Aalto-yliopisto
Taiteiden ja suunnittelun
korkeakoulu

WIGGLE-JAKKARAKONSEPTI:

Tensegrity-periaatteen hyödyntäminen kalustesuunnittelussa

Opinnäytetyö
Ilkka Mutanen
Aalto-Yliopiston taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu
Muotoilun laitos
Syksy 2021

Aalto-yliopisto
Taiteiden ja suunnittelun korkeakoulu

Aalto-yliopisto, PL 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Taiteen kandidaatin opinnäytteen tiivistelmä

Tekijä Ilkka Mutanen

Työn nimi Wiggle-jakkarakonsepti: tensegrity-periaatteen hyödyntäminen kalustesuunnittelussa

Laitos Muotoilun laitos

Koulutusohjelma Muotoilu

Vuosi 2021 **Sivumäärä** 51 **Kieli** suomi

Tiivistelmä

Tämän muotoilun opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, onko tensegrity-ilmiötä mahdollista käyttää kalustesuunnittelun periaatteena esteettisesti ja muotoilullisesti kiinnostavalla tavalla. Tensegrity ilmiönä on alun perin lähtenyt liikkeelle 1900-luvun puolivälissä taiteen parista, josta se on levinnyt monille eri aloille, erityisesti arkkitehtuuriin. Viime vuosina ilmiö on tullut tutuksi tensegrity-huonekaluista, niin sanotuista leijuvista pöydistä ja tuoleista, joiden yläosa näyttää uhmaavan fysiikan lakeja. Tensegrity sopii erityisen hyvin taiteeseen, arkkitehtuuriin ja muotoiluun sen näyttävyyden ja yllätyksellisyyden takia. Se on kuitenkin suhteellisen tuore ilmiö, eikä sitä ole vielä hyödynnetty kovin laajasti. Kalustesuunnittelussa tensegrity asettaa designille reunaehtoja, kuten rakenteen muodostumisen vähintään kahdesta erillisestä osasta, sekä niiden välillä olevista kiristettävistä köysistä tai vaijereista. Suurimpana haasteena designille on tensegrity-rakenteen vaatimien rakenteiden sekä köysien tai vaijerien sulautuminen muuhun kokonaisuuteen ja siten muotoilullinen yhtenäisyys.

Opinnäytetyön ensimmäinen puolisko koostuu kirjallisuusosuudesta, jossa esitellään tensegrityn alkuperää, määritellään tensegrityn käsitettä, sekä käydään läpi sen sovelluskohteita. Jälkimmäisessä produktio-osuudessa suunnittelen ja toteutan tensegrity-periaatteella toimivan kalusteen. Produktion tavoitteena oli tuottaa korkealaatuinen kalustekonsepti, jossa tensegrity-periaate toimii olennaisena osana sen muotokieltä. Ideoinnin ja luonnosten pohjalta valittiin lupaavin jakkarakonsepti, jonka toimivuus varmistettiin karkealla 1:1 hahmomallilla. Tämän jälkeen kehitystä jatkettiin usealla erillisellä 3D-mallinnuskierroksella.

Suunnitteluprosessin pohjalta toteutettiin täysin toimiva ja viimeistelty Wiggle-jakkarakonseptin prototyyppi. Siinä köydet on valjastettu muuhunkin käyttöön kuin rakenteen pystyssä pitämiseen, jolloin ne nousevat paitsi visuaalisesti kiinnostavaksi, myös funktionaalisesti perustelluksi detaljiksi. Konseptissa onnistuttiin myös saamaan tensegrity-periaatteen vaatima rakenne mahdollisimman saumattomaksi osaksi muuta muotoilua. Visuaalisesti prototyyppi jäi vielä hieman keskeneräiseksi, mutta renderöintien perusteella Wiggle on esteettisesti korkealaatuinen tensegrity-kalustekonsepti. Wiggle on leikkisä ja yllätyksellinen sekä visuaalisesti että funktionaalisesti, sillä hieman joustava rakenne reagoi myötäilemällä käyttäjän liikkeitä.

Avainsanat kalustesuunnittelu, huonekalusuunnittelu, tensegrity

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO 1

2 TAUSTA OPINNÄYTETYÖLLE 2

3 TENSEGRITY-PERIAATE 4

3.1 Alkuperä 4

3.2 Johdatus tensegrity-periaatteeseen 8

3.2.1 Puristus- ja vetojännitys 8
3.2.2 Tensegrityn perusperiaatteet 10
3.2.3 Tensegrityn hyödyt ja haitat 13

3.3 Tensegrityn sovellukset 14

3.3.1 Tensegrity luonnossa ja biologiassa 15
3.3.2 Tensegrity taiteessa 16
3.3.3 Tensegrity rakennesuunnittelussa ja arkkitehtuurissa 18
3.3.4 Tensegrity kalustesuunnittelussa 19

4 PRODUKTIO: KALUSTEKONSEPTIN KEHITYS 25

4.1 Suunnitteluprosessi 25

4.1.1 Lähtökohta ja tavoitteet 25
4.1.2 Konseptien ideointi ja luonnostelu 26
4.1.3 Alustavan konseptin valinta 32

4.2 Konseptin jatkokehitys 33

4.2.1 Hahmomalli 33
4.2.2 Konseptin 3D-mallinnus ja kehitys 36

5 PRODUKTIO: PROTOTYYPIN VALMISTUSPROSESSI 39

5.1 Istuinosan valmistus 39

5.2 Metalliosien valmistus 39

5.3 Köydet ja köyden kiristimet 41

5.4 Kokoonpano 42

6 WIGGLE-JAKKARAKONSEPTIN ESITTELY 43

7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET 45

8 POHDINTA 46

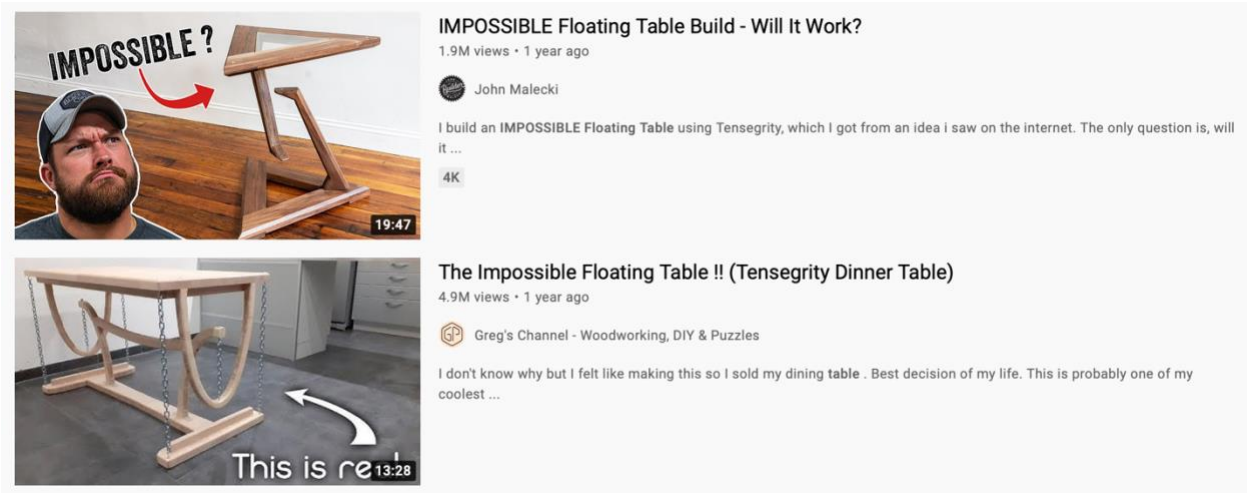
LÄHTEET 48

KUVAT 50

1 JOHDANTO

Tensegrity on arkkitehtoninen systeemi, jossa eri osiin kohdistuvat vastakkaiset puristus- ja vetojännitykset ovat tasapainossa (Ingber, 1998). Hyvin monet luonnosta löytyvät rakenteet perustuvat tähän rakennustapaan, mutta silti tensegrityn käyttö keinotekoisten rakenteiden suunnittelussa on suhteellisen tuore ilmiö. Alun perin tensegrityä on hyödynnetty lähinnä taiteessa hyvin kokeelliselta pohjalta, ja ilmiön fysiikkaa on alettu tietoisesti tutkia ja ymmärtää vasta 1900-luvun jälkipuoliskolla. Ensimmäisenä tensegrity-rakenteena pidetään yleisesti kuvanveistäjä Kenneth Snelsonin teosta X-Piece vuodelta 1948. Tensegrity ilmiönä henkilöityy kuitenkin pitkälti Snelsonin opettajaan, keksijä Buckminster Fulleriin, joka popularisoi ilmiötä ja vakiinnutti sille englanninkielisen nimen. Tensegritylle ei ole suomenkielistä sanaa, mutta ”tensional integrity” kääntyisi esimerkiksi muotoon ”jännitteellinen yhtenäisyys”. Käytän opinnäytetyössäni selvyyden vuoksi englanninkielistä termiä, jolla voidaan viitata joko ilmiöön yleisesti (”tensegrity”) tai ilmiötä hyödyntävään rakenteeseen (”a tensegrity”).

Tensegrity-rakenteita on niiden ilmeisistä eduista huolimatta käytetty yllättävän vähän puhtaan taiteen ulkopuolella. Ilmavana ja erittäin kevyen rakentamisen mahdollistavana rakenteena sitä on käytetty sekä toiminnallisena että esteettisenä tehokeinona arkkitehtuurissa ja rakentamisessa, erityisesti erilaisissa paviljongeissa ja kattorakenteissa. Kevyet, kestävät tensegrity-rakenteet mahdollistavat myös erittäin tehokkaan materiaalien käytön. Tensegrityä on alettu soveltaa yhä enemmän myös muussa käytännön suunnittelussa, esimerkiksi kalustemuotoilussa, josta tutuimpana esimerkkinä ovat miljoonia katselukertoja YouTubessa saaneet ”leijuvat” tuolit ja pöydät (kuva 1).



Kuva 1. ”Leijuvia” pöytiä (Youtube, 2021).

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, voiko tensegrityä hyödyntää esteettisesti ja muotoilullisesti korkealaatuisen kalusteen suunnittelussa. Opinnäytetyötäni varten suunnittelen ja toteutan tensegrityyn perustuvan kalustekonseptin. Samalla tutkin ilmiön

lainalaisuuksia ja pyrin saavuttamaan käsityksen siitä, onko rakenteessa mahdollista säilyttää samanaikaisesti sekä riittävä rakenteellinen kestävyys että leijumisilluusion vaatima ilmavuus. Paitsi että tensegrity kalustesuunnittelussa on aiheena ajankohtainen, se vaikuttaa myös keräävän yleisön kiinnostusta. Näin ollen markkinoilla voisi nähdäkseni olla kysyntää korkealaatuisille tensegrityä hyödyntäville kalusteille. Toistaiseksi nähdyt esimerkit ovat usein olleet hyvin prototyyppimaisia ja viimeistelemättömiä.

Aluksi avaan opinnäytetyössäni tensegrity-ilmiön taustaa: historiaa, teoriaa sekä sovelluskohteita. Produktio-osuudessa kuvaan prosessia, jossa suunnittelen ja toteutan tensegrityä hyödyntävän kalustekonseptin. Motiivini opinnäytetyölle on kiinnostavan ilmiön tutkiminen ja kokeellisempi lähestyminen muotoiluun, sekä syvempi halu päästä tekemään kalustemuotoilua ja kartuttamaan siihen liittyvää osaamista. Tavoitteenani on kerryttää monipuolisesti uutta tietoa ja osaamista esimerkiksi eri materiaalien käytöstä kalusteissa, kalusteiden valmistuksesta ja istumisen ergonomiasta. En pyri lähtökohtaisesti kaupallistamaan tuotetta, enkä näin ollen ota yksittäisessä käsin valmistettavassa prototyypissäni kantaa sen teolliseen sarjavalmistettavuuteen.

2 TAUSTA OPINNÄYTETYÖLLE

Vaikka tensegrity on hyvin olennainen periaate rakenteiden suunnittelussa, se on silti kohtalaisen tuntematon käsite. Tensegrity ilmiönä on kuitenkin viime vuosina alkanut nousta suuremman yleisön tietoisuuteen, pitkälti sosiaalisen median ansiosta. Itse tutustuin ilmiöön ensimmäisen kerran vuonna 2020, kun tutustuin sosiaalisessa mediassa tensegrity-periaatteella toimivaan ”leijuvaan” pöytään. Tensegrity herätti nopeasti oman kiinnostukseni, sillä se vaikutti nousevan esiin yhä useammissa yhteyksissä. Aluksi videot herättivät minussa epäuskoista kummastusta: miten on mahdollista, että pöydän yläosa kelluu vain ohuiden pingotettujen nauhojen tai vaijereiden varassa? Varsinkin ensinäkemältä ilmiö oli erittäin vaikuttava, ja ymmärsin vasta lyhyen pohdinnan jälkeen mistä näkemässäni ilmiössä on oikeastaan kyse. Vaikka en heti nähnytkään tensegrityssä potentiaalia opinnäytetyöni aiheeksi, lokeroin sen hautumaan mieleeni inspiraation lähteeksi omille tuleville muotoiluprojekteille.

Tekemäni vertailun perusteella tensegrityä hyödyntävissä kalustekonsepteissa ei ole vielä saavutettu teeman täyttä potentiaalia. YouTubesta löytyy satoja videoita itse tehdyistä tensegrity-pöydistä ja -tuoleista, mutta niissä on usein muotoilullisia puutteita. Videoissa tyypillisesti kummastellaan ja hehkutetaan painovoimaa uhmaavaa ”mahdotonta” rakennetta, mutta kalusteet ovat yleensä harrastelijoiden tekemiä. Itse ilmiö on näyttävä, mutta sitä ei ole osattu hyödyntää kalustesuunnittelussa kenties sen ansaitsemalla tavalla. Yleisön kovan kiinnostuksen perusteella tensegrityä hyödyntäville kalusteille voisi olla kuitenkin kaupallista potentiaalia. Opinnäytetyöni tavoitteena onkin tuottaa muotoilullisesti korkeatasoinen kalustekonsepti, jossa tensegrity-periaate nivoutuu saumattomaksi osaksi tuotteen muotokieltä

ja toimii muotoilussa olennaisena ja perusteltuna lähtökohtana. Samalla pyrin vastaamaan esittämääni laajempaan tutkimuskysymykseen: voidaanko tensegrity-periaatetta käyttää kalustemuotoilussa kiinnostavana visuaalisena ja funktionaalisena elementtinä?

Tensegrity on mielestäni yllättävä ja positiivista hämmennystä herättävä ilmiö, ja siihen liittyvän jännitteellisyyden ja leijumisaspektin takia pidän sitä muotoilullisesti hyvin kiinnostavana. Virittämällä rakenteita kannattelevat vaijerit tietyllä tavalla on mahdollista saada aikaan illuusio, joka näyttää äkkiseltään luonnonlakien vastaiselta (kuva 2). Minua kiehtoo myös tarina, joka syntyy kappaleiden välisestä vuorovaikutuksesta, ja haluaisin pystyä valjastamaan tämän kalustesuunnittelussa taiteelliseksi tehokeinoksi. Lisäksi koen tensegrityyn liittyvät käytännölliset ja muotoilulliset haasteet projektille kiinnostavina reunaehtoina, mutta myös inspiraation lähteenä. Koska tensegrity-rakenteisiin liittyy aina jonkinlaisten kiristettävien köysien tai vaijerien käyttö, sen voi mieltää joko suunnitelmaa rajoittavana tekijänä tai koko ideaa kannattelevana teemana.

Kuva 2. Hyvin ohuilla läpinäkyvillä siimoilla on mahdollista saada aikaan leijuvalta näyttävä rakenne. Mitä kevyempi rakenne, sitä huomaamattomammaksi vaijerit on mahdollista saada. (The British School Warsaw, 2020; https://i.imgur.com/hAcYZaG.jpg, ei pvm.)

Tavoitteen saavuttamiseen liittyy haasteita, jotka on hyvä tiedostaa. Omana lähtökohtana ei ole pelkästään tensegrityn ynnääminen tuotteeseen hinnalla millä hyvänsä, vaan siitä pitää olla joko funktionaalista tai esteettistä hyötyä. Tensegrity-huonekalujen visuaalinen näyttävyys perustuu vahvasti illuusioon leijumisesta, ja tätä teemaa haluan ensisijaisesti tavoitella myös omassa produktiossani. On kuitenkin ilmeistä, että tensegrity-huonekaluissa illuusio leijumisesta ei voi olla yhtä vahva kuin keveissä hahmomalleissa, joissa voidaan käyttää hyvin hienovaraista ja lähes näkymätöntä siimaa illuusion aikaansaamiseksi. Jotta voidaan saavuttaa

riittävän kestäviä ja esimerkiksi ihmisen painon kannattelevia rakenteita, täytyy joko lisätä vaijerien määrää tai niiden paksuutta – kummassakin tapauksessa illuusio leijumisesta kärsii.

Koska vaijerit tulevat joka tapauksessa olemaan näkyvä visuaalinen elementti, kannattaa niistä tehdä muotoilua keskeisesti ohjaava konsepti. Ongelmana useimmissa tensegrity-huonekaluissa on nimenomaan materiaalinen ja visuaalinen eheys; vaijerit ja muu rakenne tuntuvat edustavan täysin eri muotokieltä keskenään. Tähän liittyy toisaalta myös kiinnostavia muotoilullisia mahdollisuuksia: siinä missä teräsvaijerit vievät ajatukset kohti teollisuutta tai arkkitehtonista maailmaa, paksujen köysien käytöllä voidaan viitata hyvinkin suoraviivaisesti vaikkapa veneilyteemaan. Leijuvaa rakennetta voi ajatella paitsi ongelmana rakenteen kestävyyden kannalta, myös mahdollisuutena esimerkiksi ergonomian ja funktionaalisuuden kannalta. Erilaiset keskivartalon lihaksia aktivoivat keinuvat jakkarat ovat suosittuja istumatyöläisten keskuudessa, ja hieman joustava kelluva rakenne saattaisi tarjota tuotteeseen samankaltaisen funktionaalisen näkökulman ja hyvinvointia lisäävän aspektin.

3 TENSEGRITY-PERIAATE

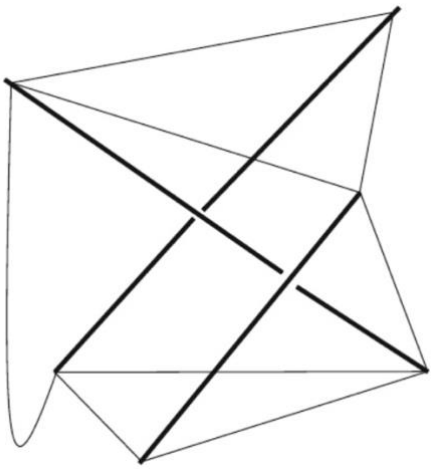
Tensegrityn käsite on saanut alkunsa alun perin taiteen maailmasta, mistä se on levinnyt laajasti muille aloille. Tätä nykyä tensegrityn ainutlaatuisia mekaanisia ominaisuuksia hyödynnetään insinööritieteiden ja rakentamisen lisäksi esimerkiksi matematiikassa ja biolääketieteessä. Luonnossa tensegrity esiintyy aina mikrotasolta makrotasolle, ja sitä voidaankin pitää hyvin universaalina ilmiönä. (Zhang & Ohsaki, 2015.) Tässä kappaleessa pureudutaan tensegrityyn ilmiönä teoreettisemmista lähtökohdista. Ensimmäisenä avataan sen historiaa, jonka jälkeen keskitytään terminologiaan ja ilmiön tarkempaan määrittelemiseen. Sen jälkeen esitellään tensegrityn erilaisia sovelluskohteita – sekä ihmisen tekemiä rakennelmia että luonnosta löytyviä esimerkkejä.

3.1 Alkuperä

Tensegrityn alkuperä ja siihen liittyvä kysymys älyllisestä omistajuudesta on säilynyt nykypäivään asti kiistanalaisena. Kiistelyä tensegrityn immateriaalioikeuksista on jälkeenpäin selvitelty esimerkiksi patenttien ja avainhenkilöiden käymän kirjeenvaihdon avulla, ja ainakin Gómez Jáuregui (2009) on omistanut tälle kokonaisen artikkelin.

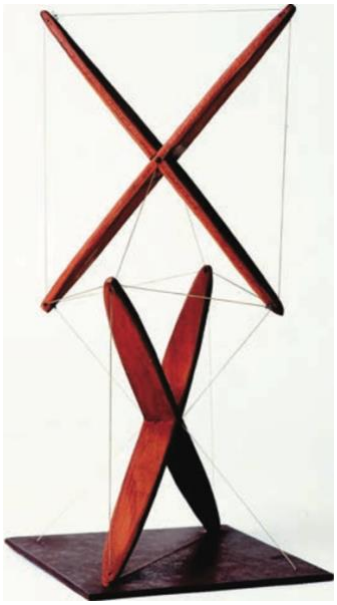
Kirjallisuudessa mainitaan yleisesti tensegrityn varhaisimpana edelläkävijänä venäläinen konstruktivisti Karl Ioganson, jonka taideteos Study in Balance vuodelta 1920 muistutti tensegrity-rakennelmaa (Rivas Adrover, 2015). Sultanin (2009) mukaan se ei kuitenkaan täytä yhtä tensegrityn pääkriteereistä, sillä se ei ole jäykässä esijännitetyssä tasapainotilassa. Iogansonin veistoksessa (kuva 3) on kolme suoraa tankoa ja seitsemän jännitettyä vaijeria, ja kahdeksannen, löysän vaijerin avulla voidaan muuttaa systeemin konfiguraatiota. Näin ollen

rakenne on tasapainotilassa vasta kun siihen kohdistuu ulkoisia jännityksiä vaijerin kiristämiseksi.



Kuva 3. Karl Iogansonin Study in Balance vuodelta 1920 (Sultan, 2009).

Selkeää on, että ensimmäisen ”aitona” tai ”puhtaana” pidetyn tensegrity-rakenteen teki kuvanveistäjä Kenneth Snelson vuonna 1948 opiskellessaan Black Mountain Collegessa (Sultan, 2009). Snelsonin X-Piece -teos (kuva 4) erosi kaikista muista aikaisemmin nähdyistä vetojännitykseen perustuvista rakenteista siinä, että se oli jatkuvasti esijännitetyssä tilassa (Rivas Adrover, 2015). Rakenne on esijännitetty, kun sen kaikki osat ovat koko ajan joko veto- tai puristusjännityksessä riippumatta ulkoisista jännitteistä.



Kuva 4. Kenneth Snelsonin X-Piece vuodelta (Snelson, 1948).

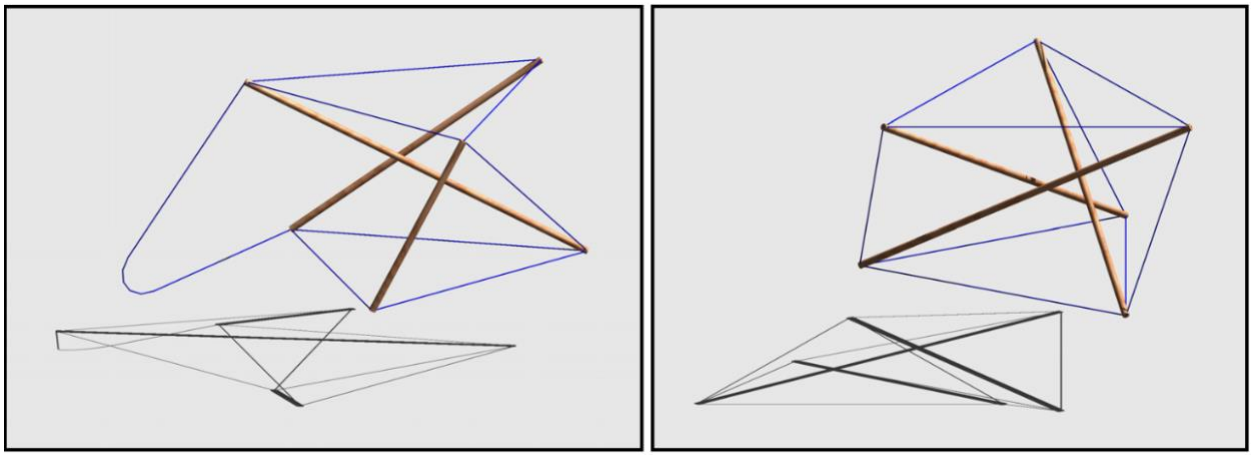
Snelsonin veistoksessa puiset X-rakenteet on viritetty nailonlankojen avulla, ja rakenne pysyy jäykkänä, vaikka puurimat eivät ole keskenään kosketuksessa (Keats, 2016). Olennaista

rakenteessa Iogansonin tutkielmaan verrattuna on se, että kaikki langat ovat jännityksessä ja rakenne on jäykässä tasapainotilassa ilman ulkoisia voimia (Sultan, 2009). Snelson kutsui systeemiä ”kelluvaksi puristusjännitykseksi” ja myöhemmässä patentissaan vuonna 1960 ”jatkuvaksi vetojännitykseksi, epäjatkuvaksi puristusjännitykseksi” (Keats, 2016; Motro, 2003).

Tässä kohtaa kuvaan astui Richard Buckminster Fuller, johon tensegrityn alkuperä henkilöityy nykyään jopa vahvemmin kuin Kenneth Snelsoniin. Fuller oli vuoden 1948 kesällä ollut Snelsonin opettajana Black Mountain Collegessa, ja häkeltyi vuonna 1949 nähdessään tämän uraauurtavan teoksen. Fuller ymmärsi heti rakenteen merkityksellisyyden; Snelson oli tietämättään ratkaissut Fullerin aikaisemmin esittämän haasteen puristusjännityksen ja vetojännityksen erottamisesta. Snelsonin rakenne säilyi jäykkänä siitä huolimatta, että jäykät puurakenteet eivät olleet kosketuksissa toisiinsa, koska rakenteessa vetojännitys oli jatkuvaa. Fullerin mielestä vetojännityksen erottaminen oli keskeinen avain erityisen kevyeen rakentamiseen, sillä jännitetyt vaijerit ovat sekä kevyitä ja kestäviä. (Keats, 2016.)

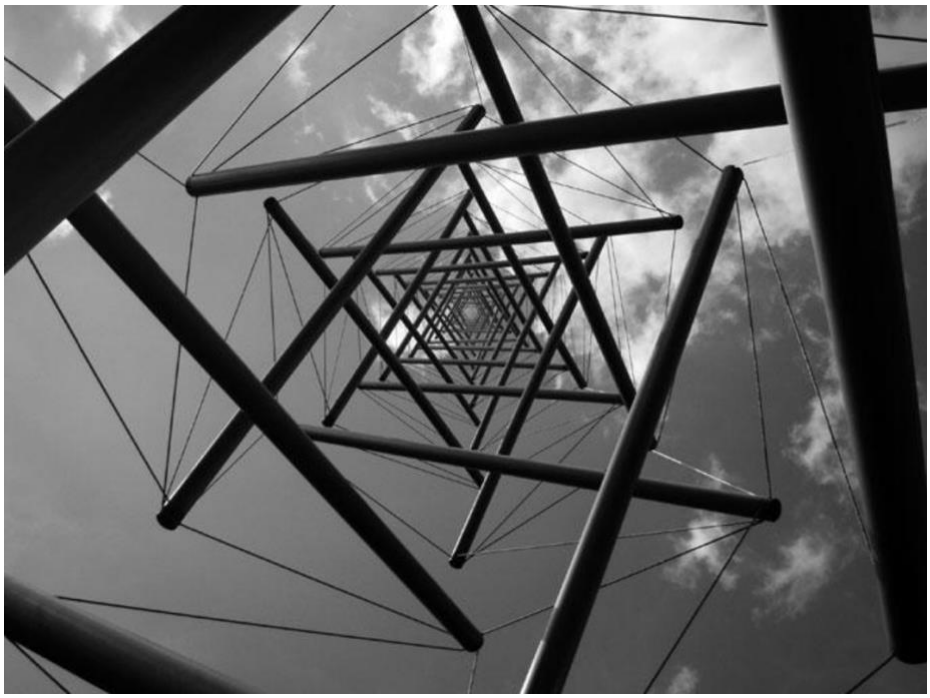
Keatsin (2016) mukaan Fuller piti myöhemmin keksintöä täysin omanaan, sillä oli omien sanojensa mukaan kolunnut tensegrity-konsepteja 21 vuoden ajan ennen Snelsonin tapaamista. Fuller antoi Snelsonille lähinnä alentavaan sävyyn maininnan siitä, että hän oli onnistunut demonstroimaan erikoistapauksen hänen omasta periaatteestaan (Keats, 2016). Fuller otti keksinnön kirjaimellisesti omiin nimiinsä vuonna 1955, jolloin nimesi ilmiön ”Tensegrityksi” yhdistelmänä sanoista ”tensional” ja ”integrity” (Gómez Jáuregui, 2009). Tällä nimityksellä ja ison alkukirjaimen käytöllä hän alleviivasi, että kyse oli nimenomaan Fullerin keksimästä tensegritystä.

Kiistaa tensegrity-konseptin immateriaalioikeuksista on selvitelty patenttien perusteella ja niidenkin mukaan on vähintäänkin kiistanalaista, kenelle kuuluu kunnia tensegrityn keksimisestä (Motro, 2003). Patenteissa kuviin astuu Fullerin ja Snelsonin lisäksi myös kolmas henkilö: David Georges Emmerich, joka samaan aikaan mutta itsenäisesti alkoi tutkia tensegrity-rakenteita (Gómez Jáuregui, 2009). Kaikki kolme ovat Motron (2003) mukaan tuoneet patenteissaan merkittävän panoksen aiheeseen, ja lisäksi patentoineet lähes identtisen rakenteen. Rakenne, jota Motro (2003) kutsuu joko simpleksiksi (”simplex”) tai Emmerichin mukaan alkeistasapainotilaksi (”elementary equilibrium”) on yksinkertaisin mahdollinen tensegrity-yksikkö ja hyvin lähellä Iogansonin tutkielmaa. Rakenteessa on kolme suoraa ja tankoa ja yhdeksän vaijeria, jotka yhdessä muodostavat kiertyneen prismamaisen rakenteen (kuva 5).



Kuva 5. Vasemmalla Karl Iogansonin Study in Balance. Oikealla niin kutsuttu alkeistasapainotila eli simpleksi. (Gómez Jáuregui, 2009.)

Sekä Snelson, Fuller että Emmerich tutkivat tensegrity-ilmiön eri aspekteja vuosien 1950–1960 tienoilla ja näkivät tensegrityn potentiaalin hieman eri paikoissa. Snelson ei ollut kovin kiinnostunut tensegrityn soveltamisesta käytännön insinööritieteisiin vaan keskittyi erityisesti taiteelliseen ja esteettiseen näkökulmaan, kontekstinaan dramaattiset veistokset, jotka hyödynsivät tensegrity-periaatetta. Kuvanveistäjän ja taiteilijan töitä on esillä esimerkiksi museoissa ja veistospuistoissa. Snelsonin parhaiten tunnettu työ Needle Tower (kuva 6) vuodelta 1968 on hänen varhaisimpaan ja edelleen vaikuttavimpia tensegrity-rakennelmia. Siinä alumiiniputket pysyvät täydellisessä tasapainossa yhden ainoan teräsvaijerin avulla (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011).



Kuva 6. Kenneth Snelsonin Needle Tower (Snelson, 1968).

Fuller ja Emmerich tutkivat tensegrityä toisenlaiselta kantilta kuin Snelson. He etsivät tensegrityn erilaisia tyyppiluokkia ja pyrkivät löytämään mahdollisia sovelluskohteita arkkitehtuurin ja insinööritieteiden alalta (Gómez Jáuregui, 2009). Fuller pyrki Snelsonia tieteellisempään ja käytännöllisempään tutkimukseen ja patentoi useita rakenteita yksinkertaisemmista aina monimutkaisempiin arkkitehtuurisiin sovelluksiin: mastoihin, putkiin, geodeettisiin kupoleihin ja palloihin (de Llorens, 2015). Fullerin kiinnostus kohdistui erityisesti geodeettisiin rakenteisiin, joista hän myös tuli kuuluisaksi. Arkkitehti Emmerich taas näki tensegrityn käytännön arvon erityisesti rakentamisen tekniikoissa.

Vaikka Fuller Snelsonin mukaan enemmän tai vähemmän anasti keksinnön omistajuuden ja kielsi hänen osuutensa keksinnössä, niin kirjallisuudessa Snelson tunnustetaan oikeutetusti kaiken alulle panijana. Snelsonille annetaan tunnustus esimerkiksi tensegrity-rakenteen keksimisestä ja konseptin soveltamisesta ensimmäisenä tilallisiin rakenteisiin (Sultan, 2009; Motro, 2003). Fuller kuitenkin – ilmiselvästi Snelsonin saavutusten jouduttamana – päätyi tutkimaan tensegrity-rakenteiden mekaniikkaa, teki systemaattisia kokeiluja erilaisilla tensegrity-yksiköillä ja muodoilla, ja patentoi lukuisia erilaisia rakenteita. Fulleria on siis kiittäminen nykypäivänä tuntemamme tensegrity-konseptin popularisoimisesta sekä sen merkityksellisyyden lisäämisestä ja kehittämisestä. Gómez Jáureguin (2009) mukaan keksijää ei voi selkeästi nimetä, vaan synergia opettajan ja oppilaan välillä johti tensegrityn syntymään.

3.2 Johdatus tensegrity-periaatteeseen

Tensegrity-rakenteiden hyötyjen ymmärtämiseksi on oleellista käsittää, miksi rakenteessa on edullista erottaa puristus- ja vetojännitys toisistaan. Tämä selkeytyy, kun ensin selvitetään miten materiaalit käyttäytyvät erilaisten jännitysten alaisena. Sen jälkeen avataan tensegrityyn liittyvää terminologiaa ja määritelmiä, sekä sen hyötyjä ja haittoja.

3.2.1 Puristus- ja vetojännitys

Kaikkiin rakenteisiin kohdistuu rasitusta, ja yksinkertaisin rasituksen muoto on puristusjännitystä, jota aiheutuu esimerkiksi painovoimasta. Aina viime vuosisadalle asti rakentamisen filosofia on ollut hyvin yksinkertaista: rakenteet pysyivät paikoillaan painovoiman alaisena ja niihin kohdistuvat jännitykset olivat siksi pääosin puristavia (Gómez Jáuregui, 2004). Puristusjännitykseen perustuu siis kaikkein yksinkertaisin rakentaminen, jossa esimerkiksi tiiliä tai kiviä kasataan päällekkäin seinäksi. Ne estävät kattoa romahtamasta painovoiman vaikutuksen alaisena ja kantavat päälle kasatun rakenteen aiheuttamaa puristusjännitystä.

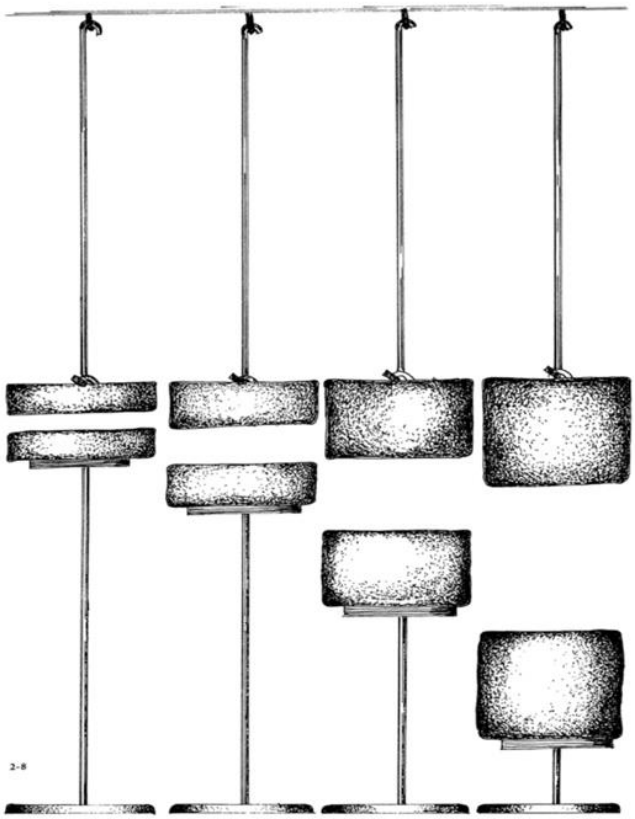
Vetojännitykseen perustuvissa rakenteissa, joita ovat esimerkiksi teltat ja erilaiset riippusillat, saavutetaan samalla materiaalimäärällä selvästi parempi rakenteellinen kestävyys kuin puristusjännitykseen perustuvilla rakenteilla (Williams, 2013). Riippusillat ovat vuosituhansia

vanha keksintö, mutta viimeistään 1800-luvun lopulla ensimmäisissä nykyaikaisissa riippusilloissa ymmärrettiin konseptuaalisesti, että rakenteessa on edullista erottaa puristus- ja vetojännitys toisistaan. Riippusillassa pystysuorat tornit ovat puristusjännityksessä ja pitävät ylhäällä vetojännityksessä olevia kaapeleita, jotka puolestaan tukevat sillan kantta. (Glass, 2008.)

Tensegrityssä ajatus veto- ja puristusjännityksen erottamiseksi toisistaan on viety vielä pidemmälle mahdollistaen rakenteellisesti vielä joustavampia ja vapaampia rakenteita. Ne perustuvat täysin erilaiseen konseptiin kuin perinteinen rakentaminen; koska komponentit ovat esijännityksen ansiosta tasapainotilassa jo ennen ulkoisten voimien vaikutusta, ne eivät vaadi painovoimaa pysyäkseen kasassa. Olennaista on myös se, että tensegrity-rakenteissa hyödynnetään enimmäkseen vetojännitystä puristusjännityksen sijaan. Näin saavutetaan erityisen ilmavia ja kevyitä rakenteita, joissa on vahva kontrasti perinteisiin massiivisiin rakennelmiin. Koska puristusjännitystä kantavat painavat osat ovat tensegrity-rakenteissa hyvin vähäisiä, on painon ja kestävyyden välinen hyötysuhde vielä parempi kuin varhaisissa vetojännitykseen perustuvissa rakenteissa (Williams, 2013).

Materiaalit käyttäytyvät eri tavalla veto- kuin puristusjännityksen alaisena, ja tensegrity-rakenteet hyödyntävät vetojännityksen ainutlaatuisia ominaisuuksia. Kun sauvamaiseen rakenteeseen kohdistetaan puristavia voimia sen pääakselin suuntaisesti, se taipuu jännitystä lisättäessä. Vetojännitystä sauvamaiseen rakenteeseen kohdistaessa materiaali venyy ja voi murtua, mutta ennen kaikkea se pysyy suorana. Vetojännityksen toinen etu on se, että kiristäminen jäykistää ja stabiloi rakennetta. Tensegrity-rakenteissa kuorma jakautuu tasaisesti koko rakenteen alueelle, jolloin kuorma ei kohdistu yksittäisiin pisteisiin (Williams, 2013).

Vetojännityksen edullisuutta puristusjännitykseen verrattuna voidaan konkretisoida kuvan 7 yksinkertaisella esimerkillä. Ylärivissä painot roikkuvat sauvojen varassa, jolloin niihin kohdistuu vetojännitystä, alarivissä painot kohdistavat sauvoihin puristusjännitystä. Vasemmalta oikealle painoa lisättäessä huomataan, että puristusjännityksen tapauksessa sauvan pituutta täytyy lyhentää, jotta se ei ala taipua. Toisaalta sauvan pituutta kasvatettaessa painoa täytyy vähentää, kunnes saavutaan tilanteeseen, jossa sauva pystyy kannattelemaan taipumatta vain oman painonsa. Ylärivissä painoa tai sauvan pituutta voidaan lisätä ilman pelkoa sauvan taipumisesta, sillä taipumista ei voi tapahtua vetojännityksen alaisena (Williams, 2013).



Kuva 7. Puristusjännityksessä (alarivi) sauvan pituutta täytyy lyhentää tai halkaisijaa kasvattaa kuormaa lisättäessä. Vetojännitykselle (ylärivi) ei ole samanlaisia rajoituksia. (Williams, 2013.)

3.2.2 Tensegrityn perusperiaatteet

Tensegrity-rakenteet eroavat perinteisistä puristusjännitykseen perustuvista rakenteista sekä tavallisista vetojännitystä hyödyntävistä rakenteista siinä, mitkä komponentit ovat jatkuvia ja mitkä epäjatkuvia (Motro, 2003). Sekä puristusjännitykseen että vetojännitykseen perustuvissa rakenteissa puristusjännityksessä olevat osat muodostavat jatkuvan verkon, ja vetojännityksessä olevat osat ovat yksittäisiä ja epäjatkuvia saarekkeita. Vetojännitys on epäjatkuvaa myös rakenteissa, joissa valtaosa komponenteista on vetojännityksessä. Tensegrity-rakenteissa tämä perusperiaate kääntyy toisinpäin: puristusjännitys on eristetty epäjatkuvaksi ja se kelluu jatkuvassa vetojännityksen kentässä. (Williams, 2013.) Koska puristusjännitykseen liittyy mielikuvissamme olennaisesti vaatimus jatkuvuudesta, tästä ominaispiirteestä seuraa myös tensegrityyn liittyvä yllätyksellisyys (Motro, 2003).

Jos tensegrityn alkuperä on säilynyt kiistanalaisena nykypäivään asti, niin myös yksiselitteisen määritelmän antaminen ilmiölle on hankalaa. Määritelmiä on yhtä monta kuin määrittelijöitäkin ja Gómez Jáurequi (2004) käy väitöskirjassaan läpi tätä evoluutiota. Yleisesti hyväksytty ja paljon viitattu määritelmä on Motron (2003) käsialaa:

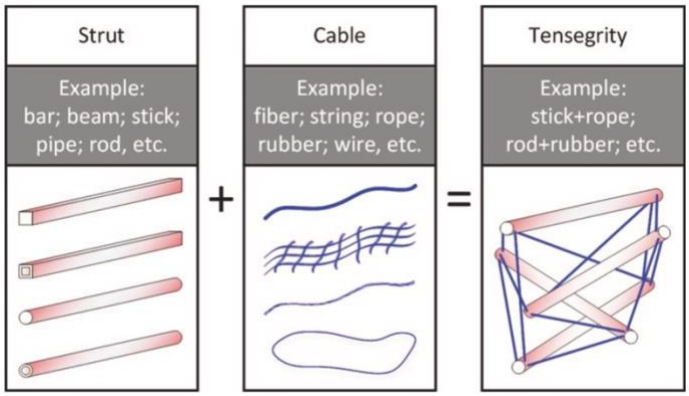
”Tensegrity on systeemi, joka on itsestään tasapainotilassa ja joka koostuu epäjatkuvasta joukosta puristusjännitettyjä komponentteja, joka on vetojännitettyjen komponenttien jatkumon sisällä.”

Hieman kattavammin tensegrityn päätyi summaamaan itse Gómez Jáuregui (2004), jonka muotoilemaa määritelmää on käytetty myös englanninkielisessä Wikipediassa:

”Tensegrity on periaate, jossa eristetyt puristusjännitetyt komponentit ovat jatkuvan vetojännityksen verkon sisällä siten, että puristusjännitetyt komponentit (yleensä tangot tai sauvat) eivät kosketa toisiaan ja esikuormitetut vetojännitetyt komponentit (yleensä kaapelit tai jänteet) rajaavat systeemin tilallisesti.”

Yksiselitteisen määritelmän antamisessa pienetkin eroavaisuudet sanavalinnoissa ovat merkittäviä. Siksi kirjallisuudessa pyritään määrittelemään myös käytetyt epämääräiset termit (systeemi, komponentti jne.) mahdollisimman yksiselitteisesti. Kääntäminen suomen kielelle tuo lisähaasteita ja on hyvinkin mahdollista, että olennaisissa sanavalinnoissa on virheitä. Olen kuitenkin pyrkinyt käyttämään opinnäytetyössäni termejä, jotka mahdollisimman hyvin kuvaavat alkuperäistä tarkoitustaan, ja pysymään niissä johdonmukaisesti.

Olennaista on, että tensegrity-systeemissä vetojännityksessä olevat komponentit ovat ohuita ja taipuisia, ja puristusjännityksessä olevat komponentit ovat jäykkiä ja poikkileikkaukseltaan paksumpia. Jäykät komponentit voivat olla profiililtaan oikeastaan mitä tahansa sauvoja ja putkia (kuva 8); tyypillisesti esimerkiksi onttoja alumiini- tai teräsputkia, puuta tai jopa lasia (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011). Yhtä lailla ohuet ja taipuisat komponentit voivat olla siimoja, nauhoja, köysiä, kaapeleita tai johtoja; tyypillisesti kevyttä ja lujaa materiaalia, esimerkiksi teräsvaijeria (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011). Käytän selvyyden vuoksi kirjallisuusosuudessa komponenteista johdonmukaisesti yleisnimitystä ”tanko” ja ”vaijeri”.



Kuva 8. Esimerkkejä tensegrity-rakenteissa käytettävistä tangoista (strut) ja vaijereista (cable) (Gan, 2020).

Vaikka tensegrity on terminä epämääräisesti määritelty, niin kirjallisuudessa ollaan yksimielisiä siitä, että rakenteen täytyy täyttää tiettyjä ehtoja ollakseen ”aito” tai ”puhdas” tensegrity. Zhangin ja Ohsakin (2015) mukaan aidon tensegrityn kriteerejä ovat: (1) rakenne pysyy kasassa itsenäisesti ilman tuentaa (2) rakenteelliset komponentit ovat suoria (3) rakenteessa on ainoastaan kahdenlaisia komponentteja, puristusjännitystä kantavia tankoja ja vetojännitystä kantavia vaijereita (4) tankojen päät eivät kosketa toisiaan. Hanaor (2009) tiukentaa vielä viimeistä ehtoa mainiten, että aidossa tensegrityssä tangot ovat kiinnitetty vain vaijereihin; toisin sanoen mikään niiden osista ei saa koskettaa toisiaan.

Näin ollen useimmat kirjallisuudessa käytetyt esimerkit ja analogiat eivät täytä aidon tensegrityn kriteerejä. Kenneth Snelsonin (2012) mukaan tensegrityn noin puolesta miljoonasta Google-osumasta – tämän opinnäytetyön kirjoittamisen hetkellä osumia oli noin miljoona – isolla osalla ei ole mitään tekemistä alkuperäisen tensegrityn kanssa. Toisaalta myöskään esimerkiksi Snelsonin X-Piece ei täytä kriteeriä siitä, että suorat tangot kelluvat toisistaan eristettynä ainoastaan vaijereihin kiinnitettynä. Eichenauerin ja Lordickin (2019) mukaan tensegrity-rakenteita voidaan luokitella niiden puhtauden perusteella. Puhtaimmat tensegrityt ovat rakenteita, joissa yksikään tanko ei kosketa toista ja systeemissä on ainoastaan lineaarisia komponentteja. Laajimmassa merkityksessään tensegrityksi voidaan kutsua mitä tahansa systeemiä, jossa puristusjännityksessä olevat komponentit pysyvät tasapainotilassa vetojännityksessä olevien komponenttien verkossa. Tensegrityn laajemmassa merkityksessä voidaan palata esimerkiksi Fullerin alkuperäiseen määritelmään ”puristusjännityksessä olevista saarekkeista vetojännityksen valtameressä” (Motro, 2003).

Motron (2003) mukaan minkä tahansa ilmalla täytetyn pneumaattisen rakenteen kuten ilmapallon tai jalkapallon voi luokitella tasapainossa olevaksi tensegrity-systeemiksi. Pallon sisään suljettu ilma edustaa systeemissä puristusjännityksessä olevaa komponenttia ja pallon kuori on vetojännityksessä. Motro (2003) käyttää pallo-analogiaa myös selkeyttääkseen tensegrity-systeemin hakeutumista tasapainotilaan. Kun pallossa on ilmaa vähemmän kuin sen tilavuuden verran, pallolla ei ole määriteltyä muotoa. Systeemi saavuttaa tasapainon, kun pallossa on sen tilavuuden verran ilmaa ja ilmanpaine on yhtä suuri pallon sisä- ja ulkopuolella. Pallo ei ole kuitenkaan jäykkä eikä siten stabiili. Vasta kun palloon puhalletaan lisää ilmaa sen kasvavan ilmanpaineen takia ulkokuoreen kohdistuva jännitys jäykistää rakenteen lopulliseen muotoonsa. Mitä täydempänä pallo on ilmaa, sitä vaikeampi sen muotoa on muuttaa ulkoisilla voimilla.

Samat kolme tilaa voidaan Motron (2003) analogian mukaan saavuttaa perinteisessä tensegrity-systeemissä lisäämällä tankojen pituutta. Jos tangot ovat tiettyä kriittistä mittaa lyhyempiä, systeemillä ei ole määrättyä muotoa vaan se muuttuu ulkoisten voimien mukaan. Kun tankojen pituus on saavuttanut kriittisen mitan suhteessa vaijerien pituuteen, saavutetaan itseistasapainoksi (self-equilibrium) kutsuttu tila, jossa systeemi asettuu määrättyyn muotoon

eivätkä sen komponentit ole rasituksen alaisena (Motro, 2003). Tämän konfiguraation etsiminen joko geometrisin tai laskennallisin menetelmin on tensegrity-rakenteiden perustavanlaatuinen suunnitteluhaaste, ja sitä kutsutaan muodon hakemiseksi (form-finding tai shape-finding) (Zhang & Ohsaki, 2015). Jos tankojen pituutta kasvatetaan edelleen, tankoihin alkaa kohdistua puristusjännitystä ja analogian mukaisesti ulkokuoren vaijerit kiristyvät vetojännityksestä. Tasapainotilaan verrattuna systeemi muuttaa muotoaan, mutta säilyttää yleiset ominaisuutensa. Systeemin kokoonpano on sitä hankalampaa, mitä pidemmäksi tankojen pituutta kasvatetaan tasapainotilan yli, mutta tämä rakenteeseen virittyvä esijännityksen määrä myös määrittelee rakenteen jäykkyyden ja kapasiteetin kestää kuormitusta.

3.2.3 Tensegrityn hyödyt ja haitat

Tensegrity-rakenteilla on useita ominaisuuksia, jotka tekevät niistä houkuttelevia monissa insinöörimäisissä sovelluksissa. Ne ovat keveitä, mekaanisesti kestäviä, energia- ja massatehokkaita, usein helposti siirrettäviä ja helposti käyttöönotettavia sekä kestävät suuria muodonmuutoksia vaurioitumatta (Pajunen, Johanns, Raj, Rimoli & Daraio, 2019). Tensegrity-rakenteissa enemmistö rakenteen osista on jatkuvassa vetojännityksessä olevia ohuita vaijereita ja puristusjännityksessä olevien bulkkirakenteiden määrä on minimoitu. Koska valtaosa rakenteen painosta tulee painavista puristusjännityksessä olevista komponenteista, saadaan aikaan äärimmäisen kevyitä ja ilmavia rakenteita. Lisäksi saavutetaan erinomainen hyötysuhde rakenteen keveyden ja lujuuden välillä (Williams, 2013). Rakenteet tulevat myös suhteellisesti sitä keveämmäksi ja tehokkaammiksi, mitä suurempia ne ovat (Porter, 2004).

Tensegrity-rakenteet ovat erityisen houkuttelevia ns. kevyessä rakentamisessa, joka tähtää mahdollisimman vähäiseen materiaalin käyttöön spesifiä tarkoitusta ajatellen. Kevyttä rakentamista voidaan hyödyntää, kun tarvitaan helposti ja nopeasti kuljetettavia ja kokoonpantavia rakenteita, esimerkiksi hätätilamajoituksiin katastrofialueilla. Maffein, Zanellin ja Beccarellin (2013) mukaan vetojännityksessä olevien vaijerien tehokkuus rakentamisessa perustuu siihen, että lujuus ei riipu niiden pituudesta vaan pelkästään materiaalin ominaisuuksista. Puristusjännityksen vallitessa pituuden kasvaessa komponentit taipuvat, jolloin pitää lisätä poikkipinta-alaa saman lujuuden saavuttamiseksi, ja seurauksena on paksuja ja painavia pylväitä. Tensegrity, jossa hyödynnetään pääosin vaijerien vetolujuusominaisuuksia, onkin kevyen rakentamisen näkökulmasta ylivoimainen menetelmä muihin rakentamisen tapoihin verrattuna.

Ingberin (1998) mukaan tensegrity-rakenteiden mekaaninen kestävyys ja vakaus ei ole niiden yksittäisten komponenttien lujuuden ansiota, vaan kuormitus tasapainottuu rakenteessa ja jakautuu koko rakenteen kannettavaksi. Tensegrity-rakenteeseen kohdistuvat kuormat jakautuvat rakenteen yli siten, että yhteen osaan kohdistuva vetojännitys lisää vetojännitystä

myös kaikissa muissa osissa. Globaalin vetojännityksen lisääntyessä rakenne tasapainottaa itsensä lisäämällä vastaavasti puristusjännitystä sitä kantavissa osissa.

Tensegrity-rakenteet ovat monilta ominaisuuksiltaan ylivoimaisia perinteisiin tankorakenteisiin (truss) verrattuna. Lisäksi niillä voidaan luoda henkeäsalpaavan hienoja ilmassa leijuvien rakenteiden rykelmiä. Lukuisten edullisten ominaisuuksien perusteella voisi kuvitella, että tensegrity-rakenteet olisivat rakentamisessa arkipäivää, mutta niillä on myös omat haittapuolensa. Tensegrity on myös suhteellisen uutena rakennusperiaatteena melko tuntematon, ja siksi tietoisuus sen fysiikasta ja mekanismeista ei ole levinnyt kovin laajalle insinöörien ja arkkitehtien keskuudessa (Gómez Jáuregui, 2004). Tensegrityn sovellukset ovat kuitenkin Ganin (2020) mukaan lisääntyneet viime vuosikymmeninä myös yhdyskuntarakentamisessa ja arkkitehtuurissa.

Tensegrityn suurin haittapuoli rakentamisen kannalta on sama, joka myös tekee tensegrity-rakenteista niin näyttäviä: epäjatkuva puristusjännitys. Tensegritylle tyypillinen ominaisuus on epäjatkuva bulkkirakenne, ja sen takia tasojen kuten julkisivujen päällysteiden tai lattialaatoitusten rakentaminen tensegrity-menetelmin on vaikeaa (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011). Rakentamisen näkökulmasta tensegrity-rakenteet tuppaavat olemaan liian joustavia ja lisäksi niiden visuaalinen kiinnostavuus vähenee, kun niitä sovelletaan raskaisiin rakennusprojekteihin (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011). Rakentamisessa tensegrity soveltuu siis lähinnä sellaisiin erityiskohteisiin, joissa vaaditaan äärimmäistä keveyttä ja kestävyyttä.

Oma lukunsa on tensegrity-rakenteiden valmistaminen ja kokoonpano, joka on Gómez Jáureguin (2004) mukaan oma taiteen- ja tieteenlajinsa. Kokoonpano on hankalaa, koska tankojen ja vaijereiden liikuttaminen liikuttaa aina muita komponentteja (Gan, 2020). Tensegrity-rakenteiden tasapainotila perustuu koko systeemin kattavaan kovaan esijännitykseen (Sandaker, Eggen & Cruvellier, 2011) ja kun kokoonpano tehdään onnistuneesti, rakenne ikään kuin hakeutuu automaattisesti oikeaan muotoonsa.

3.3 Tensegrityn sovellukset

Tensegrityn alkuperä linkittyy vahvasti taiteen maailmaan ja Kenneth Snelsonin kokeiluihin. Universaalina ilmiönä tensegrity paitsi näyttäisi toimivan rakentumisperiaatteena lukuisille luonnollisille rakenteille, se on alkanut löytää sovelluksia laajalti myös muilta aloilta kuin taiteesta. Tensegrity-rakenteita on käytetty insinööritieteiden ja arkkitehtuurin lisäksi myös arkipäiväisissä esineissä kuten leluissa ja huonekaluissa. Tensegrityä sovelletaan nykyään myös matematiikan ja biolääketieteen tutkimuksessa, robotiikassa ja avaruustekniikassa (Zhang & Ohsaki, 2015). Tässä kappaleessa tutustutaan tarkemmin tensegrityn sovelluskohteisiin muutamilla edellä mainituilla alueilla.

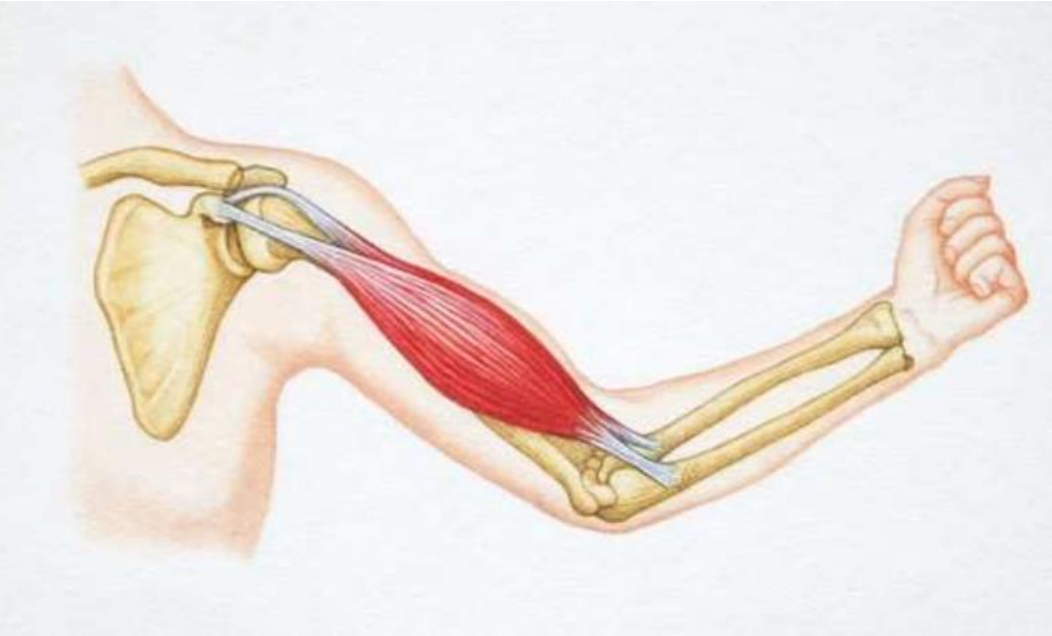
3.3.1 Tensegrity luonnossa ja biologiassa

Fullerin mielestä tensegrityssä oli kyse jostain universaalimmasta, koko maailmankaikkeutta ohjaavasta kosmisesta laista. Hän oli vakuuttunut, että koko maailmankaikkeus mikrokosmoksesta makrokosmokseen, atomeista aurinkokuntiin rakentuisi tensegrityn periaatteiden varaan. Taivaankappaleiden välisessä näkymättömässä vetovoimassa olisi näin ollen kyse pitkän ja äärettömän ohuen elementin vetojännityksestä. Fullerin mukaan myös atomien ja hiukkasten välisessä keskinäisessä vuorovaikutuksessa oli kyse toisenlaisesta tensegritystä. (Gómez Jáuregui, 2004.)

Ainakin solubiologian pioneerin Donald Ingberin tutkimus puoltaa osittain Fullerin käsitystä, sillä hän julistaa artikkelissaan Architecture of Life (1998), että tensegrityn periaatteet pätevät olennaisesti ihmiskehon kaikissa mittakaavoissa. Ingber on omaksunut Fullerin käsityksen, jonka mukaan tensegrityssä on kyse universaaleista säännöistä, jotka ohjaavat solujen rakentumista nanomittakaavassa. Ingberin mukaan samat periaatteet näyttävät ohjaavan orgaanisten rakenteiden muodostumista aina yksinkertaisista hiiliyhdisteistä, proteiineista ja viruksista monimutkaisiin soluihin ja kudoksiin, jopa ihmisiin ja muihin eläviin olentoihin. Tässä yhteydessä tensegrityllä viitataan systeemeihin, jotka tasapainottavat itsensä mekaanisesti jakamalla puristus- ja vetojännitykset rakenteessa.

Ingberin (1998) mukaan tensegrityllä voidaan saavuttaa mahdollisimman suuri mekaaninen kestävyys tietylle määrälle rakennusainetta. Koska tensegrity on kaikkein taloudellisin ja energiatehokkain tapa rakentaa, ei ole Ingberin mukaan yllättävää, että se on myös luonnon suosima rakennustapa. Ingber arvioi, että tensegrity-rakenteiden joustavuus on myös ollut evoluution kannalta hyödyllistä, sillä se on mahdollistanut rakenteiden nopean muodonmuutoksen ympäristön muutosten seurauksena. On osoitettu, että solujen reagointia ympäristön vaikutuksen alaisena voidaan tulkita ja ennustaa tensegrity-mallien avulla (Zhang & Ohsaki, 2015).

Ihmiskehon mikroskaalassa proteiinit ja muut avainasemassa olevat molekyylit tasapainottavat itsensä tensegrityn periaatteiden avulla. Soluissa vetojännitys aiheutuu pääosin aktiini-myosiini -proteiiniyhdistelmän supistumisesta ja puristusjännitys syntyy solutukirangan mikroputkissa ja substraateissa, joihin solut kiinnittyvät (Davies, 2016). Makroskaalassa ihmisen tuki- ja liikuntaelimistöä voidaan pitää tensegrity-mallina (kuva 9). Luut vastustavat painovoimaa ja lihakset, lihaksiin kiinnittyvät jänteet ja luihin kiinnittyvät nivelsiteet muodostavat verkoston, joka stabiloi systeemin ja säätelee luiden liikkeitä. Toisin sanoen kehon tensegrity-rakenteessa luut ovat jäykkiä puristusjännityksessä olevia komponentteja ja lihakset, jänteet ja nivelsiteet ovat vetojännityksessä. (Ingber, 1998.) Tensegrity-rakenne mahdollistaa ihmiskehossa nopean muodonmuutoksen, esimerkiksi siirtymän istumisesta seisomiseen (Davies, 2016).

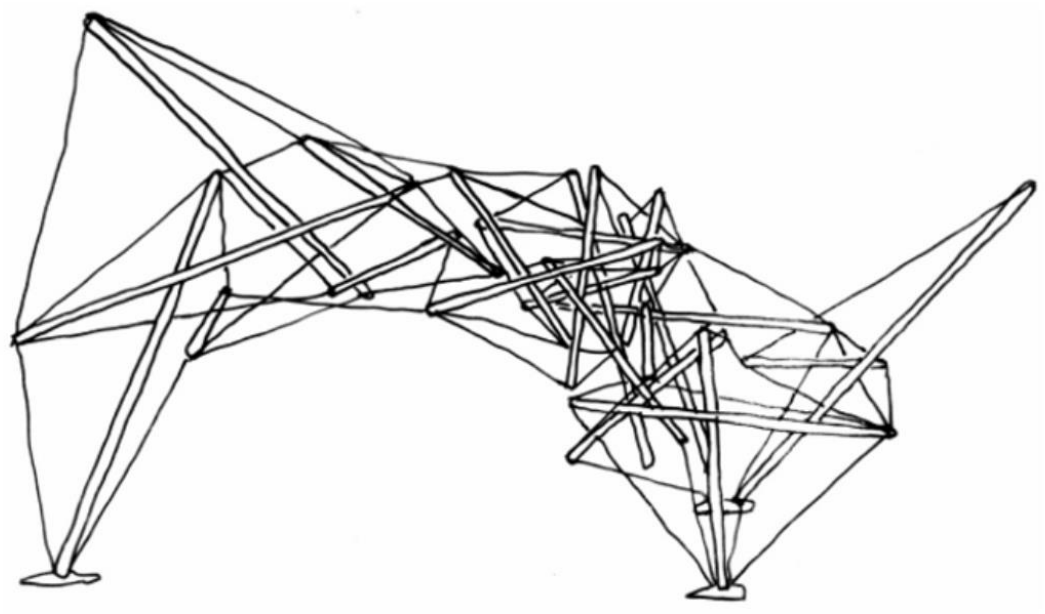


Kuva 9. Ihmisen luusto ja lihaksisto muodostavat tensegrity-systeemin, jossa luut kannattelevat puristuskuormaa ja jänteet tasapainottavat lihaksiston liikkeitä (Skelton & Oliveira, 2009).

3.3.2 Tensegrity taiteessa

Tensegrity-rakenteilla voidaan saavuttaa erityisesti kuvanveiston ja taiteen kannalta kiehtovia sommitelmia, joiden kiinnostavuus perustuu epätavalliseen jännitysten jakautumiseen. Ihmisen silmä on tottunut painovoiman vaikutukseen ja rakenteiden jatkuvuuteen, mutta tensegrity-rakenteiden leijuvat tangot näyttävät uhmaavan painovoiman lakeja. Kuvanveistossa ja taiteessa nämä tensegrityn ainutlaatuiset ja dramaattiset ominaisuudet pääsevät kenties parhaiten esiin.

Kenneth Snelson (1927–2016) raivasi veistoksillaan ja luonnoksillaan tietä tensegrity-konseptin kehitykselle ja hän lienee yhä merkittävin tensegrityn parissa työskennellyt taiteilija. Olennaista Snelsonin ajattelussa oli rakenteellinen vapaus, joka seurasi veto- ja puristusjännityksen erottamisesta (Glass, 2008). Siinä missä Needle Tower (1968) ja Rainbow Arch (2001) edustavat säännöllistä arkkitehtuuria, Free Ride Home (1974) ja Easy Landing (1977) ovat esimerkkejä vapaammasta ja abstraktimmasta muotokielestä (kuvat 10 ja 11). Huomionarvoista Snelsonin teoksissa on suuri mittakaava ja mahdollisuus soveltaa niitä suoraan arkkitehtuuriin, sillä monet teokset muistuttavat torneja, kaareutuvia siltoja tai holvikaaria.



Kuva 10. Kenneth Snelsonin Free Ride Home (Snelson, 1974).

Kuva 11. Kenneth Snelsonin Easy Landing (Snelson, 1977).

Snelson oli kuitenkin itse hyvin skeptinen tensegrityn käytännön mahdollisuuksista ja piti rakenteita epäkäytännöllisenä missä tahansa insinöörimäisessä rakentamisessa. Hän perusti näkemyksensä sille, että rakenteet ovat liian joustavia ja vielä kymmenien vuosien tutkimuksen jälkeenkin tensegrityn hyödyt rakentamisessa olivat yhä olemattomat. Snelson itse pysyi uskollisena tensegrityn esteettiselle ja taiteelliselle puolelle, ja vältti syvempää ilmiön matematiikan tai fysiikan pohdintaa. Tämä mahdollisti muotojen vapaan tutkiskelun ilman insinöörimäisiä kahleita, ja hän kehitti myös vuosien varrella hyvin tarkkaan hiotun tekniikan teostensa valmistamiseen. (Gómez Jáuregui, 2004.)

Skelton ja Oliveira (2009) nostavat esiin seikan, joka on heidän mielestään jarruttanut tensegrity-konseptin kehitystä. Tensegrity on peräisin taiteen maailmasta, jossa ei ole tarvinnut välittää rakenteiden käytännön hyödyistä tai mekaanisista ominaisuuksista. Taiteilijoilla on ollut vapaus kokeilla ja inspiroitua ilman insinöörimäistä arviointia, mikä on johtanut luovuuteen ja innovaatioihin. Toisaalta taideteosten käytännön hyöty on ollut vähäinen, eivätkä rakenteet ole mekaanisesti tarpeeksi kestäviä insinöörien tarpeisiin. Tämä lähtökohta ja analyysityökalujen puute on Skeltonin ja Oliveiran mukaan johtanut siihen, että tensegrity-konseptit eivät ole saavuttaneet ansaitsemaansa paikkaa insinöörien suunnittelemissa rakenteissa.

3.3.3 Tensegrity rakennesuunnittelussa ja arkkitehtuurissa

Tensegrity-rakenteilla on erityislaatuisten ominaisuuksiensa takia suuri potentiaali rakentamisessa ja arkkitehtuurissa, mutta toistaiseksi sitä on hyödynnetty vielä rajallisesti. Haasteet liittyvät Gruberin (2011) mukaan siihen, että rakenteiden kokoonpano on monimutkaista ja esijännityksien ollessa suuria yksittäisen rakenteen pettäminen aiheuttaa koko rakenteen romahtamisen. Turvallisuusseikkojen lisäksi edellä mainituista syistä se soveltuu vain tietynlaisiin kohteisiin. Tensegrityä on hyödynnetty jo olemassa olevista rakenteista esimerkiksi kupoleissa, katoissa, kaariholveissa, teltoissa, paviljongeissa ja silloissa.

Tensegrityn käytön odotetaan kasvavan arkkitehtuurissa dramaattisesti, kun suunnittelutyökalut paranevat ja materiaalikustannukset lisääntyvät. Tensegrityä voidaan hyödyntää rakennuksissa samaan tapaan kuin luonnossa rakenteissa, joissa vaaditaan suuria kontrolloituja muutoksia. Mukautuvilla tensegrity-rakenteilla voidaan esimerkiksi kontrolloida rakennuksen vastaanottaman aurinkoenergian määrää, tehdä niistä energiatehokkaampia ja sopeutuvampia ulkoisia tapahtumia, kuten maanjäristystä tai tuulta kohtaan. Kokoontaittuvien (deployable) tensegrity-rakenteiden suunnittelu on ollut kovan kiinnostuksen kohteena. Kokoontaittuvaa tensegrityä voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusten pystytyksessä, kun vaaditaan helppoa kuljetettavuutta ja nopeaa käyttöönottoa. Tällaiset rakenteet ovat omiaan tiputettavaksi katastrofialueille kenttäsairaaloiksi tai tarjoamaan asutusta kehittyvin maihin. (Skelton & Oliveira, 2009.)

Tavallisessa yhdyskuntarakentamisessa tensegrity-esimerkit ovat hyvin harvassa ja niitä on käytetty lähinnä kokeellisemmissa väliaikaisissa projekteissa, mutta myös pysyvissä erikoisratkaisuissa kuten olympiastadioneissa. Kirjallisuudessa mainitaan usein esimerkkinä Brisbanessa sijaitseva vuonna 2009 auennut Kurilpa-silta (kuva 12), jonka sanotaan olevan vaikuttavin suuressa mittakaavassa toteutettu tensegrity-rakenne (Kemp, 2016). Kurilpa-sillan kävelykansi roikkuu horisontaalisten parrujen varassa, jotka puolestaan linkittyvät vaijereilla diagonaalisiin mastoihin. Tämän verkon sisällä on pienempi tensegrity-rakenne, joka kannattelee kävelykannen päällä olevaa katosta. Rakenteessa on ylimääräisillä vaijereilla

huolehdittu siitä, että yhden rakenteen pettäminen ei johda katastrofaaliseen romahdukseen (Kemp, 2016).

Kuva 10. Kurilpa-silta (Jones, 2011).

Usein mainitaan esimerkkinä tensegritystä myös vuoden 1988 Soulin olympialaisiin valmistuneen voimistelustadionin vaijerikupoli. Fun (2015) mukaan sitä ei voi kuitenkaan pitää tensegrity-systeeminä, koska uloin puristusjännityksessä oleva rengas ei rajaudu Motron määritelmän mukaisesti vaijeriverkoston sisäpuolelle. Matthys Levy paranteli Geigerin suunnitelmaa vuoden 1992 Atlantan olympialaisiin ja rakensi Georgia Domen, jonka kupolia pidetään maailman ensimmäisenä tensegrity-kupolina (Fu, 2015).

3.3.4 Tensegrity kalustesuunnittelussa

Koska tensegrity on kalustesuunnittelussa vielä kuriositeetti, aiheesta ei löydy tieteellistä tekstiä. Ainoastaan Gómes Jáurequi (2004) väitöskirjassaan esittää muutamia esimerkkejä tensegrity-huonekaluista listatessaan erilaisia sovelluskohteita. Itse tensegrity-rakenteiden suunnittelusta ja kokoamisesta ei löydy juurikaan käytännön ohjeita, vaan jopa tensegrityn ”käytännön suunnitteluun” liittyvien kirjojen sisältö uppoutuu nopeasti todella matemaattiseksi ja teoreettiseksi.

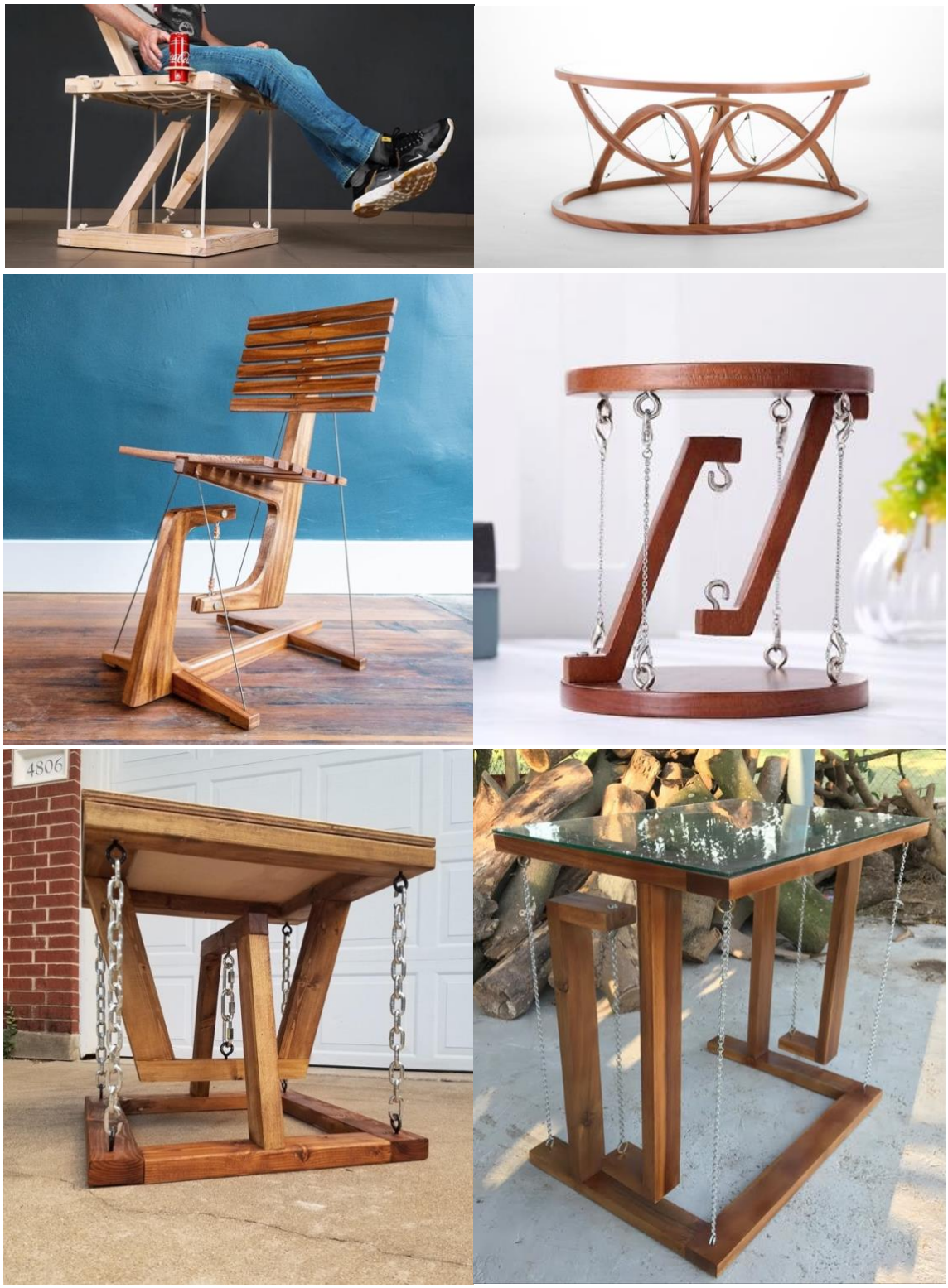
Lisäksi jo valmistetut kalusteet ovat lähempänä taiteellisia konseptikokeiluita ja yksittäisiä prototyyppejä kuin valmiita tuotteita. Niihin voisi kuvitella törmäävänsä ennemmin taidegalleriassa tai nykytaiteen museossa kuin huonekalukaupassa. Ongelma tensegrityä hyödyntävissä kalusteissa on, että ne jäävät helposti kuriositeeteiksi, sillä ne ovat ennemminkin suunnittelijan hupikokeiluja kuin todellisia innovaatioita. Tuotteet eivät ole funktionaalisia vaan usein epämukavia ja kömpelöitä ja lähinnä niihin liittyy visuaalisesti yllättävä puoli.

Tekemäni tutkimuksen perusteella tensegrity-huonekalut voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri kategoriaan. Kategorisointi ei missään nimessä ole aukoton, ja on olemassa esimerkkejä, jotka on hyvin vaikea sijoittaa mihinkään tiettyyn kategoriaan. Jäsentäminen auttaa kuitenkin selittämään rakenteiden eroavaisuuksia.

1. **Leijumisilluusioon perustuvat huonekalut**

   Vahvasti leijumisilluusiota hyödyntävät tensegrity-huonekalut ovat tutuin kategoria, sillä nämä ”mahdottomat” pöydät ja tuolit valtasivat Youtuben vuonna 2020. Rakenne perustuu kehikkoon, jossa vaijerien kiristyessä ulkokehällä alaosa vetää yläosaa alaspäin ja keskellä alaosa vetää yläosaa ylöspäin (kuva 13). Kun nämä jännitykset saadaan tasapainoon riittävän esikiristyksen avulla, saavutetaan illuusio leijumisesta, koska ulkokehällä on vaijereita vähäinen määrä.

   Halutessaan kategorian voisi ryhmitellä moneen eri alakategoriaan sen perusteella, miten alaosa kannattelee yläosaa. Ratkaisuja sille miten ylä- ja alaosan saa osumaan kohdakkain on mitä kekseliäämpiä, mutta kaikki ratkaisut perustuvat olennaisesti saman idean eri variaatioihin. Suurin osa designeista perustuu jonkinlaiseen jatkeeseen tai kaarimaisiin rakenteisiin, jotka menevät toistensa läpi. Mielestäni leijumisilluusio on helpointa saavuttaa silloin, kun rakenteet eivät mistään näkökulmasta osu kohdakkain. Esimerkiksi kuvan 13 oikean yläkulman ratkaisussa on vaikea hahmottaa leijumista, koska visuaalisesti osat näyttävät nopeasti katsottuna olevan ”yhtä puuta”.



Kuva 11. Muutamia esimerkkejä kategorian 1 eri variaatioista (The Q, 2020; Lin, 2017; Malecki, 2020; Ebay, 2021; https://i.redd.it/dx1esbqe4jc51.jpg, ei pvm; H Carpenter, 2020).

2. Aitoa tensegrityä jäljittelevät huonekalut

Aidolla tensegrityllä tarkoitan tässä yhteydessä aidon tensegrityn määritelmän täyttävää tanko-vaijeri -rakennetta, jossa tangot ovat suoria eivätkä kosketa toisiaan. Tähän kategoriaan kelpuutan varauksella myös kalusteita, jotka eivät täysin täytä aidon tensegrityn kriteerejä; olennaista on aidon tensegrityn tietoinen jäljittely (kuva 14). Mainittakoon myös, että kalusteet itsessään eivät yleensä täytä aidon tensegrityn määritelmää, koska tensegrity-rakenne on vain osa muuta rakennetta. Jos tuolin tai pöydän jalkana on aito tensegrity-rakenne, tarvitaan silti rakenteeseen kiinnitetty kiinteä kappale pöydän tai istumisen tasoksi.

Kuva 12. Esimerkkejä kategorian 2 kalusteista (Yberg, ei pvm; Waddell, 1972; Bilbija & Nikolic, 2012; Koenic, ei pvm; Bartosik, ei pvm).

3. Muut

Tähän kategoriaan sijoittaisin ne kalusteet, jotka eivät täysin sovellu kumpaankaan edellä mainittuun ryhmään. Yleensä näissä rakenteissa on käytetty vetojännitystä joko olennaisena rakenteellisena osana tai stabiloimaan rakennetta (kuva 15), mutta rakenne on hyvin usein kaukana oikeasta tensegritystä.

Kuva 13. Esimerkkejä kategorian 3 kalusteista (Flemons, ei pvm; de Chirico, 2019; Yang, 2019).

Analysoin tensegrity-huonekaluja vielä muutaman case-esimerkin kautta. Taiteilija ja muotoilija Robby Cuthbert käyttää termiä tensegrity hyvin vapaasti teoksissaan, jotka ovat huomattavasti kauniimpia kuin DIY-videoiden esimerkeissä. Vaikka teoksissa on selvästi pyritty tavoittelemaan leijumisilluusiota, voi kyseenalaistaa perustuvatko rakenteet kuitenkin rakenteen roikottamiselle vaijerien varassa painovoiman avulla (kuva 16). Selvää on kuitenkin se, että esikiristämällä vaijerit tensegrityn kaltaisella lähestymistavalla on saavutettu kalusteissa nähty

rakenteellinen kestävyys. Enemmän veistosta kuin käyttöesinettä muistuttavissa kalusteissa puuosat erotetaan toisistaan teräsvaijereiden verkolla, joka itsessään muodostaa kauniita matemaattisia muotoja hakeutuessaan määrättyihin kaareviin pinnanmuotoihin. Esimerkiksi Cuthbertin lepotuoli ei ole kuitenkaan kovin käytännöllinen ja teräsvaijereiden funktio jää esteettiseksi, ilman syvempää tarkoitusta muodossa.

Kuva 14. Robby Cuthbertin suunnittelema lepotuoli ja pöydän jalka (Cuthbert, 2011; Cuthbert, 2012).

Konstantin Achkovin tensegrity-tuolit ovat malliesimerkki siitä, että tensegrityllä voidaan kyllä tuoda kalustesuunnitteluun mielenkiintoisia visuaalisia ulottuvuuksia, mutta kiristettyjen vaijereiden tuoma käytännön hyöty jää pinnalliseksi. Klassisen tuolin muotokieli rikkoutuu helposti siihen kuulumattomien köysielementtien takia. Venetsian biennaalissa 2021 esitetyt tuolit (kuva 17) tähtäävät niiden suunnittelijan mukaan erityiseen mukautuvuuteen tuoliin istujan painon ja liikkeiden perusteella, mutta niiden ergonomiaa ja istumisen mukavuutta on vaikea arvioida valokuvien kautta. Vasemmanpuolisessa tuolissa takajalkojen korvaaminen kiristetyillä köysillä saa suunnittelijan mukaan aikaan jousimaisen vasteen istumiseen. Oikeanpuoleisessa tuolissa diagonaalinen tuki on katkaistu leijumisen optisen illuusion aikaansaamiseksi ja istumisen tuntuma muistuttaa suunnittelijan mukaan keinutuolia.

Kuva 15. Konstantin Achkovin suunnittelemia tuoleja (Achkov, 2021).

4 PRODUKTIO: KALUSTEKONSEPTIN KEHITYS

Opinnäytetyön jälkimmäisessä osuudessa otan konkreettiseen käyttöön sitä teoriaosaamista, jota olen hankkinut edellä esitetystä kirjallisuuskatsauksesta. Tässä osiossa kuvaan prosessia, jossa ideoin, suunnittelen ja toteutan tensegrity-periaatteeseen perustuvan kalusteen.

4.1 Suunnitteluprosessi

4.1.1 Lähtökohta ja tavoitteet

Alusta alkaen minulle oli selkeää, että haluan toteuttaa perinteisen kalusteen, joko tuolin tai pöydän. Sama perusmuoto voisi toimia sekä jakkarana että pöytänä, joten ideointivaiheessa ei tarvinnut välttämättä tehdä eroa näiden kahden välillä. Itse asiassa jakkaramainen matala istuin toimisi sellaisenaan erinomaisesti myös esimerkiksi sivupöytänä. Sen sijaan lopullisessa toteutuksessa ero tulisi olemaan hyvinkin suuri riippuen sovelluksesta. Siinä missä sivupöydän pitäisi kestää muutamien kilojen tai muutamien kymmenien kilojen paino, istuimen pitäisi kestää yli sadan kilon kuorman lisäksi siihen kohdistuvia eri suuntaisia vääntöjä ja rotaatiota. Näin ollen oli selkeää, että istuimen suunnittelu on huomattavasti haastavampi, mutta kenties siten myös antoisampi projekti.

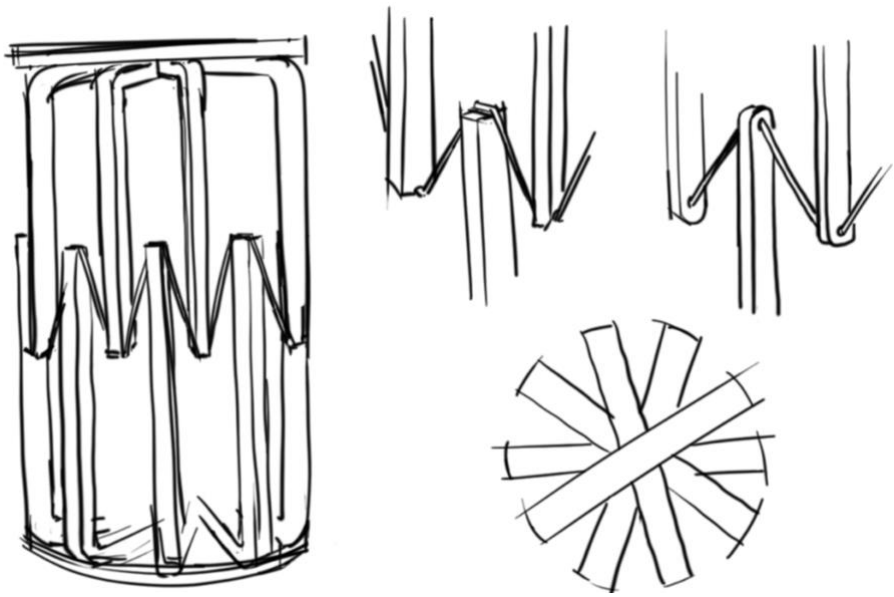
On ikävää huomata, että suurin osa tensegrity-huonekaluista ei täytä lähellekään aidon tensegrityn määritelmää. Kuitenkin tensegrity-huonekaluiksi tunnistetaan parhaiten nimenomaan nämä kategorian 1 leijumisilluusioon perustuvat kalusteet. Haluankin suunnitella tensegrity-huonekalun siinä merkityksessä kuin se parhaiten tunnetaan, vaikka sillä ei olisikaan tekemistä aidon tensegrityn kanssa. Tähtään siis suunnitelmassani leijumisilluusioon, mutta en erityisemmin pyri siihen, että yläosa näyttäisi leijuvan ilmassa, kuten kuvan 2 malleissa.

Kuten olen edellä avannut opinnäytetyöni motiiveja, tarkoituksenani on paitsi tutkia tensegrity-periaatteen estetiikkaa kalustesuunnittelussa, myös kehittää esteettisesti korkealaatuinen kaluste. Tämä tarkoittaa tensegrity-huonekalun tapauksessa mielestäni sitä, että siihen vääjäämättömästi liittyvä vaijeri- tai köysirakenne muodostaa myös perustellun, visuaalisesti kiinnostavan kokonaisuuden. Ylipäätään kalusteen materiaaleihin, rakenteeseen tai muotokieleen liittyvät valinnat pitäisi olla perusteltuja ja kauneuden syntyä osittain siitä, miten funktio ja tensegrity-periaate ohjaavat muotoa. Koska olen muotoilijana erityisen innostunut skandinaavisen vaalean puumateriaalin soveltamisesta nykyaikaiseen kalustemuotoiluun, halusin päästä tekemään kalusteen pääosin puusta. Ensisijaisesti myös lähdin luonnostelemaan alustavia konsepteja tämä materiaali mielessäni.

4.1.2 Konseptien ideointi ja luonnostelu

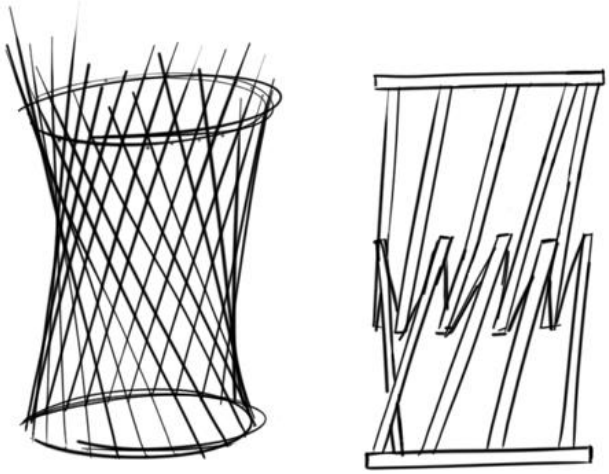
Lähdin aluksi luonnostelemaan hyvin laajalti erilaisia tensegrity-periaatteeseen perustuvia rakenteita; sekä leijumisilluusioon perustuvia että vapaammin aihetta mukailevia konsepteja. Koska leijumisilluusioon perustuvat tensegrity-huonekalut vaikuttivat kaikki perustuvan samaan perusideaan, pyrin ensin saamaan siitä konseptuaalisen käsityksen, ja miettimään voisinko ratkaista saman asian jollain uudella tavalla. Oikeastaan kaikki ideat redusoituivat kuitenkin samaan ajatukseen: tavalla tai toisella alaosa pitää saada ulotettua yläosan yläpuolelle, jotta ”yläosaa voi roikottaa alaosasta”. Tämä on suunnittelun periaatteena niin absurdi, että se vaati erityistä aivotyötä eikä silti aina tuntunut pysyvän mielessä.

Ensimmäisessä konseptiaihiossani oli taustalla ajatus kaksiosaisesta jakkarasta, jota voisi käyttää kahdella eri tavalla: joko kahtena erillisenä matalana jakkarana tai yhtenä korkeana baarijakkarana (kuva 18). Hieman Aalto-jakkaran muotoa mukailevan istuimen jalat menisivät limittäin toisen, ylösalaisin olevan jakkaran kanssa, ja jonkinlainen köysimekanismi pitäisi osat tietyllä etäisyydellä toisistaan. Ajatusta ohjasi vahvasti myös opinnäytetyön kalusteprojektin työnimi ”Ten Segrity”: jakkaralla olisi tietysti kymmenen jalkaa. Ensisijaisena ajatuksena oli, että jakkara ei tarvitsisi erillistä istuinosaa, vaan taivutetut jalat kytkeytyisivät keskeltä toisiinsa ja muodostaisivat riittävän yhtenäisen alustan istumiselle. Tämä olisi luultavasti mahdollista saavuttaa esimerkiksi Aalto-jakkaran tyyppisillä jalanpaksuuksilla. Ongelmana tässä konseptissa on kuitenkin se, että siinä ei ole kyse tensegritystä vaan yläosa on vain ripustettu vetojännityksessä olevien köysien varaan. Lisäksi koin hankalana ajatuksena sen, että köysi olisi joko täysin irrallinen osa tai se jäisi kiinni toiseen jakkaraan silloin kun ne irrotetaan toisistaan. Koin tässä siis kiinnostavan aihion ehkä jollekin toiselle kalusteprojektille, mutta tensegrity-teemaan se ei oikein soveltunut.



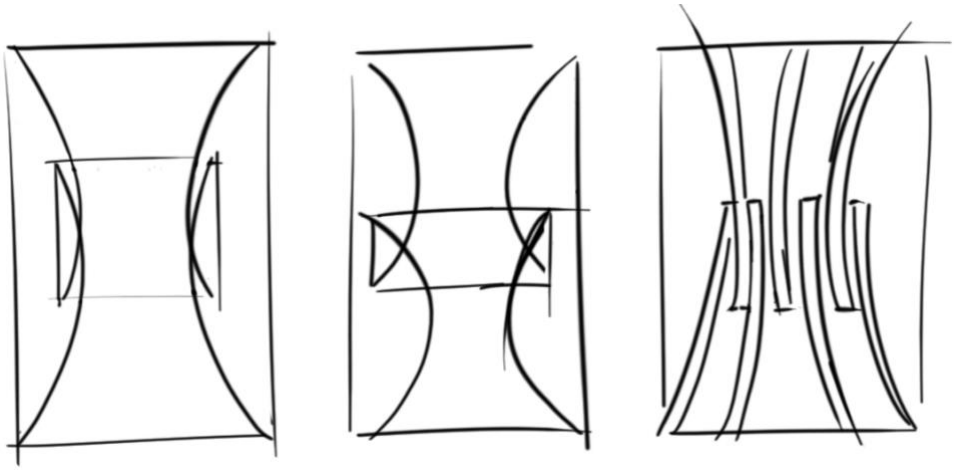
Kuva 16. Konsepti 1.

Pohdin myös ajatusta, jossa sama perusmuoto voisi toimia ”kierteisenä” siten, että tankojen määrästä riippuen muodostuisi joko prismamainen rakenne tai hyperboloidinen määrätty pinta (kuva 19). Ajatuksena oli replikoida tensegrity-hyperboloideja, mutta en tullut ajatelleeksi, että kyseessä on perustavanlaatuisesti eri tilanne, jos tangot katkaistaan keskeltä ja niiden välille liitetään kiristävä köysi. Tällöin ei auta, vaikka ulkokehälle lisäisi tasapainottavia köysiä, sillä keskiosa pääsisi todennäköisesti hakeutumaan muotoon, jossa koko rakenne romahtaa kasaan.



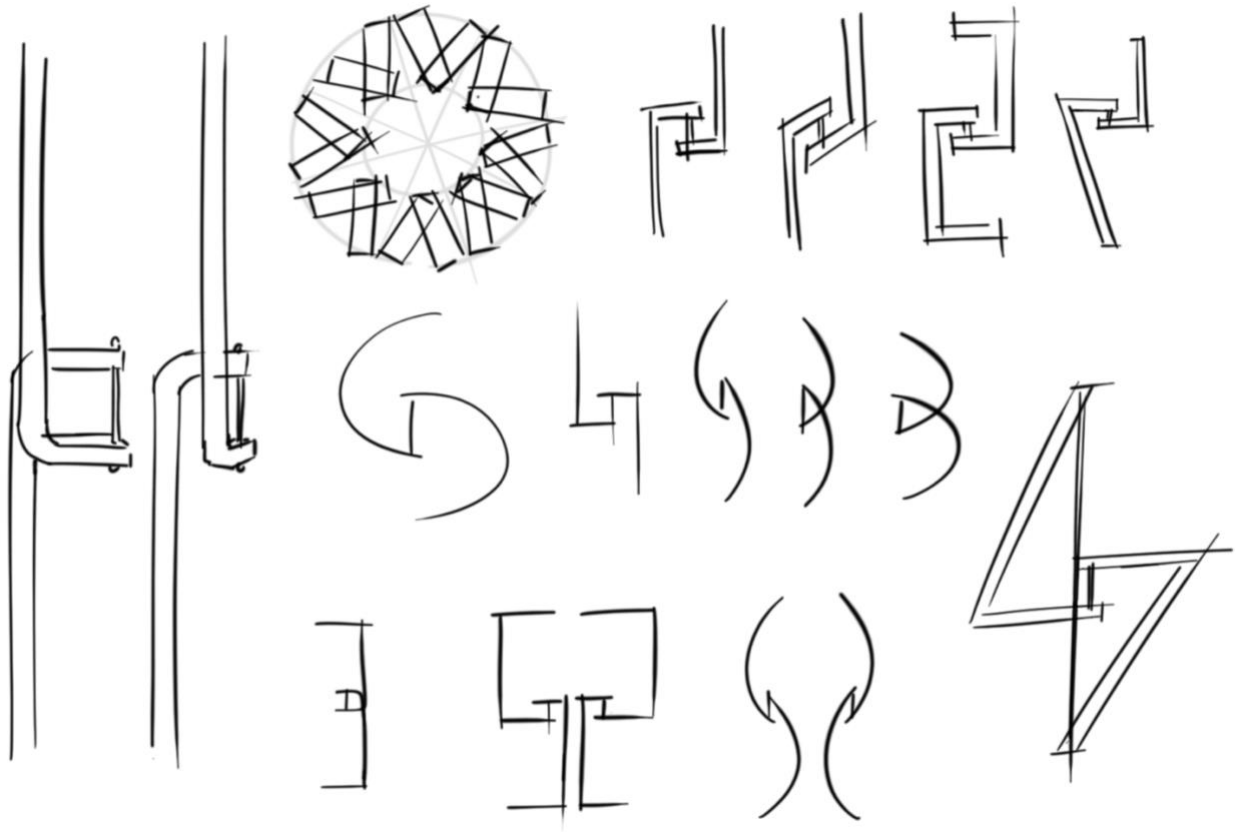
Kuva 17. Konsepti 2.

Kolmannen konseptin kohdalla aloin tiedostaa, että tavalla tai toisella alaosa on saatava yläosan yläpuolelle. Luonnoksissa on ääriviivoilla haettu muotoa sienimäisestä jakkarasta, joka koostuu kahdesta identtisestä, toistensa suhteen ylösalaisin olevasta osasta (kuva 20). Tässä konseptissa sattui samanlainen ajatusvirhe kuin edellisessä, eikä se toimi sillä tavalla kuin olin sen ajatellut. Jos ulkokehälle lisätään köysiä, ne pakottavat rakenteen eri muotoon ja se romahtaa. Yläosaan pitäisi lisätä joku kappaleet yhteen kokoava elementti, esimerkiksi istuinalusta, mutta tällöin ulkokehän köysillä ei ole mitään virkaa. Tästä seuraa sama ongelma kuin ensimmäisessä konseptissa, yläosa makaa köysien varassa eikä voida puhua tensegrity-rakenteesta.



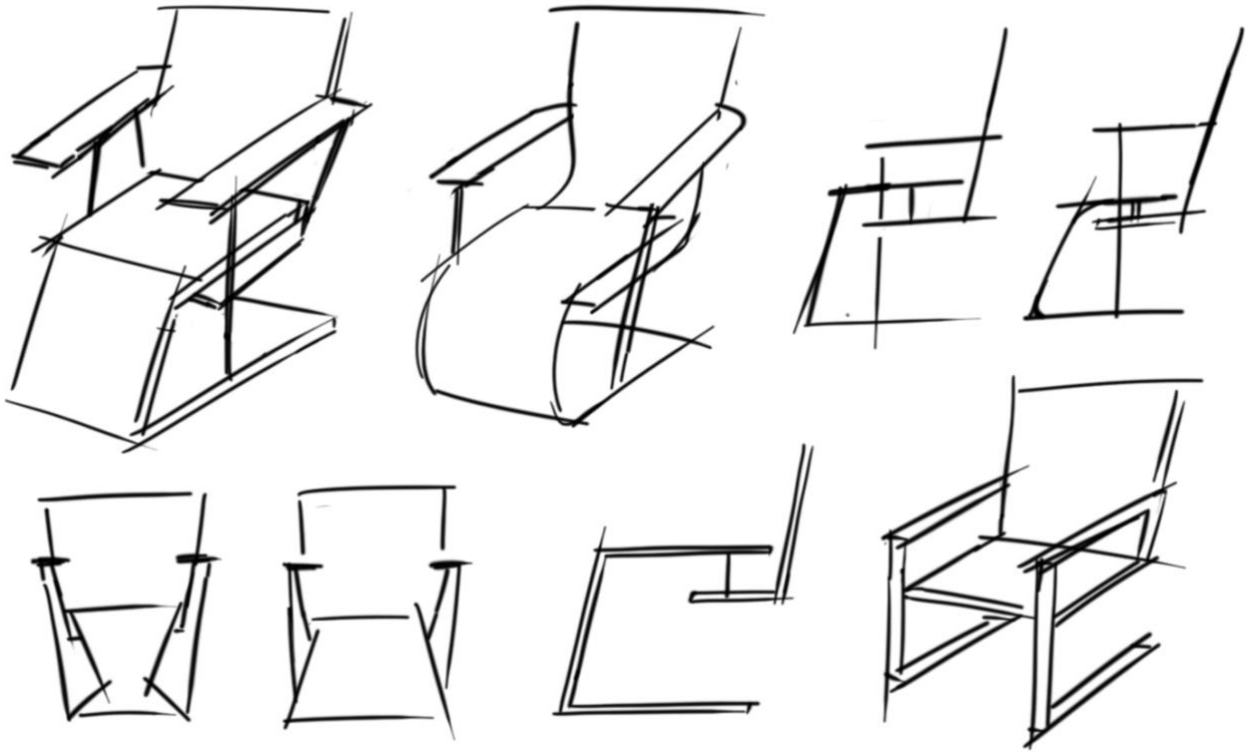
Kuva 18. Konsepti 3.

Sama ajatteluvirhe toistuu isossa osassa luonnoksistani. Hahmottelin erilaisia ratkaisuja kappaleista, joita rotatoimalla voisi saada aikaan mielenkiintoisen pyörähdyskappaleen (kuva 21). En kuitenkaan osannut tiedostaa, että mikään näistä muodoista ei toimi tensegrity-rakenteessa. Tämä toimi hyvänä muistutuksena siitä, että suunnitellessa rakennetta, joka ei toimi täysin arkijärjen mukaan, on vaikea hahmottaa miten kappale tulisi käyttäytymään todellisuudessa. Tämän takia konseptien toimivuus olisi hyvä varmistaa hahmomalleilla hyvin aikaisessa vaiheessa. Tensegrity-rakenteissa tämä on kuitenkin erityisen työlästä, sillä se vaatii erikseen kappaleiden valmistamisen, narujen virittämisen sekä hankalan kokoonpanon.



Kuva 19. Pyörähdyskappaleen muodon hakemista.

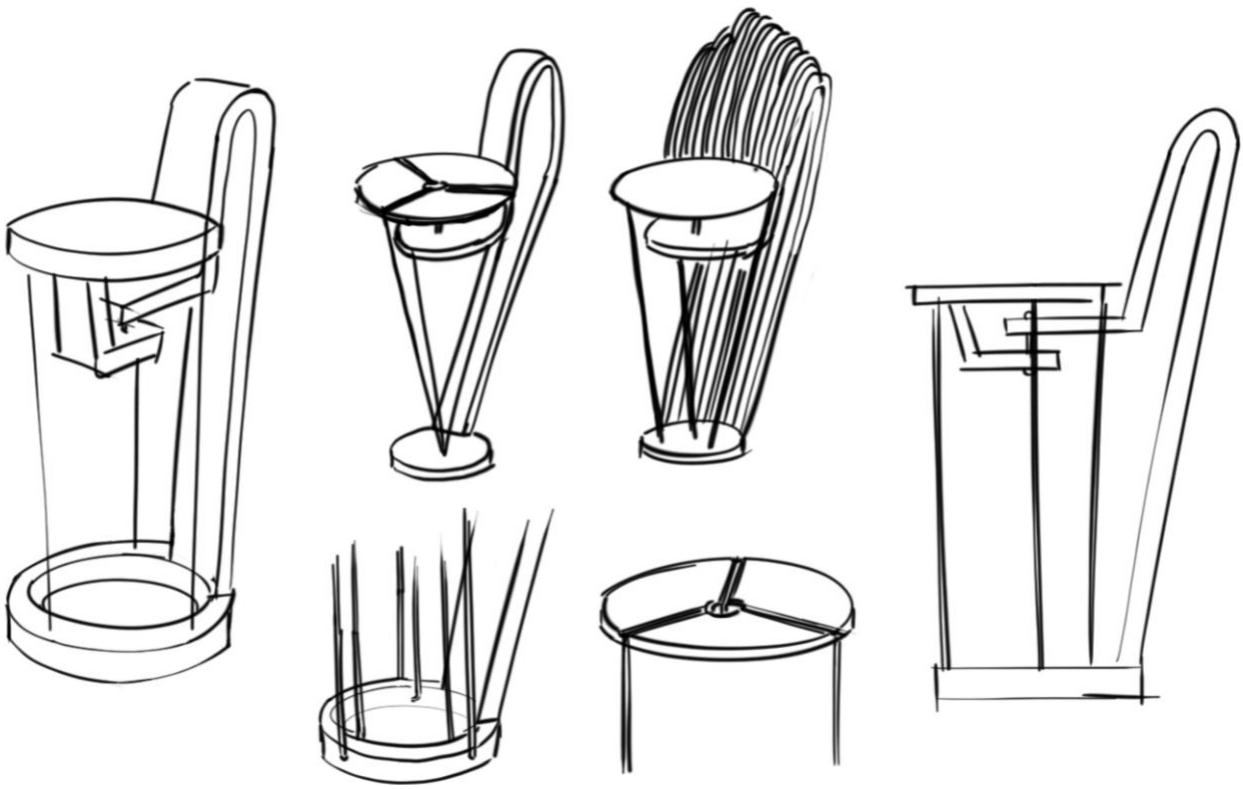
Tämän jälkeen aloin hahmotella perinteisempää tuoliratkaisua (kuva 22), ja mietin, voisiko jo markkinoilla oleviin tensegrity-tuoleihin tuoda uudenlaisen kulman. Tensegrity-tuoleissa ei oikeastaan ole jalkoja, vain alaosa ja yläosa, jossa on istuinosa ja selkänoja. Mietin, että loogisempi jako voisi olla se, että istuinosa on alaosassa ja selkänoja yläosassa; tällaista tensegrity-tuolia ei käsittääkseni ole ennen tehty. Tällöin istuinosa pitäisi saada nostettua yläosan yläpuolelle. Koska ulkokehälle pitää saada tasapainottavat köydet, on selkänojaan lisättävä ulokkeita, jolloin ratkaisut alkavat muistuttaa nojatuolia.



Kuva 20. Konsepti 4.

Totta puhuen en ollut itse kovin innostunut nojatuolimaisesta ratkaisusta, sillä lopputuloksesta tulee helposti hyvin massiivinen. Lisäksi voi olla vaikea saada tensegrity-teemaa riittävän hyvin esille, koska keskiosan köydet jäävät piiloon istuinosan alle. Yleinen tunne oli se, että saman asian voisi toteuttaa paljon helpommalla ja toimivammalla tavalla, ja tensegrity-teeman pakottaminen tuntui väkinäiseltä. Tämä on yleisestikin ongelma tensegrity-huonekaluissa: vain hyvin harvoin sen käyttö tankomaisten rakenteiden ja perusliitosten sijaan on perusteltua, ja lopputulos tuntuu siksi kivalta mutta oudolta hassuttelulta.

Lopulta päädyin hahmottelemaan pyöreämpiin muotoihin ja kaarimaisiin rakenteisiin nojautuvaa baarijakkaraa (kuva 23). Siinä kantavana teemana on se, miten tensegrity-rakenteissa yleensä turhaksi jalustaksi jäävä alaosa sulautuu rakenteeseen selkänojana. Lisäksi detaljitasolla olin kiinnostunut siitä, miten ulkokehän köydet voisi upottaa uriin istuinosassa. Tässä vaiheessa alkoi konkretisoitua ajatus nimenomaan köysien käytöstä esimerkiksi kirkkaan neonvärisenä ja vahvana visuaalisena kontrastina vaalealle puulle. Kartoitin myös muita vaihtoehtoja vetojännityksessä oleviksi komponenteiksi, mutta esimerkiksi vanttiruuveilla kiristettävät teräsvaijerit, jotka kiinnitettäisiin silmukalla ruuvikoukkuihin, eivät olisi mielestäni sopineet tavoittelemaani muotokieleen.



Kuva 21. Konsepti 5.

Tämä oli mielestäni alustavista konseptiaihioista ylivoimaisesti vahvin ja kiinnostavin, ja oli mielestäni selkeää, että konseptin kehitys lähtee tähän suuntaan. Konseptien välikatselmuksessa sain vahvaa palautetta siitä, että selkänojaan kohdistuvat jännitykset tulevat olemaan niin suuria, ettei tukirakennetta kannata tehdä puusta. Riittävän vahvuuden saavuttamiseksi puuosista pitäisi tehdä todella massiivisia. Siromman rakenteen aikaansaamiseksi minua suositeltiin tekemään rakenne sen sijaan teräsputkesta.

Tässä vaiheessa muutin hieman itsekin omaa ajatusmaailmaa ja aloin siirtää fokusta metalliputkesta tehtäviin rakenteisiin. Siirryin myös 3D-mallinnukseen konseptien luonnostelussa nähdäkseni, miltä rakenteet näyttäisivät oikeilla materiaaleilla ja hieman realistisempina kuin omissa karkeissa piirroksissa. Nämä olivat hyvin viitteellisiä mallinnuksia, enkä tässä kohtaa kiinnittänyt huomiota esimerkiksi liitoksiin tai vetojännityksessä olevien komponenttien materiaaliin ja kiinnitykseen.

Mallinsin ensiksi käyttäen metalliputkea konseptia 5 mukailevan rakenteen, joka on esitetty kuvassa 24. Hieman paremmin istuttavan selkänojan aikaansaamiseksi ja kestävyyden lisäämiseksi käytin tässä mallissa kolmea metalliputkea – niitä voisi olla enemmänkin. Visuaalisena inspiraationa metalliputkien muodolle toimi paperiliittimen kaarevat muodot. Ongelmana mallissa on se, että keskiosan köydet tai vaijerit ovat liian ulkokehällä eivätkä ne ole vertikaaliset, jolloin istuinosa keikahtaa helposti ympäri. Tämä design oli mielestäni vielä raakile

ja koin, että muotojen hienosäätö ei riitä korjaamaan tämän konseptin ongelmia. Tämä oli kuitenkin tärkeä väliaskel lopullisen designin syntymiselle.

Kuva 22. Konsepti 5A.

Kilpailevana konseptina hahmottelin muotoa, joka toimisi sekä jakkarana että sivupöytänä. Kuvassa 25 on esitetty useita saman konseptin eri variaatioita. Tässä konseptissa tukien muodolla ja määrällä voidaan manipuloida istuinosan alle muodostuvaa tilaa. Kiinnostavana yksityiskohtana köydet tai vaijerit muodostavat hyperboloidisen pinnan, joka alkaa hahmottua, kun niiden määrää lisätään. Nähdäkseni kuitenkaan tämäkään ei ole tensegrity-rakenne: yläosa ei leiju vaan se roikkuu.

Kuva 23. Konsepti 6.

4.1.3 Alustavan konseptin valinta

Koska en ollut mihinkään konsepteista vielä täysin tyytyväinen, projekti jäi hautumaan pitkäksi aikaa kunnon inspiraation löytämiseksi. Ongelmana oli osittain se, että en saanut leijumisilluusiota aikaan riittävän elegantisti menemättä hyvin lähelle konsepteja, jotka ovat jo olemassa. Halusin, että konseptissani on joku uusi ja kiinnostava kulma, eikä se ole pelkästään vanhan toistoa pienillä esteettisillä muutoksilla. Lisäksi koin ongelmallisena sen, että muotoilu menee niin vahvasti tensegrityn ehdoilla, eikä toisinpäin. Pyrin siis suunnittelemaan rakenteen, missä kaikki muodot ovat perusteltuja muutenkin kuin pelkästään tensegrityn takia. Rakenteessa ei mielestäni saa olla turhia muotoon liittymättömiä osia, kuten irrallisia väkäsiä, joihin köydet tai vaijerit kiinnitetään. Tämän ajatuksen pohjalta onnistuin vihdoin kehittämään konseptin, johon olin riittävän tyytyväinen. Ensimmäinen mallinnus alustavasta valitusta konseptista, joka pohjautuu edelleen hyvin vahvasti konseptiin 5, on esitetty kuvassa 26.

Kuva 24. Alustava valittu konsepti.

Tässä konseptissa mielestäni kantavana voimana on se, että tensegrity-rakenteen vaatimat muodot sulautuvat hyvin osaksi kokonaisuutta, ja materiaalien määrä on minimoitu. Jopa se, että alaosa on saatu tuotua yläosan yläpuolelle, tuntuu osittain jopa ilmeiseltä ratkaisulta.

Alaosa on hieman epäortodoksisesti nurin perin kuin istuimessa voisi normaalisti ajatella, mutta se mahdollistaa yläosan taivuttamisen yhdestä metalliputkesta siten, että istuinosa makaa sen päällä. Yläosan metalliputket ovat istuinosan alapuolelle CNC-työstetyissä urissa. Yhdistelin tähän konseptiin myös muita kiinnostavana pitämiäni aihioita, kuten selkänojan ja köysien upottamisen istuinosaan. Tässä kohtaa jätin vielä köysien kiinnityksen metalliosiin ratkaisematta, mutta tiedostin että kuvaamassani mallissa ne pitää kiinnittää jotenkin paikoilleen, etteivät ne luiskahda pois paikoiltaan. Selkänoja on hyvin viitteellinen, eikä tarjoa ergonomista mukavuutta, mutta se ottaa kantaa istumissuuntaan ja toimii lisäksi kantokahvana.

Ajatuksena kehittämässäni jakkarakonseptissa on, että istuinosan korkeus on jotain korkean baarijakkaran (noin 75 cm) ja normaalin istuimen (50 cm) välimaastosta. Koska istuimessa ei ole jalansijaa, se ei toimi baarijakkaran korkuisena. Ajatuksenani oli, että jakkaralle voi istua paitsi koko painolla, myös nojaten osalla painosta hieman samaan tapaan kuin niin sanotuissa seisomatuoleissa. Pyrin siis rakenteeseen, joka antaa hieman periksi, mutta ei kuitenkaan liikaa, jotta siinä ei tapahdu fataalia tensegrity-rakenteen pettämistä. Empiiristen kokeilujen perusteella tähän valikoitui 63 cm korkeus.

4.2 Konseptin jatkokehitys

Konseptin jatkokehityksessä tunnistan kolme erillistä osuutta. Ensimmäisenä rakensin karkean hahmomallin konseptin toimivuuden varmistamiseksi. Tästä saadun infon perusteella tein pieniä viilauksia mittoihin ja tein uuden, yksityiskohtaisemman mallinnuskierroksen. Tästä saamani palautteen perusteella jouduin vielä tekemään muutoksia mittoihin ja siksi vielä yhden ylimääräisen mallinnusversion.

4.2.1 Hahmomalli

Lopullisen konseptin valinnan jälkeen tärkein tehtävä oli varmistaa sen toimivuus hahmomallilla. Päätin työstää hahmomallin oikean kokoisena, jotta saisin mahdollisimman paljon informaatiota myös jakkaran istumisergonomiasta ja stabiiliudesta. Tein hahmomallin pääosin vanerista, joka on levyn pitkittäissuunnassa kova ja kestävä materiaali, ja sopi siksi tehtävään erinomaisesti. Koska levymäisellä materiaalilla päädytään luonnollisesti hyvin erilaisiin lopputuloksiin, mitat olivat metalliputkia replikoitaessa varsin suurpiirteiset ja lisäksi rakennetta vahvistettiin muutamista kohdista. Olennaisinta hahmomallissa oli, että köysien kiinnityskohdat olivat suunnilleen oikeassa kohdassa. Hahmomalli on esitetty kuvassa 27.

Paremman kiinnitysmekanismin puutteessa päädyin käyttämään soljella kiristettäviä kuormaliinoja, sillä se oli yksinkertainen ja helpoimmin saatavilla oleva tapa. Nämä osoittautuivatkin erittäin helppokäyttöiseksi ja helposti kiristettäviksi ja toivat lisäksi oranssina rohkean värikontrastin – alustavasti mielessäni oli juurikin kirkkaan oranssin käyttäminen

köysissä. Kuormaliinat toimivat niin hyvin sekä funktionaalisesti että esteettisesti, että niitä olisi voinut harkita jopa lopullisessa prototyypissä. Pidin kuitenkin köysien upottamista istuinosassa oleviin uriin niin mielenkiintoisena detaljina, että halusin ehdottomasti pitäytyä niissä.

Kuva 25. Hahmomalli. Oikealla ylä- ja alaosa on käännetty 180 astetta toistensa suhteen.

Hahmomallikokeilu onnistui hyvin, sillä istuin tuntui tukevalta ja kesti hyvin ainakin noin 90-kiloisen koehenkilön istumista. Testin perusteella istuin oli sivuttaissuunnassa todella stabiili, eli varaamalla painoa oikeaan tai vasempaan reunaan se ei juuri kallistunut. Sen sijaan syvyyssuunnassa oli selkeä puoliero; varatessa painoa etureunalle rakenne jousti hyvin vähän ja varatessa painoa selkänojan puolelle rakenne kallistui jonkin verran. Huomasin tämän vain sen takia, että tein virheen hahmomallin suunnittelussa ja selkänoja meni vahingossa väärälle puolelle. Näin ollen kokeillessani istumista ”väärinpäin” huomasin tämän puolieron.

Selvittääkseni mistä tämä puoliero johtui, käänsin ylä- ja alaosaa toistensa suhteen 180 astetta (kuva 27). Tämäkään ei luonnollisesti vastaa sitä tilannetta mitä 3D-mallissa, mutta halusin nähdä, kääntyykö myös puoliero vastaavasti. Yllätyksekseni puoliero ei kääntynyt, vaan istuin jousti edelleen samalla puolella kuin viimeksi. Hieman asiaa pohdittuani ymmärsin, että keskiköysi löystyy ja kiristyy samalla tavalla riippumatta osien orientaatiosta, kun painoa varataan etu- tai takareunalle. Jos kuvan 27 tapauksessa paino on etureunalla, keskiköyden kiinnityskohta pyrkii kauemmaksi ja köysi kiristyy, ja näin ollen jännitykset tasapainottuvat. Jos sen sijaan istutaan takareunalla, yläosan kiinnityskohta liikkuu lähemmäksi alaosan kiinnityskohtaa, jolloin keskiköysi löystyy, ja seurauksena rakenne saattaa antaa periksi. Samasta syystä istuin on erittäin stabiili sivuttaissuunnassa: keskiköysi kiristyy sekä oikealle että vasemmalle reunalle painoa varattaessa.

Hieman onnekkaan sattuman kautta sain siis lisäinfoa siitä, miten istuin käyttäytyy. Istuin oli ehdottomasti stabiilimpi tässä virheellisessä muodossaan. Tämän perusteella jouduin pohtimaan designin mielekkyyttä ja jopa sitä, että stabiiliuden lisäämiseksi kääntäisin selkänojan kuten virheellisessä hahmomallissa. Tämä olisi kuitenkin ollut vaikeampi toteuttaa yhdellä metalliputkella ja olisi hieman vesittänyt myös ajatusta rakenteiden jatkuvuudesta. Päädyin loppujen lopuksi pitämään designin ennallaan, sillä haluan siinä tavoitella nimenomaan pientä joustoa ja kallistumista etureunaan nojatessa. Oli vaikea ennustaa, miten metalliputki tulisi käyttäytymään vastaavassa tilanteessa. Aavistukseni oli kuitenkin se, että koska metalliputket tulisivat olemaan jo valmiiksi jousimaisessa jännitetyssä tilassa köysien kiristämisen jälkeen, tuo jännite pyrkisi purkautumaan ja neutraloimaan kallistuksesta seuraavaa liikettä, jolloin jousto ei olisi niin radikaali.

Testasin hahmomallilla myös useita erilaisia tapoja kuormaliinojen virittämiseen ja erilaisiin sijoitteluihin kehällä kuvan 28 mukaisesti. Niillä ei mielestäni ollut sanottavaa vaikutusta istuimen stabiiliuteen, mutta sillä voidaan vaikuttaa hyvin paljon istuimen visuaaliseen luonteeseen. Kokeilin myös neljän erillisen kuormaliinan virittämisen sijaan yhden kuormaliinan kulkemista koko systeemin läpi (kuvassa 28 keskellä), mutta tämä ei arvattavasti toiminut, koska liinaa ei saanut tarpeeksi kireälle. Istuimessa oli jonkin verran rotaatioliikettä, jota voisi vähentää vetämällä köydet ristiin. Se ei kuitenkaan ehkä palvele tarkoitusta, sillä ei ole riskiä siitä, että tensegrity-rakenne pettäisi rotaatioliikkeen takia. Designista saattaa tulla myös liian hektinen, jos köysien määrää lisätään, ja lisäksi se veisi rakenteen ilmavuutta. Lisäksi rakenteen reagoiminen istujan liikkeisiin sai koeistujilta kiitosta.

Kuva 26. Kokeiluja kuormaliinojen eri viritystavoista.

4.2.2 Konseptin 3D-mallinnus ja kehitys

Hahmomallikokeilujen jälkeen tein uuden yksityiskohtaisemman mallinnuskierroksen, jossa mitat ja detaljit olivat lähellä lopullista (kuva 29). Valitsin mallinnukseeni 25 mm metalliputken aikaisemman 20 mm sijaan, sillä se oli vaikuttanut kuvissa liian ohuelta. Köyden läpimitta oli tässä mallissa 10 mm. Jalustan renkaasta tein täysin pyöreän, sillä halusin saada köydet täysin symmetrisesti kehälle, ja se ei olisi onnistunut aikaisemman mallinnuksen mukaisessa rakenteessa. Tässä köysien kiinnitys metalliputkiin on ratkaistu yksinkertaisimmalla mahdollisella tavalla: metalliputken läpi poratulla reiällä. Muutin myös köysien sijoittelua istuinosan upotuksiin rohkeamman ilmeen saavuttamiseksi. Lisäksi testasin erilaisia värivariaatioita (kuvassa 30) ja tykästyin erityisesti täysmustiin metalliosiin ja istuinosaan yhdistettynä neonvihreään köyteen. Mielestäni kyseinen yhdistelmä on tunnelmaltaan huomattavasti rauhallisempi kuin muut väriyhdistelmät, ja siinä on vahvemman kontrastin takia helpompi hahmottaa, mitä keskiosassa tapahtuu.

Kuva 27. Konseptin uusi mallinnuskierros.

Kuva 28. Erilaisia viimeistely- ja väriyhdistelmiä.

Tässä vaiheessa minulla ei ollut kovin vahvaa käsitystä siitä, miten osat tultaisiin toteuttamaan. Esiteltyäni mallia metallipajan väelle, minulle selvisi, että metalliputken taivuttamiseen eri kääntösäteillä ei ole Aallossa kovin paljon mahdollisuuksia. Tiukemmat kulmat pitäisi toteuttaa käsikäyttöisellä putkentaivuttimella, joka myös määrittelisi kääntösäteen yksiselitteisesti. Saatavilla olevista putkivaihtoehdoista 22 mm halkaisija vaikutti sopivimmalta, ja tälle putken paksuudelle kääntösäde tulisi olemaan 67 mm putken keskipisteestä. Tarkkojen mittapiirrosten

aikaansaamiseksi päädyin siis tekemään vielä yhden mallinnuskierroksen, jossa tämä otettaisiin huomioon. Tämä mallinnus on esitetty kuvassa 31. Lisäksi nopealla kokeilulla todettiin, että mallintamani jalustan ympyrän kehän halkaisija oli auttamattomasti liian pieni. Olin alun perin mallintanut sen vastaamaan istuinosan 33 cm:n halkaisijaa, jotta köydet olisivat mahdollisimman vertikaaliset. Olemassa olevien jakkaroiden mittojen perusteella kasvatin jalustan ympyrän halkaisijan 44 cm:iin sekä myös istuinosan halkaisijan 34 cm:iin.

Kuva 29. Konseptin viimeinen mallinnuskierros.

Viimeisellä mallinnuskierroksella päädyin toteuttamaan myös köysien ripustukseen liittyviä ideoita, joita olin haudutellut prosessin aikana. Köydet on ripustettu metalliosaan kiertämällä ne spiraaliksi metalliputken ympäri. Tämä on mielestäni ovela ratkaisu siinä mielessä, että se paitsi tuo designiin erittäin tunnistettavan yksityiskohdan, toimii samalla ”huopatassuina”. Ainoa kauneusvirhe tässä ratkaisussa on se, että köysiä ei saa täysin identtisiksi, koska käytössä on vain kolme neljäsosaa ympyrän kehästä. Viimeisessä versiossa köysien upotukset istuinosassa on tehty mukailemaan ympyrän kehää. Tämä vaatii uraan 45 asteen kulmassa jyrsityn syvennyksen, jotta köysi ei pääse suoristumaan sen kiristyessä. Syvennys on mallinnettu siten, että se pitää köyden paikoillaan, mutta köysi on juuri istuinosan pinnan tasolla.

5 PRODUKTIO: PROTOTYYPIN VALMISTUSPROSESSI

5.1 Istuinosan valmistus

Istuinosan valmistusmateriaaliksi pohdin joko tammea tai saarnia. Pidän molemmista puulajeista kalustemateriaalina siksi, että ne ovat riittävän vaaleita, mutta niissä on silti hyvin luonteikas syykuvio. Materiaaliksi valikoitui lopulta saarni, lähinnä sen takia, että minulla oli juuri sopiva ylijäämäpala tähän tarkoitukseen.

Istuinosan työstäminen lopulliseen muotoonsa onnistui helposti CNC:llä. Kappaleen yläpinnassa olevat urat mallinnettiin siten, että ne on mahdollista jyrsiä palloterällä 45 asteen kulmassa. CNC-työstöä varten valmistin saarnista 32 mm paksun liimapuulevyn; kummallekin pinnalle jätettiin 1 mm työstövaraa istuinosan tavoitepaksuuden ollessa maksimissaan 30 mm. Työstäminen CNC:llä onnistui ongelmitta ja pinnalle jääneet työstöjäljet viimeisteltiin vielä hiekkapaperilla tasaisiksi. Istuinosasta tuli loppujen lopuksi niin tyylikäs (kuva 32), etten raaskinut värjätä sitä mustaksi.

Kuva 30. Valmis istuinosa CNC-työstön jälkeen.

5.2 Metalliosien valmistus

Metalliset tuet valmistettiin useassa pienemmässä osassa siten, että putket voitiin taivuttaa yhdessä tasossa. Osien 3D-taivuttaminen olisi ollut mahdottomuus käytettävissä olevilla työkaluilla. Alatukeen tarvittiin neljä osaa ja yläosaan kuusi osaa logiikalla, jossa kullakin putken pätkällä on vain yksi taivutus. Leikkaussaumat jätettiin sellaisiin kohtiin, joissa putki on varmasti suorassa, jotta hitsauspinnat oli helpointa saada mahdollisimman kohdakkain.

Putkentaivutus tehtiin manuaalisella profiilintaivuttimella, jossa lopullinen kulma piti arvioida silmämääräisesti. Helpoin tapa oikean kulman saavuttamiseksi oli tulostaa paperille kuva kustakin kaaresta, ja verrata taivutettua putkea siihen. Näin saavutettiin prototyyppiä ajatellen täysin riittävä kulman tarkkuus. Valmiit osat liitettiin toisiinsa käyttämällä metallisia holkkeja, joiden avulla osat saattoi kokoonpanna väliaikaisesti oikeaan muotoon hitsausta varten. Se auttoi myös varmistamaan, että hitsauspinnat ovat varmasti tasaiset ja putket jatkuvat suorina hitsaussauman yli. Teoriassa holkkien käytön pitäisi myös varmistaa lopullisen kappaleen valmistuminen oikean muotoon olettaen, että putken taivutukset on tehty oikeassa kulmassa.

Holkkeina käytettiin noin 20 mm pitkiä 18 mm terästangon palasia, joiden pitäisi mahtua 22 mm teräsputken 18-milliseen sisäreikään. Muissa liitoskohdissa tämä onnistuikin ongelmitta, mutta kohdassa, jossa jalustan pyöreä kehikko lähtee taipumaan ylöspäin, holkin saaminen putkien sisälle vaati hieman vaivannäköä. Tämä oli muutenkin liitoskohdista haastavin, koska siinä kohtaa kaksi kaarta, eikä välissä ole suoraa osuutta hitsaussaumalle. Tiedostin tämän jo suunnitteluvaiheessa, mutta halusin nimenomaan jalustasta täysin pyöreän.

Osien hitsaaminen toisiinsa onnistui ilman suurempia ongelmia. Monimutkaisemman yläosan kokoonpanemisessa auttoi se, että istuinosaa urineen saattoi käyttää eräänlaisena muottina, jolla varmistettiin putkien asettuminen oikeaan muotoon. Tästä huolimatta kappaleeseen jäi hitsauksen seurauksena jännityksiä, eikä se sopinut uraan täydellisesti ilman pientä vääntämistä. Kappaleiden muodossa on muutenkin pieniä kauneusvirheitä, jotka johtuvat todennäköisesti siitä, että putkien pituuksissa on ollut muutamien millimetrien virheitä. Osat onnistuivat kuitenkin enemmän kuin hyvin prototyyppiä ajatellen.

Hitsaussaumat siistittiin vielä hiomalla, jonka jälkeen metalliosat vietiin maalaamoon jauhemaalattavaksi. Halusin metalliosiin kalusteissa usein käytetyn jauhemaalaamalla aikaansaadun hieman röpelöisen mattapinnan (ns. efektimusta), jonka tekeminen onnistui vain ulkopuolisella alihankkijalla. Maalauksen jälkeen hitsauskohdat hädin tuskin erottuivat (kuva 33), mutta osiin jäi ikävä jälki kohtiin, joista niitä oli roikotettu maalauksen aikana. Nämä olivat onneksi kohdissa, jotka jäävät piiloon köysien alle. Lopuksi porattiin reiät istuinosan neljälle kiinnitysruuville.

Kuva 31. Vasemmalla metalliosat hitsauksen ja hitsaussaumojen viimeistelyn jälkeen. Oikealla jauhemaalauksen lopputulos, jossa suoralla osuudella olevat hitsaussaumat hädin tuskin erottuvat. Maalauksessa on jälki siinä kohdassa, josta kappaletta on roikotettu maalauksen aikana.

5.3 Köydet ja köyden kiristimet

Köysien kiristämiseen ei ollut tarjolla kovinkaan montaa valmista ratkaisua. Fiksuin ja elegantein kiristysmekanismi, jonka löysin markkinoilta, oli 2—5 mm köysille tarkoitettu Nite Izen CamJam (kuva 34). CamJam:sta on olemassa myös 3—9 mm köysille tarkoitettu kalliimpi ja isompi versio, sekä 2—5 mm köysille tarkoitettu laadukkaampi alumiininen versio. Budjettisyistä päädyin kuitenkin hankkimaan muoviset perusversiot, joka näin ollen rajoitti köysien paksuuden huomattavasti ajattelemaani ohuempaan 5 mm:iin.

Kuva 32. Nite Izen CamJam -kiristinsolki (Nite Ize, 2021). Kuvassa huomattavasti muovista laadukkaamman oloinen alumiininen versio.

En onnistunut löytämään prototyyppia varten visuaalisesti täysin mieluisaa köyttä, sillä mielikuviani vastaavat järeämmät kiipeilyköydet olisivat maksaneet satoja euroja. Lisäksi

rajoitus 5 mm:n paksuuteen rajoitti valikoimaa huomattavasti. Päädyin hankkimaan kokoonpanoa varten kaksi erityyppistä köyttä, joista ensisijaisesti halusin käyttää 3.5 mm paksua polypropeenista valmistettua neonvihreää Paracord-köyttä. Varasuunnitelmana olin hankkinut myös 5 mm paksua polyesteristä valmistettua harmaavihreää köyttä. Tämän opinnäytetyön puitteissa ei ollut mahdollista tutkia käyttötarkoitusta varten parasta köysimateriaalia, mutta tarkistin kuitenkin, että köydet kestivät painoa riittävästi tätä sovellusta ajatellen.

5.4 Kokoonpano

Osien kokoonpano aloitettiin liittämällä metallinen yläosa istuinosaan tavallisilla 40 mm puuruuveilla. Tämän jälkeen oli vuorossa vaikein osuus, eli köysien virittäminen ja kiristäminen. Viritin ensin köydet löysästi paikoilleen käyttäen tukea pitämään yläosan paikoillaan. Keskimmäiselle köydelle ei tarvittu kiristintä, vaan se solmittiin haluttuun pituuteen, joka myös määrittelee istumakorkeuden. Kun ulommaiset köydet oli saatu paikoilleen riittävän hyvin, jotta rakenne pysyi kasassa ilman tukemista, köydet kiristettiin mahdollisimman kireälle. Tämä tehtiin kiristämällä köysiä yksitellen vähän kerrallaan varoen, että rakenne ei keikahda kumoon. Koska köydet löystyvät jonkin verran jakkaralle istuessa, köydet saatiin riittävän kireälle vain laskemalla sen varaan reilusti painoa, ja hilaamalla köysi aina vain kireämmälle muutama sentti kerrallaan.

Koska ohuempi Paracord-naru lipsui helposti kiristinsoljesta, päädyin käyttämään varavaihtoehtona ollutta 5 mm köyttä. Köysien kiristys oli erittäin vaivalloista, mutta se onnistui kohtuullisesti ja lähes yhtä hyvin kuin hahmomallilla, jossa oli paljon helpommin kiristettävät kuormaliinat. Köydet saatiin loppujen lopuksi niin kireälle, että istuminen jakkaralla tuntui varsin tukevalta. Käyttämäni köydet olivat kyseiseen tarkoitukseen riittävän jäykät ja metalliosat eivät joustaneet juuri lainkaan, vaikka niihin olisi voinut kuvitella kohdistuvan suuriakin jännityksiä. Muutamien kokoonpanossa esiin tulleiden ongelmien takia rakenne jäi kuitenkin mielestäni hieman vähemmän stabiiliksi kuin hahmomallissa. Näitä ongelmia ei ollut mahdollista korjata käytettävissä olevalla aikataululla.

Ensinnäkin, ainoa markkinoilta löytynyt ratkaisu köysien kiristämiseksi osoittautui kehnoksi. Kiristysmekanismi on helppo, mutta vaatii tietynlaisen tekniikan, ettei köysi irtoa sille tarkoitetusta urasta. Köydet pitäisi saada kiristettyä todella kireälle, jolloin kiristysmekanismiin kohdistuu todella suuria voimia. Kiristimen yleisvaikutelma on kuitenkin muovinen ja helposti rikkoutuvan näköinen, ja sen lukitus on heppoinen. Kokoonpannessa yksikään neljästä kiristimestä ei vielä rikkoutunut, mutta en uskaltaisi käyttää ainakaan muovisia versioita oikeassa tuotteessa. Toiseksi, kaareva ympyrän kehää myötäilevä ura köysille ei ollut toimiva ratkaisu. Jakkaralle istuessa köydet pääsevät löystymään sen verran, että ne eivät tahdo pysyä urassa. Lisäksi köysien kiristäminen oli vaikeaa, sillä köysi ei juurikaan päässyt liikkumaan kitkan ja terävien kulmien takia. Käytännössä olisi tarvittu kaksi kiristintä kullekin neljälle köydelle,

jotta kiristys olisi onnistunut vaivatta. Kolmanneksi, jalustan ympäri spiraalille kierretyt köydet eivät pysyneet paikoillaan pelkän kitkan avulla, vaan ne pyrkivät purkautumaan ja liikkumaan. Tämä on ongelma erityisesti takaosassa, jossa köyden liikkuminen saattaa aiheuttaa sen löystymisen. Liikkuminen luonnollisesti vähenee, kun köydet saadaan riittävän kireälle, mutta se hankaloittaa kiristysprosessia.

6 WIGGLE-JAKKARAKONSEPTIN ESITTELY

Kuvissa 35–37 on esitetty Wiggle-jakkaran prototyyppi eri kuvakulmista. Prototyyppi kestää hyvin istumista, ja se käyttäytyy istuessa kuten toivoinkin. Jakkaralle voi istua koko painollaan, tai rennosti etuosaan nojaten, jolloin se antaa hieman periksi. Selkänojan kulma osoittautui myös toimivaksi, varsinkin tilanteessa, jossa käyttäjä istuu rennommassa asennossa. Köysien käyttäminen tassuina oli hyvä keksintö, tosin riskinä saattaa olla köysien likaantuminen tai kuluminen.

Kuva 33. Wiggle-jakkarakonsepti.

Kuva 34. Wiggle-jakkarakonsepti.

Kuva 35. Wiggle-jakkarakonsepti.

Istuminen tensegrity-jakkaralla on erikoinen kokemus, jota on vaikea kuvailla sitä kokematta. Tunnetta ei oikein voi luonnehtia sanalla ”leijuminen”, koska jakkara joustaa yllättävän vähän ja se tekee istumisen tuntumasta kovemman kuin voisi kuvitella. Istuin ei kuitenkaan ole epämukava, vaan kyse on siitä, että tunne on odottamaton ja yllättävä. Halutessaan istuinta voi ”aktivoida” liikehtimällä, sillä se kyllä antaa jonkin verran periksi ja reagoi liikkeisiin, erityisesti rotaatioliikkeeseen.

Kokoonpanossa paljastui ongelmien lisäksi myös yksi mieluisa yllätys. Eräs tensegrity-rakenteen hyödyistä on säädettävyys, joka konkretisoitui minulle vasta fyysisen prototyypin avulla. Istumiskorkeutta voi säädellä melko vapaasti muuttamalla keskimmäisen köyden pituutta. Tarkan korkeuden määrittäminen on kuitenkin vaikeaa, sillä köysi venyy jonkin verran siihen kohdistuvan jännityksen takia. Jotta käyttäjä voisi säätää istuimen korkeutta, pitäisi keskiköydenkin olla säädettävissä kiristimellä.

En voi sanoa olevani täysin tyytyväinen lopullisen prototyypin ulkoasuun, sillä sen tunnelma on hyvin rauhaton köyden värityksen ja useiden huomiota vievien solmujen takia. Tällainen räikeämpi tyyli voi puhutella monia, mutta itse olen enemmän minimalistisen graafisen ilmeen puolestapuhuja. Värejä ja materiaaleja on myös yksinkertaisesti liikaa: tämä todennäköisesti korjaantuisi värjäämällä istuinosan mustaksi ja korvaamalla köysi yksivärisellä, esimerkiksi mainitulla neonvihreällä. Istuin näyttää myös hieman etupainotteiselta, mikä johtuu siitä, että rakenne ei ole täysin ympyräsymmetrinen.

7 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Lähtökohtana suunnitteluprosessille oli tavoite tuottaa korkeatasoinen tensegrity-periaatetta hyödyntävä kalustekonsepti, sekä tutkia voidaanko tensegrityn avulla saavuttaa esteettisesti ja funktionaalisesti toimivia kalusteita. Mielestäni onnistuin konseptillani vastaamaan tutkimuskysymykseen ja samalla tuomaan tensegrity-huonekalujen kirjoon jotain uutta. Vaikka perusmuoto mukailee hyvin läheisesti jo nähtyjä leijumisilluusioon perustuvia istuimia, niin Wiggle-konseptissa muotoilua on viety hieman pidemmälle, eikä se kulje täysin tensegrity-teeman ehdoilla. Designissa on pyritty ottamaan huomioon tensegrity-rakenteiden vaatimien muotojen sulautuminen mahdollisimman saumattomaksi osaksi kokonaisuutta, siinä hyvin onnistuen. Aikaisemmin tiedostettiin, että tensegrity-huonekaluissa materiaalinen yhtenäisyys ja erityisesti köysien tai vaijerien eroavaisuus muusta muotokielestä on yksi suurimmista haasteista. Nähdäkseni olen myös onnistunut luomaan köysistä oikeasti perustellun visuaalisen elementin, joka uppoutuu rakenteeseen mielenkiintoisten yksityiskohtien avulla. Lisäksi olen samalla onnistunut valjastamaan köydet myös muuhun käyttöön kuin vain pitämään rakennetta pystyssä.

Tiedostan, että visuaalisesti prototyyppi ei edusta täysin sitä linjakkuutta, mitä suunnitelmassani tavoittelin. Tämä johtuu kuitenkin omista huonoista valinnoista toimimattomissa yksityiskohdissa, ja prototyypin tehtävä on nimenomaan nostaa nämä ongelmat esille. Itse en näe tuotetta vielä läheskään valmiina, vaan selkeästi prototyyppinä, jonka pitäisi käydä läpi vielä monta kehityskierrosta. Renderöinnin perusteella tällä konseptilla on potentiaalia tuottaa myös hyvännäköinen ja raikas prototyyppi, kunhan sen hektistä tunnelmaa saa hieman rauhoitettua paremmilla värivalinnoilla. Tuotteistaminen vaatinee myös tätä tarkoitusta varten erityisesti suunnitellun kiristysmekanismin ja huolellisesti suunnitellut solmut, tai vaihtoehtoisesti täysin toisenlaisen kiristystavan.

Konseptia voisi mielestäni kuvailla sanoilla leikkisä, yllättävä ja jännittävä. Hieman rohkeammat värivalinnat ja leikittely sopivat hyvin muutenkin yllätykselliseen tensegrity-teemaan. Konseptia voi helposti kustomoida tarjoamalla siihen esimerkiksi eri värisiä köysiä tai pintaviimeistelyjä. Leikkisämpään puoleen johdattelee myös huumorimielessä valittu konseptin nimi, joka viittaa istuimen elämiseen käyttäjän alla. Nähdäkseni jakkara sopisi erityisen hyvin lapsille ja lapsenmielisille, ja voisi toimia rauhoittavana elementtinä kaikille niille, joiden on vaikea pysyä paikoillaan.

8 POHDINTA

En ole ennen suunnitellut istuimia, ja lisäksi metalli kalusteen pääasiallisena materiaalina oli minulle uutta. Näin ollen koin haasteellisena sekä istuimen suunnittelun teoriapuolen että käytännön valmistusprosessin, ja jouduin opettelemaan paljon uusia asioita kantapään kautta. Prosessi olikin siksi haastava, mutta myös erittäin opettavainen. Kalusteprojektiksi tensegrity-istuin oli luultavasti keskimääräistä haastavampi, sillä istuin on ylipäätään vaikea tuote suunnitella, ja lisäksi teema määritti vahvasti myös rakenteen muotoa ja reunaehtoja. Nähdäkseni erikoisen teeman tapauksessa voi olla kuitenkin ihan hyvä asia, etteivät esimerkiksi kalustesuunnittelun perusperiaatteet ja kaavat päässeet liikaa määrittelemään omaa tekemistä.

Opinnoissani en ole juurikaan tutustunut kalusteiden rakenteiden mitoittamiseen, mikä on erityisen olennaista istumisen ergonomian ja istuimen riittävän rakenteellisen kestävyyden varmistamiseksi. Näin ollen suhtauduin projektiin varsin kokeellisesti, enkä vaivannut liikaa päätäni istuimen ergonomiaan liittyvillä asioilla. Opinnäytetyötä aloittaessa ajattelin, että perehtyisin myös oppikirjoihin saadakseni jonkinlaisen käsityksen kalustesuunnittelun perusteoriasta, mutta opinnäytteen edetessä tuli selväksi, ettei tämän projektin puitteissa ole mahdollista uppoutua niin syvälle. Prototyypin teko ja suunnittelu olivat itselleni suurimmaksi osaksi aihepiiriin tutustumista ja valmistusprosessien ja työtapojen opettelua. Siihen nähden, että projekti oli minulle ensimmäinen hyppäys istuinten suunnitteluun, kalustekonsepti ja prototyyppi olivat molemmat erittäin onnistuneita.

Jälkikäteen ratkaisisin toki muutamia yksityiskohtia eri tavalla. Edellä mainituista syistä halusin käyttää ripustuksiin köyttä kuormaliinojen sijaan, mutta ne olisivat luultavasti olleet kaikin puolin helpompi ja parempi ratkaisu – olettaen toki, että tämä olisi otettu huomioon muussa designissa. Kuormaliinat toimisivat mielestäni hyvin halvempien puumateriaalien, kuten vanerin tai jopa lastulevyn kanssa, ja tukisivat myös arkkitehtonisempaa ja kulmikkaampaa muotokieltä. Koska kuitenkin päädyin käyttämään köysiä, niille pitäisi löytää ehdottomasti toimivampi kiristysratkaisu. Kiristysmekanismin pitäisi olla riittävän kestävä ja helppokäyttöinen, ja se pitäisi saada lukittua kunnolla. Valitsemassani designissa ongelmia kiristykseen aiheutti myös köyden kitka urassa ja uran kaareutuminen. Prototyypistä viisastuneena olisin luultavasti palannut aikaisemmin mallintamaani suoraan uraan (kuva 29), ja lisäksi olisin pyöristänyt terävät reunat, jotta köysi pääsee kulkemaan paremmin kiristäessä.

Todennäköisesti kliinisemmän lopputuloksen olisi saanut aikaan poistamalla selkänojan kokonaan ja käyttämällä alaosassa lähes samanlaista muotoa kuin yläosassa. Jälkeenpäin ajatellen saattoi olla muutenkin huono ratkaisu siirtyä alkuperäisen konseptin (kuva 26) neliskanttisesta jalustasta täysin pyöreään jalustaan. Lopullisessa konseptissa oli mahdollisesti jo liikaa pyöreitä muotoja. Mikäli putkien taivutuksessa olisi enemmän vapausasteita, saattaisin muuttaa muitakin muotoja selkeästi tiukemmiksi kaariksi.

Luultavasti jatkan vielä projektia pyrkimällä löytämään prototyyppiin sopivat materiaali-, kiristys- ja väriratkaisut. Optimaalinen köyden paksuus on mielestäni luokkaa 7—10 mm, ja se toimisi huomattavasti sopusuhtaisempana graafisena elementtinä paksun metalliputken rinnalla. En raaskinut pilata saarnin kaunista syykuviota värjäämällä, mutta aion kokeilla jälkikäteen jostain toisesta puulajista tehdyn istuinosan värjäämistä mustaksi. Luultavasti musta istuinosa ja yksivärinen köysi tekevät jo ihmeitä prototyypin graafiselle ilmeelle.

LÄHTEET

Davies, J. (2016). *Machines for living in: Connections and contrasts between designed architecture and the development of living forms*. Arq : Architectural Research Quarterly, 20(1), 45-50.

de Llorens, J. I. (2015). *Fabric Structures in Architecture.* Cambridge: Elsevier Science & Technology.

Eichenauer, M.;& Lordick, D. (2019). How Platonic and Archimedean solids define natural equilibria of forces for tensegrity. *FME Transactions, 47*, ss. 234-244.

Fu, F. (2015). *Advanced Modelling Techniques in Structural Design.* Wiley-Blackwell.

Gan, B. S. (2020). *Computational Modeling of Tensegrity Structures: Art, Nature, Mechanical and Biological Systems.* Cham: Springer International Publishing.

Glass, C. (2008). Leonardo's Successors. *Nexus Network Journal*, 129-148.

Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings.* Wien: Springer Vienna.

Gómez Jáuregui, V. (2004). Tensegrity Structures and their Application to Architecture.

Gómez Jáuregui, V. (2009). Controversial Origins of Tensegrity. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009.*

Hanaor, A. (2009). Some Structural-Morphological Aspects Of Deployable Structures For Space Enclosures. Teoksessa R. Motro, *Anthology Of Structural Morphology, An* (ss. 83-108). Singapore: World Scientific Publishing Company.

Ingber, D. (1998). The architecture of life. *Scientific American*, 48-57.

Keats, J. (2016). *You Belong to the Universe: Buckminster Fuller and the Future.* New York: Oxford University Press, Incorporated.

Kemp, M. (2016). *Structural Intuitions: Seeing Shapes in Art and Science.* Charlottesville: University of Virginia Press.

Maffei, R.;Zanelli, A.;& Beccarelli, P. (2013). Lightweight architecture: characteristics for an effective application in case of emergency. Teoksessa P. Cruz, *Structures and Architecture : New Concepts, Applications and Challenges* (ss. 1342-1349). Lontoo: Taylor & Francis Group.

Motro, R. (2003). *Tensegrity: Structural Systems for the Future.* Oxford: Elsevier Science & Technology.

Pajunen, K.;Johanns, P.;Raj, K.;Rimoli, J.;& Daraio, C. (2019). Design and impact response of 3D-printable tensegrity-inspired structures. *Materials & Design, 182*.

Porter, T. (2004). *Archispeak: An Illustrated Guide to Architectural Terms.* Lontoo: Taylor & Francis Group.

Rivas Adrover, E. (2015). *Deployable Structures.* Lontoo: Laurence King Publishing.

Sandaker, B.;Eggen, A.;& Cruvellier, M. (2011). *The Structural Basis of Architecture.* Firenze: Taylor & Francis Group.

Skelton, R.;& Oliveira, M. (2009). *Tensegrity Systems.* Boston: Springer.

Snelson, K. (2012). The Art of Tensegrity. *International Journal of Space Structures, 27*(2-3), ss. 71-80.

Sultan, C. (2009). Tensegrity: 60 Years of Art, Science, and Engineering. *Advances in Applied Mechanics, 43*, ss. 69-145.

Williams, C. (2013). *Origins of Form: The Shape of Natural and Man-made Things—Why They Came to Be the Way They Are and How They Change.* Lanham: Architectural Book Publishing.

Zhang, J.;& Ohsaki, M. (2015). *Tensegrity Structures: Form, Stability, and Symmetry.* Tokyo: Springer Japan.

KUVAT

Kuva 1 Youtube. (2021). [Kuvakaappaus]. Haettu 17.2.2021 osoitteesta: https://www.youtube.com/results?search_query=floating+table.

Kuva 2 The British School Warsaw. (21.2.2020). [Luonnos]. Haettu 19.8.2021 osoitteesta: https://www.nordangliaeducation.com/our-schools/warsaw/article/2020/5/21/kasias-craft-corner--make-and-impossible-floating-table.

(Ei pvm). [Valokuva]. Haettu 19.8.2021 osoitteesta: https://i.imgur.com/hAcYZaG.jpg.

Kuva 3 Sultan, C. (2009). *The ‘‘proto-tensegrity’’ sculpture built by Ioganson*. [Luonnos]. Teoksessa Tensegrity: 60 Years of Art, Science, and Engineering. Advances in Applied Mechanics, 43, ss. 69-145.

Kuva 4 Snelson, K. (1948). *X-Piece.* [Veistos]. Teoksessa Deployable Structures, Rivas Adrover E. 2015. Lontoo: Laurence King Publishing.

Kuva 5 Gómez Jáuregui, V. (2009). *Comparison between the "Gleichgewichtkonstruktion" or “Structure-Sculpture” by Karl Ioganson and the Simplex by Snelson.* [Luonnos]. Teoksessa Controversial Origins of Tensegrity. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009.

Kuva 6 Snelson, K. (1968). *Needle Tower.* [Veistos]. Teoksessa The Structural Basis of Architecture, Sandaker, B., Eggen, A. & Cruvellier, M. 2011. Firenze: Taylor & Francis Group.

Kuva 7 Williams, C. (2013). *Kuvaus vetojännityksen edusta puristusjännityksen verrattuna.* [Piirros]. Teoksessa Origins of Form: The Shape of Natural and Man-made Things—Why They Came to Be the Way They Are and How They Change. Lanham: Architectural Book Publishing.

Kuva 8 Gan, B. S. (2020). *Kuvaus tensegrity-komponenteista.* [Luonnos] Teoksessa Computational Modeling of Tensegrity Structures: Art, Nature, Mechanical and Biological Systems. Cham: Springer International Publishing.

Kuva 9 Skelton, R. & Oliveira, M. (2009). *Class 2 shoulder joint and class 3 elbow joint.* [Piirros] Teoksessa Tensegrity Systems. Boston: Springer.

Kuva 10 Snelson, K. (1974). *Free Ride Home.* [Veistos]. Teoksessa Leonardo's Successors, Glass, C. 2008. Nexus Network Journal, 129-148.

Kuva 11 Snelson, K. (1977). *Easy Landing.* [Veistos]. Teoksessa Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings, Gruber, P. 2011. Wien: Springer Vienna.

Kuva 12 Jones, C. F. (2011). *Kurilpa Bridge*. [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://www.archdaily.com/186214/kurilpa-bridge-cox-rayner-architects-with-arup/5016d9ea28ba0d235b00004b-kurilpa-bridge-cox-rayner-architects-with-arup-photo.

Kuva 13 The Q. (27.9.2020). *Insane floating tensegrity chair*. [Videon thumbnail]. Haettu 17.2.2021 osoitteesta: https://www.youtube.com/watch?v=4nkdl1iqKQA.

Lin, Y. (2017). *Amaranta.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://exlab.org/work/yinong-lin-amaranta.

Malecki, J. (5.10.2020). *My IMPOSSIBLE Chair Build.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://www.johnmalecki.com/post/does-this-chair-actually-work-my-impossible-floating-chair-build.

Ebay. (9.8.2021). *ANTY GRAVITY DESK Invisible Tensegrity Structure DIY Handmade Floating Wood Gift.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://www.ebay.com/itm/203248332574.

(Ei pvm). [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://i.redd.it/dx1esbqe4jc51.jpg.

H Carpenter. (22.6.2020). *IMPOSSIBLE Wood Floating Table Build – Amazing Anti Gravity Wood Structure*. [Videon thumbnail]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://www.youtube.com/watch?v=9TH9qlpcKoo.

Kuva 14 Yberg, A. (Ei pvm). *Potential for Collapse.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://www.decoist.com/2012-04-03/cutting-edge-modern-furniture-design-by-akke-functional-art/?safari=1.

Waddell, T. (1972). *Dynamic "Tensegrity" 714 Dining Table.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: http://tensegritywiki.blogspot.com/2016/06/waddel-tensegrity-table-for-sale-in.html.

Bilbija, M. & Nikolic, J. (2012). *Tensegrity chair/nightstand/table and light.* [Konseptiluonnos]. Haettu 17.2.2021 osoitteesta: https://www.behance.net/gallery/5637943/Tensegrity.

Koenic, R. (Ei pvm). *Suspend Dining table.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: http://www.koenigdesign.com.

Bartosik, M. M. (Ei pvm). *Light Sculptures.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://design-milk.com/michal-maciej-bartosik/.

Kuva 15 Flemons, T. (Ei pvm). *Compass Table.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: http://intensiondesigns.ca/tensegrity-furniture/.

de Chirico, A. (2019). *Tenstable 2.0.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: http://www.andreadechirico.com/Tenstable-Series.

Yang, Z. (2019). *Tensegrity Table.* [Valokuva]. Haettu 31.8.2021 osoitteesta: https://exlab.org/work/ziyi-yang.

Kuva 16 Cuthbert, R. (2011). *Lounge Chair.* [Valokuva]. Haettu 13.8.2021 osoitteesta: http://www.robbycuthbert.com/furniture.

Cuthbert, R. (2012). *Contour Coffee Table Base.* [Valokuva]. Haettu 17.2.2021 osoitteesta: http://www.robbycuthbert.com/furniture.

Kuva 17 Achkov, K. (2021). *Vector-1, O-tense and Z-tense.* [Valokuva]. Haettu 13.8.2021 osoitteesta: https://www.giganticforehead.com/single-post/tensegrity-experimental-chairs-designed-by-konstantin-achkov-presented-at-venice-designbiennial-2021.

Kuva 34 Nite Ize. (2021). *CAMJAM® XT™ ALUMINUM CORD TIGHTENER WITH 15 FT OF 550 PARACORD.* Haettu 18.10.2021 osoitteesta: https://www.niteize.co.uk/products/camjam-xt-aluminum-cord-tightener-with-15-ft-of-550-paracord.