

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

JÄÄKIEKKOMAILAN MITTAUSLAITTEISTON SUUNNITTELU
DESIGN OF ANALYSIS SYSTEM FOR ICE HOCKEY STICK

Ohjaaja: TKT Kimmo Kerkkänen

Lappeenrannassa 31.5.2012

Tuomo Kanerva

0341221

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1. JOHDANTO	4
1.1. Työn taustaa	4
1.2. Työn tavoite ja rajaus	5
1.3. Järjestelmällinen koneensuunnittelu	5
2. MAILAN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN	6
2.1. Jääkiekkomaila	6
2.2. Rakenne	7
2.3. Testilaitteisto	8
2.4. Taipuminen	10
2.4.1. Mittaustulokset	11
2.4.2. Tulosten analysointi	13
2.5. Kiertyminen	14
2.5.1. Mittaustulokset	15
2.5.2. Tulosten analysointi	16
3. MITTAUSLAITTEISTON LUONNOSTELU	18
3.1. Vaatimuslista ja toimintorakennekaavio	18
3.2. Toimilaitteet	19
3.3. Anturit	20
3.4. Taivutus	21
3.4.1. Toimilaitteiden ja mittalaitteiden vertailu	23
3.5. Vääntöjäykkyyden mittaus	26
3.5.1. Toimilaitteiden ja mittalaitteiden vertailu	27
3.6. Ratkaisu luonnokset	29
3.7. Kustannusarvio ja -analyysi	32
4. TULOSTEN TARKASTELU	34
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

v	siirtymä	[mm]
F	voima	[N]
l	pituus	[mm]
I	jähyysmomentti	[mm ⁴]
E	kimmokerroin	[MPa]
k	jousivakio	[N/m]

1. JOHDANTO

1.1. Työn taustaa

Maila on jääkiekkoilijan tärkein varuste luistimien lisäksi. Oikeanlaisen jääkiekkomailan löytäminen vaatii paljon erityyppisten mailojen kokeilemista ja analysointia. Kun pelaaja on löytänyt itselleen sopivan mailan, on seuraavia ongelmia mailojen valmistuksessa tapahtuva laadun vaihtelu ja käytössä olevan mailan löystyminen. Nykyään pelaajat tutkivat mailoja tunneperäisin keinoin, taivuttelemalla ja silmämääräisesti arvioimalla niiden kuntoa. Menetelmän ongelmana on sen epätarkkuus, johon myös tunnetilat vaikuttavat. Tunteeseen perustuvassa mittauksessa on kertautuvan virheen riski, jonka johdosta pelaajalla käytössä oleva maila voi muuttua ajan kuluessa ominaisuuksiltaan alkuperäisestä poikkeavaksi. Toinen merkittävä ongelma on mailan yhtäkkäinen katkeaminen ottelunaikana, joka aiheuttaa usein ottelun kannalta vaarallisia tilanteita. Mailan katkeamisen ennustaminen vähentäisi merkittävästi näitä tilanteita, kun pelaaja voisi vaihtaa mailan ennen sen katkeamista.



Kuva 1. Jääkiekkomaila. (Reebok-CCM hockey Inc.)

Nykyiset komposiittimailat maksavat jopa yli 250 €. Keskiverto ammattilaispelaaja käyttää kauden aikana useita kymmeniä mailoja, jolloin mailoista aiheutuvat kokonaiskustannukset nousevat tuhansiin euroihin. Pelaaja vaihtaa mailan, kun se tuntuu löysältä, vaikuttaa silmämääräisesti rikkinäiseltä tai menee poikki. Mielentila vaikuttaa

monessa tapauksessa mailan arviointiin, esimerkiksi epäonnistumisen jälkeen, jolloin tulokset voivat olla vääristyneitä. Pintapuolinen silmämääräinen tarkastelukaan ei aina kerro mailan todellisesta kunnosta. Virheellisin perustein pois heitetty maila on aina turha menoerä, jossa voitaisiin säästää kausittain tuhansia euroja. Tutkimuksessa toimii konsulttina jääkiekkoa ammatikseen Saipassa pelaava Ville Koho.

1.2. Työn tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on suunnitella mittauslaitteisto, jolla voidaan tutkia kenttäpelaajan jääkiekkomailoissa kulumisen tai laadunvaihtelun aiheuttamia muutoksia. Laitteiston suunnittelu edellyttää mailan mekanismien ja vauriotapausten ymmärtämistä. Laitteiston mittaustulosten tulee olla yksiselitteisiä ja sillä on kyettävä mittaamaan eri tyyppisiä jääkiekkomailoja riittävällä tarkkuudella. Tarkkuuden riittävyys määritellään tutkimustulosten perusteella.

Tässä työssä laitteen suunnittelu päätetään luonnosteluun. Työssä etsitään laitteelle mahdollisia toteutustapoja, joden perusteella voidaan arvioida sen mahdollisuuksia pärjätä markkinoilla. Laitteen mahdollinen kehittäminen ja viimeistely jätetään työn teettäjän harkittavaksi.

1.3. Järjestelmällinen koneensuunnittelu

Laitteiston suunnittelussa sovelletaan järjestelmällisen tuotekehityksen metodia VDI 2221, joka jakautuu neljään päävaiheeseen: Tehtävänasettelu, luonnostelu, kehittäminen ja viimeistely. Tehtävänasettelun tarkoitus on tutustua ongelmaan ja muuttaa tarve, sekä odotukset konkreettisiksi lähtöarvoiksi. Sen lopputuloksena on vaatimusluettelo, joka yhdessä tehtävän kuvauksen kanssa muodostavat tuotekehityksen tavoitteet ja reunaehdot. Luonnostelun tärkein vaihe on pää- ja osatoimintojen määrittäminen. Osatoimintoja havainnollistetaan VDI 2222:n mukaisella toimintorakennekaaviolla. Pää- ja osatoiminnoille esitetään periaateratkaisuja, jotka kootaan ideamatriisiin. Periaateratkaisuja yhdistämällä saadaan luotua erilaisia kokonaisratkaisuja. Ratkaisuluonnokset arvostellaan ja parhaat vaihtoehdot otetaan kehittelyyn, jossa luonnokset suunnitellaan yksityiskohtaisesti teknistaloudelliset näkökohdat huomioon ottaen. Viimeistelyyn kuuluu dokumenttien valmistaminen ja tuotteen testaus. (Mekatronikka, Airila)

2. MAILAN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

2.1. Jääkiekkomaila

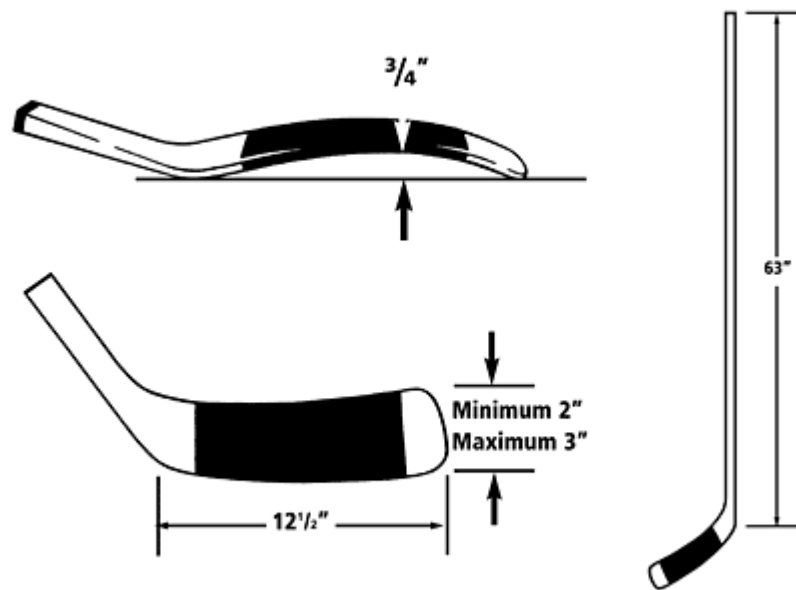
Jääkiekkomailan varsi on suora ja poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen. Varren tehtävä on välittää voima pelaajan käsistä kiekkoon. Laukauksen aikana varsi toimii jousen tapaan. Mailan lavan koskettaessa jäätä varsi taipuu ja varastoi energiaa. Lavan irrotessa jäädä, varteen varautunut potentiaalienergia muuttuu mailan ja kiekon liike-energiaksi ja kiekko saadaan liikkeelle. Osumalla mailan lavalla pelkästään kiekkoon ei pelaajan pyörähdysenergiaa saada siirrettyä kiekkoon ja kiekon lähtönopeus on pienempi. (jääkiekon fysiikka s.126)



Kuva 2. Lyöntilaukaus. (Reuters)

Mailan lapa on yleensä hieman kaareva ja alle yhden sentin paksuinen levy, jolla pelaaja hallitsee kiekkoa. Mailan lapoja on hyvin montaa eri mallia. Lavan muuttujia ovat: kaarevuussäde, kaarevuussäteen keskipisteen sijainti, lavan kallistuskulmat, sekä kärjen muoto. Lavan käyristyssuunta on joko left tai right, pelaajan kätsisyyden mukaan. Left tarkoittaa pelaajan pitävän mailan lapaa vasemmalla puolellaan ja right oikealla puolellaan. Mailan lavan ja varren välistä liitosta kutsutaan nilkaksi. (Hockey Stick Dictionary 2008)

Säännöissä on mailan mitoille annettu tietyt rajat. Varren pituus ei saa ylittää 63" (1600,2 mm). Poikkeuksena yli 198 cm pituisille pelaajille suurin sallittu varren pituus on 65" (1651 mm). Mailan lavan kaarevin kohta ei saa olla matalimmillaan yli $\frac{3}{4}$ " (19,1 mm) etäisyydellä lavan kannan ja kärjen muodostamasta linjasta, eikä lavan pituus saa ylittää $12\frac{1}{2}$ " (317,5 mm). (Rules 2012)



Kuva 3. Jääkiekkomailan sallitut mitat. (Rules 2012)

2.2. Rakenne

Jääkiekkomailoja on perinteisesti valmistettu puusta. Paras puulaji mailan raaka-aineeksi on vuorijalava. Vuorijalava taipuu hyvin, eikä säleidy helposti. Sieniperäiset taudit tuhosivat kuitenkin merkittävästi vuorijalavakantaa, joka ajoi mailateollisuuden etsimään vaihtoehtoisia materiaaleja. Yleisimmin käytettyjä korvaavia materiaaleja ovat alumiini ja kuitukomposiitit. (Jääkiekon fysiikka). Nykyään kuitukomposiitit ovat kaikkein käytetyin mailojen valmistusmateriaali. Erityisesti hiilikuitu on yleistynyt mailojen raaka-aineena ja lähes kaikki ammattilaispelaajat, harvoja poikkeuksia lukuunottamatta, pelaavat hiilikuitukomposiittimailoilla. Hiilikuidun lisäksi mailojen varressa käytetään myös aramidikuitua parantamaan iskunkestävyyttä. (Stick technology 2011)

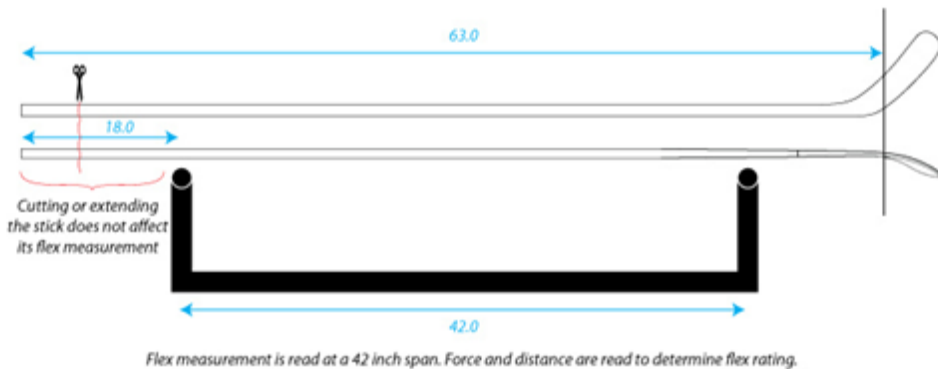
Komposiittimailat koostuvat yleensä lavasta ja varresta, jotka liimataan yhteen, mutta yksiosaisten mailojen määrä on kasvussa. Mailan varsi valmistetaan käärimällä komposiittikerroksia muotin ympärille, jonka jälkeen varsi kuumennetaan ja puristetaan joillain seuraavista kolmesta menetelmästä. Ensimmäinen tapa on perinteinen hydraulinen prässä, jossa komposiittikerrokset puristetaan vastakkain käänteisillä muotin puoliskoilla. Toinen tapa on painaa komposiittikerrokset muottia vasten alipaineella. Kolmannessa tavassa kerrokset puristetaan muottia vasten paineistetulla ilmapussilla. (Hockey Stick 2012) Lapa valmistetaan laminoimalla komposiittikerrokset polymeerisen ytimen päälle, kuva 4.



Kuva 4. Lavan poikkileikkaus.

2.3. Testilaitteisto

Jääkiekkomailojen taivutusjäykkyys ilmoitetaan flex arvolla. Mailan flex arvo tarkoittaa voimaa paunoissa, jolla mailan varsi taipuu yhden tuuman. Taivutuksessa tuentapisteiden välimatka on 42" (1066,8 mm) ja voima kohdistetaan tuentapisteiden puoliväliin. Aikuisten käyttämien mailojen flex arvo on yleensä 75-100. Tarkemmissa tutkimuksissa voidaan samaa menetelmää käyttää mittaamaan varren jäykkyyttä myös alueittain.



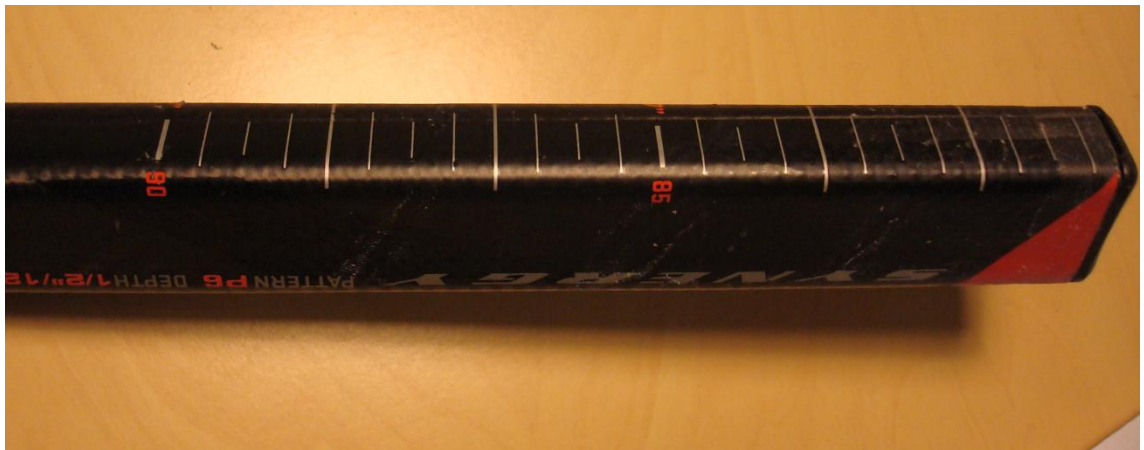
Kuva 5. Taivutusjäykkyyden määrittäminen. (Warrior)

Jääkiekkomailojen vääntöjäykkyydelle ei ole yleistä mittaamenetelmää, eikä siten flex arvon tyypistä yleisesti käytettyä arvoa. Laukauksen aiheuttamaa kiertymää on kuitenkin tutkittu käyttäen varteen kiinnitettyjä venymäliuskoja. (Vander Veen, 2003) Tutkimuksissa on mitattu vain mailan varren kiertymistä tietyissä pisteissä, eikä niissä ole otettu huomioon mailan lavan tai nilkan joustavuutta. Mailan lavan joustaminen on huomattava osa mailan kokonaismyötöä ja pelaajan tuntumaa kiekkoon. (Phil Kessel wrist shot 2009)

Mailan lavan ja nilkan jäykkyyttä voidaan mitata laakeroimalla varsi läheltä lavan kiinnityskohtaa, siten että varsi pääsee kiertymään pituusakselinsa ympäri, mutta ei liikkumaan radiaalisesti. Mailan lapa tuetaan keskeltä tai kärjestä, riippuen siitä miten tarkasti lavan osuutta halutaan tutkia. Mittaus suoritetaan kiertämällä mailan vartta laakeroinnin läheltä varren puolelta. Tuloksena saadaan kiertymä-momentti kuvaaja. Varren vääntöjäykkyys voidaan ottaa mukaan mittaukseen kiertämällä vartta vapaasta päästä. Tällöin varsi pitää laakeroida molemmista päistä, jotta kiertyminen ei aiheuta varteen ylimääräistä taipumaa.

2.4. Taipuminen

Mailan flex arvon määrittämisessä huomioidaan ainoastaan varren yleinen jäykkyys. Mittaustapa ei huomioi mahdollisia eroja mailan jäykkyydessä sen eri kohdissa. Esimerkiksi monet mailavalmistajat markkinoivat mailojaan mm. normaalia matalammalla joustokohdalla eli ns. kick pointilla, jonka väitetään parantavan laukaisunopeutta. Mittausmenetelmä ei myöskään ota huomioon mailan pidentämistä tai lyhentämistä pelaajan pituuden mukaan. Mailan kokonaispituus vaikuttaa kuitenkin merkittävästi sen kokonaisjäykkyyteen, sillä saman suuruisen voiman aiheuttama taipuma on suurempi käytettäessä pitkää momenttivartta, kuin lyhyttä.



Kuva 6. Pituuden muutoksen vaikutus jäykkyyteen.

Kuvassa 6 on valmistajan mailan varteen merkitsemä taulukko, joka kertoo kuinka paljon mailan lyhentäminen vaikuttaa sen todelliseen jäykkyyteen. Olettamalla maila päistään tuetuksi tasapaksuiseksi neliskulmaiseksi putkeksi, jota kuormitetaan keskipisteestä, voidaan sen todellinen jäykkyys laskea seuraavasti:

$$v = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (1)$$

Yhtälössä 1, v on suurin siirtymä [mm], F on taivuttava voima [N], l on tukipisteiden välimatka [mm], E on materiaalin kimmokerroin [MPa] ja I on varren jäyhyysmomentti. Koska jäyhyysmomentti on tuntematon, käännetään yhtälö muotoon:

$$I = \frac{Fl^3}{48Ev} \quad (2)$$

85 flex hiilikuitukomposiittimailassa $v_{42} = 25,4$ mm, $F_{85} = 378$ N, $l_{42} = 1066,8$ mm, $E_c = 70\,000$ MPa. Sijoittamalla arvot kaavaan 2 saadaan I_{85} :n arvoksi $5377,3$ mm⁴. Koska mailan varsi oletettiin tasapaksuiseksi neliskulmaiseksi putkeksi on I :n arvo sama koko matkalla. Tuntemalla mailan jäyhyys koko matkalla, voidaan varren suurin siirtymä laskea yhtälöllä 1.

Käyttötilanteessa mailan varren tukipisteiden välimatka l on 57" (1447,8 mm). Sijoittamalla $l_{57} = 1447,8$ mm ja $I_{85} = 5377,3$ mm⁴ yhtälöön 1 saadaan v_{57} :n arvoksi 63,5 mm. Mikäli vartta lyhennetään 2" (50,8 mm) voidaan todellinen flex arvo laskea yhtälöstä 3, käyttäen laskettua v_{57} :n arvoa 63,5 mm.

$$F = \frac{48vEI}{l^3} \quad (3)$$

Sijoittamalla $v_{55} = 63,5$ mm, $l_{55} = 1397$ mm ja $I_{85} = 5377,3$ mm⁴ yhtälöön 3 saadaan F :n arvoksi 420,8 N (94,6 lb). Flex 85 varren, jota on lyhennetty 2" (50,8 mm), todellinen flex arvo on siis 94,6.

Laskentatapa voidaan osoittaa päteväksi vertaamalla jousivakioita. Jääkiekkomaila toimii laukauksessa jousen tapaan, jolla on jousivakio k ja siirtymä tasapainoasemasta v . Jousivakio voidaan laskea yhtälöstä 4.

$$F = -kv \quad (4)$$

Flex 85 varren, jota on lyhennetty 2", suurin siirtymä v on 63,5 mm 420,8 N voimalla F . Yhtälöstä 4 lyhennetyin varren jousivakioksi k saadaan 6,6. 57" (1447,8 mm) pitkän flex 94,6 varren taipuma on yhtä suuri kuin 57" pitkän flex 85 varren, johtuen laskentatavasta. Flex 94,6 varren suurin siirtymä on siten 63,5 mm 420,8 N voimalla, josta saadaan jousivakion k arvoksi 6,6.

2.4.1. Mittaustulokset

Mittaukset tehtiin käyttäen kuvan 7 mukaista testilaitteistoa. Laitteessa siirtymä mitattiin erillisellä mittakellolla, jonka asteikko on 0-30 mm ja resoluutio 0,01 mm. Mittakello kalibroitiin erikseen jokaisessa kokeessa, mutta kalibrointi pidettiin samana eri mailojen välillä. Voima mitattiin laitteen käyttämän hydrauliiikan paineesta digitaalisella anturilla. Digitaalisen voima-anturin resoluutio on 10 N.

Neljässä erillisessä kokeessa testattiin yhteensä kuusi hiilikuitukomposiittimailaa. Valmistajan ilmoittamia tietoja ovat mailan flex arvo ja pituus. Mailan kuntoa arvioitiin pelaajien käyttökokemusten perusteella.

Taulukko 1. Tutkittavat mailat

	Merkki	Malli	Ilm. flex arvo	Pituus	Kunto
Maila 1	CCM	U+ Pro 2011	85	60" (1524 mm)	Pelikuntoinen
Maila 2	CCM	U+ Pro 2011	85	60"	Löystynyt
Maila 3	CCM	U+ Pro 2010	100	60"	Löystynyt
Maila 4	CCM	U+ Pro 2011	85	60"	Uusi
Maila 5	EASTON	Synergy ST	85	60"	Pelikuntoinen
Maila 6	CCM	Vector V80	85	60"	Pelikuntoinen



Kuva 7. Kolmipistetäivutuslaite.

Kokeessa 1 mailoja 1, 2, 3 ja 4 taivutettiin asettamalla voima varren keskipisteeseen ja asettamalla tukipisteet 42” (1066,8 mm) etäisyydelle toisistaan. Kokeessa 2 mailoja taivutettiin kuvan 5 mukaisesti. Koska testatut mailat ovat pituudeltaan 60” (1524 mm) oli toisen tukipisteen etäisyys mailan päästä 15” (381 mm). Mailaa 3 ei voitu testata, sillä sen varsi oli poikki tukipisteen yläpuolelta. Kokeessa 3 mailoja taivutettiin 30 mm, jotta mailojen jäykkyyksien välille saataisiin selvempiä eroja. Mailoja taivutettiin varren keskipisteestä, kuten kokeessa 1. Koe 4 oli muuten sama kuin koe 1, mutta vertailuun otettiin mukaan mailat 5 ja 6.

Taulukossa 2. on esitetty kokeiden tulokset. Suluissa oleva luku on mitattu flex arvo pyöristettynä kokonaislukuihin.

Taulukko 2. Mittaustulokset

	Maila 1	Maila 2	Maila 3	Maila 4	Maila 5	Maila 6
Koe 1	400 N (90)	400 N (90)	420 N (94)	400 N (90)		
Koe 2	380 N (85)	400 N (90)		400 N (90)		
Koe 3	420 N	440 N	440 N	420 N		
Koe 4		370 N (83)		370 N (83)	310 N (70)	400 N (90)

2.4.2. Tulosten analysointi

Kokeiden välisissä tuloksissa huomataan olevan melko suurta hajontaa, joka johtuu voima-anturin huonosta resoluutiosta, sekä siirtymänmittauksen kalibroinnista. Kokeiden sisäiset tulokset ovat kuitenkin vertailukelpoisia, sillä mittausvirhe on kaikille kokeen tuloksille sama.

Saman mallisarjan mailat 1, 2 ja 4 ovat tuloksiltaan lähellä toisiaan. Mailan 1 jäykkyys on vain hieman pienempi, kuin mailojen 2 ja 4. Koska maila 1 on uusi ja käyttämätön voidaan tuloksista päätellä mailan varren jäykkyyden pysyvän samana käyttömäärästä riippumatta. Tuloksista voidaan myös päätellä valmistuksellisen hajonnan olevan jäykkyydessä melko pientä. Mailan äkillistä katkeamista on myös mahdotonta ennustaa mailan jäykkyyden avulla, koska siinä ei käytön aikana tapahdu muutosta.

Kokeiden 1, 3 ja 4 tuloksista huomataan mailoissa olevan suurta heittoa ilmoitetun jäykkyyden ja todellisen jäykkyyden välillä. Suurin ero on mailassa 5, jonka todellinen flex arvo 70 poikkeaa ilmoitetusta 85:stä jopa 18 %. Mailan 5 varren yläosan merkintä

kertoo mailan todelliseksi flex arvoksi 80 ja arvon 85 olevan pätevä, kun mailaa lyhennetään 3" (76,2 mm). Ero mitattuun arvoon on silti 13 %.

Jääkiekkomailan ilmoitettu flex arvo voi poiketa merkittävästi sen todellisesta arvosta ja saman mallisarjan kappaleidenkin välillä on pieniä eroja. Todellisen flex arvon määrittäminen on siten tarpeellista, jotta pelaaja voi luottaa pelaavansa jatkuvasti samanlaisilla mailoilla. Valmistajan ilmoittamat jäykkyydet ovat suuntaa-antavia, mutta eivät täysin luotettavia.

2.5. Kiertyminen

Kohdassa 2.4.2 todettiin ettei mailan varsi väsy taivutuksessa. On siis oletettavaa, että muutokset mailan jäykkyysominaisuuksissa johtuvat vääntöjäykkyyden heikkenemisestä. Silmämääräisellä tarkastelulla huomataan käyttäjien mailojen nilkkaosassa olevan rakenteellisia vaurioita. Nilkkaosan pintaan muodostuu käytössä halkeamia. Silmämääräisesti on kuitenkin vaikea arvioida murtumien todellista vaikutusta mailan toimintaan.

Jääkiekkomailaan ja etenkin nilkkaan kohdistuu laukauksen aikana huomattava taivutusmomentti. Äärimmäisenä esimerkkinä voidaan käyttää Zdeno Charan lyöntilaukausta, jonka nopeudeksi mitattiin NHL:n tähdistöottelussa 48,6 m/s (175,1 km/h). Lyöntilaukauksessa ihanteellinen kiekon saattomatka on noin 30 cm. Kiihtyvä kiekko kohdistaa mailaan voiman, joka voidaan laskea yhtälöstä 5. (Jääkiekon fysiikka s.132-134)

$$F = \frac{mv^2}{2d} \quad (5)$$

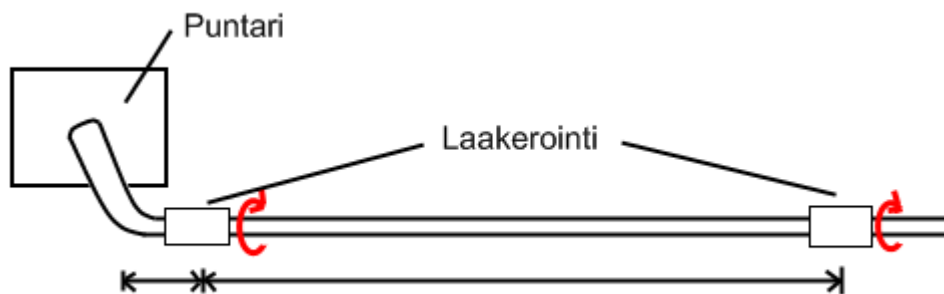
Sijoittamalla kiekon loppunopeus $v = 48,6$ m/s, kiekon massa $m = 0,170$ kg ja saattomatka $d = 0,3$ m, saadaan $F = 670$ N. Keskiaverto pelaajan laukausnopeus on noin 36 m/s (noin 130 km/h), jolloin voima $F = 370$ N. Lyöntilaukauksessa kiekko asettuu yleensä lähelle lavan keskipistettä. Suurin sallittu lavan pituus on 12½" (317,5 mm), jolloin kiekon aiheuttaman momentin momenttivarsi on 6¼" (157,5 mm). Momentti voidaan laskea yhtälöstä 6.

$$M = Fx \quad (6)$$

Sijoittamalla momenttivarsi $x = 0,1575 \text{ m}$ ja kiekon aiheuttama voima $F = 370 \text{ N}$, saadaan momentiksi $M = 58 \text{ Nm}$.

2.5.1. Mittaustulokset

Voiman mittauksissa käytettiin puntaria, jonka resoluutio on 1 g . Kiertymän mittauksessa käytettiin jäykkää taivutusvartta, jonka päädyn siirtymä mitattiin mitta-asteikolla, jonka resoluutio on 1 mm .



Kuva 8. koejärjestelyt

Kokeessa 5 lavan kärki asetettiin puntarille ja varsi laakeroitiin 120 mm päästä lavan kannasta 150 mm matkalta. 415 mm pitkä taivutusvarsi kiinnitettiin 300 mm päähän kannasta. Kokeessa 6 varsi laakeroitiin myös yläpäästä 150 mm pituisella laakerilla, siten että ylemmän laakerin kauimmaisen reunan etäisyys lavan kantaan oli 1100 mm . 415 mm pitkä taivutusvarsi kiinnitettiin 1120 mm päähän kannasta, hieman ylemmän laakerin yläpuolelle. Kokeessa 7 alemmaa laakeria siirrettiin ylemmäs, siten että laakereiden välimatka oli 900 mm . Molempien laakereiden ulkopuolelle kiinnitettiin taivutusvarret. 280 mm pituinen taivutusvarsi asetettiin puntaria vasten ja 415 mm pituista vartta painettiin vapaasta päästä. Kokeessa käytetyt mailat olivat samoja, kuin taivutuskokeessa.

Tulokset on laskettu jakamalla taivuttava voima kiertymiskulmalla, yksikkö on siten $\text{N}/^\circ$. Kokeet 5 ja 7 tehtiin kahdesti, jotta saadaan käsitys mittausvirheen suuruudesta. Mittaukset tehtiin lavan kärjestä, sillä tällöin tulokset huomioivat myös lavan taivutusjäykkyyden. Puntarin lukemat vaihtelivat $50 - 109 \text{ N}$ välillä, kiertymien ollessa $6 - 12^\circ$ välillä.

Taulukko 3. Mittaustulokset

	Maila 1	Maila 2	Maila 3	Maila 4
Koe 5.1	12 N/°	5,6 N/°		11,9 N/°
Koe 5.2	12 N/°	5,7 N/°		12,2 N/°
Koe 6	7,8 N/°	4,9 N/°		7,9 N/°
Koe 7.1	11,6 N/°	11,4 N/°	8,9 N/°	10,3 N/°
Koe 7.2	11,7 N/°	11,8 N/°	8,6 N/°	10,6 N/°

2.5.2. Tulosten analysointi

Kokeissa 5 ja 7, joissa mittaukset suoritettiin kahdesti, tuloksia voidaan pitää melko tarkkoina ja vertailukelpoisina, sillä mittaustuloksien hajonta on pientä.

Kokeessa 5, jossa tutkittiin nilkan ja lavan jäykkyyttä, ovat mailojen 1 ja 4 tulokset mittaasepä tarkkuuden puitteissa samat. Myös kokeen 6 tulokset ovat lähes identtiset. Tulokset tukevat sitä empiiristä havaintoa, jonka mukaan maila 1 on täysin uudenveroinen aiemmasta käytöstä huolimatta. Mailojen 1 ja 4 taivutusjäykkyydetkin olivat lähes identtiset, joten uusien saman mallisarjan mailojen erot ovat kokeiden mukaan erittäin pieniä.

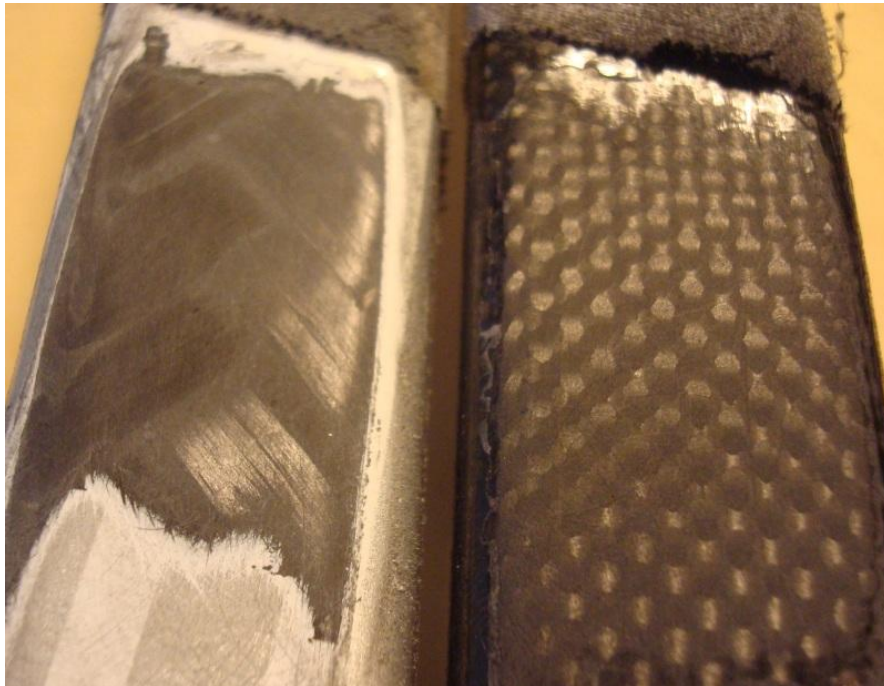
Mailan 2 tulokset kokeissa 5 ja 6 eroavat selvästi mailoista 1 ja 4. Nämä tulokset myös tukevat käyttäjän havaintoja mailan löystymisestä pidemmän käytön aikana. Erot ehjiin mailoihin ovat myös niin huomattavia, joten kokeiden 5 ja 6 avulla voidaan luotettavasti seurata mailan jäykkyyden muutoksia käytön aikana ja verrata niitä käyttäjän tekemiin havaintoihin.

Kokeessa 7 tutkittiin pelkän varren jäykkyyden eroja mailojen välillä. Mailojen 1 ja 2 tulokset ovat mittaustarkkuuden puitteissa samat, jotka tukevat aikaisempia tuloksia mailan varren jäykkyyden muuttumattomuudesta. Oletusten vastaisesti mailan 4 tulokset kuitenkin eroavat selvästi mailojen 1 ja 2 tuloksista, vaikka muut mittaukset ovat olleet lähellä toisiaan. Mailan 3 vääntöjäykkyys on jopa pienempi kuin mailan 4, vaikka mailan 3 taivutusjäykkyys oli kaikkein suurin.

Kokeen 7 tulosten erot johtuvat todennäköisesti mittauksessa tapahtuneesta virheestä. Mailan 4 pinta eroaa mailojen 1 ja 2 pinnoista. Mailan 1 ja 2 pintaan on levitetty liimamaista ainetta, joka parantaa pelaajan otetta mailasta. Liima myös parantaa taivutusvarren otetta mailasta. Mailan 4 pinta on tehtaan jäljiltä lakattu ja liukas, joten

taivutusvarsi on todennäköisesti liukunut hieman aiheuttaen mitattua pienemmän kiertymiskulman.

Mailan 3 huomattava ero vääntöjäykkyydessä johtuu sen erilaisesta rakenteesta. Kuvasta 9 nähdään että vuoden 2011 mailoissa käytetty punottu hiilikuitumatto on asetettu noin 45° kulmaan mailan varren pituussuuntaan nähden. Vuoden 2010 mailassa hiilikuitumatto on siten että kuidut ovat yhdensuuntaisia pituus- ja poikittaissuunnassa mailaan varteen nähden. Kuitulujitteisten komposiittien kimmokerroin on suurin kuitujen suuntaan ja pienin kuitujen poikittaissuuntaan. Väännössä voiman suunta on viisto putken pituussuuntaan nähden, jolloin viistoon asetetut kuidut pystyvät hyödyntämään lujuusominaisuutensa paremmin kuin suoraan asetetut kuidut. (Kuitulujitetut komposiitit 2005)



Kuva 9. Vasemmalla vuoden 2011 malli ja oikealla vuoden 2010 malli.

3. MITTAUSLAITTEISTON LUONNOSTELU

3.1. Vaatimuslista ja toimintorakennekaavio

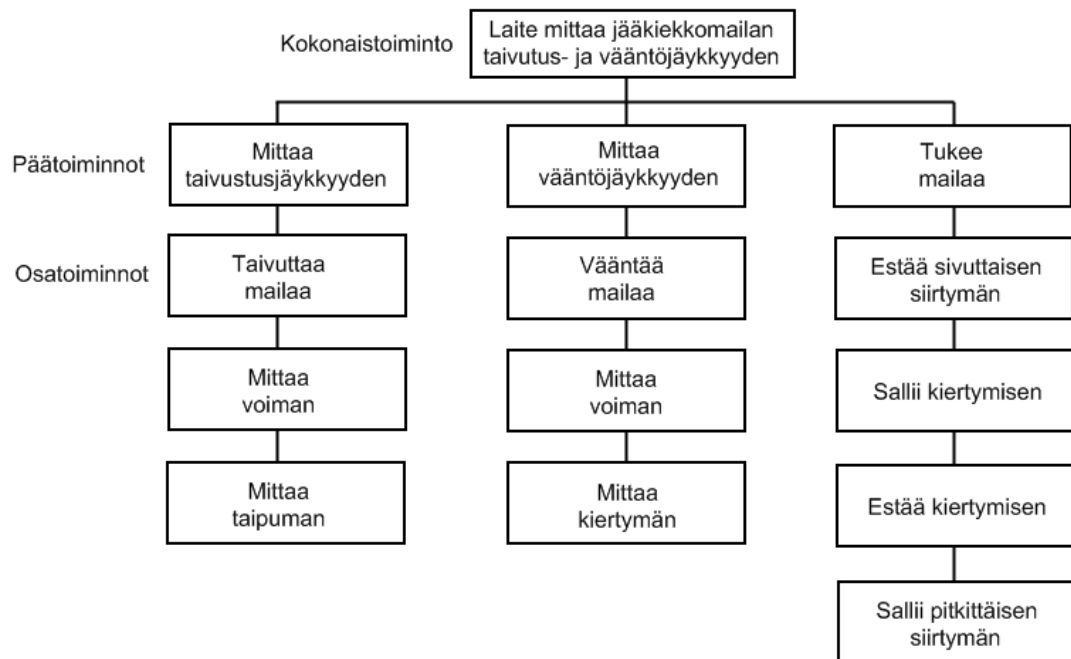
Taulukko 4. Vaatimusluettelo

Päättunnuspiirre	V/T	Ominaisuus
Toimilaitteet	V	Mittaa varren jäykkyyden 5 flexin resoluutiolla
Toimilaitteet	T	Mittaa varren jäykkyyden 1 flexin resoluutiolla
Toimilaitteet	V	Tuottaa vähintään 600 N taivutusvoiman
Toimilaitteet	V	Mittaa vääntöjäykkyyden.
Toimilaitteet	T	Laskee mailan todellisen flex arvon
Toimilaitteet	T	Toiminta automaattista
Toimilaitteet	T	Mittaa varren kiertöjäykkyyden
Materiaalit/Toimilaitteet	V	Sietää kosteaa (95%) ja kylmää (-10°C) käyttöympäristöä
Kinematiikka	T	Mittaus kestää korkeintaan 1 min
Geometria	V	Mittaa mailat 65" asti
Geometria	T	Riittävän kevyt ja kompakti kuljetettavaksi helposti linja-auton tavaratilassa. Max. 20 kg.
Kunnossapito	V	Varma toimivuus vähäisellä huollolla

Ongelman ydin saadaan tiedostettua vaatimusluettelon avulla, jättämällä siitä pois toivomukset ja pelkistämällä vaatimusten sisältö yhteen lauseeseen. Lauseen muotoilussa pyritään välttämään rajoituksia sisältäviä sanoja ja ilmaisuja. Tätä toimenpidettä kutsutaan abstrahoinniksi. (Luova koneensuunnittelu, Tuomaala)

Abstrahoinnin tulos: "Laitte mittaa jääkiekkomailan taivutus- ja vääntöjäykkyyden."

Abstrahoinnilla saatu lause toimii laitteen kaikki toiminnot kokoavana pohjana eli kokonaistoimintona. Toimintorakennekaavion avulla kokonaistoiminto puretaan erillisiin pää- ja osatoimintoihin. Osatoiminnoille etsitään erilaisia ratkaisuja, joista lopulta kootaan ehdotukset laitteen kokonaisratkaisuksi.



Kuva 10. Toimintorakennekaavio.

3.2. Toimilaitteet

Lineaarinen liike, jonka minimi iskunpituus on 25,2 mm ja minimi voima 600 N, voidaan toteuttaa käsivoimin mekanismien avulla, sähköisillä-, pneumaattisilla- tai hydraulisilla toimilaitteilla. Mittauslaitetta tullaan käyttämään jäähallilla ja sen oletettu käyttötila on pukuhuone. Jäähallin pukuhuoneessa saatavilla on 230 V vaihtovirtaa ja mittauksen suorittajan lihasvoima. Laitteiston tulee silloin itse tuottaa pneumaattisten tai hydraulisten toimilaitteiden käyttöpaine käyttäen sähköistä pumppua tai kompressoria.

Hydraulisilla toimilaitteilla saadaan tuotettua suuria voimia ja sen liikkeitä pystytään hallitsemaan erittäin tarkasti. Ne ovat kuitenkin kalliita paineilmalaitteisiin verrattuna. Lisäksi hydraulijärjestelmä aiheuttaa melua ja vuodot likaavat käyttöympäristön. Ominaisuuksiensa takia hydraulijärjestelmä ei sovellu tähän käyttötarkoitukseen. (Mekatroniikka)

Pneumatiikka on yksinkertainen, luotettava ja hydraulikkaan verrattuna edullinen ratkaisu lineaarisen liikkeen luomiseen. Pneumatiikan heikkoutena on huono paikoitustarkkuus muualla, kuin ääriasennoissa. Koska jääkiekkomailan ominaisuudet mitataan aina samoilla siirtymillä, voidaan sovelluksissa hyödyntää ääriasetoja.

Järjestelmä vaatii kuitenkin kompressorin käyttöpaineen tuottamiseen, mutta valmiiseen järjestelmään on helppoa ja edullista lisätä useita toimilaitteita. Erillisen kompressorin tuoma paino ja hinta tekevät pneumatiikasta epäsovivan vaihtoehdon. (Mekatroniikka)

Sähkömoottorilla toimiva järjestelmällä saadaan aikaan hyvä paikoitustarkkuus ja kohtuullinen momentti. Sähkömoottori ei aiheuta käyttöympäristölle haittaa, se on kestävä ja mahtuu pieneen tilaan. Servomoottorit ovat melko kalliita ja lineaarisen liikkeen aikaansaaminen vaatii erillisen mekanismin. Sähkömoottori soveltuu ominaisuuksiltaan haluttuun käyttötarkoitukseen. (Mekatroniikka)

Käsiikäyttöinen mekanismi on edullinen, luotettava ja kevyt. Mekanismi on tarkka ääriarvoissaan. Heikkoutena se saattaa rajata käyttäjäkuntaa fyysisten ominaisuuksien perusteella. Virheellisen käytön riski on suurempi, kuin muilla vertailtavilla vaihtoehdoilla. Vaatimusluettelossa on toivomus automaattisuudesta, mutta käsiikäyttöinen mekanismi on laitteen käyttötarkoituksen huomioon ottaen kilpailukykyinen vaihtoehto.

3.3. Anturit

Tässä mittauslaitteistossa antureita tarvitaan mittaamaan voimaa ja paikkaa. Voiman mittausta tarvitaan, kun määritetään mailan taivutus- ja vääntöjäykkyyttä. Paikan mittausta tarvitaan mailan pituuden määrittämiseen ja toimilaitteista riippuen myös taipuman ja kiertymän määrittämisessä.

Voiman mittaamiseen käytetään yleensä venymäliuska-antureita ja pietsosähköisiä antureita. Molemmat anturit toimivat samalla periaatteella, jossa tutkittavaan kappaleeseen kohdistuva voima aiheuttaa anturissa fyysisen muutoksen. Tämä muutos vaikuttaa anturin sähköisiin ominaisuuksiin, joita voidaan helposti mitata. Venymäliuska-anturin etu pietsosähköiseen anturiin on edullisempi hinta ja parempi tarkkuus. (Mekatroniikka)

Siirtymän mittauksessa voidaan käyttää joko analogisia tai digitaalisia antureita. Analogiset anturit antavat lähtöjännitteen, joka on verrannollinen siirtymään. Digitaaliset anturit ovat joko pulssiantureita tai koodiantureita. Pulssiantureissa pulssien määrä ja koodiantureissa digitaalisena kertoo siirtymän. (Anturit s. 91)

Yleisimmin servopiireissä käytetty siirtymäanturi on potentiometri. Se on analoginen anturi, joka koostuu vastuselementistä ja liukukoskettimesta. Potentiometrissä ulostuleva jännite on verrannollinen anturin asentoon. Sen mittausepätaarkkuus on suhteellisen pieni n. $\pm 0,05$ - $\pm 0,5$ % mittausalueesta, esimerkiksi analogisen LVDT anturin mittausepätaarkkuus on n. 0,5 – 1,5 % mittausalueesta. (Anturit s. 92)

Digitaalisista antureista käytetään useimmin kiertyvää optista pulssianturia. Tarkasteltavassa sovelluksessa lineaarinen pulssianturi olisi kiertyvää anturia helpommin toteutettavissa. Lineaarisen pulssianturin erottelukyky voi olla jopa 0,01 – 0,05 mm. (Anturit s. 104)

3.4 Taivutus

Sähkömoottorin pyörimisliike täytyy muuttaa lineaariseksi käyttäen erilaisia voimansiirtojärjestelmiä. On olemassa myös lineaarisähkömoottoreita, joilla voidaan hetkellisesti tuottaa vaadittu voima. Lineaarisen sähkömoottorin maksimivoimat ovat kuitenkin lyhytaikaisia ja moottoreiden hinnat jopa viisinkertaisia tavallisiin sähkömoottoreihin verrattuna. (TUT, lineaarimoottorit)

Taivutukseen vaadittava työ voidaan toteuttaa sähkömoottorilla, askelmoottorilla, servomoottorilla joka on kytketty vaihteistoon. Vaihteiston avulla moottorin pyörimisliike muutetaan lineaariliikkeeksi. Monimutkaisen voimansiirron kokoonpano on hidasta ja kallista, sillä siihen kuuluu usein useita erilaisia komponentteja. Markkinoilla on saatavissa myös valmiita moottoreita voimansiirtoineen. Työ voidaan toteuttaa myös lihasvoimalla käyttäen erilaisia mekanismeja.

Taulukko 5. Ideamatriisi taivutukselle

Mailan taivuttaminen	Pyöritettävä kampi	Vipu	Vetonaru	Sähkömoottori
Liikkeen-/voimansiirto	Vipumekanismi	Kuularuuvi	Hammastanko	Hammashihna
Voiman mittaaminen	Leikkausvoima-anturi	Venymäliuska rakenteissa		
Taipuman mittaaminen	Mekaaninen rajoitin	Rajakytin	Asematiedon mittaaminen	
Rungon rakenne	Putkirunko	Särmätty ohutlevy		

Käsivoima voidaan muuttaa mekaaniseksi työksi pyörän, vivun tai vetonarun avulla. Kammen avulla voidaan helposti toteuttaa suuria välityksiä ja siten tuottaa suuria voimia käsin. Kampi ei vie paljoa tilaa ja on helpohkosti sijoitettavissa. Sen heikkous on hidas käyttö ja käyttäjän on vaikea hahmottaa alku ja lopputilojen eroa kampea pyöritettäessä yli 1 kierroksen. Vetonarulla voidaan toteuttaa yli 1 kierroksen verran pyörivä mekanismi, jossa on selkeästi havaittavissa alku ja lopputila. Naruun voidaan merkata mm. eri värein missä tilassa milloinkin ollaan.

Vipu on käyttäjän kannalta selkeä käyttää. Siitä on helposti nähtävissä milloin vipu on alku tai lopputilassa. Vivun toimintaa voi verrata auton käsijarruun, jossa saadaan helpohkosti tuotettua suuria voimia ja käyttäjällä on aina tieto, missä tilassa käsijarru on. Pitkällä vivulla voidaan tuottaa suuria voimia, mutta se vie paljon tilaa. Teleskooppivarren avulla säilytystila saadaan kohtuulliseksi, mutta käytössä liikeradat ovat pitkät.

Liike on usein pyörivää liikettä sekä käsin että sähkömoottorilla tuotettuna, joten se täytyy muuttaa lineaariseksi. Pyörivä liike voidaan muuttaa lineaariseksi vipumekanismeilla, kuularuuvilla, hammaspyörällä tai hammashihnalla.

Vipumekanismi toimii parhaiten kulmamuuoksen ollessa pieni, esimerkiksi käsikäyttöisen vivun kanssa. Se sisältää melko paljon osia, jolloin valmistuskustannukset nousevat. Niveliin jää helposti välystä, joka saattaa aiheuttaa mittausvirhettä. Kulmamuuoksen ollessa yli 180° on vipumekanismi vaikeasti toteutettavissa. Suuri kulmamuuos tai jatkuva pyörimisliike saadaan muutettua lineaariseksi liikkeeksi kuularuuvilla. Välityssuhde on helposti valittavissa ja järjestelmästä on mahdollista tehdä myös itsepidättävä. Kuularuuvi toimii kaikkien käyttötapojen kanssa.

Hammastangolla tai hammashihnalla voidaan rattaan koosta riippuen muuttaa jatkuvaa pyörivää liikettä tai pieni kulmamuuos lineaariseksi liikkeeksi. Sähkömoottorin suuri kierrosnopeus vaatii kuitenkin alennusvaihteen. Hammastangolla voidaan siirtää hammashihnaan verrattuna suuria voimia. Sovelluskohteen voimat ovat kuitenkin niin pieniä, että niiden siirtämiseen voidaan käyttää hammashihnaa. Hammashihnan etu hammastankoon nähden on pienempi massa.

Voiman mittaamiseen käytetään lähes pelkästään venymäliuskaan perustuvia antureita, mutta liuskan sijoittelu voi vaihdella. Anturit voivat olla erillisiä komponentteja, tai venymäliuskat voidaan integroida rakenteisiin.

Taipuman mittaamiseen voidaan käyttää yksinkertaista mekaanista rajoitinta, joka sallii mailan taipumisen tiettyyn pisteeseen saakka. Mekaaninen rajoitin toimii parhaiten vain manuaalisilla käyttötavoilla. Rajoitin toimii sähköisessä järjestelmässä, jos moottoriin yhdistetään voimanrajoitin. Mekaaninen rajoitin pystyy hallitsemaan vain mailaa taivuttavan osan liikettä, eikä se ota huomioon mailan paksuudesta johtuvaa vaihtelua. Tällöin ohuempi maila taipuu todellisuudessa vähemmän, kuin paksumpi verrokki, eikä mittaustulokset ole kovin tarkkoja.

Rajakytkintä voidaan käyttää sähköisissä järjestelmissä mekaanisen rajoittimen tapaan. Mailan taipuman mittaamisessa paras paikka rajakytkimelle on mailan alapuolella, jossa sen tarkoitus on havaita milloin mailan alareuna on oikeassa kohdassa. Mailan alapuolella sijoitetun rajakytkimen toimintaan ei vaikuta mailan paksuus, joten se antaa melko tarkkoja arvoja, jotka riippuvat vain rajakytkimen herkkyydestä.

Mailan taipumaa voidaan mitata myös jatkuvasti asematietoanturilla. Moottorinohjaus seuraa asematietoanturin antamaa dataa ja pysäyttää mailan taipuman oikeaan kohtaan. Jatkovaa sijaintitietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi kun halutaan taipuman olevan normaalista poikkeava.

Laitteiston runkorakenteen tulee olla tukeva ja muodonmuutosten tulee olla pieniä rasituksen aikana. Vaihtoehtoina on hitsattu putkirunko tai särmäämällä jäykistetty ohutlevyrunko. Ohutlevyrungon etu on täysin valmis rakenne, jossa ulkokuori toimii myös kantavana rakenteena. Pistemäisten kuormituskohtien jäykistäminen on kuitenkin hankalaa ohuilla levynpaksuuksilla. Putkirungosta saadaan helpokosti jäykkä suurillakin kuormilla. Putkirungon ulkokuorena voidaan käyttää muovilevyä, joka on kevyttä.

3.4.1. Toimilaitteiden ja mittalaitteiden vertailu

Vertailu tehdään pisteyttämällä kukin käyttötapa ominaisuuksien perusteella arvosanoilla 1-5, numeron 1 ollessa heikoin ja numeron 5 paras arvosana ja laskemalla painokertoimien avulla kokonaisarvosana.

Taulukko 6. Käsikäytön vertailu

	Hinta (0,4)	Käytettävyys (0,3)	Koko (0,3)	Tulos (1)
Pyörítettävä kampi	3	3	4	3,3
Vipu	5	5	4	4,7
Vetonaru	4	4	5	4,3

Vertailun perusteella vipu on selkeästi paras vaihtoehto sähkökäytölle. Käyttäjystävällisyys ja edullinen valmistettavuus ovat vivun vahvuudet.

Liikkeen linearisoinnissa ei voida suoraan verrata vaihtoehtoja keskenään, sillä kullakin on omat etunsa ja heikkoutensa, joiden painotus riippuu voimakkaasti siitä miten niitä käytetään. Mekanismeja tuleekin verrata erikseen sähkö- ja vipukäytössä.

Taulukko 7. Voimansiirron vertailu, sähkökäyttö

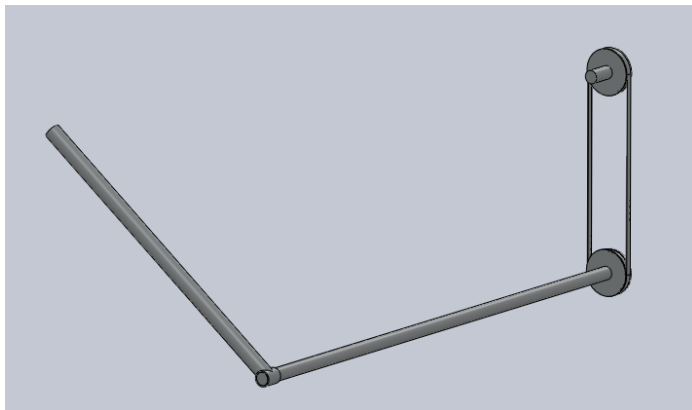
	Hinta (0,4)	Toimintavarmuus (0,3)	Massa (0,3)	Tulos (1)
Vipumekanismi	3	2	3	2,7
Kuularuuvi	4	4	3	3,7
Hammastanko	3	4	3	3,3
Hammashihna	3	4	4	3,6

Taulukon 7 mukaan kuularuuvi on sähkökäyttöä varten niukasti paras vaihtoehto. Kuularuuvi on usein kallis vaihtoehto lineaariliikkeelle, mutta tarvittavat siirtomatkat ovat 100 mm tai alle, joka tekee kuularuuvista edullisen vaihtoehdon. Taloudellisin tapa kuularuuvin käyttöön on karamoottori, jossa koko voimansiirto on valmiina yhdessä paketissa. Muut mekanismit vaativat sähkömoottorin yhteyteen alennusvaihteiston, joka lisää kustannuksia.

Taulukko 8. Voimansiirron vertailu, käsikäyttö

	Hinta (0,4)	Tarkkuus/vällys (0,3)	Massa (0,3)	Tulos (1)
Vipumekanismi	3	2	3	2,7
Kuularuuvi	3	5	3	3,6
Hammastanko	4	4	3	3,7
Hammashihna	4	4	4	4

Talukon 8 pisteytyksen mukaan hammashihna on paras vaihtoehto käsikäytön voimansiirrolle. Hammashihnan suurin valtti on keveys, joka korostuu käsikäyttöisessä laitteessa, jonka etu sähkökäyttöiseen versioon on hinta ja massa.



Kuva 11. Kampi ja hammashihna

Taulukko 9. Runkorankenteen vertailu

	Jäykkyys (0,4)	Valmistettavuus (0,3)	Massa (0,3)	Tulos (1)
Putkirunko	5	4	4	
Ohutlevyrunko	3	3	3	

Runkorakenteeksi valitaan putkirunko suuremman jäykkyyden ja helpomman valmistettavuuden ansiosta. Putkirunko voidaan toteuttaa alumiinista ja ulkokuori muovilevyistä, jolloin kokonaisrakenteesta saadaan kevyt.

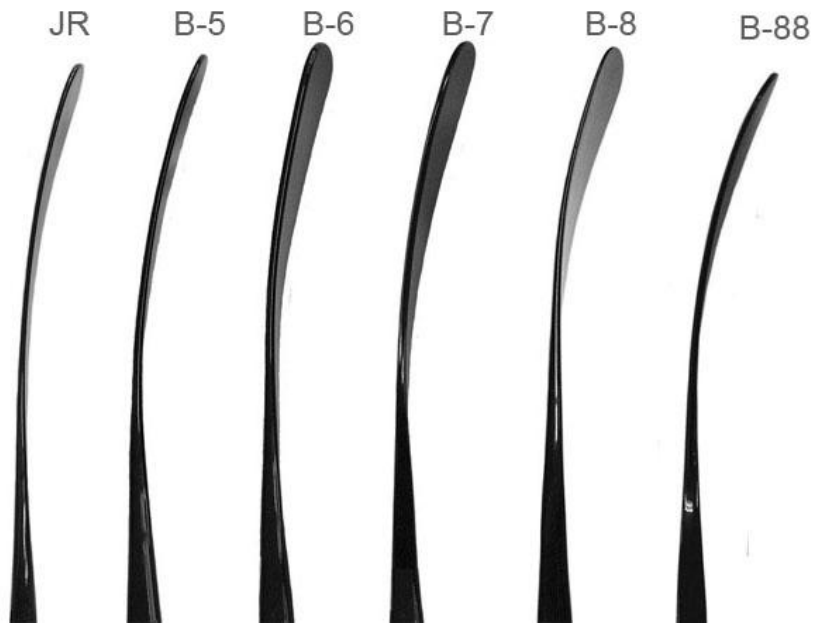
3.5. Vääntöjäykkyyden mittaus

Vääntöjäykkyyttä mitattaessa tulee koko mailan varren kiertyä voiman kohdistuessa lapaan. Koetulosten tarkastelussa huomattiin miten mailan eri kuidutussuunnat vaikuttavat mailan kiertojäykkyyteen. Koska mittauslaitetta tullaan käyttämään eri mailojen ominaisuuksien vertailuun, on myös varren kiertojäykkyys oleellinen mitattava parametri.

Kiertymässä suurin ongelma on mailan tukeminen siten että tuet vaikuttaisivat mahdollisimman vähän mittaustuloksiin eri mailojen välillä. Tuenta pitäisi toteuttaa siten että ylemmässä kiinnityskohdassa maila ei pääse kiertymään pituusakselinsa ympäri koestuksen aikana. Alemmassa kiinnityskohdassa varren tulisi päästä kiertymään vapaasti, mutta samalla poikittainen liike tulisi estää. Mikäli samoja kiinnityskohtia käytetään myös taivutuksessa, pitää varren päästä liikkumaan tarvittaessa pituussuunnassa.

Kiertymää tarkasteltaessa kohdistetaan mitattava voima lavan keskikohtaan, eli samaan kohtaan missä kiekko laukaisuhetkellä on. Mittauksen kannalta ongelmallista on lapojen erilaiset kaarevuudet. Varren ollessa tukevasti kiinnitettynä, voi lapojen keskikohtien etäisyys keskilinjalta vaihdella noin ± 5 mm, kuten kuvasta 12 voidaan huomata.

Voidaan kuitenkin tehdä oletus, että pelaaja pelaa aina samalla lapamallilla. Etenkin ammattilaisjäkiekossa mailatehtaat valmistavat pelaajille nimikko lapamalleja. Koska laitteiston tarkoitus on analysoida maila yksittäistä pelaajaa varten, eikä vertailla erilaisten mailojen ominaisuuksia, voidaan lavan muodon vaikutus olettaa merkitykseltään vähäiseksi.



Kuva 12. Erilaisia lapoja. (Tackla Pro Oy)

3.5.1. Toimilaitteiden ja mittalaitteiden vertailu

Ideamatriisiin on koottu kiertymän osatoiminnot toteuttavia ideoita. Suuri osa osatoiminnoista ja ideoista on yhtäläisiä taipuman kanssa ja ne on esitelty edellisessä kappaleessa 3.4.

Taulukko 10. Ideamatriisi kiertymälle

Mailan tuenta	Nivelletty puristin	Puristus mailan keskelle	Puristaminen tukia vasten	Putkimainen tuenta
Mailan kiertäminen	Pyöritettävä kampi	Vipu	Vetonaru	Sähkömoottori
Liikkeen-/voimansiirto	Vipumekanismi	Kuularuuvi	Hammaspyörä	Hammashihna
Voiman mittaaminen	Leikkausvoima-anturi	Venymäliuska rakenteissa		
Kiertymän mittaaminen	Mekaaninen rajoitin	Rajakytkin	Asematiedon mittaaminen	

Mailan varren tukeminen voidaan toteuttaa laakeroidulla puristimen tyyppisellä ratkaisulla. Varren sivuja vasten puristetaan lyhyet tangot, jotka estävät mailaa

liukumasta mihinkään suuntaan. Kiinnityksessä, jonka tulee kiertyä, voidaan puristin osa liittää alustaan, jonka suhteen se pääsee kiertymään. Taivutuksessa puristus voidaan pitää avoinna. Rakenteen etuna on sen tarkkuus kiertymän mittauksissa. Puristus voidaan toteuttaa siten, että mailan keskilinja on aina samalla tasolla riippumatta mailan paksuudesta. Rakenteen suurin ongelma on sen monimutkaisuus.

Kiertymän mittauksessa voitaisiin hyödyntää myös taivutuksen puristusominaisuutta. Aluksi puristettaisiin vartta keskeltä ja sitten poikkeutettaisiin lapaa. Kiertymää ei tapahtuisi koko varren matkalta, mutta mittaus ottaisi silti huomioon varren kiertojäykkyyden. Mailan taivutusjäykkyys vaikuttaisi tulokseen ja se heikentäisi mailojen ominaisuuksien erottelua.

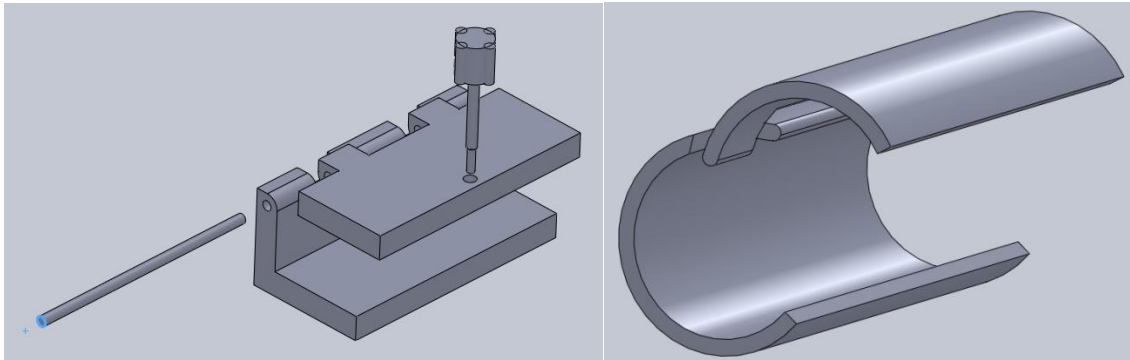
Puristamalla vastakappale mailan yläosan tukeaan vasten saadaan sen kiertyminen estettyä. Alaosan tukea vasten puristettaisiin puoliympyrä, jonka sisällä varsi pääsee kiertymään. Taivutuksessa käytettävät pyöreät tuet saattavat aiheuttaa mailaan vaurioita puristuksen aikana.

Putkimainen tuenta mailan alaosassa sallii varren kiertyä vapaasti. Nivelöimällä putken poikittaissuunnassa, voidaan sitä käyttää tukena myös taivutuksessa. Putken sisähalkaisijan mitoitus on hankalaa, sillä mailojen paksuus vaihtelee ja varren tulisi olla mahdollisimman välyksettömästi putken sisällä.

Taulukko 11. Mailan tuenta

	Hinta (0,4)	Ominaisuudet (0,3)	Tarkkuus (0,3)	Tulos (1)
Nivelletty puristin	2	5	5	3,8
Puristus mailan keskelle	5	2	1	2,9
Puristus tukia vasten	3	4	2	3,0
Putkimainen tuenta	4	4	4	4,0

Taulukon 10 perusteella parhaaksi vaihtoehdoksi valikoituu putkimainen tuenta. Sen etuja on edullinen hinta, melko hyvä tarkkuus. Tuennalla voidaan tarkastella mailan lavan ja varren kiertojäykkyyttä samanaikaisesti, sillä maila pystyy kiertymään täysin vapaasti pituusakselinsa ympäri, mutta ei pääse siirtymään.



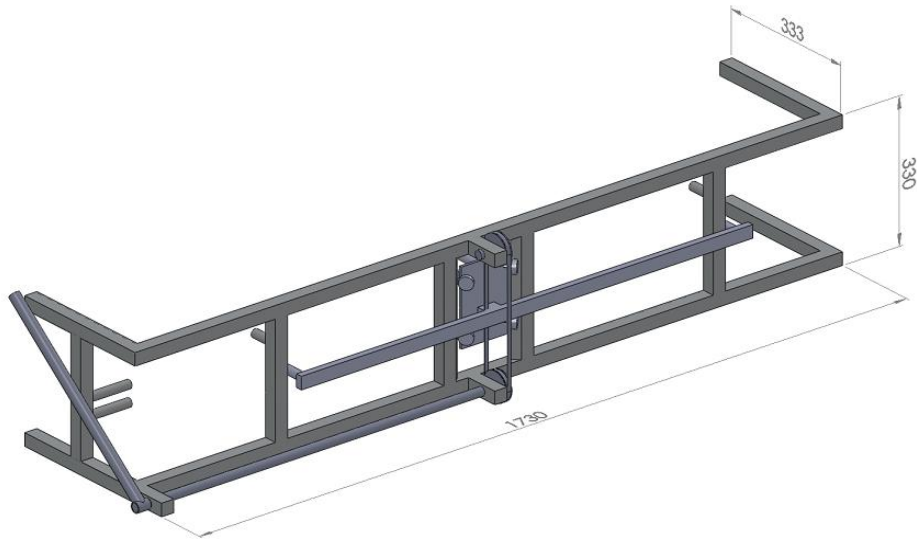
Kuva 13 a & b. Tuennat

Kuvassa 13 a on mailan ylempi tuenta, jonka tarkoitus on pitää mailan varsi liikukumattomana ja estää yläosan kiertyminen. Kuvassa 13 b on putkimainen tuenta, jonka sisällä maila pääsee vapaasti kiertymään.

3.6 Ratkaisuluonnokset

Taivutuksen käsikäyttöisessä ratkaisussa työ tehdään vipua vääntämällä, vääntöliike siirretään hihnapyörällä ja hammashihnalla mailaa taivuttavaan lineaarijohteeseen. Mailan taivutuksessa ja kiertämisessä käytetään eri tukia, sillä molemmat vaativat hyvin erilaiset ominaisuudet tuentapisteiltä.

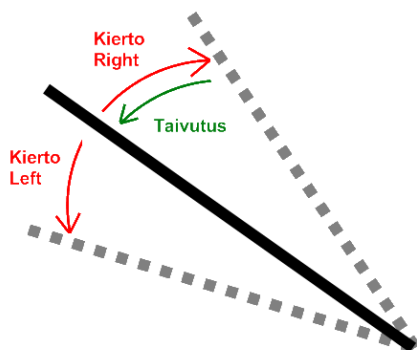
Laitteistossa riittää yksi y-suuntaan liikkuva lineaarijohde toteuttamaan sekä taivutuksen että kiertymisen, liittämällä kiertämisessä käytetyt tuennat mailaa taivuttavaan lineaarijohteeseen. Vaihtoehtoinen ratkaisu olisi yhdistää mailan lavan tuenta lineaarijohteeseen, jota liikuttamalla saataisiin maila kiertymään. Usean lineaarijohteen käyttäminen lisää kuitenkin osien määrää ja nostaa siten kokonaiskustannuksia.



Kuva 14. Kampikäyttöinen laitteisto

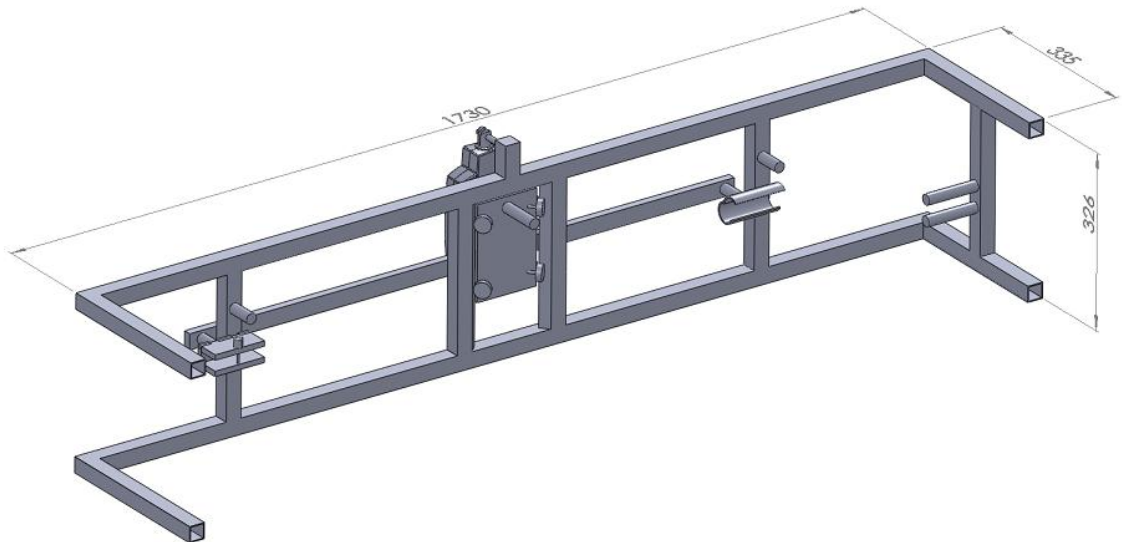
Kampikäyttöisessä laitteistossa taivutuksen alkutilanteessa lineaarijohteessa liikkuva kelkka on yläasennossa. Tällöin maila asetetaan paikoilleen makaamaan tukien päälle. Kampea käännettäessä kelkka liikkuu alas ja taivuttaa mailaa. Kiertöjäykkyyttä testattaessa kelkka on alkutilanteessa lineaarijohteen puolivälissä. Tuet kiinnitetään ja mailan lapa asetetaan kahden päädyssä olevan tapin väliin. Mikäli maila on oikeakätisille tarkoitettu, käännetään kampea siten että kelkka liikkuu alaspäin. Mikäli maila on vasenkätisille tarkoitettu, liikutetaan kelkkaa ylöspäin.

Laitteiston toiminnasta tulee käydä käyttäjälle ilmi, milloin kampi on oikeassa kohdassaan. Tämä voidaan toteuttaa pienellä pykälällä kammen liikkeen puolivälissä. Taivutuksessa kammen liike tulisi pysäyttää kohtaan jossa pykälä on, jotta taivutuksen suuruus olisi oikea. Kuvassa 15 esitellään kammen käyttöä.



Kuva 15. Kammen käyttö

Sähkökäyttöisessä ratkaisussa karamoottori kytketään suoraan mailaa taivuttavaan lineaarijohteeseen. Laitteiston kokoonpanosta tulee yksinkertainen ja erillisten komponenttien määrä vähenee käytettäessä valmiita osakokonaisuuksia.



Kuva 16. Sähkökäyttöinen laitteisto

Sähkökäyttöisessä laitteistossa elektroniikka ohjaa kelkan liikettä. Ohjauselektroniikkaan tulisi koodata valmiit liikeradat taivutukselle ja kierto kummallekin kätisyydelle. Käyttäjälle riittäisi painaa laitteesta näppäimiä: taivutus, kierto left tai kierto right, sekä asettaa maila laitteeseen.

Kelkan asema voidaan mitata rajakytkimillä tai siirtymäantureilla. Rajakytkimien käyttäminen olisi edullinen vaihtoehto, mutta jatkuvalla siirtymän mittaamisella saadaan lisättyä laitteiston ominaisuuksia. Potentiometri on edullinen ja riittävän tarkka mittalaite kyseessä olevaan sovellukseen. Se on helppo yhdistää esimerkiksi Arduino piiriin, joka on edullinen avoimeen laitteistoon perustuva mikrokontrolleri ja ohjelmointiympäristö.

Arduino voi toimia koko laitteiston ohjaimena ja siihen voidaan ohjelmoida haluttuja toimintoja. Mailan taivutuksessa laitteisto voidaan määrittää aloittamaan siirtymän mittaus vasta kun maila alkaa taipua, eli kun voima-anturista saadaan signaali. Tällätavoin saadaan tarkempia taivutusmittauksia, sillä mailan paksuus ei vaikuta todelliseen siirtymään. Paksu maila alkaa taipua ohutta mailaa aiemmin, ja ero vaikuttaa mittaustuloksiin.

3.7. Kustannusarvio ja -analyysi

Kustannusarvio on suuntaa-antava. Komponenttien yksikköhinnat perustuvat tavarantoimittajilta saatuihin hinta-arvioihin. Hinnat sisältävät ALV:n.

Taulukko 12. Käsikäyttöisen laitteiston kustannusarvio

	Määrä	Hinta/yksikkö	Hinta
Alumiinitanko	8 m	5 €/m	40 €
Alumiinilevy	0,025 m ²	100 €/m ²	2,50 €
Laakeri	8 kpl	4 €/kpl	32 €
Voima-anturi	3 kpl	20 €/kpl	60 €
Näyttölaitte	1 kpl	30 €/kpl	30 €
Hammashihna	1 kpl	25 €/kpl	25 €
Hihnapyörä	2 kpl	20 €/kpl	40 €
Tarvikkeet			50 €
Hitsaus	2 h	30 €/h	60 €
Kokoonpano	2 h	25 €/h	50 €
Yhteensä:			389,50 €

Laitteiston ALV:ton hinta on n. 320 €. Vähittäishinta laitteistolla voisi olla n. 1000 € sisältäen alvin, jolloin ALV:ton hinta on 813 €. Yhden laitteen myyntikate olisi tällöin n. 500 €. Laitteiston myyntimäärä ratkaisee pitkälti kannattavan myyntikatteen määrän. 1000 € hintaluokassa kysyntä saattaisi olla rajoittunut vain pieneen ostajakuntaan joka hyötyisi laitteen ominaisuuksista eniten. Kyseisessä ostajakunnassa laitteiston hinnan merkitys ei olisi niin suuri, jolloin hintaakin voisi nostaa.

Taulukko 13. Sähkökäyttöisen laitteiston kustannusarvio

	Määrä	Hinta/yksikkö	Hinta
Alumiinitanko	8 m	5 €/m	40 €
Alumiinilevy	0,025 m ²	100 €/m ²	2,50 €
Laakeri	8 kpl	4 €/kpl	32 €
Voima-anturi	3 kpl	20 €/kpl	60 €
Näyttölaitte	1 kpl	30 €/kpl	30 €
Sähkötarvikkeet			30 €
Karamoottori	1 kpl	130 €/kpl	130 €
Tarvikkeet			50 €
Hitsaus	2 h	30 €/h	60 €
Kokoonpano	2 h	25 €/h	50 €
Yhteensä:			484,50 €

Sähkökäyttöisen laitteiston ALV:ton hinta on n. 395 €. Sähkökäyttöisen laitteiston kuluttajahinta voisi olla selvästi käsikäyttöistä suurempi, sillä asiakkaat kokevat saavansa huomattavasti enemmän vastinetta rahalle. Vähittäishinnaksi voisi laittaa jopa 2000 €, jolloin myyntikate olisi n. 1200 €. Vaikka laitteiston oletettu käyttäjäkunta rajattaisiin vain ammattilais joukkueisiin, olisi myyntikate todennäköisesti riittävä kannattavan toiminnan pyörittämiseksi.

4. TULOSTEN TARKASTELU

Jääkiekkommailan tutkimuksista saadut tulokset poikkesivat hieman ennako-oletuksesta, jonka mukaan mailan varren ominaisuudet muuttuvat käytön aikana. Koska oletus ei pitänyt paikkaansa, oli tutkimuksissa ja laitteen suunnittelussa keskityttävä tarkemmin mailan lavan ja varren liitoskohtaan, sekä liitoksen rakenteellisiin muutoksiin.

Suunnittelutyön tuloksena saatiin kaksi hieman toisistaan poikkeavaa ratkaisuluonnosta. Molemmat ratkaisuluonnokset täyttävät laitteelle asetetut vaatimukset ja ainakin osittain myös toivomukset. Ottaen huomioon että suunnittelua ei viety loppuun asti, saatiin aikaiseksi lähes toteutuskelpoinen konstruktio. Tarkempi suunnittelu ja prototyypin valmistaminen toisivat paremmin esille laitteeseen tarvittavat muutokset ja mahdolliset ongelmakohdat. Prototyypin avulla voitaisiin keskittyä parantamaan laitteen käyttäjäystävällisyyttä ja saataisiin enemmän tietoa laitteen käytännön hyödyistä.

Käsi­käyttöinen malli ei tarkkuudessa todennäköisesti yllä toivomusten tasolle, mutta täyttää laitteelle asetetut vähimmäisvaatimukset. Käsi­käyttöisen laitteen tarkoitus on tarjota edullinen toimiva laitteisto kaiken­tasoisille joukkueille. Laitetta voidaan käyttää jääkiekkjoukkueiden pukuhuonetoiloissa ja kuljettaa mukana ottelumatoilla. Laitteen käyttö on yksinkertaista ja käyttö voidaan opettaa nopeasti kaikille pelaajille. Kustannusero sähkökäyttöiseen versioon on kuitenkin niin pieni, että käsi­käyttöisen mallin valmistaminen sähkökäyttöisen rinnalla ei ole todennäköisesti kannattavaa.

Sähkökäyttöinen malli täyttää kaikki laitteistolle asetetut vaatimukset ja toivomukset. Kalibroinnilla ja laadukkailla komponenteilla mittaustarkkuudesta saadaan riittävä mailan ominaisuuksien tutkimiseen. Elektroniikan ansiosta laitteen käyttäminen on erittäin yksinkertaista ja helppoa. Verrattaessa kustannuksia käsi­käyttöiseen laitteeseen, on sähkökäyttö kilpailukykyinen vaihtoehto parempien ominaisuuksiensa puolesta. Kustannukset eivät nouse merkittävästi käsi­käyttöistä korkeammalle, mutta laitteen käyttöarvo kuluttajalle on huomattavasti suurempi.

Laitteiston suurimpia ongelmakohtia ovat mailan tuentaan liittyvät osat. Etenkin tuki jonka sisällä varsi pääsee kiertymään, on mailojen erilaisesta paksuudesta johtuen aina hieman väljä. Tällöin kun maila pääsee liikkumaan useita millijä aiheuttaa se mittaasepätarkkuutta.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutustua jääkiekkomailan vaurioitumiseen käytön aikana ja luonnostella laitteisto, jolla voidaan mitata vaurioiden kehittymistä. Samalla laitteistolla tulisi myös voida vertailla eri mailojen jäykkyysominaisuuksia. Varren äkillisen katkeamisen ennustaminen mittauksen avulla olisi myös toivottava ominaisuus. Laitteen pitäisi olla helppokäyttöinen ja siirrettävissä.

Mailojen vauriokäyttäytymiseen ja jäykkyysominaisuuksiin tutustuttiin laboratoriossa tehtyjen kokeiden avulla. Tutkimistulosten mukaan mailan vaurioituminen ja vaurioitumisen taso on havaittavissa silmämääräisesti, sekä tunnustelemalla mailaa. Laitteiston hyöty varsinaisessa mailan vaurioitumisen seuraamisessa ei ole niin merkittävä kuin aluksi oletettiin. Laitteiston hyöty tulee kuitenkin esille uutta mailaa valittaessa, joka on jopa vaurioitumisen seuraamista merkittävämpi ominaisuus.

Pelaajat hankkivat kaudelle usein sarjan samanlaisia mailoja, jotka tutkimusten mukaan ovat identtisiä tarkkuudella, jota pelaajan on mahdotonta huomata. Ongelmakohta on vuosittain vaihtuvat mallistot, jolloin myös mailojen ominaisuudet muuttuvat. Tarkka mailojen ominaisuuksien tutkiminen on merkittävää vain ammattilaissarjoissa, joka rajaa huomattavasti laitteiston asiakaskuntaa.

Laitteistosta luonnosteltiin kaksi erilaista versiota, joista toinen on käsikäyttöinen ja toinen toimii sähköisesti. Käsikäyttöinen laitteisto on toimiva ratkaisu, jolla saavutetaan kelvollinen mittaustarkkuus ja helppo käytettävyys. Sähkökäyttöisen laitteiston pieni hintaero ja monipuolisemmat ominaisuudet käsikäyttöiseen verrattuna tekevät siitä järkevämmän valinnan jatkokehitystä varten.

Lähteet:

Haché, A. 2003. Jääkiekon fysiikka. Helsinki, Terra Cognita. 262 s.

Tuomaala J. 1995. Luova koneensuunnittelu. 1. Painos. Tampere, Tammertekniikka. 287 s.

Blom, S. & Lahtinen, P. & Nuutio, E. & Pekkola, K. & Pyy, S. & Rautiainen, H. & Sampo, A. & Seppänen, P. & Suosara, E. 1999. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki, Edita. 328 s.

Fonselius, J. & Pekkola, K. & Selosmaa, S. & Välimaa, T. 1990. Koneautomaatio. Helsinki, VAPK-kustannus. 209 s.

Airila, M. 1996. Mekatroniikka. 4. Painos. Espoo, Otatieto. 367 s.

Kotamäki, M. & Nyberg, T. 1992. Koneautomaatio 2000. Helsinki, VAPK-kustannus. 99 s.

Fonselius, J. & Laiteinen, E. & Pekkola, K. & Sampo, A. & Välimaa, T. 1994. Anturit. 3. Painos. Helsinki, Painatuskeskus Oy. 167 s.

Hockey Stick Dictionary. [Hockey Stick Expertin www-sivuilla]. Päivitetty 2008. [viitattu 9.1.2012] Saatavissa: <http://hockeystickexpert.com/hockey-stick-dictionary/>

Rules. [NHL:n www-sivuilla]. Päivitetty 2012. [viitattu 9.1.2012] Saatavissa: <http://www.nhl.com/ice/page.htm?id=26286>

Hockey Stick. [eNotesin www-sivuilla]. Päivitetty 2012. [viitattu 19.1.2012] Saatavissa: <http://www.enotes.com/hockey-stick-reference/hockey-stick>

Vander Veen, B. 2003. Luentomoniste, Machine design one. Michigan, Grand Valley State University. 20 s.

Phil Kessel wrist shot. [YouTube:n www-sivuilla]. Päivitetty 17.12.2009. [viitattu 9.1.2012] Saatavissa: <http://www.youtube.com/watch?v=v1HUUJxZtJU>

Kuitulujitetut komposiitit. [TUT:n www-sivuilta]. Päivitetty 2005. [viitattu 3.2.2012] Saatavissa: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_5_1.php

Stick technology. [Easton Hockey:n www-sivuilla]. Päivitetty 2011. [viitattu 13.1.2012] Saatavissa: <http://eastonhockey.com/the-difference/stick-tech>