



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

MAASTOPYÖRIEN RUNKOGEOMETRIA

Marko Moilanen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2021

TIIVISTELMÄ

Maastopyörien runkogeometria

Marko Moilanen

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 40 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Jussi Salakka

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia polkupyörien runkogeometriaa ja sen vaikutusta maastopyörien käyttäytymiseen. Työ on rajattu koskemaan rungon rakenteita, toiminnallisia mittoja ja niiden yhteyksiä. Työssä keskityttiin rungon mitoituksen terminologian määrittämiseen ja kuvaamaan eri suunnitteluratkaisujen hyötyjä ja erityispiirteitä. Työssä perehdyttiin myös maastopyörän geometrian vaikutukseen sen dynamiikkaan jousitusratkaisujen ja ohjausdynamiikan osalta.

Työtä varten aiheeseen perehdyttiin alan kirjallisuuden sekä verkkolähteiden pohjalta. Työn perusteella voidaan todeta, että rungon suunnittelu on täynnä kompromisseja ja tasapainoilua eri ominaisuuksien välillä, ja että suunnittelijan tehtäväksi jää painottaa haluttuja ominaisuuksia saadakseen rungon, joka soveltuu käyttötarkoitukseensa mahdollisimman hyvin.

Asiasanat: Polkupyörät, maastopyörät, geometria, jousitus

ABSTRACT

Mountain bike frame geometry

Marko Moilanen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 40 pp.

Supervisor at the university: Jussi Salakka

The aim of this bachelor's thesis was to research bicycle frame geometry and the effect it has on mountain bikes. The scope of this study includes frame design regarding the key measurements of the frame and their relations to each other. This thesis focuses on defining the terminology of mountain bike frames and explaining the characteristics and advantages of different types of designs. This thesis also looks at suspension linkage design and steering dynamics specific to a mountain bike.

Research for this thesis was conducted through literature and web sources. It was found that frame design is full of compromise and balancing between different features and that it is up to the designer to highlight these features to end up with a product that is most capable of fulfilling its purpose.

Keywords: Bicycles, mountain bikes, geometry, suspension

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty osana tekniikan kandidatin tutkintoa Oulun yliopiston konetekniikan tutkinto-ohjelmassa. Työn päätarkoituksena oli perehtyä maastopyörien runkogeometriaan ja tutustuttaa lukija sen vaikutukseen pyörän käyttäytymisen kannalta. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena pääosin marraskuun 2020 ja tammikuun 2021 välisenä aikana.

Haluan kiittää Oulun yliopistolla työni ohjannutta ja tarkastanutta Jussi Salakkaa hyvistä neuvoista ja opastuksesta työn aikana.

Oulu, 5.2.2021



Marko Moilanen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 MAASTOPYÖRÄ	5
2.1 Maastopyörätyypit.....	6
2.2 Maastopyörän runko.....	8
2.2.1 Rungon osat	9
2.2.2 Rungon materiaalit.....	10
3 STAATTINEN GEOMETRIA	12
3.1 Rungon koko	12
3.2 Rungon mitoitus.....	13
4 DYNAAMINEN GEOMETRIA.....	21
4.1 Ohjausdynamiikka.....	21
4.2 Jousitus.....	24
4.2.1 Jousituksen kinematiikka.....	24
4.2.2 Jousitusratkaisut.....	32
5 YHTEENVETO	38

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena on maastopyörien runkogeometria. Työssä esitellään yleisesti polkupyörien rakennetta ja sen historiaa, polkupyörän rungon osien ja niiden mitoituksen terminologiaa sekä runkogeometrian vaikutusta maastopyörän ajokäyttäytymiseen.

Maastopyörät ovat kehittyneet viime vuosina paljon, ja geometrian osalta vallalla oleva trendi on ollut loiventaa keulakulmia ja pidentää akseliväliä. Jousitusteknologian kehittyessä joustomatkatkin ovat kasvaneet kautta linjan. Työssä keskitytään näiden nykyaikaisten maastopyörien runkojen erityispiirteisiin, niiden suunnitteluun sekä eri suunnitteluratkaisujen pohjalta syntyviin ilmiöihin käyttäjän näkökulmasta. Erityinen huomio kiinnitetään täysjousitettujen pyörien jousituksen kinematiikkaan. Työtä varten perehdyttiin erilaisiin jousitusratkaisuihin ja tutkittiin niitä jousituksen kinematiikan tarkasteluun soveltuvalla suunnitteluohjelmalla.

Työssä jätetään rungon ulkopuoliset osat perusteellisemmän tarkastelun ulkopuolelle, mutta siinä perehdytään seikkoihin, jotka rungon suunnittelussa tulee huomioida liittyen näihin osiin. Valitsin kyseisen aiheen, koska minulla on siitä käytännön kokemusta maastopyöräilyharrastukseni kautta, ja koska maastopyörien suunnitteluratkaisut ja alan tekninen kehitys ovat kiehtoneet minua jo pitkään.

2 MAASTOPYÖRÄ

Maastopyörä on polkupyörä, joka on suunniteltu maastossa ajettavaksi. Maastopyörillä on paljon yhtäläisyyksiä muiden polkupyörätyyppien kanssa, mutta niissä on osia ja ominaisuuksia, jotka mahdollistavat maasto-olosuhteissa liikkumisen, kuten lujatekoinen runko, tehokkaat jarrut, maastoon soveltuvat karkeakuivoiset renkaat, sekä yleensä myös jousitus. Myös vaihteisto tarjoaa vaihteleviin olosuhteisiin sopivan suuren välitysskaalan. (Hadland & Lessing 2014, s. 438)

Maastopyöräily nykyisessä muodossaan on saanut alkunsa 1970-luvun alussa Kaliforniassa Yhdysvalloissa, jossa lajin harrastajat muokkasivat tavallisia polkupyöriä vuorelta laskeutumiseen kykeneviksi. Niin kutsut cruiser-pyörät olivat suosittuja, sillä niissä oli vankka teräsrunko ja paksuhkot renkaat jo valmiina. Kokeilemalla löytyi tarkoitukseen sopivat komponentit, joilla ajoa saatiin parannettua ja pyörät kestävämmän kovaa käyttöä. 1970-luvun lopulla valmistettiin jo pienissä määrin varta vasten maastopyöräilyyn tarkoitettuja runkoja, kunnes 1980-luvun alussa markkinoille alkoi tulla massatuotettuja maasto-olosuhteisiin tarkoitettuja polkupyöriä. (Hadland & Lessing 2014, s. 434; Savre et al. 2010, s. 1948)

1970- ja 80-lukujen edistysaskeleet saivat lajin kehittymään vuosien saatossa vapaa-ajanvietteestä ammattimaiseksi urheiluksi. Ensimmäiset maailmanmestaruuskisat järjestettiin Coloradossa 1990 ja lopulta laji nousi myös olympialajiksi 1996 Atlantan olympialaisiin. (Savre et al. 2010, s. 1944)

2.1 Maastopyörätyypit

Maastopyörien välillä on suuriakin eroja riippuen käyttökohteesta. Käyttötarkoituksen myötä komponenttien lisäksi myös geometrian täytyy muuttua siihen sopivaksi.

Cross-country

Cross-country- eli XC-pyörät ovat maastopyöristä ulkomuodoltaan lähimpänä maantiepyöriä, ja ne onkin suunniteltu polkemistehokkuus pääprioriteettina. XC-pyörät ovat keveitä ja niissä on usein jyrkkä keulakulma, lyhyt jousitusmatka, hyvin rullaavat renkaat sekä lyhyt akseliväli. Sen geometria tekee siitä ketterän ja hyvän nousuissa

alamäkiajon kustannuksella. Joustomatka näissä pyörissä on lyhyt, noin 100 millimetriä. Cross-country -kilpailuissa painotetaan kestävyyskuntoa ja se on maastopyöräilyn olympialaisissa esiintyvä alalaji. (Evo 2021; UCI 2021)

Downhill

Alamäkiopyörät (engl. downhill) ovat lujatekoisia suurella joustomatalla (n. 200 mm) varustettuja pyöriä, jotka on suunniteltu sietämään alamäkiajolle ominaisia kovia iskuja ja korkeita pudotuksia. Niille ominaista on loiva keulakulma ja pitkä akseliväli, mitkä mahdollistavat vakaan ajon kovassa vauhdissa. Alamäkiajokilpailuissa osallistujat ajavat yksitellen aikaa vastaan teknisellä radalla, jossa huippunopeudet voivat nousta jopa 80 kilometriin tunnissa. (Evo 2021; UCI 2021)

Enduro

Enduropyörät ovat alamäkiopyöristä askeleen lähempänä XC -pyöriä. Enduropyörät ovat silti alamäkiopyörien tavoin pitkiä ja niissä on matala painopiste, joustomatkaakin on yleensä n. 160–180 millimetriä kummassakin päässä. Endurokisoissa ajetaan erikoiskokeita vaihtelevassa maastossa, joten pyörillä on tärkeä pystyä polkemaan myös ylämäkeen. Kuitenkin vain alamäkiosuuksista otetaan ajat, jotka kumuloituvat kisaajan lopulliseen tulokseen (UCI 2021). Tästä syystä enduropyörien suunnittelun lähtökohtana on hyvä suorituskyky alamäessä. (Evo 2021)

Trail

Edellä mainituista poiketen tämä kategoria ei vastaa mitään kansainvälisen pyöräilyliiton tunnustamaa kilpailulajia, mutta trailpyörät muistuttavat geometrialtaan ja ulkonäöltään enduropyöriä ja asettuvat joustomatkan ja ajo-ominaisuuksiensa puolesta enduro- ja cross-countrypyörien välimaastoon. Nämä pyörät ovat sekä polkemistehokkuuden että alamäkiajon kannalta kelvollisia, ja siksi usean harrastajan valinta päivittäiseen käyttöön. (Evo 2021)

2.2 Maastopyörän runko

Polkupyörän runko on yksi sen keskeisimmistä komponenteista, johon sen tärkeimmät osat, kuten renkaat, polkimet, ohjaustanko ja satula kiinnittyvät. Polkupyörän rungon tehtävä on paikoittaa nämä osat ja jakaa kuljettajan paino renkaille sopivassa suhteessa, yleensä hieman takapainoisesti. Rungon vaatimuksena on olla mahdollisimman luja, jäykkä ja kevyt (Brown 2010). Tähän päästään käyttämällä soveltuvia materiaaleja ja muotoja.

Polkupyörän runko koostuu tavallisesti kahdesta kolmiosta, jotka on liitetty toisiinsa timantin muotoon. Tämä rakenne on saanut alkunsa jo 1800-luvun lopulla tarpeesta kehittää turvallisempi pyörä korvaamaan isopyöräisiä edeltäjiänsä. Tästä syystä sitä kutsuttiinkin turvapyöräksi (engl. safety bicycle). Vuosisadan vaihteessa nämä pyörät olivat käytännössä syrjäyttäneet kilpailevat mallit. Ne olivat tunnistettavasti nykyaikaisen pyörän kaltaisia, niissä oli yhtä suuret ilmalla täytettävät renkaat, ketjuveto ja materiaalina käytettiin terästä. Rungot rakennettiin teräsputkista ja liitettiin joko hitsaamalla tai kovajuottamalla. (Hadland & Lessing 2014, s. 170) Myös maastopyörän runko perustuu tähän rakenteeseen.

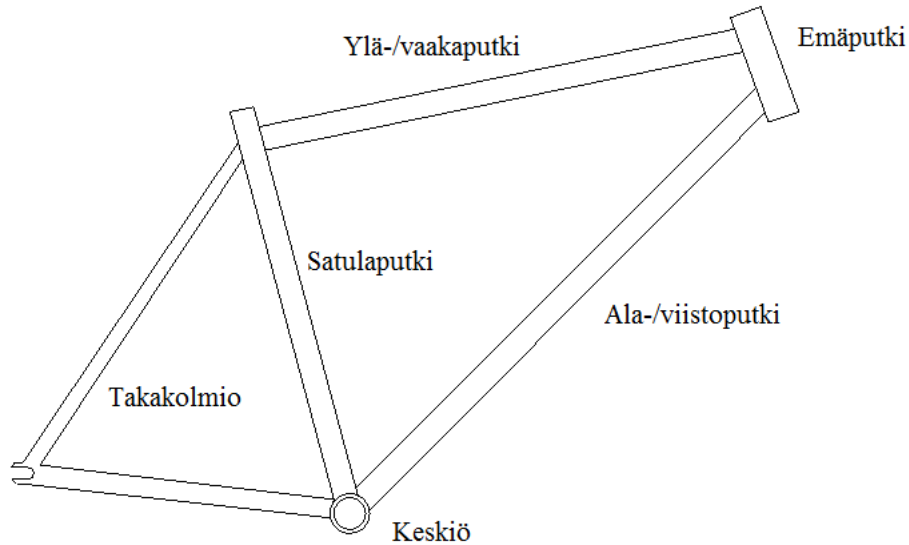
Varhaisten maastopyörien runkojen valmistajat keskittyivät perinteisen timanttirakenteen vahvistamiseen ja yhteensopivuuteen maastopyöriä varten kehitettyjen komponenttien kanssa. Tähän tuli muutos 1990-luvun aikana jousituksen yleistyessä maastopyörissä, mikä pakotti valmistajat tekemään muutoksia rungon rakenteeseen ja geometriaan. Jo teleskooppiset joustokeulat muuttivat rungon kulmia, mikä täytyi ottaa suunnittelussa huomioon, mutta viimeistään jousituksen lisääminen runkoon aiheutti tarpeen rungon uudelleen suunnitteluun. (Hadland & Lessing 2014, s. 438) Suuri osa jousitusinnovaatioista on tullut maastopyöriin motocross- ja enduromoottoripyörien kautta, joissa lajilla ja jousituskehityksellä on pidempi historia, ja joihin alettiin kehittämään erilaisia vipumekanismeja pidempien joustomatkojen mahdollistamiseksi jo 1970-luvulla (Foale 2006, s. 8–7).

Maastopyörän käyttötarkoituksen takia sen runko joutuu elinkaarensa aikana huomattavasti suuremman rasituksen kohteeksi kuin esimerkiksi maantiepyörä, mikä asettaa haasteita rungon suunnitteluun. Rungon kestävyys voi vaikuttaa ennen kaikkea

materiaalivalinnoilla ja putkien seinämävahvuudella, mutta myös geometrian avulla (Covill et al. 2014).

2.2.1 Rungon osat

Ymmärtääkseen rungon geometriaa, täytyy ensin tunnistaa rungon osat, jotka muodostavat rungon rakenteen, ja täten määräävät sen geometrian.



Kuva 1. Rungon osat.

Kuvassa 1 on esiteltyä perinteisen timanttirungon osat. Etummaisena kolmion muodostavat ylä- eli vaakaputki, ala- eli viistoputki sekä satulaputki. Satulaputken tehtävänä on myös luoda kiinnitys satulapalle, joka liukuu satulaputken sisään sen yläosasta, ja joka kiristetään pannalla paikalleen. Ylä- ja alaputken risteykseen sijoittuu emäputki, johon polkupyörän keula kiinnittyy. Keulassa on ohjainputki, joka laakeroidaan emäputkeen. Alaputken ja satulaputken risteyksessä on kampien laakerikupit eli keskiö. Takakolmio sijaitsee satulaputken takana ja luo kiinnityspisteen takapyörälle. Takakolmiota kutsutaan myös takahaarukaksi, sillä oikeastaan se koostuu kahdesta kolmiosta pyörän molemmiin puoliin. Kolmio itsessään koostuu kahdesta putkesta, alaputkesta eli chainstaysta ja yläputkesta eli seatstaysta. (SFS-EN 15532 2009)

2.2.2 Rungon materiaalit

Maastopyörän runko valmistetaan tänä päivänä yleisimmin joko alumiinista tai hiilikuidusta. Myös teräs ja titaani ovat käytössä, mutteivat niin laajalti. Ei voi sanoa, että yksikään näistä olisi toistaan parempi, vaan kaikilla on ominaisuuksia, jotka ovat suotuisia eri osa-alueilla. Suunnittelijan täytyy huomioida materiaalin vaikutukset valitsemalla kullekin sopivat seinämänpaksuudet, putken halkaisijat ja geometriat. (Brown 2010)

Materiaaleilla on kolme tärkeää ominaisuutta, jotka vaikuttavat sen soveltuvuuteen runkomateriaalina: Jäykkyys, lujuus ja tiheys.

Jäykkyys viittaa materiaalin kykyyn vastustaa muodonmuutosta tietyn voiman vaikutuksesta. Tämä muodonmuutos riippuu materiaalin kimmokertoimesta. Rungon jäykkyys vaikuttaa sen ajettavuuteen. Runko ei saisi joustaa liikaa, mutta liian jäykkä runko ei myöskään ole mukava ajaa. Lujuus ei vaikuta suoraan pyörän ajo-ominaisuuksiin, mutta se täytyy ottaa huomioon, jotta runko kestäisi pitkäaikaista käyttöä, eikä vaurioituisi raskaissa ja epätavallisissa kuormitustapauksissa, kuten kaatumisissa. Materiaalin tiheys on merkittävä suure, sillä polkupyörät pyritään valmistamaan mahdollisimman keveiksi. Matalan tiheyden omaavaa materiaalia voidaan käyttää enemmän, ja näin parantaa rungon muita ominaisuuksia. Tästä syystä kevyemmät materiaalit ovat vieneet markkinoilta tilaa teräkseltä. (Brown 2010)

Edellä mainituista suureista jäykkyys riippuu eniten runkoputken halkaisijasta, lujuus seinämänpaksuudesta ja paino kummastakin. Suunnittelija voi näitä mittoja muuttamalla vaikuttaa rungon lujuuteen, jäykkyyteen ja painoon sekä korostaa tiettyjä ominaisuuksia. (Brown 2010)

Teräs

Teräs on ollut käytössä polkupyörien rakentamisessa jo pitkään. Kun maastopyöräily syntyi 70-luvulla, teräs oli käytännössä ainoa saatavilla oleva runkomateriaali. Kevyemmät materiaalit ovat tulleet suosituimmiksi, mutta teräkselläkin on vankka kannattajajoukko, ja etenkin pienemmät valmistajat tekevät siitä yhä runkoja osin sen helpon valmistettavuuden takia. (Brown 2010)

Alumiini

Alumiini on ensimmäinen materiaali, jolla terästä runkomateriaalina on korvattu. Nykyisin useimmat pyörät valmistetaan alumiinista. Alumiinista valmistetut rungot ovat teräksisiä kevyempiä, sillä sen tiheys on vain noin 1/3 teräksen tiheydestä. Lujuus ja jäykkyys siinä ovat kuitenkin heikompia, joten rungon putket joudutaan valmistamaan suuremmalla halkaisijalla ja seinämävahvuudella. Näin saavutetaan runko, joka on lähes yhtä jäykkä kuin teräksinen, mutta silti kevyempi. (Brown 2010)

Titaani

Titaani on suhteellisen vähän käytetty materiaali sen korkean hinnan ja vaativan valmistuksen vuoksi, mutta siitä voi valmistaa erinomaisia juuri maastopyöräilyyn sopivia runkoja. Verrattuna teräkseen titaani on lähes yhtä lujaa mutta sillä on vain noin puolet sen tiheydestä. Tätä mukailten sen jäykkyyskin on vain noin puolet teräksen jäykkyydestä, mutta käyttämällä enemmän materiaalia saadaan runko, joka on jäykkä ja erittäin luja ja silti kevyempi kuin teräksinen vastaava. (Brown 2010)

Hiilikuitu

Hiilikuitu runkomateriaalina on yleistynyt viime vuosina myös maastopyörissä, ja sillä saadaan aikaan erittäin kevyt ja jäykkä runko, joka on metallisia runkoja lujempi. Hiilikuitu eroaa materiaalina suuresti edellä mainituista metalleista, koska se koostuu hartsiin sidotuista kuiduista, jotka voidaan sijoittaa runkoon siinä vaikuttavien voimien suuntaisesti. Sen etuna on myös sen luontainen värähtelynvaimennuskyky, joten se ei teoriassa välitä yhtä paljon tärinää kuljettajalle. Tästä on hyötyä etenkin maantiepyörissä, joissa ei ole jousitusta tai paksuja renkaita. Hiilikuiturunkojen korkea hinta rajoittaa niiden mielekkyyttä harrastusvälineenä mutta suorituskyvyltään se on usein paras edellä mainituista ja ammattilaisurheilijoiden suosima. (Brown 2010)

3 STAATTINEN GEOMETRIA

Polkupyörän geometrialla tarkoitetaan niitä mittoja, jotka määräävät rungon muodon. Rungon geometria vaikuttaa pyörän ulkonäön lisäksi sen ajettavuuteen ja hallintaan sekä sopivuuteen kullekin käyttäjälle. Maastopyörien runkogeometriat eroavat eri maastopyörätyyppien välillä, ja jo pyörän ulkonäöstä voidaan päätellä, millaiseen ajoon se on suunniteltu. Geometriaa kuvaillaan usein myös ajoasennon ja pyörän luonteen mukaan. Pyörä voi olla geometrialtaan joko loiva tai jyrkkä, ja ajoasento voi olla pysty tai aggressiivinen. Nämä piirteet antavat jo vähän tietoa siitä millainen pyörä on ajominaisuuksiltaan, mutta lopulta vain senttien ja millien erot pyörien geometrioissa voivat olla merkittäviä. (Stott 2020) Usein eroja on hankala havaita silmin, etenkin jos ei satu olemaan verrokkipyörää vieressä. Internetissä onkin työkaluja, joilla eri pyörien geometrioita voidaan vertailla numeerisesti ja myös visuaalisesti projisoimalla runkojen rautalankamalleja toistensa päälle.

3.1 Rungon koko

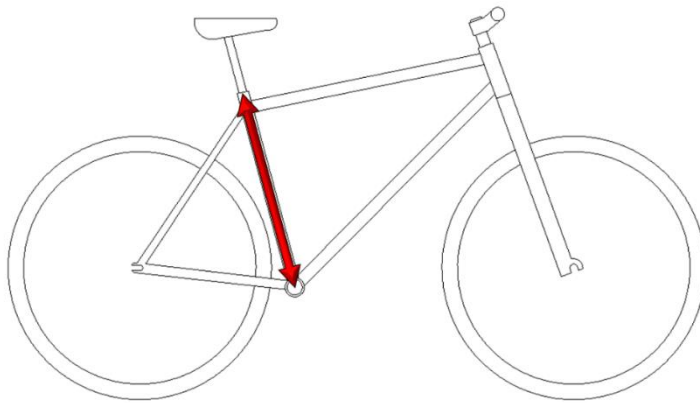
Polkupyörän koko ilmoitetaan yleensä joko kirjainmuodossa (esim. S, M, L) tai perinteisemmin satulaputken pituutena senttimetreissä tai tuumissa, mutta tässäkin on valmistajien välillä eroja siinä, miten ja mistä pyörän koko on mitattu. Yleensä eri ko'ille on annettu ohjeellinen kuljettajan pituus, joka kuitenkin antaa vain suuntaa, johtuen eroista yksilöiden välillä. Koska mitoituskäytännöt vaihtelevat pyörämallista toiseen, eivätkä perustu mihinkään yleiseen standardiin, on pyörän kokoa valittaessa hyvä tutustua kyseisen pyörän geometriataulukoihin. Nämä luvut ovat hyvä lähtökohta eri mallien vertailuun ja kokenut käyttäjä voikin niiden pohjalta arvioida kunkin mallin käyttäytymistä. Jokainen pyörämalli käyttäytyy kuitenkin omalla tavallaan, ja niiden todelliset ominaisuudet selviävät vain koeajamalla. (Bikeradar 2020)

Rungon koolla on geometrian kannalta myös yllättävä vaikutus, sillä usein pyörän mittasuhteet eivät skaalaudu täydellisesti runkokokojen välillä, jolloin saman pyörämallin eri kokojen välillä voi olla pieniä eroja geometriassa.

3.2 Rungon mitoitus

Tässä kappaleessa esitellään rungon geometrian kannalta oleelliset mitat. Vaikka useat mitat on nimetty rungon putkien ja niiden pituuksien mukaan, merkityksellistä niissä on etäisyydet rungon eri osien risteyskohtien välillä, sillä aina rungon putket eivät ole suoria, ja ne saattavat kulkea erikoisiakin reittejä riippuen rungon rakenteesta. Joissain tapauksissa tietyt putket saattavat puuttua kokonaan. Esiteltävät mitat ovat tästä huolimatta erittäin vertailukelpoisia eri valmistajien ja mallien välillä, ja antavat paljon tietoa pyörän käyttäytymisestä ja sopivuudesta kullekin kuljettajalle. (Stott 2020)

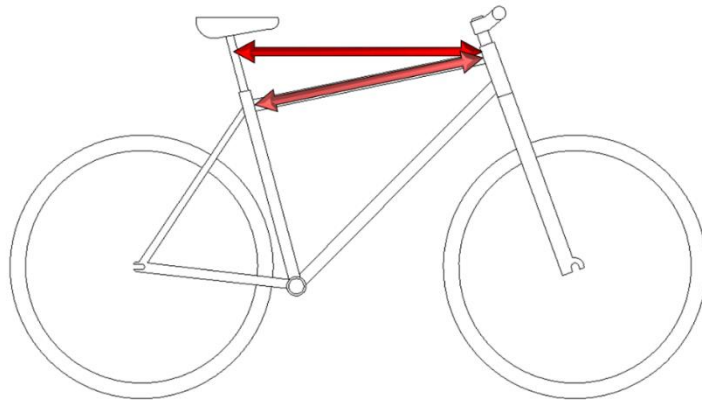
Satulaputken pituus



Kuva 2. Satulaputken pituus.

Satulaputken pituus on mitta keskiöstä satulaputken päähän (kuva 2). Kahdella nimellisesti samankokoisella pyörällä voi olla eri satulaputken pituus, joten tämä mitta antaa hyvin osviittaa siitä, minkä kokoiselle kuljettajalle pyörä sopii. Satulaputken pituus määrittää sen, kuinka korkealle tai matalalle satulan voi asettaa, ja täten kuljettajan minimi- ja maksimijalanpituuden. Perinteisesti runkokoko on ilmoitettu satulaputken pituuden mukaan, mutta etenkin maastopyörien rungon muodon takia tämä mitta ei ole kovin hyvä indikaattori rungon varsinaisesta koosta. (Stott 2020)

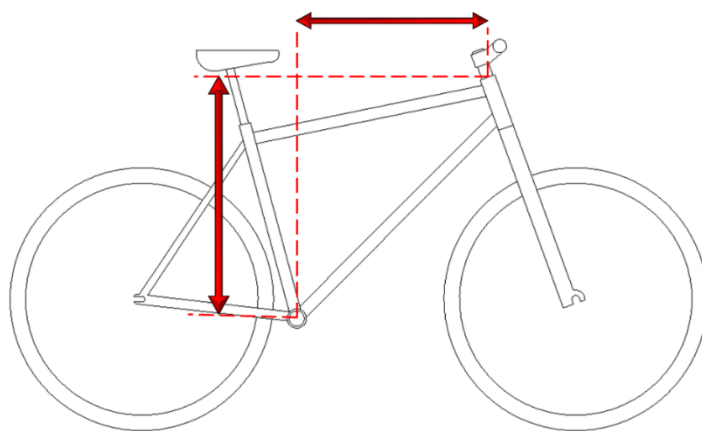
Yläputken pituus



Kuva 3. Yläputken todellinen ja efektiivinen pituus.

Yläputken pituus on mitta emäputkesta satulapolppaan (kuva 3). Koska maastopyörän yläputki on usein hyvin viistossa, ei tämän mitan käyttö tällöin ole kovinkaan mielekäs. Usein käytetäänkin nk. kuvitellun yläputken pituutta, eli efektiivistä pituutta, joka saadaan, kun vedetään vaakasuora linja emäputkesta satulaputken keskiakseliin saakka. Tällä tavalla mitattuna yläputken pituudesta voidaan arvioida, kuinka pitkältä pyörä tuntuu satulasta ajettaessa. (Stott 2020)

Stack ja Reach

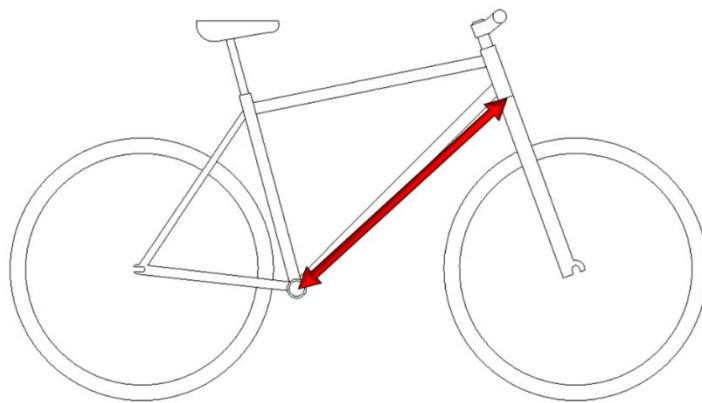


Kuva 4. Stack ja reach.

Stack ja reach kuvaavat emäputken yläosan ja keskiön pysty- ja vaakasuuntaisia etäisyyksiä toisistaan (kuva 4). Kyseiset mitat ovat erityisen oleellisia juuri maastopyörän geometriaa analysoitaessa, sillä huomattava osa maastopyörällä ajosta tapahtuu seisovasta asennosta. Kaikista geometrian tunnusluvuista reach on pyörän kokoa valittaessa kenties tärkein, sillä yhdistettynä ohjainkannattimen pituuteen, se antaa todennukaisen kuvan pyörän ohjaamon tilavuudesta ja sen sopivuudesta kuljettajalle. Yhdistettynä satulaputken kulmaan, siitä voidaan myös arvioida pyörän sopivuutta istuvasta asennosta. (Stott 2020)

Stack kertoo, kuinka matalalle ohjaustanko on mahdollista saada. Stackilla ja reachilla on myös yhteys, joka johtuu emäputken viistoudesta. Jos pyörän emäputki on pitkä ja tämän takia stack korkea, muuttaa se reach-lukemaa lyhyemmäksi kuin se matalammalla stackilla olisi. Tästä johtuen pyöriä vertailtaessa on syytä ottaa kumpikin mitta huomioon. (Stott 2020)

Alaputken pituus

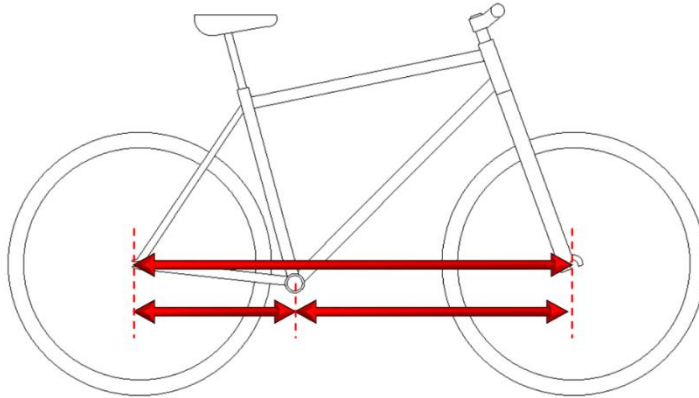


Kuva 5. Alaputken pituus.

Alaputken pituus on mitta keskiöstä emäputken alaosaan (kuva 5). Reachin tapaan alaputken pituus kertoo pyörän pituudesta ja ohjaamon tilavuudesta, mutta se riippuu paljon muistakin tekijöistä, eikä se tästä syystä anna tarkkaa tietoa pyörän ominaisuuksista. Tätä mittausta voidaan kuitenkin käyttää verrattaessa pyöriä, joilla on sama rengaskoko ja etuhaarukan pituus, koska tällöin pyörien emäputkien alaosat ovat karkeasti samalla korkeudella. Alaputken pituus on myös reachia helpompi mitata itse,

jolloin runkojen vertailu onnistuu vaikkei olisi pääsyä niiden teknisiin tietoihin. (Stott 2020)

Akseliväli



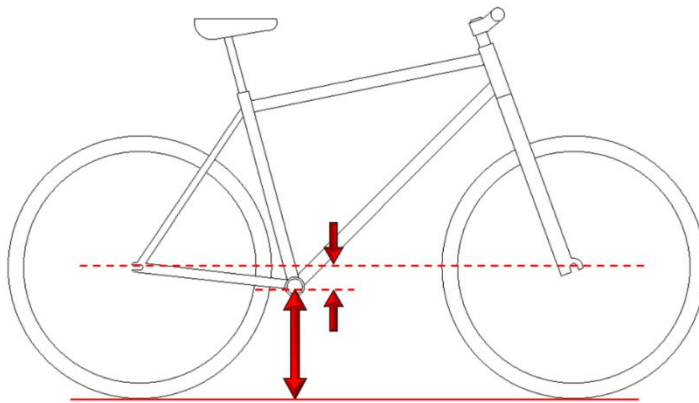
Kuva 6. Akseliväli sekä napojen etäisyydet keskiöstä.

Akseliväli kuvaa nimensä mukaisesti etäisyyttä etu- ja takapyörän napojen välillä (kuva 6). Akselivälillä on suuri merkitys pyörän ajo-ominaisuuksiin. Yleisesti ottaen pidempi akseliväli tuo vakautta ajoon, koska muutokset kuljettajan painopisteessä mm. epätasaisen maaston ja jarrutusten johdosta eivät aiheuta yhtä suurta painojakauman muutosta kuin lyhyemmällä akselivälillä. Tämä kuitenkin voi hankaloittaa pyörän hallintaa, sillä keulan tai perän keventäminen vaatii enemmän ponnisteluja. (Stott 2020)

Akselivälin merkityksestä huolimatta, yksin siitä on hankala tehdä johtopäätöksiä pyörän luonteesta. Tätä varten täytyy ottaa huomioon napojen etäisyydet keskiöstä, joidenka summa akseliväli on. Etunavan ja keskiön etäisyyttä kutsutaan alan sanastossa front-centreksi ja takanavan ja keskiön etäisyyttä rear-centreksi. Näiden mittojen suhde määrittää keskiön sijainnin, joka vaikuttaa huomattavasti kuljettajan ja pyörän muodostaman systeemin painopisteeseen. Tämän lisäksi, koska etunavan ja keskiön etäisyys koostuu reachista, keulakulmasta ja keulan poikkeamasta, sama akseliväli voidaan tuottaa useilla eri geometrioilla. Pidemmällä front-centrellä saavutetaan se, että pyörä ei lähde kallistumaan eteenpäin helposti korkeita töyssyjä kohdattaessa tai etujarrua käytettäessä. Tämä johtuu siitä, että kuljettaja ja täten suurin osa painosta on kauempana eturenkaan kontaktipisteen takana kuin lyhyemmällä front-centrellä. Tämän takia

alamäkipyörissä tämä luku on suuri rear-centreen verrattuna. Pidempi front-centre tarkoittaa luonnollisesti myös sitä, että systeemin painopiste on takana, mikä hankaloittaa eturenkaan pidon säilyttämistä mutkissa, ja edellyttää kuljettajan painon siirtämistä eteenpäin. Tätä voidaan kompensoida pidentämällä myös rear-centrea. (Stott 2020)

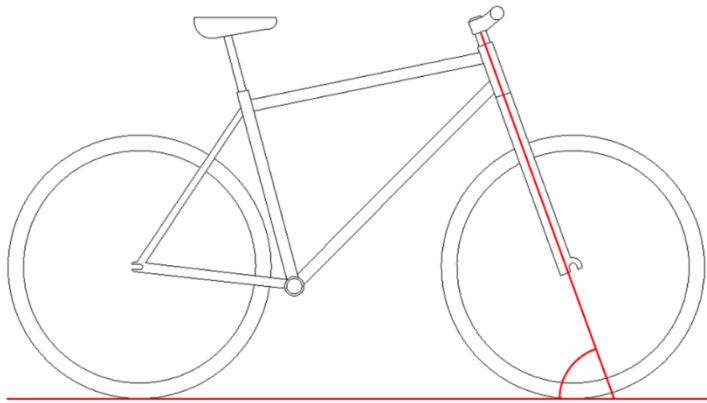
Keskiön korkeus ja keskiön pudotus



Kuva 7. Keskiön korkeus ja pudotus.

Keskiön korkeus on mitta keskiön keskeltä maahan. Keskiön pudotus puolestaan on keskiön ja pyörien napojen muodostaman linjan välinen etäisyys. Mittaa nimitetään pudotukseksi, sillä yleensä keskiö sijoitetaan napalinjan alapuolelle suotuisten ajo-ominaisuuksien vuoksi (kuva 7). Matala keskiö nimittäin laskee koko systeemin painopistettä, jolloin ajo vakautuu. Tämän lisäksi käännoöksissä kuljettajan on helpompi kallistaa pyörää ja siirtää painoa puolelta toiselle tämän painon ollessa lähempänä pyörän keinumisakselia. Keskiön mataluutta rajoittava tekijä etenkin maastopyörissä on mahdolliset polkimien ja eturattaiden osumat maaston esteisiin, kuten kiviin ja kantoihin. (Stott 2020)

Keulakulma

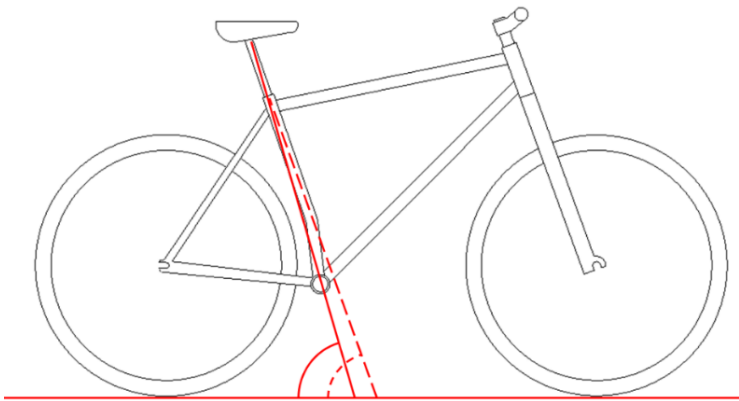


Kuva 8. Keulakulma.

Keulakulma on emäputken kautta maahan vedetyn linjan ja vaakatason välinen kulma (kuva 8). Tyypillisesti keulakulma vaihtelee jyrkkäkulmaisten cross-countrypyörien n. 70° :n ja alamäki- ja enduropyörien reilun 60° :n välillä. Keulakulmalla on suuri vaikutus pyörän hallintaan, ja useaan geometrian osa-alueeseen. Loiva keulakulma vie eturengasta kauemmaksi kuljettajan kahvoista, ja täten siirtää painoa takapyörälle. Tämä on haluttu ilmiö etenkin alamäkiajossa, jossa maaston kaltevuus siirtää kuljettajan ja pyörän painopistettä edemmäs suhteessa vaakatasoon. (Stott 2020) Jyrkempi kulma taas on eduksi vaihtelevassa maastossa, sillä se tekee nousuista helpompia. Usein trail-pyörissä päädytäänkin keskivaiheen astelukuun, jotta pyörä suoriutuisi hyvin mahdollisimman monipuolisessa maastossa. (Evo 2021)

Edellä mainitun lisäksi keulakulma on yhteydessä eturenkaan jättämään, kuten jäljempänä tullaan toteamaan. Kulman loivetessa jättö kasvaa, minkä seurauksena ohjauksesta tulee vakaampi ja rauhallisempi ja pyörästä soveltuvampi kovaan vauhtiin. Kun tarvitaan ketteryyttä ja pientä kääntösädettä, suositaan jyrkempää kulmaa, joka tuottaa nopeamman ohjauksivasteen, mutta joka voi tuntua vauhdissa epävakaammalta. (Stott 2020)

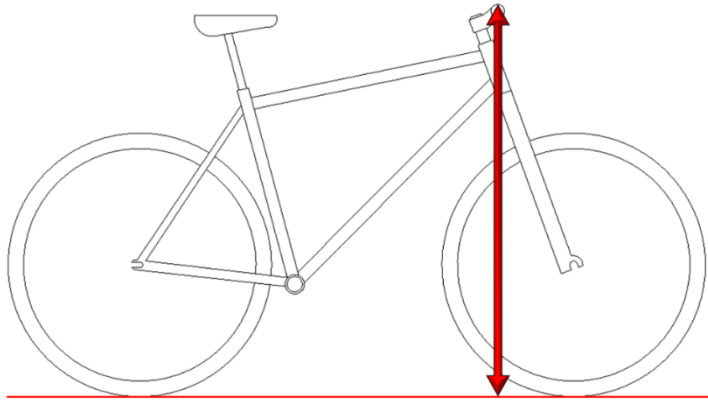
Satulaputken kulma



Kuva 9. Satulaputken kulma. Todellinen kulma katkoviivalla.

Satulaputken kulma on satulaputken yläpäästä keskiön läpi maahan vedetyn viivan ja vaakatason välinen kulma. Tämä mitta antaa hyvän kuvan satulan sijainnista polkimiin nähden. Se mitataan edellä mainitulla tavalla, koska satulaputken todellinen kulma ei välttämättä anna hyvää kuvaa satulan paikasta, jos putki on käyrä, kuten kuvassa 9. Yleisesti polkupyörissä n. $72\text{--}73^\circ$:n kulma on todettu ergonomiseksi ja tehokkaan polkemisen mahdollistavaksi. Maastopyöriä suunniteltaessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon maaston vaikutus kuljettajan asemaan pyörän päällä sekä jousituksen painumasta aiheutuva geometrian muutos. Täten nykyisissä maastopyörissä kulma on usein jyrkempi, jotta voitaisiin estää kuljettajan ja pyörän painopisteen siirtyminen takarenkaan kontaktipisteen takapuolelle ylämäissä. Lisäksi jyrkempi kulma kompensoi modernin geometrian mukaisia pitkiä etukolmioita ja tuo satulan lähemmäs ohjaamaa. (Stott 2020)

Ohjaustangon korkeus



Kuva 10. Ohjaustangon korkeus.

Ohjaustangon korkeus on mitta kahvoista maahan (kuva 10). Tangon korkeus vaikuttaa huomattavasti ajotuntumaan sekä kuljettajan asemaan pyörän päällä. Kahvojen sijaintia voidaan hienosäätää helposti pyörästä riippumatta, joko tankoa vaihtamalla tai lisäämällä välikappaleita ohjainkannattimen alle. Ohjainkannatin eli stemmi (engl. stem) on pyörän osa, joka kiinnittää tangon ohjainputkeen. Myös niitä on saatavilla eri pituisina ja erilaisilla nousukulmilla, mikä antaa käyttäjälle huomattavasti vaihtoehtoja ajoasennon säätämiseen. (Stott 2020)

4 DYNAAMINEN GEOMETRIA

Aiemmin käsitellyn staattisen geometrian lisäksi täytyy perehtyä myös dynaamiseen geometriaan, eli siihen kuinka pyörän geometria ja käsiteltävyys muuttuvat kuljettajan painosta, ohjauksesta sekä maaston vaikutuksesta.

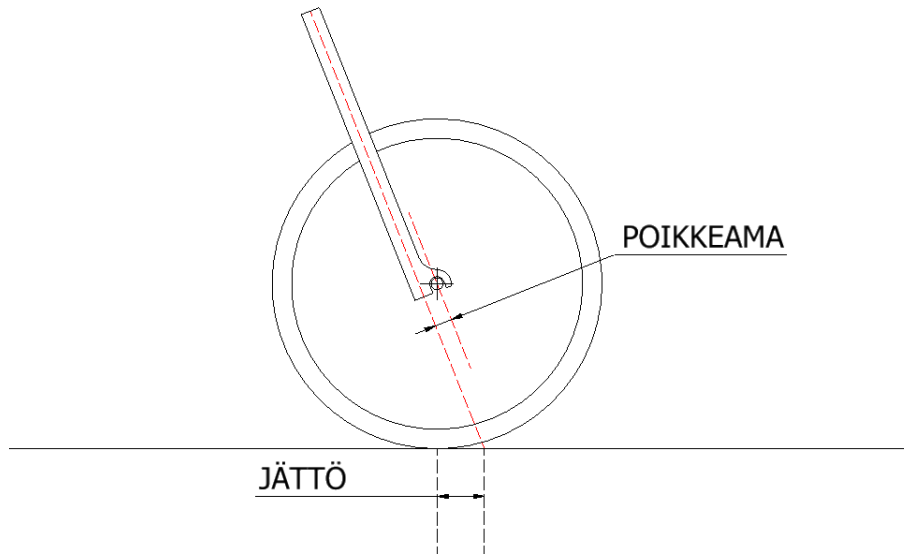
Kaikki jousituksella varustetut pyörät kokevat geometrian muutoksen kuljettajan painon vaikutuksesta. Jousitus säädetään siten, että jousituksen painuma (engl. sag) kuljettajan painon alaisena on noin 25–30 % kokonaisjoustomatkasta, riippuen kuljettajan mieltymyksistä. Sagin lisäksi joustomatka ja pyörien akselien liikeradat jouston aikana vaikuttavat geometrian muutokseen. Pelkällä etujousituksella varustetuissa pyörissä keulan painuma tuo ohjaustankoa alemmas ja jyrkentää pyörän kulmia. Tämän lisäksi etukolmio lyhenee ja keskiö laskee hieman. Täysjousitetuissa pyörissä takajousitus yleensä painuu enemmän, jolloin pyörän kulmat taas loivenevat ja keskiö laskee huomattavasti. Ajossa geometria muuttuu maaston ja painopisteen muutoksista johtuen jatkuvasti. Lisäksi on mainittava, että maastossa pyörän keskimääräinen jouston painuma on sagia syvemmällä johtuen iskunvaimentimien kompressiovaimennusta hitaammasta paluuvaimennuksesta. (Stott 2020)

Maaston vaikutus taas on huomattava etenkin ohjausdynamiikan osalta. Esimerkiksi töyssyjen kohdalla eturenkaan kontaktipiste saattaa hetkellisesti siirtyä ohjausakselin etupuolelle saaden aikaan negatiivisen jätön. Myös ohjaus muuttaa pyörän geometriaa eturenkaan kontaktipisteen liikkuaessa. (Stott 2020)

4.1 Ohjausdynamiikka

Polkupyörän ohjausdynamiikkaan vaikuttaa sen ohjausgeometria, johon liittyy vahvasti käsitteet haarukan poikkeama ja jättö, jotka aiemmin esitellyn akselivälin ja keulakulman lisäksi ovat merkittävimpiä tekijöitä pyörän ohjauksen ja stabiiliuden kannalta.

Haarukan poikkeama ja jättö



Kuva 11. Poikkeama ja jättö.

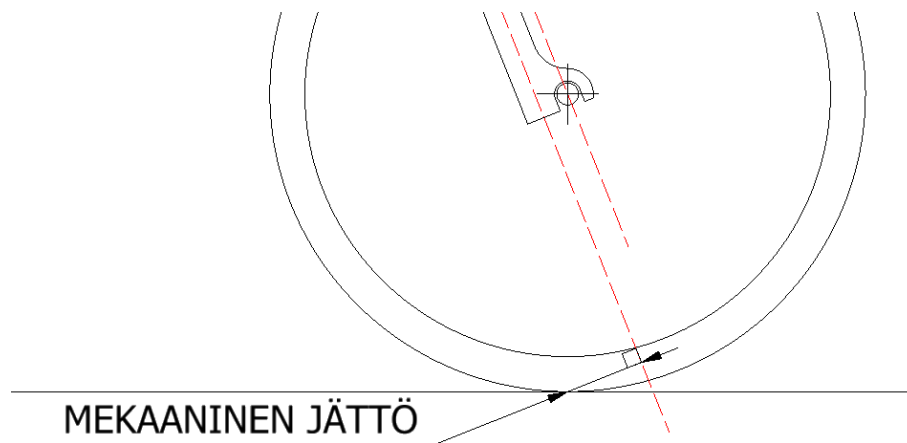
Haarukan poikkeama tarkoittaa etuakselin ja ohjausakselin lyhintä etäisyyttä toisistaan. Poikkeamalla voidaan säätää pyörän jättöä ja pyörien keulat suunnitellaan yleensä pienellä poikkeamalla jätön pienentämiseksi. Poikkeama syntyy haarukan poikkeamasta ohjainputkeen nähden sekä mahdollisesta akselin kiinnityskohdan poikkeamasta kuten kuvassa 11. (Stott 2020)

Jättö on vaakasuora mitta eturenkaan kontaktipisteestä ohjausakseliin. Siihen vaikuttaa poikkeaman lisäksi renkaan koko ja keulakulma (Stott 2020). Jättö on ohjausdynamiikan kannalta yksi tärkeimmistä komponenteista. Sen pääasiallisia tehtäviä on luoda vakautta ohjaukseen ja mahdollistaa kallistamalla kääntäminen (Foale 2006, s. 3–1).

Jättö on positiivista, kun kontaktipiste seuraa ohjausakselia. Ohjausakselin ollessa pisteen takana jättö muuttuu negatiiviseksi. Kaksipyöräisissä kulkuvälineissä jätön arvot ovat lähes poikkeuksetta positiivisia. Negatiivinen jättö epävakauttaa systeemiä pyrkimällä vahvistamaan renkaan kääntymistä ja kallistamaan pyörää vastakkaiseen suuntaan tehden ajosta erittäin haastavaa. (Cossalter 2006, s. 7)

Jättö on merkittävä tekijä pyörän ohjauksen itsekorjautuvuuden ja täten myös pyörän hallinnan kannalta. Pyörän kallistuessa pyörän ja kuljettajan paino vaikuttaa

ohjausakselin kautta renkaaseen. Kontaktipisteen ollessa ohjausakselin takana, aiheuttaa systeemin massa ja alustan kitkavoima renkaaseen momentin, joka kääntää eturenkaan kallistuksen suuntaan. Tämä korjaava liike tuo kontaktipistettä takaisin painopisteen alle ja suoristaa pyörää. Tätä itsekorjautuvuutta kutsutaan myös caster-ilmiöksi. (Foale 2006 s. 3–1) Tämän korjausliikkeen vuoksi pyörää voi ohjata kallistamalla ja se pysyy pystyssä, vaikka kädet irrotettaisiin ohjaustangosta (Stott 2020).



Kuva 12. Mekaaninen jättö.

Jätön vaikutusta ohjausdynamiikan ilmiöihin analysoitaessa voi olla mielekkäämpi käyttää mekaanisen jätön määritelmää, joka on eturenkaan kontaktipisteen kohtisuora etäisyys ohjausakseliin (kuva 12). Sitä voidaan ajatella momenttivartena, jonka ympäri renkaan ohjauksen täytyy kääntyä (Foale 2006, s. 3–1). Pidemmällä momenttivarrella ohjaus ei järky niin paljon ulkopuolisista vaikutuksista kuten iskuista maaston muotoihin, mutta vaatii enemmän voimaa ohjaukseen. Vaakasuooraan mitattu jättö on kuitenkin hyvä analogia mekaaniselle jätölle, koska sen kasvaessa myös mekaaninen jättö kasvaa. Helpon mitattavuuden vuoksi se on yleisemmin ilmoitettu luku geometriataulukoissa. (Stott 2020)

Yleistäen voidaan todeta, että suurempi jättö rauhoittaa ohjausta ja vakauttaa ajoa epätasaisessa maastossa, sillä keskittävä voima on verrannollinen jätön pituuteen. Toisaalta ohjaaminen vaatii tällöin kuljettajalta enemmän työtä, sillä kontaktipisteen täytyy liikkua rungon suhteen suuremman momenttivarren päässä. (Cossalter 2006, s. 7) Verrattain suuri jättö on maastopyörissä tärkeä myös maaston vaikutuksen vuoksi. Liian

lyhyellä jätöllä caster-ilmiö voi muuttua negatiiviseksi esim. töyssyissä tai tiukoissa kurveissa. (Stott 2020)

4.2 Jousitus

Maastopyörän jousitus eristää jousitetun massan, eli kuljettajan ja suurimman osan pyörästä, maastosta. Sen pääasiallisia tehtäviä on iskujen vaimentaminen sekä liike-energian ja pidon säilyttäminen epätasaisessa maastossa. Jousitus pyrkii pitämään renkaat tiukasti alustassa, samalla kun jousitettu massa jatkaa mahdollisimman suoraviivaista liikettä. Lisäksi se parantaa ajomukavuutta. (Worsey & Torenbeek 2019; Worsey 2020)

Nykyisin yhä useammassa pyörässä on jousitetun etuhaarukan lisäksi myös jousitettu runko, eli takajousitus. Pyörää, jossa kumpikin pää on jousitettu, kutsutaan täysjousitetuksi pyöräksi. Täysjousitetut pyörät yleistyivät alamäkipyöräilyssä, mutta tekniikan kehittyessä niiden käyttökohteet ovat levinneet laajemmalle. Tavanomaisesta teleskooppisesta etujousituksesta poiketen, takapään jousitus toteutetaan taka-akselin ja rungon välissä olevilla varsilla, nivelillä, mahdollisilla vipumekanismeilla sekä jousiskunvaimenninelementillä. (Worsey & Torenbeek 2019)

4.2.1 Jousituksen kinematiikka

Jousituksen kinematiikka kuvaa sen kappaleiden ja relevanttien pisteiden liikettä toistensa ja päärungon suhteen 2D-tasossa. Todellisuudessa runko ja jousitus täytyy suunnitella myös sivuttaissuuntainen ja kiertojäykkyys huomioiden, mutta jousituksen toimintaa analysoitaessa sitä tarkastellaan tasossa polkupyörän sivusta katsottuna. Kinemaattisessa tarkastelussa keskitytään vain jousituksen geometriaan ja sen kappaleet oletetaan täysin jäykiksi. Kinemaattinen tarkastelu edeltää jousituksen dynaamista tarkastelua, jossa huomioidaan iskunvaimentimen jousi- ja vaimennusvoimat (Muelaner et al. 2015).

Maastopyörän jousitus on dynaaminen kokonaisuus, ja sen käyttäytyminen ja ominaisuudet riippuvat valitun rakenteen ja iskunvaimentimen lisäksi muista tekijöistä, kuten siitä, missä vaiheessa joustomatkaa pyörä on. Jousituksen suunnittelun yhtenä tavoitteena onkin saavuttaa järjestelmä, joka toimii jousituksen alku-, keski- ja loppupäässä mahdollisimman hyvin. (Worsey 2020)

Polkeminen aktivoi jousitusta ja aiheuttaa energiahäviöitä (Muelaner et al. 2015). Tästä syystä suunnittelun eräs tavoite onkin kehittää jousituksen kinematiikkaa suuntaan, jossa jousitus mahdollistaa tehokkaan polkemisen. Jousituksen yleistyessä alamäkipyörissä polkemistehokkuus ei ollut merkittävä seikka, sillä kyseiset pyörät oli suunniteltu maastoon, jossa liike syntyy pääosin painovoiman vaikutuksesta. Jousituksen suunnittelu olisikin paljon helpompaa, jos ketjusta välittyviä voimia ei tarvitsisi huomioida. Kuitenkin todellisuudessa jousituksen suunnittelu on tasapainoilua jousituksen herkkyyden ja polkemisen tehokkuuden välillä. Viime vuosina runko- ja iskunvaimenninteknologia on kuitenkin ottanut suuria harppauksia eteenpäin. On kehitetty jousitusratkaisuja, jotka minimoivat jousen liikettä pelkän polkemisen vaikutuksesta, mikä on osaltaan mahdollistanut jousituksen yleistymisen muissakin kuin alamäkipyörissä. Usein jousitus on myös mahdollista lukita jäykäksi, jolloin siihen kohdistuvat voimat välittyvät eivät vie tehoa polkemiselta. (Stott 2018; Worsley & Torenbeek 2019)

Jousituksen suunnittelun apuna voidaan käyttää suunnitteluohjelmaa, joka laskee jousituksen toiminnan parametrit jokaisessa joustomatkan vaiheessa. Jousituksen dynaamisuudesta johtuen käsin laskenta voi osoittautua työlääksi, joten tällaisen ohjelmiston käyttö helpottaa jousituksen analysointia ja rakenteeseen voi tehdä muutoksia nopeasti suunnittelun aikana. Tässä kappaleessa esitettyjen esimerkkien visuaalisessa havainnollistamisessa on hyödynnetty Racooz Softwaren Linkage X3-ohjelmaa. Kyseinen ohjelma on erittäin hyvä erilaisten ratkaisujen vertailuun, sillä se sisältää laajan kirjaston, jossa on edustettuna lähes kaikki suosituimmat pyörämallit.

Jotta eri jousitusratkaisuja voisi vertailla keskenään, on hyvä ymmärtää keskeisimpiä käsitteitä ja teknisiä termejä jousituksen kinematiikkaan liittyen.

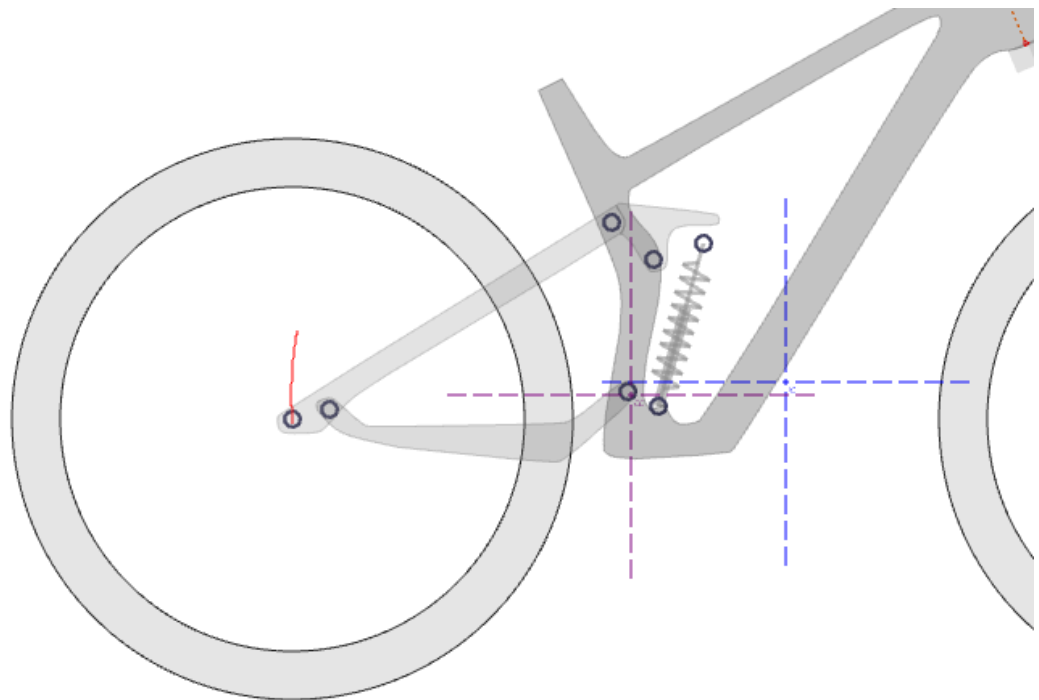
Instant centre

Hetkellinen nivelpiste eli IC (engl. instant centre) on piste, jonka suhteen taka-akseli liikkuu läpi jousitusmatkan. Tämä nivelpiste voi olla yksinkertaisimmillaan kiinteä laakeroitu piste rungossa, jonka ympäri takahaarukka liikkuu ympyrän kaarella koko jousituksen liikkeen ajan. Monimutkaisemmissa ratkaisuissa IC voi olla 'kelluva' eli se liikkuu jousitusmatkan funktiona ja voi jopa sijaita rungon ulkopuolella. Tällöin sitä voidaan kutsua myös virtuaaliseksi nivelpisteeksi. Kelluva nivelpiste tarjoaa suunnittelijalle paremman mahdollisuuden hallita jousituksen käyttäytymistä läpi sen

joustomatkan kuin kiinteä. Hetkellisen nivelpisteen käsite on tärkeä, sillä sen avulla johdetaan useat tässä kappaleessa jäljempänä mainituista ilmiöistä. (Stott 2018; Worsey 2020)

Eräs hetkelliseen nivelpisteeseen yhteydessä oleva käsite on kaarevuuden keskipiste eli CC (engl. centre of curvature). CC saadaan, kun piirretään jollain jousitusmatkalla viiva taka-akselilta IC:hen, liikutetaan jousitusta ja piirretään uusi viiva. CC on näiden kahden viivan risteyksessä, joten määritelmällisesti CC on aina samalla janalla taka-akselin ja IC:n kanssa. Kiinteällä IC:llä varustetuissa ratkaisuihin IC ja CC ovat samassa pisteessä, kun taas kelluvalla IC:llä eivät, ja tällöin myös CC:n paikka saattaa vaihdella suuresti tai olla lähes liikkumatta. (Stott 2018)

Kuvan 13 esimerkissä on havainnollistettu IC:n ja CC:n sijaintia eräässä horst link tyyppisessä jousituksessa, jossa IC on kelluva ja se liikkuu huomattavasti. CC:n liike joustomatkan aikana suhteessa runkoon on tässä tapauksessa mitätön mutta olemassa.



Kuva 13. Ruutukaappaus Linkage-suunnitteluohjelmasta. IC kuvassa sinisellä ja CC violetilla ristillä merkittynä. Näkyvillä myös taka-akselin liikerata punaisella.

Akselin liikerata

Akselin liikerata on se reitti, jonka pyörän taka-akseli liikkuu jousituksen aikana suhteessa pyörän runkoon. Akselin liikerata on erilainen jokaisessa pyörässä ja se on riippuvainen nivelpisteiden sijoittelusta. Liikeradan suunta on jokaisella jousitusmatkan hetkellä kohtisuorassa linjaan, joka kulkee akselilta jousituksen hetkelliseen nivelpisteeseen (IC). Yksinkertaisissa yhden laakeripisteen kautta liikkuvilla takahaarukoilla varustetuissa jousituksissa liikerata on ympyränkaari vakiosäteellä. Liikerata voi olla myös lähempänä pystysuoraa viivaa tai jopa loivan s-kirjaimen muotoisen käyrän muotoinen. (Stott 2018)

Keinuminen

Keinuminen (engl. pedal bob) tarkoittaa jousen painumista kasaan polkemisen vaikutuksesta, ja on polkemistehokkuuden kannalta merkittävä ilmiö. Polkeminen ja etenkin kiihdyttäminen siirtävät kuljettajan painopistettä taaksepäin, ja saavat takajousituksen puristumaan. Tämän lisäksi suurin voimantuotto polkemisessä tapahtuu polkimien liikkuessa alaspäin, mikä osaltaan lisää jousituksen painumista. Rytmisen poljinliikkeen tapauksessa nämä tapahtumat yhdistettynä saavat aikaan keinumista, joka aktivoi jousitusta. Iskunvaimentimen liikkeestä syntyy paljon hukkaa lämmön muodossa, joka on suoraan pois varsinaisesta liike-energiasta. (Stott 2018)

Anti-squat

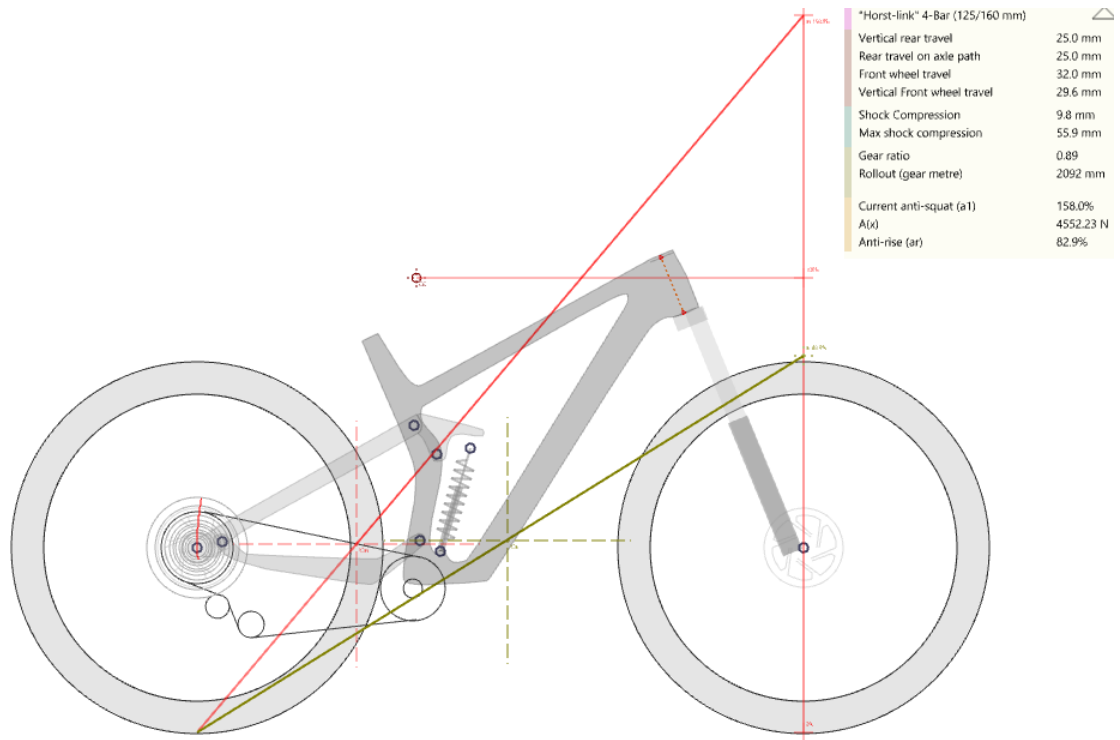
Anti-squat kuvaa jousituksen kykyä vastustaa polkemisestä aiheutuvaa painumaa. Toisin sanoen se on jousituksen painuman vastavoima, eli se pyrkii ojentamaan jousitusta. Polkeminen ja kiihdyttäminen saavat jousituksen painumaan, kun taas takarenkaan ja alustan välinen kitkavoima ja ketjun veto polkiessa ojentaa sitä. (Stott 2018)

Koska anti-squat on pohjimmiltaan jousen reaktio ketjuvoimaan, siihen vaikuttaa jousituksen rakenteen lisäksi ketjun asema (Foale 2006, s. 9–24). Maastopyörissä vaihteet toteutetaan lähes aina usean erikokoisen hammasrattaan avulla, minkä vuoksi ketjulinja on eri jokaisella vaihteella. Näin ollen anti-squat -arvotkin muuttuvat vaihteiden välillä. Lisäksi jousituksen painuessa sen geometria muuttuu ja täten myös ketjulinja suhteessa siihen. Tästä seuraa se, että anti-squat saa eri arvoja myös riippuen joustomatkan

kohdasta. Näistä seikoista johtuen tämä verrattain yksinkertainen ilmiö hankaloittaa jousituksen optimointia huomattavasti. (Worsey & Torenbeek 2019)

Anti-squatin voimakkuus ilmaistaan prosentuaalisesti, jolloin sen ollessa 0 %, sillä ei ole merkitystä jousen painumaan. Arvon ollessa 100 %, ketjuvoima kumooa keinumisvoimat kokonaan. Alle 0 % arvot luonnollisesti lisäävät painumaa, kun taas yli 100 % arvot saavat jousituksen ojentumaan polkemisen vaikutuksesta. (Worsey & Torenbeek 2019) Noin 100 % anti-squat -arvo on polkemisen kannalta optimaalisin, mutta huomioiden jousituksen dynaamisuuden ja kuljettajan painopisteen jatkuvan siirtymisen ajossa, on lähes mahdotonta suunnitella jousitus, jossa tätä voitaisiin täysin hyödyntää. Usein tämä arvo pyritään saamaan ilmenemään siinä jousituksen kohdassa, johon se kuljettajan painosta asettuu, eli sag-pisteessä. Joustomatkan loppupäässä voikin olla hyötyä matalasta anti-squatista, jolloin ilmenee vähemmän polkimien takapotkua eli pedal kickbackia. (Stott 2018)

Anti-squatin arvo voidaan laskea visuaalisesti, kun etsitään ylemmän ketjulinjan ja taka-akselilta instant-centreen kulkevan linjan risteyskohta, kuljettajan painopiste ja eturenkaan kontaktipiste. Tämän jälkeen voidaan piirtää linja takarenkaan kontaktipisteestä edellä määritellyn ketjulinjan risteyskohdan kautta aina eturenkaan kontaktipisteestä pystysuoraan ylöspäin vedettyyn linjaan saakka. Tämä linja on esitetty kuvassa 14 punaisella viivalla. Sen jyrkkyys kertoo anti-squatin määrän kyseisessä tapauksessa, johon vaikuttaa sen hetkinen joustomatka, valitun vaihteen ketjulinja sekä painopiste. 100 % saadaan silloin, kun linja risteää pystysuoran viivan painopisteen kohdalla, kun taas 0 % löytyy aivan eturenkaan alaosasta. (Stott 2018) Kuvan esimerkkitapauksessa linja risteää pystysuoran viivan reilusti painopisteen yläpuolella ja suunnitteluohjelma antaa tälle tapaukselle anti-squat -arvon 158 %. Jousituksen ja ketjulinjan parametreja muuttamalla saadaan erilaisia arvoja.



Kuva 14. Ruutukaappaus Linkage-suunnitteluohjelmasta. Anti-squat ja anti-rise.

Pedal kickback

Suurella anti-squatilla on nurja puoli, joka ilmenee kohonneena pedal kickbackina eli polkimien takapotkuna. Useimmissa jousitusratkaisuissa taka-akselin ja keskiön välinen etäisyys kasvaa jousituksen painuessa, eli ketjun ylälinja joutuu pitenemään (Worsey & Torenbeek 2019). Usein takarenkään pyörimisliike mahdollistaa ketjun kasvun tuomalla lisää ketjua rattaiden yli, mutta nopeissa iskuissa hitaassa vauhdissa tai jarrutettaessa ketjun kasvun täytyy tapahtua eturattaalta, jolloin kammet joutuvat pyörähtämään taaksepäin aiheuttaen ikävän tuntemuksen. Ilmiötä ei välttämättä havaitse normaalissa ajossa, mutta joka tapauksessa se vastustaa jousituksen normaalia toimintaa ja täten heikentää sen herkkyyttä. (Stott 2018)

Anti-rise

Anti-rise kuvaa takajarrun vaikutusta jousitukseen. Se on siis saman kaltainen, mutta vastakkainen ilmiö verrattuna anti-squatiin. Jarruttaessa kuljettajan paino siirtyy eteenpäin, jolloin jousitus pyrkii ojentumaan. Jarrun voima kuitenkin pyrkii painamaan

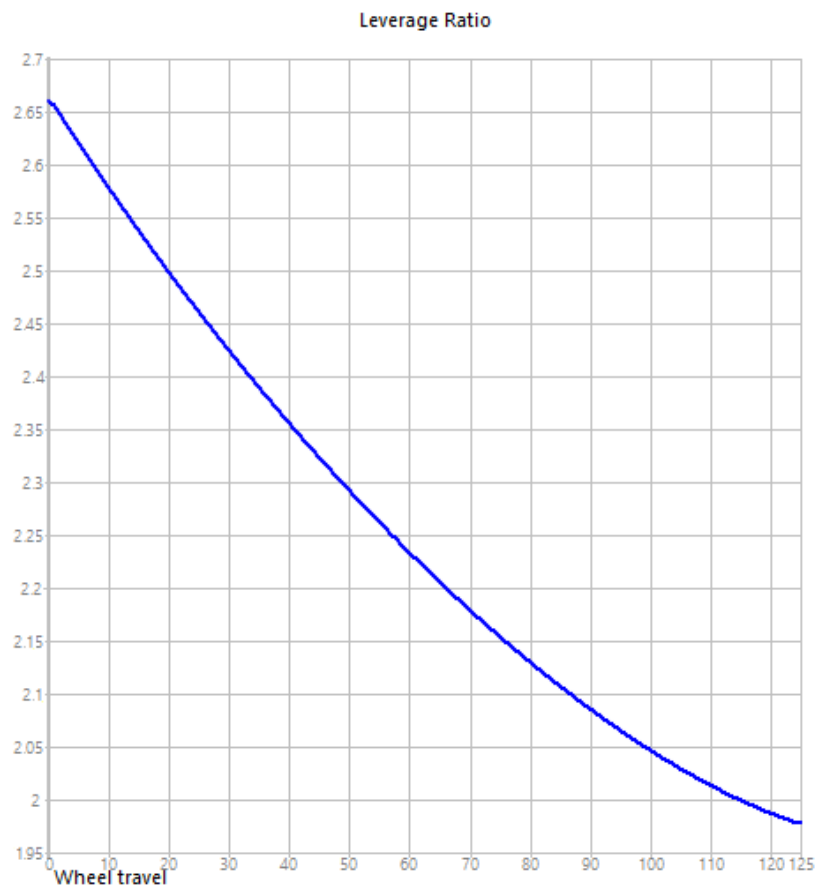
jousitusta kasaan, mikä tasapainottaa jousitusta. Ilmiön voimakkuuteen voidaan vaikuttaa nivelten sijainnin lisäksi jarrun sijainnilla takahaarukassa. Myös anti-risen voimakkuus ilmoitetaan prosenteissa. 0 %:ssa jarrutus toimii itsenäisesti eikä vaikuta jousitukseen ja 100 %:ssa jarrutuksen ja jousituksen voimat kumoavat toisensa täysin. Yli 100 %:ssa jousitus puristuu kasaan. (Worsey 2020)

Myös anti-risen voi anti-squatin tapaan johtaa pyörän geometriasta visuaalisesti. Kuvan 14 esimerkin tapauksessa anti-rise on merkitty vihreällä viivalla. Arvo saadaan vetämällä viiva takarenaan kontaktipisteestä IC:n kautta eturenkaan pystysuoraan viivaan (Stott 2018). Tässä tapauksessa anti-rise on n. 83 %.

Jousituksen optimointi anti-risen kannalta on jälleen tasapainottelua ajo-ominaisuuksien ympärillä, tällä kertaa geometrian säilyttämisen ja jousituksen herkkyyden välillä. Suuri anti-rise jäykistää jousitusta ja saattaa hankaloittaa ajoa epätasaisessa maastossa, joten useat valmistajat pyrkivät vähentämään anti-riseä polkemistehokkuuden kustannuksella. Täyttä konsensususta suunnittelijoiden kesken ilmiön merkittävyydestä ei kuitenkaan ole saavutettu, ja eri mallien välillä anti-rise -lukemat vaihtelevat suuresti. (Stott 2018)

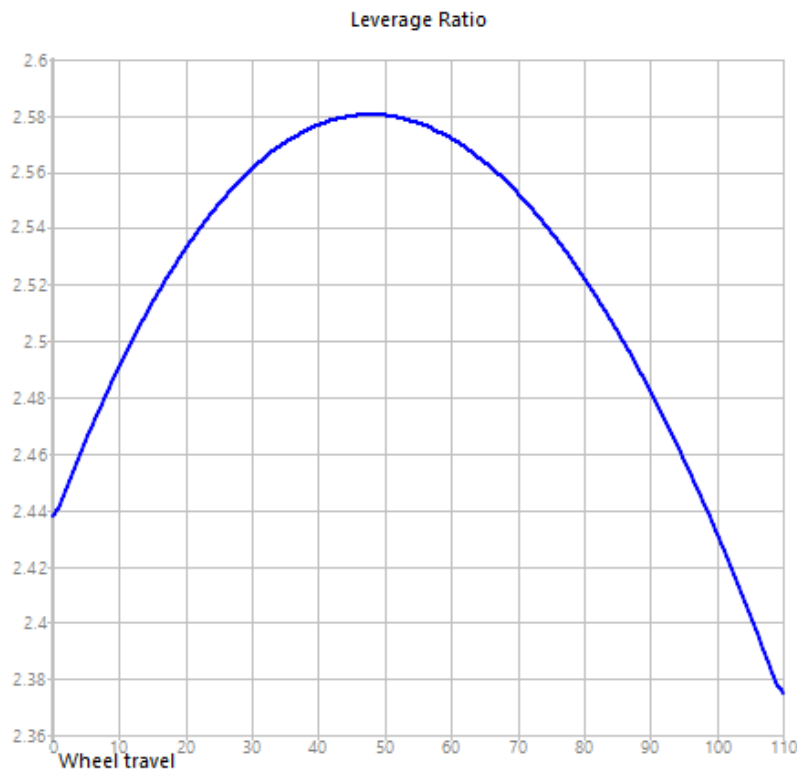
Vipusuhde

Taka-akselin liikettä suhteessa iskunvaimentimen liikkeeseen kutsutaan vipusuhteeksi (engl. leverage ratio). Pyörässä voi olla esimerkiksi 150 millimetriä joustoa, ja 100 millimetrin iskulla varustettu iskunvaimennin. Tällöin keskimääräiseksi suhteeksi saadaan 1,5. Vipusuhteen tärkein aspekti ei kuitenkaan ole sen keskimääräinen arvo vaan se, kuinka se muuttuu jouston aikana (Stott 2018). Vipusuhdetta kannattaakin kuvata kuvaajan avulla, jolloin sen ulkonäöstä voi tehdä johtopäätöksiä. Suunnitteluohjelmaa voi jälleen käyttää hyödyksi, sillä se piirtää kunkin pyörän vipusuhdekuvaajan automaattisesti. Käyrän ollessa suora, vipusuhdetta luonnehditaan lineaariseksi. Käyrän laskiessa jousitus taas on progressiivinen. Tällöin jousituksen jäykkyys tuntuu kasvavan jousitusmatkan loppua kohden, sillä loppumatkasta tiettyä renkaan liikettä vastaa suurempi iskunvaimentimen matka. Ylöspäin suuntautuva käyrä tätä vastoin olisi regressiivinen. (Worsey & Torenbeek 2019)



Kuva 15. Ruutukaappaus Linkage-suunnitteluohjelmasta. Progressiivinen vipusuhte.

Kuvassa 15 on aiemman esimerkin horst link -jousituksen vipusuhteen kuvaaja. Kuvaajasta nähdään, että vipusuhte on progressiivinen ja on jouston alussa n. 2,65 ja laskee hieman alle kahteen. Tämän kaltaista vipusuhdetta suositaan etenkin enduro- ja alamäkipyörissä jousituksen pohjaamisen estämiseksi (Worsey & Torenbeek 2019).



Kuva 16. Ruutukaappaus Linkage-suunnitteluohjelmasta. Yhdistelmävipusuhde.

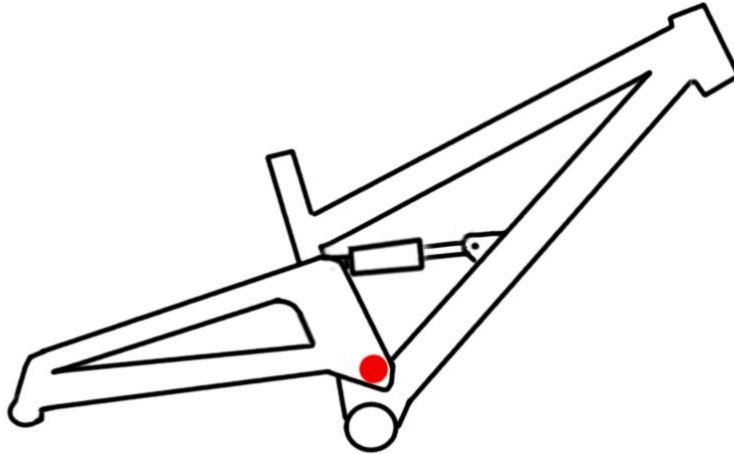
Kuvassa 16 on erään toisen, tällä kertaa twin link -jousituksella varustetun pyörän vipusuhde. Tässä tapauksessa on yhdistetty sekä regressiivistä että progressiivista käyttäytymistä. Keskivaiheilla takarengas vaikuttaa iskunvaimentimeen ikään kuin pidemmällä varrella, jolloin jousitus saattaa tuntua pehmeältä (Stott 2018).

Edellä esitelty vipusuhde muodostuu täysin jousituksen nivelistön mekaanisesta toiminnasta. Lopulliseen jousituksen tuntuun vaikuttaa tämän lisäksi jousen ja iskunvaimentimen ominaisuudet. Kierrejouset käyttäytyvät lineaarisesti mutta ilmajousellisia iskunvaimentimia pystyy säätämään ja ne ovat usein hyvinkin progressiivisia. (Worsey & Torenbeek 2019)

4.2.2 Jousitusratkaisut

Jousituksella on selvä tehtävä, mutta eri ratkaisut toteuttavat sen hyvinkin eri tavalla. Jousitusratkaisuja markkinoidaan lukemattomilla eri nimikkeillä ja myyntipuheilla, mutta käytännössä ne kaikki edustavat yhtä neljästä eri perusrakenteesta, jotka ovat single pivot, single pivot vipumekanismilla, horst link sekä twin link.

Single pivot

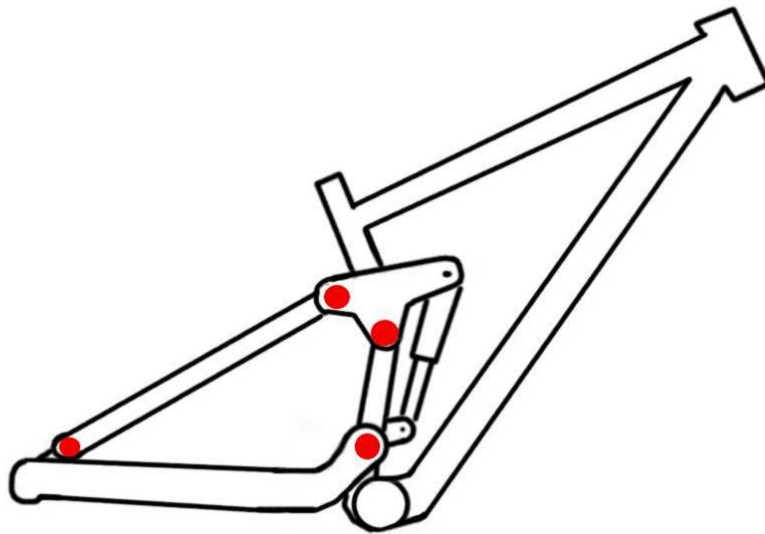


Kuva 17. Single pivot -jousitus.

Kuvassa 17 on esitelty tyypillinen single pivot -jousitus. Se on jousitusratkaisusta yksinkertaisin. Siinä taka-akseli on suorassa yhteydessä runkoon takahaarukan kautta ja siinä on nimensä mukaisesti vain yksi nivelpiste (kuvassa punaisella), jonka varassa takahaarukka liikkuu. Tavallisessa single pivot -ratkaisussa iskunvaimennin kiinnittyy suoraan takahaarukkaan. Rakenteensa yksinkertaisuuden vuoksi siinä on vain vähän huollettavia ja rikki meneviä osia. (Stott 2018)

Tässä ratkaisussa hetkellinen nivelpiste on kiinteä ja sijaitsee päärungon laakeroidussa nivelpisteessä. Tällöin jousituksen vipusuhteen määrää iskunvaimentimen kiinnityspiste rungossa, minkä takia jousituksen käyttäytyminen on yleensä hyvin ennustettavaa ja lineaarista koko joustomatkalla. Suunnittelun kannalta haittana on se, että jousituksen hienosäätö sen eri vaiheissa on rajoituneempaa kuin monimutkaisemmissa järjestelmissä. (Worsey 2020)

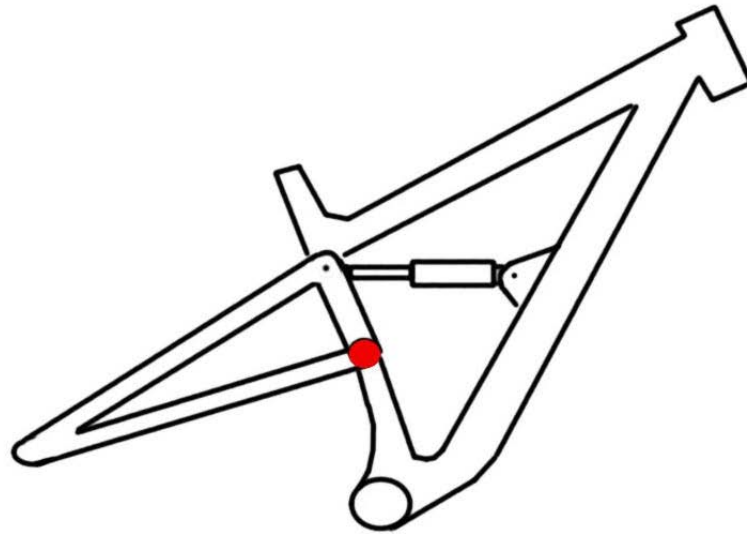
Single pivot vipumekanismilla



Kuva 18. Single pivot -jousitus vipumekanismilla.

Single pivot -jousitus voidaan toteuttaa myös vipumekanismin avulla, mikä antaa suunnittelijalle enemmän vapauksia kinematiikan optimointiin. Tässäkin järjestelyssä nivelpiste on kiinteä ja taka-akseli liikkuu samalla radalla kuin tavallisessa single pivot -jousituksessa, mutta se saa aikaan luonteeltaan hieman erilaisen jousituksen. Kyseisen jousituksen voi toteuttaa visuaalisesti hyvinkin erilaisilla rakenteilla, mutta sen tunnistaa kiinteästä varresta päänivelpisteen ja taka-akselin välillä. Tämä ilmenee myös kuvan 18 esimerkistä. Taka-akselin ja iskunvaimentimen välillä on kuitenkin yleensä runkoon kiinnittyvän heilurivarren avulla toteutettu mekanismi, joka mahdollistaa vipusuhteen optimoinnin ja täten jousituksen progressiivisuuden hallinnan. (Stott 2018)

high pivot

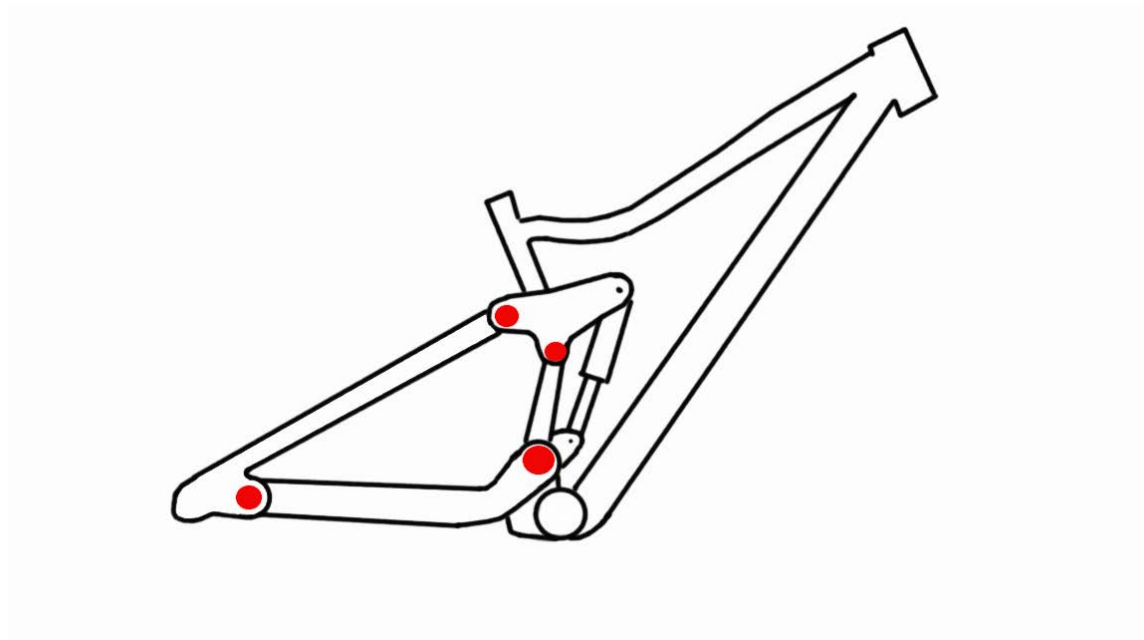


Kuva 19. High pivot -jousitus.

High pivot (kuva 19) on single pivotin erityistapaus, jossa nivelpiste sijaitsee huomattavan korkealla keskiöstä. Ratkaisu voidaan toteuttaa vipumekanismiin kanssa tai ilman. Normaalisti tämän kaltaisessa ratkaisussa ilmeni erittäin suurta polkimen takapotkua johtuen akselin ja keskiön suuresta etäisyyden kasvusta jouston aikana. High pivotin etuna kuitenkin on se, että takapotku voidaan eliminoida lähes kokonaan lisäämällä ylimääräinen ketjupyörä nivelpisteen kanssa samalle akselille tai hyvin lähelle sitä, jolloin ketjun matka eturattaalta takarattaille pysyy lähestulkoon samana koko jouston ajan. (Worsey 2020)

High pivot -jousitus tuottaa taakse- ja ylöspäin liikkuvan akseliradan, josta voi tietyissä tapauksissa olla nopeuden ylläpitämisen ja polkemistehokkuuden kannalta hyötyä. Suorakulmaisia esteitä ylitettäessä takarengas liikkuu enemmän iskun suuntaan ja mahdollisesti hidastaa vauhtia vähemmän kuin ylös ja eteen suuntautuvilla akseliradoilla. Korkeasta nivelpisteestä johtuen pyörän akseliväli pitenee jousituksen painuessa, ja aiheuttaa muutoksia sen hallintaan. Tälle järjestelmälle ominaista on myös korkea anti-rise johtuen nivelen sijainnista ja koska sen hetkellinen nivelpiste on kiinteä, ei se tarjoa samanlaista mahdollisuutta anti-risen eikä anti-squatin hallintaan jouston eri kohdissa, kuin seuraavaksi esiteltävät variantit. (Stott 2018)

Horst link

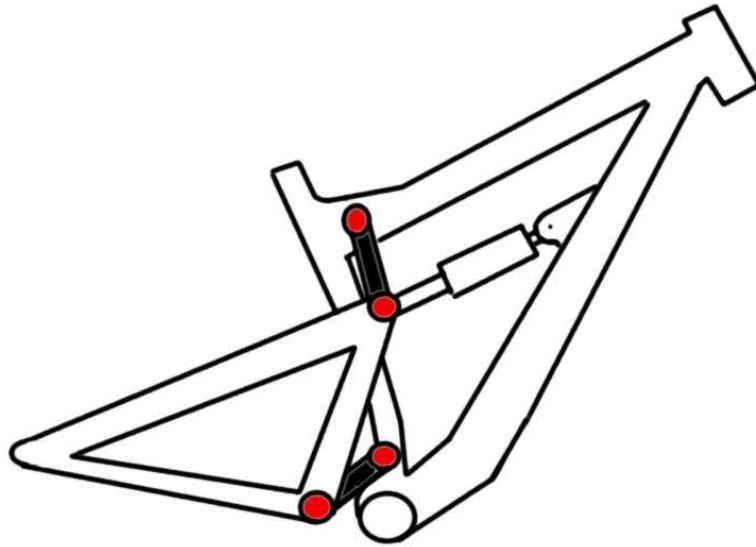


Kuva 20. Horst link -jousitus.

Horst link -jousituksen erottaa aiemmin esitellyistä ratkaisuista taka-akselin ja rungon väliin sijoitettu nivelpiste (kuva 20). Taka-akseli onkin yhteydessä seatstayhin chainstayn sijaan, eikä sillä ole enää suoraa yhteyttä päärunkoon. Täten se liikkuu radalla, jonka jousituksen hetkellinen nivelpiste määrittää. Hetkellisen nivelpisteen sijainnista riippuen jousitukseen kohdistuvia jarrutusvoimia voidaan pienentää paljonkin single pivot -jousitukseen verrattuna, ja liikkuva nivelpiste antaa myös mahdollisuuden hallita anti-squatia jousituksen eri vaiheissa. (Stott 2018; Worsey 2020)

Monissa tämän kaltaisissa jousituksissa anti-squat pyritään pitämään pienenä polkimen takapotkun minimoimiseksi, mikä voi aiheuttaa heikentyntä suorituskykyä ylämäessä (Worsey 2020).

Twin link



Kuva 21. Twin link -jousitus.

Tässä ratkaisussa takahaarukka on edellisestä poiketen kiinteä, ja se on yhdistetty päärunkoon kahden lyhyen linkin avulla (mustat kappaleet kuvassa 21). Pohjimmiltaan twin link -jousitus on kuitenkin hyvin saman kaltainen horst link -jousituksen kanssa, ja siitä löytyy käytännössä samat elementit, mutta eripituisena. Tässäkin järjestelmässä hetkellinen nivelpiste liikkuu merkittävästi. Twin linkin etu- ja takakolmion yhdistävät varret voivat kiertyä keskenään joko samaan tai vastakkaisiin suuntiin, joka mahdollistaa jarrutus- ja kiihdytysvoimien hallinnan vielä horst linkiäkin monipuolisemmin. Iskunvaimentimenkin sijoitteluun on enemmän vaihtoehtoja, sillä sen voi kiinnittää joko ylempään tai alempaan linkkiin. Lyhyiden linkkien takia käytännössä koko mekanismi sijaitsee pienellä alueella ja tilan ahtaus voi hankaloittaa järjestelmän suunnittelua ja toiminnan säätöä. (Stott 2018; Worsey 2020)

Yhteenvedona voidaan todeta, että valittua kokoonpanoa tärkeämpää on nivelpisteiden sijoittelu kussakin järjestelmässä. Kaikilla eri ratkaisuilla on suotuisia ominaisuuksia, sekä lisäksi kaksi samalla järjestelmällä toteutettua jousitusta voivat toimia aivan eri tavalla. Monimutkaisemmissa järjestelmissä on ominaisuuksia joita esim. single pivot -jousituksista ei löydy, mutta single pivotinkin erityispiirteet voivat jossain tapauksissa olla toivottavia, eikä sen toimintavarmuutta ja helppohuoltoisuutta voi korvata.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää maastopyörien runkogeometrian vaikutuksia pyörän käyttäytymiseen sekä suunnittelun raameja ajo-ominaisuudet huomioiden. Maastopyörien runkogeometria on mielenkiintoinen ja monisyinen aihe, johon ei ole olemassa oikeita vastauksia, sillä rungon suunnittelu on aina kompromissien tekoa eri ominaisuuksien välillä.

Tutkimustietoa kaksipyöräisten kulkuneuvojen geometriasta, dynamiikasta ja niiden suunnittelusta löytyi kiitettävästi. Etenkin moottoripyörien dynamiikkaa on tutkittu laajasti, ja tätä tietoa pystyi suurilta osin hyödyntämään työn teossa. Polkupyörä on kuitenkin käyttäytymiseltään hyvin erilainen laite, sillä pyörän osuus kuljettajan ja pyörän yhdistetystä massasta on huomattavasti pienempi verrattuna moottoripyörään. Tästä johtuen painopisteen vaihtelu etenkin maastoajossa on radikaalimpaa, ja sillä on huomattava vaikutus mm. pyörän hallintaan sekä jousitukseen vaikuttaviin jarrutus- ja kiihdytysvoimiin. Myös polkupyörien käyttäytymistä on tutkittu jo yli sadan vuoden ajan, mutta spesifisti maastopyörien dynamiikasta löytyi vähemmän tietoa.

Työn aihe oli laaja ja vaikka se olikin rajattu ainoastaan rungon eri mittojen ja rakenteiden vaikutukseen pyörän käyttäytymiseen, olisi sen eri osa-alueista voinut kirjoittaa laajemminkin. Esimerkiksi jousituksen kinematiikka on alue, jolla tapahtuu yhä kehitystä vuodesta toiseen, ja jota olisi voinut tutkia vielä lisää. Lisäksi todellisuudessa jousitus suunnitellaan myös iskunvaimentimen toiminnan ehdoilla, mistä johtuen jousituksen dynamiikka on paljon tässä työssä käsiteltyä laajempi pyörän suunnittelun osa-alue, jossa kuvaan astuu paljon uusia muuttujia. Työn aiheen käsittelyä voisi jatkaa laajentamalla sitä maastopyörien muihin komponentteihin tai runkosuunnittelun muihin aspekteihin. Eräitä mahdollisuuksia voisi olla myös olemassa olevan jousitusratkaisun kehittäminen tai kokonaisen pyörän rungon suunnittelu alusta alkaen tässä työssä esiteltyjen ilmiöiden pohjalta.

LÄHDELUETTELO

Bikeradar, 2020. What size mountain bike do I need? Plus tips on bike fit [verkkodokumentti]. Lontoo: Immediate Media Company Ltd. Saatavissa: <https://www.bikeradar.com/advice/sizing-and-fit/mountain-bike-sizing-what-size-bike-do-i-need/> [Viitattu 27.11.2020].

Brown, S., 2010. Frame Materials for the Touring Cyclist [verkkodokumentti]. Sheldon Brown. Saatavissa: <https://www.sheldonbrown.com/frame-materials.html> [Viitattu 14.12.2020].

Cossalter, V., 2006. Motorcycle Dynamics. 2. painos. Lulu.com, 360 s. ISBN 978-1-4303-0861-4

Covill, D., Begg, S., Elton, E., Milne, M., Morris, R., Katz, T., 2014. Parametric finite element analysis of bicycle frame geometries. *Procedia Engineering*, 72, S. 441-446.

Evo, 2021. julkaisuvuosi tuntematon. How to Choose a Mountain Bike: Buyer's Guide & Bike Types [verkkodokumentti]. Seattle: Evolucion Innovations Inc. Saatavissa: <https://www.evo.com/guides/how-to-choose-mountain-bike> [Viitattu 12.1.2021].

Foale, T., 2006. Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science. 2. painos. Tony Foale, 546 s. ISBN 978-8493328634

Hadland, T., Lessing, H-E., 2014. Bicycle Design: An Illustrated History. Cambridge: MIT Press, 564 s. ISBN 978-0-262-02675-8

Muelaner, J., Knight, T., Darling, J., 2015. Kinematic Analysis and Optimization of Bicycle Suspension. *KES Transactions on SDM II - Sustainable Design and Manufacturing* 2015, 8 (2), S. 29-38.

Savre, F., Saint-Martin, J., Terret, T., 2010. From Marin County's Seventies Clunker to the Durango World Championship 1990: A History of Mountain Biking in the USA. *The International Journal of the History of Sport*, 27 (11), S. 1942-1967.

SFS-EN 15532, 2009. Cycles. Terminology. Suomen standardoimisliitto SFS: 48 s.

Stott, S., 2018. The ultimate guide to mountain bike rear suspension systems [verkkodokumentti]. Lontoo: Immediate Media Company Ltd. Saatavissa: <https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-mountain-bike-rear-suspension-systems/> [Viitattu: 16.12.2020].

Stott, S., 2020. The ultimate guide to bike geometry and handling [verkkodokumentti]. Lontoo: Immediate Media Company Ltd. Saatavissa: <https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-bike-geometry-and-handling/> [Viitattu: 27.11.2020].

UCI, 2021. julkaisuvuosi tuntematon. About Mountain bike [verkkodokumentti]. Aigle: Union Cycliste Internationale. Saatavissa: <https://www.uci.org/mountain-bike/about-mountain-bike> [Viitattu: 12.1.2021].

Worsey, T., 2020. How your bike's suspension design affects its performance on the trail [verkkodokumentti]. Leonberg: 41 Publishing & Marketing UG. Saatavissa: <https://enduro-mtb.com/en/mtb-suspension-systems/> [Viitattu 27.11.2020].

Worsey, T., Torenbeek, R., 2019. Understanding MTB suspension – A comprehensive guide to kinematics, anti-squat and co [verkkodokumentti]. Leonberg: 41 Publishing & Marketing UG. Saatavissa: <https://enduro-mtb.com/en/mtb-suspension-kinematics/> [Viitattu: 27.11.2020].