KETOGEENINEN RUOKAVALIO KESTÄVYYSURHEILUSSA

Nevala Elina

Kandidaatin tutkielma

Ravitsemustiede

Lääketieteen laitos

Terveystieteiden tiedekunta

Itä-Suomen yliopisto

huhtikuu 2021

Itä-Suomen yliopisto, Terveystieteiden tiedekunta
Kansanterveystieteen ja kliinisen ravitsemustieteen yksikkö
Ravitsemustiede
NEVALA ELINA K : Ketogeeninen ruokavalio kestävyysurheilussa
Kandidaatin tutkielma, 29 sivua
Ohjaaja: Tutkijatohtori, FT, Maria Lankinen
huhtikuu 2021

ketogeeninen ruokavalio, ketoosi, kestävyysurheilu

KETOGEENINEN RUOKAVALIO KESTÄVYYSURHEILUSSA

Kestävyysurheilussa energiaa tuotetaan pääasiassa hiilihydraateista ja rasvoista. Perinteisesti kehon hiilihydraattivarastojen ehtymistä on pidetty suorituskykyä rajoittavana tekijänä. Ketogeeninen ruokavalio eli hyvin vähän hiilihydraatteja sisältävä ruokavalio on kasvattanut suosiotaan urheilijoiden keskuudessa lähivuosina. Täten ketogeeninen ruokavalio eroaa hyvin vahvasti perinteisistä urheiluravitsemuksen periaatteista ja sen vaikutuksia kestävyyssuorituskykyyn ja terveyteen on tutkittu lähivuosina kiihtyvällä tahdilla.

Tämän tutkielman tavoitteena oli kirjallisuuskatsauksen avulla koota yhteen tutkimustietoa ketogeenisesta ruokavaliosta kestävyysurheilussa. Tarkoituksena oli selvittää, millaisia vaikutuksia ketogeenisella ruokavaliolla voi olla kestävyyssuorituskykyyn ja terveyteen kestävyysurheilijoilla.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella ketogeenisella ruokavaliolla voi olla sekä suorituskykyä heikentäviä että sitä parantavia vaikutuksia. Ketogeeninen ruokavalio näyttäisi heikentävän suorituksen taloudellisuutta lisäämällä hapenkulutusta ja heikentävän suorituskykyä kovatehoisissa suorituksissa. Ketogeenisen ruokavalion avulla voidaan kuitenkin saavuttaa positiivisia vaikutuksia esimerkiksi parantuneen kehonkoostumuksen ja lisääntyneen rasvojen oksidaation kautta.

Tämänhetkisen tutkimusnäytön yleistettävyyttä heikentää muun muassa pienet otoskoot ja pääasiassa miehillä tehdyt tutkimukset, minkä vuoksi varmoja ja yleistettäviä johtopäätöksiä ei voida tehdä. Tulevaisuuden tutkimuksissa tulisi selvittää, millaisia vaikutuksia ketogeenisella ruokavaliolla on naisten kestävyyssuorituskykyyn ja terveyteen. Lisäksi lisätutkimusta pitkäaikaisen ketogeenisen ruokavalion noudattamisen vaikutuksista terveyteen ja suorituskykyyn tarvitaan.

SISÄLTÖ

1. JOHDANTO 4
2. KETOGEENINEN RUOKAVALIO 4
2.1 Ketogeenisen ruokavalion historia 5
2.2 Ketogeenisen ruokavalion ominaispiirteitä 6
3. KESTÄVYYSURHEILU 6
3.1 Kestävyysurheilun määritelmä 6
3.2 Kestävyyssuorituskyvyn mittaaminen 7
3.3 Energiantuotto kestävyysurheilussa 8
3.3.1 Aerobinen energiantuotto 9
3.3.2 Anaerobinen energiantuotto 10
4. KETOGEENISEN RUOKAVALION HYÖDYT 10
4.1 Ketogeenisen ruokavalion hyödylliset vaikutukset 11
5. KETOGEENISEN RUOKAVALION HAITAT 16
5.1 Ketogeenisen ruokavalion haitalliset vaikutukset 16
6. POHDINTA 21
6.1 Kirjallisuuskatsauksen tutkimukset 21
6.2 Ketoaineet lisäravinteina 23
6.3 Ketogeenisen ruokavalion käytännön noudattaminen 23
7. JOHTOPÄÄTÖKSET 24
LÄHTEET 25

1. JOHDANTO

Urheilijat haluavat löytää jatkuvasti parempia keinoja ylläpitää ja parantaa suorituskykyään ravitsemuksen keinoin. Ihmisen keho pystyy mukautumaan tehokkaasti energiaravintoaineiden saannissa tapahtuviin muutoksiin ja sovittamaan substraattien saatavuuden yhteen energiankulutuksen kanssa (Shaw ym. 2019). Kiinnostus ketogeeniseen ruokavalioon ja sen käyttöön urheilijoilla on kasvanut viime vuosina runsaasti. Aihetta on kuitenkin tutkittu vielä suhteellisen vähän.

Tavanomainen runsashiilihydraattinen urheilijan ruokavalio lisää sekä maksan ja lihasten glykogeenivarastoja parantaen suorituskykyä että myös hiilihydraattien käyttöä energiaksi urheilusuorituksen aikana (Zajac ym. 2014). Keinoja kehon glykogeenivarastojen ylläpitämiseen ovat esimerkiksi hiilihydraattitankkaus ja hiilihydraattien nauttiminen pitkäkestoisen kestävyyssuorituksen aikana (Bosch ja Smit 2011), joten ketogeeninen ruokavalio eroaa perinteisestä urheiluravitsemuksesta ja sen näkemyksistä vahvasti. Ketogeenisen ruokavalion on ajateltu olevan mahdollisesti hyödyllinen varsinkin kestävyysurheilijoille, koska sen on havaittu lisäävän rasvojen oksidaatiota ja siten vähentävän urheilijan riippuvuutta glykogeenista. On myös viitteitä siitä, että ruokavalio vähentäisi kehon massaa tai rasvakudosta. (Volek ym. 2015.)

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää ketogeenisen ruokavalion vaikutuksia kestävyyssuorituskykyyn. Lisäksi tavoitteena on tarkastella, onko ketogeenisella ruokavaliolla vaikutusta urheilijan yleiseen terveyteen. Tutkielman tiedonhaussa käytettyjä tietokantoja olivat PubMed, Scopus, Melinda ja UEF Primo. Hakusanoina tiedonhaussa toimivat muun muassa ”ketogenic diet”, ”athlete”, ”endurance” ja ”performance”. Tutkielma on kirjallisuuskatsaus, jossa perehdytään lähivuosien tuoreeseen tutkimusnäyttöön aiheesta.

2. KETOGEENINEN RUOKAVALIO

Usein kirjallisuudessa ketogeenisesta ruokavaliosta puhuttaessa käytetään lyhennettä ketogenic LCHF -diet (low carbohydrate, high fat -diet), joka tarkoittaa vähän hiilihydraatteja, mutta runsaasti rasvaa sisältävää ketogeenistä ruokavaliota. LCHF -ruokavalio voi olla myös ei-ketogeeninen, jos hiilihydraattien saantia ei rajoiteta yhtä rajusti kuin ketogeenisessä LCHF -ruokavaliossa. Tällöin puhutaan vähähiilihydraattisesta ruokavaliosta, mutta sitä ei saa sekoittaa ketogeeniseen ruokavalioon, jonka tavoitteena on saada keho ketoosiin.

Ketogeenisen ruokavalion aloittamisen jälkeen hiilihydraattien puute johtaa verenkierron insuliinitasojen laskuun ja glukagonitasojen nousuun. Lisäksi se saa rasvahappoja vapautumaan verenkiertoon. (Sansone ym. 2018.) Kehon glukoosivarastot tyhjenevät ja glukoosia ei ole enää riittävästi saatavilla keskushermoston energianlähteeksi (Paoli ym. 2015). Kun glukoosin määrä putoaa, beetahydroksiburytaatti ja asetoasetaatti korvaavat sen pääasiallisena energianlähteenä (Owen ym. 1967). Ketoaineita syntyy asetyyli koentsyymi -A:sta maksassa tapahtuvassa ketogeneesissä (Paoli ym. 2015). Asetyyli koentsyymi -A:sta muodostuu useiden reaktioiden seurauksena ensin asetoasetaattia, joka lopulta pelkistyy beetahydroksibutyraatiksi (Laffel 1999). Asetoasetaatista muodostuu myös asetonia, josta suurin osa erittyy virtsan ja hengitysilman kautta pois elimistöstä (Pinckaers ym. 2017).

Kehoon syntyy ketoositila, kun 3-hydroksibutyraatin määrä veressä ylittää 0,5mmol/l (Volek ym. 2015). Ketogeenistä ruokavaliota aloitettaessa 3-hydroksibutyraatin määrä kasvaa voimakkaasti jo muutaman ensimmäisen päivän aikana (Burke 2020). Täydellinen adaptaatio ketogeeniseen ruokavalioon näyttäisi kuitenkin vievän noin kolme viikkoa (Zinn ym. 2017).

2.1 Ketogeenisen ruokavalion historia

Alun perin ketogeenistä ruokavaliota on käytetty lapsien vaikeahoitoisen epilepsian hoitomuotona korvaamassa aikaisemmin hoitona käytettyä paastoamista (Cervenka ym. 2016). Ketogeenisen ruokavalion käsitteen kehitti Mayo-klinikan lääkäri Russell Morse Wilder. Wilder kirjoitti ensimmäisen ketogeenistä ruokavaliota käsittelevän artikkelin vuonna 1921. Epilepsiaa oli aiemmin hoidettu paastoamisella, jonka oli havaittu vähentävän vaikeita epilepsiakohtauksia lapsilla ja aikuisilla. Wilder kuitenkin havaitsi, että keho oli mahdollista saada ketoosiin paastoamisen sijaan myös tietynlaisella ruokavaliolla, jota hän alkoi kutsua ketogeeniseksi ruokavalioksi. Ruokavalion tavoitteena on saada keho käyttämään rasvoja energiaksi glukoosin sijaan ja jäljitellä siten paastoamisen aikaista aineenvaihduntaa. (Cervenka ym. 2016.)

Keksimisensä jälkeen ketogeeninen ruokavalio menetti suosiotaan uusien tehokkaiden epilepsialääkkeiden tullessa markkinoille. Phinneyn ja kumppaneiden (1980, 1983) tutkimukset 1980- luvulla olivat ensimmäisiä ketogeenisen ruokavalion ja suorituskyvyn yhteydestä tehtyjä tutkimuksia. Tutkimuksissa havaittiin, että ketogeenisen ruokavalion avulla oli mahdollista ylläpitää harjoituskapasiteettia submaksimaalisella teholla liikuttaessa. Näiden tutkimusten jälkeen kiinnostus ketogeenisen ruokavalion ja urheilun yhdistämistä kohtaan alkoi kasvaa.

2.2 Ketogeenisen ruokavalion ominaispiirteitä

Ketogeeniselle ruokavaliolle ei ole olemassa yleistä yksiselitteistä määritelmää, mikä voi johtua siitä, että on hyvin yksilökohtaista, millaisilla hiilihydraatin saantimäärillä ketoaineita alkaa kehossa muodostumaan (McSwiney ym. 2018). Käytännössä ketogeeninen ruokavalio on kuitenkin nykypäivänä pääpiirteissään edelleen samanlainen kuin se oli ruokavaliota kehitettäessä noin sata vuotta sitten. Myöhemmin ruokavalion kehittäjän, Russell Wilderin, kollega tohtori Peterman muotoili laskelmiensa perusteella ruokavaliolle sopivat ravintoaineosuudet. Tohtori Petermanin laskelmiin perustuva ketogeeninen ruokavalio on ravintoainejakaumaltaan seuraavanlainen: proteiinia 1 g painokiloa kohden (lapsille), hiilihydraatteja alle 10–15 g päivässä ja loput energiasta rasvasta. (Cervenka ym. 2016.)

Yhdessä varhaisimmista urheilijoilla tehdyssä tutkimuksessa käytetty ketogeeninen ruokavalio sisälsi alle 20 g hiilihydraatteja vuorokaudessa, 1,75 g proteiinia painokiloa kohden ja loput päivittäisestä energiasta saatiin rasvasta (Phinney ym. 1983). Ruokavaliosta saatava proteiinimääräkin tulisi ketogeenistä ruokavaliota noudatettaessa huomioida, sillä runsas proteiininsaanti stimuloi glukoneogeneesiä. Glukoneogeneesissä syntyy glukoosia, joka puolestaan heikentää ketogeneesiä. (Sansone ym. 2018.)

Tuoreissa tutkimuksissa käytetyt ketogeeniset ruokavaliot eroavat toisistaan jonkin verran niissä käytetyn hiilihydraattimäärän osalta, koska tarkkaa universaalia määritelmää ruokavaliolle ei ole. Useassa tutkimuksessa käytetään ketogeenistä ruokavaliota, joka sisältää alle 50 grammaa hiilihydraatteja vuorokaudessa (Burke ym. 2017, Zinn ym. 2017, Carr ym. 2018, Shaw ym. 2019, Burke, Whitfield ym. 2020, Burke, Sharma ym. 2020). Kirjallisuus viittaa siihen, että tämä ketogeenisen ruokavalion muoto saattaa olla yleisimmin käytetty.

3. KESTÄVYYSURHEILU

3.1 Kestävyysurheilun määritelmä

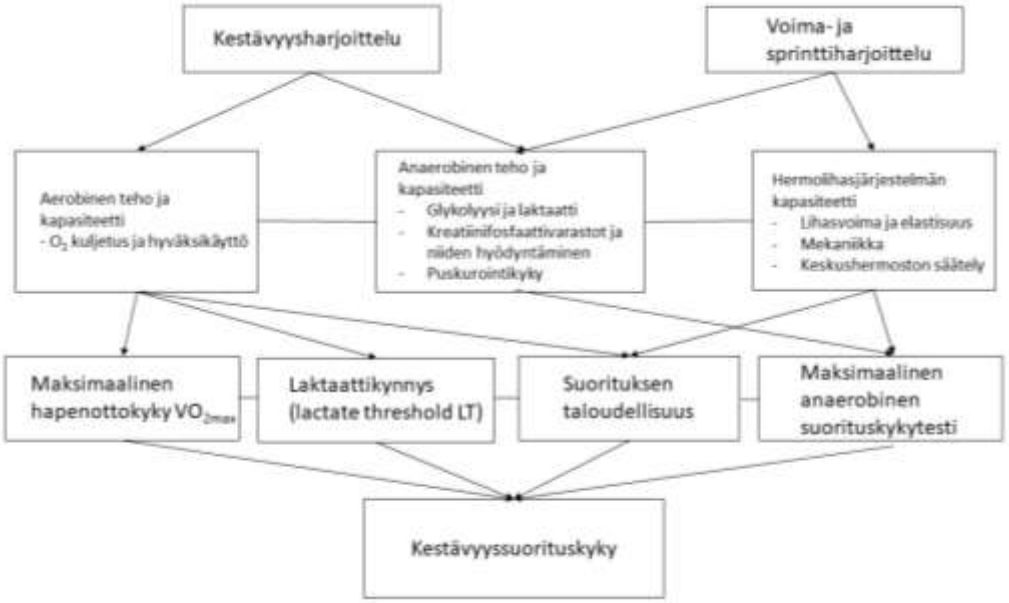
Kestävyysurheilulla tarkoitetaan urheilusuorituksia, jotka kestävät yhtäjaksoisesti vähintään 30 minuuttia (Saris ym. 2003). Suorituksen ollessa kestoltaan yli 4–5 tuntia, puhutaan niin sanotusta ultrakestävyysurheilusta. Kestävyyden voidaan ajatella olevan kykyä vastustaa urheilusuorituksen aiheuttamaa uupumusta. (Saris ym. 2003.)

Kestävyysurheilu on aerobista urheilua, jossa suoritus on pitkäkestoinen ja liikunnan teho maltillinen (Mutanen ja Voutilainen 2012). Tällaisia kestävyyslajeja ovat muun muassa maratonjuoksu, triathlon, murtomaahiihto ja maantiepyöräily. Kuitenkin kilpailun voittamisen kannalta tärkeitä osuuksia ovat esimerkiksi matkan aikana tapahtuvat sprintit ja loppukiri, jotka suoritetaan jopa maksimaalisilla tehoilla (Burke 2015).

3.2 Kestävyyssuorituskyvyn mittaaminen

Kestävyyssuorituskyvyn mittarina käytetään yleisesti maksimaalista hapenottokykyä (VO_{2max}). Maksimaalinen hapenottokyky kuvaa, kuinka tehokkaasti ihmisen hengitys- ja verenkiertoelimistö pystyy kuljettamaan happea ja lihakset hyödyntämään sitä energiantuotannossaan maksimaalisessa rasituksessa. Maksimaalista hapenottokykyä voidaan kuvata absoluuttisena arvona yksiköllä litroja minuutissa (l/min) tai yleisemmällä tavalla hyödyntäen yksikköä millilitraa kehonpainokiloa kohden minuutissa. (Kutinlahti 2018.) Bassettin ja Howleyn (2000) mukaan kestävyyssuorituskyvyn tasoon vaikuttavat maksimaalinen hapenottokyky, urheilusuorituksen taloudellisuus ja urheilijan kyky liikkua lähellä maksimaalista hapenottokykyä. Alapuolella (Kuva 1) on kuvattu kestävyyssuorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä. Kestävyysharjoittelun ohella myös voima- ja sprinttiharjoittelulla on vaikutusta kestävyyssuorituskykyyn. Pelkän aerobisen tehon ja kapasiteetin lisäksi kestävyyssuoritukseen vaikuttavat keskeisesti myös hermolihasjärjestelmän toiminta ja anaerobiset ominaisuudet. (Paavolainen ym. 1999.)

Kirjallisuudessa kestävyyssuorituskykyä on mitattu esimerkiksi 25 kilometrin kävelytestillä (McKay ym. 2019, Burke, Whitfield ym. 2020), uupumukseen saakka tehdyllä juoksutestillä (Shaw ym. 2019) sekä aika-ajo- ja sprinttisuorituksilla (McSwiney ym. 2018). Maksimaalisen hapenottokyvyn lisäksi muita kestävyyssuorituskyvyn mittareita ovat muun muassa uupumiseen kuluva aika (time to exhaustion TTE), harjoituksen koettu kuormittavuus (rating of perceived exertion, RPE) ja suoritusaika (Bailey ja Hennessy 2020).



Kuva 1. Tekijät, jotka vaikuttavat kestävyyssuorituskykyyn (mukaillen (Paavolainen ym. 1999).

3.3 Energiantuotto kestävyysurheilussa

Energiaa saadaan hapettamalla energiaravintoaineita ja varastoimalla niiden sisältämä energia erilaisiin molekyyleihin, joista tärkein on adenosiinitrifosfaatti (ATP), joka on kaikkien solujen välitön energianlähde (Sand ym. 2012a). Kun ATP hajoaa adenosiinitrifosfataasin vaikutuksesta adenosiinidifosfaatiksi (ADP) ja epäorgaaniseksi fosfaatiksi, vapautuu energiaa lihasten käyttöön (Sousa ym. 2019).

Urheilusuorituksen mahdollistamiseksi kehon pitää pystyä tuottamaan jatkuvasti energiaa. Keho väsyy, jos energiantuotto ei pysty vastaamaan tarpeeksi nopeasti lisääntyneeseen energiantarpeeseen (Shirreffs 2011). Pitkäkestoisen kestävyysurheilusuorituksen aikana energiaa tuotetaan pääasiallisesti hiilihydraateista ja rasvoista. Ensimmäisen kahden tunnin aikana energiaa tuotetaan pääasiassa lihaksen glykogeenistä, veren glukoosista ja kehon rasvavarastojen rasvasta (Bosch ja Smit 2011). Urheilijoilla tietyt ominaisuudet, kuten hapenottokyky, ovat parempia verrattuna ei-urheilijoihin, mikä vaikuttaa osaltaan hapettuvien ravintoaineiden osuuksiin.

Energiaa tuotetaan liikunnan intensiteetistä riippuen joko aerobisesti tai anaerobisesti. Aerobisessa energiantuotossa energiaa tuotetaan hapen avulla ja anaerobisessa ilman happea. Aivan urheilusuorituksen alussa energiaa tuotetaan lihassolujen kreatiinifosfaatista ja ATP:sta.

Ne kuitenkin loppuvat muutaman sekunnin jälkeen, jonka vuoksi ATP:n uudistuotannon tulee käynnistyä nopeasti liikunnan aloittamisen jälkeen (Sand ym. 2012b). Urheilijoilla parantanut hapenottokyky lisää aerobisen energiantuoton osuutta, jolloin rasvoja hyödynnetään energiantuotannossa yhä enemmän (Mutanen ja Voutilainen 2012).

3.3.1 Aerobinen energiantuotto

Aerobisessa energiantuotossa pääasiallisina energianlähteinä ovat glukoosi tai rasvahapot. Kun aerobinen liikunta on kevyttä tai kohtalaisen kuormittavaa eli liikutaan alle 65 % teholla maksimaalisesta hapenottokyvystä, rasvahapot kattavat suuren osan energiantuotosta. Glukoosin merkitys energianlähteenä puolestaan korostuu erityisesti kovan intensiteetin aerobisen liikunnan aikana, kun liikutaan noin 80–90 % teholla maksimaalisesta hapenottokyvystä. (Mutanen ja Voutilainen 2012.)

Glukoosista muodostetaan soluissa ATP:ta glykolyysin, sitruunahappokierron, elektroninsiirtoketjun ja oksidatiivisen fosforylaation kautta (Sand ym. 2012a). ATP:n muodostus alkaa solujen solulimassa tapahtuvassa glykolyysissä. Sen aikana glukoosista muodostetaan kaksi pyruvaattia ja vapautuu 2 ATP-molekyyliä (McArdle ym. 2010).

Aerobisen energiantuoton yhteydessä pyruvaatti kuljetetaan seuraavaksi mitokondrioon ja muutetaan asetyylikoentsyymi-A-molekyyleiksi, joita muokataan edelleen sitruunahappokierrossa. Sen aikana vapautuu hiilidioksidia, 2 ATP-molekyyliä ja elektroneja, jotka elektroninsiirtäjät siirtävät energiantuoton seuraavaan vaiheeseen eli elektroninsiirtoketjuun. Elektroninsiirtoketjussa elektroneja luovutetaan hapelle, joka pelkistyy vedeksi ja samalla vapautuu energiaa, jonka avulla oksidatiivisessa fosforylaatiossa ADP:sta tuotetaan ATP:ta. (McArdle ym. 2010).

Energiantuotto rasvoista alkaa puolestaan triasyyliglyserolin pilkkomisella glyseroliksi ja kolmeksi vapaaksi rasvahapoksi hormonisensitiivisen lipaasin (HSL) katalysoimana. Vapaat rasvahapot sitoutuvat veressä albumiiniin. Ne aktivoidaan asyylikoentsyymi-A:ksi, joka puolestaan siirtyy beetaoksidaatioreaktioon. Beetaoksidaatiossa rasvahappo lyhenee ja muodostuu asetyylikoentsyymi-A- molekyylejä, jotka siirtyvät sitruunahappokiertoon. (McArdle ym. 2010.)

Yhdessä grammassa rasvoja on energiaa noin kaksinkertainen määrä yhteen hiilihydraattigrammaan verrattuna. Kuitenkin yhden ATP-molekyylin tuotto hiilihydraateista kuluttaa vähemmän happea kuin ATP:n tuotto rasvoista. Eli tuotettaessa energiaa hiilihydraateista, saadaan enemmän ATP:ta tiettyä kulutettua happimäärää kohden. (Leverve ym. 2007.) Puhuttaessa urheilusuorituksen taloudellisuudesta, tarkoitetaan juuri suorituksen aikana tapahtuvaa hapenkulutusta ja sen määrää. Lisääntynyt hapenkulutus tietyn urheilusuorituksen aikana viittaa siis suorituksen heikentyneeseen taloudellisuuteen. (Burke ym. 2017.)

3.3.2 Anaerobinen energiantuotto

ATP hajoaa hapettomissa olosuhteissa nopeasti ADP:ksi ja vapauttaa energiaa solujen käyttöön. Myös kreatiinifosfaatin hydrolyysissa irtoaa fosfaatti, joka yhtyy ADP:hen muodostaen ATP:ta. Solujen ATP ja kreatiinifosfaatti riittävät tarjoamaan energiaa kuitenkin vain noin kymmenen sekunnin ajaksi. (McArdle ym. 2010).

Anaerobisesti energiaa pystytään tuottamaan vain hiilihydraateista anaerobisen glykolyysin ja laktaatin muodostumisen kautta (Mutanen ja Voutilainen 2012). Anaerobinen energiantuotto on välttämätöntä, kun happea ei ole riittävästi saatavilla tai sitä ei pystytä hyödyntämään aerobisessa energiantuotossa riittävän nopeasti.

4. KETOGEENISEN RUOKAVALION HYÖDYT

On ajateltu, että ketogeenisen ruokavalion hyödyt voisivat ilmetä vapaiden rasvahappojen määrän kasvaessa urheilun aikana samalla, kun lihasglykogeeni säästyisi suorituksen myöhempiin ja kovempaa intensiteettiä vaativiin vaiheisiin (Zajac ym. 2014). On mahdollista, että ketogeenisesta ruokavaliosta saadaan hyötyä useita tunteja kestävissä, kohtuukuormittavissa kestävyyssuorituksissa, joiden aikana rasvavarastot ovat pääasiallinen energianlähde (Shaw ym. 2019). Ihmisen kehon glykogeenivarastot ovat rajalliset, minkä vuoksi kestävyysurheilijat joutuvat useimmiten nauttimaan hiilihydraatteja urheilusuorituksen aikana. Ihmisen rasvavarastot taas ovat käytännössä katsoen rajattomat. Ketoadaptaation on osoitettu lisäävän kykyä hapettaa rasvoja energiaksi (Phinney ym. 1983), mikä voisi tehdä suorituksen aikaisesta hiilihydraattien nauttimisesta tarpeetonta. Lisäksi ketogeeninen ruokavalio voi vaikuttaa positiivisesti kehonkoostumukseen esimerkiksi lisäämällä kylläisyystuntemuksia ja siten vähentämällä nautitun ruoan määrää, jonka seurauksena kehon

rasvakudoksen määrä vähenee (Zinn ym. 2017). Amerikkalaistutkimuksessa havaittiin ketogeenisen LCHF- ruokavalion vähentävän energiansaantia noin 33 % (Heatherly ym. 2018).

4.1 Ketogeenisen ruokavalion hyödylliset vaikutukset

Phinney tutkimusryhmineen (1983) tutki ensimmäisten joukossa ketogeenisen ruokavalion yhteyttä urheilijoiden kestävyyssuorituskykyyn ja huomasi, että kestävyysurheilijoiden oli mahdollista ylläpitää suorituskykyään ketogeenisellä ruokavaliolla. He tutkivat viittä eliittipyöräilijää ja ketogeenisen ruokavalion vaikutusta kohtuukuormittavan (62–64 % VO_{2max}) liikunnan aikana. Tutkittavat noudattivat aluksi viikon tavanomaista sekaruokavaliota, jonka jälkeen he siirtyivät noudattamaan ketogeenistä ruokavaliota neljä viikkoa. Ruokavalioiden energiamäärät vastasivat toisiaan ja energian saatavuus oli noin 35–50 kcal/kg/päivä. Lisäksi tutkittavat nauttivat tutkimuksen ajan tarvittavia ravintolisiä, jotta riittävä vitamiinien ja kivennäisaineiden saanti voitiin turvata. Tutkimuksessa käytettiin ketogeenistä ruokavaliota, joka sisälsi alle 20 g hiilihydraatteja. Sekaruokavalio sisälsi 1,75 g/kg proteiinia ja jäljelle jäävästä energiamäärästä kaksi kolmasosaa tuli hiilihydraateista ja yksi kolmasosa rasvasta. Tutkimuksen aikana kolmen pyöräilijän suorituskyky parani ja kahden heikkeni. Yhden pyöräilijän uupumukseen kuluva aika (time to exhaustion, TTE) parani jopa 84 minuuttia, joka voi vääristää tuloksia**.** Lisäksi hiilihydraattipitoisen ruokavalion vaikutuksia tutkittaessa tutkittavat eivät nauttineet lisähiilihydraatteja urheilusuorituksen aikana, joka eroaa vallitsevista urheiluravitsemussuosituksista ja siksi tutkimuksen voi ajatella suosivan ketogeenistä ruokavaliota. Tutkimuksessa ei myöskään ollut mukana vertailuryhmää.

Ketogeenisen ruokavalion vaikutuksia kestävyysurheilussa on tutkittu lähivuosina koko ajan enemmän (Taulukko 1). Vaihtovuorotutkimuksessaan Zajac ym. (2014) käyttivät ketogeenistä ruokavaliota, joka sisälsi 70 % rasvaa, 15 % proteiinia ja 15 % hiilihydraatteja. Ruokavaliota verrattiin tavanomaiseen länsimaalaiseen ruokavalioon, joka sisälsi 30 % rasvaa, 20 % proteiinia ja 50 % hiilihydraatteja. Tutkimuksessa oli mukana noin 30-vuotiaita miesmaastopyöräilijöitä (n = 8), jotka kävivät läpi kaksi neljän viikon interventiota, joista toisen aikana he noudattivat tyypillistä länsimaalaista ruokavaliota ja toisen aikana ketogeenistä ruokavaliota. Tutkimuksen alussa tutkittavat kävivät ruoankäyttöhaastattelussa, jonka perusteella heille koostettiin tutkimuksessa käytettävät ruokavaliot niin, että niiden energiamäärät vastasivat tutkittavien tavanomaista ruokavaliota. Keskimäärin ruokavaliot sisälsivät hieman alle 4 000 kilokaloria. Ruokavaliointerventioiden välissä oli yhden viikon mittainen palautumisaika, jonka aikana tutkittavien syömistä ei rajoitettu. Tutkimus toteutettiin

peruskuntokaudella, jolloin harjoituksia on paljon, mutta niiden intensiteetti on kohtuullinen. Ketogeenisen ruokavalion vaikutuksesta rasvojen käyttö energiaksi urheilusuorituksen aikana lisääntyi, kehon massa ja rasvamäärä pienenivät ja harjoituksen jälkeisen lihasvaurion määrä väheni. Myös kestävyyssuorituskyvyn ja maksimaalisen hapenottokyvyn havaittiin parantuvan, joka voi ainakin osittain johtua kehon massan ja rasvakudoksen vähenemisestä. Ketogeenisen ruokavalion todettiin olevan mahdollisesti hyödyllinen kestävyysurheilijoille peruskuntokaudella, jolloin intensiteetiltään kohtuukuormittavia harjoituksia on määrältään paljon.

Yhdysvaltalaistutkimuksessa (2016) haluttiin tutkia kestävyysurheilijoita (n = 10), jotka olivat rajoittaneet hiilihydraattien saantiaan jo useiden kuukausien ajan, keskimäärin 20 kuukautta, ennen tutkimusta ja verrata heitä runsashiilihydraattista ruokavaliota noudattaneisiin urheilijoihin (n = 10). Hiilihydraattien osuus ruokavaliosta oli siten toisella ryhmällä noin 10 % energiansaannista ja toisella ryhmällä noin 59 % energiansaannista. Molemmat ryhmät koostuivat 21–45-vuotiaista korkean tason miesultrakestävyysurheilijoista. Verrattaessa runsaasti hiilihydraatteja sisältäneen ruokavalion aineenvaihdunnallisia vaikutuksia ketogeenisen ruokavalion pitkäaikaisiin vaikutuksiin, havaittiin, että rasvojen hapettuminen oli ketogeenistä ruokavaliota noudattaneilla ultrakestävyysurheilijoilla jopa 59 % suurempaa. Yllättävää oli, ettei ketoadaptoituneiden ja runsaasti hiilihydraatteja nauttineiden urheilijoiden lihasglykogeenitasoissa ollut merkittäviä eroja levossa, suorituksen tai palautumisen aikana. (Volek ym. 2016).

Zinn ja kumppanit (2017) halusivat pilottitapaustutkimuksessaan sekä tutkia ketogeenisen ruokavalion vaikutuksia kehonkoostumukseen ja suorituskykyyn että arvioida satunnaisesti kilpailevien urheilijoiden (n = 5) kokemuksia ruokavalion noudattamisesta. Tutkittavista neljä oli naisia ja yksi mies ja he olivat iältään 49–55-vuotiaita. Käytössä ollut ketogeeninen ruokavalio sisälsi alle 50 g hiilihydraatteja vuorokaudessa, 1,5 g proteiinia painokiloa kohden ja ad libitum eli rajattoman määrän rasvaa. Kymmenen viikon aikana kaikilla viidellä tutkittavalla rasvojen oksidaatio parani ja kehon massa ja ihopoimumittauksen tulos pienenivät. Ketogeenisella ruokavaliolla oli siis positiivisia vaikutuksia kehonkoostumukseen. Tutkittavat kokivat ruokavalion parantavan hyvinvointiaan ja ihonsa kuntoa ja vähentävän tulehdusta kehossaan. Positiiviset vaikutukset eivät kuitenkaan ulottuneet suorituskykyyn, vaan tutkittavien maksimaalinen aerobinen suorituskyky heikkeni ketogeenistä ruokavaliota noudatettaessa. Tutkimuksessa ei ollut mukana vertailuryhmää. (Zinn ym. 2017.)

Myös vuoden 2018 amerikkalaistutkimuksessa tutkittiin satunnaisesti kilpailevia keski-ikäisiä kestävyysurheilijoita (n = 8) ja ketogeenisen ruokavalion (alle 50 g hiilihydraatteja, noin 70 % rasvaa, loput proteiinia) vaikutusta kehonkoostumukseen, juoksusuorituskykyyn ja aineenvaihduntaan. Energiansaantia ei tutkimuksessa rajoitettu. Tutkimuksen alussa tutkittavat noudattivat vielä 7–10 päivän ajan omaa tavanomaista runsashiilihydraattista (noin 50 % energiasta hiilihydraateista) ruokavaliotaan ja heille tehtiin tarvittavat alkumittaukset kolmena eri tutkimuspäivänä. Tämän jälkeen tutkittavat siirtyivät noudattamaan ketogeenistä ruokavaliota kolmen viikon ajaksi ennen loppumittausten suorittamista, jotka toteutettiin kahtena erillisenä päivänä. Tutkimuksessa ei ollut mukana erillistä vertailuryhmää ja alkumittausten aikana tutkittavat eivät nauttineet hiilihydraatteja suorituksen aikana, joka voi siten olla epäedullista runsaasti hiilihydraatteja sisältävän ruokavalion tuottamien tulosten kannalta. Kehonmassa ja rasvaprosentti alenivat ketogeenisella ruokavaliolla verrattuna urheilijoiden tavanomaiseen, runsaasti hiilihydraatteja sisältäneeseen ruokavalioon, mutta vaikutukset suorituskykyyn olivat hyvin yksilöllisiä. Osa tutkittavista päätti tutkimuksen jälkeen jatkaa ketogeenisellä ruokavaliolla ja ilmoitti tehneensä henkilökohtaisia ennätyksiä eri pituisilla kilpailumatkoilla. Tutkimuksen perusteella näyttäisi, että keski-ikäiset mieskestävyysurheilijat voisivat hyötyä ketogeenisen ruokavalion noudattamisesta. Ruokavalio näyttää mahdollistavan kilpailusuorituksen kannalta edullisemman kehonpainon ja kehonkoostumuksen, samalla kuitenkin mahdollistaen kylläisyyteen asti syömisen. (Heatherly ym. 2018.)

Samana vuonna McSwiney ym. (2018) vertasivat ketogeenistä ruokavaliota runsashiilihydraattiseen ruokavalioon kestävyysurheilijoilla kolme kuukautta kestäneessä tutkimuksessaan. Tutkittavat saivat itse valita, halusivatko he noudattaa tutkimuksen ajan runsashiilihydraattista ruokavaliota (n = 11) vai ketogeenistä ruokavaliota (n = 9). Kaikki tutkittavat olivat 19–40-vuotiaita miehiä. Ketogeenistä ruokavaliota (alle 50 grammaa hiilihydraattia, 10–15 % proteiinia, yli 75 % rasvaa) noudattaneilla kehonpaino ja rasvaprosentti putosivat ja rasvojen oksidaatio lisääntyi huomattavasti enemmän kuin runsaasti hiilihydraatteja nauttineilla (65 % hiilihydraatteja, 14 % proteiinia ja 20 % rasvaa). Kehon rasvaton massa säilyi kummassakin ryhmässä miltei samana. Ketoadaptoituneilla urheilijoilla suorituksen huipputeho parani sekä kuuden sekunnin sprinttisuorituksessa että niin sanottua kriittistä tehoa mittaavassa testissä (critical power test, CPT). Kriittistä tehoa mittaavan testin voidaan ajatella jäljittelevän kilpailutilanteessa tapahtuvaa loppukiriä ja siitä suoriutumista. Tutkimuksen lopputuloksena oli, että kestävyyssuorituskykyä on mahdollista ylläpitää ja jopa

parantaa ketogeenisella ruokavaliolla. Ruokavaliosta voi olla hyötyä varsinkin sellaisille urheilijoille, joiden on muuten haasteellista ylläpitää kilpailuihin sopivaa kehonpainoa.

Ketogeenisen ruokavalion vaikutusta on haluttu tutkia myös lyhyemmän kestävyyssuorituksen aikana (Prins ym. 2019), jolloin suorituksen intensiteetti on usein suurempi kuin pitkäkestoisissa kestävyyssuorituksissa. Tällaista suoritusta ja sen lopputulosta on myös tavallisesti pidetty niin sanotusti ”hiilihydraattiriippuvaisena”, koska korkeilla intensiteeteillä liikuttaessa hiilihydraatit ovat pääasiallinen energianlähde. Vaihtovuorotutkimuksessa verrattiin ketogeenistä ruokavaliota runsaasti hiilihydraatteja sisältäneeseen ruokavalioon. Käytössä ollut ketogeeninen ruokavalio sisälsi alle 50 grammaa hiilihydraatteja, 75–80 % rasvaa ja 15–20 % proteiinia ja runsashiilihydraattinen ruokavalio 60–65 % hiilihydraatteja, 15–20 % proteiinia ja 20 % rasvaa. Energian kokonaissaantia ei rajoitettu kumpaakaan ruokavaliota noudatettaessa. Energiansaanti ei silti ruokavalioita noudatettaessa eronnut toisistaan ja keskimääräinen energiansaanti oli noin 3 000 kilokaloria. Tutkittavat (n = 7) olivat 18–45-vuotiaita, satunnaisesti kilpailevia mieskestävyysurheilijoita. Varsinaista vertailuryhmää tutkimuksessa ei ollut, vaan jokainen tutkittava kävi läpi kaksi kuuden viikon ruokavaliointerventiota, joiden välissä oli kahden viikon washout period eli niin sanottu huuhtelujakso. Ruokavalioiden välillä ei havaittu eroa 5 kilometrin aika-ajosuorituksissa, joita suoritettiin neljä kummankin ruokavaliointervention aikana. Ketoadaptoituneiden urheilijoiden havaittiin kuitenkin pystyvän juoksemaan noin 82 % teholla maksimaalisesta hapenottokyvystä ja tuottamaan tuollakin teholla suhteellisen suuren osan energiasta rasvoista, jonka ei ole aiemmin uskottu olevan mahdollista. (Prins ym. 2019.)

Ketogeenisellä ruokavaliolla voisi mahdollisesti olla myös palautumista edistäviä vaikutuksia. Uusiseelantilaistutkimuksessa (2017) tutkittavat raportoivat ketogeenisen ruokavalion parantaneen palautumistaan, joka voisi mahdollisesti johtua ketoaine 3-beetahydroksibutyraatin reaktiivisia happilajeja vähentävästä ja antioksidanttisten geenien ekspressiota lisäävästä vaikutuksesta. Volek ym. (2016) havaitsivat tutkimuksessaan, että luurankolihasten glykogeenivarastot oli mahdollista ylläpitää ketoadaptaatiosta huolimatta samalla tasolla kuin runsashiilihydraattista ruokavaliota nautittaessa. Tämän perusteella pitkäaikainen matalahiilihydraattisen ruokavalion noudattaminen johtaa kehossa muutoksiin, jotka pyrkivät säilyttämään lihasglykogeenin määrän. Rasittavan kestävyyssuorituksen jälkeen tärkein palautumiseen ja palautumisaikaan vaikuttava tekijä on lihasglykogeenivarastojen uudelleen täydentäminen (Beelen ym. 2010).

Taulukko 1. Tutkimuksia ketogeenisen ruokavalion hyödyllisistä vaikutuksista

Viite (maa)	Tutkimus	n	Tutkimusmenetelmä ja kesto	Tärkeimmät tulokset
Zajac ym. 2014 (Puola)	The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists	8 miestä	Kokeellinen (vaihtovuoroasetelma, satunnaistettu) 8 viikkoa	Ketogeeninen ruokavalio paransi kehonkoostumusta ja aerobista kapasiteettia (parempi maksimaalinen hapenottokyky).
Volek ym. 2016 (Yhdysvallat)	Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners	20 miestä	Havainnoiva (poikkileikkaustutkimus, ei satunnaistettu)	Ketoadaptoituneilla urheilijoilla rasvojen hapettuminen oli suurempaa ja samalla lihasglykogeenin määrä säilyi samalla tasolla kuin runsaasti hiilihydraatteja nauttineilla urheilijoilla.
Zinn ym. 2017 (Uusi-Seelanti)	Ketogenic diet benefits body composition and well-being but not performance in a pilot case study of New Zealand endurance athletes	5 (4 naista, 1 mies)	Kokeellinen (pilottitapaustutkimus, ei kontrolliryhmää) 10 viikkoa	Heikentyneestä suorituskyvystä huolimatta urheilijoiden kokemus omasta hyvinvoinnista parani ja heidän kehonkoostumuksensa parani.
Heatherly ym. 2018 (Yhdysvallat)	Effects of Ad libitum low-carbohydrate high-fat dieting in middle-age male runners	8 miestä	Kokeellinen (vaihtovuoroasetelma, ei kontrolliryhmää) 3 viikkoa	Ketogeenisen ruokavalion vaikutuksesta urheilijoiden kehonkoostumus parani ja rasvojen oksidaatio lisääntyi. Ruokavalion vaikutukset suorituskykyyn näyttävät olevan hyvin yksilökohtaisia.
McSwiney ym. 2018 (Irlanti)	Keto-adaptation enhances exercise performance and body composition responses to training in endurance athletes	20 miestä	Kokeellinen (rinnakkaistutkimus, ei satunnaistettu) 12 viikkoa	Ketoadaptaatio paransi kehonkoostumusta, suorituskykyä ja rasvojen oksidaatiota harjoituksen aikana.
Prins ym. 2019 (Yhdysvallat)	High rates of fat oxidation induced by a low-carbohydrate, high-fat diet, do not impair 5-km running performance in competitive recreational athletes	7 miestä	Kokeellinen (satunnaistettu, vaihtovuoroasetelma) 12 viikkoa	Ketogeeninen ruokavalio ei huonontanut suorituskykyä kovatehoisessa 5 km aika-ajo- suorituksessa.

5. KETOGEENISEN RUOKAVALION HAITAT

Ketogeenisen ruokavalion haitallisten vaikutusten oletetaan johtuvan esimerkiksi tyhjentyneistä glykogeenivarastoista ja urheilusuorituksen heikentyneestä taloudellisuudesta. Kaikilla ruokavalioilla ja niin myös ketogeenisella ruokavaliolla on merkittävä vaikutus urheilijoiden jaksamiseen, suorituskykyyn ja terveyteen. Ketogeeninen ruokavalio ja sen käyttö urheilijoilla on vielä suhteellisen uusi käsite, jonka vuoksi sen mahdolliset haitalliset vaikutukset urheilijan kokonaisvaltaiseen terveyteen ovat tärkeä tieto urheilijan valmennusta suunniteltaessa. Ketogeenisen ruokavalion vaikutuksia on kuvattu tiivistetysti myöhemmin kuvassa 2 (s.21).

5.1 Ketogeenisen ruokavalion haitalliset vaikutukset

Tutkimuksia, joissa ketogeenisellä ruokavaliolla on havaittu olevan haitallisia vaikutuksia kestävyysurheilijoiden suorituskykyyn ja terveyteen on esitelty taulukossa 2. Burke ym. (2017) vertasivat interventiotutkimuksessa keskenään ketogeenisen ruokavalion (n = 10) (75–80 % rasvaa, 15–20 % proteiinia ja alle 50 g hiilihydraatteja vuorokaudessa), periodisoidusti hiilihydraatteja sisältävän (n = 10) sekä tasaisesti runsaasti hiilihydraatteja sisältävän ruokavalion (n = 9) vaikutuksia kestävyyssuorituskykyyn kolmen viikon tehostetun harjoittelujakson aikana. Hiilihydraatteja sisältävät ruokavaliot vastasivat energiaravintoaineosuuksiltaan toisiaan (60–65 % hiilihydraatteja, 15–20 % proteiinia ja 20 % rasvaa), mutta toisessa hiilihydraattien saantia periodisoitiin niin, että osa harjoituksista suoritettiin korkealla hiilihydraattien saatavuudella ja osa matalalla hiilihydraattien saatavuudella. Kaikkien ruokavalioiden energian saatavuus oli 40 kcal/kg/vrk, jotta voitiin varmistaa, että mahdolliset erot suorituskyvyssä eivät johtuisi muutoksista kehonkoostumuksessa. Tutkimuksessa oli mukana 21 noin 20–30-vuotiasta kansainvälisen tason huippumieskävelijää. Tutkimus toteutettiin kahden eri harjoitusleirin aikana ja kahdeksan tutkittavaa oli mukana molemmilla leireillä. Siten tutkimukseen saatiin mukaan yhteensä 29 mittausta. Ketogeenisen ruokavalion havaittiin lisäävän rasvojen käyttöä energiantuottoon ja siten rasvojen oksidaatiota. Samalla havaittiin kuitenkin myös suorituksen taloudellisuuden huononevan hapen kulutuksen lisääntyessä 20 kilometrin kilpailuvauhtia vastaavalla nopeudella. Runsaan hiilihydraatin saannin ja periodisoidun runsaan hiilihydraatinsaannin havaittiin olevan yhteydessä parantuneeseen suorituskykyyn, kun taas ketogeeninen ruokavalio heikensi suorituskykyä.

Kun tutkimus toistettiin tulosten luotettavuuden varmistamiseksi myöhemmin aiempaa tutkimusta laajempana (Burke, Sharma ym. 2020), päädyttiin samoihin tuloksiin kuin alkuperäisessä tutkimuksessa. Myös tässä tutkimuksessa oli kolme keskenään verrattavaa tutkimusryhmää: ketogeenistä ruokavaliota (n = 10), periodisoidusti hiilihydraatteja sisältävää (n = 8) ja säännöllisesti runsaasti hiilihydraatteja sisältävää (n = 8) ruokavaliota noudattaneet ryhmät. Tutkimuksessa oli mukana 26 tutkittavaa, jotka olivat noin 20–30-vuotiaita korkean tason mies- ja naiskävelijöitä. Ketogeeninen ruokavalio heikensi suorituskykyä heikentämällä suorituksen taloudellisuutta. Lisäksi tutkimusryhmä halusi selvittää, onko ketogeenisellä ruokavaliolla mahdollisesti joitain hyödyllisiä vaikutuksia, jotka ilmenevät vasta myöhemmin, mikäli ketogeenisen ruokavalion jälkeen siirryttäisiin jälleen runsashiilihydraattiseen ruokavalioon. Tällaisella periodisoidulla ketogeenisen ruokavalion hyödyntämisellä esimerkiksi ennen kilpailuja suorituskyvyn parantamiseksi ei näyttäisi olevan hyödyllisiä vaikutuksia.

Tutkimuksia on tehty myös ketogeenisen ruokavalion vaikutuksista kohtuukuormittavan kestävyysurheilun yhteydessä. Shawn ja kumppaneiden (2019) vaihtovuorotutkimuksessa 8 tutkittavaa kävivät läpi kaksi 31 päivän ruokavaliointerventiota, joista toinen oli ketogeeninen ja toinen heidän tavanomainen ruokavalionsa. Interventioiden välissä oli 2–3 viikon mittainen huuhtelujakso. Tutkittavien tavanomainen ruokavalio sisälsi noin 43 % hiilihydraatteja ja 38 % rasvaa. Ruokavaliointerventioiden välissä oli 2–3 viikon mittainen huuhtelujakso. Kaikki tutkittavat olivat noin 30-vuotiaita, useita vuosia harjoitelleita mieskestävyysurheilijoita. Tutkimusryhmä havaitsi tutkimuksessaan, että 31 päivän ketogeeninen ruokavalio (<50 g hiilihydraatteja, 15–20 % proteiinia, 75–80 % rasvaa) voi ylläpitää suorituskykyä kohtuukuormittavan liikunnan aikana. Tutkimustulokset kuitenkin osoittavat, että ketoadaptaatio heikentää suorituskykyä korkean intensiteetin kestävyyssuorituksissa lisäten suorituksen aikaista hapenkulutusta.

Australialaistutkimuksessa (Burke, Whitfield ym. 2020) haluttiin selvittää, riittäisikö alle viikon altistuminen ketogeeniselle ruokavaliolle saamaan aikaan voimakkaita muutoksia rasvojen oksidaatiossa urheilusuorituksen aikana. Lisäksi haluttiin tutkia, voisiko vuorokauden kestävä runsas hiilihydraatin nauttiminen ketoadaptaation jälkeen mahdollisesti kumota ketogeenisen ruokavalion aiheuttamat negatiiviset vaikutukset suorituskykyyn palauttamalla lihasten glykogeenivarastot aikaisemmalle tasolle. Käytössä ollut ketogeeninen ruokavalio sisälsi alle 50 g hiilihydraatteja vuorokaudessa, 75–80 % rasvaa ja 2–2,2 g/kg proteiinia. Runsashiilihydraattinen ruokavalio sisälsi 65 % hiilihydraatteja, 15 % proteiinia ja 20 % rasvaa.

Energian saatavuus molemmissa ruokavalioissa asetettiin tasolle 40 kcal/kg/vrk. Tutkittavat (n = 13) olivat noin 30-vuotiaita eliittimieskävelijöitä. Tutkimus kesti neljä viikkoa ja se suoritettiin Australian urheiluinstituutissa, missä tutkittavat asuivat tutkimuksen ajan. Alkumittaukset suoritettiin runsaalla hiilihydraattien saatavuudella, jonka jälkeen tutkittavat jaettiin viiden päivän ajaksi korkean hiilihydraatin saannin ryhmään (n = 6) ja ketogeenisen ruokavalion ryhmään (n = 7). Huomattiin, että jo viiden päivän aikana rasvojen oksidaatio urheilusuorituksen aikana kasvoi samalle tasolle kuin aiemmissa tutkimuksissa 3–4 viikon aikana, mutta samalla suorituksen taloudellisuus heikkeni. Hiilihydraattien nauttiminen ketoadaptaation jälkeen ei onnistunut palauttamaan suorituskykyä aiemmalle tasolle, vaan hiilihydraattien hapettuminen jäi alkuperäistä matalammalle tasolle. Siten tutkimuksen perusteella tällaisesta ketogeenisen ruokavalion periodisoidusta hyödyntämisestä ei näyttäisi olevan hyötyä, koska vähentynyt hiilihydraattien hapettuminen heikentää kovalla intensiteetillä tehtyjä suorituksia. Sekä rasvojen että hiilihydraattien hapettumisen maksimointi ei täten näyttäisi olevan samanaikaisesti mahdollista. (Burke, Whitfield ym. 2020.)

Aiheen saralla on tutkittu myös ketogeenisen ruokavalion epäsuoraa vaikutusta kestävyysurheilusuoritukseen. Esimerkiksi rautametabolia ja kehon rautastatus liittyvät vahvasti kestävyyssuorituskykyyn. Hemoglobiini-proteiini kuljettaa veressä happea työskenteleville lihaksille ja hemoglobiinin rakenteessa on noin 70–80 % kehon raudasta (Ilander ym. 2014). Raudanpuutoksessa punasoluja tuotetaan normaalia vähemmän, jolloin sekä kehon hemoglobiinin määrä että veren kyky kuljettaa happea heikkenee, mikä heikentää kestävyyssuorituksissa tarvittavaa aerobista energiantuotantoa (Ilander ym. 2014). Tuoreessa tutkimuksessa (McKay ym. 2019) tarkasteltiin sytokiini IL-6- määrää ja edelleen sen vaikutusta hepsidiinin määrään urheilijoilla, jotka kolmen viikon ketoadaptaation jälkeen nauttivat urheilusuorituksen yhteydessä hiilihydraatteja. Hepsidiini on maksassa tuottama peptidi, jolla on merkittävä rooli elimistön rautatasapainon säätelyssä ja rautastatuksen ollessa hyvä, on hepsidiinin määrä verenkierrossa suuri (Mutanen ja Uusitupa 2012). Tutkimuksessa oli mukana noin 20–30-vuotiaita korkean tason mies- ja naiskävelijöitä. Ketogeenistä ruokavaliota (<50 g hiilihydraattia, 15–20 % proteiinia, 80 % rasvaa) noudattanutta ryhmää (n = 9) verrattiin sekä periodisoidusti (n = 6) että säännöllisesti runsaasti hiilihydraatteja (n = 8) sisältävää ruokavaliota noudattaneisiin. Runsaasti hiilihydraatteja sisältävässä ruokavaliossa oli 15–20 % proteiinia, 15 % rasvaa ja 8–8,5 g/kg hiilihydraatteja. Kolmen viikon ruokavaliointervention jälkeen urheilijat suorittivat testauksen, jonka aikana myös ketogeenistä ruokavaliota nauttineille urheilijoille tarjottiin hiilihydraatteja kaksi tuntia ennen urheilusuoritusta ja sen aikana (CHO restoration). Huomattiin, että ketoadaptoituneilla urheilijoilla urheilusuorituksen

jälkeen IL-6 -pitoisuudet olivat korkeammat, eikä pitoisuus laskenut akuutin hiilihydraatin nauttimisen seurauksena samalle tasolle, mitä se oli urheilijoilla, jotka olivat nauttineet runsaasti hiilihydraatteja koko intervention ajan. IL-6 -pitoisuus ei kuitenkaan vaikuttanut hepsidiinin määrään. Proinflammatorisen luonteensa vuoksi IL-6 -pitoisuuden nousu voi kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti joihinkin muihin kehon prosesseihin, kuten immuunijärjestelmään. (McKay ym. 2019.)

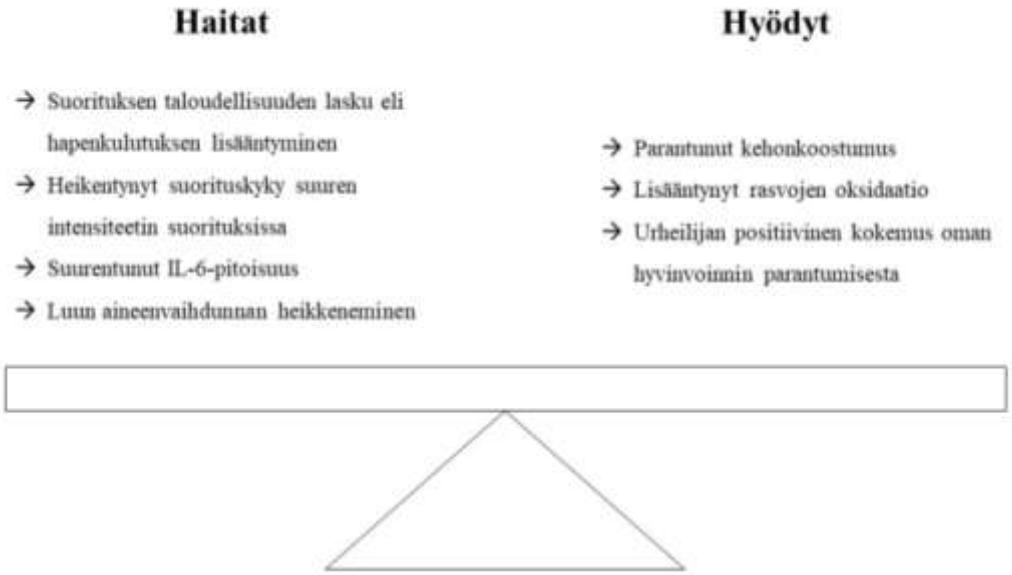
Tutkimuksessaan Heikura ym. (2020) tutkivat ketogeenisen ruokavalion ja sen jälkeisen hiilihydraattien nauttimisen ja liikunnan välisen vuorovaikutuksen vaikutuksia luuterveyteen. Myös tässä tutkimuksessa verrattiin ketogeenistä ruokavaliota (0,5 g/kg hiilihydraatteja, 2,1 g/kg proteiinia ja 75–80 % rasvaa) runsaasti hiilihydraatteja (8,6 g/kg hiilihydraatteja, 2,1 g/kg proteiinia ja 1,2 g/kg rasvaa) sisältävään ruokavalioon. Tutkimuksessa oli mukana korkean tason noin 20–30-vuotiaita mies- ja naiskävelijöitä. Ketogeenistä ruokavaliota noudatti 19 tutkittavaa ja runsashiilihydraattista ruokavaliota 17 tutkittavaa. Tutkittavat rekrytoitiin mukaan tutkimukseen kolmelta eri harjoitusleiriltä ja osa tutkittavista oli mukana kahdella leirillä ja tuotti siten kaksi mittausta mukaan tutkimukseen. Luuterveyttä tutkittiin analysoimalla verinäytteistä luun resorptioon eli hajoamiseen liittyvä tyypin 1 kollageenista vapautuva C-terminaalinen telopeptidi (cross-linked C-terminal telopeptide of type 1 collagen, CTX), luun muodostukseen liittyvä tyypin 1 prokollageenin aminoterminaalinen propeptidi (procollagen 1 N-terminal propeptide, P1NP) ja luun yleiseen aineenvaihduntaan liittyvä osteokalsiini (osteocalcin, OC). Tutkimuksessa havaittiin sekä levossa että liikunnan seurauksena luun resorption markkerin (CTX) lisääntyvän ja luun muodostuksen ja aineenvaihdunnan markkerien (P1NP ja OC) vähenevän kolmen ja puolen viikon ketogeenisen ruokavalion noudattamisen jälkeen. Ketoadaptaation jälkeen nautitun runsaan hiilihydraatin vaikutuksesta vain CTX -pitoisuus palasi alkuperäiselle tasolleen, mutta P1NP- ja OC -pitoisuuden pysyivät edelleen matalina. Tutkimustulokset viittaavat luun aineenvaihdunnan yleisen tasapainon heikentymiseen, joka voi olla hyvin haitallista varsinkin pitkällä aikavälillä. (Heikura ym. 2020.)

Taulukko 2. Tutkimuksia ketogeenisen ruokavalion haitallisista vaikutuksista

Viite (maa)	Tutkimus	N	Tutkimusmenetelmä ja kesto	Tärkeimmät tulokset
Burke ym. 2017 (Australia)	Low carbohydrate, high fat diet impairs exercise economy and negates the performance benefit from intensified training in elite race walkers	21 miestä	Kokeellinen, ei satunnaistettu (sekä rinnakkaisasetelman että vaihtovuoroasetelman piirteitä, sillä osa miehistä mukana molemmilla leireillä ja erikokoiset ruokavaliointerventioryhmät) 3 viikkoa	Ketogeeninen ruokavalio heikensi suorituskykyä runsashiilihydraattiseen ruokavalioon verrattuna. Suorituskyky heikkeni lähinnä suorituksen aikaisen hapenkulutuksen lisääntyessä eli suorituksen taloudellisuuden huonontuessa.
Burke ym. 2020 (Australia)	Crisis of confidence averted: Impairment of exercise economy and performance in elite race walkers by ketogenic low carbohydrate, high fat (LCHF) diet is reproducible	26 (19 miestä, 7 naista) (19*)	Kokeellinen (rinnakkaistutkimus, ei satunnaistettu) 5,5 viikkoa	Ketogeeninen ruokavalio heikensi suorituskykyä verrattuna runsashiilihydraattiseen ruokavalioon heikentämällä lähinnä suorituksen taloudellisuutta. Ketogeenisestä ruokavaliosta ei näyttäisi olevan hyötyä myöskään periodisoidusti käytettynä.
Shaw ym. 2019 (Uusi-Seelanti)	Effect of a ketogenic diet on submaximal exercise capasity and efficiency in runners	8 miestä	Kokeellinen (satunnaistettu, vaihtovuoroisasetelma) noin 3 kuukautta	Suorituskyky säilyi ketogeenistä ruokavaliota noudatettaessa kohtuukuormittavissa (<60 % VO_{2max}) suorituksissa, mutta heikkeni kovilla tehoilla (>70 % VO_{2max}) liikuttaessa.
Burke ym. 2020 (Australia)	Adaptation to a low carbohydrate high fat diet is rapid but impairs endurance exercise metabolism and performance despite enhanced glycogen availability	13 miestä	Kokeellinen (rinnakkaistutkimus, ei-satunnaistettu) 4 viikkoa	Energiaravintoaineiden käytössä tapahtui huomattava muutos ketogeenisen ruokavalion vaikutuksesta. Äkillinen hiilihydraattitankkaus ei onnistunut palauttamaan suorituskykyä korkean intensiteetin suoritusta varten.
McKay ym. 2019 (Australia)	Acute carbohydrate ingestion does not influence the post-exercise iron-regulatory response in elite keto-adapted race walkers	23 (17 miestä, 6 naista)	Kokeellinen (rinnakkaistutkimus, satunnaistettu) noin 4 viikkoa	Ketogeeniseen ruokavalio lisäsi kehon inflammaatioreaktiota ja IL-6 määrää. Inflammaatio ei vähentynyt akuutin runsaan hiilihydraatin nauttimisen seurauksena.
Heikura ym. 2020 (Australia)	A short-term ketogenic diet impairs markers of bone health in response to exercise	28 (23 miestä, 5 naista)	Kokeellinen (rinnakkaistutkimus, ei-satunnaistettu) 3,5 viikkoa	CTX lisääntyi, kun taas P1NP ja OC vähenivät. Vain CTX palasi aiemmalle tasolleen akuutin hiilihydraatin nauttimisen jälkeen.

CTX cross-linked C-terminal telopeptide of type 1 collagen; P1NP procollagen 1 N-terminal propeptide; OC osteocalcin, IL-6 interleukiini 6

*19 henkilöä osallistui tutkimuksen kolmanteen vaiheeseen



Kuva 2. Ketogeenisen ruokavalion hyödyt ja haitat kestävyysurheilussa

6. POHDINTA

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena oli tutkia ketogeenisen ruokavalion roolia, erityisesti sen hyötyjä ja haittoja, kestävyysurheilussa. Tämänhetkisen tutkimusnäytön perusteella ketogeeninen ruokavalio voi parantaa suorituskykyä submaksimaalisilla tehoilla liikuttaessa, mutta heikentää suorituskykyä kovaa intensiteettiä vaativissa suorituksissa. Eliittiurheilussa voiton voi saavuttaa jopa vain 1 % suorituserolla (Pinckaers ym. 2017), joten pienestäkin ketogeenisellä ruokavaliolla saavutetusta parannuksesta suorituskykyyn voi olla hyötyä.

6.1 Kirjallisuuskatsauksen tutkimukset

Suuri osa kirjallisuuskatsauksen tutkimuksista käsiteltävän aiheen saralla oli toteutettu mieskestävyysurheilijoilla. Neljässä tutkimuksessa kahdestatoista oli mukana naisia, mutta vain murto-osa mukana olleista miehistä. Naisten ottaminen mukaan tutkimukseen voi heikentää saatuja tuloksia, sillä tuloksiin tulee enemmän vaihtelua, koska naisten aerobinen kapasiteetti ja nopeus ovat miehiä pienempiä (Burke, Sharma ym. 2020). Lisäksi naisten tutkimuksissa saamat vasteet voivat olla miehiä heikompia johtuen esimerkiksi kuukautiskierron tutkimustuloksia sekoittavasta vaikutuksesta (Burke, Sharma ym. 2020).

Kirjallisuuskatsauksen perusteella ei siten voida tehdä yleispäteviä johtopäätöksiä ketogeenisen ruokavalion vaikutuksista kaikilla kestävyysurheilijoilla sukupuolesta riippumatta.

Monet tämän kirjallisuuskatsauksen tutkimukset eivät olleet satunnaistettuja, ne olivat kestoltaan hyvin lyhyitä ja kontrolliryhmiä ei käytetty. Osassa tutkimuksia tutkittavat saivat itse vaikuttaa, mitä ruokavaliota he noudattivat tutkimuksen ajan. Esimerkiksi Burken ja kumppaneiden tutkimuksissa (2017, 2020) tutkittaville esiteltiin tutkimuksessa käytössä olevat ruokavaliot ja niiden mahdolliset hyödyt ja haitat, jonka jälkeen tutkittavia pyydettiin kertomaan oma mieltymyksensä ruokavalioihin liittyen. Tutkittavien mieltymysten perusteella heidät saatiin jaettua interventioryhmiin, jotka pystyttiin silti kaltaistamaan iän, kehonmassan, aerobisen kapasiteetin ja 20 kilometrin kilpailusuorituksen suhteen. Yksi tutkimuksista (Volek ym. 2016) oli puolestaan havainnoiva poikkileikkaustutkimus, jonka avulla pystyttiin tutkimaan ketogeenisen ruokavalion aineenvaihdunnallisia vaikutuksia, mutta havainnoivat tutkimukset eivät ole yhtä luotettavia kuin kokeelliset tutkimukset. Zinn ja kumppanit (2017) puolestaan toteuttivat pilottitapaustutkimuksen, jonka tuloksia ei voida yleistää koko urheilijaväestöön vertailuryhmän puuttuessa. Tutkimus toi kuitenkin paljon lisätietoa aiheesta ja sitä voidaan hyödyntää jatkotutkimuksia suunniteltaessa. Jatkotutkimuksissa voidaan puolestaan saada aina paremmin yleistettävissä olevia tuloksia. Kirjallisuuskatsauksen tutkimusten otoskoot olivat hyvin pieniä, mikä entisestään heikentää tutkimustulosten yleistettävyyttä. Pienet otoskoot ovat yleisiä urheiluravitsemustutkimuksessa, koska urheilijoita on suhteellisen vähän ja he ovat niin heterogeeninen joukko, että riittävän tutkittavien lukumäärän saaminen mukaan tutkimukseen voi olla haastavaa.

Tutkimuksissa on jonkin verran keskitytty tutkimaan ketogeenisen ruokavalion vaikutuksia eliittiurheilijoilla (Volek ym. 2016, Burke ym. 2017, McKay ym. 2019). On kuitenkin mahdollista, että heidän vasteensa ketogeeniselle ruokavaliolle on erilainen kuin esimerkiksi urheilijoiden, jotka kilpailevat satunnaisesti ja matalammilla tehoilla. Lisäksi ketogeenisen ruokavalion mahdollinen energiansaantia ja kehonpainoa pienentävä vaikutus voivat olla erityisen tarpeellisia satunnaisesti kilpaileville urheilijoille, koska heillä on tavallisesti eliittiurheilijoita korkeampi rasvaprosentti. (Heatherly ym. 2018.) Tämä tulisi tulevaisuudessa ottaa entistä paremmin huomioon, sillä mahdolliset hyödyt alemmillakin kilpatasoilla ovat toivottuja.

Vielä ei tiedetä, kuinka paljon ketogeenisen ruokavalion mukanaan tuoma painonpudotus mahdollisesti parantaa suorituskykyä. Lisäksi on epäselvää, johtuuko painon putoaminen

vähentyvästä rasvamassasta, glykogeenista tai muutoksista nestetasapainossa vai osittain kaikista edellä mainituista. (Heatherly ym. 2018.) Aiheen tutkimuksiin liittyy myös monia tuloksia sekoittavia tekijöitä, joita tulee ottaa tulevaisuudessakin huomioon. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi naisurheilijoiden kuukautiskierto ja olosuhteet, joissa urheilija kilpailee. On esimerkiksi huomattu, että ketogeeninen ruokavalio paransi kestävyyssuoritusta urheilijoilla, joita tutkittiin myöhään talvella tai keväällä, mutta heikensi kestävyyssuoritusta kesällä tutkituilla urheilijoilla (Heatherly ym. 2018). On myös mahdollista, että ketogeenisella ruokavaliolla on erilaisia vaikutuksia eri kestävyyslajien urheilijoiden suorituskykyyn, koska lajien intensiteetit vaihtelevat suuresti, samoin kuin niissä tarvittavat pääasialliset energianlähteet. Urheilijoiden tulee pohtia omia tavoitteitaan, oman lajinsa vaatimuksia ja sitä, mikä rooli runsaalla hiilihydraattien hapettumisella ja sen mahdollistamalla korkean intensiteetin suorituskyvyllä on omassa lajissa (Burke, Whitfield ym. 2020). Ketogeenisen ruokavalion avulla on mahdollista hyödyntää kehon lähes rajattomia energiavarastoja ja ylläpitää suorituskykyä pidempiä aikoja kohtuullisella intensiteetillä liikuttaessa, mutta samalla kyky suorittaa korkean intensiteetin suorituksia heikkenee.

6.2 Ketoaineet lisäravinteina

Ihmisen kehon hiilihydraattivarastot ovat rajalliset, mutta energian tuotto glykogenolyysin avulla mahdollistaa liikkumisen kovillakin tehoilla. Vaikka kehon rasvavarastot ovat käytännössä loputtomat, rasvametabolia ei pysty tuottamaan riittävästi energiaa kovatehoisissa suorituksissa. (Sansone ym. 2018.) Koska ketogeeninen ruokavalio voi heikentää kykyä hyödyntää hiilihydraatteja energianlähteenä ja siten heikentää suorituskykyä kovatehoisissa suorituksissa, voivat suun kautta nautitut ketoainelisäravinteet olla käytännöllisempi tapa lisätä kehon ketoaineiden määrää ilman erillisen ketogeenisen ruokavalion noudattamista (Pinckaers ym. 2017). Tällaiset ulkosyntyiset ketoaineet voisivat muun muassa lisätä glykogeenivarastojen täydentymistä harjoituksen jälkeen, vähentää proteolyysiä eli proteiinien hajoamista ja toimia vaihtoehtoisena energianlähteenä säästäen hiilihydraatteja (Sansone ym. 2018). Tietoa ketoaineiden käytöstä hiilihydraattipitoisen ruokavalion rinnalla on vielä vähän, joten tutkimusta tällä rintamalla vaaditaan vielä lisää.

6.3 Ketogeenisen ruokavalion käytännön noudattaminen

Useita vuosikymmeniä sitten ketogeenisen ruokavalion on havaittu vähentävän sekä lihasten glykogeenivarastojen että urheilusuorituksen aikana käytettävän glykogeenin määrää

huomattavasti (Phinney ym. 1983). Uudehkossa yhdysvaltalaistutkimuksessa kuitenkin havaittiin, että ketoadaptoituneiden urheilijoiden oli mahdollista säilyttää lihasglykogeenivarastonsa samalla tasolla kuin runsaasti hiilihydraatteja nauttineiden urheilijoiden (Volek ym. 2016). Tämän tiedon perusteella myös ketogeenistä ruokavaliota nautittaessa voisi olla mahdollista suorittaa glykogeenivarastojen avulla kovatehoisia osuuksia, joita kestävyysurheilusuoritukseen usein kuuluu esimerkiksi loppukirin muodossa. Tehokkaalla kestävyysharjoittelulla on lisäksi mahdollista parantaa aerobista kapasiteettia, mutta ketogeenisen ruokavalion aiheuttama suorituksen taloudellisuuden lasku näyttää kuitenkin kariuttavan harjoittelulla saavutetut hyödyt (Burke ym. 2017).

Ketogeenisen ruokavalion ensimmäisinä viikkoina ketoadaptaation alkuvaiheessa on havaittu esiintyvän esimerkiksi väsymystä ja suorituskyvyn heikkenemistä. Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten valossa voisi siten olla hyödyllistä vähentää harjoitusten volyymia ja intensiteettiä ketogeenisen ruokavalion ensimmäisten viikkojen aikana. (Zinn ym. 2017, McSwiney ym. 2018, Prins ym. 2019.) Ruokavalion noudattaminen on kuitenkin syytä lopettaa, jos suorituskyky ei parane viimeistään kolme viikkoa ruokavalion aloituksen jälkeen (Heatherly ym. 2018). Zinn ja muiden (2017) tutkimuksen loputtua tutkimuksessa mukana olleet urheilijat lisäsivät hiilihydraatteja ruokavalioonsa sen verran, että korkean intensiteetin suorituskyky palasi, mutta he nauttivat silti vähemmän hiilihydraatteja ja enemmän rasvaa kuin ennen tutkimusta. He kertoivat löytäneensä toimivan energiaravintoainesuhteen, joka pitää yllä suorituskykyä, kehonkoostumusta ja terveyttä.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella ketogeenisellä ruokavaliolla on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia kestävyysurheilijoiden suorituskykyyn ja terveyteen. Ketogeeninen ruokavalio voi ainakin ylläpitää suorituskykyä kohtuukuormittavilla tehoilla liikuttaessa ja auttaa urheilijaa parantamaan kehonkoostumustaan. Suorituksen intensiteetin kasvaessa ketogeeninen ruokavalio kuitenkin heikentää kestävyysurheilijoiden suorituskykyä heikentämällä suorituksen taloudellisuutta. Ruokavalion vaikutukset ovat hyvin yksiöllisiä. Vaikka ketogeenisestä ruokavaliosta voi olla hyötyä esimerkiksi harjoituskaudella, jolloin harjoittelumäärät ovat suuria, mutta kuormitus kohtuullinen, muista mahdollisista terveysvaikutuksista on vielä todella vähän tietoa. Tämän kandidaatin tutkielman pohjalta ei siten voida varmasti sanoa, onko ketogeeninen ruokavalio turvallinen vaihtoehto kestävyysurheilijoille pitkällä aikavälillä.

LÄHTEET

Bailey CP, Hennessy E. A review of the ketogenic diet for endurance athletes: performance enhancer or placebo effect? J Int Soc Sports Nutr 2020;17:33-9.

Bassett DR,Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. Med Sci Sports Exerc 2000;32:70-84.

Beelen M, Burke LM, Gibala MJ, van Loon, L. J. C. Nutritional strategies to promote postexercise recovery. Int J Sport Nutr Exerc Metab 2010;20:515-532.

Bosch A, Smit KM. Nutrition for endurance and ultra-endurance training. Kirjassa: Lanham-New SA, toim. Sport and exercise nutrition. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley-Blackwell 2011, s. 158-172.

Burke LM. Ketogenic low-CHO, high-fat diet: the future of elite endurance sport? J Physiol 2020;.

Burke LM. Re-Examining High-Fat Diets for Sports Performance: Did We Call the 'Nail in the Coffin' Too Soon? Sports Med 2015;45 Suppl 1:33.

Burke LM, Ross ML, Garvican-Lewis LA ym. Low carbohydrate, high fat diet impairs exercise economy and negates the performance benefit from intensified training in elite race walkers. J Physiol 2017;595:2785-2807.

Burke LM, Sharma AP, Heikura IA ym. Crisis of confidence averted: Impairment of exercise economy and performance in elite race walkers by ketogenic low carbohydrate, high fat (LCHF) diet is reproducible. PLoS One 2020;15:e0234027.

Burke LM, Whitfield J, Heikura IA ym. Adaptation to a low carbohydrate high fat diet is rapid but impairs endurance exercise metabolism and performance despite enhanced glycogen availability. J Physiol 2020;.

Carr AJ, Sharma AP, Ross ML, Welvaert M, Slater GJ, Burke LM. Chronic Ketogenic Low Carbohydrate High Fat Diet Has Minimal Effects on Acid-Base Status in Elite Athletes. Nutrients 2018;10:236. doi: 10.3390/nu10020236.

Cervenka MC, Doerrer S, Henry BJ, Kossoff EH, Turner Z. The Ketogenic and modified Atkins diets : treatments for epilepsy and other disorders. New York, NY: Demos Health 2016.

Heatherly AJ, Killen LG, Smith AF ym. Effects of Ad libitum Low-Carbohydrate High-Fat Dieting in Middle-Age Male Runners. Med Sci Sports Exerc 2018;50:570-579.

Heikura IA, Burke LM, Hawley JA ym. A Short-Term Ketogenic Diet Impairs Markers of Bone Health in Response to Exercise. Front Endocrinol (Lausanne) 2020;10:880.

Ilander O, Laaksonen M, Mursu J. Vitamiinit, kivennäisaineet ja fytokemikaalit - riittävästi, vaan ei liikaa. Kirjassa: Ilander O, Laaksonen M, Lindblad P, Mursu J, toim. Liikuntaravitsemus : tehoa, tuloksia ja terveyttä ruuasta. Lahti: VK-Kustannus 2014, s. 311-376.

Kutinlahti E. Maksimaalinen hapenottokyky kestävyyskunnon mittarina. 2018. https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01038 (luettu Jan 27, 2021).

Laffel L. Ketone bodies: a review of physiology, pathophysiology and application of monitoring to diabetes. Diabetes Metab Res Rev 1999;15:412-426.

Leverve X, Batandier C, Fontaine E. Choosing the right substrate. Novartis Found Symp 2007;280:108-4.

McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Energy transfer in the body. Kirjassa: Exercise physiology : nutrition, energy, and human performance. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins 2010, s. 134-161.

McKay AKA, Peeling P, Pyne DB ym. Acute carbohydrate ingestion does not influence the post-exercise iron-regulatory response in elite keto-adapted race walkers. J Sci Med Sport 2019;22:635-640.

McSwiney FT, Wardrop B, Hyde PN, Lafountain RA, Volek JS, Doyle L. Keto-adaptation enhances exercise performance and body composition responses to training in endurance athletes. Metabolism 2018;81:25-34.

Mutanen M, Voutilainen E. Energia-aineenvaihdunta. Kirjassa: Aro A, Mutanen M, Uusitupa M, Antaa R, toim. Ravitsemustiede. Helsinki: Duodecim 2012, s. 76-87.

Mutanen M, Uusitupa M. Ravinto, geenien toiminta, genomiikka ja epigenetiikka. Kirjassa: Aro A, Mutanen M, Uusitupa M, Antaa R, toim. Ravitsemustiede. Helsinki: Duodecim 2012, s. 168-182.

Owen OE, Morgan AP, Kemp HG, Sullivan JM, Herrera MG, Cahill GF,Jr. Brain metabolism during fasting. J Clin Invest 1967;46:1589-1595.

Paavolainen L, Häkkinen K, Hämäläinen I, Nummela A, Rusko H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. J Appl Physiol (1985) 1999;86:1527-1533.

Paoli A, Bianco A, Grimaldi KA. The Ketogenic Diet and Sport: A Possible Marriage? Exerc Sport Sci Rev 2015;43:153-162.

Phinney SD, Bistrian BR, Evans WJ, Gervino E, Blackburn GL. The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: preservation of submaximal exercise capability with reduced carbohydrate oxidation. Metabolism 1983;32:769-776.

Phinney SD, Horton ES, Sims EA, Hanson JS, Danforth E,Jr, LaGrange BM. Capacity for moderate exercise in obese subjects after adaptation to a hypocaloric, ketogenic diet. J Clin Invest 1980;66:1152-1161.

Pinckaers PJ, Churchward-Venne TA, Bailey D, van Loon LJ. Ketone Bodies and Exercise Performance: The Next Magic Bullet or Merely Hype? Sports Med 2017;47:383-391.

Prins PJ, Noakes TD, Welton GL ym. High Rates of Fat Oxidation Induced by a Low-Carbohydrate, High-Fat Diet, Do Not Impair 5-km Running Performance in Competitive Recreational Athletes. J Sports Sci Med 2019;18:738-750.

Sand O, Sjaastad ØV, Haug E ym. Kemian ja fysiikan perusteet. Kirjassa: Ihminen: Fysiologia ja anatomia. Helsinki: Sanoma Pro 2012a, s. 14-43.

Sand O, Sjaastad ØV, Haug E ym. Lihakset. Kirjassa: Ihminen : fysiologia ja anatomia. Helsinki: Sanoma Pro 2012b, s. 236-265.

Sansone M, Sansone A, Borrione P, Romanelli F, Di Luigi L, Sgrò P. Effects of Ketone Bodies on Endurance Exercise. Curr Sports Med Rep 2018;17:444-453.

Saris WH, Antoine JM, Brouns F ym. PASSCLAIM - Physical performance and fitness. Eur J Nutr 2003;42 Suppl 1:50.

Shaw DM, Merien F, Braakhuis A, Maunder ED, Dulson DK. Effect of a Ketogenic Diet on Submaximal Exercise Capacity and Efficiency in Runners. Med Sci Sports Exerc 2019;51:2135-2146.

Shirreffs SM. Exercise physiology. Kirjassa: Lanham-New S, toim. Sport and exercise nutrition. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley-Blackwell 2011, s. 16-19.

Volek JS, Freidenreich DJ, Saenz C ym. Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners. Metabolism 2016;65:100-110.

Volek JS, Noakes T, Phinney SD. Rethinking fat as a fuel for endurance exercise. Eur J Sport Sci 2015;15:13-20.

Zajac A, Poprzecki S, Maszczyk A, Czuba M, Michalczyk M, Zydek G. The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists. Nutrients 2014;6:2493-2508.

Zinn C, Wood M, Williden M, Chatterton S, Maunder E. Ketogenic diet benefits body composition and well-being but not performance in a pilot case study of New Zealand endurance athletes. J Int Soc Sports Nutr 2017;14:22-0. eCollection 2017.