

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

MAANALAISTEN TYÖKONEIDEN JARRUJÄRJESTELMIEN TESTAUS- MENETELMIEN YHTENÄISTÄMINEN JA TODENTAMINEN VIRTUAALIYM- PÄRISTÖSSÄ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Arttu Kaatrasalo	
Työn nimi Maanalaisten työkoneiden jarrujärjestelmien testausmenetelmien yhtenäistäminen ja todentaminen virtuaaliympäristössä	
Päiväys 2.5.2023	Sivumäärä/Liitteet 44/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Normet Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Normet Oy. Työn tarkoituksena oli yhtenäistää ja päivittää kaivosajoneuvojen ohjausjärjestelmän kautta päivittäin suoritettavien jarrutestien toimintalogiikka ja käyttöliittymä sekä testata niiden toiminta virtuaalisesti. Samalla perehdyttiin standardeihin, mihin kyseiset testit perustuvat. Tällä hetkellä jarrutestien suoritus on haastavaa johtuen erilaisista voimansiirtotyyppien toteutuksista. Lisäksi testien ohjeistus on ollut puutteellinen.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla nykyisiin testeihin ja analysoimalla niiden toiminta. Näitä pohjana käyttäen suunniteltiin uudet testit peilaten niitä standardeihin ja asiakaskohtaisiin vaatimuksiin. Uusista jarrutesteistä suunniteltiin spesifikaatiot, joiden pohjalta ne koodattiin Norsmart3-ohjausjärjestelmään. Työssä hyödynnettiin myös digitaalista kaksosta testaamalla jarrutestien toiminta virtuaalisesti ennen varsinaisia konetestauksia. Testitapaukset kirjoitettiin Robot Frameworkillä.</p> <p>Lopputuotoksena syntyi virtuaalisesti varmennetut ja interaktiiviset jarrutestit jokaiselle voimansiirtotyyppille. Uusissa jarrutesteissä on myös erillinen valikko testeille, minkä sisältä löytyy kyseiselle koneelle ja testille ominaiset alkuehdot testin suorittamiseksi. Valikko ohjeistaa kuljettajaa asettamaan koneen oikeaan tilaan ja indikoi sen selkeästi. Jarrutestien toimintaa testattiin myös oikealla koneella.</p>	
Avainsanat kaivosajoneuvo, jarrutesti, ohjausjärjestelmä, digitaalinen kaksonen, virtuaalitestaus, Robot Framework	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Arttu Kaatrasalo	
Title of Thesis Unification and verification of testing methods for brake systems of underground working machines in a virtual environment	
Date 2 May 2023	Pages/Appendices 44/0
Client Organisation /Partners Normet Oy	
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to combine and update the operating logic and user interface of the daily performed brake tests and to confirm the functionality of the brake tests virtually. The brake tests can be performed via a control system. At the same time, standards that define the requirements for the tests were reviewed. At the moment, the performance of the brake tests is challenging due to different implementations regarding power transmission types, and the instructions for the test and during it are inadequate. The thesis was commissioned by Normet Oy.</p> <p>The thesis work was started by getting familiar with the current tests and analyzing their operation. Utilizing these as a basis, new tests were designed, relating them to standards and customer-specific requirements. Specifications were designed for the new brake tests, based on which they were coded into the Norsmart3 control system. The thesis also utilized a digital twin for testing the functionality of the brake tests virtually before the actual machine testing. Test cases were written by using Robot Framework.</p> <p>The result of this thesis was virtually certified and interactive brake tests for each transmission type. The new brake tests also have a separate selection window for tests, which contains the initial conditions for performing the test specific to the machine and the test. The menu instructs the driver to put the machine in the right mode and clearly indicates it. The functionality of the brake tests was also tested with a real machine.</p>	
<p>Keywords</p> <p>mining vehicle, brake test, control system, digital twin, virtual testing, Robot Framework</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	NORMET OY.....	10
2.1	Tuotteet.....	11
2.1.1	Panostus.....	12
2.1.2	Henkilönosto- ja asennustyöt	12
2.1.3	Rusnauslaitteet.....	13
2.1.4	Logistiikka	13
2.1.5	Betonin ruiskutus.....	14
3	KAIVOSKONEEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	15
3.1	CAN-väylä	15
3.2	Norsmart-ohjausjärjestelmä.....	16
4	VOIMANSIIRTOTYYPIT	18
4.1	Sähköinen voimansiirto	18
4.2	Elektrodynaaminen voimansiirto.....	19
4.3	Hydrodynaaminen voimansiirto	20
4.4	Hydrostaattinen voimansiirto	21
5	HYDRAULIKÄYTTÖISTEN JARRUJEN TOIMINTA JA KOMPONENTIT	22
5.1	Jarrujärjestelmän pääkomponentit	22
5.1.1	Hydrauliöljy	23
5.1.2	Hydraulipumppu	23
5.1.3	Paineakku	24
5.1.4	Venttiilit	25
6	JARRUJÄRJESTELMÄT	26
6.1	Käyttöjarru	26
6.1.1	Positiiviset jarrut.....	26
6.1.2	Negatiiviset jarrut	27
6.2	Turvajarru	27
6.3	Varajarru.....	28
6.4	Proportionaalijarrut	28
6.5	Hidastimet.....	29
6.5.1	Moottorijarru	29

6.5.2	Pyörrevirtahidastin.....	30
6.5.3	Hydrodynaaminen hidastin	31
6.5.4	Regeneroiva jarrutus	32
6.5.5	Jarruvastus	32
7	TYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET	34
7.1	Vanhat jarrutestit.....	34
7.2	Standardit ja vaatimukset	34
7.3	Työn toiminnallinen osuus	36
8	VIRTUAALITESTAUS	39
8.1	Digitaalinen kaksonen	39
8.2	Robot Framework	40
9	YHTEENVETO.....	42
	LÄHTEET	43

KUVALUETTELO

Kuva 1. Normetin Iisalmen tehdas. (Normet, 2023)	10
Kuva 2. Normetin SmartDrive tuotteet. (Normet, 2023)	11
Kuva 3. Charmec LC 605 D(V). (Normet, 2023).....	12
Kuva 4. Himec SF605. (Normet, 2023)	12
Kuva 5. Scamec 2000 S. (Normet, 2023)	13
Kuva 6. Multimec MF 100 ja sammutuskasetti. (Normet, 2023)	14
Kuva 7. 8100-sarjan laitteisiin on saatavilla ruiskubetonointia automatisoiva SmartSpray-järjestelmä. (Normet, 2023).....	14
Kuva 8. CAN-väylässä on 120 Ω vastukset molemmissa päissä vähentämässä signaalin heijastumista. (Zhu, 2010, s. 14).....	15
Kuva 9. Sekä uudet että vanhat (kuvassa) jarrutestit voidaan suorittaa MIDin kautta (Kaatrasalo, 2022). ...	16
Kuva 10. Joystickin liike saa aikaan hydraulisylinterin liikkeen (Normet, 2022).	17
Kuva 11. Sähköisen voimansiirron ansiosta maksimaalinen vääntö on käytössä välittömästi. (Normet, 2023).....	18
Kuva 12. Hybridivoimansiirron periaate. (Larminie & Lowry , 2012, s. 20).....	19
Kuva 13. Momentinmuuntimen toimintaperiaate. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3j).....	20
Kuva 14. Hydrostaattinen voimansiirto. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3i).....	21
Kuva 15. Hydraulisen jarrujärjestelmän pääkomponentit. (Poclain Hydraulics, 2020, s. 2).....	22
Kuva 16. Ulkohammaspyöräpumpussa öljy kulkeutuu imupuolelta (sininen) painepuolelle (punainen) hammaspyörien väleissä ulkolaitoja myöten. (Metropolia, 2009)	24
Kuva 17. Paino-, jousi-, ja kaasutoiminen paineakku. (FluidPower Journal, 2020).....	24
Kuva 18. Venttiilin erilaisia ohjaustapoja piirrosmerkeinä. (Metropolia, 2009)	25
Kuva 19. Positiivisilla jarruilla varustetuissa akseleissa tarvitaan erillinen öljynsyöttö käyttö- ja turvajarrulle (Kaatrasalo 2023).	26
Kuva 20. Negatiivisilla jarruilla varustetuissa akseleissa tarvitaan vain yksi öljynsyöttölinja jarruille sekä kaksi linjaa jäähdytykselle (Kaatrasalo 2023).	27
Kuva 21. Pakokaasun virtausta vastustavan läpän asentoa voidaan ohjata automaattisesti esimerkiksi kaasupolkimen asentoon perustuen. (Jacobs Vehicle Systems, 2023)	29
Kuva 22. Männän liikettä voimistavat palokaasut päästetään karkaamaan pakoputkistoon avaamalla pakoventtiilit moottorijarrutuksessa. (Jacobs Vehicle Systems, 2023)	30
Kuva 23. Pyörrevirtahidastimessa kineettinen energia muuttuu lämmöksi. (Telma S.A.S, 2023).....	31
Kuva 24. Hydrodynaaminen hidastin asennettuna vaihteiston yhteyteen. (Voith GmbH & Co, 2023)	31
Kuva 25. Regeneroivan jarrutuksen ansiosta käyttöjarrujen elinikä pitenee. (Normet, 2023)	32
Kuva 26. Hybridilinja-autoissa matkustamon lämmitys on tyyppillisesti toteutettu jarruvastuksella. (Hanzestrohm, 2019)	33
Kuva 27. Normetilla on asiakkaita sekä toimipaikkoja ympäri maailmaa, joten myös alue- ja kaivoskohtaisia vaatimuksia koneiden toiminnalle on runsaasti. (Normet Group Oy, 2022).....	35
Kuva 28. Jarrutestien toimintaa voi seurata CAN-väylän kautta (Kaatrasalo 2023).	36

Kuva 29. Kuljettajan tarvitsee painaa vain yhtä nappia päästäkseen tähän näkymään (Kaatrasalo 2023). ...	37
Kuva 30. Uusissa jarrutesteissä kuljettajan on helppo asettaa kone vaadittuun tilaan seuraamalla ohjeistusta näytöltä (Kaatrasalo 2023).	37
Kuva 31. Jarrutestinäkymä on riippuvainen konetyypistä sekä kuljettajan valitsemasta jarrutestistä. (Kaatrasalo 2023).	38
Kuva 32. Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli oikeasta koneesta (Normet, 2022).....	39
Kuva 33. Simulaattorikoulutus on kustannustehokasta (Mevea Ltd, Julkaisuaika tuntematon).	40
Kuva 34. Testeihin voidaan luoda erilaisia vikatilanteita. (Kaatrasalo 2023).	41
Kuva 35. Robot Frameworkin raportista voidaan havaita ohjausjärjestelmän toimivan oletetusti. (Kaatrasalo 2023).	41

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

ABA	Automatic Brake Application, jarrujärjestelmän tilaa valvova ja jarrujen automaattisesti päälle kytkevä järjestelmä (negatiiviset jarrut)
BEV	Battery Electric Vehicle, akkukäyttöinen sähköajoneuvo
CAN	Controller Area Network, kenttäväylä
CAN-H	CAN-high väyläjohto
CAN-L	CAN-low väyläjohto
CCS	Combined Charging system, pikalatausstandardi
Digitaalinen kaksonen	Virtuaalinen malli oikeasta koneesta
ED	Electro Dynamic, Diesel-sähköinen voimansiirto
HD	Hydrodynaaminen voimansiirto
Hidastin	Energiaa absorvoiva laite
HST	Hydrostaattinen voimansiirto
IOmux	Ohjausjärjestelmän tulot (input) ja lähdöt (output)
Käyttöjarru	Ensisijainen jarrutusmenetelmä
Negatiiviset jarrut	Hydrauliöljyn paineella vapautetaan jarrut
NS3	Norsmart3, ohjausjärjestelmä
Positiiviset jarrut	Hydrauliöljyn paineella jarrutetaan
RABA	Redundant Automatic Brake Application, jarrujärjestelmän tilaa valvova ja jarrujen automaattisesti päälle kytkevä järjestelmä (positiiviset jarrut)
SAE J1939	Society of Automotive Engineersin (SAE) kehittämä elektronisten ohjausyksikköjen (ECU) standardoitu CAN-väyläpohjainen tiedonsiirtomenetelmä, jota useimmat konevalmistajat käyttävät.
SD	SmartDrive, Sähköinen voimansiirto
Turvajarru	Ensisijaisena tarkoituksena pitää pysäytetty kone paikoillaan
Varajarru	Järjestelmä, jota käytetään koneen pysäyttämiseen, mikäli käyttöjarrujärjestelmässä ilmenee yksittäinen vika

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Normet Oy. Työn tarkoituksena oli yhtenäistää ja päivittää kaivosajoneuvojen ohjausjärjestelmän kautta päivittäin suoritettavien jarrutestien toimintalogiikka, käyttöliittymä sekä testata niiden toiminta virtuaalisesti. Useat kaivostoimijat ja standardit vaativat nämä testit suoritettavan päivittäin ennen jokaisen työvuoron alkua.

Kaivoskoneet ovat omamassaltaan jo varsin painavia laitteita puhumattakaan niiden ollessa täyteen kuormattuna paino voi olla jopa yli 60 tonnia. Tämä asettaa vaatimuksia myös laitteiston pysähtymiseen ja paikallaan pitämiseen, jotta kaivoksessa on turvallista operoida.

Nykyisellään jarrutestit ovat vaikeita suorittaa jopa Normetin oman henkilökunnan toimesta, johtuen konetyyppien välisestä epäyhteneväisyydestä testien suhteen. Osittain puutteita on myös operaattorille näytettävässä testi-ikkunassa, missä on esillä myös testille tai konetyypille epäolennaisia tietoja. Testi ei myöskään ole interaktiivinen eikä ohjeistava kuljettajaa kohtaan.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda interaktiivinen ja kuljettajaa ohjeistava testinäköymä, missä on näkyvissä vain kyseiselle testille ja konetyypille olennaiset arvot. Työn tuloksena syntyi edellä kuvattun kaltaiset testit virtuaalisesti varmennettuna.

2 NORMET OY

Normetin tarina alkaa vuodesta 1962, jolloin Jaakko Sarvela perusti veljensä Jussi Sarvelan kanssa siementuotantotilan yhteyteen Peltosalmen Konepaja Oy:n. Konepajan tuotteisiin lukeutui erilaiset traktorikäyttöiset työvälineet kuten takalanat ja kuormaimet. (Savon Siemen, 2004)

Vuonna 1966 takakuormain sai palkinnon New Yorkin kansainvälisillä patenttimessuilla ja vielä samana vuonna ensimmäinen kolmiakselinen metsätraktori syntyi, mikä siivitti raskaiden kaivoskoneiden valmistuksen alkua Peltosalmella. Samalla siirryttiin uusiin tuotantotiloihin junaradan sekä viitostien viereen, missä nykyinenkin tehdas (kuva 1) sijaitsee. (Sarvela, 2008)

Sarvelat myivät konepajatoiminnan Orion-yhtymälle vuonna 1971. Yrityksen nimi vaihtui Normetiksi 1973 ja jatkaa tällä nimellä toimintaa vielä nykyäänkin. Kaksi pääomarahastoa osti liiketoiminnan vuonna 1999, jolloin nimeksi vaihtui Normet Oy. Vuodesta 2005 lähtien Normet Group Oy:n pääomistajana on toiminut Aaro Cantell. (Savon Sanomat, 2020)

Nykyisellään Normetilla on toimintaa yli 50:llä toimipaikalla 33:ssa maassa eri puolilla maailmaa työllistäen yli 1600 ammattilaista. Tarjonta kattaa runsaasti maanalaiseen rakentamiseen tarkoitettuja rakennuskemikaaleja, kallionlujitusta sekä laitteistoja erilaisiin työvaiheisiin aina räjähdysaineiden panostuksesta logistiikkaan. (Normet, 2023)



Kuva 1. Normetin Iisalmen tehdas. (Normet, 2023)

2.1 Tuotteet

Normetilla on kattava valikoima erilaisia kaivosteollisuuteen soveltuvia tuotteita ja laitteita. Laitteita on saatavilla useilla eri voimansiirto- ja moottorivaihtoehdoilla useassa eri kokoluokassa aina XS-sarjasta XL-sarjaan saakka. Koneita on myös mahdollista räätälöidä asiakkaan tai aluevaatimusten mukaisesti. Kaivos- ja tunnelilaitteiden lisäksi saatavilla on myös erilaisia kemikaaleja ja kalliolujitus-tuotteita kaivosteollisuuteen.

Tulevaisuudessa koneita on saatavilla yhä enenevässä määrin sähkökäyttöisinä. Tähän suuntaukseen ovat merkittävästi vaikuttaneet tiukentuneet päästörajoitukset. Merkittävä tekijä on myös sekä koneen, että myös koko kaivoksen energiatehokkuuden lisääntyminen. Jopa 40 % kaivoksen energiasta kuluu pelkkään ilmanvaihtoon, jotta dieselmootoreiden tuottamat pakokaasut saadaan poistettua kaivoksesta. (Kocsis & Hardcastle, 2003)

Lähes kaikilla Normetin laitteilla voidaan operoida joko koneen omalla voimanlähteellä tai sähköhydraulisella voimayksiköllä, mikä saa voimansa kaivoksen sähköverkosta. Kuvassa 2 on esitetty tämänhetkiset SmartDrive-laitteet.



Kuva 2. Normetin SmartDrive tuotteet. (Normet, 2023)

2.1.1 Panostus

Charmec (kuva 3) on Normetin valmistama panostuslaite, mikä on suunniteltu perä- ja louhospanostuksiin kaivoksissa ja tunneleissa. Koneisiin on saatavilla integroidut kuljetustilat panostuksessa käytettävälle räjähdysaineelle, joten tarvetta erilliselle räjähdysaineen kuljetukselle ei tarvita. Koneen keulassa olevasta korista kuljettaja voi suorittaa panostuksen turvallisesti. (Normet, 2023)



Kuva 3. Charmec LC 605 D(V). (Normet, 2023)

2.1.2 Henkilönosto- ja asennustyöt

Himec (kuva 4) on henkilönostoihin ja asennustöihin suunniteltu kone. Tyypillisiä käyttökohteita tunneleissa ja kaivoksissa on erilaiset ilmanvaihtojärjestelmän huolto- ja asennustyöt. Koneen takaosassa sijaitseva nostettava kori mahdollistaa työskentelyn tehokkaasti ja turvallisesti oikealta korkeudelta. (Normet, 2023)



Kuva 4. Himec SF605. (Normet, 2023)

2.1.3 Rusnauslaitteet

Scamec (kuva 5) on irtokivien ja muun materiaalin poistamiseen eli rusnaukseen tarkoitettu kone. Puomin päähän asennetulla vasaralla irtokivien pudottaminen tunnelin seinistä ja katosta on turvallista ja tehokasta. (Normet, 2023)



Kuva 5. Scamec 2000 S. (Normet, 2023)

2.1.4 Logistiikka

Normetilla on laaja valikoima maanalaiseen kuljetukseen tarkoitettuja laitteita. Multimecit (kuva 6) ovat vaihtolavalla varustettuja monikäyttöisiä laitteita, missä yhdelle rungolle voidaan asentaa useita erilaisia kasetteja. Kasetteja on olemassa useita erilaisia, aina betonikasetista nosturikasettiin. (Normet, 2023)

Raskaampaan maanalaiseen logistiikkaan lukeutuu Utimecit. Eroina Multimeceihin verrattuna on koneen suurempi koko ja kuljetuskapasiteetti sekä kiinteästi asennetut prosessimoduulit. Utimecejä on saatavilla useassa eri kokoluokassa (M/L/XL). (Normet, 2023)



Kuva 6. Multimec MF 100 ja sammutuskasetti. (Normet, 2023)

2.1.5 Betonin ruiskutus

Spraymecit (kuva 7) ovat betoniruiskutukseen tarkoitettuja laitteita. Niitä on saatavilla useissa eri kokoluokissa tunneliin tai kaivokseen räätälöitynä. Betoniruiskuja käytetään kallion lujittamiseen ja materiaalin sidontaan hyödyntäen erilaisia kiihdytinaineita lujittamaan ja nopeuttamaan betonin kuivumista. (Normet, 2023)



Kuva 7. 8100-sarjan laitteisiin on saatavilla ruiskubetonointia automatisoiva SmartSpray-järjestelmä. (Normet, 2023)

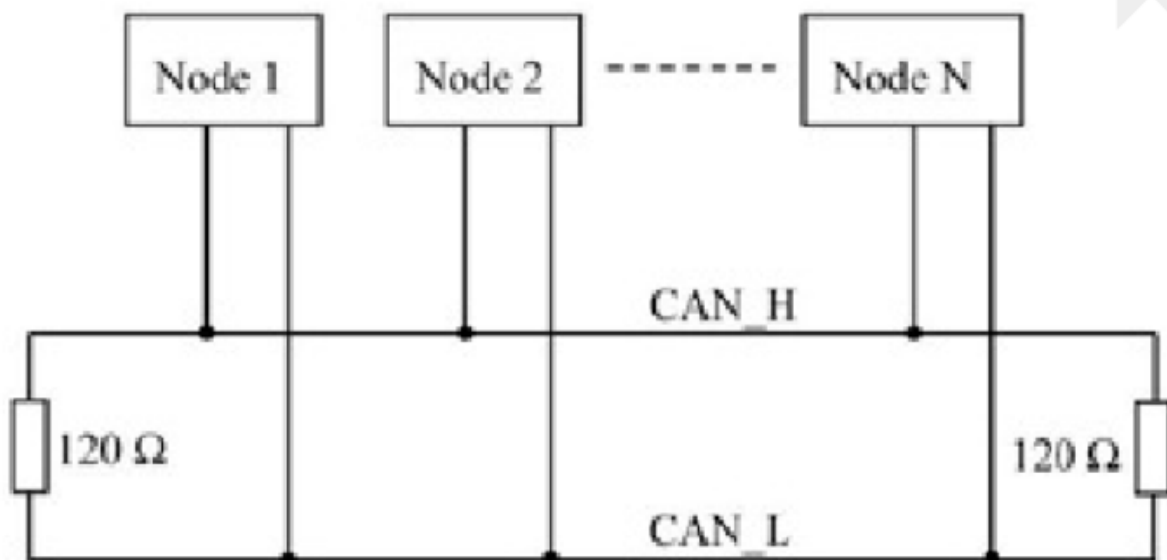
3 KAIVOSKONEEN SÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Nykyaikainen kaivoskone pitää sisällään useita eri jännitetasoja aina muutaman voltin tasajännitteen lähes tuhannen voltin vaihtojännitteeseen. Tässä kappaleessa perehdytään ohjausjärjestelmän toimintaperiaatteeseen.

3.1 CAN-väylä

Controller Area Network eli CAN-väylä (kuva 8) on sarjaväyläprotokolla, minkä Bosch kehitti vuonna 1983. Tuohon aikaan ajoneuvojen sähköjärjestelmään alkoi tulla lisää elektroniikkaa ja sähköisiä toimintoja, minkä seurauksena johtosarjojen koko suureni ja kustannukset nousivat. CAN-väylä on kehitetty juuri tämän ongelman ratkaisemiseksi. Nykyisellään CAN-väylän käyttö on laajentunut ajoneuvoteollisuudesta laajemmallekin käyttäjäkunnalle, esimerkiksi kotiautomaatioon ja lääketieteeseen. (Zhu, 2010, s. 11)

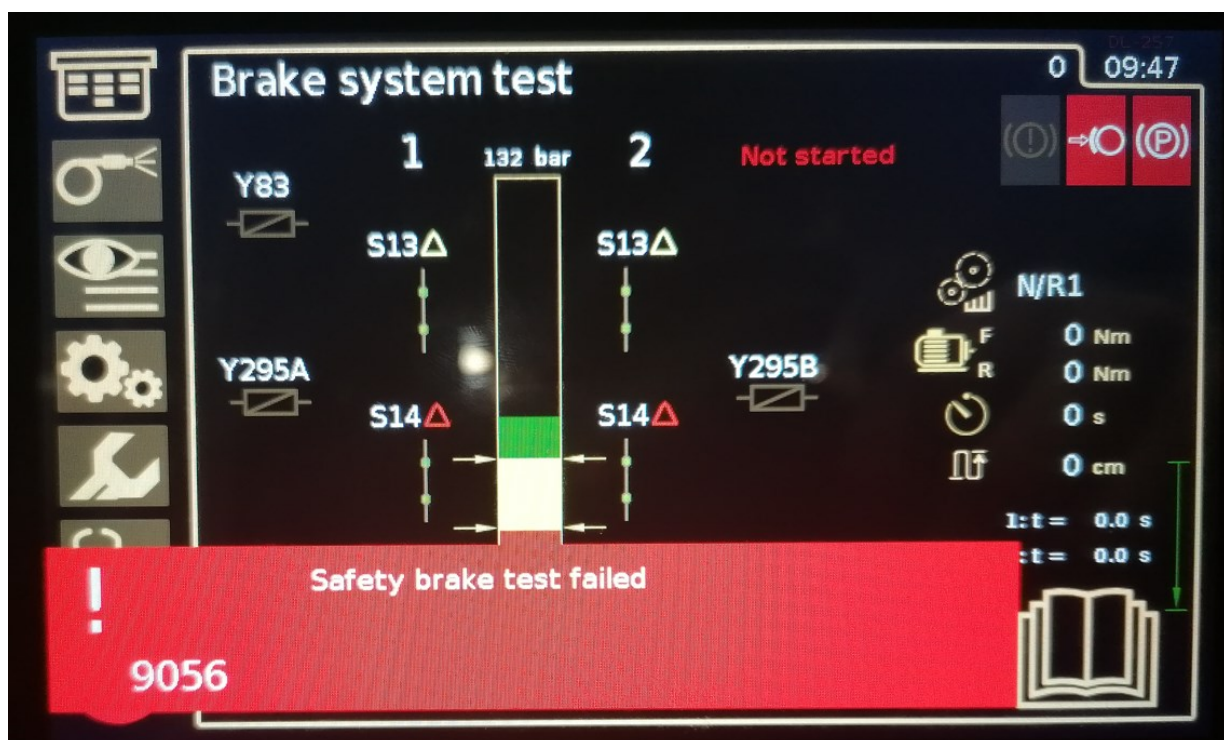
CAN-väylässä kaapelina käytetään kierrettyä parikaapelia, jonka toista johdinta kutsutaan CAN-H:ksi, jonka jännite on 2,5 V – 4 V ja toista CAN-L:ksi ja sen jännite on 1 V – 2,5 V. Jännite-ero näiden signaalien välillä esittää loogista tilaa joko 1 tai 0. CAN-väylässä jokainen viesti välitetään kaikille solmupisteille eli nodeille. Jokaisella viestillä on yksilöllinen tunniste, minkä perusteella solmupiste tunnistaa kuuluuko viesti sille. Tämä mahdollistaa yhden tiedon lähettämisen usealle solmupisteelle yhdellä tunnisteella, jolloin jokaista tietoa varten ei tarvita erillistä johdotusta. Esimerkiksi nopeustietoa voidaan välittää usealle eri toimilaitteelle. (Zhu, 2010, s. 12)



Kuva 8. CAN-väylässä on 120 Ω vastukset molemmissa päissä vähentämässä signaalin heijastumista. (Zhu, 2010, s. 14)

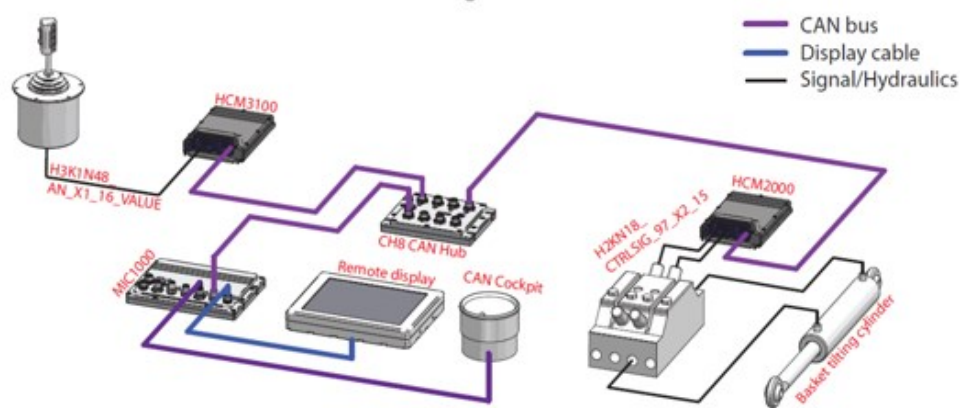
3.2 Norsmart-ohjausjärjestelmä

Norsmart on Normetin koneissa käytetty CAN-väyläpohjainen älykäs ohjausjärjestelmä, mikä on toteutettu yhteistyössä ohjausjärjestelmiä valmistavan Exertuksen kanssa. Ohjausjärjestelmä on suunniteltu vaativiin olosuhteisiin ja on muokattavissa kaikkiin Normetin koneisiin ja variaatioihin. Järjestelmä mahdollistaa älykkäät ohjaukset, koneen säädön, vikadiagnostiikan sekä tiedonkeruun. Järjestelmä on periaatteeltaan master-slave -tyylinen, missä yksi master-laite käskyy muita CAN-väylän solmupisteitä, I/O-moduuleja. Masterina toimii kuljettajaa opastava ja kaikki koneelle ominaiset tiedot näyttävä moduuli, jota kutsutaan MID:iksi (kuva 9). MIDi on kosketusnäytöllä varustettu ohjausyksikkö, josta kuljettaja voi tarkkailla ja säätää konetta. (Normet, 2023)



Kuva 9. Sekä uudet että vanhat (kuvassa) jarrutestit voidaan suorittaa MIDin kautta (Kaattrasalo, 2022).

MIDin lisäksi tarvitaan myös I/O-moduuleja eli nodeja. Ne kuuntelevat ja lähettävät dataa ohjausyksikölle ja ohjausjärjestelmä toimii niiden perusteella. MIDi ja I/O-moduulit ovat kytketty toisiinsa CAN-väylällä. Esimerkiksi, kun kuvassa 10 kuljettaja liikuttaa sauvaohjainta se lähettää analogisen signaalin I/O-moduulille. Tästä tieto jatkaa eteenpäin digitaalisena ohjausyksikön kautta toiselle moduulille, minkä analoginen ulostulo ohjaa hydraulisylinteriä. Hydraulisylinterin liikkeestä on mahdollista saada myös takaisinkytkentätieto ohjausjärjestelmälle.



Kuva 10. Joystickin liike saa aikaan hydraulisynterin liikkeen (Normet, 2022).

Norsmartissa on kaksi eri pääväylää jaoteltuna seuraavasti:

CAN1

- Alustaväylä
 - Voimansiirto
 - Alustan valvonta...

CAN2

- Prosessiväylä
 - Puominohjaus
 - Betonin ruiskutus
 - Panostus...

Lisäksi on käytössä kolmansien osapuolien kenttäväyliä esimerkiksi moottorinohjaukseen J1939-väylä sekä akus-
tolle ja inverttereille omia väyliä.

4 VOIMANSIIRTOTYYPIT

Normetin koneita on saatavilla kahdella eri voimanlähteellä; diesel- tai sähkömoottorilla varustettuna. Näiden lisäksi on juuri 2023 keväällä lanseerattu yhdistelmä näistä kahdesta voimanlähteestä, mikä kantaa nimeä elektrodynaaminen voimansiirto. Koneita on saatavilla runsailla eri dieselmoottorivariaatioilla sekä päälirakennevariaatioilla varustettuna. Koneisiin on saatavilla myös akseleita useisiin eri käyttötarkoituksiin varustettuna sekä erilaisilla jarrunohjausjärjestelmillä.

4.1 Sähköinen voimansiirto

SmartDrive eli SD-laitteet ovat modulaarisia akkukäyttöisiä sähköajoneuvoja, joissa on optimoitu energiankulutus ja suorituskyky. SD-laitteet takaavat paremman tuottavuuden sekä alentavat kaioksen ilmanvaihtotarvetta, koska ne eivät tuota paikallispäästöjä. (Normet, 2023)

Energiavarastona toimii litiumioniakusto nopealla CCS-latauksella varustettuna. Akusto tuottaa energian inverttereille, mitkä säätelevät tehon sähkömoottoreille tarpeen mukaan. Sähkömoottorit pyörittävät öljyjäähdytteisiä akseleita, jotka ovat varustettuna joko positiivisilla tai negatiivisilla jarruilla koneen käyttötarpeen mukaan.

Yksi merkittävä etu on myös sähköisen voimansiirron (kuva 11) mahdollistama yksipoljinajo. Siinä kuljettajan ei normaalissa ajotilanteessa tarvitse lainkaan koskea jarrupolkimeen vaan voimansiirron ominaisuuksien seurauksena ajopolkimen keventäminen mahdollistaa jarrituksen ilman varsinaista jarrupoljinta.



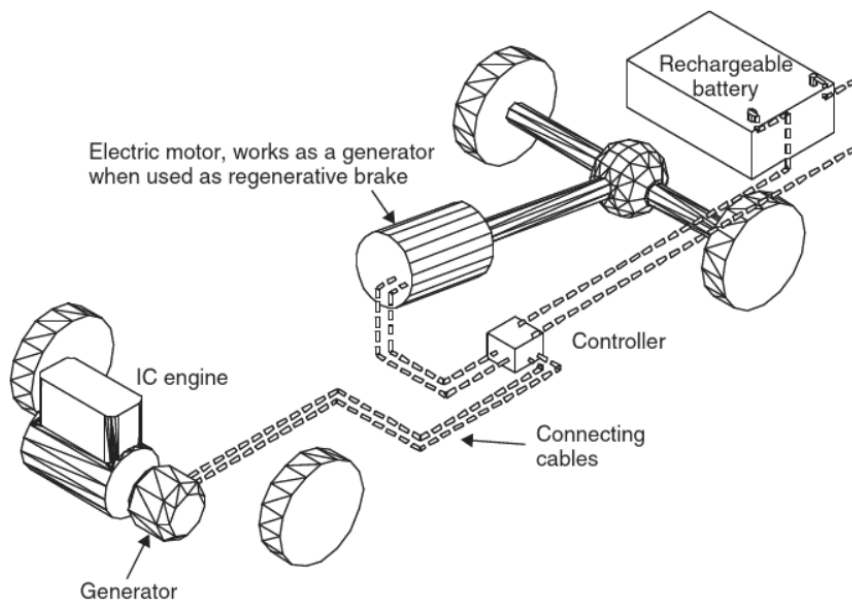
Kuva 11. Sähköisen voimansiirron ansiosta maksimaalinen vääntö on käytössä välittömästi. (Normet, 2023)

4.2 Elektrodynaaminen voimansiirto

Elektrodynaaminen voimansiirto (ED) on peruseriaaltaan samanlainen kuin SmartDrive voimansiirto, mutta merkittävämpänä eroavaisuutena on akuston korvaaminen dieselmoottorilla ja generaattorilla. Dieselmoottorin pyörittämä generaattori tuottaa vaihtosähköä, mikä tasasuunnataan inverttereillä. Tasajännite vaihtosuunnataan invertterien avulla akseleissa sijaitseville sähkömoottoreille kuhunkin tilanteeseen sopivaksi. Etuina tällaisessa hybridivoimansiirrossa on polttoainetaloudellisuus ja sähkömoottoreille ominaiset vääntömomentit verrattuna perinteiseen dieselkoneeseen.

Merkittävämpänä muutoksena perinteiseen saman kokoluokan dieselkoneeseen verrattuna ED:n hyötykuorma on 88 % suurempi. Tämä selittyy dieselkoneissa käytetyn kardaaniin korvaamisella nipulla sähköjohtoja, mikä mahdollistaa joustavamman komponenttien sijoittelun koneeseen. Tämän seurauksena esimerkiksi betonisäiliötä on saatu suurennettua ja pudotettua huomattavasti alaspäin hyötykuorman kasvaessa, mutta koneen fyysisen koon siitä kuitenkin kärsimättä. (Normet, 2023)

Kuvassa 12 on esitetty perinteisen hybridivoimansiirron periaate, missä pääkomponentteina on polttomoottori, sähkömoottori, invertteri ja akusto. (Larminie & Lowry, 2012, s. 20) Normetin käyttämässä hybridivoimansiirrossa esiintyvät nämä edellä mainitut komponentit lukuun ottamatta akustoa. Tämän seurauksena hyötykuorma on lisääntynyt ja koneen ulkomitat pysyneet mahdollisimman kompaktina. Samat ominaisuudet kuitenkin toteutuvat kuten sähköisessä- ja hybridivoimansiirrossa eli sähkömoottoria on mahdollista käyttää jarrutukseen, mutta sen energiaa ei voida varastoida johdettujen akuston puuttumisesta.

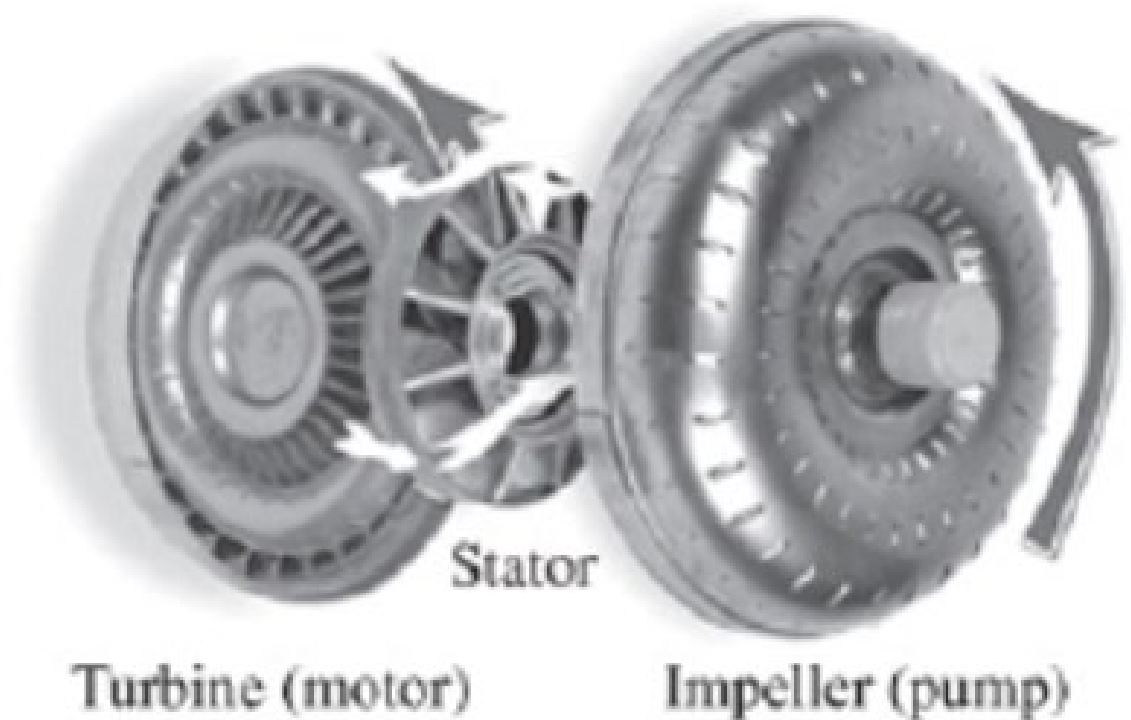


Kuva 12. Hybridivoimansiirron periaate. (Larminie & Lowry, 2012, s. 20)

4.3 Hydrodynaaminen voimansiirto

Hydrodynaamisessa eli momentinmuuntimella varustetussa voimansiirrossa on vastakkain pumppupyörä sekä turbiinipyörä (kuva 13). Näillä komponenteilla ei ole mekaanista yhteyttä toisiinsa vaan ulkoisella voimanlähteellä pyöritettävä pumppupyörä saa aikaan nesteen liikkeen eli virtauksen. Virtaus ohjataan staattorin kautta turbiinipyörälle, mikä välittää voiman kardanin kautta akseleille. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3i)

Momentinmuunnin on myös mahdollista lukita jäykäksi, jolloin sekä pumppu- että turbiinipyörä pyörivät samaa nopeutta eli ns. luistoa ei tapahdu. Normetin koneisiin on saatavilla lisävarusteena mekaaniseen vaihteistoon automaattiominaisuus ohjaamalla vaihteiston venttiilejä Norsmartilla.

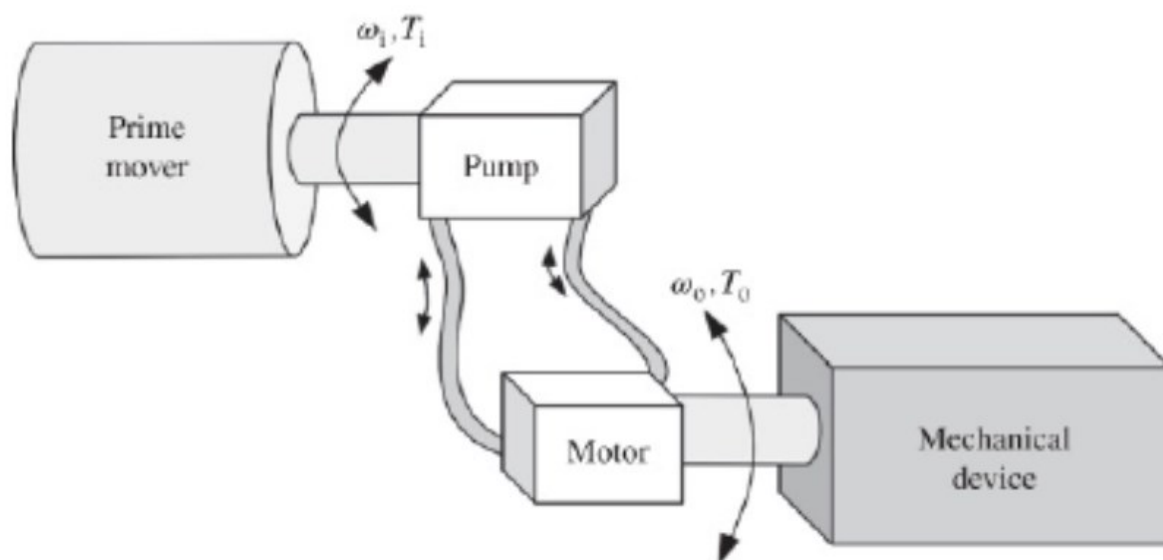


Kuva 13. Momentinmuuntimen toimintaperiaate. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3j)

4.4 Hydrostaattinen voimansiirto

Hydrostaattisessa voimansiirrossa (kuva 14) voima välitetään nesteen avulla, mikä yhdistää hydraulipumpun ja moottorin toisiinsa. Pumpua pyöritetään ulkoisella voimanlähteellä esimerkiksi dieselmoottorilla. Pumppu muuttaa mekaanisen energian hydrauliseksi virtauksen ja paineen muodossa. Hydraulinen energia kulkeutuu nesteenä moottoriin, mikä on kytketty akseliin. Tällöin hydraulinen energia muuttuu takaisin mekaaniseksi energiaksi. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3h)

Hydrostaattisen voimansiirron etuina hydrodynaamiseen voimansiirtoon nähden on tilan säästö. Hydrostaattisessa voimansiirrossa mekaaninen kardaani voidaan korvata hydrauliletkuilla, minkä ansiosta säästyy tilaa. Toinen merkittävä ominaisuus on myös järjestelmän säädettävyys, sekä hydraulipumppuja että moottoreita on saatavissa muuttuvatilavuuksisina, mikä tarkoittaa ominaisuutta säätää hydraulimoottorin- tai pumpun lapojen kulmaa, millä voidaan säädellä nopeutta ja tehoa. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3m)



Kuva 14. Hydrostaattinen voimansiirto. (Costa & Sepehri, 2015, s. 3i)

5 HYDRAULIKÄYTTÖISTEN JARRUJEN TOIMINTA JA KOMPONENTIT

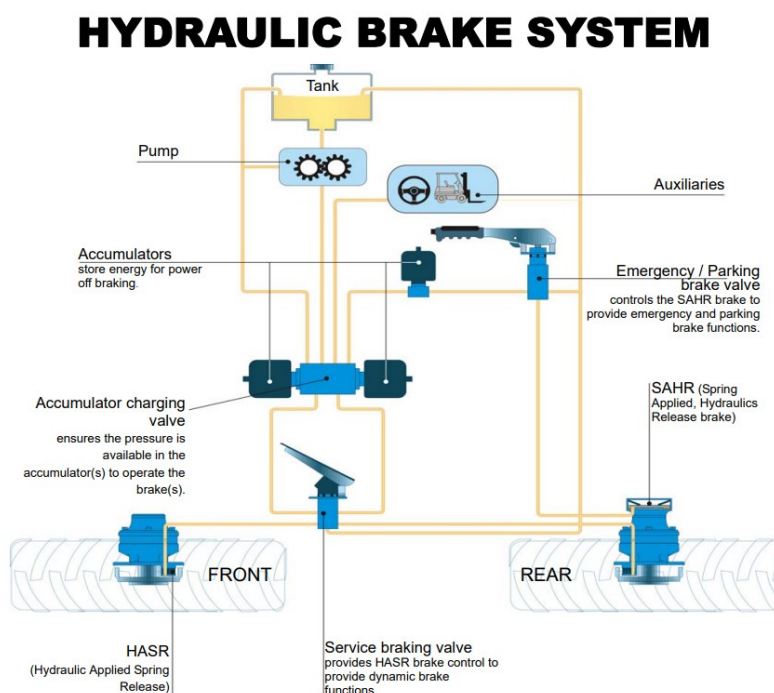
Jarrujärjestelmän ensisijainen tarkoitus on säätää nopeutta kulloinkin vallitsevaan tilanteeseen nähdessä sekä varmistaa tasainen pysähtyminen mahdollisimman lyhyellä matkalla hätätilanteessa. (Sakthivel, ym., 2019, s. 89)

Yli 30:ssä % raskaan kaluston tieliikenteessä kuolemaan johtaneista onnettomuuksista on havaittu ongelmia jarrujärjestelmissä (Sakthivel, ym., 2019, s. 90). Tämä osoittaa jarrujen toiminnan tärkeyden myös kaivosteollisuudessa, missä suurilla koneilla kuljetetaan suuria massoja sekä maanalla että -päällä. Jarrujen oikean toiminnan varmentamisesta onkin säädetty standardeja ja alue- sekä kaivoskohtaisia määräyksiä. Näihin standardeihin ja määräyksiin perustuen tämäkin opinnäytetyö pohjautuu siten, että kaivostyökoneissa on oltava mahdollisuus varmentaa jarrujärjestelmän toiminta. Standardeista ja jarrutesteistä lisää luvussa 7.

5.1 Jarrujärjestelmän pääkomponentit

Normetin koneissa ja yleisestikin raskaammassa maansiirtokoneissa on hydraulikäyttöiset akselijarrut, missä väliaineena käytetään hydraulijäilyä. Hydraulipumppua pyöritetään joko verkkovirralla tai koneen omalla voimanlähteellä. Pumppu pumppaa jarrujärjestelmään öljyä, minkä määrää akseleille säädetään erilaisilla venttiileillä, esimerkiksi jarrupolkimella. Paineakut tasaavat järjestelmän paineeroja ja toimivat myös varajärjestelmänä, mikäli hydraulinen voimantuotto menetetään. Jarrujärjestelmään on sijoiteltuna myös erilaisia järjestelmän toiminnan varmentavia mittauksia, esimerkiksi paineakkujen latauspaine sekä erilaisia paineakytkimiä- ja lähettäjiä. Näiden perusteella voidaan ohjauksijärjestelmällä valvoa jarrujen toimintaa ja esimerkiksi kytkeä jarrut automaattisesti päälle latauspaineen kadotessa.

Hydraulisen jarrujärjestelmän pääkomponentit on esitetty kuvassa 15 ja komponentit on esitelty tarkemmin kuvan alapuolella.



Kuva 15. Hydraulisen jarrujärjestelmän pääkomponentit. (Poclain Hydraulics, 2020, s. 2)

5.1.1 Hydraulioöljy

Hydraulisessa jarrujärjestelmässä väliaineena toimii neste eli hydraulioöljy. Useissa jarrujärjestelmissä kuten kuorma-autoissa väliaineena öljyn sijaan käytetään myös ilmaa tai kaasua, mutta yhdessä asiassa ne auttamattomasti häviävät nesteelle; kokoonpuristuvuudessa. Nesteen kokoonpuristamattomuuden ansiosta se on erinomainen väliaine täsmällisten liikkeiden toteuttamiseen. Käytännössä nestekin hiukan puristuu kokoon paineen alaisena, mutta verrattuna esimerkiksi ilmaan ero on merkittävä. (Aula & Mikkonen, 2021, s. kappale 1.1)

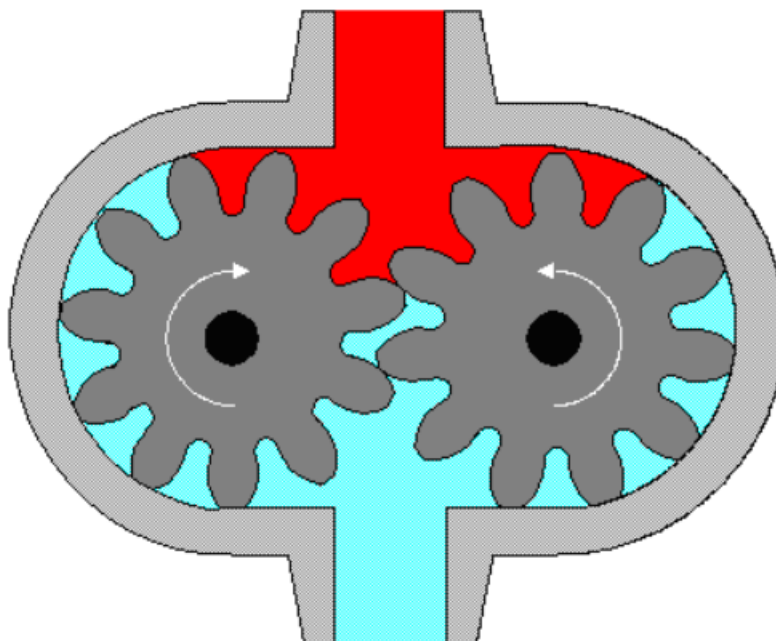
Jarruissa käytettävä hydraulioöljy on varastoituna hydraulioöljysäiliöön eli tankkiin. Jarrujärjestelmä voi käyttää siis samaa öljyä kuin muutkin hydrauliiikan komponentit esimerkiksi tukijalat tai erillistä säiliötä. Hydraulioöljysäiliön tilavuuden tulisi olla 1,5 kertaa hydraulijärjestelmän tilavuuden muutos, kun kaikki liikkeet ajetaan ääriasennosta toiseen, jotta öljyllä on varaa laajentua. (Aula & Mikkonen, 2021, s. kappale 4.3.4) Öljyn määrän suurentamisella myös tehostetaan jarrujen jäähtytystä, mikä taas pidentää ja parantaa jarrujen käyttöikää. Usein säiliöön on myös sijoitettuna erilaisia suodattimia poistamaan järjestelmän epäpuhtauksia, mitkä saattavat vaurioittaa komponentteja. Yleensä järjestelmässä on vähintään sekä imu- että paluusuodatin sekä mahdollisia muita huuhotin- tai painesuodattimia. (Aula & Mikkonen, 2021, s. kappale 4.3.2)

5.1.2 Hydraulipumppu

Yksi oleellisimmista jarrujärjestelmän komponenteista on öljyn liikkeen eli virtauksen aikaansaava hydraulipumppu (kuva 16). Hydraulipumppu saa voimansa tyypillisimmin ulkoisesta voimakoneesta esimerkiksi diesel- tai sähkömoottorista. Hydraulipumppuja on useita erilaisia, mutta yleisimpiä ovat hammaspyörä-, ruuvi-, siipi-, ja mäntäpumput. Nämä taas voidaan jakaa edelleen karkeasti kahteen ryhmään; kiinteätilavuuksisiin ja muuttuvatilavuuksisiin. (Metropolia, 2009, s. kappale 9.2)

Kiinteätilavuuksisissa pumpuissa öljyn tuottoa voidaan säätää vain sen pyörintänopeutta muuttamalla. Käytännössä tämä tarkoittaa pumppua pyörittävän voimakoneen pyörimisnopeuden muuttamista. Tämä ei ole kuitenkaan polttoainetaloudellisesti järkevää ilman välityssuhteen muuttamista. Kiinteätilavuuksisissa pumpuissa sen tuottama ylimääräinen öljy ohjataan varoventtiilin kautta säiliöön aiheuttaen tehohäviöitä ja öljyn lämpenemistä. Yleensä kiinteätilavuuksinen pumppu asetetaan vapaakierrolle, jolloin hukkatahoa ei juurikaan synny. (Aula & Mikkonen, 2021, s. kappale 4.1)

Muuttuvatilavuuksinen pumppu eli käytännössä joko siipi- tai mäntäpumppu tuottaa vähemmän hukkatahoa, koska se tuottaa vain todellista tarvetta vastaavan öljymäärän. Siinä pumpun tuottoa voidaan säätää vinolevyjen kulmaa muuttamalla toisin kuin kiinteätilavuuksisissa pumpuissa, joissa vinolevyyn kulma on kiinteä. Kasvattamalla pumpun kulmaa tuotto lisääntyy. Pumppu ei tuota ollenkaan öljyä, mikäli vinolevyt ovat sylinteriryhmän kiertoliikkeen kanssa saman suuntaiset. Pumpun vinolevyyn kulmaa voidaan säätää esimerkiksi mekaanisesti vivulla tai automaattisesti LS- eli kuorman tuntevan hydrauliiikan perusteella. (Metropolia, 2009, s. kappale 10.2.1) Kun jotakin toimintoa käytetään, painetieto välittyy LS-linjaan ja pumpun vinolevy pääsee jousen painamana kääntymään lisäten pumpun tuottoa (Aula & Mikkonen, 2021, s. kappale 4.1.2).



Kuva 16. Ulkohammaspyöräpumpussa öljy kulkeutuu imupuolelta (sininen) painepuolelle (punainen) hammaspyörien väleissä ulkolaitoja myöten. (Metropolia, 2009)

5.1.3 Paineakku

Hydraulijärjestelmään oleellisena osana kuuluu myös paineakut. Ne varastoivat ja luovuttavat hydraulienenergiaa tarpeen mukaan. Paineakut voivat olla joko paino-, jousi- tai kaasutoimisia (kuva 17). Paineakkuja voidaan käyttää tehostamaan hydraulipumppua tai turvaamaan järjestelmän paine myös hydraulisen voimantuoton menetyksen aikana. Tällöin paineakusta vapautetaan painetta järjestelmään, minkä avulla esimerkiksi kriittisimmät toimenpiteet on vielä mahdollista suorittaa turvallisesti loppuun. (FluidPower Journal, 2020)

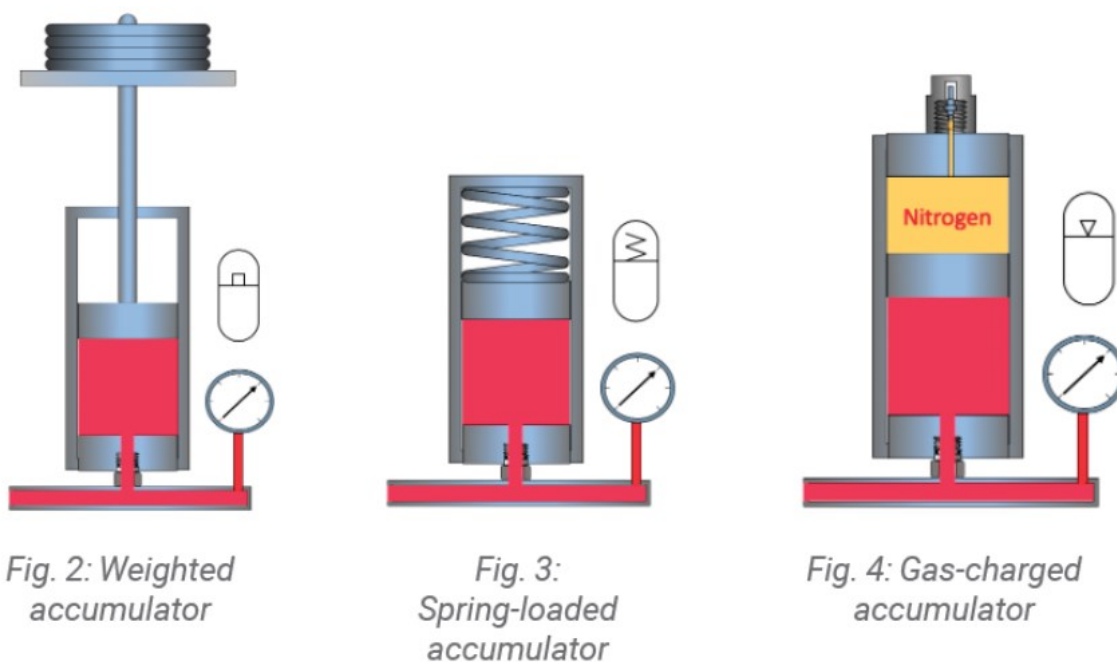


Fig. 2: Weighted accumulator

Fig. 3: Spring-loaded accumulator

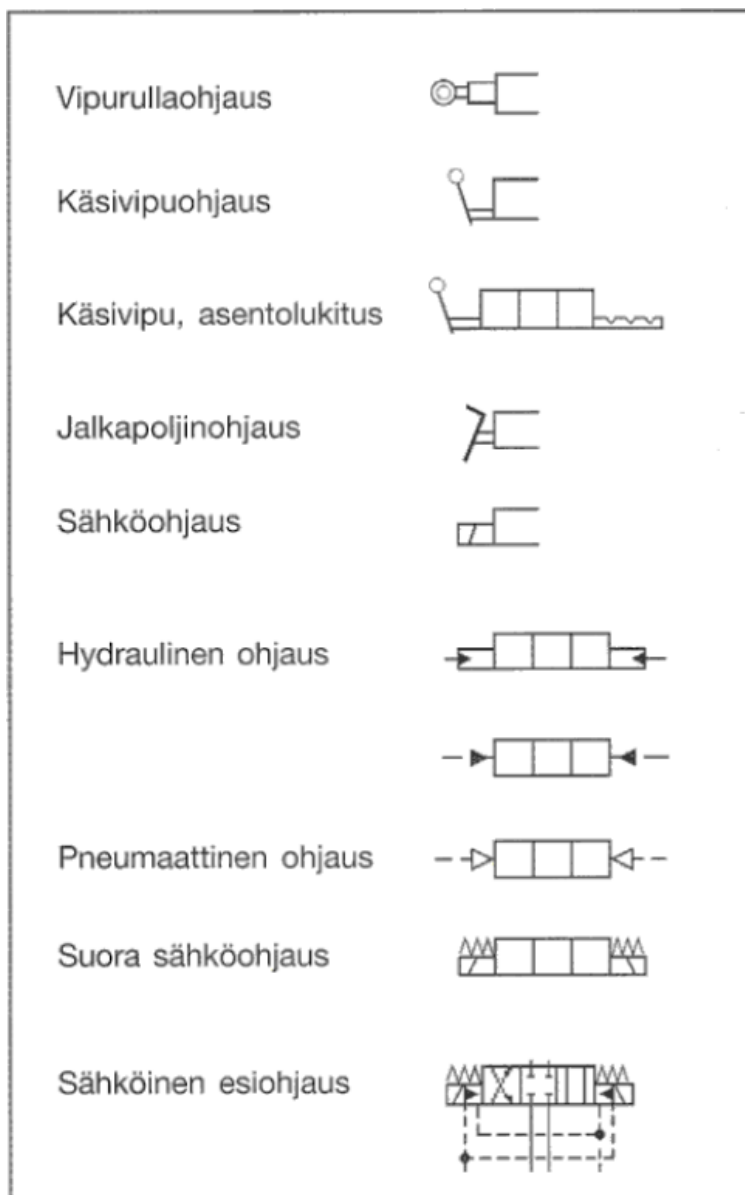
Fig. 4: Gas-charged accumulator

Kuva 17. Paino-, jousi-, ja kaasutoiminen paineakku. (FluidPower Journal, 2020)

5.1.4 Venttiilit

Jarrujärjestelmään oleellisena osana kuuluu myös erilaiset venttiilit. Venttiilin toiminta perustuu karan asennon muuttamiseen säätäen samalla väliaineen virtausta. Tyypillisimmin venttiilit ovat luisti-, istukka- tai kiertyvä karaisia.

Venttiileitä on useaan eri tarkoitukseen esimerkiksi paineenrajoitukseen tai virtauksen suunnan ohjaamiseen, millä voidaan säätää hydraulisylinlerin asentoa. Niitä on saatavilla myös useilla erilaisilla liitännä- ja kytkentävaihtoehdoilla, esimerkiksi 4/3-venttiilissä on paikka neljälle liittynälle ja kolme eri kytkentäasentoa. Venttiilien ohjaustapoja on olemassa useita erilaisia ja yleisimmät on esitetty kuvassa 18. Jarrupoljin on mekaaninen venttiili, jossa hydraulioöljyn virtausta säädetään polkimella venttiilin karan asentoa muuttamalla. (Metropolia, 2009) Sähköisesti ohjatulla proportionaaliventtiilillä voidaan toteuttaa samanlainen toiminto kuin esimerkiksi jarrupolkimella. Sähköisiä venttiilejä voidaan ohjata joko ohjausjärjestelmän kautta automaattisesti esimerkiksi vikatilanteissa tai kuljettajan toimesta.



Kuva 18. Venttiilin erilaisia ohjaustapoja piirrosmerkkeinä. (Metropolia, 2009)

6 JARRUJÄRJESTELMÄT

Jarrujärjestelmät voidaan jakaa yleisesti kolmeen eri kategoriaan; Käyttö-, vara- ja turvajarruiksi. Nämä jarrujärjestelmät sijaitsevat yleensä akseleihin sijoitettuna ja voivat käyttää yhteisiä komponentteja eli ei tarvitse välttämättä olla kolmea erillistä järjestelmää. Jarrutusvoima on mahdollista myös toteuttaa voimansiirtoon sijoitettuna jarruna tai hyödyntämällä diesel- tai sähkömoottoria jarrutuksessa, jolloin puhutaan hidastimista. Hidastimia käytetään tehostamaan jarrutusta tai pitkäkestoisissa jarrutuksissa (Sakthivel, ym., 2019, s. 90).

6.1 Käyttöjarru

Käyttöjarrun ensisijainen tarkoitus on koneen pysäyttäminen ja paikallaan pitäminen. Glencoren vaatimuksen (Glencore, 2021, s. kappale 6.3) mukaan käyttöjarrun on oltava joko hydraulisesti (positiiviset jarrut) tai jousivoimalla (negatiiviset jarrut) kytkeytyvä akselin sisäisillä märkälevyjarruilla varustettu. Käyttöjarrupiirin on oltava erillinen jokaiselle akselille, eli yhden piirin vikaantuminen ei estä koneen pysäyttämistä.

Käyttöjarrua voidaan ohjata jarrupolkimella tai erillisillä sähköisillä proportionaaliventtiileillä esimerkiksi kauko-ohjauksessa tai nopeuden hillitsemisessä. Normetin käyttämissä koneissa on olemassa kahta eri käyttöjarrujärjestelmää; positiiviset – ja negatiiviset jarrut. Jarrujen tyyppi määräytyy koneen massan ja käyttötarkoituksen mukaan, suuret logistiikkalaitteet ovat tyypillisesti varustettu negatiivisilla jarruilla, kun taas pienimmillä koneilla suositetaan positiivisia jarruja.

6.1.1 Positiiviset jarrut

Positiivisissa jarruissa (kuva 19) jarrutusvoima tuotetaan hydraulisesti. Jarrupiirin painetta ja sen määrää säädetään jarrupolkimella tai ohjausjärjestelmän ja sähkötoimisen venttiilin kautta. Mitä enemmän jarrupoljinta painetaan, sitä suurempi paine jarrupiiriin muodostuu painaen jarrulevyjä toisiinsa kiinni tiukemmin. (Ican Company Ltd, 2014)

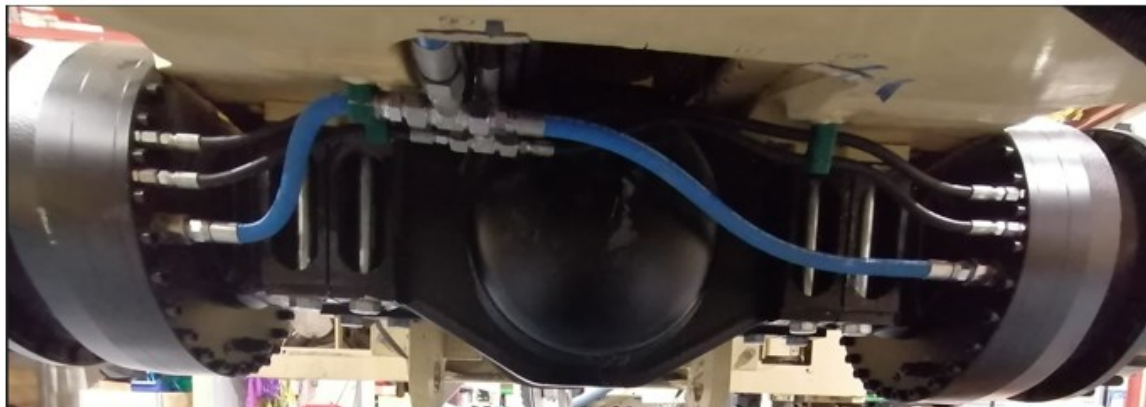


Kuva 19. Positiivisilla jarruilla varustetuissa akseleissa tarvitaan erillinen öljynsyöttö käyttö- ja turvajarrulle (Kaatrasalo 2023).

6.1.2 Negatiiviset jarrut

Negatiivisissa jarruissa (kuva 20) jarrujen ollessa vapautettuina jarrupoljin päästää hydraulipumpulta tulevan öljyn virtaamaan molempiin jarrupiireihin kumoten jousivoiman. Jarrupolkimen painaminen laskee jarrupiirin painetta hydraulioöljysäiliöön ja näin jousivoimalla jarrulevyt kytkeytyvät kiinni toisiinsa aiheuttaen jarrituksen. (Ican Company Ltd, 2014)

Negatiivisista jarruista käytetään nimitystä vikaturvallinen jarrujärjestelmä (Fail-safe), koska paineen kadotessa jarrujärjestelmästä esimerkiksi vian tai koneen sammutuksen seurauksena jarrut kytkeytyvät automaattisesti päälle jousivoiman ansiosta.



Kuva 20. Negatiivisilla jarruilla varustetuissa akseleissa tarvitaan vain yksi öljynsyöttölinja jarruille sekä kaksi linjaa jäähdytykselle (Kaatrasalo 2023).

6.2 Turvajarru

Turva- tai seisontajarrun ensisijaisena tarkoituksena on pitää pysäytetty kone paikallaan ja se voi olla osa varajarrujärjestelmää. Normaalitylanteessa käytetään nimitystä seisontajarru ja vikatilanteessa turvajarru. Koneella, jolla operoidaan kaltevalla tasolla tai rampissa on oltava varustettu turvajarrulla (Ontario.ca, 2022, s. kappale 119. (2)). Turva- tai seisontajarrun on kyettävä pitämään kone paikallaan nimelliskuormalla sen käyttöalueelle määritetyssä rampissa tai tasolla (Ontario.ca, 2022, s. kappale 119. (8)).

Vaatuksena turvajarrulle on hydraulisesti vapautettavat jousivoimalla kytkeytyvät täysin suljetut ja tiiviit märkälevyjarrut. Kuljettajan on harkitulla toiminnallaan saatava turvajarru vapautetuksi sen kytkeydyttyä joko automaattisesti tai manuaalisesti. Turvajarrun kytkeydyttyä se ei saa olla riippuvainen ulkoisesta voimanlähteestä tai kuljettajan lisätoiminnoista. (Glencore, 2021, s. kappale 6.5).

Edellä mainittujen vaatimusten täyttämiseksi kaikissa Normetin koneissa turvajarru on toimintaperiaatteeltaan negatiivinen jousivoimalla kytkeytyvä ja hydraulisesti vapautettava. Näin turvajarru toimii myös varajarruna, mikäli jarrupiirin paine menetetään.

6.3 Varajarru

Varajarru on järjestelmä, jota käytetään koneen pysäyttämiseen, mikäli käyttöjarrujärjestelmässä ilmenee yksittäinen vika. Suosituksena on käyttää jousivoimalla kytkeytyvää ja hydraulisesti vapautettavia märkälevyjarruja. (Glencore, 2021, s. kappale 6.4) Esimerkiksi kaksipiirissä jarrujärjestelmässä, missä etu- ja taka-akseleiden jarrupiirit ovat erilliset, yksittäinen vika ei estä koneen pysäyttämistä.

Lisäksi esimerkiksi Kanadaan toimitettaville koneille on alue- ja kaivoskohtaisena vaatimuksena jarrujärjestelmän tilaa valvova ABA (Automatic Brake Application). Se koostuu jarrujärjestelmän tilaa valvovasta sähköpiiristä, mikä sisältää painelähettimen ja painekeytkimiä, jotka lähettävät tietoa ohjausjärjestelmälle.

ABA-järjestelmällä varustetussa koneessa turvajarrun on kytkeydyttävä automaattisesti positiivisilla jarruilla ennen kuin jarrujärjestelmän paine saavuttaa kriittisen pisteen. Jousikäyttöisillä eli negatiivisilla jarruilla automaattisen kytkeytymisen on tapahduttava ennen kuin painetaso, joka vaaditaan pitämään jarrut täysin vapautettuina saavutetaan. (Glencore, 2021, s. kappale 6.7.12.2)

Normet on halunnut erotella positiivisten- ja negatiivisten jarrujen valvonnan käyttäen negatiivisia jarruja valvovasta järjestelmästä nimitystä ABA (Automatic Brake Application) ja positiivisia jarruja valvovasta järjestelmästä nimitystä RABA (Redundant Automatic Brake Application). Sanalla Redundant eli kahdentamisella viitataan molempiin jarrupiireihin sijoitettuihin painekeytkimiin, kun ABA-järjestelmässä ne ovat sijoitettuina vain yhteiseen molempia jarrupiirejä syöttävään linjaan.

ABA ja RABA ominaisuus ovat lisävarusteita ja mikäli kone ei sisällä tätä ominaisuutta jarrujärjestelmästä puuttuu sen tarkkailuun vaaditut komponentit. Jokaisessa Normetin koneessa jarrupiirinpaineen mittausta on kuitenkin vakiona. Tieto jarrujärjestelmän tilasta välitetään Norsmartille ja matala jarrupiirin paine välittyy kuljettajalle näyttöön, mutta jarruja ei kytkeä automaattisesti päälle.

6.4 Proportionaalijarrut

Proportionaalijarruilla voidaan toteuttaa jarrutus kauko-ohjauksessa tai ohjelmallisesti rajoittaa koneen ylinopeutta. Proportionaaliventtiilit asennetaan jarrupolkimen rinnalle, jolloin niitä sähköisesti ohjaamalla saadaan vastaava toiminto kuin jarrupolkimella.

6.5 Hidastimet

Kaivoskoneilla kuljetetaan suuria massoja pitkiäkin matkoja alamäkeen, jolloin koneen nopeutta on rajoitettava. Käyttäjarruja ei ole suunniteltu tällaiseen yhtäjaksoiseen useiden kilometrien pituiseen jarrutukseen, joten siihen on kehitetty erilaisia hidastimia. Käyttämällä hidastimia jarrutukseen varsinainen käyttäjarrujen huoltotarve ja sitä kautta kustannukset vähenevät merkittävästi sekä jarrut pysyvät viileämpänä parantaen jarrutusvoimaa.

6.5.1 Moottorijarru

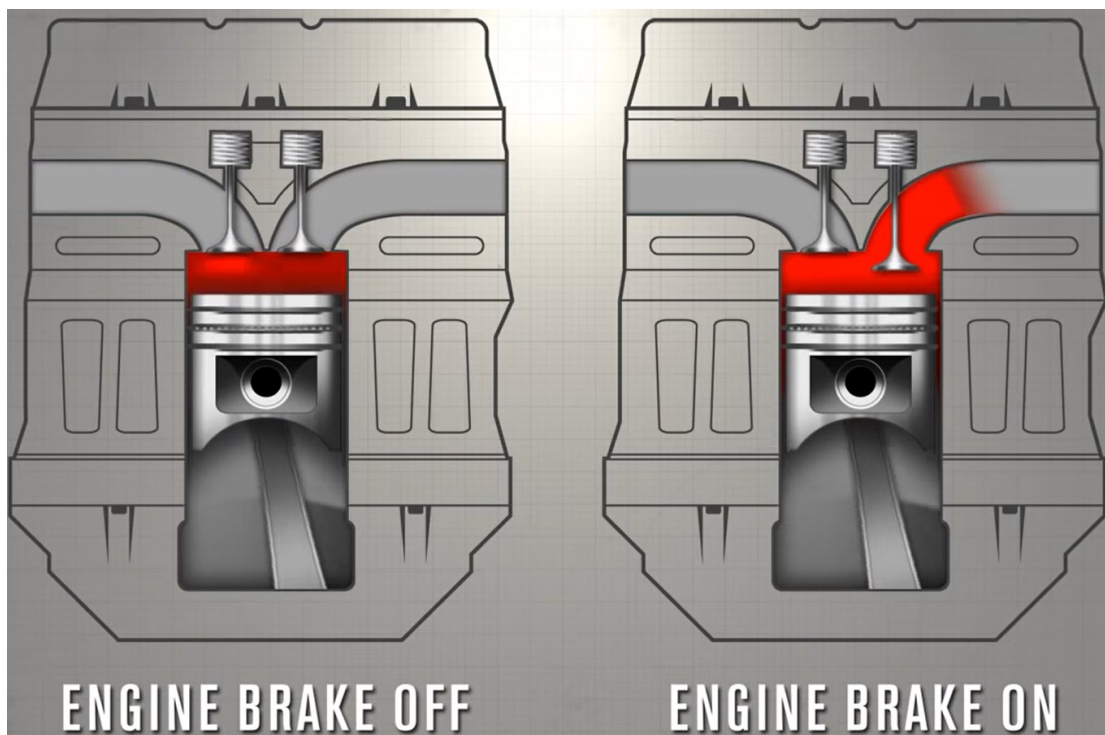
Moottorijarru on yksi sovellus dieselmoottorisissa kaivoskoneissa käytetyistä hidastimista. Dieselmoottoreilla ei luonnostaan saavuteta samanlaista moottorijarrutusta kuin bensiinikäyttöisillä moottoreilla, koska dieselmoottorin toiminta perustuu polttoaineen säätelyyn toisin kuin bensiinimootto-reissa säädellään ilman määrää kaasuläpällä. Kaasuläpän ansiosta on mahdollista luoda moottorijarrutus ohjaamalla kaasuläppä lähes kiinni saavuttaen luontaisesti moottorijarrutus. Niinpä dieselmoottoreihin on kehitetty erilaisia pakokaasun virtausta sääteleviä järjestelmiä, joilla on saatu aikaan moottorijarrutus. (Universal Technical Institute, 2020)

Moottorijarruja on saatavilla usealla eri toimintaperiaatteella. Yleisimmin niiden toiminta kuitenkin perustuu joko pakokaasun poistumisen rajoittamiseen tai sen päästämiseen ennaikaisesti vapautumaan moottorista. Pakokaasun pääsyä rajoitettaessa pakoputkistoon asennetaan läppä (kuva 21), mitä säätelämällä luodaan moottorin pyörimistä vastustava vastapaine. Tällöin moottori joutuu poistotahdinkin aikana puristamaan ilmaa kokoon ja sylintereihin varastoitunut ilma vastustaa männän liikettä hidastaen kampiakselin pyörimisnopeutta. (Jacobs Vehicle Systems, 2023)



Kuva 21. Pakokaasun virtausta vastustavan läpän asentoa voidaan ohjata automaattisesti esimerkiksi kaasupolkimen asentoon perustuen. (Jacobs Vehicle Systems, 2023)

Toinen yleinen käytössä oleva moottorijarru on esitetty kuvassa 22. Sen toiminta perustuu palokaasujen ennenaikaiseen vapauttamiseen pakoputkistoon. Tämä tapahtuu ohjaamalla pakoventtiilit auki puristustahdin lopussa, jolloin sylinterissä olevan ilman puristamiseen käytettyä energiaa ei palauteta moottoriin vaan se vapautetaan pakoputkistoon. Normaalisti puristustahdissa pakoventtiilit ovat kiinni, jolloin puristetut palokaasut työntävät mäntää alaspäin aiheuttaen pystysuuntaisen liikkeen, minkä kampiakseli muuttaa pyöriväksi liikkeeksi.



Kuva 22. Männän liikettä voimistavat palokaasut päästetään karkaamaan pakoputkistoon avaamalla pakoventtiilit moottorijarrutuksessa. (Jacobs Vehicle Systems, 2023)

6.5.2 Pyörrevirtahidastin

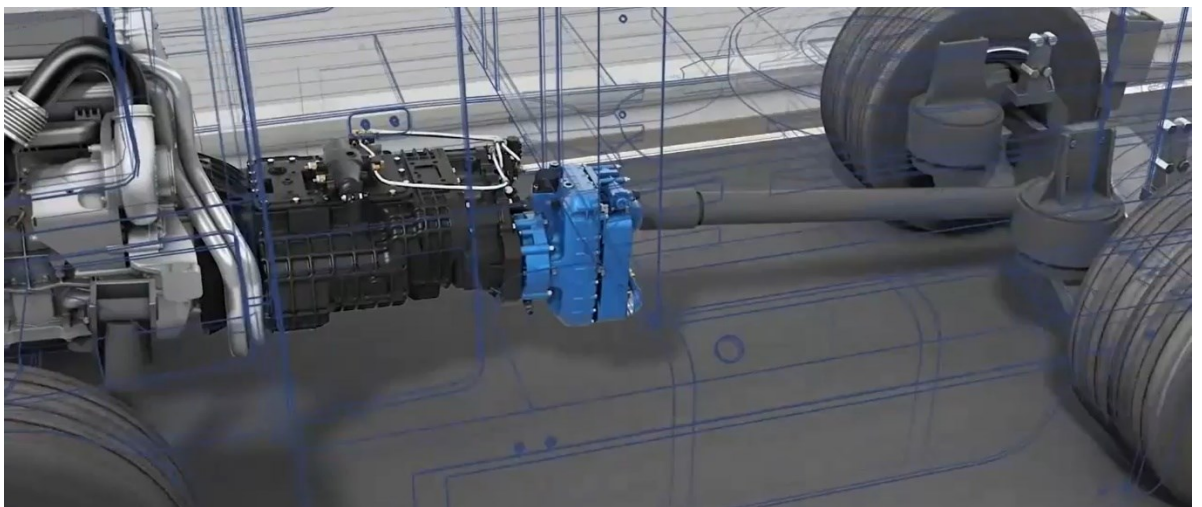
Myös pyörrevirtakäyttöiset hidastimet (kuva 23) ovat yleisesti käytössä. Niiden toiminta ei perustu ollenkaan kitkaan, vaan sähköiseen ilmiöön, missä paikallaan olevan staattorin molemmin puolin on voimansiirtoon kytketyt metallilevyt, roottorit. Jarrutuksen aktivoitua staattorin sähkömagneetit virroitetaan, jolloin roottoreihin indusoituu pyörrevirtoja. Nämä pyörrevirrat pyrkivät vastustamaan roottorin liikettä samalla hidastaen koko voimansiirron pyörimisnopeutta ja muuttaen kineettisen energian lämmöksi. (Telma S.A.S, 2023)



Kuva 23. Pyörrevirtahidastimessa kineettinen energia muuttuu lämmöksi. (Telma S.A.S, 2023)

6.5.3 Hydrodynaaminen hidastin

Hydrodynaamisilla hidastimilla (kuva 24) saadaan aikaan vastaavanlainen jarrutus kuin pyörrevirtahidastimilla, mutta niissä väliaineena toimii neste. Nesteenä voidaan käyttää esimerkiksi vaihteistoöljyä tai moottorin jäähdytysnestettä. Jarrutuksen aktivoituessa neste ohjataan pyörivän roottorin ja kiinteän staattorin lävitse, jolloin staattori liikuu akselilla jarrutustilaan hidastaen samalla voimansiirron pyörimisnopeutta. Jarrutuksen yhteydessä kineettinen energia sitoutuu lämpönä nesteeseen. (Voith GmbH & Co, 2023)

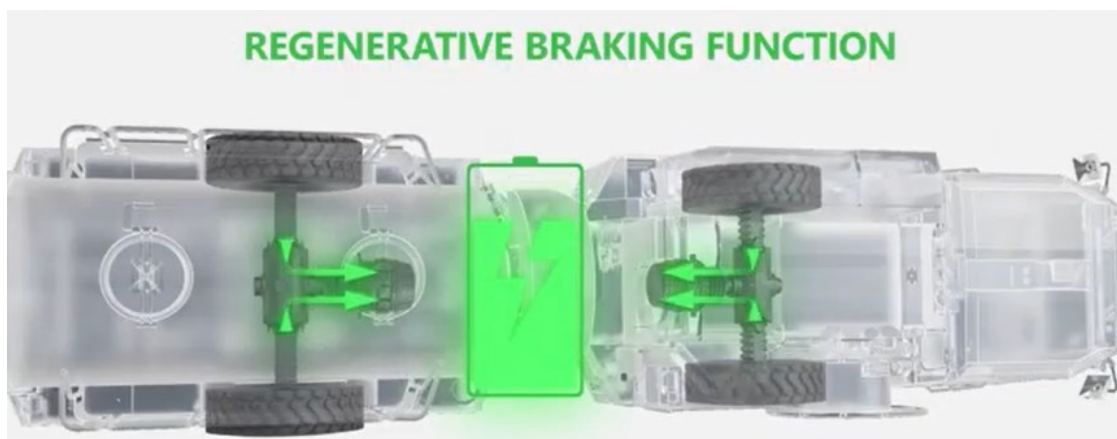


Kuva 24. Hydrodynaaminen hidastin asennettuna vaihteiston yhteyteen. (Voith GmbH & Co, 2023)

6.5.4 Regeneroiva jarrutus

Regeneroivassa jarrutuksessa voimansiirron sähkömoottorit toimivat generaattoreina muuntaen kiineettisen energian sähköiseksi. Sähköinen energia voidaan varastoida esimerkiksi akustoon tai kondensaattoreihin. (Larminie & Lowry , 2012, s. 5)

Sähköisellä- ja hybridivoimansiirrolla varustetuissa kaivoskoneissa regenerointi mahdollistaa yksipoljin ajon, missä kuljettajan nostaessa jalkaa ajopolkimelta kone hidastuu regeneroinnin seurauksena ilman tarvetta painaa jarrupoljinta. Regenerointi on taloudellinen ominaisuus kaivoskoneissa, koska sen avulla energiaa voidaan varastoida akustoon kaivoksen pohjalle ajettaessa ja ylös tultaessa taas ottaa akustosta energiaa. Kuvassa 25 on esitetty sähköisen voimansiirron regeneroivan jarrutuksen toiminta.



Kuva 25. Regeneroivan jarrutuksen ansiosta käyttöjarrujen elinikä pitenee. (Normet, 2023)

6.5.5 Jarruvastus

Sähkö- ja hybridi voimansiirrolla varustetuissa koneissa on mahdollista käyttää jarruvastusta (kuva 26) nopeuden hillitsemiseen. Jarruvastuksen toiminta perustuu sähköisen energian muuttamiseksi lämpöenergiaksi. Jarrutuksessa syntyvää lämpöä voidaan hukkalämmöksi muuttamisen sijaan hyödyntää esimerkiksi koneen sisätilojen lämmitykseen.

Jarruvastuksen resistanssin määrittävät sähköiset suureet, vastukselle syötettävä hetkellinen ja jatkuva teho. Jarrutusenergia ohjataan välipiiriin kytkettyyn jarruvastukseen jarrukatkojan kautta, mikä aktivoituu automaattisesti välipiirin jännitteen noustessa yli raja-arvon. Jarruvastusta ei ole suunniteltu jatkuviin ja pitkäaikaisiin käyttöihin vaan se toimii osana muuta järjestelmää. (ABB Automation Group Ltd, 2001, ss. 16-17)



Kuva 26. Hybridilinja-autoissa matkustamon lämmitys on tyypillisesti toteutettu jarruvastuksella. (Hanzestrohm, 2019)

7 TYÖN TOTEUTUS JA TULOKSET

Työ toteutettiin tutkimus- ja kehitystyönä, minkä lähtökohtana hyödynnettiin vanhoja jarrutestejä. Näistä kerättiin tietoa ja kuunneltiin koeajajien toiveita, minkä lopputuloksena syntyi uudistetut jarrutestit, joiden toiminta on virtuaalisesti varmennettu.

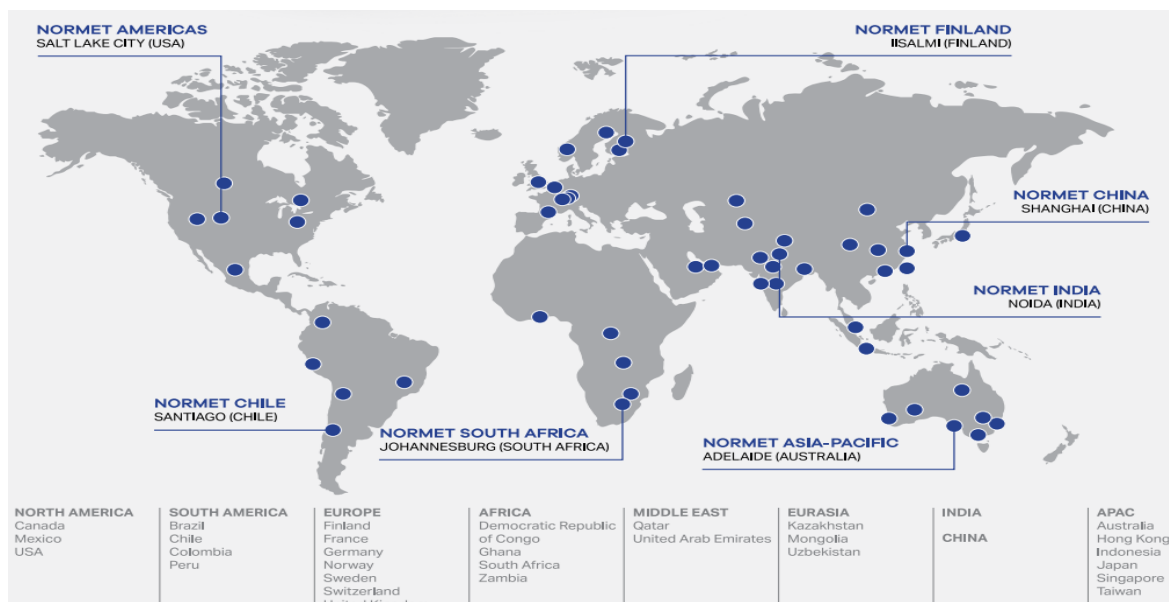
7.1 Vanhat jarrutestit

Vanhat jarrutestit olivat myös mahdollista suorittaa ohjausjärjestelmän kautta, mutta testinäkömään pääsemiseksi oli suoritettava erinäköisiä toimenpiteitä, jotka on ohjeistettu ohjekirjassa sekä ohjaamoon sijoitetuissa tarroissa. Testien suorituksen kuitenkin tekee haastavaksi usean eri toiminnon suorittaminen oikeassa järjestyksessä nopealla syklillä. Testin aloittamiseksi on painettava jarrutestipainiketta ja suoritettava kullekin jarrujärjestelmän testaukselle vaaditut toimenpiteet. Ohjausjärjestelmä tunnistaa signaalitietojen perusteella, minkä testin kuljettaja aikoo suorittaa. Esimerkiksi käyttäjarrua testattaessa turvajarrun on oltava vapautettuna, ajosuunta kytkettynä ja kaasua ja jarrupoljin painettuna. Nämä kaikki tulee suorittaa oikeassa järjestyksessä tietyn aikaikkunan sisään.

7.2 Standardit ja vaatimukset

Jarrutestit pohjautuvat standardeihin ja aluekohtaisiin vaatimuksiin. Koneiden jarrujärjestelmä muokataan kunkin alueen vaatimuksien mukaiseksi ja sen seurauksena erilaisia jarrujärjestelmiä on käytössä. Esimerkiksi kansainvälisen standardoimisjärjestön ISO 3450:2011 standardi määrittää maansiirtotyökoneille, jotka toimivat työmailla tai kaivostoiminnassa jarrujärjestelmän vaatimukset. Käyttö- ja turvajarrun toiminta on varmennettava päivittäin. Mikäli edellä mainituissa jarrujärjestelmien testauksessa ei voida varmentaa turvajarrun toimintaa on sen toiminta myös testattava. (ISO 3450, 2011, s. 9)

Normetin koneita operoidaan usealla mantereella eri puolilla maailmaa (kuva 27). Useilla mailla ja kaivosyhtiöillä on omia standardejaan sekä alue- ja kaivoskohtaisia vaatimuksia jarrujärjestelmien toiminnan ja testauksen suhteen. Normetin markkina-alueesta Etelä-Afrikkalaisten vaatima SABS 1589 standardi määrittää kaikista tiukimmat vaatimukset turva- ja käyttäjarrujen toiminnalle. Käyttäjarrulla on voitava hidastaa konetta 0,4 g:n voimalla ja koneen on pysyttävä paikallaan turvajarrulla 32 %:n kaltevuudella nimelliskuormattuna. Jarrutesteillä on testattava jarrujärjestelmän toimivuus ja se on määrätty suoritettavaksi staattisena eli koneen ollessa paikallaan. (SABS 1589, 1994)



Kuva 27. Normetilla on asiakkaita sekä toimipaikkoja ympäri maailmaa, joten myös alue- ja kaivoskohtaisia vaatimuksia koneiden toiminnalle on runsaasti. (Normet Group Oy, 2022)

Turva- ja käyttäjarrutestissä jarrujärjestelmään kohdistetaan edellä mainittua (SABS 1589, 1994) standardin vaatimusta vastaava vääntömomentti koneen omalla voimanlähteellä. Voimansiirto asetetaan kunkin konetyypin vaatimusten mukaiseen tilaan. Testin aikana tarkkaillaan jarruihin kohdistuvan vääntömomentin suuruutta ja testin aikana liikuttua matkaa. Näiden perusteella kuljettajalle näytetään tieto testin tuloksesta.

Glencoren spesifikaatio taas määrittää varajarrujärjestelmän tilaa valvovalle ABA- ja RABA järjestelmälle testivaatimukset. Päivittäisen testauksen on aktivoitava jokainen painekeytkin ja varmennettava niiden toiminta ja asetusrivot sekä testattava merkkivalojen toiminta (Glencore, 2021). Testi suoritetaan staattisena ja järjestelmän painetta lasketaan avaamalla paineenpurkuventtiilit ohjelmallisesti. Paineen laskiessa varmistetaan painekeytkinten, -lähettimien sekä myös paineakkujen toiminnasta. Norsmart-ohjausjärjestelmä valvoo myös jarrujen päälle kytkeytymistä oikealla hetkellä sekä merkkivalojen toimintaa. Näiden perusteella testin tulos ilmoitetaan kuljettajalle.

Proportionaalijarrujen testausta ei ole vaadittu standardeissa eikä alue- tai kaivoskohtaisissa vaatimuksissa, mutta Normet esimerkillisenä toimijana mahdollistaa myös niiden toiminnan varmentamisen. Kuljettajalla on mahdollisuus edellä mainittujen pakollisten jarrutestien lisäksi testata myös proportionaalijarrujen toiminta.

7.3 Työn toiminnallinen osuus

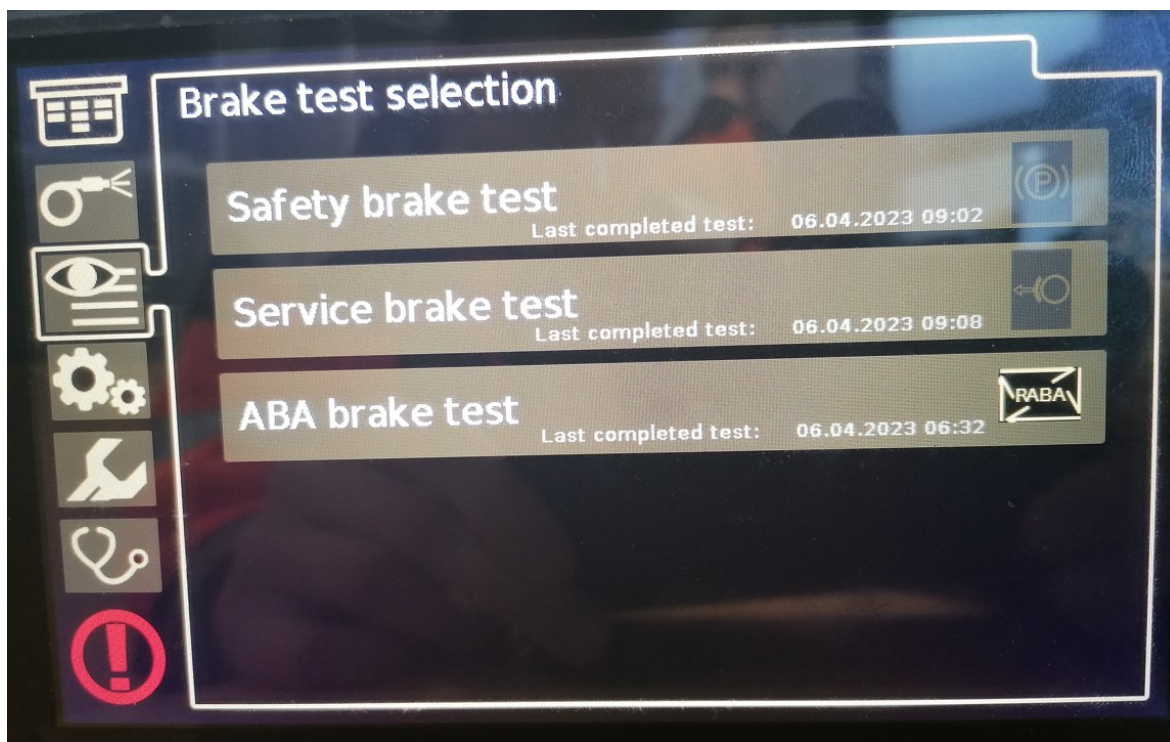
Opinnäytetyössä luotiin kokonaan uusi jarrutesti negatiivisen varajarrujärjestelmän toiminnan varmentavalle ABA-järjestelmälle sekä päivitettiin jo olemassa olevat jarrutestit kaikille neljälle voimansiirtotyypille sekä positiivisille että negatiivisille jarruille. Jarrutesteistä laadittiin toimintakuvaukset eli spesifikaatiot, joiden pohjalta koodattiin Norsmart-ohjausjärjestelmään kyseinen toiminnallisuus, minkä toiminta varmennettiin virtuaalitestauksella.

Työ aloitettiin perehtymällä vanhoihin testeihin. Testejä suoritettiin useilla eri konetyypeillä ja testeistä otettiin CAN-väylältä nauhoituksia tarkempia tutkimuksia varten (kuva 28). Testejä suoritettaessa ja nauhoituksia tutkiessa havaittiin muutamia epäkohtia, joilla testiä voitiin ns. huijata. Esimerkiksi turvajarrua testattaessa testiä ei hylätty, mikäli myös käyttöjarrua painettiin. Tällöin kuljettajalle voi jäädä virheellinen käsitys turvajarrun toiminnasta, mikäli ohjausjärjestelmä ei hylkää testiä virheellistä suorituksesta tai infoa siitä. Myös graafisessa näkymässä havaittiin parantamisen varaa, esimerkiksi jokaiselle konetyypille oli käytössä kaikille testeille sama näkymä, jolloin osa näytetyistä arvoista tai venttiileistä ei ollut valideja kyseiselle koneelle tai testille.



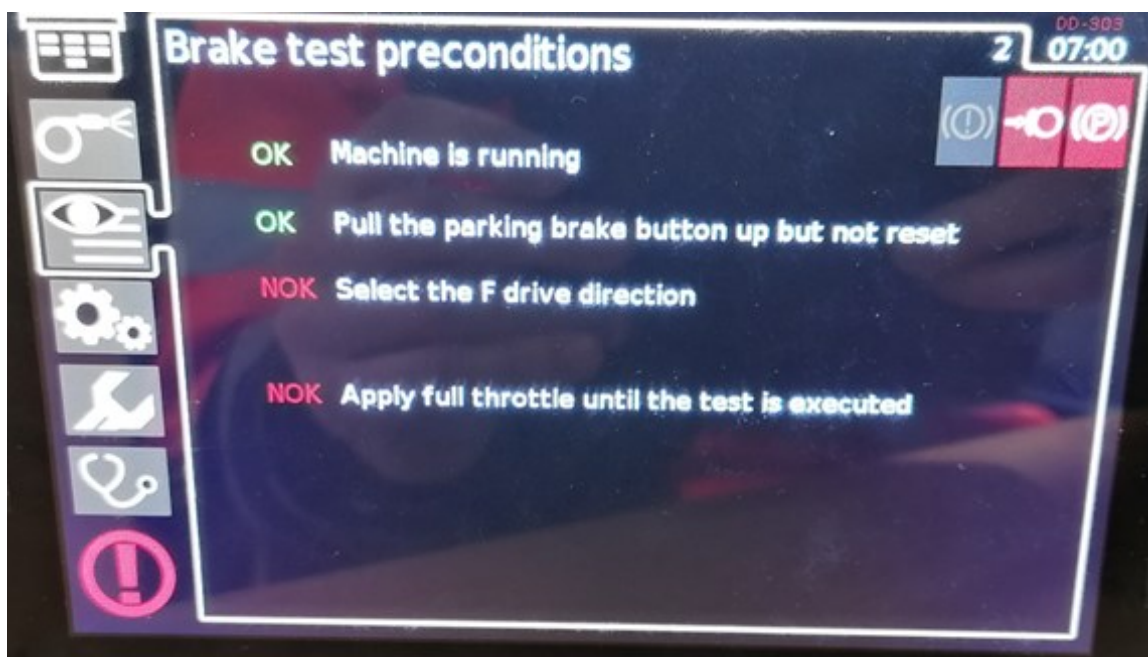
Kuva 28. Jarrutestien toimintaa voi seurata CAN-väylän kautta (Kaatrasalo 2023).

Vanhat testit toimivat hyvänä lähtökohdana uusien testien suunnittelulle. Alusta alkaen lähtökohdaksi valittiin kuljettajaa ohjeistava interaktiivinen testinäkymä. Normetin koneissa ajonäyttönä toimiva MIDi mahdollistaa informaatioiden näyttämisen ja kuljettajan ohjeistamisen. Tätä päätettiin hyödyntää siten, että jarrutestinapin painaminen avaa kuljettajalle valintaikkunan (kuva 29), mistä hän voi valita suoritettavaksi haluamansa jarrutestin. Samalla hän näkee viimeisimmän hyväksytysti suoritettun jarrutestin.



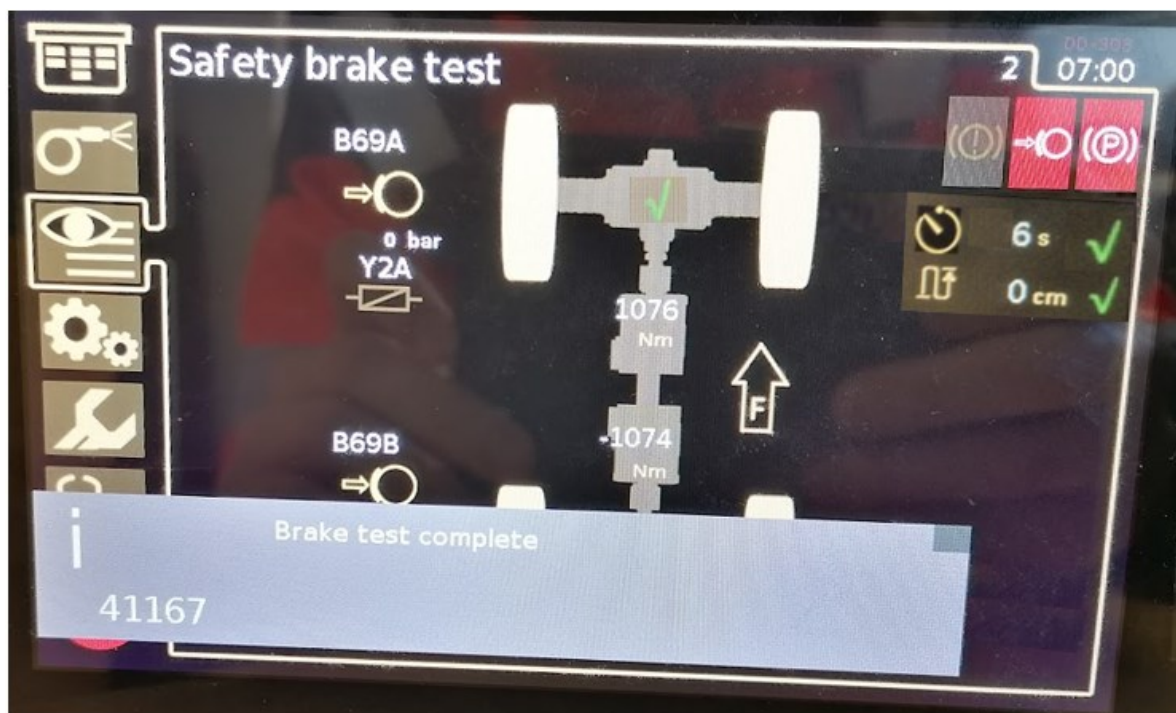
Kuva 29. Kuljettajan tarvitsee painaa vain yhtä nappia päästäkseen tähän näkymään (Kaatrasalo 2023).

Valitsemalla jonkin jarrutesteistä kuljettajalle avautuu näkyviin kyseisen testin suorittamiseen vaadittavat alkuehdot, joiden tila on indikoitu selkeästi värein ja tekstillä, kuten kuvassa 30. Varsinainen testi avautuu, kun ehdot ovat täytetty. Yhtenä merkittävänä parannuksena uusissa testeissä ei ole kiirettä testien suorittamiselle vaan kuljettaja voi rauhassa asetella koneen haluttuun tilaan seuraamalla ohjeistusta.



Kuva 30. Uusissa jarrutesteissä kuljettajan on helppo asettaa kone vaadittuun tilaan seuraamalla ohjeistusta näytöltä (Kaatrasalo 2023).

Parannuksena testin aikana kuljettajalle näytettävään ikkunaan suunniteltiin jokaiselle voimansiirtotyyppille sekä positiivisilla että negatiivisilla jarruilla varustetuille koneille omat testinäkymät (kuva 31). Näkymä generoidaan koneen IOMuxista löytyvien signaalien ja kuljettajan valitseman testin perusteella. Näin saatiin luotua kuljettajaystävällisempi vaikutelma komponentit sijoiteltuna siten, kuten ne oikeassakin koneessa ovat. Esimerkiksi koneen etuakselin mittaukset ja venttiilit on aseteltu myös testinäkymässä vastaavasti. Tämän ansiosta operaattorin tai huoltomiehen on helpompi lähteä selvittämään vikaa, koska heillä on jonkinlainen näkemys, missä komponentti sijaitsee tai mihin osaan konetta se vaikuttaa.



Kuva 31. Jarrutestinäkymä on riippuvainen konetyypistä sekä kuljettajan valitsemasta jarrutestistä. (Kaatrasalo 2023).

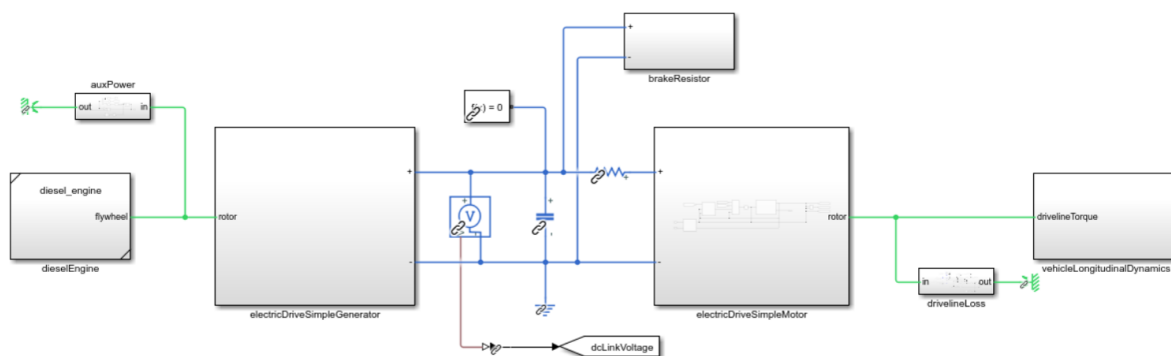
8 VIRTUAALITESTAUS

Virtuaalitestaus on koneen toiminnan varmentamista digitaalisessa ympäristössä. Sitä käytetään ohjausjärjestelmien testaukseen ja validointiin hyödyntämällä virtuaalimallia. Virtuaalimalli on digitaalinen kaksonen oikeasta koneesta. Tämä tarkoittaa sitä, että virtuaalimalliin on mallinnettu vastaavat toiminnot kuin oikeassakin koneessa. Virtuaalitestauksen etuina on eri skenaarioiden testaaminen, mitkä voisivat olla joko vaarallisia tai mahdottomia toteuttaa oikealla koneella. Virtuaalitestauksella on myös helppo testata uusia toiminnallisuuksia. Testauksella voidaan jo varhaisessa vaiheessa havaita suunnitteluvirheitä, minkä ansiosta ne eivät päädy protokoneisiin eivätkä aiheuta ylimääräisiä kuluja.

8.1 Digitaalinen kaksonen

Digitaalisella kaksosella (Digital Twin) tarkoitetaan mahdollisimman tarkasti fyysisestä koneesta luotua virtuaalista mallia. Käsitteenä digitaalinen kaksonen on suhteellisen tuore ja laaja käsite, mikä voi pitää sisällään yksittäisen mallin tai kokonaisen tuotantolinjaston. Kuvassa 32 on esitetty yksinkertaistettuna kaivoskoneen digitaalinen kaksonen. Digitaalisen kaksosen luomisessa voidaan käyttää hyväksi todellisia tietoja ja mittauksia, joita on kerätty fyysisestä mallista (Mevea Ltd, Julkaisuaika tuntematon).

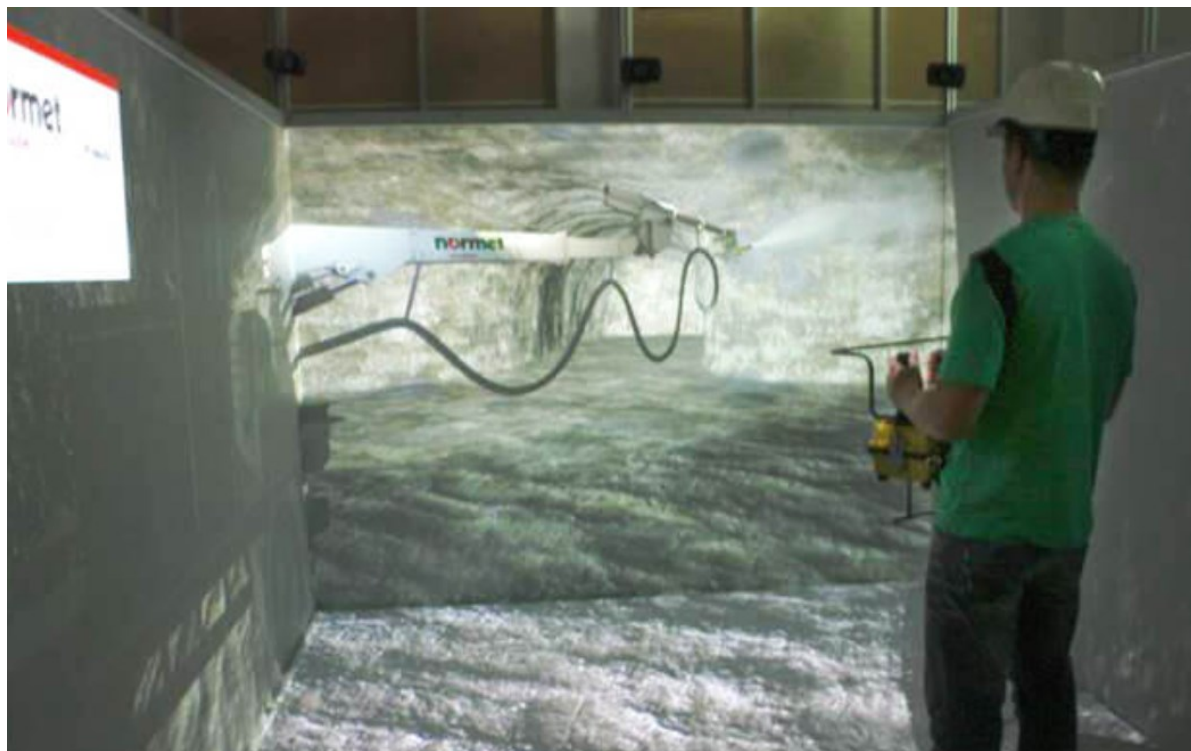
Normet on panostanut virtuaalitestaukseen ja se onkin mallintanut digitaaliset kaksokset eri voimalinjoista ja jarrujärjestelmistä. Näitä malleja käytetään hyväksi suunnittelussa ja uusien ominaisuuksien testauksessa ennen fyysisiä testejä protokoneella. Tässäkin opinnäytetyössä käytettiin hyväksi digitaalista kaksosta. Hybridivoimansiirrolla ja negatiivisilla jarruilla varustettua digitaalista kaksosta vasten testattiin Robot Frameworkilla laaditut testiskenaariot ja ne ajettiin Norsmart-ohjausjärjestelmäkoodia vasten. Näin voitiin tarkastella, miten ohjausjärjestelmä suoriutuu ja toipuu erilaisista tilanteista, mitä jarrutestien aikana voi tapahtua. Osaa näistä testeistä olisi ollut lähes mahdotonta tai vaarallista testata oikealla koneella.



Kuva 32. Digitaalinen kaksonen on virtuaalinen malli oikeasta koneesta (Normet, 2022).

Digitaalista kaksosta voi käyttää hyödyksi monella eri tapaa myös suunnittelun lisäksi esimerkiksi markkinoinnissa ja koulutuksessa. Normet hyödyntää sitä sekä oman huoltohenkilökunnan että asiakkaiden koulutuksessa. Simulaattorilla tapahtuva koulutus on tehokasta ja kustannustaloudellista (kuva 33). Esimerkiksi betoninruiskutuksen opetteleminen kaikkine lisäaineineen tulisi kalliiksi ilman

mahdollisuutta harjoitella ensiksi virtuaalisesti. Virtuaalisen koulutuksen yhtenä merkittävänä etuna on myös paikasta riippumattomuus.



Kuva 33. Simulaattorikoulutus on kustannustehokasta (Mevea Ltd, Julkaisuaika tuntematon).

8.2 Robot Framework

Robot Framework on Pekka Klärckin vuonna 2005 diplomityön seurauksena alkunsa saanut avoimen lähdekoodin automaatiokehys. Sitä voidaan käyttää testiautomaatiossa testitapausten kirjoittamiseen ja testaamiseen. Robot Frameworkillä testitapausten kirjoittaminen ei vaadi varsinaista koodausta. Testitapaukset voidaan kirjoittaa joko käyttäen Robot Frameworkin sisäistä RIDE-tekstieditointia tai jotain muuta tekstinkäsittelyohjelmaa. Etuina RIDEä käytettäessä on automaattinen muotoilu ja avainsanojen korostaminen. (Tieturi Oy, 2023)

Testitapausten kirjoittaminen pohjautuu avainsanoihin. Ne voivat koostua sisäänrakennetuista avainsanoista tai niitä voi luoda itse. Avainsanat pitävät sisällään monimutkaisemman tai useamman toiminnon. Näin testikoodista saadaan luotua mahdollisimman selkeä nimeämällä avainsanat mahdollisimman kuvaavasti. Testitapausten lukeminen on helppoa käyttäen loogisesti nimettyjä avainsanoja.

Jarrutesteille laadittiin omat testitapaukset, mitkä pohjautuivat spesifikaatioon ja kuljettajan mahdollisiin virhetoimintoihin testin aikana. Käytännössä testeissä voidaan testata lähes mitä tahansa, mutta tässä työssä keskityttiin turvallisuuden kannalta kriittisimpiin tapauksiin. Testitapauksiin luotiin erilaisia vikatilanteita kuten kuvassa 34, jossa simuloitiin koneen liikkumista yli sallitun rajan ja tarkasteltiin, että ohjausjärjestelmä asettaa ajopyynnin nolla-arvoon.


```

37 *** Test Cases ***
38 Verify That DriveEnabled Goes Zero And Fails If Travelled distance > 30 cm
39   [Tags]      Safety brake test      XL23
40   Safety Brake Preconditions OK
41   Sleep      0.1
42   Set RPM Simple    ${ThrottleBraketestRPM}
43   Sleep      0.1
44   Set Signal      sim_BrakeTestFault    ${1}
45   Sleep      1.4    # Moves about 50 cm
46   Set Signal      sim_BrakeTestFault    ${0}
47   Set RPM Simple    ${ThrottleIdleRaw}
48   Wait for EMCY Alarm    32    10
49   Sleep      2
50   Assert DriveEnabled Goes Zero

```

Kuva 34. Testeihin voidaan luoda erilaisia vikatilanteita. (Kaatrasalo 2023).

Kun testiympäristö on valmiina sisältäen digitaalisen kaksosen ja MIDin, testitapaukset voidaan suorittaa joko RIDEn kautta tai komentotulkkiä käyttäen. Testin etenemistä voidaan seurata joko MIDiltä tai tietokoneelta. Testejä voidaan suorittaa joko yksittäin tai kaikki kerralla valituille konetyypeille ja testin yksityiskohtaiset tiedot voi tarkastella testin lopuksi raportista (kuva 35).

- TEST		Verify That DriveEnabled Goes Zero And Fails If Travelled distance > 30 cm	00:00:09.736
Full Name: Robotframework.Testsuites.SAFETY BRAKE TEST.Verify That DriveEnabled Goes Zero And Fails If Travelled distance > 30 cm			
Tags: Safety brake test, XL23			
Start / End / Elapsed: 20230405 16:38:46.182 / 20230405 16:38:55.918 / 00:00:09.736			
Status: PASS			
+ SETUP	Builtin.Run Keywords	Set Machine Idle, AND, Set Service Brake Pedal Position, \${ServiceBrakeReleased}, AND, Set Gear Neutral, AND, Write drivebus Parameter, 183, 1, AND, Switch Brake Test Mode On, AND, Switch Brake Test Mode Off, AND, Execute Manual Step, Select test, AND, Start Listening Drivebus EMCY	00:00:03.716
+ KEYWORD	Safety Brake Preconditions OK		00:00:01.332
+ KEYWORD	Builtin.Sleep	0.1	00:00:00.102
+ KEYWORD	Set RPM Simple	\${ThrottleBraketestRPM}	00:00:00.016
+ KEYWORD	Builtin.Sleep	0.1	00:00:00.101
+ KEYWORD	CommonLib.Set Signal	sim_BrakeTestFault, \${1}	00:00:00.001
+ KEYWORD	Builtin.Sleep	1.4	00:00:01.401
+ KEYWORD	CommonLib.Set Signal	sim_BrakeTestFault, \${0}	00:00:00.001
+ KEYWORD	Set RPM Simple	\${ThrottleIdleRaw}	00:00:00.014
+ KEYWORD	common_keywords.Wait for EMCY Alarm	32, 10	00:00:00.004
+ KEYWORD	Builtin.Sleep	2	00:00:02.002
+ KEYWORD	Assert DriveEnabled Goes Zero		00:00:00.015
+ TEARDOWN	Builtin.Run Keywords	Set Machine Idle, AND, Engage Safety Brake, AND, Set Service Brake Pedal Position, \${ServiceBrakeReleased}, AND, Stop Listening Drivebus EMCY	00:00:01.024

Kuva 35. Robot Frameworkin raportista voidaan havaita ohjausjärjestelmän toimivan oletetusti. (Kaatrasalo 2023).

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Normet Oy. Työn tarkoituksena oli yhtenäistää ja päivittää kaisvosajoneuvojen ohjausjärjestelmän kautta päivittäin suoritettavien jarrutestien toimintalogiikka, käyttöliittymä sekä testata niiden toiminta virtuaalisesti. Koneita on varustettuna usealla eri voimansiirrolla sekä jarruvaihtoehdoilla. Vanhat jarrutestit olivat haastavia suorittaa, koska konetyyppien välillä on eroja sekä testin aikainen ohjeistus puutteellinen.

Opinnäytetyön edetessä vanhoja testejä tutkiessa sekä standardeja ja vaatimuksia selatessa testeistä paljastui joitakin puutteita. Näitä käytiin läpi suuremmalla porukalla miettien ja asioihin pyrittiin löytämään sekä standardit että vaatimukset täyttävät menetelmät, kuitenkin konetta tai sen toiminallisuutta heikentämättä. Esimerkiksi turva- ja käyttöjarrutestin aikana jarruja kuormittava vääntömomentti on kompromissi vaatimusten ja komponenttien kestävyuden suhteen. Ei ole tarkoituksenmukaista ja järkevää päivittää kuormittaa jarruja maksimiväännöllä, vaan testeihin on luotu ennakoivia toimintoja havaitsemaan jarrujärjestelmän toiminnan heikkeneminen.

Lopputuotoksena syntyi positiivisille jarruille ja kaikille voimansiirroille päivitettyt turva-, käyttö-, proportionaali-, ja RABA-testit. Negatiivisille jarruille päivitettiin vastaavat jarrutestit lukuun ottamatta proportionaalitestiä, koska proportionaalijarruja ei ole vielä saatavilla negatiivisille jarruille.

Työssä luotiin myös kokonaan uusi negatiivisen jarrujärjestelmän toiminnan varmentava ABA-testi. Uusissa jarrutesteissä on erillinen valikko testeille, minkä sisältä löytyy kyseiselle koneelle ja testille ominaiset alkuehdot testin suorittamiseksi. Valikko ohjeistaa kuljettajaa asettamaan koneen oikeaan tilaan ja indikoi sen selkeästi.

Jarrutestien virtuaalitestausta varten kirjoitettiin erilaisia testitapauksia Robot Frameworkilla, joita testattiin digitaalista kaksosta hyväksi käyttäen. Aikataulullisesti ei ollut mahdollisuutta jokaiselle voimansiirto- ja jarrutyypille varmentaa jarrutestien toimintaa opinnäytetyön aikana vaan tästä syystä päädyttiin testaamaan jarrutestien toiminta negatiivisilla jarruilla ja elektrodynaamisella voimansiirrolla. Virtuaalitestausta osoittautui myös ainoaksi mahdollisuudeksi varmentaa ABA-testin toiminta, sillä tehtaalla ei ollut yhtään kyseisellä ominaisuudella varustettua oikeaa konetta. Opinnäytetyön lopuksi käyttö- ja turvajarrutestien toimintaa testattiin myös oikealla koneella.

LÄHTEET

- ABB Automation Group Ltd. (15. 3. 2001). Tekninen opas nro 8 - Sähköinen jarrutus. Haettu 10. 3. 2023 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/Tekninen_opasno8.pdf
- Aula, E.;& Mikkonen , P. (2021). *Liikkuvan kaluston sähköhydrauliikka. Electrohydraulics of the moving workmachines*. Haettu 7. 3. 2023 osoitteesta <https://www.ellibslibrary.com/reader/9789527053027>
- Costa, G.;& Sepehri, N. (2015). *Hydrostatic transmissions and actuators : operation, modelling and applications*. Chichester. Haettu 6. 3. 2023 osoitteesta https://savonia.alma.exlibrisgroup.com/view/action/uresolver.do?operation=resolveService&package_service_id=2222482250006248&institutionId=6248&customerId=6245
- FluidPower Journal. (10. 2. 2020). *Understanding the Function of Accumulators*. Haettu 7.. 3. 2023 osoitteesta FluidPower Journal: <https://fluidpowerjournal.com/understanding-the-function-of-accumulators/>
- Glencore. (5. 1. 2021). U/G Mobile Equipment. *Braking System Specification(2.)*. Haettu 7. 3. 2023
- Hanzestrohm. (6. 5. 2019). Brake resistors for electrical bus and truck transport. Haettu 10. 3. 2023
- Ican Company Ltd. (24. 2. 2014). *What is the difference between positive (active) brakes and the negative brakes?* Haettu 25. 2. 2023 osoitteesta Ican Company Ltd: <https://www.ican.co.jp/en/faq/2014/02/24/?p=34>
- ISO 3450. (11. 2011). *Earth-moving machinery - Wheeled or high-speed rubbertracked machines - Performance requirements and test*. Haettu 28. 2. 2023
- Jacobs Vehicle Systems. (2023). Engine Braking. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://www.jacobsvehiclesystems.com/technologies>
- Kocsis, C.;& Hardcastle, S. (2003). Ventilation system operating cost comparison between a conventional and an automated underground. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/298684909_Ventilation_system_operating_cost_comparison_between_a_conventional_and_an_automated_underground_metal_mine
- Larminie , J.;& Lowry , J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained* (2. painos p.). John Wiley & Sons Ltd. Haettu 18. 2. 2023 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/reader.action?docID=952418&ppg=3>
- Metropolia. (26. 8. 2009). *Hydrauliikka*. Haettu 7. 3. 2023 osoitteesta Metropolia: <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Hydrauliikka>
- Mevea Ltd. (Julkaisuaika tuntematon). Digital Twin. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://mevea.com/solutions/digital-twin/>
- Normet. (2022). Yrityksen sisäinen tiedosto.
- Normet. (2023). *Laitteet*. Haettu 6. 3. 2023 osoitteesta Tuotteet: <https://www.normet.com/fi/tuotetyyppi/laitteet/>
- Normet. (2023). Normet Electrodynamic Technology. Haettu 10. 4. 2023 osoitteesta <https://www.normet.com/electro-dynamic/>

- Normet . (2023). *Normet SmartDrive®*. Haettu 3. 2. 2023 osoitteesta <https://fi.normet.com/smartdrive/>
- Normet. (2023). *Tietoja meistä*. Haettu 3. 2. 2023 osoitteesta Normet: <https://www.normet.com/fi/tietoja-meista/>
- Normet Group Oy. (2022). Annual Report 2022. Haettu 31. 3. 2023 osoitteesta <https://www.normet.com/wp-content/uploads/2023/03/normet-group-oy-annual-report-2022.pdf>
- Ontario.ca. (1. 7. 2022). R.R.O. 1990, Reg. 854: Mines and mining plants. *Occupational Health and Safety Act*. Ontario. Haettu 7. 3. 2023 osoitteesta <https://www.ontario.ca/laws/regulation/900854>
- Poclain Hydraulics. (28. 1. 2020). *VB Brake valves*. Haettu 23. 2. 2023 osoitteesta <https://poclain-hydraulics.com/sites/default/files/A06604D.pdf>
- SABS 1589. (7. 2. 1994). The braking performance of trackless underground mining vehicles - Load haul dumpers and dump trucks. Haettu 28. 2. 2023
- Sakthivel, R.;Faisal, O.;Narayan, S.;Abubakar, S.;Kaisan, M. U.;& Alammari, Y. (2019). *Introduction to Automotive Engineering* (1. painos p.). John Wiley & Sons. Haettu 18. 2. 2023 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/reader.action?docID=5726051>
- Sarvela, J. (2008). *Kronologia*. Haettu 3. 2. 2023 osoitteesta Jussi Sarvelan kotisivut.
- Savon Sanomat. (18. 8. 2020). *Normetin perustaja Jaakko Sarvela on kuollut*. Haettu 3. 2. 2023 osoitteesta Savon Sanomat: <https://www.savonsanomat.fi/paikalliset/3083732>
- Savon Siemen. (2004). *Historiaa*. Haettu 2. 2. 2023 osoitteesta Savon Siemen: <http://savonsiemen.com/fi/historia/>
- Telma S.A.S. (2023). Operating principle. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://www.telma.com/produits/fonctionnement>
- Tieturi Oy. (2023). Robot Framework – toimiva avoimen lähdekoodin ratkaisu. Haettu 10. 3. 2023 osoitteesta <https://www.tieturi.fi/blogi/robot-framework-toimiva-avoimen-lahdekoodin-ratkaisu/>
- Universal Technial Institute. (1. 5. 2020). How do diesel exhaust brake systems work? Haettu 23. 3. 2023 osoitteesta <https://www.uti.edu/blog/diesel/how-diesel-exhaust-brake-systems-work>
- Voith GmbH & Co. (2023). Retarders - Trucks. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://voith.com/corp-en/braking-systems/retarders-trucks.html>
- Zhu, Y. (2010). *CAN and FPGA communication engineering implementation of a CAN bus based measurement system on an FPGA development kit*. Diplomica Verlag. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/reader.action?docID=660231&query=>