

Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Rakennettu ympäristö

Kandidaatintyö

Hyperloop-järjestelmän liikennetekninen tarkastelu

9.12.2016

Julia Wasenius

Tekijä Julia Wasenius

Työn nimi Hyperloop-järjestelmän liikennetekninen tarkastelu

Koulutusohjelma Rakennettu ympäristö

Pääaine Rakennettu ympäristö

Pääaineen koodi RYM

Vastuupettaja Hanna Mattila

Työn ohjaaja(t) Jouni Ojala

Päivämäärä 9.12.2016

Sivumäärä 20

Kieli suomi

Tiivistelmä

Hyperloop on Elon Muskin ensimmäistä kertaa vuonna 2013 esittämä tulevaisuuden liikenne-muoto. Järjestelmä koostuu tiivistä, matalapaineisesta putkesta ja siinä liikkuvista matkustuskap-seleista. Järjestelmä on ideoitu vastauksena maailman jatkuvasti kasvavaan liikkumistarpeeseen ja sen vaatimiin uudenlaisiin kestäviin liikenneratkaisuihin.

Tässä työssä perehdyttiin Hyperloop-järjestelmän toimintaperiaatteisiin ja kuvattiin tekniikka sen toiminnan takana. Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa tutkitaan erilaisia julkaisuja järjestelmään liit-tyen. Työssä oli tavoitteena tutkitun kirjallisuuden avulla selvittää Hyperloop-järjestelmän tarjo-amia mahdollisuuksia tulevaisuuden liikennejärjestelmänä, sekä erityisesti perehtyä sen mahdollis-tamiin kestäviin vaikutuksiin päästöjen ja energiareurssien avulla.

Työssä selvisi, että vaikka Hyperloop-järjestelmän tekniikka ja ideologia kuulostavat mullistavalta, on sen toteuttaminen kuitenkin mahdollista ja kannattavaa. Selvisi myös, että eri puolilla maailmaa, erityisesti Yhdysvalloissa ja Suomessa järjestelmän koeratojen rakentaminen on osittain hyvinkin pitkällä.

Avainsanat Hyperloop, kestävä liikennejärjestelmä, Elon Musk, liikennetekninen tarkastelu

Sisällysluettelo

1 Johdanto	1
2 Järjestelmän kuvaus	3
2.1 Kapseli	3
2.2 Putki	4
2.3 Voimanlähde	5
3 Järjestelmän toiminnalliset ominaispiirteet.....	6
3.1 Terminaalioperointi.....	6
3.2 Matkustusmukavuus	8
4 Vaikutukset	9
4.1 Matkustusturvallisuus	10
4.2 Päästöt	10
4.3 Kestävä näkökulma	11
5 Järjestelmän resurssit	12
5.1 Energiaomavaraisuus	12
5.2 Kustannukset.....	12
6 Analyysi	14
6.1 Haasteet.....	14
6.2 California High Speed Rail -järjestelmä	14
6.3 Yhteys Helsingin ja Tukholman välillä	15
7 Yhteenveto	17
8 Lähteet.....	19

1 Johdanto

Maapallon jatkuva, viime vuosikymmeninä räjähdysmäisesti kasvanut matkustustarve on saanut aikaan tarpeen uusien, kestävien liikennemuotojen kehittämiseksi. Nykyisiä liikumistapoja tarkasteltaessa, voidaan niistä kaikista osoittaa puutteita; lentoliikenteen suuret päästöt ja usein kalliit matkaliput, tieliikenteen hitaus ja suuret päästöt sekä raideliikenteen hitaus ja kalliit matkaliput. Uutta liikennemuotoa kehitettäessä on otettava huomioon, millä tapaa se olisi parempi kuin jo olemassa olevat järjestelmät.

Hyperloop on supernopea liikenneyhteys, jossa alipaineistetussa putkessa kulkee matkustajakapseleita. Alipaineistetussa putkessa ilmanvastus on hyvin pieni, jolloin kapseleilla on mahdollisuus saavuttaa erittäin suuria kulkunopeuksia, jopa yli 1000 km/h. Hyperloop-järjestelmästä olisi mahdollista kehittää lähes energiaomavarainen, joten liikennemuotona se olisi erittäin kestävä ja ympäristöystävällinen. Järjestelmän tarjoamat matkajat ovat täysin eri tasolla, kuin olemassa olevista liikkumismuodoista nopeimmatkaan. Järjestelmän kapasiteetti on suuri, sillä putkessa kulkevia kapseleita on mahdollista laukaista jopa 30 sekunnin aikavälillä, jolloin se tarjoaa käyttäjälle lyhyen matka-ajan lisäksi myös välittömän käyttövalmiuden. Erilaiset arviot järjestelmän rakennuskustannuksista kuulostavat suurilta, mutta suuren kapasiteetin ansiosta matkalippujen hinnat on mahdollista saada käyttäjille edullisiksi. Myöhemmissä luvuissa tutustutaan tarkemmin järjestelmän tarjoamiin hyötyihin ja mahdollisuuksiin.

Tesla Motors:n ja SpaceX:n toimitusjohtaja Elon Muskin alkuperäinen ajatus Hyperloopista on herättänyt useiden tahojen kiinnostuksen. Muskin oma yritys SpaceX ajaa järjestelmän alkuperäistä suunnitelmaa rakentamalla testirataa Kalifornian Hawthorneen, tiiviisti yhteydessä Muskiin oleva Hyperloop One -yritys rakentaa testirataa Nevadaan ja Hyperloop Transportation Technologies (HTT) rakentaa prototyyppiä Quay Valleyssa San Franciscon ja Los Angelesin puolivälissä. (Hower 2015.) Muskin oma yritys SpaceX on yritys koko järjestelmän takana, sen elokuussa 2013 julkaisema raportti ”Hyperloop Alpha” on toiminut innoittajana järjestelmää koskevien hankkeiden aloittamisessa. Raportin julkaisemisen jälkeen Musk julisti avoimen kilpailun Hyperloop-järjestelmän kehittämiseksi (Chee 2015). Suomessa Hyperloop-hankkeeseen on tarttunut Salon kaupunki, joka on sopinut aiesopimuksen yhteistyöstä Hyperloop One -yhtiön kanssa (Ristola 2016). Ristola (2016) kirjoittaa hankkeessa suunniteltavan Salon ja Turun välistä testirataa, joka toimisi lähtökohtana myöhemmin laajennettavalle yhteydelle Helsingistä Turun kautta Tukholmaan.

Järjestelmän toimintaperiaate ei ole uusi, vaan jo 1800-luvun alussa on esitetty vastaavia ajatuksia, sekä jo vuosisadan loppupuolella Lontoossa oli käytössä pneumaattinen juna-yhteys, joka liikkui ilmanpaineen avulla (Liimatainen 2016). Tällöin tekniikka ei kuitenkaan ollut käyttökelpoinen teknologian kehityksen puutteellisuuden takia. Noin 80 vuotta sitten amerikkalaisen rakettipioneeri Robert Goddardin esitykset vakuumijunasta, eli rakettimootorin työntämästä tyhjiössä kulkevasta junasta, kaatuivat tuolloinkin teknologian, erityisesti tiiviin putkirakenteen, haastavuuteen. (Mäkinen 2016.) Mäkisen (2016) mukaan Hyperloop-järjestelmän tekemien kompromissien ja tekniikan jatkuvan kehityksen ansiosta Elon Muskin ehdotus ei kuitenkaan ole enää mahdoton.

Tämä kandidaatintyö käsittelee Hyperloop-järjestelmää ja sen liikenneteknisiä ominaisuuksia, -mahdollisuuksia ja -haasteita. Työ on kirjallisuuskatsaus aiheesta tehtyihin erilaisiin suomenkieliseen sekä kansainvälisiin julkaisuihin. Työn tarkoituksena on perehtyä järjestelmän toimintaperiaatteisiin, kartoittaa sen toimivuutta tulevaisuuden liikennemuotona sekä kartoittaa mahdollisia haasteita sen toteuttamisessa. Työssä perehdytään järjestelmän rakenteelliseen tarkasteluun ja toteutettavuuteen sekä kartoitetaan sen kestävyyttä päästöjen, energiatehokkuuden ja mahdollisen energiaomavaraisuuden kannalta. Työn tavoitteena on saada vastaus seuraaviin tutkimuskysymyksiin. Onko Hyperloop-järjestelmä mahdollinen, vai altistaako se matkustajat matkustusmukavuuden kannalta liian suurille g-voimille? Millaista järjestelmässä matkustaminen olisi, ja miten terminaalioperointi eroaisi esimerkiksi lentoasemista? Mitkä ovat Hyperloop-järjestelmän mahdollisuudet tulevaisuuden kestävästä liikkumismuotona?

2 Järjestelmän kuvaus

Tässä luvussa esitetään tarkemmin järjestelmän toimintaperiaate sekä sen rakenteelliset osat. Hyperloop-järjestelmän perusrakenteeseen kuuluvat matalapaineinen putki sekä siinä kulkevat matkustuskapselit (Liimatainen 2016). Lähtökohtainen periaate järjestelmän toiminnan taustalla on hyvin yksinkertainen: pitkä, ilmasta lähes tyhjäksi pumpattu putki, jonka sisällä liikkuu pieniä, parin sentin korkeudessa leijuvia kapseleita. Matalapaineistettu putki vähentää ilmanvastusta, ja kapseleiden leijuessa ilman kosketusta kulkupintaan ei kitka hidasta niiden vauhtia. Kitkan ja ilmanvastuksen hidastavan vaikutuksen ollessa pieni, saataisiin kapselit pusketta putken reunassa olevien induktiomotto-reiden luoman magneettikentän avulla jopa 1200 km/h vauhtiin. (Mäkinen 2016.)

2.1 Kapseli

Järjestelmässä matkustajat ovat putkessa kulkevissa kapseleissa, tai ”podeissa”. Kapselit ovat putken lisäksi tärkeä osa järjestelmän perusrakennetta, joten niiden rakenne ja ominaispiirteet ovat järjestelmän toiminnan kannalta tärkeitä tekijöitä. Työssä perehdytään ilmatyynyjen varassa leijuviin kapseleihin, ja jätetään magneettista levitaatiota hyödyntävät mallit pois tarkastelusta. Kapseleiden kapasiteetti oli noin kaksikymmentä matkustajaa, ja niitä olisi mahdollista liikennöidä jopa 30 sekunnin vuorovälillä. Liikennöinti tapahtuisi siten, että kapseli lähtisi aina matkaan joko ollessaan täynnä matkustajia tai saavuttaessaan laiturilla tietyn odotusajan. Näin järjestelmän olisi mahdollista tarjota matkustajille uudenlainen matkustustapa, jossa ei tarvittaisi aikatauluja vaan matkustus olisi aina mahdollista lähes heti asemalle saapumisen jälkeen. (Mäkinen 2016.)

Kapseleiden toimintaperiaatetta on verrattu ilmakiökköpöytään, sillä kapseleiden leijuminen ilmatyynyjen varassa perustuu samaan teknologiaan, jolla kiekot leijuvat ilmakiökkopelissä. Tämä leijuttaminen mahdollistaa kitkattomuuden ja täten suuret nopeudet, mutta ei kuitenkaan vaadi kalliimman, magneettiseen levitaatioon perustuvan, teknologian käyttöä. Edellä todettuun tapaan kapseleiden kitkavoiman eliminoiminen yhdistettynä matalaan ilmanvastukseen mahdollistaa kapseleiden liukumisen putkessa verrattain suurilla nopeuksilla ja matalalla työntövoimalla. Järjestelmässä kapseleiden toiminnan kannalta tärkeitä elementtejä ovat kapseleiden etuosaan sijoitettavat ilmaa sisäänsä vetävä turbiini sekä kompressori, jotka sekä mahdollistavat kapseleiden leijumisen ilmatyynyjen varassa, että ehkäisevät kapselin kulkua hidastavan ilmanpaineen syntymisen kapselin eteen. (SpaceX 2013.)

Kapseleiden suunnittelussa täytyy ottaa huomioon useita osittain haastavia vaatimuksia; niiden tulee olla kevyitä ja kestäviä, mutta sisätiloiltaan kuitenkin sellaisia, etteivät ne aiheuta esteitä ahtaanpaikankammoisille tai muuten tee supernopeaa matkustuskokemusta putkessa epämiellyttäväksi. Myös turvallisuus on ensisijaisen tärkeässä osassa kapseleita suunniteltaessa: niiden on oltava valmiita pysähtymään erittäin nopeasti ja automaattisesti putkessa olevien hätäpoistumisluukkujen kohdalla. (Mäkinen 2016.) Kapseleiden suunnittelussa on lähtökohtana siis pidettävä turvallisuus ja matkustusmukavuus.

Kapselit olisivat sisätiloiltaan noin 2,3 metriä halkaisijaltaan olevia sylintereitä, ja muistuttaisivat pieniä lentokoneita tai Pendolino-junia (Mäkinen 2016). Istuimet on suunniteltu mukautumaan matkustajan kehoon, ja istuin-asento muistuttaa perinteistä lentokoneen istuinta selkänoja laskettuna. Istuimien mukautuminen matkustajan kehoon auttaa

matkustusmukavuuden takaamisessa voimakkaiden kiihdytysten aikana. Kapselit ovat ikkunattomia, mutta niiden seinille on mahdollista heijastaa esimerkiksi putken ulkopuolen mukaista vaihtuvaa maisemaa matkan aikana. Virtuaalisten maisemien tarkkailun lisäksi jokaisella matkustajalla olisi mahdollisuus henkilökohtaisen viihdekeskuksen käyttöön. (SpaceX 2013).

2.2 Putki

Toinen suuri osa järjestelmän perusrakennetta on putki, jonka sisällä kapselit liikkuvat. Hyperloop-järjestelmän putki on halkaisijaltaan pyöreä, tiivis sylinteri, jossa kapselit leijuvat ilmatyynyjen varassa. Kapseleiden leijuminen mahdollistaa sen, ettei putken sisäpinnalle tarvita kalliita raiderakenteita. SpaceX:n julkaisema raportti ”Hyperloop Alpha” (2013) kertoo kustannusten minimoimiseksi putken olevan suunniteltu rakennettavaksi maanpinnan yläpuolelle, sitä kannattelevien pilareiden varaan. Tämä mahdollistaa rakenteiden ja rakennustöiden maanpinnalta vievän tilan minimoimisen ja mahdollistaa maan alle rakentamisen korkeiden kustannusten välttämisen (SpaceX 2013).

Mäkisen (2016) mukaan putken rakentaminen matalapaineiseksi, muttei kuitenkaan ilmasta täysin tyhjäksi palvelee kahta eri käyttötarkoitusta. Jopa nykyteknologialla järjestelmän vaatiman satojen kilometrien pituisen tyhjiöputken rakentaminen olisi erittäin haastavaa, joten järjestelmän on ajatettu käyttävän ilmanpainetta, joka on noin sadasosa maan normaalipaineesta, jolloin ilmanvastus saadaan hyvin alhaiseksi, mutta putken rakenne ei vaadi täydellistä tiiviyttä. Toinen etu, joka saadaan siitä, että putken sisällä on vähän ilmaa, on mahdollisuus ilmatyynytekniikan käyttämisestä kapseleiden leijumiseen. Kapselit vetäisivät sisäänsä putkessa olevaa ohutta ilmaa suuren turbiinin avulla ja puhaltaisivat sen allansa oleviin kiskomaisiin ilmatyynyihin saaden kapselit leijumaan noin parin sentin korkeudessa. Toinen vaihtoehto kapseleiden leijuttamiselle olisi magneettien käyttäminen. Tässä tekniikassa magneettien kallis hinta on aikaisemmin ollut esteenä, mutta magneettien hinnan pudotessa jatkuvasti, voisi tämä teknologia olla tulevaisuudessa myös taloudellisesti mahdollista. (Mäkinen 2016.)

Putken geometrian suunnittelussa ensiarvoisen tärkeää on putken ja kapseleiden tilavuuksien suhde. Putken tilavuuden ollessa liian pieni kapseleiden kokoon verrattuna, saavuttaa kapseleiden ympärillä putkessa virtaava matalapaineinen ilma äänennopeutta suurempia nopeuksia. Nämä yllääniset nopeudet saisivat putkessa aikaan paineaaltoja, jotka asettavat rajoituksia sille ilmapatsalle, joka pystyy poistumaan kapselin edestä. Paineaallot voisivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa sen, että kapseli joutuu puskemaan koko putken matkalta kerääntynyttä ilmapatsasta edessään, jolloin sen vaatima työntövoima kasvaisi todella suuriin arvoihin. Ilmavirtauksen ylläänisten nopeuksien ja täten myös paineaaltojen syntymisien ehkäiseminen on mahdollista valitsemalla kapseleiden ja putken tilavuuksien suhde oikein ja täten varmistaa riittävä ilmavirtaus kapselin ympärillä kaikilla kulkunopeuksilla. Tilavuuksien suhteen ollessa sopiva, kapselin kompressorin on mahdollista suodattaa kapselin eteen jäävä virtaamaton ilma ja näin estää ilmapatsaan syntyminen. (SpaceX 2013.)

Putken sijaitessa maanpinnan yläpuolella ovat sitä kannattelevat pilarit keskeinen osa rakennustyötä. Pilarit olisi optimaalista sijoittaa suhteellisen pienin, noin 30 metrin, välimatkoin toisistaan. Tukipilareiden tiiviisti asettaminen vaatii suuren määrän pilareita, mutta samalla mahdollistaa putken jatkuvan tuen koko reitin ajan. Pilareiden tarjoama

jatkuva ja jakautettu tuki taas antaa laajempia vaihtoehtoja putken materiaalivalintojen suhteen, jolloin se on mahdollista toteuttaa edullisemmasta materiaalista. Putken rakenteeseen kuuluvat myös hätäuloskäynnit ja paineistetut liityntäkohdat tasaisin välimatkoin koko sen pituudella. (SpaceX 2013.)

2.3 Voimanlähde

Järjestelmän rakenteellisista osista viimeisenä käsitellään kapseleita liikuttavaa voimanlähdettä. Järjestelmän energiareсурsseja, kuten kapseleiden käyttämää energiaa, ja päästöjä käsitellään myöhemmin luvussa järjestelmän resurssit. Toimintaperiaatteena kapseleiden liikkumiselle ovat putkessa olevat lineaariset induktiomoottorit, jotka tuottavat kapseleita kiihdyttävän tai hidastavan sähkömagneettikentän. Järjestelmää liikuttava elementti, roottori sijoitetaan kapseliin kiinni ja kapseleiden energian tuottamat stationaariset elementit, eli staattorit, sijoitetaan putkirakenteeseen. (SpaceX 2013.)

Hyperloop-järjestelmän toiminnan mahdollistavalla voimanlähteellä on joitakin haastavia vaatimuksia. Sen täytyy pystyä kiihdyttämään ja pitämään kapselit suhteellisen matalassa, noin 480 km/h, nopeudessa alueilla, joilla välimatkat tai maasto vaativat matalampaa nopeutta. Voimanlähteellä täytyy myös olla mahdollista kiihdyttää kapselit matalammasta nopeudesta huippunopeuteen ja samoin myös jarruttaa kapseleiden nopeus. Lineaarisen induktiomoottorin käyttäminen antaa useita etuja verrattuna kostomagneettimoottoriin. Esimerkiksi materiaalikustannukset on mahdollista saada pienemmiksi induktiomoottorilla sekä sen kuoresta on mahdollista tehdä pienempi ja kevyempi. (SpaceX 2013.)

3 Järjestelmän toiminnalliset ominaispiirteet

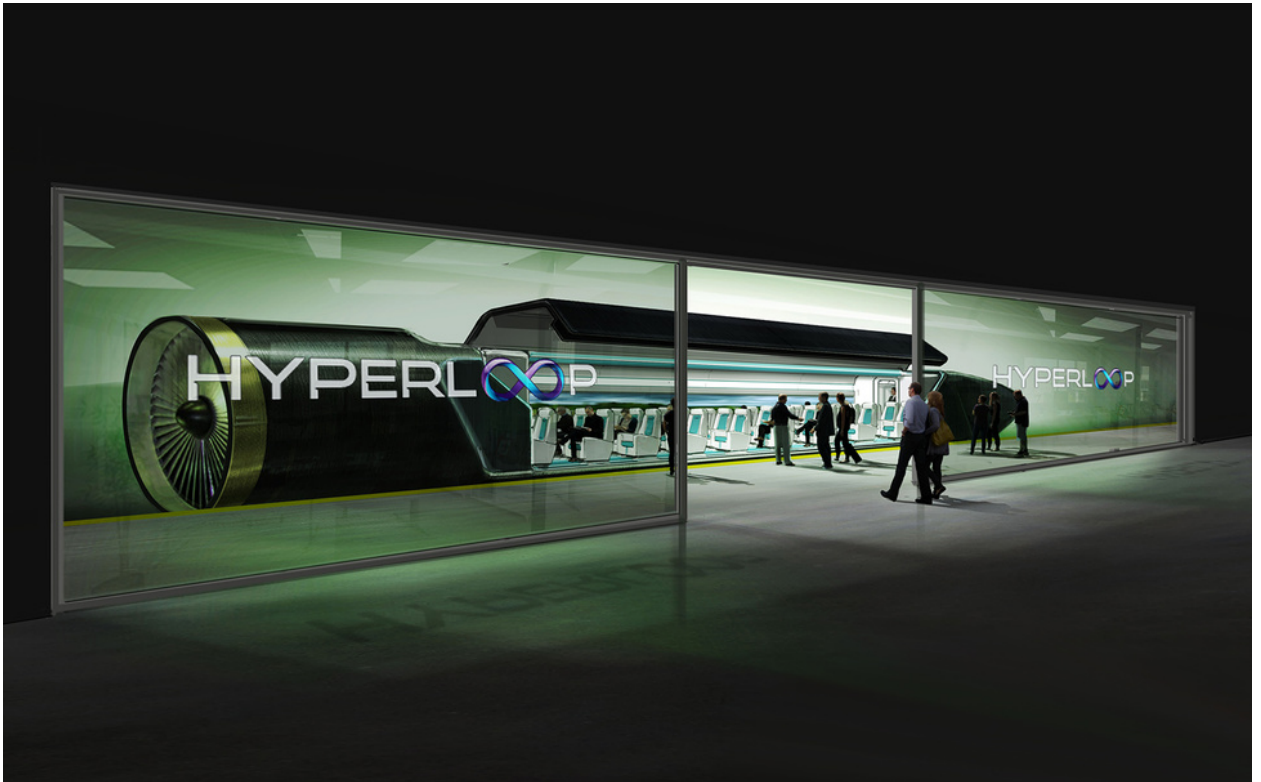
Tässä luvussa perehdytään järjestelmän toiminnallisiin ominaispiirteisiin, painottaen erityisesti käyttäjän, eli matkustajan, näkökulmaa. Toiminnallisista ominaispiirteistä luvussa käsitellään terminaalioperointia sekä matkustusmukavuutta, joista molemmilla on voimakas yhteys järjestelmän tarjoamaan matkustuskokemukseen. Tämän lisäksi luvussa perehdytään järjestelmän matkustajapotentiaalin muodostumiseen tutkimalla asemien saavutettavuutta. Matkustuskokemus järjestelmässä on herättänyt kritiikkiä ja kysymyksiä siitä, millaista matkanteko ikkunattomassa, suhteellisen pienessä kapselissa olisi. Myös matkustajiin vaikuttavat g-voimat ja kokonaismatka-aika herättävät kysymyksiä järjestelmän toimivuutta tarkasteltaessa. Selkeitä hyötyjä järjestelmän tarjoamissa ominaispiirteissä ovat suurista nopeuksista johtuvan lyhyen matka-ajan lisäksi riippumattomuus aikatauluista ja lähes jatkuva käyttövalmius; kapseleiden lähtiessä liikkeelle hyvin lyhyillä operointiväleillä, on asemalle saapuvan matkustajan mahdollista päästä matkaan lähes koska tahansa. Täten esimerkiksi raide- ja lentoliikenteen aikataulut tulevat järjestelmälle tarpeettomiksi.

3.1 Terminaalioperointi

Matkustajan näkökulmasta terminaalioperoinnilla on suuri vaikutus matkustuskokemuksen syntymiseen. Kuvassa 1 on esitettyä havainnekuva siitä, miltä järjestelmän terminaali voisi tulevaisuudessa näyttää. Hyperloopin kaltaisessa järjestelmässä, jossa liikkeesäoloajat ovat verrattain lyhyitä, nousee terminaalioperointi tärkeäksi vaikuttajaksi kokonaismatka-aikaa tarkasteltaessa. Nykyisistä liikennemuodoista voidaan vertauskohdiksi asettaa lento- ja raideliikenne, joissa kulkuneuvon nousemiseen kuluvat ajat asemalle saapumisen jälkeen ovat hyvin erilaiset. Tarjotakseen todellista kehitystä Hyperloop-järjestelmän tulee mahdollistaa nopean matkustusajan lisäksi nopeaa ja yksinkertaista terminaalioperointia.

Järjestelmässä kulkuneuvon, eli kapseliin, nouseminen on mahdollista reitin pääteasemilta sekä useilta tärkeisiin solmukohtiin sijoitetuilta asemilta reitin varrelta. Asemien suunnittelussa tärkeimpänä kriteerinä on käytännöllisyys ja lentokenttiä huomattavasti yksinkertaisemmat pohjapiirustukset sekä kyytiinnousemisprosessit. Järjestelmän ominaispiirteisiin kuuluvien lyhyen matka-ajan ja tiiviin operointivälin on arvioitu aiheuttavan asemille matkustajien jatkuvan virran. Tämä ei johda samanlaisiin jonoihin ja viivytyksiin, kuin esimerkiksi lentoliikenteen sykleissä toimivat aikataulut. Turvallisuus on terminaalitoiminnassa ensisijaisen tärkeää, joten kokonaisvaltaisten turvatarkastusten on sisällyttävä terminaalioperointiin. Ne olisi kuitenkin mahdollista suorittaa huomattavasti sujuvammin kuin lentoasemilla nykyään. (SpaceX 2013.)

Hyperloop-järjestelmässä putken ilmatiiviyys asettaa tiettyjä vaatimuksia terminaaleissa sijaitseville alueille, joiden kautta kulku kapseleihin tapahtuu. Alue on suunniteltu suu-rehkoksi avoimeksi tilaksi, jossa on kaksi ilmalukkoa merkitsemässä kohtia, joista kapseleihin nouseaan ja niistä poistutaan. Pääteasemalle tuleva kapseli saapuu toiseen ilmalukkoon, jossa sen paine tasataan aseman paineen kanssa. Tämän jälkeen kapseli vapautetaan kulkualueelle, jossa matkustajat nousevat kapselista pois. Seuraavaksi kapseli käännetään ja lähtevät matkustajat asemalta astuvat kyytiin, jonka jälkeen kapseli on valmiina menemään putkeen uloskäynnin ilmalukon kautta. (SpaceX 2013.)



Kuva 1 Havainnekuva järjestelmän terminaalista (Hyperloop One 2016).

3.2 Matkustajapotentiaali

Järjestelmän yhteysverkko sekä asemien vaikutusalue ja liityntäkulkutavat ovat tärkeitä ominaisuuksia järjestelmän matkustajapotentiaalin muodostumista arvioitaessa. Järjestelmän on suunniteltu mukailevan jo olemassa olevien liikenneväylien infrastruktuuria (Virtanen 2016). Tämä ja hyperloop-asemien ominaispiirteet mahdollistavat asemien rakentaminen kaupunkikeskuksiin hyvien kulkuyhteyksien varrelle. Tässä asiassa järjestelmä saa selkeän edun matkustajapotentiaalin muodostumisen kannalta verrattuna esimerkiksi lentoliikenteeseen, asemien sijainti voi lentokenttien sijasta olla toteutettu samantyyillisillä ratkaisuilla kuin juna-asemat.

Julkisen liikenteen yhteydet ja asemien keskeinen sijainti tekevistä järjestelmästä käytettävemmän ja lyhentävät kokonaismatka-aikaa. Tämän lisäksi Hyperloop-järjestelmän matkustajapotentiaalia Hyperloop One -yhtiö on kehittänyt mobiiliapplikaatiota liityntäliikenteen keinoksi. Yhtiön ehdotuksessa puhelimeen ladattavalla applikaatiolla on mahdollista tehdä varaus matkustajapaikasta järjestelmässä. Varauksen tekemisen jälkeen itsenäisesti ajava, useita matkustajia kerrallaan kuljettava bussimainen kulkuneuvo tulee matkustajan ilmoittamaan osoitteeseen ja kuljettaa matkustajan lähimmälle Hyperloop-asmalle. (Hawkins 2016.)

Hyperloop-asemien saavuttaminen on siis erittäin sujuvaa, ja sen vaikutusalue voidaan saada esimerkiksi edellä kuvaillun applikaation tapaisella ratkaisulla hyvin laajaksi. Asemien ja täten myös järjestelmän laajan vaikutusalueen ansiosta järjestelmän matkustajapotentiaalilla on mahdollisuuksia olla todella laaja.

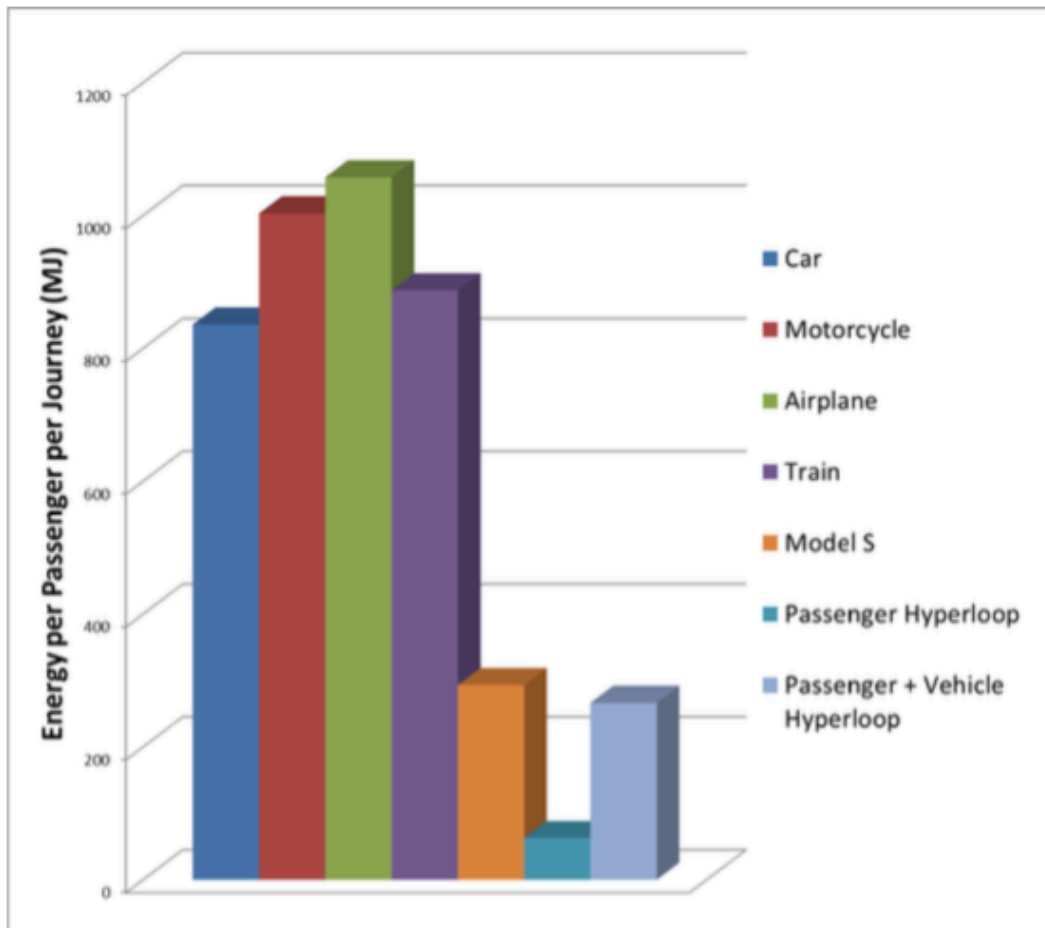
3.3 Matkustusmukavuus

Järjestelmässä matkustamisen kannalta tärkeä osa toiminnallisia ominaispiirteitä on matkustusmukavuus itse järjestelmässä tehdyn matkan ajalta. Kuten edellä on muutamaan otteeseen mainittu, on Hyperloop herättänyt kritiikkiä paljon matkustuskokemuksen kannalta. Suuret g-voimat ja matkustaminen suhteellisen ahtaassa, ikkunattomassa kapselissa nopeuksilla, jotka ovat täysin eri suuruusluokassa kuin mikään tähänastisten liikennejärjestelmien tarjoama, kuulostaa ajatuksena ahdistavalta ja jopa pelottavalta. Kiihdytyksestä ja jarruttamisesta aiheutuvien g-voimien lisäksi suurilla nopeuksilla liikuttaessa radan pyöristyssäteet ja putken tasaisuus aiheuttavat haasteita (Brandom 2013).

Matkustusmukavuudesta ja -kokemuksesta on kuitenkin useita eriäviä mielipiteitä. Mäkinen (2016) kirjoittaa järjestelmässä matkustamisen olevan tasaista ja jopa tylsää. Alussa tapahtuva kiihdytys ja lopun jarrutus noin 0,5 g:n kiihtyvyydellä olisivat Mäkisen mukaan kyydin ainoat kokemukset. 0,5 g:n kiihtyvyys on vain hieman enemmän kuin kiitoradalla kiihdyttävässä lentokoneessa, joten sen ei pitäisi aiheuttaa pahoinvointia tai muitakaan epämieluisia tuntemuksia. Toisin kuin Brandom (2013) Mäkinen kirjoittaa suurten nopeuksien olevan matkan aikana huomaamattomia, sillä putken rakenteessa on otettu huomioon erittäin loivat kurvit, minkä lisäksi kapseli kallistuu käännteissä.

4 Vaikutukset

Tässä luvussa tarkastellaan järjestelmän vaikutuksia. Luvussa käydään läpi turvallisuus matkustajan näkökulmasta sekä perehdytään järjestelmän päästöihin ja tarkastellaan Hyperloop-järjestelmää kestävästä näkökulman kannalta. Ihmiskunnan jatkuvasti kasvava tarve matkustaa on saanut aikaan erityisesti lyhyiden lentomatkojen määrän suuren lisääntymisen viime vuosina. Harri Junttilan kirjoittama artikkeli ”Alle tunnin mittaiset lennot kiellettävä, autojen maksiminopeus 120 km/h – vaihtoehdon tarjoaa putkikytyi kapselissa” Tekniikka & Talous -lehdessä (2016) käsittelee muun muassa lisääntyneen lentoliikenteen vaikutusta öljypohjaisten polttoaineiden tuotannon määrässä. Junttila (2016) kirjoittaa energiayhtiö St1:n Mika Anttosen sanoneen, ettei vuodelle 2030 asetettujen päästötavoitteiden saavuttaminen ole mahdollista ilman nykyiseen energiankulutukseen tehtäviä radikaaleja muutoksia. Hyperloop-järjestelmän energiankulutus yhtä matkustajaa kohden on SpaceX:n omien laskelmien mukaan vain enintään kahdeskymmenesosa vastaavien matkojen lentoliikenteen kulutuksesta (kuva 2). Järjestelmä ei myöskään ole riippuvainen lentopolttoaineesta, vaan sen käyttämän energian tuottamiseksi on olemassa kestäviä vaihtoehtoja, kuten tuuli- tai aurinkovoima. (Junttila 2016.)



Kuva 2. Eri liikennemuotojen energiankulutus yhtä matkustajaa kohden Los Angelesin ja San Franciscon välillä (SpaceX 2013).

4.1 Matkustusturvallisuus

Täysin uutena liikennemuotona Hyperloop-järjestelmästä ei ole olemassa ennakko-tapausta tai vertailukohdetta, minkä takia järjestelmän turvallisuus ennen käyttöönottoa on varmistettava kaikissa mahdollisissa olosuhteissa. Osa järjestelmän turvallisuuskysymyk-sistä linkittyy muihin edellä käsiteltyihin ominaispiirteisiin, kuten terminaalioperointiin ja matkustusmukavuuteen.

Järjestelmän koko luomisprosessin ajan turvallisuus on otettu vahvasti huomioon. Järjes-telmässä kapselit kulkevat putkessa, joka on tarkasti kontrolloitu ympäristö ilman sääolo-suhteiden tuomia haasteita. Koko järjestelmä on automatisoitu, ja voimanlähteet ovat in-tegroitu putken kanssa siten, ettei kapseleiden ole mahdollista saavuttaa reitin eri kohdille sopimattomia nopeuksia. Automaatiosta johtuva inhimillisten virheiden puute sekä sää-olosuhteiden vaikutusten eliminointi tekevät järjestelmästä jo lähtökohtaisesti erittäin tur-vallisen. Järjestelmässä on lisäksi koko reitin pituudella tasaisin välimatkoin paineistet-tuja hätäuloskäyntejä, joista poistuminen onnistuu hätätapauksen tapahtuessa. (SpaceX 2013.)

Matkustajiin liittyvät hätätilanteet, kuten matkustajan sairaskohtaus tai uhkaava matkus-taja ovat järjestelmässä otettu huomioon. Kapselit ovat varustettu radioin, joilla yhteyden saaminen asemien operaattoreihin on mahdollista koko matkan ajan. Terminaalien turva-toimet ovat yhtä kattavia kuin lentokentillä, joten matkustajien aiheuttavat uhkaavat ti-lanteet eivät ole sen todennäköisempiä kuin lentoliikenteessä. Järjestelmän suurien no-peuksien ansiosta sairaskohtauksen tapahtuessa aika ennen avunsaantia on hyvin lyhyt, lyhyempi kuin esimerkiksi kiitoradalla kiihdyttävällä lentokoneella. (SpaceX 2013.)

”Hyperloop Alpha” -raportin (2013) reitin kulkiessa Kaliforniassa on turvallisuusasioissa tärkeää ottaa huomioon maanjäristysten ja maan pinnanmuotojen vaikutus. Järjestelmässä putki rakennetaan tarpeeksi taipuisaksi kestäväksi maanjäristyksistä aiheutuvat liikkeet, siten että putken linjaus säilyy. Pilareiden suunnittelussa on otettu huomioon maanpinnan mahdollisista muutoksista aiheutuvat vaatimukset putken rakenteelle. Pilarit tukevat put-kea vertikaalisessa suunnassa, mutta sallivat hillityn sivusuuntaisen liukuman, vähentäen näin maanjäristysten aiheuttamaa riskiä. Pilareiden ja putken yhtymiskohtien säätäminen on mahdollista pysty- ja sivusuuntaisesti, tehden siten mahdolliseksi putken muodon säi-lyttämisen pinnanmuotojen muutoksista huolimatta. (SpaceX 2013.)

4.2 Päästöt

Tässä alaluvussa käsitellään Hyperloop-järjestelmän tuottamia päästöjä sekä vertaillaan sitä muihin mahdollisiin kestäviin liikenneratkaisuihin. Vuoteen 2050 mennessä liiken-
növien autojen määrän arvellaan kasvaneen kahteen miljardiin ja lentoliikenteen mat-
kustajien määrän kaksinkertaistuneen. Ihmisten elintason nouseminen on suoraan verran-
nollinen tehtyjen matkojen määrään. Liikkumisen kasvava määrä aiheuttaa sen, että lii-
kenteen tuottamat päästöt ovat yksi nopeinten kasvavista kasvihuonekaasujen aiheutta-
jista. Pariisin ilmastokokouksessa asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi liikenteen
tuottamien päästöjen kontrolloinnilla on siis suuri vaikutus, eikä esitettyjen päästötasojen
saavuttamisen hidastaminen enää riitä, vaan päästöt on saatava radikaalisti vähenemään.
(Baynes 2016.)

Kestävän liikkumisen kehittämisessä on kaksi ongelmaa: energiatiiiviyys ja infrastruktuurin vaihdokseen kuuluva aika. Liikennejärjestelmien energialähteiden tulee olla sekä tiiviitä että kevyitä, joten esimerkiksi lentoliikenteen toimiminen sähköllä on mahdoton ajatus painavien ja tilaa vievien akkujen takia. Liikenteen infrastruktuurin muuttuminen kestää vuosikymmeniä. Keskimääräisesti auton käyttöikä on 15 vuotta, ja lentoyhtiöiden toimimisaika Yhdysvalloissa on keskimäärin 20 vuotta. Nykyisillä päästöillä liikenteen infrastruktuurin muuttumisen odottamiseen ei ole varaa, vaan on luotava kestäviä vaihtoehtoja jo olemassa olevien järjestelmien rinnalle ja kilpailijoiksi. (Baynes 2016.)

Kuten edellä on mainittu, Hyperloop-järjestelmä tarjoaa suuren mahdollisuuden etenkin lentoliikenteestä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi. Järjestelmän energiankulutus on erittäin alhainen verrattuna nykyisiin liikennemuotoihin, ja sen tarvitsema energia voidaan tuottaa kestäväillä tavoilla. Järjestelmän toimimisen vaatiman putkirakenteen takia se ei välttämättä ole ensisijainen vaihtoehto korvaamaan pitkän matkan lentoja, mutta lyhyiden, erityisesti työmatkoina tehtävien, lentomatkojen vaihtoehdoksi se soveltuu erinomaisesti.

4.3 Kestävä näkökulma

Kestävän näkökulman kannalta ainoastaan järjestelmän käyttämä energia ei ole tärkeää, vaan on myös syytä ottaa huomioon eri energiamuotojen mahdollisuudet järjestelmän vaatiman energian tuottamiseksi. Raportissa ”Hyperloop Alpha” (2013) järjestelmän energialähteeksi on suunniteltu aurinkoenergiaa. Järjestelmän kulkuputkien päälle rakennettavilla aurinkokennoilla on mahdollista tuottaa keskimäärin 57 MW energiaa, joka on huomattavasti enemmän kuin järjestelmän vaatima keskimääräinen 21 MW:n energiantarve. Aurinkoenergia vaatisi liikuttelun Hyperloopin ja muiden järjestelmien välillä, mutta tämä on perustoimenpide joka ei aiheuttaisi käytännön ongelmia. (Dodson 2013.)

Hyperloop-järjestelmä vaatii kapselien kiihdyttämiseen paljon keskimääräistä kuluusta suurempia energiamääriä. Tämä ratkaistaan asentamalla jokaisen staattorin yhteyteen patterijärjestelmä ylimääräisen energian varastoimiseksi. Näin järjestelmän on mahdollista saada pattereihin varastoituneesta energiasta hetkellinen suurempi energiamäärä. Myöhemmin käsiteltävä järjestelmän energiaomavaraisuus tekee myös mahdolliseksi aurinkokennojärjestelmän tuottavan energiaa paljon yli Hyperloop-järjestelmän vaatiman kokonaiskulutuksen. Ylijäämäenergian myymisellä olisi mahdollista tuottaa jopa 25 miljoonan Yhdysvaltojen dollarin voitot, mistä olisi apua järjestelmän käyttökustannusten kattamisessa. (Dodson 2013.)

5 Järjestelmän resurssit

Tässä luvussa käsitellään järjestelmän energiaressusseja sekä sen kustannuksia. Kustannukset ovat poliittisesta ja ekonomisesta näkökulmasta tärkeä tekijä järjestelmän käyttömahdollisuuksien kannalta, mutta työ keskittyy liikennetekniseen näkökulmaan, joten kustannukset ja niiden aiheuttama kritiikki on käsitelty vain pintapuoleisesti. Myöhemmin luvussa haasteet on lisää analyysia kustannusten aiheuttamista ristiriidoista.

5.1 Energiaomavaraisuus

Hyperloop-järjestelmän on SpaceX:n raportin ”Hyperloop Alpha” (2013) mukaan mahdollista olla ainakin osittain energiaomavarainen. Energiaomavaraisuudella ei tässä yhteydessä tarkoiteta järjestelmän yhteydessä toimivan aurinkokennojärjestelmän sähköntuotantoa, vaan perehdytään järjestelmän mahdollisuuksiin saada osa toimimiseen tarvittavasta energiasta järjestelmän operoimisesta.

Järjestelmässä käytettyjen lineaaristen moottoreiden toimintaperiaate perustuu liike-energian lisäämiseen kapseleiden kiihdyttämiseksi. Niiden toiminta on mahdollista myös päinvastoin. Tällöin kapseleiden jarrituksen aikana lineaariset moottorit muuttavat kapseleiden liike-energiaa sähköenergiaksi ja näin hidastavat niiden vauhtia. Samoin kuin auton regeneroivassa jarrutuksessa, moottorit säilövät tämän energian myöhempää käyttöä varten. Tämän tapaisten regeneraattorien järjestelmien hyötysuhde voi olla jopa 85 prosenttia, joten suurin osa kapselin liikkumiseen tarvittavasta energiasta saadaan edellisen kapselin hidastamisesta saadusta energiasta. (Dodson 2013.)

5.2 Kustannukset

Tämä alaluku käsittelee järjestelmän kustannusarvioita sekä tarkastelee kokonaiskustannuksien kattamiseksi käyttäjille myytävien matkalippujen hinnan vaatimuksia. Työssä käsitellään paljon kritiikkiä aiheuttaneita kokonaiskustannuksia sekä kustannusarvioiden toteutumista vain pintapuoleisesti, sillä pääpaino työssä ei ole poliittiset ja ekonomiset näkökulmat, vaan liikenneteknillinen toimivuus ja sen tarjoamat mahdollisuudet.

Putken rakentaminen aiheuttaa suurimman osan järjestelmän toteuttamiseen liittyvistä kustannuksista. Kapseleiden ja voimalähteiden kustannukset on arvioitu maksimissaan satojen miljoonien Yhdysvaltojen dollareiden arvoiksi, kun taas putki itsessään aiheuttaa useiden miljardien dollareiden kustannukset (SpaceX 2013). Arkikielessä käytettynä järjestelmän kokonaiskustannusten arvio useista miljardeista dollareista kuulostaa erittäin suurelta, mutta suhteutettuna esimerkiksi raportin ”Hyperloop Alpha” (2013) käyttämään referenssikohteeseen California High Speed Rail -järjestelmästä, jonka kustannusarvioksi on esitetty useita kymmeniä miljardeja dollareita, ovat Hyperloopin kokonaiskustannukset verrattain alhaiset.

Järjestelmän vaatima putki rakennetaan maanpinnan yläpuolelle pilareiden varaan, ja tämä laskee putken vaatimia kustannuksia; ostettavan maan osuus verrattuna esimerkiksi raideliikenteen vaatimuksiin, on marginaalinen (SpaceX 2013). SpaceX:n raportti ”Hyperloop Alpha” (2013) esittää Los Angelesin ja San Franciscon välille toteutettavan järjestelmän kokonaiskustannuksiksi alle kuusi miljardia dollaria. Matka-aika olisi noin puoli tuntia ja 28 matkustajaa kerrallaan kuljettavia kapseleita olisi mahdollista lähettää jopa puolen minuutin välein jokaisesta terminaalista. Nämä arvot antavat vuosittaiseksi

matkustajamääräksi 7,4 miljoonaa henkilöä. Järjestelmän arvioitun käyttöiän ollessa 20 vuotta, jakamalla kokonaiskustannukset tälle aikavälille ja lisäämällä käytöstä aiheutuvat kustannukset saadaan yhden matkalipun hinnaksi ilman käsittelykustannuksia noin 20 dollaria. Menopaluu lentolipun hinnan kyseisellä välillä ollessa syyskuussa 2013 reilu 150 dollaria, ja bensiinikustannusten henkilöautolla edestakaisessa matkassa lähes 120 dollaria, on järjestelmän tarjoama matkakustannus erittäin edullinen. (SpaceX 2013.)

6 Analyysi

Viimeisessä pääluvussa luodaan näkemys suurimpiin haasteisiin järjestelmän toteuttamisen kannalta sekä vertaillaan Hyperloop-järjestelmää Kaliforniassa sen kanssa samalle reitille suunnitteilla olevan California High Speed Rail -järjestelmän kanssa. Luvun viimeisessä alaluvussa perehdytään suunnitteilla olevaan Hyperloop-yhteyteen Helsingin ja Tukholman välillä.

6.1 Haasteet

Hyperloop-järjestelmä ja sen toteuttamiseen liittyvät haasteet ovat aiheuttaneet paljon kritiikkiä asiantuntijoiden parissa. Jussi Ahlroth (2016) kirjoittaa Helsingin Sanomien artikkelissaan ”Onko hyperloop vallankumous vai vitsi?” hankkeeseen liittyvien suurimpien ongelmien ja haasteiden liittyvän siihen, ettei vastaavaa järjestelmää ole vielä olemassa. ”Se [Hyperloop] on hypoteettista tekniikkaa”, Ahlroth tiivistää. Aalto-yliopiston liikennetekniikan apulaisprofessori Milos Mladenovicin mukaan järjestelmässä on kolme keskeistä ongelmaa: kapasiteetti, turvallisuus ja kustannukset (Ahlroth 2016).

Salon hankkeessa Hyperloop One -yhtiön kanssa yhteistyötä tekevä suomalaisyhtiö FS Linksin esittämät arviot järjestelmän käyttökapasiteetista eivät ole Mladenovicin mukaan tarpeeksi kattavia. Mladenovicin mukaan laskelmissa käytetty 30 sekunnin ope- rointiväli on jo perusliikennetieteen mukaan tämän tyyppiselle, omalla kulkuradallaan kulkevalle, kulkuvälineelle liian tiheä. (Ahlroth 2016.) Järjestelmää myyvien tahojen mukaan operointivälin on kuitenkin mahdollista olla tiheämpi kuin 30 sekuntia, Ahlroth (2016) kirjoittaa FS Linksin Hallituksen puheenjohtajan Otto Hojarin mukaan jopa kymmenen sekunnin operointivälin olevan mahdollinen.

Toinen haaste järjestelmän toteuttamisen kannalta on turvallisuus. Suomeen suunnit- teilla oleva Hyperloop-rata olisi Itämeren yli tai ali kulkeva 500 kilometriä pitkä putki, jonka sisällä matkustajakapselit kulkevat 1200 kilometrin tuntinopeudella. Suomen il- maston kaltaisissa olosuhteissa jo routa aiheuttaa järjestelmän vaatimalle putkelle suuria haasteita. Myös satojen kilometrien pituisen putken alttius terrori-iskuille herättää kysy- myksiä turvallisuuteen liittyen. (Ahlroth 2016.) Ahlroth (2016) kirjoittaa Mladenovicin kyseenalaistavan myös järjestelmän suunnitellun tekniikan mahdollisuuksia saada tar- vittavat turvallisuusluvut, sillä uusilta liikennevälineiltä vaaditaan erittäin tiukkoja tur- vallisuuksäädöksiä ennen toimintaluvan saamista.

Mladenovicin nostama kolmas ongelma-alue ovat kustannukset. Tässäkin haasteessa Mladenovicin mukaan keskeisimpänä ongelmana on todellisten kustannusten arvioinnin haasteellisuus, sillä riittävän pitkää ja toimivaa Hyperloop-järjestelmää ei ole todellisesti vielä rakennettu. (Ahlroth 2016.) Ahlrothin (2016) tekstissä on käytetty Mladenovicin vertausta ylääänilentokoneisiin, joiden kustannukset arvioitiin aivan liian alhaisiksi. Väärin arvioitujen kustannusten takia lippujen hinnat kohosivat jopa kymmeneen tuhan- teen dollariin, jolloin järjestelmä rajoittui pääasiallisesti pelkästään rikkaiden, poliitik- kujen ja julkisuuden henkilöiden käyttöön. (Ahlroth 2016.)

6.2 California High Speed Rail -järjestelmä

SpaceX:n artikkelissa ”Hyperloop Alpha” referenssikohteena järjestelmälle käytettiin California High Speed Rail -järjestelmää (kuva 3). Tässä alaluvussa esitellään California High Speed Rail -järjestelmä pintapuoleisesti sekä vertaillaan sitä ja Hyperloop-järjestel- mää. Yhdysvaltojen länsirannikolla sijaitseva ajoväylä Los Angelesin ja San Franciscon

välillä on yksi eniten matkustetuista väylistä. California High Speed Rail -järjestelmä on suurinopeuksinen raideliikenneyhteys näiden kahden kaupungin yhdistämiseksi. Järjestelmän kustannusarvioksi on esitetty 68 miljardia Yhdysvaltojen dollaria, ja sen kaupunkien välisen matka-ajan on arvioitu olevan kaksi tuntia 38 minuuttia yli 320 kilometrin tuntinopeudella. (Nath 2015.)

California High Speed Rail -järjestelmän mahdollistama matka-aika on huomattavasti nopeampi kuin ”Hyperloop Alpha” -raportissa esitetty viiden ja puolen tunnin matka-aika autolla matkustettaessa, mutta kuitenkin huomattavasti hitaampi kuin lentoliikenteen tunti viisitoista minuuttia. (SpaceX 2013.) Keskimääräiseksi matkalipun hinnaksi on arvioitu 80–90 dollaria (Nath 2015). Nath kirjoittaa järjestelmältä odotettavan myös tieliikenteen vähenemistä, ilmanlaadun paranemista sekä kasvihuonekaasujen vähenemistä.

Verrattaessa California High Speed Rail- ja Hyperloop-järjestelmiä nousevat Hyperloopin edut selkeästi esille. Jos laskelman Hyperloop-järjestelmän rakennuskustannuksista ja siten myös arviot matkalippujen hinnoille pitävät paikkansa, olisi California High Speed Rail -järjestelmä huomattavasti Hyperloop-järjestelmää kalliimpi investointi sekä matkustusmuoto. Myös matka-aikojen vertailussa Hyperloop-järjestelmä on ylivoimainen, yli kahden ja puolen tunnin matka-aika on huomattavasti pidempi kuin Hyperloopin vastaavan välin puolen tunnin matka-aika. Toisaalta California High Speed Rail -järjestelmän etuna järjestelmien vertailussa voidaan pitää sen matalampaa nopeutta, joka ei altista matkustajia muita, jo käytössä olevia, liikennejärjestelmiä suuremmille g-voimille.



Kuva 3. Havainnekuva California High Speed Rail -järjestelmästä (Elkind 2016)

6.3 Yhteys Helsingin ja Tukholman välillä

Tämän vuoden kesäkuun lopussa yhdysvaltaisyyhtiö Hyperloop one esitti Helsingissä maailman pisimmälle pohjustetun Hyperloop-hankkeen. Hanke käsittää Salon ja Turun välille rakennettavan testiradan, jota myöhemmin on suunniteltu jatkettavaksi Helsingin ja Tukholman väliseksi yhteydeksi. Yhteyden väliasemiksi on suunniteltu Turun ja Salon lisäksi Ahvenanmaata. (Virtanen 2016.)

Virtanen (2016) kirjoittaa Salon kaupunginarkkitehti Jarmo Heinon kannattavan Hyperloop-järjestelmää joustavuutensa ansiosta Salon kaltaisten pienten kaupunkien saavutettavuuden parantamiseksi. Virtanen (2016) kertoo tekstissään myös Hyperloop One -yhtiön varatoimitusjohtaja Alan Jamesin näkemyksen siitä, kuinka Hyperloop-järjestelmä toisi etuja pienten paikkakuntien saavuttamiselle ja näin mahdollisesti pidemmällä aikavälillä tasaisi hintaeroja eri paikkakuntien välillä. Salon osallistumista hankkeeseen edistää Nokian ja sittemmin Microsoftin irtisanomisten jälkeensä jättämä laaja tekninen osaaminen. (Virtanen 2016.)

Marraskuussa 2015 sekä Suomeen että Ruotsiin perustettu kehitysyritys FS Links edistää Hyperloop-yhteyden rakentamista Helsingin ja Tukholman välille. Virtanen (2016) kirjoittaa maiden välisellä yhteydellä olevan mahdollisuuksia olla maailman ensimmäisten joukossa. Hän listaa yhteyden tuomista eduista vaikuttavimpina tunnin matka-ajan sekä matkalipun hinnan, joka alkuperäisten laskelmien mukaan olisi välillä 17–25 euroa. Tällä hetkellä kaupunkien väliselle matkalle on kaksi vaihtoehtoa: kokonaismatka-ajaltaan noin 3,5 tuntia kestävä lentomatka tai yli 17 tuntia kestävä laivamatka. (Virtanen 2016.)

7 Yhteenveto

Tässä työssä pyrittiin tehdyn kirjallisuuskatsauksen avulla selvittämään Hyperloop-järjestelmän toimintatapaa sekä järjestelmälle ominaisia peruspiirteitä ja näiden avulla arvioimaan sen mahdollisuuksia tulevaisuuden liikkumismuotona. Työssä käsiteltiin järjestelmän rakenteellisten osioiden kuvaus sekä perehdyttiin toiminnallisiin ominaispiirteisiin, jotka ovat tärkeitä matkustusparametreja. Työssä tutkittiin järjestelmän vaikutuksia matkustusturvallisuuteen sekä valittiin yhdeksi näkökulmaksi kestävyys tarkastelemalla järjestelmän päästöjä ja sen käyttämän energian tuottotapoihin. Järjestelmän resursseista käsiteltiin energiaomavaraisuutta sekä paljon kritiikkiä herättäneitä kustannuksia. Viimeisessä luvussa käsiteltiin järjestelmän toteuttamisen kannalta uhkaavia haasteita sekä suoritettiin liikennejärjestelmien vertailu, jossa referenssikohteena käytettiin Yhdysvaltoihin suunniteltua California High Speed Rail -järjestelmää. Lopuksi esiteltiin vielä paljon julkisuutta saanut hanke, jossa Suomen ja Ruotsin välisen yhteyden suunnittelu on yksi maailmalla pisimmistä olevista.

Ensimmäisenä tutkimustavoitteena oli selvittää Hyperloop-järjestelmän mahdollisuutena matkustajiin vaikuttavien suurten g-voimien kannalta. Selvisi, että rakenteellisilla vaatimuksilla, kuten radan pyörityssäteillä ja kapseleiden kallistamisella g-voimat eivät kasva matkustajille sietämättömiksi suurimpienkaan nopeuksien aikana. Osassa käsitellyä kirjallisuutta väitteet ihmiselle kestävämmistä g-voimista oli jopa kumottu, eikä järjestelmässä matkustamista kuvailtu epämiellyttävänä tai ahdistavana. Järjestelmän mahdollistamien suurten nopeuksien vaikutusta matkustusmukavuuteen on kuitenkin vaikea arvioida täydellisesti, sillä vastaavaa esimerkkiä ei ole olemassa. Turvallisuuden kannalta suuria g-voimia ei pidetty uhkana, vaan senkin saralla asiantuntijat pitivät suurimpana ongelmana järjestelmän ainutlaatuisuutta, mistä johtuen turvallisuuden takaaminen esi-merkin avulla ei ole mahdollista.

Toisena tutkimustavoitteena työssä haluttiin selvittää, millainen järjestelmän matkustuskokemus olisi kokonaisuudessaan, ja tarjoaisiko se jotain vaihtoehtoja esimerkiksi lentokenttien suhteellisen hitaalle terminaalioperoinnille. Työssä selvisi, että järjestelmällä olisi mahdollisuus tarjota jatkuva käyttövalmius tiiviillä operointivälillä. Tämä on jo itsessään liikennetekniikan kannalta mullistavaa, sillä se tekee juna- ja lentoliikenteen aikataulut tarpeettomiksi. Kapselin sisäinen matkustuskokemus todettiin työssä positiiviseksi eikä eroja esimerkiksi lentokoneessa matkustamiseen juurikaan löytynyt. Järjestelmään liittyvästä terminaalioperoinnista saatiin työssä kattava katsaus, ja sen todettiin olevan mahdollista tehdä huomattavasti lentokenttiä nopeammaksi ja sujuvammaksi.

Kolmantena tutkimustavoitteena haluttiin tarkastella järjestelmää kestävästä näkökulmasta, sekä kartoittaa sen resursseja. Järjestelmä todettiin lähes nollapäästöiseksi ja mahdollisesti myös energiaomavaraiseksi, sekä sen käyttämän energian tuottamiseen todettiin olevan kestäviä vaihtoehtoja. Näiden tulosten valossa järjestelmän potentiaalia tulevaisuuden kestävässä liikkumismuotona voidaan pitää erittäin suurena.

Työtä, eli kirjallisuuskatsausta on mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa järjestelmään liittyvien hankkeiden edistämiseksi sekä järjestelmälle sopivien reittimahdollisuuksien selvittämisessä. Työssä selvisi myös, kuinka osa Hyperloop-hankkeista on jo hyvin pitkälle edistyneitä, joten sen avulla voidaan saada järjestelmän tarjoamat mahdollisuudet konkretisoitua. Työssä löydettiin vastaukset tutkimuskysymyksiin, sekä saatiin kattava

yleiskuvaus järjestelmästä, joten työtä voidaan pitää hyvin onnistuneena. Työssä käytettiin useita, tyyliltään hyvin erilaisia lähteitä. Lähteet ovat verkkoaineistoja, sillä järjestelmästä ei ole vielä julkaistu painettua kirjallisuutta. Lähteet ovat suhteellisen luotettavia, mutta niitä arvioitaessa on syytä ottaa huomioon, että artikkeleiden ja yritysten julkaisemien raporttien kohdalla niissä oleva tieto voi olla erittäin valikoitua ja julkaisun näkökulmaa tukevaa. Jatkotutkimuksissa olisi hyvä löytää ja käyttää puolueettomampia lähteitä.

Työstä pois rajatut poliittiset ja ekologiset ovat voimakas tekijä järjestelmään liittyvien hankkeiden edistämiseksi. Järjestelmän todellisten mahdollisuuksien selvittämiseksi tulisi sitä tarkastella myös näistä näkökulmista. Poliittiselta ja ekologiselta näkökannalta tehty kirjallisuuskatsaus olisikin mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde.

8 Lähteet

- Ahlroth, J. 2016. ”Onko hyperloop vallankumous vai vitsi?” Helsingin Sanomat 9.8.2016. [verkkoaineisto]. [Viitattu 23.11.2016]. Saatavilla: <http://www.hs.fi/kotimaa/a1470629125425>
- Baynes, B. 2016. ”Why the hyperloop is no green transport miracle”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.11.2016]. Saatavilla: <http://www.climatechangenews.com/2016/06/20/why-the-hyperloop-is-no-green-transport-miracle/>
- Brandom, R. 2013. ”Speed bumps and vomit are the Hyperloop’s biggest challenges”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.11.2016]. Saatavilla: <http://www.theverge.com/2013/8/16/4626506/speed-bumps-and-vomit-are-the-hyperloops-biggest-challenges>
- Chee, A. 2015. ”The Race to Create Elon Musk’s Hyperloop Heats Up”. Wall Street Journal 30.11.2015. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.11.2016]. Saatavilla: <http://www.wsj.com/articles/the-race-to-create-elon-musks-hyperloop-heats-up-1448899356>
- Dodson, B. 2013. ”Beyond the hype of Hyperloop: An analysis of Elon Musk’s proposed transit system”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.11.2016]. Saatavilla: <http://newatlas.com/hyperloop-musk-analysis/28672/>
- Elkind, E. 2016. ”What’s The Future Of California’s High Speed Rail System?”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.12.2016]. Saatavilla: <http://legal-planet.org/2016/10/24/whats-the-future-of-californias-high-speed-rail-system/>
- Hawkins, A. 2016. ”This is what it’d be like to ride in the Hyperloop”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.11.2016]. Saatavilla: <http://www.theverge.com/2016/11/8/13556392/hyperloop-one-pod-dubai-design-video-passenger>
- Hower, M. 2015. ”Musk’s ’Hyperloop’ on Track to Start Construction in 2016”. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.11.2016]. Saatavilla: http://www.sustainablebrands.com/news_and_views/startups/mike_hower/musk's_hyperloop_start_construction_2016
- Hyperloop Alpha, 2013. SpaceX, [pdf]. [Viitattu 2.11.2016]. Saatavilla: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
- Hyperloop One, 2016. [Verkkosivu]. [Viitattu 9.12.2016]. Saatavilla: <https://hyperloop-one.com>
- Junttila, H. 2016. ”’Alle tunnin mittaiset lennot kiellettävä, autojen maksiminopeus 120 km/h’ – vaihtoehdon tarjoaa putkikyty kapselissa”. Tekniikka & Talous 10.11.2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.11.2016]. Saatavilla: http://www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/liikenne/alle-tunnin-mittaiset-lennot-kiellettava-autojen-maksiminopeus-120-km-h-vaihtoehdon-tarjoaa-putkikyty-kapselissa-6598124

Liimatainen, K. 2016. ”Huippunopea Hyperloop-yhteys otti Suomessa askeleen eteenpäin – Salo lähtee kilpailemaan käytännön kokeilusta”. Helsingin Sanomat 1.7.2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.11.2016]. Saatavilla: <http://www.hs.fi/talous/a1467344368652>

Mäkinen, J. 2016. ”Olisiko Hyperloop-superjuna Turun ja Tukholman välillä realistinen?” [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.11.2016]. Saatavilla: <http://www.tiedetuubi.fi/tekniikka/olisiko-hyperloop-superjuna-turun-ja-tukholman-valilla-realistinen>

Nath, T. 2015. ”Hyperloop System Vs. High Speed Train: What’s Best for California? (TSLA)”. [verkkoaineisto]. [viitattu 23.11.2016]. Saatavilla: <http://www.investopedia.com/articles/investing/050815/elon-musks-hyperloop-economically-feasible.asp>

Ristola, P. 2016. ”Salo selvittää aktiivisesti hyperloopin tuloa – ”Helsingin ja Tukholman välille toteutuisi yksi iso kaupunki”. [Verkkoaineisto]. [viitattu 7.11.2016]. Saatavilla: <http://yle.fi/uutiset/3-9005256>

SpaceX, 2013. ”Hyperloop Alpha”. [pdf]. [Viitattu 2.11.2016]. Saatavilla: http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf

Virtanen, S. 2016. ”Helsingistä Tukholmaan tunnissa 25 €:lla? – Hyperloop One -yhtiö esitteli suunnitelmansa 1000 km/h kulkevasta kapselijunasta”. Tekniikka & Talous 1.7.2016. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2016]. Saatavilla: <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/helsingista-tukholmaan-tunnissa-25-lla-hyperloop-one-yhtio-esitteli-suunnitelmansa-1000-km-h-kulkevasta-kapselijunasta-6564037>

