

Otto Ilves, Tommi Ikonen

# Sähköpyöräkonversio

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

27.3.2015

Tekijä(t)	Otto Ilves, Tommi Ikonen
Otsikko	Sähköpyöräkonversio
Sivumäärä	36 sivua + 2 liitettä
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Autoelektroniikan lehtori Vesa Linja-aho, Metropolia
<p>Tämä insinöörinäytetyö käsittää sähköpolkupyörän suunnittelun ja rakentamisen sekä sen teknisen kuvauksen. Eri vaihtoehdot akkutyypin ja moottorien välillä käydään läpi teoriapohjasta aina valintapäätökseen asti. Tämän työn tarkoituksena on esittää perusteet sähköpyörästä ja tietoa siitä, kuinka rakentaa oma sähköpyörä edullisesti ja helposti, sillä budjettina oli noin 800 euroa ja rakennukseen kuluva aika pyrittiin pitämään lyhyenä.</p> <p>Työ alkaa sähköpyörän historiasta. Tämän jälkeen käydään läpi perusteet ja työn tavoitteet. Seuraavaksi kuvataan tärkeimmät tekniset ratkaisut, joista sähköpyörä koostuu, kuten sähkömoottorit ja akuston eri vaihtoehdot. Teknisissä ratkaisuissa pyrittiin mahdollisimman taloudelliseen sekä tehokkaaseen vaihtoehtoon, jotta kantama ja ajettavuus maastokäytössä olisi riittävä. Työssä tarkastellaan myös pintapuolisesti rakentamisen eri vaiheita pitäen pääpaino kuitenkin teoriassa.</p> <p>Ajotestien tuloksena saatiin erittäin tehokkaan sähköpyörä, jolla pääsi työmatkan kevyesti edestakaisin ja jolla maastokäytössä nopeus on noin 45 km/h. Budjetti kasvoi alkuperäisestä suunnitelmasta, sillä ensimmäinen paristoista koottu akusto ei toiminut odotuksien mukaisesti.</p>	
Avainsanat	sähköpolkupyörä, sähköpyörä

Author(s)	Otto Ilves, Tommi Ikonen
Title	Electric bike conversion
Number of Pages	36 pages + 2 appendices
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer in Automotive Electronics
<p>This Bachelor's thesis processes the layout of electric bicycle and construction, its technical points and different options between battery and motor types based on theory to the conclusion between choices. The purpose of this thesis is to give basic knowledge to a anyone who wants to build his own electric bicycle easily and at an affordable cost as the budget in this case was around 800 Euros and the construction time was pursued to be as short as possible.</p> <p>First the thesis introduces the origins of the electric bicycle.. After that the most important technical conclusions which the electric bicycle consists of are introduced for example electric motor types and different options between battery types. In technical conclusions the main objective was to be as economical as possible and at the same time the bike had to be powerful enough for off-road purposes.</p> <p>Test driving results gave a powerful electric bike which could easily go 20 kilometers without charging with top speed up to 45 km/h. The budget was higher than in the original plan because the first battery construction did not work at all.</p>	
Keywords	electricbicycle, electricbike

## Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet	1
1.2	Rajaus	1
1.3	Vaatimukset	2
2	Historia	2
3	Miksi sähköpyörä?	6
3.1	Käyttäjän näkökulmasta	6
3.2	Globaali näkökulma	7
4	Sähköpyöriä koskevat säädökset	10
4.1	Laki	10
4.2	Lain huomiointi projektissa	10
5	Tekniikka	11
5.1	Moottorit ja voimansiirto	11
5.1.1	Napamoottori	12
5.1.2	Keskimoottori	14
5.2	Akut	15
5.2.1	Toimintaperiaate	15
5.2.2	Sähköpyörää ajatellen tärkeimmät akkutyypit	16
5.2.3	Nikkeli-metallihydridi	16
5.2.4	Li-ion	17
5.3	Moottorinohjaus	17
6	Projektin esittely	18
6.1	Projektin tavoitteet	18
6.2	Aikataulu	18
6.3	Riskit	19
7	Komponenttien valitseminen	19
7.1	Polkupyörä	19
7.2	Moottori	20
7.3	Moottorinohjaus	22
7.4	Akusto	22

7.4.1	Akkutyypin valinta	22
8	Toteutus	23
8.1	Pyörän kasaaminen	23
8.2	Akuston kokoaminenparistoista	23
8.3	Moottorin ohjaus	25
8.3.1	Ohjainlaite	25
8.3.2	Nopeudenrajoittimen luominen Arduinolla	26
8.4	Ongelmakohdat	27
8.4.1	Akusto	27
8.4.2	Moottorinohjaus	29
8.5	Budjetin toteutuminen	29
9	Lopullinen toteutus	30
	Lähteet	32
	Liitteet	
	Liite 1. Kustannusten laskeminen	
	Liite 2. Moottorinohjauksen koodi	

## 1 Johdanto

### 1.1 Tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella sähkömoottorilla varustettu polkupyörä. Tätä ennen tutustuttiin sähköpyörien tekniikkaan ja niihin liittyvään lainsäädäntöön.

Lisäksi tavoitteena oli rakentaa maastokäyttöön soveltuva sähköpyörä lähteistä hankittua tietoa hyödyntäen. Lisäksi tavoitteena oli tehdä pyörään nopeudenrajoitin Arduino-mikrokontrollerialustaa hyväksi käyttäen, niin että pyörän teho ja nopeus saataisiin pidettyä tarvittaessa tieliikennelain mukaisena. Eri ajotilat oli tarkoitus toteuttaa ohjelmoitavalla Arduino-mikrokontrollerilla. Tavoitteena oli, että valmiilla sähköpyöräkonversiolla pystyisi ajamaan seitsemän kilometrin työmatkan edestakaisin yhdellä latauksella.

Tarkoitus on siis luoda sähköpyörä maastopyörän rungosta mahdollisimman edullisesti, mutta samalla tehokkaaksi maastokäyttöä ajatellen sekä kertoa osien valinnasta niin, että maallikko voi tehdä omat päätöksensä ja käyttää tätä insinööriyötä pohjana oman sähköpyörän luomiseksi.

### 1.2 Rajaus

Budjettina projektissa on noin 800 euroa, jolla on tarkoitus hankkia sähköpyöräksi soveltuva käytetty maastopyörä, akusto, moottori, sekä johtosarja ja ohjelmisto. Budjetti toimii suurimpana rajoittavana tekijänä osien hankinnassa.

Tässä työssä ei verrata lopputulosta kaupallisiin sähköpyöriin eikä sähköpyöräkonversiopaketteihin, vaan keskitytään luomaan sähköpyörä, joka täyttää työn tekijöiden sille asettamat vaatimukset. Päävaatimuksina on, että pyörällä pääsee työmatkan edestakaisin ilman latausta tieliikennesäädöksiä noudattaen ja maastoasetus, jolla tehon- ja nopeudenrajoitin poistuu käytöstä. Tehon- ja nopeudenrajoitin toteutetaan Arduinolla, eikä sen koodiin perehdytä kuin pintapuolisesti.

### 1.3 Vaatimukset

Maastopyörällä päävaatimuksena oli sen koko, eli sen runkoon piti pystyä helposti sovittamaan isompikin akusto, sen kotelointi ja johdot. Myös hintataso rajasi paljon vaihtoehtoja, sillä budjetin osuus pyörälle oli vain 100 euroa. Mukavuuden puolesta etu- tai täysjousto olisi hyvä, sillä pyörällä pitäisi päästä maastoasetuksella jopa yli 40 km/h.

Akuston vaatimukset eli energiamäärä, virranantokyky, koko ja hinta määritettiin pääkäyttötarkoituksen mukaan, niin että vähintään työmatka edestakaisin onnistuisi yhdellä latauksella. Työmatka suuntaansa olisi noin 7 kilometriä eli yhteensä 14 kilometriä yhdellä latauksella. Akuston osuus budjetista oli noin 200 - 300 euroa.

Moottorin kaksi päävaatimusta olivat hinta ja teho. Pyörän tuli siis olla mahdollisimman tehokas ja sijoittua edulliseen hintaluokkaan. Budjetin osuus moottorille oli noin 200 - 300 euroa ja yleensä moottori myydään pakettina, joka sisältää tarvittavat johdot, anturit ja ohjainlaitteen virransäätelyyn.

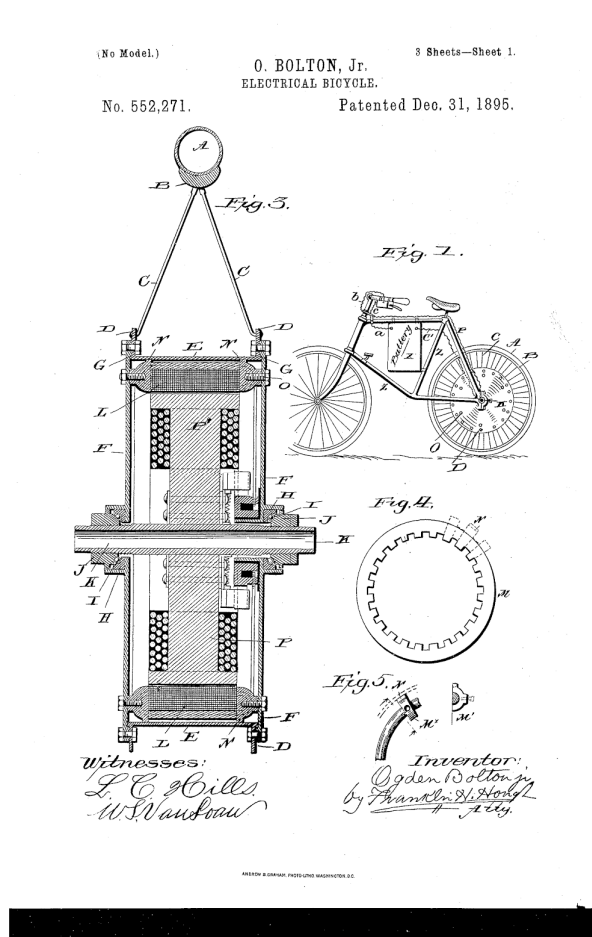
Tavoitteena moottorinohjaukselle oli luoda kaksi eri tilaa, joista toinen soveltuisi tiekäyttöön ja toinen maastokäyttöön, jossa tehot ovat rajoittamattomat. Ohjaus toteutetaan C-ohjelmointikieleen perustuvalla Arduino-mikrokontrollerilla.

Lopputuloksen vaatimuksena on toimiva sähköpolkupyörä, jolla pääsee työmatkat edestakaisin lataamatta välissä, on sovelias tieliikennekäyttöön ja sisältäämahdollisuuden poistaa tehonrajoitin maastokäytössä.

## 2 Historia

Sähköpyörä ei suinkaan ole mikään uusi keksintö, vaan ensimmäinen toteutukseen asti edennyt ajatus sähköpyörästä syntyi jo 1800-luvun lopussa. Todisteena tästä on olemassa patentteja Yhdysvalloista [1 ; 2], jotka on kirjattu vuosille 1895 ja 1897. Sähköpolkupyörät eivät kuitenkaan vielä tuolloin yleistyneet, vaan kokivat vastaavan kohtalon kuin aikansa sähköautot. Sähkömoottorilla varustettujen pyörien sijaan yleistyivät polttomoottorilla varustetut versiot eli moottoripyörät[3].

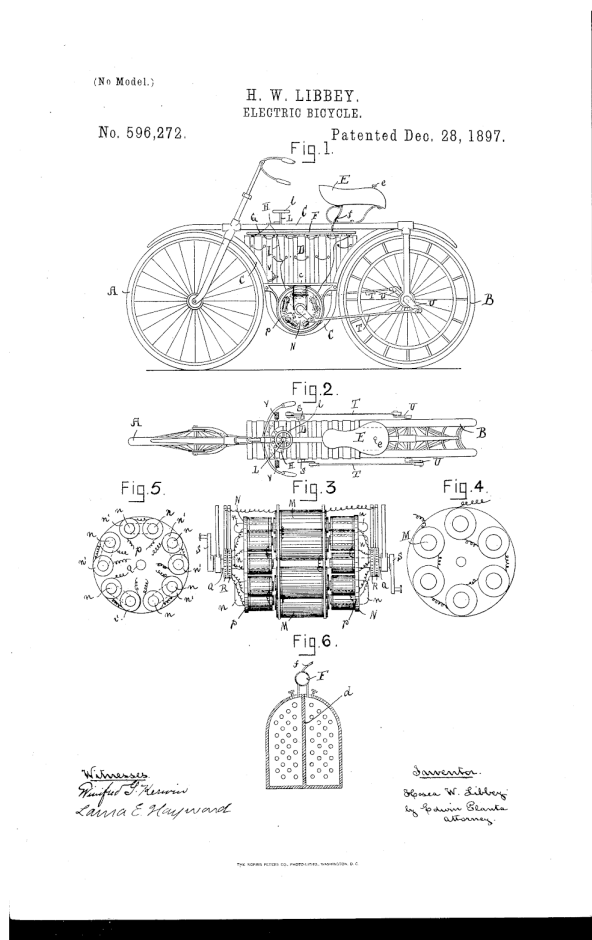
Patentissa US 552271 [1] (kuva 1) esiintyvä sähköpyörä on hämmästyttävän samankaltainen kuin nykyaikaiset sähköpyörät. Pyörässä on ulkokehältäään pyörivä napamoottori takapyörässä ja akku sijoitettuna runkokolmioon. Tehon säätö hoidetaan ohjaustankoon sijoitetulla säätövastuksella. Näistä elementeistä oikeastaan kaikki ovat löydettävissä sähköpyöristä vielä nykyäänkin.



Kuva 1. Sähköpyöräpatentti (US 552271).

Patentti US 596272[2] (kuva 2) kuvaa pyörää, jossa on sähkömoottori keskellä pyörittämässä polkimia, jotka tankojen välityksellä pyörittävät takapyörää, tätä voidaan pitää keskimoottorisen sähköpyörän esiasteena. Pyörässä on kaksi akkua. Tasaisella tiellä ajettaessa vain toinen akku on käytössä ja toinen akku tulee avuksi jyrkissä nousuissa. Kyseessä on siis tavallaan alkeellinen versio moottorinohjaimesta.





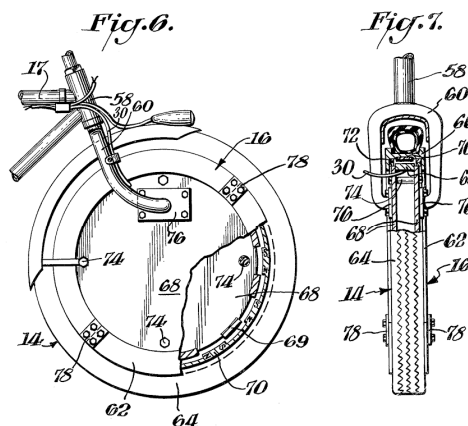
Kuva 2. Sähköpyörä patentti US 596272.

Sähköpyöriä koskevia patenteja on muitakin. Patentti US 3884317:ssä [4](kuva 3) moottori voi olla myös etupyörässä ja polkimilla poljetaan generaattoria, joka tuottaa sähkön moottorille. Myös moottorijarru mahdollisuus on kuvailtu patentissa. Tässä patentissa on ensimmäisen kerran esitelty mahdollisuus laittaa napamoottori myös etupyörään niinkuin nykyäänkin monesti tehdään.

PATENTED MAY 20 1975

3,884,317

SHEET 3 OF 3



Kuva 3. Sähköpyörän patentti US 3884317.

Erityisen mielenkiintoinen on idea siitä, että pyörässä ei ole ketjuja ollenkaan, vaan polkimet tuottavat ainoastaan sähköä ja kaikki voima pyörälle välitetään sähköisenä. Hieman kuin nykyiset sarjahybridiautot[5], joissa sähkömoottori hoitaa yksin auton liikuttamisen ja polttomoottori toimii generaattorina tuottaen virtaa akuille. Nykyaikaiset sähköpyörät ovat kaikki rinnakkaishybridin kaltaisia, eli sähkömoottori ja polttomoottori tai pyörän tapauksessa polkimet pyörittävät molemmat yhdessä pyöriä. Olisiko sarjahybridin toteuttaminen myös polkupyörässä siis mahdollisesti yksi tulevaisuuden suuntaus?

### 3 Miksi sähköpyörä?

#### 3.1 Käyttäjän näkökulmasta

Sähköpyörä valikoitui työmme aiheeksi, koska uskomme, että tulevaisuudessa liikkuminen tapahtuu yhä enenevässä määrin sähkötoimisilla kulkuneuvoilla ja auton sähköistäminen olisi ollut aivan liian iso ja kallis operaatio. Polkupyörä on jo valmiiksi erinomainen kulkuväline, etenkin kaupunki- ja esikaupunkialueilla, missä etäisyydet eivät ole kovinkaan suuria. Polkupyörällä pääsee paikkaan kuin paikkaan ajamalla joko ajotien reunaa, pyörätietä tai tarvittaessa jopa metsäpolkua pitkin. Polkupyörä on myös erittäin ekologinen vaihtoehto, sillä se ei luonnollisestikaan tuota lainkaan päästöjä. Polkupyörä on myös monelle julkista liikennettä miellyttävämpi ja parempi vaihtoehto, koska ei tarvitse huolehtia aikatauluista, saa olla omissa oloissaan ja pääsee ovelta ovelle. Lisäksi moni myös arvostaa pyöräilystä saatavaa liikunnallista hyötyä.

Joillekin ihmisillepyöräily ei kuitenkaan ole pelkkää iloa ja nautintoa. Hiemankin nopeampaa tahtia poljettaessa jalat täyttyvät maitohapolla ja vastatuuli aiheuttaa kurkun kipeytymisen, vaikka muu vartalo hikoilisi. Lisäksi polkupyörän käyttö työmatkoilla on joillekin mahdottomuus, koska polkiessa tulee aina hiki, polki sitä kuinka rauhallisesti tahansa. Rauhallisuus tosin yleensä ei ole työmatkoilla edes realistista. Monella työpaikalla ei joko ole suihkua ollenkaan tai siellä ei vain ole aikaa käydä. Sähköpyörä tuo juuri näihin ongelmiin ratkaisun, sillä sähköavusteisena pyörällä polkeminen keventyy tarvittaessa jopa lähes täysin vastuksettomaksi, eikä hiestä tai maitohapoista tarvitse tällöin huolehtia.

Sähköpyörä on oikea ratkaisu henkilöille, jotka haluavat hyötyä pyöräilyn taloudellisuudesta ja ekologisuudesta eivätkä pidä pyöräilyä ainoastaan kuntoilumuotona. Sähköpyörä tekee pyöräilystä varteenotettavan ja realistisen vaihtoehdon yksityisautoilulle ja joukkoliikenteelle myös sellaisille henkilöille jotka eivät syystä tai toisesta pysty tai halua polkupyörällä muuten liikkua.

Sähköpyörä ei välttämättä ole taloudellisesti suuri investointi, ainakaan autoon verrattuna. Käyttövalmiiden sähköpyörien hinnat alkavat noin 2000 [6] eurosta, mutta laadukkaammista osista kootut merkkipyörät saattavat maksaa jo kaksinkertaisesti. Vaativampiin olosuhteisiin tarkoitettujen maastopyörien sähköversiot taas voivat maksaa jopa 10 000€[7]. Halvemmallalla pääsee, mikäli omistaa jo valmiiksi omaan

käyttötarkoitukseen sopivan tavallisen polkupyörän. Tieliikenteeseen soveltuvia sähköpyörän muunnossarjoja on saatavilla kotimaasta noin 300 euron lähtöhintaan[8], kun taas ulkomailta voi sarjan löytää jopa alle 150 eurolla [9]. Muunnossarjan lisäksi tarvitaan tietenkin akku, joiden hinnat kotimaassa alkavat noin 350 eurosta [8]. Ulkomailta saa myös akkuja halvemmalla, edullisimmillaan jopa 200 eurolla [9]. Akkujen kohdalla hinta tietenkin riippuu akun kapasiteetista. Mitä enemmän ampeeritunteja, sitä pidemmälle akulla pääsee ja sitä korkeampi on akun hinta. Halvimpien akkujen kapasiteetti on yleensä noin 10 Ah, mikä riittää kyllä useimmille kaupunkialueella liikuttaessa. Hankintakustannukset jäävät siis halvimmillaan alle 400 euron.

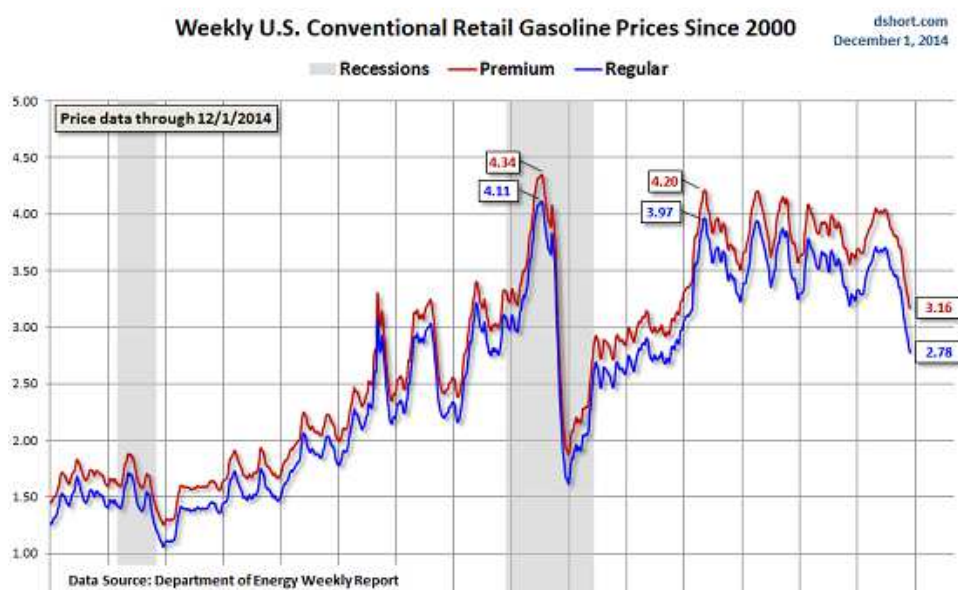
Jos työmatka on esimerkiksi 10 km suuntaansa ja vaihtoehtona on joko kulkea matka sähköpyörällä tai 10 litraa sadalla kilometrillä kaupunkiajossa kuluttavalla autolla, polttoaineen hinnan ollessa 1,40 euroa litralta, maksaa sähköpyörä polttoainekuluissa itsensä takaisin jo 143 työpäivässä eli noin puolessa vuodessa. Työmatkan ollessa pidempi on takaisinmaksuaika lyhempi. Liitteenä olevassa taulukossa (liite 1) on yksinkertainen laskuri jolla voi laskea sähköpyörän hankinnan kannattavuuden työmatka-ajoon. Taulukkoon voi syöttää eri arvoja auton kulutukselle, bensiinin hinnalle, työmatkan pituudelle sekä sähköpyörän hankintahinnalle. Taulukko ei ota huomioon sähkön kulutuksesta syntyviä kuluja eikä autoiluun liittyviä huolto, vakuutus, yms. kuluja. Autoilun muut kulut huomioon otettaessa sähköpyörä maksaa itsensä takaisin huomattavasti nopeammin.

### 3.2 Globaali näkökulma

Liikenteestä syntyvät päästöt ovat ilmastonmuutoksen takia olleet ajankohtainen puheenaihe jo toista vuosikymmentä. Entisten köyhien ja nykyään kovasti kehittyvien talousalueiden, etenkin Kiinan, vaurastuvan väestön halu liikkua paikasta toiseen helpommin kasvaa [10 ; 11]. Mikäli näillä markkinoilla aletaan hankkia autoja länsimaalaiseen malliin, on maailma pulassa. Suurkaupungeissa saasteista johtuva savusumu on jo nyt valtava ongelma, ja voi vain kuvitella, mitä tapahtuisi, jos autojen määrä moninkertaistuisi. Suurkaupungeissa autoilusta aiheutuvat päästöt eivät ole ainoa ongelma, vaan myös ruuhkat ja parkkipaikkojen puute ovat todellisia ongelmia.

Päästöjä vähentääkseen päättäjät etenkin suomessa ovat keksineet päästöihin perustuvia, lähes vuosittain korotettavia, lisäkustannuksia autoilijoille.

Vähäpäästöisyyteen kannustavat myös maailmanlaajuisesti alati nousevat polttoainekustannukset. Benssiinin hinta kävi Suomessa pahimmillaan jo lähellä kahden euron litrahintaa, ja Yhdysvalloissakin polttoaineen hinta on kaksinkertaistunut 2000-luvun aikana (kuva 4). Myös muualla maailmassa kohoava polttoaineen hinta on pakottanut autoteollisuuden toimiin. Autovalmistajat ovatkin reagoineet muuttuvaan maailmaan, ja uusien henkilöautojen päästöt ovat pudonneet viime vuosina huimasti [12]. Monelle uusi henkilöauto on kuitenkin liian suuri investointi, ja ainoa vaihtoehto on ajaa vanhemmalla isompipäästöisellä autolla. Päästöttömiin sähköautoihin, etenkin hieman parempiin malleihin, tavallisella kuluttajalla ei tule olemaan varaa vielä pitkään aikaan.



Kuva 4 Polttoaineen hinnan nousu [12].

Sähköpyörällä on potentiaalia olla merkittävä tekijä vähäpäästöisempään liikkumiseen tähtäävässä maailmassa, onhan se käytännössä päästötöntä liikkumista. Polkupyörä itsessään on jo valtavan suosittu liikkumaväline ympäri maailmaa, sillä se on halpa hankkia ja ylläpitää eikä käytöstä juuri aiheudu kustannuksia ja sen ajamiseen ei edes tarvitse ajokorttia. Sähköistäminen mahdollistaa polkupyörän käytön vielä laajemmin ja monipuolisemmin. Sähkön avustamana voidaan kulkea pidempiä matkoja vaivattomammin ja nopeammin, sekä voidaan kuljettaa suurempia kuormia, sillä myös tavarapyörät (kuva 5) voidaan sähköistää.



Kuva 5. Tavarapyörä [13].

Etenkin kiinalaiset ovat aina olleet pyöräilykansaa. Joidenkin tilastojen mukaan jopa puolet maailman pyöristä on Kiinassa [14], ja sähköpyörän kehitys on tulevaisuudessa jopa ratkaiseva tekijä siinä, saadaanko heidät myös pysymään pyöräilyssä autoilun sijaan. Varsinkin kaupungeissa on sähköpyöräilyn suosion kasvulle valtava potentiaali, ja tähän kannattaisi kansalaisia myös kannustaa. Sähköpyörä tekee pyörästä enemmän tavalliselle kansalle sopivan kulkuneuvon kuin kuntoiluvälineen, ja kaupungeissa olevat lyhyet välimatkat, alhaiset nopeusrajoitukset ja rajalliset parkkipaikat ovat suoria kannustimia pyöräilyyn siirtymiseen autoilun sijasta. Tärkeintä on huolehtia infrastruktuurissa siitä, että pyörällä liikkuminen onnistuu vaivatta ympäri kaupunkia.

## 4 Sähköpyöriä koskevat säädökset

### 4.1 Laki

Suomen laki tuntee sähköavusteisen polkupyörän ja sitä käsitellään tavallisena polkupyöränä kunhan laissa määrätyt ehdot täyttyvät.

Ajoneuvolain 2. luvussa Ajoneuvojen perusluokitus sanotaan:

#### *19 § Moottorittomat ajoneuvot*

*Polkupyörällä tarkoitetaan yhden tai useamman henkilön tai tavaran kuljettamiseen valmistettua, vähintään kaksipyöräistä, polkimin tai käsikammin varustettua moottoritonta ajoneuvoa. Polkupyöräksi katsotaan myös sellainen enintään 250 W:n tehoisella sähkömoottorilla varustettu ajoneuvo, jonka moottori toimii vain poljettaessa ja kytkeytyy toiminnasta viimeistään nopeuden saavuttaessa 25 kilometriä tunnissa.*

Sähkömoottorilla varustetut polkupyörät voidaan siis jakaa pääasiassa kahteen eri kategoriaan, joista on yleistymässä seuraavat termit:

- sähköavusteiset polkupyörät, joissa enintään 250 W:n tehoinen sähkömoottori avustaa polkemista enintään 25 km/h nopeuteen asti ja vain silloin kun polkimia poljetaan
- sähköpyörät tai sähköpolkupyörät, joissa teho on usein enemmän kuin 250 W, ja jotka kulkevat nopeammin kuin 25 km/h ja joilla voidaan ajaa polkematta polkimilla pelkästään sähkömoottorin voimin. Tällaiset sähköpyörät eivät ole lain silmissä polkupyöriä, vaan ne täytyy rekisteröidä moottoriajoneuvoksi, jos niillä haluaa liikkua yleisillä teillä. Lisäksi liikennevakuutus on pakollinen.

### 4.2 Lain huomiointi projektissa

Lakipykälä ei määritä sähköosissa käytettävää teknologiaa kuin maksimitehon ja -nopeuden osalta. Moottorityypin, moottorinohjauksen, akkuteknologian ja -koon sekä

muut lisävarusteet saa siis valita tarpeisiinsa sopiviksi, ja pyörä on laillinen, kunhan aiemmin mainitut ehdot täyttyvät.

Insinööriyön tavoitteena on yhdistää sähköavusteisen polkupyörän laillisuus ja sähköpyörän hauskuus. Tämä aiotaan toteuttaa kahdella valittavissa olevalla ajotilalla. Tieliikenteeseen tarkoitettu ajotila rajoittaa pyörän tehoa ja nopeutta sekä vaatii polkimien pyörimistä toimiakseen, eli täyttää lain vaatimat ehdot. Toinen ajotila on tarkoitettu maastoajoon, eli suljetuille alueille ja metsäpoluille. Tässä ajotilassa moottorin tehoa ja huippunopeutta ei rajoiteta ja polkimien pyörimistä ei vaadita. Momenttitoive moottorille annetaan molemmissa tapauksissa oikealla kädellä tankoon asennettua kaasukahvaa käyttäen.

## 5 Tekniikka

### 5.1 Moottorit ja voimansiirto

Sähköpyörien moottorina on luonnollisesti aina sähkömoottori. Sähkömoottoreita on muutamaa eri tyyppiä. Tärkeimmät huomioon otettavat seikat ovat moottorin vaiheisuus, harjallisuus tai harjattomuus sekä staattorin ja roottorin suhde toisiinsa. Polkupyöräkäytössä moottorit ovat luonnollisesti tasavirtamoottoreita, sillä tasavirran muuttaminen akusta vaihtovirraksi on monimutkaista ja vaatisi inverttereitä, jotka toisivat vain turhia kustannuksia ja ylimääräistä painoa. Lisäksi etenkin polkupyöräkäyttöön soveltuvassa kokoluokassa, vaihtovirtakomponentit ovat harvinaisia ja täten myös tasavirtavaihtoehtoja kalliimpia hankintahinnaltaan. Käytännössä käyttökelpoiset ja ylipäätään järkevät moottorityypit ja -ratkaisut rajoittuvat muutamaa eri vaihtoehtoon.

Nykyään moottorit ovat lähes poikkeuksetta harjattomia, sillä ne ovat harjallisiin verrattuna lähes täysin huoltovapaita ja hyötysuhteeltaan parempia [15]. Harjallisen tasavirtamoottorin huono puoli on myös se, että roottorin ja staattorin asentoa toisiinsa nähden ei mitata mitenkään niin liikkeelle lähtö voi olla nykivää tai jopa mahdotonta. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun moottoria pyörittää virrattomana. Polkupyörä käytössä tämä ei välttämättä ole mikään merkittävä ongelma, sillä liikkeelle lähtiessä voi polkea polkimilla, jolloin sähkömoottorikin lähtee pyörimään ja liikkuvan



moottorin on helpompi synkronoida itsensä. Harjattomat moottorit on aina varustettu moottorin asentoa tarkkailevilla antureilla, mikä mahdollistaa virran antamisen juuri oikeaan kohtaan ja liikkeelle lähtö paikaltaan sujuu ongelmitta. Harjattomat moottorit tarvitsevat kuitenkin kaverikseen aina kommutaattorin eli ohjainlaitteen, joka ohjaa sähkövirran kulkua eri käämeissä asentotunnistimien antamien tietojen mukaan. Yleisimmissä sähköpyöräkäyttöön soveltuviissa moottoreissa aseman tunnistamiseen käytetään Hall-antureita ja näitä on yleensä vähintään kolme. Tämä mahdollistaa moottorin moitteettoman toiminnan myös siinä tapauksessa, että joku antureista rikkoutuu. Mitä enemmän staattorikehällä on käämejä ja roottorissa magneettipareja, sitä tarkempaa moottorin toiminnasta saadaan.

Yleisin pienkonekäytössä oleva moottorityyppi on kestromagneettimoottori, jossa kestromagneetit on sijoitettu roottoriin. Staattorin käämejä ohjataan kommutaattorilla, joka puolijohdetransistoreja käyttämällä säätelee virtaa käämien välillä antureiden antamia asentotietoja hyväksikäyttäen.

### 5.1.1 Napamoottori

Yleisin käytetty ratkaisu, niin valmiissa sähköpyörissä, kuin myös sähköpyörien muunnossarjoissa, on niin sanottu napamoottori (kuva 6) [16]. Napamoottori on rakenteensa ansiosta hyvin yksinkertainen asentaa ja yleisyytensä ansiosta edullinen hankintahinnaltaan. Napamoottori tulee nimensämukaisesti kiinni suoraan pyörän napaan, joko eteen tai taakse. Napamoottori on rakenteeltaan päinvastainen verrattuna yleisesti pienelektroniikka käytössä oleviin sähkömoottoreihin. Yleensä sähkömoottoreissa ulkokuori on paikallaan pysyvä staattori, ja tämän sisällä pyörii roottori, josta lähtee voiman ulostuloakseli. Napamoottorissa kuitenkin akseli on kiinteästi paikallaan pyörän rungossa pyörännavan kohdalta ja paikallaan pysyvä staattori on moottorin sisällä. Napamoottorissa roottorina toimii moottorin runko, joka pyörii sisustan ympärillä. Moottorin runko on kiinnitetty pyörän pinoihin, joiden avulla moottorin pyörivä liike saadaan välitettyä vanteelle ja renkaan kitkapinnan kautta tiehen. Napamoottorin kanssa ei siis tarvita erillistä voimansiirtoa, vaan se hoidetaan moottorin rungolla.



Kuva 6. Napamoottori.

Napamoottoreita on tarjolla joko etu- tai takapyörälle tarkoitettuja. Useimpiin malleihin on myös mahdollista kiinnittää levyjarruilla varustetun pyörän jarrulevy. Takapyörälle tarkoitetuissa moottoreissa on aina paikka, mihin voidaan kiinnittää hammasratas ketjuja varten, jotta pyörää voidaan myös polkea kuten tavallista polkupyörää.

Napamoottorit ovat lähes poikkeuksetta harjattomia, ja niissä on sisäkehällä (staattorissa) useita erillisiä keloja, vähintään kolme. Ohjausyksikkö syöttää näihin keloihin virtaa aina yhteen kerrallaan, ja ulkokehässä olevat magneetit yrittävät seurata tätä virtaa, mikä aikaansaa pyörivän liikkeen. Jotta ohjausyksikkö tunnistaisi moottorin asennon ja tietäisi, mihin kelaan syöttää virtaa milloinkin, tarvitaan moottorissa Hall-antureita. Hall-antureiden avulla ohjausyksikkö tunnistaa ulkokehän magneettien sijainnin ja moottorin pyörimissuunnan.

Napamoottorin vaihteettomuus on samanaikaisesti sen vahvuus että heikkous. Vaihteettomuuden takia ei tarvita monimutkaisia ratas- ja ketjurakennelmia, joten rakenne on yksinkertainen. Toisaalta taas vaihteettomuuden takia napamoottorin suorituskyky on kompromissi eri tilanteiden välillä. Vaihteella varustetuissa moottoriratkaisuissa moottorin pyörälle tuottaman vääntömomentin voi sovittaa kuhunkin tilanteeseen sopivaksi, mutta napamoottorin kanssa tämä ei ole mahdollista. Erityisesti ajotilanteiden ääripäissä, lähdöissä ja huippunopeuksissa, napamoottorin rakenne aiheuttaa haasteita. Lähdössä tarvittaisiin paljon vääntömomenttia, että kitkavoimat saadaan voitettua [18], ja huippunopeutta varten tarvitaan suurta pyörimisnopeutta. Vaihteilla nämä tilanteet ratkaistaisiin luonnollisesti niin, että lähdössä käytettäisiin pientä vaihdetta ja huippunopeutta tavoiteltaessa suurta vaihdetta.

Napamoottorin voi sijoittaa joko etu- tai takapyörännapaan. Kummallakin sijoituksella on hyvät ja huonot puolensa. Etupyörään sijoitettu moottori on järkevämpi, jos ajaa talvella, sillä tällöin saadaan vetoa molempiin pyöriin. Sähköpyörä hoitaa etupyörän ja jaloilla poljetaan takapyörää. Etupyörään ei kannata laittaa kovinkaan tehokasta moottoria. Pyörän kannattimet voivat hajota, kun niihin kohdistetaan vääntöä, sillä niitä ei ole suunniteltu vetävän pyörän kannattamiseen, toisin kuin takapyörän vastaavia. Takana lisäksi takapyörä pyrkii pyörimään koria kohti eikä siitä pois, minkä takia tehokkaammat moottorit tulisi sijoittaa taka-akselille. Huono puoli moottorin sijoittamisessa taakse on pyörän takapainoisuuden korostuminen entisestään. Takapyörä joutuu monesti kannattelemaan jo valmiiksi suuren osan kuormasta kuljettajan muodossa ja lisäksi vielä mahdollisen tavaratelineen tavaroineen.

### 5.1.2 Keskimoottori

Keskimoottorilla (kuva 7) tarkoitetaan sähköpyörien yhteydessä polkupyörän keskiosassa, yleensä polkimien lähellä sijaitsevaa sähkömoottoria. Keskimoottorilla varustetussa sähköpyörässä veto välitetään moottorilta takapyörälle ketjujen ja rattaiden välityksellä [17]. Juuri ketju- ja ratasvälitteisyydessä piilevät keskimoottorin hyvät ja huonot puolet muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Koska voima kulkee takapyörälle rattaiden kautta, voidaan pyörässä jo valmiina ollutta vaihteistoa käyttää hyväksi myös sähkömoottorilta saatavan väännön sovittamisessa kulloiseenkin ajotilanteeseen. Näin ollen keskimoottorissa ei jouduta tekemään samanlaisia kompromisseja kuin napamoottorin kanssa. Vaihteiston avulla moottorista saadaan tarpeentullen paljon vääntömomenttia esim. mäkien nousuun tai suurta pyörintänopeutta huippunopeutta vaadittaessa. Toisaalta rattaat hankaloittavat huomattavasti asennustyötä ja vaativat tarkkaa mitoittamista, että pyörä toimisi toivotunlaisesti. Ylimääräisiä rattaita ja moottoria voi olla hankala sijoittaa pyörän runkoon, toisin kuin kätevästi vanteen paikalle menevää napamoottoria.



Kuva 7. Keskimoottori.

Keskimoottoria käytettäessä riittää yleensä hieman pienempitehoinen moottori, koska siitä irti saatavaa hyötyä pystytään parantamaan vaihteistolla. Samalla moottorin hyötysuhde paranee ja tarvittavan akun kapasiteetti pienenee. Keskimoottorilla säästetään siis myös hieman painoa. Myös pyörän käsiteltävyys paranee, koska painopiste on keskellä pyörää ja yleensä myös alhaalla. Keskimoottori on harvinaisempi ja monimutkaisempi kuin napamoottori, ja on täten myös kalliimpi vaihtoehto. Keskimoottori on yleensä myös äänekkäämpi rattailla toteutetun voimansiirron takia. Sähkömoottori on kiinni polkimien rataspakassa joko suoraan tai erillisen ketjun välityksellä.

## 5.2 Akut

### 5.2.1 Toimintaperiaate

Akun tehtävä on varastoida energiaa sähkökemiallisessa muodossa, eli ladattaessa muuttaa sähköenergia kemialliseksi energiaksi ja purettaessa luovuttaa sähköenergiaa. Akuissa käytetään erilaisia yhdisteitä, joilla jokaisella on hieman erilaiset ominaisuudet energian vastaanoton ja luovutuksen suhteen. Energian vastaanotto, eli lataus on useimmiten suhteellisen hidasta, sillä akut ottavat vain vähän energiaa vastaan ilman lämpiämistä. Energian luovutus, eli virranantokyky taas riippuu paljolti akun tyypistä.

### 5.2.2 Sähköpyörää ajatellen tärkeimmät akkutyypit

Perinteisin akkutyyppejä, eli nikkeli-kadmiumakku (NiCd) on ominaisuuksiltaan hyvin joustava. Sitä voi käyttää eri lämpötiloissa, ja sen virranantokyky on suuri [19]. Tämän takia se on suosittu esimerkiksi porakoneissa ja muissa työkaluissa, joissa virtaa tarvitaan paljon ja käyttökin saattaa olla ulkona kylmässä. Myös käyttöikä nikkeli-kadmiumakussa on pitkä, mikäli lataus ja säilytys tehdään oikeaoppisesti. Nykyään sen käyttöä on rajoitettu huomattavasti, koska kadmium on ympäristömyrky.

Nikkeli-metallihydridiakun (NiMH) suuri kapasiteetti varastoida energiaa tulee käytännölliseksi sähköpyörää tehdessä, kun ajokantamasta saadaan laajempi samankokoisella ja painoisella akustolla. Suurin etu NiMH-akulle tulee hinnasta, joka on muita akkutyyppejä selvästi alempi. Akun virranantokyky pitäisi myös olla muita parempi, sillä sitä on käytetty sähkötyökalusovelluksissa. Huonona puolena tällä akulla on sen hidas lataaminen, sillä se kehittää latauksessa lämpöä ja täten lataus täytyy suorittaa älylatureilla tai muuten hitaasti.

Litium-ioniakku (Li-ion) on energiatiheä [19], sillä litium on kevyin akuissa käytetty metalli. Virranantokyky on parempi kuin NiMH akuissa, mutta yllätausta Li-ion ei kestä ollenkaan, vaan paine akun sisällä kasvaa hajottaen akun. Li-ion-akku myös vanhenee ajan myötä, vaikka käyttöä ei olisikaan.

Lyijyakku on autoissa, trukeissa ja muissa raskaan kaluston ratkaisuihin paljolti käytetty. Akun paino tulee lyijystä, joka toimii elektrodina, ja elektrolyyttinä on rikkihappoliuos.

### 5.2.3 Nikkeli-metallihydridi

Aluksi päädyttiin käyttämään NiMH-akkuparistoja, sillä niiden kyky varastoida energiaa (noin 60 - 120 Wh/kg) painoon nähden on hyvä, lähes Li-ion-akkujen (110 - 160 Wh/kg) tasolla [19]. Samalla sen virranantokyky on teoriassa parempi ja muistiongelmat eivät vaikuta kuten muilta osin samankaltaisessa NiCd-akussa. Sähköpyörissä suurta virranantokykyä tarvitaan etenkin liikkellehdössä ja täyskaasukiihdytyksessä.

Ongelmina NiMH-akussa on sen lataaminen ja ylläpito, sillä ylläpito rikkoo akun ja lataaminen tarvitsee älylaturin [19]. Akku myös purkautuu itsestään muita akkutyyppejä noin 50 % nopeammin, joten akusto tarvitsee latausta myös silloin, kun sitä ei käytetä.

#### 5.2.4 Li-ion

Li-ion-akut ovat kalliimpia ja ne tarvitsevat valvontajärjestelmän, joka suojelee akkua yli- ja alipurkautumiselta. Hyvänä puolena Li-ion-akussa on sen pieni itsestään purkautuminen ja suuri energiatiheys. Li-ioni-akussa ei myöskään esiinny muistiongelmia. Ominaisuuksien puolesta Li-ion akku olisi ollut ensisijainen valinta sähköpyörään, mutta sen kalliin hankinta hinnan takia päädyimme kokeilemaan NiMH-akkuparistoja.

#### 5.3 Moottorinohjaus

Moottorinohjaus on oleellinen osa sähköpyörää. Siinä missä perinteiset harjalliset tasavirtamoottorit toimivat vaikka suoraan akkuun kytkettynä, yleisimmin polkupyöräsovelluksissa käytettävät harjattomat tasavirtamoottorit vaativat toimiakseen ohjainlaitteen. Moottorinohjainlaite jakaa jännitteen kolmeen vaiheeseen ja ohjaa sen vuorotellen moottorin käämeihin juuri oikeassa järjestyksessä, niin että roottori pyörii tasaisesti staattorin ympärillä[20]. Tietääkseen moottorin asennon ja mihin staattorin käämiin virta tulee ohjata seuraavaksi, tarvitsee ohjainlaite tietoa moottorilta. Tämä on yleensä hoidettu Hall-antureilla, jotka kertovat ohjainlaitteelle missä asennossa roottori milloinkin on. Ohjainlaite myös muuntaa moottorin pyörintänopeutta kuljettajan toiveiden mukaisesti. Mikäli pyörä on tehty lakipykälän mukaan, ei siinä voi moottorin momenttia muuttaa halutunlaiseksi, vaan moottori avustaa ainoastaan poljettaessa ennalta määrättyllä teholla. Monessa rakennussarjassa kuitenkin on mukana kaasukahva tai peukalokaasu, jolla moottorin momenttia voi säädellä halunsa mukaan.

## 6 Projektin esittely

### 6.1 Projektin tavoitteet

Tarkoituksena oli rakentaa tavallisesta polkupyörästä sähköpyörä muunnossarjaa käyttäen. Pyörällä oli tarkoitus päästä yhdellä latauksella työmatka edestakaisin. Kustannukset pyrittiin pitämään alle tuhannen euron. Tehotasoja pyörään suunniteltiin kaksi, toinen tieliikennekäyttöön ja toinen maastokäyttöön.

### 6.2 Aikataulu

Tavoitteena oli saada pyörä ajokuntoon kesällä 2014. Projekti aloitettiin maaliskuussa 2014. Koska akku päätettiin rakentaa itse ja yksittäiset paristot sai halvimmalla Kiinasta, josta toimitusaika Suomeen on noin kuukauden luokkaa, aloitettiin projekti akkutyypin valinnalla. Kun valinta oli suoritettu, laitettiin paristot tilaukseen. Myös akkukotelon rakentamiseen oli ennakoitu kuluvan kauan aikaa, siksi projekti oli hyvä aloittaa juuri akusta.

Paristojen toimitusta odottaessa alettiin etsiä käytettyä tarkoitukseen soveltuvaa polkupyörää, tällä ei kuitenkaan ollut vielä kiire niin pystyimme rauhallisesti odottamaan, että sopiva pyörä löytyy edulliseen hintaan. Samalla myös tutkittiin eri moottorivaihtoehtoja. Kun sopiva moottoripaketti oli valittu, sekä edullisin ja järkevin tilauspaikka löydetty, laitettiin moottoripaketti heti tilaukseen, sillä toimitusajat olivat tässäkin pitkiä. Moottorilla ei ole niin kiire kuin akulla, koska moottorin asennuksen pyörään odotetaan olevan helppo ja nopea osuus.

Kun paristot saapuivat, ja niiden todellinen koko nähtiin, pystyttiin aloittamaan akkukotelon suunnittelu. Tässä vaiheessa polkupyörä oli jo hankittuna, jotta akkukotelon mitat ja muoto pystyttiin määrittämään. Akkukotelon suunnitteluun ja rakentamiseen uskottiin menevän yhdestä kahteen kuukauteen, samalla moottori ja tarvittavat anturit yms. ehdittiin asentamaan polkupyörään.

## 6.3 Riskit

Projektin onnistumiseen tai epäonnistumiseen vaikuttavia tekijöitä oli useita. Osa riskeistä uhkasi toteutuessaan koko projektin loppuun viemistä, osa taas vaikutti vain lopputuloksen onnistuneisuuteen. Riskit liittyivät lähinnä käytettäviin komponentteihin sekä niiden laatuun. Myös rajallinen budjetti aiheutti ongelmia.

Suurin riski liittyi akustoon, sillä erillisten halpojen paristojen tasalaatuisuudesta ei ollut takeita. Muihin komponentteihin liittyi myös riski, että niiden laatu olisi ollut huonompi, kuin myyntitiedoissa oli annettu ymmärtää.

## 7 Komponenttien valitseminen

### 7.1 Polkupyörä

Polkupyörän tyyppi valittiin pitkälti henkilökohtaisten mieltymysten ja käyttötarkoituksen, sekä hinnan mukaan. Sähköpyörätekniikka asetti kuitenkin joitain rajoitteita. Suurimpana rajoittavana tekijänä oli rengaskoko, joka asettui 26 tuumaan, koska moottoria ei ollut saatavilla isompaan vanteeseen asennettuna. Koska akku haluttiin painonjakauman takia asentaa ehdottomasti runkokolmioon, jäivät vaihtoehtoista pois sellaiset mallit, joissa runko oli liian ahdas tai se ei ollut rakenteeltaan ollenkaan perinteinen kolmio, kuten esimerkiksi suurimmassa osassa täysjousitettuja pyöriä. Yksi poissulkeva tekijä oli myös takahaarukan leveys, jolle taka-akselille sijoitettava moottori asetti tiettyjä vaatimuksia.

Pyörämalliksi valikoitui maastopyörä (kuva 8), koska pyörällä piti pystyä ajamaan myös maastossa. Lisäksi maastopyörissä 26 tuuman pyörä koko on yleisempi kuin esimerkiksi hybridi- ja maantiepyörissä, joissa 27,5 ja 29 tuumaa ovat suosittumia. Ajomukavuuden takia pyörässä tuli olla ainakin jousitettu etuhaarukka. Myös takajousituksella varustettuja täysjousitettuja pyöriä tutkittiin vaihtoehtona, mutta ne rajautuivat nopeasti pois korkean hintansa tai epäsovivan runkorakenteensa takia. Koska pyörästä oli tulossa muunnoksen jälkeen melko raskas, valintaa suoritettaessa etusijalle asetettiin pyörät joista löytyi levyjarrut, jotka ovat vannejarruja tehokkaammat.





Kuva 8. Polkupyörä.

Projektin alussa pyörälle varattu budjetti rajoitti vartenotettavat vaihtoehdot käytettyihin malleihin. Kärsivällisen etsinnän jälkeen internetin markkinasivustolta ([www.tori.fi](http://www.tori.fi)) löytyi pientä kunnostusta vaativa, mutta teknisiltä ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan sopiva yksilö.

## 7.2 Moottori

Moottoria valittaessa päätökset täytyy tehdä moottorityypin ja tehon suhteen. Moottorityypin suhteen vaihtoehtoja oli kaksi: napamoottori etu- tai takapyörään sekä keskimoottori. Lopulta valinta muodostui hyvin helpoksi, sillä keskimoottoreiden hinnat ovat vähintään kaksin- tai kolminkertaiset napamoottoriin verrattuna. Lisäksi asennuksen helppous ja yksinkertaisen rakenteen tuoma huoltovapaus puolsivat napamoottoria.

Päädymme napamoottoriin täytyi vielä päättää, halutaanko moottori etu- vai takapyörään. Etupyörä olisi painojakauman takia parempi, sillä taka-akselilla on kannettavanaan suurempi kuorma ilman lisävarusteitakin. Lisäksi moottorin vetäessä etupyörää olisi pyörä poljettaessa kaksivetoinen, mikä varmasti parantaisi etenemistä hankalissa olosuhteissa, kuten lumessa, mudassa tai pehmeässä hiekassa. Oikeastaan ainoa negatiivinen asia moottorin sijoittamisessa etupyörään on pyörän rakenteiden kesto. Koska etupyörää ei ole suunniteltu vetäväksi, ei myöskään etuhaarukkaa ole tehty tätä tehtävää varten. Kun haarukkaan kohdistetaankin vääntöä, voivat pyörännavan kiinnikkeet antaa periksi, ja jos tämä tapahtuu vauhdissa, voivat

seuraukset olla ikävät. Lopulta tämä seikka muodostui ratkaisevaksi tekijäksi päätöstä tehdessä, koska valittu moottori oli tehoiltaan korkeimmasta päästä.

Kun moottorin tyyppi ja sijoituspaikka oli päätetty, oli jäljellä enää tehon valitseminen. Lakipykälän määräämä maksimiteho on 250 wattia, mutta koska pyörää haluttiin käyttää myös metsäpoluilla ja ajaa välillä ilman polkimilla avustamista, tarvittiin tehoa enemmän. Lakipykälät täytettäisiin riittävin osin muilla keinoilla, joista kerrotaan moottorinohjauksen luvussa (luku 6.3) lisää. Yleisimmät teholuokat napamoottoreissa ovat 250 W, 500 W, 750 W ja 1000 W. Vieläkin tehokkaampia on saatavilla, mutta huomattavasti vähemmän kuin edellämainittuja, joten niiden hinnat ovat jo huomattavan paljon korkeammat. Moottorit myydään yleensä paketissa, johon kuuluu mm. ohjainlaite, kaasukahva ja tarvittavat anturit. Tällaisten pakettien hinnat ovat 250 - 350 euron tuntumassa, hintaeroa 250 W:n ja 1000 W:n paketeilla ei ole kuin muutamia kymmeniä euroja. Koska hintaerot ovat hyvinkin pieniä, päädyttiin moottoripaketin kohdalla tehokkaimpaan mitä on helposti saatavilla, eli 1000 watin järjestelmään. Asioiden helpottamiseksi etsittiin pakettia, jossa tulisi mukana moottorin lisäksi ohjainlaite ja kaikki tarvittavat lisälaitteet, sen sijaan että nämä kaikki ostettaisiin erillisinä. Näin varmistettiin, että osat varmasti toimivat toistensa kanssa, eikä ikäviä yllätyksiä pitäisi syntyä. Lisälaitteet, jotka paketista oli ehdottomasti löydettävä, olivat kaasukahva, jolla säädellään moottorin tehoa, poljintunnistin, joka tunnistaa polkimien pyörimisen. Lisäksi suositeltavaa oli, että paketti sisältäisi jarrukahvat tunnistimella, joka katkaisisi moottorin virransyötön jarrutustilanteessa.

Erilaisia paketteja vertailtaessa havaittiin, että suurin osa myynnissä olevista laitteista olivat hyvinkin samankaltaista toistensa kanssa. Selkeästi suurin osa tarjolla olevista tuotteista oli kiinalaisia, mikä ei sinänsä ole yllättävää, onhan Kiina maailman johtava maa niin elektroniikassa kuin sähköpyöräilyssäkin. Kiinalaisten tuotteet olivat myös halvempia kuin ne harvat muunmaalaiset, lähinnä amerikkalaiset, tuotteet joihin törmäsimme. Lähes kaikki 1000 W:n moottoripaketit sisälsivät moottorinohjaimen lisäksi kaasukahvan ja jarrutunnistimet, mutta harvassa tehokkaammassa paketissa oli poljintunnistinta mukana. Niinpä vaihtoehdot rajattiin näihin paketteihin, joissa tunnistin oli. Kiinasta tilattuna sopivan paketin olisi saanut noin 250€:lla, mutta tästä olisi joutunut todennäköisesti maksamaan tullitarkastuksen jälkeen vielä arvonlisäveroa 24% tuotteen hinnasta. Lisäksi toimitusajat Kiinasta ovat noin kuukauden luokkaa. Valintamme kohdistuikin pakettiin, joka löytyi espanjalaisesta verkkokaupasta ja

vieläpä lähes yhtä edullisesti kuin Kiinasta. Paketti sisälsi kaiken tarpeellisen, mutta sen kohdalla ei tarvinnut pelätä tullin yhteydessä tuleva verokustannuksia.

### 7.3 Moottorinohjaus

Moottorinohjaimen suhteen ei tarvinnut juurikaan valintaa suorittaa, sillä moottoripaketit sisältävät aina kyseiselle moottorille ja oheislaitteille soveltuvan moottorinohjaimen. Oikeastaan ainoa päänvaivaa aiheuttanut valinta kohdistui erääseen moottorinohjaimen liittyvään osa-alueeseen, nimittäin tehon rajoittimeen. Koska valittu moottoripaketti on tehoiltaan suurempi kuin Suomen laki sallii tieliikennekäytössä, ja moottori toimii myös ilman polkemista, täytyi keksiä jokin keino millä pyörästä saa lakipykälät täyttävän.

Rajoittimeksi harkittiin aluksi jotain yksinkertaista ratkaisua, kuten tarvittaessa päälle kytkettävää vastusta. Lopulta kuitenkin päädyttiin hieman monimutkaisempaan, mutta huomattavasti monipuolisempaan ratkaisuun. Päätimme tehdä moottorinohjaimen eteen lisäohjaimen ohjelmoitavasta Arduino-mikrokontrollerista. Mikrokontrollerilla pystymme ohjelmoimalla toteuttamaan halutulla tavalla kaksi eri ajomoodia, tieliikenne ja maastoajo, jotka voidaan valita ohjaustankoon asennetusta kytkimestä. Muut ratkaisut asian suhteen olisivat olleet kompromisseja suuntaan tai toiseen, mutta mikrokontrollerilla pystymme tekemään pyörästä juuri sellaisen kuin haluamme.

### 7.4 Akusto

#### 7.4.1 Akkutyypin valinta

Vaihtoehtoja oli useita niin tyyppin, koon kuin valmistajan suhteen. Tutkiessamme eri akkutyyppejä ja niiden soveltumista sähköpyörään, tutustuimme mm. Li-ion-, Ni-MH- ja NiCd-akkutyyppeihin ja niiden ominaisuuksiin ja hintoihin, sekä vertasimme näiden soveltuvuutta sähköpyörän akustoksi. Li-ion-akku vaikutti alkuun hyvältä vaihtoehdolta, mutta sen huonoksi puoleksi ilmeni huono virranantokyky ja akun huonontuminen ajan myötä. Ni-MH-akku vaikutti kaikin puolin lupaavalta, paitsi lataukseltaan se vaati kehittyneemmän laturin, jollaista ei ollut helposti saatavilla. NiCd-akuston huonoksi

puoleksi osoittautui sen muisti-ilmiö, eli jos akkua puretaan jatkuvasti saman verran, eikä välillä tyhjäksi, sen kapasiteetti alenee.

Luimme paljon sähköpyörien rakentajien kokemuksia eri akuista ja päädyimme käyttämään omassa projektissamme Ni-MH-akkuparistoja, sillä niiden virranantokyky oli selvästi soveltuvien sähkömoottorin suureen virrantarpeeseen. Haasteena Ni-MH-akussa oli sopivan laturin löytäminen, sillä niitä ei ollut saatavilla kuin Amerikasta, josta postituskulut melkein kaksinkertaistivat laturien hinnan.

## 8 Toteutus

### 8.1 Pyörän kasaaminen

Projektin lähtökohtana toimii aiemmin mainittu käytettynä hankittu polkupyörä. Pyörä on 26 tuuman renkailla varustettu 21-vaihteinen etujousitettu maastopyörä, jossa on mekaaniset levyjarrut edessä ja takana.

Kun pyörä oli saatu kunnostettua ajokuntoon, pystyttiin aloittamaan muutostyöt sen sähköistämiseksi. Ensimmäiseksi asennettiin moottori, joka oli myyjän toimesta jo pinnoitettu 26 tuuman vanteelle. Rengas ja jarrulevy otettiin vanhalta vanteelta. Moottoriasennettiin pyörän takahaarukkaan, kaasukahva ohjaustankoon ja ohjainlaite tavaratelineelle.

### 8.2 Akuston kokoaminen paristoista

Tilasimme yli 90 kappaletta 1,2 voltin 10000 mAh:n NiMH-paristoja (kuva 9), kokoluokkaa C. Näistä oli tarkoitus käyttää 80 kappaletta eli 40 per kenno, jolloin yhden kennon nimellisjännitteeksi tulee 48 voltia, ja nämä kaksi kennoa asennettaisiin rinnan kytkettynä riittävän tehon ja kestävyuden saamiseksi. Teoriassa 10000 mAh, 48 voltia ja NiMH-akkujen hyvä virranantokyky olisi ollut riittävä ja hieman jopa ylimitoitettu sähkömoottorille. Akuston kokoaminen paristoista vaikutti hyvältä vaihtoehdolta verrattuna kalliisiin sähköpyöriin tarkoitettuihin valmisakkuihin.



Kuva 9. NiMH-paristot.

Paristot oli alun perin tarkoitus juottaa yhtenäiseksi levyksi, mutta levyn muotoinen akusto olisi ollut hankala sijoittaa polkupyörään. Paristoja soviteltiin pyörän runkoon, jolloin huomattiin, että ne mahtuisivat parhaiten rungon keskiosaan jonossa kahden tai kolmen riveissä. Akkukotelosta päätettiin rakentaa ensin karkea prototyyppi, niin että akkua päästäisiin testaamaan ja varmistamaan toimivuus ennen varsinaisen kotelon rakentamista. Sarjoitukseen käytettiin sopivan kokoista muoviputkea (kuva 10), johon paristot oli helppo laittaa jonoon. Päähän laitettiin reikärautaa (kuva 11), joka johtaisi virtaa ja samalla pitäisi paristot paikallaan. Toiseen päähän laitettiin reikäraudan lisäksi jousi, joka painoi paristoja vielä tiiviimmin yhteen. Putket yhdistettiin reikäraudalla, johdoilla ja teipillä toisiinsa. Akku saatiin lopulta käyttökelpoiseen kuntoon ja se kiinnitettiin pyörän runkoon runkokolmion alaputken juomapullotelineen ja mustekalakuminauhan avulla.



Kuva 10. Muoviputket.



Kuva 11. Reikärautapäätty.

### 8.3 Moottorin ohjaus

#### 8.3.1 Ohjainlaite

Työssä käytettiin hyväksi moottorisarjan mukana tullutta ohjainlaitetta, jossa oli kaikki tarvittavat kytkennät valmiina. Valmiiseen ohjainlaitteeseen päädyttiin lähinnä

ajansäästösyistä, sillä ohjainlaitteen suunnitteleminen ja tekeminen itse alusta lähtien olisi ollut jo itsessään yhden insinööriyön laajuinen aihe. Valmiina saatavat ohjainlaitteet ovat kustannuksiltaan melko halpoja projektin muihin osa-alueisiin verrattuna. Itse tehty ratkaisu olisi todennäköisesti tullut jopa kalliimmaksi. Moottorisarjan mukana tuli lisäksi kaikki tarvittavat lisälaitteet, kuten polkemistunnistin, peukalokaasu ja jarrukahvat, joita voitiin käyttää vedon katkaisuun jarruttaessa.

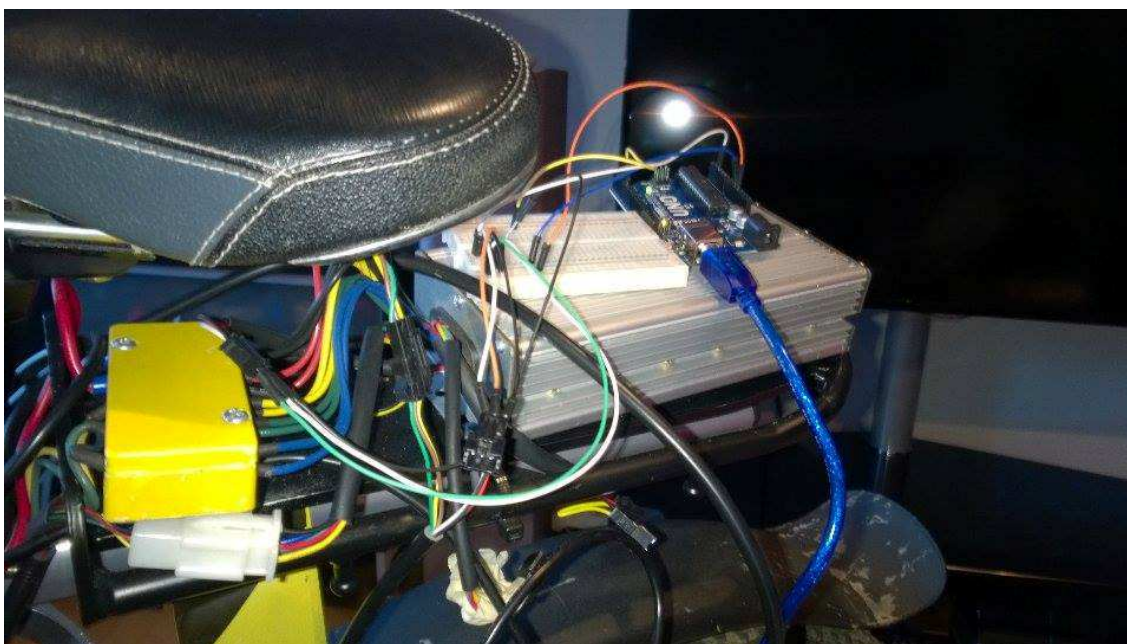
Jotta pyörä täyttäisi lain asettamat vaatimukset, täytyi pyörän tehoa ja toimintanopeutta rajoittaa, kun ajetaan tieliikenneajotilalla. Yleisten teiden ulkopuolella tapahtuvaa maastoajoa varten ei rajoituksia tarvita. Rajoitus aiottiin toteuttaa ohjelmoitavan Arduino-mikrokontrollerin avulla. Arduinohjelmointikieli on hyvin yleinen C-kieli, johon löytyy ohjeita ja esimerkkejä runsaasti eri käyttökohteisiin. Meidän tarpeisiimme ei luonnollisestikaan löytynyt suoraan mitään aikaisempaa vastaavaa Arduino-pohjaista projektia, vaan ohjelmaa suunniteltaessa jouduttiin käyttämään hyväksi useampaa eri esimerkkiä ja ohjetta.

### 8.3.2 Nopeudenrajoittimen luominen Arduinolla

Suomen lainsäädännön täyttämistä varten pyörään piti saada tarvittaessa kytkettävä nopeudenrajoitin, joka myös samalla kytkisi poljintunnistimen käyttöön. Toteutukseen valittiin ohjelmoitava Arduino Uno -mikrokontrolleri, joka toimii yleisellä C-ohjelmointikielellä. Ensin hahmoteltiin kytkentäkaavio. Sen perusteella voitiin aloittaa ohjelman kirjoitus käyttäen kaaviossa olevia Arduinon sisään- ja ulostuloportteja. Alkuvaiheessa ja keskityttiin tekemään prototyyppi tieliikenne versiosta. Ohjelmaa kirjoittaessa tavoitteena oli rajoittaa Arduinolla kaasukahvalta tuleva noin 4,8 voltin maksimijännite sellaiseksi, että moottorinohjaimelle syötettäessä tämä jännite kuljettaisi pyörää enintään 25 kilometrin tuntinopeudella. Sopivaksi suhteeksi valikoitui testien kautta 1:4, eli moottorinohjaimelle syötettiin neljäsosa kaasukahvan toiveesta.

Kun ohjelman ensimmäinen osa (liite 2) eli nopeuden rajoitus oli saatu kirjoitettua, rakennettiin kytkentälevyä ja hyppylankoja hyväksi käyttäen kytkentä, jolla ohjelmaa pystyttiin kokeilemaan käytännössä (kuva 12). Ohjelma rajoittikin nopeutta ja tehoa tehokkaasti, mutta tasanopeudella esiintyi pätkimistä. Ongelmaa yritettiin ratkaista ohjelman parametreja kuten viivettä ja raja-arvoja muuttamalla, mutta millään ei ollut vaikutusta. Kytkentään lisättiin myös kondensaattori tasaamaan virransaantia, mutta

tälläkään ei ollut vaikutusta. Lopulta pätkiminen jätettiin huomiotta ja siirryttiin seuraavaan vaiheeseen, poljintunnistimen lisäämiseen. Poljintunnistin kytkettiin ainoastaan Arduinoon, ja tarkoituksena oli kirjoittaa ohjelma niin, että mikäli poljintunnistimelta ei tule jännitettä yli määritetyn rajan, moottorille ei mene ohjaussignaalia ollenkaan. Tässä kohden ilmenneiden ongelmien vuoksi, joita selvitetään tarkemmin kohdassa 7.4.2, moottorinohjauksen jatkokehityksestä päätettiin luopua.



Kuva 12 Prototyyppi.

## 8.4 Ongelmakohdat

### 8.4.1 Akusto

Ongelmia ilmeni jo kokoamisvaiheessa. Muoviputkeen sijoitetut paristot eivät ottaneet kontaktia toisiinsa, vaikka molemmissa päissä oli reikärauta vastakappaleena sekä jousi takaamassa hyvän kontaktipinnan. Tämä ilmeni joissain putkissa jatkuvasti ja toisissa ei kertaakaan, joten oletettiin, että oli tehty jokin virhe asennusvaiheessa. Huonosti toimivat putket purettiin, paristot mitattiin ja putket koottiin uudestaan. Tämä ei siltikään parantanut kontaktia, vaan paristoja piti puristaa voimalla yhteen, jotta jännite nousisi. Paristoja yhdisteltiin eri tavoilla, mutta jokainen yritys epäonnistui tuottamaan halutun jännitteen.



Ongelman aiheuttaja paljastui, kun akkuja oli ensi kertaa ladattu. Latauksen jälkeen mitattiin jokaisen pariston jännite ja ongelmia aiheuttaneiden putkien sisältä löytyi paristoja, joiden jännitteet olivat todella alhaisia. Nämä paristot olivat siis käyttökelvottomia alunalkaen, ja tässä vaiheessa epäilyksiä nousimyös muiden paristojen luotettavuuden suhteen.

Kun akusto saatiin korjattua jokseenkin toimivaksi kokonaisuudeksi, kokeiltiin sähkömoottorin toimintaa pyörässä. Kaasua kääntäessä normaalisti tehot hävisivät heti, eli ohjausjärjestelmän sisäänrakennettu turvakytkin sulki virran syötön moottorille, kun akun jännite putosi alle 36 voltin. Erittäin hitaasti kaasua lisätessä akusto jaksoi liikuttaa pyörää hiljalleen eteenpäin. Mittauksista selvisi, että virta ja jännite laskivat äkillisesti alle odotettujen lukemien, kun kaasua käännettiin reilummin. Toisin sanoen akuston virranantokyky oli odotettua noin 10 kertaa huonompi. Tämä täytyi kumminkin todeta erillisillä vastuksilla, jotta varmistuttiin, ettei vika ole moottorissa tai sen ohjainlaitteessa.

Tilasimme kaksi tehovastusta arvoiltaan 0,1 ohmia, jotka sarjaan kytkettynä toimisivat 0,2 ohmin vastuksena yhdelle paristolle. Kirchhoffin II lain[21] mukaan  $U = RI$  ( $U$  on jännite, eli pariston jännite 1,2 voltia,  $R$  on resistanssi, eli tässä tapauksessa kahden vastuksen sarjaankytkennän tulos ja  $I$  on virta, joka silmukassa kulkee) mukaisesti  $U/R = I$  pitäisi 1,2 voltin paristosta tulla 0,2 ohmin vastukseen 6 ampeerin virta. Hetkellisesti virta oli 2 ampeeria, mutta lähti välittömästi laskemaan, ja jo kymmenessä sekunnissa virta oli pudonnut alle 0,7 ampeerin. Kokeilimme myös vastuksien rinnankytkennällä, jolloin vastusarvoksi tulee 0,05 ohmia. Laskennallinen virta-arvo tällöin on 24 A, johon yksi paristo ei millään pystyisi, joten laitoimme kaksi paristoa myös rinnankytkettynä. Tällöin saimme 3 ampeeria irti paristoista, mutta virta laski hyvin äkillisesti. Jo kolmessa sekunnissa virta oli laskenut alle 0,7 ampeerin. Paristojen jännite laski heti testin alussa 1,17 voltista 0,5 volttiin, joka on hälyttävän vähän. Muutaman sekunnin päästä jännite oli laskenut vielä alemmas, jopa 0,35 volttiin. Täten totesimme paristot täysin käyttökelvottomiksi sähköpyörän akkua varten.

#### 8.4.2 Moottorinohjaus

Teoriassa Arduinoon kirjoitetun ohjelman olisi pitänyt toimia juuri suunnitellulla tavalla, mutta syystä tai toisesta näin ei käynyt. Käytössä olevien komponenttien toimintaperiaatteista ei ollut saatavilla juuri mitään tietoja, joten niiden toimintaa jouduttiin arvailemaan mittausten tukemana. Lukuisista yrityksistä huolimatta Arduinoa ei saatu toimimaan antureiden ja moottorinohjaimen välissä toivotulla tavalla. Tehonrajoitus toimi, mutta tasakaasulla esiintyi pätkimistä, jota yritettiin korjata ohjelmallisesti ja lisäämällä kytkentään kondensaattori tasaamaan virransaantia. Mikään ei kuitenkaan auttanut, joten asia jätettiin myöhemmäksi ja siirryttiin seuraavaan vaiheeseen. Poljintunnistinta yritettiin lisätä ohjelmaan siten, että sen voisi ottaa kytkintä kääntämällä käyttöön tai pois käytöstä. Tässä ei kuitenkaan onnistuttu, sillä Arduinoa ei saatu reagoimaan poljintunnistimeen ollenkaan. Muutaman korjausyrityksen jälkeen päätettiin ajan puutteen vuoksi poljintunnistin jättää ennalleen, eli kun sitä halutaan käyttää, täytyy liitin kytkeä manuaalisesti. Pätkimiseen, jota esiintyy rajoitinta käytettäessä tasakaasulla, ei ole löydetty vielä ratkaisua. Ongelman työstämistä jatketaan.

#### 8.5 Budjetin toteutuminen

Rungon, moottorin, laturin ja tarvikkeiden osalta budjetti alitettiin 17 eurolla. Alkuperäinen budjetti, 800 euroa, ylittyi reilusti kun akustoa varten tilaamamme NiMH-akkuparistot eivät antaneet tarpeeksi virtaa kontaktihäiriöstä ja paristojen laadusta johtuen. Uusi sähköpyörään tarkoitettu akusto maksoi 405 euroa. Akkuihin meni yhteensä 638 euroa, josta 233 euroa kului turhiin paristoihin. Uuden akuston myötä budjetti ylittyi 388 euroa alkuperäisistä arviosta.

Lopulliseen tuotokseen käytettiin siis 905 euroa, kun huonosti virtaa antavia paristoja ei oteta huomioon. Budjetti piti siis paikkansa muiden kohdalta lähes täysin paitsi akuston.

Suosittellemme siis käyttämään sähköpyörään soveltuvia valmiita akkuja tai edes varmasti laadukkaita paristoja, vaikka niiden hinnat ovat vielä tätä kirjoittaessa korkealla, varsinkin jos ei ole kokemusta paristojen yhteen juottamisesta.

## 9 Lopullinen toteutus

Pyörä saatiin kuin saatiinkin lopulta koottuaja toimimaan lukuisista aiemmin käsitellyistä vaikeuksista huolimatta. Lopputulos (kuva 13) poikkeaa melko paljon alkuperäisestä suunnitelmasta, ja pyörä on paljon tavoiteltua yksinkertaisempi. Akun vaihtuminen itse tehdystä kaupalliseen malliin ei ainakaan heikennä lopputulostavaan ennemminkin päinvastoin. Uusi akku toimii hienosti, latautuu nopeasti ja kestää riittävästi. Lisäksi kotelo kiinnitystelineineen, kantokahvoineen ja virtalukkoineen on erittäin helppokäyttöinen. Toki tästä aiheutui budjetin ylittyminen melkein kaksinkertaisesti, mutta lopputulos oli kyllä sen arvoinen. Toinen vaihtoehto olisi ollut luovuttaa kiinalaisten paristojen pettäessä, mutta silloin olisi jääty ilman sähköpyörää ja kaikki muut jo ostetut komponentit olisivat menneet hukkaan.



Kuva 13. Lopputulos.

Moottori ja moottorinpaketin mukana tulleet lisälaitteet saatiin asentumaan pyörään helposti, eikä niiden toiminnassa ole esiintynyt ongelmia. Poljintunnistinkin saatiin vaikeimman kautta lopulta paikalleen. Ainoa moottoriin kanssa syntynyt ongelma mitä ei ole saatu korjattua liittyy vaihteisiin. Napamoottorin kyljessä on vaihdepakkaa varten kierteen, mihin asennettiin seitsemänrattainen kierteytetty vaihdepakka takavaihteeksi. Tämä pakka kuitenkin jollain lailla kanittaa hieman, niin että takarenkään rullatessa vapaana polkimet alkavat pyörimään hieman mukana, vaikka niiden pitäisi pysyä paikallaan. Lisäksi takaratas myös pitää rallattavaa ääntä. Ongelma yritettiin korjata irrottamalla vaihdepakka ja rasvaamalla sen laakeri, mutta tällä ei ollut vaikutusta. Haitta koettiin lopulta niin pieneksi, ettei siihen ollut tarpeen sen enempää paneutua.

Moottorin ohjauksen kanssa ei mikään sujunut toivotulla tavalla. Ohjelmointitaitojen vähäisyys sekä käytössä olevien komponenttien teknisten tietojen ja toimintatapojen tarkan tiedon puute aiheuttivat sen, että ohjelmaa ei saatu toimimaan halutulla tavalla. Poljintunnistinta ei saatu toimimaan Arduinon kanssa ollenkaan, lähinnä koska sen toiminta-alueesta ja periaatteesta ei ollut saatavilla riittäviä tietoja. Moottori saatiin pyörimään Arduinon avulla kaasukahvalta tulevan pyynnön mukaan, mutta jostain syystä toiminta oli pätkivää. Koska suoritetuilla mittauksilla ja analyyseillä ei syytä saatu selville, päätettiin Arduino lopulta jättää yhtälöstä kokonaan pois.

Nyt pyörä toimii siis ainoastaan moottoripaketin mukana tulleiden antureiden kanssa. Tehoa ei saatu rajoitettua lainsäädäntöä täyttäväksi, mutta pyörään asennetulla mittarilla voi tarkkailla ajonopeuttaan ja pysyä sallitun nopeuden 25 km/h alapuolella. Poljinsensorin voi nopeasti kytkeä manuaalisesti käyttöön yleisillä teillä ajoa varten ja poistaa käytöstä maastoajoa varten. Tehon rajoitusta varten yritetään löytää jokin toimiva ratkaisu, mutta se kuuluu tämän projektin jälkeiseen elämään. Tällä hetkellä tärkein rajoitin löytyy siis satulan päältä.

Testeissä pyörällä pystyttiin ajamaan polkimilla avustamatta suoralla tiellä noin 45 km/h, ja tämä riittää hyvin. Polkimilla avustamalla pystyy ajamaan jyrkätkin metsämäet ylös hengästyttä ja hikoilematta. Akun kestokin on riittävä, sillä tavoitteeksi asetettu työmatka taittuu molempiin suuntiin lataamatta välillä, ja virtaa riittää vielä tämän jälkeen.

Polkupyörän huvitteluominaisuudet onnistuivat juuri halutulla tavalla, mutta tieliikennettä varten pyörää ei saatu toimimaan toivotunlaisesti. Projektissa melkein kaikki etukäteen kaavaillut riskit toteutuivat, ja aikataulukin venyi alkuperäisestä suunnitelmasta useammalla kuukaudella.

## Lähteet

- 1 Electric bicycle US 552271 A. Verkkodokumentti. IFI CLAIMS Patent Services. <<http://www.google.com/patents/US552271>>. Luettu 4.5.2014.
- 2 Electric bicycle US 596272 A. Verkkodokumentti. IFI CLAIMS Patent Services. <<https://www.google.com/patents/US596272?dq=US+596272+A&hl=fi&sa=X&ei=ZsGTVMGFPKb5yQOPmYHwBg&ved=0CB0Q6AEwAA>>. Luettu 4.5.2014.
- 3 The Past. Verkkodokumentti. Total Motorcycle.com. <<http://www.totalmotorcycle.com/future.htm#past>>. Luettu 5.5.2014.
- 4 Electric bicycle US 3884317 A. Verkkodokumentti. IFI CLAIMS Patent Services. <<http://www.google.com/patents/US3884317>>. Luettu 4.5.2014.
- 5 Hybridit. Verkkodokumentti.. Creative Commons Attribution. <<http://www.sahkoautot.fi/wiki:vertailu-hybridit> >. Päivitetty 3.7.2013. Luettu 8.5.2014
- 6 Sähköavusteiset pyörät. 2014. Verkkodokumentti. Suomen Polkupyörätukku. <[http://www.suomenpolkupyoratukku.fi/index.php?main\\_page=index&cPath=107&zenid=o9c0d4n802bbcahjgr11ei6m6](http://www.suomenpolkupyoratukku.fi/index.php?main_page=index&cPath=107&zenid=o9c0d4n802bbcahjgr11ei6m6)>. Luettu 28.5.2014
- 7 Elite Series. Verkkodokumentti. Optibike Electric Bicycles. <<http://optibike.com/optibike-r11/>>. Luettu 4.5.2015
- 8 Akut. Verkkodokumentti. Greencycle.fi. <<http://www.greencycle.fi/category/2/akut>>. Luettu 10.5.2014
- 9 Product Directory. Verkkodokumentti. Made-in-China. <http://www.made-in-china.com/> >. Luettu 5.5.2014.
- 10 China Bicycle 2015. Verkkodokumentti. Chinatravel.com. <[www.chinatravel.com/facts/china-bicycle.htm](http://www.chinatravel.com/facts/china-bicycle.htm) >. Updated 18 March 2015. Luettu 3.5.2014.

- 11 Beijing unveils measures to ease traffic flow. 2012. Verkkodokumentti Chinadaily.com.cn. <[http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2010-12/24/content\\_11748230.htm](http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2010-12/24/content_11748230.htm)>. Luettu 3.5.2014.
- 12 Weren't Lower Gas Prices Supposed to Boost Holiday Shopping. Verkkodokumentti. Wolf Street Corp. <<http://wolfstreet.com/2014/12/01/meanwhile-at-the-pump/>>. Luettu 4.5.2014
- 13 CARGO BIKE FOR ECO-SUSTAINABLE TRANSPORT. Verkkodokumentti. Cargo Bike. <<http://www.cargobikesystem.com/>>. Luettu 7.1.2015.
- 14 Bicycles produced this year. Verkkodokumentti. Worldometers.info <<http://www.worldometers.info/bicycles/>>. Luettu 5.5.2014.
- 15 An Introduction to Brushless DC Motor Control. 2013. Verkkodokumentti. Steven Keeping. <<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>>. Updated 27 March 2013. Luettu 20.9.2014.
- 16 Nine Continen Hub Motor 9c Review. Verkkodokumentti. ElectricBike.com <<https://www.electricbike.com/9c/>>. Luettu 7.10.2014.
- 17 Advantages of the Mid-drive Motor. Verkkodokumentti. EVELO Inc. <<http://www.evelo.com/evelo-difference/advantages-mid-drive-motor-vs-hub-motor/>>. Luettu 8.10.2014
- 18 Kitka. Verkkodokumentti. Opetushallitus <<http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/kurssi2/vastustavat/>>. 10.11.2014
- 19 What's the Best Battery? 2010. Verkkodokumentti. Isidor Buchmann <[http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery)>. Luettu 14.9.2014
- 20 Brushless DC (BLDC) Motor. 2014. Microchip Tehcnology Inc. <<http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/technology/motorcontrol/motor-types/bldc.html>>. Luettu 20.10.2014

21 Valtanen Esko, 2013. Tekniikan taulukkirja. Genesis-Kirjat.

## Kustannusten laskeminen

<b>Esimerkki 1</b>		
Kulutus	10	litraa/100km
Polttoaineen hinta	1,4	euroa/litra
Työmatka	20	km
Polttoaine kustannukset	2,8	euroa
Hankintakulut	400	euroa
Takaisinmaksu	143	päivää
<b>Esimerkki 2</b>		
Kulutus	10	litraa/100km
Polttoaineen hinta	1,4	euroa/litra
Työmatka	40	km
Polttoaine kustannukset	5,6	euroa
Hankintakulut	400	euroa
Takaisinmaksu	71	päivää
<b>Esimerkki 3</b>		
Kulutus	6	litraa/100km
Polttoaineen hinta	1,4	euroa/litra
Työmatka	30	km
Polttoaine kustannukset	2,52	euroa
Hankintakulut	400	euroa
Takaisinmaksu	159	päivää



## Moottorinohjauksen koodi

```
intmotorPin = 9; // moottorin ohjaussignaali pin 9
intpotPin = 3; // kaasukahva pin 3
intpotVal = 180;
intmotorVal = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);
}

void loop()
{
  potVal = analogRead(potPin);
  motorVal = map(potVal, 180, 1023, 0, 255);
  analogWrite(motorPin, motorVal);
  Serial.print("potentiometer = "); // simuloinninhelpptamiseksi pyydetty ja toteutuneetarvottulostetaannäytölle
  Serial.print(potVal);
  Serial.print("\t motor = ");
  Serial.println(motorVal);
  delay(2);
}
```