W.I.N.D -verkkolaitteella (Wireless Integrated Network Device). Laitteella voidaan mitata erikseen molempien jalkojen toimintaa eli seurata poljennon tasapainoa. Laitteen tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa  $\pm 2$  %. Polkimen kierteet ovat valmistettu standardin mukaisesti, jolloin laitteen voi vaihtaa kätevästi pyörästä toiseen. Kuvassa 10 näkyy Kéo PowerPedal kiinnitettynä poljinkampeen. (Huang J. 2010)



**Kuva 9.** Kéo PowerPedal (Huang J. 2010).



**Kuva 10.** Kéo PowerPedal kiinnitettynä poljinkampeen (Huang J. 2010).

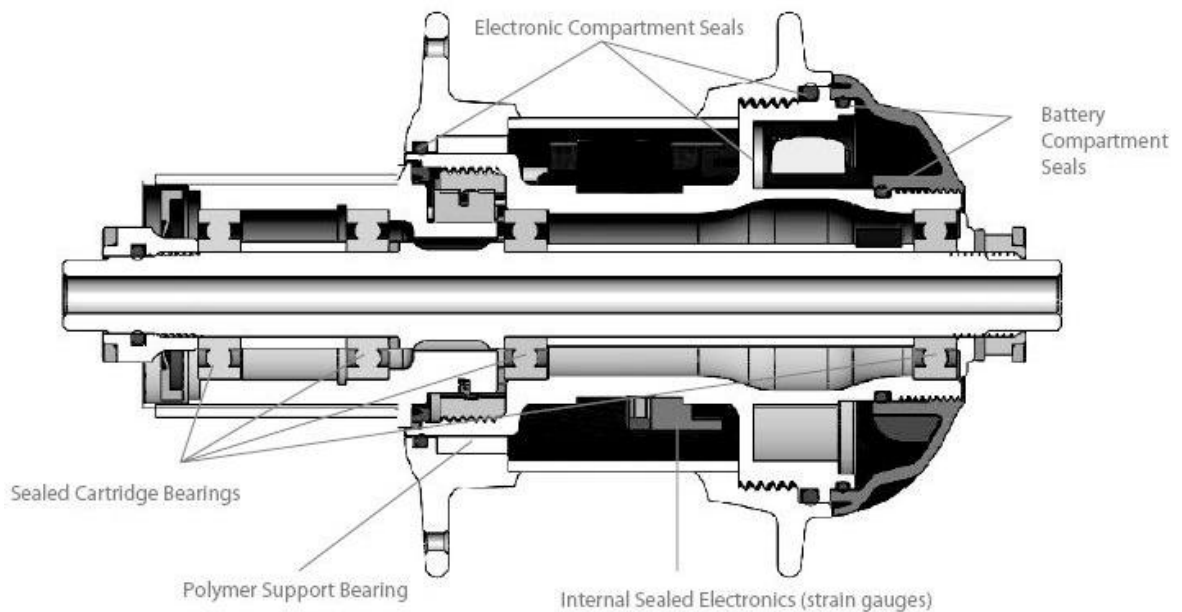
### 2.2.3 Takanavan muodonmuutoksiin perustuva sovellus

CycleOpsin PowerTap tehon mittauslaite perustuu takanavassa tapahtuviin muodonmuutoksiin ja on markkinoiden ainoa napaan perustuva sovellus. PowerTap sisältää 10 venymäliuskaa ja sen tarkkuudeksi ilmoitetaan  $\pm 1.5\%$ . Tiedonsiirrossa PowerTap käyttää langatonta ANT-protokollaa. Tieto siirtyy navasta suoraan pyöräilytietokoneen käyttöön. (CycleOps)



**Kuva 11.** CycleOps PowerTap (CycleOps).

Kuvasta 12 näkyy, kuinka venymäliuskat on asennettu navan sisälle. Navan läpi kulkee akseli, josta takavanne kiinnitetään polkupyörän runkoon. Kiinnitysakselin ympärillä pyörii itse napa. Navan sisälle voidaan ajatella putkenmuotoinen voimansiirtoakseliksi, jonka muodonmuutoksia venymäliuskoilla mitataan. Tämä voimansiirtoakseli joutuu vääntöjännitykselle, kun pyörää poljetaan. Lähteissä kerrotaan PowerTapin laskevan takanavassa vaikuttavan momentin. On siis todennäköistä, että laite mittaa venymäliuskoilla voimansiirtoakselin kiertymää eikä liukukulmaa. PowerTap mittaa tehoa navasta, joten myös pyörimisnopeus on laskettava navasta. Navan läpi kulkevaan akseliin on asennettu magneetti ja itse navassa on kytkin. Navan pyörähtäessä ympäri magneetti yhdistää kytkimen johdot, jolloin laite voi laskea kierrokseen kuluneen ajan. (CycleOps)



**Kuva 12.** PowerTap leikkauskuva (Crankzone 2010).

### 2.3. Ketjun värähtelyyn perustuva sovellus

Polar on ainoa valmistaja, joka valmistaa ketjunvärähtelyyn perustuvaa tehon mittaus laitetta. Polkupyörän takahaarukkaan asennettava sensori mittaa ketjun värähtelyä ikään kuin sähkökitaran mikrofonit kitarankielien värähtelyä, kuva 13. (Bike Tech Review, 2011)

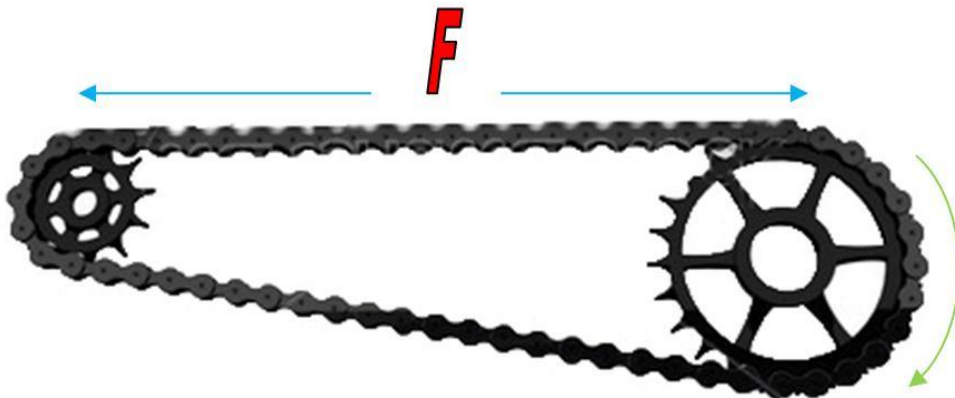


**Kuva 13.** Polar Output Sensor (Polar).

Poljettaessa polkupyörää ketju joutuu vedolle, kuten kuvassa 14. Polarin tehon mittauslaite laskee, kuinka suuri voima ketjua vetää eri suuntiin. Värähtelyn ollessa harmonista voidaan siinä vaikuttava voima  $F$  laskea käyttämällä yhtälöä 13. (Bike Tech Review, 2011)

$$F = (\omega_{chain})^2 ms \quad (13)$$

Yhtälössä 13  $\omega_{chain}$  on ketjun värähtelytaajuus [1/s],  $s$  on ketjun poikkeama [m] ja  $m$  on ketjun massa jännevälillä [kg]



**Kuva 14.** Ketjuun vaikuttavat voimat ja pyörimissuunta.

Teho saadaan laskettua kun kerrotaan voima ketjurattaan säteellä ja poljinnopeudella. Ohjaustankoon asennettava polkupyörätietokone laskee lopulta varsinaisen tehon. Tiedonsiirto tapahtuu Polarin omalla W.I.N.D-tekniikalla. Laitteen tarkkuudeksi Polar ilmoittaa  $\pm 5\%$ . (Bike Tech Review, 2011)

#### 2.4. Vastavoimaan perustuva sovellus

Newtonin kolmannen lain perusteella kappaleen liikettä vastustava voima on yhtä suuri kuin se voima, joka liikuttaa kappaletta. Kuvassa 15 oleva iBiken tehon mittauslaite perustuu tähän lakiin. iBike on ainoa valmistaja, joka valmistaa vastavoimaan perustuvaa tehon mittauslaitetta.



**Kuva 15.** iBike polkupyörätietokone (iBike).

iBike ottaa huomion ilmanvastuksen, maan vetovoiman ja vierintävastuksen. Summaamalla nämä kolme vastavoimaa iBike laskee yhtälön 14 mukaan käytetyn tehon  $P$ .

$$P = \sum F_i v \quad (14)$$

Yhtälössä 14  $F$  on vastavoima komponentti [N] ja  $v$  on nopeus [m/s].

Pyöräilijän nopeuden iBike mittaa etuvanteen pyörimisnopeudesta. Ilmanvastuksen  $F_{ilmanvastus}$  iBike laskee käyttäen yhtälöä 15.

$$F_{ilmanvastus} = \frac{1}{2} C_d \rho A w^2 \quad (15)$$

Yhtälössä 15  $C_d$  on vastuskerroin,  $\rho$  on ilmantiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $A$  on otsapinta-ala [ $\text{m}^2$ ] ja  $w$  on virtausnopeus [ $\text{m}/\text{s}$ ].

iBike mittaa virtausnopeutta pääyksikköön integroidun Pitot-putken avulla. Ilmantiheyden iBike laskee mittaamalla lämpötilan ja ilmanpaineen. iBiken on kuitenkin mahdotonta tietää tarkalleen pyöräilijän otsapinta-ala ja vastuskerroin, jotka ovat riippuvaisia pyöräilyasennosta. iBike laskee todennäköisesti vakio kertoimet tietyn pituisille ja painoisille pyöräilijöille ja käyttää niitä ilmanvastuksen määrittämiseen. Pitot-putki ei myöskään ota huomioon tuulen suuntaa, joka saattaa aiheuttaa virhettä tehon mittauksessa. (Bike Tech Review, 2011)

Tien kulmasta johtuen maan vetovoima joko vastustaa liikettä tai kiihdyttää sitä. iBike määrittää kiihtyvyyssanturilla tien kulman ja laskee voimakomponentin  $F_g$  yhtälön 16 mukaan.

$$F_g = mg \sin \theta \quad (16)$$

Yhtälössä 16  $m$  on massa [ $\text{kg}$ ],  $g$  on putoamiskiihtyvyys [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] ja  $\theta$  on tien kaltevuuskulma [ $^\circ$ ].

Vierintävastuksen  $F_{vierintä}$  iBike laskee yhtälön 17 mukaan.

$$F_{vierintä} = \mu N_f \quad (17)$$

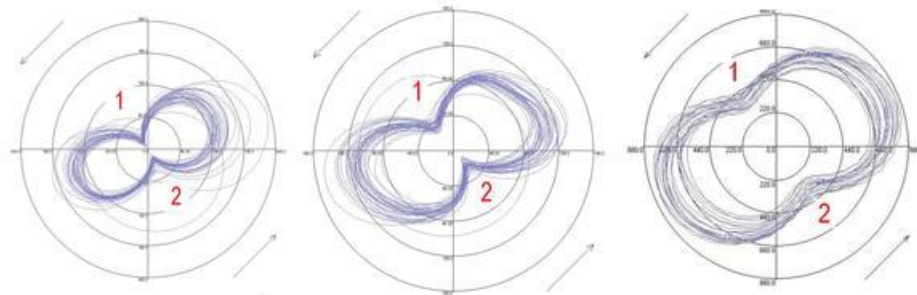
Yhtälössä 17  $\mu$  on kitkakerroin ja  $N_f$  on normaalivoima [ $\text{N}$ ].

Kitkakerroin on riippuvainen monesta eri tekijästä, esimerkiksi tien pinnanlaadusta ja rengaspaineesta. Todennäköisesti iBike olettaa kitkakertoimen vakioksi, joka on valmistajan laskema keskiarvo. (Bike Tech Review, 2011)

## 2.5 Ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvan sovelluksen kehittäminen

SRM:n on kehittänyt ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvan tehon mittauslaitteensa hyvin pitkälle ja se onkin erittäin laadukas ja tarkka laite. Laitteella ei kuitenkaan voi mitata juurikaan muuta kuin pyöriilyn tehoa. Laitteen ominaisuudet ja käyttötarkoitus kasvaisivat, jos laite tunnistaisi poljinkammen kiertymiskulman.

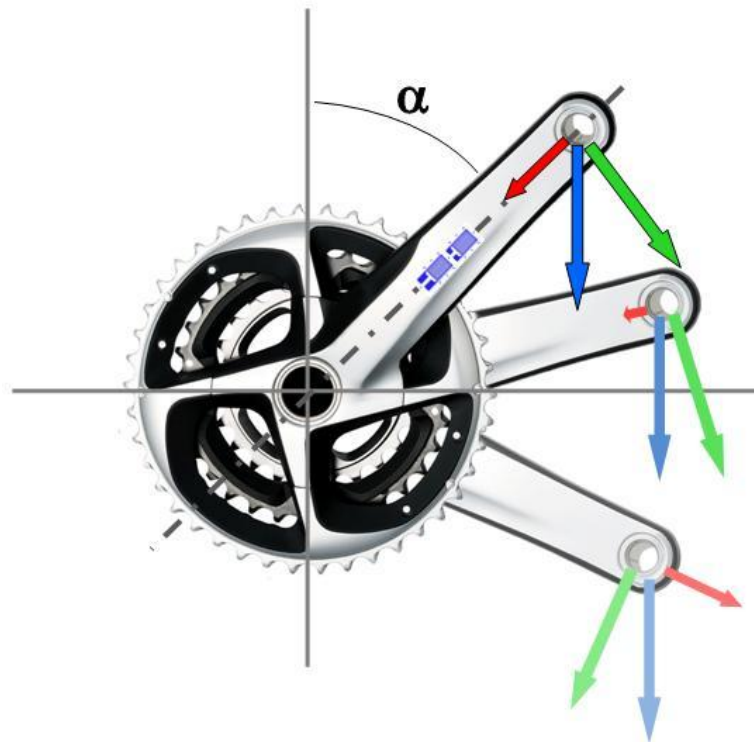
Wattibike on kuntopyöriä valmistava yritys. Yrityksen valmistama kuntopyörä vertaa poljinkammen kiertymiskulmaa tuotettuun voimaan nähden. Siitä, miten Wattibike mittaa poljinkammen kiertymiskulmaa, ei löytynyt tietoa, mutta laitteen avulla voidaan piirtää voimakäyrä polkemistapahtumasta. Kuvassa 16 on kolme erilaista käyrää, joista ensimmäinen kahdeksikon muotoinen on aloittelijan tuottama voimakäyrä ja viimeinen on ammattilaisen voimakäyrä. Kuvan voimakäyrien muodoista huomataan, että laite mittaa molempien jalkojen tuottaman voiman. (Wattibike)



**Kuva 16.** Wattibike voimakäyrät (Wattibike).

Ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvan laitteen ominaisuuksia voidaan lisätä asentamalla laitteeseen kiihtyvyyssanturi. Kiihtyvyyssanturit ovat sähköisiä laitteita, joita käytetään mittaamaan kiihtyvyysoimia. Voimat voivat olla joko staattisia, dynaamisia tai värähdyksiä. Kiihtyvyyssanturin avulla voidaan selvittää laitteen kallistuskulma. Antureita

käytetään useissa kannettavissa sovelluksissa, kuten kameroissa ja matkapuhelimissa. Asentamalla kaksiakselinen kiihtyvyyssanturi ketjurattaan pyörimisakselille voidaan tunnistaa poljinkammen kiertymiskulma. Ketjurattaan sisällä olevien venymäliuskojen mittaama tieto voidaan yhdistää poljinkammen asemaan. Näin saadaan selville poljinkammen kiertymiskulma, kun pyöräilijä kohdistaa voimaa polkimeen. Jokainen polkupyörää polkenut tietää, että polkemiseen saa parhaiten voimaa, kun poljinkampi on kello kolmessa. Kuitenkin poljennon tulisi olla mahdollisimman tasaista ja voimaa tulisi pyrkiä tuottamaan myös poljinkammen muissa asennoissa. Tuntemalla poljinkammen asento ja polkimeen kohdistettu voima voi pyöräilijä kehittää polkemistekniikkaansa. Anturin avulla saadaan myös tieto molempien jalkojen toiminnasta ja tehontuotosta erikseen. Lisäksi kiihtyvyyssanturin avulla pystyy mittaamaan yhteen kierrokseen kuluneen ajan, jolloin laite ei tarvitse erillistä anturia mittaamaan poljinnopeutta. Kuvassa 17 on havainnollistettu poljinvoiman suuntautumista sinisellä nuolella. Kuvassa on myös poljinvoimakomponentit ja niiden käyttäytyminen kammen eri kiertymiskulmilla  $\alpha$ . Punainen nuoli on aksiaaliskomponentti ja vihreä on tehoa tuottava kohtisuoravoimakomponentti.



**Kuva 17.** Poljinvoimakomponentit kammen eri kiertymiskulmilla, poljinkammen symmetria-akseli ja venymäliuskat.



Kiihtyvyyssanturin voisi myös asentaa Polarin ja Lookin Kéo PowerPedaliin, mutta tällöin anturi tulisi sijoittaa poljinten akseleihin. Tämä tuskin olisi ongelmallista toteuttaa, koska MetriGearin Vectorissa on kiihtyvyyssanturit polkimen akseleissa. Kiihtyvyyssanturi on pieni, kevyt ja yksinkertainen komponentti ja se lisää tehon mittauslaitteen ominaisuuksia ilman huomattavaa lisäpainoa. Kandidaatintyössä esitellyistä laitteista vain MetriGearin Vectorissa on kiihtyvyyssanturi.

Kuten kuvassa 17 on havainnollistettu, poljinvoima koostuu kahdesta voimakomponentista. Voimakomponenteista toinen vaikuttaa kohtisuorasti poljinkampeen nähden ja toinen kammen aksiaaliseen suuntaan. Ketjurataan muodonmuutoksien avulla saadaan laskettua kohtisuoravoimakomponentti, mutta ei aksiaalisvoimakomponenttia. Poljinkampi joutuu aksiaalisvoimakomponentin vaikutuksesta vuoroin puristukselle ja vedolle riippuen kammen kiertymiskulmasta. Tämän muodonmuutoksen mittaamalla voidaan selvittää myös aksiaalisvoimakomponentti. Teoriassa tällainen mittajärjestely toimisi. Käytännössä ongelmaksi saattaa tulla se, kuinka hyvin poljinkammen muodonmuutoksia voidaan mitata. Venymäliuskat tulee asentaa poljinkampeen niin, että ne ovat kammen symmetria-akselilla. Kuvaan 17 poljinkammen symmetria-akseli on merkitty katkoviivalla. Kuvaan on piirretty myös kaksi venymäliuskaa havainnollistamaan niiden asennusta. Venymäliuskojen tulisi mitata vain venymää ja puristumaa. Käytännössä poljinkampi kuitenkin taipuu kaikkiin suuntiin, jolloin tarkkojen mittaustulosten saaminen saattaa olla hyvinkin hankalaa. On myös huomioitava häviöt, joiden takia ketjurataan puolissa vaikuttava tehoa tuottava voima ei ole yhtä suuri kuin poljinkammen päässä vaikuttava voima. Tästä johtuen poljinvoiman mittatarkkuus heikkenisi entisestään.

### 3. TEHON MITTAUSLAITTEIDEN VERTAILU

Kappaleessa keskitytään vertailemaan kandidaatintyössä esiteltyjen tehon mittauslaitteiden toiminnallisia eroja. Kappaleen lopussa oleviin taulukoihin on kerätty vertailu tietoja laitteista. Tehon mittaussovellusten eriäväisyyksistä johtuen laitteiden ilmoittamat tehoarvot eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Vertailtaessa arvoja keskenään on otettava huomioon miten ja mistä kyseinen tehonarvo on mitattu, koska polkupyörässä

kuten autossakin tapahtuu tehohäviöitä voimansiirrossa. Lisäksi tehon mittauslaitteiden toimintaperiaate vaikuttaa saatuun tulokseen.

Vastavoimaan perustuvaa laitetta valmistava iBike kertoo tuotteensa laskeman tehon tarkkuudeksi  $\pm 5\%$ . Tuotteen toiminta periaatteesta johtuen laitteen mitaamat arvot ovat kuitenkin hieman kyseenalaisia. On todennäköistä, että iBike käyttää tiettyjä vakiokertomia vastavoimien määrittämiseen. Ajatellaan tilanne, jossa pyöräillään vakionopeudella suoraa tietä. Tällöin ilmanvastus, vierintävastus ja maanvetovoimasta johtuva vastusvoima pysyvät vakioina. Kyseisessä tilanteessa myös teho pysyy vakiona. Pyöräilijä polkee edelleen vakionopeudella, mutta päättää vaihtaa isomman vaihteen, jolloin tehon tarve kasvaa. Vastavoimaan perustuvan laitteen on mahdoton mitata vaihteen vaikutusta tehoon. Kaupallisesti kilpailukykyisen laitteesta tekee sen hinta. Laitteen käyttö ja asennus on myös erittäin helppoa. Laite ei vaadi muita asennustoimenpiteitä kuin nopeusmittarin asentamisen ja itse tietokoneen asentamisen ohjaustankoon.

Polar kertoo Output Sensorin ilmoittavan tehon tarkkuudella  $\pm 5\%$ . Laite laskee tehon mittaamalla ketjuvärähtelyn avulla voiman, joka kiristää ketjua. Ketjua kiristävän voiman avulla laite laskee pyöräilijän tekemän työn ja taas työn avulla tehon. Polkupyörässä, jossa on ratasvaihteet, ketjun paikka vaihtelee riippuen käytettävästä vaihteesta. Output Sensori asennetaan taka-haarukkaan, jolloin ketjun paikka sensorin suhteen vaihtelee. Ketjun aseman vaihdokset vaikuttavat laitteen mittaamaan tehon tarkkuuteen. Lisäksi  $\pm 5\%$ :n tarkkuus antaa suhteellisen ison marginaalin mitatulle teholle. Laite onkin todennäköisesti suunniteltu enemmän harraste- kuin kilpakäyttöön. Kuten vastavoimaan perustuva iBike myös Output Sensor on tarkempiin laitteisiin verrattuna halvempi ja helpompi asentaa, koska polkupyörän osia ei tarvitse vaihtaa.

PowerTap on taka-navan muodonmuutoksiin perustuva tehon mittauslaite ja sen valmistaja CucleOps ilmoittaa laitteensa tarkkuudeksi  $\pm 1,5\%$ . Laite mittaa tehoa venymäliuskojen avulla ja tulokset perustuvat mekaanisiin muodonmuutoksiin, joita taka-navassa tapahtuu. Taka-navasta mitattava teho on kärsinyt tehohäviöistä, jotka johtuvat esimerkiksi ketjusta ja muista polkupyörän voimaa siirtävistä osista. PowerTapin mittaama teho on pyöräilijän tuotaman tehon sijaan se teho, jonka pyörä siirtää takapyörän kautta tiehen. Verrattuna edellä mainittuihin laitteisiin PowerTap on huomattavasti tarkempi. Sen mitaamat tulokset

ovat myös luotettavampia, koska ne perustuvat mekaanisiin muodonmuutoksiin. Laitteen tarkkuus on siis verrannollinen venymäliuskojen mittatarkkuuteen ja niiden määrään takanavassa. PowerTap on myös suhteellisen helppo asentaa ja CycleOps myy myös valmiiksi takavanteeseen asennettua napaa. PowerTap siirtää tiedon langattomasti pyöräilytietokoneelle ja on yhteensopiva myös muiden valmistajien tietokoneiden kanssa.

SRM oli ensimmäinen valmistaja, joka toi kaupallisille markkinoille polkupyörän tehonmittauslaitteen. Laitteen nimi on PowerMeter ja se käyttää venymäliuskoja mittamaan mekaanisia muodonmuutoksia ketjurataan puolissa. Sovelluksessa tehohäviö on pienempi kuin takanavasta mitattaessa. Laitteen suunnittelussa ja erityisesti venymäliuskojen asettelussa on täytynyt ottaa huomioon, että laite mittaa vain ketjurataan puolan taipumista, eikä puolan vetoa tai puristusta. SRM:n valmistamat PowerMeterit ovat keskenään erilaisia. Yleisimmät tuotteet sisältävät joko 8 tai 16 venymäliuskaa ja niiden tarkkuus on  $\pm 0,5\%$  tai  $\pm 2\%$ . Tästä voidaan huomata, että yksin venymäliuskojen määrä ei vaikuta tuotteen tarkkuuteen. Ketjuratas on valmistettu alumiinista ja lämpötilan muutokset vaikuttavat tuloksiin. Venymäliuskoja käytettäessä lämpölaajeneminen on erittäin yleinen ongelma ja vaikka muut venymäliuskoja käyttävät valmistajat eivät yhtä avoimesti kerro lämpötilan vaikutuksesta laitteen tuloksiin. On kuitenkin todennäköistä, että se vaikuttaa niihin.

Quarq valmistaa SRM:n tapaan ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvaa tehonmittauslaitetta nimeltä CinQo. Laitteessa venymäliuskat on asennettu kehärakenteen sisään, joka kiinnitetään ketjurattaaseen. SRM:n PowerMeterin puoliin asennettavien venymäliuskojen asetteluun tarvitaan paljon tietotaitoa, jotta venymäliuska mittaa puolan taipumista eikä venymistä. Todennäköisesti kehärakennetta käyttämällä Quarq on päässyt venymäliuskojen asettelussa helpommalla kuin SRM. Quarqin valikoimasta löytyy myös erilaisia variaatioita laitteesta, mutta niissä kaikissa on 10 venymäliuskaa ja kaikkien tuotteiden tarkkuudeksi he ilmoittavat  $\pm 2\%$  eli saman kuin yleisimmät PowerMeterit.

Polkimen akselin muodonmuutoksiin perustuvia tehonmittauslaitteita ei ole vielä markkinoilla. MetriGear sekä yhteistyötä tekevät Look ja Polar ovat kehittäneet omat ratkaisut laitteesta ja tuotteiden pitäisi tulla markkinoille vuoden 2011 aikana. Lookin ja Polarin tuotteen nimi on KÉO PowerPedal ja MetriGearin tuotteen nimi on Vector. KÉO

PowerPedal käyttää tavanomaisia venymäliuskoja kun taas Vectorissa venymäliuskat ovat pietsoresistiivisiä. Tuotteiden ero muihin tehon mittauslaitteisiin on se, että niillä voidaan mitata erikseen molempien jalkojen toimintaa. Verrattuna Kéo PowerPedaliin Vector on paljon kehittyneempi. Kéo PowerPedalissa venymäliuskat on asennettu polkimen akseliin niin, että ne mittaavat akselin taipumaa vain kohtisuorasti poljinkampeen nähden. Laitteen ominaisuudet rajoittuvatkin vain tehon mittaukseen ja poljennon tasapainon seuraamiseen. Vector sen sijaan mittaa polkimen akselin muodonmuutokset kaikkiin suuntiin. Vectoriin on asennettu kiihtyvyyssanturi, jonka avulla se tietää poljinkammen kiertymiskulman. Tällöin laite tietää pyöräilijän kampeen kohdistaman voiman suuruuden ja suunnan globaalissa koordinaatistossa koko poljinkammen kierroksen ajan. Esitellyistä laitteista Vector on kaikkein edistyneisin ja pisimmälle viety tehon mittauslaite. Vectorin ominaisuudet eivät rajoitu vain tehon mittaamiseen, vaan sen avulla pyöräilijä pystyy parantamaan poljentatekniikkaansa. Kéo PowerPedalin tehon mittauksena ilmoitetaan  $\pm 2\%$ . MetriGear ilmoittaa muista valmistajista poiketen Vectorin mittaavan  $\pm 1.5\%$  tarkkuudella polkimeen kohdistetun voiman.

SRM:n PowerMeter on markkinoilla olevista tuotteista pisimmälle kehitetyin tehon mittauslaite ja SRM:n tarkimpien tuotteiden avulla saadaan mitattua hyvinkin tarkasti tehoa. Kuitenkin Kéo PowerPedal ja Vector sisältävät ominaisuuksia, joita PowerMeterillä ei voida toteuttaa. Etenkin Vectorin ominaisuus, joka mahdollistaa poljinvoimakuvaajan piirtämisen on edistyneisin saavutus tehon mittauslaitteelta. Lisäksi mitä lähempänä jalkaa tehon mittaus tapahtuu, sitä vähemmän mitattavassa tehossa on häviöitä. Taulukoissa 1-3 on tietoja kandidaatintyössä esitellyistä tehon mittauslaitteista.

**Taulukko 1.** iBike ja Output Sensor (iBike)(Bike Tech Review, 2011).

Valmistaja	iBike	Polar
Tuotteen nimi	iBike	Output Sensor
Toiminta periaate	Vastavoima	Ketjunvärähtely
Tarkkuus	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$
Paino (g)	65	222
Hinta (€)	170–480	pelkkä sensori 350 täydellinen paketti 600

**Taulukko 2.** CinQo, PowerMeter ja PowerTap (Quarq)(Wooles A.2007 s.95)(CycleOps).

Valmistaja	Quarq	SRM	CycleOps
Tuotteen nimi	CinQo	PowerMeter	PowerTap
Venymäliuskat	Resistiivinen	Resistiivinen	Resistiivinen
Venymäliuskojen lukumäärä	10	2,4,8,16	10
Muodonmuutokset	Ketjuratas	Ketjuratas	Taka-napa
Tarkkuus	$\pm 2 \%$	$\pm 0.5\%$ , $\pm 2 \%$ tai $\pm 5\%$	$\pm 1.5 \%$
Paino (g)	700–800	600–850	402
Hinta (€)	1000–1400	2500–3800	1300

**Taulukko 3.** Kéo PowerPedal ja Vector (Huang J.2010)(MetriGear 2010a).

Valmistaja	Polar & LOOK	MetriGear
Tuotteen nimi	Kéo PowerPedal	Vector
Venymäliuskat	Resistiivinen	Pietsoresistiivinen
Venymäliuskojen lukumäärä	8	60
Muodonmuutokset	Polkimen akseli	Polkimen akseli
Tarkkuus	$\pm 2 \%$	$\pm 1.5 \%$ voimasta
Paino (g)	340	50
Hinta (€)	ei julkistettu	ei julkistettu

#### 4. SOVELTUVIMMAN MITTAJÄRJESTELYN VALINTA

##### 4.1 Tehon mittauslaitteiden vertailu poljinvoiman kannalta

Poljinvoimasta johtuen polkimeen kohdistuu voima, jonka suuruus ja suunta vaihtelevat. Poljinvoima voidaan jakaa komponentteihin, mutta vain kohtisuorasti kampea vastaan vaikuttava voimakomponentti pyörittää kampea. Ketjun värähtelyyn, navan muodonmuutoksiin ja ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvien sovellusten tehon mittaus perustuu karkeasti ajatellen tämän voimakomponentin selvittämiseen. Kyseinen voima on ainoa voima, joka laitteilla voidaan mitata, jolloin niiden avulla ei saada selville

koko poljinvoimaa. Kéo PowerPedal lukeutuu myös näihin laitteisiin koska se mittaa polkimen akselin muodonmuutoksia vain kohtisuorasti poljinkampeen nähden.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston suunnittelema poljinvoiman mittauskoe tapahtuu laboratorio-olosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa ei tarvitse ottaa huomioon tuulen vaikutusta eikä tien kaltevuuskulmaa. Tarkasteltaessa vastavoimaan perustuvaa tehon mittauslaitetta ainoaksi voitettavaksi voimaksi jää kitka, joka sekin on laboratorio-olosuhteissa vakio. Laite siis pyrki laskemaan tehoa pelkän nopeuden mukaan.

Kaikista muista tehon mittauslaitteista poiketen Vector laskee ensin poljinvoiman ja laskee tehon vasta sen avulla. Lisäksi laite tietää poljinkammen kiertymiskulman jokaisella ajanhetkellä. Vector on esitellyistä laitteista ainoa, jonka avulla voidaan laskea poljinvoiman suuruus ja suunta kokonaisuudessaan.

#### 4.2 Ehdotus mittajärjestelyksi

Ajatellen tutkimustyötä polvinivelen liikkeistä liikunnan aikana ei ole tarpeellista tietää pelkästään millä teholla poljetaan. Tärkeämpää on tietää poljinvoiman suuruus ja suunta. Tuntemalla vain voimakomponentti, joka pyörittää poljinkampea, ei saada selville kaikkea voimaa mitä polkemiseen on käytetty. Poljinvoiman mittaukseen parhaiten soveltuu laite, joka mittaa poljinvoiman molemmat voimakomponentit sekä tietää poljinkammen orientaation mittaushetkellä. Esitellyistä laitteista polkimen akselin muodonmuutokset kaikkiin suuntiin mittaava Vector on tutkimustyön kannalta paras laite.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ensimmäiset tehon mittauslaitteet tulivat kaupallisesti saataville 1980 -luvun lopussa. Tänä päivänä polkupyörän tehon mittaus kehittyy nopeasti, jonka myötä uusien valmistajien ja laitteiden määrä kasvaa. Nykyiset kaupalliset laitteet on suunniteltu tehon mittauksen ehdoilla. Laitteiden toimintaperiaatteet ovat hyvin erilaisia. Yhteistä niille kuitenkin on, että niillä mitataan pelkästään tehoa ja poljentoa eli kierrosaikaa, joka kuluu poljinkamman yhteen kierrokseen. Suurin osa sovelluksista mittaa venymäliuskojen avulla tehoa. Venymäliuskat mittaavat mekaanisia muodonmuutoksia. Tästä johtuen niiden antamat tulokset ovat luotettavampia ja tarkempia verrattuna esimerkiksi vastavoimaan perustuvan tehon mittauslaitteen tuloksiin.

Nykyisissä kaupallisissa sovelluksissa venymäliuskat on asennettu niin, että tehonmittaus onnistuu varsin mainiosti. Kyseisillä laitteilla on kuitenkin mahdotonta selvittää poljinvoima. Laitteiden avulla saadaan selville poljinvoiman komponentti, joka pyörittää kampea muttei koko voimaa. Esimerkkinä SRM:n ketjurattaan muodonmuutoksiin perustuva tehon mittauslaite. Yritys on ollut pisimpään alalla ja heidän parhaimpien laitteiden tarkkuus on noin  $\pm 0.5\%$ . Venymäliuskat on sijoitettu ketjurattaan puoliin, jolloin voidaan mitata vain ketjurattaan tangentialisuuntaan vaikuttava voima.

Työssä esiteltyjä polkimen akselin muodonmuutoksiin perustuvia sovelluksia ei ole vielä kaupallisesti saatavilla. Laitteiden valmistajat ovat ilmoittaneet julkaisevansa laitteet 2011 vuoden puolella. KÉO PowerPedal mittaa muiden laitteiden tapaan tehoon vaikuttavan voimakomponentin suuruutta. Toinen polkimen akselin muodonmuutoksia mittaava laite on Vector ja verrattuna muihin laitteisiin suunnittelussa on lähdetty varsin eri lähtökohdista. Laitteilla seurataan pyöräilijän tapaa polkea ja sitä kuinka hän kohdistaa voimaa polkimeen. Poiketen muista laitteista tämä laite mittaa polkimeen kohdistetun voiman ja laskee sen avulla pyöräilijän tuottaman tehon. Kaupallisista tuotteista tämä laite on ainoa, joka soveltuu poljinvoiman mittaamiseen.

Polkupyöräilyn ammattilaisten ja harrastajien keskuudessa on varmasti tunnettua, että paras hyöty saadaan, kun kohdistetaan voimaa kohtisuorasti poljinkampea vastaan. Tuntemalla tämän voiman voi pyöräilijä harjoitella polkemisen tehokkuutta. Erikoista on

se, että tehon mittauslaitteita on ollut kaupallisesti saatavilla jo yli 20 vuotta mutta vasta nyt on tulossa laitteita, joilla voidaan mitata suoraan polkimeen kohdistettua voimaa ja sen suuntaa.

Kuten jo aikaisemmin on tullut ilmi, ketjurataan muodonmuutoksiin perustuvalla laitteella voidaan mitata kampea kohtisuorassa oleva voimakomponentti. Yhdistämällä tähän laitteeseen venymäliuskoilla ja kiihtyvyyssanturilla varustettu poljinkampi, olisi teoriassa mahdollista laskea kammensuuntaan vaikuttava voimakomponentti ja kammen kiertokulma. Kiihtyvyyssanturi antaa tiedon kammen asennosta ja kammessa olevat venymäliuskat antavat tiedon siitä onko kampi vedolla vai puristuksella.

Kaupallisesti on saatavilla kuntopyöriä, jotka antavat tiedon siitä, missä asennossa poljinkampi on, kun pyöräilijä kohdistaa voimaa polkimeen. Tällaisen sovelluksen avulla pyöräilijä pystyy parantamaan poljintekniikkaa, koska laiteen avulla voidaan piirtää voimakäyrä. Käyrästä näkyy, miten paljon ja milloin pyöräilijä tuottaa voimaa. Kyseisiä sovelluksia ei kuitenkaan ole kehitetty polkupyöriin. Poljinvoiman mittauksen kannalta voimakäyrästä ei ole hyötyä, mutta tehon mittauslaitteen osana kylläkin.

## 6. YHTEENVETO

Lappeenrannan teknillinen yliopisto tekee tutkimustyön, jonka tarkoituksena on simuloida polvinivelen käyttäytymistä liikuntaharjoitteen aikana ja selvittää polviniveleen kohdistuvia rasituksia. Pyöräilyn oletetaan olevan hyvä liikuntaharjoite polven kannalta. Poljinvoima tulee määrittää, jotta voidaan tutkia polveen kohdistuvia rasituksia. Kandidaatintyössä tutkittiin tehon mittauslaitteita ja niiden soveltuvuutta poljinvoiman mittaamiseen.

Polkupyöriin on kehitetty useita tehon mittauslaitteita ja niiden toimintaperiaatteet eroavat toisistaan paljon. Karkeasti ottaen tehon mittauslaitteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, venymäliuskoja käyttävät ja muut. Useimmat mittalaitteet mittaavat tehon venymäliuskojen välityksellä. Venymäliuskoja käytetään mittaamaan muodonmuutoksia polkupyörän osissa kuten ketjuratas, taka-napa ja polkimen akseli. Venymäliuskat



mittaavat pieniä muodonmuutoksia kappaleen pinnalla. Muodonmuutoksien avulla voidaan laskea kappaleen jännitys. Tuntemalla kappaleen jännitys voidaan laskea kappaletta taivuttava voima tai vaihtoehtoisesti kappaletta vääntävä momentti. Muita tehon mittausrakenteita ovat liikettä vastustavan voiman mittaamiseen perustua laite sekä mittausrakenne, joka mittaa ketjun värähtelyä ja sen avulla ketjua kiristävää voimaa.

Poljinvoima vaikuttaa globaalissa koordinaatistossa, mutta se voidaan jakaa komponentteihin poljinkamman suhteen. Suorassa kulmassa poljinkamman nähden vaikuttava voima on tehoa tuottava voima. Useimmat tehon mittausrakenteet on suunniteltu niin, että ne laskevat vain tuon kyseisen voimakomponentin. Poljinvoiman mittaamiseen tarvitaan kuitenkin myös poljinkamman suuntainen voimakomponentti ja tieto kamman kiertymiskulmasta.

Nykyisistä kaupallisista laitteista yksikään ei mittaa molempia voimakomponentteja. Vuoden 2011 aikana MetriGear on ilmoittanut tuovansa markkinoille laitteen, joka mittaa poljinvoimaa. MetriGear on suunnitellut laitteen nimeltä Vector. Vector poikkeaa muista laitteista siinä määrin, että se mittaa poljinvoiman molempia komponentteja ja hyödyntää niitä tehon mittauksessa. Vector mittaa molempien jalkojen poljinvoiman erikseen. Laitteen avulla voidaan piirtää voimavektori kuvaaja poljinvoimasta. Laite mittaa poljinvoimaa piezoresistiivisillä venymäliuskoilla polkimen akselista. MetriGear ilmoittaa Vectorin tarkkuudeksi  $\pm 1.5\%$  todellisesta voimasta, joka on kiitettävä arvo kun otetaan huomioon resistiivisten venymäliuskojen mittatarkkuuden, joka on yleisesti  $\pm 2\%$  todellisesta venymästä. Vectorissa on kiihtyvyyssanturit, joilla mitataan poljinkamman kiertymiskulmaa. Tiedonsiirto tapahtuu langattomasti 2.4 GHz:n radiotaajuuksilla.

Mitä lähempänä voiman lähdettä poljinvoiman mittaus tapahtuu, sitä vähemmän tuloksiin tulee häviöitä ja mittauserätarkkuutta. Poljinvoiman mittaamisen kannalta polkimen akseli on ideaalinen mittausrakenne.

## LÄHDELUETTELO

Bike Tech Review, 2011, Power Meter Review [pdf-dokumentti]. [viitattu 3.3.2011]  
Saatavilla:

[http://biketechreview.com/images/biketechreview\\_powermeter\\_review\\_2011.pdf](http://biketechreview.com/images/biketechreview_powermeter_review_2011.pdf)

Crankzone 2010. CycleOps PowerTap SL+ (Mountain Bike) [verkkoartikkeli]. [viitattu 10.3.2011] Saatavilla: <http://www.crankzone.com/cycleops-powertap-sl-mountain-bike/>

CycleOps [CycleOpsin verkkosivuilla]. [viitattu 10.3.2011] Saatavilla:

<http://www.cycleops.com/products/power-meters.html>

Efunda. Strain Gage: Theoretical Background [verkkosivu]. [viitattu 1.4.2011] Saatavilla:

[http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain\\_gages/strain\\_gage\\_theory.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages/strain_gage_theory.cfm)

Gardiff Uni Engin 2009. Strain Gauge [verkkoartikkeli]. [viitattu 1.4.2011] Saatavilla:

<http://cardiffengin.wordpress.com/2009/02/21/strain-gauge/>

Hannah. R.L, Reed .S.E. 1992. Strain Gage users' handbook. Chapman & Hall. s. 134-138  
ISBN 0 412 53720 6

Huang J. 2010. Eurobike 2010: Look and Polar launch Keo Power pedal [verkkoartikkeli].  
[viitattu 9.3.2011]. Saatavilla: <http://www.bikeradar.com/road/gear/article/eurobike-2010-look-and-polar-launch-keo-power-pedal-27618>

iBike [iBiken verkkosivuilla]. [viitattu 5.3.2011] Saatavilla:

[http://www.ibikesports.com/products\\_isport.html](http://www.ibikesports.com/products_isport.html)

MetriGear 2010a [verkkosivu]. [viitattu 9.3.2011] Saatavilla:

<http://www.metrigear.com/products/>

MetriGear 2010b. Is Your Pedal Force Profile as Unique as Your Fingerprint?

[verkkoartikkeli]. [viitattu 9.3.2011] Saatavilla: <http://www.metrigear.com/blog/>

Mikkola A. 2010. Application for project: Dynamic simulation of the knee joint during physical activity [pdf-dokumentti]

Polar [Polarin verkkosivuilla]. [viitattu 2.4.2011] Saatavilla:  
[http://www.polar.fi/en/support/product\\_support?product=401](http://www.polar.fi/en/support/product_support?product=401)

Quarq [Quarqin verkkosivuilla]. [viitattu 9.3.2011] Saatavilla:  
<http://www.quarq.com/cinqo>

SRM [SRM:n verkkosivuilla]. [viitattu 12.4.2011] Saatavilla:  
<http://www.srm.de/index.php/us/home>

Valtanen E. 2007. Tekniikan Taulukkokirja. Gummerus Kirjapaino Oy. s. 437–449  
ISBN 978-952-9867-32-5

Wattbike [Wattibiken verkkosivuilla]. [viitattu 16.4.2011] Saatavilla:  
[http://wattbike.com/fi/wattbike/wattbike\\_voimakaeyrae](http://wattbike.com/fi/wattbike/wattbike_voimakaeyrae)

Wooles A, 2007, SRM User Manual 4th Edition, s. 92-95 [pdf-dokumentti].  
[viitattu 9.3.2011] Saatavilla: <http://www.srm.de/index.php/us/support/phoca-down-test/category/14-powermeter>