

Antti Ruokolainen

Kevytajoneuvon voimansiirto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

14.10.2013

Tekijä Otsikko	Antti Ruokolainen Kevytajoneuvon voimansiirto
Sivumäärä Aika	39 sivua 14.10.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Konetekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaaja	Yliopettaja Pekka Hautala
Insinöörityön aiheena on sähköavusteisen poljettavan kevytajoneuvon mekaanisen voimansiirron suunnittelu sekä toteutus tilaajayritykselle. Tarkoituksena työlle oli suunnitella toteutettavissa oleva voimansiirto ja lopulta prototyypin rakentamisen kautta mahdollistaa ajoneuvon liikkuminen. Työssä tarkastellaan poljettavan kevytajoneuvon mekaanisen voimansiirron mahdollisia toteutuksia, ratkaisuja sekä ensimmäisen prototyypin rakentamista ja lopputulosta. Työ on eritelty osakokonaisuuksiin, joissa käydään läpi mahdollisia toteutustapoja sekä komponentteja. Voimansiirtokokonaisuus koostuu omavalmisteisista ja polkupyöräosista sekä mekaniikan peruskomponenteista. Valittujen ratkaisujen jälkeen käydään läpi prototyypin rakentaminen kuvien avulla havainnollistaen päätyen lopulta lopputulosten tarkasteluun. Työn lopputuloksena syntyi ensimmäisen prototyypin toimiva voimansiirtokokonaisuus.	
Avainsanat	Voimansiirto, poljettava, kevytajoneuvo, polkupyörä

Author Title	Antti Ruokolainen Power Transmission for Light Vehicle
Number of Pages Date	39 pages 14 October 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Machine Automation
Instructor(s)	Pekka Hautala, Principal Lecturer
The objective of this Bachelor's thesis was the design and production of a mechanical power transmission system for an electrically assisted pedal-driven light vehicle. The aim was to design a technically feasible power transmission system, and eventually, to allow the movement of the vehicle throughout the production. The thesis examines the possible mechanical implementations, solutions, manufacturing and the results of the first prototype's power transmission for a pedal-driven light vehicle. This thesis is divided into units, in which the possible implementations and components are reviewed. The power transmission consists of self-made parts, bicycle parts and mechanical basic components. Furthermore, the suggested solutions are followed by an illustrated examination of the production of the first prototype, which results in the examination of the final outcome. As a result, the first prototype's functional transmission system was created.	
Keywords	Transmission, pedal, light vehicle, bicycle

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoitteet	2
2	Eri ratkaisuvaihtoehdot ja niiden vertailu	4
2.1	Vetotapa	4
2.2	Polkutapa	5
2.3	Voimansiirtovaihtoehdot	6
2.3.1	Ketju	7
2.3.2	Hammashihna	9
2.3.3	Kardaani	11
2.4	Akselisto	13
2.4.1	Kiinteä taka-akseli	13
2.4.2	Vetoakseli yksisuuntalaakereilla	13
2.4.3	Tasauspyörästö	15
2.5	Voimansiirtolinjat	17
2.5.1	Polkimilta kaksi linjaa väliakselille, josta yksi linja taka-akselille	17
2.5.2	Polkimilta kaksi linjaa väliakselille, jonka päistä kaksi linjaa vetäville pyörille	18
2.5.3	Polkimilta kaksi linjaa taka-akselille	19
2.6	Vaihteistot	20
2.6.1	Napavaihde	20
2.6.2	Ketjuvaihde	21
2.6.3	Muut vaihteistototeutukset	21
2.7	Sähköavusteisuus sekä peruuttaminen	22
3	Ratkaisut	24
4	Prototyypin suunnittelu, mitoitus ja toteutus	27
4.1	Yleistä	27
4.2	Ensiöveto	28
4.2.1	Poljinpalkit	28
4.2.2	Poljinkeskiö, kammet sekä polkimet	29
4.3	Vaihteistot sekä väliakseli	30
4.3.1	Vaihteet, vaijerit ja valitsimet	30
4.3.2	Akselit	32

4.4	Toisio veto	34
4.4.1	Takapyörien konstruktiot sekä ripustukset	35
4.5	Välityssuhteet	37
4.6	Osat ja hinnat	38
5	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet	39
	Lähteet	40

1 Johdanto

1.1 Tausta

Insinöörityön aiheena oli suunnitella, sekä rakentaa sähköavusteisen poljettavan kevytajoneuvon prototyypin mekaaninen voimansiirto. Tilaajayrityksenä projektille oli Tamperelainen Rideascout. Työ oli projektiluonteinen ja mukana oli Rideascoutin työntekijöiden lisäksi Metropolia AMK:n henkilökuntaa sekä neljä insinööriopiskelijaa. Kaikki opiskelijat olivat projektissa mukana tekemässä insinöörityötään. Ajoneuvon osa-alueet jaettiin voimansiirtoon, sähköavusteisuuteen, runkoon sekä ohjaukseen ja ajodynamiikkaan. Työ aloitettiin tammikuussa 2013.

Kaupunkiliikkuminen erityisesti maailman suurkaupungeissa on tänä päivänä ruuhkaista sekä saastuttavaa. Eräänä ratkaisuna voidaan pitää polkemisen sekä sähköavusteisuuden yhdistävää kevytajoneuvoa, jossa yhdistyy ympäristöystävällisyys sekä autoa pienempi koko.

Ajoneuvoa lähdettiin suunnittelemaan pitäen silmällä ajomukavuutta, tehokkuutta sekä käytännöllisyyttä. Käytännössä nämä tarkoittivat ajoneuvon päälle asetettavaa katetta, jolla saadaan suojattua sisätilat esim. sateelta, polkemisen helppoutta sekä voimansiirron tehokkuutta mekaanisten ratkaisujen sekä sähkömoottoreiden avulla sekä tilankäyttöä kuorman tai henkilön kuljettamisen mahdollistamiseksi.

Projektissa käytettiin avointa lähestymistapaa uusiin ideoihin. Tavoitteena oli pyrkiä ennakkoluulottomaan asenteeseen uusia ideoita kohtaan sekä mahdollisuuksien mukaan välttää ideoiden ja ratkaisujen pohjautumista jo olemassa oleviin teknisiin toteutuksiin.

Työssä tarkastellaan poljettavan kevytajoneuvon mekaanisen voimansiirron mahdollisia toteutuksia, ratkaisuja sekä ensimmäisen prototyypin lopputulosta. Työssä käydään läpi kaikki voimansiirron osat. Ajoneuvoprojekti aloitettiin nollapisteestä ja tekstissä edetään ideoista suunnitelmiin sekä lopulta itse prototyypin valmistumiseen.

1.2 Tavoitteet

Tavoitteena oli tutkia ja suunnitella voimansiirron toteutusta poljettavaan kevytajoneuvoon. Kevytajoneuvolla tarkoitetaan tässä yhteydessä polkupyörään rinnastettavaa nelipyöräistä ajoneuvoa.

Voimansiirrolla tarkoitetaan kokonaisuutta, jolla polkijan tekemä työ mahdollistaa vetävän tai vetävien pyörien avulla ajoneuvon liikkumisen. Kokonaisuus koostuu osin ostopuolista sekä osin omavalmisteisista osista.

Alkuperäisiksi ajoneuvon prototyypin kriteereiksi asetettiin voimansiirron osalta seuraavat:

- 2 polkijaa
- liikkeellelähdön helppous sekä huippunopeus 25 km/h
- optimointi tasamaa-ajoon sekä polkemisen keveys
- mahdollisimman alhainen hinta
- huollon helppous sekä varaosien saanti.

Ajoneuvon ulkomuoto sekä tekniikka tahdottiin automaaisiksi ja poljentatavasta tahdottiin nojapyörämainen. Nojapyörällä tarkoitetaan kulkuvälinettä, jossa polkija on taaksenojaavassa asennossa polkimien ollessa likipitään penkin tasolla edessä. Ajoneuvon tuli olla kahden ihmisen poljettava ja mahdollistaa kuorman taikka ylimääräisen henkilön kuljetus.

Polkemisen tuli olla mahdollisimman kevyttä ja mahdollistaa esim. hikoilematta töihin pääseminen. Välityssuhteille suuntaa antoivat kriteerit liikkeellelähdön helppoudesta sekä huippunopeudesta.

Ajoneuvon kokonaishinta pyrittiin pitämään mahdollisimman alhaisena jo prototyyppi-vaiheessa. Tämä vaikutti osaltaan jossain määrin komponenttivalintoihin sekä erityisesti voimansiirtotapaan.

Ajoneuvon tuli olla mahdollisimman helposti korjattavissa myös huonoissa elinoloissa, jolloin toimintavarmuus oli suuressa roolissa. Tämän johdosta tuli perehtyä erilaisiin toteutustapoihin sekä komponentteihin. Pääajatuksena korjattavuudelle oli mahdollisten vikatilanteiden varalta pyrkiä ratkaisuihin, jotka olisivat heikommissakin elinolosuhteissa mahdollisia toteuttaa. Tällä tarkoitetaan varaosien saatavuutta sekä yleisesti ottaen monimutkaisten rakenteiden välttämistä. Tämä vaikutti komponenttien valintoihin sekä voimansiirtolinjojen sijainteihin. Ajoneuvo tuli pitää mahdollisimman kevyenä, joten mekaanisessa voimansiirrossa pyrittiin suosimaan mahdollisimman kevyitä sekä tämänkin osalta yksinkertaisia ratkaisuja.

Lopullisena tavoitteena työllä oli saada aikaan toimiva voimansiirtokokonaisuus, joka mahdollistaisi ensimmäisen prototyypin liikkumisen sekä testaamisen.

2 Eri ratkaisuvaihtoehdot ja niiden vertailu

Ratkaisuvaihtoehtoja ryhdyttiin tutkimaan aluekokonaisuus kerrallaan. Jokaisesta kokonaisuudesta tuli kerätä tietoa sekä esittää erilaisia mahdollisia tapoja toteuttaa kukin aihe.

2.1 Vetotapa

Aluksi pohdittavana oli vetotapa. Vaihtoehtoisia ratkaisuja olivat seuraavat:

1 Etuveto

Etuvetolla tarkoitettiin yhden tai molempien kääntyvien etupyörien vetoa. Vaihtoehdossa ongelmaksi muodostui teknisesti vaikeahko toteutus etupyörien kääntyessä. Vaihtoehtoa rajasi alkuunsa myös kriteeri edullisuudesta sekä keveydestä.

2 Takaveto

Takavetoinen vaihtoehto vaikutti alun perin toteutuskelpoiselta sekä luonnolliselta vaihtoehdolta. Pohdittavaksi jäi jäykän taka-akselin vaikutus kaarroksissa ulomman pyörän kulkiessa pidemmän matkan ja tätä myötä tasauspyörästäön tarve.

Takavetoa pohdittiin myös ratkaisuna, jossa veto kohdistuisi yhdeltä poljinyksiköltä ainoastaan toiseen takapyörään.

3 Neliveto

Nelivetovaihtoehdon tarkoituksena oli välittää mekaaninen veto takapyörille, ja toteuttaa etupyörien veto napamoottoreilla. Sekä etu- että takavedon mekaaninen yhdistäminen ei ollut tarkoituksenmukaista.

2.2 Polkutapa

Ajoneuvoa suunniteltiin joko vierekkäin tai lomittain poljettavaksi kahdelle polkijalle. Lomittaista ratkaisua mietittiin tapauksessa, jossa ajoneuvon kokonaisleveys olisi tahdottu mahdollisimman kapeaksi. Yhteisellä päätöksellä päädyttiin vierekkäin poljettavaan vaihtoehtoon. Lain mukaan polkupyörään rinnastettavan ajoneuvon eli useampi-pyöräisen polkupyörän maksimileveys on 1250 mm (1, 28 §).

Ideatasolla käytiin läpi myös erikoisempia vaihtoehtoja, kuten käsin pyörittämistä sekä heilurimaisen, edestakaisen liikkeen hyväksikäyttöä, mutta näistä luovuttiin tarkemman perehtymisen jälkeen.

Potentiaalisiksi vaihtoehtoiksi jäivät perinteiset polkupyörämaiset keskiön ympäri poljettavat polkimet sekä kuvassa 1 luonnosteltu z-poljinakseli. Variaatioiden merkittävimmät erot liittyivät ketjulinjojen haluttuihin sijainteihin.

- Perinteisessä polkupyörämaisesä poljinkeskiössä kiinni olevissa polkimissa ketjulinja kulkee polkijan jalkojen välistä kuljettajan ali.
- Z-poljinakselitoteutuksessa ketjulinja kulkee joko ajoneuvon sivussa taikka keskellä. Pyörivän liikkeen hyödyntäminen sekä ulosotto tapahtuvat akselin päistä.



Kuva 1. Luonnos Z-poljinakselista

2.3 Voimansiirtovaihtoehdot

Tässä luvussa käsitellään voimansiirron eri tapoja. Potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi jäivät ketju, hammashihna sekä kardaani. Ketju sekä hammashihna voidaan kategorisoida muotosulkeisiin lenkkivaihteisiin.

Muotosulkeisilla lenkkivaihteilla tarkoitetaan koneenosia, jotka välittävät liikettä kahden tai useamman akselin välillä käyttäen hyväksi lenkkivaihteen geometrian avulla synnytettyä vetojännitystä. Muotosulkeisiin lenkkivaihteisiin kuuluvat ketju- ja hammashihnavaihteet. (2, s. 394.)

Kardaaniratkaisulla tarkoitetaan akselien sekä kulmavaihteiden muodostamaa voimansiirtokokonaisuutta.

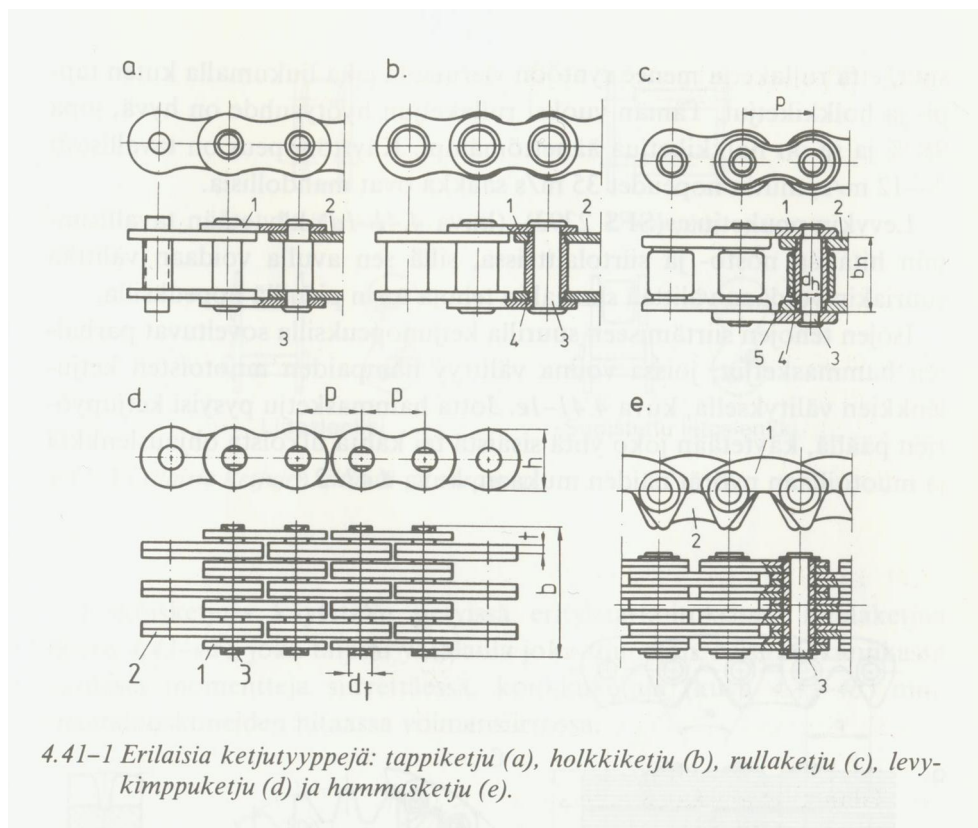
Hyötysuhteella tarkoitetaan mekanismin tehokkuusastetta. Kolmelle voimansiirtotavalle on annettu kirjallisuudesta löytyvät hyötysuhteet. Todellisuudessa käyttö, lika sekä huollon puute heikentävät hyötysuhdetta. Suojaamalla voimansiirto voidaan saavuttaa parempi kesto hyötysuhteen laskematta.

2.3.1 Ketju

Ajoneuvon ollessa polkupyörään rinnastettava, käsitellään ainoastaan polkupyöräkäyttöön soveltuvia, tai suunniteltuja standardirullaketjuja.

Kuvassa 2 tarkastellaan ketjujen kehitystä rullaketjuksi. Tappiketju (a) on yksinkertaisin ja halvin ketjutyyppe. Sivulevyt (1 ja 2) on laakeroitu suoraan tappien (3) päihin, minkä johdosta ketju kuluu nopeasti. Holkkiketjussa (b) sisälenkit (2) on kiinnitetty toisiinsa holkeilla ja ulkolevyt (1) terästapeilla (3). Tällä saadaan aikaan runsas laakeripinta, josta seuraa pieni pintapaine ja hidas kuluminen.

Rullaketju (c) on holkkiketjusta edelleen kehitetty ketjutyyppe. Rullaketjussa on holkkiketjun holkki (4) ympäröity karkaistulla ja hiotulla teräsrullalla (5). Holkin ja rullan välinen rako täyttyy voiteluöljyn muodostamalla kalvolla kapillaari-ilmion takia, minkä johdosta kitka olennaisesti pienenee. Kitkan pieneminen aiheutuu siitä, että rullaketju menee ryntöön vierimällä eikä liukumalla kuten tappi- tai holkkiketjut. Tämän vuoksi rullaketjun hyötysuhde on jopa 98 % ja se on holkkiketjua äänettömämpi. (2, s. 395.)



Kuva 2. Tappi-, holkki- ja rullaketjun erot (2, s. 395)

Rullaketjun merkinnässä ensimmäisellä luvulla tarkoitetaan ketjun jakoa, toisella ketjun leveyttä. Polkupyöräkäytössä standardiksi on muodostunut $\frac{1}{2}$ "-n ketjujako. Leveys vaihtelee riippuen vaihteistosta sekä vaihteiden lukumäärästä pääosin $\frac{1}{8}$ "-n ja $\frac{3}{32}$ "-n välillä.

Ketjun kestoikä määräytyy yksinomaan sen kulumisen mukaan. Kulumista tapahtuu ketjulenkeissä tapin ja holkin välissä. Kuluminen on sitä nopeampaa, mitä huonompi voitelu, suurempi ketjun vetovoima ja mitä nopeampi käyttö. Ketjukäytön optimikestoikä saavutetaan järjestämällä asianmukainen voitelu, jälkikiristysmahdollisuus sekä ketjupyörien linjaus. (3)

Rullaketjuvälityksen hyötysuhde on ihanteellisissa oloissa 0,98 (4, s. 571).

Ketjupyörät

Ketjupyörien valmistus tapahtuu yleensä koneistamalla hampaat joko hitsaamalla, valamalla tai muovaamalla tiettyyn aihioon. Materiaali voi olla rakenneterästä, valurautaa tai vaativissa käyttöoloissa hiiletysterästä tai teräsvalua. Tarvittava koneistustarkkuus riippuu ketjun nopeudesta: hitaille käyttönopeuksille riittää varsin vaatimatonkin valmistustarkkuus, mikä parantaa olennaisesti varaosien saantia kehittymättömissä oloissa. (2, s. 398.)

Ketju on yleisin poljettavien ajoneuvojen voimansiirtotapa, joka on säilyttänyt asemansa jo yli 100 vuoden ajan. Ketjukäytössä vaihteistovaihtoehtoina ovat yleensä napavaihde sekä ketjuvaihde.

Edut

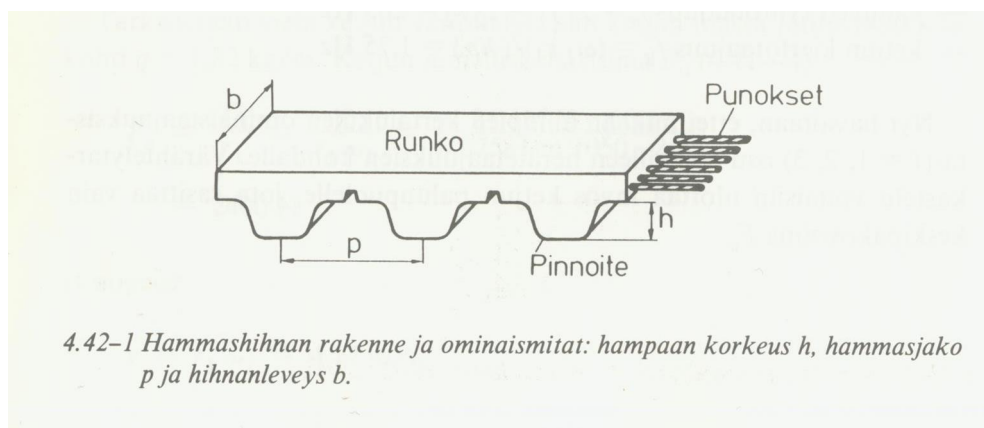
- Hinta
- Paino
- Välityssuhteiden helppo muuttaminen
- Tuttu ja helposti saatavissa myös ”kolmannessa maailmassa”
- Toimintavarmuus

Haitat

- Likaava
- Polkupyörämäinen
- Huollon tarve voitelun ja venymisen suhteen

2.3.2 Hammashihna

Hammashihnaa voidaan pitää ketju- ja hihnavälityksen välimuotona. Voima välittyy muotosulkeisesti hihnan sisäpuolisen (kuva 2) ja hihnapyörän ulkopuolisen hammas-
tuksen välillä, mutta rakenteeltaan hammashihna on tyypillinen hihna (4, s. 604). Hammashihnat ovat parhaimmillaan silloin, kun niitä käytetään suurilla nopeuksilla mutta pienillä tehoilla. (5, s. 243.)



Kuva 3. Hammashihnan rakenne (2, s. 414)

Hammashihna pyrkii vaeltamaan sivusuunnassa riippumatta hihnapyörien hyvästäkin linjauksesta. Tästä johtuen ainakin yksi hihnapyöristä varustetaan ohjauslaipoin. (4, s. 606.)

Hammashihnakäyttö on harvinainen ratkaisu polkupyörätoteutuksissa ja rajattiin pois suunnitelmista melko suoralta kädeltä yhteisellä päätöksellä. Moottoripyörissä käytetään jonkin verran. Ongelmana polkupyöräkäytössä on hidas pyörimisnopeus, johon hammashihnaa ei ole suunniteltu. Hammashihnakäytössä myös hihnan vakiona pysyvä pituus rajoittaa välityssuhteiden muutosta.

Hammashihnaa voidaan pitää tulevaisuudessa varteenotettavana vaihtoehtona, sillä kehitystä tapahtuu materiaalien ja toteutustekniikoiden osalta sekä valmistajia on useita: mm. Gates, Continental ja Habershtock Mobility.

Hammashihnan hyötysuhde on 0,93–0,98 (4, s. 607).

Vaihteistovaihtoehtona hammashihnalla on yleensä napavaihte.

Edut

- Massasta erottuvuus
- Paino
- Likaamattomuus, johtuen voitelutarpeen poissaolosta

Haitat

- Välityssuhteiden muuttaminen
- Huollon toteutus sekä varaosien heikko saatavuus huonoissa elinoloissa

2.3.3 Kardaani

Kardaanin käyttöä pohdittiin potentiaalisena vaihtoehtona ajoneuvoon. Kardaanitoteutus koostuu käytännössä kulmavaihteista sekä itse akselist. Kardaani on melko harvinaisen polkupyöräkäytössä. Perinteisestä polkupyöräkäytöstä poikkeavissa tilanteissa ongelmaksi muodostuu usein hinta, joka koostuu kulmavaihteiden hinnoista sekä suurista lukumääristä.

Kulmavaihteella tarkoitetaan kartiohammasvaihdetta. Kartiohammaspyöräparin tärkein tehtävä on saada akselit risteävään asemaan toisiinsa nähden. Akselien välinen kulma on lähes poikkeuksetta 90° . (2, s. 295.)

Markkinoilla on myös valmiita kaupallisia kardaanitoteutuksia perinteiseen polkupyöräkäyttöön, mm. taiwanilaisen Samagagan tuotteet. Tällöin voimansiirtolinja on todella yksinkertainen, kun ensimmäinen kulmavaihde toimii samalla polkimien keskiönä. Tästä suora akseli normaalisti kulkee rungon yhteydessä tai sisällä melko lähellä olevaan takapyörän yhteyteen, jossa toinen kulmavaihde pyörittää yleensä vaihteiston kautta takapyörää.

Kardaanivälityksessä kulmavaihteiden hyötysuhde laskettuna hammasvaihteena 0,94–0,98 (4, s. 607). Kulmavaihteet ovat itsessään suojattuja ulkoiselta liialta.

Kardaanikäytössä vaihteistovaihtoehtona on yleensä ainoastaan napavaihde.

Edut

- Huoltovapaus
- Massasta erottuvuus
- Likaamattomuus

Haitat

- Hinta
- Paino
- Käytännössä kiinteä välityssuhde
- Heikko huollettavuus vikatilanteissa

2.4 Akselisto

Pohdittavana oli myös akseliston toteutus tilanteessa, jossa kahdelta poljinyksiköltä saadaan voima vetävälle tai vetäville pyörille sekä mahdollisen tasauspyörästön tarve. Tässä otettava huomioon, että ulompi pyörä kulkee tai pyrkii kulkemaan kaarroksessa pidemmän matkan kuin sisempi. Vetävälle akselille välitetään voima polkimilta joko ketju- tai kardanivälityksellä.

Tilankäyttöratkaisuja suunniteltaessa harkittiin myös taka-akselin siirtoa pois takapyörien välistä, jolloin tilaa vapautuisi tarpeen mukaan kuljetus- tai matkustuskäyttöön.

2.4.1 Kiinteä taka-akseli

Kiinteällä taka-akselilla tarkoitetaan vetävien pyörien välillä sijaitsevaa yhtenäistä akseliä, joka jakaa polkimilta tulevan väännön yhtäläisesti molemmille vetäville pyörille.

Edut

- Helppo valmistaa
- Edullinen
- Lähes huoltovapaa

Haitat

- Heikko kääntymään

2.4.2 Vetoakseli yksisuuntalaakereilla

Vapaakytkin eli yksisuuntalaakeri on laakeri, jonka tarkoituksena on sallia vapaa pyöriminen ainoastaan toiseen suuntaan ja samalla mahdollistaa vääntömomentin siirto toiseen pyörimissuuntaan. Vapaakytkimen toteutustapoina on esim. rullakytkin ja kiertokiilakytkin. (5, s. 293.)

Ratkaisussa molemmilta polkijoilta tuleva vääntö jaetaan yhtenäiselle akselille, jonka päissä sijaitsevat yksisuuntalaakerit välittävät vedon vetäville pyörille. Ideana saattaa kumpikin pyörä pyörimään joko akselin kanssa samaa nopeutta tai nopeammin.

Edut

- Helppo valmistaa ja toteuttaa
- Kääntyminen tilanteessa, jossa ei poljeta
- Akseli mahdollista sijoittaa myös muualle kuin takapyörien väliin

Haitat

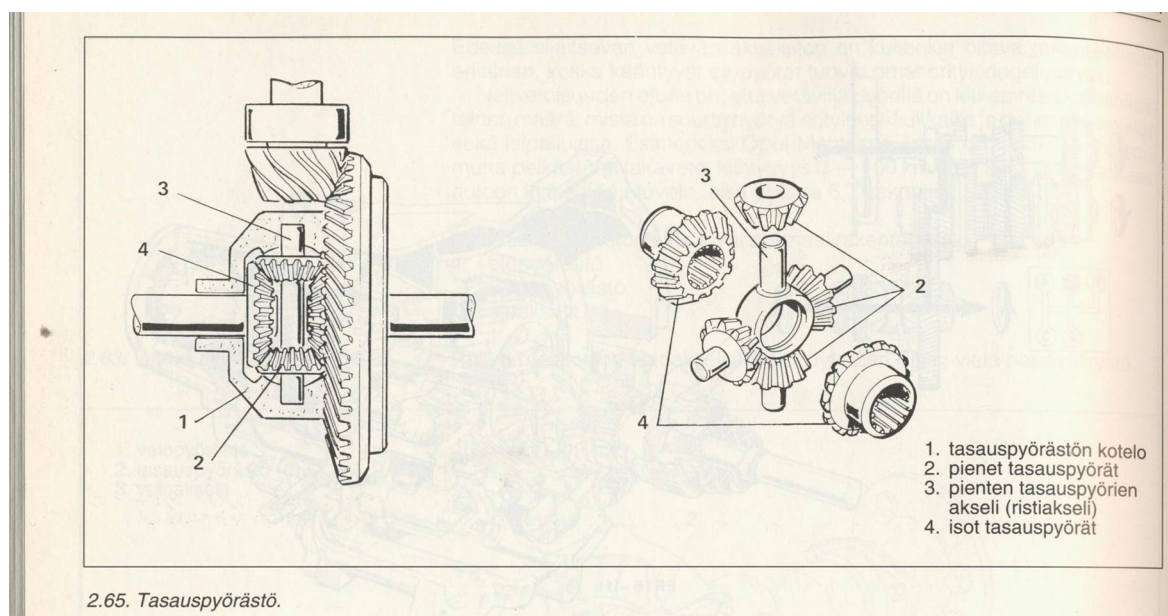
- Polkiessa käänöksessä epäoptimaalisesti veto sisemmällä pyörällä

2.4.3 Tasauspyörästö

Tasauspyörästöllä tarkoitetaan mekanismia, jonka tehtävänä on jakaa polkimilta tuleva vääntömomentti kahdelle akselille halutussa suhteessa sekä akselien pyörimisnopeuden tasaaminen niiden pyörimisvastuksien mukaisesti (6, s. 553).

Tasauspyörästön toiminta tiivistettynä

- Veto kohdistuu kartiohammasvaihteen kautta lautaspyörään, joka pyörittää kuvassa 4 kuvattua kokonaisuutta.
- Suoraan ajettaessa molemmat vetävät pyörät pyörivät samaa nopeutta, jolloin pienet tasauspyörät (2) eivät pyöri.
- Kaarteessa ulompi pyörä pyörii nopeammin, jolloin isot tasauspyörät (4) pyörivät eri nopeuksilla. Tällöin pienet tasauspyörät pyörivät akseliensa ympäri veto-akselien nopeuserojen kasvaessa. Isojen tasauspyörien nopeuksien keskiarvo on sama kuin lautaspyörän (7, s. 204).



Kuva 4. Tasauspyörästön havainnekuva (7, s. 204)

Markkinoilla on tarjolla kaupallisia valmiita ratkaisuja poljettavien ajoneuvojen tasauspyörästön toteuttamiseksi. Esimerkiksi, aikaisemminkin mainittu Samagaga valmistaa

poljettaviin ajoneuvoihin tasauspyörästäjä. Eräänä vaihtoehtona harkittiin myös mikro-auton tai vastaavan kevyen ajoneuvon tasauspyörästöä.

Edut

- Polkiessa optimaalinen kääntyminen

Haitat

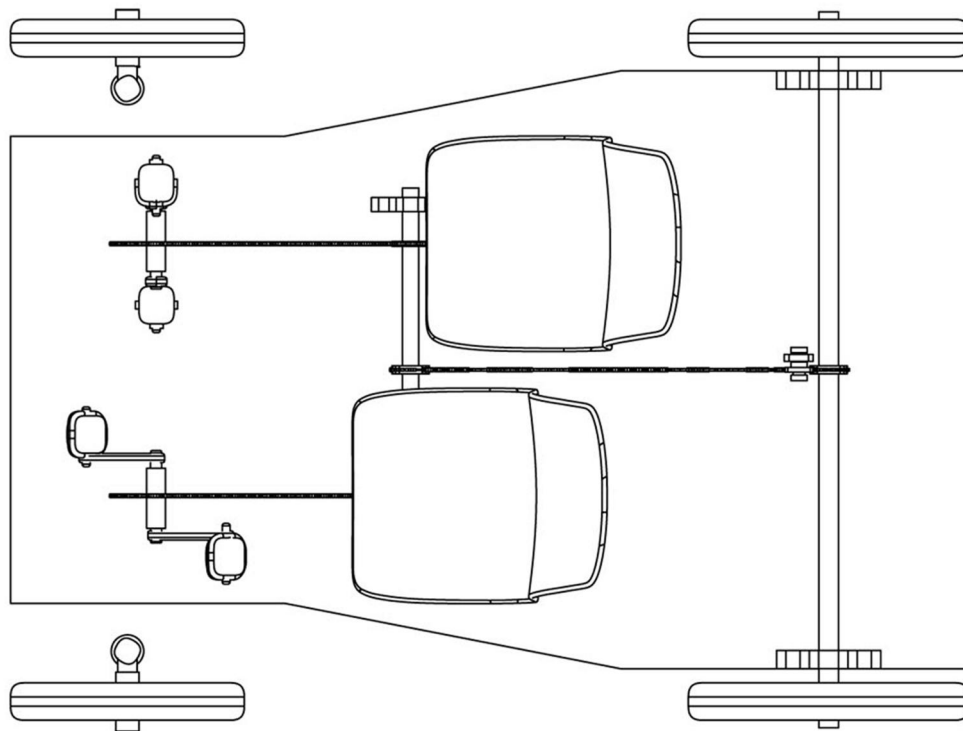
- Hinta
- Sijoitus ainoastaan vetävien pyörien välille

2.5 Voimansiirtolinjat

Edellä mainittujen seikkojen perusteella ryhdyttiin suunnittelemaan mahdollisia voimansiirtolinjoja polkimilta vetäville pyörille. Vaihtoehtoisia toteutustapoja suunniteltiin useita, joista päätettiin ottaa tarkempaan käsittelyyn kolme potentiaalisinta. Kaikissa vaihtoehtoissa toteuttamistapoina pidettiin joko ketjua tai kardaania.

2.5.1 Polkimilta kaksi linjaa väliakselille, josta yksi linja taka-akselille

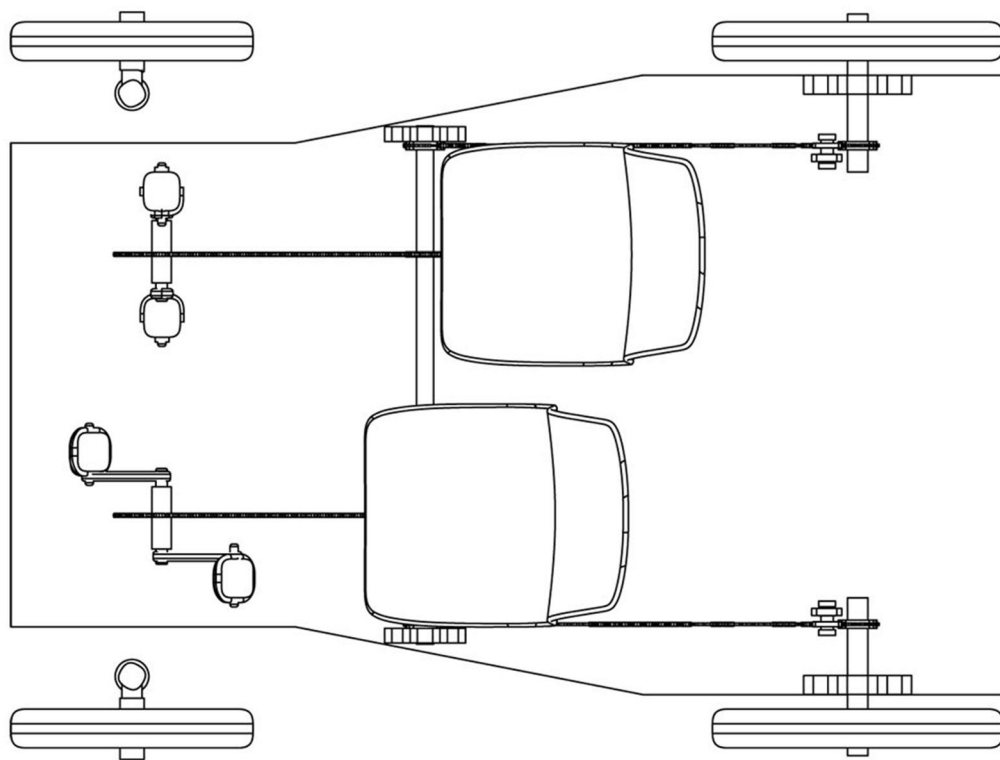
Kuvassa 5 esitetyssä ideassa polkimilta tulevat linjat yhdistyisivät ajoneuvon keskellä olevan väliakselin kautta yhdeksi linjaksi, joka yhdistyisi taka-akselille. Etuna on se, että vaihtoehto mahdollistaisi kaupallisen tasauspyörästäön käytön.



Kuva 5. Voimansiirtolinjaidea 1 ylhäältä kuvattuna

2.5.2 Polkimilta kaksi linjaa väliakselille, jonka päistä kaksi linjaa vetäville pyörille

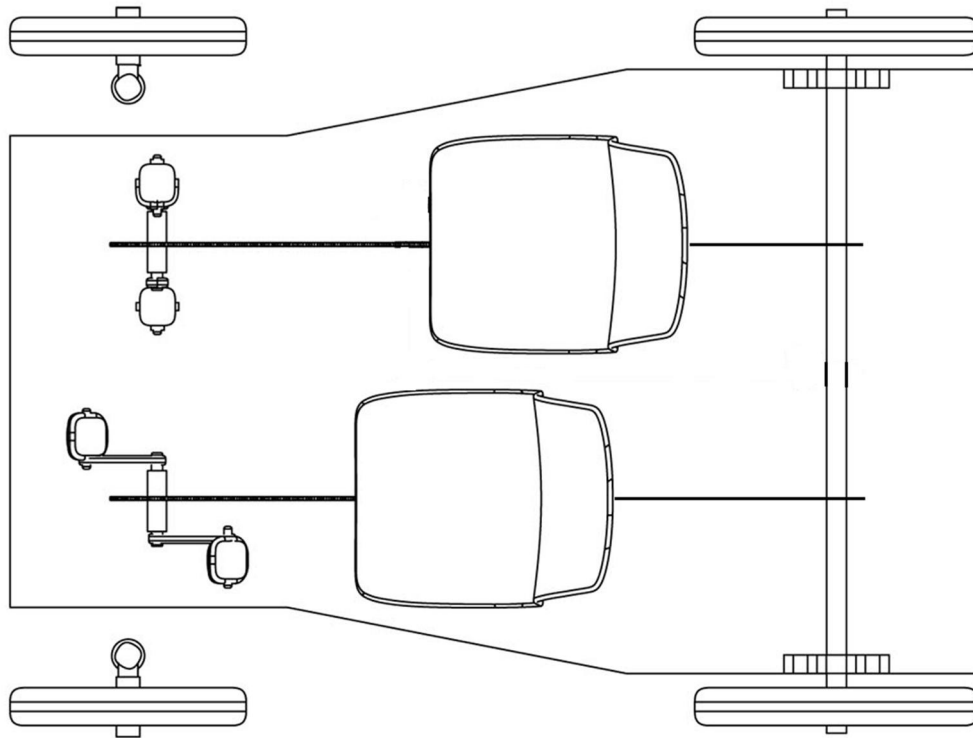
Kuvassa 6 esitetyssä ideassa polkimilta tulevat linjat yhdistyisivät ajoneuvon keskellä olevalle väliakselille. Väliakselin ulommista päistä voimansiirtolinjat kulkisivat ajoneuvon sivussa vetäville pyörille. Yksisuuntalaakerit mahdollistaisivat oikean- ja vasemmanpuoleisen linjan pyörimisnopeuserot. Vetävien pyörien ripustus olisi toteutettava erillisillä kannattimilla. Etuna ratkaisussa olisi takapyörien väliin jäävä tasainen tila.



Kuva 6. Voimansiirtolinjaidea 2 ylhäältä kuvattuna

2.5.3 Polkimilta kaksi linjaa taka-akselille

Kuvassa 7 esitetyssä ideassa oli voimansiirtolinjan kulkeminen molemmilta polkimilta yhtenäiselle taka-akselille. Voimansiirtolinja tulisi ohjata ajoneuvon keskikohdalta istuinten ali. Ketjutoteutuksessa olisi otettava huomioon pitkäksi kasvanut ketjulinja.



Kuva 7. Voimansiirtolinjaidea 3 ylhäältä kuvattuna

2.6 Vaihteistot

Seuraavassa käsitellään ainoastaan polkupyörän takanapojen vaihteistototeutuksia.

Polkupyöräkäytössä käytetään pääasiassa kahta vaihdetyyppiä: ketju- tai napavaihteita. Molemmat ovat yleisesti ottaen vaijerikäyttöisiä, ja vaihteen valinta tapahtuu usein, joko ruuvattavalla tai liipaisintyyppisellä periaatteella. Vaihteistoissa käytetään hyväksi vapaakytkimiä, jotka sallivat vääntömomentin siirron eteen polkiessa mutta pyörivät vapaasti taaksepäin. Tällä mahdollistetaan esim. polkemisen lopettaminen alamäessä.

2.6.1 Napavaihde

Polkupyörän napavaihteella tarkoitetaan yleisesti ottaen takarenkaan navassa sijaitsevaa planeettavaihteistoa, jonka ulkokuoreen yleisesti ottaen vanne kiinnittyy pinnon avulla. Napavaihteessa ensiöveto tulee polkimilta hammaspyörälle, joka välittyy planeettavaihteiston kautta ulkokehälle. Välitys valitaan vaijeritoimisella vaihteenvalitsimella. Vaihteiden lukumäärä on yleensä alle 14. Vaihteita voidaan vaihtaa myös paikallaan ollessa.

Napavaihteita myydään jalkajarrullisina taikka jarruttomina versioina. Jalkajarrulla jarrutus tapahtuu poljinta taaksepäin työntäessä. Jarruttomissa versioissa jarrutus on toteutettava käsikäyttöisenä joko vanne-, levy- taikka rullajarruin polkimien pyöriessä vapaasti taaksepäin.

Napavaihteen kanssa käytetään yleisesti ottaen $\frac{1}{2}$ " * $\frac{1}{8}$ "-n ketjua.

2.6.2 Ketjuvaihde

Ketjuvaihteella tarkoitetaan vaihteistoa, jossa vaihtaja vaihtaa ketjun sijaintia rinnakkaisten hammaspyörien suhteen. Rattaiden lukumäärä on tyypillisesti alle 10. Vaihteen vaihto tapahtuu polkiessa, jolloin vaijerin välityksellä toimiva vaihtaja siirtää ketjun pienemmälle rattaalle ja isommalle rattaalle vaihto tapahtuu jousen siirtämänä. Ketjun oikean kireyden säätö tapahtuu jousikuormitteisesti vaihtajan kahden hammaspyörän kautta.

Ketjuvaihteen kanssa käytetään yleisesti $\frac{1}{2}'' * \frac{3}{32}''$:n ketjua.

2.6.3 Muut vaihteistototeutukset

Markkinoilla on myös vähemmän tunnettuja toteutustapoja. Kyseiset toteutukset ovat yleensä hinnaltaan korkeampia sekä jossain määrin kokeiluasteella.

Hybridi

Hybridivaihteistossa on yhdistetty ketju- sekä napavaihde. Tällöin perinteisen napavaihteen hammaspyörä on korvattu rataspakalla. Ratkaisulla pyritään poistamaan tarve usealta eturattaalta sekä etuvaihtajalta. Etuna ratkaisussa on myös vaihtenvaihto paikallaan ollessa. Kaupallisena tuotteena on esim. Sram Dualdrive.

Keskiövaihde

Saksalainen Pinion valmistaa 18-vaihteista toteutusta, jossa vaihteisto on integroitu polkupyörän keskiöön. Etuina ratkaisussa on vaihtenvaihto paikallaan ollessa sekä etu tilanteessa, jossa vaihteiston sijoitus kulkuneuvoon on ongelma. Painoa vaihteistolla on 2,7 kg ja välitysalue on 636 %.

2.7 Sähköavusteisuus sekä peruuttaminen

Eurooppalaisen lainsäädännön mukaan sähköavusteisuuden teho ei saa ylittää 250 W:a, eikä moottori saa avustaa nopeuden saavuttaessa 25 km/h. Sähköavusteisuus on sallittu ainoastaan tilanteessa, jossa poljetaan. Tällä suljetaan pois esimerkiksi ainoastaan käsikaasulla ajaminen. (8, 19 §.)

Ajoneuvon sähköavusteisuuden toteuttamisen kannalta vaihtoehtoisiksi tavoiksi jäivät joko napamoottori tai erillinen tasavirtamoottori voimansiirtolinjojen välille.

Napamoottoreilla tarkoitetaan pyörien navoissa sijaitsevia akkukäyttöisiä tasavirtamootoreita (kuva 8).



Kuva 8. Golden Motor -napamoottori

Sähkömoottorin toimintaperiaate itsessään liittyy virran johtamiseen yksittäisille keloille tietyssä järjestyksessä, jolloin kestopagneetin avulla saadaan moottori pyörimään haluttuun suuntaan.

Peruuttaminen

Ajoneuvon koon sekä painon vuoksi oli välttämätöntä myös suunnitella sekä ideoida peruuttamisen mahdollisuutta. Mahdollisuuksia mietittiin polkemisesta sähkömoottorien hyödyntämiseen. Peruuttamisen mahdollistava mekanismi todettiin projektiin nähden teknisesti hankalaksi toteuttaa. Tämä johtui siitä, että voimansiirto oli toteutettu polku-

pyörän osilla, jotka itsessään on suunniteltu eteenpäin polkemista varten. Peruuttamisvaihtoehtoina pohdittiin joko eteen- tai taaksepäinpolkemista. Poljettava peruutus todettiin käytössä olevien resurssien perusteella kannattamattomaksi, kun käytössä olivat sähköavusteisuuteen liittyvät napamoottorit.

3 Ratkaisut

Edellisessä luvussa mainituista osakokonaisuuksien vaihtoehtoisista toteutustavoista valittiin lopulta ratkaisut jotka yhdistivät kompromissina hinnan, painon sekä huollon osalta parhaat puolensa.

- Voimansiirtolinjat päätettiin sijoittaa pohjalevyn päälle. Tällä vältettiin mahdolliset vikatilanteet mahdollisissa pohjakosketuksissa sekä samalla komponentit saatiin suojaan lialta. Ratkaisu oli myös eduksi huoltotoimenpiteitä ajatellen.
- Vetotavaksi valittiin mekaaninen takaveto yhdistettynä etupyörien napamootto-reihin. Ratkaisusta saatiin melko helposti toteutettava, sekä peruuttamisen myötä ilmenneet ongelmat ratkesivat.
- Polkutavaksi valittiin perinteinen polkupyörämäinen toteutus, jossa polkimet ovat kampien välityksellä kiinni poljinkeskiössä. Tällä saatiin hyväksikäytettyä kaupallisia toteutuksia.
- Akselisto päätettiin sijoittaa istuinten yhteyteen. Tällä saatiin hyödynnettyä takapyörien väliin jäävä tila esim. tavara- tai henkilökuljetukseen. Akseliston päissä olevat hammaspyörät laakeroitiin yksisuuntalaakereihin, jolloin takapyörät saatiin pyörimään joko polkemisen kanssa samaa nopeutta taikka käännöksessä nopeammin. Käännöksissä ilman yksisuuntalaakereita olisi muodostunut suuria voimia väliakselille tilanteessa, jossa toinen pyörä pyrkii jarruttamaan käännöstä.
- Vaihteistojen sijoittaminen väliakselin yhteyteen vaikutti vaihteistotyypin valintaan. Napavaihteisiin päädyttiin ketjuvaihteiden sijaan yhteisellä päätöksellä mm. esteettisten syiden, tilankäytön sekä säätöjen helppouden perusteella. Ketjuvaihteiden olisi tarvinnut sekä korkeus- että leveyssuunnassa enemmän tilaa johdettujen toimintatavastaan, jossa jousikuormitteinen vaihtaja siirtää ketjua vierekkäisillä hammaspyörillä.

Lopullinen ratkaisu voimansiirron toteutuksesta päätettiin viimeiseksi. Vaihtoehtoiksi jäivät

- a) ketju
- b) kardaan
- c) voimansiirron toteutus ensimmäiseen prototyyppiin toiselta poljinyksiköltä ketjulla ja toiselta kardaanilla.

Kardaanivaihtoehto päätettiin jättää toteuttamatta useiden seikkojen summana. Ratkaisevina tekijöinä päätökseen olivat

- tekniset haasteet
- hinta
- huolto.

Kardaanitoteutusta suunniteltaessa päätettyyn prototyypin toteuttamistapaan haasteiksi alkoivat ilmetä ensinnä kulmavaihteiden lukumäärä. Kulmavaihteita olisi täytynyt asentaa molempiin poljinkeksioihin, väliakselille neljään kohtaan sekä takapyörien yhteyteen. Tämä olisi johtanut kustannusten sekä painon liialliseen nousuun. Yhdelle kulmavaihteelle arvioitiin hinnaksi n. 200 €.

Projektissa ongelmaksi muodostui kevytajoneuvon voimansiirtolinjojen, kahden polkijan voimien yhdistämisen sekä vaihteistojen muodostaman kokonaisuuden toteuttaminen. Projektissa voimansiirtolinjat olivat melko pitkiä ja leveyssuuntainen siirtymä polkimien keskiöiden sekä vetävien takapyörien välillä aiheutti ongelmia.

Haasteena oli napavaihteiden käyttö tilanteessa, jossa itse vaihteistot eivät sijainneet takapyörien navoissa. Kaupalliset kardaanitoteutukset on suunniteltu pääasiassa tavallisiin polkupyöriin, joissa polkimilta tuleva akseli kiinnittyy kulmavaihteen kautta polkupyörän takahaarukkaan, jonka yhteydessä napavaihte nimensä mukaisesti ja suunnitellusti sijaitsee. Projektissa vaihteistojen sijaitessa väliakselilla ongelmaksi ei muodostunut.

tunut voiman saattaminen vaihteistoille vaan vaihteistoilta ulos. Ongelmana oli myös, kuinka yhdistää kahdelta poljinyksiköltä tulevat voimat akselille.

Huollon osalta kardaani todettiin haastavaksi vikatilanteissa. Normaalikäytössä kardaania voidaan pitää melko luotettavana sekä lähes huoltovapaana. Tarkasteltaessa kuitenkin tilannetta, jossa esim. kulmavaihde vikaantuu huonoissa elinoloissa, ei välttämättä kohdesijainnissa löydy tietoa, taitoa taikka varaosia ongelman ratkaisemiseksi.

Valittujen osakokonaisuuksien johdosta kardaani ei ollut soveltuva vaihtoehto. Kardaanimuunnoksissa tulisi lähes koko voimansiirron kokonaisuutta tutkia uudessa valossa. Budjettia suurentamalla sekä aikatauluja pitkittämällä kardaanimuunnoksesta olisi voinut saada toimivan vaihtoehdon.

Kardaanimuunnoksen karsiuduttua pois vaihtoehdoista jäljelle jäi ketjulla toteutettu voimansiirto. Ketjun valintaan vaikutti yhteensopivuusvaatimus polkupyörän osien kanssa. Ketjuina käytettiin SKS:ltä ostettua Wippermannin valmistamaa $\frac{1}{2}$ " * $\frac{1}{8}$ "-n rullaketjua. Ketjun murtokuorma oli 8200N (DIN) ja paino 0,28 kg/m. Käytössä sen todettiin olevan liian leveää ensiövedolle polkimilta napavaihteille. Polkupyöräkäytössä ketju on hieman kapeampaa johtuen ketjun tarpeesta liikkua rattaalta toiselle. Ongelma ratkaistiin ostamalla Biltemasta polkupyöräkäyttöön tarkoitettua $\frac{1}{8}$ "-n sekä $\frac{3}{32}$ "-n ketjua. Koelun- toisesti kuljettajalle asennettiin $\frac{3}{32}$ "-n ja apukuljettajalle $\frac{1}{8}$ "-n ketju.

Vierailulla SKS:lle ajoneuvoon ratkaisuksi ehdotettiin Wippermannin valmistamaa huoltovapaata Marathon -rullaketjua. Ketju eroaa yllä mainitusta tavallisesta rullaketjusta siten, että sintteriteräksinen erikoisholkki sisältää voiteluaineen, joka voitelee holkin, tapin ja rullan sekä sivulevyjen väliset laakeripinnat. Huoltovapaudella tarkoitetaan voitelutarpeen poissaoloa. Huoltovapaasta ketjuvaihtoehdosta luovuttiin tilaajayrityksen toiveesta.

4 Prototyypin suunnittelu, mitoitus ja toteutus

Luvussa käydään prototyypin toteutus läpi alkaen polkimilta, edeten perää kohti sekä päätyen takapyörille. Voimansiirron kuvaus on jaettu selkeyden vuoksi kolmeen kokonaisuuteen: ensiövetoon, vaihteistoihin ja väliakseliin, sekä toisiovetoon. Osaa luvun valokuvista on sumennettu taustan osalta jättäen käsiteltävä kohde teräväksi.

4.1 Yleistä

Ajoneuvoa suunniteltiin viikoittaisissa palaverissa, joissa opiskelijoille annettiin tehtäviksi ottaa selvää sekä ideoida vuorossa olleita kysymyksiä ja toteutustapoja. Mitoitus tapahtui pääosin ajoneuvon dimensioiden sekä valmiiden polkupyöränosien ehdoilla. Ensimmäisessä prototyypissä ensiarvoista oli saada ajoneuvo liikkeelle, jotta kaikkia osakokonaisuuksia päästiin käytännön tasolla testaamaan.

Suunnittelun tukena toimivat myös käynnit SKS:llä sekä Pyörätohtorin luona. SKS -käynnin tarkoitus oli saada tietoa mahdollisista toteutustavoista koko ajoneuvon osalta. Pyörätohtorin käynti sekä konsultointi tapahtuivat voimansiirron osien oston yhteydessä.

Ensimmäinen prototyyppi rakennettiin Metropolia AMK:n protopajalla Helsingin Herne-saaressa kolmen opiskelijan sekä koneistuspalveluista vastaavan Pekka Pesosen kesken. Pesonen johti kokoonpano- ja valmistusprojektia sekä koneisti omavalmisteiset osat.

Kokoonpanovaiheen alkaessa aikataulu oli melko lyhyt, joten alkuperäisiin suunnitelmiin tuli hieman muutoksia mm. tilattujen osien toimitusaikojen sekä koneistettavien osien vuoksi. Muutokset liittyivät lähinnä ainoastaan hammaspyörien hammaslukuihin sekä pieniin muotoseikkoihin.

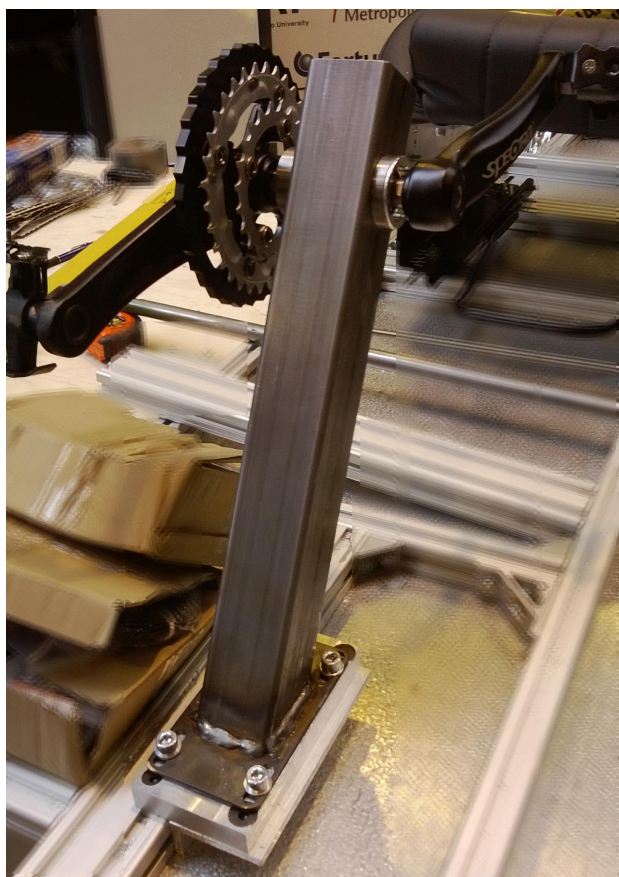
Prototyypin pohjautuessa polkupyörän komponentteihin oletuksena oli osien riittävä kesto sekä toimintavarmuus testikäytössä.

4.2 Ensiö veto

Ensiövedolla tarkoitetaan tässä yhteydessä polkijalta vaihteistolle tulevaa ketjulla toteutettua voimansiirtolinjaa. Runkokonstruktiosta sekä halutusta nojapyörämaisestä polkuvasta johtuen polkimet tuli sijoittaa istuinten eteen likipitään samalle tasolle korkeussuunnassa.

4.2.1 Poljinpalkit

Polkimille valmistettiin itse 50 * 50 * 2 mm:n teräsprofiilista kuvassa 9 nähtävät palkit. Kuljettajan puoleinen palkki toimi myös ohjauspilarina, johon ohjausakseli kiinnitettiin. Tolpat kiinnitettiin aluslevyjen avulla runkoon pultein. Tolppiin hitsattiin kiinni myöhemmin tukivarsi alapuolelle, jotta notkumista saatiin vähennettyä. Tolppien juuressa oleviin kiinnitysosiin koneistettiin urat, jotka mahdollistivat tolppien säädön pituussuunnassa sekä samalla ketjun kiristyksen.



Kuva 9. Apukuljettajan poljinpalkki projektin alkuvaiheessa

4.2.2 Poljinkeskiö, kammet sekä polkimet

Keskiöllä tarkoitetaan keskiömuhvista sekä keskiölaakerista muodostuvaa kokonaisuutta, johon kammet sekä polkimet kiinnitetään. Muhvin sekä kasettikeskiön muodostama kokonaisuus kiinnitettiin hitsaamalla palkkeihin porattuihin reikiin.

Pyörätohtorilta ostettiin FSA:n eli Full Speed Aheadin kasettikeskiöt nelikulmaisella titaaniakselilla. Keskiöiden mitat olivat 116/68 mm. Valmistusvirheen vuoksi kuoressa luki cro-mo, vaikka todellisuudessa keskiö oli titaaniakselinen.

Kasettikeskiöt kiinnitettiin myös Pyörätohtorilta ostettuihin CNC-koneistettuihin keskiömuhveihin. Muhvien materiaali oli terästä ja ulkohalkaisija 39,60 mm sekä leveys 68 mm.

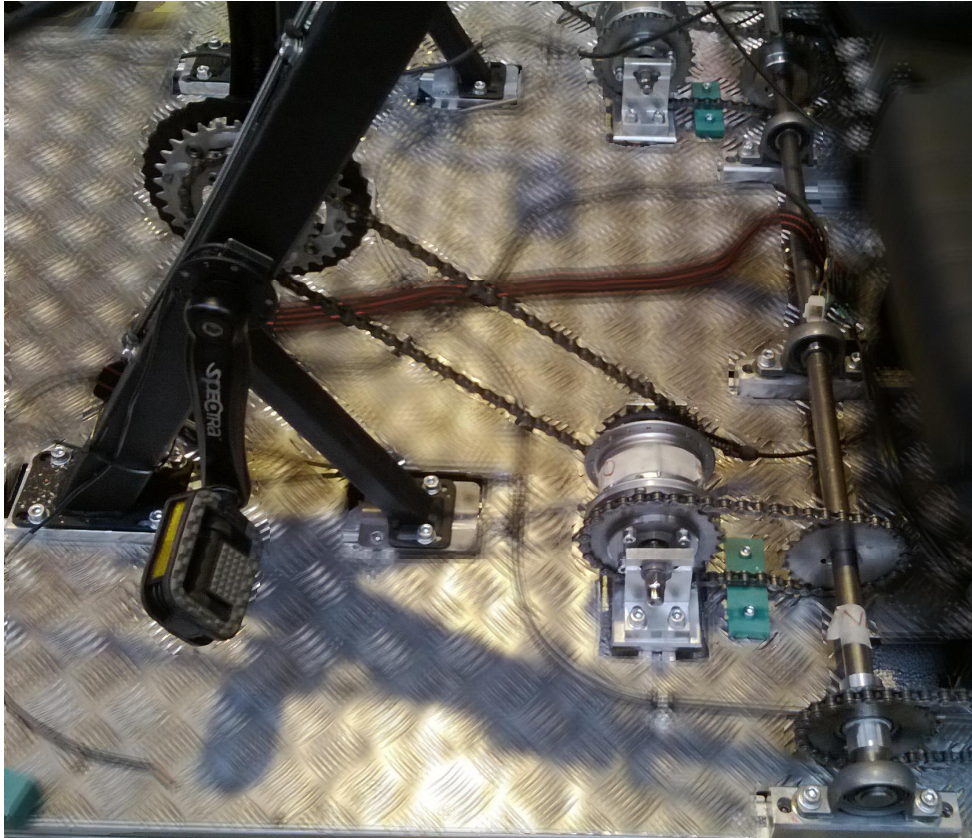
Ajoneuvossa päätettiin käyttää tilankäytön kannalta suotuisia mahdollisimman lyhyitä eli käytännössä n. 150 mm:n kampia. Pyörätohtorilta ostettiin kaksirattaiset 152 mm:n Spectra-kampisarjat. Kampisarjat oli varustettu bashring-ketjusuojilla, joilla tarkoitetaan suuremman rattaan yhteydessä olevaa kiinteää iskuilta sekä tarttumiselta suojaavaa rakennetta. Rattaiden hammasluvut olivat z22 ja z32.

Alkuperäiset Pyörätohtorilta ostetut teräspolkimet päätettiin korvata Biltemasta ostetuilla muovisilla 9/16":n kierteellä olevilla polkimilla. Teräspolkimien huomattiin olevan huono valinta yhdistettynä napamoottoreilla toteutettuun peruutukseen. Peruuttaessa polkimet pyörivät taaksepäin, jolloin testiajossa kuljettajan jalka jäi rungon ja polkimen väliin, mikä aiheutti säären haavan.

Ketjuna käytettiin kuljettajalle Bilteman 1/2" * 1/8":n standardiketjua ja apukuljettajalle Bilteman 1/2" * 3/32":n standardiketjua.

4.3 Vaihteistot sekä väliakseli

Tässä luvussa käsitellään kuvan 10 mukaista napavaihteistojen ja väliakselin muodostamaa ketjuvälitteistä kokonaisuutta.



Kuva 10. Kuljettajan poljinpalkilta tuleva ketjulinja vaihteistolle, jolta ketjuvälitys väliakselille

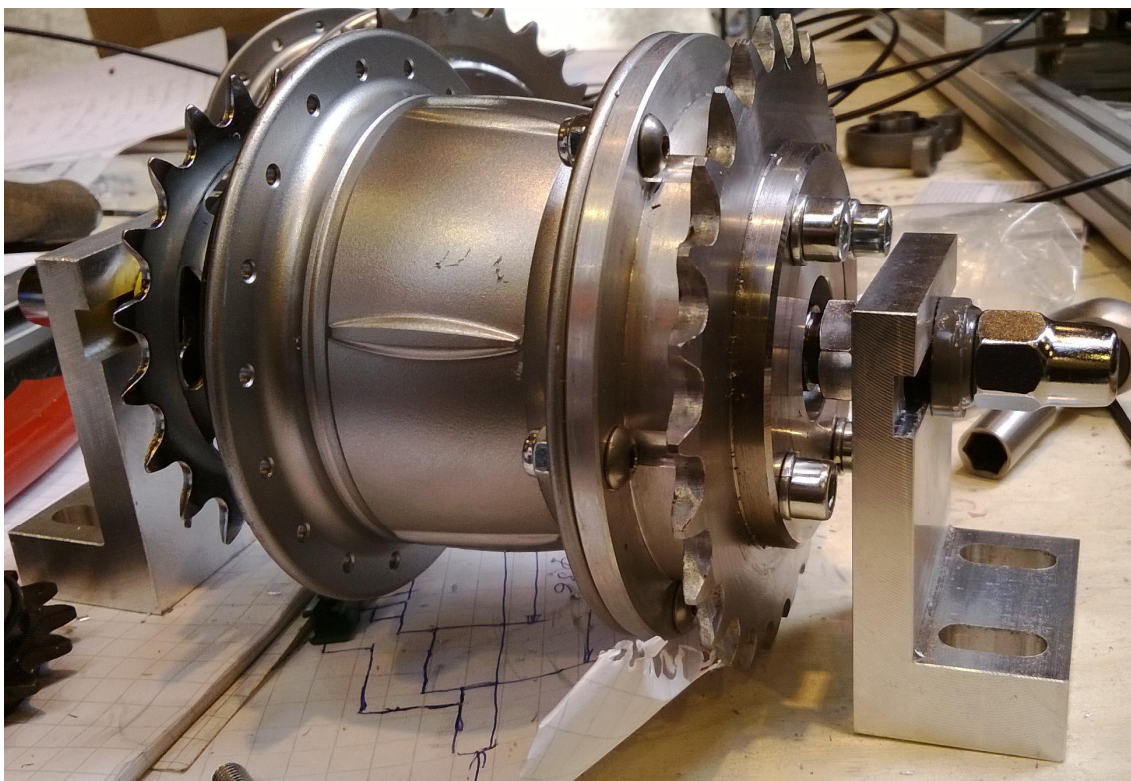
Napavaihteet sijoitettiin akselin yhteyteen johtuen takapyörinä käytetyistä mopedin renkaista, joihin ei modifikaatioiden jälkeen olisi ollut mahdollista kiinnittää vaihteita.

Vaihteistojen sekä väliakselin välille ei tilanpuutteen vuoksi ollut mahdollista asentaa erillistä ketjunkiristintä, joten välille kiinnitettiin muovinen liukupala. Tämä esti ketjun osumisen pohjalevyyn.

4.3.1 Vaihteet, vaijerit ja valitsimet

Vaihteiston suhteen päädyttiin käyttämään molemmille polkijoille Shimano Nexus SG-8R36 napavaihteita (kuva 11), jotka hankittiin Helsingin Urheiluvälinehuollosta. Merkin-

nät tarkoittavat 8-vaihteista rullajarruvalmista napavaihdetta, jossa 36 reikää pinnoille. Napavaihteen paino oli 1630 g.



Kuva 11. Modifioitu Shimano Nexus 8 -napavaihte kannattimiseen

Takapyörille sijoitetuista hydraulisista levyjarruista johtuen tarvetta ei ollut rullajarruille, joten rullajarruoptio jätettiin käyttämättä. Koska vaihteistot päädyttiin sijoittamaan ensiövedon ja väliakselin välille pyörän navan sijasta (kuva 13), napavaihteisiin kiinnitettiin omavalmisteiset adapterit, joilla vaihteen ulkokuorelle saatiin asennettua hammaspyörä. Hyväksi käytettiin normaalikäytössä pinnoille suunniteltuja reikiä, joita suurennettiin pultteja varten. Hammaspyörältä tuli ketjuveto akselille.

Malliin päädyttiin sopivien välityssuhteiden, hinnan sekä painon perusteella. Napavaihteet kiinnitettiin runkoon omavalmisteisilla alumiinikiinnikkeillä. Kiinnikkeissä oli horisontaalisessa suunnassa etäisyydensäätömahdollisuus, jolla saatiin vaihteen ja akselin välillä oleva ketju kiristettyä.

Napavaihte tarvitsi toimiakseen myös vaihdinkasetin sekä Shimanon omat lukkorengaat ja pultit. Vaihdinkasetti on napavaihteen kylkeen ja akselille kiinnitettävä kompo-

nentti, johon vaihdevaijeri kiinnitetään ja joka saa aikaan planeettavaihteen välitysten muutokset. Myös hammaspyörä oli ostettava erikseen.

Vaihteenvalitsimet valittiin samasta sarjasta ja käyttötavaksi valittiin ruuvattava. Vaijerit sisältyivät pakettiin. Kuljettajan puolelle valittiin testimielessä standardi- ja apukuljettajalle Scandic-versio. Scandicilla tarkoitetaan vaihdevaijerin kumisuojausta vaijerin loppupäässä, jossa vaijeri liitetään napavaihteeseen. Vaihteenvalitsimet sijoitettiin kuljettajan puolella ohjaustankoon. Apukuljettajan puolella valitsin kiinnitettiin ylimääräisestä ohjaustangosta katkaistuun osaan, joka kiinnitettiin istuimen runkoon.

4.3.2 Akselit

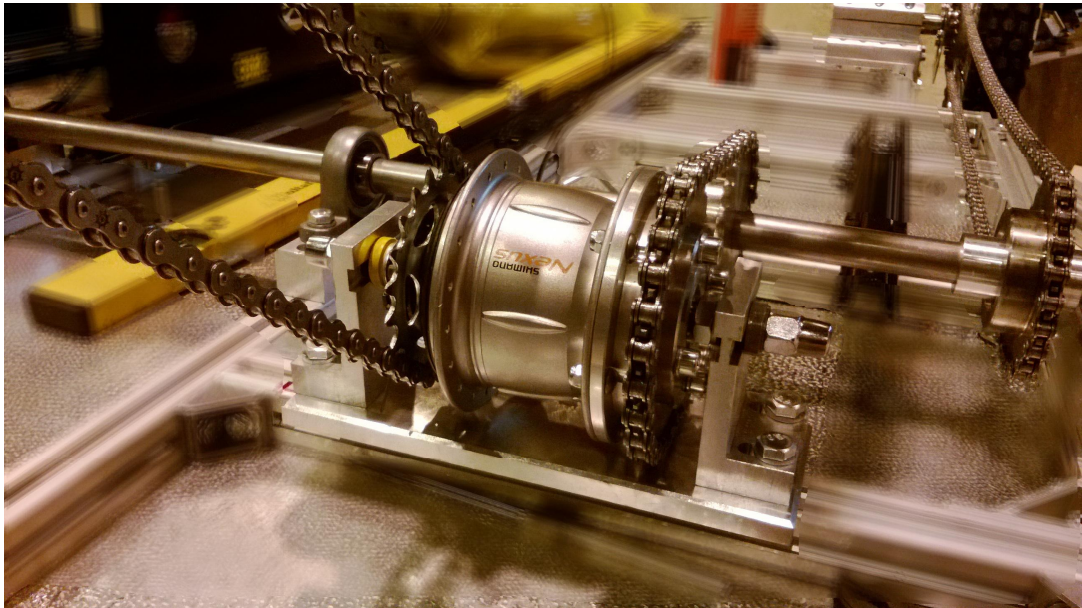
Väliakselina toimi 20 mm:n teräsakseli joka laakeroitiin neljällä urakuulalaakerilla runkoon. Teräsakseliin kiinnitettiin kiilaliitoksin 4 kpl ketjupyöriä. Akselin päissä olevat ketjupyörät laakeroitiin yksisuuntalaakereilla, jotka mahdollistivat takapyörien pyörimisen eri nopeuksilla. Yksisuuntalaakerit liitettiin hammaspyöriin kutistusliitoksin. Liitos varmistettiin Locktiten kiinnikkeellä (kuva 12).



Kuva 12. Väliakselin yksisuuntalaakeroitu hammaspyörä

Akselin laakeripukkien sekä rungon kiinnityspalojen väliin asennettiin jälkeinpäin prikat, jotka nostivat akselia 3 mm ja estivät ketjun osumisen pohjalevyyn.

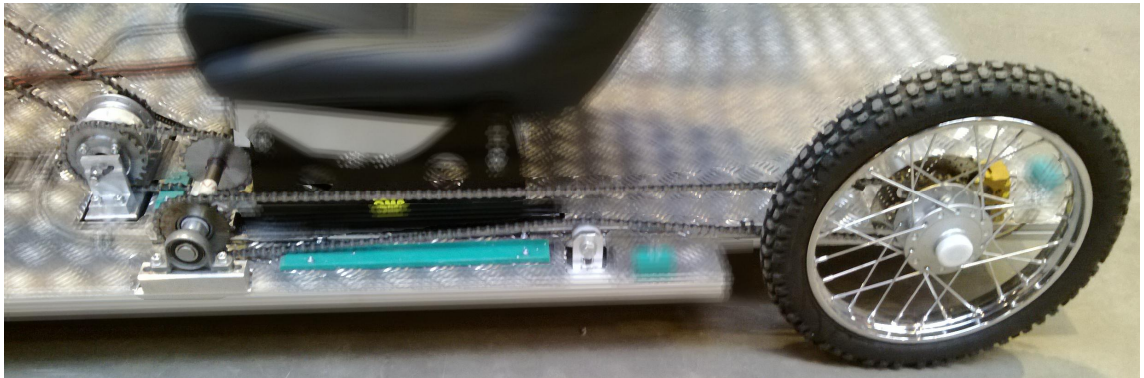
Takapyörien akseleina toimivat halkaisijaltaan 30 mm:n teräsakselit, jotka koneistettiin takapyörien sisään jäävältä osalta halkaisijaan 20 mm.



Kuva 13. Polkimilta tulevan ketjulinjan yhdistyminen napavaihteeseen. Napavaihteelta tuleva ketjuvälitys yhdistyy väliakselille, josta yksisuuntalaakereiden kautta takapyörille.

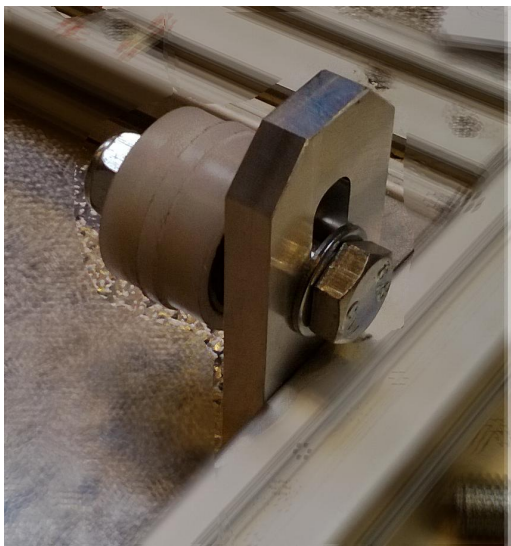
4.4 Toisiovento

Tässä luvussa käsitellään väliakselin päistä vapaarattaiden kautta takapyörille tulevaa ketjulinjaa. Ketjulinja kulkee ajoneuvon sivuilla (kuva 14).



Kuva 14. Ketjulinja väliakselilta takapyörälle

Toisiovedon tapauksessa ketjulinjasta muodostui melko pitkä. Ketjunkiristimet asennettiin väliakselilta takapyörille kulkevien ketjulinjojen välille. Kiristin toteutettiin muovirullalla, joka oli kiinnitetty pultilla vertikaalisessa suunnassa olevaan hahloon (kuva 15). Tämä mahdollisti rullan korkeussäädön, joka ketjun alapuolella kiristi ketjun halutulle kiireydelle.



Kuva 15. Väliakselilta takapyörälle kulkevan ketjulinjan välillä sijaitseva ketjunkiristin

4.4.1 Takapyörien konstruktiot sekä ripustukset

Alkuperäisen suunnitelman mukaan takapyörinä oli tarkoitus käyttää polkupyörän vanteita ja renkaita. Ajoneuvon painon noustessa päädyttiin etsimään tukevampia vaihtoehtoja tilalle. Takapyörinä käytettiin lopulta Hong Kong -tavaratalosta ostettuja mopedin 14":n vanteita renkaineen.

Vanteita jouduttiin modifioimaan laakeroinnin, hammaspyörän sekä jarrulevyn osalta. Alkuperäiset laakerit korvattiin 3 kpl:lla Laakericenteristä ostettuja urakuulalaakereita, jotta kyettiin käyttämään 20 mm:n akselia.

Vanteeseen kiinnitettiin napaketjupyörä, joka itsessään toimi adapterina jarrulevyn kiinnitykselle (kuva 16). Ketjupyörä laakeroitiin akseliin urakuulalaakerilla.



Kuva 16. Modifioitu takapyörä, jossa kiinnitettynä ketjupyörä sekä jarrulevy

Takapyörän akseleille valmistettiin itse molemmille puolille ripustukset, jotka koneistettiin Alumeec-työkalualumiinista (kuva 17). Ripustukset kiinnitettiin runkoon aluslevyn avulla. Ripustuksiin koneistettiin hahlot yhdelle sivulle, joilla mahdollistettiin akselin liikkuminen sivuttaissuunnassa. Jarrukenkien kiinnityskorvakkeet kiinnitettiin ripustusten ulkosivuille (kuva 18).



Kuva 17. Takapyörän ripustus



Kuva 18. Kuljettajan puoleinen takapyörä kiinnitettynä runkoon

4.5 Välityssuhteet

Välityssuhteella tarkoitetaan kahden toisiinsa kytketyn pyörivän osan välistä pyörintänopeuseroa. Välityssuhde ilmoitetaan käytettävän ja käyttävän esim. hammaspyörän hammaslukujen suhteena.

Ensiveto

- Kuljettajalla eturattaan hammasluvun ollessa z22 ja napavaihteen hammasluvun ollessa z21 välityssuhteeksi muodostui 0,954.
- Apukuljettajalla eturattaan hammasluvun ollessa z32 ja napavaihteen hammasluvun ollessa z21 välityssuhteeksi muodostui 0,656.

Vaihteistolta väliakselille

- Napavaihteen ulkokehälle kiinnitetyn hammaspyörän sekä väliakselilla olevan hammaspyörien hammasluvut olivat molemmat z23, välityssuhde 1.

Toisioveto

- Väliakselin päissä olevien hammaspyörien hammasluvut olivat z23 ja takapyörän z26, välityssuhde 1,13.

Kokonaisvälityssuhteeksi muodostui kuljettajalle 1,078 ja apukuljettajalle 0,741.

Kiireellisen aikataulun vuoksi käytettiin saatavilla olevia hammaspyöriä. Kuljettajalle tahdottiin hieman nopeammat välitykset johtuen tämän pääasiallisesta polkuvastuusta, sekä alkuperäisessä vaatimuslistassa olleesta lähtökohdasta, liikkeellelähdon helppoudesta. Koska kampisarja oli kaksirattainen, apukuljettajan ketju asennettiin testimielessä suuremmalle ketjupyörälle.

4.6 Osat ja hinnat

Taulukkoon 1 on kerätty polkupyöränosien hinnat sekä ostopaikat. Taulukosta on kar-
sittu muut voimansiirron kokoonpanoon liittyvät osat. Pois jätettyihin osiin kuuluivat
kiinnittämiseen, laakerointiin sekä materiaaleihin liittyvät osat. Pois jättäminen johtui
siitä, että omavalmisteisten osien materiaalit olivat osin Metropolia AMK:n omia tai
erikseen ostettuja ja jotkin osat liittyivät muiden osa-alueiden tilauksien myötä tehtyihin
yhteistilauksiin.

Taulukko 1. Polkupyöränosien hinnat ja ostopaikat

Osa	Lukumäärä	Kpl- hinta	Yhteishinta	Mistä
Keskiömuhi	2	27	54	Pyörätohtori
Keskiölaakeri	2	29	58	Pyörätohtori
Kampisarja	2	29	58	Pyörätohtori
Poljinpari	2	4	8	Biltema
Ketju, SKS	1	57,85	57,85	SKS
Ketju, 1/2"*1/8"	1	4	4	Biltema
Ketju, 1/2"*3/32"	1	4,5	4,5	Biltema
Napavaihde	2	158,25	316,5	Helsingin urheilu- välinehuolto
Vaihdevalitsin sekä vaijeri	2	10,3	20,6	Helsingin urheilu- välinehuolto
Takaratas	2	4,18	8,36	Helsingin urheilu- välinehuolto
Vaihdinkasetti sekä lukko- renkaat	2	16	32	Helsingin urheilu- välinehuolto
Kokonaishinta			589,81	

5 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Ensimmäinen prototyyppi valmistui lähes ajallaan ja pysyi melko hyvin alkuperäisissä suunnitelmissa. Voimansiirto toteutettiin lähes täysin alkuperäisten suunnitelmien mukaan. Ratkaisut olivat kompromisseja hinnan, painon sekä tilankäytön suhteen. Muutoksina alkuperäisiin suunnitelmiin oli hammaspyörien saatavuuksien johdosta tehty muutokset, jotka koskivat lähinnä hammaslukuja.

Hinnaltaan prototyyppi pysyi voimansiirron osalta suunnitelmissa. Sarjavalmistisuuden kautta hintoja olisi mahdollista saada alas.

Käytännön testiajossa ilman sähköavusteisuutta ajoneuvo kulki painoonsa nähden hyvin. Kaksi polkijaa pystyi melko hyvin kuljettamaan kahta ylimääräistä matkustajaa. Testiajoja suoritettiin tarpeen mukaan Hernesaaren asfalttiparkkipaikoilla sekä hallissa. Suurempia mäkiä ei alueella ollut eikä rengasvalintojen vuoksi soralla taikka hiekalla ajettu. Huippunopeuksia ja vastuksia ei aikataulun vuoksi päästy testaamaan.

Sähköavusteisuutta ei saatu synkronoitua polkemisen kanssa täydellisesti, joten koeajokokemus ei täysin vastannut suunniteltua.

Lähteet

1. Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä. 774/25.8.1994.
2. Airila, Mauri, Karjalainen, Jussi A., Mantovaara, Urpo, Nurmi, Lasse, Ranta, Aarno & Verho, Arto. 1985. Koneenosien suunnittelu 3: Tehonsiirto. Helsinki: WSOY.
3. Ketju- ja hihnäkäytöt 2. 2010. SKS Group Oy.
4. Airila, Mauri, Ekman, Kalevi, Hautala, Pekka, Kivioja, Seppo, Kleimola, Matti, Martikka, Heikki, Miettinen, Juha, Niemi, Erkki, Ranta, Aarno, Rinkinen, Jari, Salonen, Pekka, Verho, Arto, Vilenius, Matti & Välimaa, Veikko. 1997. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: WSOY.
5. Blom, Seppo, Lehtinen, Pekka, Nuutio, Erkki, Pekkola, Kari, Pyy, Seppo, Rautiainen, Hannu, Sampo, Arto, Seppänen, Pekka & Suosara, Eero. 1999. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki: Edita.
6. Juurikkala, Jussi. 1981. Autotekniikan perusteet. Helsinki: Tammi.
7. Nieminen, Simo, Piirainen, Ilkka & Suoniemi, Lauri. 1997. Autotekniikan perusteet. Helsinki: WSOY.
8. Ajoneuvolaki. 1090/11.12.2002.

