



Antti Jormanainen

Mobiililaitteen käyttömahdollisuudet tiekitkan mittauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

25.5.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Antti Jormanainen
Otsikko: Mobiililaitteen käyttömahdollisuudet tiekitkan mittauksessa
Sivumäärä: 70 sivua
Aika: 25.5.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaajat: Lehtori Pasi Oikarinen
TkT Arto Niskanen, Roadcloud Oy

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tiekitkan mittaamista Android-käyttöjärjestelmällä toimivaan puhelimeen asennettavan applikaation avulla. Applikaatiossa hyödynnetään puhelimen kiihtyvyyssanturilta saatavaa dataa kitkakertoimen määrittämiseen auton pitkittäisdynamiikan teoriaan perustuen.

Opinnäytetyö tehtiin yritykselle RoadCloud Oy. Yrityksellä oli jo valmiiksi kehitetty pohja applikaatiolle, joka on tarkoitus tulevaisuudessa saattaa Väyläviraston hyväksymäksi viralliseksi kitkanmittaustyökaluksi tiekunnossapidon valvontatarkoituksiin. Työn päätavoitteena oli testata matkapuhelimen soveltuvuutta ammattikäyttöön tarkoitetun kitkanmittaussovelluksen alustaksi. Työssä perehdytään puhelimella mitattavaan kiihtyvyyssignaaliin, testataan sovelluksessa käytetyn kitkanestimointialgoritmin suorituskykyä ja arvioidaan sovelluksen mahdollisuuksia läpäistä Väyläviraston hyväksyntätestaus.

Työn teoriaosuutta varten perehdyttiin erilaisiin kitkanestimointimenetelmiin, ajoneuvon pitkittäisdynamiikkaan, mittaustekniikkaan Android-ympäristössä, mittaussignaalin suodattamiseen sekä kitkanmittaussovelluksen viranomaisvaatimuksiin.

Työn käytännön osuudessa suoritettiin applikaatiolle tarvittavat toimenpiteet mittausdatan keräämiseksi ja tutkittiin puhelimen kiihtyvyyssanturin signaalia sekä etsittiin signaalille sopivaa suodatintyyppiä ja sen parametreja. Applikaation suorituskykyä testattiin suorittamalla erilaisia ajosuoritteita ja analysoimalla niistä kerättyä kiihtyvyyssdataa. Soveltuvuutta viralliseksi mittaustyökaluksi testattiin suunnittelemalla ja suorittamalla Väyläviraston mittausprotokollaa mukaileva testisarja.

Suoritettujen testien perusteella sovelluksella on mahdollista arvioida tienpinnan ja renkaan välistä kitkakerrointa Väyläviraston edellyttämällä mittatarkkuudella, joten sovelluksen virallista hyväksyntätestausta voidaan suositella. Työn aikana havaittiin kuitenkin eroja anturirajapinnan hyödyntämisessä eri matkapuhelinmallien välillä, joten myös jatkotestaus erilaisilla puhelinmalleilla on suositeltavaa.

Avainsanat: rengaskitka, kitkanmittaus, matkapuhelin, Android-sovellus

Abstract

Author: Antti Jormanainen
Title: Utilizing a Mobile Phone in Tyre-Road Friction Estimation
Number of Pages: 70 pages
Date: 25 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Senior Lecturer Pasi Oikarinen, Metropolia UAS
D.Sc Arto Niskanen, Roadcloud Oy

The objective of this Bachelor's thesis was to research the possibilities of measuring the tire-road friction using mobile application in an ordinary Android phone environment. The application utilizes the data gathered from the accelerometer of the phone for estimating the tire-road friction based on the theory of vehicle dynamics.

The thesis was made for the company RoadCloud Oy. The company had already developed a base for an application, which is to be approved by the Finnish Transport Infrastructure Agency as an official friction measurement tool for road maintenance control purposes. The main objective of the thesis was to test the suitability of a mobile phone as a platform for a professional friction measurement application. In this thesis, the acceleration signal that can be measured from the phone is examined, the performance of the friction estimation algorithm is tested and the application's potential to pass the official acceptance test is evaluated.

For the theoretical part of the thesis, the following different friction estimation methods were studied: vehicle longitudinal dynamics; measurement techniques in the Android environment; signal processing and the regulatory requirements of a friction measurement application.

In the practical part of the work, the application was edited to enable collecting the acceleration sensor data and the data were examined, and the appropriate filter type and its parameters were searched for. Suitability as an official measurement tool was tested by designing and running a test sequence following the Finnish Transport Infrastructure Agency's official measurement protocol.

The tests carried out indicate that the application is capable of estimating the tire-road friction coefficient with the accuracy required by the Finnish Transport Infrastructure Agency, so that the official acceptance test for friction measurement applications can be recommended. However, during the work, differences in the utilization of the sensor interface between different mobile phone models were found, thus, further testing with different phone models is also recommended.

Keywords: Tire-road friction, friction estimation, mobile phone, Android application

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kitkan mittaus	2
2.1	Tieolosuhteista arvioitava kitka	3
2.1.1	Tiesääennusteet	5
2.1.2	Kameranäköön perustuvat järjestelmät	5
2.1.3	Tarkoitukseen rakennetut optiset anturit	6
2.2	Kitkan aiheuttamiin ilmiöihin perustuvat menetelmät	8
2.3	Ajoneuvopohjaiset kitkaestimointimenetelmät	10
3	Ajoneuvon pitkittäisdynamiikka	13
3.1	Ajovastukset	13
3.2	Normaalivoima	16
3.3	Ajoneuvon suorituskyvyn teoreettiset rajat	18
4	Mittaustekniikka Android-ympäristössä	19
4.1	Mobiililaitteiden sovelluskehitys	20
4.2	Matkapuhelimien kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit	21
5	Signaalinkäsittely	24
5.1	Mittauskohina	24
5.1.1	Terminen kohina	24
5.1.2	Raekohina	25
5.1.3	$1/f$ -kohina	25
5.2	Näytteistystaajuus	25
5.3	Signaalin suodatus	26
5.4	Suodatinapproksimaatiot	30
5.4.1	Butterworth-suodatin	31
5.4.2	Bessel-suodatin	32
5.4.3	Chebysev-suodattimet	32
5.4.4	Elliptiset suodattimet	33
6	Viranomaisvaatimukset kitkanmittaussovellukselle	33

6.1	Kitkan mittaamisen menetelmä	33
6.2	Vaatimukset käyttöturvallisuudelle	34
6.3	Vaatimukset kalibroituudelle	34
6.4	Vaatimukset mittatarkkuudelle	34
7	Sovelluksen käyttöliittymä ja testausvalmistelut	35
7.1	Sovelluksen käyttöliittymä	35
7.2	Käyttöliittymään tehdyt muutokset testausta varten	38
7.3	Algoritmin mallintaminen	39
8	Kiihtyvyyssignaalin tarkastelu	40
8.1	Raakasignaalit	41
8.2	Signaalin taajuuskomponentit	42
8.3	Signaalin suodatus	46
8.4	Suodattimen valintaperusteet	49
9	Sovelluksen testaus	51
9.1	Testiprotokollan suunnittelu	51
9.2	Testiympäristö ja testiolosuhteet	52
9.3	Testin suoritus	52
10	Testitulokset	56
11	Päätelmät	58
11.1	Jarrutustestin tuloksista	58
11.2	Sovelluksesta ja algoritmista	62
12	Yhteenveto	67
	Lähteet	71

Lyhenteet

- ABS: *Anti-locking brake system*. Lukkiutumaton jarrujärjestelmä.
- API: *Application programming interface*. Ohjelmointirajapinta. Komponenttien ja moduulien välinen raja ohjelmoitavassa järjestelmässä.
- ASR: *Anti-slip regulation*. Vetoluistonestojärjestelmä.
- BJT: *Bipolar junction transistor*. Bipolaaritransistori.
- CSS: *Cascading style sheets*. Esimerkiksi verkkosivujen ulkoasun tekemiseen käytetty ohjelmointikieli.
- FFT: *Fast Fourier transform*. Nopea Fourier-muunnos. Algoritmi, jolla lasketaan diskreetti muunnos aikatasosta taajuustasoon.
- FET: *Field effect transistor*. Kanavatransistori.
- FIR: *Finite impulse response*. Äärellinen impulssivaste.
- ESC: *Electronic stability control*. Ajonvakautusjärjestelmä.
- HTML: *Hypertext markup language*. Ohjelmointikieli.
- IIR: *Infinite impulse response*. Ääretön impulssivaste.
- IR: *Infra-red*. Infrapuna.
- IFFT: *Inverse fast Fourier transform*. Algoritmi, jolla muunnetaan signaali taajuustasosta aikatasoon.
- MEMS: *Microelectromechanical system*. Komponentti, jossa yhdistyy mekaanisia ja sähköisiä ominaisuuksia.

ELY: Elinkeino, liikenne ja ympäristö.

TPMS: *Tyre pressure monitoring system*. Rengaspaineiden valvontajärjestelmä.

MVP: *Minimum Viable Product*. Tuote tai palvelu, jossa on vain sellaiset ominaisuudet, joita varhaiset asiakkaat tarvitsevat.

1 Johdanto

Suomen talven keliolosuhteet luovat haasteita niin autoilijoille kuin teiden kunnossapidolle. Lumisateesta tai erittäin liukkaista tienpinnoista johtuvat huonot tiekeliolosuhteet lisäävät tutkitusti onnettomuuden riskiä. Riski lisääntyy eritoten moottoriteillä, vaikka ne ovat normaaleissa olosuhteissa varsin turvallisia [1, s. 49]. Ajanjaksolla 1995–2004 tapahtuneista kuolemaan johtaneista kohtaamisonnettomuuksista 60 % tapahtui kokonaan tai osittain lumisella tai jäisellä tienpinalla [2, s. 17].

Suomen tiestön talvihoidosta vastaavat pääasiassa alueellisten ELY-keskusten valitsemat yksityiset tienhoitourakoitsijat [3]. Jokaiselle urakka-alueen tielle on määritelty valtion puolesta hoitoluokka, johon se kuuluu. Kullekin hoitoluokalle on määritelty tarkasti, millaiset tieolosuhteet sille huonoimmillaan sallitaan, sekä toimenpideaika, jonka sisällä vaatimusten alittuessa urakoitsijan kuuluu aloittaa toimenpiteet, kuten suolaus tai linjahiekoitus [4, s. 14]. Urakoitsijoiden vastuulla on myös toimittaa ajantasaista tietoa suoritetuista ja suoritetuista tienhoidon toimenpiteistä [3].

Tehokkaammalla talvitienhoidolla on mahdollista vähentää liikenneonnettomuuksien määrää sekä alentaa tienhoidon kokonaiskustannuksia. Luotettavaa tapaa mitata tiekitkaa voidaan hyödyntää niin tienhoidon urakoitsijoiden työn laadunvalvonnassa, kuten myös urakoitsijoiden apuna tienhoidossa. Kitkanmittausmenetelmiä on useita erilaisia, ja niihin käytettävät laitteet vaihtelevat myös paljon hinnaltaan.

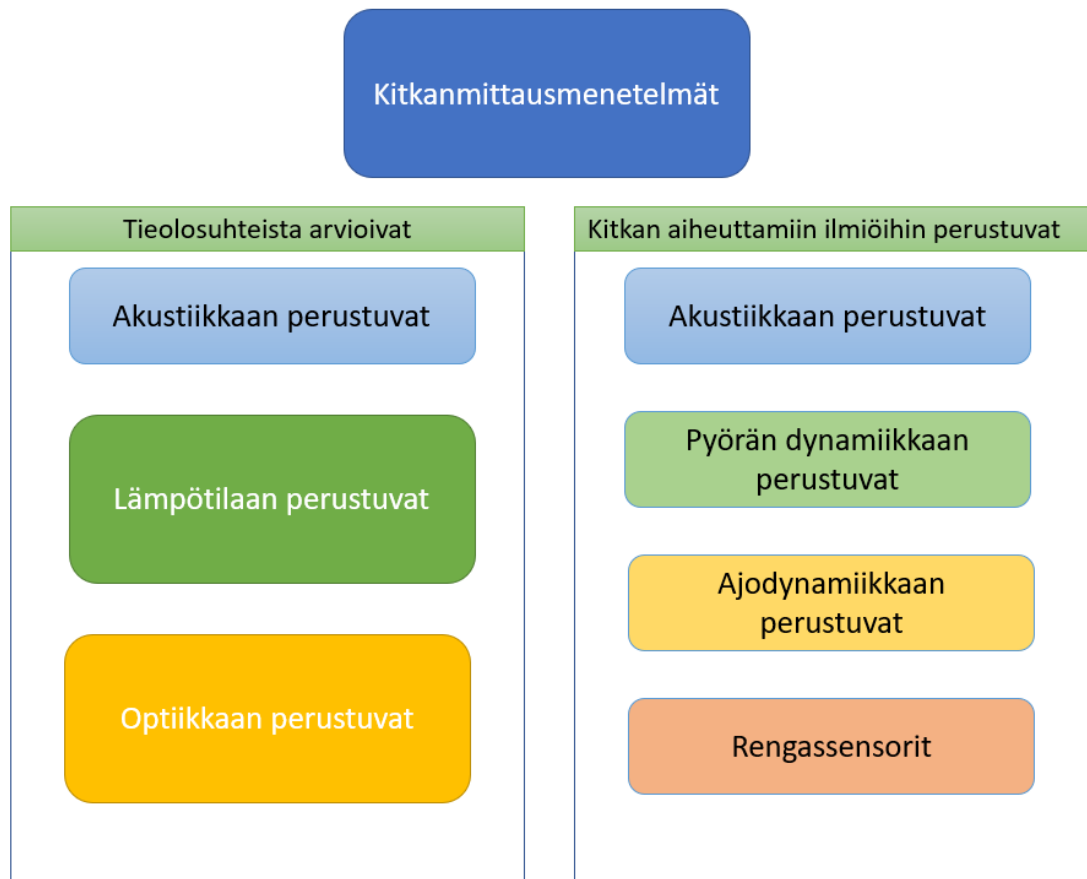
Työn tilaajana toimiva Roadcloud Oy on kehittänyt Android-puhelimille tarkoitettua applikaation tiekitkan mittaamiseen. Applikaatio hyödyntää matkapuhelimen kiihtyvyyssanturilta saatavaa signaalia ja ajoneuvon pitkittäisdynamiikan teoriaa tiekitkan määrittämiseen. Applikaatio on tarkoitus tulevaisuudessa saattaa Väyläviraston hyväksymäksi kitkanmittaustyökaluksi. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, täyttääkö applikaatio Väyläviraston kitkamittareille asettamat vaatimukset, sekä tutkia matkapuhelinten ja Android-järjestelmän

ominaispiirteitä mittausympäristönä. Sovelluksella on mahdollista mitata kitkaa myös kiihdytyksen aikana, mutta tämän ominaisuuden tarkastelu ja testaus rajattiin opinnäytetyön sisällöstä pois.

2 Kitkan mittaus

Renkaan ja tienpinnan välinen kitkapotentiaali tarkoittaa käytettävissä olevan kitkan maksimiarvoa, ja sen arviointi on tärkeää informaatiota ajoneuvojen aktiivisten turvajärjestelmien, tien kunnossapidon sekä myös lähitulevaisuudessa autonomisen ajamisen tarkoituksiin. Kitkapotentiaalin tietäminen mahdollistaisi ajoneuvon hallinta- ja turvajärjestelmien säätämisen optimaalisesti, ennen kuin merkittäviä rengasvoimia ehtii syntyä. Näin ollen esimerkiksi adaptiivisen vaki-onopeudensäätimen turvaväliä voidaan pidentää alhaisen kitkan tapauksessa.

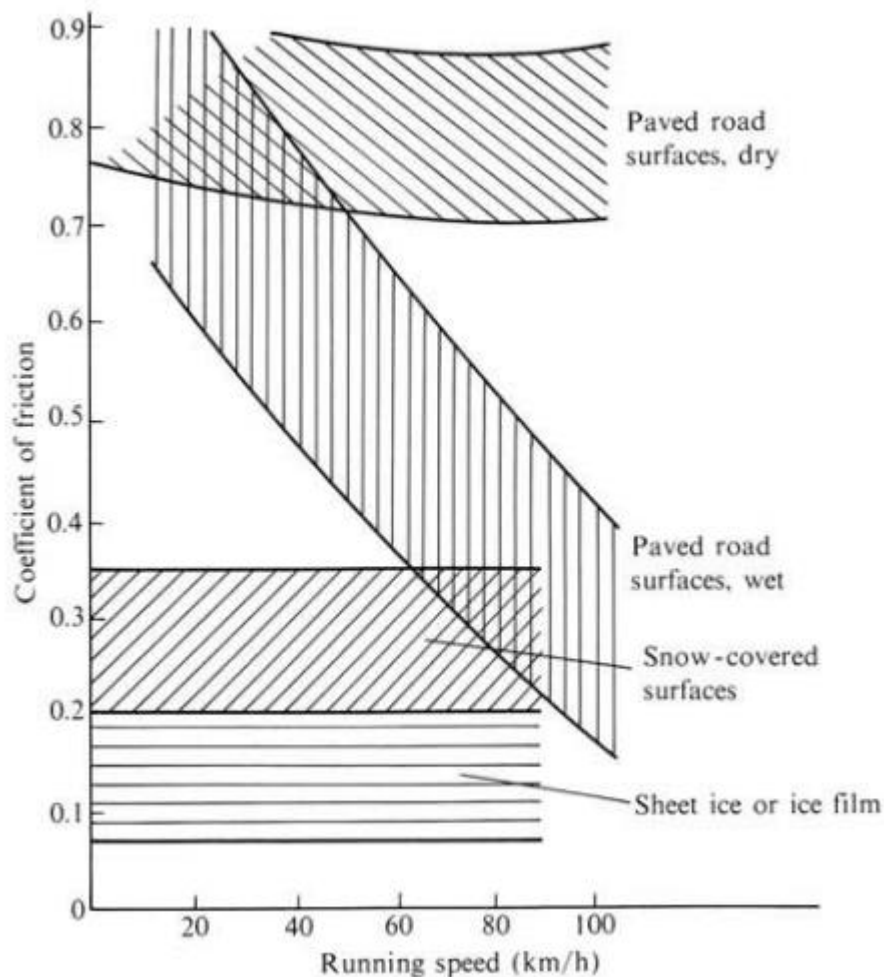
Tiekitkan mittaamista ja arviointia on tutkittu vuosikymmenien ajan, mutta edelleen tuotantokelpoisen ratkaisun löytäminen ajoneuvokäyttöön on haaste. Tiekitkan mittaamiseen tarkoitettuja menetelmiä on useita erilaisia, niin hinnaltaan, kuin myös tarkkuudeltaan. Kirjallisuudessa menetelmät jaetaan usein kahteen luokkaan: tieolosuhteiden perusteella arvioiviin menetelmiin sekä kitkan aiheuttamia ilmiöitä tutkiviin menetelmiin [5, s. 4]. Jaottelua on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Kitkanmittausmenetelmien jaottelu.

2.1 Tieolosuhteista arvioitava kitka

Kitkan arviointi tieolosuhteiden perusteella perustuu tiellä vallitsevien keliolosuhteiden sekä tienpinnan tyypin ja kunnon mittaamiseen. Tienpinnan tilan vaikutus renkaan ja tien väliseen kitkakertoimeen näkyy kuvassa 2. Kuvasta nähdään kitkakertoimen käyttäytyminen suhteessa ajonopeuteen välillä 0–100 km/h. Lumisella tai jäisellä tienpinnalla kitkakerroin pysyy samana ajonopeudesta riippumatta. Märällä kestopäällystetyllä tienpinnalla kitkakerroin taas laskee huomattavasti ajonopeuden kasvaessa. Kuivalla kestopäällysteellä kitkakerroin laskee hieman ajonopeuteen 80 km/h asti, minkä jälkeen se kääntyy taas loivaan nousuun.



Kuva 2. Tienpinnan tilan vaikutus kitkakertoimeen [6].

Kitkan tieolosuhdeperusteisen arvioinnin etuna on se, ettei se vaadi ylimääräisiä ajosuoritteita, kuten kiihdyttämistä tai jarruttamista liikenteen seassa. Kääntöpuolena näillä metodeilla ei kuitenkaan saada tietoon ajoneuvon renkaan ja tien välissä todellisuudessa vaikuttavaa kitkakerrointa. Menetelmät eivät ota huomioon renkaiden kulumisesta, rengaspaineiden muutoksista, kuormauksen aiheuttamista normaalivoiman muutoksista tai vesiliirrosta aiheutuvaa kitkakertoimen muutosta. Tästä syystä olosuhteiden perusteella tehtävän kitkan arvioinnin käytössä on rajoituksensa. [5, s. 4–5.]

2.1.1 Tiesääennusteet

Tiesääennusteet pyrkivät ennustamaan tulevia tienpinnan olosuhteita ja näin ollen estimoimaan tiekitkaa. Tiesääennusteet käyttävät aiemmin toteutuneita havaintoja sekä numeerisia sääennusteita, joiden perusteella tieolosuhteista muodostetaan fyysinen malli. Tätä mallia käytetään tienpinnan simulointiin. Fyysisen mallin syötteenä käytetty data koostuu useista muuttujista, kuten ilman lämpötilasta ja kosteudesta, tuulen nopeudesta, sademäärästä ja auringon säteilystä. Mallinnuksessa huomioidaan lämmönsiirto tienpinnan ja maan välillä sekä ilmakehän kanssa kuten myös faasimuutokseen liittyvä lämpö (ts. jäätyminen). Mallinnuksen tuloksena on niin tienpinnan lämpötila kuin myös lumen, jään tai veden kerrospaksuus. Kitka voidaan tämän jälkeen arvioida tielämpötilan ja kerrospaksuuden perusteella. [7, s. 5.]

Tiesääennusteet voivat olla ainoastaan niin tarkkoja kuin tien fyysisen mallin muodostamiseen käytetty sääennuste. Myös liikenteestä tai tienhoidosta johtuvan tienpinnan lumi, jää tai vesipeitteen muutoksen huomioonottaminen tiesääennusteessa on vaikeaa. Ongelmia aiheuttaa myös havainnointiin käytettyjen tiesääasemien maantieteellinen harvalukuisuus. Yksi mahdollisuus tämän ongelman parantamiseksi olisi datatiheyden kasvattaminen ajoneuvoihin asennettavilla laitteilla suoritetuilla mobiilimittauksilla. [7, s. 5.]

2.1.2 Kameranäköön perustuvat järjestelmät

Tien sääolosuhteiden sekä kunnan määrittämistä kameranäköön perustuvilla järjestelmillä on tutkittu. Holzmann analysoi kameralla tiestä otettujen kuvien tekstuuria luokitellakseen tietyyppisiä. Hänen työnsä perusajatuksena oli, että kuvissa karkeista tienpinnoista on laajempi pikseleiden valotustasojen jakauma kuin kuvissa tasaisista tienpinnoista. Hänen metodinsa tarjoaa kuusi tasoa ennustetulle tiekitkalle. Analyysin luotettavuus kuitenkin huononee ajoneuvon nopeuden ja värähtelyjen sumentaessa kuvanlaatua. [5, s. 5.] Tutkimus on kuitenkin tehty vuonna 2006 senaikaista kamerateknologiaa hyödyntäen, ja teknologia on ottanut harppauksia eteenpäin sittemmin.

Šabanovič ja kumppanit tutkivat vuonna 2019 tekoälymenetelmien hyödyntämistä liikkuvasta ajoneuvosta kuvatun videodatan analysoimiseen. He simuloivat ajoneuvon matemaattisen mallin jarrutusmatkaa erilaisilla tienpinnoilla, kun malli kykenee ottamaan huomioon videodatan perusteella määritetyn tienpinnan laadun. Tuloksena jarrutusmatka pieneni 2–18 % verrattuna verrokiajoneuvoon, jossa on perinteinen ABS-järjestelmä, kaikilla muilla tienpinnoilla paitsi kuivalla asfaltilla, jolla ABS-järjestelmä on suunniteltu toimimaan. Merkittävin jarrutusmatkan lyhentyminen saavutettiin märällä asfaltilla. [8.]

Tulokset kameradatan hyödyntämisessä tiekitkan estimoinnissa ovat lupaavia, mutta haasteita on edelleen ajoneuvosta aiheutuvan tärinän sekä muuttuvan valoisuuden parissa. Houkuttavaksi kamerapohjaisen datan hyödyntämisen tekee se, että useissa uusissa ajoneuvoissa on jo integroitua kameralaitteistoa esimerkiksi liikennemerkkien tunnistusta varten.

2.1.3 Tarkoitukseen rakennetut optiset anturit

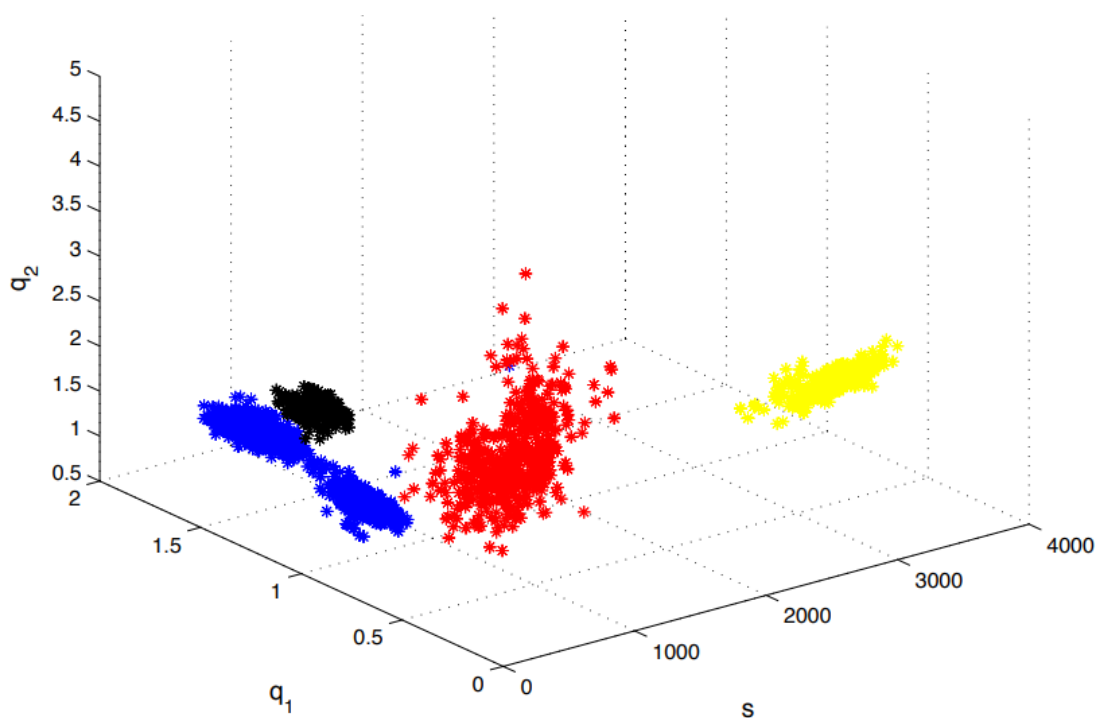
Tien pintaolosuhteiden havainnointiin tarkoitettujen optisten antureiden toiminta perustuu valonsäteiden takaisinheijastumaan pinnasta. Laitteet toimivat pääosin infrapuna-aallonpituuksilla, ja laitteet mittaavat takaisin heijastuvan säteilyn määrää. Koska pinnan absorbanssi sekä vastavuoroisesti takaisin heijastuvan valon määrä riippuvat valon aallonpituudesta ja pinnan materiaalista, voidaan eri aallonpituuksisia IR-diodeja käyttämällä luokitella tienpinnan tila. Esimerkiksi 1550 nanometrin aallonpituudella absorbointikerroin jäälle on useita kertoja suurempi kuin vedelle. Optiset anturit eivät suoraan mittaa kitkaa, vaan jokaiselle luokitellulle tienpinnan tilalle on määritetty kitkakerroin. Optisten antureiden heikkoutena voidaan pitää sitä, että ne on erikseen asennettava ajoneuvoihin, ja niitä täytyy säännöllisesti puhdistaa tai ainakin kalibroida linssin likaantuessa. [7, s. 3.]

Yksi esimerkki optisesta anturista on Casselgrenin ja kumppaneiden SIRWEC 2012 konferenssipaperissa [9] esittelemä Road eye (kuva 3).



Kuva 3. Optinen sensori Road eye SD [10].

Anturissa käytetään kolmea erilaisilla aallonpituuksilla toimivaa laserdiodia sekä fotodiodia, johon heijastuma suunnataan linssillä. Anturin ulostulosignaali koostuu kolmesta jännitteestä, jotka edustavat eri aallonpituuksien takaisinheijastumien intensiteettiä. Eri tienpinnoilla (kuiva, märkä, jäinen ja luminen asfaltti) suoritettujen mittauksien perusteella on pystytty muodostamaan jokaiselle tienpinnalle oma erottuva joukkonsa arvoja, jotka on esitetty kuvassa 4. Yksinkertaistetusti luokittelualgoritmi vertaa mittaustuloksen etäisyyttä joukkojen keskiöön, minkä perusteella määritetään tien tila. [9, s. 2–3.]



Kuva 4. Neljä erilaista tien tilaa piirrettynä kolmea ulostulosignaalista laskettua magnitudia vastaan. Musta on kuiva asfaltti, sininen märkä, punainen jäinen ja keltainen luminen. [8, s. 3.]

Liikennevirasto teetti vuonna 2013 tutkimuksen, jonka tavoitteena oli selvittää optisten kitkamittareiden tarkkuutta sekä toimivuutta laadunvalvonnan ohjauksessa. Tutkimuksen perusteella mittarit havaitsivat erilaiset tiekeliolosuhteet useimmiten hyvin ja ne autoivat havaitsemaan erityisesti mustan jään tilanteita. Laadunvalvontatarkoituksiin pelkkien optisten antureiden käyttöä ei tutkimuksessa suositella, sillä laadunvalvonnan vaatimukset tarkkuudelle ja luetettavuudelle ovat erittäin korkeat. Mitattu laadunlatus voi olla peruste tieurakoitsijalle määrätyille sanktioille, joten tutkimuksessa suositellaan optisella anturilla mitatussa laadunlatusilanteessa suoritettavaksi vielä erillistä vahvistusmittausta jarrutuskitkamittarilla. [11.]

2.2 Kitkan aiheuttamiin ilmiöihin perustuvat menetelmät

Ajoneuvon saadessa tasaisessa liikkeessä herätteen, kuten ohjaus, kiihdytys tai jarrutus, sen liikkeessä ja renkaissa tapahtuu muutoksia, jotka ovat verrannollisia tien ja renkaan väliseen kitkakertoimeen. Näitä muutoksia analysoimalla

kitkakerroin on mahdollista laskea matemaattisesti. Normaaliajossa herätteet ovat kuitenkin pieniä, mikä vaikeuttaa kitkakertoimen laskemista ajodynamiikan perusteella. [5, s. 5–6.]. Kitkapotentiaalin selvittämiseksi normaaleissa ajotilanteissa renkaan sisälle asennettavien antureiden käyttöä on tutkittu.

Rengasanturit ovat yksi suorimmista tavoista mitata renkaan ja tien kosketukseen liittyviä ilmiöitä. Käytössä on ollut useita anturityyppejä, joista jokaisella on omat vahvuutensa mitattaessa tiettyjä renkaan käyttäytymismalleja. Ensimmäisiä implementaatioita oli renkaan kulutuspinnaan vulkanoitu magneetti ja Hallanturi renkaan sisäpinnassa. Kiihtyvyyssantureita on käytetty mittaamaan tie-rengaskontaktin pituutta ja muotoa ja estimoimaan renkaan ja tien välistä kitkaa renkaan sivuttaispoikkeamaan perustuen. Kitkapotentiaalin estimointiin kiihtyvyyssantureita on käytetty tallentamaan liukkaalla alustalla vapaasti pyörivän renkaan paikallisesta liukumasta aiheutuvaa värähtelyä. [6, s.1.]

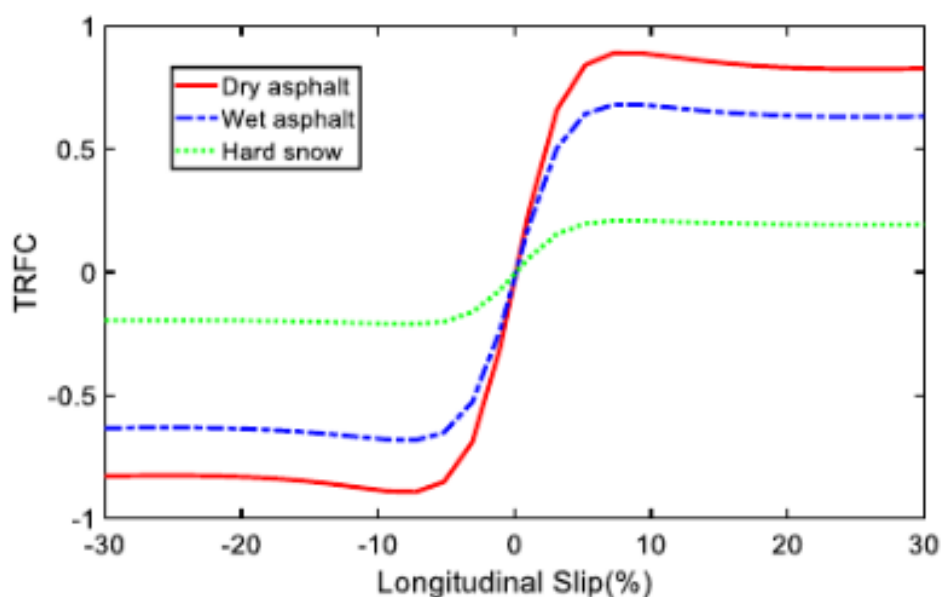
Niskanen ja Tuononen tutkivat kolmen kiihtyvyyssanturin käyttöä renkaan sisäpuolella sen kitkapotentiaalin arvioinnissa. He suorittivat testimittauksia jäällä ja tasaisella betonilla renkaan pyöriessä vapaasti ilman luistoa arvioidakseen, voiko kiihtyvyyssanturien datasta nähdä yhteyttä kitkapotentiaaliin. Tasainen betoni valittiin alustaksi normaalin asfaltin sijaan ei-toivottujen värinöiden eliminoinniseksi kiihtyvyyssanturidatasta. Heidän tutkimuksensa perusteella kiihtyvyyssignaaleissa eri pinnoilla on eroja, jäällä värähtelyn taso on huomattavasti korkeampi, kuin korkeamman kitkatason pinnalla. Oletetusti kitka kumin ja pinnan välillä tasapainottaa värähtelyjä renkaan rungossa. Kiihtyvyyssantureiden datasta havaittiin myös hyvin pystyttävän päättämään renkaan kontaktipinnan pituus, millä voi myös olla käyttötarkoituksensa aktiivisissa turvajärjestelmissä. [12.]

Uusissa autoissa pakollisena oleva TPMS-järjestelmä on jo tuonut elektroniikkaa renkaiden sisään, joten rengasanturit eivät enää ole vain tutkimus- ja kehitystyössä käytössä olevia laitteita. Yksi ”älykkään renkaan” ongelmia kuitenkin vielä on käyttöenergian vienti antureille. [12.] Käyttöenergian keräämistä renkaiden pyörimisestä aiheutuvasta muodonmuutoksesta on myös tutkittu lupaavin tuloksin. Renkaan sisälle asennetun piezosähköisen

energiankeräysjärjestelmän on tutkittu kykenevän tuottamaan 80 mikrowatin tehon ajonopeudella 60 km/h, mikä riittäisi täyttämään esimerkiksi TPMS-anturin virrantarpeen. [13.]

2.3 Ajoneuvopohjaiset kitkaestimointimenetelmät

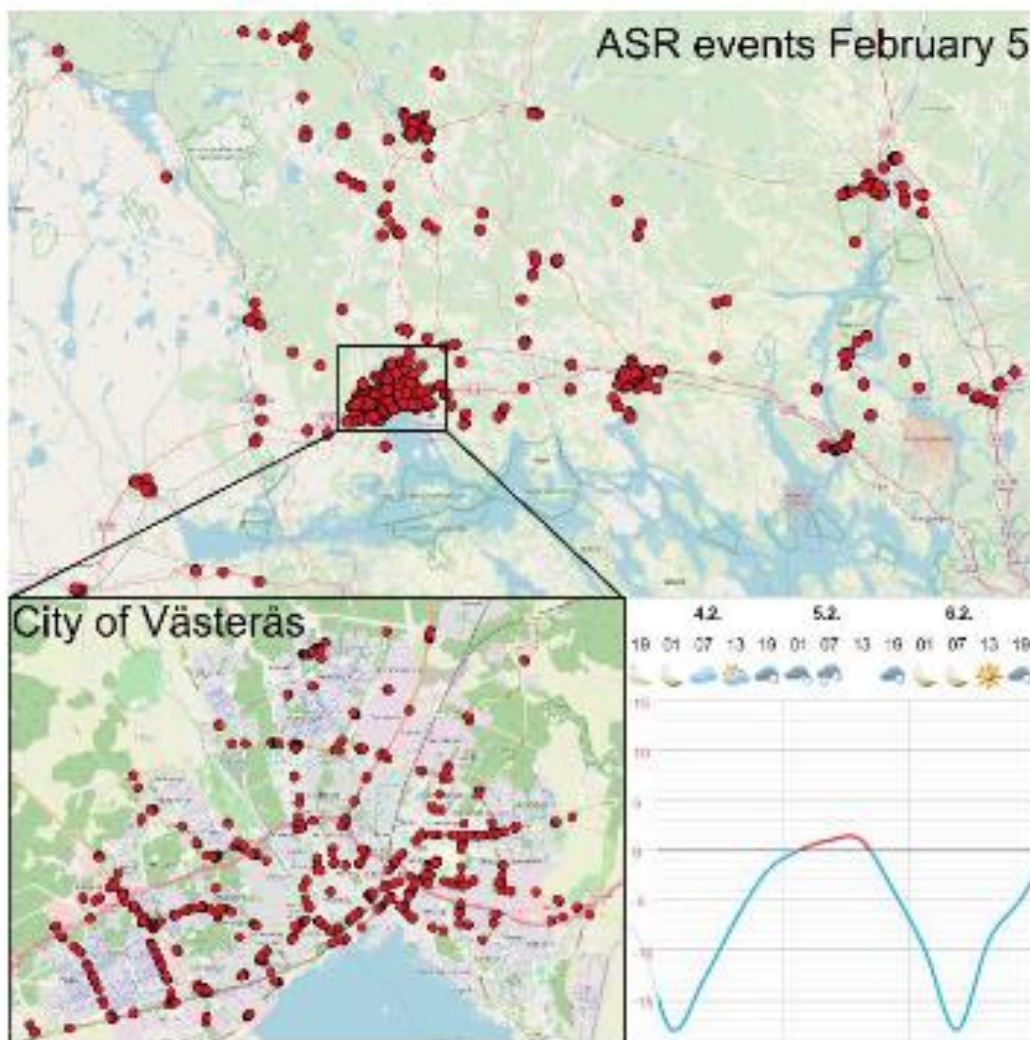
Ajoneuvopohjaiset kitkaestimointimenetelmät perustuvat jonkin ajoneuvoon kohdistuvan herätteen ja sen vaikutusten analysointiin. Heräte voi olla esimerkiksi ohjausliike, kiihdytys tai jarrutus. Pitkittäisdynamiikkaan perustuvissa menetelmissä on tyypillisesti korkea tarkkuus kiihdytys- ja jarrutustilanteille. Useimpien tällaisten menetelmien taustalla oleva periaate on pitkittäisen luiston ja tiekitkan välillä vallitseva yhteys. [14, s. 3.] Riittävä heräte on paras tapa arvioida kitkapotentiaalia. Riittävän herätteen määrää voidaan arvioida kitkan suhteesta renkaan pituussuuntaiseen luistoon (kuva 5).



Kuva 5. Tiekitkan (TRFC) ja pituussuuntaisen luiston yhteys [14, s. 3].

Ajoneuvon aktiivisten turvajärjestelmien, kuten ABS, ASR tai ESC, interventio mahdollistaa kitkakertoimen tarkan arvioinnin tietyllä ajoneuvolle, sillä näiden järjestelmien aktivoituessa liikutaan maksimikitkan alueella. Normaaliajossa nämä interventiot ovat kuitenkin harvinaisia ja tapahtuvat pääosin erittäin

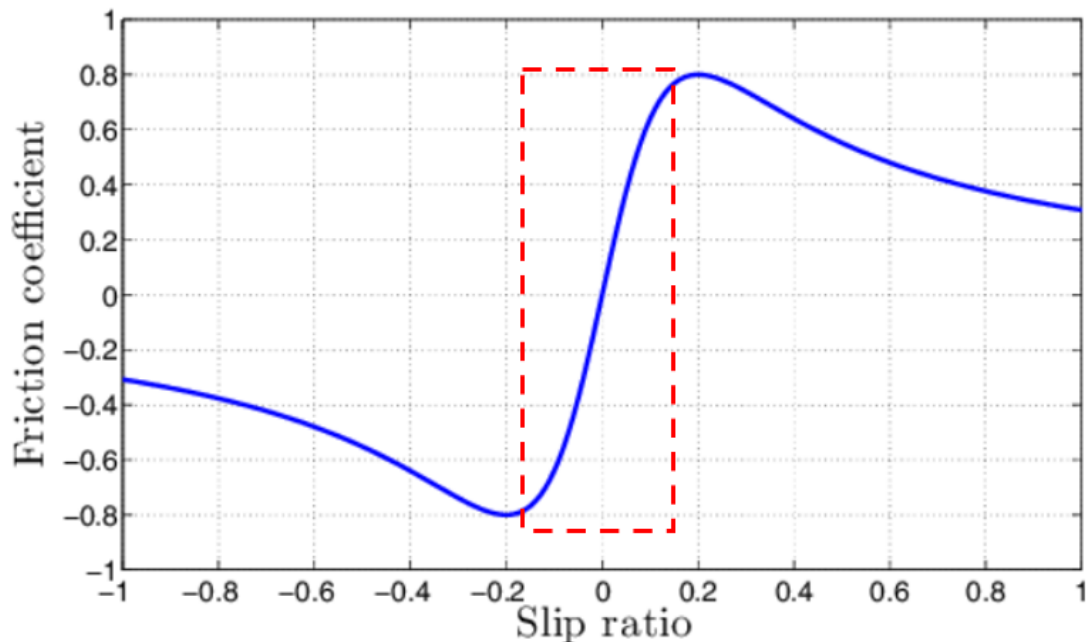
liukkaalla kelillä. Tienhoidon näkökulmasta on haastavaa myös se, että järjestelmien peliin puuttumisia tapahtuu harvemmin maanteillä vaan suurin osa aktivoitumisista sijoittuu kaupunkien läheisyyteen ja risteysalueille, kuten on nähtävissä kuvasta 6. [7, s. 4.]



Kuva 6. ASR-järjestelmän aktivoitumiset Västeråsin kaupungin alueella päivän aikana liukkaalla ajokelillä. Kuvasta nähdään, että suurin osa ASR-järjestelmän aktivoitumisista tapahtuu taajama-alueilla [7, s. 5].

Suurin osa normaaliajosta tapahtuu siis alueella, jossa heräte ei ole riittävä aktiivisten turvajärjestelmien aktivoitumiseksi. Normaaliajossa liikutaan siis pääosin rengaskitkan lineaarisella alueella (kuva 7). Tästä syystä ajodynamiikan menetelmiin, kuten renkaan luistojäykkyyteen, perustuvia menetelmiä maksimitkan arviointiin rengaskitkan lineaarisella alueella on tutkittu. Renkaan ja tien

välisen kitkan ja luistojäykkyyden suhde perustuu kuitenkin empiiriseen tietoon, ja tämän menetelmän ongelmana onkin vaaditut ennakkotiedot ajoneuvoon asennettujen renkaiden ominaisuuksista.



Kuva 7. Rengaskitkan suhde luistoon, lineaarinen alue ympäröity [15].

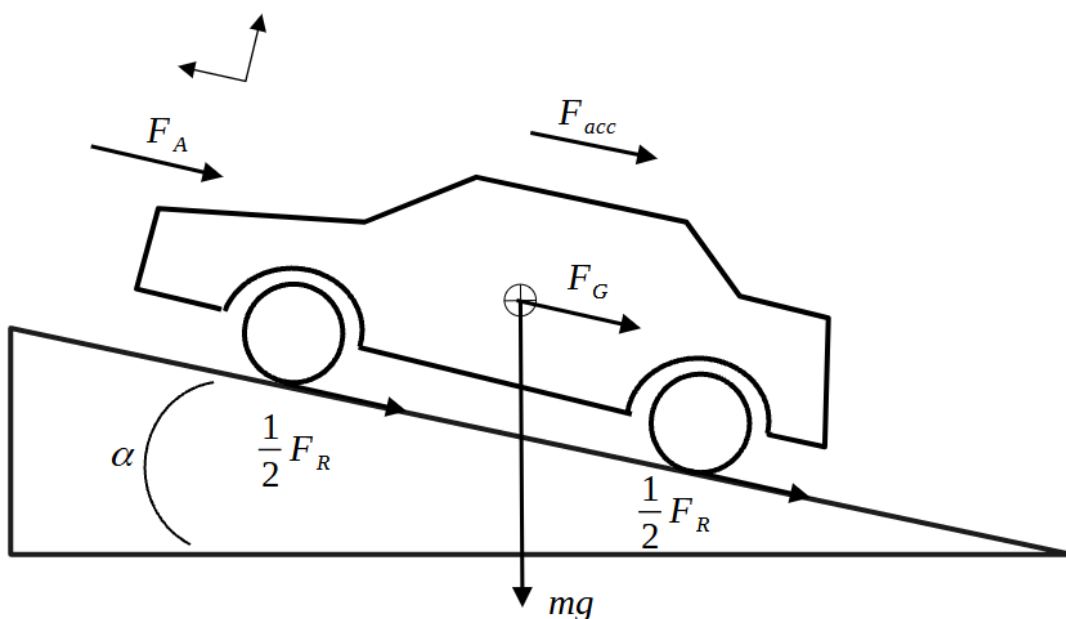
Albinsson ja kumppanit tutkivat vaaditun herätteen määrää ja eri rengasmallien sopivuutta kitkan estimointiin sovittamalla epälineaarisia rengasmalleja 76:lla eri renkaalla lumipinnalla suoritettujen mittauksien dataan arvioidakseen odotettua arviointivirhettä, kun renkaasta ei ole ennakkotietoja. Heidän tutkimuksensa perusteella yleisesti käytetty Magic Formula -rengasmalli vaatii 65 %:n herätteen, että saavutetaan alle 10 %:n virhe häiriöttömässä ympäristössä. [16.] Tämän perusteella kitkan estimointi renkaan lineaarisella alueella on hyvin vaikeaa ajodynamiikan menetelmiä soveltaen.

3 Ajoneuvon pitkittäisdynamiikka

Android-sovelluskäytössä ainoa tapa estimoida tiekitkaa ilman ulkoisia mittalaitteita on hyödyntää matkapuhelinten sisäänrakennettuja antureita. Tässä luvussa tarkastellaan ajoneuvon pitkittäistä dynamiikkaa, jonka avulla tiekitkaa voidaan estimoida.

3.1 Ajovastukset

Ajoneuvon pituussuuntaiseen liikkeeseen vaikuttaa useita eri syistä aiheutuvia voimia. Ajoneuvon liikettä vastustavia voimia ovat ilmanvastuksesta, renkaiden vierinvastuksesta, nousuvastuksesta ja kiihdytyksestä aiheutuvat voimat (kuva 8).



Kuva 8. Ajoneuvon ajovastukset.

Ajoneuvoon vaikuttava kokonaisvastus voidaan esittää yhtälöllä 1,

$$F_{res} = F_a + F_R + F_G + F_{acc} \quad (1)$$

jossa F_a on ilmanvastuksesta aiheutuva voima, F_r renkaan vierinvastus, F_G nousuvastus ja F_{acc} kiihdytysvastus. Näiden voimien summan verran ajoneuvon on kyettävä siirtämään tiehen, jotta ajoneuvo pysyy tasaisessa liikkeessä. Näin ajoneuvon pituussuuntaiseksi liikeyhtälöksi saadaan

$$ma_x = F_x - F_{res} \quad (2)$$

jossa F_x on auton voimansiirrosta tiehen siirretty voima.

Ilmanvastuksen aiheuttama voima voidaan laskea yhtälöstä 3,

$$F_a = \frac{1}{2} \rho v^2 * A * c_d \quad (3)$$

jossa ρ on ilman tiheys, c_d ilmanvastuskerroin, joka voidaan määrittää kokeellisesti tai kysyä valmistajalta sekä A ajoneuvon etuosan pinta-ala.

Renkaiden vierinvastus aiheutuu renkaan muodonmuutoksesta kuorman alla. Vierinvastus voidaan esittää yhtälöllä 4.

$$F_r = fmg \quad (4)$$

Yhtälössä 4 f on vierinvastuskerroin, joka vaihtelee renkaista ja ajoneuvosta riippuen. Vierinvastuskerroin on yleensä välillä 0,01–0,04.

Nousuvastus johtuu painovoiman vaikutuksesta ajoneuvoon sen noustessa rinteä ylös. Kun rinteeseen kulma α tiedetään, nousuvastus voidaan laskea yhtälöllä 5.

$$F_G = mg * \sin(\alpha) \quad (5)$$

Ajoneuvon liiketilän muuttamiseksi alkunopeudesta v_{x1} nopeuteen v_{x2} kiihtyvyydellä $a_x = \frac{dv_x}{dt}$, kiihdytysvastus F_{acc} on voitettava. Muuttuvassa liikkeessä olevan ajoneuvon ei siis tarvitse voittaa ainoastaan ilmanvastusta, vierinvastusta ja

nousuvastusta, vaan myös ajoneuvon pyörivien massojen hitausmomenteista johtuva kiihdytysvastus. Kiihdytysvastus voidaan esittää yhtälöllä 6.

$$F_{acc} = a_x \left(m + \frac{J}{r_{dyn}^2} \right) \quad (6)$$

Yhtälössä J on ajoneuvon pyörivien massojen yhdistetty hitausmomentti, jolloin termistä $m + \frac{J}{r_{dyn}^2}$ voidaan käyttää myös ilmausta redusoitu massa. Yhdistetty hitausmomentti J on ajoneuvon pyörivien osien hitauksien summa, joka voidaan laskea yhtälöllä 7,

$$J = J_w + i_{df}^2 * J_{ds} + i_{df}^2 * i_G^2 * (J_{mot} + J_C + J_G) \quad (7)$$

jossa

- J_w on pyörien yhdistetty hitausmomentti
- i_{df} on tasauspyörästäön välityssuhde
- J_{ds} on vetoakselien yhdistetty hitausmomentti
- i_G on valitun vaihteen välityssuhde
- J_{mot} on moottorin hitausmomentti
- J_C on kytkimen hitausmomentti
- J_G on vaihteiston hitausmomentti.

Kiihdytysvastuksen yhtälöä voidaan yksinkertaistaa ottamalla käyttöön massatekijä e_m . Massatekijä voidaan muodostaa yhtälöllä 8.

$$e_m = \frac{J}{m * r_{dyn}^2} + 1 \quad (8)$$

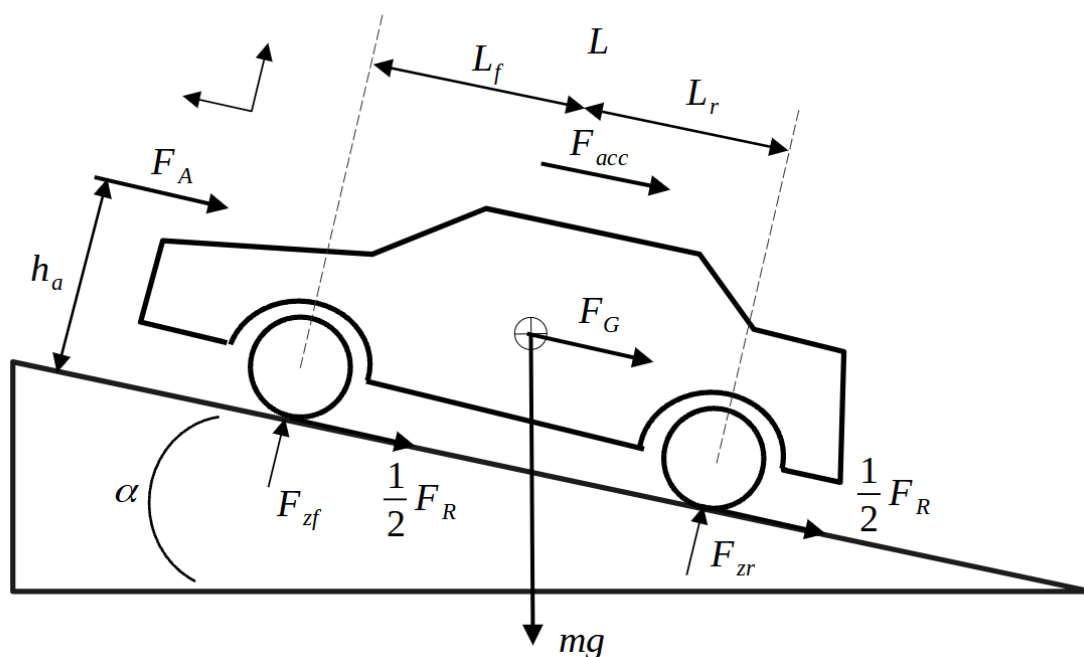
Tämän jälkeen kiihdytysvastuksen yhtälö voidaan yksinkertaistaa muotoon

$$F_{acc} = a_x * (e_m * m + m_{add}) \quad (9)$$

jossa m_{add} on kuljettajasta, matkustajista ja kuormasta koostuva massa. [17, s. 35–45.]

3.2 Normaalivoima

Normaalivoimalla tarkoitetaan auton pyöriin pystysuuntaisesti vaikuttavaa voimaa ts. renkaiden kuorma, jonka merkittävin vaikuttava tekijä on auton massa. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat ajoneuvon painopisteen korkeus ja etäisyys akseleista, ilmanvastus, ajoneuvon kiihtyvyys ja tienpinnan pitkittäissuuntainen kaltevuus. Muuttujat määritetään kuvan 9 mukaisesti.



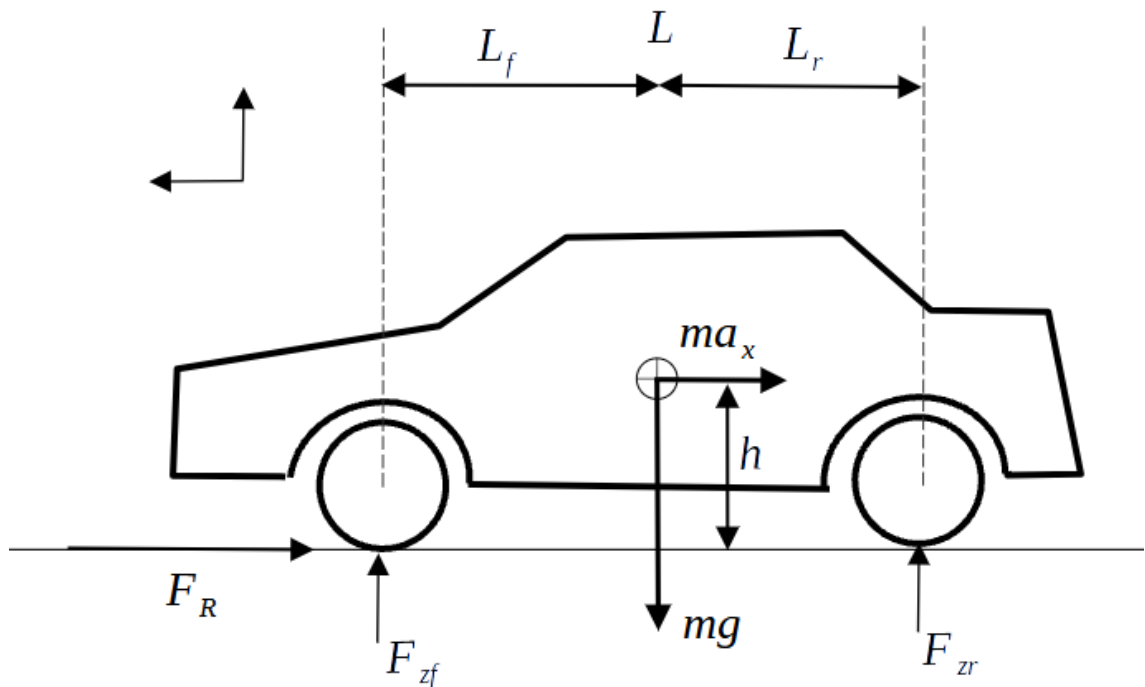
Kuva 9. Normaalivoimat ja niiden laskentaan vaikuttavat tekijät.

Momenttitarkastelun jälkeen voidaan todeta, että tilanteessa, jossa tienpinta ei ole kalteva ajoneuvon poikittaissuunnassa eikä ajoneuvolla ei kiihdytetä tai jarruteta, staattiset akselikuormat eturenkaille F_{zf} ja takarenkaille F_{zr} voidaan laskea yhtälöillä 10 ja 11. [18, s. 98.]

$$F_{zf} = \frac{mg \cdot L_r \cos(\alpha) - ma_x \cdot h - F_a \cdot h_a - mgh \cdot \sin(\alpha)}{L} \quad (10)$$

$$F_{zr} = \frac{mg \cdot L_f \cos(\alpha) + ma_x \cdot h + F_a \cdot h_a + mgh \cdot \sin(\alpha)}{L} \quad (11)$$

Edellä esitetyistä yhtälöistä on nähtävissä, että ajoneuvolla kiihdytettäessä normaalivoima taka-akselilla kasvaa ja etuakselilla se pienenee. Vastaavasti jarrutettaessa normaalivoima etuakselilla kasvaa ja takana pienenee. Tapahtuu siis dynaamista painonsiirtoa. Merkitään dynaamista painonsiirtoa muuttujalla ΔF_z ja tarkastellaan kiihdyttävän auton tapausta (kuva 10).



Kuva 10. Ajoneuvoon vaikuttavat voimat kiihdytystilanteessa.

Painonsiirto on suurimmillaan lähtökiihdytyksessä, jolloin voidaan olettaa ilmanvastuksen olevan likimain 0. Momenttiyhtälöt voidaan kirjoittaa muotoon

$$(F_{zf} - \Delta F_z) \cdot L + ma_x \cdot h - mg \cdot \frac{F_{zf}}{mg} \cdot L = 0 \quad (12)$$

$$F_{zf} \cdot L - \Delta F_z \cdot L + \frac{mg}{g} \cdot a \cdot h - F_{zf} \cdot L = 0 \quad (13)$$

josta seuraa, että

$$\Delta F_z = \frac{mg}{g} * \frac{h}{l} * a_x = \frac{h}{l} * ma_x \quad (14)$$

Dynaaminen painonsiirto on siis suuresti riippuvainen kiihtyvyydestä ja siten myös renkaiden kyvystä siirtää voimaa tiehen. Kiihdyttävän auton tapauksessa maksimaalinen dynaaminen painonsiirto taka-akselille voidaan laskea yhtälöllä

$$\Delta F_{z,max} = mg * \frac{l_f}{l} + \frac{h}{l} (\mu \Delta F_{z,max} - f * mg) \quad (15)$$

joka voidaan esittää yksinkertaisemmin muodossa

$$\Delta F_{z,max} = \frac{\frac{l_f - f * \frac{h}{l}}{1 - \mu * \frac{h}{l}} * mg}{1 - \mu * \frac{h}{l}} \quad (16)$$

[19.]

3.3 Ajoneuvon suorituskyvyn teoreettiset rajat

Kitkakerroin μ kuvaa renkaaseen vaikuttavan normaalivoiman ja tiehen siirretyn voiman suhdetta:

$$\mu = \frac{F_z}{F_x} \quad (17)$$

Yhtälöstä nähdään, että tilanteessa jossa $\mu = \mu_{max}$ suurinta mahdollista tiehen siirrettävää voimaa ja siten myös maksimikiihtyvyyttä rajaa vetävillä pyörillä vaikuttava normaalivoima. Näin ollen takavetoisen auton tapauksessa kiihdytettäessä dynaaminen painonsiirto lisää normaalivoimaa vetävillä pyörillä. Takavetoisen auton rajakiihtyvyys voidaan laskea yhtälöllä

$$a_{max,RWD} = \frac{\mu * \frac{l_f - f}{1 - \mu * \frac{h}{l}} * g}{1 - \mu * \frac{h}{l}} \quad (18)$$

Etuvetoisessa autossa taas toiminta on päinvastainen. Kiihdytys vie painoa pois etuakselilta, jolloin dynaaminen painonsiirto huonontaa maksimikiikkyvyyttä. Rajakiihtyvyys etuvetoiselle autolle saadaan yhtälöstä

$$a_{max,FWD} = \frac{\mu * \frac{l_r}{l} - f}{1 + \mu * \frac{h}{l}} * g \quad (19)$$

Nelivetoisessa autossa kaikki pyöriin vaikuttava normaalivoima voidaan ideaalitapauksessa hyödyntää, joten nelivetoisen auton rajakiihtyvyudeksi saadaan

$$a_{max,AWD} = (\mu - f) * g \quad (20)$$

[19.]

4 Mittaustekniikka Android-ympäristössä

Nykyaikainen matkapuhelin on varustettu useilla antureilla ympäröivien olosuhteiden mittaamiseen. Esimerkiksi ympäröivän tilan valoisuutta tarkastellaan valoisuusanturilla, läheisyystunnistimella havaitaan, kun puhelin nostetaan korvalle, kiihtyvyysantureita käytetään peleissä ja sovelluksissa havaitsemaan esimerkiksi näytön kallistusta ja lämpötila- ja kosteustunnistimilla voidaan arvioida kastepistettä. Osa sensoreista on puhtaasti hardware-pohjaisia, eli puhelimessa on fyysinen anturi mittaamassa suuretta, mutta osa voi olla myös software-pohjaisia. Antureiden software-pohjaisuus tarkoittaa, että ne eivät ole fyysisiä antureita, mutta ne jäljittelevät sellaisen käytöstä. Ne laskevat arvoja toisille suureille fyysisiltä antureilta mitattujen arvojen perusteella. Esimerkki joskus ohjelmallisesti toteutetusta anturista on pitkittäskiihtyvyysanturi, joka mittaa laitteeseen kohdistuvan kiihtyvyyden kaikilla kolmella fyysisellä akselilla lukuun ottamatta painovoimaa. [20.]

Android tarjoaa sovelluskehittäjille puitteet laitteen anturien hyödyntämiseksi sovelluksissa. Rajapinnan kautta on mahdollista määrittää saatavilla olevat anturit laitteessa, niiden mittausalueiden rajat sekä kerätä raakadataa sovelluksessa käytettäväksi.

4.1 Mobiililaitteiden sovelluskehitys

Matkapuhelinsovelluksia on mahdollista kehittää käyttäen useita erilaisia kehitysalustoja ja ohjelmointikieliä. Karkeasti sovelluskehitys jaetaan pääsääntöisesti kahteen osaan: natiiviin ja cross-platformiin.

Natiivilla sovelluskehityksellä tarkoitetaan, että applikaatio kehitetään vain yhdelle tietylle käyttöjärjestelmälle, hyödyntäen sille erityisesti tarkoitettuja ohjelmointikieliä ja työkaluja. Markkinoilla on tällä hetkellä kaksi pääsääntöisesti käytettyä käyttöjärjestelmää, Android ja iOS. Natiivissa sovelluskehityksessä Androidille käytetään ohjelmointikielinä Javaa ja/tai Kotlinia, iOS:lle taas Swiftiä tai Objective-C:tä. [21.]

Cross-platform sovelluskehityksessä applikaatiosta ei kehitetä erillisiä versioita eri käyttöjärjestelmille, vaan sama sovellus toimii niin Androidissa, kuin iOS:kin. Tapoja kehittää cross-platform-sovelluksia on tehdä web-pohjaisia sovelluksia hyödyntäen web-kehityksessä usein käytettyjä työkaluja, kuten HTML, CSS ja JavaScript, tai käyttää cross-platform-kehitykseen tarkoitettuja ohjelmointipuitteita, kuten Flutter tai React Native. Web-pohjaisia applikaatioita voidaan ajaa puhelimen internetselaimessa, eivätkä ne siten vaadi jakelua Google Playn tai AppStoren kautta. Niiden rajoituksena on rajoitettu pääsy laitteen toimintoihin, kuten yhteystietoihin, kalenteriin tai antureihin. [21.]

Cross-platform kehitykseen tarkoitettujen ohjelmointipuitteiden välillä on myös eroja. Esimerkiksi Flutter soveltuu paremmin laitetta raskaammin kuormittavien ja MVP-sovellusten kehittämiseen. Flutterilla kehitettyjä sovelluksia ovat mm. Google Ads ja eBay Motors. React Native soveltuu taas paremmin kevyempien sovelluksien kehitykseen. Sen etuihin voidaan laskea JavaScript-ohjelmointikielen käyttö. JavaScript on yleinen ohjelmointikieli web-ympäristössä, joten React Nativella applikaatiokehityksen aloittaminen on helpompaa yrityksissä, joissa on jo valmiiksi web-kehityksen osaamista. Mm. Instagramin ja Facebookin mobiilisovellukset on kehitetty React Nativella. [21.]

Valintaa natiivin ja cross-platform-sovelluskehityksen välillä tehtäessä on otettava huomioon kummankin edut ja haitat. Natiivisti kehitetyt sovellukset hyödyntävät laitteen resursseja tehokkaammin sekä tarjoavat pääsyn hyödyntämään puhelimen laitteistoa. Mikäli sovellus on kuitenkin tarkoitus kehittää kummallekin pääsääntöisistä käyttöjärjestelmistä, tarvitaan luonnollisesti molemmille käyttöjärjestelmälle omat osaajansa, mikä nostaa kustannuksia. [22.]

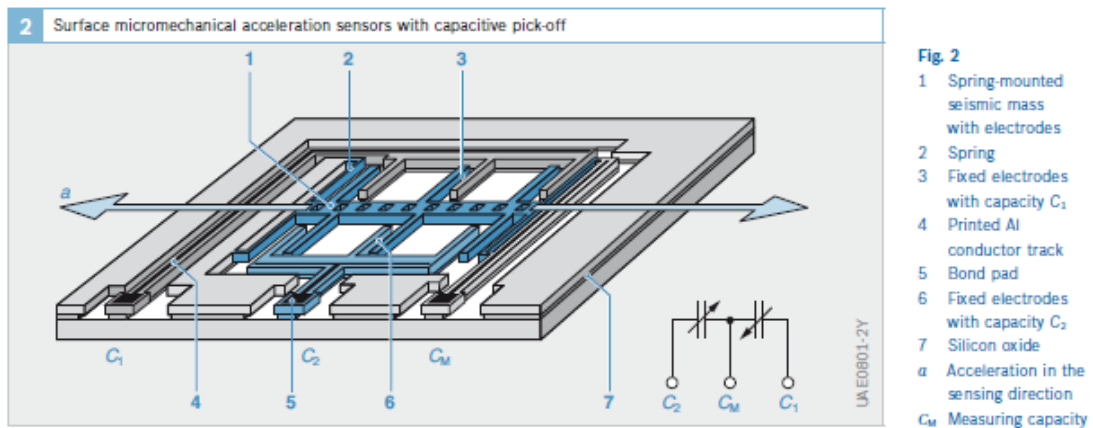
Cross-platform-kehityksen etuina taas on tehdyn koodin käytettävyys molemmissa alustoissa, joka vähentää työn määrää. Se kuitenkin häviää suorituskyvyssä natiiville, ja myös esimerkiksi natiivin eri antureille tarjoamien rajapintojen hyödyntäminen cross-platform-kehityksessä on vaikeampaa. Cross-platform-aplikaatioiden koodi on myös vaikeampaa kirjoittaa johtuen koodin korkean tason abstraktoinnista, ja kehittäjien on myös tiedettävä molempien käyttöjärjestelmien erityispiirteet. [22.]

Tämän opinnäytetyön aiheena oleva applikaatio on suunniteltu julkaistavaksi aluksi ainoastaan Android-käyttöjärjestelmälle. Tästä syystä luonnollinen valinta kehitysympäristöksi oli natiivi. Applikaation hyödyntäessä myös puhelimen antureita ja Bluetooth- ja Wi-Fi-yhteyksiä sekä suorittaessa laskentaa natiivikehityksen tarjoama suorituskyky on merkittävä. Ohjelmointikielenä valittiin käytettäväksi Javaa, sillä kaikki aikaisemmin tehty koodi oli kirjoitettu Javalla. Ohjelmointiympäristönä valittiin käytettäväksi Android Studiota, sillä se oli tuttu jo entuudestaan, ja on käyttöjärjestelmän virallinen kehitysympäristö.

4.2 Matkapuhelimien kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit

Puhelimeissa käytetyt kiihtyvyyssanturit ovat poikkeuksetta pieniä elektromeekaanisia systeemejä, joista käytetään myös nimeä MEMS-laitteet. Kiihtyvyyssanturien toimintaperiaate perustuu seismisen massan liikkeen aiheuttamien muutoksien mittaamiseen. Massan liike aiheuttaa muutosta anturin sisäisten elektrodien kapasitanssissa, joka on lineaarisesti riippuvainen massan kiihtyvyydestä. [23.]

Yhden akselin kiihtyvyyssanturin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Kiihtyvyyssanturin rakenne [23, s. 341].

Useimmiten puhelimissa käytettävissä kiihtyvyyssantureissa on kolmen akselin kiihtyvyyssantureiden lisäksi myös integroitu kolmen akselin gyroskooppi. Yleisesti puhelimissa käytettyjä antureita ovat mm. Boschin valmistama BMI160, ST Microelectronicsin LSM6DSL sekä Panasonicin K6DS3TR, jotka noudattavat tätä rakennetta. Opinnäytetyön testivaiheessa käytetyssä Samsung Galaxy A30 -puhelimessa on LSM6DSL-anturi [24.].

Tarkkaa tietoa puhelimissa käytetyistä kiihtyvyyssantureista on vaikeaa löytää, sillä valmistajat eivät tyypillisesti sitä julkista. Niin ollen saatavilla oleva tieto on peräisin puhelimista syvemmin kiinnostuneiden harrastajien tutkimuksista.

Puhelimen antureiden hyödyntäminen tapahtuu käyttämällä Android Sensor API-rajapinnan luokkia ja funktioita. Esimerkki puhelimen valoisuusanturin ottamisesta sovelluksen käyttöön on esitelty esimerkikoodissa 1.

```
public class SensorActivity extends Activity implements SensorEventListener {
    private SensorManager sensorManager;
    private Sensor mLight;

    @Override
    public final void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
        super.onCreate(savedInstanceState);
        setContentView(R.layout.main);

        sensorManager = (SensorManager) getSystemService(Context.SENSOR_SERVICE);
        mLight = sensorManager.getDefaultSensor(Sensor.TYPE_LIGHT);
    }
}
```

```

@Override
public final void onAccuracyChanged(Sensor sensor, int accuracy) {
    // Do something here if sensor accuracy changes.
}

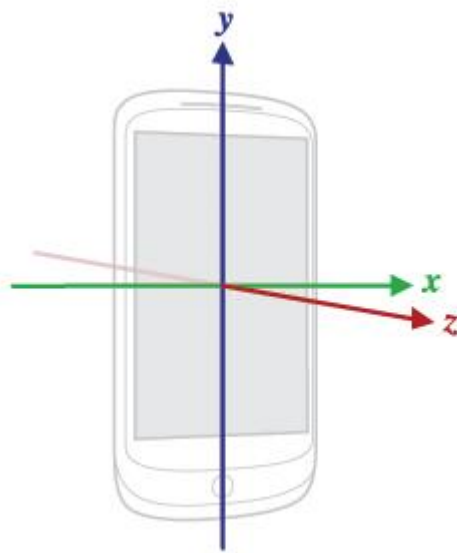
@Override
public final void onSensorChanged(SensorEvent event) {
    // The light sensor returns a single value.
    // Many sensors return 3 values, one for each axis.
    float lux = event.values[0];
    // Do something with this sensor value.
}

```

Esimerkkikoodi 1. Valoisuusanturin ottaminen sovelluksen käyttöön. Funktiossa `onCreate()` haetaan instanssi valoisuusanturista ja otetaan se käyttöön. Valoisuusanturia näytteistettäessä suoritetaan funktio `onSensorChanged()`, joka saa syötteenä luokan `SensorEvent` olion `event`. Tämän olion kautta on pääsy anturin mittaamiin arvoihin.

Anturien mittaamia arvoja käsitellään 32-bittisinä liukulukumuuttujina. Tämä vähentää huomattavasti ns. kvantisointivirheen määrää. Kvantisointivirheellä tarkoitetaan virhettä, jota syntyy muunnettaessa analogista signaalia digitaaliseksi käyttäen verrattain pientä bittimäärää sen esityksessä [25, s. 17].

Android Sensor API -rajapinnan kuvauksessa määritellään Android-puhelimien noudattavan kuvan 12 mukaista koordinaattijärjestelmää.

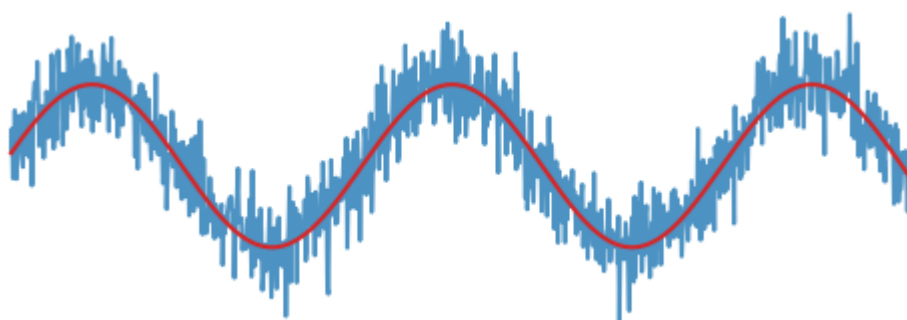


Kuva 12. Android-puhelimen koordinaattijärjestelmä [20].

5 Signaalinkäsittely

5.1 Mittauskohina

Fysikaalisia suureita elektronisesti mitattaessa signaali ei koskaan ole ideaalisen puhdas, vaan se sisältää aina mittauskohinaa (kuva 13). Kohinalla tarkoitetaan elektronisessa järjestelmässä esiintyvää spontaania vaihtelua, joka aiheutuu laitteiden, komponenttien tai materiaalien fysiikasta. Kohinan käyttäytymistä ei voida ennustaa eikä sitä voida poistaa, mutta sen vaikutusta voidaan kuitenkin minimoida. Erilaisia kohinamekanismeja ovat mm. terminen kohina, raekohina sekä $\frac{1}{f}$ -kohina.



Kuva 13. Esimerkki kohinasta signaalissa, puhdas signaali punaisella.

5.1.1 Terminen kohina

Terminen kohina on ilmiö, joka syntyy energiaa lämmöksi muuttavissa komponenteissa. Elektronisissa laitteissa sen erityisiä lähteitä ovat resistiiviset komponentit. Termistä kohinaa kutsutaan myös Johnson-Nyqvist-kohinaksi. Se aiheutuu johteessa olevien varauksenkuljettajien satunnaisesta lämpöliikkeestä. Kohinan vaikutusta voidaan minimoida pudottamalla lämpötilaa sekä kaventamalla kaistanleveyttä. [26, s. 752.]

5.1.2 Raekohina

Raekohinaa liittyy aina tasavirtaan, ja syntyy elektronien kulkiessa rajapintojen tai potentiaalikynnysten yli esimerkiksi diodeissa ja transistoreissa. Raekohinaa voidaan vähentää vähentämällä potentiaalikynnyksiä signaalitiellä, käyttämällä FET-transistoreja BJT-transistorien sijasta, kaventamalla kaistaa sekä pitämällä virrat niin pieninä kuin mahdollista ilman, että se vaikuttaa signaaliin. [26, s. 748.]

5.1.3 $\frac{1}{f}$ -kohina

$\frac{1}{f}$ -kohina on matalilla taajuuksilla kaikissa aktiivisissa piireissä esiintyvää kohinaa. Sen alkuperä ei ole täysin tiedossa, mutta tyypillisimmin se liitetään epäpuhtauksiin ja kidevirheisiin, jotka sitovat ja vapauttavat varauksenkuljettajia satunnaisesti. $1/f$ -kohinan tehospektri ei ole tasainen, vaan kohina kasvaa mentäessä pienemmälle taajuudelle. Keskiarvoistuksesta ei ole $1/f$ -kohinan ollessa määräävä juuri hyötyä, vaan tehokkaampi tapa minimoida sitä on moduloida mittaus korkeammille taajuuksille. [26, s. 753.]

5.2 Näytteistystaajuus

Mitattaessa analogista signaalia mittauksen näytteistystaajuudella on iso merkitys siinä, kuinka hyvin signaalin informaatio säilyy. Mikäli näytteistystaajuus on liian pieni suhteessa signaalin taajuuteen, signaalin näytteenottotaajuutta korkeampitaajuiset komponentit "laskostuvat" alempitaajuisen signaalin päälle. Näin ollen mitatusta signaalista ei enää saada rekonstruoitua alkuperäisen kaltaista signaalia. [27.]

Niin kutsutun Nyquistin teoreeman mukaan korkein taajuus, joka voidaan esittää tarkasti, on puolet näytteistystaajuudesta. Toisin sanoen näytteistystaajuuden tulisi olla kaksinkertainen mitattavan signaalin taajuuteen nähden, ettei laskostumista tapahdu. Käytännössä näytteistystaajuuden olisi kuitenkin syytä olla

jopa hieman tätä korkeampi mittauksessa tapahtuvien kvantisointivirheiden takia. [27.]

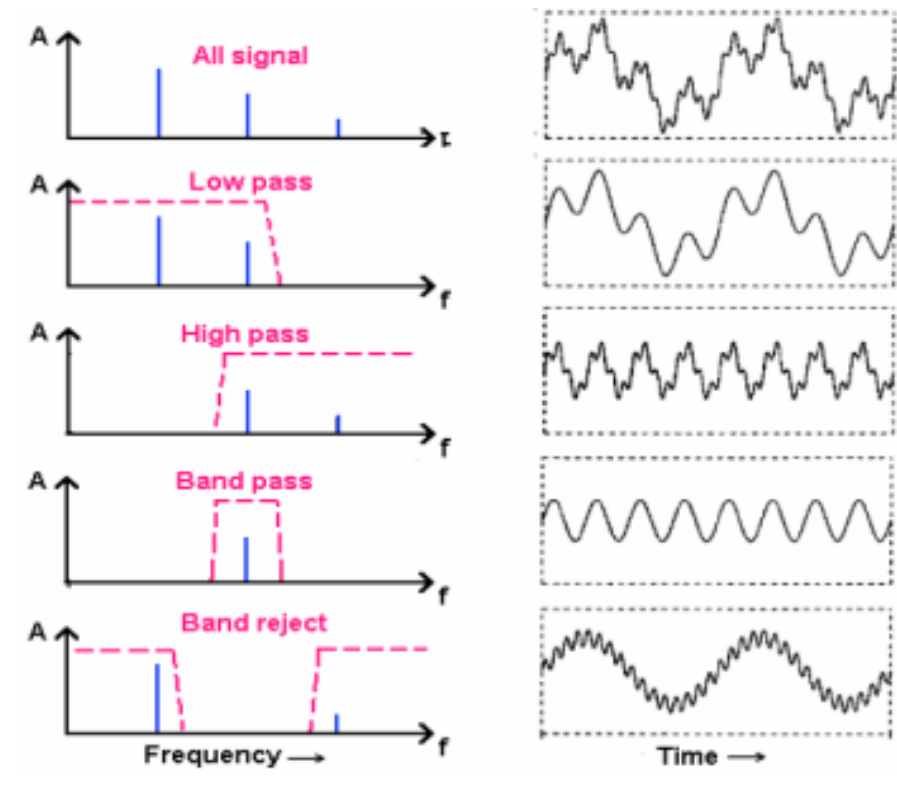
5.3 Signaalin suodatus

Kohinan vähentämiseksi signaalissa sitä suodatetaan. Suodattimia on sekä analogisia että digitaalisia. Analogiset suodattimet koostuvat elektronisista komponenteista, kuten kondensaattoreista, vastuksista ja keloista. Digitaalinen suodatin taas käsittelee signaalia pelkästään matemaattisten laskutoimitusten avulla, eikä näin koostu fyysisistä komponenteista.

Tavallisimmat suodatintyypit ovat seuraavat:

- alipäästösuodatin: vaimentaa korkeita taajuuksia, päästää läpi matalat
- alipäästösuodatin: vaimentaa matalia taajuuksia, päästää läpi korkeat
- kaistanpäästösuodatin: päästää läpi tietyllä kaistalla olevat taajuudet, vaimentaa kaistan ulkopuolisia
- kaistanestosuodatin: vaimentaa tietyn kaistan taajuuksia
- kokopäästösuodatin: kaikki taajuudet pääsevät läpi, vain vaihesiirto.

Suodatintyyppien toimintaa on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Suodatintyyppien esto- ja päästökaistat [28].

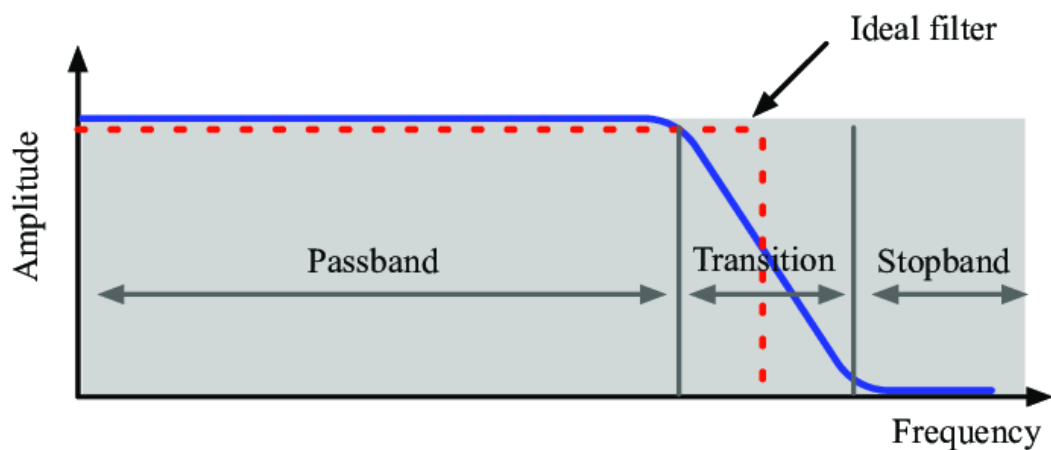
Päästökaistan ja estokaistan välistä pistettä kutsutaan rajataajuudeksi (engl. cut-off frequency).

Kaikki edellä mainitut suodatintyytit voidaan toteuttaa niin analogisesti kuin myös digitaalisesti. Tämän työn kannalta oleellisempaa on kuitenkin signaalin digitaalinen suodatus, joten analogisten suodattimien tarkempi käsittely on rajattu pois.

Digitaalinen suodatin voidaan toteuttaa joko FIR- tai IIR-suodattimena. FIR-suodattimet eivät sisällä takaisinkytkentää, mikä tarkoittaa, etteivät aiempien mittausten arvot vaikuta nykyiseen mittatulokseen. Tämän takia ne ovat ehdottoman stabiileja, ja ne on myös mahdollista toteuttaa lineaarivaiheisina, mikä tarkoittaa, etteivät ne vääristä signaalin ajoitusta. IIR-suodattimet taas perustuvat takaisinkytkettyihin silmukoihin, joten ne on myös mahdollista suunnitella epästabiileiksi. IIR-suodattimesta on vaikea tehdä vaihelineaarista, mutta se on suodattimena tehokkaampi kuin FIR-suodatin. [29.] Signaalia on mahdollista

myös suodattaa hyödyntämällä signaalin FFT-muunnosta taajuustasoon. Signaalin ei-toivotut taajuuskomponentit nollataan, jonka jälkeen signaalille suoritetaan käänteinen IFFT-muunnos takaisin aikatasoon. Tällä metodilla on kuitenkin rajoitteensa suodatettaessa signaalia reaaliajassa, ja muunnoksella takaisin aikatasoon voi olla odottamattomia sivuvaikutuksia signaaliin. [30.]

Idealisessa suodattimessa päästökaistan ja estokaistan välinen liuska olisi pystysuora eikä siirtymävaihetta päästökaistalta estokaistalle olisi ollenkaan. Luonnossa ideaalisen suodattimen toteuttaminen ei ole kuitenkaan mahdollista, vaan käytännön toteutuksessa suodatukseen käytetään erilaisia suodatinaprosimaatioita. Suodatinaprosimaatioissa päästökaistan ja estokaistan välillä on aina siirtymävaihe, jonka jyrkkyys vaihtelee aproksimaatiotyypin mukaisesti. Ideaalisen suodattimen ja aproksimaation eroa on havainnollistettu kuvassa 15.

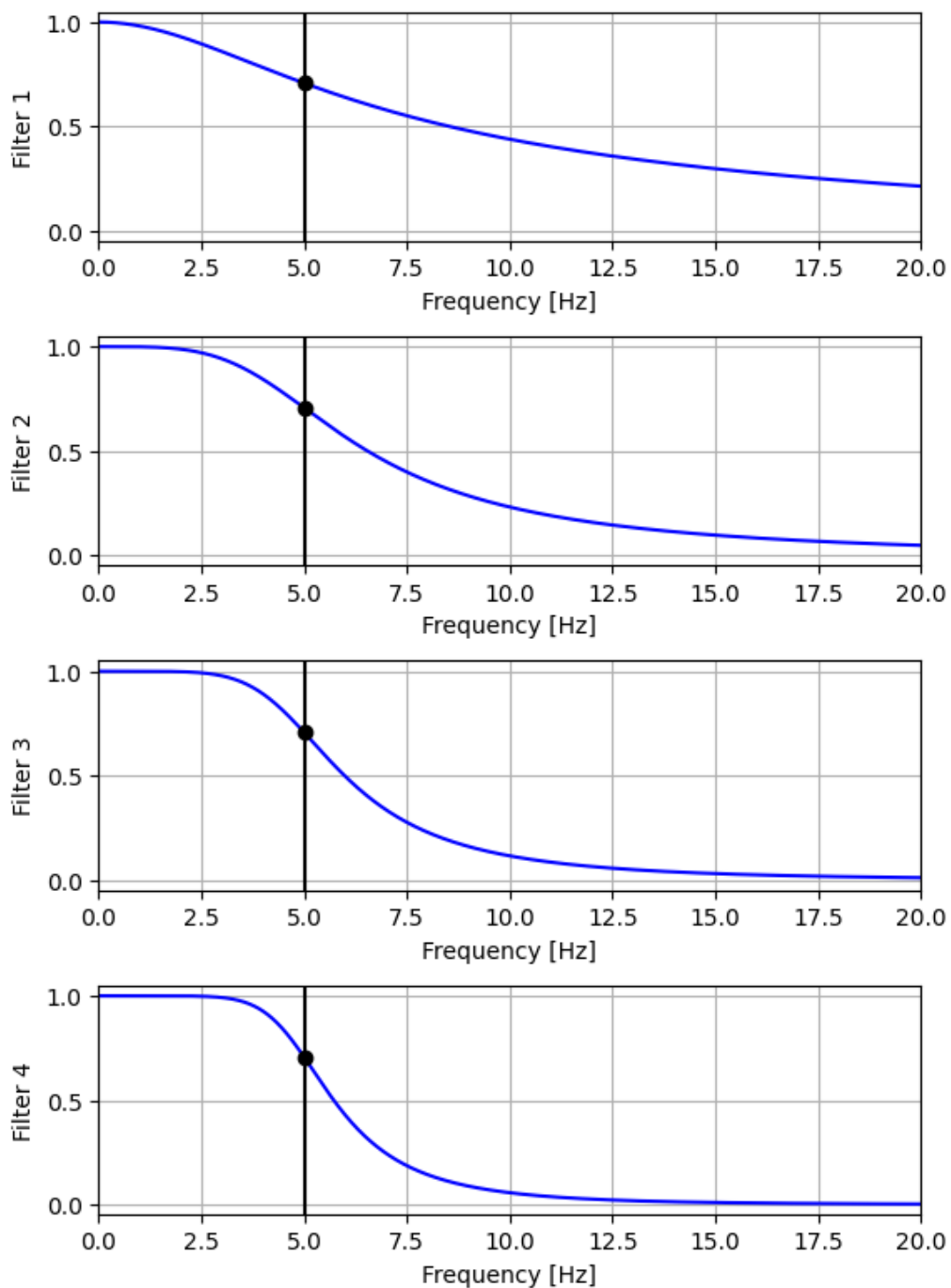


Kuva 15. Ideaalisen suodattimen ja suodatinaprosimaation ero [31].

Suodatinaprosimaatiossa rajataajuus määritetään siihen taajuuteen, jossa taajuuskomponentin amplitudi on laskenut -3 dB:n voimakkuuteen alkuperäisestä. Tätä taajuutta kutsutaan myös puolen tehon taajuudeksi. [32; 33.]

Suodatinaprosimaation rajataajuuden lisäksi sen ominaisuuksia kuvaa myös sen asteluku. Asteluku vaikuttaa suodattimen päästökaistan ja estokaistan välisen liuskan jyrkkyyteen. Erilaisia suodattimia tarkastellaan yleensä niiden

taajuusvastekuvaajan avulla. Kuvassa 16 on esitetty neljän erilaisen Butterworth-tyyppisen alipäästösuodattimen taajuusvaste kasvavilla asteluvuilla järjestyksessään 1, 2, 3 ja 4. Jokaisen suodattimen rajataajuus on sama eli 5 Hz.



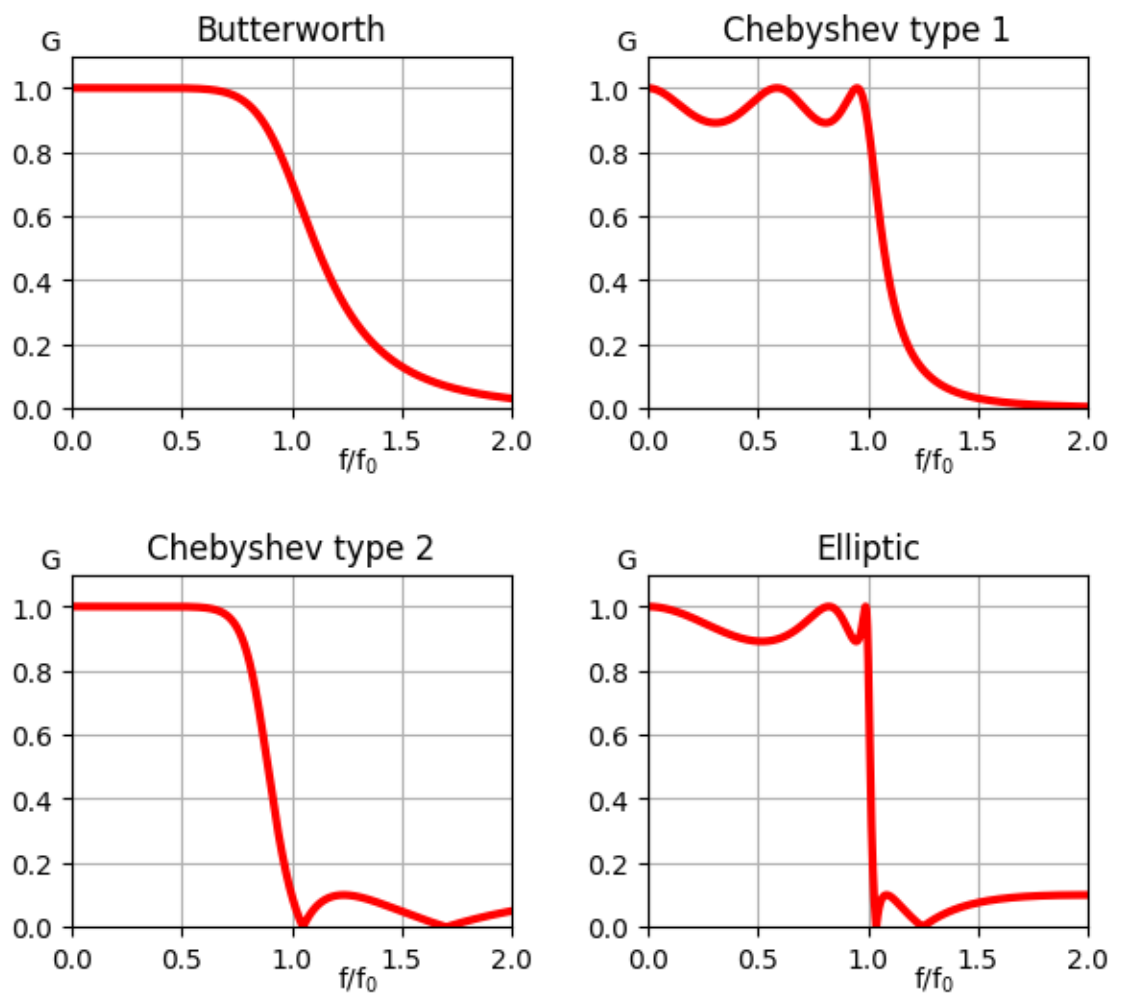
Kuva 16. Erilaisten Butterworth-tyyppisten alipäästösuodattimien taajuusvas- teita.

5.4 Suodatinapproksimaatiot

Tyypillisimmin käytettyjä suodatinapproksimaatioita ovat

- Butterworth
- Bessel
- Chebysev 1 ja 2
- elliptinen.

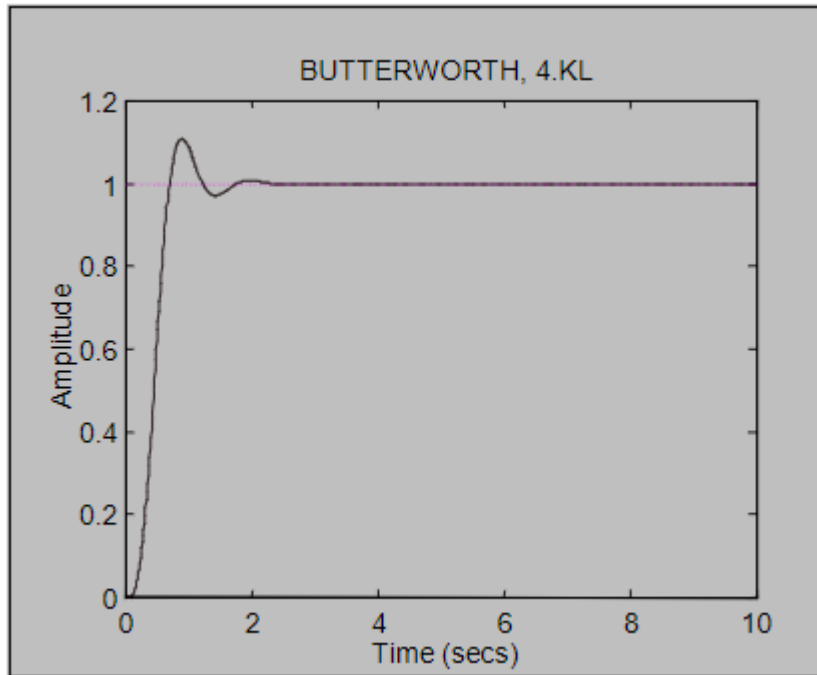
Suodatinapproksimaatioiden eroavaisuuksia havainnollistetaan kuvassa 17.



Kuva 17. Suodatinapproksimaatioiden eroja.

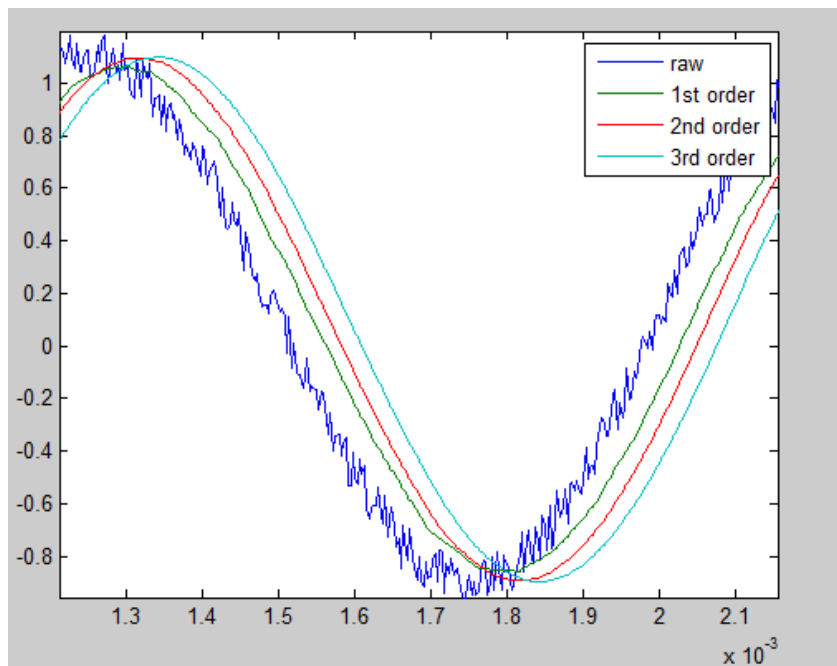
5.4.1 Butterworth-suodatin

Butterworth-suodatin on tunnetuin suodatinapproksimaatio, jolle on ominaista tasainen päästökaista, jolla ei ilmene väreitä (kuva 17). Estokaistalle siirtyminen tapahtuu tasaisesti ja monotonisesti. Butterworth-suodattimen negatiivisena ominaisuutena voidaan pitää ns. overshoot-ilmiötä askelvasteessa (kuva 18). [32.]



Kuva 18 4. Kertaluvun Butterworth-suodattimen askelvaste [32].

Butterworth-suodattimelle on myös ominaista se, että vaikka estokaistalle siirtymän jyrkkyyttä saadaan lisättyä kertalukua kasvattamalla, samalla myös vaihe-siirto kasvaa, kuten on nähtävissä kuvasta 19.



Kuva 19 Vaihesiirto kertaluvun kasvaessa [34].

Vaihesiirto kasvaa vastaavasti myös rajataajuuden pienentyessä, mutta myös kaistasiiirtymän jyrkkyys kasvaa.

5.4.2 Bessel-suodatin

Bessel-suodatin on ominaisuuksiltaan lähellä Butterworthia, kuitenkin vieläkin loivemmalla siirtymällä estokaistalle. Bessel-suotimen hyvinä ominaisuuksina on lähes lineaarinen vaihevaste sekä erinomainen transienttivaste, jossa ei esiinny värähtelyä eikä ylitystä. [32.]

5.4.3 Chebysev-suodattimet

Chebysev-suodattimille on ominaista joko päästökaistalla (Chebysev 1) tai päästökaistalla (Chebysev 2) esiintyvä väre (kuva 17). Chebysev-suodattimella on mahdollista saavuttaa Butterworth-suodatinta jyrkempi siirtyminen estokaistalle, joten tältä osin se vastaa lähemmin ideaalista suodatinta. Taajuusvasteessa esiintyvä väre sekä Butterworth-suodatinta huonompi transienttivaste heikentävät kuitenkin suodattimen ominaisuuksia. [32.]

5.4.4 Elliptiset suodattimet

Elliptisen suodattimelle on ominaista jyrkin siirtymä estokaistalle verrattuna Butterworth-, Chebysev- tai Bessel -suodattimiin. Siinä kuitenkin esiintyy väreitä sekä päästö- että estokaistalla (kuva 17), ja sen vaihevaste on hyvin epälineaarinen ja transienttiominaisuudet ovat huonot. [32.]

6 Viranomaisvaatimukset kitkamittaussovellukselle

Liikennevirasto (nyk. Väylävirasto) julkaisi vuonna 2011 ohjeen, joka sisältää kitkamittauksen menetelmäkuvauksen sekä vaatimukset jarrutuskitkamittareille. Ohjeessa esitetään vaatimuksen kitkamittarin käyttöturvallisuudelle, kalibroituudelle ja mittaustarkkuudelle. Tämän opinnäytetyön aiheena olevaa kännykkäsovellus on tarkoitus rakentaa siten, että sitä voidaan tulevaisuudessa käyttää virallisena työkaluna teiden kunnonvalvonnassa. Sen on siis kyettävä täyttämään nämä vaatimukset. Mittarin hyväksyttämiseksi Väyläviraston käyttöön vaatimusten täytyminen on testautettava puolueettomalla asiantuntijalla. Vuoden 2015 ohjeessaan jatkuvatoimisille kitkamittareille Väylävirasto mainitsee Ivalossa toimivan Testworld Oy:n järjestävän testipalveluja kitkamittareille.

6.1 Kitkan mittaamisen menetelmä

Liikenneviraston ohjeen mukaisesti kitkan mittaaminen tapahtuu jarruttamalla voimakkaasti ABS-jarruilla ja nastarenkailla varustetulla henkilöautolla lähtönopeudesta 60 km/h tiellä, jonka kaltevuus on enintään 2 %. Jos mittari on kykenevä mittaamaan kitkaa jyrkemmissä kuin 2 %:n mäissä, tämä on myös mahdollista, mutta mittauksen yhteydessä on oltava maininta mäen jyrkkyydestä. [35.]

Ajoneuvojen ollessa renkailtaan ja ominaisuuksiltaan erilaisia, mittarit kalibroidaan näyttämään lumipolanteella -5 °C :n lämpötilassa kitka-arvoa 0,29. [35.]

6.2 Vaatimukset käyttöturvallisuudelle

Vaadittu jarrutusaika kitkan estimoimiseksi tulisi olla alle kaksi sekuntia. Mittarin käyttöpainikkeiden tulisi olla sellaisia, ettei niiden käyttö ajon aikana kuormita käyttäjää kohtuuttomasti. Mittarin näyttöä tulisi olla vaivaton tarkastella sekä hämärällä että voimakkaassa auringonpaisteessa. Mittarin tulee olla niin käyttövarma, että kokenut käyttäjä saa sillä uskottavia tuloksia 95 %:ssa mittauksista. [35.]

6.3 Vaatimukset kalibroituudelle

Mittarin osoittama kitkataso tulee olla muutettavissa kalibroitukertoimella, jonka suuruus on nähtävissä laitteesta kalibroinnin jälkeen. Tämä mahdollistaa vertailun kalibroitukertoimen suhteesta renkaiden käyttöikään. Mikäli kalibroitukertoimen ohella käytetään myös muita tapoja kitkatason säätämiseen, kuten offset, myös näiden lisätermien suuruus tulee olla jälkeinpäin tarkastettavissa. Lisäksi mittarin valmistajan tulee esittää oma näkemyksensä siitä, millä tavalla kalibroiden saadaan paras korrelaatio jo hyväksytyjen mittarien kanssa. [35.]

6.4 Vaatimukset mittatarkkuudelle

Kahden samanlaisen mittarin ero tulee olla 95 %:ssa mittauksista alle 10 %, kun liikutaan maantiellä laatuvaatimuskitka-alueella 0,20–0,30. Ehdon tulee täytyä, kun suoritetaan vähintään 100 mittausta ja mittauksissa liikutaan tasaisesti em. kitka-alueella. [35.]

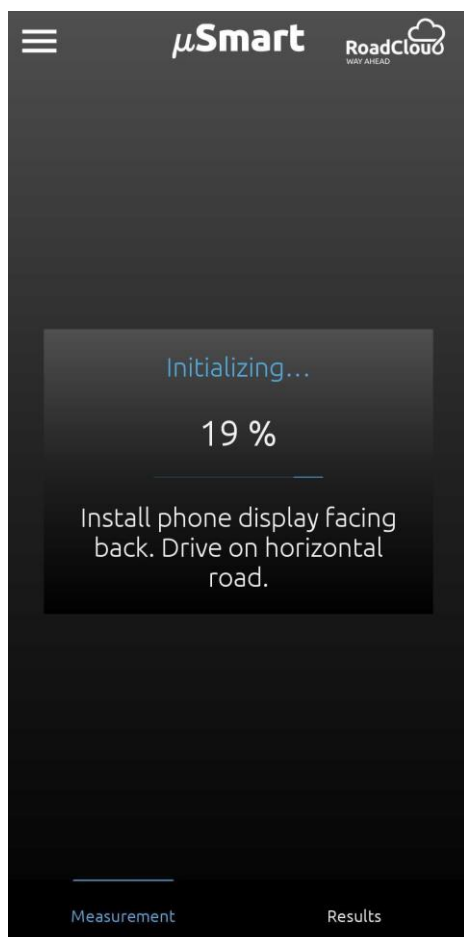
Kun mittari on -5 °C :n lämpötilassa lumipolanteella kalibroitu vastaamaan jarrutusmatkan mukaista kitkaa, mittari ei saa erota 90 %:ssa mittauksista jarrutusmatkan mukaisesta kitkasta yli 15 %. Jarrutusmatka tulee mitata samanaikaisesti kitkamittauksen kanssa jatkuvatoimisen matka- ja nopeusmittarin, kuten Peiseler-pyörän avulla. Ehdon tulee täytyä koko jarrutuskitka-alueella 0,15–0,70, joka vastaa laatuvaatimuskitka-alueetta n. 0,12–0,55. [35.]

Mikäli mittari on suunniteltu sellaiseksi, että sen voi välillä irrottaa ajoneuvosta ja asentaa uudelleen uuteen asentoon ilman ajoneuvokalibrointia, tulee mittarin läpäistä em. testit myös siten, että sen asentoa muutetaan vähintään kahdesti kesken testin. [35.]

7 Sovelluksen käyttöliittymä ja testausvalmistelut

7.1 Sovelluksen käyttöliittymä

Puhelimen telineeseen kiinnittämisen jälkeen sovelluksen käyttö aloitetaan asentokalibroinnin suorittamisella. Asentokalibroinnin aikana sovelluksessa avautuu näkymä, jossa näytetään kalibroinnin eteneminen prosentteina (kuva 20).



Kuva 20. Sovelluksen näkymä asentokalibroinnin aikana.

Asentokalibroinnin suorittamisen jälkeen sovelluksen päänäkymä avautuu (kuva 21).



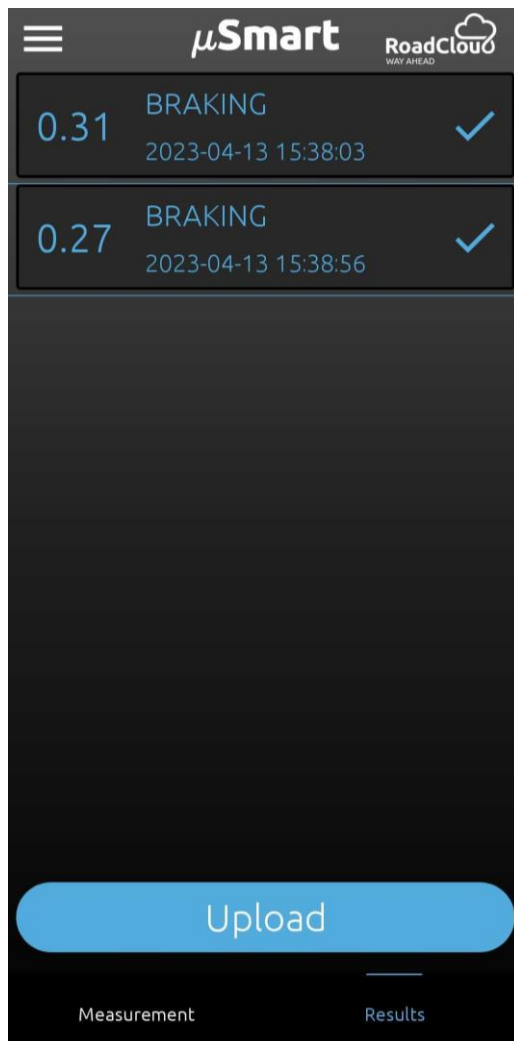
Kuva 21. Sovelluksen päänäkymä.

Päänäkymässä yläoikealla on ruutu, jossa mitattu kitka-arvo näkyy reaaliajassa. Sen alapuolella näkyy sijaintitiedon perusteella haettu sääennuste sekä ulkoilmaa tarkkailevan sensorin mitta-arvot. Sovellukseen on myös mahdollista yhdistää Bluetooth-yhteydellä optinen anturi, jolloin sen luokittelema tienpinnan tila, tilaa vastaava kitkakerroin, tiellä olevan vesikerroksen arvioitu paksuus sekä tien lämpötila näkyvät kitkanäkymän vasemmalla puolella kuvan 22 kaltaisesti.



Kuva 22. Leikkaus sovelluksen päänäköymästä optisen anturin ollessa yhdistettynä.

Korkein mitattu kitka-arvo näkyy ruudulla n. 5 sekuntia mittauksen jälkeen, minkä aikana käyttäjän on mahdollista tallentaa mittaus klikkaamalla mustaa kitkanäkymäruutua. Kitka-arvon lisäksi mittaustapahtumasta tallennetaan sijaintitiedot, mahdolliset kalibrointi-arvot sekä tallennuksen ajanhetki. Tallennettuja mittauksia on mahdollista tarkastella sovelluksen "Results"-välilehdellä (kuva 23), josta ne on myös mahdollista ladata pilveen painamalla "Upload"-nappia.



Kuva 23. Sovelluksen "Results"-välilehti.

Epäonnistuneen mittauksen voi valita epäaktiiviseksi painamalla sen oikeassa laidassa olevaa kuvaketta. Tällöin mittausta ei huomioida ladatessa mittauksia pilveen.

7.2 Käyttöliittymään tehdyt muutokset testausta varten

Sovelluksen algoritmin testausta varten puhelimen kiihtyvyydataa tuli pystyä tallentamaan. Sovellukseen oli jo valmiiksi kirjoitettu Java-luokka, jonka metodeja hyödyntämällä dataa oli mahdollista tallentaa csv-tiedostomuodossa. Tallennuksen logiikka oli kuitenkin sellainen, että dataa tallennettiin aina sovelluksen ollessa päällä. Lisäksi ainoat tallennetut arvot olivat suodattamattomat x, y

ja z -akseleiden kiihtyvyydet. Tämä toimintalogiikka soveltui huonosti testauskäyttöön, sillä se johti tarpeettoman suuriin datamääriin, eikä sovelluksen kitkaestimointia ja suodattimen toimivuutta voitu tarkastella. Logiikkaa muutettiin sopivammaksi siten, että tallennukseen lisättiin myös suodatetut kiihtyvyyssignaalit sekä algoritmin laskema kitkakerroin jokaiselle kiihtyvyyssignaalille. Datan tallennus muutettiin ehtoperusteiseksi, ja tallennuksen aloituksen ja lopetuksen hallintaa varten sovelluksen päänäkömään lisättiin painike (ympyröitynä vihreällä kuvassa 24).



Kuva 24. Sovellukseen lisätty painike datan tallennuksen aloittamiselle.

Tehtyjen toimenpiteiden jälkeen applikaation suorittamassa kitkaestimoinnissa käytetty data pystyttiin hakemaan puhelimen muistista.

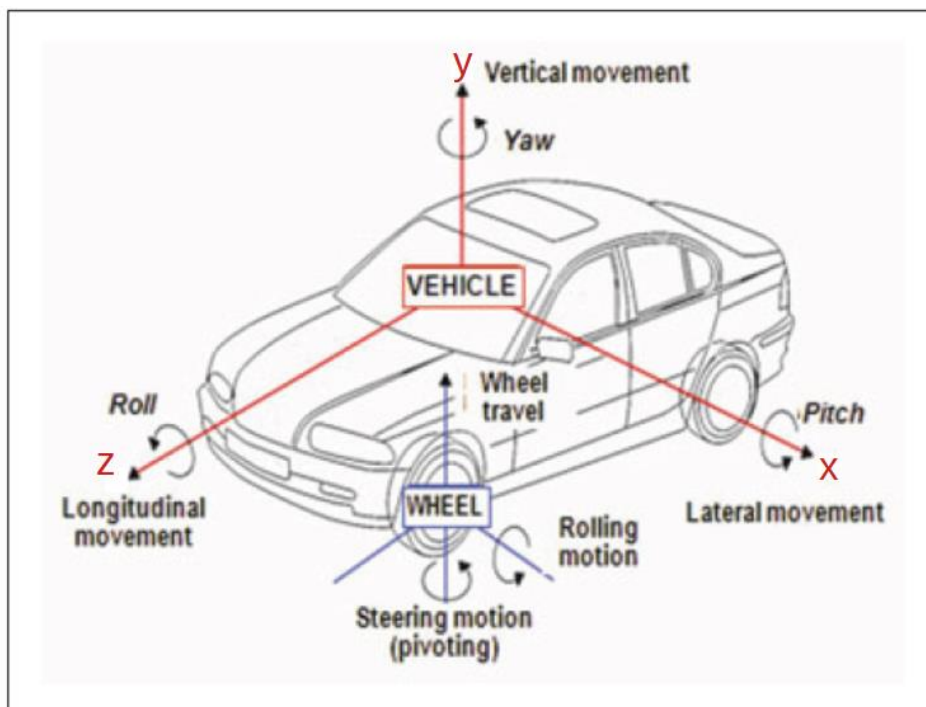
7.3 Algoritmin mallintaminen

Applikaation suorituskyvyn arvioimiseksi applikaatiossa suoritettava algoritmi käännettiin Python-ohjelmointikielelle sen testaamiseksi Jupyter Notebook

-ympäristössä. Python valittiin käytettäväksi ohjelmointikielenä siksi, että se sisältää paljon valmiita funktioita signaalin käsittelyyn. Algoritmin mallintaminen mahdollisti mm. erilaisten suodatinten testaamisen ilman, että varsinaiseen sovelluksen lähdekoodiin tarvitsi tehdä muutoksia.

8 Kiihtyvyyssignaalin tarkastelu

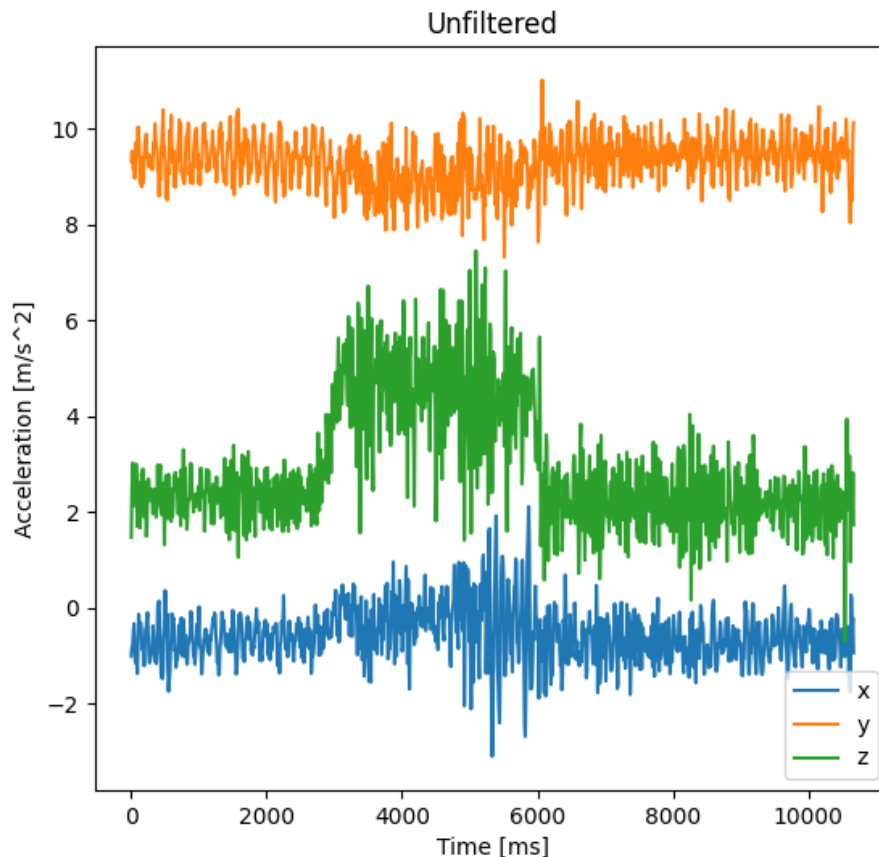
Kiihtyvyyssignaalien hallittu tallentaminen mahdollisti signaalin ominaisuuksien tarkemman tutkimisen. Erityisen kiinnostavia ovat suodattamattomassa signaalissa esiintyvän kohinan taajuuskomponentit, sillä ne tiedostamalla suodatin voidaan suunnitella niin, että kiihtyvyyssignaalista saadaan mahdollisimman puhdas. Mielenkiintoista on myös puhelimen kiinnityksen vaikutus signaalissa esiintyvään kohinaan. Signaalia tutkittiin Jupyter Notebook -ympäristössä. Signaalit on nimetty vastaamaan Android-järjestelmän käyttämää koordinaatistoa, joka poikkeaa standardin ISO 8855 mukaisesta ajoneuvokoordinaatistosta. Puhelimen koordinaatisto suhteessa ajoneuvoon on havainnollistettu kuvassa 25.



Kuva 25. Puhelimen koordinaatisto suhteessa autoon [17].

8.1 Raakasignaalit

Tarkastellaan ensiksi maantiellä suorittettua jarrutustapahtumaa, jossa ABS-järjestelmä oli aktiivinen n. 2 s:n ajan (kuva 26). Tienpinta, jolla jarrutus suoritettiin, oli jäinen ohuella lumipeitteellä. Puhelin oli kiinnitettyä tuulilasiin imukupilla tarttuvaan puhelintelineeseen ilman tukemista kojelautaan. Signaalin toteutunut näytteistystaajuus oli 100 Hz.

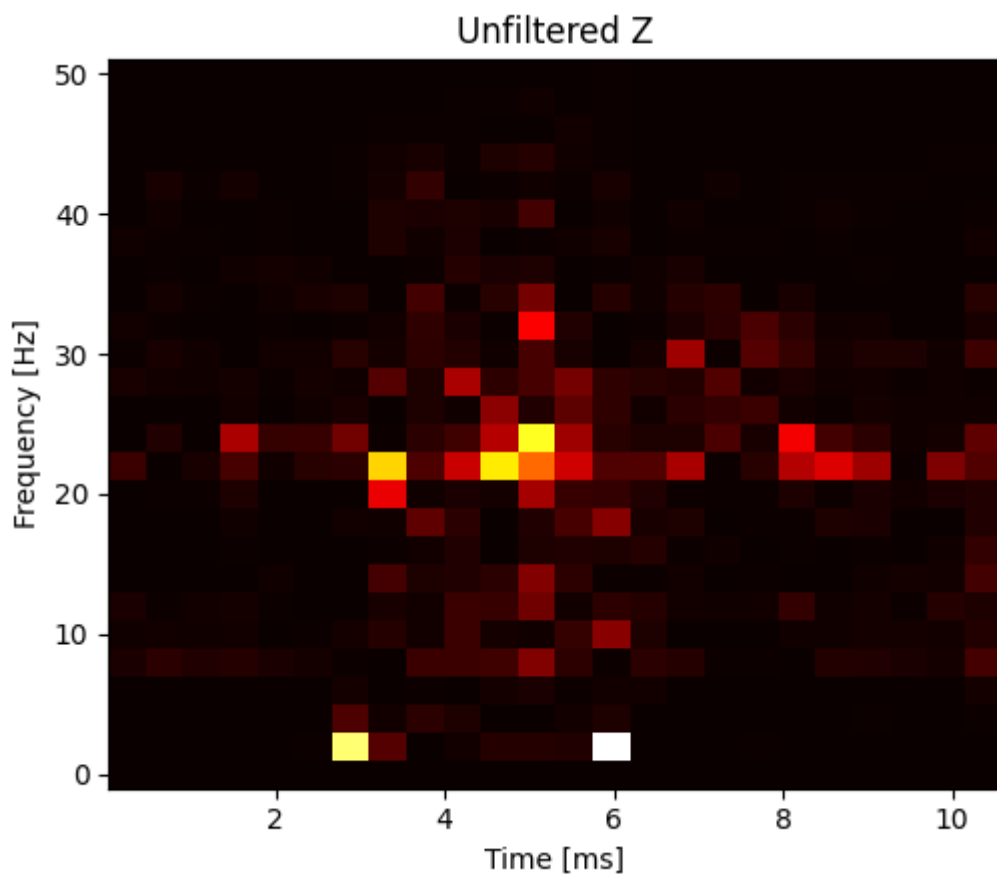


Kuva 26. Suodattamaton kiihtyvyyssignaali jarrutustapahtumasta.

Kuvasta nähdään, että signaalissa esiintyy verrattain paljon kohinaa. Jarrutuksesta aiheutuva hidastuvuus on nähtävissä z-akselin signaalissa. Y-akselilla on nähtävissä painovoiman aiheuttama kiihtyvyyssignaali positiivisena. Tästä signaalista voidaan myös päätellä, että puhelin on ollut asennettuna melko pystysuoraan, sillä signaalin yleistaso on lähellä yhtä G:tä. Pelkkä signaalin tarkastelu aikatasossa ei kuitenkaan kerro vielä paljoa siinä esiintyvistä taajuuskomponenteista.

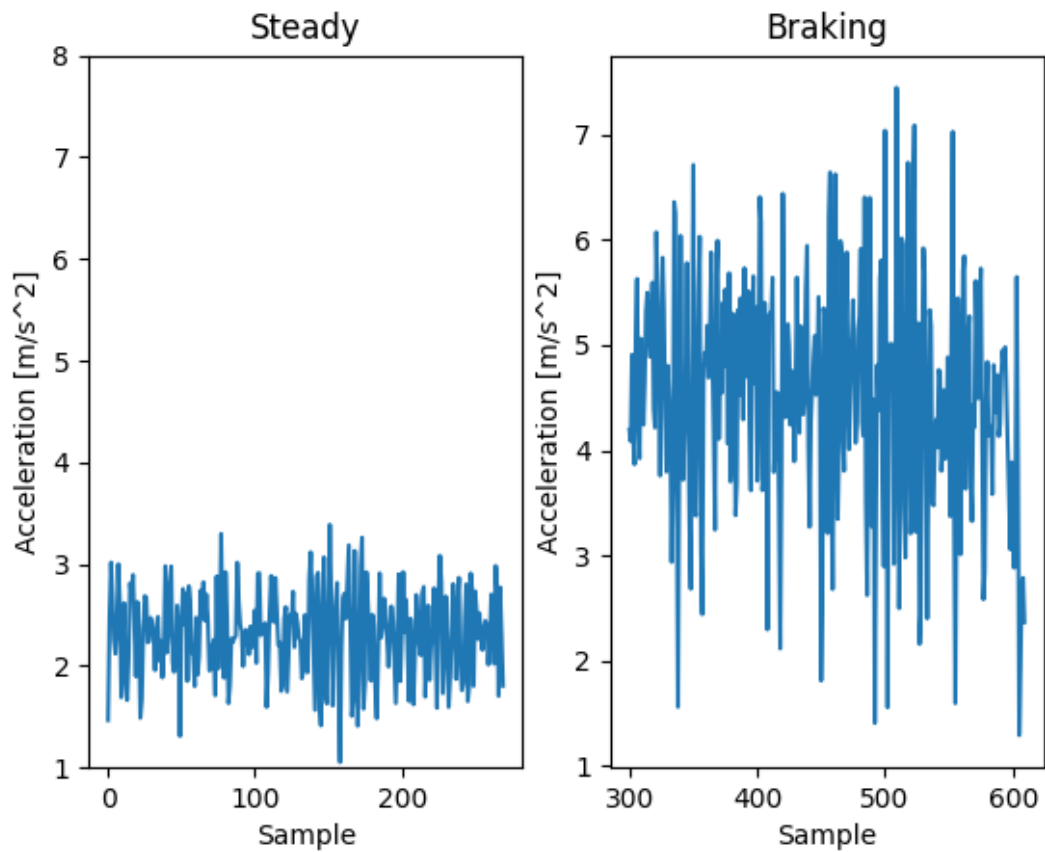
8.2 Signaalin taajuuskomponentit

Tarkastellaan lähemmin signaalissa esiintyviä taajuuskomponentteja spektrogrammin avulla. Spektrogrammi on Fourier-analyysiin perustuva signaalin aika-taajuusesitys. Sen avulla saadaan nopeasti kuva signaalin taajuuskomponenttien jakaantumisesta eri signaalin vaiheille. Kitkan arvioinnin kannalta oleellisinta on z-akselin suuntainen kiihtyvyys, joten tässä osuudessa keskitytään kyseiseen signaaliin. Suodattamattomasta z-akselin kiihtyvyyssignaalista muodostettu spektrogrammi on nähtävissä kuvassa 27.



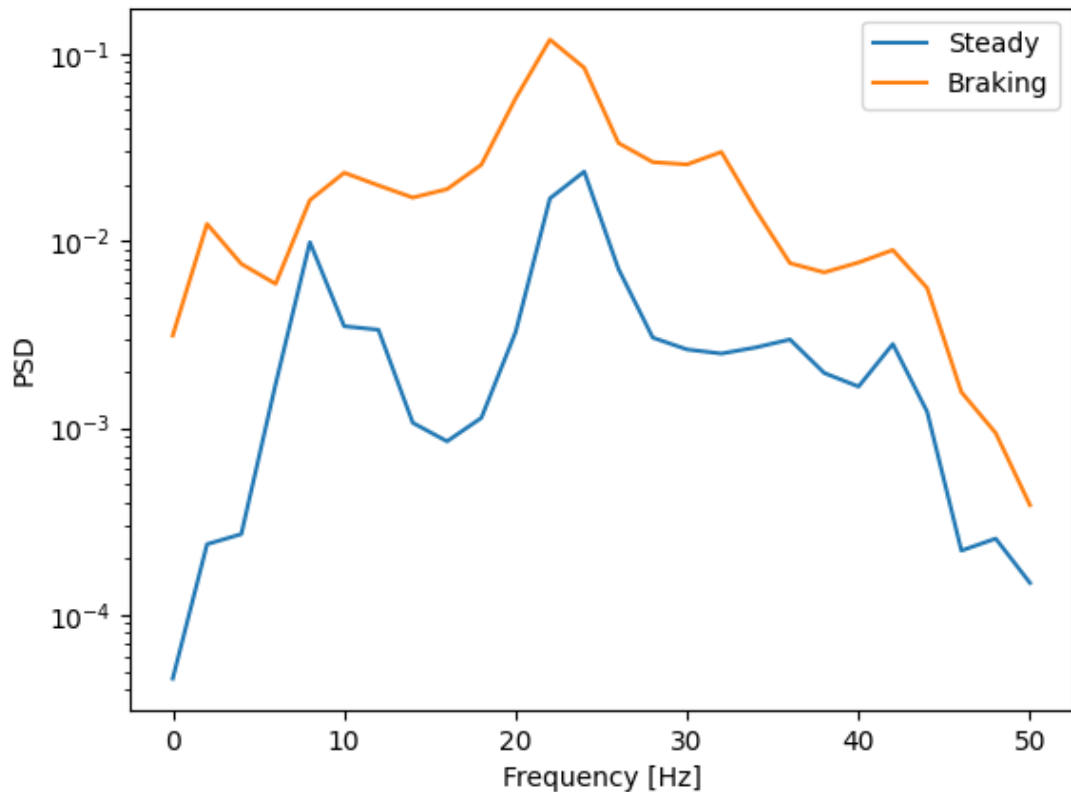
Kuva 27. Z-akselin signaalin spektrogrammi.

Jarrituksen aikana signaalissa vaikuttaisi voimistuvan taajuuskomponentteja 10 Hz – 30 Hz:n alueella. Jarrituksen alussa ja lopussa esiintyvät myös voimakkaat 1–3 Hz:n taajuudet. Jaetaan signaali tasaisen ajon osuuteen ennen jarrutusta ja jarrituksen aikaiseen osuuteen (kuva 28).



Kuva 28. Z-akselin kiihtyvyyssignaali jaettuna osiin.

Siirrytään tarkastelemaan signaalia taajuustasossa hyödyntäen Welchin menetelmää. Welchin menetelmässä signaali jaetaan ikkunoihin, joista jokaiselle lasketaan spektri Fourier-muunnoksen avulla. Kun kaikki ikkunat on analysoitu, spektrit keskiarvoistetaan kokonaisspektrin saamiseksi signaalille. Ikkunoiden kokoa ja päällekkäisyyttä muuttamalla saadaan säädettyä spektrin tarkkuustasoa. Yksinkertaistettuna isommalla ikkunan näytekoolla voidaan saavuttaa suurempi taajuusresoluutio, mutta kohinan määrä myös lisääntyy. Käännöllisesti pienemmällä näytekoolla resoluutio taas on matala mutta kohina keskiarvoistuu hyvin pois. Tässä tapauksessa kiinnostavinta on nähdä taajuuskomponenttien suuripiirteinen jakautuminen eikä niinkään yksittäisiä taajuuksia. Tästä syystä menetelmän ikkunakooksi valittiin 50 näytettä per ikkuna. Laskennan tulos on nähtävissä kuvasta 29.



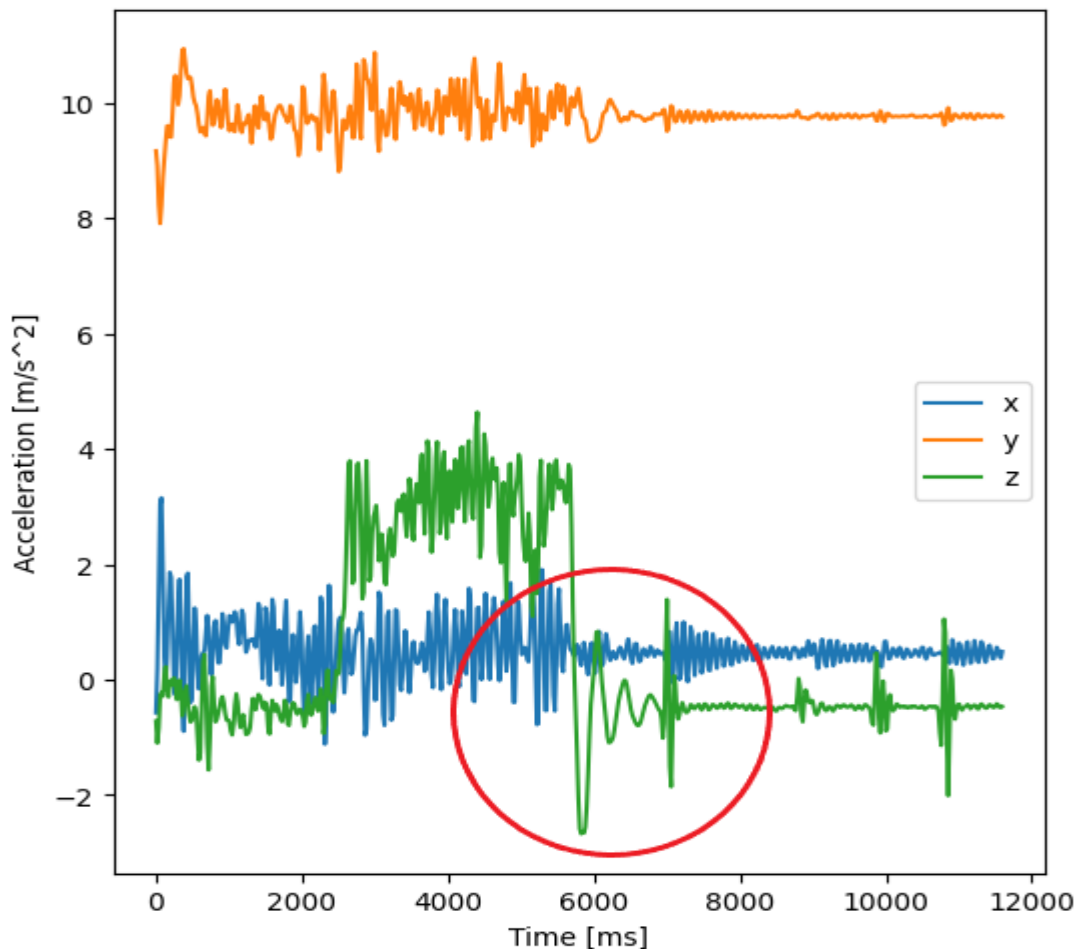
Kuva 29. Z-akselin signaali taajuustasossa.

Kuvaajasta nähdään molemmissa signaaleissa korostumat kohdissa 9–15 Hz, noin 23 Hz sekä 30 – n. 42 Hz.

Kovin tarkkaa analyysia signaalin sisältämistä värähtelymoodeista on vaikea tehdä, sillä puhelimen kiinnityksen takia signaali on epäideaalinen siihen tarkoitukseen. Jotakin johtopäätöksiä voidaan kuitenkin tehdä. Esimerkiksi värähtelyt 9–15 Hz:n alueella voivat aiheutua ilmiöstä, josta yleisesti käytetään nimitystä ”wheel hop”. Ilmiössä on kyse ajoneuvon renkaiden, vanteiden ja joustintuennan eli jousittamattoman massan värähtelystä sekä jousituksen pystyjäykkyydestä [36, s. 140]. Renkaan rungon saman vaiheinen värähtely vanteen kanssa tapahtuu n. 33 Hz alueella [37, s. 467]. Osa mitatusta värähtelystä välillä 30–42 Hz voi siis lähtöisin siitä. Voimakas piikki 20–30 Hz:n alueella esiintyy sekä tasaisella alueella, että ABS-jarrutuksen aikana. On mahdollista, että esimerkiksi puhelintelineen värähtely osuu tälle alueelle. Myös joidenkin alustan

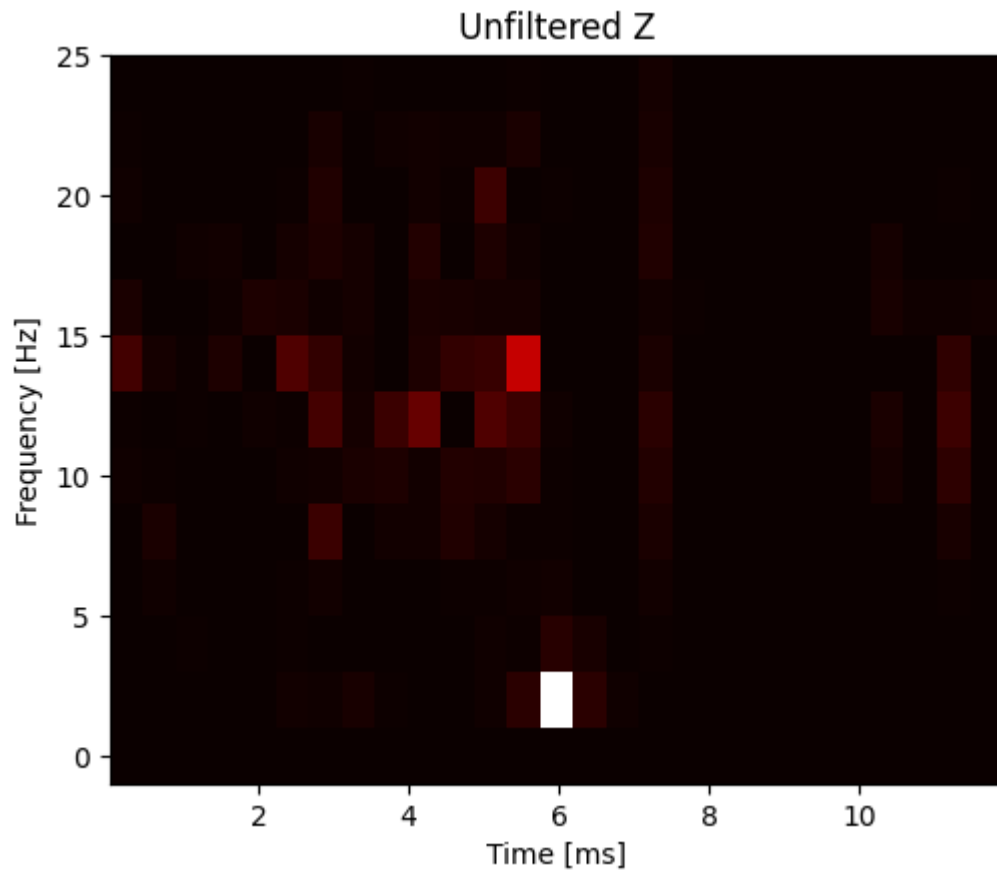
komponenttien värähtelyä ja renkaan pituussuuntaista liikettä voi esiintyä tällä taajuusalueella.

Jarrutuksen aikaisessa spektrissä on näkyvillä piikki myös spektrogrammissa nähtävillä olleiden, jarrutuksen alussa ja lopussa esiintyneiden 1–3 Hz:n taajuuksien kohdalla. Tässä on kyse ajoneuvon jousituksen ominaistaajuudesta. Ajoneuvon jousituksen ominaistaajuus näkyy selkeämmin tarkastellessa pysähdyksiin asti suoritettun jarrutuksen z-akselin kiihtyvyytkuvaajaa (kuva 30).



Kuva 30. Pysähdyksiin saakka suoritettun jarrutuksen kiihtyvyyssignaalit.

Kuvassa punaisella ympyröidyllä ajanhetkellä ajoneuvo on pysähtynyt jarrutuksen jälkeen, ja jää hetkeksi keinumaan jousituksen ominaistaajuudella. Ominaistaajuus näkyy myös selkeästi samasta jarrutustapahtumasta muodostetusta z-akselin kiihtyvyyden spektrogrammista (kuva 31)



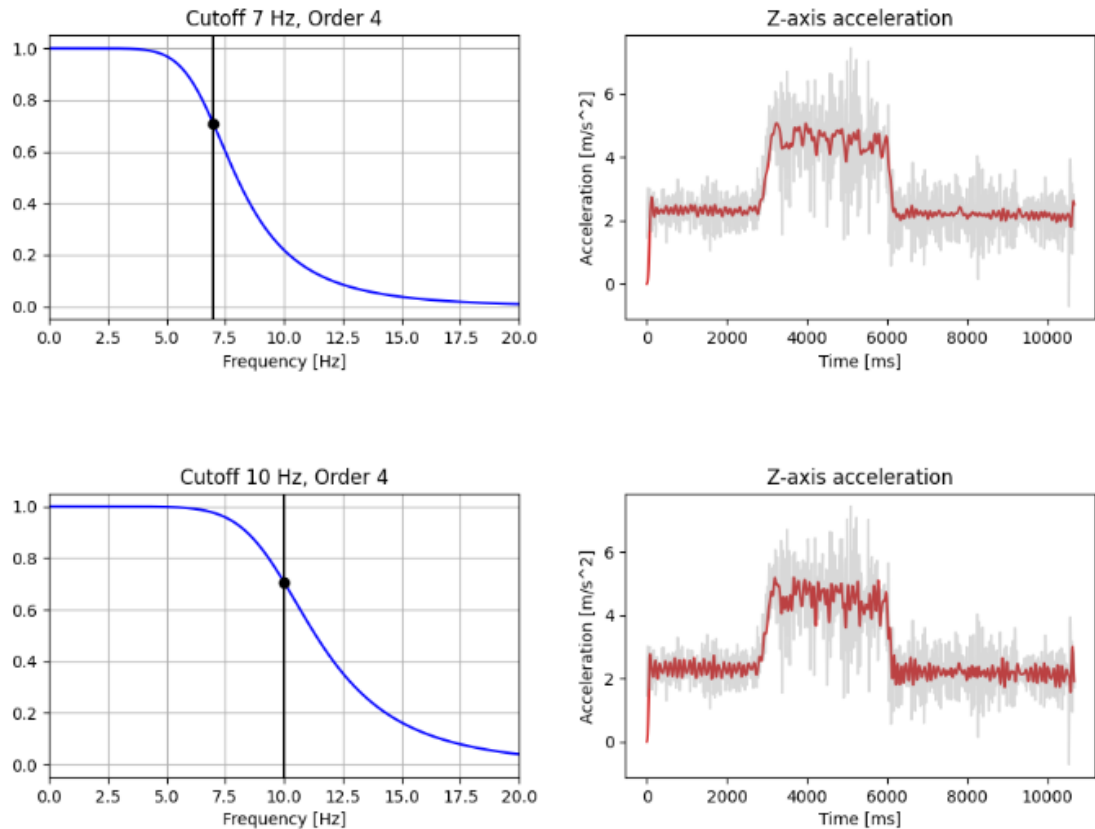
Kuva 31. Pysähdyksiin asti suoritettun jarrutuksen z-akselin kiihtyvyyssignaalista muodostettu spektrogrammi.

Tämän analyysin perusteella voidaan tulkita, että suurin osa ei-toivotuista taajuuksista asettuu > 9 Hz:n alueelle.

8.3 Signaalin suodatus

Tiedettäessä suodatettavan kohinan taajuusalue, voidaan testata eri rajataajuuksien vaikutusta signaalin muotoon. Testauksessa käytettäväksi suodatinapproksimaatioksi valittiin neljännen kertaluvun Butterworth-tyyppinen alipäästösuodatin sen tarjoaman tasaisten päästö- ja estokaistojen takia. Pelkän rajataajuuden vaikutuksen havainnollistamiseksi suodattimen kertaluku pidettiin vakiona.

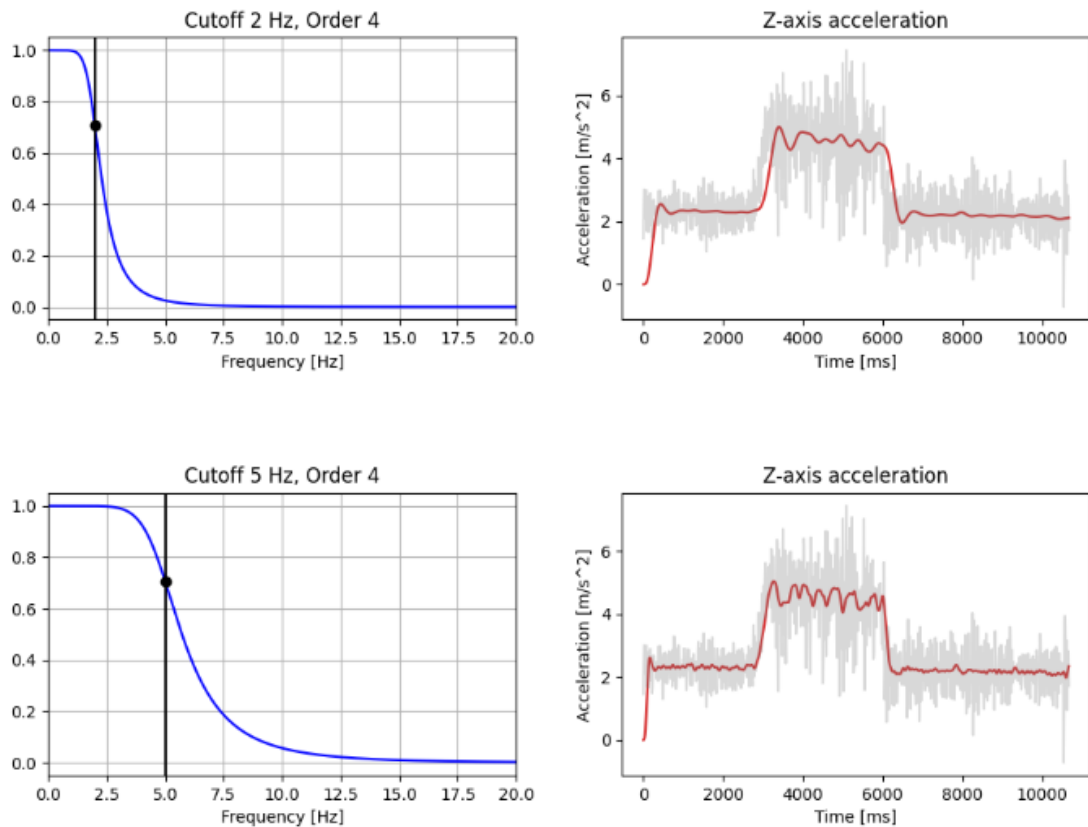
Ensimmäisenä testattiin suodattimia rajataajuuksilla 7 Hz ja 10 Hz. Kuvassa 32 on nähtävillä molempien taajuusvastekuvaajat sekä suodatetut z-akselin kiihtyvyyssignaalit, joiden taustalla harmaalla on suodattamaton raakasignaali.



Kuva 32. Kahden eri rajataajuuden Butterworth-suodattimen vertailu (7 Hz ja 10 Hz).

Taajuusvastekuvaajasta nähdään rajataajuuden vaikutus päästö- ja estokaistan välisen luiskan jyrkkyyteen. Kiihtyvyyssignaaleista voidaan havaita, että näiden kahden suodattimen välillä ero vaihesiirrosta ei vielä ole merkittävä, mutta 10 hertsillä suodatettaessa signaalin jää voimakkaampaa kohinaa.

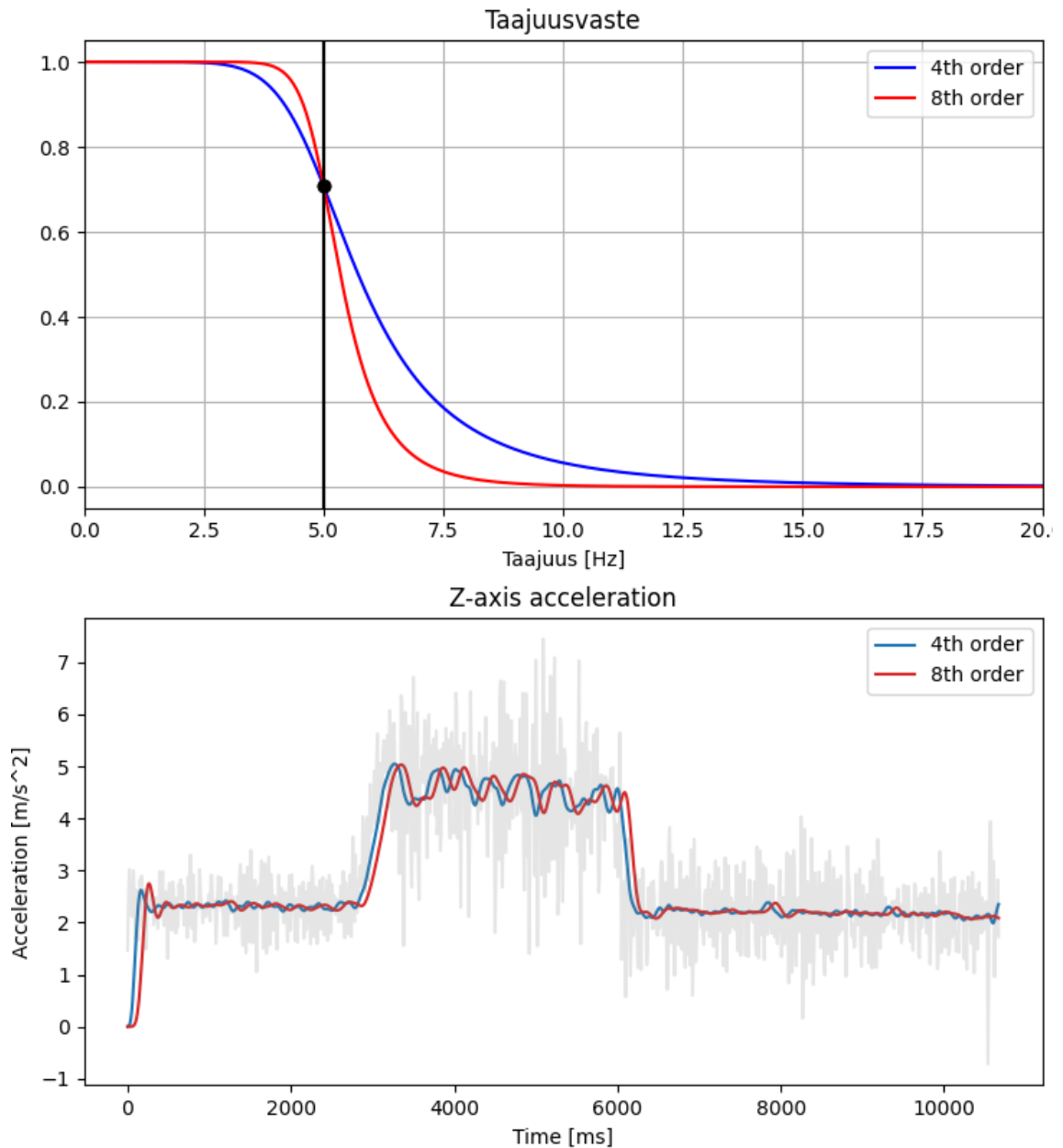
Seuraavaksi tarkasteltiin suodattimia 2 ja 5 hertsin rajataajuuksilla (kuva 33).



Kuva 33. Kahden eri rajataajuuden Butterworth-suodattimen vertailu (2 Hz ja 5 Hz).

Ylemmän suodattimen taajuusvasteen luiska on jo melko jyrkkä, ja näin ollen signaali hyvin kohinaton. Kuitenkin z-akselin kiihtyvyyden kuvaajassa on nähtävillä Butterworth-suodattimelle tyypillinen vaihesiirto rajataajuuden laskiessa. Lisäksi ns. overshoot-ilmiö korostuu jarrutuksen alku- ja loppupäässä.

Suodattimen kertaluvun vaikutusta signaaliin on havainnollistettu kuvassa 34, jossa signaali on suodatettu 5 Hz:n rajataajuudella neljän ja kahdeksan kertaluvun suodattimilla. Taajuusvastekuvaajasta nähdään liuskan jyrkkeneminen kertaluvun kasvaessa, mutta ainakaan tällä rajataajuudella varsinainen signaali ei ole merkittävästi erilainen. 4:n kertaluvun suodattimella suodatettu signaali on jo varsin selkeä, ja kertaluvun kasvattaminen lähinnä lisää signaalin vaihesiirtoa.



Kuva 34. Kertaluvun vaikutus suodattimen vaihesiirtoon.

8.4 Suodattimen valintaperusteet

Applikaation käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvan suodattimen parametrien ja tyypin valinnassa on syytä ottaa huomioon käyttöympäristön ja -tarkoituksen asettamat vaatimukset. Suodatun signaalin tullaan käyttämään kitkan mittaamiseen reaaliajassa. Mittatarkkuuden on täytettävä minimissään luvussa 6 esitetyt

Väyläviraston vaatimukset kitkanmittaussovellukselle. Suodatinalgoritmia ajetaan matkapuhelimessa.

Mittatarkkuusvaatimukset asettavat rajat sille, kuinka paljon signaaliin saa jäädä kohinaa. Piikit kiihtyvyyssignaaleissa voivat vääristää mittaustulosta, ja tästä syystä kohinan teho täytyisi saada suodatettua mahdollisimman hyvin pois. Myöskään signaali itsessään ei saa vaimentua, sillä se pienentää suoraan laskennallista kitkakerrointa. Näin ollen käytettävän suodatinapproksimaation päästökaistan on oltava tasainen.

Käytettäessä kitkamittaria liikenteen seassa, etenkin jarruttamalla tehdyn kitkamittauksen turvallisuuden kannalta olisi edullista, että mittaustapahtuma on mahdollisimman lyhyt. Koska kitkan laskentaa suoritetaan reaaliajassa, vaihe siirto ei ole toivottava ominaisuus. Tämä aiheuttaa rajoitteita rajataajuudelle ja suodattimen kertaluvulle käytettäessä Butterworth-suodatinapproksimaatiota.

Koska algoritmia ajetaan matkapuhelimessa, omat rajoitteensa asettaa myös algoritmin monimutkaisuus. Suodattimen kertaluvun nostaminen kasvattaa jo kaista kiihtyvyyssignaalinäytettä kohden suoritettujen laskutoimitusten määrää. Testien perusteella puhelin voi käyttää näytteistystaajuutena jopa 500 Hz:ä, joten algoritmin olisi oltava sen verran yksinkertainen, että se ei tälläkään näytteistystaajuudella vielä vie liikaa resursseja käyttöliittymältä.

Applikaatiossa käytettävä suodatin muodostettiin käyttämällä edellä mainittuja vaatimuksia apuna suodatinparametrien ja -tyypin arvioinnissa.

9 Sovelluksen testaus

Applikaation soveltuvuutta Väyläviraston hyväksymäksi kitkanmittauslaitteeksi testattiin. Testissä algoritmin laskemaa kitkakerrointa verrattiin jarrutusmatkan perusteella laskettuun kitkakertoimeen.

9.1 Testiprotokollan suunnittelu

Testin päätarkoituksena pidettiin sovelluksen mittatarkkuuden testaamista. Väyläviraston ohjeessa todetaan, että kun kitkamittari on kalibroitu näyttämään -5 celsiusasteen ulkolämpötilassa $0,29$ kitkakerrointa lumipolanteella, sen mittaus tuloksien täytyy olla 90% :ssa mittauksista 15% :n sisällä jarrutusmatkan perusteella lasketusta kitkakertoimesta. Ohjeen mukaan hyväksytyjä jarrutusmatkan mittaustyökaluja on kitkanmittauksen kanssa yhtäaikaisesti jarrutusmatkaa mittaavat laitteet, esimerkiksi Peiseler-pyörä.

Ennen mittauksen aloittamista applikaation näyttämä kitkakerroin suunniteltiin kalibroitavaksi näyttämään $0,29$ kitkakerrointa. Peiseler-pyörää ei ollut saatavilla, joten jarrutusmatka päätettiin mitata suorittamalla jarrutus pysähdyksiin asti, ja mittaamalla jarrutusmatka mittanauhalla. Mittauksia suunniteltiin suoritettavaksi 10 kappaletta mahdollisten mittavirheiden tasoittamiseksi. Jarrutus päätettiin suorittaa alkunopeudesta 40 km/h.

Edellä mainittu mittaustapa ei ole täysin Väyläviraston ohjeen mukainen. Ohjeessa mainitaan, että liikenneturvallisuuksista luotettavasti kitkan mittausta varten suoritettavan jarrutustapahtuman tulee kestää enintään kaksi sekuntia. Tästä syystä pysähdyksiin asti suoritettavien jarrutusten väleihin lisättiin suoritettavaksi 2 sekuntia kestävä jarrutus, joka pyrittiin ajamaan samoihin uriin kuin edellä suoritettu jarrutus pysähdyksiin. Tätä tulosta voitiin siten verrata niin applikaation pysähdyksiin asti suoritetusta jarrutuksista mittaamaan kitkaan kuin myös jarrutusmatkan perusteella laskettuun kitkaan. Näin ollen suunnitelluksi mittaussajojen lukumääräksi tuli yhteensä 20 . Jokaiselta mittausajolta päätettiin myös tallentaa kiihtyvyydataa sen myöhempää analysointia varten.

9.2 Testiympäristö ja testiolosuhteet

Testi pyrittiin suorittamaan ulkolämpötilan ollessa mahdollisimman lähellä Väyläviraston ohjeessa mainittua -5 astetta. Mittausajojen kokonaismäärän takia testi päätettiin toteuttaa poissa yleisiltä teiltä. Suorituspaikaksi valittiin teollisuusalue Joensuun Tuupovaarassa. Alueelta löytyi myös pitkä, suhteellisen tasainen suora, jolla suunniteltu alkunopeus 40 km/h kyettiin saavuttamaan helposti. Testit päätettiin suorittaa viikonlopun aikana, jolloin alueella ei ollut yritysten logistikkasta aiheutuvaa liikennettä.

Väyläviraston ohjeessa kuvataan kitkanmittauksen menetelmä, jossa mainitaan mittauksessa käytettävän ajoneuvon vaatimuksiksi sen kuuluminen henkilöauton kokoluokkaan, ABS-järjestelmä ja nastarenkaat. Nämä kriteerit jättävät ajoneuvon valinnalle paljon pelivaraa, joten testissä käytettäväksi ajoneuvoksi valittiin helpoiten saatavilla ollut vuosimallin 2003 Volvo V70 -henkilöauto.

9.3 Testin suoritus

Testauspäivän ulkolämpötila oli $-6,82$ °C. Testin jarrutusalue määritettiin suoran osalle, jossa tienpinta on mahdollisimman tasainen, ja tilaa on riittävästi ajouran vaihtelua varten. Jarrituksen alkupaikka merkittiin renkaalla, ja suoran matkalle asetettiin mittanauha jarrutusmatkan mittaamista varten. Testialue on nähtävissä kuvasta 35.



Kuva 35. Testialue ja -kalusto.

Testipuhelin kiinnitettiin ajoneuvon kojelautaan kuvan 36 mukaisesti ja sovellukselle suoritettiin asentokalibrointi ajamalla tasaisella nopeudella tasaisella alustalla. Testit suoritettiin siten, että autossa oli erikseen kuljettaja sekä puhelimenkäyttäjä ja ulkona mittaja, joka piti kirjaa jarrutusmatkoista. Jarrutuksien päättymispaikat merkittiin maalaamalla lumeen viiva pysähtyneen auton eturenkaiden keskikohdan paikkaan.



Kuva 36. Puhelimen kiinnitys.

Asentokalibroinnin jälkeen suoritettiin referenssiajo, jonka perusteella applikaatio oli tarkoitus kalibroida näyttämään 0,29 kitkakerrointa. Referenssiajon mittaustulokseksi saatiin kuitenkin 0,42 kitkakerroin, ja mittaustapahtuman aikaisessa sovellusversiossa mitattuun kitkaan oli mahdollista asettaa maksimissaan 0,05 poikkeamaa suuntaan tai toiseen. Testialueen lumikerroksen alta paljastui myös hiekoitushiekkaa, joten valittu testialue ei muutenkaan täysin vastannut ohjeessa kuvattua lumipolannetta. Testiä päätettiin kuitenkin jatkaa, sillä olosuhteet mahdollistivat edelleen sovelluksen mittatarkkuuden testaamisen.

Ensimmäisellä referenssiajolla kuljettaja myös totesi ajaneensa todennäköisesti jonkin verran tavoitenopeutta alle 40 km/h, joten tämän jälkeen ajettiin vielä toinen referenssiajo. Tämän jälkeen testit saatiin suoritettua suunnitelman mukaisesti, lukuun ottamatta yhtä jarrutusta, jolla jarrutusmatka oli n. 4 metriä pidempi verrattuna muihin. Tämä johtui liian suuresta aloitusnopeudesta, sillä tämän jälkeen jarrutus toistettiin ajamalla samaan ajouraan, jolloin mittaustulos vastasi paremmin muita tuloksia. Muuten pysähdyksiin asti suoritettujen jarrutusten päättymispaikat osuivat n. kahden metrin sisään (kuva 37). Testin kokonaiskesto oli noin puoli tuntia.



Kuva 37. Jarrutusmatkojen hajonta.

10 Testitulokset

Taulukossa 1 on esitelty testipäivän mittaustulokset.

Taulukko 1. Pysähdyksiin asti suoritettujen jarrutusten mitatut jarrutusmatkat sekä sovelluksen laskemat kitkakertoimet niille sekä niitä seuranneille kahden sekunnin jarrutuksille.

nro	Jarrutusmatka [m]	μ	μ laskettu	Huom.
ref	13,2	0,42		v < 40 km/h
ref2	15,75	0,41		
1	15,5	0,46	0,41	
2		0,45		
3	15,6	0,43	0,40	
4		0,4		
5	14,7	0,42	0,43	
6		0,38		
7	13,8	0,44	0,46	
8		0,41		
9	13,5	0,41	0,47	
10		0,43		
11	14,85	0,43	0,42	
12		0,37		
13	15,6	0,37	0,40	
14		0,4		
15	15,5	0,4	0,41	
16		0,41		Radan ulkoreuna
17	15,6	0,42	0,40	Radan ulkoreuna
18		0,38		
19	19,5	0,41		v > 40 km/h
20	15,3	0,39	0,41	sama linja ^
21		0,39		sama linja ^

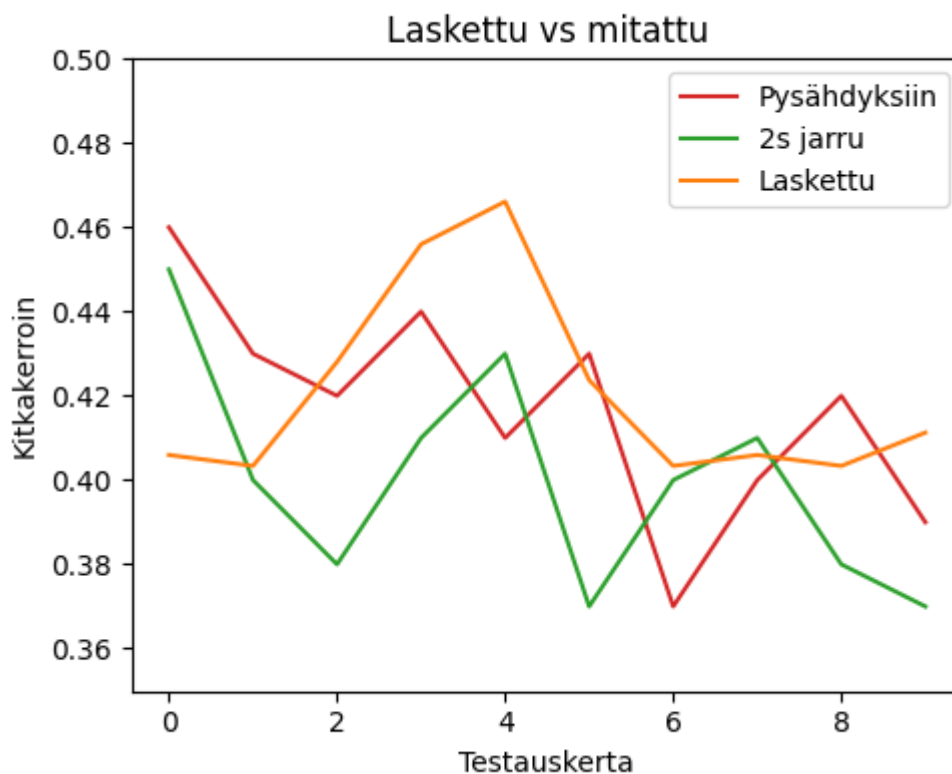
Taulukossa esitetty laskennallinen kitkakerroin on laskettu yhtälöllä

$$\mu = \frac{v^2}{2Sg} \quad (21)$$

jossa v on alkunopeus ja S jarrutusmatka.

Taulukosta nähdään, että niin mitattu kuin laskettu kitkakerroin pysyi välillä 0,37–0,47 koko testin ajan. Suurin ero lasketun ja mitatun kitkakertoimen välillä oli mittauksessa 9, jolloin ero oli 0,6. Sovelluksen mittaamien kitkakertoimien ero perättäisten jarrutusten välillä oli suurimmillaan mittauksissa 11 ja 12. Tällöin kitkakertoimien ero pysähdyksiin asti suoritettun jarrutuksen ja rullaavan välillä oli 0,6. Ero pisimmän ja lyhyimmän jarrutusmatkan välillä oli 2,1 metriä, jos ei oteta huomioon referenssimittauksia ja mittausta 19, jonka 19,5 metrin jarrutusmatka viittaa selvästi liian korkeaan alkunopeuteen. Mittauksissa 16 ja 17 käytettiin testiradan ulkoreunaa, mutta tällä ei ollut oleellista vaikutusta mitattuun tai laskettuun kitkakertoimeen.

Kuva 38 havainnollistaa jarrutusmatkan perusteella laskennallisen kitkakertoimen sekä sovelluksella mitatut kitkakertoimet.

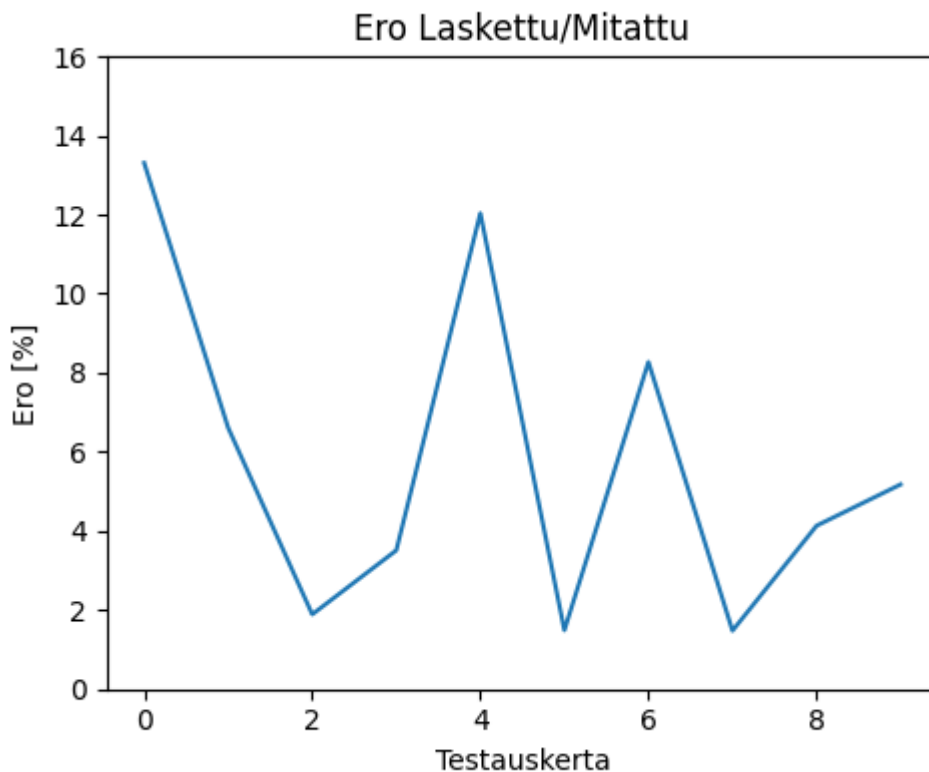


Kuva 38. Lasketut ja mitatut kitkakertoimet.

11 Päätelmät

11.1 Jarrutustestin tuloksista

Testin aikana mitattu kitkakerroin vaihteli välillä 0,37–0,46. Yleisesti voidaankin todeta, että mittauksien perusteella sovelluksella mitattu kitkakerroin on järkevä ja vastaa odotettua kyseiselle tienpinnalle. Myös Väyläviraston hyväksyntätetsauksen kannalta testin tulokset ovat lupaavia. Jarrutusmatkan perusteella laskettu kitkakerroin ei eroa yli 15 % prosenttia yhdessäkään mittauksessa, joten ainakin testin otannan perusteella sovellus täyttää vaatimukset laitteen mittatarkkuudelle. Lasketun ja mitatun kitkan prosentuaaliset erot mittausta kohden on nähtävissä kuvasta 39.

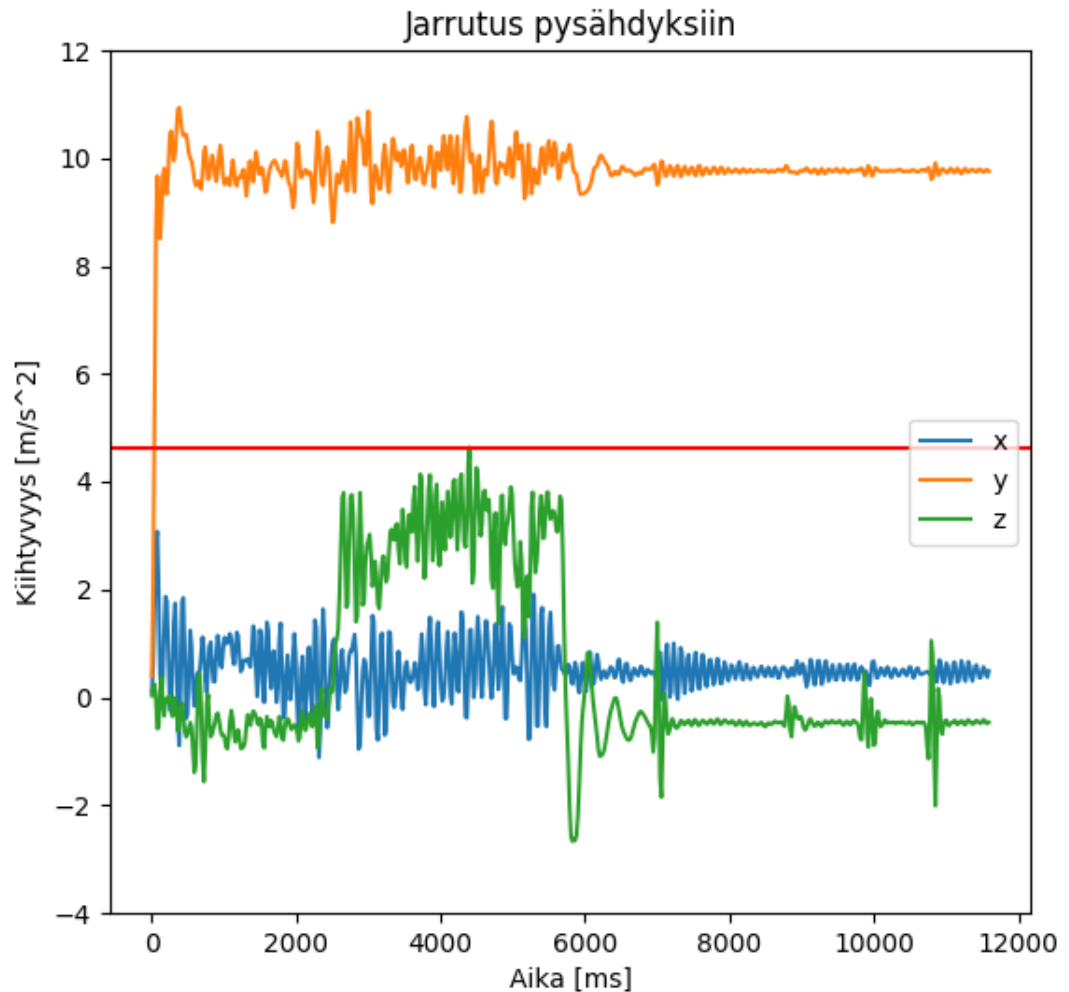


Kuva 39. Laskennallisen ja mitatun kitkan ero prosentteina mittausta kohden.

Tuloksia tulkittaessa on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että ajoneuvon nopeutta tarkkailtiin ajoneuvon omasta nopeusmittarista ja jarrutuksen aloituspaikka määritettiin joka mittauskerralla silmämääräisesti. Tämä voi luonnollisesti

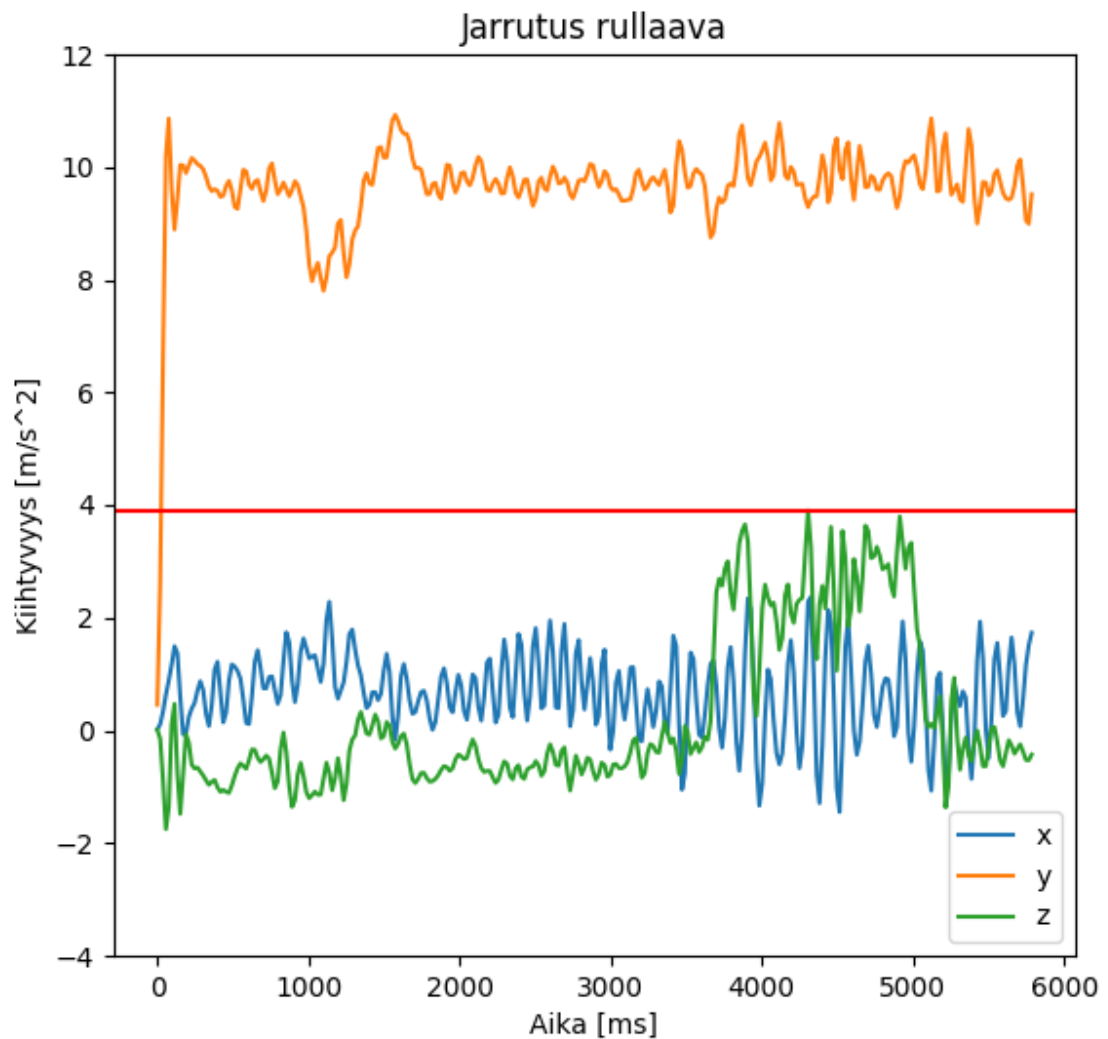
vääristää mittaustuloksia suuntaan tai toiseen. Kymmenen mittauksen otannan perusteella ero pysyy kuitenkin pääsääntöisesti alle kymmenessä prosentissa, mitä voidaan pitää hyvänä tuloksena jarrutusmatkan mittaustapa huomioiden.

Verrattaessa tuloksia pysähdyksiin asti suoritettun jarrutuksen ja rullaavan jarrutuksen välillä nähdään, että 7/10 mittausparissa pysähdyksiin asti suoritettusta jarrutuksesta mitattu kitka on suurempi, kuin sitä seuranneesta rullaavasta jarrutuksesta mitattu. Tämä ilmiö oli myös visuaalisesti havaittavissa testejä suoritettaessa. Useassa testissä applikaation kitkanäytössä ollut lukema nousi ylöspäin jarrutustapahtuman lopussa tapahtuvan ”heilahduksen” jälkeen. Ilmiö ei kuitenkaan ole selvästi havaittavissa verratessa pysähdyksiin asti suoritettun jarrutuksen kiihtyvyyssignaaleja (kuva 40) rullaavan jarrutuksen kiihtyvyyssignaaleihin (kuva 41).



Kuva 40. Mittaus 11:n kiihtyvyyssignaalit. Punainen viiva merkitsee suurinta z-akselin kiihtyvyyttä.

Mittaus 11 suoritettiin pysähdyksiin asti. Applikaation laskema kitka oli kyseiselle mittaukselle 0,43. Mittaus 12 suoritettiin rullaavana, ja applikaation laskema kitka jarrutukselle oli 0,37. Silmämääräisesti tarkastellessa mittauksen 11 z-akselin kiihtyvyyssignaalin taso ei ole merkittävästi korkeampi, mutta sen korkein piikki on yli 4 m/s^2 tasolla, kun taas mittauksessa 12 korkein piikki jää alle 4 m/s^2 (kuva 41). Tämä ei kuitenkaan vastaa visuaalista havaintoa, sillä mittauksen 12 piikki on likimain jarrutuksen keskivaiheilla.

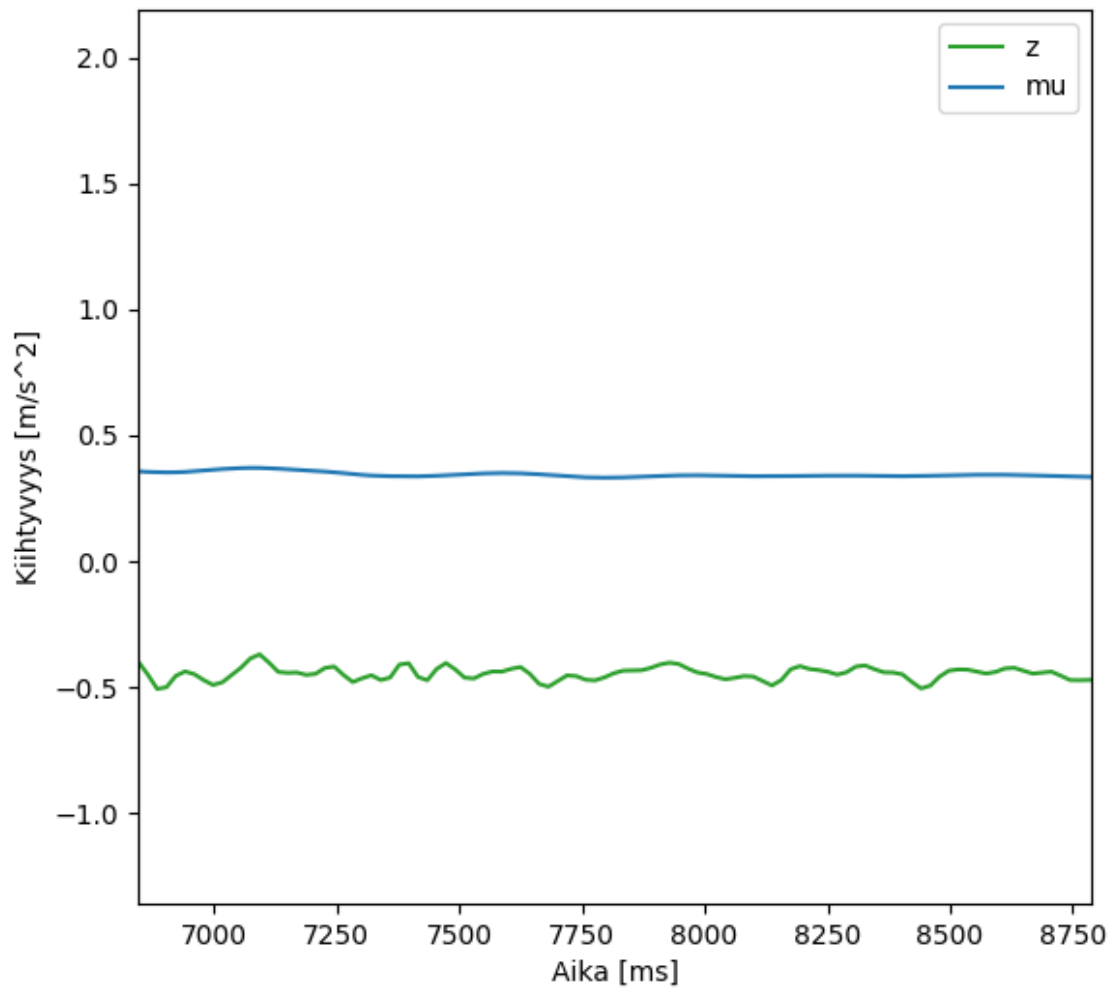


Kuva 41. Mittaus 12 kiihtyvyyssignaalit. Punainen viiva merkitsee suurinta z-akselin kiihtyvyyttä.

Pysähdyksen hetkellä renkaan lakatessa pyörimästä kiihtyvyys on hetkellisesti korkeampi, joka selittää osin ilmiötä. Myös käytetyn suodattimen ominaisuuksilla voi olla vaikutusta, etenkin jos suodatintyypille on ominaista overshoot askelevasteessa. Tällä ilmiöllä ei kuitenkaan ole Väyläviraston hyväksyntätestauksen kannalta merkitystä, sillä liikenteen seassa suoritettavan mittauksen tulee ohjeen mukaisesti kestää alle kaksi sekuntia, eikä sitä ole tarkoitus suorittaa pysähdyksiin saakka.

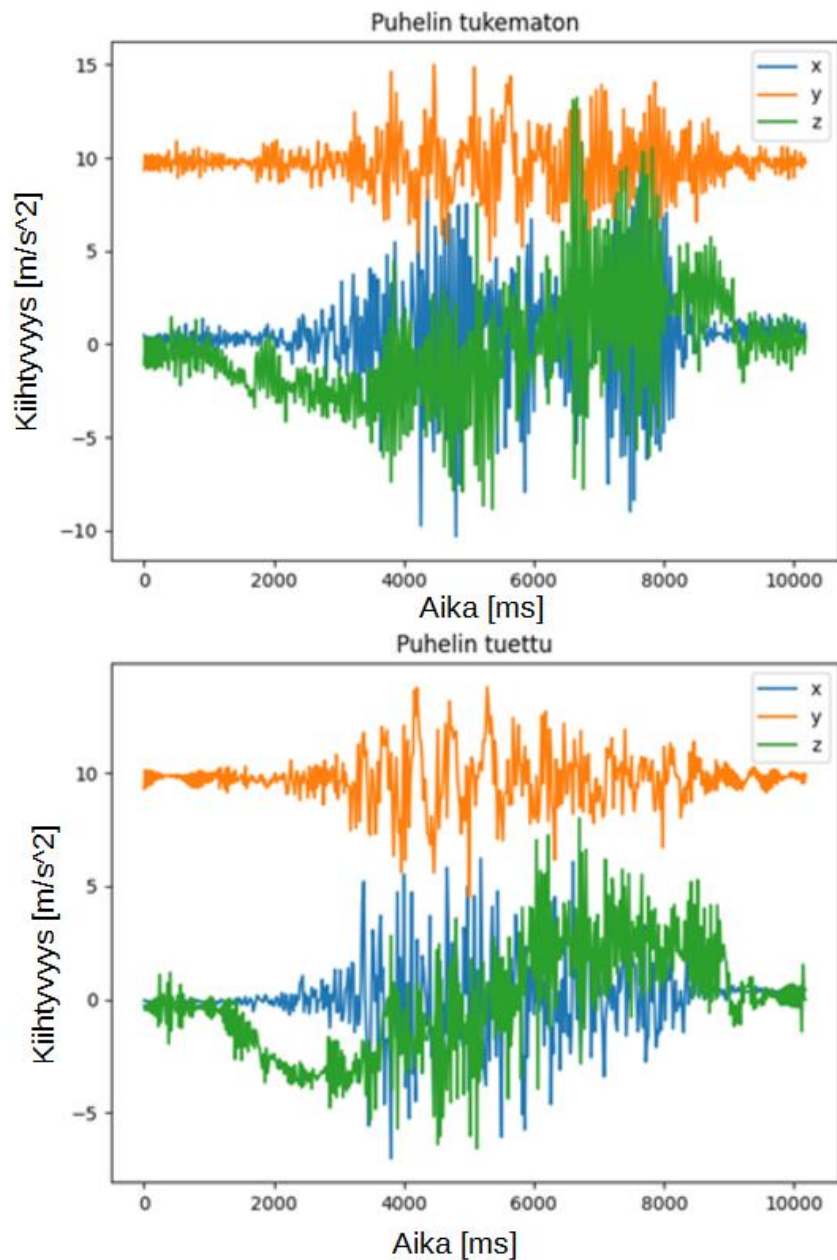
11.2 Sovelluksesta ja algoritmista

Asentokalibroinnin onnistumisella on suuri vaikutus mittaustuloksen onnistumiseen. Asentokalibroinnin aikana kerätyistä akseleiden kiihtyvyyssignaaleista muodostetaan estimaatti siitä, kuinka painovoiman vaikutus jakautuu kiihtyvyyssanturin koordinaattiakseleille. Tästä syystä on ensiarvoisen tärkeää, että kalibrointi suoritetaan tasaisella tieosuudella, ja kalibroinnin aikana ajoneuvon nopeus on tasainen. Kalibroinnin epäonnistuminen johtaa virheeseen kompensoitaessa painovoiman vaikutusta pois jarrutustapahtuman kiihtyvyyssignaalista, mikä vääristää laskettua kitkakerrointa. Tämä on nähtävissä kuvasta 42, jossa näkyy paikallaan olevan auton z-akselin kiihtyvyyssignaali sekä sovelluksen laskema kitkakerroin. Kitkakerroin on skaalattu samalle alueelle kertomalla se 9,81:llä. Kuvan perusteella puhelin on kalibroitu pystysuorassa, mutta kalibroinnin jälkeen se on kallistunut hieman taaksepäin. Tämä aiheuttaa laskettuun kitkakertoimeen poikkeaman, joka kuvan tapauksessa on n. 0,04 ylöspäin.



Kuva 42. Puhelimen asennon muuttumisen kalibroinnin jälkeen aiheuttama poikkeama lasketussa kitkassa.

Tämä asettaa vaatimuksia puhelintelineen ja puhelimen kiinnityksen tukevuudelle. Puhelintelineen kiinnityksellä on myös vaikutusta raakasignaalin selkeyteen. Kuvassa 43 on nähtävissä suodattamattomien kiihtyvyyssignaaleiden ero, kun puhelinteline on ainoastaan kiinnitetty tuulilasiin ja kun teline on myös tuettu kojelautaan siten, että puhelin ”kiilautuu” tuulilasin ja kojelaudan väliin.



Kuva 43. Tukemattoman ja kojelautaan tuetun puhelimen kiihtyvyyssignaalien vertailu.

Sovelluskehityksen ja -testauksen aikana huomattiin, että vaikka Android-käyttöjärjestelmä on yhtenäinen laitteiden välillä, joitakin laitekohtaisia eroja havaittiin. Projektin aikana sovellusta testattiin neljällä eri matkapuhelimella, joista jokaisella havaittiin omat erityspiirteensä. Kitkan mittaamisen kannalta oleelliset erot olivat kuitenkin puhelimen käyttämässä kiihtyvyyssanturin näytteistystaajuudessa.

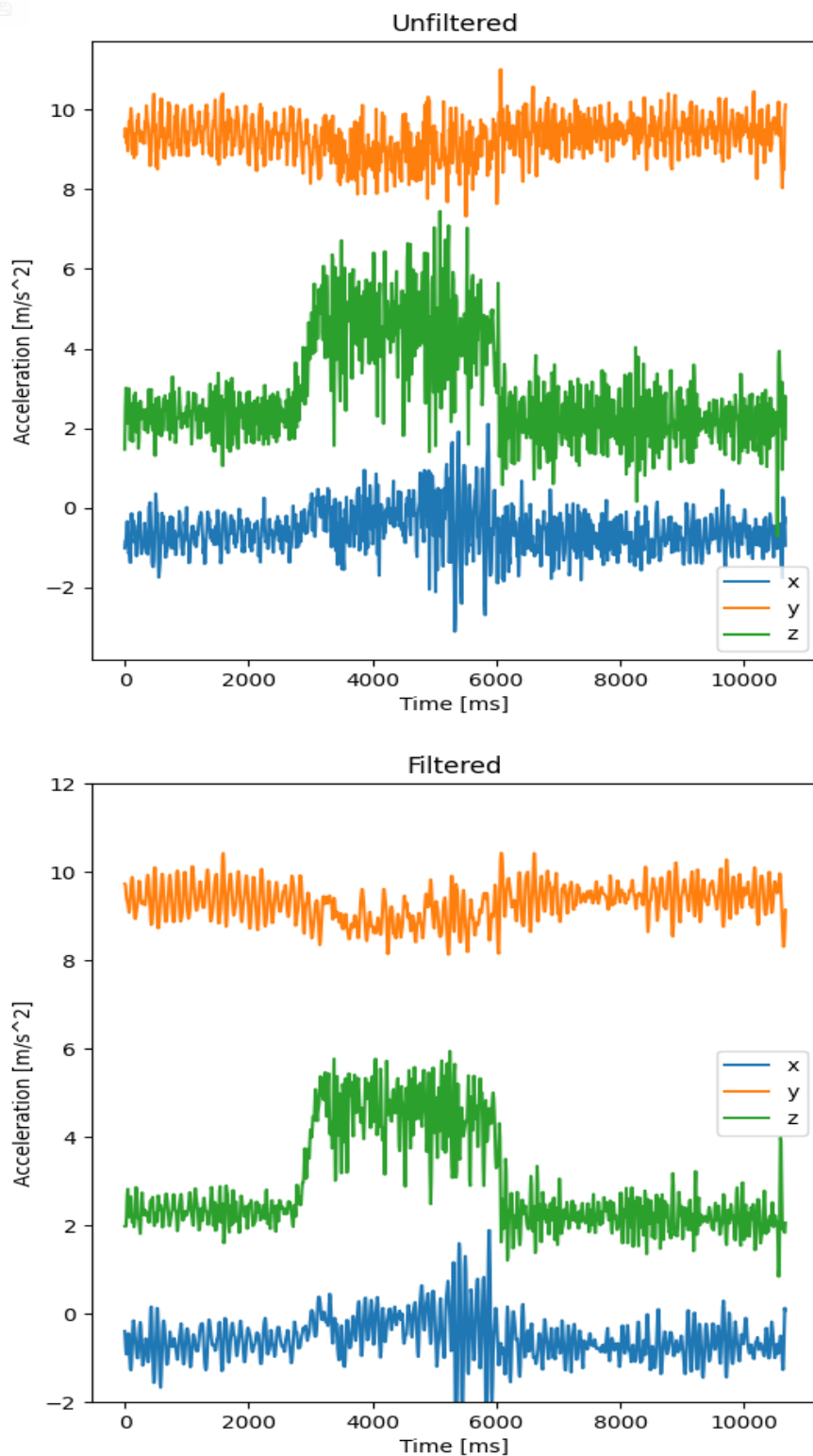
Ohjelmassa kiihtyvyysanturi alustetaan esimerkikoodin 2 mukaisesti:

```
if (sensorManager.getDefaultSensor(Sensor.TYPE_ACCELEROMETER) != null)
{
    accelerometer = sensorManager.getDefaultSensor(Sensor.TYPE_ACCELEROMETER);

    sensorManager.registerListener((SensorEventListener) this, accelerometer, 1000000/50); //Samplerate 50 Hz
}
```

Esimerkkikoodi 2. Kiihtyvyysanturin alustus Java-ohjelmassa.

Koodista nähdään, että funktio `registerListener()` ottaa syötteenä näytteistysvälin mikrosekunteina. Näytteistysväli on kovakoodattu arvoon `1000000/50`, joka vastaa näytteistystaajuutta 50 Hz. Yhden puhelimen havaittiin saattavan vaihtaa näytteistystaajuutta 50 Hz:n ja 100 Hz:n välillä kesken sovelluksen käytön. Tämä kävi ilmi signaalin suodatinta testattaessa, kun havaittiin, ettei suodatin ole toiminut oikein (kuva 44).



Kuva 44. Suodattamaton ja väärillä suodatinparametreilla suodatettu signaali. Suodatettuun signaaliin on jäänyt väärin parametreitten takia mittauskohinaa, joka vähentää mittauksen luotettavuutta.

Edellä mainittu ominaisuus vaikuttaa olevan kuitenkin normaalia toiminnallisuutta, joka käy ilmi virallisen Android Sensor API -rajapinnan dokumentaatiosta. Sen mukaan ohjelmallisesti asetettua näytteistysväliä käytetään ehdotuksena, mutta järjestelmä ja muut sovellukset voivat muokata sovelluksen todellisudessa käyttämää näytteistysväliä [20]. Tämä ominaisuus on otettava huomioon ohjelman suunnittelussa.

Tämän seurauksena sovelluksen algoritmia muutettiin siten, että näytteistystaajuutta monitoroidaan jatkuvasti ja sen muuttuessa suodatinparametrit määritellään uudelleen. Sovellukseen myös lisättiin piilotettuun ”kehittäjänäkymään” näyttö näytteistystaajuudelle. Tämän näytön avulla yhden testipuhelimen havaittiin käyttävän jatkuvasti 500 Hz:n näytteistystaajuutta.

12 Yhteenveto

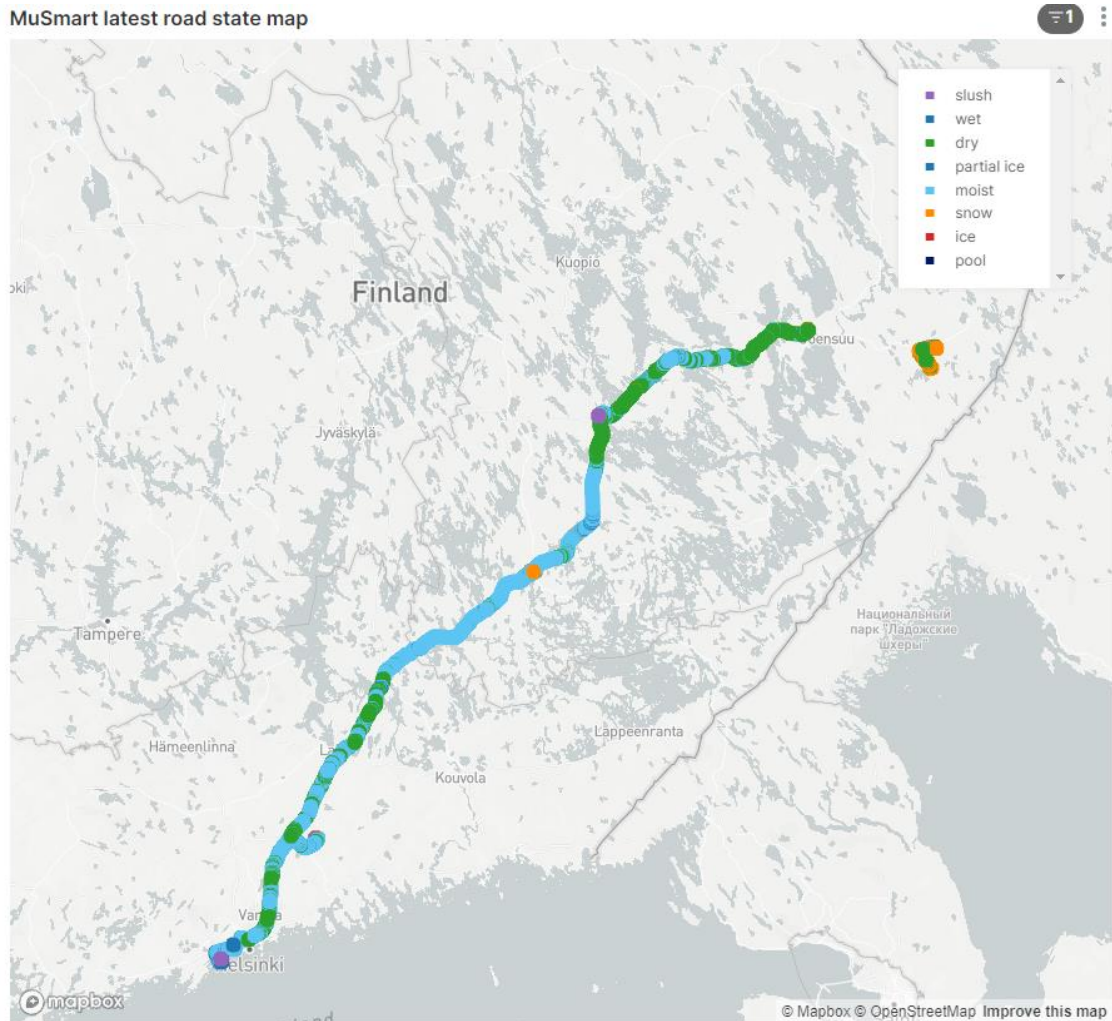
Tehokas tienhoito ja sen laadukas valvonta on tärkeää tienkäyttäjien turvallisuuden kannalta, ja tienhoito on myös suuri kustannuserä. Tärkeä mittari tienpinnan laadulle on kitkakerroin, joka tien ja renkaan välillä voidaan saavuttaa. Juuri kustannustehokkuus tekee matkapuhelimen hyödyntämisestä tiekitkan arvioinnissa kiinnostavaa, sillä jo halvimista matkapuhelimista löytyy sisäänrakennettu kiihtyvyyssanturi sekä mahdollisuus datan eteenpäin lähettämiseen internetyhteyden avulla.

Tässä opinnäytetyössä testattiin Android-matkapuhelimelle kehitetyn sovelluksen kykyä arvioida tiekitkaa. Puhelimen kiihtyvyyssignaalin laatua ja soveltuvuutta kitkanmittaustarkoitukseen arvioitiin tarkastelemalla puhelimesta tallennettua signaalia ja sen sisältämiä taajuuskomponentteja aika- ja taajuustasossa. Sovelluksessa suoritettavan kitkanestimointialgoritmin mittatarkkuuden testaamista varten suunniteltiin ja toteutettiin Väyläviraston ohjetta [35] soveltava testi. Testissä sovelluksen mittaamaa kitkakerrointa verrattiin jarrutusmatkan perusteella laskettuun kitkakertoimeen.

Suoritetun testin perusteella sovelluksen laskeman ja jarrutusmatkan perusteella lasketun kitkan ero oli 80 %:ssa mittauksista alle 10 %, joten sovellus riittää täyttämään Väyläviraston vaatimukset jarrutuskitkamittarin mittatarkkuudelle. Sovellusta käytettiin myös luvussa 9 esitellyn testin ulkopuolella, minä aikana luottamus sen toimintaan myös kasvoi. Sovelluksen näyttämät kitkalukemat vaikuttivat uskottavilta ja oletetun kaltaisilta myös muilla tienpinnoilla kuin lumipolanteella. Näiden kokemusten perusteella virallisen hyväksyntätähtäuksen suorittamista esimerkiksi Testworldilla voidaan suositella.

Eroja kiihtyvyyssanturin toteutuneessa näytteistystaajuudessa puhelinmallien välillä havaittiin jo opinnäytetyön aikaisen testipuhelinotannon (4) sisällä paljon. Eri Android-versioiden välillä havaittiin myös eroja. Esimerkiksi uudemmat Android-versiot edellyttävät, että sovelluksen on pyydettävä käyttäjältä erikseen lupaa Bluetoothin hyödyntämiseen. Nämä asiat on otettava huomioon sovelluskehityksessä, sillä niiden huomioimattomuus voi helposti johtaa sovelluksen arvaamattomaan käyttöön ja sen kaatuiluun. Monet ohjelmakirjastot myös päivittyvät tietyin väliajoin, joka voi aiheuttaa muutoksia toiminnassa ja tietoturvasa, joten sovellusta tulee myös huoltaa ja pitää ajantasaisena. Eroista eri puhelinmallien ja Android-versioiden välillä johtuen tulee ainakin harkita, olisiko sovelluksen käyttö syytä sallia vain testatuilla ja sopivaksi todetuilla puhelinmalleilla.

Opinnäytetyön aikana sovellusta vielä täydennettiin lisäämällä siihen mahdollisuus yhdistää se Bluetoothilla luvussa 2.1.3 esitellyn kaltaiseen optiseen anturiin. Sovellus näyttää optisen anturin mittaamat arvot puhelimen näytöllä reaaliajassa sekä lähettää tiedot RoadCloudin palvelimelle, josta niitä voidaan tarkastella jälkeenpäin karttapalvelussa (kuva 45).



Kuva 45. muSmart-sovelluksesta kerättyä tietoa kartalla.

Näin ollen yhden sovelluksen sisällä optista anturia voidaan hyödyntää tienpinnan jatkuvaan monitorointiin tienhoidon laadunvalvonnassa ja laatuvaatimuksen alittuessa mittaustulos voidaan käydä vielä varmistamassa jarrutuskitkamittauksella, kuten Väyläviraston tutkimuksessa [11] suositeltiin. Myös sovelluksella suoritettujen jarrutuskitkamittaukset on mahdollista tallentaa ja lähettää samaan palveluun.

Tällä hetkellä sovelluksessa käytetty algoritmi rajoittaa puhelimen asennus-asentoa siten, ettei sen z-akseli voi olla liian lähellä painovoimavektoria. Toisin sanoen puhelin on kiinnitettävä telineeseen siten, että näyttö osoittaa mahdollisimman suoraan taaksepäin. Tulevaisuudessa sovelluksen yksi kehityskohde voisi olla algoritmin muuttaminen siten, että puhelimen koordinaatisto

käännettäisiin ohjelmallisesti vastaamaan ajoneuvon koordinaatistoa rotaatiomatriisin avulla. Vastaavanlainen toiminnallisuus löytyy jo muista RoadCloudin laitteista kirjoitettuna eri ohjelmointikielellä, ja sen siirtäminen Android-ympäristöön olisi varmasti tehtävissä.

Lähteet

- 1 Malin, F.; Norros, I. & Innamaa, S. 2017. Identification of accident risk and its application in traffic control. Accident risks of different weather and road conditions on Finnish main roads. Helsinki: Liikennevirasto.
- 2 Kautiala, Christel; Kempainen, Minna & Rusanen, Matti. 2006. Kohtaamis-
onnettomuuksien vähentämismahdollisuudet tienpidon keinoin. Helsinki:
Tiehallinto.
- 3 Aaltonen, Mikko. 2022. Suolaa tielle! Tie & Liikenne 1/22 s.13.
- 4 Liikenneviraston ohjeita 33/2018. Maanteiden talvihoito – Laatuvaatimuk-
set. 2018. Helsinki: Liikennevirasto.
- 5 Chang, S. A. 2011. Robust Estimation of Road Friction Coefficient for Ve-
hicle Active Safety Systems. Dissertation. University of Michigan.
- 6 Fujimura, K.; Sakamoto T. 1988. Road Surface Sensor. FUJITSU TEN
Tech. J., No. 1. s. 65.
- 7 Tuononen, Ari; Niskanen, Arto & Ovaska, M. 2019. Review on Tire-Road-
Friction Potential Estimation Technologies. IAVSD 2019 Seminaaripaperi.
- 8 Šabanovič E.; Žuraulis V.; Prentkovskis O.; Skrickij V. 2020. Identification
of Road-Surface Type Using Deep Neural Networks for Friction Coefficient
Estimation. Sensors Jan 22; 20(3), s. 612.
<<http://dx.doi.org/10.3390/s20030612>>.
- 9 Casselgren, J.; Rosendahl, S.; Eliasson, J. 2012. Road surface infor-
mation system. SIRWEC 2012, 23 – 25.5.2012, Helsinki.
- 10 Road eye. 2021. Optical Sensors Sweden AB. Verkkoaineisto. <<https://opticalsensors.se/roadeye.html>>. 8.2021. Luettu 5.4.2023.
- 11 Malmivuo, Mikko. 2013. Optisten kitka- ja lämpömittarien vertailututkimus
2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 52/2013. Helsinki: Liiken-
nevirasto.
- 12 Niskanen, Arto & Tuononen, Ari. 2015. Three Three-Axis IEPE Accelerom-
eters on the Inner Liner of a Tire for Finding the Tire-Road Friction Poten-
tial Indicators. Sensors, vol. 15, no. 8, s. 19251–19263.
<<https://doi.org/10.3390/s150819251>>.

- 13 Jousimaa, Otso. 2016. Energy Harvester Design for Intelligent Tyre Systems. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Aaltodoc-tietokanta.
- 14 Wang, Y.; Hu, J.; Wang, F.; Dong, H.; Yan, Y.; Ren, Y.; Zhou, C.; Yin, G. 2022. Tire Road Friction Coefficient Estimation: Review and Research Perspectives. Chinese Journal of Mechanical Engineering. <<http://dx.doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>>.
- 15 Road anomaly estimation: Model based pothole detection - Scientific Figure on ResearchGate. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/figure/A-typical-relation-between-slip-ratio-and-friction-coefficient_fig2_283111351> Luettu 5.4.2023.
- 16 Albinsson, A.; Bruzelius, F.; Jacobson, B. 2016. Friction utilization for tyre-road friction estimation on snow: an experimental study. Seminaaripaperi. AVEC 2016, 13 – 16.9.2016, München.
- 17 Heißing, B. & Ersoy, M. 2011. Chassis Handbook. E-kirja. Vieweg+Teubner.
- 18 Rajamani, R. 2006. Vehicle Dynamics and Control. Springer US.
- 19 Oikarinen, Pasi. 2020. Auton ajodynamiikka. Luentosarja keväällä 2020 opintojaksolla Dynamiikka ja sovellukset. Vantaa: Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 20 Android Developers. Sensors Overview. Verkkoaineisto. <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview>. Päivitetty 4.5.2023. Luettu 10.4.2023.
- 21 What is cross-platform Mobile Development? Verkkoaineisto. JetBrains. <<https://kotlinlang.org/docs/cross-platform-mobile-development.html>>. Päivitetty 6.5.2023. Luettu 10.4.2023.
- 22 JetBrains. 2023. Native and cross-platform app development: how to choose? Verkkoaineisto. <<https://kotlinlang.org/docs/native-and-cross-platform.html>>. Päivitetty 6.5.2023. Luettu 10.4.2023.
- 23 Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics. 2014. Robert Bosch GmbH. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- 24 Sensor database. Verkkoaineisto. Phyphox. <<https://phyphox.org/sensordb/>>. Luettu 20.4.2023.
- 25 Huttunen, Heikki. 2006. Signaalinkäsittelyn sovellukset. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

- 26 Gray, P. R. 2010. Analysis and design of analog integrated circuits. 4th ed. New York: John Wiley.
- 27 Oshana, Robert. 2006. DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems. E-kirja. Newnes.
- 28 Ikonen, Enso. Filterisuunnittelu. PSYOSYS-kurssin opetusmoniste. <<http://cc.oulu.fi/~iko/SASU/Filterisuunnittelu.pdf>>. Luettu 20.4.2023.
- 29 Rahkonen, Timo. 2007. Suodattimet. Verkkoaineisto. <<https://wiki.aalto.fi/download/attachments/62723089/filters.pdf?version=1&modificationDate=1331019751000&api=v2>>. Luettu 19.4.2023.
- 30 Käyttäjä hotpaw2. Why is it a bad idea to filter by zeroing out FFT bins? StackExchange 20.12.2021. Kommentti keskustelupalstan osastolla Digital Signal Processing. <<https://dsp.stackexchange.com/questions/6220/why-is-it-a-bad-idea-to-filter-by-zeroing-out-fft-bins>>. Luettu 19.4.2023.
- 31 Filtered OFDM: An Insight Into Intrinsic In-Band Interference and Filter Frequency Response Selectivity. Tieteellinen kaavio sivustalla ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Ideal-low-pass-filters-versus-practical-filters_fig3_341632151>. Luettu 20.4.2023.
- 32 Katsaus suodatukseen. Lappeenrannan teknillisen yliopiston opetusmateriaali. <https://wiki.aalto.fi/display/EPOP/Suodattimet?searchId=O1DBAYHRU&preview=/62723089/63775017/luento_suodin.pdf>. Luettu 20.4.2023.
- 33 Linja-Aho, Vesa. Suodattimet. Luentokalvot kevään 2020 opintojaksolla Elektroniikka. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 34 Käyttäjä Aashu10. Phase shift in high order filters. StackExchange 25.10.2016. Signal Processing. <<https://dsp.stackexchange.com/questions/35055/phase-shift-in-higher-order-filters>>. Luettu 20.4.2023.
- 35 Liikennevirasto. 2011. Kitkanmittauksen menetelmäkuvaus ja vaatimukset jarrutuskitkamittarille. Helsinki: Liikennevirasto.
- 36 Kindt, Peter. 2009. Structure-Borne Tyre/Road Noise due to Road Surface Discontinuities. Väitöskirja. Katholieke Universiteit Leuven.
- 37 Pacejka, H. B. 2012. Tire and vehicle dynamics. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.