

Ville-Veikko Koskinen

# MATERIAALIN VALINTA PERÄVAUNU- TEOLLISUUDESSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Ville-Veikko Koskinen: Materiaalin valinta perävaunuteollisuudessa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikka  
Helmikuu 2021

---

Suomessa erilaisia henkilö- ja pakettiautoilla hinattavat perävaunuja käytetään paljon. Tässä työssä perehdytään kyseisiin O1- ja O2-luokan perävaunuihin. O1-luokan vaunut ovat alle 750 kg kokonaismassaltaan olevia vaunua eivätkä tarvitse jarruja. O2-luokan vaunut ovat jarrullisia ja niiden kokonaismassa on maksimissaan 3500 kg.

Työn ensimmäisessä osiossa tutkitaan millaisia materiaaleja tämän hetkisiä O1- ja O2-luokan vaunuissa käytetään sekä mitä vaatimuksia niille asetetaan. Yleisimmin käytetty materiaali on sinkitty teräs, mutta myös alumiinia sekä ruostumatonta terästä käytetään. Lain tuomia vaatimuksia ovat ajoneuvolaissa määritellyt maksimipituudet, -leveydet sekä -massat. Koska perävaunujen pääasiallisena tarkoituksena on siirtää tavaraa, käydään työssä läpi, kuinka jännitys ja syklinen kuormitus vaikuttavat käytettyihin materiaaleihin. Syklisen kuormituksen kestävyys eroaa riippuen materiaalista. Teräkselle on teoriassa olemassa äärettömän kestävyuden raja, alumiinilla sellaista ei ole, näin teräs voidaan mitoittaa kestävämmän äärettömän syklimäärän. Suomessa vaihtelevat tielosuhteet sekä talvisin teiden suolaaminen aiheuttavat normaalista poikkeavan korroosioympäristön. Korroosiota käsitellään työssä teoreettisesti sekä verraten eri materiaalien korroosiota tieliikenteessä.

Työn toisessa osiossa suoritetaan materiaalin valintaa. Vaatimuksien määrittämiseksi käytetään kuvitteellista perävaunumallia. Malli pohjautuu perävaunuissa käytettyihin runkopalkkeihin ja laskenta perustetaan palkkiteoriaan. Mallin perusteella suoritetaan materiaalin valintaa käyttäen apuna CES selector -ohjelmistoa.

Materiaalin valinnassa sopiviksi vaihtoehtoiksi kohteeseen löytyy erilaisia teräksiä ja alumiini-seoksia. Teräs on hinnaltaan alumiinia edullisempaa. Alumiinin vahvuus on sen luontainen korroosion kestävyys sekä keveys. Tulosten perusteella rakenneteräkset ovat materiaaleista soveltuvimpia perävaunuun. Rakenneteräkset ovat hinnaltaan edullisia, helposti muokattavia sekä saavuttavat pinnoitteilla riittävän korroosio kestävyuden. Alumiinin heikkouksia on sen heikompi muovattavuus, heikompi syklisen kuormituksen kesto sekä selvästi korkeampi hinta.

Avainsanat: Perävaunu, tieliikenne, syklinen kuormitus, korroosio, tiesuola, CES selector.

# SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| 1. JOHDANTO .....   | 1  |
| 2. LAINSÄÄDÄNTÖ JA KÄYTTÖYMPÄRISTÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET ..... | 2  |
| 2.1 Lainsäädäntö .....  | 2  |
| 2.2 Väsyminen .....   | 2  |
| 2.3 Korroosio .....   | 7  |
| 2.4 Ympäristö.....  | 11 |
| 3. PERÄVAUNUJEN RAKENTEET .....                                 | 13 |
| 3.1 Yleisimmät runkorakenteet.....                              | 13 |
| 3.2 Runkomallien vaikutus materiaalin valintaan .....           | 14 |
| 4. KÄYTETYT MATERIAALIT JA PINNOITTEET .....                    | 17 |
| 4.1 Materiaalit .....   | 17 |
| 4.2 Pinnoitteet.....  | 17 |
| 5. MATERIAALIN VALINTA .....                                    | 19 |
| 5.1 Materiaalin valinta CES selector -ohjelmistolla .....       | 19 |
| 5.2 Materiaalien vertaaminen palkkeilla .....                   | 22 |
| 6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....                           | 25 |
| LÄHTEET .....   | 26 |
| LIITE A: MATERIAALIEN SIJOITTUMINEN KILOHINNAN MUKAAN .....     | 27 |
| LIITE B: MATERIAALIEN SIJOITTUMINEN EDULLISUUDEN MUKAAN.....    | 28 |
| LIITE C: COLD FORMING LAVETTI 5 USP240 .....                    | 29 |
| LIITE D: COLD FORMING LAVETTI 4 USP240 .....                    | 30 |

# KUVALUETTELO

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Kuva 1. Alumiinin ja teräksen(<math>\alpha</math>-ferriitti) kiderakenteet (Metalforming Mag 2017) .....</i>   | <i>4</i>  |
| <i>Kuva 2. Liukutaso ja dislokaatio (Rabb 2013, s. 26).....</i>   | <i>5</i>  |
| <i>Kuva 3. Liukutaso ja muokkauslujittuminen (Rabb 2013, s. 27) .....</i>   | <i>5</i>  |
| <i>Kuva 4. Murtuman kasvu (Schjive 2009, p. 19).....</i>  | <i>6</i>  |
| <i>Kuva 5. S-N-käyrä (Jännitysamplitudi-kuormanvaihtokertojen lkm.) raudalle ja alumiinille (Salmi &amp; Pajunen 2010).....</i>   | <i>7</i>  |
| <i>Kuva 6. Metallin anodien liukeneminen, kun anodi ja katodi ovat saman metallin eri kohdissa. (Korroosio 2008, s. 30).....</i>  | <i>8</i>  |
| <i>Kuva 7. Raudan Pourbaix-diagrammi, joka osoittaa korroosiokäyttäytymisen eri alueet; C = korroosioalue (C1 alueella korroosion katodinen reaktio on hapen pelkistyminen ja C2 alueella vedyn kehitys), I = immuunisuusalue (metalli termodynaamisesti stabiili), P = passivaatioalue (metallioksidi MO termodynaamisesti stabiili). (Korroosio 2008, s. 49).....</i> | <i>9</i>  |
| <i>Kuva 8. Sinkin Pourbaix-diagrammi, joka osoittaa korroosiokäyttäytymisen eri alueet; C = korroosioalue (C1 alueella korroosion katodinen reaktio on hapen pelkistyminen ja C2 alueella vedyn kehitys), I = immuunisuusalue (metalli termodynaamisesti stabiili), P = passivaatioalue (metallioksidi MO termodynaamisesti stabiili). (Korroosio 2008, s. 53).....</i> | <i>10</i> |
| <i>Kuva 9. Alumiinin Pourbaix-diagrammi (Korroosio 2008, s. 54).....</i>  | <i>10</i> |
| <i>Kuva 10: Runkotyyprien eroja: vasemmalla kiinteälaita, oikealla irrotettavalaita.....</i>  | <i>14</i> |
| <i>Kuva 11: Kärryn perusrakenne .....</i>   | <i>14</i> |
| <i>Kuva 12: Palkkimalli, yksinkertaistettu päästä tuettu palkki, jota kuormitetaan päästä voimalla F.....</i>   | <i>15</i> |

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

|                      |   |
|----------------------|---|
| C                    | korroosioalue   |
| C1                   | korroosio katodinen reaktio hapen pelkistyminen               |
| C2                   | korroosio katodinen reaktio vedyn kehitys                     |
| I                    | immuunisuusalue (metalli termodynaamisesti stabiili)          |
| P                    | passivaatioalue (metallioksidi MO termodynaamisesti stabiili) |
| <i>F</i>             | voima   |
| <i>g</i>             | putoamiskiihtyvyys  |
| <i>L</i>             | varren pituus   |
| <i>m</i>             | massa   |
| <i>n</i>             | varmuusluku   |
| <i>M</i>             | momentti  |
| <i>W<sub>z</sub></i> | taivutusvastus  |
| $\sigma$             | jännitys  |
| $\sigma_a$           | jännitysamplitudi   |
| $\sigma_m$           | keskijännitys   |
| $\sigma_{max}$       | ylempi rajajännitys   |
| $\sigma_{min}$       | alempi rajajännitys   |

# 1. JOHDANTO

Suomessa näkyy erilaisia perävaunuja liikenteessä päivittäin. Kun puhutaan henkilöautojen perävaunuista, tulee mieleen jarruton kärry, jossa mahdollisesti on myös kuomu. Tällaisella yleiskärryllä viedään niin puita mökille kuin muuttokuormia opiskelija-asuntoihin. Hieman vähemmän tunnettu osa henkilöautojen perävaunuista on valmistettu suurempien kuormien kuljetuksiin, vaikka harrasteautojen tai pienyrityksen kuljetustarpeisiin. Perävaunut ovat pääasiassa teräksestä tai alumiinista valmistettuja, mutta miksi näin on.

Tässä työssä tutkimuskysymyksinä ovat:

1. Mitä materiaaleja O1- ja O2-luokan perävaunuissa käytetään ja mitä vaatimuksia toimintaympäristö niille asettaa?
2. Perävaunuissa yleisimmin käytettyjen materiaalien, teräksen ja alumiinin mekaanisten ominaisuuksien vertaaminen sekä materiaalin valinta CES selector- ohjelmistoa apuna käyttäen.

Työssä käydään läpi millaisia rajoituksia lainsäädäntö, mekaaninen kuormitus sekä luonnonilmiöt aiheuttavat perävaunuille. Päämateriaaleina käsitellään alumiinia ja rakenne-teräksiä sekä näille materiaaleille ominaisia pinnoitus- ja korroosionestomenetelmiä. Tarkoituksena on erotella runkorakenteisiin käytettäviä materiaaleja väsymiskestävyyden ja maksimijännityksen perusteella.

## 2. LAINSÄÄDÄNTÖ JA KÄYTTÖYMPÄRISTÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET

Työssä keskitytään O1- ja O2-luokan keskiakseliperävaunuihin. Koska kyseiset perävaunutyytit ovat rekisteröitävissä, aiheuttaa lainsäädäntö niille raja-arvoja massojen sekä pituuden ja leveyden suhteen. Onkin tärkeä tarkastella niihin käytössä kohdistuvaa väsymistä ja korroosiota.

### 2.1 Lainsäädäntö

Ajoneuvolaissa on määritelty O1- ja O2-luokan perävaunujen massoille seuraavia rajoitteita. ” 1) O1-luokan ajoneuvon (kevyt perävaunu) luokittelumassa on enintään 0,75 tonnia; 2) O2-luokan ajoneuvon luokittelumassa on suurempi kuin 0,75 tonnia mutta enintään 3,5 tonnia;” (Ajoneuvolaki 17§ 1090/2002). Pituutta, leveyttä ja korkeutta koskevat rajoitteet on ilmoitettu asetuksessa ajoneuvojen käytöstä tiellä (1257/1992). Sen 24 §:ssa yhdistelmän pituus ei saa ylittää 18,75 m, eikä perävaunun pituus ilman aisaa saa ylittää 12,5 m. 25 §:ssa ajoneuvon ja perävaunun suurin sallittu korkeus on 4,40 m ja leveys 2,60 m. Mikäli perävaunua käytetään kansainvälisessä liikenteessä, ovat korkeus 4,00 m ja leveys 2,55 m 30 §:n mukaan. (Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä (1257/1992)) Tässä työssä keskitytään kotimaan liikenteeseen, johon suurin osa markkinoista on suuntautunut.

Uusi tieliikennelaki (729/2018) astui voimaan 1.6.2020 alkaen. Tässä laissa luokittelumassaltaan enintään 750 kg perävaunujen maksiminopeutta nostettiin 100 km/h:iin, kun se on kytkettynä henkilö- tai pakettiautoon. Ennen myös tällaisen O1-luokan vaunun maksiminopeus oli 80 km/h. Luokittelumassa tarkoittaa keskiakseliperävaunussa akselille kohdistuvaa massaa. Tässä työssä perävaunujen nopeuksia ei ole huomioitu.

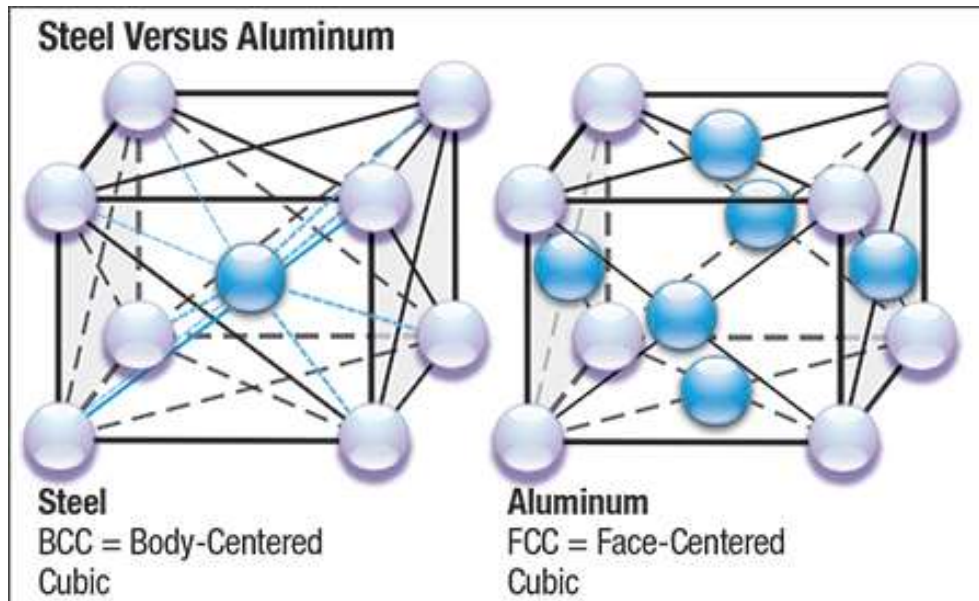
### 2.2 Väsyminen

Väsyminen tarkoittaa materiaalin murtumista, kun se on dynaamisen kuormituksen alla. Verrattuna normaaliin murtumiseen staattisissa olosuhteissa ovat väsymiseen liittyvät mekanismit huomattavasti monimutkaisempia. (Salmi & Pajunen 2010, s. 353-354) Väsymismurtuma tapahtuu alemmalla kuormituksella kuin materiaalin murtoraja. Väsymistä ei voida mallintaa suoraan yhtälönä, kuten pisteen jännitysteoria voidaan. Näin ollen sen tutkimiseen ja mallintamiseen liittyvät vahvasti erilaiset testauslaitteet. On mahdollista

myös tehdä väsymisanalyysi käyttäen todennäköisyysteoriaa. Kyseinen menetelmä tarvitsee paikallisjännityksen, joka on mahdollista saada nykyaikaisilla elementtimenetelmillä. (Rabb 2013, s. 21) Tämä prosessi on tämän työn kannalta liian työläs, joten väsyminen mallinnetaan käyttäen rajana materiaalivalintaohjelmisto CES selectorin syklistä jännitystä, mikä on  $10^7$  sykliä. Syklimäärä on riittävä, mikä todetaan tämän kappaleen lopussa

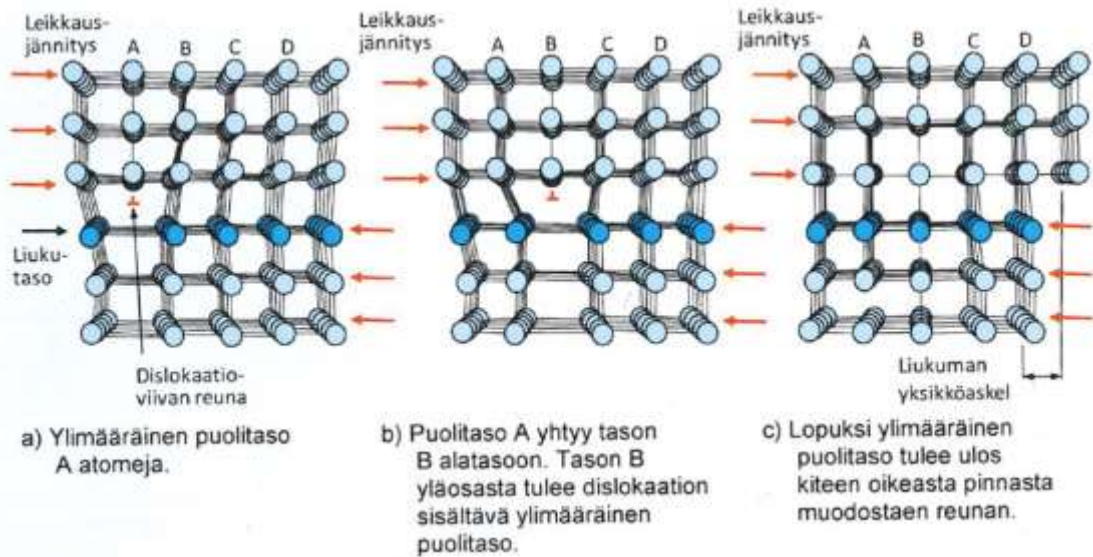
Materiaalin väsyminen on ilmiö, jossa syklinen jännitys kuormittaa materiaalia alle myötö- ja murtorajan. Sykliä määrän ollessa suuri on mahdollista, että materiaaliin syntyy murtumaan johtavia säröjä. Yleensä murtuman suunta on kohtisuorassa vaikuttavaan jännitykseen nähden. (Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. 2014, p. 305-314) Säröjen syntymisen ymmärtämiseen tarvitaan tietoa materiaalin mikrorakenteesta eli siitä, kuinka atomit ovat järjestäytyneet. Metallimateriaaleilla esiintyy yleisimmin kolmea erilaista kiderakennetta: pintakeskeinen kuutiollinen (FCC), tilakeskeinen kuutiollinen (BCC) sekä heksagoninen (HCP). Tämän työn kannalta tärkeimmät rakenteet ovat alumiinin FCC ja teräksen ( $\alpha$ -ferriitti) BCC rakenteet, kuten kuvassa 1 on ilmaistu. Teräksillä ilmenee myös muita kiderakenteita kuten martensiitin tetragoninen ja austeniitin pintakeskeinen kuutiollinen kiderakenne. Kuvasta nähdään myös, montako atomia kunkin rakenteen yksikkökoppi sisältää sekä montako vierusatomia kullakin atomilla on. Myös pakkaustiheys, eli montako täyttää atomia yhteen kuutioon mahtuu, on eri. FCC:llä se on 4, kun taas BCC:llä 2. (Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. 2014, p. 73-103) On hyvä huomata, että käytännössä materiaalit eivät ole puhtaita vaan seoksia. Joten tietty osakoppien atomeista voi olla korvattu jonkin seosaineen atomilla. Teräksillä esiintyy riippuen seosaineiden pitoisuuksista sekä eri lämpökäsittelyistä alueita, joissa on eri mikrorakenteita.





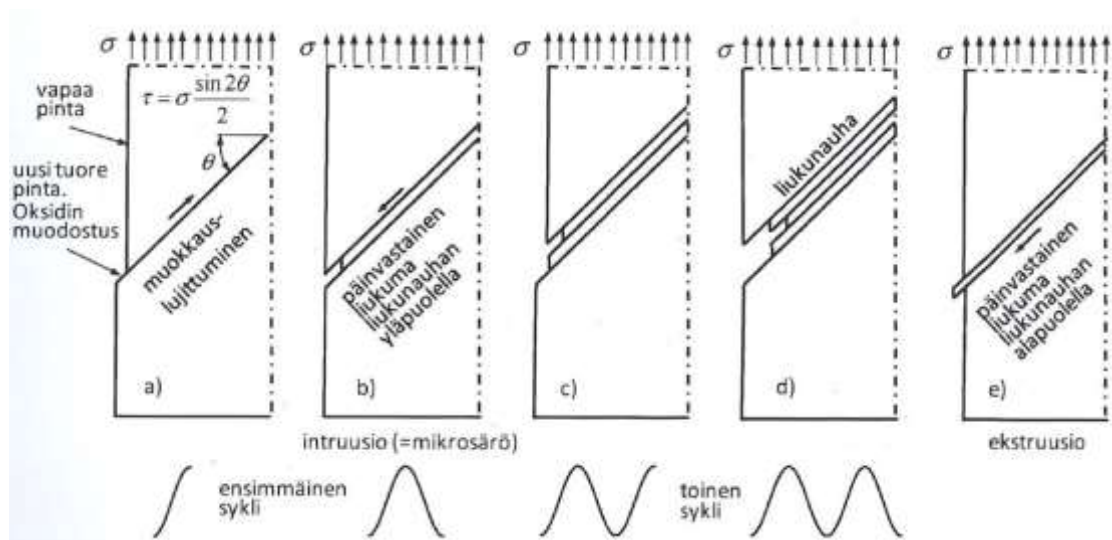
**Kuva 1.** Alumiinin ja teräksen( $\alpha$ -ferriitti) kiderakenteet (Metalforming Mag 2017)

Atomirakenteella on vaikutusta, kun sula metalli jäähtyy. Ensimmäisenä syntyneet yksikkösoluryhmät jatkavat kasvuaan, kunnes ne osuvat toisiinsa. Näin syntyneiden rakeiden orientaatio on satunnainen. Atomirakenne vaikuttaa myös kimmokertoimeen, koska se vaihtelee yksikkösolun rakenteen ja suunnan mukaan. Tällöin atomitasojen liukumista tapahtuu todennäköisemmin tietyssä suunnassa. (Rabb 2013, s.22-31) Metalleilla liukutasojen liukumiseen liittyy lähes aina dislokaatio. Dislokaatiossa tietyn atomitason atomeja puuttuu, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Dynaaminen kuormitus aiheuttaa materiaaliin leikkausjännityksen ja sen aiheuttamana dislokaatio liikkuu kohti raerajaa. Leikkausjännityksen on oltava riittävän suuri, jotta dislokaatiot liikkuisivat. Leikkausjännityksen suuruus vaihtelee suuresti raekoon, kiteen orientaation ja materiaalin kimmokertoimen anisotropian vuoksi. (Rabb 2013, s. 22-31)



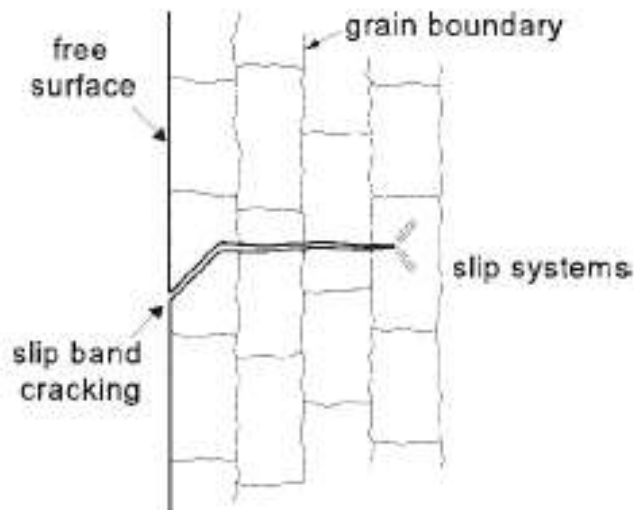
**Kuva 2.** Liukutaso ja dislokaatio (Rabb 2013, s. 26)

Kuvassa 3 havainnollistetaan, kuinka väsymisydintymä syntyy syklisessä kuormituksessa. Materiaalin pinta on yleensä se kohta, jossa dislokaatioliikettä tapahtuu. Näin ollen siitä johtuvaan uuteen pintaan syntyy korroosiokerros, koska se on kosketuksessa ympäristön kanssa. Tämä on esitetty kuvassa 3 a). Kun jännitys poistuu, on leikkausjännitys samalla liukunauhalla mutta eri suuntaan, kuten kuvassa 3 b). Kun syklinen kuormitus jatkuu, liukunauha liikkuu sinne, missä liike on helpointa, kuten aiemmin kerrottiin. (Schjive 2009, p. 13-56)



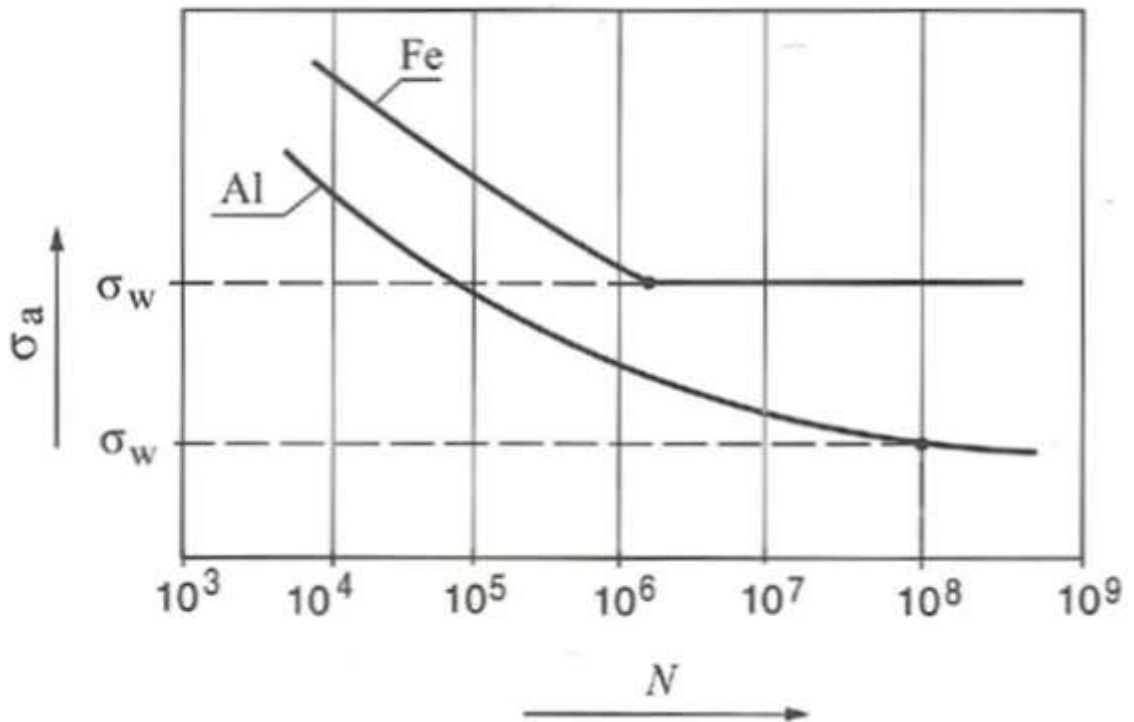
**Kuva 3.** Liukutaso ja muokkauslujittuminen (Rabb 2013, s. 27)

Kun dislokaatioliike ja aktiiviset liukunauhat eivät pysy yhdessä rakeessa, vaan tapahtuvat myös viereisissä rakeissa, on tyypillistä, että murtuma lähtee jatkumaan kohtisuorassa jännitystä vastaan. Kuvassa 4 on havainnollistettu murtuman syntymää. Se kasvaa materiaalin sisään, yli raerajojen. (Schjive 2009, p. 13-56) Murtumien synty ja niiden eteneminen riippuu siitä, millaisesta materiaalista on kyse. Jotkin materiaalit vastustavat murtumien etenemistä eri tavalla kuin toiset. Sitä, kuinka murtuma etenee materiaalin sisällä, kutsutaan materiaalin vastustuskyvyksi halkeamille.



**Kuva 4.** Murtuman kasvu (Schjive 2009, p. 19)

Koska eri materiaaleilla on erilainen väsymiskäyttäytyminen, on käytöksen tutkimiseen kehitetty erilaisia testejä. Testauksen tuloksena saadaan materiaalille ominainen jännitys-elinikäkäyrä, S-N-käyrä. Pysty akselilla on testaukseen käytetty jännitys ja vaak akselilla syklien määrä ennen murtumista ja molemmat asteikot ovat logaritmisia. Kuvasta 5 nähdään teräksille ominainen piste  $10^6$  syklin kohdalla, kun jännitysamplitudi jää alle materiaalin vaihtolujuuden, jolloin rakenneosaa kestä äärettömän määrän syklejä. Vaihtolujuus tarkoittaa jännitysamplitudia, jonka koekappale kestä murtumatta äärettömällä syklien määrällä. Teräksille käytetään vaihtolujuutena  $10^6$  syklin arvoa ja alumiinilla se on  $10^8$  syklin kohdalla. Alumiinilla ei ole äärettömän kestävyys pistettä ja on myös hyvä huomata, että alumiinin S-N-käyrä ei ole suora, kuten teräksillä. (Salmi & Pajunen 2010, s. 359-381)



**Kuva 5.** S-N-käyrä (Jännitysamplitudi-kuormanvaihtokertojen lkm.) raudalle ja alumiinille (Salmi & Pajunen 2010)

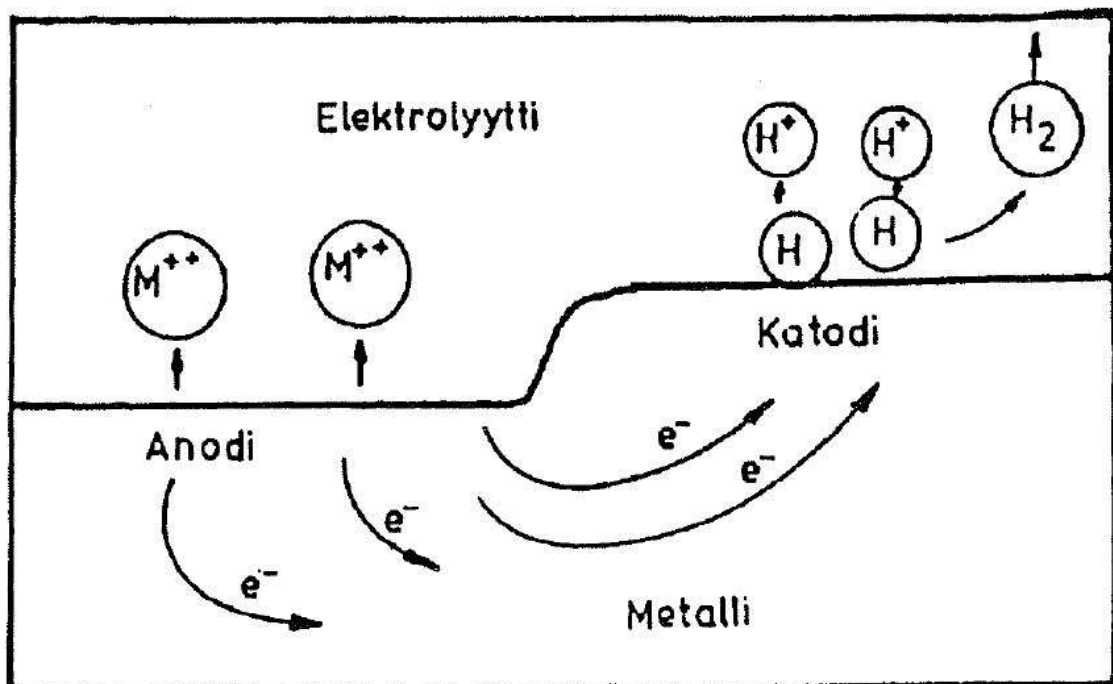
Perävaunut altistuvat sykliselle kuormitukselle elinikänsä aikana. Kuormituksen suuruuteen vaikuttavat perävaunun käyttötarkoitus, suurin sallittu perävaunumassa sekä perävaunun pituus. Mitä suuremmalle massalle sallittu ja pidempi perävaunu on, sitä suuremmassa asemassa ovat väsymisen aiheuttavat syklisen kuormituksen amplitudit. Sitä, minne tyypilliset väsymisvauriot syntyvät, käsitellään alaluvussa 3.1 Yleisimmät runkorakenteet.

## 2.3 Korroosio

Metallien korroosiolla tarkoitetaan mekanisme, jossa metalli muuttuu oksideiksi tai sulfideiksi. Metalleille reaktio on yleensä sähkökemiallinen ja alkaa muodostua metallien pinnalle. Korroosio on materiaalia tuhoava ilmiö ja sen kustannuksiksi teollistuneissa maissa on arvioitu olevan 5 % niiden bruttokansantuotteesta. (Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. 2014, p. 638-679) Raudan korroosiota kutsutaan ruostumiseksi ja se on tunnetuin korroosioilmiö. Sähkökemiallisessa reaktiossa elektroni siirtyy atomilta toiselle. Metallit yleensä menettävät elektroneja eli hapettuvat.

Korroosioilmiöt voidaan jaotella kuivakorroosioon sekä märkäkorroosioon, riippuen siitä, mikä materiaali metallia ympäröi. Tämän työn kannalta keskitytään märkäkorroosioon,

koska ajoneuvojen liikennekäytössä vesi on yleensä läsnä. Metallin ollessa kosketuksessa veteen, muodostuu korroosiopari. Korroosioparin muodostamiseen tarvitaan kaksi elektrolyyttiin nähden eripotentiaalissa olevaa elektrodia, joilla elektrolyyttisen yhteyden lisäksi on elektroninen yhteys. Näin korroosiopari muodostaa suljetun virtapiirin. (Korroosio 2008, s. 17-31) Kuvassa 6 on esitelty, kuinka käytännössä korroosioreaktio tapahtuu. Kun vettä on metallin pinnalla ja muita metalleja ei ole läsnä, saman metallin erikoikatodit hapettuvat ja pelkistyvät. Samanlainen reaktio on mahdollinen myös perävaunuissa, vaikka kaikki metalli olisikin keskenään samaa metallia.

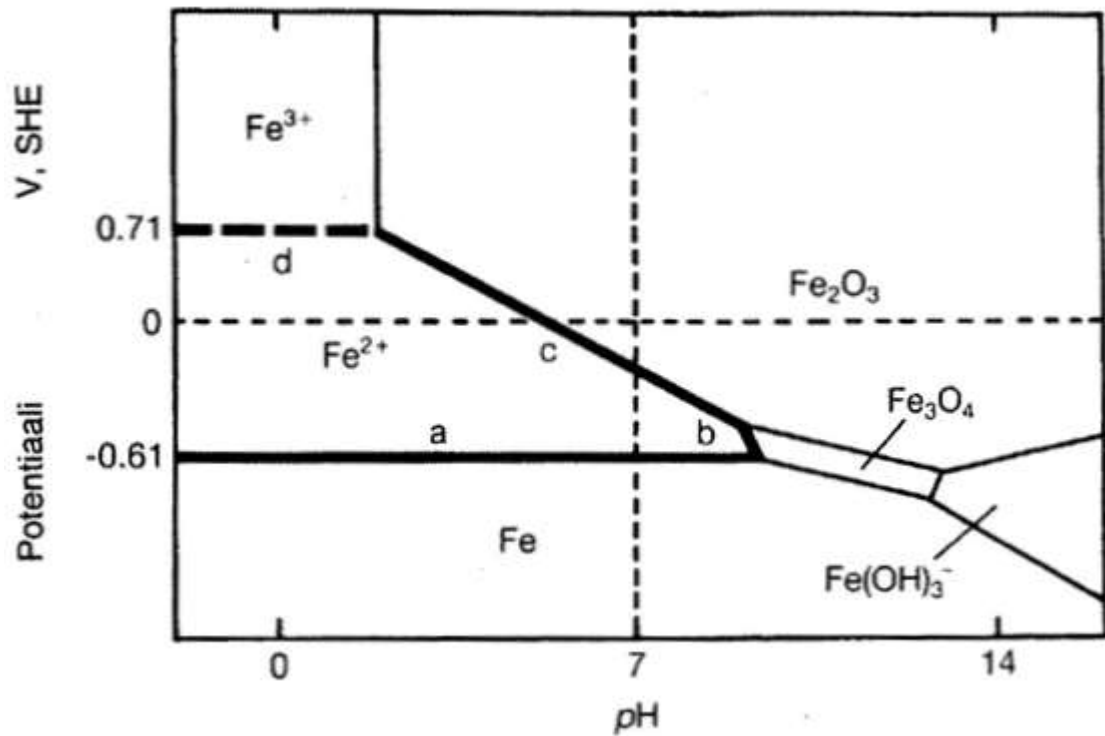


**Kuva 6.** Metallin anodien liukeneminen, kun anodi ja katodi ovat saman metallin eri kohdissa. (Korroosio 2008, s. 30)

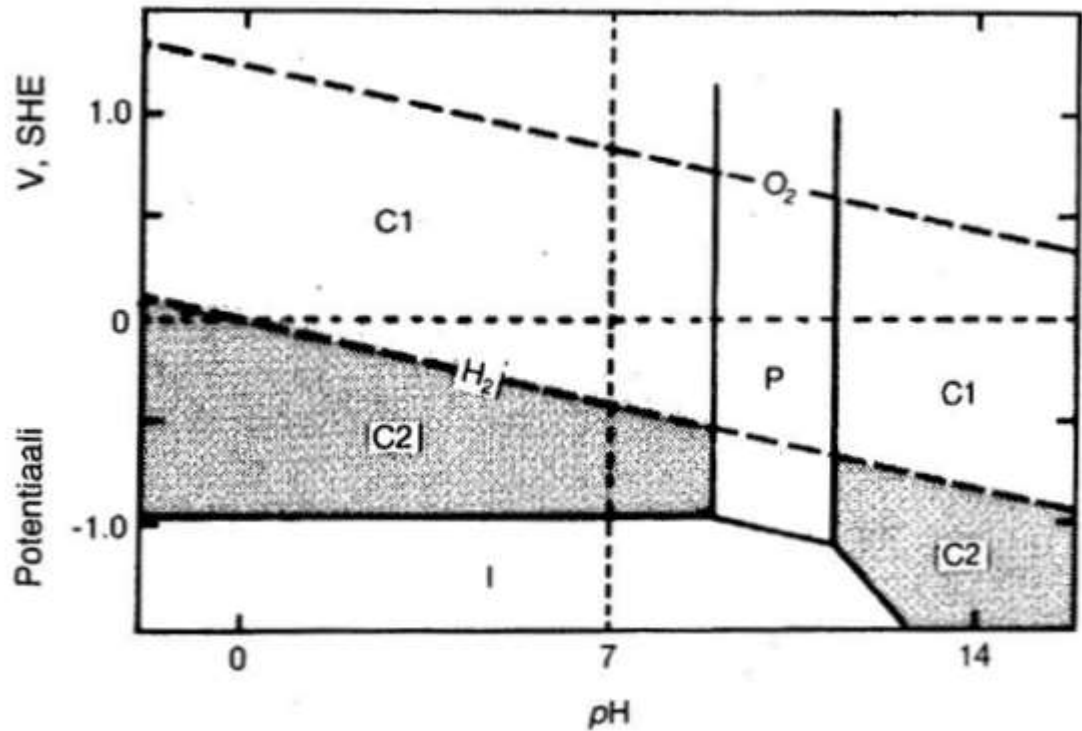
Yksittäiselektrodin ja liuoksen välille syntyy sähkökemiallinen potentiaaliero, se koostuu sähköisestä sekä kemiallisesta potentiaalierosta. Standardipotentiaali voidaan määrittää materiaalille standardielektrodia vastaan. Näin saadaan materiaalille ominainen potentiaali, jota voi verrata muiden materiaalien potentiaaliin, kunhan ne ovat määritetty samalla standardielektrodilla.

Korroosioreaktio on spontaani, jos termodynaamisesti ajateltuna systeemin vapaaenergia pienenee reaktion ansiosta. Näin voidaan termodynaamisesti arvioida, mitkä reaktiot mahdollisesti tapahtuvat spontaanisti. Termodynaamisia yhtälöitä käyttäen voidaan eri materiaaleille piirtää niiden ominainen potentiaali-pH-piirros, Pourbaix-diagrammi. Piirrokset ovat yleensä laadittu metalli-vesi systeemille, jonka lämpötila on 25 celsiusastetta.

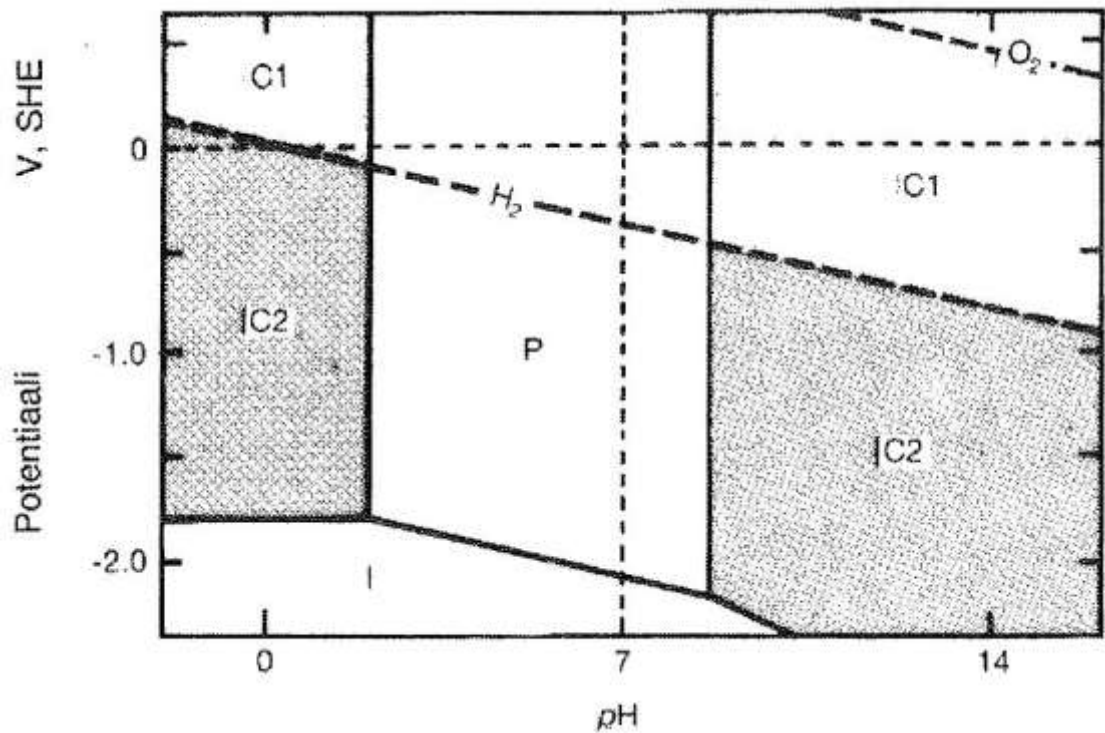
Mikäli lämpötila halutaan muuttujaksi, saadaan kolmiulotteinen kuva. Diagrammi on mahdollista laatia myös käytännön korroosioympäristöön. (Korroosio 2008, s.43-61)



**Kuva 7.** Raudan Pourbaix-diagrammi, joka osoittaa korroosikäyttäytymisen eri alueet; C = korroosioalue (C1 alueella korroosion katodinen reaktio on hapen pelkistyminen ja C2 alueella vedyn kehitys), I = immuunisuusalue (metalli termodynaamisesti stabiili), P = passivaatioalue (metallioksidi MO termodynaamisesti stabiili). (Korroosio 2008, s. 49)



**Kuva 8.** Sinkin Pourbaix-diagrammi, joka osoittaa korroosiokäyttäytymisen eri alueet; C = korroosioalue (C1 alueella korroosion katodinen reaktio on hapen pelkistyminen ja C2 alueella vedyn kehitys), I = immuunisuusalue (metalli termodynaamisesti stabiili), P = passivaatioalue (metallioksidi MO termodynaamisesti stabiili). (Korroosio 2008, s. 53)



**Kuva 9.** Alumiinin Pourbaix-diagrammi (Korroosio 2008, s. 54)

Kuvissa 7, 8 ja 9 on esitelty tähän työhön liittyvien metallien Pourbaix-diagrammeja. On hyvä huomata, että vaikka metallilla olisi suuri passivaatioalue, ei sen passiivinen oksidikerros välttämättä suojaa sitä, vaan oksidi irtaantuu materiaalin pinnalta. Tällainen on ainakin raudan tapauksessa, sen oksidikerros ei estä veden pääsyä puhtaalle raudalle, joten korrosio pääsee etenemään materiaalissa. Alumiinilla puolestaan sen oksidi suojaa sitä olosuhteiden ollessa passivaatioalueella. Alumiinin oksidikerros on niin tiivis, ettei puhtaalle alumiinin pinnalle synny pieniä anodisia alueita kuten raudalla. Rautaa ei tulisi käyttää suojaamattomana koskaan, mikäli se on tekemisissä ulkoilman kanssa. Ruostumattomassa teräksessä kromi muodostaa teräksen pinnalle oksidikalvon, joka suojaa pintaa korroosiolta. (Korroosio 2008, s. 43-102) Koska Pourbaix-diagrammi tai termodynamiikka eivät kerro reaktionopeutta, tulisi jokaisen materiaalin syöpymisnopeus tietää kyseisessä ympäristössä. Tietoja erilaisista syöpymisnopeuksista eri materiaaleille eri olosuhteissa on saatavilla kirjallisuudessa.

## 2.4 Ympäristö

Ympäristön aiheuttaman korrosio vaihtelee alueittain, tähän vaikuttaa esimerkiksi onko alue kaupunki tai lähellä merta. Perävaunujen käyttöympäristö on Suomen tieverkko, joten on hyvä tutkia korroosiota kaupunki- ja meri-ilmaston kannalta. On myös huomiotava tieverkon vaikutus, mikä Suomessa tarkoittaa teiden suolaamista natriumkloridilla (NaCl) ja kalsiumkloridilla (CaCl<sub>2</sub>). Perusoletuksena maantieolosuhteissa on, että vettä on aina läsnä. Jo pieni määrä vettä sumuttuu maantieolosuhteissa, jolloin se nousee kaikkialle rakenteisiin ja voi kuljettaa suoloja mukanaan. (Vestola *et al.* 2006)

Taulukkoon 1 on kerätty työhön liittyvien materiaalien korroosionopeuksia meri- ja kaupunki-ilmastossa. Yleisesti on tiedossa, että terästä ei tulisi käyttää suojaamattomana. Tämän näkee taulukosta 1, vaikka molemmat sekä teräs että sinkki kärsivät korroosiosta normaalioloissa, on sinkin korroosionopeus paljon teräksen korroosionopeutta hitaampi prosessi. Sinkityn teräksen korroosionopeus on noin kymmenesosa suojaamattomasta teräksestä. Kuumasinkityn kerroksen paksuus riippuu valmistusmenetelmästä. Jatkuvalle prosessille saadaan sinkkipinnoitteelle paksuus alkaen 7 µm ja yksittäisten kappaleiden pinnoitus alkaa 40 µm paksuudesta. Yksittäisesti pinnoitettujen kappaleiden käyttöikä on yli 20 vuotta. Alumiini ja ruostumaton teräs kestävät meri- ja kaupunki-ilmastoa hyvin, pientä pistekorrosiota esiintyy, mutta passiivikalvo on muuten kestävä. Maalipintojen korroosionopeuksista ei ole yhteneväistä tietoa saatavilla. Yleisesti ottaen maalipintojen korroosiokesto on hyvä, kunhan työn laatu on hyvä, eikä maalipinnan ja teräseen väliin ole jäänyt epäpuhtauksia. (Korroosio 2008, s. 165-220 ja 442-565)



**Taulukko 1:** Korroosionopeus meri- ja kaupunki-ilmastossa (Vestola et al. 2006, Korroosio 2008)

| Materiaali     | Korroosio nopeus ( $\mu\text{m/a}$ ) |
|----------------|--------------------------------------|
| Teräs          | 20-35                                |
| Sinkki         | 2-3                                  |
| Alumiini       | pistekorroosio <0,2mm                |
| Ruostumaton T. | pistekorroosio <0,1mm                |

Tieverkostossa on alueesta riippuen natrium- ja kalsiumkloridia. Vaikka edellä mainitut suolat eivät muuta pH:ta radikaalisti, vaikuttaa kalsiumkloridi vettä sitovasti, pitäen pinnat märkinä. Kloridi-ionit toimivat korroosioprosessissa katalyyttisesti. Suojaamattomien teräksien korroosionopeus tällaisissa olosuhteissa on noin 200  $\mu\text{m/a}$ , mikä on kymmenkertainen normaaliin verrattuna. Sinkkipinnoitteelle korroosionopeuden kasvu ei ole niin suuri, mutta kuitenkin huomattava. (Vestola et al. 2006) Alumiinille kalsiumkloridi on hieinan syövyttävämpää kuin natriumkloridi. Suurin ero alumiinissa on, että syöpyminen on nopeaa, jos alueen kalsiumkloridipitoisuus on pieni, noin 3%. Tällöin korroosionopeus on 76  $\mu\text{m/a}$ . Tätä ei suoraan voi soveltaa tieliikenteeseen, mutta se antaa suuntaa alumiinin käyttäytymisestä (Vestola et al. 2006; Korroosio 2008, s. 442-565). Ruostumattomilla teräksillä ei tapahdu yleisesti korroosiota alle 50 celsiusasteen lämpötiloissa, joten se ei ole ongelmana perävaunujen käytössä.

Eniten tiesuolojen aiheuttamaan korroosioon vaikuttaa perävaunujen suunnittelu. Rakenteet tulee suunnitella niin, ettei niissä oli sellaisia kohtia, joihin vesi ja suola pääsee kerääntymään, vaan vesi pääsee valumaan maahan. Myös rakenteiden puhdistuksella voidaan välttää tällaisten alueiden syntymistä.

## 3. PERÄVAUNUJEN RAKENTEET

Tämän luvun tarkoituksena on kartoittaa yleisesti käytettyjä runkorakennetyyppejä sekä niiden materiaaleja. Runkorakenteita jaotellaan massojen mukaan O1- ja O2- luokan vaunuihin. Lisäksi määritellään työssä käytettävä laskentamalli jännitysten selvittämiseen eri malleille. Jotta materiaalivalinnasta ei tuli liian laajaa, rajataan siihen käytettävä runkotyyppi luvussa 5 Materiaalin valinta.

### 3.1 Yleisimmät runkorakenteet

O1- ja O2-luokan perävaunuille yhteistä on maksimipituus 12,5 m. Myös aisan ja akselien kiinnitys on molemmissa samantapainen, nämä molemmat ovat nykyisin pulttiliitoksia. Yleisesti O1-luokan vaunujen koko on pienempi, koska niiden suurin sallittu kokonaisuudessa tulee helposti vastaan, jolloin itse tavarankuljetus on mahdotonta.

Runkorakenteita valmistetaan pulttaamalla ja hitsaamalla. Pulttatut rakenteet ovat yleensä sinkittyä teräslevyä, ruostumatonta terästä tai alumiinia. Hitsattu rakenne on pinnoittamatonta terästä, mikä vaatii sinkityksen tai maalauksen. Alumiinia voi myös hitsata, jolloin yleensä käytetyt seokset eivät vaadi pintakäsittelyä, mutta ne ovat myös mahdollista maalata. Tällaisiin alumiineihin on seostettu magnesiumia korroosiokestävyyden parantamiseksi, yleisnimityksenä näitä seoksia kutsutaan merialumiineiksi. Alumiiniseoksien koostumukset löytyvät standardista SFS-EN 573-3:2019. (Korroosio 2008, s. 529-538 ja 675-709)

Perävaunujen rakenne voidaan jakaa myös käyttötarkoituksen mukaan kahteen eri malliin. Toisessa sivulaidat ovat aukeavat ja toisessa kiinteät. Kun laidat ovat kiinteät, toimivat ne tukirakenteena ja voivat jatkuu runkoon niin, että akselit ovat kiinnitetty niihin. Kun laidat ovat irrotettavissa, tarvitaan erillinen runkorakenne massan kantamiseen. Kuvassa 10 on esitetty edellä mainittuja runkorakenteita. Vasemmalla olevassa perävaunussa runko ja laita on samasta osasta. Oikealla olevassa perävaunussa on erillinen runkopalkki, joka kulkee pituudeltaan kärryn mitan. Käytetään vasemmalla olevasta tyylistä termiä peruskärry, joka kuuluu O1-luokkaan ja oikealla olevasta lavettikärry, joka edustaa O2-luokan vaunua. Ei ole olemassa virallisia nimityksiä eri malleille vaan valmistajat itse nimeävät niitä. On myös olemassa malleja, jotka eivät kuulu kumpaakaan edellä mainituista. Tämä työ käsittelee lavettimallin ja peruskärryn tarkastelun. Materiaalin valinta keskittyy lavettimalliin, mutta myös peruskärryn jännitykset lasketaan mielenkiinnon vuoksi.

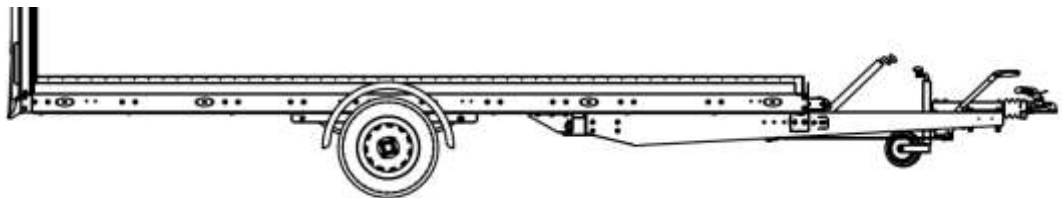


**Kuva 10:** Runkotyyppien eroja: vasemmalla kiinteälaita, oikealla irrotettava-laita.

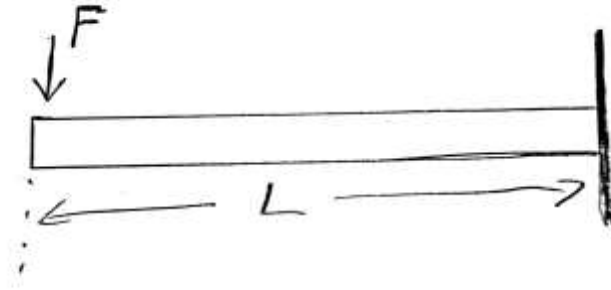
### 3.2 Runkomallien vaikutus materiaalin valintaan

Materiaalin valinnan kannalta on määritettävä tarvittavat materiaalin ominaisuudet runkorakenteiden osalta. Ajatellaan, että runkopalkit kantavat koko tarvittavan massan. Tällöin on mahdollista valita ulkopinnoille sellaisia materiaaleja, joiden mekaaninen kestävyys ei ole niin hyvä, mutta joilla on korroosiokestoa tai jotka ovat visuaalisesti näyttäviä. Toisaalta voidaan myös ottaa runkomateriaaleiksi erityyppisiä materiaaleja. Peruskärrylle laskentaan käytetään 750 kg kokonaismassaa sekä 3 m lavapituutta. Lavetikärrylle käytetään kahta eri massaa ja pituutta, massa vaihtelee 1500 kg aina 3500 kg asti ja pituus vaihtelee 4 m ja 8 m välillä.

Alla olevassa kuvassa 11 on kuvattuna laskentaan käytettävä mallinnus rungolle. Akseli on yleensä hieman lavan keskikohdan takana, tällä varmistetaan, ettei kärry ole takapainoinen. Ajatellaan tässä, että akseli olisi keskellä, toimien tukena. Kärryn etuosa on joko nokkapyörän varassa tai kytkettynä vetoautoon, jolloin myös etuosa on tuettu. Suurin tukematon alue jää akselin taakse. Kun runkorakenne on poikkileikkaukseltaan sama koko pituusmitaltaan, voidaan maksimijännityksen kohta määrittää olevan juuri akselin takana. Näin ollen maksimijännitys voidaan laskea käyttäen yksinkertaistettua päästä tuettua palkkia. Palkkimalli on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 11:** Kärryn perusrakenne



**Kuva 12:** Palkkimalli, yksinkertaistettu päästä tuettu palkki, jota kuormitetaan päästä voimalla  $F$

Koska perävaunujen massat ja mitat eroavat suuresti toisistaan, on runkomallit jaettu viiteen eri luokkaan. Ne ovat alla olevassa taulukossa 2. Laskennallisesti käytetään varten  $L$  puolta karrin kokonaispituudesta, näin ollen myös vaikuttava massa  $m$  on puolet kokonaismassasta. Tämä on siksi, ettei perävaunua tule lastata takapainoiseksi, koska silloin sen vetäminen liikenteessä on vaarallista. Massan ajatellaan olevan aivan ääri-rajien päässä, tällöin saadaan suurimman mahdollisen kuormituksen aiheuttava tila, jonka mukaan tässä mitoitetaan.

**Taulukko 2:** Perävaunujen runkomallien pituudet ja massat

| Runko     | Kokonaispituus (m) | Kokonaismassa (kg) |
|-----------|--------------------|--------------------|
| Perus 1   | 3                  | 750                |
| Lavetti 2 | 4                  | 1500               |
| Lavetti 3 | 8                  | 1500               |
| Lavetti 4 | 4                  | 3500               |
| Lavetti 5 | 8                  | 3500               |

Jännitysten määrittämiseen tarvitaan kaavoja 1, 2 ja 3. Massojen aiheuttamat voimat  $F$  lasketaan kaavalla 1 käyttäen putoamiskiintoa  $g$ . Maksimimomentti  $M$  saadaan palkkiteorian mukaan kaavalla 2. Erilaisten palkkien ja voimien vaikutuksia on helppoa selvittää käyttämällä jännitysmaksimin  $\sigma$  etsintään maksimimomenttia ja taivutusvastusta  $W_z$ , kuten kaavassa 3 on näytetty. Käytetään palkkeina USP-tankoja, joiden taivutusvastukset löytyvät helposti kirjallisuudesta. Niiden muoto on myös lähellä perävaunuissa käytettyjä runkoprofiileja, joten ne ovat käyviä työn tasoiseen vertailuun. Alla olevat kaavat löytyvät Salmi & Pajunen 2010, s. 167-178 ja 358.

$$F = mg \quad (1)$$

$$M = FL \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{M}{W_z} n \quad (3)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (5)$$

Valittujen perävaunujen massojen ja pituuksien sekä eri palkkien maksimijännitykset  $\sigma_{max}$ , amplitudit  $\sigma_a$  ja keskimjännitykset  $\sigma_m$  on koottu alla olevaan taulukkoon 3. Amplitudin ja keskimjännityksen kaavat ovat 4 ja 5. Minimijännityksenä  $\sigma_{min}$  on käytetty tilannetta, jossa ei massaa ole lainkaan, jolloin jännitys on nolla. Varmuuslukuna  $n$  on käytetty lukua 2. Kyseisillä massoilla ja pituuksilla saadaan suuri vaihtelu maksimijännityksiin. On huomioitava, että käytännössä on mahdollista rekisteröidä kokonaismassa pienemmäksi kuin laskennallisesti tarvitsisi. Näin voidaan toimia esimerkiksi silloin, jos kuljettajan ajokortti rajoittaa kokonaismassaa.

**Taulukko 3: Maksimijännitykset, amplitudit ja keskimjännitykset eri palkeilla**

| Runko                       | Perus 1 | Lavetti 2 | Lavetti 3 | Lavetti 4 | Lavetti 5 |
|-----------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Palkki                      | MPa     | MPa       | MPa       | MPa       | MPa       |
| <b>USP 160</b>              |         |           |           |           |           |
| $\sigma_{max}$ (max)        | 97      | 258       | 516       | 602       | 1205      |
| $\sigma_a$ (amplitudi)      | 48      | 129       | 258       | 301       | 602       |
| $\sigma_m$ (keskimjännitys) | 48      | 129       | 258       | 301       | 602       |
| <b>USP 200</b>              |         |           |           |           |           |
| $\sigma_{max}$ (max)        | 59      | 157       | 313       | 365       | 731       |
| $\sigma_a$ (amplitudi)      | 29      | 78        | 157       | 183       | 365       |
| $\sigma_m$ (keskimjännitys) | 29      | 78        | 157       | 183       | 365       |
| <b>USP 240</b>              |         |           |           |           |           |
| $\sigma_{max}$ (max)        | 38      | 101       | 202       | 236       | 472       |
| $\sigma_a$ (amplitudi)      | 19      | 51        | 101       | 118       | 236       |
| $\sigma_m$ (keskimjännitys) | 19      | 51        | 101       | 118       | 236       |

## 4. KÄYTETYT MATERIAALIT JA PINNOITTEET

Ennen materiaalin valintaa on syytä käydä läpi perävaunuteollisuudessa yleisesti käytetyt materiaalit sekä pinnoitteet. Hinta määrittää suuren osan käytetyistä materiaaleista sekä pinnoitteista perävaunuteollisuudessa. Myös tuotteiden saatavuus voi olla rajaava tekijä, tämä osaltaan vaikuttaa myös niiden hintaan.

### 4.1 Materiaalit

Erilaiset teräkset ovat selvästi markkinoilla olevien perävaunujen käytetyin raaka-aine. Tätä selittää sen helppo saatavuus ja muokattavuus. Teräksillä mekaaniset ominaisuudet ovat myös tarvittavan hyvät, eikä korroosio ole maantieolosuhteissa liian vaativa. Kylmämuokattavat rakenneteräslevyt ovat yleensä sinkkipinnoitettuja ja niiden myötölujuus on välillä 220-350 MPa. On myös mahdollista käyttää erikoisteräksiä, joilla on suuremmat lujuudet. Erikoisteräksillä voidaan saavuttaa yli 1000 MPa:n myötölujuuksia. Markkinoilla on myös ruostumattomasta teräksestä valmistettuja perävaunuja, mutta niiden hinnat ovat selvästi korkeammat verrattuna perinteisiin terässeoksiin. Ruostumattoman teräksen saatavuus on myös heikompaa verrattuna rakenneteräksiin. (SSAB 2020)

Alumiiniseoksista valmistettuja perävaunuja on myös saatavilla, mutta ne eivät kilpaile määrissä eivätkä hinnassa teräsvalmisteisten perävaunujen kanssa. Alumiinirakenteet ovat yleensä hitsattuja pursotetusta profiilista. Lujuusominaisuudet ovat alhaisemmat kuin teräksillä, tätä käsitellään lisää materiaalin valinta luvussa 5.

### 4.2 Pinnoitteet

Rakenneteräksillä yleinen pinnoitus on sinkitys. Mikäli rakenne on pulttiliitetty tai hitsattu, on sinkitys toteutettava eri tavalla. Pulttiliitetyt rakenteet ovat pääsääntöisesti valmistettu sinkitystä levystä, kun taas hitsattavat rakenteet sinkitään hitsaamisen jälkeen altaassa. Sinkityksen hintaan vaikuttaa monta tekijää. Yleensä sinkityksen hinta määräytyy kappaleen painon mukaan, kuitenkin paljon tilaa vievän osan, kuten perävaunun rungon sinkitys, on yleensä kalliimpaa. On otettava myös huomioon sinkitysaltaiden koko, esimerkiksi kahdeksan metrisen rungon sinkitys saattaa olla ongelmallista. Pinnan paksuuteen vaikuttaa käytetty menetelmä sekä haluttu kesto, pinnoitteiden paksuuksia sivuttiin kappaleessa 2.4 Ympäristö. (Korroosio 2008, Kuklík, V & Kudláček, J. 2016)

Alumiinin korroosiokestävyyttä voidaan parantaa anodisoinnilla. Anodisoinnissa alumiinin luonnollista oksidikalvoa paksunnetaan rikkihappokylvyssä kytkien kappale virtalähteen anodiin. Näin alumiini pintaan saadaan hallitusti oksidikerros, mikä siihen voisi muodostua myös normaalisti. Pinta voidaan samalla värjätä halutulla värillä. Huokoinen pinta tiivistetään kuumassa vedessä. Anodisointia käytetään pursotettuihin profileihin sekä pieniin kappaleisiin. Hitsattua runkoa ei voida anodisoida ennen hitsausta, eikä sen anodisointi jälkeenpäin ole kannattavaa. Myös anodisoinnin hinta on korkeampi kuin teräksen sinkitys. Kaikki alumiinilaadut eivät kuitenkaan tarvitse erillistä suojausta, kuten kappaleesta 2.4 Ympäristö nähtiin.

Ruiskumaalaus on myös varteenotettava vaihtoehto. Sen eri muodot ovat yleisesti käytössä metallipajateollisuudessa, minkä takia sen saatavuus on hyvä. Riippuen käytettävästä maalista, voidaan pinnan ominaisuuksia varioida. Korroosionestomaaleilla pyritään nimensä mukaan suojaamaan maalattu pinta korroosiota vastaan. Maalaamisella voidaan myös parantaa pinnan ulkonäköä. (Korroosio 2008, s. 675-746) Ruiskumaalaus ei ole yleinen menetelmä O1- ja O2-luokan perävaunujen valmistuksessa. Se on kuitenkin yleinen raskaammissa perävaunuissa kuten O3- ja O4-luokan vainuissa. Tämä johtuu lähinnä siitä, että muilla pinnoitusmenetelmillä on rajoituksia kappaleen kokoon. Ruiskumaalauksessa ei suoranaisesti tällaisia ole.

## 5. MATERIAALIN VALINTA

Edellisen luvun taulukossa 3 laskettiin, millaisia jännityksiä runkomateriaalien tulisi kestää. Keskitytään materiaalin valinnassa kolmeen malliin: Perus 1, Lavetti 4 ja Lavetti 5. Näin mallit on jaettu pääasiassa pituuden mukaan. Voidaan myös huomata, että Lavetti 4 on jännityksiltään todella lähellä Lavetti 3 mallia. Etsitään mahdollisia materiaaleja käyttäen maksimijännitystä aineen myötörajana, sekä amplitudia väsymiskestona  $10^7$  syklin kohdalla. Olisi mahdollista myös mennä myötörajan yli, mutta se ei ole ulkonäöllisesti hyvännäköinen varsinkaan, jos perävaunu pituus on suuri. Väsymiskeston raja on yleensä  $10^6$  sykliä teräksille ja  $10^8$  alumiinille, kuitenkin materiaalin valinta ohjelmasta löytyy valinta  $10^7$  sykliin, joten käytetään sitä. (Salmi & Pajunen 2010, s. 353-379) Syklimäärältään perävaunuun kohdistuva määrä on pieni.

### 5.1 Materiaalin valinta CES selector -ohjelmistolla

Materiaalin valinnassa apuna käytetään CES selector -ohjelmistoa. CES selector -ohjelmistolla voidaan suorittaa materiaalin valintaa sekä verrata materiaalien ominaisuuksia graafisesti. CES selectorin tulokset ovat suuntaa antavia, joten niitä tulee tarkastella kriittisesti. Materiaalin valinnassa etsitään materiaaleja, jotka toteuttavat halutut vaatimukset. Materiaaleja voidaan verrata keskenään, jolloin vaatimukset toteutetaan mahdollisimman tehokkaasti, turvallisesti ja taloudellisesti. Tässä työssä soveltuvat materiaalit etsitään eri maksimijännityksillä sekä jännitysamplitudeilla. Maksimijännitys antaa vaatimuksen materiaalin myötörajalle ja jännitysamplitudilla saadaan vaatimus väsymiskestävyydelle. Materiaaleja, joiden ominaisuudet riittävät vertaillaan keskenään käyttäen toimivuusindeksiä, joka ottaa huomioon mekaaniset ominaisuudet sekä edullisuuden. Näin voidaan helpommin verrata kustannuksia, vaikka materiaalien tiheydet ovatkin erilaisia. Kylmämuokattavuutta käytetään myös yhtenä vaatimuksena, koska se vaikuttaa tuotteiden valmistettavuuteen. Taulukossa 4 on esitetty myötörajojen sekä jännitysamplitudien arvot, joilla materiaalin valinta toteutetaan. Myötöraja sekä syklinen kesto ovat sellaisia ominaisuuksia, jotka materiaalin on täytettävä. Materiaalikustannukset halutaan minimoida, johon käytetään edullisuutta. Saadut kaaviot eri mallien ja palkkien yhdistelmistä on kerätty liitteiksi työn loppuun. Materiaaleiksi hyväksytään metalleja sekä niiden seoksia. Särmääminen on yleinen tapa valmistaa perävaunuja, joten seoksilta vaaditaan myös kylmämuokattavuutta. Korroosion kesto on myös vaadittu ominaisuus, CES selectorin lisäksi sitä tulee tarkastella käytettyjen menetelmien pohjalta. CES selectorista saaduilla arvoilla voidaan helposti verrata saman materiaalityypin eri seoksia keskenään.



Näin voidaan löytää sopivimmat materiaalit eri ryhmistä ja verrata niitä käytännössä toisiinsa.

**Taulukko 4:** Materiaalin valinnassa käytetyt jännitykset ja amplitudit.

| Runko                        | Perus 1 | Lavetti 4 | Lavetti 5 |
|------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Palkki                       | MPa     | MPa       | MPa       |
| <b>USP 160</b>               |         |           |           |
| $\sigma_{\max}(\max)$        | 97      | 602       | 1205      |
| $\sigma_a(\text{amplitudi})$ | 48      | 301       | 602       |
| <b>USP 200</b>               |         |           |           |
| $\sigma_{\max}(\max)$        | 59      | 365       | 731       |
| $\sigma_a(\text{amplitudi})$ | 29      | 183       | 365       |
| <b>USP 240</b>               |         |           |           |
| $\sigma_{\max}(\max)$        | 38      | 236       | 472       |
| $\sigma_a(\text{amplitudi})$ | 19      | 118       | 236       |

CES selectorista saadut tulokset on kerätty liitteiksi A-D, eri palkkeja voidaan vertailla syklisen kuormituksen avulla käyttäen taulukon 4 amplitudin arvoja syklisen kuormituksen rajana. Liitteessä A on saadut materiaalit käyttäen toimivisuusindeksiä  $M_1$ .  $M_1$  on ilmaistu väsymiskestävyyden suhteena kilohintaan, sen kaava on ilmaistu yhtälössä 7. Siihen on myös merkattu missä erilaiset materiaali ryhmät sijaitsevat. Rautapohjaiset materiaalit, jotka ovat merkattu vihreällä, ovat selvästi edullisempia kuin muut kilohinnaltaan. Niillä on myös korkein syklisen kuormituksen kesto. Liitteessä B on määritetty toimivisuusindeksi  $M_2$ .  $M_2$  on ilmaistu väsymiskestävyyden suhteena edullisuuteen, mikä on kilohinta kertaa tiheys.  $M_2$  kaava esitettynä yhtälössä 8. Nähdään kuinka alumiiniseokset, jotka on merkattu violetilla, siirtyvät lähemmäksi teräksiä. Punaisella olevat materiaalit ovat sinkkipohjaisia seoksia. Niiden edullisuudet ovat alumiinien edullisuuksia suuremmat, eivätkä syklisen kuormituksen keston puolesta ole varteenotettavia vaihtoehtoja. Jotkin teräkset ovat sykliseltä kestoiltaan niin hyviä, että olisi mahdollista pienentää laskeintaan käytettyä palkkia pienemmillä kärrymalleilla. Perus 1 mallissa jännitykset ovat niin pieniä, että soveltuvia materiaaleja on todella paljon. Tämän takia tarkempi valinta suoritetaan Lavetti 4 ja 5 mallien perusteella.

$$M_1 = \frac{\text{Fatigue strenght (MPa)}}{\text{Price} \left( \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right)} \quad (7)$$

$$M_2 = \frac{\text{Fatigue strenght (MPa)}}{\text{Price} \left( \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) * \text{Density} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad (8)$$

Liitteistä A ja B voidaan nähdä myös Lavetti 4 mallin jännityksillä saadut tulokset. Rajaten taulukon 4 mukaan amplitudit 301, 183 ja 118 MPa. Niissä nähdään selvästi, että siirryttäessä paksummasta ohuempaan palkkiin jännityksen kasvaessa, kuinka sinkkiseokset sekä alumiineja poistuu valinnasta. Palkkien välillä syklisen jännityksen vaatimus melkein kolminkertaistuu, kuten taulukossa 4 on ilmaistu. Teräksiä on edelleen saatavana eri hintaluokissa. Liitteissä A-B voidaan samaan tapaan nähdä Lavetti 5 mallin jännityksillä saadut materiaalit. Alumiini on enää läsnä vain USP240 palkilla, jolloin jännitys on 236 MPa. Pienemmillä palkeilla materiaaleja poistuu. USP160 palkilla, kun jännitys on 602 MPa, on jäljellä enää muutamia teräslaatuja. Jäljelle jäävät teräkset ovat keskenään samantapaisia seoksia, suurin eri niiden välillä on se, millaista lämpötilaa karkaisemiseen käytetään. Alumiinien kohdalla vaihtoehtoja on kaksi, riippuen siitä käytetäänkö vain kylmämuokattavia seoksia vai hyväksytäänkö myös muunlaiset valmistustavat. Liitteistä C-D nähdään kuinka kylmämuokkaaminen vaikuttaa soveltuviin alumiineihin, mutta teräksille se ei ole este.

Liitteessä A on merkattu CES selectorin kaaviosta parhaimmin toimivuuksiltaan sijoittuva teräs AISI 5160 sekä kaksi alumiini seosta. Kylmämuokattava 5182 sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempi muttei kylmämuokattava 7055. AISI 5160 kuuluu jousiteräksiin, sille ei löydy EN-standardista vastaavuutta. Tästä syystä ei voida olla varmoja soveltuuko se todellisuudessa käyttökohteeseen ja onko sitä edes saataville levynä. Myös jousiteräksille ominainen joustavuus voi olla liikaa perävaunu käytössä. CES selector antaa AISI 5160 teräkselle erinomaisen kylmämuokkaamisen keston, kuitenkin jousiterästen särmääminen voi olla hankalaa. Liitteeseen A on myös merkattu rakenne-teräs YS550. Se on CES selectorin perusteella parhain rakenneteräs, jolle voidaan löytää eurooppalainen vastaavuus S550MC. Se täyttää standardin EN 10149-2, jonka teräkset ovat kuumavalssattuja kylmämuokattavia teräslevyjä. S550MC on varmasti saatavilla ja se soveltuu käyttökohteeseen. Myös muut saman standardin teräkset ovat vaihtoehtoja, vaikka niitä ei löydykään CES selectorista.

Materiaalien ominaisuuksia käyttäen voidaan muodostaa materiaaleille kolmas toimivuuksindeksi  $M_3$ . Palkille, jonka hinta halutaan minimiin, voidaan määrittää toimivuuksindeksi myötörajan suhteena edullisuuteen. Yhtälöä 9 käyttäen kootaan toimivuuksindeksit taulukkoon 5, suhteuttaen ne toisiinsa tasaluvuiksi. Huomataan, että teräs AISI 5160 on tällä indeksillä kaikista toimivin materiaali. S550MC on tämän perusteella alumiineja niukasti parempi. Alumiineissa ei ole suuria eroja keskenään.

$$M_3 = \frac{\text{Yield strenght (MPa)}^{2/3}}{\text{Price} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}}\right) * \text{Density} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} \quad (9)$$

**Taulukko 5:** Toimivuusindeksi  $M_3$ , valituille materiaaleille

| Materiaali | AL5182 | AISI 5160 | AL 7055 | S550MC |
|------------|--------|-----------|---------|--------|
| M          | 4      | 17        | 5       | 9      |

## 5.2 Materiaalien vertaaminen palkeilla

CES selectorista saimme monia käypiä materiaaleja. Verrataan näistä neljää keskenään laskemalla valituilla palkkimallilla, minkä painoisia ja hintaisia eri materiaaleilla toteutetut palkit olisivat todellisuudessa. Laskentaan käytetään liitteestä E-F löytyvien arvojen maksimiarvoja.

Lavetti 5 mallissa palkin pituus on 8 m, materiaaleina käytetään valittua teräs AISI 5160, S550MC ja alumiini 7055. USP240 palkin tilavuus on  $0,03064\text{m}^3$  ja käyttäen liitteessä E olevaa alumiinia 7055, saadaan painoksi 89,2 kg. Samassa liitteessä olevalle teräkselle käyttäen USP160 palkkia, saadaan tilavuudeksi  $0,01768\text{m}^3$  ja painoksi 139,7 kg. Tällöin alumiininen palkki on noin 50 kg kevyempi kuin teräksinen. Liitteen E kilohintaa käyttäen alumiini USP240 palkki maksaa 169,5 € ja teräs AISI5160 USP160 palkki maksaa 57,3 €. Näin ollen teräksinen palkki on 110 € halvempi kuin alumiininen. Teräspalkkia AISI 5160 on mahdollista pienentää vielä hieman, jolloin sen massa ja hinta ovat hieman alhaisemmat. Optimointi ei kuitenkaan ollut tässä työssä käsiteltävä aihe. S550MC toimii palkilla USP200, sen murtolujuus on 760 MPa ja tiheys  $7840\text{kg/m}^3$ . Näin sen painoksi saadaan 187 kg ja hinnaksi 75 €. Näiden tulosten perusteella teräs AISI 5160 on selvästi edullisempi kuin alumiini 7055 ja hieman edullisempaa kuin teräs S550MC. Lavetti 5 malliin parasta olisi käyttää AISI 5160 terästä alumiinin sijaan. Lasketut hinnat ja painot koottuna taulukossa 6.

**Taulukko 6:** Lavetti 5-mallille soveltuvat materiaalit ja palkit

| Lavetti 5- malli  | USP160 AISI 5160 | USP240 AL 7055 | USP200 S550MC |
|-------------------|------------------|----------------|---------------|
| Palkin hinta (€)  | 57               | 169            | 75            |
| Palkin paino (kg) | 140              | 89             | 187           |

Lavetti 4 mallissa voidaan laskea samat arvot palkeille myös käyttäen kylmämuokattavaa alumiinia 5182. Lavetti 4 mallin runkopalkki on 4 m pitkä. Alumiini 5182 seosta voidaan käyttää USP200 palkkina, alumiini 7055 seosta voidaan käyttää USP 160 palkkina.

Teräksisen palkin laskentaan käytetään USP140 palkkia, koska muuten teräksinen AISI 5160 palkki olisi reilusti ylimitoitettu. Palkkien tilavuuden ovat: USP200 0,01192 m<sup>3</sup>, USP160 0,00884 m<sup>3</sup> ja USP140 0,00748 m<sup>3</sup>. Alumiini 5182 seoksen USP200 palkki painaa 31,9 kg ja maksaa 56,5 €. Alumiini 7055 seoksen USP160 palkki painaa 25,7 kg ja maksaa 48,8 €. Teräksinen AISI 5160 USP140 palkki painaa 59,1 kg ja maksaa 24,2 €. Teräksinen S550MC USP160 palkki painaa 69 kg ja maksaa 28 €. Tulokset kerätty taulukkoon 7. Tulokset ovat samantapaisia kuin Lavetti 5 mallille laskettaessa. Teräksinen palkki on painavin mutta maksaa puolet alumiinisten hinnasta. Alumiineissa keskenään ei ole suuria eroa. Ottaen huomioon, että seokset täytyy valmistaa eri menetelmiä käyttäen, ei niiden kustannuksia voi täysin tietää. Alumiini 5182 seos sisältää myös magnesiumia, mikä parantaa sen luontaista suolaveden kestoa ja tällöin ei välttämättä vaadi anodisointia kuten alumiini 7055 seos. Lavetti 4 palkit voitaisiin valmistaa joko teräksestä tai alumiinista.

**Taulukko 7:** Lavetti 4-mallille soveltuvat materiaalit ja palkit

| Lavetti 4- malli  | USP140 AISI 5160 | USP160 AL 7055 | USP200 AL 5182 | USP160 S550MC |
|-------------------|------------------|----------------|----------------|---------------|
| Palkin hinta (€)  | 24               | 49             | 57             | 28            |
| Palkin paino (kg) | 59               | 26             | 32             | 69            |

Taulukoissa 6 ja 7 on koottu hinnat ja painot lavetti 4 ja 5 malleilla. Nähdään, kuinka teräs on edullisempaa mutta painoa kertyy enemmän. AISI 5160 valmistetut palkit voidaan tehdä pienemiksi kuin S550MC teräksestä tehdyt. Näin AISI 5160 valmistetut palkit ovat keveämpiä ja halvempia. Lavetti 4 mallilla, jossa on mahdollista käyttää kahta eri alumiiniseosta, nähdään niillä olevan hieman eroa. AL 7055 on mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempi, mikä näkyy hinnassa sekä myös painossa. Teräksien erot keskenään ovat pienemmän lavetti 4 mallilla. Materiaalien vertaamiseen voidaan käyttää myös toimivuus indeksejä. Esimerkiksi hinnan ja painon yhdenvertaista painottamista. Taulukossa 8 on koottu aiemmin laskettujen palkkien toimivuutta, kun hinta ja paino ovat yhtä tärkeitä. Tällöin pienimmän arvon saanut on paras vaihtoehto. Näin ollen lavetti 5 mallissa teräs AISI 5160 on paras, kun taas lavetti 4 mallissa teräs AISI 5160 ja alumiiniseos 7055 ovat lähekkäin. Ongelman vertailuun tuottaa se, että teräs palkkia olisi mahdollista pienentää hieman, jolloin sen arvo olisi pienempi. Teräs vaatii myös korroosio suojauksen. Sinkitys levyteräksen hinta on noin 0,1€/kg kalliimpaa kuin pinnoittamattoman, joten levyteräksillä sinkkipinnoitteen vaikutus hintaan on minimaalinen. Alumiini 7055 on tässä tapauksessa kuitenkin hieman parempi. Mikäli toimivuutta muutettaisiin joko niin, että

hintaa painotetaan enemmän tai keveyttä, olisi ero helpommin nähtävissä. Mikäli kylmämuokkaus on pakollista, ei alumiiniseos 7055 ole käytettävissä. S550MC on lavetti 5 mallissa parempi vaihtoehto kuin alumiini 7055, lavetti 4 mallilla se on alumiiniseoksen 5182 samalla tasolla.

**Taulukko 8: Hinta\*Paino (edullisuus) toimivuusindeksinä**

| <b>Materiaali</b> | <b>AISI 5160</b> | <b>AL 7055</b> | <b>AL 5182</b> | <b>S550MC</b>  |
|-------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Lavetti5</b>   | <b>USP 160</b>   | <b>USP 240</b> |                | <b>USP 200</b> |
| Hinta*Paino       | 7998             | 15105          |                | 13973          |
| <b>Lavetti4</b>   | <b>USP 140</b>   | <b>USP 160</b> | <b>USP 200</b> | <b>USP 160</b> |
| Hinta*Paino       | 1430             | 1257           | 1806           | 1921           |

Alumiinia voidaan käyttää, mikäli halutaan tehdä tuote, joka eroaa kilpailijoistaan ulko-näöllisesti. Kuitenkin kokonaishinta tulisi suuremmaksi kuin terästä käytettäessä. Myös valmistustapaa tulee miettiä. Ohutlevystä särmääminen on markkinoilla paljon käytetty menetelmä. Alumiinin kohdalla kylmämuokattavuus heikentää seoksen väsymiskestävyyttä verrattaessa seoksiin, joita ei voi kylmämuokata. Sen väsymiskestävyys riittää Lavetti 4 mallin USP200 palkille. Aiemmin Lavetti 5 mallille laskettu alumiini olisi valmistettava eri tavalla, esimerkiksi pursottamalla. Särmättyjen kappaleiden hyötynä on mittojen muuttaminen. Pursottamisessa käytetään muottia, jolloin profiilin mittoja on hankala muuttaa ja se on kallista. Mikäli halutaan saada perävaunun omamassa mahdollisimman alhaiseksi, jotta kantavuus olisi suurin mahdollinen, on alumiinin käyttö suositeltavaa.

CES selectorilla valintaa tehtäessä täytyy huomioida, että toimitustila, lämpökäsittelyt tai saatavuus voivat vaihdella, mikä ei täysin näy CES selectorin mukaan rajautuvista materiaaleista vaan nämä tulee aina selvittää myös tapauskohtaisesti.

## 6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia mitä materiaaleja O1- ja O2-luokan perävaunuissa käytetään ja minkälaisia ominaisuuksia niiltä vaaditaan käytännössä. Toisena tavoitteena oli tarkastella ja vertailla näiden materiaalien soveltuvuutta kohteeseen CES selector-ohjelmistoa apuna käyttäen.

Tällä hetkellä käytettäviä materiaaleja oli muutamia. Yleisimmin materiaalina on sinkkipinnoitettu rakenneteräs. Ruostumattomasta teräksestä sekä alumiinista valmistettuja perävaunuja on myös saatavilla. Materiaalien vaatimukset määräytyvät lain asettamien rajoitusten sekä käytön mukaan. Laissa määritetään maksimimassat sekä -pituudet. Näistä saadaan vaatimukset myötörajalalle sekä syklisen kuormituksen kestolle. Tieliikennekäyttö asettaa materiaaleille ympäristön, jossa korrosio on nopeaa suojojen vaikutuksesta. Käytetyn materiaalin tai pinnoitteen tulee olla kestävä tällainen korrosio.

Materiaalin valinnassa CES selector ohjelmaa käytettiin apuna kohteeseen käytettävien ja siihen parhaimmin soveltuvien materiaalien valinnassa. CES selectorin perusteella soveltuvia teräksiä on monia. AISI 5160 valikoitui CES selectoria apuna käyttäen väsymislujouden ja edullisuuden näkökulmasta yhdeksi parhaista teräksistä ja myös muut AISI 5000 sarjan teräkset ovat näiltä ominaisuuksiltaan erittäin hyviä. CES selectorin perusteella paras EN-standardin mukainen teräs on S550MC. CES selectorin mukaan alumiiniseoksista soveltuvat esimerkiksi EN AW-5182 ja EN AW-7055. Alumiiniseos 5182 on yleisesti käytettyä merialumiini laatua, jota on saatavilla levynä. CES selectorin mukaisesti soveltuvaa S550MC terästä on helposti saatavilla levynä ja se täyttää EN 10149-2 standardin. Samaisen standardin muitakin teräslaatuja voidaan käyttää. Tällaisia ovat esimerkiksi SSAB:n Domex 550MC, joka on vastaava S550MC teräkselle. Samalle standardille löytyy myös SSAB:n Strenx 700MC, joka on myötö- ja murtolujuudeltaan S550MC terästä parempi.

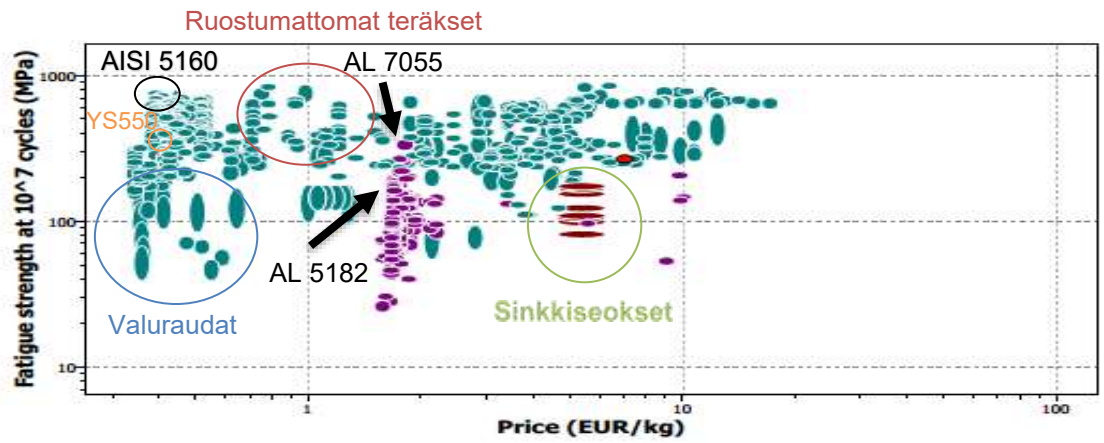
Valitaan käytettäväksi materiaaliksi S550MC. Se on mekaanisilta ominaisuuksiltaan riittävän hyvä ja saatavana helposti levynä. Se soveltuu myös särmättäväksi ja voidaan kuumasinkitä tai maalata korroosionkeston saavuttamiseksi.

# LÄHTEET

1. Ajoneuvolaki (11.12.2002/1090), saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20021090#L2P10>
2. Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä (4.12.1992/1257), saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257>
3. Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. (2014), Materials Science and Engineering, 9th Edition SI Version, Wiley, New York.
4. Metalforming magazine (2017), saatavissa <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/materials/high-strength-steel/how-grain-structure-impacts-steel-strength> viitattu 28.12.2020
5. Rabb, R. (2013), Todennäköisyysteoriaan pohjautuva väsymisanalyysi, BoD - Books on Demand, Helsinki.
6. Salmi, T. & Pajunen, S. (2010), Lujuusoppi, Pressus, Tampere.
7. Schijve (2009), Fatigue of Structures and Materials, Springer Netherlands, Dordrecht.
8. SSAB -Tuotteet (2020), saatavissa <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-domex>
9. Elina Vestola, Pekka Pohjanne, Leena Carpén, Tuija Kaunisto, Tiina Ahlroos (2006), Tiehallinnon selvityksiä: Kalsiumkloridin sivuvaikutukset, Edita Prima Oy, saatavissa [https://julkaisut.vayla.fi/pdf/3201014-vkalsiumkloridin\\_sivuvaik.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf/3201014-vkalsiumkloridin_sivuvaik.pdf)
10. Kuklík, V & Kudláček, J. (2016) Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures. Butterworth-Heinemann.

# LIITE A: MATERIAALIEN SIJOITTUMINEN KILOHINNAN MUKAAN

CES 2015 Stage 2: Fatigue strength at  $10^7$  cycles (MPa) vs. Price (EUR/kg)  
SELECTOR

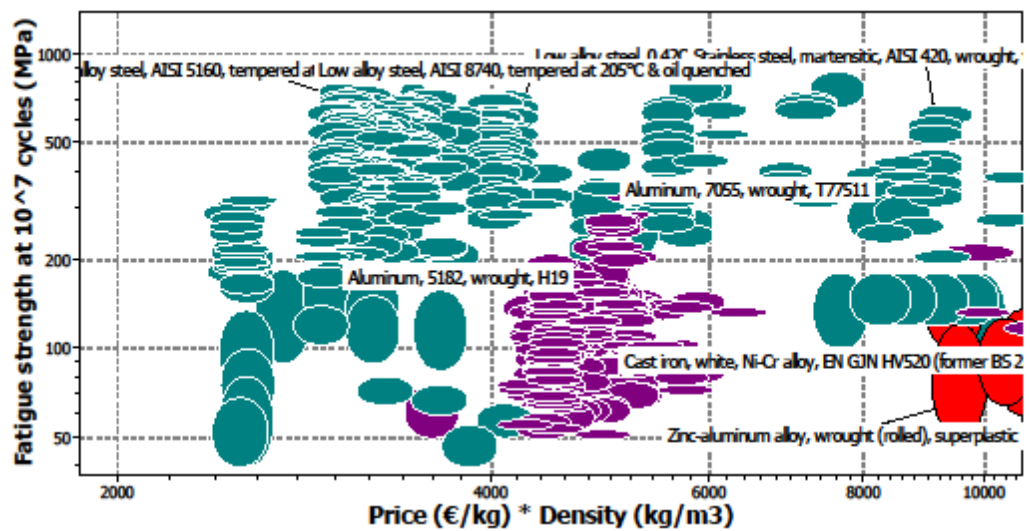




## LIITE B: MATERIAALIEN SJOITTUMINEN EDULLISUUDEN MUKAAN

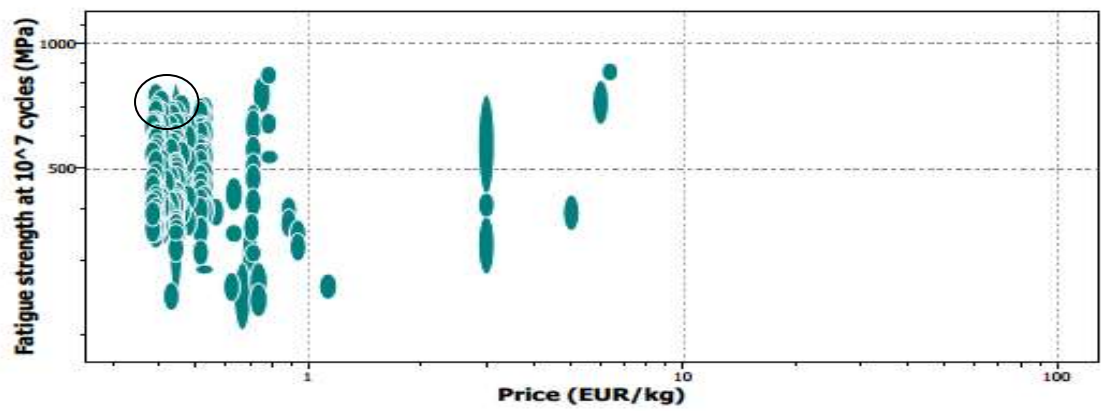
CONSTRUCT  
CES 2015  
SELECTOR

Stage 5: Fatigue strength at  $10^7$  cycles (MPa) vs.  
Price (€/kg) \* Density (kg/m<sup>3</sup>)



# LIITE C: COLD FORMING LAVETTI 5 USP240

CES 2015 Stage 2: Fatigue strength at  $10^7$  cycles (MPa) vs. Price (EUR/kg)  
SELECTOR



# LIITE D: COLD FORMING LAVETTI 4 USP240

CES 2015 Stage 2: Fatigue strength at  $10^7$  cycles (MPa) vs. Price (EUR/kg)  
SELECTOR

