



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mika Tapio Pyykkö

SÄHKÖMOOTTORIN KIINNITYSKAPPALE MOPOAUTOON

Tekniikka ja liikenne
2010

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelmassa.

Haluan kiittää Vaasan ammattikorkeakoululta koneosaston johtaja Lotta Saarikoskea opinnäytetyön järjestämisestä sekä opinnäytetyöni ohjaaja lehtori Juha Hantulaa hyvästä ohjauksesta opinnäytetyöni osalta.

Vaasassa 24.3.2010

Mika Pyykkö

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone-ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Mika Pyykkö
Opinnäytetyön nimi	Sähkömoottorin kiinnityskappale mopoautoon
Vuosi	2010
Kieli	suomi
Sivumäärä	50+9 liitettä
Ohjaaja	Juha Hantula

Tämä työ on tehty Vaasan ammattikorkeakoulun koneosastolle. Työ liittyy ammattikorkeakoululla meneillä olevaan projektiin, jossa yleisiltä markkinoilta ostettu mopoauto muutettaisiin polttomoottorin sijaan sähkömoottorikäyttöiseksi. Työn aihe rajoittui projektissa siten, että tehtävänä oli laskea sähkömoottorille suunnitellun uuden kiinnityskappaleen lujuudet ja selvittää mopoauton muutoskatsastamiseen vaaditut määritykset ja lakipykälät.

Sähkömoottorin kiinnittämiseen suunnitellun uuden kiinnityskappaleen lujuuksien laskentaan täytyi etsiä sopivat lujuusopilliset menetelmät. Uuden kiinnityskappaleen lujuudet laskettiin perinteisesti kynällä paperille laskinta apuna käyttäen. Sopivat lujuusopilliset menetelmät löytyivät statiikan ja lujuusopin kirjallisuutta hyödyntäen. Tukena olivat myös opinnoissa suoritettujen lujuuslaskennan opinnot.

Mopoauton muutoskatsastamiseen löytyi tietoa jo olemassa olevista direktiiveistä ja katsastusviranomaisilta. Mopoauton muuttamista koskevat säännöt ja pykälät löytyivät EU:ssa tehdyistä direktiiveistä myös suomen kielellä.

Muutoskatsastamiseen tehtyjen selvityksien perusteella voidaan todeta mopoauton muuttamisen sähkökäyttöiseksi ajoneuvoksi olevan laillisesti täysin mahdollista.

Asiasanat: mopoauto, sähköauto, muutoskatsastus

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Kone-ja Tuotantotekniikan koulutusohjelma

ABSTRACT

Author	Mika Pyykkö
Title	Attachment of an Electric Motor to a Light Quadricycle
Year	2010
Language	Finnish
Pages	50+9 appendices
Name of Supervisors	Juha Hantula

This thesis was done for mechanical department of Vaasa University of Applied Sciences. The thesis was part of the project investigating a light quadricycle and its possibility to be converted from ic. an engine driven to electrical motor driven vehicle. The light quadricycle is available in common market. The aim was limited to calculating the strengths of the electrical engine of the proposed new attachments and to find out different issues regarding inspection modification of a light quadricycle.

Suitable methods for designing and calculating strength values of the new mounting attachment designed for the electric motor had to be found out. The strength of materials was calculated by pen on paper method using a calculator. Suitable methods of strength of materials were found out by using literature from the field of statistic and the strength of materials. The writer's knowledge of strength of materials obtained from studies in VAMK University of Applied Sciences were also used..

Information of inspection modification of light quadricycle was obtained from already existing directives and inspection authorities. Corresponding EU directives were also available in Finnish.

The result of the investigation was that the conversion of light quadricycle to an electric vehicle is legally possible.

Keywords: light quadricycle, electric car, modification inspection

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET.....	7
1 JOHDANTO	8
2 MOPOAUTO	9
2.1 Kevyt nelipyörä	10
2.1.1 L6e tyyppi hyväksyntä.....	10
2.1.2 Rakenteet.....	11
2.2 Valmistajat	13
2.2.1 Markkinat Suomessa	13
3 MUUTETTAVA MOPOAUTO	14
3.1 Muutokset.....	15
3.2 Muutoksesta	15
3.2.1 Omamassa	16
3.2.2 Sähkömoottori	16
3.2.3 Sähkömoottorin kiinnityskappale.....	16
4 SÄHKÖMOOTTORIN KIINNITYS	17
4.1 Moottorin irrottaminen.....	17
4.2 Uuden moottorikiinnikkeen suunnittelu.....	19
4.3 Moottorin kiinnike	21
5 LUJUUSOPIN MENETELMÄT	22
5.1 Kuorma ja sen vaikutus.....	22
5.2 Normaalijännitys	23
5.3 Leikkausjännitys.....	24
5.4 Taivutus.....	25
5.4.1 Geometriset suureet.....	25
5.4.2 Puhdas taivutus	27
5.4.3 Varmuusluku	33
6 KIINNITYSKAPPALEEN LUJUUS.....	35

6.1	Sähkömoottorista syntyvät voimat	35
6.2	Laskutoimitukset edestäpäin	36
6.3	Laskutoimitukset sivultapäin	43
7	TULOKSET	46
8	KIINNITYSKAPPALEEN MUUTOKSET	47
9	YHTEENVETO	48
	LÄHDELUETTELO	49
	LIITELUETTELO	50

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

F	voima
N	normaalivoima
σ	normaalijännitys
A	pinta-ala
τ	leikkausjännitys
Q	leikkausvoima
S	staattinen momentti
I_z, I_y	jäyhyysmomentit z- ja y-akselien suhteen
M	taivutusmomentti
R_{eh}	myötölujuus
R_m	murtolujuus
n	varmuusluku
ε	venymä
E	kimmokerroin
W	taivutusvastus
Pa	pascal (paineen yksikkö) N/m^2
MPa	megapascal
GPa	gigapascal
m	massa kg
g	maanvetovoiman kiihtyvyys $9,80665m/s^2$

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää mopoauton muutoskatsastukseen liittyviä seikkoja, kun polttomoottorikäyttöinen mopoauto muutetaan sähkökäyttöiseksi, sekä laskea sähkömoottoriin liittyvien kiinnityksien lujuuksia. Opinnäytetyö tehtiin Vaasan ammattikorkeakoulun tekniikan yksikölle. Olen opiskellut kyseissä oppilaitoksessa ja sieltä löytyi sopiva opinnäytetyön aihe.

Työ aloitettiin syyskuussa 2009. Tällöin Vaasan ammattikorkeakoululla oli alkamassa projekti, jossa tekniikan eri osastot yhdessä suunnittelisivat ja toteuttaisivat muunnoksen markkinoilta ostettavaan mopoautoon.

Projektin lähtökohtana oli ostaa markkinoilla oleva polttomoottorilla varustettu mopoauto ja muuttaa sitä niin, että polttomoottorin korvaisi sähkömoottori. Näitä sähkömoottorilla varustettuja mopoautoja ei markkinoilta vielä ole saatavilla.

Opinnäytetyön osuus koostui polttomoottorin tilalle tulevan sähkömoottorin kiinnittämiseen suunnitellun kiinnityskappaleen lujuuksien tarkastaminen laskentamenetelmiä apuna käyttäen. Suunnitellun kiinnikkeen tuli kestää sähkömoottorin aiheuttamat vääntömomentit ja muut voimat joita moottori kiinnikkeelle aiheuttaa.

2 MOPOAUTO



Kuva 1. Mopauto.

Suomessa paremmin nimeltä tunnettu mopauto on kuvan 1 tapainen pieni nelipyöräinen kulkuneuvo, joka on varustettu pienitehoisella moottorilla.

Mopautoa saa kuljettaa 15 vuotta täyttänyt henkilö tai sitä vanhempi, jolla on vähintään M-luokan ajokortti. /2/

2.1 Kevyt nelipyörä

Kevyt nelipyörä on nimitys, jota käytetään EU-direktiivin (92/61/EY) L6e luokan mukaisesta ajoneuvosta. Direktiivi otettiin käyttöön Ranskan esityksestä 30.6.1992. Tarkennusta direktiiviin tuli vuonna 1997 (97/24/EY) ja 2002 (2002/24/EY). Kevyttä nelipyörää kutsutaan englanniksi light quadricycle.

Suomessa direktiivi otettiin käyttöön 17.8.1998, jonka myötä kevyet nelipyörät tulivat sallituiksi tieliikennekäyttöön. Ajoneuvojen verotus kuitenkin aiheutti sen, ettei kyseisen luokan ajoneuvoja kovinkaan paljon teilläämme näkynyt. Ajoneuvovero kyseisestä luokasta poistettiin vuonna 2003 ja sen jälkeen kevyiden nelipyörien suosio alkoi kasvaa. /4/ /10/

2.1.1 L6e tyyppi hyväksyntä

L6e-luokan kevyt nelipyörä voidaan rekisteröidä kyseiseen luokkaan, kun ajoneuvo täyttää mm. seuraavat määritykset.

Ajoneuvon suurin sallittu kuormaamaton omamassa on 350 kg:aa. Kuormaamattomalla omamassalla tarkoitetaan painoa jolloin ajoneuvo on valmis liikenteeseen kun siihen lisätään akku ja polttomoottorin toimintaan tarvittavat nesteet. Sähkökäyttöisessä ajoneuvossa voimanlähteenä on sähkömoottori ja siihen tuotetaan virta akkujen avulla. Sähkökäyttöiseen ajoneuvoon pätee samat säännöt kuin polttomoottorikäyttöiseen ja moottorille tuottavan virran akkuja ei siis tarvitse omamassaan laskea.

Kokonaispainon määrittelee ajoneuvon valmistajan rakenteille määrittämä kantavuus. Yleensä se on suunnilleen 650 kg:aa.

Mopoauton moottori voi olla ottomoottori, sähkömoottori tai jokin muu polttoainemoottori. Kun puhutaan ottomoottorista sillä tarkoitetaan bensiinikäyttöistä moottoria. Ottomoottorin suurin sallittu kuutiolavuus saa olla

enintään 50 cm³. Se kuinka paljon tuolla kuutiotilavuudella saadaan tehoa moottorista, ei ole mitenkään rajoitettu. Polttomoottori on dieselöljyä polttoaineena käyttävä moottori. Dieselmoottorin kuutiotilavuutta ei ole tässä tapauksessa rajoitettu, ainoastaan suurin sallittu teho saa olla 4 kW. Sähkomoottorilla on samat määritykset kuin dieselmoottorilla.

Kaikilla moottorivaihtoehdoilla mopoauton suurin sallittu rakenteellinen nopeus on 45 km/h. /4/ /5/

2.1.2 Rakenteet

Mopoauton runko (kuva 2) on tehty pääosin alumiini profiilista, käsittäen myös ovet ja peräluukun runkorakenteet. Alumiinia käyttämällä on runkorakenteista saatu tehtyä mahdollisimman kevyet, kestävyyttä kuitenkin unohtamatta. Moottoritilan rakenteeseen on käytetty terästä kestävämmän moottorin aiheuttamat voimat paremmin.

Mopoauton rakenteille ei ole määritetty mitään pakollisia törmäystestejä, kuten esimerkiksi henkilöautoissa käytetty Euro NCAP-kolaritesti. Valmistajat ovat kuitenkin rakenteita suunnitellessaan huomioineet mahdolliset kolarit tekemällä kyseisiä kolaritestejä itsenäisesti. Näistä kolaritesteistä ei ole julkaistu minkäänlaista tilastoa eri valmistajien kesken, joilla voitaisiin turvallisuutta verrata.



Kuva 2. Kirkkaampi osa alumiinia ja musta terästä.

Kori autolle tehdään myös mahdollisimman kevyestä materiaalista. Yleisimmin käytetty materiaali on muovi. Muovista voidaan helposti tehdä erilaisilla valumenetelmillä juuri sellaisia korin osia, joita auton ulkonäön muotoiluun on haluttu. Ulkonäkö syntyy kun korin eri osat kiinnitetään auton runkoon. Kuvasta 3 voidaan nähdä auton rungon ja muovisten korin osien yhteensovitus. /7/



Kuva 3. Rungon ja korin yhteensovitus.

2.2 Valmistajat

Tunnettuja mopoautojen valmistajia ovat ranskalaiset Aixam, Ligier, JDM, Chatenet ja MicroCar sekä italialaiset Grecav ja Casalini. Casalini on Euroopan ensimmäinen mopoauton valmistaja. Valmistus aloitettiin vuonna 1939. Tuotannollisesti suurin on Aixam. Aixamin tuotantomäärä kahdella Ranskassa sijaitsevalla tehtaalla on n. 14000 ajoneuvoa vuosittain. Markkinaosuus on myytävistä ajoneuvoista Euroopassa on n. 40%:a.

2.2.1 Markkinat Suomessa

Tunnetuimmat valmistajat Suomen markkinoilla ovat Aixam, Ligier, Microcar ja JDM. Suomessa rekisteröityjä mopoautoja vuoden 2009 lopussa oli 6498 kpl:tta. Vuonna 2009 ensirekisteröintejä tehtiin 985 kpl:tta. Merkeistä Aixam on tällä hetkellä myyntimääriltään markkinajohtajana Suomessa. Mopoautojen hinnat vaihtelevat mallin ja varustetason mukaan 10 ja 18 tuhannen euron välillä. /3/

3 MUUTETTAVA MOPOAUTO

Projektiin hankittiin kuva 4 Microcar M Go S-merkkinen mopoauto. Valinnassa eri merkkien välillä ratkaisi hinta ja tämän merkin valintaa puollettiin myös senkin takia, että MicroCar on ilmoittanut tuovansa markkinoille vastaavanlaisen mopoauton sähkökäyttöisenä. Projekti-auton muutoksia pystytään näin ollen tulevaisuudessa vertaamaan tehtaan tekemään sähköautoon.



Kuva 4. Microcar M Go S.

Tekniset tiedot:

Moottori	YANMAR dieselmoottori
Jäähdytys	Nestejäähdytys
Moottorilavuus	523 cm ³
Suurin teho	4 kW / 5,4 hv / 3200 kierr/min
Suurin vääntömomentti	15 Nm / 2200 kierr/min
Latausgeneraattori	480 W vaihtovirta
Vaihteisto	Eteen-vapaa-taakse, automaattinen variaattori
Suorituskyky	
Huippunopeus	45 km/h

Polttoainesäiliön tilavuus	16 l
Polttoaineen kulutus	3-3,5 l / 100km

Mitat

Pituus	3026 mm
Leveys	1506 mm
Korkeus	1553 mm
Akseliväli	2080 mm
Raideväli	1270 mm
Omapaino	390 kg
Suurin sallittu kokonaispaino	650 kg
Renkaat	145 / 80–13 tai 155 / 65–14

3.1 Muutokset

Mopoautoon tulee alkuperäisen moottorin paikalle sähkömoottori. Sähkömoottori ei suoraan käy polttomoottorin moottorin kiinnikkeisiin vaan sähkömoottorin ja alkuperäisten moottorin kiinnikkeiden väliin täytyy tehdä muuntokappale.

Sähkömoottorin pyörittämiseen tarvitsema energia tullaan ottamaan akuista ja näille akuille täytyy tehdä kotelot joihin ne pystytään asettamaan. Akkujen sijoituksessa täytyy huomioida paras mahdollinen sijoituspaikka niin painojakauman kuin lämpötilaerojenkin suhteen.

Muutoksilla pyritään samaan mopootosta täysin tieliikenne kelpoinen ja kaikki muutokset täytyy tehdä siten, että nelipyörälle määritellyt direktiivit täytyisivät.

3.2 Muutoskatsastus

Mopoauton muuttaminen sähkömoottorikäyttöiseksi täytyy sille tehdä muutoskatsastus. Muutoskatsastukseen liittyviä asioita kyseltiin A-katsastusasemalta ja oltiin yhteydessä autorekisterikeskus TRAFIn tekniseen neuvontaan (entinen AKE). Saatujen vastausten perusteella ei pitäisi olla mitään

esteitä mopon muutoskatsastamiseen, kun pysytään sille asetettujen määräysten puitteissa.

3.2.1 Omamassa

Puhuttaessa ajoneuvon omamassasta täytyy se, muutoksista huolimatta, pysyä määritellyssä 350 kg:ssa. Ajoneuvon omamassa on kuormittamaton massa, johon ei tarvitse laskea ajoneuvoon tulevien akkujen painoa. Akkujen sijoittelussa on kuitenkin huomioitava ajoneuville määritetty suurin sallittu kokonaismassa. Myöskään akseli massoja ei saa ylittää. Laskettaessa kokonaismassaa on kuljettajan ja matkustajan laskennallinen paino otettava huomioon. Laskennallinen paino henkilölle on 75 kg.

Ajoneuvon omamassa on esitettävä muutoskatsastuksen yhteydessä. Ajoneuvon omamassan mittaus ei onnistu välttämättä kaikilla katsastusasemilla. Mittauksen tekeminen jossain muualla luotettavasti, olisi hyvä ottaa yhteyttä katsastusmieheen ja sopia hänen kanssaan kuinka punnituksessa tulisi menetellä. /5/ /8/

3.2.2 Sähkömoottori

Sähkömoottorista täytyy olla tekniset tiedot, josta ilmenee moottori tehot. Moottorin teho saa olla enintään 4 kW. Pyörintä nopeus täytyy rajoittaa siten, ettei suurin sallittu huippunopeus ajoneuvolla ylitä 45 km/h. /5/ /8/

3.2.3 Sähkömoottorin kiinnityskappale

Sähkömoottorin kiinnitykseen tarvittavan muutoskappaleen tekemisestä ei ole vaadittu mitään erityisiä dokumentteja. Kiinnityksessä tullaan kuitenkin käyttämään alkuperäisiä kiinnityspaikkoja, eikä näihin olla tekemässä muutoksia. Riittää kun kiinnityskappaleesta nähdään päällepäin, että se on asiallisesti tehty ja riittävän luja tehtävänsä. Yleensä katsastusmiehen hyväksyntä osasta riittää. /5/ /8/

4 SÄHKÖMOOTTORIN KIINNITYS

Sähkömopo projektin toteuttamiseen osallistui myös oppilaitoksen neljännen vuosikurssin oppilaita jotka olivat saaneet tehtäväkseen purkaa mopoautosta alkuperäisenä voimanlähteenä olevan moottorin sekä suunnitella alkuperäisille moottorin kiinnikkeille toteutettava sähkömoottorin kiinnityskappale.

4.1 Moottorin irrottaminen

Alkuperäisen moottorin irrottaminen aloitettiin huolellisella katselmuksella, jotta tiedettiin miten moottori olisi helpoin ja järkevin tapa saada autosta pois. Kuvissa 5,6 nähdään mopoauton moottoritila, jossa alkuperäinen moottori on vielä paikoillaan.

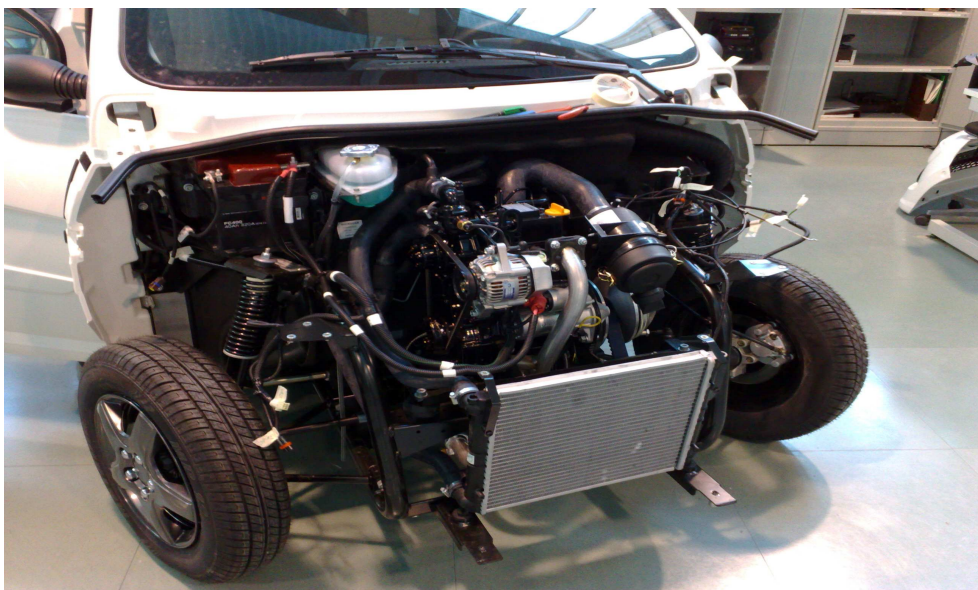


Kuva 5. Mopoauton moottoritila.



Kuva 6. Mopoauton moottori.

Moottorin pois saamiseksi oli helpointa purkaa auton keulan ympäriltä muoviset korin osat. Moottorista irrotettiin kaikki sähköjohdot, vaijerit ym. sellaiset osat, jotka eivät moottorin mukana irti olisi lähteneet. Kaikki irrotetut osat merkittiin, jotta kasaamisvaiheessa tiedettäisiin mihin osat kuuluvat. Kuvassa 7 autosta on purettu kaikki muoviset korin osat moottoritilan ympäriltä ja moottori on irrotusta vaille valmis.



Kuva 7. Moottori on irrotusta vaille valmis.

Moottori nostettiin pois nostolaitetta apuna käyttäen. Moottori punnittiin kaikkine apulaitteineen, jolla saatiin selville massa, joka tulee auton konehuoneesta jättämään pois kun dieselmoottori ei enää ole voimanlähteenä. Moottorin punnitsemisella oli tärkeä merkitys, jolloin sähkömoottoriin vaihdettaessa saataisiin konehuoneeseen laitettua sama massa, jolloin akseli massa pysyisi mahdollisimman samana. Moottorin painoksi mitattiin 56 kg:aa. Kuvassa 8 moottori on irrotettuna nostolaitteessa.

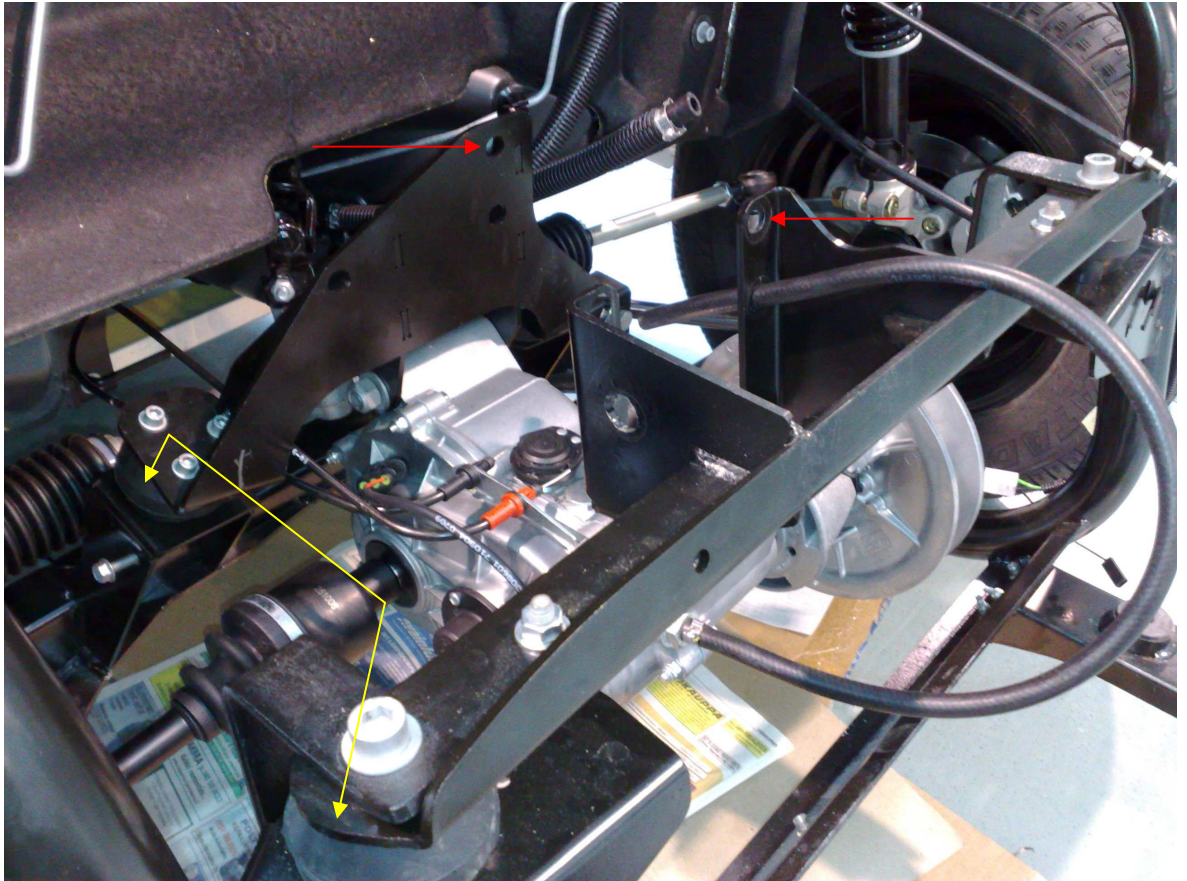


Kuva 8. Dieselmoottori irrotettuna.

4.2 Uuden moottorikiinnikkeen suunnittelu

Polttomoottorin korvaaminen sähkömoottorilla ei onnistunut käyttämällä suoraan jo olemassa olevia alkuperäisiä moottorikiinnikkeitä. Polttomoottorissa kiinnityspisteet olivat moottorin molemmin puolin kun sähkömoottorilla kiinnityspisteet ovat yleensä yhdellä sivulla tasopintamaisesti. Sähkömoottorin kiinnittämiseen tarvittiin näin ollen jonkinlainen muutosratkaisu, jotta moottori saataisiin kiinnitettyä.

Sähkömoottorin kiinnitystä suunniteltaessa haluttiin hyödyntää kuitenkin alkuperäisiä kiinnityspisteitä kuva 9 mahdollisimman paljon, jotta välttyttäisiin myös auton runkoon tehtäviltä muutoksilta.



Kuva 9. Moottorin alkuperäiset kiinnityspisteet.

Alkuperäiset moottorin kiinnityspisteet auton runkoon nähden on merkitty kuvaan 9 keltaisilla nuolilla. Moottorin kannattimen kiinnityksessä on käytetty vaimentavaa kumituentaa, joka sallii moottorin liikkeissä hieman joustoa ja poistaa myös korille aiheutuvaa tärinää. Alkuperäinen moottori on ollut kiinnikkeessään kuvassa 9 näkyvien punaisten nuolien kohdilla. Kiinnikkeen rei'istä moottori on pultattu kiinnikkeeseen.

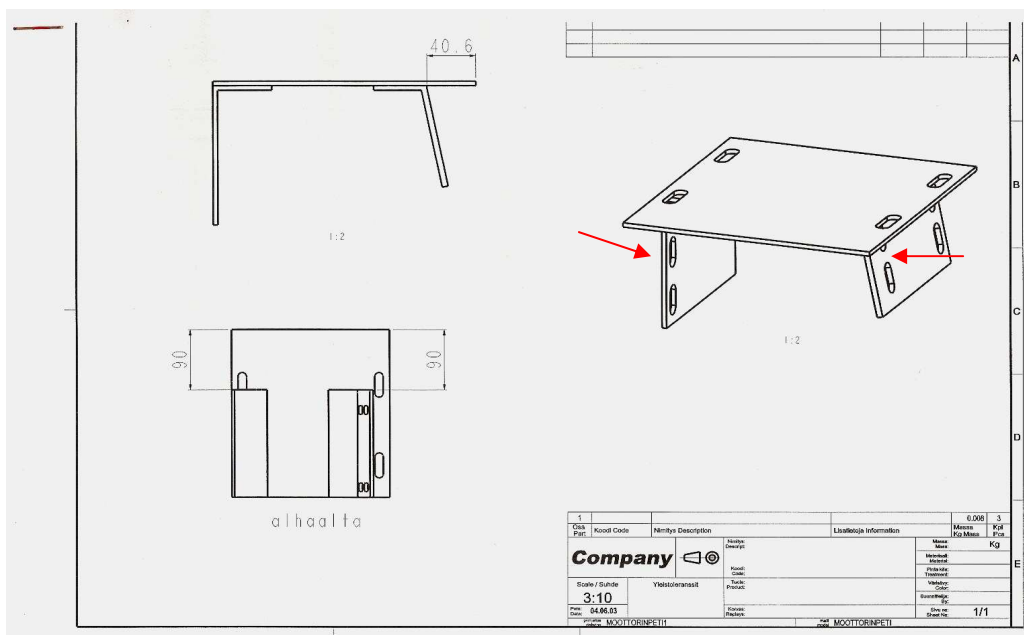
Uuden sähkömoottorin kiinnikkeen suunnittelussa haluttiin ottaa huomioon jo olemassa olevat kiinnikkeet. Kiinnikkeitä käyttämällä saataisiin runkoon kiinnitys myös joustavaksi sähkömoottorille. Olemassa olevat kiinnikkeet olivat siis oikein

hyvät, koska sähkömoottorin runkoon kiinnittämisessä pystyttiin niitä hyödyntämään.

Sähkömoottorin kiinnike mitoitettiin sopimaan alkuperäisen moottorin kiinnityspisteisiin. Kiinnike suunniteltiin siten, että se saadaan pultattua alkuperäisiin kiinnityspisteisiin ja sähkömoottori pultattua kiinnityskappaleen tason päälle. Kiinnike tehtäisiin teräksestä alkuperäisen kiinnikkeen tapaan. Kiinnikkeen mitoituksessa huomioitiin sähkömoottorin ja vaihteiston akseleiden etäisyys niin, että akseleihin tulevat hammaspyörät olisivat linjassa toisiinsa nähden. Materiaalivahvuutena suunniteltaessa käytettiin samaa kuin alkuperäisessä kiinnikkeessä.

4.3 Moottorin kiinnike

Suunniteltu moottorin kiinnike (Liite 1) on toteutettu siten, että kiinnikkeessä on petilevy johon sähkömoottori kiinnitetään pulttiliitoksella. Petilevyyn hitsataan alaspäin lähtevät teräskappaleet joihin on tehty kiinnitysreiät. Kiinnitysrei'istä (Kuvassa 10 punaiset nuolet) saadaan kiinnike pultattua alkuperäisiin moottorin kiinnikkeisiin.



Kuva 10. Uusi moottorin kiinnityskappale.

5 LUJUUSOPIN MENETELMÄT

Lujuusoppi on kone- ja rakennustekniikan keskeisiä perusteita. Viime aikoina lujuusopin merkitys on voimakkaasti lisääntynyt lähinnä seuraavista syistä: materiaalia halutaan säästää muun muassa hintakilpailun vuoksi, koneiden kasvaneet nopeudet ovat lisänneet kuormituksia ja siksi esimerkiksi värähtelyjen vaikutukset on otettava huomioon aikaisempaa laajemmin.

Lujuusopin vaativin sovellusalue on koneiden, rakennusten, rakenteiden ym. konstruktiivinen suunnittelu. Lujuusopissa fysikaalisia ilmiöitä kuvataan malleilla, joita muodostettaessa tehdään eritasoisia yksinkertaisia oletuksia. Laskennassa käytettävän mallin tason valitseminen edellyttää harkintaa ja kokemusta.

Lujuusopin laskemiseen on olemassa paljon tietokoneelle räätälöityjä ohjelmia, joihin tietoja syöttämällä saadaan tietokoneen laskemia lujuuksia ja vääntymiä 3D-mallinnuksena.

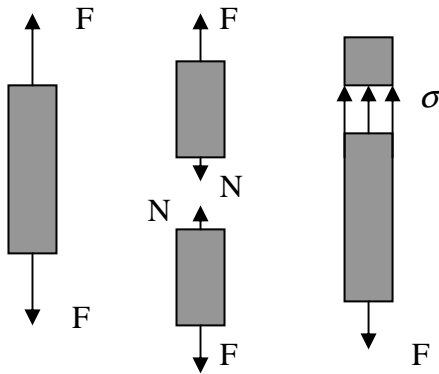
5.1 Kuorma ja sen vaikutus

Lujuusoppi tarkastelee kuormituksen vaikutusta kappaleisiin. Lujuusopin ratkaisemisessa tarvitaan kahta asiaa, mekaniikan perusyhtälöitä ja materiaalitietoa. Tavallisesti riittävät statiikan tasapainoyhtälöt: voimien summa on nolla ja momentti on nolla, mutta jos kappale on kiihtyvässä liikkeessä, on käytettävä dynamiikan liikeyhtälöitä.

Kuormitus on piste-, viiva-, pinta- tai tilavuuskuorma riippuen siitä minkälaiseen alueeseen kuorma vaikuttaa. Kuormituksen vaikutuksesta kappaleen muoto muuttuu ja sen sisälle syntyy jännityksiä. Kappaleen osat kohdistavat toisiinsa voimia ja momentteja, jotka pitävät kappaleen koossa. Kappaleen sisälle syntyviä voimia ja momentteja kutsutaan rasiuksiksi. /9/

5.2 Normaalijännitys

Normaalijännitys ja sen yhteys muodon muutokseen on eräs lujuusopin tärkeimmistä käsitteistä. Kuvassa 11 on sauvassa esiintyvä normaalijännitys.



Kuva 11. Normaalijännitys sauvassa.

Sauvan poikkileikkaukseen syntyy rasitukseksi normaalivoima N , joka on tasapainoyhtälöiden mukaan yhtä suuri kuin voima F . Todellisuudessa normaalivoima ei vaikuta yhdessä pisteessä, kuten kuvaan on piirretty, vaan leikkauspintaan syntyy voimajakauma, jonka yhdistystulos on normaalivoima N . Jakaantuneen voiman kuormitustiheyttä N/A kutsutaan jännitykseksi. A on poikkileikkauksen pinta-ala. Normaalivoimaa vastaavasta jännityksestä käytetään nimitystä normaalijännitys σ :

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

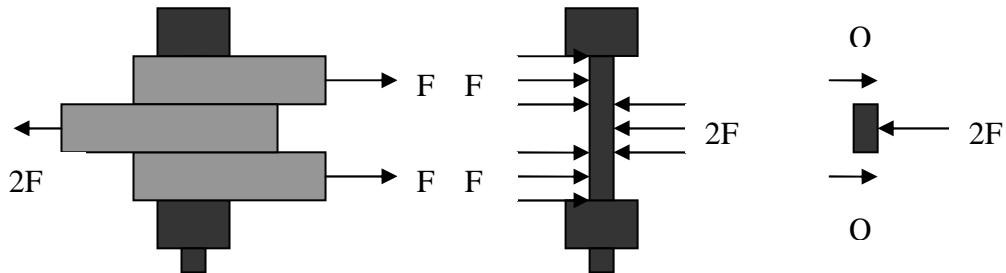
Kuvassa ja kaavassa on oletettu, että voimajakautuma on tasainen, mikä pitääkin usein hyvin paikkansa.

Normaalijännityksen merkki valitaan normaalivoiman mukaisesti. Jos normaalivoima on leikkauspinnasta poispäin (veto), normaalijännitys on positiivinen ja jos normaalivoima on leikkauspintaan päin (puristus), normaalijännitys on negatiivinen.

Jännityksen yksikkö SI-järjestelmässä on kaavan 1 mukaan N/m^2 eli pascal, Pa. Pascal on kuitenkin niin pieni yksikkö, että lujuusopissa esiintyvät tavallisesti sen kerrannaiset MPa ja Gpa. /6/

5.3 Leikkausjännitys

Kuvassa 12 on esimerkki ruuviliitoksen tyypillisestä leikkausjännityksestä. Kuvassa on ruuviliitos jossa kosketuspinoissa vaikuttavat voimat on jaettu tasaisesti pystysuunnassa. Ruuviin kohdistuvien voimien leikkauskohdassa olevan osan tasapainoyhtälöstä seuraa, että leikkauspinoissa vaikuttaa pinnan suuntainen voima, leikkausvoima Q . Molemmissa pinoissa leikkausvoiman suuruus on F .



Kuva 12. Ruuviliitos.

Todellisuudessa leikkauspinnassa vaikuttaa jännitysjaakauma, jonka yhdistystulos on leikkausvoima Q . Pinnansuuntaista jännitystä kutsutaan leikkausjännitykseksi ja se merkitään symbolilla τ . Leikkausjännitys lasketaan kaavasta:

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

jossa A on poikkileikkauksen pinta-ala. Tulokseksi saadaan keskimääräinen leikkausjännitys, sillä todellisuudessa jännitys ei jakaannu pintaan tasaisesti.

Normaalijännityksellä ja leikkausjännityksellä on tärkeä ero. Normaalijännitys vaikuttaa kohtisuorassa leikkauspintaa vastaan, kun taas leikkausjännitys vaikuttaa pinnan suunnassa.

Esimerkit luvuissa 5.2 ja 5.3 (sauva ja ruuviliitos) ovat tapauksia kuormituksista, jotka aiheuttavat tarkasteltavaan leikkaukseen vain yhden tyyppistä jännitystä. Yleensä leikkauksissa esiintyy samanaikaisesti sekä normaali että leikkausjännitystä. Lujuusopillisen mitoituksen kannalta on tärkeää laskea jännitysten yhteisvaikutus. /6/

5.4 Taivutus

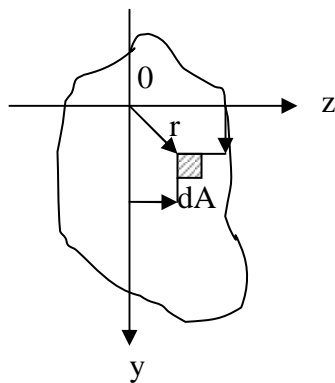
Poikittaisesti kuormitettua rakenneosaa nimitetään palkiksi. Jos palkki taipuu, kysymyksessä on taivutuskuorma. Taipuminen aiheuttaa rakenteessa jännityksiä, joiden suuruudesta riippuu sen kestävyys. Käsitellään edellä puhdas suora taivutus ja samanaikainen veto tai puristus ja suora taivutus. /9/

5.4.1 Geometriset suureet

Taivutuksessa syntyvien voimien laskemiseen on tarpeellista selvittää taivutuksen kohteena olevasta rakenteesta poikkipintaan kohdistuvia geometrisia suureita. Tarkastellaan laskuissa tarvittavat suureet: staattiset momentit, pintakeskiö ja pinnan neliömomentit.

Staattiset momentit

Pinnan ensimmäiset momentit eli staattiset momentit y - ja z -akselin suhteen ja poikkileikkauksen pinta-ala (Kuva 13). /6/



$$A = \iint dA \quad (3)$$

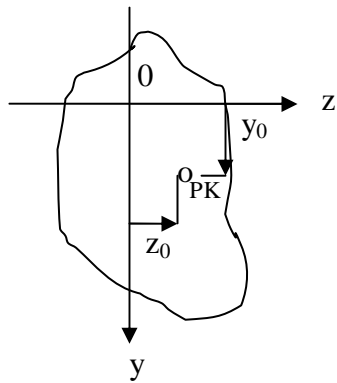
$$S_y = \iint z dA \quad (4)$$

$$S_x = \iint y dA \quad (5)$$

Kuva 13. Staattiset momentit

Pintakeskiö (PK)

Pintakeskiön määrittämisen koordinaatit y- ja z-akselien suhteen (Kuva 14). /6/



$$y_0 = \frac{S_z}{A} = \frac{\iint y dA}{A} \quad (6)$$

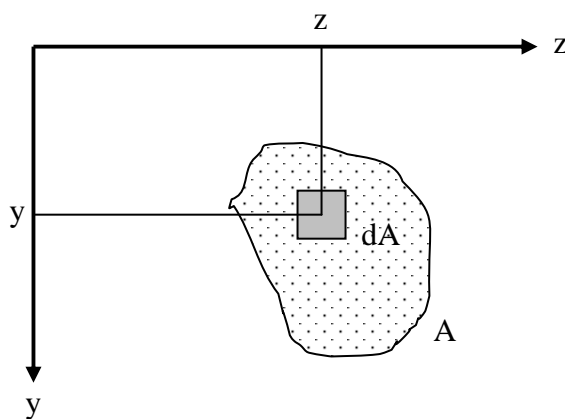
$$z_0 = \frac{S_y}{A} = \frac{\iint z dA}{A} \quad (7)$$

Kuva 14. Pintakeskiö

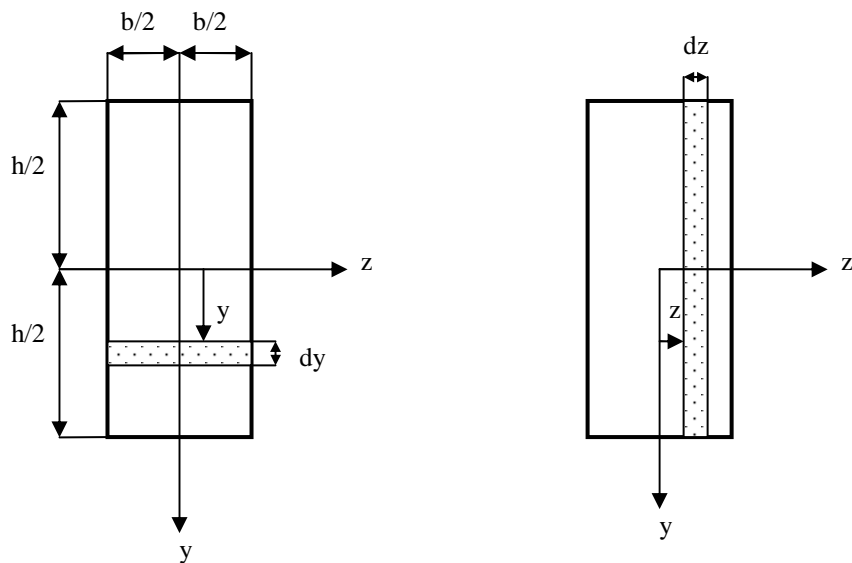
Pinnan jäyhyysmomentit

Määritellään pinnan jäyhyysmomentti eli neliömomentti z-akselin suhteen (kuva 15)

$$I_z = \int_A y^2 dA \text{ ja y-akselin suhteen (kuva 16) } I_y = \int_A z^2 dA.$$



Kuva 15. Pinnan jäyhyysmomentin määrittäminen.



Kuva 16. Suorakulmio poikkipinnan pinta-alkiot.

Määritetään suorakulmaisen poikkipinnan jäyhyysmomentit painopisteen kautta kulkevan sivujen suuntaisen akseliston suhteen. Jäyhyysmomenttia I_z laskettaessa on pistemäisen pinta-alkion sijasta edullisinta valita z -akselin suuntainen liuska $dA=bdy$ ja silloin saadaan kaava muotoon:

$$I_z = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 b dy = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b \frac{y^3}{3} = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

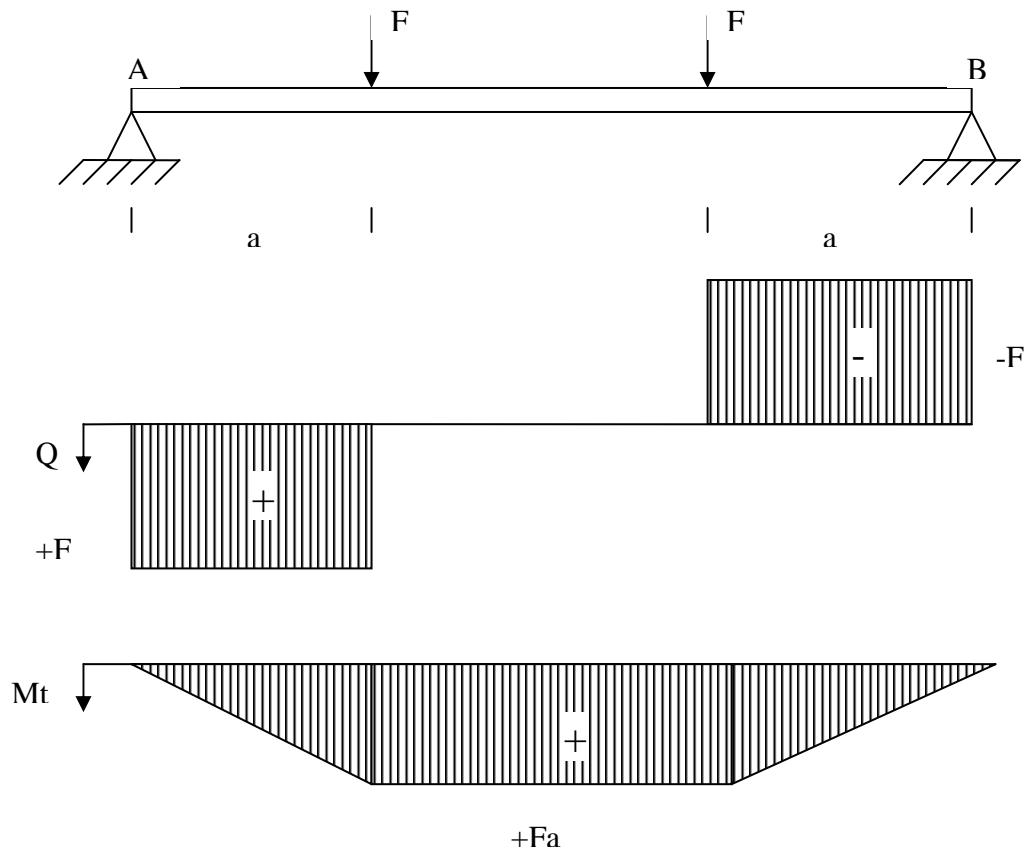
I_y laskettaessa pinta-alkioksi sopii parhaiten pystyliuska $dA=hdz$. Tällöin saadaan kaava muotoon: /6/

$$I_y = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} z^2 h dz = \frac{hb^3}{12} \quad (9)$$

5.4.2 Puhdas taivutus

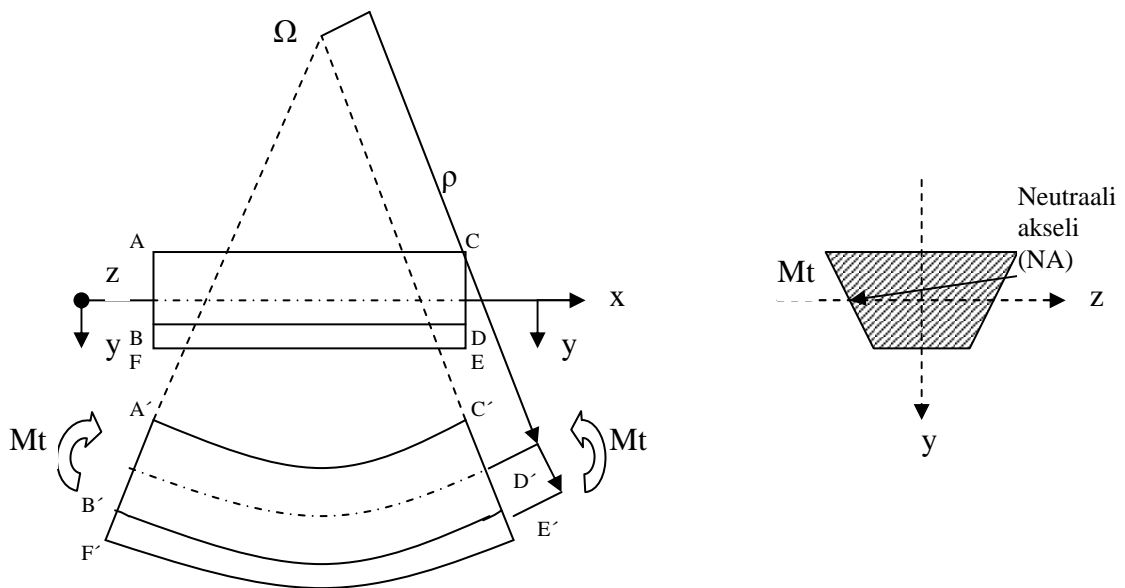
Taivutetaan päistään tuettua palkkia kuvassa 17 osoittamalla tavalla pistevoimilla

F



Kuva 17. Taivutuksen voimakuviot Q ja M_t .

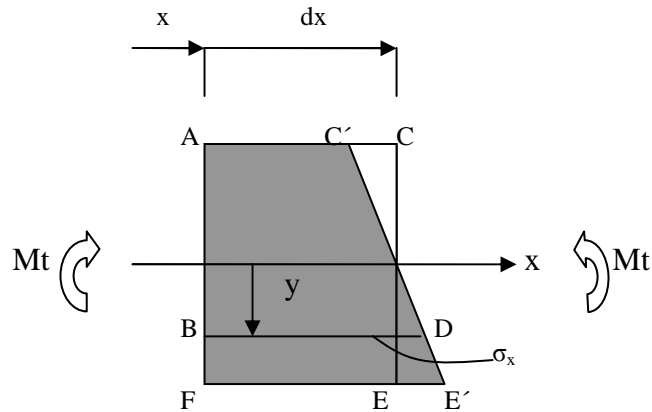
Tällöin syntyy puhdasta taivutusta Fa välille AB . Kun palkkia rasittaa pelkkä taivutusmomentti $M(+Fa)$, puhutaan puhtaasta taivutuksesta, jolloin palkki demorfoituu kuvan 18 mukaisesti ympyrän kaaren muotoiseksi. Havaitaan, että demormaatiossa sauvan akselia kohtisuora taso säilyy tasona ja sauvan akselia vastaan kohtisuorana. Tämä havainto muodostaa Bernoullin otaksunnan, johon perustuu ns. Bernoulli-Euler palkkiteoria, jota kutsutaan myös tekniseksi taivutusteoriaksi. /6/ /9/



Kuva 18. Puhdas taivutus.

Katsotaan palkista leikatun osan ACEF (kuva 18) muodonmuutoksia. Kuormittamattoman palkin poikkileikkaustasojen oletetaan säilyvän tasoina myös kuormitustilassa. Tämä oletus on ns. teknisen taivutusteorian perusta. Se on puhtaassa taivutuksessa hyvin sopusoinnussa käytännön mittaustulosten kanssa.

Vaikka palkin poikkileikkaustasot säilyvät tasoina, ne eivät enää kuormitustilassa ole yhdensuuntaisia ($A'C'E'F'$). Kuva 19 havainnollistaa särmiön ACEF muodonmuutosta särmiöksi $AC'E'F'$. CE-tason kulmanmuutos on kuvassa vahvasti liioiteltu.



Kuva 19. Tason CE kulmanmuutos tasoksi $C'E'$ ja säikeen BF pituuden muutos σ_x .

Ajatellaan palkin koostuvan pituussuuntaisista säikeistä. Alaosan säikeet pitenevät ja yläosan vastaavasti lyhenevät. Jossakin on kohta, jossa säikeiden pituus dx ei muutu. Tätä kutsutaan palkin neutraalikerrokseksi. Koordinaatisto on asetettu niin, että neutraalikerros yhtyy sylinteripinnaksi taipuvaan xz -tasoon. Poikkipintatason z -akselia kutsutaan poikkipinnan neutraaliakseliksi (NA), x -akseli taas taipuu palkin kimmoviivaksi. /6/

Koordinaatin y määräämän säikeen BF pituuden muutos σ_x on kuvan 19 mukaan:

$$\sigma_x = ky$$

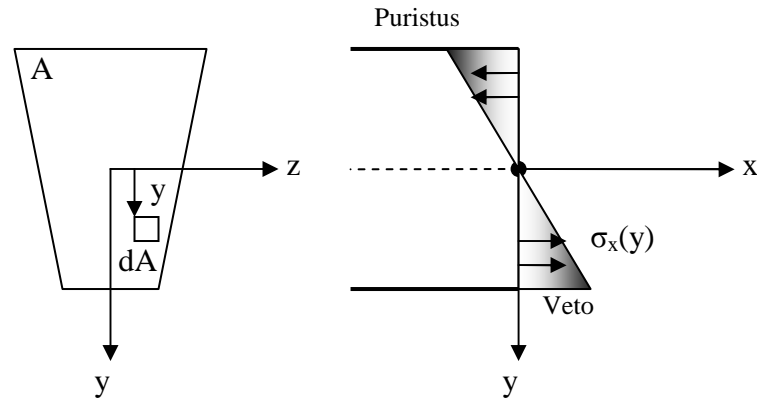
Tässä k on verrannollisuuskerroin, jonka arvoa ei toistaiseksi tiedetä. Säikeen suhteellinen venymä on tällöin:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{dx}$$

Rajoitutaan lineaarisesti kimmoiseen materiaaliin ja käytetään Hooken lakia:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = E \frac{\sigma_x}{dx} = E \frac{ky}{dx}$$

Pituussuuntainen normaalijännitys σ_x on suoraan verrannollinen y -koordinaattiin (kuva 20).



Kuva 20. Puhtaan taivutuksen normaalijännitys jakauma.

Poikkipintaan A vaikuttava x:n suuntainen kokonaisvoima häviää, koska palkissa ei ole normaalivoimaa rasiuksena, joten:

$$\int_A \sigma_x dA = \int_A E \frac{ky}{dx} dA = \frac{Ek}{dx} \int_A y dA = 0$$

Tämä ehto toteutuu vain mikäli:

$$\int_A y dA = 0$$

toisin sanoen poikkipinnan staattinen momentti z-akselin suhteen häviää eli z-akseli kulkee poikkipinnan painopisteen kautta. Tulos on saatu tarkastelemalla palkkia, jonka poikkileikkaus on symmetrinen, mutta se koskee myös mielivaltaista poikkipintaa, kunhan yz-akselistoksi valitaan sen pääjäyhyysakselisto.

Poikkipinnassa A jännitysten kokonaismomentin pitää olla taivutusmomentin suuruinen, joten:

$$\int_A y \sigma_x dA = \int_A y E \frac{ky}{dx} dA = \frac{Ek}{dx} \int_A y^2 dA = M$$

lausekkeessa esiintyvä integraali $I_z = \int_A y^2 dA$ merkitsee poikkipinnan jäyhyysmomenttia z-akselin suhteen (ks. luku pinnan jäyhyysmomentti).

Edellisistä yhdistämällä saadaan yhtälö

$$\frac{Ek}{dx} I_z = M$$

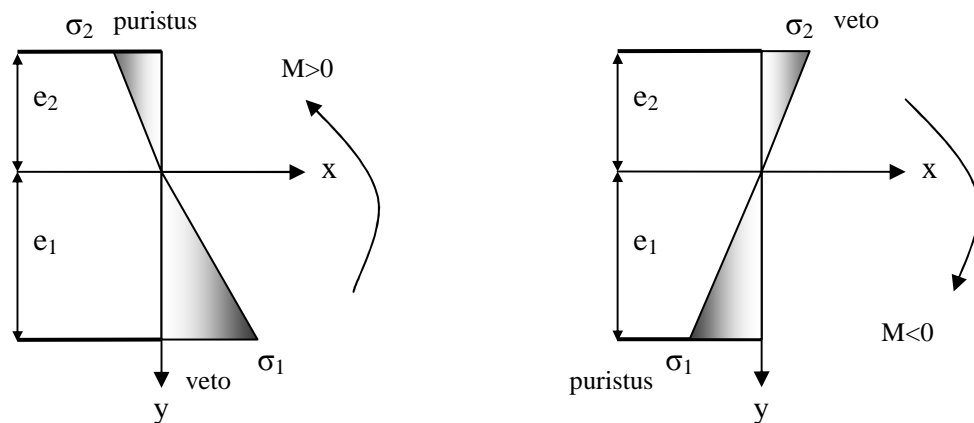
josta voidaan määrittää verrannollisuuskerroin k

$$k = \frac{M}{EI_z} dx$$

Sijoittamalla k lausekkeeseen $\sigma_x = E\varepsilon_x = E \frac{\sigma_x}{dx} = E \frac{ky}{dx}$ saadaan

$$\sigma_x = \frac{M}{I_z} y \quad (10)$$

Poikkipinnan normaalijännitys on siis y:n lineaarinen funktio ja lisäksi se on suoraan verrannollinen taivutusmomenttiin ja kääntäen verrannollinen jäyhyysmomenttiin.



Kuva 21. Taivutusmomentin suunnan vaikutus normaalijännitysjakaumaan.

Kuvasta 21 voidaan tarkastella taivutusmomentin suunnan vaikutusta jännityksiin.

Jännityksille voidaan laskea myös saavutetut ääriarvot palkin ylä- ja alapinnoissa:

$$\sigma_1 = \frac{M}{I_z} e_1 \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{I_z} (-e_2) \quad (12)$$

Näitä jännityksiä kutsutaan reunajännityksiksi. z-akselin suhteen symmetriselle poikkipinnalle on reunaetäisyys $e_1 = e_2 = e$. Reunalle määritellään taivutusvastus:

$$W = \frac{I_z}{e} \quad (13)$$

ja sen avulla reunajännitykset voidaan esittää muodossa:

$$\sigma_1 = \frac{M}{W} \quad (14)$$

$$\sigma_2 = -\frac{M}{W} \quad (15)$$

Kaavat 10, 11 ja 12 antavat jännityksen σ_x merkkeineen. Etumerkit kertovat, että kuperalle puolelle tulee positiivinen eli vetojännitys ja koveralle puolelle negatiivinen eli puristusjännitys. /6/ /9/

5.4.3 Varmuusluku

Suunnittelun lähtökohdaksi ei voida ottaa rakenteen kestäväää suurinta kuormitusta tai jännitystä. Lujuusopin laskentamallit sisältävät aina yksinkertaistuksia ja epätarkkuuksia. Valmistusmenetelmät ja käyttöolosuhteet sisältävät epävarmuustekijöitä. Rakenteen toimivuus varmistetaan käyttämällä varmuuslukua n , joka määritellään joko kuormituksen tai jännityksen avulla

$$n = \frac{F_{kr}}{F_{sall}}, \quad (16)$$

jossa F_{kr} on kriittinen kuormitus ja F_{sall} laskennassa sallittava kuormitus

$$n = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{sall}}, \quad (17)$$

missä σ_{kr} on kriittinen jännitys ja σ_{sall} on suurin sallittu rakenteessa esiintyvä jännitys.

Teräsrakenteiden suunnitteluohjeen RIL 90-1996 (SFS 3200) mukaan kriittisenä jännityksenä voidaan käyttää materiaalin myötölujuutta R_{ch} tai murtolujuutta R_{em} .

Käytettävä varmuusluvun arvo vaihtelee suunnittelukohteen mukaan. Varmuusluvun valinnassa on otettava huomioon esimerkiksi laskentatarkkuus. On

hyvä huomioida mahdolliset epätarkkuudet laskennassa ja valita varmuusluku mieluummin riittävän varmaksi. Varmuusluku ei toisaalta saa olla liian suuri, koska tällöin suuremmista rakenteista tulee materiaalin vahvuuksien mukaan kalliimpi ja mahdollisesti liian painava.

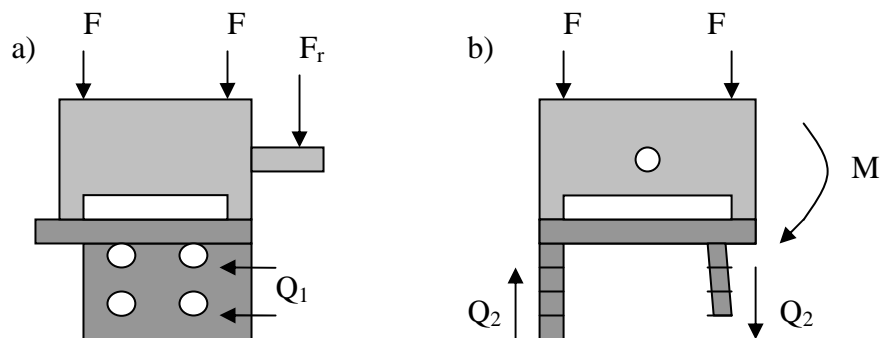
RIL 90-standardin mukaan teräsrakenteiden suunnittelussa käytetään varmuuslukuna 1,5 ja 1,3. Rakenteessa, jossa kuormitus on tavanomaista käytetään lukua 1,5. Harvinaisemmissa kuormitustapauksissa riittää luku 1,3. /6/

6 KIINNITYSKAPPALEEN LUJUUS

Suunnittelusta kiinnityskappaleesta täytyi laskea lujuus, jotta saatiin selville tuleeko se kestävänsä sellaisenaan sähkömoottorin aiheuttamat voimat.

Mopoautoon valittu sähkömoottori, joka on ABB:n valmistama oikosulkumoottori on malliltaan M2AA 112M. Pyörimisnopeus moottorilla on 1500 rpm ja painoa 29 kg:aa. Nimellismomentti 26,8 Nm ja maksimimomentti 40,2 Nm. Akselille sallittu suurin säteisvoima on 1500N. /1/

6.1 Sähkömoottorista syntyvät voimat



Kuva 22. Voima piirros.

Kuvassa 22 on hahmoteltu sähkömoottori kiinnikkeineen kahdesta suunnasta, sivulta (a) ja edestäpäin (b) katsottuna. Sivultapäin katsotussa kuvassa nähdään voimat, joita kiinnityskappaleeseen kohdistuu. Moottorin päällä olevat voimat F syntyvät moottorin omasta painosta ja voima F_r on moottorin akselille suurin sallittu säteisvoima. Voimat F ja F_r aiheuttavat näin ollen kiinnityskappaleen pulttiliitokseen leikkausvoimaa Q_1 . Akselille kohdistuvasta todellisesta säteisvoimasta ei ollut tarkkaa laskennallista tietoa, koska voiman siirtämiseen moottorilta vaihteistoon ei ollut tätä työtä tehdessä tarkempaa suunnitelmaa. Laskennassa otetaan huomioon sähkömoottorin valmistajan ilmoittama suurin

sallittu akselille kohdistuva säteisvoima, joka kerrotaan maan vetovoiman kiihtyvyydellä g .

Edestäpäin katsottuna sähkömoottorista kohdistuu sama voima F kuin sivullakin ja moottorin pyörimisestä aiheutuvaa vääntömomenttia M . Voimat F ja M aiheuttavat leikkausvoimaa Q_2 .

Laskennalliset voimat sivultapäin ovat:

Sähkömoottorin omapaino 29 kg. Paino jakautuu kahteen kiinnityspisteeseen, joten omapaino jaetaan kahdella ja kerrotaan maanvetovoima g :llä.

$$F = \frac{29kg}{2} * g = 142,196N$$

Suurin sallittu säteisvoima on F_r :

$$F_r = 1500N = 1,5kN$$

Leikkausvoima Q ja kiinnitysliitoksen yhteen pulttiin kohdistuva leikkausjännitys τ lasketaan.

Laskennalliset voimat edestäpäin:

Sähkömoottorin omasta painosta aiheutuva voima on F .

$$F = \frac{29kg}{2} * g = 142,196N$$

Sähkömoottorin pyöriessä aiheutuva vääntömomentti on M . Sähkömoottorin suurin maksimimomentti on

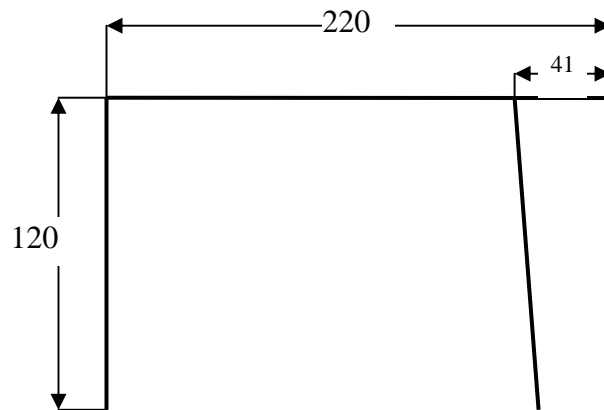
$$M = 26,8Nm * 1,5 = 40,2Nm$$

6.2 Laskutoimitukset edestäpäin

Laskenta aloitetaan selvittämällä kuvan 22 (b) sähkömoottorin aiheuttamat voimat kiinnityskappaleeseen. Laskennassa käytetään samoja menetelmiä kuin laskettaessa esimerkiksi jotain suurempaa palkkirakennetta. Tässä tapauksessa

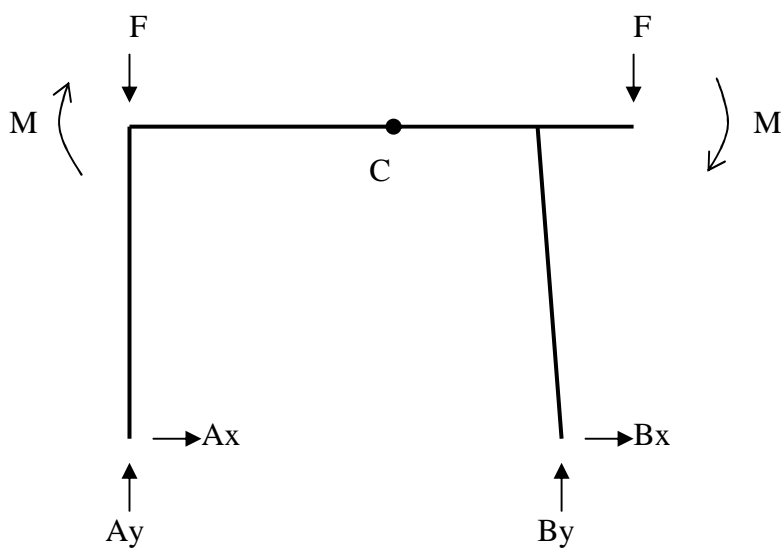
kiinnityskappale on rakenteeltaan kevyempi, mutta samat laskentamenetelmät pätevät tällaiseenkin rakenteeseen.

Aluksi piirretään kiinnityskappaleesta laskennassa tarvittava mittakuva (kuva 23).



Kuva 23. Kiinnityskappaleen mitat.

Sen jälkeen piirretään kiinnityskappaleesta vapaakappale kuva 24. Ajatellaan kiinnityskappale siten, että se on kiinnitetty pisteistä A ja B siirtymättömällä nivelliitoksella joka, sallii kappaleen kääntymistä, mutta ei liikkumista pysty- ja pituussuunnassa. Uuden kiinnityskappaleen kiinnitys tehdään pulttiliitoksella jo olevaan alkuperäiseen moottorin kiinnikkeeseen joka on tehty joustaviksi kumipuslien avulla.



Kuva 24. Vapaakappalekuva.

Kappaleen tasokehän tukireaktiot sekä leikkausvoima ja taivutusmomenttikuviot määritetään. Tasokehään avuksi otetaan piste C, jota voidaan käyttää apuna tukireaktioiden laskemisessa.

Moottorin painosta syntyvä voima F muutetaan Newtoniksi painovoiman kaavalla 18.

$F = mg$, jossa m on sähkömoottorin massa jaettuna kahdella ja g on maan vetovoiman kiihtyvyys $9,80665\text{m/s}^2$. Sijoitetaan arvot kaavaan seuraa yhtälö:

$$[F] = N = \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2} \quad (18)$$

$$F = 14,5\text{kg} * 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 142,196\text{N}$$

Momentti kohdistetaan moottorin kiinnityspisteisiin

$$M = 26,8\text{Nm} * 1,5 = 40,2\text{Nm} = 40,2 * 10^3 \text{Nmm}$$

Momentti pisteen B ympärille lasketaan. Avuksi otetaan alaindeksi, jolla kerrotaan momentin suunta. Alaindeksi + tarkoittaa suuntaa myötäpäivään ja – vastapäivään.

$$B_- = -A_y * 179\text{mm} - M + F * 179\text{mm} - F * 41\text{mm} - M = 0$$

$$\Rightarrow A_y = \frac{(142,196\text{N} * 179\text{mm}) - (142,196\text{N} * 41\text{mm}) - 40200\text{Nmm} - 40200\text{Nmm}}{179\text{mm}}$$

$$A_y = -339,54\text{N}$$

Nolla momentti apupisteen C ympärille lasketaan ja saadaan tuntematon A_x selvitettyä.

$$C_+ = M_c = A_y * 110\text{mm} + M - F * 110 - A_x * 120\text{mm} = 0$$

$$\Rightarrow A_x = \frac{(-339,54\text{N} * 110\text{mm}) + 40200\text{Nmm} - (142,196\text{N} * 110\text{mm})}{120\text{mm}}$$

$$A_x = -106,59\text{N}$$

Koko kappalesysteemistä pystyvoimat lasketaan ja saadaan selvitettyä voima B_y .

$$\uparrow A_y - 2F + B_y = 0$$

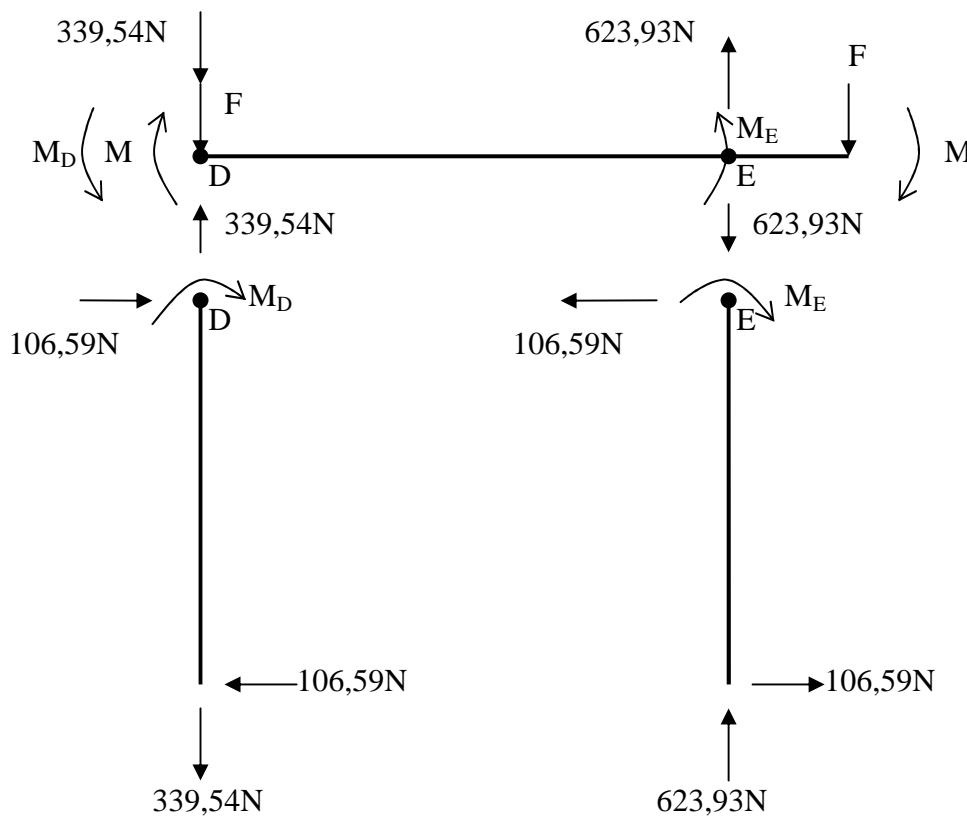
$$\Rightarrow B_y = +339,54N + 284,393N = 623,933N$$

Koko kappalesysteemin vaakavoimat lasketaan ja saadaan selvitettyä voima B_x .

$$\rightarrow Ax + Bx = 0$$

$$\Rightarrow Bx = +106,59N$$

Nyt on saatu kappalesysteemin tukireaktiot kohdissa A ja B selvitettyä. Seuraavaksi kappalesysteemi hajotetaan yksittäisiksi osiksi, joten liitoskohtiin syntyy voimien suhteen tuntemattomat pisteet D:een ja E:een. Kappaleeseen vaikuttavat voimat (kuva 25).



Kuva 25. Kappaleen voimapiirros.

Kun kappalesysteemi hajotetaan osiin, silloin liitoskohtiin D ja E täytyy tulla samansuuruiset vastavoimat kun pystyvoimat kohdissa A ja B. Vaakavoimat ovat myös samansuuruiset kohdissa D ja E kuin A ja B, koska pystykappaleissa ei ole muita vaikuttavia voimia ja tasapainoehtojen mukaan voimat ovat samansuuruiset

vastakkaiseen suuntaan. Liitoskohtiin D ja E syntyy myös momenttia. Momentit kohdissa D ja E ovat tällöin tuntemattomia, joten otetaan ne tarkisteltaviksi pisteiksi kappaleen pystyosista. Momentit lasketaan pisteisiin D ja E seuraavasti:

Lasketaan pisteen D momentti:

$$D_+ = 106,59N * 120mm + M_D = 0$$

$$\Rightarrow M_D = -12790,8Nmm$$

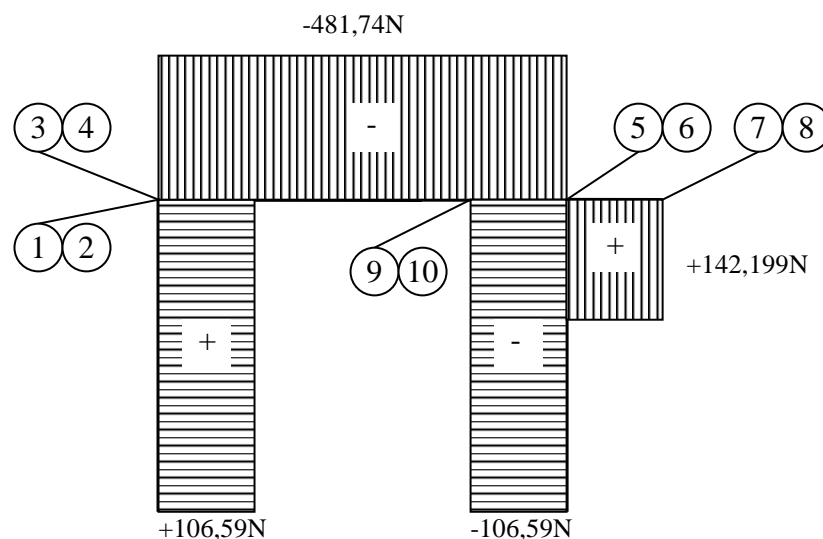
Lasketaan pisteen E momentti:

$$E_+ = -106,59N * 120mm + M_E = 0$$

$$\Rightarrow M_E = 12790,8Nmm$$

Nyt on saatu laskettua kaikki kappalesysteemiin vaikuttavat voimat. Voimapiirroksesta voidaan nähdä, että kappaleeseen syntyy suurimmat taivutusvoimat juuri sähkömoottorin kiinnityskohtiin.

Lasketaan seuraavaksi leikkausvoimat ja piirretään leikkausvoimakuvio eli ns. Q-Kuvio (kuva 26).



Kuva 26. Leikkausvoimakuvio (Q-Kuvio).

Lasketaan kappaleeseen kohdistuvat taivutusmomentit. Valitaan tarkistettaviksi kohdiksi kuvan 25 mukaan sellaiset paikat joissa kappaleeseen kohdistuu useampi voima tai voiman tyyppi muuttuu. Valitut laskentakohdat on merkitty kuvaan 26.

$$1.Mt = +106,59N * 120mm = +12790,8Nmm$$

$$2.Mt = +12790,8Nmm + M_D = 0$$

$$3.Mt = -M_D = -(-12790,8Nmm)$$

$$4.Mt = 12790,8Nmm + 40200Nmm = 52990,8Nmm$$

$$5.Mt = 52990,8Nmm - (481,732N * 179mm) = -33239,228Nmm$$

$$6.Mt = -33239,228Nmm - 12790,8Nmm = -46030,028Nmm$$

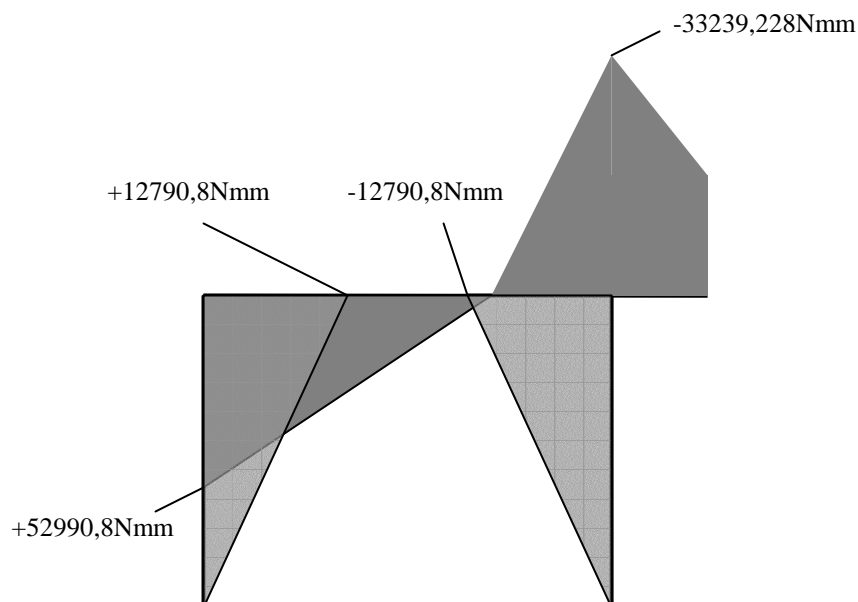
$$7.Mt = -46030,028 + (142,199N * 41mm) = -40200Nmm$$

$$8.Mt = -40200Nmm + 40200Nmm = 0$$

$$9.Mt = -106,59N * 120mm = -12790,8Nmm$$

$$10.Mt = -12790,8Nmm + 12790,8Nmm = 0$$

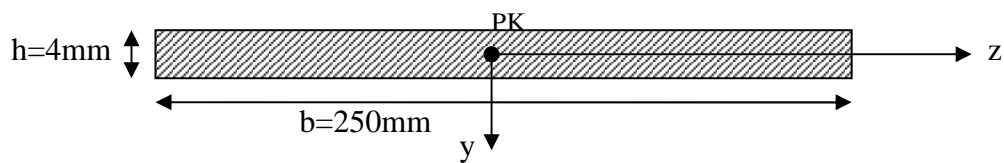
Piirretään lasketuista taivutusmomentin arvoista taivutusmomenttikuvio eli ns. M_t -Kuvio (kuva 27). Lasketut arvot sijoitetaan piirroksessa kyseiseen numeroituun kohtaan ja taivutusmomentin arvot yhdistetään viivoilla. /9/



Kuva 27. Taivutusmomenttikuvio (M_t -Kuvio).

Suurin taivutusmomentin arvo kohdistuu kiinnityskappaleen petilevyyn, joka on moottorin tasopinta kiinnitykseen. Suurin taivutusmomentin arvo +52990,8 Nmm esiintyy petilevyn ja moottorin takapetin yhtymäkohdassa (kuva 22 b ja liite1).

Sen jälkeen lasketaan kiinnikkeen petilevylle kohdistuva taivutusjännitys, koska se on suurimmillaan juuri tässä kappaleessa. Ensimmäiseksi tarkastellaan petilevyn poikkileikkauskuvaa, koordinaatisto sijoitetaan leikkauksen keskelle jolloin myös pintakeskiön (PK) paikka on keskellä (kuva 28).



Kuva 28. Petilevyn poikkileikkaus.

Lasketaan poikkileikkauksesta jäyhyysmomentti z-akselin suhteen kaavalla 8.

$$I_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{1}{12} * 250mm * 4mm^3 = 1333,333mm^4$$

taivutusjännityksen kaavaan (10).

$$\sigma_x = \frac{Mt_z}{I_z} y, \text{ sijoitetaan arvot, joissa taivutusmomentin } Mt \text{ suurin arvo saadaan}$$

kuvan 27 taivutusmomenttikuviosta ja y on matka pintakeskiöstä poikkileikkauksen reunaan.

$$\sigma_x = \frac{52990,8Nmm}{1333,33mm^4} 2mm = 79,486 \frac{N}{mm^2}$$

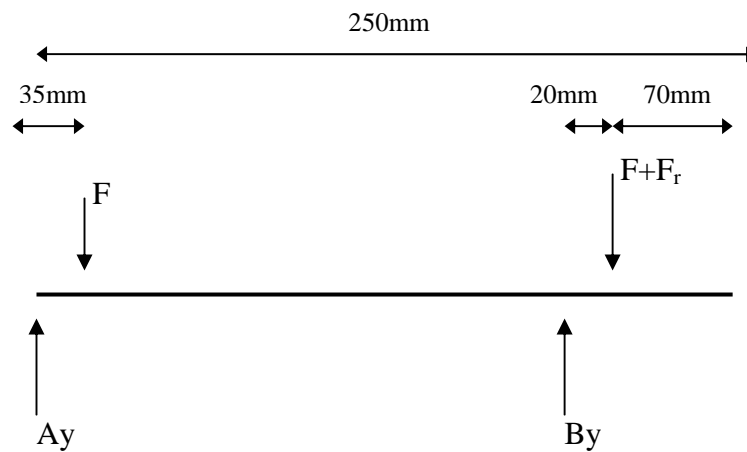
Kiinnityskappaleen valmistukseen käytettävä materiaali voisi olla esim. Ruukin valmistama Laser 250 C/S235JR. Teräksen särmättävyys on erinomaista ja myötölujuus R_{eh} on vähintään $240N/mm^2$, murtolujuus R_m vähintään $360N/mm^2$.

Sitten lasketaan teräksen kestävyys varmuusluvun avulla teräsrakenteiden suunnitteluohjeen RIL 90-1996-standardin SFS 3200 mukaisesti kaavalla 17. /6/

$$n = \frac{R_{eh}}{\sigma_{\max}} = \frac{240 \frac{N}{mm^2}}{79,486 \frac{N}{mm^2}} = 3,02$$

6.3 Laskutoimitukset sivultapäin

Laskenta aloitetaan piirtämällä kiinnityskappaleen petilevyn vapaakappalekuva (kuva 29). Lisätään vapaakappalekuvaan sähkömoottorista aiheutuvat voimien paikat, jotka nähdään kuvasta 22a.



Kuva 29. Vapaakappalekuva.

Momenti B lasketaan pisteen ympärille. Voimat saadaan jo aiemmin lasketuista arvoista eli $F=142,196N$ ja $F_r=1500N$.

$$B = -A_y * 160mm + F * 125mm - (F + F_r) * 20mm = 0$$

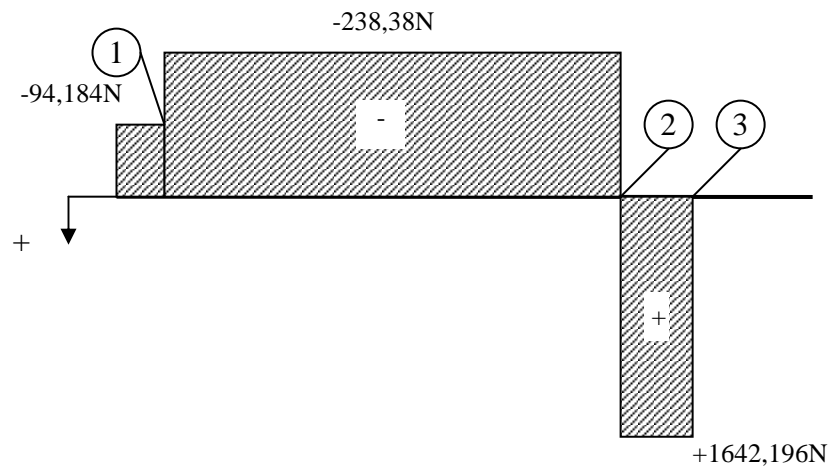
$$\Rightarrow A_y = \frac{(142,196N * 125mm) - (1642,196N * 20mm)}{160mm} = -94,184N$$

Pystyvoimista lasketaan arvo B_y

$$\uparrow A_y - F - F - F_r + B_y = 0$$

$$\Rightarrow B_y = +94,184N + 142,196N + 142,196N + 1500N = 1878,576N$$

Leikkausvoimakuvio piirretään (kuva 30).



Kuva 30. Leikkausvoimakuvio (Q-kuvio)

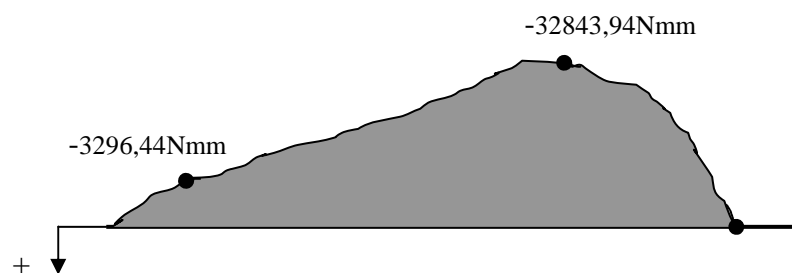
Taivutusmomentin arvot lasketaan kuvaan 30 merkittyihin kohtiin.

$$1. M_t = -94,184 \text{ N} * 35 \text{ mm} = -3296,44 \text{ Nmm}$$

$$2. M_t = -3296,44 \text{ Nmm} - 236,38 \text{ N} * 125 \text{ mm} = -32843,94 \text{ Nmm}$$

$$3. M_t = -32843,94 \text{ Nmm} + 1642,196 * 20 \text{ mm} = 0$$

Taivutusmomenttikuvio piirretään (kuva 31).



Kuva 31. Taivutusmomenttikuvio (Mt-Kuvio).

Kiinnityskappaleen kiinnityspultille kohdistuva suurin leikkausjännitys Q :n laskenta. Q lasketaan kappaleeseen kohdistuvasta suurimmasta vääntömomentista M (kuva 27). Kiinnityspulttien jakohalkaisijaksi (d) saadaan piirustuksen (Liite 1) mukaan n. 115 mm ja pulttien halkaisija on 12 mm. Pultteja on sivussa kaikkiaan neljä kappaletta. Tässä oletetaan, että kunkin pultin poikkileikkaukseen kohdistuu

yhtä suuri sädettä vastaan kohtisuora leikkausvoima, joka saadaan momenttitasapainoehdon kaavasta (18).

$$M - nQ * \frac{d}{2} = 0 \quad (18)$$

$$\Rightarrow Q = \frac{2M}{nd} = \frac{2 * 52990,8 Nmm}{4 * 115 mm} = 230,395 N$$

Saatu tulos on yhdelle pultille kohdistuva leikkausvoima. Pultille lasketaan kohdistuva leikkausjännitys kaavan (2) mukaisesti. /6/ /9/

$$\tau = \frac{Q}{A} = \frac{230,395 N}{\frac{\pi * (12 mm)^2}{4}} = 2,037 \frac{N}{mm^2}$$

7 TULOKSET

Saatujen laskentojen perusteella voidaan todeta, että sähkömoottorista aiheutuvat voimat on suhteellisen pieniä. Kiinnityskappaleen kestävydestä voidaan laskennan perusteella päätellä, että kiinnityskappale tulisi kestävänsä sellaisenaan sähkömoottorin aiheuttavat voimat.

Suurin taivutusmomentti syntyy kiinnityskappaleelle moottorin painon ja vääntömomentin yhteisvaikutuksesta. Suurin taivutusmomentti n. 53 Nm kohdistuu piirustuksessa (liite 1) merkittyyn petilevyyn. Suurimman taivutusmomentin avulla laskettaessa suurimman taivutusjännityksen tulokseksi saatiin noin 80N/mm^2 . Suurin sallittu taivutusjännitys petilevyn materiaalin myötörajaan nähden saadaan kaavaa 10 pyörittämällä seuraavasti:

$$\sigma_{sall} = \frac{Mt}{I_z} y \Rightarrow Mt_{\max} = \frac{\sigma_{sall} * I_z}{y}$$

Kaavaan syötetään σ_{sall} paikalle valitun materiaalin myötöraja R_{eh} . Tulokseksi saadaan:

$$Mt_{\max} = \frac{240 \frac{N}{mm^2} * 1333,33 mm^4}{2mm} = 159999,6 Nmm \approx 160 Nm$$

eli kestävyys on hyvällä puolella niin, kuin laskettu varmuusluku ≈ 3 kertookin.

8 KIINNITYSKAPPALEEN MUUTOKSET

Suunniteltua kiinnityskappaletta voisi muuttaa siten, että se saataisiin jäykistettyä molempiin suuntiin. Kiinnityskappaleen uudessa piirustuksessa (liite 2) etu- ja takapetiä on jatkettu pituussuunnassa niin että se on samanpituinen kuin petilevykin. Kiinnityskappaleen pätyihin ja keskelle petilevyn pohjaan lisätään jäykistelevyt. Nämä muutokset lisäävät kiinnityskappaleen lujuutta entisestään. Kyseessä on vähän materiaalia vievä kappale, joten kustannuksiin ja painoonkaan ei tulisi suuria lisäyksiä.

Kiinnityskappaleen paino ilman muutoksia on:

$$\text{Etupeti } (90\text{mm}+45\text{mm})\cdot 160\text{mm}=0,135\text{m}\cdot 0,160\text{m}=0,0216\text{m}^2$$

$$\text{Takapeti } (120\text{mm}+50\text{mm})\cdot 160\text{mm}=0,170\text{m}\cdot 0,160\text{m}=0,0272\text{m}^2$$

$$\text{Petilevy } 220\text{mm}\cdot 250\text{mm}=0,220\text{m}\cdot 0,250\text{m}=0,055\text{m}^2$$

Yhteensä kiinnityskappaleen materiaalin tarve neliöinä on $0,1038 \text{ m}^2$. Teräksen neliöpaino millin vahvuudessa levyssä on $7,83 \text{ kg/m}^2$

Lasketaan $0,1038 \text{ m}^2 \cdot 7,83 \text{ kg/m}^2 = 0,812754 \text{ kg}$. Tämä kerrotaan ainevahvuudella, joka piirustuksissa on 4 mm. Painoksi saadaan 3,25 kg. Muutokset lisäävät kokonaispainon 4,92 kg:aan.

9 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin markkinoilta ostettavan mopoauton mahdollisuuksia saada se muutettua polttomoottorikäytön sijaan sähkömoottorikäyttöiseksi. Työssä keskityttiin sähkömoottorin kiinnitysratkaisuun ja mitä asioita olisi syytä muistaa kun sähkökäyttöiseksi muutettu mopoauto halutaan muutos katsastaa tieliikenteeseen sopivaksi.

Sähkömoottorin kiinnityksessä päädyttiin käyttämään autossa olevia jo alkuperäisiä kiinnityspisteitä. Kiinnityspisteitä hyväksi käyttämällä ei tarvitse millään lailla muuttaa ja hitsailla mopoauton runkoon uusia kiinnikkeitä. Sähkömoottorin kiinnittämiseen riitti kun alkuperäisten kiinnikkeiden ja sähkömoottorin väliin tehtiin rauta johon sähkömoottori saatiin kiinnitettyä.

Kiinnitysraudan kohdalla suurin haaste oli lujuuden laskeminen siihen kohdistuvien voimien takia. Laskennalla haluttiin varmistaa suunnitellun kiinnityskappaleen kestäminen. Laskennassa käytin apuna statiikan ja lujuusopin opintoja ja niihin liittyvää kirjallisuutta. Ponnistelujen ja ahkeran mietinnän jälkeen alkoi näkyä ns. valoa tunnelin päässä ja löytyi selvä menetelmä, jolla lujuuden sain laskettua.

Muutoksastamiseen liittyvissä kysymyksissä oli hieman hankaluuksia saada selkeitä vastauksia katsastuskonttorilta. Katsastuskonttorin insinöörit eivät uskaltaneet ottaa vastuuta siitä, miten asioissa tulisi menetellä. Soittaessani Trafinitiseen ajoneuvohallintokeskuksen tekniseen neuvontaan sain kysymyksiini vastauksia. Vastausten perusteella tuleva mopoauton muutoksastaminenkaan ei pitäisi tuottaa suurempia ongelmia, kunhan pysytään jo olemassa olevan lainsäädännön puitteissa

LÄHDELUETTELO

- /1/ ABB Sähkömoottorin tekniset tiedot. [viitattu 14.2.2010] saatavilla www-muodossa:
<URL:<http://www.abb.fi/product/seitp322/6d46d8c65eb9d173c125744f003f527f.aspx>>
- /2/ Ajoneuvohallintokeskuksen ajokorttiluokat. [viitattu 10.12.2009] saatavilla www-muodossa:
<URL:http://www.ake.fi/AKE/Ajokortit_ja_tutkinnot/Ajokortit/Ikäv_aatimukset+ajokortin+myöntämiselle.htm>
- /3/ Ajoneuvohallintokeskuksen tilastot ajoneuvokannasta. [viitattu 4.1.2010] saatavilla www-muodossa: <URL:
<http://www.ake.fi/AKE/Tilastot/Ajoneuvokanta/>>
- /4/ Euroopan Parlamentin ja neuvoston direktiivi. [viitattu 3.1.2010] saatavilla www-muodossa: <URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31992L0061:FI:NOT>>
- /5/ Katsastajan käsikirja 2009. [viitattu 10.12.2009] saatavilla www-muodossa:<URL:<http://www.ake.fi/NR/rdonlyres/65BD13FA-230F-4B6E-AD37-68B1D2FB1E8B/0/KatsastajankäsikirjaVersio20.pdf>>
- /6/ Lujuusopin perusteet 2004. Tampere. Pressus Oy.
- /7/ Mopoauto valmistajan teknillistä tietoa. [viitattu 20.1.2010] saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.aixam.co.uk>>
- /8/ Peltokangas, Tuomo, tekninen neuvoja, liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Helsinki, puhelinhaastattelu.
- /9/ Statiikka 2005. Tampere. Pressus Oy.
- /10/ Valtioneuvoston laki autoverosta. [viitattu 7.1.2010] saatavilla www-muodossa:<URL:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19941482>>

LIITELUETTELO

- Liite 1. Sähkömoottorille suunnitellun kiinnityskappaleen piirustus.

- Liite 2. Sähkömoottorin kiinnityskappaleen piirustus, jossa lisättynä ehdotetut jäykisteet.

