



Jere Laine ja Tommi Riite

Valmistusmenetelmät polkupyörän suunnittelussa ja valmistuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

17.11.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Jere Laine ja Tommi Riite
Otsikko:	Valmistusmenetelmät polkupyörän suunnittelussa ja valmistuksessa
Sivumäärä:	93 sivua + 1 liite
Aika:	17.11.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine:	Koneensuunnittelu, tuotanto- ja valmistustekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Tero Karttiala

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia ja vertailla eri valmistusmenetelmiä täysjoustomaastopyörän valmistuksessa. Nykyaikaisilla valmistusmenetelmillä pyörän runkorakenne voidaan toteuttaa innovatiivisilla tavoilla. Markkinoilla ovat yleistyneet varsinkin hybridirakenteiset rungot, joissa pyörän valmistuksessa on yhdistetty monia eri valmistusmenetelmiä. Metallin ainetta lisäävän valmistuksen kustannuksien lasku on tuonut markkinoille lukuisia valmistajia, jotka panostavat tähän suuresti.

Työssä suunniteltiin täysjoustomaastopyörä alkaen kinematiikan ja geometrian määrittelystä. Valmistuksessa hyödynnettiin hybridirakennetta, jossa koneistetut alumiiniset liitososat yhdistettiin hiilikuitukomposiittiputkiin liimaliitoksilla. Valmistus toteutettiin ammattikorkeakoulun koneistuslaboratoriossa.

Työ antoi edellytykset jatkaa prototyypin jatkokehitystä tulevaisuudessa.

Avainsanat: Maastopyörä, kinematiikka, koneistaminen, hiilikuitu, liimaliitokset

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Jere Laine and Tommi Riite
Title: Manufacturing Methods in Bicycle Design and Manufacturing
Number of Pages: 93 pages + 1 appendix
Date: 17 November 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Mechanical Design,
Production And Manufacturing Engineering
Supervisors: Tero Karttiala Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to investigate and compare different manufacturing methods in the production of a full-suspension mountain bike. Modern manufacturing methods allow the frame structure of the bike to be implemented in innovative ways. Hybrid frame structures, where multiple manufacturing methods are implemented, have become prevalent on the market. The decrease in costs for metal additive manufacturing has introduced numerous manufacturers to be invested in this area.

The thesis project involved designing a full-suspension mountain bike, starting from the definition of kinematics and geometry. The manufacturing process utilized a hybrid frame structure, integrating machined aluminum components with carbon fiber composite tubes using adhesive bonding joints. The manufacturing was carried out in the machining laboratory in the premises of the university.

The study provided the groundwork for further development of the prototype frame in the future.

Keywords: Mountain bike, kinematics, carbon composite, machining, adhesive joints

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maastopyörän geometria ja kinematiikka	2
2.1	Geometria	2
2.1.1	Satulaputken pituus	3
2.1.2	Yläputken pituus	4
2.1.3	Reach ja stack	5
2.1.4	Akseliväli ja sen jakauma	6
2.1.5	Keskiön korkeus ja pudotus	7
2.1.6	Keulakulma	8
2.1.7	Satulaputken todellinen ja efektiivinen kulma	9
2.2	Kinematiikka	11
2.2.1	Instant center	11
2.2.2	Axle path	13
2.2.3	Anti-squat	14
2.2.4	Anti-rise	15
2.2.5	Pedal kickback	16
2.2.6	Leverage ratio	18
2.3	Jousitusjärjestelmät	20
2.3.1	Single pivot	20
2.3.2	Vipumekanismilla toteutettu single pivot	21
2.3.3	Nelilinkku (horst link)	22
2.3.4	High pivot	23
2.3.5	Twin link (Virtual Pivot Point)	24
2.3.6	Muut	25
3	Geometrian -ja kinematiikan suunnittelu	26
3.1	Vaatimuslista	26
3.2	Konseptoinnin tulokset ja valinta	27
3.3	Valitun kinematiikan ja geometrian esittely	28
4	Valmistusmenetelmien vertailu	33
4.1	Rungon valmistus putkirakenteista	33

4.2	Valmistus hiilikuitukompositista	34
4.3	CNC-koneistetun rungon valmistus	35
4.4	Monimateriaalirakenteet ja hybridivalmistus	39
4.5	Monimateriaalirungon valmistaja Atherton Bikes	40
4.6	Tutkitut menetelmät ja vertailu	41
4.7	Valmistusmenetelmien valintaperiaatteet	44
5	CAD-mallien suunnittelu	45
5.1	Geometrian hahmotelma	45
5.2	Ainetta lisäävän valmistusmenetelmän suunnitelmat	46
5.2.1	FEA (Finite Element Analysis)	46
5.2.2	Tutkitut vaihtoehdot AM-valmistukselle – Desktop Metal	50
5.2.3	Tutkitut vaihtoehdot AM-valmistukselle – jauhepetimenetelmä	52
5.3	CNC-koneistuksen suunnitelmat	54
5.3.1	Takakolmion lopulliset suunnitelmat	55
5.3.2	Etukolmion lopulliset suunnitelmat	61
5.4	Valitut materiaalit ja ominaisuudet	64
6	Valmistusvaiheet CNC-koneistuksessa	66
6.1	Työstöarvot ja lähtötiedot koneistukseen	66
6.2	Työstöratojen suunnittelu	68
7	Yhteenveto	81
	Lähteet	82
	Liitteet	
	Liite 1: Loctite 9466 -liiman datataulukko	

Lyhenteet

- AM: *Additive Manufacturing*. Ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, tunnetaan myös nimellä 3D-tulostus. Valmistusmenetelmä, jossa osat luodaan lisäämällä materiaalia kerroksittain, kunnes osa on kokonaan valmis.
- CAD: *Computer-aided Design*. Tietokoneavusteinen suunnittelu, tietotekninen työkalu, jolla pystytään luomaan digitaaliset 2- ja 3D-mallit valmistusta ja simulointia varten.
- CAM: *Computer-aided Manufacturing*. Tietokoneavusteinen valmistus, työkalu, jolla digitaalisille CAD-malleille luodaan valmistusta edellyttävät toimenpiteet.
- CNC: *Computer Numerical Control*. Valmistuksessa käytettävien koneiden automaattiohjaustekniikka, jossa tietokone ohjaa koneen moottorien ja laitteiden toimintaa.
- DFMA: *Design for Manufacturing and Assembly*. Tuotteen suunnittelussa käytetty toimintamalli, jossa keskitytään tuotteen suunnitteluun valmistettavuuden ja kustannustehokkuuden näkökulmasta.
- FEA: *Finite Element Analysis*. Lujuusopin elementtimenetelmän analyysi, numeerinen tietokonepohjainen simulointimenetelmä, joka toimii työkaluna mallien lujuus- ja muissa simulointitarpeissa.
- FEA: *Finite Element Analysis*. Lujuusopin elementtimenetelmän analyysi, numeerinen tietokonepohjainen simulointimenetelmä, joka toimii työkaluna mallien lujuus- ja muissa simulointitarpeissa.
- IC: *Instant Center*. Piste, jonka ympärillä takakolmio pyörii.

IPW: *In-Process Workpiece*. Käytössä oleva työkappale. CAM-ohjelmassa aikaisemmista työstöoperaatioista jäljelle jäävä materiaali ja aihio, jota voidaan hyödyntää seuraavien operaatioiden aihiona.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia ja eri valmistusmenetelmiä täysjoustomaastopyörän valmistuksessa. Työssä valmistettiin täysjoustomaastopyörän prototyyppi jatkokehitystä varten. Tilaajana työssä toimi Metropolia Oy.

Nykyaikaisilla valmistusmenetelmillä pyörän runkorakenne voidaan toteuttaa innovatiivisilla tavoilla. Markkinoilla ovat yleistyneet varsinkin hybridirakenteiset rungot, joissa pyörän valmistuksessa on yhdistetty monia eri valmistusmenetelmiä. Erityisesti metallin ainetta lisäävän valmistuksen kustannuksien laskeminen on tuonut markkinoille lukuisia valmistajia, jotka panostavat tähän suuresti.

Työssä esitellään polkupyörän geometrian ja kinematiikan teoriaa sekä käydään lyhyesti läpi olemassa olevia jousitusjärjestelmiä. Näiden tietojen perusteella polkupyörän suunnittelu aloitetaan kinematiikan ja geometrian suunnittelusta. Koko polkupyörän suunnittelu- ja valmistusprosessi kuvataan vaiheittain ja ratkaisut perustellen.

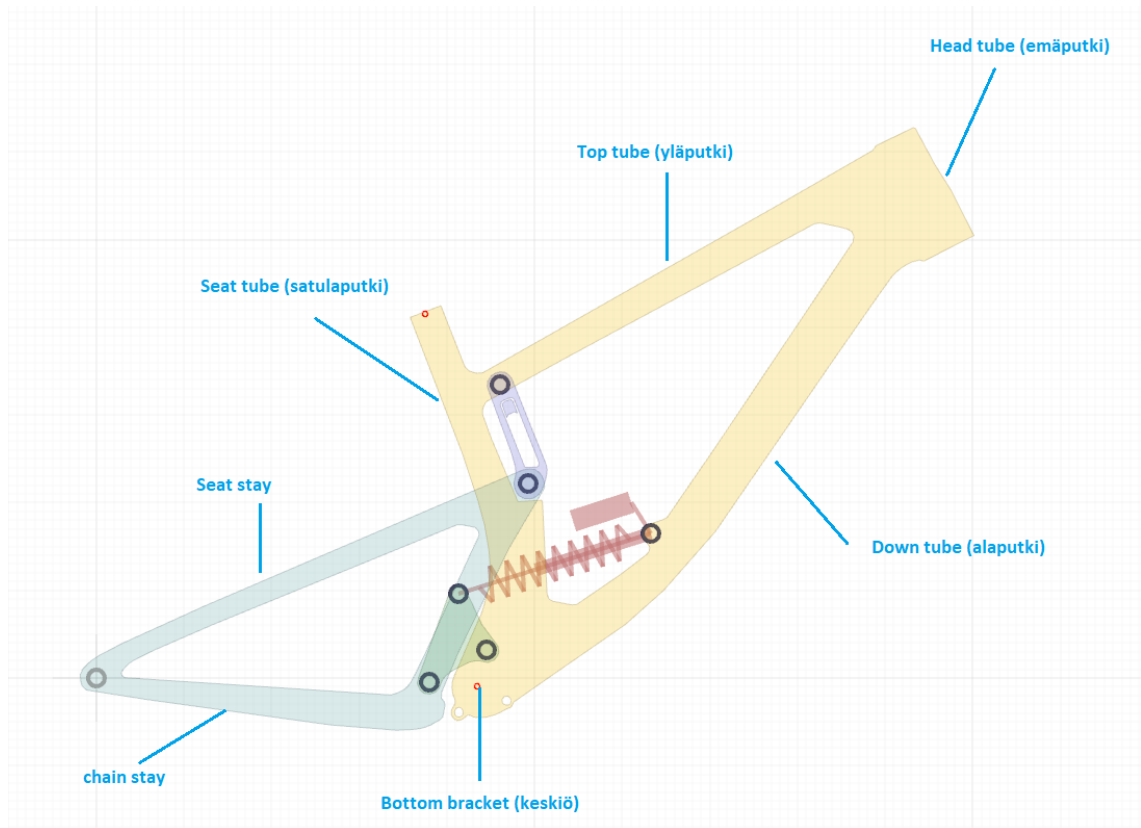
2 Maastopyörän geometria ja kinematiikka

Maastopyörät voidaan karkeasti jakaa neljään eri kategoriaan niiden käyttötarkoituksen perusteella. Näille kategorioille on vakiintunut termit cross-country-, trail-, enduro- ja downhillpyörä. Tässä taustatutkimuksessa keskitytään täysjousitettuihin enduropyöriin. Tutkimus koostuu teknisestä analyysistä, jossa perehdytään tarkemmin polkupyörän geometriaan ja kinematiikkaan sekä määrittellään siihen liittyviä tärkeitä parametreja. Olemassa olevat jousitusjärjestelmät ja niiden toimintaperiaate esitellään lyhyesti.

2.1 Geometria

Maastopyörän ajo-ominaisuudet määräytyvät pääosin sen geometrian ja jousituksen kinematiikan perusteella (Bulej ym. 2022: 3). Geometria on yksi polkupyörän tärkeimmistä ominaisuuksista. Se määrittelee pyörän muodon ja ulkonäön. Geometrian avulla saadaan myös alustava kuva pyörän koosta ja ajo-ominaisuuksista. (Stott 2020.) Internetissä on saatavilla lukuisia työkaluja, joilla voi vertailla eri pyörien geometrisia lukuja, ja geometria on usein kuluttajalle ratkaiseva tekijä ostopäätöksen kannalta.

Polkupyörän geometrian tarkastelua varten on tarpeellista esitellä tyypillisen maastopyörän rungon osat. Täysjoustomaastopyörän runko jaetaan kahteen osaan. Etukolmio koostuu ylä-, ala- ja satulaputkesta, jotka pyörän etupäässä yhdistyvät emäputkeen. Satula- ja alaputken liitoskohdassa sijaitsee keskiö, johon keskiölaakerit liitetään kampien pyörimisen mahdollistamiseksi. Takakolmio koostuu joko useasta pienemmästä tai yhdestä kiinteästä osasta riippuen jousitusjärjestelmän rakenteesta. Takakolmion alempi putki on nimeltään chain stay ja ylempi seat stay (SFS-EN 15532 2019: 12). Takakolmio on yhdistetty etukolmioon yhden vapausasteen jousitusjärjestelmällä. Jousitusjärjestelmä koostuu akseleista, laakereista, vipumekanismeista ja iskunvaimentimesta (Bulej ym. 2022: 3). Kuvassa 1 on näkyvissä rungon komponentit ja niitä vastaavat nimet.



Kuva 1. Rungon komponenttien nimet SFS-EN 15532 -standardin mukaan. Su-
luissa suomenkielinen vastine.

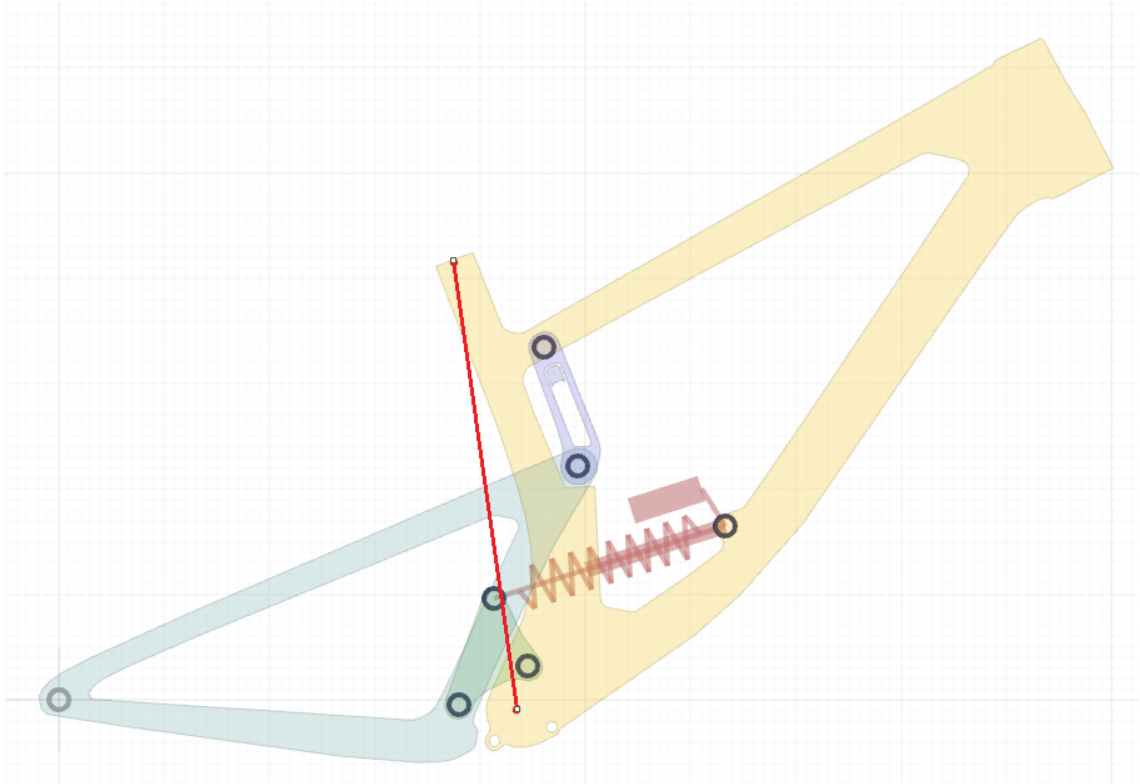
Seuraavissa luvuissa esitellään polkupyörän geometrian kannalta tärkeimmät mitat. Geometriaa määriteltäessä näitä termejä käytetään vain kyseisten elementtien pituuden määrittämiseen riippumatta valmistustavasta tai elementtien mahdollisesta rakenteesta.

2.1.1 Satulaputken pituus

Satulaputken pituus määrittää, mille korkeudelle satula voi pyörässä asettua. Eri valmistajien samankokoisissa rungoissa satulaputken pituus voi vaihdella. Satulaputken pituutta voidaan käyttää myös indikaattorina tarkemmasta runko-koosta, kun sitä verrataan myöhemmin esiteltävään reach-lukemaan. Vaikka satulaputken pituus ei suoranaisesti vaikuta pyörän ajo-ominaisuuksiin, se tulee kuitenkin ottaa huomioon rungon kokoa valittaessa. (Stott 2020.) Liian korkealle

jäävä satula voi häiritä ajamista huomattavasti seisovassa ajoasennossa, koska se rajoittaa pyörän liikkumista jalkojen välissä dynaamisissa ajo-tilanteissa.

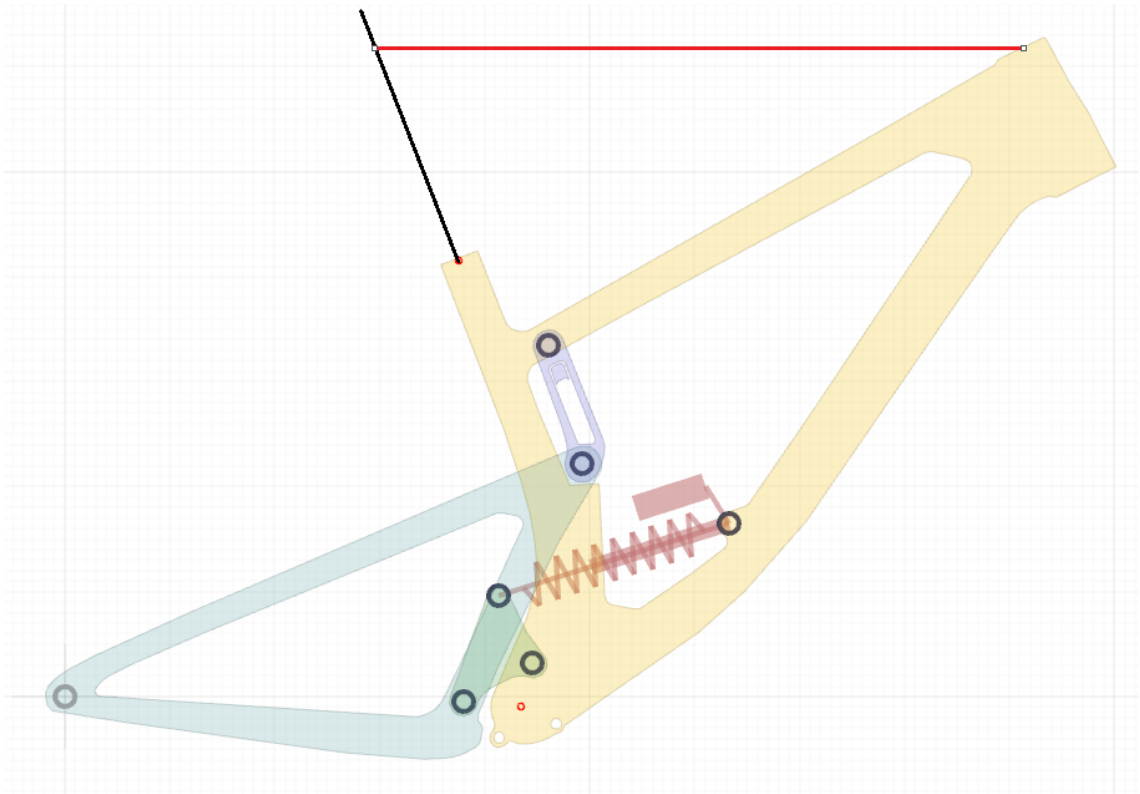
Satulaputken pituus määritellään keskiölaakerin keskikohdasta rungon satulaputken yläpäähän (kuva 2).



Kuva 2. Satulaputken pituus merkittynä punaisella viivalla.

2.1.2 Yläputken pituus

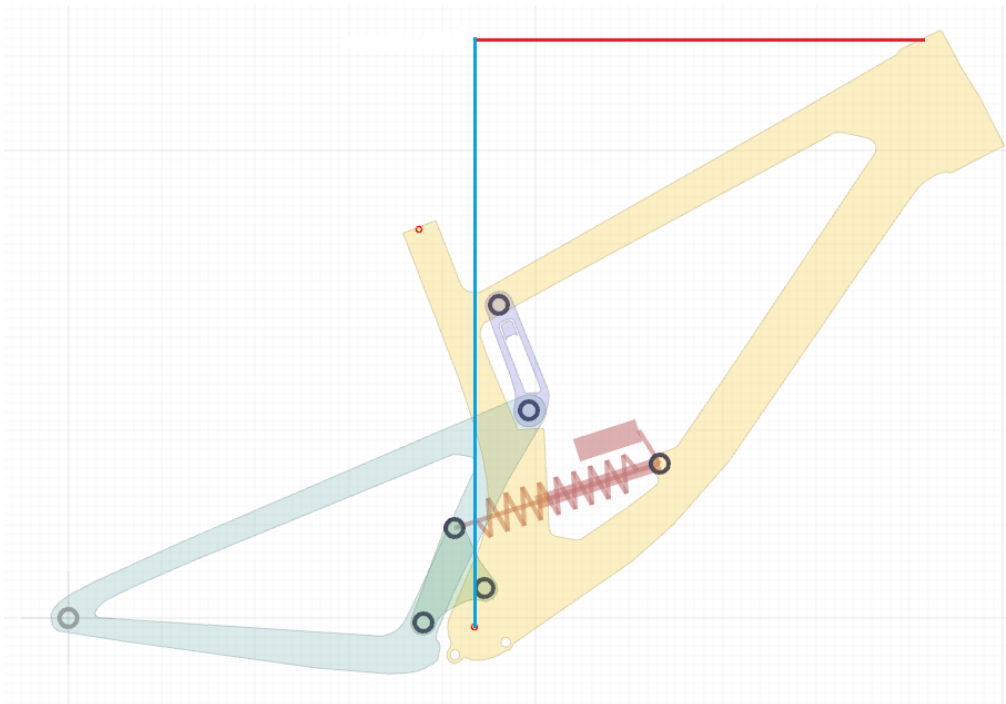
Yläputken pituudesta käytetään yleisesti efektiivistä yläputken pituutta, koska pelkkä putkensuuntainen pituus emäputkesta satulaputkeen ei ota huomioon satulaputken kulmaa ja satulan sijaintia ylös nostettuna. Efektiivinen yläputken pituus tarkoittaa vaakasuoraa etäisyyttä emäputken yläosasta fyysisen satulaputken risteyskohtaan (kuva 3). (Stott 2020.)



Kuva 3. Yläputken pituus merkittynä punaisella viivalla.

2.1.3 Reach ja stack

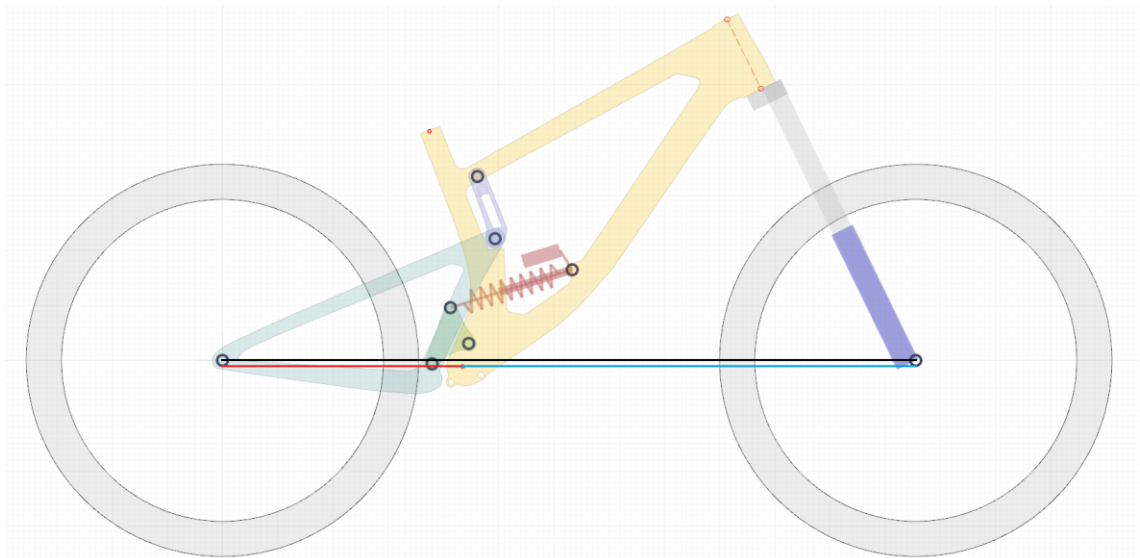
Kaikista polkupyörän mitoista reach kuvastaa parhaiten rungon kokoa. Sen avulla voidaan päätellä, kuinka pitkältä pyörä tuntuu ajoasennossa. Yhdistettynä satulakulmaan voidaan myös tehdä johtopäätöksiä ohjaamon tilavuudesta poljettaessa. Reach tarkoittaa vaakasuuntaista mitta emäputken yläosasta keskiölaakerin keskelle. (Stott 2020.) Vastaavasti stack tarkoittaa samojen pisteiden välistä pystysuuntaista mitta. Yleisesti markkinoilla olevia pyöriä vertailaan vain niiden reachin perusteella, mutta on tärkeää ottaa huomioon myös pyörän stack-korkeus (Kuva 4.)



Kuva 4. Polkupyörän rungon reach merkittynä punaisella viivalla ja stack merkittynä sinisellä viivalla.

2.1.4 Akseliväli ja sen jakauma

Akseliväli tarkoittaa yksinkertaisesti etu- ja takarenaan akselien välistä etäisyyttä. Akselivälistä ei suoranaisesti pysty päättelemään pyörän ajo-ominaisuuksia, koska suurempi tekijä ajo-ominaisuuksien kannalta on etu- ja takakolmion suhde. Näiden suhde voi vaihdella merkittävästi ilman sen vaikutusta akseliväliin. On kuitenkin ajateltu, että akseliväliltään pidempi pyörä olisi vakaampi ajettava. Luonnollisesti pidemmän akselivälin seurauksena pyörän kääntösäde ja ketteryys heikkenevät. (Stott 2020.) Kuvassa 5 etuakselin ja keskiön välinen etäisyys on merkitty sinisellä viivalla ja taka-akselin ja keskiön etäisyys punaisella.



Kuva 5. Etu- ja takakolmion suhde. Etukolmion pituus sinisellä ja takakolmion punaisella viivalla.

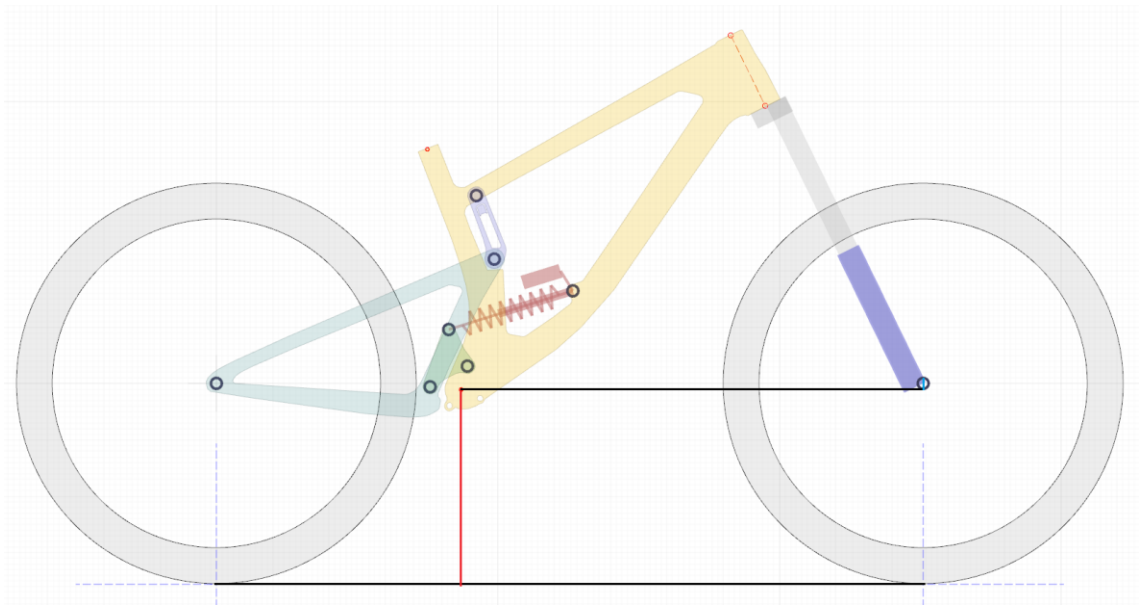
Akselivälin jakauma eli etu- ja takakolmion suhde vaikuttaa pyörän paino- ja kaumaan. Tyypillisesti pyörissä, jotka on suunniteltu alamäkiajoon, etukolmiot ovat pidempiä, koska painopistettä halutaan siirtää taaksepäin. (Stott 2020.) Takakolmion pituudesta käytetään nimeä chain stay (SFS-EN 15532 2019).

Etu- ja takakolmion suhde määritellään siten, että mitat otetaan akseleista keskiölaakerin keskelle.

2.1.5 Keskiön korkeus ja pudotus

Keskiön korkeus maanpinnasta vaikuttaa suoraan kuljettajan painopisteen sijaintiin. Mitä korkeammalla painopiste sijaitsee, sitä enemmän maastonmuodot ja jarrutukset vaikuttavat kuljettajan painopisteen siirtymään. Tämän takia on ajateltu, että samoin kuin pitkä akseliväli myös matala keskiön korkeus tarkoittaisi vakaampaa pyörää. Keskiön korkeuteen vaikuttaa suuresti myös kuljettajan dynaaminen ajoasento ja pyörän jousituksen painauma. Tämän takia pyörät, joissa on pitempi joustomatka, täytyy suunnitella suuremmalla keskiön korkeudella. Toisaalta liian matala keskiö aiheuttaa ongelmia kampien osuessa maastonmuotoihin ja esteisiin. On tärkeä huomioida se, että pyörän ja kuljettajan

painopiste on ajoasennossa yli metrin korkeudessa maanpinnasta, jolloin keskiötä laskemalla saavutetaan hyvin pieni prosentuaalinen muutos painopisteen sijaintiin. Voidaan siis ajatella, että tärkeämpi ominaisuus tämän parametrin kohdalla on riittävä maavara. (Stott 2020.) Keskiön korkeudesta puhuttaessa yleisesti mainitaan myös keskiön pudotus suhteessa renkaiden akseleihin (kuva 6).



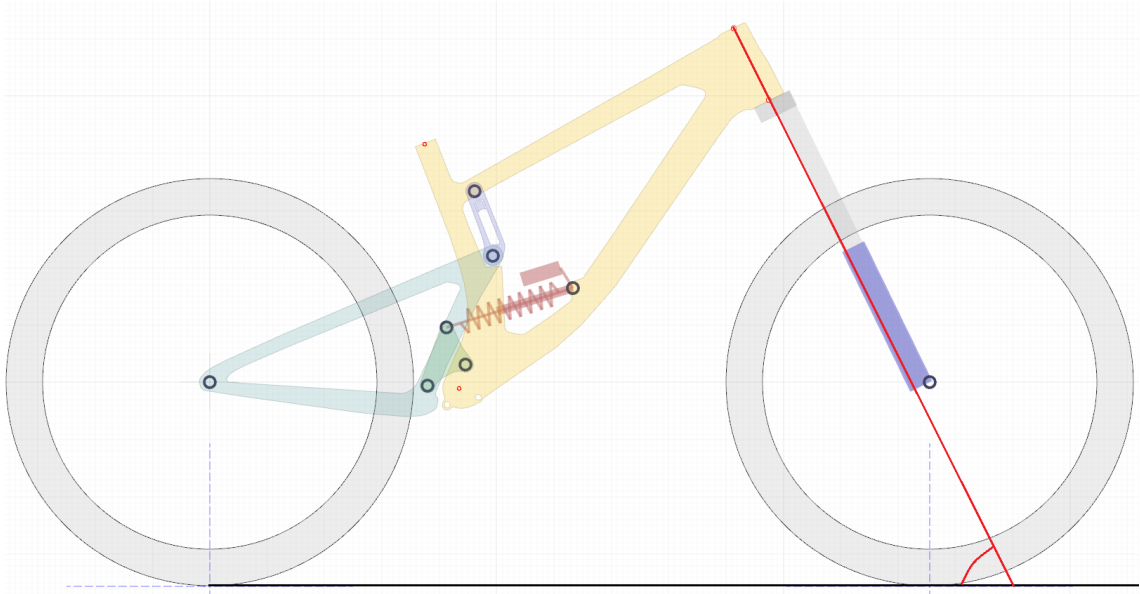
Kuva 6. Keskiön korkeus merkittynä punaisella viivalla. Keskiön pudotus etuakselin vertikaalinen etäisyys keskiöstä.

Tämän vaikutusta on kuitenkin pidetty toissijaisena verrattuna itse keskiön korkeuteen (Stott 2020).

2.1.6 Keulakulma

Keulakulmalla on suuri vaikutus pyörän ajo-ominaisuuksiin, koska se vaikuttaa suoraan kuljettajan painojakaumaan pyörässä. Loivempi keulakulma pidentää pyörän etuosaa, joka vähentää painoa eturenkaalta. Etujousitus toimii keulakulman suuntaisesti, joten esimerkiksi 170 mm:n etujousitus 64 asteen

keulakulmalla tuottaa pystysuuntaista joustoa 153 mm. Tästä syystä pyörät suunnitellaan usein siten, että etujousituksen matka on pidempi kuin takajousituksen. Keulakulma tarkoittaa emäputken kulmaa suhteessa vaakatasoon (kuva 7). (Stott 2020).



Kuva 7. Keulakulman määrittely.

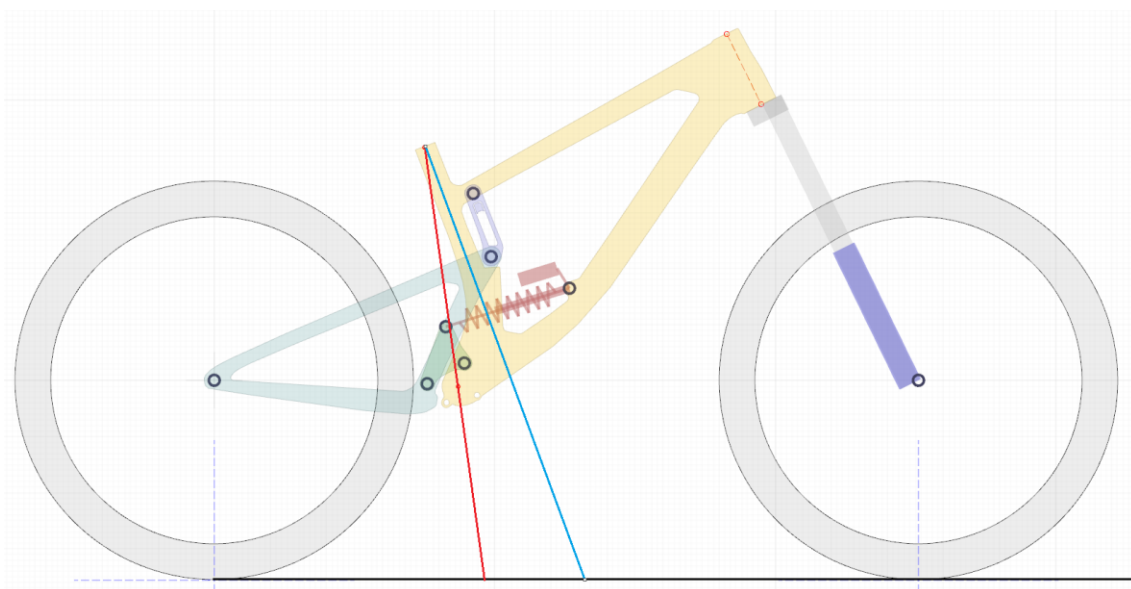
Keulakulmalla on myös suora vaikutus jättöön. Jättö tarkoittaa ohjaukselin suuntaisesti piirretyyn viivan etäisyyttä eturenkaan kontaktipisteestä. Jättöön vaikuttaa keulakulman lisäksi rengaskoko ja joustohaarukan offset, joka tarkoittaa etuakselin etäisyyttä ohjaukselistasta. Loiva keulakulma, suurempi rengaskoko ja offsetin lisääminen nostavat jätön määrää. Suurempi jättö tarkoittaa vakaampaa mutta hitaampaa ohjauksvastetta. Maastopyörän osalta sopivana jätön määränä pidetään 80–100 mm:n jättöä. (Lin 2022.)

2.1.7 Satulaputken todellinen ja efektiivinen kulma

Satulaputken kulmalla tarkoitetaan pyörän fyysisen satulaputken kulmaa suhteessa vaakatasoon. Tämä mittaustapa toimii monilla pyörätyypeillä, koska satulaputki koostuu usein yhdestä suorasta rakenteesta, joka yhdistyy keskiöön. Täysjoustopyörissä on kuitenkin jouduttu miettimään satulaputken rakennetta

uusiksi. Takarenkkaan ja jousitusosien vaatima tilantarve joustomatkan aikana on pakottanut siirtämään satulaputkea kauemmaksi takarenkkaasta ja tästä syystä on otettu käyttöön satulaputken kulman mittariksi todellinen ja efektiivinen kulma. (Roberts 2020.)

Efektiivinen satulakulma tarkoittaa virtuaalisen viivan ja vaakatason välistä kulmaa. Virtuaalinen viiva muodostuu fyysisen satulaputken ja emäputken yläosan (stack) risteyskohdasta keskiöön. (Roberts 2020.) Efektiivinen satulakulma voi olla vaikeasti hahmotettava käsite, mutta visuaalisesti esitettynä se on helposti ymmärrettävissä kuvasta 8.



Kuva 8. Satulaputken kulma osoitettuna sinisellä viivalla ja efektiivinen satulaputken kulma punaisella viivalla.

Efektiivisen satulakulman käytössä on kuitenkin omat ongelmansa. Suurin osa kuljettajista pitää polkiessaan satulaa emäputken yläosaa korkeammalla. Tästä syystä efektiivistä satulakulmaa on alettu mitata arvioidun satulankorkeuden perusteella. Usein valmistajat eivät kuitenkaan ilmoita käytettyä satulankorkeutta, joten satulakulmien vertailu eri valmistajien välillä on haastavaa. (Roberts 2020.)

Täysjoustopyörässä satulakulma loivenee jousituksen painuessa kasaan. Tästä syystä niiden satulakulmat ovat usein paljon jyrkempiä kuin muiden pyörien. Tätäkin arvoa olisi siis tarpeen tarkastella myös pyörän dynaamisessa tilassa eli painaumassa.

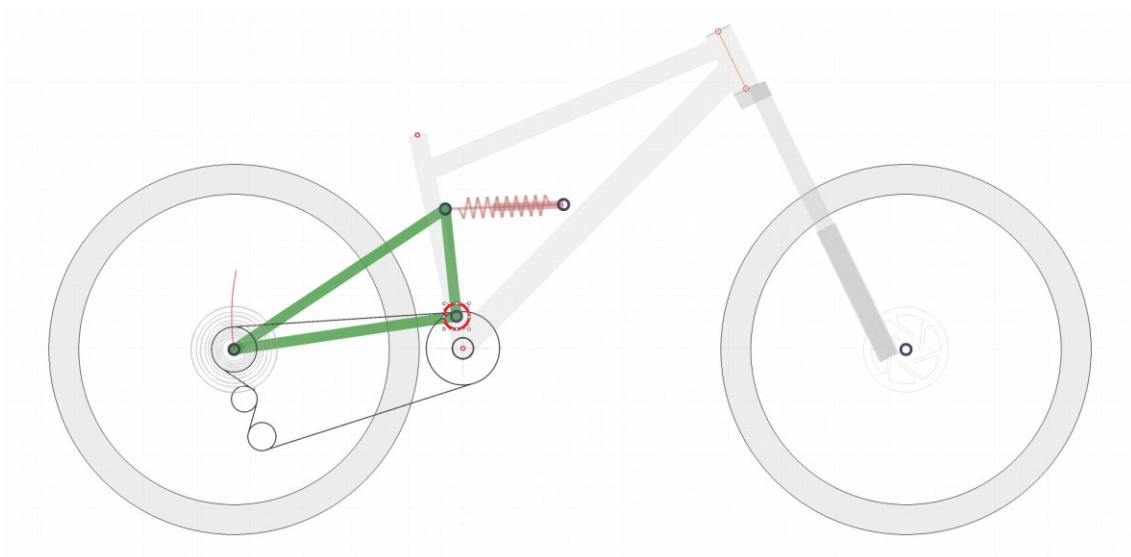
2.2 Kinematiikka

Jousitusjärjestelmän kinemaattiseen analyysiin liittyy geometriaan pohjautuvia parametreja, jotka esitellään tässä luvussa. Nämä parametrit toimivat valintaperusteena jousitusjärjestelmän ominaisuuksia valittaessa, ja niitä käytetään tässä raportissa kuvaamaan opinnäytetyössä käytettyjä suunnitteluperusteita sekä kuvailemaan olemassa olevien tuotteiden ominaisuuksia.

2.2.1 Instant center

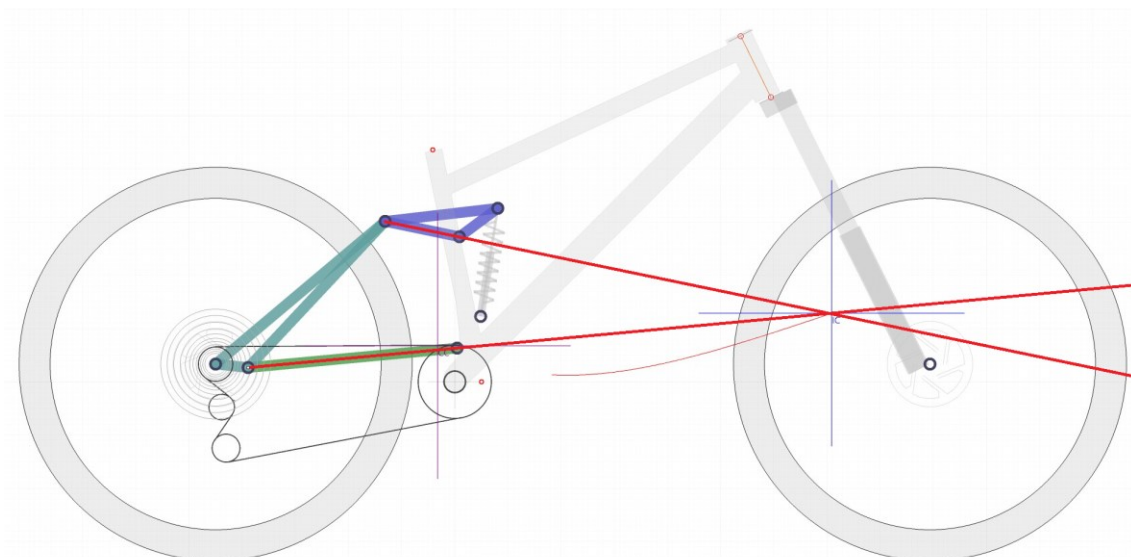
Instant center on piste, jonka ympärillä takakolmion kaikki osat liikkuvat joustomatkan aikana. Takakolmion kaikki pisteet liikkuvat tangentiaalisesti kyseisen pisteen ja IC:n väliin muodostuvan viivan ympärillä. (Android ym. 2021: 3.)

Single pivot -jousitusjärjestelmissä IC sijaitsee aina etukolmion ja takakolmion välisessä nivelessä (Mäennenä 2020). Koska nivelpiste on kiinteä osa etukolmiota, tässä jousitusjärjestelmässä taka-akseli liikkuu ympyrän kaariliikkeessä nivelpisteen ympärillä. Kuvassa 9 taka-akselin liikerata on visualisoitu punaisella viivalla ja IC ympyröity punaisella.



Kuva 9. Single pivot -jousitus Linkage X3 -suunnitteluohjelmassa.

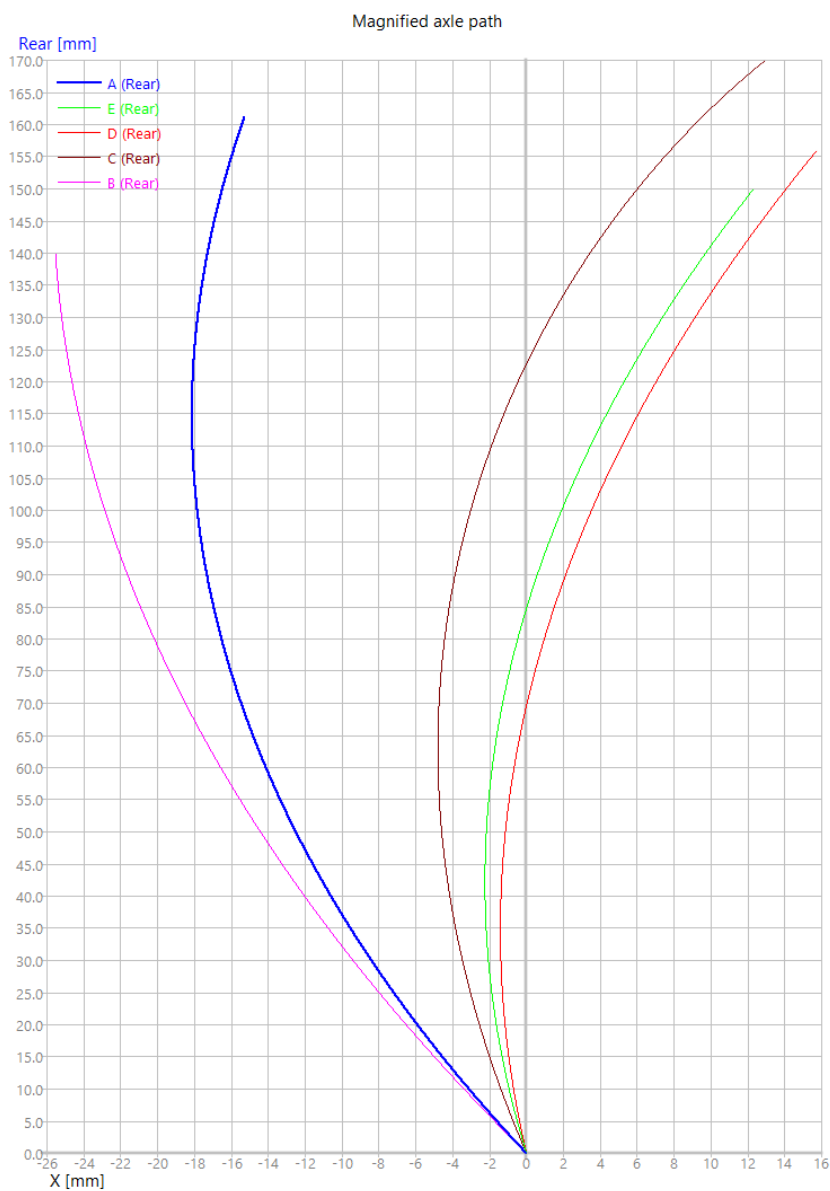
Suuressa osassa enduropyöristä on käytössä jousitusjärjestelmä, jossa käytetään vipumekanismia muokkaamaan jousituksen toimintaa. Näissä järjestelmissä IC määräytyy vipumekanismien nivelpisteiden perusteella ja se pystyy liikkumaan joustomatkan aikana. Kuvasta 10 selviää, miten IC määritellään vipumekanismin nivelpisteiden perusteella horst link -jousituksessa (Linkage x3).



Kuva 10. Horst link -jousituksen IC:n graafinen määrittely ja sen liikerata joustomatkan aikana merkittynä punaisella viivalla.

2.2.2 Axle path

Axle path eli taka-akselin liikerata kuvaa akselin liikerataa joustomatkan aikana. Yleisesti taka-akselin liikerata on ympyrän kaari edellä mainitun IC:n ympärillä, mutta monimutkaiset vipumeکانismit mahdollistavat sen manipuloinnin lähes kaikkiin muotoihin (kuva 11). (Androus ym. 2021: 4.)



Kuva 11. Viiden eri jousitusjärjestelmän taka-akselin vaakasuuntainen liikerata.

Tärkeä mittari liikerataa kuvailtaessa on sen vaakasuuntainen liike suhteessa rungon keskiöön. Tämän etäisyyden muutos vaikuttaa suuresti myöhemmin esiteltävän anti-squatin ja anti-risen määrään. Yleisesti on myös ajateltu, että taaksepäin suuntautunut liikerata saa aikaan paremman herkkyyden iskunvaimentimelle, koska eteenpäin suuntautuvassa liikkeessä mahdolliset maaston muodot pyrkivät liikuttamaan takarengasta taakse (Aston 2018), verrattuna normaalin, hieman eteenpäin suuntautuneeseen liikerataan, joka pyrkii liikuttamaan takarengasta vain enemmän iskun suuntaan. Tämä suunnitteluperiaate on selkeästi nähtävissä pyörissä, joissa päänivel on asetettu etukolmiossa huomattavasti korkeammalle, jonka avulla saavutetaan taaksepäin suuntautuva akselin liikerata.

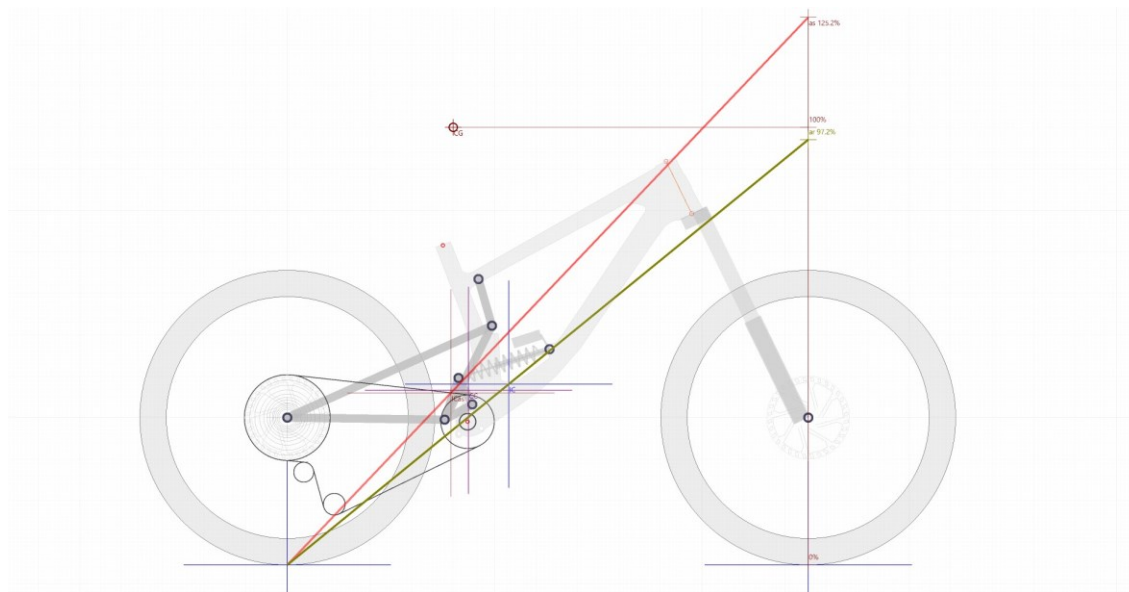
2.2.3 Anti-squat

Eteenpäin kiihtyvä liike aiheuttaa kuljettajan painopisteen siirtymisen taakse, minkä takia jousitus pyrkii puristumaan kasaan. Tyypillisesti jousitusjärjestelmät suunnitellaan siten, että polkemisesta aiheutuva ketjuvoima pyrkii vastustamaan tätä liikettä (McLeay 2012). Anti-squatin tarkoituksena on määrittää järjestelmän kykyä vastustaa iskunvaimentimen kasaan puristumista. Polkupyörissä tähän on kiinnitetty erityisesti huomiota, koska polkemisesta aiheutuva syklinen liike aiheuttaa pyörään keinumisliikkeen. (Androus 2021: 6.)

Anti-squat määritellään prosentteina, jolloin 100 %:n anti-squat tarkoittaa teoreettisesti sitä, että polkemisesta aiheutuvat voimat on täysin kumottu (Mäenänen 2020). Tyypillisesti jousitusjärjestelmissä käytetään kuitenkin yli 100 %:n arvoja, mikä teoriassa tarkoittaisi, että polkiessa iskunvaimennin keventyisi painumisen sijaan. Käytännössä kuljettajan painopiste ja sen siirtymä on vaikea määritellä, ja näihin arvoihin on päädytty kokeellisen ajotuntuman perusteella.

Anti-squat lasketaan graafisesti ja sen määrittämiseen tarvitaan IC, ketjulinja, systeemin painopiste ja renkaiden kontaktipisteet. Jousitusjärjestelmän anti-squat-arvo määritellään etsimällä taka-akselin ja IC:n välisen viivan ja ketjulinjan risteyskohta. Sen jälkeen piirretään viiva taka-akselin kontaktipisteestä

äskän määrittelyyn risteyskohdan kautta ja sitä verrataan etuakselin pystysuuntaisen ja painopisteen vaakasuuntaisen viivan muodostamaan referenssipisteeseen. Anti-squat-arvoon vaikuttaa siis suuresti painopisteen arvioitu sijainti sekä vaihteiston välityssuhde, ja sen arvo muuttuu koko jousitusmatkan ajan. (Androus 2021: 6.) Esimerkki anti-squatin graafisesta määritelmästä näkyy kuvassa 12.



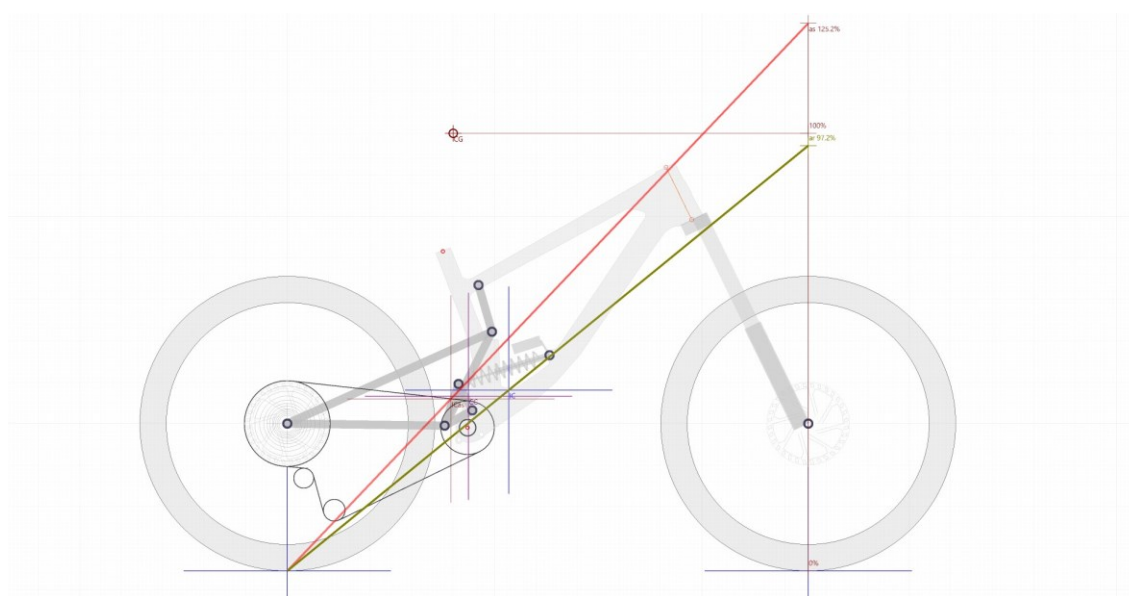
Kuva 12. Anti-squatin graafinen määrittelmä.

On olemassa muutamia harvinaisempia jousitusjärjestelmiä, joihin tämä graafinen määrittelmä ei päde (McLeay 2012).

2.2.4 Anti-rise

Kuten anti-squat myös anti-rise kuvaa dynaamisesta ajotilanteesta aiheutuvaa kuljettajan painopisteen siirtymää ja jousitusjärjestelmän kykyä vastustaa siitä aiheutuvaa reaktiota. Jarruttaessa kuljettajan painopiste siirtyy eteenpäin, jolloin takapyörä kevenee ja jousitus pyrkii nousemaan kuormituksen pienentyessä. Suurin osa jousitusjärjestelmistä suunnitellaan siten, että jarrutusvoimat pyrkivät painamaan jousitusta kasaan vastustaakseen jarrutusvoimasta aiheutuvaa kevenemistä. (McLeay 2012.)

Myös anti-rise määritellään graafisesti IC:n, takarenkkaan kontaktipisteen, etuakselin sijainnin ja painopisteen avulla (kuva 13). Vastaavasti myös anti-rise määritellään prosenteissa ja 100 %:n anti-rise-arvo teoreettisesti kumoaa jarrutuksesta aiheutuvan voiman iskunvaimentimelle. Täytyy kuitenkin huomioida, että kyseessä on vain teoreettinen malli ja todellisuudessa käytetyt arvot ja niiden muuttuminen joustomatkan aikana ovat tarkoin suojeltuja salaisuuksia pyörävalmistajien keskuudessa (Benedict 2018).



Kuva 13. Anti-risen graafinen määritelmä

Monissa järjestelmissä jarrusatula on kiinteä osa takakolmiota, jolloin ainoa keino vaikuttaa anti-rise-arvoon ovat nivelpisteiden sijainnit. Tämän takia jousituksen suunnittelu onkin yleensä kompromissi eri parametrien välillä. On olemassa monimutkaisempia ratkaisuja, joilla jarrusatula on eristetty siten, että sen liikerata ei ole IC:n kanssa sama.

2.2.5 Pedal kickback

Pedal kickback eli kampien takaisinisku johtuu taka-akselin ja keskiön välisen etäisyyden kasvamisesta, joka aiheuttaa ketjuun jännitystä. Ketjulinjan pituuden muutoksesta aiheutunut voima pyrkii pyörittämään kampia taaksepäin (kuva 14)

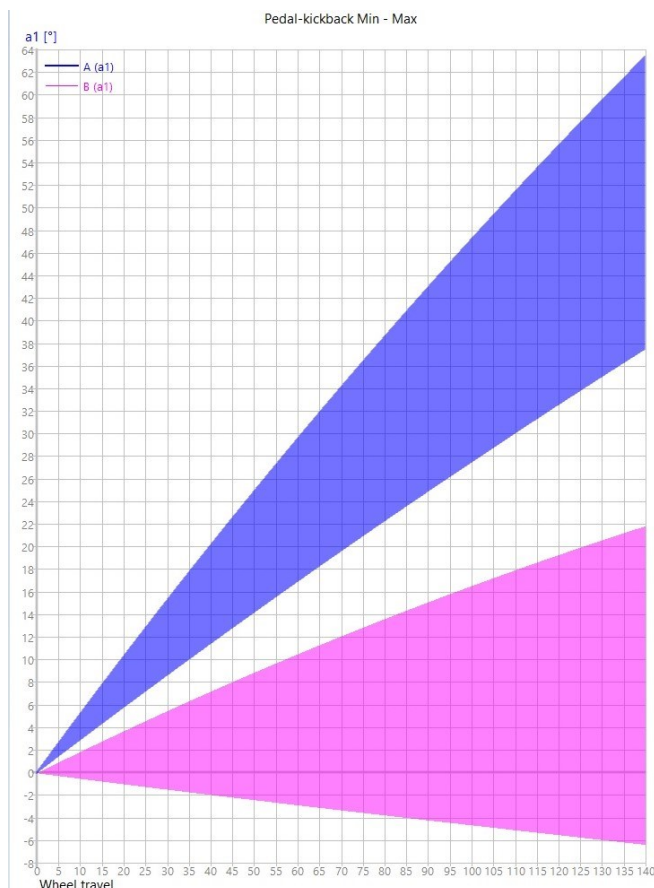
ja välittyy polkimien kautta kuljettajan jalkoihin (Androus 2021: 5). Pedal kick-back on suoraan verrannollinen anti-squat-arvoon ja suunnittelu on tyypillisesti kompromissi näiden kahden arvon välillä. Pedal kickback mitataan kampien pyörähdyksen kulmana ja se saadaan laskettua suunnitteluohjelmilla (Mäenänen 2020).



Kuva 14. Pedal kickback staattisessa ja maksimikuormituksessa.

Ketjulinjan pituuden kasvaminen voidaan minimoida erilaisilla ratkaisuilla. High pivot -rungoissa käytetty lisäratas, joka kierrättää ketjun rungon nivelpisteen kautta, on erinomainen esimerkki tästä. Kyseinen rakenne on lähes pakollinen

pedal kickbackin hallitsemiseksi, jos nivelpiste sijaitsee korkealla suhteessa rungon keskiöön. (Aston 2018.) Kuvassa 15 on esitettyä saman jousitusjärjestelmän pedal kickback -arvot ketju nivelpisteen kautta kierrätettynä ja ilman. Kuvaajassa on x-akselilla taka-akselin vertikaalinen joustomatka ja y-akselilla pedal kickback asteina eturattaalta. Koska ketjuun kohdistuva voima riippuu vaihteiston välityssuhteesta, kuvaaja on koko vaihteiston välityssuhteen alueelta.

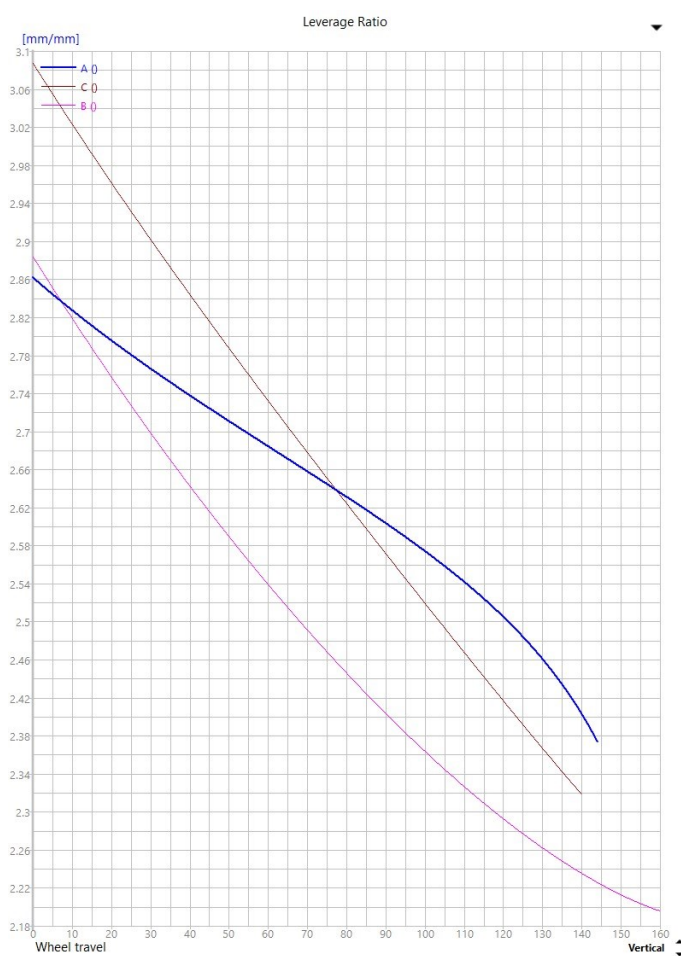


Kuva 15. Pedal kickback, liila kuvaaja lisärattaalla ja sininen ilman.

2.2.6 Leverage ratio

Leverage ratio eli vipusuhte kuvaava taka-akselin liikettä suhteessa iskunvaimentimen männän liikkeeseen. Vipusuhte muuttuu koko joustomatkan ajan, ja se tyypillisesti vaihtelee 3:1:n ja 2:1:n välillä tarkoittaen sitä, että iskunvaimentimen jokaista millimetriä kohden taka-akseli liikkuu 2–3 millimetriä. (Mäennenä 2020.)

Tyypillisesti jousitusjärjestelmät suunnitellaan siten, että vipusuhteen muutos joustomatkan funktiona on progressiivinen. Syynä tähän on se, että jousituksen alkuherkkyys pyritään säilyttämään, mutta jousitukseen luodaan vastustusta kovien iskujen aiheuttamaan pohjaan lyöntiin. Progressiivisuudella on siis käytännössä sama vaikutus kuin jousivakion nostamisella (Androus 2021: 8). Kuvassa 16 on esiteltyä kolmen eri valmistajan jousitusten vipusuhteet.



Kuva 16. Kolmen eri valmistajan jousitusjärjestelmän vipusuhteet joustomatkan funktiona.

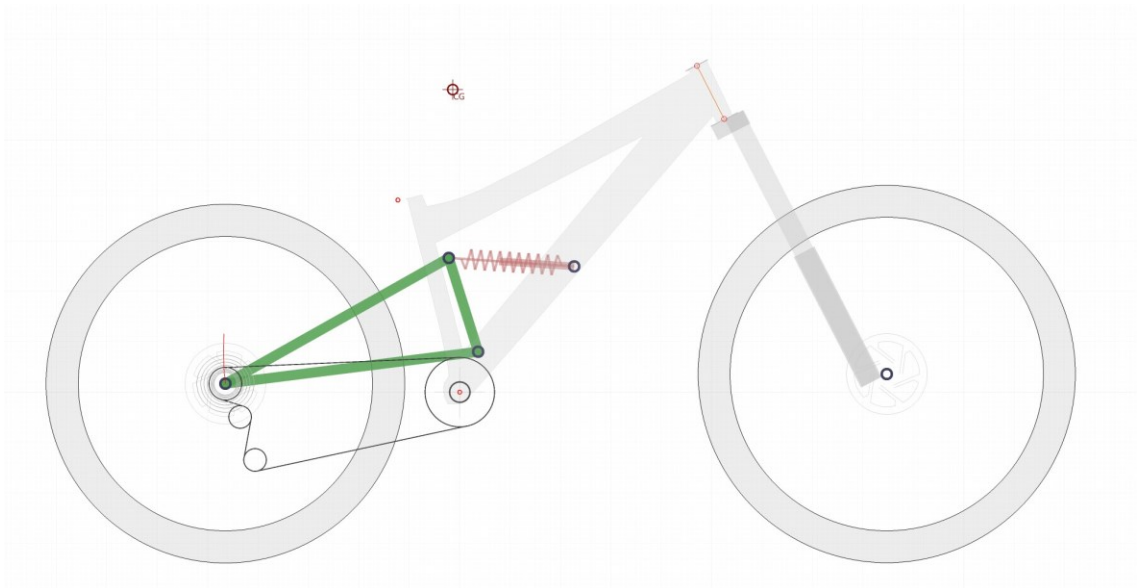
2.3 Jousitusjärjestelmät

Suurin osa markkinoilla olevista jousitusjärjestelmistä perustuu seuraavaksi esiteltävään viiteen eri kategoriaan. Vaikka valmistajien käyttämiä markkinointi termejä on olemassa loputtomasti, lähes kaikki jousitusjärjestelmät ovat kuitenkin perusteeltaan yksinkertaisia ja perustuvat usein samaan rakenteeseen. On olemassa myös joitain erikoisempia ratkaisuja, jotka jäävät näiden kategorioiden ulkopuolelle.

Kaikki jousitusjärjestelmät pyrkivät samaan tavoitteeseen: progressiiviseen ja keskialueelta kantavaan, mutta alkuherkkään jousitukseen. Polkemisesta ja jarrutuksesta syntyvät vaikutukset minimoiden. (Mäennenä 2020)

2.3.1 Single pivot

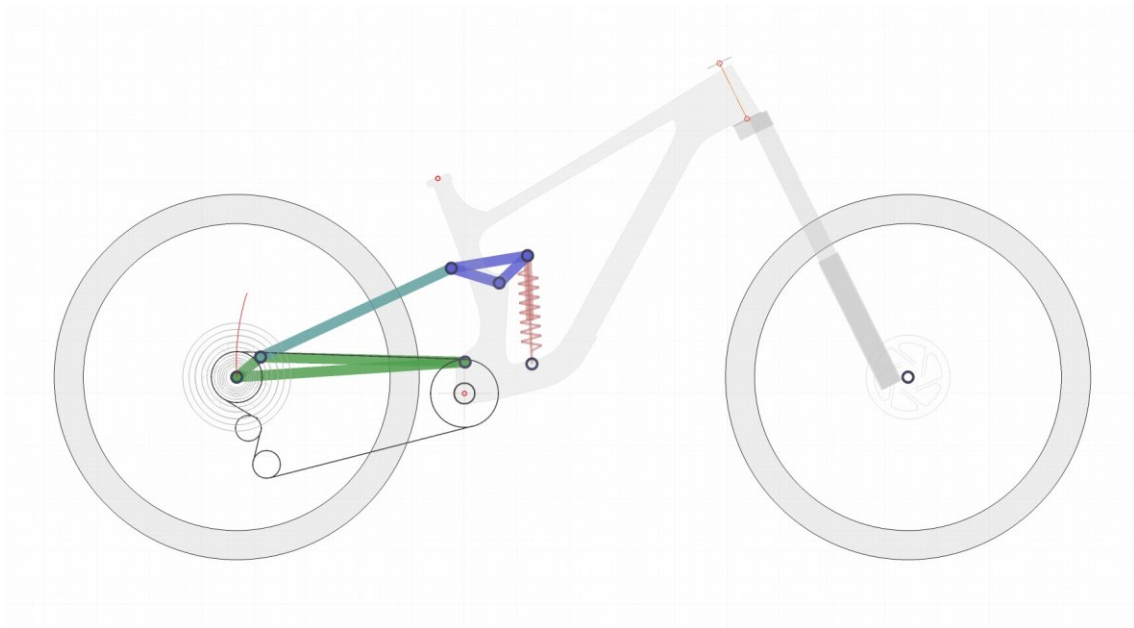
Single pivot (kuva 17) on jousitusjärjestelmä yksinkertaisin, koska siinä on vain yksi nivelpiste takakolmion ja etukolmion välillä (Mäennenä 2020). Tak akseli liikkuu ympyrän kaarella nivelpisteen ympärillä ja iskunvaimennin on yleensä kiinnitetty suoraan takakolmioon. Tämän jousitusjärjestelmän etuna on huoltovarmuus ja helppo valmistettavuus, minkä takia se onkin usein harrastelijoiden suosima jousitusratkaisu. Single pivot -jousitus on lineaarinen, mikä tarkoittaa sitä, että sen vipusuhde pysyy lähes vakiona koko joustomatkan ajan. Tätä on pidetty sen heikkoutena, koska se ei tarjoa suuria säätömahdollisuuksia eikä tukea jousituksen pohjaamista vastaan (Stott 2018).



Kuva 17. Single pivot -jousitus.

2.3.2 Vipumekanismilla toteutettu single pivot

Parempien säätömahdollisuuksien saavuttamiseksi single pivot -jousitus voidaan toteuttaa käyttäen vipumekanismia. Taka-akseli on kuitenkin yhdistetty vastaavasti osana kiinteää systeemiä nivelpisteeseen. Kuten normaalissa single pivotissa myös tässä taka-akselin liikerata on ympyrän kaari nivelpisteen ympärillä. Vipumekanismin käyttö mahdollistaa vipusuhteen säätämisen, jonka avulla jousitukseen voidaan luoda usein toivottua progressiivisuutta sen pohjaamisen estämiseksi. Tyypillisesti vipumekanismi sijaitsee takakolmion ylemmän osan (seat stay) päädyssä (kuva 18). (Gonzales-Larionova 2020; Stott 2018.)

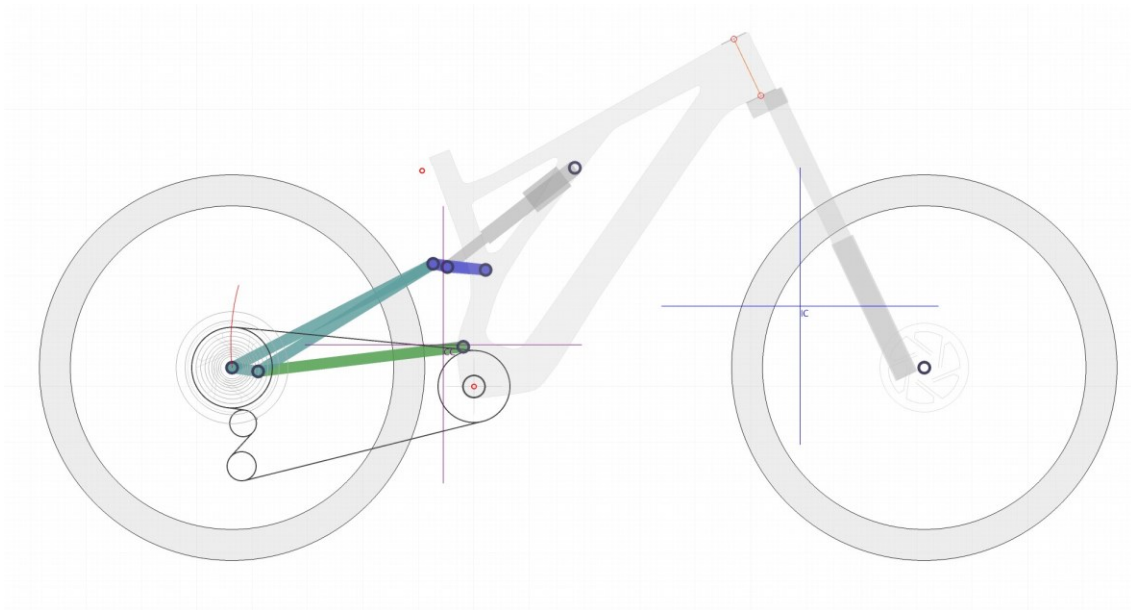


Kuva 18. Single pivot toteutettuna vipumekanismilla.

2.3.3 Nelilinkku (horst link)

Horst link -jousituksessa (kuva 19) taka-akseli ei ole yhdistettynä kiinteästi pääniveleen kuten aikaisemmissa jousituksissa. Pääniveleen ja taka-akselin väliin on lisätty nivel, jonka avulla jousituksen ominaisuuksia ja taka-akselin liikeraata voidaan paremmin säätää. (Mäennenä 2020.) Lisätyn nivelen avulla jousitusjärjestelmä pystytään optimoimaan siten, että anti-rise- ja anti-squat-ilmiöt pyritään minimoimaan. Horst link -jousitus onkin yleisesti tuttu sen korkeasta anti-squat-arvosta eli erinomaisesta polkutehokkuudesta. Taka-akselin liikerata ei horst link -jousituksessa ole pääniveleen ympärillä vaan hetkellisen nivelpisteen (IC). (Gonzales-Larionova 2020.)

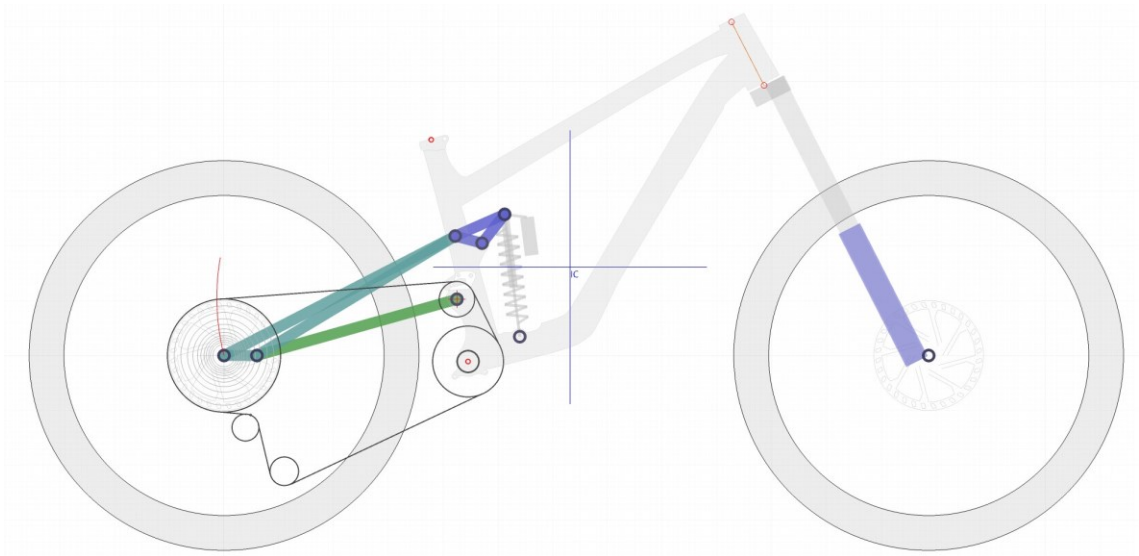
Horst link -jousitus on hiljattain vapautunut Specialized Bicyclesin patenttisuo-
jasta, ja se on yleistynyt nopeaa vauhtia pyörämarkkinoilla.



Kuva 19. Horst link -jousitus.

2.3.4 High pivot

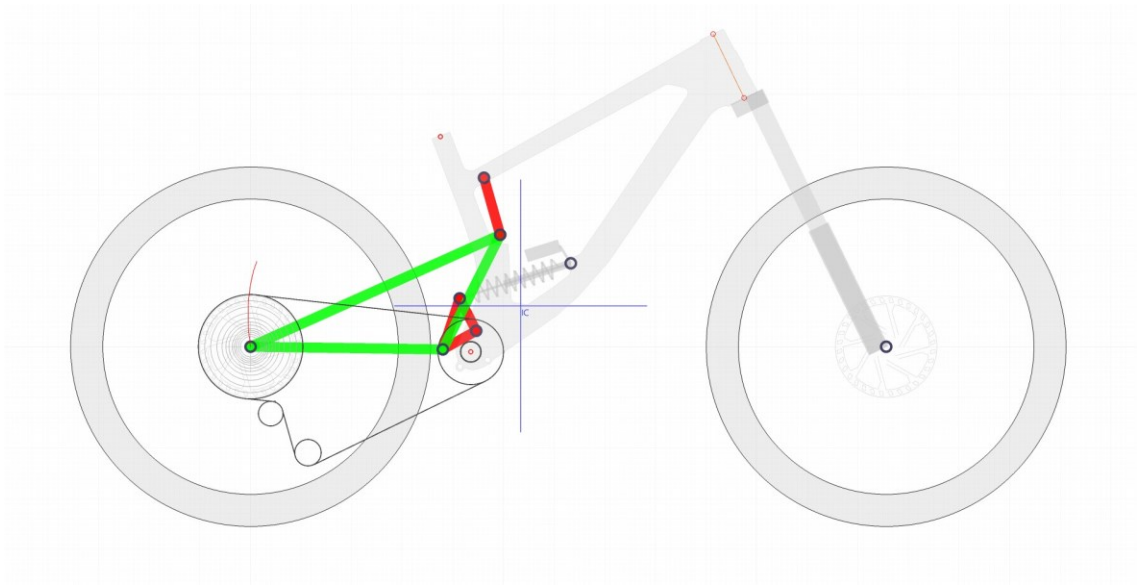
High pivot -jousituksessa (kuva 20) päänivel sijaitsee huomattavasti ketjulinjan yläpuolella. Päänivelen korkealla sijainnilla pystytään paremmin muokkaamaan taka-akselin liikerataa. Suurimmassa osassa jousitusjärjestelmistä taka-akseli liikkuu joustomatkan aikana eteenpäin, mutta korkea päänivelen sijainti mahdollistaa taaksepäin suuntautuvan liikeradan. Tämä mahdollistaa takarenkaan liikumisen pois päin mahdollisista töyssyistä ja maastonmuodoista. Korkea nivelpisteen sijainti aiheuttaa suuren määrän pedal kickbackia, joten high pivot -jousituksissa ketju täytyy kierrättää päänivelen kautta ketjun pituuden hallitsemiseksi. (Mäennenä 2020.) Joissain tapauksissa ketju kierrätetään läheltä pääniveltä mutta kuitenkin epäkeskeisesti sen kanssa. Tämä mahdollistaa anti-squat- ja anti-rise-arvojen hienosäädön. Päänivelen kanssa epäkeskeinen lisäratas on kuitenkin patenttisuojeittu.



Kuva 20. High pivot -jousitus.

2.3.5 Twin link (Virtual Pivot Point)

Twin link, josta käytetään usein nimeä virtual pivot point saa nimensä joustomatkan aikana liikkuvasta hetkellisestä nivelpisteestä. Twin link -jousituksessa jäykkä takakolmio on yhdistetty etukolmioon kahdella lyhyellä vipumekanismilla, jotka on korostettu punaisella kuvassa 21. Vipumekanismit voivat kiertyä samaan tai vastakkaisiin suuntiin, mikä mahdollistaa erinomaiset säätömahdollisuudet jousituksen toimintaan. Toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin horst link -jousituksessa, mutta vipumekanismit ovat huomattavasti lyhyemmät. Niiden sijainti etukolmion läheisyydessä tai sen sisällä voivat aiheuttavat haasteita suunnittelussa. (Mäennenä 2020; Moilanen 2021: 36.)



Kuva 21. Twin Link -jousitus.

2.3.6 Muut

Edellä esiteltyjen jousitusten ulkopuolelta löytyy markkinoilta myös muita ratkaisuja, mutta ne ovat erittäin harvinaisia. Varmaankin tunnetuimpia näistä on Yeti bicyclesin käyttämä switch infinity -jousitusjärjestelmä. Switch infinity perustuu twin link -rakenteeseen, mutta toinen vipumekanismista on korvattu pystysuuntaisella liukuputkella (kuva 22). Nivelen liikesuunta joustomatkan aikana vaihtelee, jonka ansiosta jousituksella saavutetaan uniikkeja ominaisuuksia.

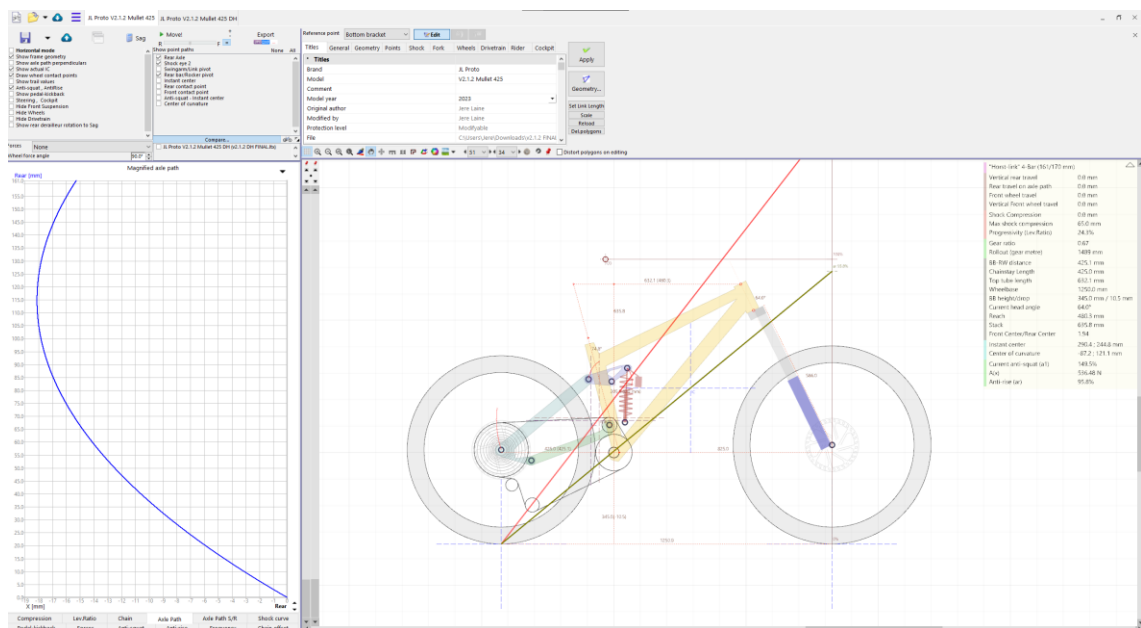


Kuva 22. Yeti Switch Infinity -jousitus.

3 Geometrian -ja kinematiikan suunnittelu

Geometrian -ja kinematiikan suunnittelu aloitettiin määrittelemällä vaatimuslista pyörän halutuista ominaisuuksista. Geometrian osalta luvut perustuivat pitkälti omaan ajokokemukseen eri pyörävalmistajien pyörillä. Kinematiikan osalta toiveena oli lähes sama kuin kaikilla valmistajilla. Oma versio alkuherkstä, keski-alueen tuen tarjoavasta loppupään progressiivisesta jousituksesta.

Kinematiikan suunnittelu toteutettiin Linkage X3 -suunnitteluohjelmalla, joka on tarkoitettu erityisesti polkupyörien kinematiikan simulointiin. Ohjelmassa on 2D-suunnittelutila, jossa mekaniikien visuaalisen simuloinnin lisäksi ohjelma luo automaattisesti kuvaajat kaikista polkupyörän suunnittelussa yleisesti tarkastelluista kinematiikan arvoista (kuva 23). Tämän ansiosta suunnittelu oli huomattavasti tehokkaampaa ja helpompaa kuin yleisillä CAD-ohjelmistoilla.



Kuva 23. Kuvankaappaus Linkage X3 -suunnitteluohjelman käyttöliittymästä.

3.1 Vaatimuslista

Tärkeimmäksi ominaisuudeksi kirjattiin jousituksen kyky säilyttää geometriansa ja pysyä aktiivisena jarrutusten aikana. Joustomatkaa tulisi olla jousituksessa

sen verran, että se mahdollistaa ajovirheitä, mutta kuitenkin pääpaino on pitää pyörä polkutehokkaana. Nämä ominaisuudet ovat erittäin tärkeitä varsinkin endurokilpailuissa, joissa usein reittejä ajetaan ”sokkona” ja siirtymävaiheet kuljetaan polkien. Takapään joustomatkan tavoitealueeksi asetettiin 140–160 mm. Kinematiikan suunnittelussa kiinnitettiin erityisesti huomiota siihen, että kaikki arvot pyritään optimoimaan pyörän dynaamisessa ajoasennossa eli painaamassa.

Kinematiikan säädettävyyden osalta toiveiksi kirjattiin progressiivisuuden säätö tukemaan mahdollisesti ilma- ja jousivaimenninta. Mahdollisuus käyttää takarenkaana 27,5 -ja 29 tuuman rengasta ilman sen suurta vaikutusta ajogeometriaan ei pidetty pakollisena, mutta se kirjattiin listaan toiveena, jos runkorakenne sen sallii. Lisäksi toivottiin mahdollisuutta käyttää kahta iskunpituudeltaan eri mittaista iskunvaimenninta takarengaankin joustomatkan lisäämiseksi.

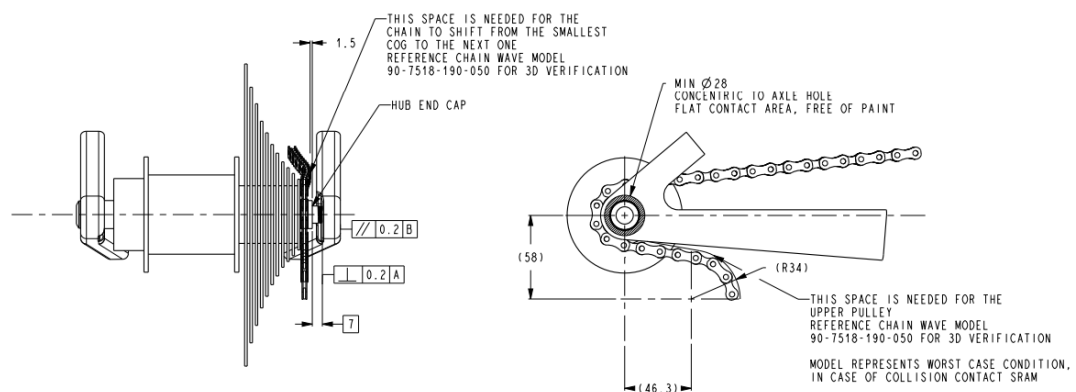
Vaatimuslistan perusteella oli nopeasti selvillä, että nämä ominaisuudet vaativat single pivot -jousitusta monimutkaisempaa ratkaisua. Tämän perusteella konseptointi aloitettiin horst link -ja twin link -jousituksista kuitenkin poissulke-matta vipumekanismilla varustettua single pivot- jousitusta.

3.2 Konseptoinnin tulokset ja valinta

Konseptoinnin aikana tutustuttiin lukuisiin eri variaatioihin horst link- ja twin link -jousituksista. Kuitenkin hieman yllätykseksi high pivot -jousituksien konseptit vastasivat vaatimuslistan ominaisuuksia parhaiten. Erityisesti horst link -jousitukset, joissa päänivelen sijainti on kohtalaisen korkealla, erottuivat joukosta, ja tämän perusteella kehitys rajattiin tähän jousitusjärjestelmään. Lopullinen valintapäätös tehtiin vertailemalla jousituksen ominaisuuksia, yksinkertaisuutta ja sen sopivuutta eri valmistusmenetelmille.

3.3 Valitun kinematiikan ja geometrian esittely

Kinematiikan osalta lopulliseksi valinnaksi päätyi high pivot horst link -jousitus. Kinematiikkaa on vahvasti inspiroinut saksalaisen Kavenz brändin VHP 16 -pyörä, jonka suunnittelija ja yrityksen omistaja Giacomo Großhagenbrock on ystävällisesti vastailut kysymyksiin ja toimittanut akselit ja kiinnitysosat projektia varten. Hieman erikoisemman muihin markkinoilla oleviin ratkaisuihin verrattuna tästä tekee sen kohtalaisen matalalla sijaitseva horst link pivot. Matala sijainti aiheutti kuitenkin ongelmia suunnittelun kannalta, koska takavaihtajan vaatima tila sen ääriasennossa asettuu lähelle tätä aluetta (kuva 24). Ongelma huomattiin hyvin nopeasti 3D-suunnittelun alkuvaiheessa ja pisteen sijaintia muutettiin mahdollisimman vähän kinematiikkaan vaikuttaen. Myöskään päänivelen sijainti ei ole tyypilliseen high pivot -jousitukseen verrattuna niin korkealla vaan asettuu normaalin ja korkean väliin.



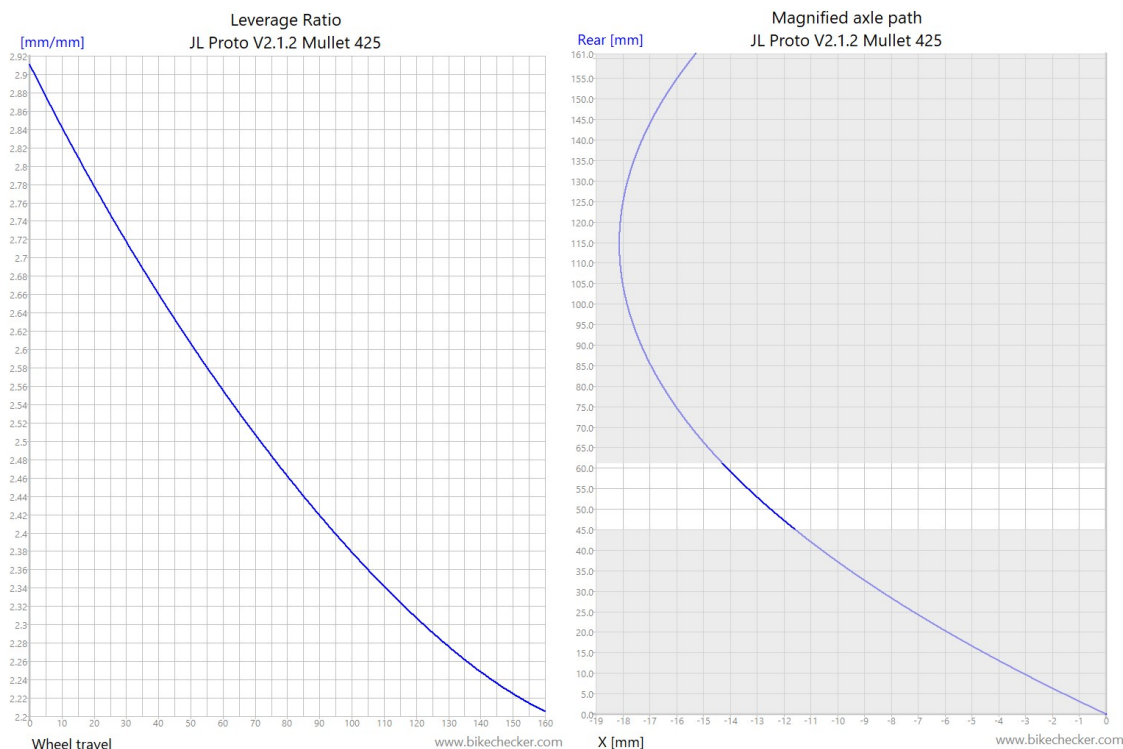
Kuva 24. Komponenttivalmistaja SRAMin ilmoittama tilavaatimus takavaihtajalle (SRAM 2021: 1.)

High pivot -jousituksissa taka-akselin liikerata on tyypillisesti taaksepäin suuntautunut, mikä tarkoittaa sitä, että joustomatkan aikana pyörä pitenee. Moni markkinoilla olevista high pivot -pyöristä on kuitenkin suunniteltu käyttäen samoja takakolmion mittoja kuin jousituksissa, joissa pituus lyhenee. Yksi tapa lähestyä chain stayn pituutta high pivot -jousituksessa on tarkastella sen mittaa

dynaamisessa ajotilanteessa ja lyhentää sitä niin, että se painaumassa vastaa normaalin pyörän takakolmion mitta. Tämä perusteella pyörän chain stayn pituudeksi staattisessa tilassa valittiin 425 mm, joka on huomattavasti lyhyempi kuin markkinoilla olevissa malleissa. Joissain konsepteissa käytettiin vielä lyhyempää mitta, mutta on otettava huomioon komponenttivalmistajien asettama 419 mm:n alaraja vaihteiston toimivuuden kannalta. Modulaarisen rakenteen ansiosta chain stayn pituutta voidaan vaihtaa eripituisilla dropouteilla.

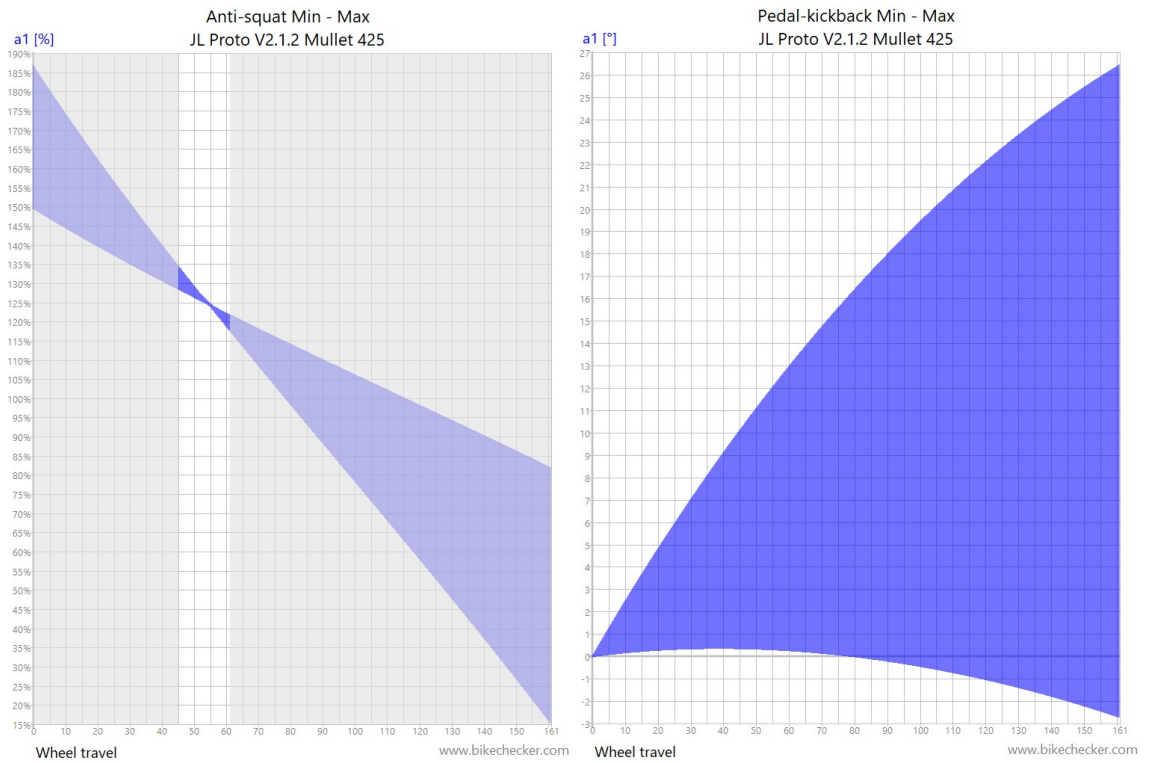
Iskunvaimentimen kiinnityspituudeksi määräytyi 215 mm ja iskunpituudeksi 65 mm, mikä tuottaa takapäähän 161 mm joustomatkan. Jousituksen vipusuhte (kuva 25) on alkuherkkä, ja sen pitäisi tuottaa kohtalainen keskialueen tuki. Loppupään tuki vipusuhteen osalta ei ole niin suuri kuin joissain järjestelmissä, mutta monissa iskunvaimentimissa on käytössä jonkinlainen hydraulinen vaimennuspiiri iskun loppupäässä. Vipusuhteen progressiivisuus on 24,3 %, mikä mahdollistaa myös lineaarisen kierrejousen käytön.

Taka-akselin liikerata on taaksepäin suuntautunut, minkä ansiosta se liikkuu pois päin maastonmuodoista. Liikerata on kuitenkin normaalia high pivot -jousitusta huomattavasti maltillisempi. Chain stayn pituus on optimoitu siten, että noin 30 % painaumassa se on 438 mm, joka vastaa modernien enduropyörien tyypillisiä pituuksia. Takarenkaana käytetään 27,5-tuumaista rengasta. Pisimmillään taka-akselin liikerata käy vaakasuunnassa 18 mm:n päässä lähtöpis- teestään (kuva 25).



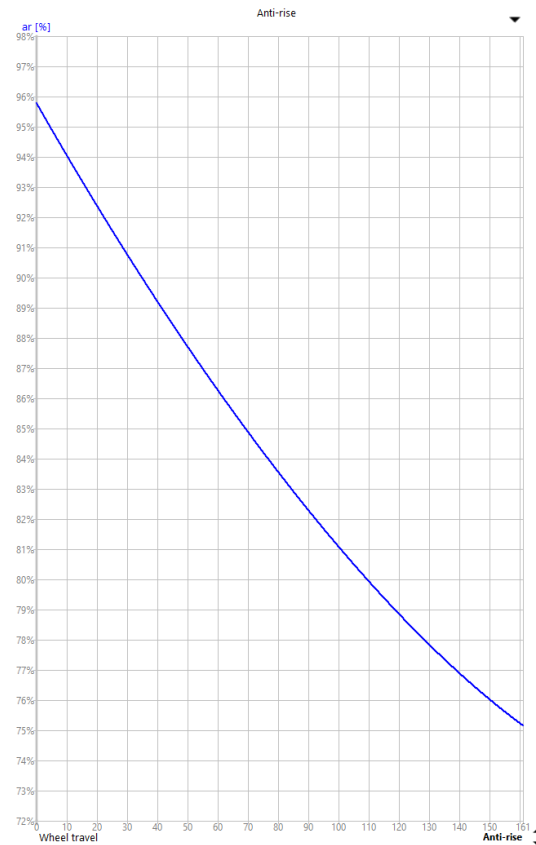
Kuva 25. Vipusuhde ja taka-akselin liikerata.

Anti-squat-arvo on voitu pitää korkeana, koska ketju kierrätetään päänivelel kautta lisärattaalla, jonka ansiosta korkeasta anti-squatista johtuva pedal kick back on saatu pidettyä hallinnassa. Anti-squat on optimoitu siten, että painaumassa se on sama koko vaihteiston välityssuhteen alueelta (kuva 26). Arvot on laskettu käyttäen 16-hampaista ratasta päänivelessä. Pedal kickback on laskevan anti-squat-käyrän ansiosta saatu pudotettua niin pieneksi, että vaihteilla, joilla tyypillisesti lasketaan mäkeä alas, se on lähes nolla astetta tai jopa negatiivinen.



Kuva 26. Anti-squat- ja pedal kickback -kuvaajat koko vaihteiston välityssuhteen alueelta.

Taaksepäin suuntautuva taka-akselin liikerata aiheuttaa epäedulliset anti-rise-arvot ja pyrkii painamaan jousitusta kasaan. Kuitenkin maltillisen akselin liikerradan ansiosta anti-rise-arvo pysyy kohtalaisen tasaisena ja neutraalina (kuva 27).



Kuva 27. Anti-rise arvon kuvaaja.

Kinematiikka tarkasteltaessa on huomioitava, että syötetty arvioitu painopisteen sijainti vaikuttaa joihinkin arvoihin huomattavasti. Tästä syystä esimerkiksi anti-squat- ja anti-rise-arvot eivät välttämättä ole vertailukelpoisia suoraan kaikkien valmistajien ilmoittamien arvojen kanssa. Tässä suunnittelussa painopisteen sijaintina käytettiin vaakatasossa 30 mm keskiön takana ja pystysuunnassa 730 mm keskiön yläpuolella.

Runkogeometrian osilta päädyttiin seuraaviin lukuihin. Reach 480 mm ja stack 636 mm. Keulakulma 64 astetta ja satulaputken efektiivinen kulma 77 astetta. Akseliväli 1250 mm ja chain stayn pituus 425 mm.

4 Valmistusmenetelmien vertailu

Valmistusmenetelmän valintaan liittyy useita seikkoja, kuten kustannukset, valmistettavuus, suunnittelun rajat ja aikarajoitteet. Polkupyörävalmistajat ja sarjatuotantoon tähtäävät yritykset pyrkivät valitsemaan sopivimman vaihtoehdon kustannusten ja trendien pohjalta. Muita kriteerejä saattavat olla painoluokat, käyttötarkoitukset ja monimutkaiset geometriat.

Markkinoilla on alettu suosimaan monimateriaalirakenteisia runkoja, joissa hyödynnetään useita valmistusmenetelmiä. Polkupyörän runkorakenteen valmistusmenetelmät kehittyvät uusien innovaatioiden myötä.

4.1 Rungon valmistus putkirakenteista

Pyörän rungon materiaalina voidaan käyttää mm. terästä, alumiinia ja titaania. Putkiprofiilin jäykkyys sopii erinomaisesti polkupyörän rungoille ja sen valmistus on maailmanlaajuista ja hyvin standardisoitua. Rungon valmistukseen valmistetaan jigi, johon esivalmistellut putket liitetään hitsaamista varten. Jigi voidaan rakentaa lähes mistä vain materiaalista, kunhan se kestää hitsaamisessa syntyvän lämmön. Rungon geometriatarkat pisteet lukitaan hitsaamisen ajaksi, jotta lämmön muodonmuutosta ei tapahtuisi paikoissa, joissa sitä ei sallita. On myös mahdollista hitsata runko ilman jigiä, mutta rungon jälkikäsittelyn määrä lisääntyy.

Putkien esivalmisteluun liittyy putken taittaminen, reikien loveaminen sekä pinnan siistiminen hitsaamista varten. Metalliputkien seinämävahvuutta ja pyörän painoa saadaan pienennettyä muotoilemalla putkigeometriat vastustamaan voimia paikoissa, joissa vaaditaan kestävyyttä. Putkien muotoilulla, kuten vesimuovauksella, saadaan putkeen haluttu kestävämpi ja näyttävämpi muoto.

Hyvin optimoidut prosessit minimoivat lämmöntuoton metallissa, jolloin jälkikäsittelyn määrä pienenee entisestään. Jälkikäsittelyyn liittyy reikien avartamista laakerisovitteille, kierteitystä ja jopa rungon suoristamista hitsauksen tuottaman

lämmön takia. Alumiinista hitsatut rungot vaativat jälkikäsittelyssä myös lämpökäsittelyn, jonka pyrkimyksenä on lievittää syntyneitä jännityksiä hitsaus- saumoissa ja nostaa alumiinin lujuusominaisuuksia. Jotkin alumiinit ovat valmiiksi lämpökäsiteltyjä, joten jälkikäsittelyprosessiin perehtyminen on kannattavaa rungon kestämissä kannalta.

4.2 Valmistus hiilikuitukomposiitista

Hiilikuitukomposiitin ominaisuudet, kuten sen vetolujuus, massa sekä ulkonäkö, täyttävät lähes kaikki rungon ominaisuuksilta vaaditut kriteerit (Willard 2016). Yhä yleistymässä oleva valmistusmenetelmä on vallannut pyörämarkkinat keski- ja korkean hintaluokan pyörissä. Usein samaa polkupyörämallia saa matalammassa hintaluokassa metallista valmistettuna.

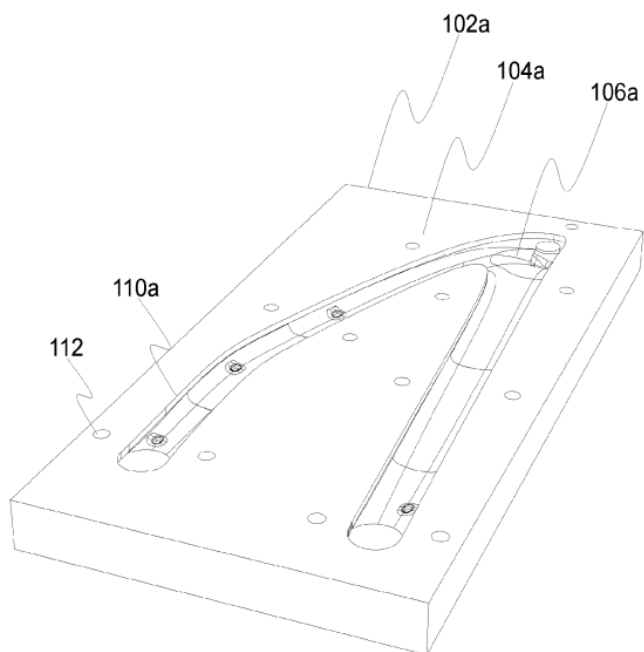
Hiilikuiturungon valmistus alkaa muotin rakentamisesta. Runko rakennetaan usein kahdesta puolikkaasta, jolloin muottikin on kaksiosainen. Muotti voi olla metallista valettu tai koneistettu käänteinen malli rungosta. Valmistaja määrittelee rungolle lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, joista saadaan johdettua kuitukerrosien määrä ja suuntaus. Hiilikuidun ominaisuuksiin liittyy sen erinomainen kestävyys vedossa, jolloin kuitukerrostien suuntaus vaikuttaa rungon jäykkyyteen ja kestävyyskykyyn. Kuitukerrokset asetetaan muottiin ja liimataan epoksiliimalla päällekkäin. Rungonpuolikkaat yhdistetään ja muotti asetetaan vakuumiin, jolloin hiilikuidun ja liiman välistä saadaan poistettua sinne jumittunut ilma. Vakuumi auttaa myös epoksiliiman asettumisessa. Runko poistetaan muotista, minkä jälkeen epoksi kovetetaan lämpökäsittelyssä, joka usein toteutetaan asettamalla runko uuniin. Lopuksi pinta käsitellään hiomalla epätäydellisyydet, minkä jälkeen runko pintakäsitellään.

Hiilikuidun ominaisuuksien tarkka määrittäminen teoreettisesti on haastavaa. Rungon valmistuksessa joudutaan rakentamaan prototyyppirunkoja mekaanisiin testauksiin, joista syntyy lisäkustannuksia. Valmistusmenetelmään liittyy useita haasteita sekä monimutkaisen teoreettisen suunnittelun ja fyysisen toteutuksen kannalta.

4.3 CNC-koneistetun rungon valmistus

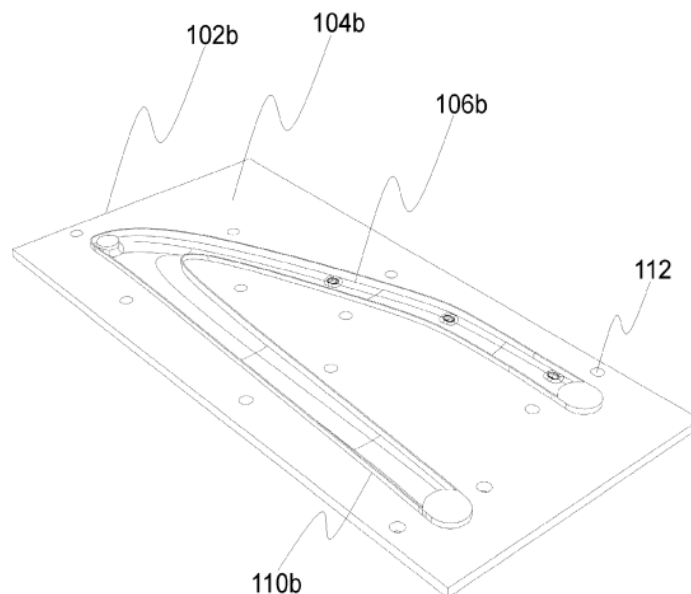
Valmistusmenetelmässä pyörän rungon koko profiili on valmistettu metallista koneistamalla. Painon pudottamista varten runko valmistetaan kahdesta puolikkaasta, joka mahdollistaa sisäprofiilin koneistuksen, sekä rakenteen tukemisen sisältäpäin. Puolikkaiden koneistusvaiheessa voidaan käyttää samaa koneistusohjelmaa, joka sallii samanaikaisen koneistuksen ja yhteiset nollapistekoordinaatit, jolla minimoidaan asetusaikoja tuotannossa ja nostetaan tuottavuutta. Menetelmä onkin kannattavaa vain, jos prosessi on kilpailukykyinen muiden valmistusmenetelmien kanssa suhteessa sen antamiin hyötyihin. Valmiiksi koneistetut puolikkaat liimataan epoksiliimalla yhteen ja liitosta voidaan vahvistaa ruuviliitoksilla. Liittämisen jälkeen runkorakenne voi käydä vielä koneistuksessa, jolla varmistetaan, että vaaditut toleranssit kohtaavat sovitteissa.

Suomalainen polkupyöräteollisuuden edelläkävijä Pole Bicycles on hakenut patentin menetelmälle (Kokkonen 2021), jossa takakolmion ja rungon puolikkaiden sisäpinnat koneistetaan ja liimataan yhteen. Liimauksen jälkeen kappaleen ulkomuoto koneistetaan. Kuvat 28–31 havainnollistavat valmistusmenetelmää.



Kuva 28. Pole Bicyclesin ensimmäisen takakolmion puolikkaan sisäpuolen koneistus.

Koneistaessa monimuotoista geometriaa kasvaa yhden puolikkaan aihio jo suureksi. Laatuvirheen sattuessa kokonainen tuote-erä voidaan hylätä, mikä voi tuottaa suuria ajallisia ja taloudellisia tappioita.



Kuva 29. Pole Bicyclesin toisen takakolmion puolikkaan sisäpuolen koneistus.

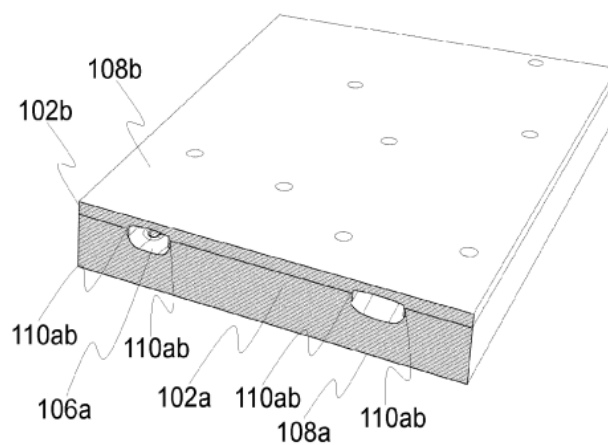
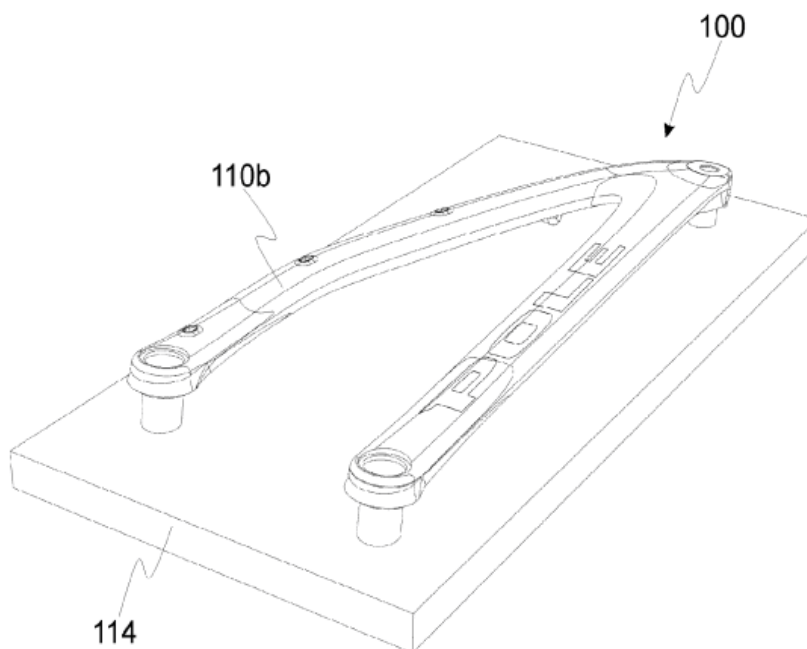


Fig. 3b

Kuva 30. Pole Bicycles takakolmion puolikkaat liitettynä yhteen jatko-operaatioita varten.

Puolikkaiden liimaamisen jälkeen osia käsitellään yhtenä rakenteena. Kuvasta 31 näkee, miten aihioista koneistetaan ylimääräinen materiaali ja jäljelle jää ontto rakenne, jonka ulko- ja sisäpuolet ovat koneistettu.



Kuva 31. Pole Bicyclesin koneistamalla valmistettu takakolmiorakenne.

Rakenteelle saadaan erinomainen jäykkyys, ja sen paino on optimaalinen ontton rakenteen takia. Menetelmässä käytettävien työstökoneiden käyttö hinnat, työstöajat ja materiaalihukka kuitenkin rajoittavat valmistusta. Prosessi on monimutkainen, mutta hyvin optimoitu se on täysin kilpailukykyinen kustannuksiltaan muiden menetelmien kanssa. Rungot ovat markkinoilla ylemmän hintatason tuotteita.

4.4 Monimateriaalirakenteet ja hybridivalmistus

Runko voidaan rakentaa yhdistämällä useamman materiaalin ominaisuuksien sekä eri valmistusmenetelmien hyviä puolia, millä saadaan rungolle ominaisuuksia, jota yksinkertaisimmissa rakenteissa ei saada. Valmistettujen ja dokumentoitujen hybridirunkojen määrä lisääntyy ja menetelmää hyödyntävät myös sarjatuotantoon tähtäävät yritykset. Menetelmässä voidaan yhdistää ainetta lisäävässä valmistuksessa luotuja osia, hiilikuiturakenteita ja perinteisiä metalleja, kuten metalliputkia, levyrakenteita ja koneistettuja osia.

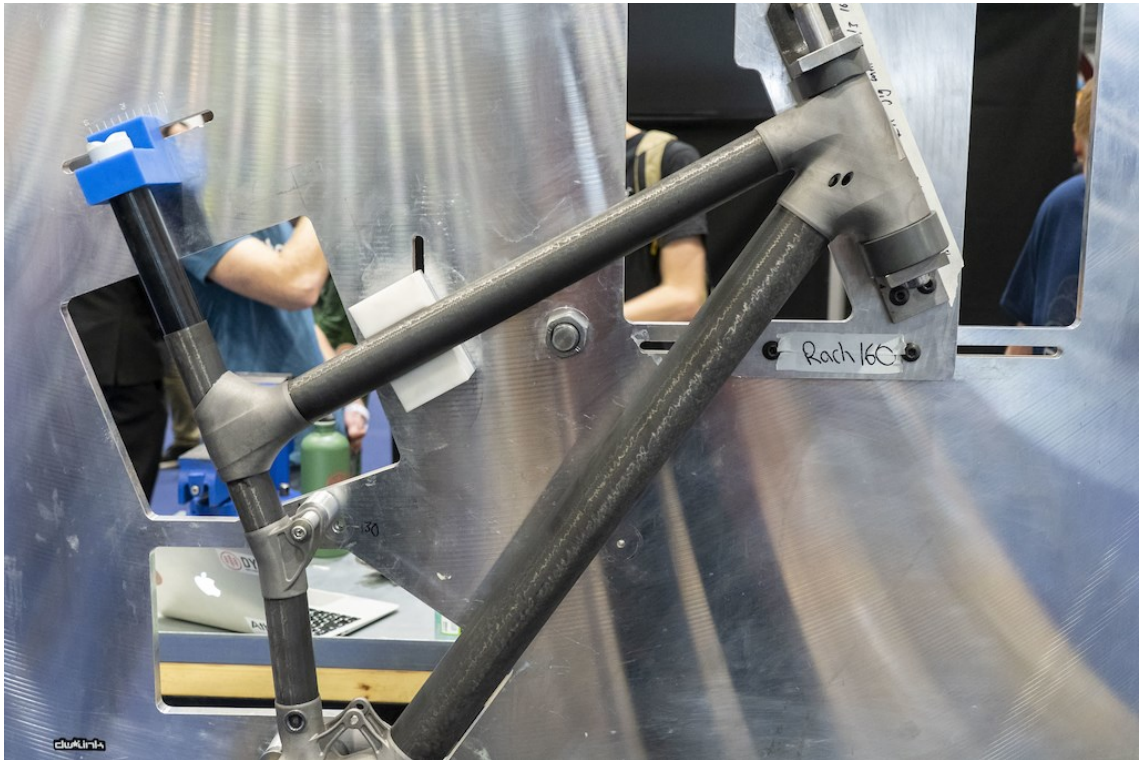
Rakenteet koostuvat yhdysosista, joita kutsutaan lugeiksi, sekä putkiprofiilista, jotka liitetään yhdysosiin (Technology 2023). Runko rakennetaan yhdistelmänä useammasta materiaalista ja valmistusmenetelmästä. Lugit rakennetaan kestämään liitoskohtiin kohdistuvat voimat ja niiden välille joko hitsataan tai liimataan suoraprofiiliset- tai muotoprofiloidut putket. Myös ruuviliitoksia on käytetty yhdistysmenetelmänä. Putket voivat olla hiilikuituprofiilia tai perinteistä metallia. Menetelmään voi myös yhdistää levyvalmisteita, mikä on kustannustehokas tapa valmistaa yhdysrakenteita.

Hybridirakenteissa käytetään yleisimmin alumiinin tai titaatin AM (Additive Manufacturing) -valmistusta tai koneistusta ja hiilikuituputken yhdistelmää. Alumiinin, titaatin ja hiilikuidun, jäykkyysominaisuudet ovat lähes samansuuruiset, mikä mahdollistaa rakenteiden seinämävahvuuksien optimoinnit ja liimattavuuden.

Osien liittämistä eli rungon luomista varten rakennetaan jigi. Erilliset osat liimataan yhdeksi kiinteäksi rakenteeksi jigissä, joka varmistaa oikean paikotuksen jokaiselle liitos- ja yhdysosalle. Menetelmän hyötyinä muihin valmistusmenetelmiin verrattuna on se, että saadaan tuotua eri materiaalien parhaat ominaisuudet rakenteeseen. Menetelmä ei vaadi hitsaamista. Prototyypin valmistus on kätevää ja edullista muovin AM-valmistuksella. Hiilikuidun käyttö on mahdollista ilman kalliiden muottien valmistamista hiilikuiturunkovalmisteelle.

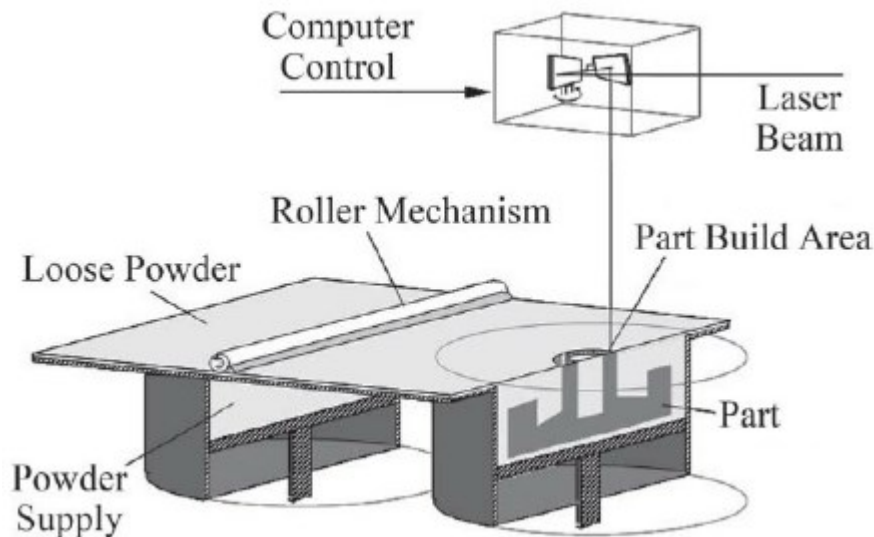
4.5 Monimateriaalirungon valmistaja Atherton Bikes

Markkinoille tuotuja monimateriaalirunkoja on vähemmän kuin muita runkotyypejä, mutta osa valmistajista on päättänyt lähteä kehittämään tätä uutta innovaatiota ja pyrkinyt tuomaan sen hyödyt esille. Suosituimpana monimateriaalirunkojen valmistajana toimii Atherton Bikes, joka valmistaa täysin parametrisoituja runkoja eri kokoisina kaikkialle maailmassa (Technology 2023). Atherton käyttää pyörissään titaanin AM-valmisteisia yhdysosia eli lugeja, joihin hiilikuituputket liimataan. Kuvassa 32 on Atherton Bikesin käyttämä runkojigi rungon osien liittämistä varten. Jigi on rakennettu isosta alumiinilevystä, johon on liitetty muovi- sekä alumiinin fikstuuriasia.



Kuva 32. Atherton Bikes -runko koottuna runkojigissä.

Titaaniset lugit valmistetaan jauhepetimenetelmällä Renishaw AM 500Q -koneella, jossa kone levittää tulostusalustalle jauhepedin ja laserit hitsaavat kerrokset kiinni aiempaan kerrokseen (Mansikka-Aho 2014: 11). Prosessi jatkuu tuhansia kertoja, kunnes kappaleet ovat valmiita. Kuvassa 33 havainnollistetaan yleisesti jauhepetimenetelmän toimintaa.



Kuva 33. Jauhepetimenetelmän komponentit ja toiminta (Wessel 2015).

Titaaniset osat sopivat valmistettavaksi ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä, sillä niiden paino- ja kestävyysoptimointi mahdollistaa monimutkaiset geometriat. AM-valmisteiden pinnankarheus ja toleranssit eivät riitä suoraan sopimaan polkupyörän käyttöön, vaan laakerisovitteet ja muut mittatarkat geometriat täytyy koneistaa AM-prosessin jälkeen. Osien laatu voidaan mitata koordinaatistomittalaitteessa. Lopuksi runkorakenne pintakäsitellään kestävämpään ulkoista korroosiota ja näyttämään tyylikkäämmältä.

4.6 Tutkitut menetelmät ja vertailu

Työssä arvioitiin eri valmistusmenetelmien sopivuutta polkupyörän rungon valmistuksessa. Valintakriteereitä olivat kustannukset, valmistettavuus ja erilaiset hyödyt runkorakenteessa. Huomioon otettiin myös mielenkiinto uusien menetelmien kehitykseen ja uusien menetelmien oppimiseen. Taulukossa 1 on esiteltyä vertailua eri valmistusmenetelmien haasteista ja hyödyistä.

Taulukko 1. Valmistusmenetelmien suurimmat hyödyt ja haitat sekä niihin liittyvät huomiot.

Valmistusmenetelmä	Hyödyt	Haitat	Muut huomiot
Hitsattu putkirunko	Yksinkertainen ja kustannustehokas	Hitsaamisesta aiheutuvat vääristymät ja työ	Pitkälle tutkittu menetelmä
Hiilikuitukomposiittirunko	Kevyt ja äärimmäisen kestävä	Monimutkainen ja epävarmuudet valmistuksessa	Kohtalainen määrä materiaalia ja tutkimuksia
Koneistettu runko	Uniformi rakenne, helposti optimoitavissa	Kallis, altis virheille ja hankala protovaihe	Vähän tutkittu, vaikea toteuttaa
Hybridivalmisteinen runko	Uniikki rakenne, materiaalioptimointi ja kehittymisen mahdollisuus	Vaatii paljon aikaa vievää taustatyötä. Vähän tutkimuksia	Yleistymässä laajalti, myös isoissa yrityksissä toteutetaan

Valmistusmenetelmää valitessa täytyi miettiä laajalti jokaisen menetelmän haasteita, mutta myös niiden tarjoamia mahdollisuuksia kehittymisen kannalta:

- Hitsatun putkirungon yksinkertainen rakenne, helppo valmistus ja laaja kehitys nousee monen suosimaksi valmistusmenetelmäksi sarjatuotannossa sekä kertaluontoisissa projekteissa. Valmiit lovitukset, muodot ja pintakäsittely voidaan ulkoistaa kustannustehokkaasti. Putkimateriaalin hitsaus on kovin standardisoitua ja lähdemateriaalia rungon luomiseen löytyy laajalti.
- Hiilikuitukomposiittirungon valmistukseen vaaditaan tietämystä ja suorituskykyisen rungon valmistamiseen täytyy nähdä paljon vaivaa, sillä edes isoimmat valmistajat eivät omista täydellistä prosessia rungon luomiseen. Hiilikuiturungon mekaaninen testaaminen, muottien luominen sekä protoilu on äärimmäisen kallista ja soveltuu paremmin sarjatuotantoon.
- Koneistetun rungon luominen vaatisi kehittyneitä tietämystä ja tuntemusta prosessiin, sillä protoilu ja virheiden tekeminen koituisi kovin kalliiksi. Yksittäisten koneistettujen osien luominen sen sijaan on kustannustehokasta ja antaa sijaa oppimiskäyrällä tapahtuville virheille. Teknisiksi haasteiksi koneistetun rungon valmistuksessa koituisi aihion koko ja sen työstäminen ja kerralla toimivien suunnitelmien luominen.
- Monimateriaalirungon valmistus koostuu monesta eri pienemmästä kokonaisuudesta, jotka on helppo jakaa projektissa jäsenien kesken. Samoja suunnitteluperiaatteita voitaisiin käyttää eri osien suunnittelussa ja valmistuksessa. Rungon valmistamiseen vaaditaan useita valmistusmenetelmiä, mutta niistä tehdyt tutkimukset ja taustatyöt ovat saatavilla helposti. Rakenne mahdollistaa optimoidut materiaalit sekä optimaaliset olosuhteet protoiluun ja oman oppimisen kehittämiseen. Rungon rakenne on uudenlainen innovaatio polkupyöriteollisuudessa, ja olisi mahdollisuus olla osana kehitystä.

Rungon valmistukseen vaaditut toimenpiteet ovat kohtalaisen samanlaiset, mutta toiset menetelmät vaativat enemmän tietämystä ja osaamista kuin toiset. Jokaista runkotyyppiä voidaan pitää korkealaatuisena, jos ne on suunniteltu, valmistettu ja dokumentoitu hyvin. Menetelmät vaihtelevat niihin käytettävän työn ja ajan sekä monimutkaisuutensa kannalta. Saatavilla olevat työkalut, tutkimusmateriaali ja tietämys vaikuttavat valmistusmenetelmän valintaan. Projektissa oli tärkeää olla sulkematta mitään valmistusmenetelmää kokonaan pois ennen kuin tarkkaperusteinen valinta oli tehty.

4.7 Valmistusmenetelmien valintaperiaatteet

Valmistusmenetelmien valintaan vaikuttivat oppimistavoitteet, saatavilla olevat työkalut ja mielenkiinto kehittyvää alaa ja innovointia kohtaan. Työssä päätettiin tutkia hybridirakenteisen rungon valmistusta ja siihen käytettyjä valmistusmenetelmiä. Valintaa pohjusti ammattikorkeakoulussa rajoittavat ja mahdollistavat tekijät ja mahdollinen hinta-arvio projektille.

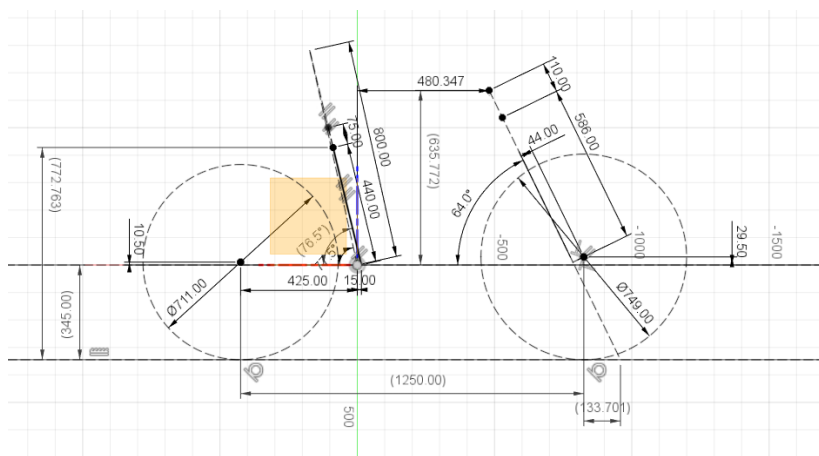
Valintaa tehdessä selveni, että täysin koneistetun rungon tai hiilikuiturungon valmistaminen ei ollut mahdollista. Valintaan vaikutti suuri virhesuoritusten ja lisäkustannusten riski. Varavaihtoehtona projektille pidettiin hitsattavaa runkoa. Hybridirungon valmistukseen käytettäviä valmistusmenetelmiä tutkittiin sillä reunaehdolla, että runkoa ei hitsattaisi tai lämpökäsiteltäisi ollenkaan. Suunnitelmat ja mallit pohjustettiin niin, että rungon etu- ja takakolmiot voitaisiin valmistaa niihin soveltuvilla menetelmillä. Hybridirungon valmistuksessa käytettiin erilaisia hiilikuituputkia, metallisia yhdysosia, koneistettuja ja levystä leikattuja osia. Työssä tutkittiin ja vertailtiin myös metallisten yhdysosien AM-valmistamista.

5 CAD-mallien suunnittelu

Kinematikan suunnittelu toimi reunaehtona CAD-suunnittelulle, sillä polkupyörän rungon geometria tuli rakentaa tarkasti kinematiikkapisteiden ympärille. CAD-suunnittelun jälkeen kinematiikkahahmotelmaan ei tulisi tehdä enää muutoksia, sillä mallien yhteensopivuus kärsisi. Projektin jäsenet pysyivät paremmin yhteisymmärryksessä, kun asioista päätettiin palavereissa eikä muutoksia tehty ilman vahvoja perusteita. Lopulliset päätökset asioista vaikuttivat positiivisesti myös aikatauluttamiseen, kun jäsenet pystyivät siirtymään työn seuraaviin vaiheisiin.

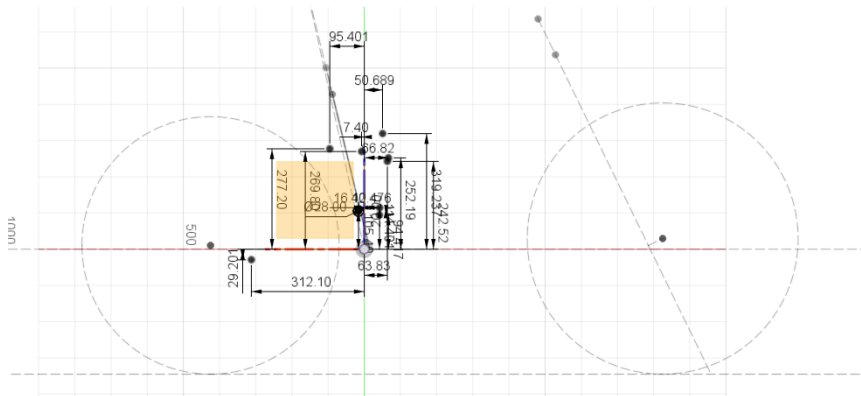
5.1 Geometrian hahmotelma

Kinematiikkasuunnitteluohjelma Linkagesta saadut kinematiikkapisteet ja pääteytyt geometriapistet jäljennettiin 2D-malliksi CAD-ohjelma Fusioniin toimimaan pohjana rungon malleille. Kuvassa 34 nähdään Fusioniin mallinnettu 2-ulotteinen hahmotelma geometriapististä sekä kuvassa 35 erillinen hahmotelma kinematiikkapisteistä. Sama malli sisälsi molemmat pistekokoelmat, mutta ne jaettiin useampaan hahmotelmaan mallin käsittelyn helpottamiseksi. Tässä vaiheessa oli tärkeää, että paikoittaviin pisteisiin ei tehtäisi muutoksia ja ne pysyivät samana kaikissa malleissa.



Kuva 34. 2-ulotteinen CAD-hahmotelma geometriapististä.

Geometriapisteet antavat rajat pyörän koolle ja sen käyttäytymiselle ja luovat pyörän tuntuman sitä käyttäessä.



Kuva 35. 2-Ulotteinen CAD-hahmotelma kinematiikkapisteistä.

Kinematiikkapisteet määrittävät jousituksen kiinnityspisteet, jotka määrittelevät pyörän jousituksen ja dynaamisen käyttäytymisen. Geometriaa ja kinematiikkaa määrääviä pisteitä tuli kohtalaisen paljon, joten niiden jakaminen mallin sisällä eri hahmotelmiin auttoi mallin käsittelyssä. Malliin lisättiin myöhemmin hahmotelmat renkaiden ääriassennoista ja jousitusosien äärimitoista niiden painuessa pohjaan, joista näki suoraan osien liikkumisvaran suhteessa kiinteisiin rungon osiin. Mallin pohjilta alettiin luomaan alustavia hahmotelmia rungon luomiseen.

5.2 Ainetta lisäävän valmistusmenetelmän suunnitelmat

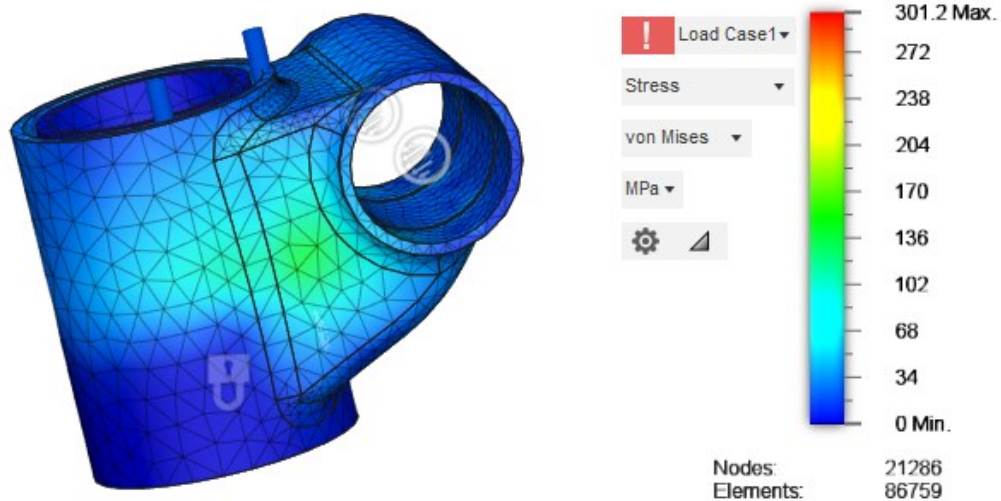
Työssä tutkittiin ainetta lisäävää valmistusmenetelmää ja erityisesti metallin AM-valmistusta polkupyörän kertaluontoisessa valmistuksessa. Suunnittelukriteerejä olivat kustannukset, keveys, suorituskykyinen rakenne, valmistettavuus ja tyylikäs ulkomuoto. Osat tulisi suunnitella niin, että ylimääräistä materiaalia tulisi mahdollisimman vähän, mikä rajaisi painoa sekä kustannuksia.

5.2.1 FEA (Finite Element Analysis)

Materiaalin määrän rajaamisessa käytettiin lujuusopin elementtimenetelmän laskelmia, jossa osalle annetaan lähtöarvoina kiinnitykset, voimat tai siirtymät

sekä materiaaliominaisuudet. FEA-ohjelma (Finite Element Analysis) laskee aiheutuvat siirtymät, voimat ja jännitykset kappaleessa, minkä perusteelta voidaan arvioida kuormituksen suuruudet elementtiverkossa ja solmuissa. Kappaleisiin johdetut kuormitukset saatiin kinematiikkasovelluksesta.

Elementtiverkko luotiin automaattisesti Fusionin simulation -välilehdellä, joka jakaa kappaleen osiin, mistä laskuri voi johtaa laskelmat. Materiaalia joko lisättiin tai poistettiin alueista FEA-laskelmien perusteella ja prosessi toistettiin, kunnes saatiin tyydyttävä varmuuskerroin kappaleen jokaiselle geometrialle. Kuvassa 36 näkyy suuntaa antava laskelma kappaleen kuormituksista. Laskelmat toimivat tukena suunnittelulle, mutta se ei määrittänyt kappaleen geometriaa yksinomaaisesti.



Kuva 36. Fusion FEA-simulointi rocker lugille.

Lugit mallinnettiin periaatteella, jossa tunnetut mitat ja geometria rakennettiin ensin, minkä jälkeen ne yhdistettiin. Mallinnuksessa käytettiin pintamallinnustyökaluja, jotta muodot sulautuisivat yhteen mahdollisimman tehokkaasti. Teräviä kulmia vältettiin jännityshuippujen syntymisen takia. Muut lugit suunniteltiin

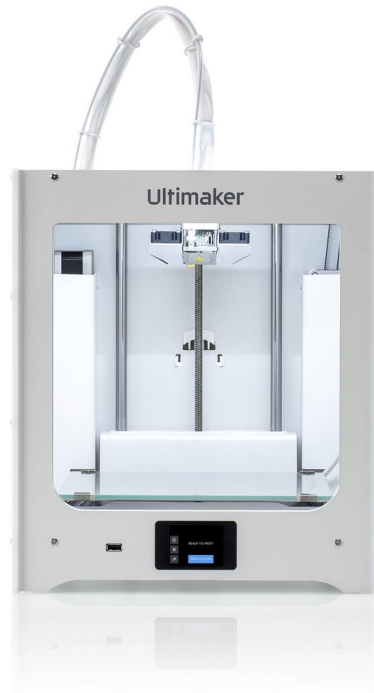
käyttäen samoja suunnitteluperusteita. Kuvassa 37 näkyy suunnitelma rungon rakenteesta AM-valmisteisilla lugeilla.



Kuva 37. Monimateriaalirungon CAD-suunnitelma ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä.

Alustavien suunnitelmien valmistuttua oli tärkeää varmistaa mallien yhteensopi- vuus käytännön testeillä. Kustannussyistä oli epäkäytännöllistä suorittaa käy- tännön testaukset metallitulosteilla, joten prototyyppikappaleita tulostettiin muo- vista. Muovikappaleiden tulostustoleranssit eivät vastanneet metallin AM-val- mistuksen toleransseja, mutta prototyyppivaiheessa tulokset olivat tarpeeksi tyydyttäviä ja kehitysideoita saatiin luotua yhteensopivuustestauksien jälkeen. Tu- losteita luotiin ammattikorkeakoulun Ultimaker 2+ Connect -laitteistolla. Kuvassa

38 on korkeakoulun käyttämä ainetta lisäävän valmistusmenetelmän laite.



Kuva 38. Ultimaker S2+ Connect -AM-laite.

Laite tulostaa useita muoveja, mutta tulosteisiin käytettiin ammattikorkeakoulun tarjoamaa PLA-tulostetta (Polyaktidi). Hiilikuituputket leikattiin korkeakoulun laboratoriossa yhteensopivuustestejä varten (kuva 39).



Kuva 39. Rungon eri komponenttien yhteensopivuudesta muoviprototyypitulos-teilla.

Prototyypin onnistuessa alettiin tutkimaan mahdollisuutta suunnitella tulosteet metallista. Lugien rakenteeseen vaikutti yhä valittu materiaali, josta tuli tehdä valintapäätös ennen suunnitelmien lopullista valmistumista. Oli tärkeää, että eri vaiheet etenivät projektissa eikä yhteen suunnitelmaan sidottu liikaa vaivaa ja aikaa.

5.2.2 Tutkitut vaihtoehdot AM-valmistukselle – Desktop Metal

Työn alussa tutkittiin mahdollisuutta valmistaa lugit ammattikorkeakoulun tarjoamalla ainetta lisäävän menetelmän Desktop Metal -koneella käyttäen ruostumattonta terästä 17-4PH säästämällä kustannuksissa. Kuvassa 40 näkyy materiaalin

ominaisuudet (Desktop Metal 2023).



Kuva 40. Desktop Metal 17-4PH Ruostumaton teräs, materiaaliominaisuudet (Desktop Metal 2023).

Metalliset lugit tulisi liimata yhdeksi jäykäksi rakenteeksi hiilikuituputkien kanssa, joten suunnittelussa tuli ottaa huomioon niiden jäykkyyserot. Jäykkyyksien tulisi erota mahdollisimman vähän, jotta elastiset muodonmuutokset eivät loisi vaurioita liiman, lugin ja hiilikuituputken välisessä adheesiossa ja liiman sisäisessä koheesiossa.

Ruostumattoman teräksen kimmokerroin 210 GPa ja liitettävien hiilikuituputkien 70–100 GPa eivät vastanneet toisiaan, mikä tarkoitti sitä, että teräksen seinämävahvuuksia tulisi pienentää kuormitusten siirtäessä kappaleita elastisella alueella. Hiilikuituputken määrittämisessä päädyttiin 1,5–3 mm:n seinämävahvuuksiin, jotta halutut ominaisuudet täyttyisivät hiilikuituputkille ja rungossa syntyville kuormituksille. Ruostumattoman teräksen seinämävahvuudet laskisivat niin alhaiseksi jäykkyyserojen tasaamisen takia, että se rikkoisi valmistajan asettamia reunaehtoja valmistuksessa.

Mahdollisuutta tutkittiin vielä tekemällä testivalmisteita, mutta koneella tehdyt testitulokset eivät vastanneet haluttua lopputulosta, sillä koneen parametrejä ja asetuksia ei saatu sopiviksi hankaliin geometrioihin.

5.2.3 Tutkitut vaihtoehdot AM-valmistukselle – jauhepetimenetelmä

Titaanin ja alumiinin kimmokertoimet 110 GPa ja 70 GPa sopisivat paremmin rakenteessa, sillä seinämävahvuuksia voitiin lisätä ja jauhepetimenetelmän luonne mahdollisti monimutkaisten geometrioiden luomisen. Mallit luotiin seinämävahvuuksilla, jotka sopisivat titaanin kanssa yhteen. Vertailtaessa alumiinin ja titaanin myötölujuuksia titaanilla oli paremmat varmuuskertoimet kappaleiden hajoamiselle näillä seinämävahvuuksilla.

Lugien valmistusta ulkoistettiin ammattikorkeakoulun yhteistyökumppanien ja muiden yritysten kanssa, sillä ammattikorkeakoulu ei omista jauhepetimenetelmään soveltuvaa laitteistoa. Hinta-arvioista kilpailukykyisimmät saatiin suomalaiselta toimittajalta 3D Stepiltä ja eurooppalaiselta toimittajalta Xometryltä. Oheisessa taulukossa (taulukko 2) on hintavertailu titaanin ja alumiinin jauhepetimenetelmän tulosteista neljälle yksittäiselle lugille, jolla kasaisi yhden kokonaisen runkorakenteen.

Taulukko 2. Ulkoistetut hinta-arviot jauhepetimenetelmälle.

Materiaali	Titaani Ti-6Al-4V	Alumiini AlSi10Mg
3D Step		1800 € 0 % alv
Xometry	4000 € 0 % alv	

On realistista olettaa ja varautua siihen, että ensimmäisiin testikappaleisiin tulisi tehdä muutoksia, joten hinnat voivat moninkertaistua alkuperäisistä hinta-arvioista. Tarjousten perusteella oli selvää, että polkupyörän valmistuksessa titaaniin AM-valmistuksen tulisi olla täydellisen optimoituja, jotta muut menetelmät eivät olisi kustannustehokkaampia. Alumiinin hinta-arvio oli kohtuullinen ottaen huomioon projektin kertaluontoisuuden. Alumiini saataisiin toimimaan kustannustehokkaammin kuin titaani.

Korkeakoulun saatavilla olevat työkalut ainetta lisäävään valmistukseen olivat rajalliset, joten lugien valmistus tulisi ulkoistaa. Työn ulkoistaminen rajoittaisi oppimismahdollisuuksia ja rajaisi projektin sisältöä, mikä olisi vasten yhtä valintaperusteista monimateriaalirakenteen valitsemiseen muiden sijaan.

Valmistusmenetelmän arvioinnissa käytettiin kriteerinä myös korkeakoulun yhteistyökumppaneita ja heidän halukkuuttansa osallistua opiskelutoimintaan sponsoreina. Metropolian yhteistyökumppani Alumeco on osallistunut ammattikorkeakoulun projekteihin aikaisemminkin. Materiaalitoimitus onnistuisi Metropolian Motorsport -tiimin yhteistyön kautta, mikä laskisi projektin kustannuksia huomattavasti. Alumecon tarjous materiaaleista (taulukko 3) kattoi viiden polkupyörän rungon valmistamisen, josta jää ammattikorkeakoulun hyödynnettäväksi aihoiden kiinnitysvarat, jotka ovat täysin uudelleenkäytettävissä.

Taulukko 3. Alumecon tarjous materiaalin toimitukselle.

Alumecon toimitus	Takakolmiot (5 kpl)	Etukolmio (5 kpl)
Alumiini 7075-T651	2500 €	1200 €

Ammattikorkeakoulun kanssa tehtiin päätös luoda myös suunnitelmat mahdollistaen lugien koneistamisen alumiinista. Lugien malleista tehtiin versiot, joiden valmistettavuus onnistuisi pelkästään koneistamalla.

5.3 CNC-koneistuksen suunnitelmat

Suunnitelmia luodessa kokonaiskuva valmistusmenetelmistä hahmottui paremmin, sillä huomattiin, että geometriaa yksinkertaistamalla saatiin samanlaiset tekniset ominaisuudet ja ulkonäkö mutta kustannukset ja muut riskitekijät pienenevät. Hybridirakenteen suurimmiksi hyödyiksi osoittautui joustavuus valmistusmenetelmien valinnassa, sillä menetelmää ei rajoita vain muutama valmistustapa. Polkupyörän rungon lisäksi tulisi valmistaa siihen sopiva takakolmio, jossa noudatetaan samoja suunnitteluperiaatteita kuin etukolmiossa, eli hitsaamista ei sallittaisi. Sopiva valmistusmenetelmä takakolmion valmistukseen todettiin olevan koneistus, sillä tukimateriaalia oli paljon ja korkeakoulussa tarjolla olevat työkalut ja resurssit sopivat siihen erinomaisesti.

Valmistuksen tueksi tutustuttiin suunnittelumenetelmiin, jotta mallit olisivat valmistettavissa. Tunnetuimpia menetelmiä suunnitteluun ovat DFM (Design for Manufacturing) ja DFA (Design for Assembly) eli yhdistettynä DFMA (Design for Manufacturing and Assembly). Menetelmä koostuu viidestä eri perusteesta (What is Design for Manufacturing or DFM? 2020):

- Prosessi – Valmistusmenetelmä tulee olla oikea jokaiselle osalle ja tuotteelle.
- Suunnitelma – Osa täytyy suunnitella niin, että se on yksiselitteinen ja mahdollisimman yksinkertainen. Liian tarkka määrittely johtaa usein siihen, että

valmistusvaiheessa epäonnistutaan täyttämään asetetut vaatimukset. Mitä vähemmän tarkkoja mittoja, sen parempi.

- Materiaali – Materiaali tulee valita oikein. Osille määritetään mekaaniset, termodynaamiset ja muut vaatimukset.
- Ympäristö – Osan tulee kestää myös oikeassa maailmassa rajuimmatkin olosuhteet.
- Yhteensopivuus – Osien tulee läpäistä niille asetetut laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Osat tulee suunnitella tarvittavilla asennusväleillä.

Erilaisia nimikkeitä tulee luoda mahdollisimman vähän, sillä jokainen yksilöllinen nimike vaatii omat toimenpiteet suunnittelusta valmistukseen asti. Piirteitä, joilla ei ole toiminnallista hyötyä tulisi olla mahdollisimman vähän. Osien asettelu ja käsittely valmistusvaiheiden välissä tulee minimoida sekä käytettävien työkalujen määrää vähentää minimiin. Muuttujien määrää vähentämällä vähennetään myös työhön käytettävää vaivaa ja aikaa ja työssä onnistutaan todennäköisemmin.

5.3.1 Takakolmion lopulliset suunnitelmat

Takakolmion suunnittelun reunaehdot muodostuivat pitkälti pyörämarkkinoilla käytetyistä standardeista. Tietyille komponenteille on määritelty standardimittoja, joiden kanssa yhteensopivaksi rakenne tulee suunnitella. Komponenttien vaatima tilantarve määrittää pitkälti käytössä olevan suunnittelutilan määrän. Suunnittelun alkuvaiheessa kinematiikkapisteiden ympärille luotiin tilamallit komponenteista, joiden tilantarve tulee ottaa huomioon.

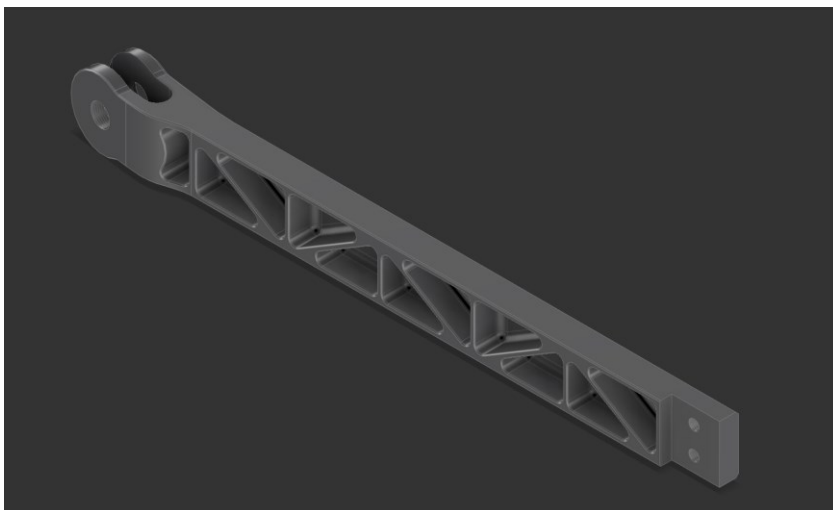
Takakolmion suunnittelun reunaehdoiksi asetettiin seuraavat vaatimukset:

- Boost 148 mm standarditakanavalle
- Universal Derailleur Hanger -yhteensopivuus
- yhteensopivuus ostettujen akselien ja kiinnitysosien kanssa
- kampien maksimipituus 170 mm
- jarrulevyn maksimikoko 220 mm
- chain stayn pituuden säätö.

- Specializedin käyttämä maksimaalinen kuormitus takarengaankontaktipisteessä; pystysuuntainen kuormitus 5000 N ja sivuttaissuuntainen kuormitus ± 400 N (Fedor ym; 16. 2019).

Näiden reunaehtojen perusteella päädyttiin modulaariseen rakenteeseen, jossa taka-akselin liitoskohta on irrotettavissa muusta takakolmiosta.

Takakolmion muotoilua lähestyttiin täysin valmistettavuus edellä. Kappaleiden suunnittelussa pyrittiin välttämään muotoja, jotka vaatisivat 5-akselista työstöä. Rakenteen painoa pyrittiin hallitsemaan koneistamalla taskuja, kuitenkin huomioiden rakenteen jäykkyys ja kestävyys. Tästä syystä päädyttiin kolmion muotoisiin taskuihin, joka jättää truss-rakenteen jäljelle jäävästä materiaalista (kuva 41). Modulaarisen rakenteen ansiosta myös takakolmion jäykkyyden kehitys tulevaisuudessa on mahdollista erilaisilla taskujen muodoilla, kuitenkin koko takakolmiota vaihtamatta. Takakolmio suunniteltiin myös symmetrisesti siten, että osat käyvät kummalle puolelle tahansa rakennetta taka-akselin liitoskohtia lukuun ottamatta. Tämän avulla nimikkeiden määrä pieneni huomattavasti.



Kuva 41. Kuvankaappaus Fusion 360 -suunnitteluohjelmasta. Komponentin kevennystaskut.

Ahtain ja vaikein suunnittelutila oli selkeästi voimansiirtopuolen chain stayssä. Päänivelen akseliin kiinnitetty lisäratas ketjulinjan kierrättämiseksi sekä renkaan

sijainti aiheuttaa kapeahkon kohdan heti osan alkupäähän. High pivot -jousitusessa on kuitenkin huomattavasti enemmän tilaa tässä kohdassa kuin normaalissa, sillä korkea kiinnityskohta etukolmioon välttää tässä tapauksessa kokonaan eturattaan aiheuttaman tilanvaatimuksen. Päänivelen ja horst link -nivelen välisellä alueella vielä toisena rajoittavana tekijänä on kampien pyöriminen. Tilantarve selviää komponenttivalmistajan tarjoamasta rungon suunnitteluohjeesta (kuva 42).

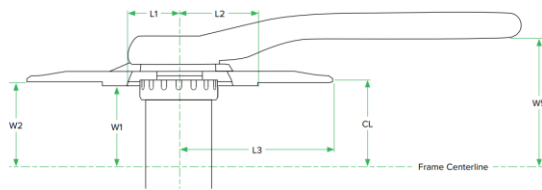
GX Eagle DUB

Drive Side Frame Clearance - BOOST and non-BOOST

Chainring		L1	L2	L3	W1	W2	CL	W5*	
1x12	30T	non-BOOST & Eagle DUB 55 CL	35.2	50.7	64.3	48	47.2	49	71.7
		BOOST	31.5	58.7					
	32T	non-BOOST & Eagle DUB 55 CL	27	54.7	68.3	51 (BOOST Variant)	50.2 (BOOST Variant)	52 (BOOST Variant)	71.7 (BOOST Variant)
		BOOST	29.3	55.2					
	34T	non-BOOST & Eagle DUB 55 CL	31.5	58.7	72.3	54 (Eagle DUB 55 CL)	53.2 (Eagle DUB 55 CL)	55 (Eagle DUB 55 CL)	74.7 (Eagle DUB 55 CL)
		BOOST	31.5	59.2					

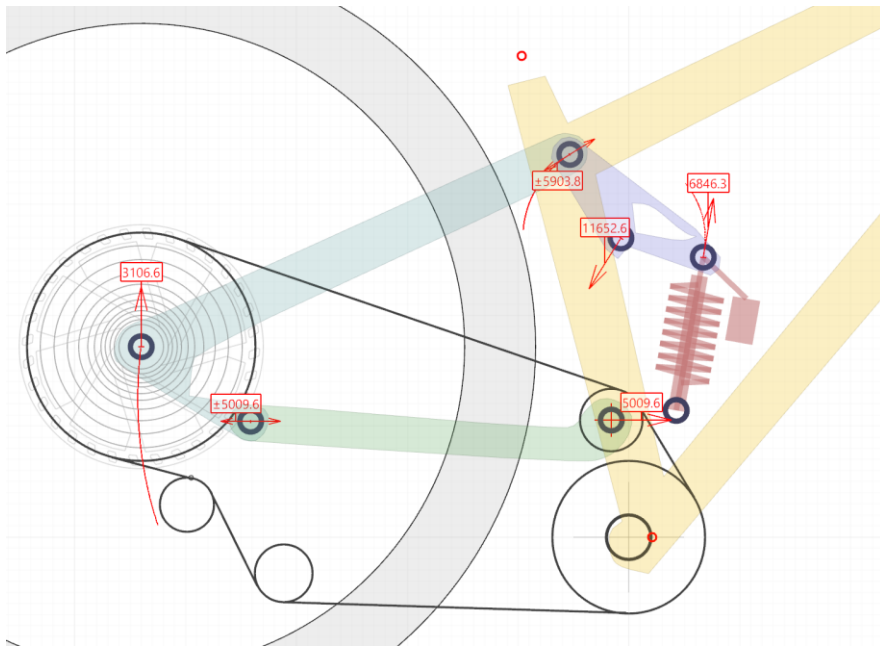
Q-factor : 169 (non-BOOST & BOOST) / 175 (Eagle DUB 55 CL) Bottom Bracket Types: DUB BSA 73 : DUB BB30 : DUB PF30 : DUB PF 89.5/92

*Dimensions will vary for cranks equipped with crank boots. Consult the section titled "Crank Boot."



Kuva 42. Komponenttivalmistajan ilmoittama kampien tilantarve (SRAM 2021: 48).

Nivelpisteen laakerointien rakenne toteutettiin ulkopuolisen toimittajan ostosilla ja Enduro Bearings 6902 LLU MAX -laakereilla. Laakerit valittiin siten, että koko rungossa on käytetty vain yhtä laakerityyppiä nimikkeiden määrän hallitsemiseksi. Laakerit mitoitettiin laskemalla nivelpisteisiin kohdistuvat voimat ja tukireaktiot Linkage x3 -ohjelmistolla (kuva 43).

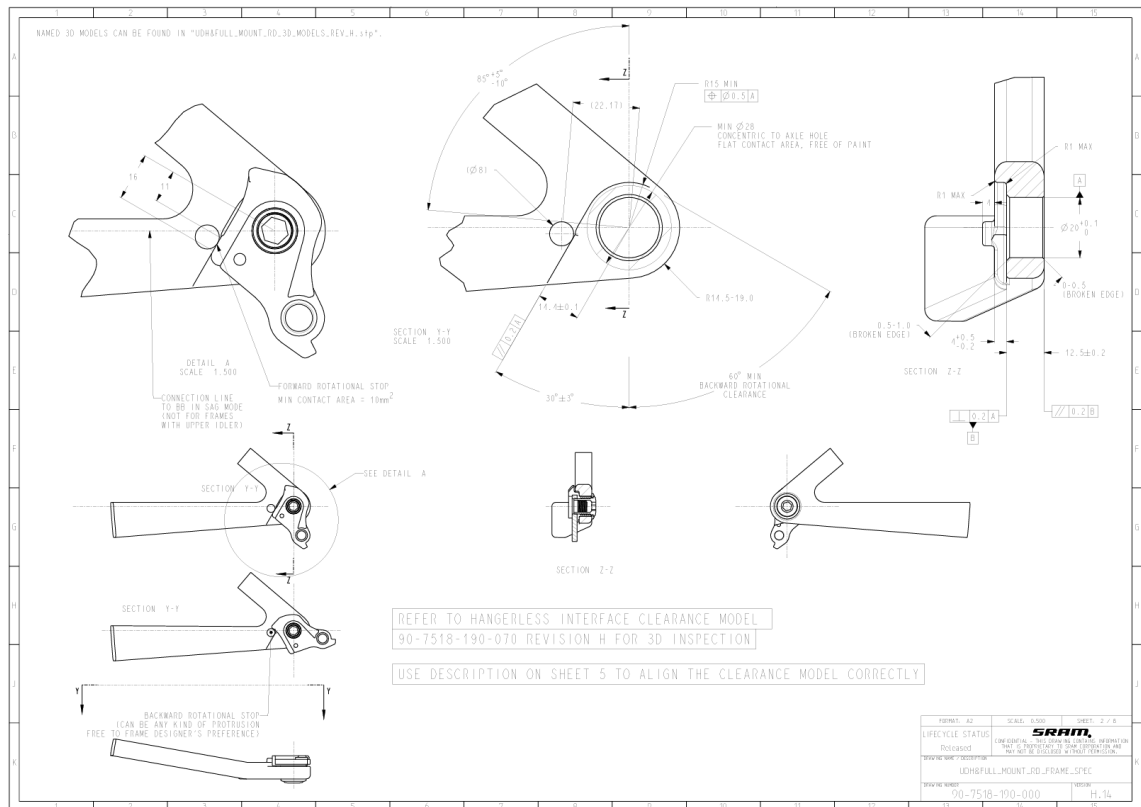


Kuva 43. Jousituksen voimat ja tukireaktiot.

Laakerivalmistajan ilmoittama sallittu kuormitus laakeria kohden on 3,61 kN. Suurimman kuormituksen omaavaan nivelpisteeseen sijoitetaan kaksi laakeria peräkkäin, jolloin yhteismääräksi tulee neljä ja kuormitus ei ylitä sallittua rajaa. Voimat ovat kuitenkin hetkittäisiä iskuja lukuun ottamatta huomattavasti pienempiä kuin lasketut arvot, joten laakerit ovat huomattavasti ylimitoitettu. Tämä on tehty tarkoituksellisesti huoltovälin pidentämiseksi.

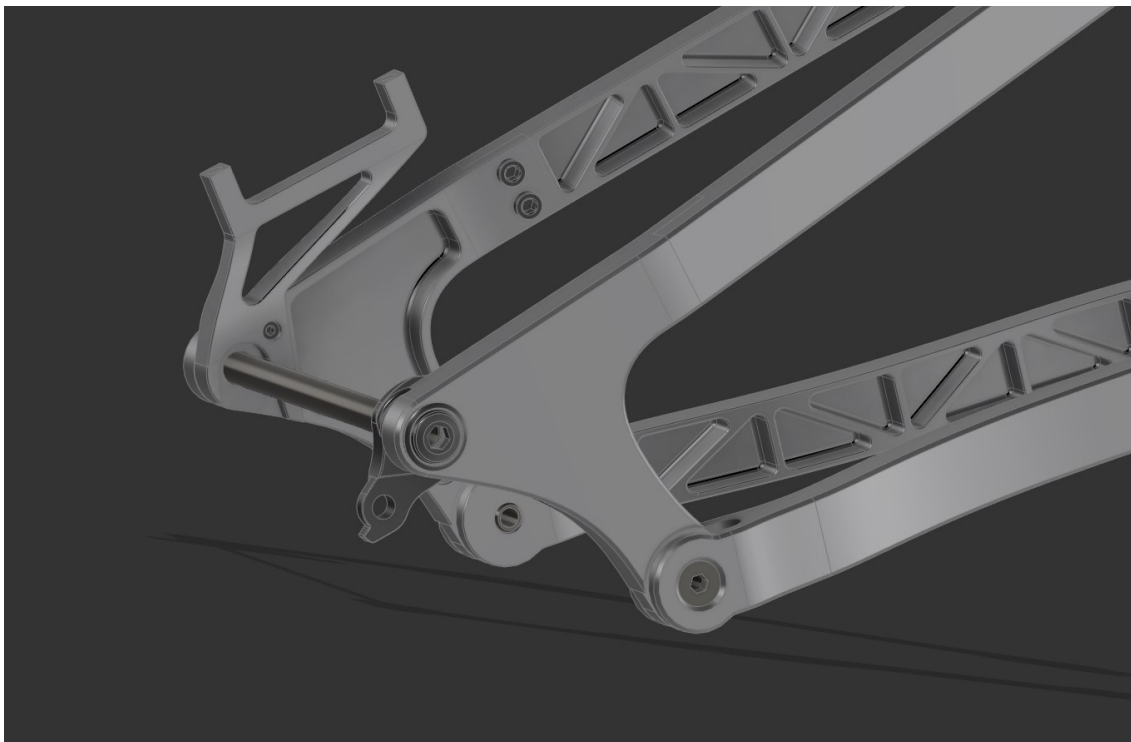
Laakeripesät ovat ahdistussovitteiset, ja niiden toleransseista konsultoitiin laakerivalmistajaa. Laakerien ulkohalkaisijan nimellismitta on 28 mm, ja niiden valmistustoleranssi on +0, -0,010 mm. Valmistajan suosittelema toleranssialue laakeripesälle on -0.012 mm...-0.022 mm.

Taka-akselien kiinnityskohdat eli dropoutit olivat suunnittelun kannalta monimutkaisimmat kokonaisuudet. Takavaihtajan toimivuuden kannalta sen asemointi on erittäin tärkeää. Kiinnityskohdassa on monia tarkan toleranssin piirteitä, joihin löytyy komponenttivalmistajalta suunnitteluohjeet (kuva 44).



Kuva 44. Universal Derailleur Hanger -kiinnityskohdan suunnitteluohje(SRAM 2023: 4).

Dropoutin toinen pää liittyy horst link -niveleen, ja modulaarisen rakenteen ansiosta se on yhdistetty toisesta päästä pulttiliitoksella seat stayhin. Pulttiliitos on toteutettu kahdella M6-pultilla siten, että pulttien kannat jäävät sisäpuolelle pii- loon (kuva 45). Osaan on myös tehty sisäpuolelle iso tasku sen massan vähentämiseksi.



Kuva 45. Dropoutit ja niiden pulttiliitokset sekä irrotettava jarrukiinnike.

Kuvassa 45 on näkyvillä myös modulaarinen jarrukiinnike, joka on toteutettu post mount -standardin mukaan. Jarrukiinnike koneistetaan suoraan haluttuun kokoon.

Takakolmion toimivuuden varmistamiseksi CAD-kokoonpanon lisäksi siitä valmistettiin muovinen prototyyppi. Tulostettu takakolmio mahdollisti liikeratojen ja osien yhteensopivuuden varmistamisen sekä antoi paremman käsityksen osien koosta. Kuvassa 46 muovista tulostettu prototyyppi ja valmiin CAD-kokoonpanon renderöinti.



Kuva 46. Muovinen prototyyppi ja valmiin takakolmion renderöinti.

Edellä mainitut komponenttien tilantarpeet pystyttiin varmistamaan fyysisesti tu-
lostetusta mallista.

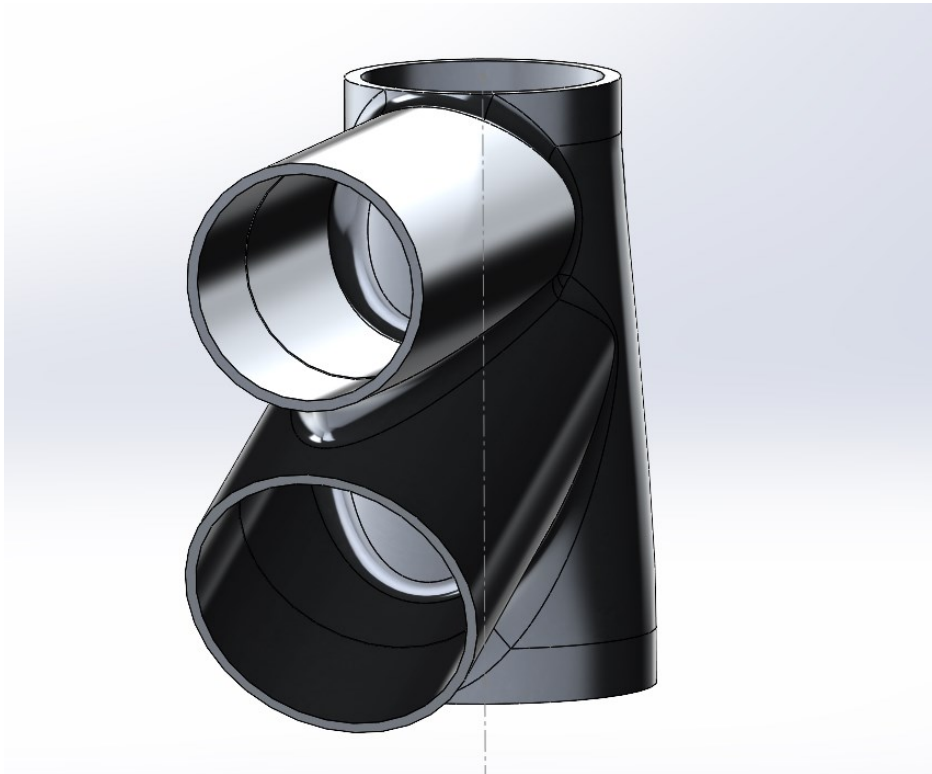
5.3.2 Etukolmion lopulliset suunnitelmat

Monimateriaalirakenteisen etukolmion suunnitelmat toteutettiin Solidworks-
CAD-ohjelmalla. Geometriahahmotelma asetettiin kokoonpanon pohjalle toimi-
maan pohjana lugirakenteille. Suunnitteluperustana toimi DFMA ja valmistetta-
vuus ensisijaisena kriteerinä. Oli tärkeämpää saada valmistettua tuote kuin
käyttää aika ylisuunnitteluun ja kiirehtiä valmistusvaiheeseen. Mallien muotoa
joutui muokkaamaan verrattuna AM-valmisteisiin lugeihin, sillä kuorimainen
ontto rakenne ei ollut valmistettavissa koneistamalla, ellei osia olisi valmistettu
Pole Bicycles -patentin mukaisesti kahdesta puolikkaasta. Osien rakenteen yk-
sinkertaistaminen mahdollisti kuitenkin mallit, joissa materiaalia ei jää ylimää-
räiseksi ja valmistettavuus ei kärsisi. Kuvassa 47 on suunnitelma koneistetta-
ville lugeille ja jousituskomponentit.



Kuva 47. Koneistettujen lujen CAD-kokoonpano jousituskomponentteineen.

Jousituskomponenttien kokoonpanomallit saatiin ulkoiselta toimijalta ja ne lisättiin kokoonpanoon, jotta voitaisiin tarkistaa mallien yhteensopivuudet. Hiilikuituputkien ja lujen liitospintaan luotiin 0,2 mm:n syvennykset, joka on epoksiliimille alumiinin ja hiilikuidun liimaliitoksessa ideaali liimakerroksen paksuus (Hölsä 2021: 47). Hiilikuituputken ja lugin välinen samankeskisyys saavutetaan jättämällä lugin takaosaan kohdistava osio, jonka halkaisija tulee olla kunkin liitosputken suurinta nimellishalkaisijaa noin 0,05 mm suurempi. Kuvassa 48 näkyy, miten tämä geometria on toteutettu lugeihin.



Kuva 48. Headtube lugin liimaurat ja kohdistavat pinnat liimauran loppuosassa.

Liimauran syvyydeksi on valittu 25 mm, joka valikoitui määrittämällä putken kohdistaman vetojännityksen liimaan. Liimassa syntyy leikkausjännitys, joka murtaa liiman joko sisäisesti tai aiheuttaa adheesiovaurion, joka irrottaa liiman sen adheesiopinnasta. Liimauran syvyys saatiin määritettyä leikkausjännityksen yhtälöstä (kaava 1):

$$\tau = \frac{F}{\pi D h} \quad (1)$$

jossa τ on liiman kestävä leikkausjännitys liimaliitoksessa (MPa)

F on putken kohdistama leikkausvoima liimaliitokseen (N)

πDh on liimaliitoksen pinta-ala (mm^2)

h on liimaliitoksen syvyys (mm)

Liimaliitoksen pinta-alaa kasvattamalla ja liiman adheesiota parantamalla liitoksessa voidaan nostaa varmuuskerrointa liitoksen kestävyydelle kuormitustilanteissa. Hiilikuituputkien liitospäät hiotaan karheaksi ja alumiinisen lugin liimastu hiekkapuhalletaan karheaksi, jotta adheesion kestävyys vastaisi mahdollisimman hyvin liimatoimittajan määrittämää leikkauslujuutta (liite 1).

Lugien valmistettavuus oli otettava huomioon myös piirteissä, kuten pyöristyksissä. Kaikki pyöristykset tuli luoda niin, että niiden pyöristyssäteet olivat suurempia kuin saatavilla olevien koneistustyökalujen säteet, jotta piirteiden koneistaminen olisi mahdollista. Malleista päätettiin jättää viisteet pois, sillä ne pystyttäisiin lisäämään valmistusvaiheessa työstöoperaatioina.

5.4 Valitut materiaalit ja ominaisuudet

Polkupyörän rungon valmistuksessa yleisiä käytettyjä materiaaleja ovat alumiini, titaani, hiilikuitu ja teräkset niiden hyvien mekaanisten ominaisuuksien ansiosta. Monimateriaalirunkoon valitut hiilikuituputket määriteltiin toimittajan kanssa ottaen huomioon putkiin syntyvät kuormitukset ja käyttötarkoituksen. Lugien materiaaliksi valittiin alumiini sen edullisuuden ja hyvän koneistettavuuden takia. Liitostarvikkeet, kuten akselit ja laakerien väliholkit, tilattiin ulkoiselta toimittajalta. Liitostarvikkeet on valmistettu titaanista, joka on erinomainen valinta sen kestävyden kannalta, sillä akselien tulee kestää koko polkupyörän elinkaaren aikana suuria rasituksia ja kulutusta. Valitut materiaalit ja niiden valintaperusteet olivat seuraavat:

- Alumiini - EN AW-7075 T651, lämpökovetettu alumiini, jonka lujuus- ja paino-ominaisuudet ovat erinomaiset polkupyörän rungolle. Hyvä koneistettavuus ja korroosionkestävyys pintakäsittelyn jälkeen.
- Hiilikuitukomposiittiputket - Toray T700, joiden suuntaus on 70 % unidirectional 0 astetta, 15 % unidirectional 90 astetta ja 15 % unidirectional 45 astetta. Hiilikuituputken kestävyyttä ja jäykkyyttä on vaikea arvioida ilman

mekaanisia testauksia. Toimittaja valitsi hiilikuitukerroksien suuntaukset kokemusperusteisesti ennalta määrättyyn käyttötarkoitukseemme.

- Liima - LOCTITE® EA 9466, lujitettu kaksikomponenttiliima vahvalla adhesio- ja leikkauskestävyydellä (Loctite EA 9466 2023). Sopii kohteisiin, jossa liimalta vaaditaan suurta leikkauslujuutta (liite 1). Käytetty teollisuudessa samankaltaisissa sovelluksissa.

Valitut valmistusmenetelmät rajasivat materiaalien valintaa. Ammattikorkeakoulun yhteistyökumppanit vaikuttivat saatavilla olevaan materiaaliin ja auttoivat pienentämään kustannuksia, mikä vaikutti materiaalien valintapäätöksiin.

6 Valmistusvaiheet CNC-koneistuksessa

Valmistuksessa käytettiin Siemens NX CAM -ohjelmaa. Koneistettujen komponenttien valmistukseen käytettiin ammattikorkeakoulun koneistuslaboratorion 5-akselista Haas UMC-750 -työstökeskusta. Kappaleiden geometrioissa oli piirteitä, jotka vaatisivat useamman kiinnityksen. Kiinnitysten määrää pienentämällä saataisiin vähennettyä kappaleen irrottamisessa syntyvät epätarkkuudet. Asetusaikoja pyrittiin minimoimaan. 5-akselisella työstökoneella pystyttiin koneistamaan kappaleita monesta eri suunnasta ja säästämään aikaa kiinnityksissä, ottaen huomioon projektiin liittyvien nimikkeiden määrän ja kertaluontoisesta valmistuksesta. Haas UMC-750 -työstökeskus on varusteltu työkalujen mitauslaitteistolla sekä nollapisteen koordinaatistomittaukseen soveltuvalla mittapäällä, joka nopeutti työskentelyä laboratoriossa. Työkalut mitattiin työstökeskuksessa ennen jokaista operaatiota. Koneistettavien osien aihiot leikattiin koneistuslaboratorion SABI EB 250-A-automaattisahalla.

6.1 Työstöarvot ja lähtötiedot koneistukseen

Työstöarvojen määrittämiseen vaadittiin muutamia lähtötietoja, joiden avulla voitiin määrittellä loput arvoista. Työkaluvalmistajat antavat työkaluille ja teräpaloille yleensä lastuamisnopeuden ja teräpalakohtaisen syötön, joista voidaan johtaa loput arvoista. CAM-ohjelma kykenee laskemaan työstöarvot annettujen lähtötietojen perusteella, joten manuaaliselta laskemiselta säästyttiin. Lastuamisnopeuden ja karanopeuden välinen yhteys voidaan laskea kaavalla 2,

(2)

$$V_c = \frac{D * \pi * n}{1000}$$

jossa V_c on lastuamisnopeus (m/min)

D on työkalun nimellishalkaisija (mm)

n on karanopeus (1/min)

sekä pöytäsyötön määritelmä kaavalla 3,

(3)

$$v_f = f_z * n * Z_c$$

jossa v_f on pöytäsyöttö (mm/min)

f_z on hammassyöttö (mm)

n on karanopeus (1/min)

j Z_c on työkalun leikkuiden lukumäärä (kpl).

Työkalujen työstöarvoja rajoittaa työstökoneen maksimikierronopeus, joka rajoittui Haas UMC-750 -työstökeskuksessa 12 000 kierrokseen minuutissa. Työkalu- ja teräpalavalmistajien suositusten mukaan työkaluille saatiin jotkin lähtöarvot, joista loput arvot saatiin määriteltä. Alumiinin työstöön saatiin yleisohjeet (Karttiala 2023), jotka pätevät koneistuslaboratorion työkaluille (taulukko 4).

Taulukko 4. Työkalujen työstöarvot.

Työstöarvot	Lastuamisnopeus V_c	Hammassyöttö f_z
Pikaterästyökalut HSS	250 m/min	0,05 mm
Kovametallityökalut	1000 m/min	0,05 mm
Poraustyökalut	50 m/min	0,15 mm

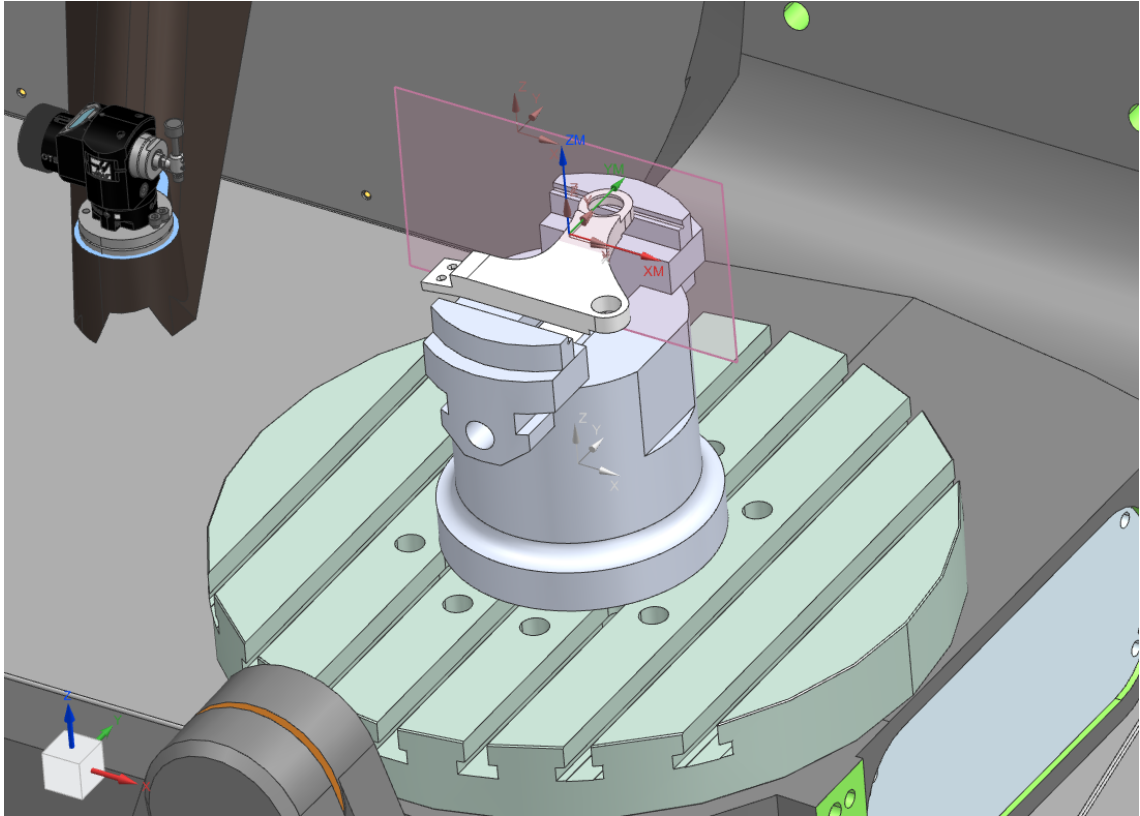
Työssä pyrittiin hyödyntämään vakiotyökaluluettelossa saatavilla olevia työkaluja, joiden simulointi oli helppoa Haas UMC-750 -konesimulointimallin avulla.

6.2 Työstöratojen suunnittelu

Valmistusta edeltävä työvaihe oli luoda 3D-CAD-malleille työstöradat CAM-ohjelmalla. Tarkoituksena oli luoda ohjelma, jossa optimoidaan

- työvaiheiden järjestys
- työkalujen vaihdot
- työstöarvot, eli syötöt ja nopeudet
- rouhinta- ja viimeistelyvaiheet.

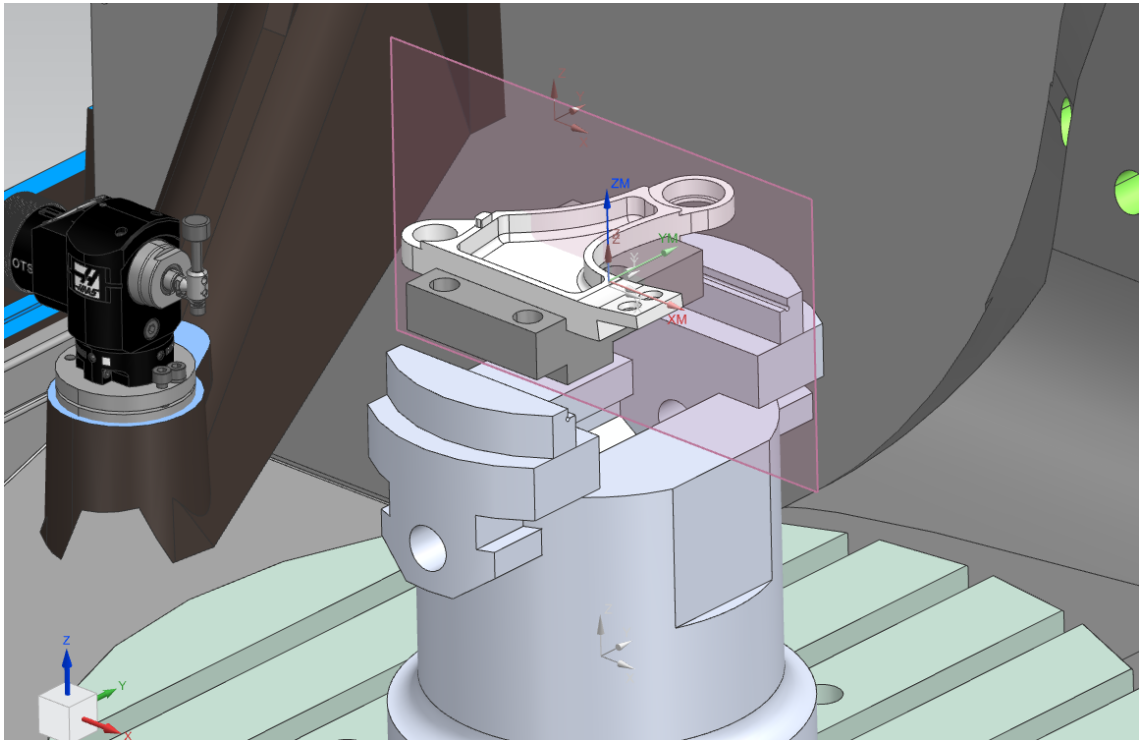
Suunnitteleamalla CAM-ohjelma hyvin voitiin nopeuttaa työstöaikoja ja pystyttiin pidentämään työkalujen elinikää. CAM-ohjelmaa suunnitellessa tuli ensin määrittellä kappaleen orientaatio työstökoneessa. Kuvassa 49 on hahmoteltuna takakolmion Dropout_D-osan orientaatio ohjelman pohjaksi.



Kuva 49. Dropout_D-malli orientoituna Haas UMC-750 -konemalliin Siemens NX -ohjelmassa.

Haas UMC-750 -konemalli otettiin jokaisen osan pohjalle, mikä mahdollisti työstörajojen simuloinnin, koneistuslaboratorion vakiotyökaluluettelon käytön sekä törmäyksenestojen määrittelyyn. Kappaleiden orientaatioita suunniteltaessa tuli miettiä, mitä kiinnitintä kannattaisi käyttää. Kiinnittimen ulottuvuus työstökeskuksessa määritteli, mihin työstörajoja voitiin luoda eteenkin 3+2-akselisessa työstössä, jossa pöytä oli käännettynä. Kappaleen orientaatio ja kiinnitykset määrittivät myös aihion kokoa, joka otettiin huomioon jättämällä kiinnittimen leuat aihioon verran auki simulointimallissa, jotta törmäyksenestön määrittely vastaisi mahdollisimman paljon tositilannetta. Aihion määrittelyssä aihioon jätettiin työvarat, eli aihio on hiukan suurempi kuin työkappale. Oikean ahiokoon valinnalla säästettiin työstöajoissa ja materiaalihukkaa pienennettiin. Törmäyksenestoon määriteltiin kiinnittimen osat ja mahdolliset jigat kääntöpuolen operaatioita varten. Kiinnitysten määrää pyrittiin minimoimaan. Kääntöpuolen koneistamista varten rakennettiin jigat ja osien symmetrisen rakenteen mahdollistaessa jigat

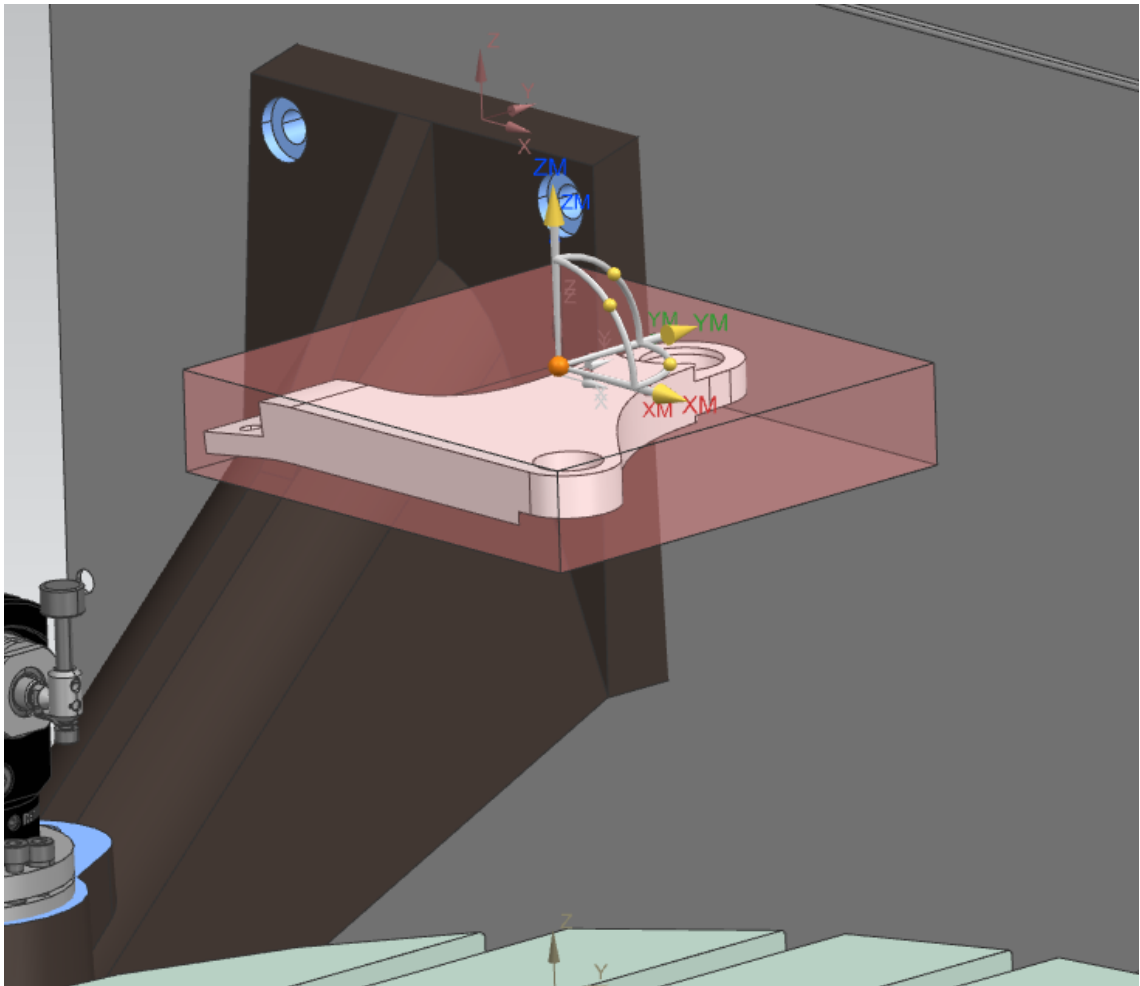
luotiin niin, että pyörän molempien puolien osat pystyttäisiin kiinnittämään toisessa vaiheessa samaan jigiiin (kuva 50).



Kuva 50. Dropout_D:n kääntöpuolen operaatio ja jigiiin malli.

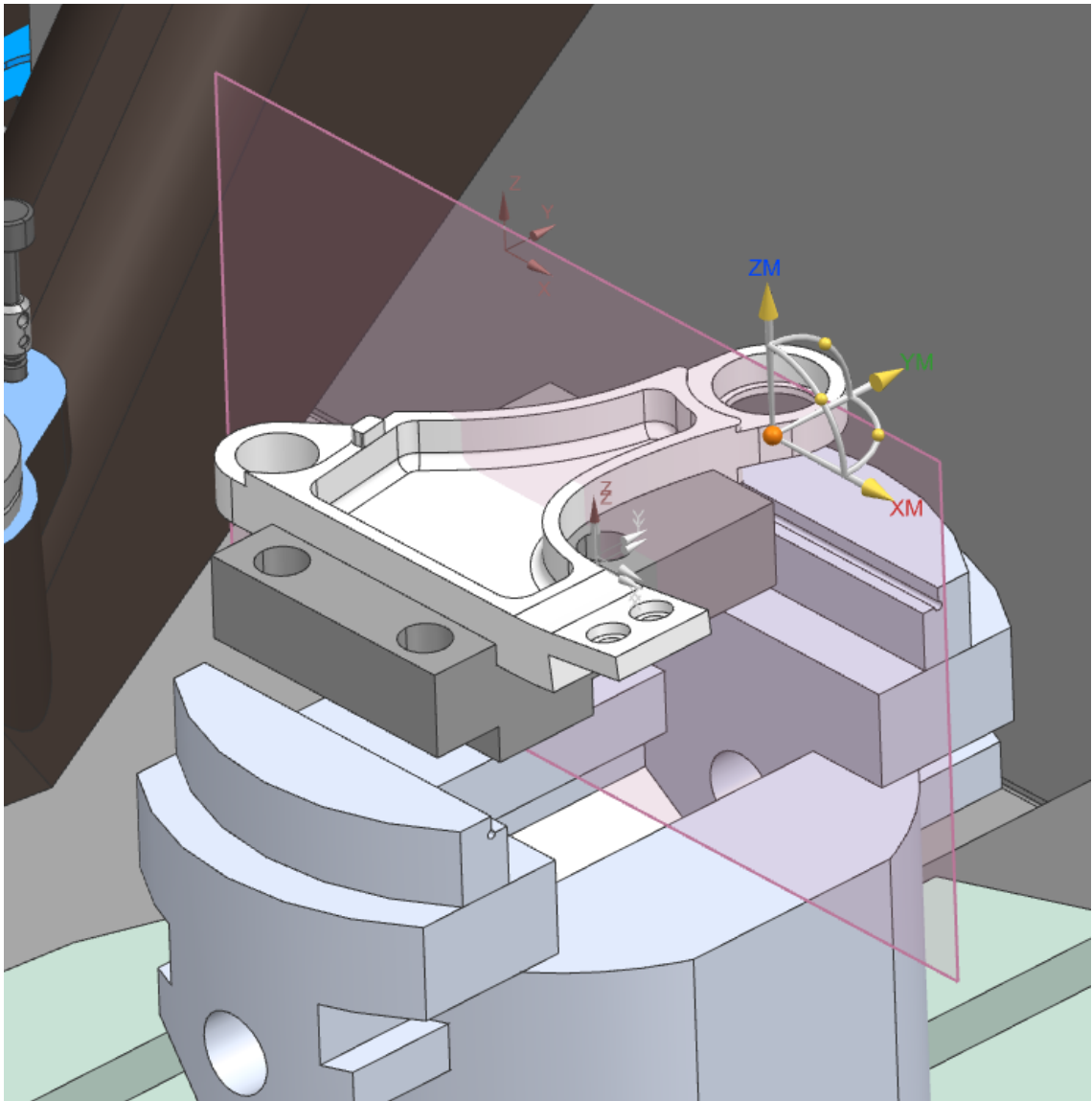
Jigiiin malli lisättiin törmäyksenestoon ohjelmassa, jotta työkalujen radat ja lähestymisliikkeet eivät osuisi kiinnityksiin. Jigit valmistettiin yhdestä alumiiniahiosista ja ne leikattiin ahiosahalla keskeltä, joka mahdollisti kappaleen puristamisen toisessa operaatiossa. Jigiiin koneistettiin muotosovitteet ja kiinnitysreiät tornikiinnittimelle. Dropouttien jigissä pystyttiin koneistamaan molemmat symmetriset Dropout-osat. Jigit suunniteltiin niin, että ne tukisivat kappaletta mahdollisimman suurelta pinta-alalta ja niiden profiili olisi matala vähentääkseen värinöitä ja kappaleen irtoamista kesken koneistuksen.

Ensimmäinen operaatio ja kääntöpuolen operaatio sisällytettiin samaan ohjelmaan, joka helpotti käsittelyä ja IPW:n käyttöä. Molemmille operaatioille tuli määritellä nollapistekoordinaatit, joiden suhteen työstökeskus luo työstöradat. Ensimmäinen nollapistekoordinaatisto G54 sijoitettiin ahion otsapintaan ja ahion keskelle, minkä näkee kuvasta 51.



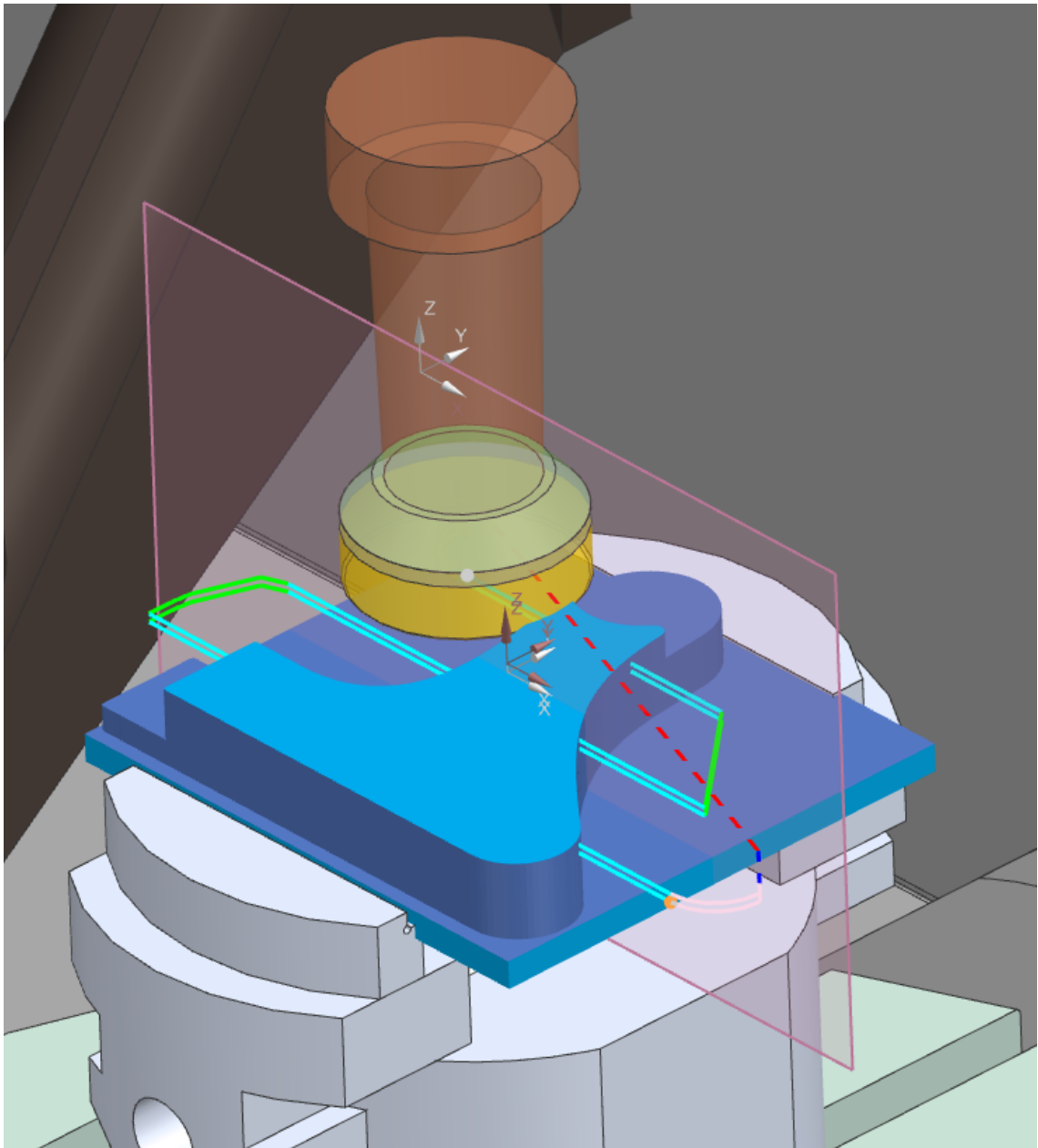
Kuva 51. Dropoutin ensimmäisen operaation aihio ja nollapistekoordinaatisto G54.

Toisessa operaatiossa oli järkevintä käyttää koordinaatistoa, joka viittaisi ensimmäisessä operaatiossa tehtyyn koneistettuun piirteeseen. Ensimmäiseen operaatioon luotu reikä laakerisovitteelle koneistettiin aihion läpi tarkoituksella, jotta kääntöpuolen operaation nollapistekoordinaatiston x- ja y-mitat saatiin reiän keskelle. Z-suunnan pinta määriteltiin koneistetusta jigin pohjapinnasta, jota vasten osa kiristettiin, joka mahdollisti tarkan nollapistekoordinaatiston myös kääntöpuolelle. Kuvassa 52 näkyy kääntöpuolen nollapistekoordinaatiston sijainti.



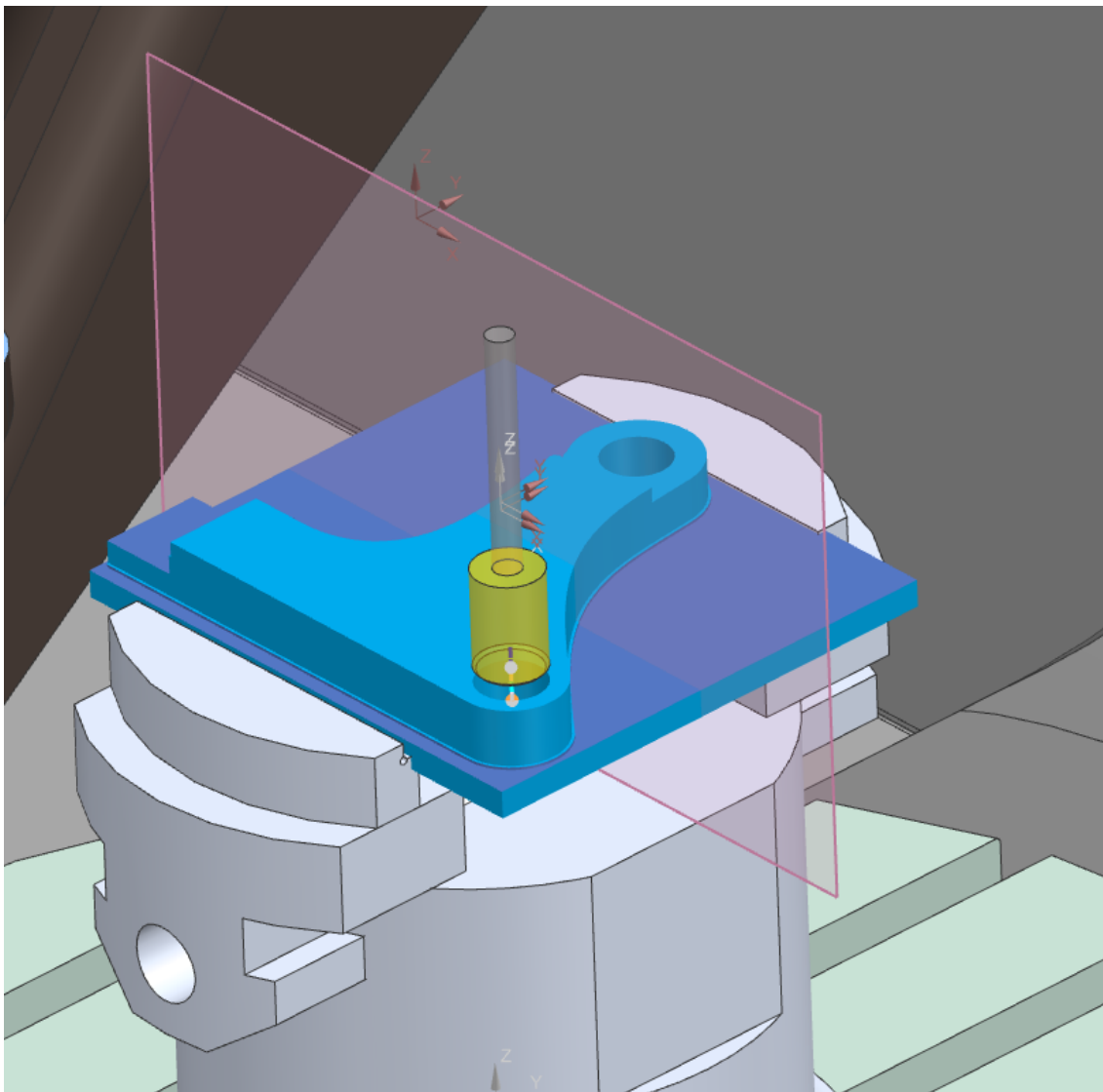
Kuva 52. Dropoutin kääntöpuolen operaation nollapistekoordinaatiston sijainti.

Kappaleen orientaatiot, nollapistekoordinaatistot ja törmäyksenestot oli nyt määriteltä, jonka jälkeen aloitettiin työstörajojen suunnittelu. Työstövaiheet aloitetaan mahdollisimman tehokkaalla materiaalinpoistolla, joka toteutettiin rouhinta-työvaiheilla. Rouhinnassa pyrittiin poistamaan materiaalia tehokkaasti rouhinta-työkaluilla ja työvarat jätettiin aihioon viimeistelyvaiheita varten. Rouhintaan käytettiin Adaptive milling- ja Floor facing -operaatioita (kuva 53).



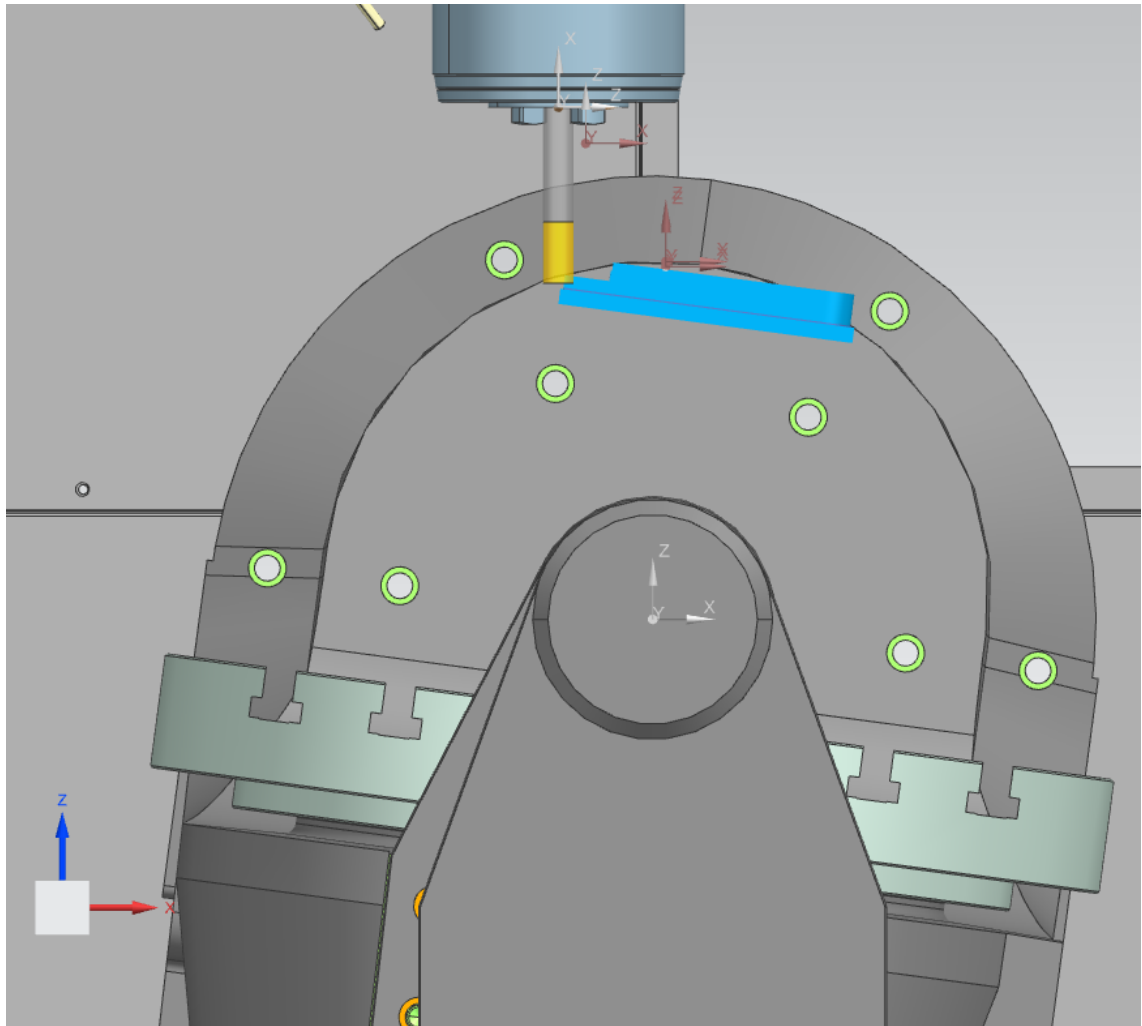
Kuva 53. Dropout_D:n rouhintavaiheen Floor facing -operaatio.

Rouhintavaiheessa käytettävät työkalut olivat kovametallityökaluja, jotka mahdollistivat suurien työstönopeuksien ja -syöttöjen käyttöä (taulukko 4). Rouhintaan sisältyi myös poraustyökierrot, jossa geometrisesti tarkka reikä ensin porattiin, väljennettiin ja lopuksi kalvettiin oikeaan kokoon. Kuvassa 54 näkyy porauksen työkierrot ja jäljellä oleva IPW.



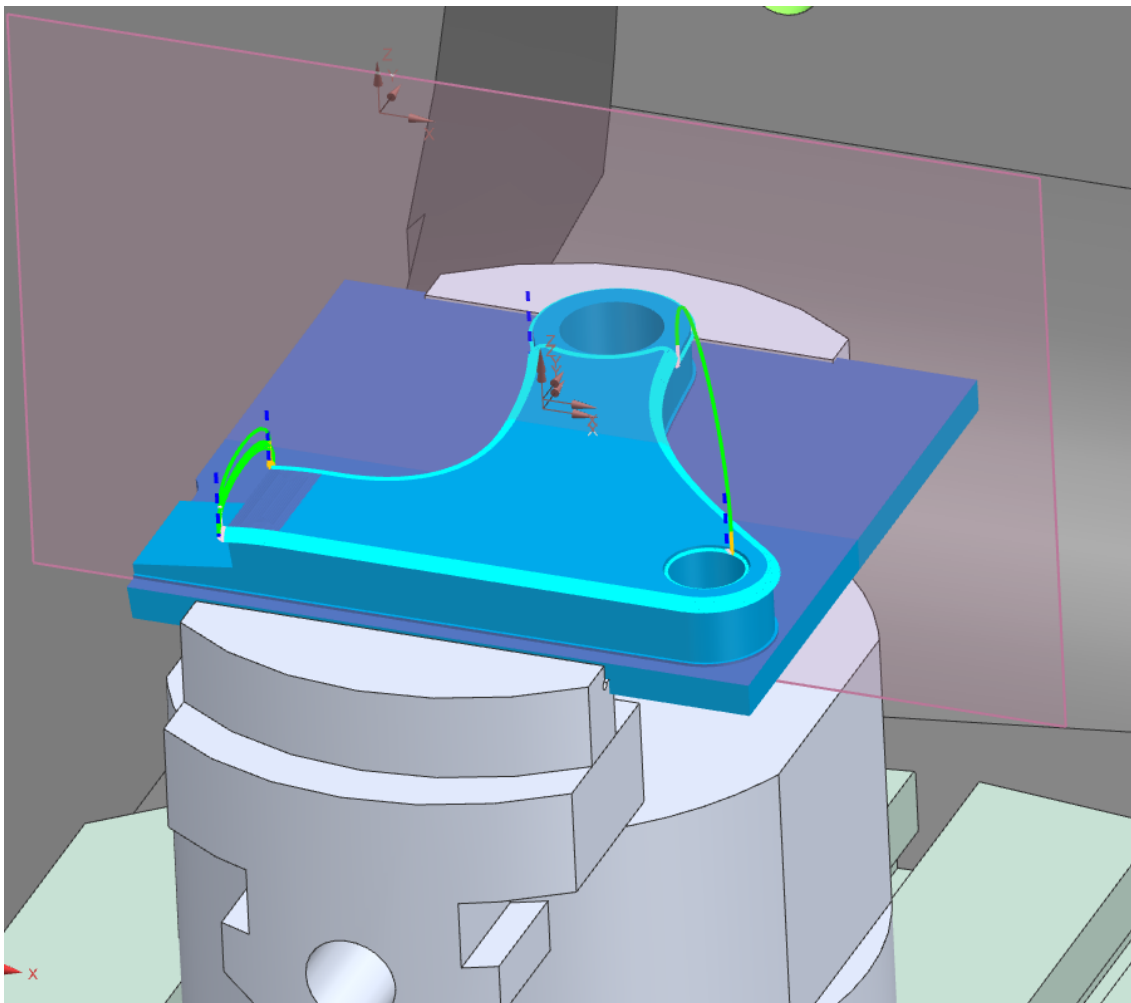
Kuva 54. Dropout_D:n poraustyökierrot ja IPW.

Rouhintavaiheiden jälkeen kappale sai muotonsa, mutta rouhintavaiheissa jätetyt karkeat pinnat ja työvarat tuli viimeistellä. Viimeistelyvaihteissa käytetyt työvaiheet ovat samoja kuin rouhintavaiheissa, mutta eroina ovat pienemmät lastunpaksuudet ja työstövaroja ei jätetty, sillä kappale haluttiin koneistaa sen suunniteltuun kokoon. Koneistuksessa käytettiin 5-akselisen työstökoneen hyötyjä ja eri kulmassa olevat piirteet koneistettiin käyttäen 3+2 akselin työstöä. Ennen työstämistä, työstökone kääntää B-akselin määriteltyyn kulmaan, jotta piirteille saadaan koneistettua suorat pinnat. Kuvassa 55 näkyy 3+2-akselinen työstö kappaleen viimeistelyvaiheissa.



Kuva 55. Dropout_D:n 3+2-akselinen työstö viimeistelyvaiheessa.

Viimeistelyn viimeisessä vaiheessa kappaleen terävät reunat pyöristettiin käyttäen 3 axis deburring -operaatioita, jossa pallopäätyökalulla reunoista poistettiin purseet, sekä luotiin pyöristykset (kuva 56). Pyöristyksen säteet ja työkiertojen määrä saatiin määriteltyä työvaiheessa.



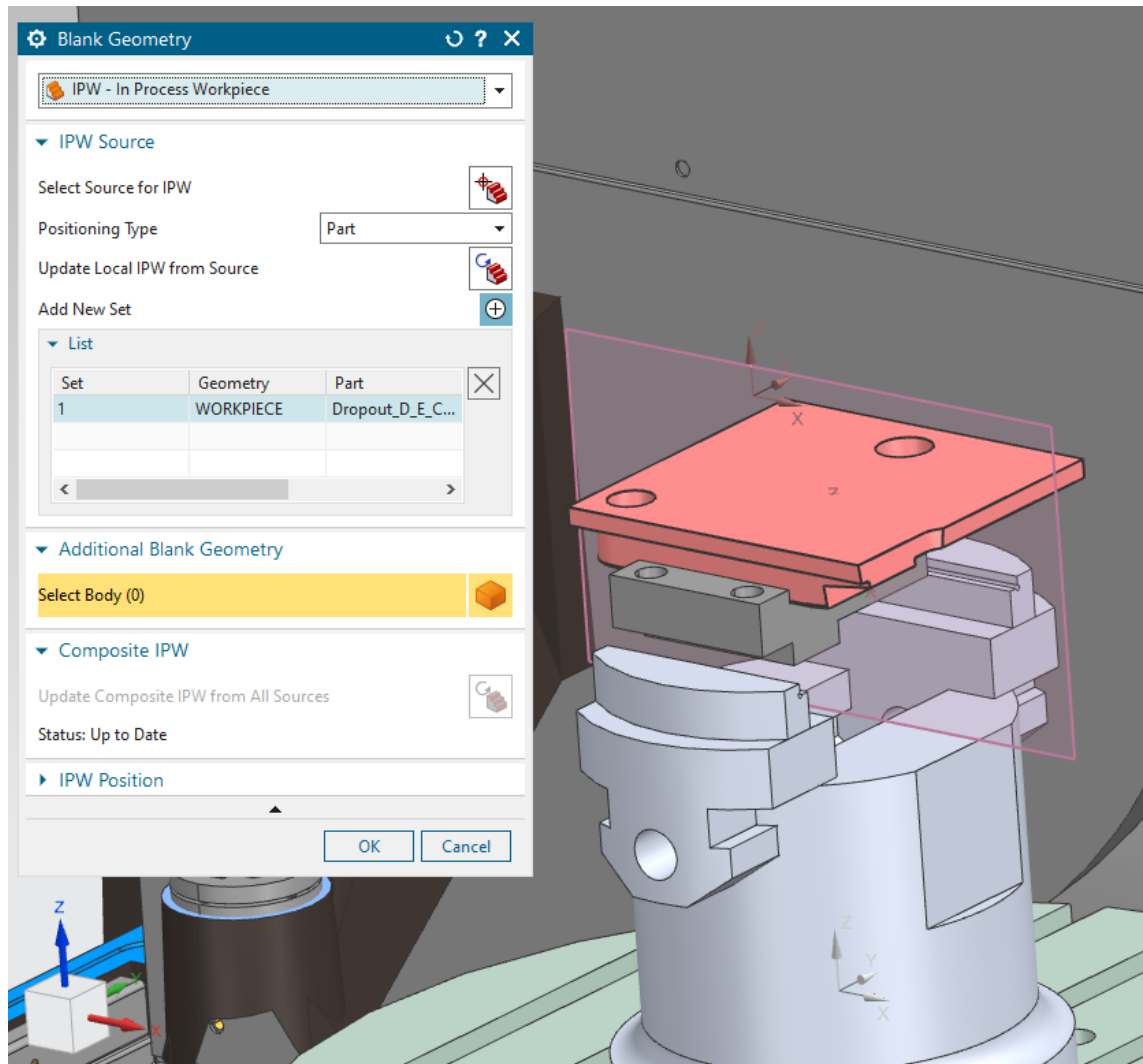
Kuva 56. Dropout_D:n ensimmäisen operaation viimeinen työstövaihe: purseenpoisto ja pyöristykset.

Ensimmäisen operaation jälkeen kappale voitiin irrottaa työstökeskuksesta ja tehdä laadunvarmistus, jossa tarkistettiin geometrisesti tarkat mitat. Kuvassa 57 on Dropout_D ensimmäisen operaation jälkeen.



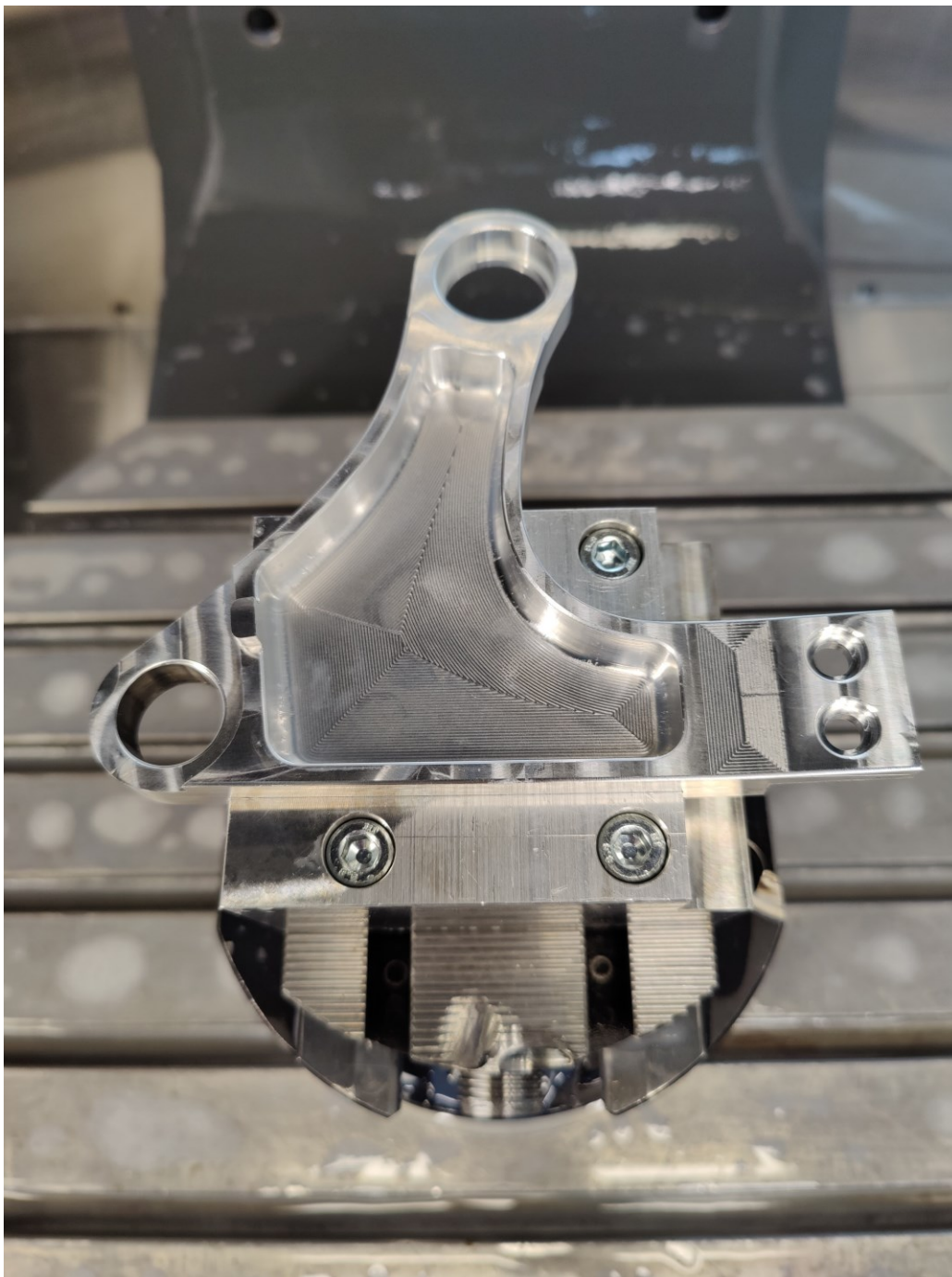
Kuva 57. Dropout_D:n ensimmäinen koneistusoperaatio.

Toisen puolen operaatiossa oli edullista pitää molemmat operaatiot samassa ohjelmassa, sillä aihion määrittäminen toiseen vaiheeseen onnistui Siemens NX IPW -määrittelyn avulla. Toiseen vaiheeseen haluttiin päivittyvä aihio, joka ottaisi huomioon ensimmäisessä vaiheessa tehtävät muutokset. Toisen vaiheen ahioksi valittiin ensimmäisen vaiheen IPW (kuva 58), jonka avulla saatiin toistettua rouhinta- ja viimeistelytyökierrot kappaleen toiselle puolelle.



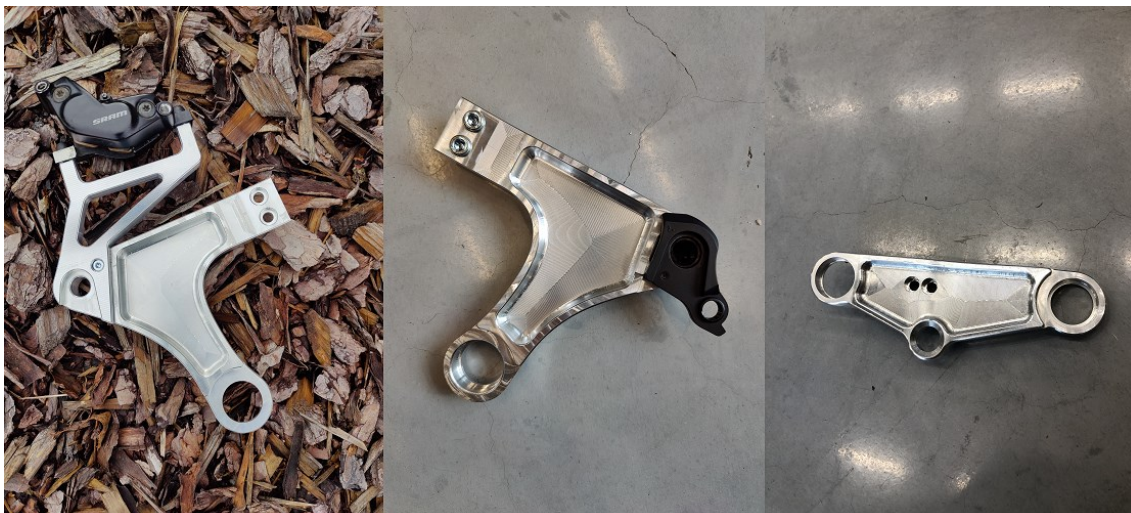
Kuva 58. Dropout_D:n toisen operaation IPW.

Positioning type eli IPW:n sijainti toisessa vaiheessa pidettiin vakioasetuksessa part. Kuvasta 58 huomataan aiemmassa operaatiossa läpi koneistetut reiät, joista voitiin mitata tarkasti toisen operaation nollapistekoordinaatisto. Status kertoo IPW:n tilan, joka voidaan päivittää aina kun ensimmäisen operaation työvaiheisiin tehdään muutoksia. IPW:n voi tallentaa myös omaksi malliksi, jos halutaan, etteivät edeltävät työvaiheet muokkaa IPW:tä toisessa vaiheessa. Toisen operaation työvaiheet noudattavat samoja periaatteita kuin ensimmäisen operaation työvaiheet. Rouhintatyövaiheiden jälkeen kappale viimeisteltiin ja tehtiin pyöritykset, viisteet ja purseiden poistot. Kuvassa 59 on valmis kappale toisen ja viimeisen operaation jälkeen ensimmäisen revision jigissä.

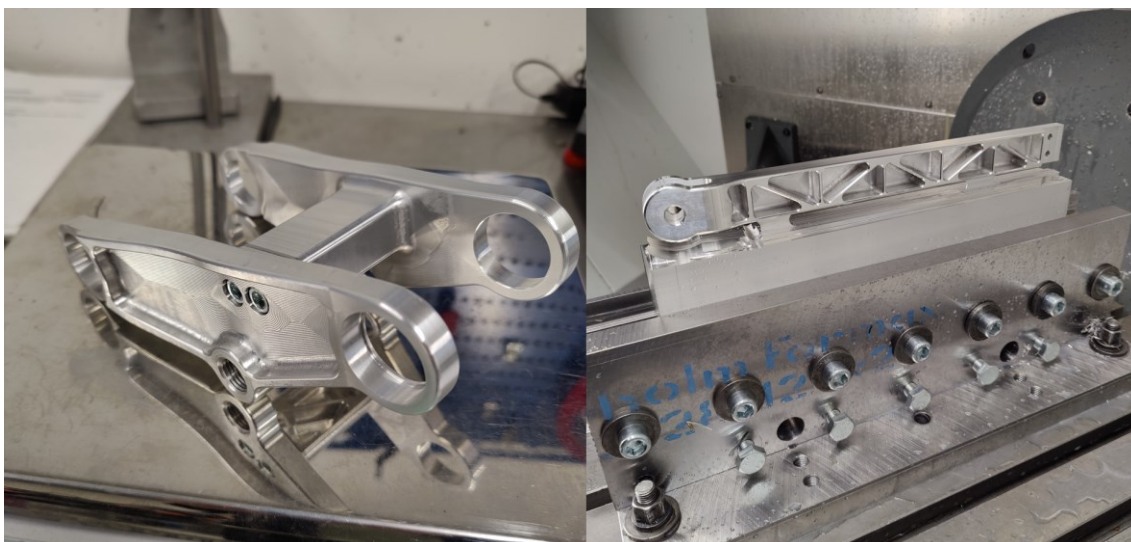


Kuva 59. Dropout_D:n viimeisteltynä koneistusoperaatioiden jälkeen.

Takakolmion ja etukolmion valmistettavat koneistettavat osat noudattivat samoja valmistusperiaatteita kuin esitetty Dropout_D. Koneistettavien osien tilanteista pidettiin päiväkirjaa Microsoft Teamsilla, josta projektiin osallistuvat pystyivät seuraamaan ja päivittämään valmistustilannetta. Kuvassa 60 ja 61 on valmistettuja ja toimivia osia prototyypirunkoon.



Kuva 60. Valmistetut osat prototyypirunkoa varten.



Kuva 61. Koneistettu vipumekanismi ja seat stay prototyypirunkoa varten.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteina oli tutkia eri valmistusmenetelmiä polkupyörän suunnittelussa ja valmistuksessa ja vertailla niiden hyötyjä ja haittoja. Työssä vertailtiin ainetta lisäävän valmistuksen ja koneistuksen suunnitelmia monimateriaalirungon suunnittelussa ja saatiin valittua sopivat valmistusmenetelmät. Suunnittelun pohjalle määriteltiin kinematiikkapisteet kinematiikkasovellus Linkagessa ja päätettiin geometriapisteet rungon rakenteelle. Suunnitelmat luotiin käyttäen eri CAD-ohjelmia ja työn vaiheista raportoitiin ohjaajalle. Viimeisessä vaiheessa suunniteltiin CAM-ohjelmat malleille ja käytettiin ammattikorkeakoulun koneistuslaboratoriossa sijaitsevaa Haas UMC-750 -työstökeskusta koneistamaan rungon komponentit.

Työ eteni valmistusvaiheeseen, joka sisältää paljon manuaalista työtä työstökeskuksella. Osien koneistamista ja rungon kokoamista jatketaan tulevaisuudessa. Opinnäytetyössä saadut opit antoivat edellytykset itsenäiselle työskentelylle, jolla rungon valmistusta voidaan jatkaa. Tarkoituksena on valmistaa prototyyppirunko, jonka jälkeen voitaisiin todeta konsepti toimivaksi ja valmistaa osia uusien runkoihin käyttäen valmiiksi luotuja suunnitelmia.

Valmistuksen tukena toimi koneistuslaboratorion ohjaajat, joista erityisesti ajoneuvo- ja konetekniikan projektipäällikkö Juho Jalava-Kanervio avusti koneeseen ja työkaluihin liittyvissä kysymyksissä.

Kiitokset Alumecolle ja Paul Eklundille, joka vastasi materiaalin toimituksesta projektiin. Kiitokset ohjaajalle tuesta ja arvokkaista neuvoista.

Lähteet

Androus, Trevor; Chan, Richard; Dagg, Connor; Dorsett, Nick & Gonzales, Sasha. 2021. Suspension Handbook. Verkkoaineisto. CalPolyPomona. <<https://drive.google.com/file/d/1bnBYAWORfA5LGj0CZxD5lzreYHy-qrpB8/view>>. 9.2021. Luettu 18.10.2023.

Aston, Paul. 2018. The Resurgence of High Pivot Suspension Design. Verkkoaineisto. Pinkbike. <<https://www.pinkbike.com/news/the-resurgence-of-high-pivot-suspension-design.html>>. 4.7.2018. Luettu 18.10.2023.

Benedict, Tyler. 2018. Suspension Tech: What is Anti-Rise?. Verkkojulkaisu. Bikerumor. <<https://bikerumor.com/suspension-tech-what-is-anti-rise/>>. 4.10.2018. Luettu 18.10.2023.

Bulej, V; Kuric, I; Sága, M; Vaško, M; Ságová, Z; Bartoš, M & Legutko, S. 2022. Analysis of Symmetrical/Asymmetrical Loading Influence of the Full-Suspension Downhill Bicycle's Frame on the Crack Failure Formation at a Critical Point during Different Driving Scenarios and Design Improvement. Symmetry 2022, 14, 255. <<https://doi.org/10.3390/sym14020255>>.

Desktop metal. 2023. Materials for all of your applications. Verkkoaineisto. Material library. <<https://www.desktopmetal.com/materials/#materials-by-type>>. Luettu 17.10.2023.

Fedor, Chris; Huerta, Ernesto; Ritter, Greg & Wu, Michael. Universal Bike Suspension Design. 2019. Verkkoaineisto. California Polytechnic State University. <<https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1547&context=mesp>>. Luettu 26.10.2023.

Frame fit specifications. 2023. Verkkoaineisto. SRAM. <<https://www.sram.com/globalassets/document-hierarchy/frame-fit-specifications/mtb/2023-mtb-frame-fit-specifications.pdf>>. Luettu 25.10.2023.

Frame Specifications. 2023. Verkkoaineisto. Universal Derailleur Hanger. <<https://www.universalderailleurhanger.com/>>. Luettu 25.10.2023.

Gonzales-Larionova, Sasha. 2020. Mountain Bike Suspension Analysis and Data Acquisition. Verkkojulkaisu. California State Polytechnic University. <<https://scholarworks.calstate.edu/downloads/tx31qr05p>>. 2020. Luettu 22.10.2023.

Hölsä, Aapo. 2021. Alumiinin ja hiilikuitukomposiitin välisen liimaliitoksen optimointi. Kandidaatintyö. Oulun yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Jultika-tietokanta.

- Karttiala, Tero. 2023. Lehtori, Metropolia Oy. Keskustelu. 30.8.2023.
- Kokkonen, Leo. 2021. Method of manufacturing tubular hollow profile vehicle frame parts. WO 2021/204987 A1. World intellectual property organization.
- Loctite EA 9466. 2023. Verkkoaineisto. Henkel-adhesives. <https://www.henkel-adhesives.com/fi/en/product/structural-adhesives/loctite_ea_94660.html>. Luettu 19.10.2023.
- Lin, Bruce. 2023. Fork offset explained. Verkkajulkaisu. Theproscloset. <<https://www.theproscloset.com/blogs/news/why-mountain-bike-use-reduced-offset-forks>>. 30.3.2022. Luettu 10.11.2023.
- Linkage X3. Racooz Software. Verkkajulkaisu. <<https://www.bikechecker.com/linkagedoc/>>. Luettu 16.11.2023.
- Mansikka-aho, Pekka. 2014. Materiaalia lisäävä valmistus. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- Moilanen, Marko. 2021. Maastopyörien runkogeometria. Kandidaatintyö. Oulun Yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Jultika-tietokanta.
- McLeay, Hugh. 2012. Suspension Theory. Verkkoaineisto. i-track suspension. <<http://www.i-tracksuspension.com/suspensiontheory.html>>. Luettu 18.10.2023.
- Mäennenä, Jukka. 2020. Näin toimii täysjoustomaastopyörän runko. Verkkoaineisto. Tekniikan Maailma. <<https://tekniikanmaailma.fi/nain-toimii-taysjoustomaastopyoran-runko-silla-on-suurta-merkitysta-missa-nivelet-sijaitsevat-ja-mil-lainen-iskunvaimennin-on/>>. 2.4.2020. Luettu 18.10.2023.
- Roberts, Dan. 2020. Engineering: How Are Seat Tube Angles Actually Measured & Why Does It Matter?. Verkkoaineisto. Pinkbike. <<https://www.pinkbike.com/news/engineering-seat-tube-angles.html>>. 31.7.2020. Luettu 22.10.2023.
- Stott, Seb. 2018. The ultimate guide to mountain bike rear suspension systems. Verkkajulkaisu. Bikeradar. <<https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-mountain-bike-rear-suspension-systems/>>. 2.10.2018. Luettu 22.10.2023.
- Stott, Seb. 2020. The ultimate guide to bike geometry and handling. Verkkajulkaisu. Bikeradar. <<https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-bike-geometry-and-handling/>>. 11.9.2020. Luettu 18.10.2023.
- Technology. 2023. Verkkoaineisto. Atherton bikes. <<https://www.athertonbikes.com/technology/technology.html>>. Luettu 17.10.2023.

What is Design for Manufacturing or DFM? 2020. Verkkoaineisto. East West Manufacturing. DFMA. <<https://news.ewmfg.com/blog/manufacturing/dfm-design-for-manufacturing>>. Luettu 17.10.2023.

Willard, Joshua. 2016. Bicycle Frame Design Independent Research. Verkkojulkaisu. <<https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/04/68/39/00001/Willard%20-%20Independent%20Research.pdf>>.

Wits, Wessel. 2015. Powder bed based metal additive manufacturing process. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Powder-bed-based-metal-additive-manufacturing-process-2_fig2_275466156>. Luettu 17.10.2023.

Loctite 9466 -liiman datataulukko

LOCTITE®

Technical Data Sheet

LOCTITE® EA 9466™

Known as LOCTITE® Hysol® 9466™
August 2019

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® EA 9466™ provides the following product characteristics:

Technology	Epoxy
Chemical Type	Epoxy
Appearance (Resin)	White opaque paste
Appearance (Hardener)	White translucent liquid
Appearance (Mixture)	Off-white opaque paste
Components	Two components - requires mixing
Viscosity	Medium
Mix Ratio, (by volume)	2 : 1
Resin : Hardener	
Mix Ratio, (by weight)	100 : 50
Resin : Hardener	
Cure	Room temperature cure after mixing
Application	Bonding

LOCTITE® EA 9466™ is a toughened, industrial grade epoxy adhesive with extended work life. Once mixed, the two component epoxy cures at room temperature to form a tough, off-white bondline which provides high peel resistance and high shear strengths. The fully cured epoxy is resistant to a wide range of chemicals and solvents, and acts as an excellent electrical insulator. LOCTITE® EA 9466™ provides excellent bond strengths to a wide variety of plastics and metals. Typical applications include general purpose industrial applications requiring extended work life for adjusting parts during assembly.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Resin:

Specific Gravity @ 25 °C	1.0
Flash Point - See SDS	
Viscosity, Brookfield - RVT, 25°C, mPa·s (cP):	
Spindle 6, speed 20 rpm	15,000 to 50,000

Hardener:

Specific Gravity @ 25 °C	1.0
Flash Point - See SDS	
Viscosity, Brookfield - RVT, 25°C, mPa·s (cP):	
Spindle 5, speed 50 rpm	25,000 to 60,000

Mixed:

Working life, minutes	60
-----------------------	----

TYPICAL CURING PERFORMANCE

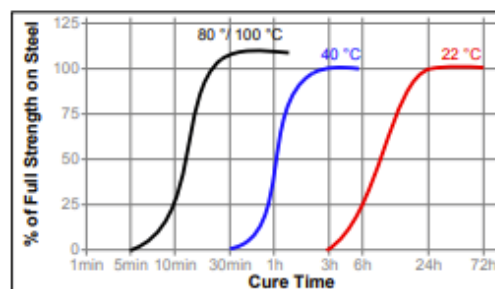
Fixture Time

Fixture time is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

Fixture Time, ISO 4587, minutes:	
Steel (grit blasted)	180

Cure Speed vs. Time, Temperature

The rate of cure will depend on the ambient temperature, elevated temperatures may be used to accelerate the cure. The graph below shows shear strength developed with time at various temperatures on grit blasted steel lap shears and tested according to ISO 4587.



TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 7 days @ 22 °C, 1.2 mm thick film

Physical Properties:

Glass Transition Temperature, ASTM E 1640, °C	62
Shore Hardness, ISO 868, Durometer D	60
Elongation, ISO 527-3, %	3
Tensile Strength ASTM D 882	N/mm ² 32 (psi) (4,640)
Tensile Modulus, ISO 527-3	N/mm ² 1,718 (psi) (249,110)

Electrical Properties:

Dielectric Breakdown Strength, IEC 60243-1, kV/mm	30
---	----

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL

Adhesive Properties

Cured for 5 days @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)	N/mm ² 37.0 (psi) (5,365)
Aluminum (abraded)	N/mm ² 26.0 (psi) (3,770)
Aluminum (anodised)	N/mm ² 17.9 (psi) (2,595)
Galvanized Steel (Hot Dipped)	N/mm ² 8.5 (psi) (1,230)
Stainless steel	N/mm ² 23.0 (psi) (3,335)
Polycarbonate	N/mm ² 5.3 (psi) (765)
Nylon	N/mm ² 1.6 (psi) (230)
Wood (Fir)	N/mm ² 11.3 (psi) (1,635)
GRP	N/mm ² 5.0 (psi) (725)
ABS	N/mm ² 4.7 (psi) (680)

180° Peel Strength, ISO 8510-2:

Steel (grit blasted)	N/mm 8.0 (lb/in) (45.5)
----------------------	----------------------------

Tensile Strength, ISO 6922:

Steel pin (grit blasted) to Soda glass	N/mm ² 43.2 (psi) (6,260)
--	---

Impact Strength, ISO 9653, J/m² :

Steel (grit blasted)	5.8
----------------------	-----

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

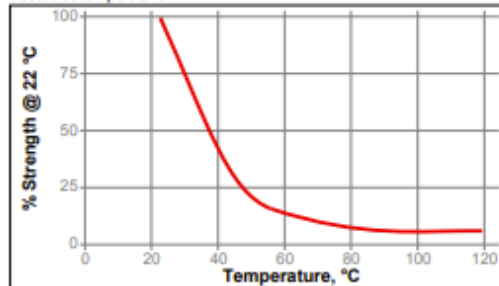
Cured for 5 days @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)

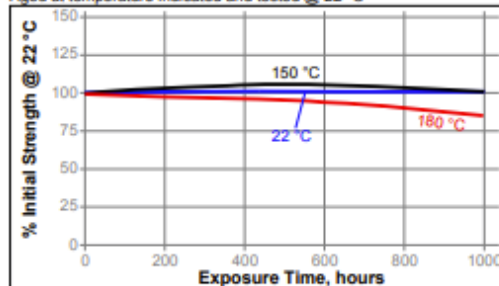
Hot Strength

Tested at temperature



Heat Aging

Aged at temperature indicated and tested @ 22 °C



Chemical/Solvent Resistance

Aged under conditions indicated and tested @ 22 °C.

Environment	°C	% of initial strength	
		500 h	1000 h
Motor oil (10W30)	87	135	145
Unleaded gasoline	22	95	125
Water/glycol 50/50	87	75	75
Salt fog	22	---	80
98% RH	40	85	90
Condensing Humidity	49	---	90
Water	22	---	90
Acetone	22	75	90
Isopropanol	22	90	100

Tensile Strength, ISO 6992:

Steel pin (grit blasted) to Soda glass

Environment	°C	% of initial strength	
		500 h	1000 h
98% RH	40	90	90