

SÄHKÖISEN VASTUSVENYMÄLIUSKAN HISTORIA

Kalle-Erkki Penttilä

ALKUSANAT

Rakenteiden mekaniikka Vol. 22
No 1 1989 s. 3...12

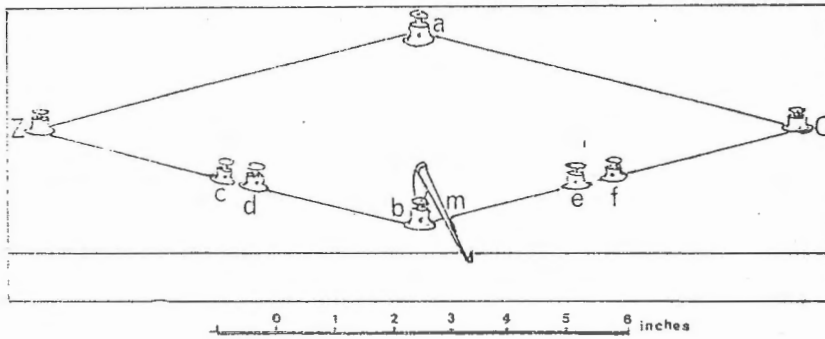
Vuonna 1988 tuli kuluneeksi 50 vuotta siitä, kun vastusvenymäliuska ensimmäisen kerran esiteltiin. Tätä merkkitaipalemaa on juhlistettu sekä Society of Experimental Mechanics (SEM) että IMEKO:n toimesta varsin näyttävästi tämän vuoden aikana. Kesäkuussa Yhdysvalloissa pidetyn SEM:n järjestämän Kokeellisen mekaniikan 6:n Maailmankonferenssin yhteydessä oli yhden päivän juhlatilaisuus, jossa alan pioneereja oli paikalla venymäliuskan alkutaivalta muistelemassa. Lokakuussa pidettiin Houstonissa USA:ssa IMEKO:n XII Maailmankonferenssi, jonka yhteydessä IMEKO:n TC15 toimesta järjestettiin venymäliuskan 50-vuotis juhlaistunto. Tässä tilaisuudessa esiteltiin lyhyesti kokemuksia vastusvenymäliuskojen hyödyntämisen alkutaipaleelta eri puolilla maailmaa. Koko kerätty aineisto tulaaan julkaisemaan VASTUSVENYMÄLIUSKAN KULTAISENA KIRJANA vuoden 1989 alkupuoliskolla.

Seuraava kirjoitus, jossa valotetaan hiukan venymäliuskan käyttöönoton alkuaikojä, perustuu edellämainitun IMEKO:n XII Maailmankonferenssin yhteydessä pidetyn juhlaistunnon esitelmiin sekä niistä julkaistuun esipainokseen.

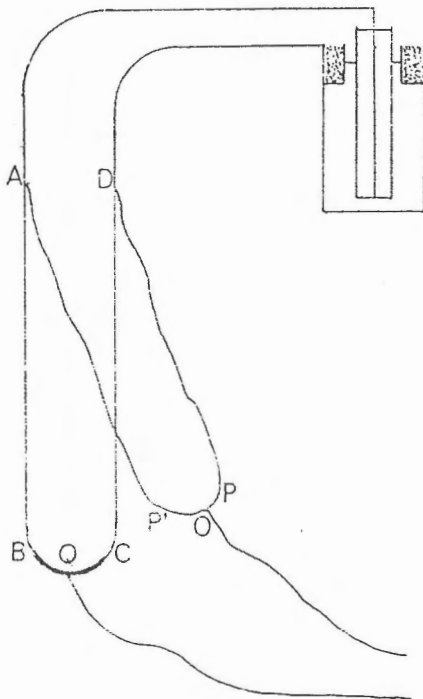
VASTUSVENYMÄLIUSKAN TEORIAN KEHITTYMINEN

Sähköisen vastuksen muutokseen perustuvan jännitys-venymäliuskan historian voi katsoa alkaneen jo v. 1827 Saksassa, jolloin G.S. Ohm keksi sähköisen piirin lait, eli virran, vastuksen ja jännitteen välisen riippuvuuden. Ohmin lakeja hyödyntäen englantilainen C. Wheatstone kehitti v. 1843 omaa nimeään kantavan Wheatstonen sillan, jota voidaan vielä nykyäänkin pitää vastusvenymämittausten perussiltakytkentänä. Kuvassa 1. on esitetty Wheatstonen käyttämä kytkentä. Ruuvien Z ja L välille kytkettiin syöttöjännite, Za ja Ca olivat metallilankoja, jotka toimivat vastuksina. Välille cd ja ef kytkettiin mitattavat vastukset. Pisteiden a ja b välille Wheatstone kytki herkän galvanometrini ja säädettävällä piirillä m tasapainotettiin silta. Wheatstone pystyi mittaamaan kahden promillen vastuksen muutoksia ja hänen kerrotaan jo tuolloin havainneen kuparilangan jännityksen vaikuttavan sen vastukseen.

Vuonna 1846 englantilainen Thomson tutki vastuksen muutosta jännitetyissä metallilangoissa. Hän käytti Wheatstonen sillan mukaista kytkentää (Kuva 2). AB ja DC olivat ohuita kupari- tai rautalankoja ja kuorma kohdistettiin pisteeseen Q, joko painojen avulla tai käsin vetämällä. Thomsonin mittaajärjestelyjen herkkyys oli noin $\Delta R/R = 30 \cdot 10^{-6}$. Kerrotaan, että Thomson ja Wheatstone tekivät tutkimuksiaan tietämättöminä toistensa töistä ja Thomson kirjoittikin, että hän sai tietää tuntia ennen omien kokeidensa esittelyä Wheatstonen jo keksineen samanlaisen piirin.



Kuva 1. Wheatstonen alkuperäinen siltakytkenä.



Kuva 2. Thomsonin kytkentä lankojen venymän vaikutusten tutkimiseksi.

VASTUSVENYMÄLIUSKAN NYKYHISTORIA

Ajatuksen nykyisestä vastusvenymäliuskasta esitti v. 1936 Edward Simmons, Kalifornian teknillisessä instituutissa. Hän oli juuri saanut opintonsa päätökseen ja työskenteli professoreiden D.S Clark ja G. Datwyler assistenttina instituutin Koneinsinööriosastolla. Clark ja Datwyler kehittivät tuolloin uutta dynamometriä mitataksaan iskukokeessa näytteeseen kohdistuvia voimia. Syyskuussa 1936 Datwyler ja Simmons keskustelivat vaikeuksista, joihin he olivat törmänneet käyttäessään hiilikalvovenymäliuskatekniikkaan perustuvia voima-antureita, ja kuinka koko uuden anturin kehitysprojekti alkoi olla uhattuna. Tällöin Simmons ehdotti, että liimataan pala tarkkuusvastuksen vastuslankaa hiilikalvon sijaan dynamometrinä toimivan sauvan kylkeen. Datwyler kokeili ehdotusta ja vastusvenymäliuska oli syntynyt. On huomion arvoista, että Simmons ei itse koskaan valmistanut venymäliuskaa vaan ainoastaan antoi idean siihen.

Datwyler oli yllättynyt uuden dynamometrin antamista tuloksista. Vaikkakin sähköinen mittasignaali oli heikompi kuin hiililiuskalla, niin se oli stabiili, ennustettavissa ja ennenkaikkea tulokset pysyivät samoina kokeita toistettaessa. Dynamometriprojekti saatiin pian onnistuneeseen päätökseen vastusvenymäliuska-antureita käyttäen ja kaksi vuotta myöhemmin v. 1938 Clark ja Datwyler julkaisivat tuloksensa ASTM:n kokouksessa Atlantic Cityssä. He mainitsivat esityksessään, että heidän iskuvasaransa hyödyntää uutta tapaa mitata venymiä, mutta idean tuottajaa ei mainittu, eikä mitenkään tuotu esiin, että jotain vallankumouksellista uutta olisi keksitty.

Vuonna 1938 Dr. Arthur Ruge suunnitteli Massachusettsin teknillisessä instituutissa rakenteita maanjäristysaltille alueille. Tutkiessaan mallikokein dynaamisten kuormien aiheuttamia vasteita vesitorneissa hän huomasi tarvitsevansa luotettavan tavan mitata venymiä. Kokeiltuaan hiililiuskoja ja ha-

vaittuaan niiden puutteet hän sai ajatuksen ottaa palan tarkkuusvastuksen vastuslankaa ja liimata sen testattavaan rakenteeseen. Dr. Ruge teki tutkimuksiaan täysin tietämättömänä Simmonsin, Clarkin ja Datwylerin kokeiluista, mutta myös hän huomasi, että tämä uudenlainen venymäliuska toimi erittäin hyvin ja ylitti kaikki odotukset.

Alussa heräsi myös epäilyjä uutta vastusvenymäliuskaa kohtaan, eivätkä kaikki uskoneet, että pätkä metallilankaa savukepaperin palasessa liimattuna rakenteen kylkeen voi toimia tarkkana venymämittarina. Tämä oli toisaalta ymmärrettävää, sillä olivathan rakenneanalyysi-insinöörit tottuneet käyttämään toinen toistaan hienompia ja monimutkaisempia mekaanisia siirtymän mittauslaitteita ja ekstensometrejä. Epäilyt kuitenkin pian hälvenivät ja vastusvenymäliuska tuli yksi kokeellisen rakenneanalyysin käytetyimmistä työkaluista. Liuskojen tärkeyttä kuvaa hyvin muutamien alan tutkijoiden lausunnot 1940-luvun alussa.

"Joissain piireissä epäiltiin millin paksun langan kykyä mitata venymää riittävällä tarkkuudella. Pian kuitenkin havaittiin, että liimattava vastusvenymäliuska oli lyömätön varsinkin dynaamisissa mittauksissa ylittäen viltimmätkin unelmat"/Dr. W.M. Murray.

"Venymäliuskat ovat luojan vastaus lentokonesuunnittelijoiden rukouksiin"/Mr. L. Tribit, Hughes Aircraft Company.

"Venymäliuskan tuloksekas kehittäminen on ollut yksi vallankumouksellisimmista muutoksista teknisten tieteiden alalla"/Capt. H.E. Saunders.

Venymäliuskojen käyttö levisi räjähdysmäisesti 1940-luvun alussa lähinnä lentokoneiteollisuuteen niin USA:ssa, Englannissa kuin Australiassakin. Syynä liuskojen käytön nopeaan laajenemiseen oli mm. lentokonerakennuksen nopea kiihtyminen toisen

maailmansodan aikana. Kehitettiin yhä nopeampia ja parempia konetyyppejä, mikä toi tullessaan vaikeampia rakenteellisia ongelmia insinöörien ratkaistaviksi. Liuskojen helppo valmistaminen itse oli omiaan edesauttamassa niiden käytön leviämistä. 1940-luvulla kaikilla lentokonevalmistajilla oli myös oma yksikkö liuskojen tekemistä varten. Tärkein syy kuitenkin venymäliuskojen suosioon oli, että niillä saadut tulokset olivat niin selvästi parempia ja luotettavampia verrattuna muilla menetelmillä saatuihin. Esimerkkinä liuskojen todellisesta hyödyntämisestä voidaan mainita, että Douglas Aircraft käytti 2000 liuskaa viikossa kehittäessään B-19 konetyyppiään.

VENYMÄLIUSKOJEN TULO EUROOPPAAN

Tieto vastusvenymäliuskoista kiiri Eurooppaan toisen maailmansodan jälkeen. Poikkeuksen teki Englanti, joka oli hyödyntänyt liuskoja jo 1940-luvun alusta lähtien, kuuluihan se länsi-liittoutuneihin ja näin sai nopeasti uutta teknologiaa USA:sta. Tietoa Eurooppaan saatiin lähinnä eri maiden suurlähetystöjen kaupallisten edustajien välityksellä. Ensimmäiset liuskat ja mittalaitteet saatiin useimmiten USA:han tehtyjen asiantuntijavierailujen tuliaisina. Lähes poikkeuksetta tällaisten vierailujen kohteena oli Baldwin Locomotive Works. Ensimmäisiä omia kokemuksia mittauksista, mittalaitteiden käytöstä ja liuskojen valmistuksesta alkoi kertyä 1940-luvun lopulla.

Aluksi käytettiin kaupallisia USA:sta tuotuja liuskoja ja mittalaitteita, joista Baldwin-Sauthwark oli yleisin. Mutta suhteellisen pian alettiin myös Euroopan puolella valmistaa omia liuskoja ja mittalaitteita. Tällaisia vieläkin tuttuja nimiä ovat mm. Hollantilaiset Bleeker, Peekel Instruments, Philips, LänsiSaksalainen Hottinger Messtechnik, Ranskalaiset Onera ja Telec (REHA).

Tärkeimpiä teollisuuden aloja, joissa venymäliuskamittauksia hyödynnettiin sangen laajasti heti alusta alkaen olivat: lentokoneenrakennus, laivanrakennus, sukellusveneteollisuus, rautateollisuus, voimantuotanto, raskas konepajateollisuus ja asetuotanto. Dynaamisten rasi- tusten mittaaminen oli heti alussa hyvin suosittua, sillä toivathan venymäliuskat ensimmäisen kunnan mahdollisuuden mitata käytön aikaisia kuormia ja rasituksia.

VENYMÄLIUSKAN SAAPUMINEN SUOMEEN

Ensimmäiset kokemukset vastusvenymäliuskojen käytöstä Suomessa ajoittuvat v. 1946-1947 tienoille. Venymämittausten sovellutuksia rakenteiden jännitysanalyysiin tutkittiin aluksi Valtion Teknillisessä tutkimuskeskuksessa, ja alan uranuurtajana maassamme voidaan pitää J. Salokangasta VTT:n Metallilaboratoriosta. Hänen tietonsa venymämittauksista olivat luultavimmin peräisin Yhdysvalloista ja Ruotsista. Suunnilleen samoihin aikoihin alettiin myös ilmavoimien fysiikan laboratoriossa tutkia ja kehittää valmiuksia rakenteiden jännitys- ja venymämittauksiin.

On sääli, että tarkkoja tietoja venymämittausten ensimmäisistä sovellutuksista ei ole enää käytettävissä. Salokangas kuitenkin julkaisi v. 1948 kirjan nimeltään "Staattisten ja dynaamisten jännitysten mittauksesta sähköisellä venymämittarilla". Tässä kirjassa hän kuvaa varsin yksityiskohtaisesti venymäliuskan ja venymämittausten periaatteet, Wheatstonen siltakytkennän teoriaa sekä kuinka suoritetaan staattisia ja dynaamisia mittauksia. Lisäksi kirjassa kuvataan venymämittausten ensimmäisiä sovellutuksia, joita Salokangas kumppaneineen teki suomalaiselle teollisuudelle.

Pääsyyinä venymäliuskamittausten käyttöönottoon Suomessa vajeat kymmenen vuotta liuskan keksimisen jälkeen, oli eittämättä toinen maailmansota ja sitä seuranneet taloudellisesti vaikeat ajat. Yhdysvallat oli tärkein tiedon ja kokemusten lähde heti 50-luvun alussa, ja lentokoneenrakennuksen ammattilaisemme hyödynsivät tätä tietolähdettä ahkerimmin.

VENYMÄMITTAUSTEN ALKUAJAN SOVELLUTUKSIA

Lentokoneteollisuudessa sovellettiin aktiivisesti venymämittauksia rakenneanalyysiongelmien ratkaisuisa heti ensimmäisten kokemusten saavuttua maahamme. Valmetin lentokonetehtaan koeasemalla venymäliuskoja käytettiin menestyksellisesti mm. siipikuormien mittaamiseen, lentokoneen rungon tukirakenteiden jännitysanalyysiin sekä moottorin aiheuttamien värähtelyongelmien ratkaisuun. Siihen aikaan oli tapana, että mittauksista vastuussa oleva henkilö joutui myös itse valmistamaan käyttämänsä liuskat. Tämä johtui siitä yksinkertaisesta syystä, että ulkomailta oli lähes mahdotonta tuoda liuskoja Suomeen. Mittalaitteina käytettiin galvanometrejä ja oskilloskooppeja. Normaali käytäntö lennonaikaisten venymien rekisteröintiin oli oskilloskoopin näytön valokuvaaminen. Valmetin lentokonetehtaan koeaseman päällikkönä toimi tuohon aikaan Paavo Järvenpää. Hänellä oli myös tapana opettaa venymämittausten tekniikka Teknillisessä korkeakoulussa.

Konepajateollisuus oli myös jo varhaisessa vaiheessa kiinnostunut vastusvenymäliuskojen tarjoamista mahdollisuuksista omissa sovellutuksissaan. Esimerkiksi paperikoneiden valmistajat käyttivät liuskoja erilaisten koneenosien jännitysanalyyseissä. Raskaiden työstökoneiden tukirakenteiden optimoinnissa hyödynnettiin liuskatekniikkaa. Hyvä esimerkki suhteellisen vaikeasta sovellutuksesta oli rautatievaunun akselin ajonaikaisen jännitystilan mittaaminen. Myös jäännösjännitysten määrittämiseen venymäliuskat antoivat ensimmäisen kunnan mahdollisuuden ja tätä tekniikkaa sovellettiin paperikoneiden hitsausliitosten jäännösjännitysten mittaamiseen.

Voimayhtiöt kiinnostuivat heti 50-luvun alussa venymäliuskoista. Imatran Voimassa hyödynnettiin vastusvenymäliuskoja ensi kerran v. 1951 voimajohtopylväiden testauksien yhteydessä. Venymäliuskat mahdollistivat myös dynaamisten ilmiöiden, kuten voimajohtoköysien katkeamisen mittaamisen.

Myös Puolustusvoimien insinöörien joukosta löytyi venymämittausten pioneereja Suomessa. He kehittivät omia mittausvalmiuksiaan jo vuodesta 1947 lähtien. Eräs vanhimmista sovellutuksista oli tykkiveneen kansilevyjen jännitysanalyysi. Toinen mielenkiintoinen esimerkki alkuaikojen mittauksista oli asepiipun jännitysmittaus. Ilmavoimien fysiikan laboratorio suoritti useita venymä- ja jännitysmittauksia muulle teollisuudelle, erityisesti 40-luvun lopulla ja 50-luvun alussa.

Myös yliopistomaailmassa hyödynnettiin venymämittaustekniikkaa jo varhaisessa vaiheessa. Tohtori Ilmari Sala käytti vastusvenymäliuskoja taipuman mittaamiseen tutkiessaan sauvojen nurjahdusta.

VTT:n sillanrakennuksen laboratoriossa tutkittiin v. 1950 arinarakenteiden vääntöä, ja tehdyissä pienoismallikokeissa käytettiin kaikkiaan n. 5000 venymäliuskaa.

ALKUAIKOJEN LIUSKAT JA MITTALAITTEET SEKÄ ESIINTYNEITÄ ONGELMIA

Sodan jälkeen oli erittäin vaikeaa tuoda Suomeen venymäliuskoja, vahvistimia ja muita mittalaitteita. Pääsyyinä tähän oli huutava pula ulkomaisista valuutoista. Koska kaupallisia liuskoja ei ollut saatavilla, mittauksista vastaavat henkilöt joutuivat valmistamaan liuskansa itse. Myös omatekoisia mittasiltoja ja galvanometrejä käytettiin.

Ensimmäisten Suomessa käytettyjen kaupallisten liuskojen joukossa olivat ainakin sellaiset merkit kuin Baldwin, Philips, Huggenberger ja Löthman. Alkuaikojen mittasiltoja ja vahvistimia olivat Philips, Ellis ja Peekel.

Venymänmittausten rajoitukset ja hankaluudet olivat alan pioneerien tiedossa jo varhaisessa vaiheessa. Kirjassaan Salokangas painottaa huolellisen valmistelutyön merkitystä liuskojen asennuksissa. Samoin liuskojen ja johtoliitosten hyvää kosteussuojausta hän piti tärkeämpänä sähköisen stabiiliuden kannalta.

Tuohon aikaan asiaan vihkiytyneet olivat sitä mieltä, että epälineaarisuuksien vuoksi ei ollut syytä mitata yli 1 % venymiä. Toisaalta eipä ollut kovin usein tarvettakaan senaikaisien terästen alhaisen lujuuden ansiosta.

LOPPUSANAT

Suomeen vastusvenymäliuskat saapuivat vajaat kymmenen vuotta liuskan alkuperäisen keksimisen jälkeen. Muutamat teollisuuden avainalueet kuten: lentokoneteollisuus, raskas konepajateollisuus ja voimantuotanto hyödynsivät uutta tekniikkaa jo varsin aikaisessa vaiheessa. Kuitenkin kesti jonkin aikaa ennenkuin venymämittausten hyödyntämisestä tuli jokapäiväinen rakenneanalyysin työkalu, ja niiden käyttö laajeni nykyisiin mittoihinsa.

Kalle-Erkki Penttilä, dipl.ins. Imatran Voima Oy