

Leiv Jørgen Husøy

Akustisk måling for kontroll av jernbanens infrastruktur

Registrering av rifler og bølger med rullestøy fra Roger 1000

Trondheim, juni 2015



Akustisk måling for kontroll av jernbanens infrastruktur

Registrering av rifler og bølger med rullestøy
fra Roger 1000

Leiv Jørgen Husøy

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Elias Kassa, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel:	Dato: 09.06.2015		
Akustisk måling for kontroll av jernbanens infrastruktur	Antall sider (inkl. bilag): 143		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn:	Leiv Jørgen Husøy		
Faglærer/veileder:	Professor Elias Kassa		
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:	Trygve Aasen og Dr. Ing. Alf Helge Løhren		

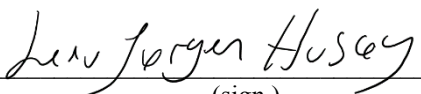
Ekstrakt:

Denne oppgaven har utarbeidet et akustisk målesystem for å detektere rifler og bølger med lydmålinger under Roger 1000. En mikrofon plasseres ved hjulet Roger 1000 bruker til vanlige målinger av rifler og bølger. Mikrofonen måler lydtrykknivå ved kontaktflaten mellom skinnen og hjulet. Målt lydtrykknivå og frekvens behandles for å fjerne kurveskrik og impulslyd. Etter databehandling sammenlignes lydtrykknivå med vanlige rifle- og bølgemålinger. Korrelasjon beregnes for bølgelengdeintervallene 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm.

Det akustiske målesystemet vurderes til å være nyttig for prosjektering og vedlikehold av sporet. Da til tilstandskontroll av jernbaneskinner, kontroll av støyreduserende effekt etter skinnslipping og for å avgjøre korleksjoner til støyberegninger. Målesystemet har også potensialet til å detektere andre støyfenomen i sporet, og for tilstandskontroll av rullende materiell.

Stikkord:

1. Rullestøy
2. Rifler og bølger
3. Tilstandskontroll
4. Støyberegning


(sign.)

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet for Jernbaneverket og Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet ved Institutt for bygg, anlegg og transport, innenfor spesialiseringen Jernbaneteknikk. Arbeidet har vært jevnt fordelt over vårsemesteret i 2015, men noe intensivt like før påske og i mai. Det meste av oppgaven har blitt skrevet og arbeidet med i Trondheim, men noe har også blitt gjort i Drammen og på Kongsvingerbanen. Det har vært interessant og svært lærerikt å arbeide med oppgaven. Faglig går oppgaven inn på tema som akustikk, jernbaneteknikk, ITS og vedlikehold.

Opprinnelig var egne målinger planlagt til like etter påske. Det lot seg ikke gjøre da det på dette tidspunkt ikke var klargjort for målingene slik som forutsatt. Innenfor tidsrammen av denne masteroppgaven lot det seg heller ikke gjøre å få forskjøvet målingene til et senere tidspunkt. Arbeidet med oppgaven fikk derfor en betydelig knekk, både for min egen motivasjon og for resultatet. Mye av den planlagte aktiviteten rundt oppgaven har allikevel blitt gjennomført, blant annet målevognskjøring med Roger 1000 i april. En dagslogg er ført over utført arbeid.

Jeg vil rette en stor takk til Professor Elias Kassa, Trygve Aasen og Dr.Ing. Alf Helge Løhren for god veiledning. Jeg vil også takke Turgut Senuysal, Lisette Mortensen, Frode Teigen, Terje Vasset, André Negård, Professor Odd Kr. Ø. Pettersen, Martin Sund, John M. Modin og Geir Harald Ingvaldsen for å ha tatt seg tid til å svare på mine spørsmål. Takk rettes også til min søster Sigrid Johanne og mine foreldre for god hjelp med språk og formuleringer.

Til slutt vil jeg takke Andreas, Espen, Henrik, Kjell, Petter, Pål, Sverre, Vegard og Øyvind for de trivelige arbeidsøktene på kontor 1-326.



Leiv Jørgen Husøy
Trondheim/09.06.2015

Sammendrag

Denne masteroppgaven er skrevet for Jernbaneverket og Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, våren 2015. Oppgavens formål er å utarbeide og vurdere en akustisk målemetode for å registrere rifler og bølger på jernbaneskinner i kontaktflaten mellom hjulet og skinnen. Omfanget er begrenset til rullestøy under Jernbaneverkets målevogn Roger 1000.

Det er utarbeidet en akustisk målemetode for å detektere rifler og bølger på skinnehodet, også kjent som korrugering. Metoden tar utgangspunkt i at lydtrykknivå for rullestøy kan uttrykkes som en funksjon av bølgehøyden til rifler og bølger. I tillegg kan passeringsfrekvensen over bølgene på skinnehodet knyttes til lydfrekvensen. Mikrofoner foreslås plassert på akselboksene til Roger 1000 slik at lydtrykket til rullestøyen kan måles nært kontaktflaten. Lydtrykknivået normaliseres til gjennomsnittshastigheten for målevognen. Kurveskrik og impulslyder fjernes med et båndpassfilter, informasjon om sporkomponenter og median over glidende vindu. Kurveskrik unngås helt ved å kun vurdere rette sporstrekninger. Roger 1000 måler bølgehøyder og bølgelengder for rifler og bølger. Metoden kan valideres ved å sammenligne bølgehøyder og bølgelengder for rifler og bølger, med lydtrykknivå og bølgelengder for rullestøy. Validering skjer ved korrelasjon mellom bølgehøyden til rifler og bølger, og lydtrykknivå i bølgelengdeintervallene 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm. Det foreslåtte akustiske målesystemet er vurdert til å ligne tilsvarende system fra Nederland og Belgia. I tillegg er enkelte feilkilder med det foreslåtte målesystemet identifisert.

Verdien av et akustisk målesystem til å bedømme korrugeringen på skinner er vurdert i oppgaven. Målesystemet kan benyttes for tilstandskontroll av jernbaneskinner i forbindelse med vedlikeholdsplanlegging. Akustiske målinger kan også brukes til å kontrollere virkningene av vedlikeholdsarbeid, for eksempel støyreducerende effekt av skinneslipning. Siden rullestøy er den dominerende støykilden i jernbanestøy, kan også akustiske målinger muliggjøre realistiske korreksjoner i støyberegninger for rifler og bølger. En utvidelse av systemet for å vurdere flere støyfenomener, kan avgjøre støysignaturen til sporkomponenter og skader på sporet. Dette kan blant annet bidra til valg av overbygningskomponenter under prosjektering. Akustiske målinger under flere togsett vil også kunne gi informasjon om togenes tilstand, det vil si primært hjulene, akselbokser og resten av boggikonstruksjonen.

Oppgaven konkluderer med at målesystemet, i teorien, kan fungere for å registrere rifler og bølger på skinnehodet. Ettersom egne målinger ikke kunne bli utført, er ikke metoden verifisert. Det konkluderes allikevel med at akustiske målinger av rullestøy er nyttig for planlegging av sporvedlikehold, støyberegninger og prosjektering.

Da målemetoden ikke er validert, anbefales det å teste om det foreslåtte målesystemet kan registrere rullestøy, og om korrelasjon mellom rullestøy og opptredende korrugering på skinnehodet kan finnes. Det

anbefales også å undersøke om en akustisk klassifisering av rifler og bølger kan lages basert på måleresultatene. Klassifiseringen vil kunne brukes i vedlikeholdsplanlegging for skinnerlipning, og til å korrigere støyberegninger. Anbefalinger videre går på å undersøke kostnader og optimalisering av metoden, blant annet ved å kode egen programvare til databehandling og analyse.

Summary

This master thesis is written for the Norwegian National Rail Administration and the Norwegian University of Science and Technology, in the spring of 2015. The purpose of this thesis is to create and evaluate a method for detecting rail corrugation using acoustic waves, in the contact zone between rail and wheel. The methodology is limited to detecting rolling noise under the inspection wagon Roger 1000, owned by the Norwegian National Rail Administration.

An acoustic measurement methodology for detecting corrugation on the rail head has been developed. The method assumes that sound pressure level of rolling noise can be expressed as a function of the rail corrugation's amplitude. Further, it is assumed that the frequency over the rail corrugation can be linked to the frequency of the sound. It is proposed to place microphones on axle boxes of Roger 1000, so that the sound pressure level can be measured close to the contact zone. The sound pressure level is normalized with the average speed of Roger 1000. Curve squeal and impact noise are removed from the data using a band pass filter and information of the track. A moving median is used to remove additional impact noises. Also, to avoid curve squeal only parallel tracks are considered. Roger 1000 measures corrugation amplitude and wavelength. The method can be validated by comparing corrugation amplitudes and wavelengths with sound pressure level and wavelengths for the rolling noise. Only correlation for corrugation amplitude and sound pressure level in the wavelength intervals 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm and 300-1000 mm are analyzed. The suggested acoustic measurement system is considered similar to corresponding systems in the Netherlands and Belgium. In addition, some sources of error in the proposed acoustic method are identified.

The benefits from an acoustic measuring system for assessment of rail corrugation are discussed. The system can be utilized for condition monitoring of rails for maintenance planning. Acoustic measurements can also be utilized for verification of noise reduction after maintenance, such as measurements of noise reducing effect from rail grinding. Since rolling noise is the dominant railway noise, acoustic measurements can also enable realistic corrections to noise calculations for rail corrugation. An expansion of the system to include multiple noise phenomena, could potentially determine the sound signatures of track components and damages. This may be used as a basis for engineering of track superstructure. Acoustic measurements under several trains could provide information about the condition of the train, i.e. wheels and bogies.

In theory, the acoustic measuring method should detect rail corrugation. The measuring system has not been verified, as test measurements could not be performed. However, it is concluded that acoustic measurements of rolling noise is useful for track maintenance, noise calculations and railway engineering.

Since the method is not validated, it is recommended to test whether the suggested measuring system can detect rolling noise, and if correlation between rolling noise and rail corrugation can be found. It is also recommended to investigate whether an acoustic classification of rail corrugation could be created, based on measurement results. The classification could be used in scheduling of rail grinding, and to produce corrections of noise calculations. Further recommendations is to determine the costs of the method and to optimize the method by creating software for data processing and analysis.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	v
Sammendrag	vii
Summary	ix
Innholdsfortegnelse.....	xi
Figurliste	xv
Tabelliste.....	xvii
Symbolliste	xix
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Begrensninger.....	2
1.4 Målsetning.....	2
1.5 Leserveiledning	2
1.6 Oppbygning.....	3
1.7 Motivasjon.....	3
2 Metode	5
2.1 Den vitenskapelige metode	5
2.2 Validitet og reliabilitet	5
2.3 Litteratursøk	8
2.3.1 Søk etter system for akustisk registrering.....	9
2.3.2 Søk etter litteratur om rifler og bølger	10
2.3.3 Måltrettet søk: Rullestøy i Europa	11
2.4 Ekspertvurderinger	12
2.5 Vurdering av kilder	12
3 Teoretisk grunnlag	15
3.1 Jernbanetekniske uttrykk.....	15
3.2 Om akustikk	15
3.3 Lydbølger	16
3.3.1 Lydintensitet	16
3.3.2 Lydtrykknivå.....	16
3.3.3 Lydtrykk over distanse.....	17
3.3.4 Summering av lydtrykknivå.....	18
3.3.5 Frekvensintervallet.....	18
3.3.6 Vekting.....	20
3.3.7 Direktelyd	21
3.3.8 Vibrasjoner og lyd.....	22
3.4 Lydmålinger	22
3.5 Vibrasjoner	25
3.6 Støy.....	26

3.6.1	Støymålinger	26
4	Rullestøy og jernbanestøy	27
4.1	Generelt om jernbanestøy	27
4.2	Bølgedannelse	28
4.2.1	Korrugert nivå	29
4.2.2	Måling av rifler og bølger	30
4.2.3	Rifler og bølger i Norge	34
4.2.4	Behandling	34
4.2.5	Krav til rifler og bølger	36
4.2.6	Vedlikeholdsstrategi	38
4.3	Rullestøy	40
4.3.1	Definisjon	40
4.3.2	Kontaktfiltereffekten	41
4.3.3	Nominell hastighet	41
4.3.4	Bakenforliggende mekanisme	42
4.3.5	Modellering av rullestøy	43
4.3.6	Reduksjon av rullestøy	45
4.4	Jernbanestøy i Norge	49
4.4.1	Generelt om jernbanestøy	49
4.4.2	Prosjektering og vedlikehold	50
4.4.3	Støyberegninger	51
4.5	Rullestøy i Europa	52
4.5.1	Belgia	52
4.5.2	Danmark	52
4.5.3	Frankrike	52
4.5.4	Italia	52
4.5.5	Nederland	53
4.5.6	Spania	53
4.5.7	Storbritannia	53
4.5.8	Sveits	53
4.5.9	Sverige	53
4.5.10	Tyskland	54
4.6	Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur	54
4.6.1	Statiske støymålinger ved sporet	54
4.6.2	NoiseMon (Storbritannia)	55
4.6.3	SMW – Schallmesswagen (Tyskland)	56
4.6.4	ARRoW – Acoustic Rail-influence Recording on Wheels (Nederland)	57
4.6.5	Passasjertog som sonder (Japan)	58
4.6.6	Registrering av kurvskrik, flensstøy slagstøy (Australia)	59
4.6.7	IWEN11 (Danmark)	59

4.6.8	Akustisk tilstandsovervåkning av skinner (Belgia)	61
5	Målesystem	63
5.1	Akustisk måling av rifler og bølger	63
5.2	Målemetode	63
5.3	Bakgrunn for målemetoden	63
5.3.1	Valg av utstyr	66
5.3.2	Måleoppsettet	67
5.3.3	Måleforhold	68
5.3.4	Målinger	69
5.3.5	Databehandling	70
5.3.6	Analyser	75
5.4	Feilkilder	76
5.5	Sammenligning med tilsvarende målesystem	77
6	Diskusjon	79
6.1	Nytteverdi av akustiske målinger	79
6.1.1	Støyberegninger	80
6.1.2	Målinger av rifler og bølger	81
6.1.3	Støyreduksjon og vedlikehold	81
6.1.4	Kontroll av hjul	83
6.1.5	Kostnad	84
6.2	Bruk av korrugert nivå	84
7	Konklusjon og anbefalinger	85
8	Videre arbeid	87
9	Referanser	89
10	Vedleggsliste	95

Figurliste

Figur 2.1 - Grafisk visning av reliabilitet og validitet.	6
Figur 2.2 - Grafisk fremstilling av nøyaktighet og presisjon på et normalfordelt datasett.	7
Figur 3.1 – Kurver for A-vekting og C-vekting av lydtryknivå.	20
Figur 3.2 - Prinsippskisse av en mikrofon	23
Figur 3.3 - Grafisk representasjon av et båndpassfilter	24
Figur 3.4 - Prinsippskisse for et akselerometer.....	25
Figur 4.1 – Rifler og bølger på en jernbaneskinne.....	29
Figur 4.2 - Müller-BBM 1200e i bruk	31
Figur 4.3 - CAT i bruk	32
Figur 4.4 - ARRoW i bruk	32
Figur 4.5 - Målevognen Roger 1000 på Kongsvingerbanen.....	34
Figur 4.6 - Oversikt over utført skinnslipning i Norge	35
Figur 4.7 – Ulike krav til rifler og bølger på norske skinner.	37
Figur 4.8 - Diskonterte vedlikeholdskostnader for Jernbaneverket.	39
Figur 4.9 - Prinsippet bak rullestøy.....	40
Figur 4.10 - Skisse av fjærmodellen til modellering av rullestøy.....	43
Figur 4.11 – Skjematisk oppsett for produksjonen av rullestøy	44
Figur 4.12 - Eksempel på hjulslitasje på et kanadisk hjul.....	46
Figur 4.13 - Mønster etter vanlig og akustisk skinnslipning.....	46
Figur 4.14 – Skinnehodet før akustisk skinnslipning og etter akustisk skinnslipning	47
Figur 4.15 - Utviklingen av boliger med høyt innendørs støynivå mellom 1997 og 2014.....	49
Figur 4.16 – RailBAM-enhet i bruk på Huseby mellom Drammen og Lier.....	55
Figur 4.17 - Mikrofonens plassering inne i SMW-vognen	56
Figur 4.18 - Sammenligning mellom ARRoW og direkte målinger med Müller-BBM.....	57
Figur 4.19 - Mikrofonenes plassering i ARRoW-systemet	58
Figur 4.20 - Det japanske kompakte akustiske målesystemet	59
Figur 4.21 - Måleoppsettet til det danske målesystemet IWEN11	60
Figur 4.22 - Plassering av mikrofon på det belgiske målesystemet.....	61
Figur 5.1 – Foreslått plassering av en mikrofon under akselboksen til Roger 1000	65
Figur 5.2 - Nor140 Lydmåler med forforsterker og mikrofon.....	67
Figur 5.3 - Plassering av måleutstyr på Roger 1000.....	68
Figur 5.4 - Målelengden øker med hastigheten og tidsintervallet	71
Figur 5.5 - Skjematisk fremstilling av målesystemets databehandling.....	72
Figur 5.6 - Forskjellen mellom glidende gjennomsnitt, glidende median og aritmetisk middelvei.....	75

Figur 6.1 - Dansk slippetog i november 2011..... 83

Tabelliste

Tabell 2.1 - Søk etter tilsvarende system for akustisk registrering.....	9
Tabell 2.2 - Søk etter litteratur om rifler og bølger.....	10
Tabell 2.3 - Rent tittelsøk etter litteratur om rifler og bølger	11
Tabell 3.1 - Frekvensintervallet i 1/3-oktavbånd.....	19
Tabell 3.2 - Oversikt over typiske støykilder.....	21
Tabell 4.1 - Standardavviket til målenøyaktigheten for Roger 1000.....	33
Tabell 4.2 - Krav til rifler og bølger fra NS-EN 13232-3:2012.....	35
Tabell 4.3– Tillatte maksimale avvik fra NS-EN 13231-3:2012.....	36
Tabell 4.4 - Inngrepskriterier for skinnerliping	36
Tabell 4.5 - Feilklasser for korrugering på danske skinner	48
Tabell 5.1 - Sammenligning av tilsvarende målesystem.	77
Tabell 6.1- Oppsummering av områder der til akustiske målinger av sporet kan ha verdi	79

Symbolliste

- A – Total lydabsorpsjon [m^2]
 a – Radius til en pulserende sfære [m]
 c – Lydens hastighet i luft, 343 m/s ved 20°C [m/s]
 a – Toppamplituden til en gjentakende bølge, halvparten av topp-til-bunn-verdien [m]
 d – Distanse til lydkilde [m]
 d_D – Radius i et direktelydfelt [m]
 F – Kraftamplituden til en harmonisk tvungen svingning [N]
 f – Lydfrekvens [Hz]
 f – Passeringsfrekvens [Hz]
 I – Intensitet til en lydbølge [W/m^2]
 $i\omega$ – Kompleks vinkelfrekvens [rad/s]
 I_{ref} – Referanseintensitet. 10^{-12} W/m^2 [W/m^2]
 K_H – Kontaktstivhet mellom hjul og skinne [N/m]
 L_I – Lydintensitetsnivå [dB]
 L_p – Lydtrykknivå [dB]
 $L_{p,i}$ – Lydtrykknivå for lydkilde i eller måling i [dB]
 $\overline{L_p}$ – Gjennomsnittlig lydtrykknivå [dB]
 $L_{p,normalisert}$ – A-veid lydtrykknivå ved nominell hastighet [dBA]
 $L_{p,målt}$ – Målt A-veid lydtrykknivå [dBA]
 L_r – Korrugert nivå [dB]
 $L_{r,gi.snitt}$ – Gjennomsnittlig korrugert nivå over en strekning [dB]
 $L_{r,krav}$ – Krav til høyeste korrugerte nivå [dB]
 $L_{r,i}$ – Korrugert nivå ved bølgelengde i [dB]
 N – Antall lydkilder eller målinger
 N – Antall data i et datasett
 N – Antall målinger på en strekning
 N – HastighetsekspONENT, mellom 25 og 35
 n – Antall verdier i et utvalg
 P – Trykkamplitude til en lydbølge [Pa]
 P_e – Lydtrykk, kvadratisk middelvei av trykkamplituden [Pa]
 P_{ref} – Referansetrykk på 20 μPa
 $P(t)$ – Lydtrykk ved tiden t [Pa]
 Q – En lydkildes styrke, gir hvor mye volum som forflyttes per tidsenhet [m^3/s]
 r – Amplitude til rifler og bølger, kvadratisk middelvei [m]

\bar{r} – Gjennomsnittlig amplitude over en strekning [m]
 $r(x)$ – Høyde på en bølge som funksjon av måledistanse [m]
 r_{ref} – Referanseamplitude, 1 μm [m]
 s_x – Standardavvikene til et utvalg
 T_m – Måleintervall [s]
 U_0 – Radiell hastighetsamplitude til pulserende sfære [m/s]
 V – Hastighet til tog [km/t]
 V_{ref} – Nominell hastighet til tog [km/t]
 v – Hastighet til tog [m/s]
 v_c – Relativ hastighetsrespons for en kontaktfjær [m/s]
 v_r – Kompleks vertikal hastighetsamplitude til skinnen [m/s]
 v_w – Kompleks vertikal hastighetsamplitude til hjulet [m/s]
 X_k – Endelig datasett med komplekst tall for lydtrykk for frekvens
 x – Måledistanse i lengderetning [m]
 \bar{x} – Forventningsverdi for et utvalg
 x_i – Verdi nummer i for et utvalg
 x_n – Endelig datasett med lydtrykk for tidsintervaller med lik lengde
 Y_c – Vertikal mobilitet til en kontaktfjæring [m/sN]
 Y_r – Vertikal mobilitet til en skinn [m/sN]
 Y_w – Vertikal mobilitet til et hjul [m/sN]
 λ – Bølgelengde [m]
 λ_0 – Referansebølgelengde 1000 mm
 Π – Utstrålt lydenergi per tidsenhet [W]
 $\delta\Pi/dA$ – En kildes lydenergi per areal per tidsenhet [W]
 $\delta\Pi(\varphi, \vartheta)/d\Omega$ – En kildes lydenergi per vinkel i retningene φ og ϑ [W]
 ρ_0 – Lufttetthet, 1,21 kg/m³ ved 20⁰C [kg/m³]

1 Introduksjon

Dette kapittelet introduserer problemstillingen og definerer målet med oppgaven. Videre er begrensninger, leserveiledning, oppbygning og motivasjon beskrevet.

1.1 *Bakgrunn*

Kontaktflaten mellom jernbaneskinnen og hjulet på toget er en viktig kilde til jernbanestøy. En jevnlig vedlikeholdt skinne er derfor elementært for at færrest mulig skal plages av jernbanestøy. For at jernbanen skal fremstå som et bærekraftig transportmiddel for gods, personer og tjenester må den være miljøvennlig, også for nærmiljøet. Alt har sin pris, også støyreducerende tiltak på jernbanen, og prioriteringer skjer derfor etter hvilke tiltak som har størst samfunnsøkonomisk effekt. Informasjon om kostnad, inntjening og effekt inngår i dette, der nøyaktigheten til disse parameterne kan avgjøre utfallet.

Data om tilstanden til sporet samles i dag inn på to forskjellige måter, med målevognen Roger 1000 og ved manuell inspeksjon. Noe rapporteres også av operatører og berørte personer ved banen. Rifler og bølger, eller korrugering, er små bølgedannelser på skinnhodet og har vært et problem i mange år. Allerede i 1889 kunne man observere bølgedannelse på skinnene på Midlandbanen i Storbritannia. I 1895 ble det rapportert om dårlig kjørekomfort og økt støy på grunn av korrugeringer på en amerikansk bane (Oostermeijer, 2008). Et av problemene med rifler og bølger er at de øker lyd og vibrasjoner fra jernbanen. For lyd er dette kjent som rullestøy, lyden som har sitt opphav i kontaktflaten til hjulet og skinnen, og er dominerende i støybildet for hastigheter mellom 50 og 300 km/t.

Jernbaneverket har bare én målevogn og over 4 000 km med spor, som gjør at målevognskjøring er en tidkrevende og omfattende prosess. En mulig løsning er at togene selv overvåker sporet. Det vil si at på mange tog plasseres måleenheter som registrerer data om sporet. Etter hvert som datasettet øker kan man neglisjere feil som skyldes eksterne forhold og andre usystematiske feil, slik at en sitter igjen med et stort datasett om sporets tilstand. Løsningen krever nøyaktige instrumenter som kan samle og lagre store datamengder. Kalibrering og optimalisering er derfor viktige ledd i målemetoden. En åpenbar fordel med et slikt innsamlingsystem er at man måler sporet når det er i bruk under reelle forhold.

1.2 *Problemstilling*

Det foreslås å undersøke om et slikt målesystem kan etableres i Norge, i første omgang for å se på rifler og bølger. På grunn av koblingen mellom rullestøy og korrugering foreslås det å måle lydbølger fra tog for å finne den akustiske signaturen til rifler og bølger.

Problemstillingen blir derfor: Hvordan kan rifler og bølger måles som rullestøy fra Roger 1000, og hvilke muligheter gir dette?

1.3 **Begrensninger**

På grunn av tid, kostnad og arbeidsbelastning begrenses oppgavens omfang. Det er flere elementer som bidrar til jernbanestøy, og siden rullestøy er den dominerende støykilden er det naturlig å fokusere på denne. Dette gjør at foreslått målesystem i første omgang ikke skal vurdere slagstøy, kurveskrik og andre støykilder.

I Norge er hastigheten relativt lav, med høyeste skiltede hastighet 210 km/t. Enkelte nye spor dimensjoneres for 250 km/t, og gir en annen begrensning av oppgaven. Målinger, studier og forhold som angår større hastigheter enn 250 km/t vil ikke vurderes.

Både målinger av vibrasjoner og lyd kan brukes til å løse problemstillingen. Dette vil kunne gi målinger av et større frekvensspekter og et godt grunnlag for å trekke en konklusjon, men grunnet tidsbruk, omfang og kunnskap er lydbølger prioritert.

Målesystemet begrenses til å kun gjelde Roger 1000. Målevognen vil gi data om bade korrugering og rullestøy samtidig. Dersom systemet på Roger 1000 fungerer kan det siden utvides til å registrere andre typer skader og lydsignaturer, i tillegg til å gjelde for målinger fra flere togsett. Dette utvidede konseptet vil diskuteres, da det kan være aktuelt for videre arbeid.

1.4 **Målsetning**

Oppgaven har ett hovedmål: Å lage et målesystem som kan registrere rullestøy, og vise at akustiske målinger under Roger 1000 korrelerer med målinger av rifler og bølger med tilstrekkelig nøyaktighet.

Videre skal oppgaven vurdere måleløsningen i sammenheng med andre tilsvarende målesystem. I tillegg må det også avgjøres hvem som har nytte av et slikt system og til hvilket formål.

1.5 **Leserveiledning**

Oppgaven er skrevet ut fra at leser kommer fra et jernbaneteknisk miljø, og er kjent med fagtermer og hvordan jernbanen fungerer. Det er ikke gitt at leser har spesielt mye kunnskap innen akustikk. Årsaken er at oppgaven skrives for Jernbaneverket, som per 10.06.2015 har kun én ansatt akustiker, slik at oppgaven kan leses og forstås av flest mulig.

1.6 **Oppbygning**

Denne oppgaven går over åtte kapittel, som vist i innholdsfortegnelsen.

- Kapittel 1 gir introduksjonen til oppgave, veiledning for selve oppgaven og motivasjon.
- Kapittel 2 beskriver metoden for informasjonsinnhenting.
- Kapittel 3 omhandler grunnleggende teori rundt akustikk og støy.
- Kapittel 4 forklarer forhold og problem rundt jernbanestøy, rullestøy, samt rifler og bølger.
- Kapittel 5 beskriver og diskuterer den foreslåtte metoden for akustisk måling av rifler og bølger.
- Kapittel 6 diskuterer nytteverdien av det foreslåtte målesystemet.
- Kapittel 7 gir konklusjon og anbefaling rundt diskusjonen.
- Kapittel 8 omhandler videre arbeid med oppgaven.

1.7 **Motivasjon**

Hovedmotivasjonen til valg av oppgave er ønsket om en praktisk rettet oppgave som noen utenfor NTNU ser verdien av. Grunnen til at jeg valgte nettopp dette studiet er muligheten til å anvende ny kunnskap og forskning på tradisjonsrike og praktiske fag. Derfor har jeg hatt stort fokus på at produktet jeg lager kan komme noen til nytte, i dette tilfellet Jernbaneverket og andre aktører innen jernbanebransjen.

En annen motivasjon for valg av fag og oppgave har vært den læring arbeidet kunne gi meg. Gjennom arbeidet med denne oppgaven har jeg lært spesielt mye om vedlikehold av skinner og jernbanestøy. Dette er kunnskap som kan komme meg til gode senere i yrkeslivet.

2 Metode

Dette kapitlet beskriver valgt metode for informasjonsinnhenting. En vurdering av informasjonen som er brukt i oppgaven er også gitt.

2.1 *Den vitenskapelige metode*

Den vitenskapelige metode går ut på å erverve kunnskap basert på empiri. Basert på erfaringer kan hypoteser med logiske følger etableres. Hver hypotese testes gjennom videre undersøkelser og eksperimenter der målet er at hypotesen kan falsifiseres. Dette betyr at hypotesen er etterprøvable, altså skal det fremkomme resultater som kan motstride prediksjoner utledet fra hypotesen. Dette innebærer at induksjon ikke kan godtas for falsifikasjon. Generelle antagelser kan ikke dras ut fra enkelte data, i motsetning til deduksjon der man drar antagelser baserte på allmenne sannheter.

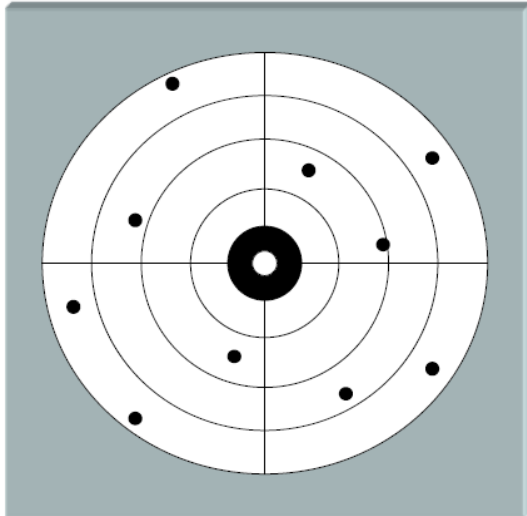
Kvalitativ forskning er mye brukt innen samfunnsvitenskapelige fag og innebærer at man skaffer informasjon og forklaringer av personers opplevelser av utvalgte hendelser. Datagrunnlaget er derfor ikke så stort, men dyptgående. Dette skiller seg fra kvantitativ forskning som benyttes av både samfunnsvitenskapelige og naturvitenskapelige fag, og baserer seg på tester av representative, målbare data. Kvantitativ forskning kan brukes sammen med kvalitativ forskning for å gi falsifiserbare hypoteser basert på kvalitative tolkninger av kvantitative data (Dybvig et al., 2003).

Høsten 2014 ble det gjennomført en prosjektoppgave med det formål å komme fram til noen hypoteser vedrørende temaet «*Rullestøy og korrugering*. Resultatet var hypotesen: *Det finnes en klar sammenheng mellom korrugering av skinnen og jernbanestøy, denne sammenhengen kan uttrykkes matematisk som en funksjon av hastigheten...*» (Husøy, 2014, s.42) Dette er da den gjeldende hypotesen for denne masteroppgaven.

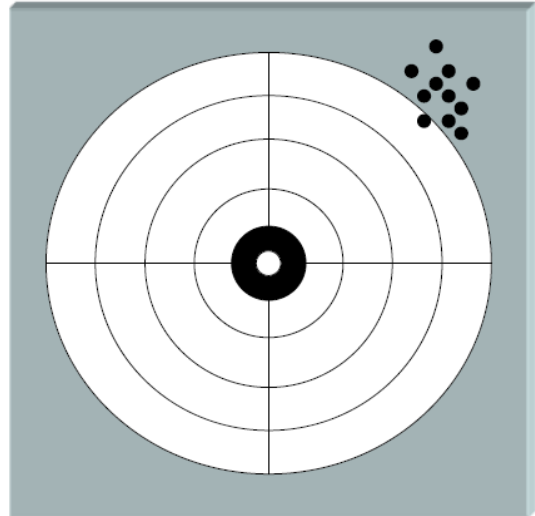
2.2 *Validitet og reliabilitet*

Et godt resultat har høy reliabilitet og god validitet. Reliabilitet vil si et pålitelig måleresultat, altså målinger med et konsistent resultat. Reliabilitet forteller ikke noe om gyldigheten til målingene, til dette benyttes validitet. Validitet gir samsvarer med realiteten, målingene undersøker de faktiske forhold som skal måles.

Litteratur som kommer frem til det samme resultatet har høy reliabilitet, og god validitet dersom alle kildene er innrettet mot de samme problemene. Det er fullt mulig å ha resultat med god validitet og lav reliabilitet, eller omvendt. Førstnevnte er gir en situasjon der man får resultater som samsvarer med det man vil måle, men som har stor usikkerhet knyttet til seg. Det omvendte gir konsistente resultater uten hold det som skal undersøkes (Samset, 2014).



God validitet
Lav reliabilitet



Lav validitet
God reliabilitet

Figur 2.1 - Grafisk visning av reliabilitet og validitet (Samset, 2014)

Validitet og reliabilitet er kvalitative mål, for å vurdere måleresultater statistisk brukes heller uttrykkene nøyaktighet og presisjon. Nøyaktighet forklarer hvor godt et måleresultat er sammenlignet med den faktiske størrelsen og svarer dermed til validitet. Presisjon gir størrelsen på måleusikkerheten eller reliabiliteten, og forklarer om repeterte målinger under like forhold gir like resultat. Nøyaktighet uttrykker forventningsverdi, og dårlig nøyaktighet er knyttet opp mot systematiske feil (Wibetoe, 2009a). Presisjon forklares som standardavvik, og er relatert til tilfeldige feil (Wibetoe, 2009b). For et utvalg av en populasjon uttrykkes forventningsverdi og standardavvik følgende:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

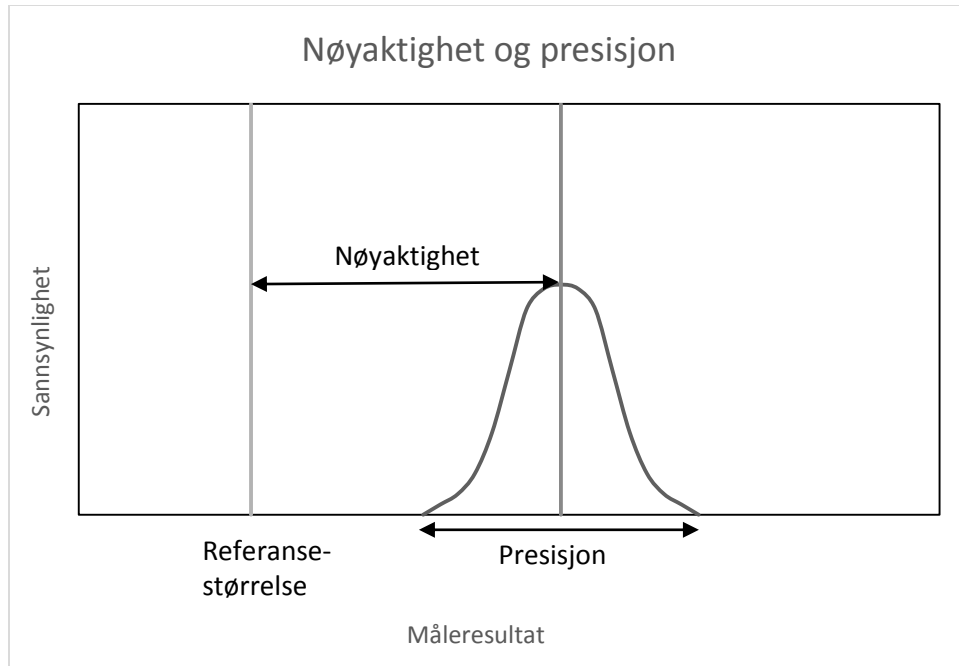
$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

\bar{x} – Forventningsverdi for utvalget

s_x – Standardavvikene til utvalget

x_i – Verdi nummer i for utvalget

n – Antall verdier i utvalget



Figur 2.2 - Grafisk fremstilling av nøyaktighet og presisjon på et normalfordelt datasett. Nøyaktigheten påvirkes av systematiske feil, og presisjonen av tilfeldige.

Systematiske feil kan også forklares som målefeil, og gjelder konstant for alle målinger som får en forskyvning. I prinsippet kan en korrigere for, eller unngå alle systematiske feil som elimineres ved kalibrering og optimalisering. Systematiske feil kan også elimineres ved sammenligning mot kjente størrelser, eller ved å variere forhold som kan påvirke målingene.

Tilfeldige feil eller måleusikkerhet kan derimot ikke unngås. Dette er feil som skyldes forhold som ikke kan forutsies, og gir for en spredning av målingene rundt middelerdien. Tilfeldige feil kan elimineres ved å øke antall målinger i utvalget.

2.3 Litteratursøk

Flere litteratursøk har blitt gjennomført for å anskaffe relevant litteratur. Et litteratursøk kan gi både kvalitativ og kvantitativ informasjon, og søket i seg selv kan gi kvantitative data for problemstillingen med grunnlag i antall kilder. På denne måten kan både validiteten og reliabiliteten sikres. For å vurdere litteraturen vil også antall siteringer og antall produserte artikler av forfatter undersøkes, disse finnes fra scopus.com. Søkemotorene som ble benyttet er Google Scholar, IEEEEXPLORE, ScienceDirect og BIBSYS/Ask via NTNUs bibliotekjeneste. Til å få et kildeutvalg har følgende metodikk blitt benyttet:

1. Generelt søk i søkemotorene der nye søkeord legges til etter hvert for å redusere antall treff. Søkeord ble valg på grunn av relevans.
2. Filtrering etter språk, slik at kun litteratur på engelsk eller et skandinavisk språk evalueres.
3. Filtrering etter relevans fra tittel og ekstrakt.
4. Filtrering etter relevans fra sammendrag.
5. Reduksjon på grunn av identiske eller tidligere funn.

Søkemotorene som ble brukt:

- Google Scholar (www.scholar.google.no)
- IEEEEXPLORE (www.ieeexplore.ieee.org)
- ScienceDirect (www.sciencedirect.com)
- BIBSYS/Ask (www.ask.bibsys.no)

Noe av litteraturen brukt i denne masteroppgaven er også funnet under arbeidet med en prosjektoppgave høsten 2014. Oppgavens tittel er *Korrugering og rullestøy*, og omhandler noe av tematikken som presenteres i denne masteroppgaven. Følgelig var det naturlig å ta i bruk den samme litteraturen i denne masteroppgaven. I tillegg til generelle litteratursøk har også noe litteratur blitt funnet etter målrettede søk på forfatter og tittel, eller gitt direkte av Professor Elias Kassa fra NTNU, Turgut Senuysal, Terje Vasset, Alf Helge Løhren eller Trygve Aasen fra Jernbaneverket. Den samme metodikken som ble brukt under litteratursøket ble brukt også brukt på disse litteraturkildene.

Det har blitt søkt målrettet etter informasjon på relevante nettsteder og biblioteksdata-baser. Dette gjelder spesielt standarder, regelverk, jernbanetekniske definisjoner og teknisk data om komponenter.

2.3.2 Søk etter litteratur om rifler og bølger

Mellom 09. og 11. mars 2015 ble det søkt etter litteratur om rifler og bølger. Relevante funn er omtalt i kapittel 4 *Rullestøy og jernbanestøy*. Etter endt søk ble antall unike litteraturkilder redusert for tittel, abstrakt og sammendrag. Søket er oppsummert i Tabell 2.2. Det ble også gjennomført to rene tittelsøk i Google Scholar. Der litteratur ble valgt med samme metodikk som før, vist i Tabell 2.3.

Tabell 2.2 - Søk etter litteratur om rifler og bølger

Søkeord	Søkemotorer			
	Google Scholar	IEEEXPLORE	ScienceDirect	BIBSYS/Ask
Rail corrugation	18 300	14	883	2
Rail corrugation growth	16 600	-	426	-
Rail corrugation growth railway	6 420	-	312	-
Rail corrugation growth railway roughness	1 940	-	147	-
Rail corrugation growth railway roughness causes	1 860	-	116	-
Rail corrugation growth railway roughness causes short-pitch	184	-	77	-
	Søkemotorer			
	Google Scholar	IEEEXPLORE	ScienceDirect	BIBSYS/Ask
Resultat	3 artikler	0	2 artikler	0
Totalt	5 artikler			

Tabell 2.3 - Rent tittelsøk etter litteratur om rifler og bølger

Tittelsøk i Google Scholar				
	Tittel	Søk 1	Tittel	Søk 2
	Rail corrugation	330	Rail roughness	105
	Rail corrugation growth	28	Rail roughness growth	15
Resultat		2 artikler		1 artikkel
Totalt	3 artikler			

2.3.3 Målrettet søk: Rullestøy i Europa

Mellom 12. og 13. mars ble det søkt etter informasjon om tiltak mot jernbanestøy, og spesielt rullestøy i Europa. Resultatet fra dette søket er gitt i delkapittel 4.5 *Rullestøy i Europa*. Det ble søkt i databasene til infrastruktureierne i følgende europeiske land:

- Belgia (www.infrabel.be)
- Danmark (www.banedanmark.dk)
- Frankrike (www.sncf.com)
- Italia (www.fsitaliane.it)
- Nederland (www.ns.nl)
- Norge (www.jernbaneverket.no)
- Spania (www.adif.es)
- Storbritannia (www.networkrail.co.uk)
- Sveits (www.sbb.ch)
- Sverige (www.trafikverket.se)
- Tyskland (www.deutschebahn.com)

2.4 **Ekspertvurderinger**

Noe av informasjonen er skaffet gjennom personlig korrespondanse eller samtale med personer med kunnskap innenfor akustikk, jernbaneteknikk, vedlikehold eller målinger på jernbanen. De betegnes her som eksperter på sine respektive fagfelt. Følgende personer er kontaktet:

- Trygve Aasen, Miljørådgiver, Jernbaneverket, (Akustikk og jernbanestøy)
- Geir Harald Ingvaldsen, Seksjonsleder, Jernbaneverket, (Målevogn)
- Elias Kassa, Professor, NTNU, (Jernbaneteknikk)
- Alf Helge Løhren, Sjefingeniør – Dr.ing., Jernbaneverket, (Jernbaneteknikk)
- John Mikael Modin, rådgiver, Jernbaneverket, (Vedlikehold)
- Lisette Mortensen, Miljømedarbeider, Banedanmark, (Akustikk og akustiske målinger)
- André Negård, Seksjonsleder akustikk, Multiconsult, (Akustikk og jernbanestøy)
- Odd Kr. Pettersen, Professor II, NTNU, (Akustikk)
- Turgut Senuysal, Jernbaneverket, (Målevogn og måleoppsett)
- Martin Sund, Jernbaneverket, (Vedlikehold)
- Frode Teigen, Sjefingeniør, Jernbaneverket, (Vedlikehold)
- Terje Vasset, Jernbaneverket, (Målevogn og tilstandskontroll)

Slik ekspertvurderinger er i sin natur kvalitative data, da dette er tolkninger av annen informasjon. Dette utfordrer etterprøvbareheten og påliteligheten til informasjonen. Derfor er det viktig å skille mellom hva som er ekspertenes meninger og hva som er fakta.

2.5 **Vurdering av kilder**

Mye av informasjonen som er gitt i denne oppgaven er kvalitativ informasjon. Det vil si tolkning av allerede eksisterende kvantitative data, informasjon gitt av eksperter eller tolkning av fysiske prinsipper og modeller. Funnet litteratur er relevant for oppgavens problemstilling, så en kan si at de litterære kildene har god validitet. Litteraturen gir mer eller mindre samme resultat, så den er generelt sett reliabel. Basert på vurderingene nedenfor anses litteratursøk som en god metode for å skaffe informasjon. Ekspertvurderinger bedømmes som en akseptabel metode for å skaffe informasjon, da etterprøvbareheten er redusert.

Litteratur om støytiltak i Norge og Europa er hentet direkte fra infrastruktureierne i de forskjellige landene. Dette er statlige etater eller foretak, så denne informasjonen sees på som offisiell og gjeldende for disse landene. Dette styrker kildenes troverdighet. Det er imidlertid en utfordring at forfatterne til noen av disse kildene er anonyme. Dette svekker meninger og tolkninger av data som presenteres.

Vedrørende akustikk og jernbanestøy er to bøker mye brukt. Innen akustikk er Lawrence E. Kinsler og Austin R. Frey kjent som autoriteter og deres bok *Fundamentals of Acoustics* er sitert 6 456 ganger på

Google Scholar i mai 2015, denne bokens innhold kan dermed regnes som troverdig. Innen rullestøy kan det samme sies om arbeidet til David Thompson, hans bok *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modeling and Means of Control* er sitert 273 ganger i mai 2015 på Google Scholar.

De fleste forskningsrapporter og bøker med tema rundt rullestøy, rifler og bølger føyer seg etter arbeidet til Thompson, men har noe sprikende resultat når det kommer til bakgrunnen til rifler og bølger. På grunn av dette har de derfor god validitet, men en noe redusert reliabilitet.

Noen forfattere er brukt mer enn andre, for å vurdere deres arbeid kan man se på antall artikler de har produsert og antall artikler de er sitert i. Til å gjøre dette er scopus.com brukt, første tall i parentes angir antall artikler som medforfatter eller hovedforfatter, og andre tall angir antall artikler sitert i. Arbeidet til følgende personer er vektlagt: David Thompson (186, 1860), Jens Nielsen (58, 605), Richard R.K. Jones (40, 223), Stuart L. Grassie (51, 863), Ard H.W.M. Kuijpers (15, 54), Histoshi Tsunashima (70, 177), Klaus Jäger (35, 136) og Hans Onnich (8, 15). Ut fra denne oversikten vurderes forfatterne og deres arbeid som troverdig, da de har mange siteringer. Både totalt og sammenlignet med antall produserte artikler.

Informasjonen som blir gitt i kildene er ikke foreldet. De eldste kildene er fra midten av 90-tallet, men hovedvekten av litteraturen er fra 2006 og frem til i dag. Selv om flere kilder er opptil 15 år gamle vurderes disse fortsatt som gjeldende, da de nyeste artiklene bygger videre på dem.

Da noe av informasjonen er gitt muntlig og i e-poster, er etterprøvsbarheten på ekspertenes faglige begrunnelser en utfordring. Ekspertenes uttalelser skal derfor ikke vektlegges for mye. Informasjonen de gir kan deles inn i to grupper; fakta og meninger. Fakta er det ikke stor grunn til å tvile på. Kritikken kan heller rettes mot deres meninger, spesielt hvis de ikke er grunnlagt. På grunn av dette kan en si at reliabiliteten til ekspertenes uttalelse spriker, men validiteten er god.

3 Teoretisk grunnlag

Følgende kapittel gir en innføring i jernbanetekniske uttrykk, akustikk, lydmålinger og støy. Det teoretiske grunnlaget til denne masteroppgaven bygger på en prosjektoppgave fra høsten 2015, og er en forbedret avskrift av denne (Husøy, 2014). En detaljert fysisk forklaring på uttrykkene blir ikke gitt, her vises det til litteraturen.

3.1 Jernbanetekniske uttrykk

- *Aksling* – Akslingen er en bjelke med hjul på hver ende. Støtter boggien og støttes selv av hjulene på skinnen.
- *Ballast* – Lag av grov stein som understøtter svillen, ligger på underbygningen
- *Ballastmatte* – Vibrasjonsdempende materiale mellom ballasten og underbygningen
- *Befestigelse* – Festeordning mellom svillen og skinnen
- *Boggi* – Rammen som understøtter toget, er selv støttet av to akslinger
- *Fritt profil* – Togets tverrsnitt under kjøring, helt uhindret av andre tog og gjenstander
- *Overbygning* – Skinne, skinnematte, befestigelse, sville, svillematte, ballasten og ballastmatte
- *Rullende materiell* – Alt materiell som ruller på skinnene (tog, vogner)
- *Skinne* – Stålbjelken som toget kjører på, støtter hjulene på akslingen og er selv støttet av svillen
- *Skinnefot* – Den flate delen nederst på skinnen
- *Skinnehode* – Den kurvede øverste delen av skinnen
- *Skinnekryss* – Der to skinner går over i hverandre på grunn av at to spor møtes
- *Skinnematte* – Vibrasjonsisolerende matte mellom skinnen og svillen, holdes på plass av befestigelsen og skinnens tyngde
- *Skinnesteg* – Forbindelsen mellom skinnehodet og skinnefoten
- *Skjøt* – Sammenkobling mellom to skinner i lengderetningen. Kan være helsveist eller lasket. For en lasket skjøt vil en isolert plate forbinde skinnene uten at de er i kontakt med hverandre
- *Sporveksel* – Mekanisk innretning i sporet som "svinger" toget inn på et annet spor.
- *Sville* – Bjelke i betong eller tre som skinnen hviler på. Ligger på ballasten
- *Svillematte* - Vibrasjonsdempende materiale mellom svillen og ballasten
- *Tyfon* – Horn som brukes til varsling
- *Underbygning* – Alt under ballasten. Inkluderer fyllinger og skjæringer, bruer og dreneringsanlegg

3.2 Om akustikk

Akustikk er et omfattende fagfelt, og enhver seriøs fagbok er tilstrekkelig til å forklare relevante uttrykk for denne studien. Her benyttes *Fundamentals of Acoustics* (Kinsler et al., 2000) om ikke annet er oppgitt.

3.3 Lydbølger

Lyd kan beskrives som trykkendringer i luften. Disse endringene skjer raskt og sprer seg ut fra lydkilden som trykkbølger, samtidig som energi transporteres gjennom luften. Trykkendringene registrerer øret som lyd, der trykkamplituden P gir lydnivået og frekvensen f tonen. Lydbølger sprer seg med en hastighet c , en frekvens f og en bølgelengde λ etter forholdet i formel (3.1).

$$c = \lambda f \quad (3.1)$$

c – Lydens hastighet i luft, 343 m/s ved 20°C [m/s]

λ – Bølgelengden [m]

f – Lydens frekvens [Hz]

Mennesker kan ikke oppfatte alle frekvenser. En ung person hører trykkendringene i lufta med frekvenser mellom 20 Hz og 20 000 Hz. Dette intervallet defineres derfor som hørbar lyd. Menneskets hørsel svekkes i med alderen, spesielt for høyfrekvente lyder.

3.3.1 Lydintensitet

Lydintensiteten er et uttrykk for lydenergien per tidsenhet og areal. Intensiteten midlet over tid og areal, kan for plane harmoniske bølger gis fra trykkamplituden, lufttettheten og hastigheten.

$$I = \frac{d\Pi}{dA} = \pm P^2 / 2\rho_0 c \quad (3.2)$$

I – Lydbølgens intensitet [W/m²]

$\delta\Pi/dA$ – Kildens lydenergi per areal per tidsenhet [W]

P – Lydbølgens trykkamplitude [Pa]

ρ_0 – Lufttetthet, 1,21 kg/m³ ved 20°C [kg/m³]

c – Lydens hastighet i luft, 343 m/s ved 20°C [m/s]

3.3.2 Lydtryknivå

Styrken på lyd defineres av lydintensitetsnivå, med enheten desibel, dB. Dette er et mål på forskjellen mellom lydintensiteten og en referanseintensitet. Referanseintensiteten er 10⁻¹² W/m², som er intensiteten til en ren 1 kHz tone som er akkurat hørbar.

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (3.3)$$

L_I – Lydintensitetsnivå [dB]

I – Lydbølgens intensitet [W/m^2]

I_{ref} – Referanseintensitet, $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ [W/m^2]

På grunn av forholdet mellom lydtrykk og lydintensitet kan også lydintensitetsnivå uttrykkes med lydtrykket og et referanselydtrykk på $20 \mu\text{Pa}$. Dette gjelder for plane og sfæriske trykkbølger. På engelsk kjent som *Sound Pressure Level* (SPL), på norsk lydtrykknivå.

$$L_P = SPL = 20 \log \left(\frac{P_e}{P_{ref}} \right) \quad (3.4)$$

L_P – Lydtrykknivå [dB]

P_e – Lydtrykk, kvadratisk middelværdi av trykkamplituden. $P_e = P/\sqrt{2}$ [Pa]

P_{ref} – Referansetrykk på $20 \mu\text{Pa}$

3.3.3 Lydtrykk over distanse

Lydtrykket avtar etter distansen. Dette kommer av at lydenergien må fordeles over en større sfærisk overflate. Lydtrykket er da omvendt proporsjonal med avstanden, noe som omfatter uhindrede lydkilder utendørs. To uttrykk presenteres, (3.5) og (3.6). Det første gjelder for lydkilder som avgir like mye lydenergi i alle retninger. Det andre er mer generell da den inkluderer lydkilder som avgir forskjellig lydtrykk i forskjellige retninger (Müller and Möser, 2013).

$$P_e^2(d) = \frac{\Pi \rho_0 c}{4\pi d^2} \quad (3.5)$$

$$P_e^2(d, \varphi, \vartheta) = \frac{\rho_0 c}{d^2} \frac{\delta\Pi(\varphi, \vartheta)}{d\Omega} \quad (3.6)$$

Π – Kildens lydenergi per tidsenhet [W]

$\delta\Pi(\varphi, \vartheta)/d\Omega$ – Kildens lydenergi per vinkel i retningene φ og ϑ [W]

d – Distanse fra lydkilden [m]

ρ_0 – Lufttetthet, $1,21 \text{ kg}/\text{m}^3$ ved 20°C [kg/m^3]

c – Lydens hastighet i luft, $343 \text{ m}/\text{s}$ ved 20°C [m/s]

Relasjonen mellom lydtryknivå og distanse kan derfor uttrykkes på følgende måte:

$$L_{p2} = L_{p1} + 20 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (3.7)$$

L_{p1} – Lydtryknivå for lydkilden i posisjon 1 [dB]

L_{p2} – Lydtryknivå for lydkilden i posisjon 2 [dB]

d_1 – Distanse fra lydkildens til posisjon 1 [m]

d_2 – Distanse fra lydkildens til posisjon 2 [m]

3.3.4 Summering av lydtryknivå

Ved summering av forskjellige bidrag til totalt lyd må en ta hensyn til at lydtryknivået er gitt som logaritmiske verdier. Dette gjør at lyder med en lavt lydtryknivå, vil ha veldig liten innvirkning på det totale lydbildet. På samme måte vil den største lydkilden totalt dominere. Summering og midling av lydtryknivå skjer etter:

$$L_p = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \quad (3.8)$$

$$\bar{L}_p = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right) \quad (3.9)$$

L_p – Lydtryknivå [dB]

$L_{p,i}$ – Lydtryknivå for lydkilde eller måling i [dB]

N – Antall lydkilder eller målinger

\bar{L}_p – Gjennomsnittlig lydtryknivå [dB]

3.3.5 Frekvensintervallet

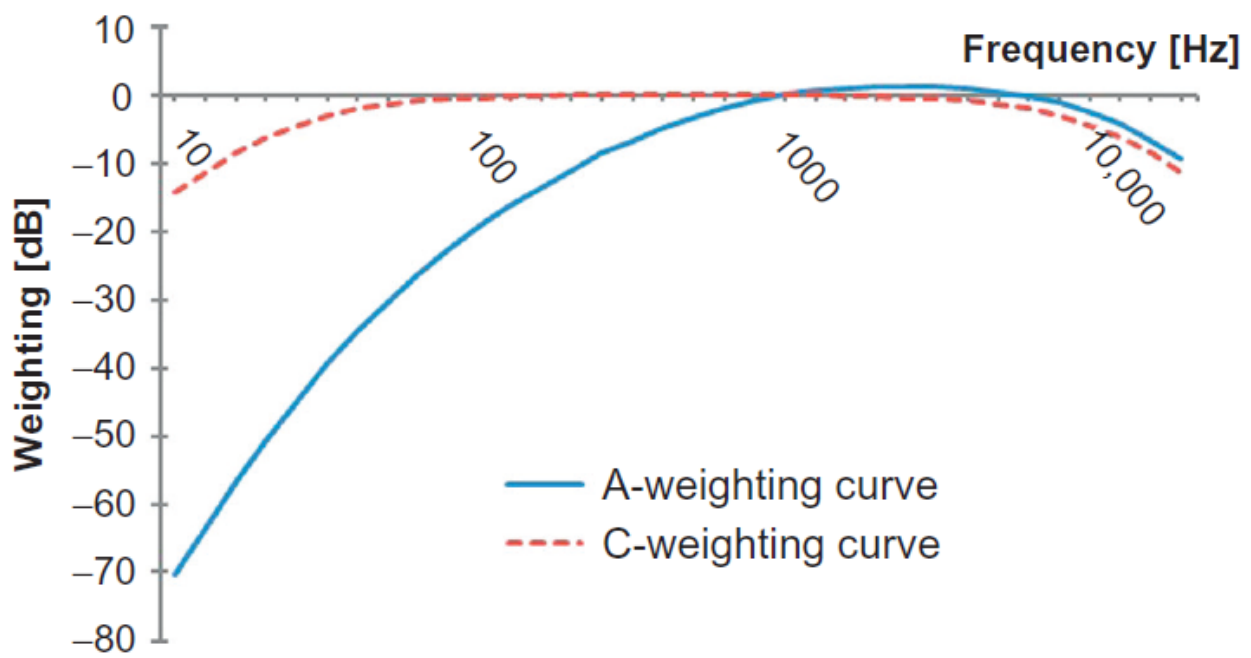
Lyd kommer sjeldent som én ren frekvens, men som en samling av mange frekvenser. På grunn av dette varierer lydtryknivået med frekvensene, og det er derfor gunstig å dele opp lyden i forskjellige frekvenser med hvert sitt lydtryknivå. Den mest brukte oppdelingen er i 1/3-oktavnå, der hvert intervall følger forholdet $f_{\text{øvre}}/f_{\text{nedre}}=2^{1/3}$, og er representert med en middelfrekvens etter forholdet $f_{\text{middel}}=(f_{\text{øvre}} \times f_{\text{nedre}})^{1/2}$. En oversikt over frekvensintervall i 1/3-oktavnå er gitt i Tabell 3.1. Lydtryknivå i hvert intervall beregnes ut fra summert intensitet.

Tabell 3.1 - Frekvensintervallet i 1/3-oktavbånd. Tilsvarende finnes også for 1/1- og 1/10-oktavbånd

Frekvensintervallet i 1/3-oktavbånd		
Nedre frekvens, f_{nedre} [Hz]	Middelfrekvens, f_{middel} [Hz]	Øvre frekvens, $f_{øvre}$ [Hz]
44,7	50	56,2
56,2	63	70,8
70,8	80	89,1
89,1	100	112
112	125	141
141	160	178
178	200	224
224	250	282
282	315	355
355	400	447
447	500	562
562	630	708
708	800	891
891	1000	1122
1122	1250	1413
1413	1600	1778
1778	2000	2239
2239	2500	2818
2818	3150	3548
3548	4000	4467
4467	5000	5623
5623	6300	7079
7079	8000	8913
8913	10000	11220
11220	12500	14130
14130	16000	17780
17780	20000	22390

3.3.6 Vekting

En praktisk størrelse til å angi hørbar lyd er det A-veide lydtryknivået. Hver frekvens vektes på grunn av ørets sensitivitet til akkurat denne frekvensen. Dette gjør at lydtryknivået ved frekvenser mellom ca. 1000 og 6000 Hz oppfattes større enn målt verdi, mens for de lavere frekvensene oppfattes lydtryknivået lavere enn målt verdi. Ved beregninger av lyd i samfunnet og miljøsammenheng må dette fenomenet inkluderes. Etter å ha vektet lyden kalles den A-veid, med enhet dBA. Se Tabell 3.2 for en oversikt over typiske støykilder og A-veid lydtryknivå. For impulslyder benyttes noen ganger C-vekting, som skyldes at øret ikke er så sensitiv for frekvenser med store lydtryknivå. Denne vektingen har derfor en flatere kurve enn A-vektingen, med enhet dBC, se Figur 3.1.



Figur 3.1 – Kurver for A-vekting og C-vekting av lydtryknivå (Murphy and King, 2014).

Tabell 3.2 - Oversikt over typiske støykilder (Murphy and King, 2014)

A-veid lydtrykknivå [dBA]	Typiske støykilder
140	Menneskelig smerteterskel
130	Jetfly
120	Nattklubb, rockekonsert
110	Mekanisk verksted, tresløyd
100	Fotballkamp
90	Konserthall, motorsykkel
80	Tungtrafikk
70	Støvsuger, vanlig samtale
60	Lett trafikk
50	Stille samtale
40	Hvisking, boligområde på natten
30	Utmark
0	Laveste hørbare lyd (1 kHz)

3.3.7 Direktelyd

Enhver lydkilde har et lydfelt rundt seg som er totalt dominert av den direkte utstrålte lyden fra kilden. Hvor stort dette lydfeltet er avhenger av lydabsorpsjonen til omgivelsene og andre lydkilder i området (Kinsler et al., 2000). For én lydkilde, som stråler likt i alle retninger, avgjøres størrelsen på dette feltet av følgende uttrykk:

$$d_D = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.10)$$

d_D – Radius på feltet med direktelyd [m]

A – Total lydabsorpsjon [m²]

3.3.8 Vibrasjoner og lyd

Utstrålt lydenergi fra en vibrerende masse kan uttrykkes med hastigheten til overflaten som vibrerer. Denne relasjonen gjør at for økte vibrasjonshastigheter vil lydenergien øke. En pulserende sfære brukes som eksempel, dette er den enkleste idealiserte lydilden. Lydtrykk, lydintensitet og lydenergi avhenger av følgende uttrykk:

$$Q = 4\pi a^2 U_0 \quad (3.11)$$

Q – Kildens styrke, gir hvor mye volum som forflyttes per tidsenhet [m^3/s]

a – Radius på den pulserende sfæren [m]

U_0 – Hastighetsamplitude radiallyt på sfæren [m/s]

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 c \left(\frac{Q}{\lambda d} \right) \quad (3.12)$$

$$I = \frac{1}{8} \rho_0 c \left(\frac{Q}{\lambda d} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \pi \rho_0 c \left(\frac{Q}{\lambda} \right)^2 \quad (3.14)$$

P – Lydbølgens trykkamplitude [Pa]

I – Lydbølgens intensitet [W/m^2]

Π – Utstrålt lydenergi per tidsenhet [W]

λ – Bølgelengden [m]

d – Distanse fra sfærens senter til observasjonspunkt [m]

ρ_0 – Lufttetthet, 1,21 kg/m^3 ved 20°C [kg/m^3]

c – Lydens hastighet i luft, 343 m/s ved 20°C [m/s]

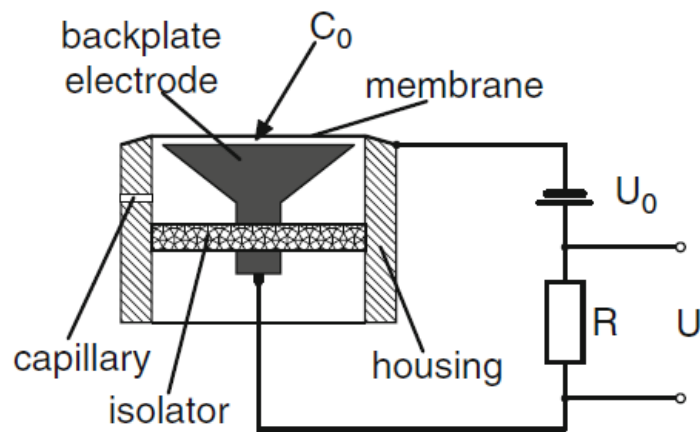
3.4 Lydmålinger

Akustiske bølger brukes til inspeksjon i flere industrier og bransjer. Som regel benyttes de til ikke-destruktiv testing, altså tester som ikke endrer det som måles. Fordelene med dette er at skader kan oppdages uten å måtte påvirke funksjonen eller levetiden til komponenten som undersøkes. Ikke-destruktive målinger har den fordel at de kan gjentas flere ganger, uten å påvirke måleresultatet.

Lyd og vibrasjoner benyttes til å detektere, lokalisere, måle eller vurdere defekter i system under normal eller full belastning. En fordel med bruk av lyd og vibrasjon er at man kun trenger én måling for å detektere skader. I tillegg kan lyd og vibrasjoner være praktiske for målinger av områder som er lite tilgjengelig,

eller for å brukes til lokalisering i større områder. En ulempe er vanskeligheter med å avgjøre størrelsen på skadene som måles (Meo, 2014).

Lydbølger kan måles med en mikrofon, som omgjør trykkbølger til elektriske signaler. Prinsippet bak en mikrofon er at en membran eller et annet medium beveges av mekaniske krefter fra lydets trykkbølger. Denne bevegelsen registreres som et elektrisk signal per tidsenhet, som videre kan tolkes for å gi informasjon om lydtrykknivå og frekvens. Mikrofonens sensitivitet og bruksområde avhenger av teknologi, materialvalg og størrelse. For at en mikrofon skal fungere optimalt må den undersøkes og kalibreres jevnlig. En mikrofon kan også benyttes under vann, da som en hydrofon. Forskjellen mellom hydrofoner og mikrofoner er at hydrofoner virker på generelt høyere trykk, og er stilt inn til å fungere i et annet medium (Müller and Möser, 2013).



Figur 3.2 - Prinsippkisse av en mikrofon (Müller and Möser, 2013)

Typisk for mikrofoner er at de må beskyttes mot faktorer som kan påvirke måleoppsettet eller forurene målingene. Mikrofoner er sensitive instrumenter, så for å unngå skader og feilmålinger må deres plasseringen og utforming vurderes slik at de ikke tar skade. En annen utfordring med mikrofoner er datainnsamling, lagring og behandling. På grunn av den høye innsamlingsfrekvensen fanges store datasett, slik at lagring og databehandling utfordres (Meo, 2014).

Beregninger av lydtrykknivå gjøres etter følgende relasjon:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} P^2(t) dt} \tag{3.15}$$

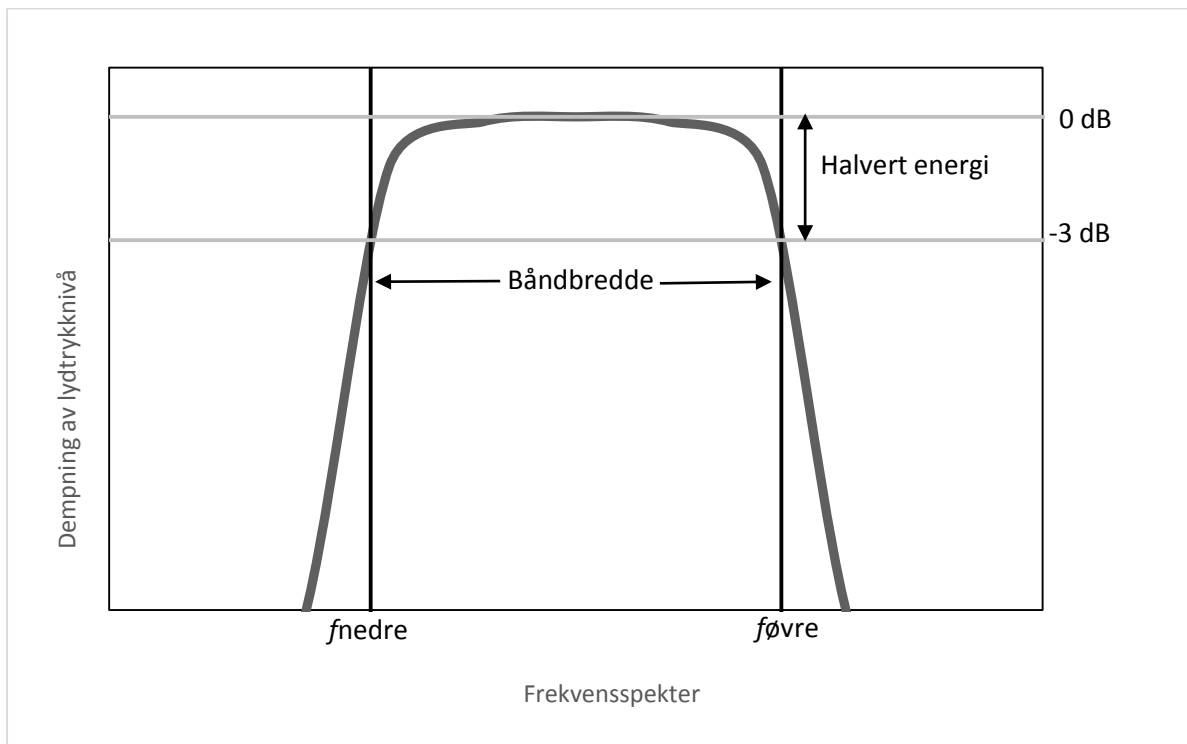
P_e – Lydtrykk, kvadratisk middelværdi av trykkamplituden [Pa]

T_m – Måleintervall [s]

$P(t)$ – Lydtrykk ved tiden t [Pa]. For harmoniske svingninger i lydtrykket vil $P(t) = P \sin \omega t$. Der ω er vinkelhastigheten til svingningen.

Frekvensene fra mikrofonen finnes med Fourier-transformasjon. Lydtrykket registreres som diskrete verdier over uniforme tidsintervall, slik at lydtrykknivået er gitt som en diskret funksjon av tiden. For å avgjøre frekvens og bølgelengde brukes en *Fast Fourier transform* (FFT). Denne beregner den diskrete Fourier-transformasjonen, og gir lydtrykknivå som en funksjon av frekvensen. FFT transformerer funksjonen fra tidsdomenet inn i frekvensdomenet.

Enkelte regneoperasjoner blir lettere å utføre i frekvensdomenet. For eksempel er det lettere å filtrere frekvensene man ønsker å fokusere på. Noe som kan gjøres med et båndpassfilter, som bare slipper igjennom ønskede frekvenser, eller et båndstopfilter, som stopper uønskede frekvenser. Båndpassfilteret demper gradvis frekvensene fra midten av filteret og utover båndbredden. Denne båndbredden er gitt som differansen mellom nedre og øvre avbrytningsfrekvens, der energien halveres, altså reduseres med 3 dB (Müller and Möser, 2013). På grunn av dempingen vil noen av frekvensene innenfor båndbredden dempes litt, og ikke alle frekvenser utenfor vil dempes helt. Denne feilen øker usikkerhet til verdiene for de passerte frekvensene.



Figur 3.3 - Grafisk representasjon av et båndpassfilter, med båndbredde mellom $f_{\overline{v}re}$ og f_{nedre}

Etter regneoperasjonene utføres den inverse Fourier-transformasjonen (Müller and Möser, 2013). Nøyaktigheten til transformasjonen avhenger av hvilken algoritme som velges for å utføre transformasjonen, for mer detaljert informasjon om FFT vises det til *Fundamentals of Acoustics* (Kinsler et al., 2000). Den generelle diskrete Fourier-transformasjonen ((3.16) og dens inverse ((3.17) uttrykkes følgende:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \text{ for } k = 0, \dots, N-1 \quad (3.16)$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i2\pi k \frac{n}{N}} \text{ for } n = 0, \dots, N-1 \quad (3.17)$$

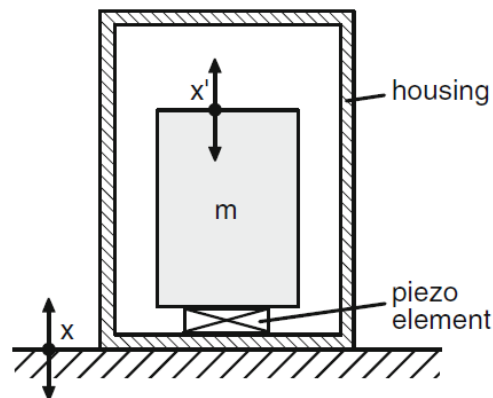
X_k – Endelig datasett. Lydtrykk for frekvens, $P(f)$ [dB]

x_n – Endelig datasett. Lydtrykk for faste tidsintervall, $P(t)$ [dB]

N – Antall data i datasettet

3.5 Vibrasjoner

Vibrasjoner måles med en resonator med gitt masse, fjæring og mekaniske dempning. Det enkleste eksempelet på dette er en gitt fjæret og dempet masse m koblet sammen med en vibrerende masse M . Ved å måle differanseamplituden mellom de to massene, kan vinkelfrekvensen til M beregnes (Müller and Möser, 2013).



Figur 3.4 - Prinsippkisse for et akselerometer (Müller and Möser, 2013)

3.6 Støy

Støy er uønsket lyd (Direktoratet for Byggekvalitet, 2011). I dagens lovverk stilles det krav til støykilder, støyreducerende tiltak og arealplanlegging for ikke å plage befolkningen og miljøet. Mange opplever støy som en stor helseplage som gir nedsatt arbeidsevne, helse og trivsel, det er derfor viktig med at reguleringene i forskriftene og lovene følges. I denne oppgaven vil uttrykkene støy og støynivå brukes om A-veid lydtryknivå for støy.

3.6.1 Støymålinger

Emisjonsmålinger av støy fra tog utføres etter ISO 3095:2013 (Standard Norge, 2013). Målinger utføres på steder der lydbølger fritt kan forplantes uhindret. Potensielle hindre er store overflater som absorberer lyden, eksempelvis snø og mye vegetasjon. Store reflekterende overflater som fritt vann, asfalt, betong eller is aksepteres heller ikke. Videre stilles det krav til høydevariasjonene i terrenget ved sporet. Personer skal ikke befinne seg i området mens det gjøres målinger.

Bakgrunnsstøy skal måles i 20 sekunder, og skal være minst 10 dB lavere enn målt $L_{P,Aeq,T}^2$ ved en togpassering. Vær og vindforhold noteres under måling, ettersom tungt regn og kraftig vind kan påvirke bakgrunnsstøyen. For hvert togsett som måles skal det utføres tre målinger i samme hastighet.

Støymålinger stiller krav til horisontalkurvatur. For hastigheter over 120 km/t må horisontalkurvaturen ha radius ≥ 5000 m, og for hastigheter mellom 70 km/t og 120 km/t må radius ≥ 3000 m. Sporet skal være ballastspor med betong eller tresviller. Sporet skal ikke ha støyskjerming, men skinnedemping aksepteres. Målestrekningen skal være uten skinneskjøter og andre synlige deformasjoner på skinnehodet. Rifler og bølger skal være etter krav omtalt i delkapittel 4.2.5 *Krav til rifler og bølger*.

Hjul på rullende materiell skal ha kjørt minst 1000 km, og kan ikke ha noen nevneverdig korrugering på overflaten. Når høyeste målte hastighet, V_{maks} , er større enn 80 km/t, skal det gjøres målinger ved 80 km/t og V_{maks} . For $V_{maks} \leq 80$ km/t skal målingene kun gjøres ved V_{maks} . Støymålinger skal skje 7,5 m fra sporets midtlinje, 1,2 m over skinnehodet. For hastigheter større enn 200 km/t kan støymålingene gjøres ved 25 m fra sporets midtlinje, 3,5 m over skinnehodet. Både målinger for 7,5 m og 25 m gjøres på begge sider av sporet.

² Definisjonen på $L_{P,Aeq,T}$ er gitt i vedlegg 7

4 Rullestøy og jernbanestøy

Dette kapittelet omhandler jernbanestøy, og spesielt rullestøy. En del av kapittelet fokuserer også på rifler og bølger. I stor grad er arbeidet til David Thompson benyttet for å forklare forhold rundt rullestøy, rifler og bølger (Thompson et al., 2009). Noe kapitelet bygger også videre på en prosjektoppgave fra høsten 2014 (Husøy, 2014).

4.1 Generelt om jernbanestøy

Jernbanestøy har ikke én kilde, men mange. Frekvensintervallet til jernbanestøy spenner fra 200 Hz til 4 kHz. De lavfrekvente bidragene kommer fra materiell og sviller, hvor materiell gir bidrag mellom 200 Hz og 400 Hz, og svillene opp til 500 Hz. De midtfrekvente lydene, mellom 750 Hz og 1500 Hz, har sitt opphav i skinnen. Fra hjulet kommer de mest høyfrekvente lydene i 2 kHz til 4kHz (Krylov, 2001).

På norske baner er den dominerende støykilden rullestøy. Dette er lyden som produseres av vibrasjoner av hjul, skinne og sville. Vibrasjoner som i all hovedsak skyldes en korrugert overflate på både hjul og skinne. Denne korrugeringen er bedre kjent som rifler og bølger. Rullestøy er spesielt utpreget på baner med hastigheter mellom 50 km/t og 300 km/t, der den øker med logaritmen til togets hastighet. Thompson har funnet at støyøkningen er ca. $30\log V$ (Thompson et al., 2009).

Kurveskrik oppleves i spesielt skarpe svinger, og kommer i et tydelig og kort frekvensintervall, normalt mellom 250 Hz og 5 kHz. Fenomenet er vanlig der horisontalkurveradiusen er mindre enn 200 m, og mer uvanlig der radius er over 500 m. Kurveskrik skyldes primært to mekanismer, 1) uønsket kontakt mellom skinnehodet og hjulflensen på ytre hjul i svingen, og 2) krypkrefter lateralt på skinnen i kontaktflaten for det innerste hjulet. I tillegg kan longititude krypkrefter i ytre skinne bidra til kurveskrik. Årsaken til krypkreftene er at ytre hjul ikke alltid roterer raskt nok for å klare den lengre reiselengden i kurven (Thompson et al., 2009).

Ved hastigheter over ca. 300 km/t tar aerodynamisk støy over som den dominerende støykilden. Aerodynamisk støy skyldes økt luftmotstand og turbulens. I likhet med rullestøy, vil også denne støykilden øke med logaritmen til hastigheten, men etter ca. $60\log V$ (Thompson et al., 2009).

Slag og impulslyder fra jernbanen kan skyldes skader, deformasjoner og skjøter. Denne typen støy er ofte knyttet opp mot sporets tilstand. Unikt med impulslyder og slag er at de opptrer på faste punkter langs sporet. Med unntak av skader på togsett som forårsaker jevnlig impulser, for eksempel hjulslag. Impulslyder kan også komme fra komponentene som gjør driften av sporet mulig, for eksempel høres et slag hver gang et hjul passerer en lasket skjot (Thompson et al., 2009).

Over broer vil støybildets karakter forsterkes på grunn av forplantning på en større overflate. Vibrasjoner forplanter seg inn i broens bæresystem som svinger og utstråler lyd. Endringen til en stivere befestigelse og stivere overbygning på broen vil også påvirke lydets frekvens (Thompson et al., 2009).

Resterende støykilder skyldes drift og vibrasjoner. Støy vil alltid oppleves på en effektiv og sikker bane, blant annet på grunn av støy fra vedlikeholdsarbeid, stasjonsområder, hensettingsområder, mekaniske deler på spor og tog, motorer og tyfoner. Disse varierer mye og kan noen ganger være dominerende (Thompson et al., 2009).

Jernbanestøy trenger ikke å komme av direkte lydutstråling fra toget eller sporet. Vibrasjoner kan forplante seg via underbygningen og inn i grunnmuren til nærliggende hus. Vibrasjoner som kommer inn i selve huset kan vibrere skap og dører, og på den måten skape en slags indirekte støy (Thompson et al., 2009).

4.2 **Bølgedannelse**

Bølgedannelser, også kjent som korrugering, er fellesbetegnelsen på flere relativt like slitasjemønstre på skinnehodet. Grassie og Kalousek har klassifisert bølgedannelsen i seks forskjellige typer: *Heavy Haul*, *Light Rail*, *Corrugation of Booted Sleepers*, *Contact Fatigue Corrugation*, *Rutting* og *Roaring Rails* (Grassie and Kalousek, 1993).

Heavy Haul betegner relativt store bølgelengder på 200-300 mm som finnes på strekninger der aksellasten er over 15 tonn og hastigheten lav. Skyldes plastiske deformasjoner på grunn av et periodisk og stort kontaktrykk.

Light Rail er store bølgelengder mellom 500 og 1500 mm som også har sin årsak i plastiske deformasjoner på grunn periodisk stort kontaktrykk. Bølgene finnes på baner med større hastigheter enn *Heavy Haul* og forårsakes av lokomotivene.

Corrugation of Booted Sleepers er bølgelengder på omlag 50 med mer. Disse skapes av slitasje og plastiske deformasjoner på skinnehodet til den innerste skinnen i kurver, som avhenger av egensvingninger til sporet og hjulet.

Contact Fatigue Corrugation er forårsaket av materialtretthet og varierende spenningsforhold, som gir mikroskopiske sprekker. Disse eksiterer egensvingningen til sporet, som forsterker skaden og gir bølgelengder på 150-450 mm.

Rutting skiller seg fra de andre ved at bølgen på skinnehodet er over hele skinnehodets bredde. Denne typen korrugering skapes av slitasje fra varierende langsgående krefter på skinnehodet, for eksempel ved bremsing eller kjøring i kurver. *Rutting* har bølgelengder på 150-450 mm.

Roaring Rails er også kjent som *short-pitch corrugation* og har bølgelengder på 25-80 mm. Årsaken til denne typen korrugering er ukjent for Grassie og Kalousek, men den er vanlig på hovedbaner med stor hastighet og aksellast på 20 tonn eller mindre. Skaden assosieres med rullestøy, og er mest vanlig på rette strekninger og slake kurver.

Jernbaneverket skiller imidlertid mellom tre kategorier; rifler, korte og lange bølger (Jernbaneverket, 1999). Rifler har bølgelengder mellom 30 og 80 mm, og tilsvarende *Roaring Rails*. Korte bølger har bølgelengder mellom 80 og 300 mm, og finnes ofte i kurver. Lange bølger har bølgelengder mellom 300 og 3000 mm.



Figur 4.1 – Rifler og bølger på en jernbaneskinne (Grassie and Kalousek, 1993).

4.2.1 Korrugert nivå

Rifler og bølger på skinnhodet defineres på samme måte som lydtryknivået, følgelig som forholdet mellom den kvadratiske middelveiden til amplituden og en referanseamplitude. Dette gir en verdi for korrugert nivå, gitt med enhet dB. Referanseamplituden er på 1 μm (Standard Norge, 2009). Riktig kvadratisk middelveide regnes etter at datasettet er vasket for ekstremverdier. Disse kan sees som pigger eller groper i rådataen fra målinger, og skyldes skader på skinnen, hjulet, skinneskjøter eller gjenstander på skinnen. Etter vasking for pigger og groper står datasettet igjen som verdier for amplituden til rifler og bølger på skinnhodet. Korrugert nivå er definert i formel (4.2). Formel (4.1) gir beregning av kvadratisk middelveide for rifler og bølger.

$$r = \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{x} \int_0^x [r(x)]^2 dx} = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

- r – Amplitude, kvadratisk middelvei [m]
 $r(x)$ – Høyde på bølgen som funksjon av måledistansen [m]
 x – Måledistanse i lengderetning med skinnen [m]
 a – Toppamplituden, halvparten av topp-til-bunn-verdien [m]

$$L_r = 20 \log \left(\frac{r}{r_{ref}} \right) \quad (4.2)$$

- L_r – Korrugert nivå [dB]
 r – Amplitude, kvadratisk middelvei [m]
 r_{ref} – Referanseamplitude, 1 μm [m]

Formel (4.3) og formel (4.4) gir kvadratisk middelvei og gjennomsnittlig korrugert nivå for en strekning.

$$\bar{r}^2 = r_{ref}^2 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{r,i}/10} \right) \quad (4.3)$$

$$L_{r,gj.snitt} = 20 \log \left(\frac{\bar{r}}{r_{ref}} \right) \quad (4.4)$$

- \bar{r} – Gjennomsnittlig amplitude over en strekning [m]
 r_{ref} – Referanseamplitude, 1 μm [m]
 $L_{r,i}$ – Korrugert nivå ved bølgelengde i [dB]
 $L_{r,gj.snitt}$ – Gjennomsnittlig korrugert nivå over en strekning [dB]
 N – Antall målinger på en strekning

4.2.2 Måling av rifler og bølger

Måling av rifler og bølger gjøres etter ulike måleprinsipper. I utgangspunktet defineres to prinsipielt forskjellige metoder, direkte og indirekte målemetoder (Thompson et al., 2009). De direkte målemetodene måler faktiske størrelser og er mest nøyaktige. De indirekte måler konsekvenser og har høyest målehastighet. Det presenteres to direkte målemetoder, henholdsvis måling med referansebjelke og måling med akselerometer. Videre presenteres akustisk måling av rullestøy under rullende materiell og måling av vertikal distanse mellom vogn og hjulaksel, som to indirekte målemetoder



Figur 4.2 - Müller-BBM 1200e i bruk (Lutzenberger, 2015)

Ved måling med referansebjelke legges en rett kalibrert bjelke over skinnen. Referansebjelken er normalt 1,2 meter lang, og måler den relative, vertikale forskjellen mellom bjelken og skinnen. Bjeklens lengde gjør at metoden begrenser seg til bølgelengder opptil 1200 mm. I praksis innebærer dette at kun bølgelengder på omlag 100 mm bør måles for å oppnå 1/3-oktavbånds oppløsning (Thompson et al., 2009). Eksempler på utstyr er ØDS TRM02 og Müller-BBM 1200e.

Den andre direkte målemetoden er med bruk av akselerometer. Da kjøres en måletralle med påmontert akselerometer over skinnen. Rifler og bølger måles som en akselerasjonen i vertikal retning over skinnehodet. Måletrallen brukes i gangfart, enten med en egen elmotor eller dyttet av en operatør. Fordelen med dette er at relativt store distanser kan måles på kort tid, sammenlignet med referansebjelken. En annen fordel er at denne målemetoden ikke har noen begrensninger i hvilke bølgelengder som kan måles. *Corrutation analysis trolley* (CAT) er et eksempel på dette systemet. CAT har en vertikal usikkerhet på $1\mu\text{m}$, for målinger hver andre millimeter i kjøretretning. Sammenligninger mellom CAT og bruk av referansebjelke viser at de har et avvik på $2,5\mu\text{m}$ for bølgelengder på 10-30 mm, $1\mu\text{m}$ for bølgelengder på 30-100 mm og $4\mu\text{m}$ for bølgelengder på 100-300 mm (Grassie et al., 1999). Begge målemetodene gir dermed et tilnærmet likt resultat.

Selv om det er flere fordeler med direkte målemetoder, er det imidlertid også noen ulemper. De direkte målemetodene er tidkrevende, på grunn av relativt lav målehastighet sammenlignet med vanlige togsett. Dette krever et stort beslag av sporet, slik at kapasiteten på banene under måling er redusert. En annen ulempe er den rene tiden det tar å måle alle banene.



Figur 4.3 - CAT i bruk (RailMeasurements Ltd, 2015)

Akustiske målinger er et eksempel på en indirekte målemetode. Støynivået under togsettet avslører rifler og bølger av skinnhodet på grunn av dominansen til rullestøyen ved spesifikke hastigheter. Passeringsfrekvensen over korrugeringen knyttes én-til-én med frekvensen til rullestøyen i 1/3-oktavnband, slik at korrugert nivå og lydtryknivå kan vises i samme plott (Kuijpers et al., 2012). Denne metoden avdekker støynivået, og måler dermed en av konsekvensene til rifler og bølger. Målingene kan benyttes til støyberegninger, støyreducerende tiltak og i prosjektering. Videre kan akustiske målinger utføres av tog i vanlig drift, eller målevogner i skiltet hastighet, slik at akustiske målinger legger et mindre beslag på sporet enn direkte metoder. Eksempler på indirekte akustiske målemetoder er den tyske SMW-målevogner og det nederlandske ARRoW-systemet.



Figur 4.4 - ARRoW i bruk (Kuijpers, 2015)

Jernbaneverket bruker i dag to målemetoder for å finne rifler og bølger, den tidligere nevnte CAT og målevognen Roger 1000. Sistnevnte måler sporgeometri, skinnprofil, rifler og bølger, samt kraft, høyde og sikk-sakk på kontaktledningen. Roger 1000 fungerer i opptil 200 km/t innsatt i et togsett, og har selv en maksimal hastighet på 160 km/t. Måling med Roger 1000 er det andre eksempelet indirekte måling.

Roger 1000³ måler rifler og bølger med en laser og en reflektor på en akselboks, som registrerer varierende vertikal høyde for hver 5 mm i kjøreretningen. Laseren og reflektoren er montert på hver side av vognen slik at begge skinner kan måles samtidig. For at færrest mulig vibrasjoner skal forurene målingene, brukes hjul uten bremses. Ved å benytte en overføringsfunksjon kan det tas høyde for svingninger og demping i fjæringen, slik at resultatet kun fremstår som den relative vertikale distansen mellom vognkasse og aksling. Dette knyttes opp mot et absolutt referansesystem for å finne eksakte verdier på rifler og bølger. Dynamikken til fjæringen varierer med hastigheten, slik at en akseptabel nøyaktighet på målingen oppnås kun for hastigheter over 40 km/t (MerMec, 2000).

I tillegg til hastighet avhenger nøyaktigheten av hvilke bølgelengder som måles. I hastigheter mellom 50 og 150 km/t er nøyaktigheten god for alle bølgelengder (MerMec, 2000). I følge Frode Teigen fra Jernbaneverket greier ikke målevogna å levere data med god nok nøyaktighet for korte bølgelengder, slik at CAT må benyttes for å måle rifler.

Tabell 4.1 - Standardavviket til målenøyaktigheten for Roger 1000, gitt av Turgut Senuysal fra Jernbaneverket

Bølgelengder [mm]	Standardavvik, kvadratisk middelvei [mm]
10-80	±0,1
80-300	±0,1
300-3000	±0,5

I følge Turgut Senuysal i Jernbaneverket blir data om rifler og bølger behandlet med FFT, båndpassfilter og invers FFT på tilsvarende måte som lydbølger. Etter behandling leveres data i en Excel-fil der kvadratisk middelvei for rifler og bølger er gitt for enhetslengder på ca. 0,5 m. Målingene er inndelt i bølgeintervaller på 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm, og kan kobles opp mot GPS-koordinater, tidspunkt, kilometrering og hastighet. GPS-koordinatene leveres med én meters nøyaktighet. Målevogna fotograferer også sporet fortløpende. Hjulene på målevognen kontrolleres én gang i året. Geir Harald Ingvaldsen fra Jernbaneverket forteller at prisen på å bruke Roger 1000, med alle målesystemer i gang, ligger på omtrent 60 000 kr per dag, og inkluderer en usikkerhet til nedskrivning, drift og lønninger. Målevogn tilsvarende Roger 1000 brukes også i Sveits (Nielsen, 2013).

³ I vedlegg 3 er datainnsamlingen og databehandlingen til Roger 1000 vist.



Figur 4.5 - Målevognen Roger 1000 på Kongsvingerbanen. Foto: Leiv Jørgen Husøy

4.2.3 Rifler og bølger i Norge

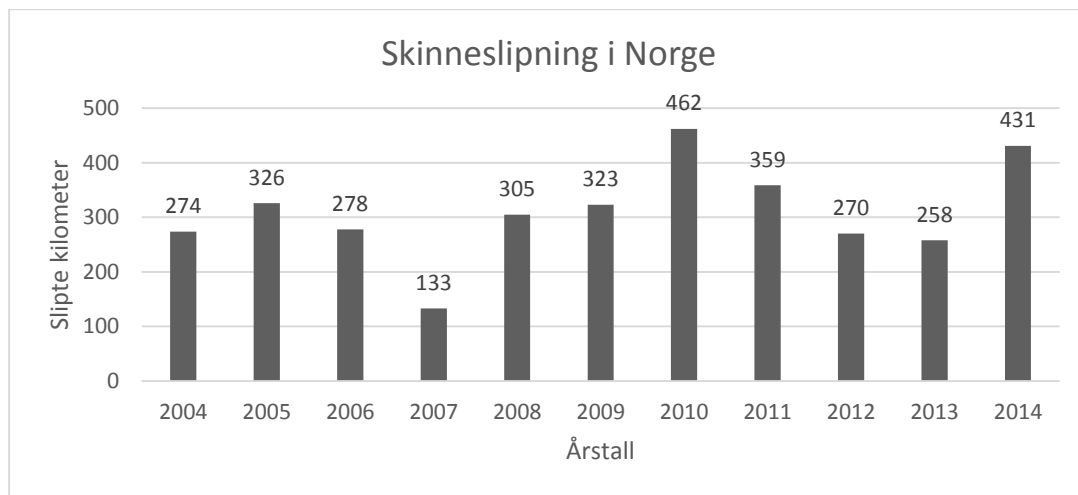
I Norge er typiske verdier for bølgehøyden til rifler mellom 0,02 og 0,04 mm, og opptrer på baner med horisontalkurveradius større enn 1000 m. Dette tilsvarer et korrugert nivå mellom 17 og 23 dB. Korte bølger har verdier mellom 0,1 til 1,2 mm, og er mest vanlig på innerstrengen i kurver med radius mindre enn 600 m. Tilsvarende 31 til 52,5 dB. Lange bølger opptrer overalt, men spesielt på eldre skinner, og har verdier mellom 0,5 og 5 mm med mer. Tilsvarende 45 til 65 dB (Vasset, 2014).

4.2.4 Behandling

For å redusere rifler og bølger kan man enten forhindre dannelsen eller slipe dem vekk. Det er vist at rifler og bølger avhenger av materialegenskaper til skinnen og hjulet, dynamikk i sporet og vognene, friksjon, hastighet, last, og trekkrefter på drivhjulet (Oostermeijer, 2008). Mye tyder på at selve mekanismen som danner rifler er at drivhjulet slipper litt når det trekker, og gir økt friksjon proporsjonal med slitasjen på rette strekninger (Nielsen, 2003). For kurver er det mer komplekst, og flere studier viser at dynamikken til boggien og kontaktflaten er avgjørende faktorer. Smøring av skinnehodet vil redusere friksjon og bruk av dempningsmateriale i sporet vil dempe de dynamiske svingningene i sporet. Det er også funnet at variasjon av hastighet og last vil redusere rifler og bølger da én type svingninger ikke blir overrepresentert (Iceland, 1996) og (Torstensson, 2012).

Alternativet til å hindre dannelsen er å fjerne rifler og bølger med skinneslipning. Rifler og bølger slipes vekk slik at skinnehodet blir tilnærmet glatt. Dette utføres med en egen slipevogn med slipesteinene montert like over skinnehodet. Når vognen kjører roteres steinene slik at skinnehodet slipes ned (Thompson et al.,

2009). I Norge slipes mellom 3% og 12 % av banenettet hvert år. Det vil si mellom 120 og 490 km av totalt 4 087 km (Vasset, 2014). Se figur Figur 4.6.



Figur 4.6 - Oversikt over utført skinneslipning i Norge (Vasset, 2014) (Jernbaneverket, 2014a)

Etter skinneslipning kontrolleres skinnene i henhold til krav fra NS-EN 13231-3:2012. Skinnene deles inn i klasse 1 og 2, der klasse 2 har de minst vedlikeholdskostnad. Dersom kravet ikke er nådd, må skinnene slipes en gang til. Det tillates at noen prosenter av målesterkningens lengde går utenfor kravene, avhengig av bølgelengde og klasse. Skinnekryss og sporveksler skal undras fra beregningene (Standard Norge, 2012). Kostnaden på skinneslipning ligger på 100 kr/m i 2014, ifølge Terje Vasset fra Jernbaneverket.

Tabell 4.2 - Krav til rifler og bølger fra NS-EN 13232-3:2012, omgjort til korrugert nivå

Bølgelengder [mm]	10-30	30-100	100-300	300-1000
Krav til topp-til-bunn verdi [mm]	±0,010	±0,010	±0,015	±0,075
Korrugert nivå [dB] re 1 µm	10,96	10,96	14,49	28,47

Tabell 4.3– Tillatte maksimale avvik fra NS-EN 13231-3:2012.

Bølgelengder [mm]	10-30	30-100	100-300	300-1000
Klasse 1	5%	5%	5%	5%
Klasse 2	Ingen krav	10%	10%	Ingen krav

4.2.5 Krav til rifler og bølger

Kravene til rifler og bølger i Norge er primært begrunnet med de nedbrytende konsekvensene vibrasjoner fra rifler og bølger har på spor, rullende materiell og kjørekomfort. Når kravene for rifler og bølger er nådd skal skinnen slipes, se Tabell 4.4 (Jernbaneverket, 2014b). I tettbygde strøk og støyutsatte områder hvor lydtryknivå utendørs er større enn 65 dBA, bør det utføres skinneslipning dersom bølgedybden for korte bølger overstiger 0,05 mm topp-til-bunn. Med en antatt sinusform tilsvarer dette et korrugert nivå på 24,9 dB (Husøy, 2014). Ifølge Trygve Aasen fra Jernbaneverket gjøres det i dag ingen vurdering av hvor det er mest hensiktsmessig å utføre skinneslipning for å redusere støy.

Tabell 4.4 - Inngrepskriterier for skinneslipning, for bølgelengder mellom 0-300 mm (Jernbaneverket, 2014b) og (Husøy, 2014)

Sth [km/t]	Trafikkbelastning [Mbrt/år]	Bølgedybde – korte bølger		Korrugert nivå
		RMS-verdi	Topp-til-bunn- verdier	
$130 \leq V \leq 160$	≥ 4	0,02 mm	0,06 mm	26,0 dB
	< 4	0,03 mm	0,08 mm	29,5 dB
$130 < V$	≥ 2	0,03 mm	0,08 mm	29,5 dB
	< 2	0,05 mm	0,15 mm	34,0 dB

I tillegg til Jernbaneverkets krav definerer ISO 3095:2013 (Standard Norge, 2013) krav til skinnens overflate for støymålinger, og benyttes sammen med ISO NS-EN:15610 (Standard Norge, 2009) for vurderinger og sammenligninger av jernbanestøy. Disse kravene kommer av at man ikke ønsker for store forskjeller mellom rifler og bølger på de ulike skinnene som sammenlignes. Presentert her i Figur 4.7

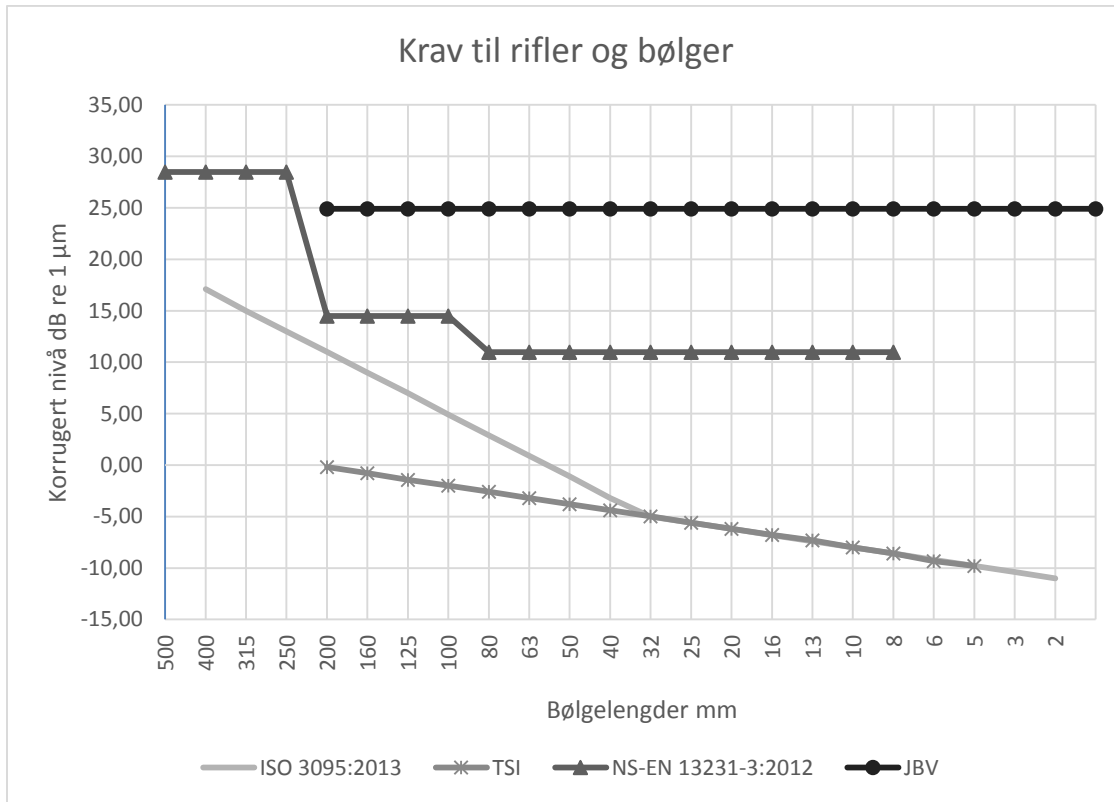
NOEMIE (*Noise Emission Measurements for High Speed Interoperability in Europe*) var et EU-finansiert prosjekt der støy og korrugering ble målt på flere høyhastighetsbaner i Europa. Formålet var å skape en database over støyverdier fra høyhastighetsbaner og definere en referanse for når, hvor og under hvilke forhold støymålinger kan utføres. En felles europeisk målestandard for jernbanestøy ble etablert, med validerte sporparametere og støygrenser. Prosjektet har resultert i et krav til korrugert nivå, som gjør det lett å sammenligne støyverdier mellom forskjellige togtyper på ulike strekninger (Fodiman and Staiger, 2006). Her presentert i Figur 4.7 og formel (4.5).

$$L_{r,krav} \leq \left[4 - 6 \log \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right) \right] \text{ for } \lambda = [0,005 \text{ m}, 0,2 \text{ m}] \quad (4.5)$$

$L_{r,krav}$ – Høyeste korrugerte nivå [dB] re 1 μm

λ_0 – Referansebølgelengde, 1000 mm

λ – Bølgelengder mellom 5 mm og 200 mm [mm]



Figur 4.7 – Ulike krav til rifler og bølger på norske skinner, gitt som korrugert nivå. TSI og ISO 3095:2013 gir absolutte krav til rifler og bølger for støymålinger. NS-EN 13231-3:2012 gir krav til rifler og bølger etter skinnslipning, kravet kan avvikes noe. JBV gir Jernbaneverkets bør-krav for skinnslipning med hensyn på støy. Jernbaneverkets øvrige krav for skinnslipning er større enn 26 dB, for bølgelengder mindre enn 300 mm.

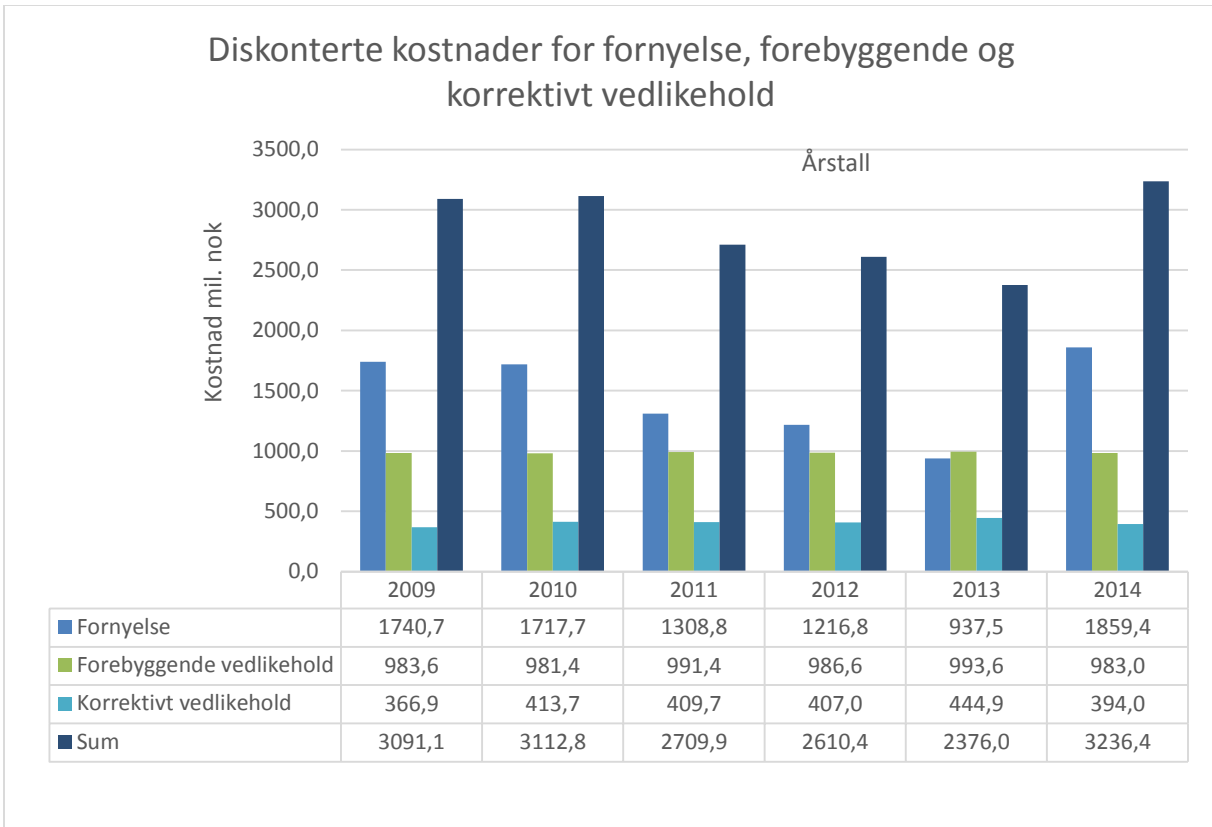
4.2.6 Vedlikeholdsstrategi

Hvert år utfører Jernbaneverket omfattende vedlikehold for å redusere rifler og bølger. De definerer sin strategi for skinnene som styrt, preventivt vedlikehold. Med dette menes inspeksjon ved faste tidsintervaller og korrektivt vedlikehold dersom målinger overgår inngrepskriteriene (Pika, 2015), gitt i Figur 4.7. Jernbaneverket ønsker å gå over til en forebyggende vedlikeholdsstrategi, hvor feil og skader detekteres tidligere enn i dag. Et landsomfattende prosjekt innad i Jernbaneverket kalt *Prosjekt Smart vedlikehold* er igangsatt, og har som formål å overvåke større deler av banen og rullende materiell (Holtet, 2014).

Generelt sett finnes det tre hovedkategorier for vedlikehold: vedlikehold under drift, korrektiv og forebyggende vedlikehold. Vedlikehold under drift er primært inspeksjoner av systemer, utført av personer uten spesielle tekniske ferdigheter. Formålet er å lete etter endringer i ytelse og form. Slik at mindre vedlikeholdstiltak, som ikke setter systemet ut av drift, kan utføres.

Korrektivt vedlikehold utføres på system med så store feil at det er satt ute av drift. Formålet er å gjenopprette tilstanden til systemet slik at det kan utføre sine oppgaver. Korrektivt vedlikehold deles inn i umiddelbare og utsatte tiltak. Førstnevnte gjøres like etter at en skade har oppstått, mens sistnevnte er tiltak som kan utsettes på grunn av en vedlikeholdsprosedyre. Prediktivt vedlikehold er planlagt korrektivt vedlikehold på grunn av prediksjoner om systemets tilstand.

Forebyggende eller preventivt vedlikehold utføres for å unngå problemer eller større skader før de oppstår. Forebyggende vedlikehold er planlagt eller tilstandsovervåket, noe som betyr at vedlikehold planlegges over faste tidsintervaller eller at indikatorer viser at feil og skader snart vil skje. Tilstandsovervåket vedlikehold skiller seg fra prediktivt vedlikehold ved at tiltak for førstnevnte kun gjøres når indikatorer varsler at systemet kommer til å bryte sammen (Standard Norge, 2010a).



Figur 4.8 - Diskonterte vedlikeholdskostnader for Jernbaneverket. Diskontert med en diskonteringsrente på 4,5 %. Gitt av John M. Modin og (Jernbaneverket, 2014a).

I følge Martin Sund fra Jernbaneverket har Jernbaneverket et ønske om å få systemer og anlegg med økt forutsigbarhet slik at bedre fornyelsesplaner kan lages. Jernbaneverket skiller mellom fornyelse av anlegg, korrektivt og forebyggende vedlikehold. Med fornyelse menes innkjøp, installasjon og bygging av anlegg, men ikke oppgradering. Behovet for fornyelse beregnes fra anleggenes levetid. Fornyelsesbehov som ikke innhentes går over til fornyelsessetterslep, også kalt vedlikeholdsetterslep. Det kan gå flere år mellom anleggenes levetid løper ut og fornyelsen, der forskjellen representeres av vedlikeholdsetterslepet. I inngangen av 2015 er dette på omlag 17-18 milliarder kroner, ifølge John M. Modin fra Jernbaneverket. Det forventes en reduksjon på 100 til 200 millioner kroner i løpet av 2015. Tallene presenteres med usikkerhet på $\pm 40\%$.

4.3 Rullestøy

Følgende kapittel gir en innføring i rullestøy og måling rettet mot rullestøy.

4.3.1 Definisjon

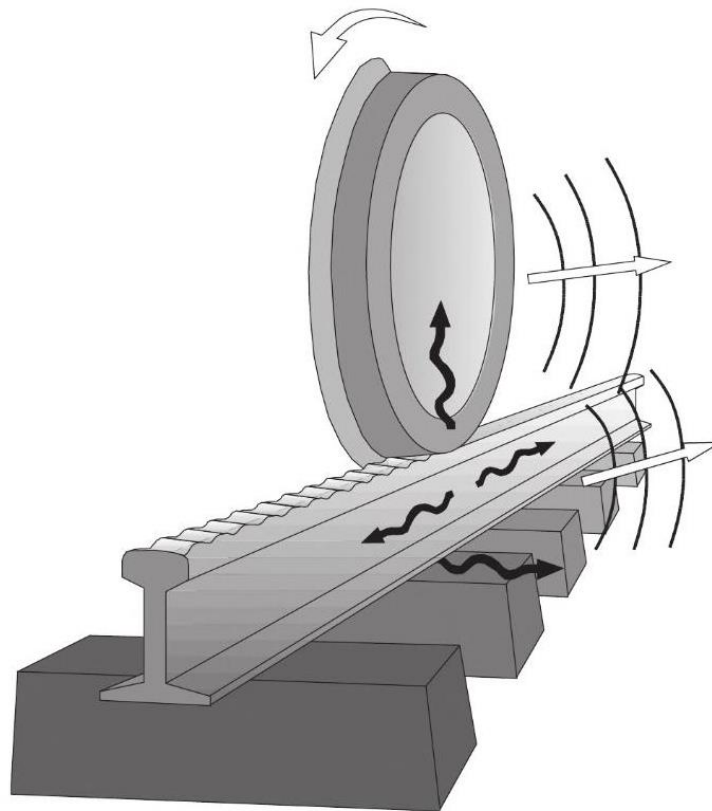
Rullestøy defineres som lyden produsert av kontakten mellom hjulet og jernbaneskinnen (Thompson et al., 2009). Hjulet og skinnen har aldri en helt glatt overflate, men den kan være tilnærmet glatt. Allikevel vil flere hjul og skinner være korrugerte, slik at rullende materiell får en gjentagende vertikal forskyvning. På skinnen kan forskyvningen sees på som en enkel bølge på skinnehodet, som følger forholdet:

$$v = \lambda f \quad (4.6)$$

v – Togets hastighet [m/s]

λ – Bølgelengden til korrugeringen [m]

f – Passeringsfrekvens [Hz]



Figur 4.9 - Prinsippet bak rullestøy. Hjulet kjører over bølgetoppene på skinnehodet, slik at vibrasjoner forplanter seg i hjulet, skinnen og svillene (Thompson et al., 2009)

Den vertikale forskyvningen og togets hastighet gir vibrasjoner som forplanter seg i både materiell og spor, noe av dette stråles ut som lyd. Passeringsfrekvensen til toget og frekvensen til den utstrålte lyden knyttes sammen én-til-én, slik at økt passeringsfrekvens gjør lyden mer høyfrekvent. På grunn av dette forholdet, kan en vurdere hvilke bølgelengder som høres best. Med en maksimal skiltet hastighet på 200 - 250 km/t er bølgelengdene mellom 5 og 500 mm tydeligst. Større bølgelengder gir lave frekvenser, som er avgjørende for vibrasjoner i grunnen og nedbryting av sporet. Disse er imidlertid ikke spesielt viktige for støyproduksjon. Kortere bølgelengder vil dempes av kontaktfiltereffekten (Thompson et al., 2009).

4.3.2 Kontaktfiltereffekten

Kontakten mellom hjul og skinne skjer over en oval flate med lengde og bredde på 10-15 mm. Der bølgelengdene til rifler og bølger er korte sammenlignet med kontaktflaten, oppleves demping av vibrasjonene. Høyfrekvente vibrasjoner kommer av korte bølgelengder og dempes derfor. Dette er kjent som kontaktfiltereffekten, og gir en nedre grense for korte bølgelengder (Iwnicki, 2006).

4.3.3 Nominell hastighet

Støynivået øker med hastigheten. Økt hastighet øker passeringsfrekvensen over korrugeringen. Dette forplanter seg som vibrasjoner i hjulet, skinnen og svillen som vibrerer med økt vibrasjonshastighet. Etter formlene i avsnitt 3.3.8 *Vibrasjoner og lyd* vil dermed lydtryknivået øke.

For å kunne sammenligne data fra forskjellige lydmålinger, normaliseres lydtrykket til en nominell hastighet. En enkel lineær regresjon mellom hastighet og målt passeringstøy gir et uttrykk for støyøkningen etter hastigheten, 7,5 m fra sporet (gitt i formel (4.7)). Utrykket gir at A-veid støynivå er proporsjonal med logaritmen til hastigheten. Siden rullestøy er dominerende i støybildet, gir dette uttrykket også et estimat for økningen av rullestøyen med hastigheten (Thompson et al., 2009). Frekvensen normaliseres til nominell hastighet med et frekvensskifte etter formel (4.6).

$$L_{p,normalisert} = L_{p,m\ddot{a}lt} - N \log \left(\frac{V}{V_{ref}} \right) \quad (4.7)$$

$L_{p,normalisert}$ – A-veid støynivå ved nominell hastighet [dBA]

$L_{p,m\ddot{a}lt}$ – Målt A-veid støynivå [dBA]

V_{ref} – Nominell hastighet [km/t]

V – Hastighet til tog [km/t]

N – Hastighetseksponent, mellom 25 og 35

4.3.4 Bakenforliggende mekanisme

Vibrasjonene som skaper rullestøy avhenger av flere faktorer. Disse modelleres i et dempet fjærsystem med tvungne svingninger. Systemet settes opp med en fjæring mellom skinne og sville, og en kontaktfjæring mellom hjulet og skinnen. Skinnen og hjulet deler kontaktpunkt, og forskyves på grunn av total korrugering. Vibrasjoner gitt som vertikal respons, uttrykkes av vertikale hastighetsamplituder, til hjul og skinne (Thompson et al., 2009). Figur 4.10 viser oppsettet av fjærmodellen.

$$v_r = \frac{i\omega r Y_r}{Y_r + Y_w + Y_c} \quad (4.8)$$

$$v_w = \frac{-i\omega r Y_w}{Y_r + Y_w + Y_c} \quad (4.9)$$

$$v_c = Y_c F = \frac{i\omega F}{K_H} \quad (4.10)$$

v_r – Skinnens respons. Kompleks vertikal hastighetsamplitude til skinnen [m/s] (positiv nedover)

v_w – Hjulets respons. Kompleks vertikal hastighetsamplitude til hjulet [m/s] (positiv nedover)

v_c – Kontaktfjærens relative hastighetsrespons [m/s] (positiv for trykk)

Y_w – Vertikal mobilitet til hjulet. Avhenger av hjulets masse og stivhet [m/sN]

Y_r – Vertikal mobilitet til skinnen. Avhenger av vinkelfrekvens, sporets stivhet, demping og masse [m/sN]

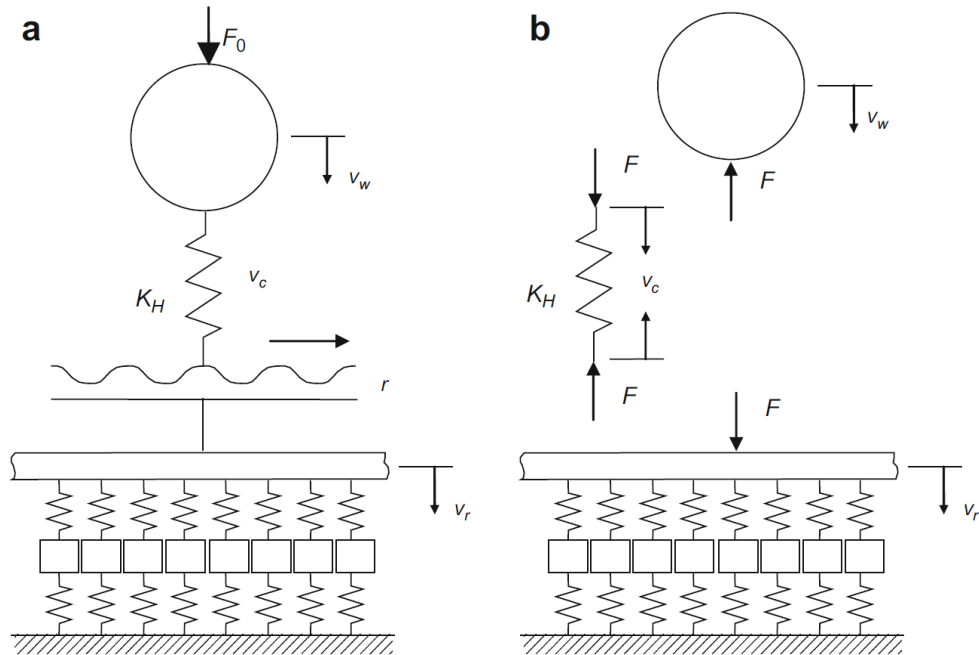
Y_c – Vertikal mobilitet til kontaktfjæringen. Avhenger av vinkelfrekvensen og kontaktstivheten mellom hjulet og skinnen [m/sN]

F – Kraftamplituden til den harmoniske tvungne svingningen fra lasten [N]

K_H – Kontaktstivheten mellom hjulet og skinnen. Skyldes lokal elastisk deformasjon i kontaktsonen og avhenger av kontaktflatens størrelse, Youngs modul, vertikal last og radius til skinne og hjul både longitudinalt og lateralt på kjøreretningen [N/m]

$i\omega$ – Kompleks vinkelfrekvens, avgjøres av passeringsfrekvensen, $\omega = 2\pi f$ [rad/s]

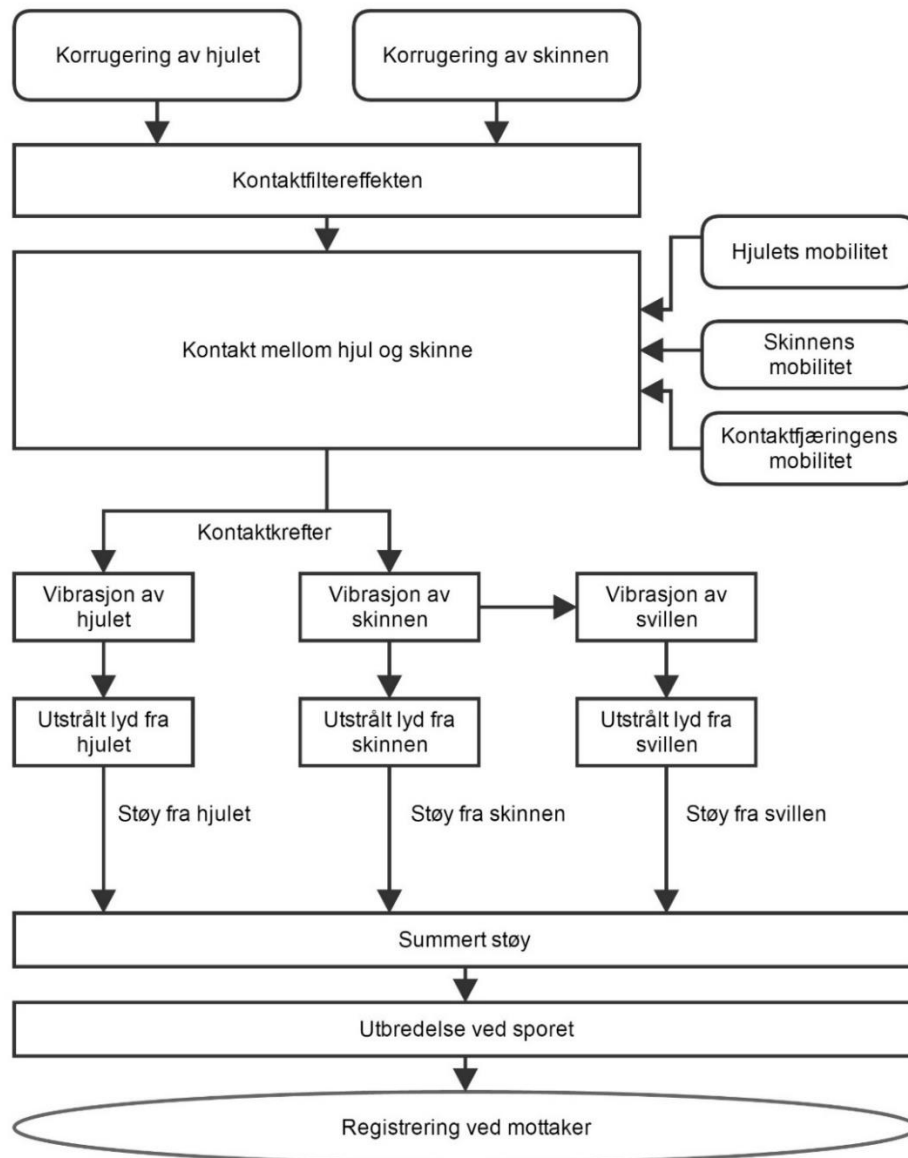
r – Bølgens amplitude, kvadratisk middelverdi [m]



Figur 4.10 - Skisse av fjærmodellen til modellering av rullestøy (Thompson et al., 2009)

4.3.5 Modellering av rullestøy

Rullestøy kan modelleres i TWINS. Dette er et mye brukt program som benytter data om rifler og bølger sammen med data om hjulet, materiell og sporet for å beregne vibrasjon av hjul, spor og sville. Dempningen på grunn av kontaktfiltereffekten beregnes av programmet. Resultatet gis i lydtryknivå over 1/3-oktavnband. TWINS kan komme fram til modelleringer av støynivået med et standardavvik på 1,5-2 dB (Thompson et al., 2009). Figur 4.10 viser hvordan TWINS beregner rullestøy, figuren gir en oversikt over hvordan rullestøy produseres.



Figur 4.11 – Skjematisk oppsett for produksjonen av rullestøy (Thompson et al., 2009)

Alternativt til TWINS kan en enklere regresjonsmodell benyttes. En svensk studie har funnet to uttrykk for rullestøy på grunn av rifler og bølger. Støy blir gitt som TEL^4 (Nielsen and Ekberg, 2011). Videre viser studien at det er bølgelengdene mellom 30 og 80 mm som er viktigst for produksjonen av rullestøy, selv for små bølgehøyder.

⁴ TEL er definert i vedlegg 7

$$L_{p,passasjer}^{7,5m} = 94,4 + 28,6 \log\left(\frac{V}{200}\right) + 0,9L_{r,30-80mm} \quad (4.11)$$

$$L_{p,gods}^{7,5m} = 95,7 + 34,9 \log\left(\frac{V}{100}\right) + 0,3L_{r,30-80mm} \quad (4.12)$$

$L_{r,30-80mm}$ - Korrugert nivå for rifler med bølgelengder mellom 30 og 80 mm [dB]

$L_{p,X2}^{7,5m}$ – A-veid støy for X2 passasjertog, 7,5 m fra sporet [dBA]

$L_{p,freight}^{7,5m}$ – A-veid støy for godstog, 7,5 m fra sporet [dBA]

V – Hastighet til toget [km/t]

4.3.6 Reduksjon av rullestøy

Kontroll på korrugeringen av både skinne og hjul er avgjørende for å redusere rullestøy. Korrugeringen på hjulene reduseres ved å bytte ut eller slippe hjulene. Enten etter behov eller etter levetid. Rifler og bølger fjernes med akustisk skinneslipning. Alternativt kan kontaktfiltreffekten brukes til å dempe høyfrekvente lyder. Dette gjøres ved å optimalisere skinnens og hjulets profil. Materialvalg og profil på komponentene kan også dempe ha en dempende effekt, på grunn av økt vekt. Vibrasjoner på skinner og sviller dempes av ballasten, skinnematten og befestigelsen. Videre kan lyd og vibrasjoner skjermes for i sporet, på toget og ved banen (Thompson et al., 2009).

Det er den totale korrugering som påvirker rullestøyen, altså den kvadratisk summerte korrugeringen av hjulet og skinnen. For hjul med stor korrugering vil derfor skinnens overflate ha mindre å si for rullestøyen enn for hjul med liten korrugering. Dette gjør at tiltak som rettes mot skinnen får liten effekt dersom hjulene er skadet og grove (Thompson et al., 2009).

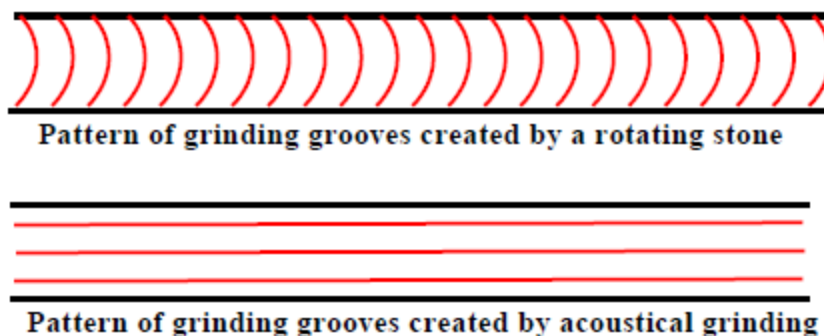
Valg av bremsesystem påvirker graden av korrugering på hjulet. Normale bremsklosser i støpejern sliter ned deler av hjulet slik at overflaten blir grov. Slitasjen gir hjulslag og øker korrugering av hjulet. Alternativt kan skivebrems eller bremsklosser benyttes, disse utsetter hjulet for mindre slitasje slik at støynivået reduseres. Bremsklosser i støpejern er billige og mest vanlig på godstog i Europa. Komposittklosser eller skivebrems er vanlig på passasjertog (Thompson et al., 2009). Dermed vil rifler og bølger ha mer å si for rullestøy fra passasjertog enn godstog. Flere land ser på valg av bremsesystem som et effektivt støyreducerende tiltak, dette er omtalt delkapittel 4.5 *Rullestøy i Europa*.

Det EU-finansierte prosjektet RIVAS kom i 2013 fram til at slitasjen på hjulet må utbedres når dybden er større enn 0,5 mm. Dette for å holde grunnvibrasjonen fra en togpassering på et lavt og akseptabelt nivå. Slitasjen fjernes ved at hele hjulet slipes ned ca. én millimeter (Gratacos et al., 2013).



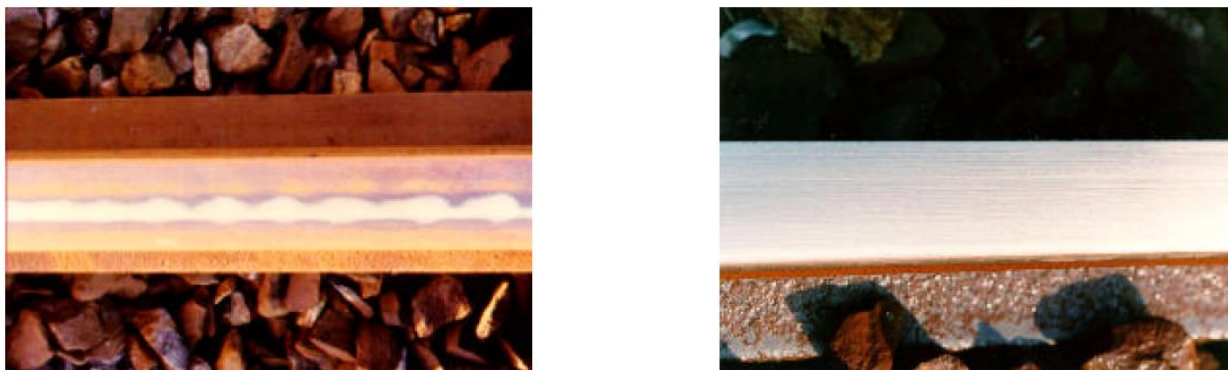
Figur 4.12 - Eksempel på hjulslitasje på et kanadisk hjul. Denne type skade vil forårsake hjulslag (The Transportation Safety Board of Canada, 2013)

Akustisk skinneslipning tar utgangspunkt i krav til støy, og utføres dersom støynivået ved sporet er for høyt. Akustisk skinneslipning benytter statiske eller oscillerende slipesteiner, mens vanlig skinneslipning bruker roterende steiner. Dette gjør at akustisk skinneslipning etterlater et mønster i skinnehodet som er parallelt med kjøreretningen, mens vanlig skinneslipning etterlater et spor lateralt på kjøreretningen, se Figur 4.13. Med tiden vil det longitudinelle mønsteret slipes ned av passerende tog, slik at effekten av akustisk skinneslipning er størst en stund etter utførelsen. Effekten av akustisk skinneslipning varierer, men flere studier er enige om at støyreduksjon ved sporet er omlag 3 dB, avhengig av plassering ved sporet (Jernbaneverket, 2004), (Mortensen et al., 2001) og (Asmussen et al., 2006). Et lateralt mønster fra vanlig skinneslipning gir en liten korrugering av skinnen, slik at støyreducerende effekt for vanlig skinneslipning ikke blir så stor som for akustisk skinneslipning (Danneskiold-Samsøe, 2004).



Figur 4.13 - Mønster etter vanlig og akustisk skinneslipning (Danneskiold-Samsøe, 2004).

Minste akseptable verdi for rifler og bølger av hensyn til støy kan defineres av hjulets overflate. En norsk studie av Kilde Akustikk AS konkluderer med at rullestøyen vil domineres av hjulets overflate dersom korrugert nivå på skinnen holdes 5 dB under kravet i ISO 3095:2013 (Hommedal and Ringheim, 2010). En annen studie fra Nederland kommer fram til en lignende konklusjon. Med utgangspunktet i differansen mellom korrugeringen av hjulet og skinnen konkluderer studien med at akustisk skinneslipning bør utføres dersom korrugeringen til skinnen er 5 dB verre enn hjulet (Dings et al., 2000).



Figur 4.14 – Skinnehodet før akustisk skinneslipning (venstre), og etter akustisk skinneslipning (høyre) (Asmussen et al., 2006).

Akustisk skinneslipning utføres jevnlig i enkelte europeiske land, hvorav Tyskland, Nederland og Danmark har utviklet en egen strategi for dette. Siden 1998 har Deutsche Bahn (DB) i Tyskland utført akustisk skinneslipning, der støynivået under en spesiell målevogn måles. Akustisk skinneslipning utføres så raskt som mulig dersom støynivået har økt med 3 dB, fra en forutbestemt verdi, for strekningen som måles. Hvis økningen er målt til 2 dB, utføres skinneslipningen innen ti måneder. På denne måten settes relative akustiske krav til rifler og bølger. 3 dB reduksjon etter skinneslipning er inkludert i den tyske beregningsmodellen for støy, selv om reduksjonen ikke kan måles. I Nederland må en gjennomsnittlig støyreduksjon på 2 dB måles med ARRoW, for å inkluderes i støyberegninger. Hvis ikke 2 dB reduksjon kan bevises, må skinnen slipes enda en gang eller andre støyreduserende tiltak må utføres (Scossa-Romano and Oertli, 2012). SMW og ARRoW er omtalt i kapittel 4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*.

Hastigheten på slipetoget er i utgangspunktet lav, så DB har utført *High Speed Grinding* (HSG) siden 2007. HSG er både vanlig og akustisk skinneslipning i høy hastighet, på omlag 80 km/t. Dette gjør HSG kan inngå som en del av blandet togtrafikk, i normal driftshastighet. Slipningen gjøres med er fritt rullende slipesteiner i en vinkel med kjøreretningen (Vossloh Rail Services, 2015).

I Danmark benyttes akustisk skinnesliping på hovednettet, og metrosystemet til København. Strategien inkluderer en klassifisering av rifler og bølger, oppdelt etter amplituden til korrugeringen. Klassifiseringen deles inn i feilklasser, hvor korrugeringen måles med utstyr tilsvarende Roger 1000. Ved å sette krav til hvor stor andel av jernbanen som må slipes, oppnås en total støyreduksjon. For hastigheter under 100 km/t kan kun 20% av skinnen være over feilklasser 5, for hastigheter mellom 100 og 120 km/t kan kun 20% være større enn feilklasser 4 og for hastigheter mellom 120 og 200 km/t kan kun 10% være over feilklasser 3 (Mortensen et al., 2001).

Tabell 4.5 - Feilklasser for korrugering på danske skinner (Mortensen et al., 2001) og (Husøy, 2014).

Feilklasser	1	2	3	4	5	6	7	8
Bølgedybde, topp-til-bunn [mm]	<0,04	0,04-0,06	0,06-0,08	0,08-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20	0,20-0,25	>0,25
r, kvadratisk middelvei [mm]	<0,014	0,014-0,021	0,021-0,028	0,028-0,035	0,035-0,053	0,053-0,071	0,071-0,088	>0,088
L _r , Korrugert nivå [dB]	<22,9	22,9-26,4	26,4-28,9	28,9-30,9	30,9-34,5	34,5-37,0	37,0-38,9	>39,9

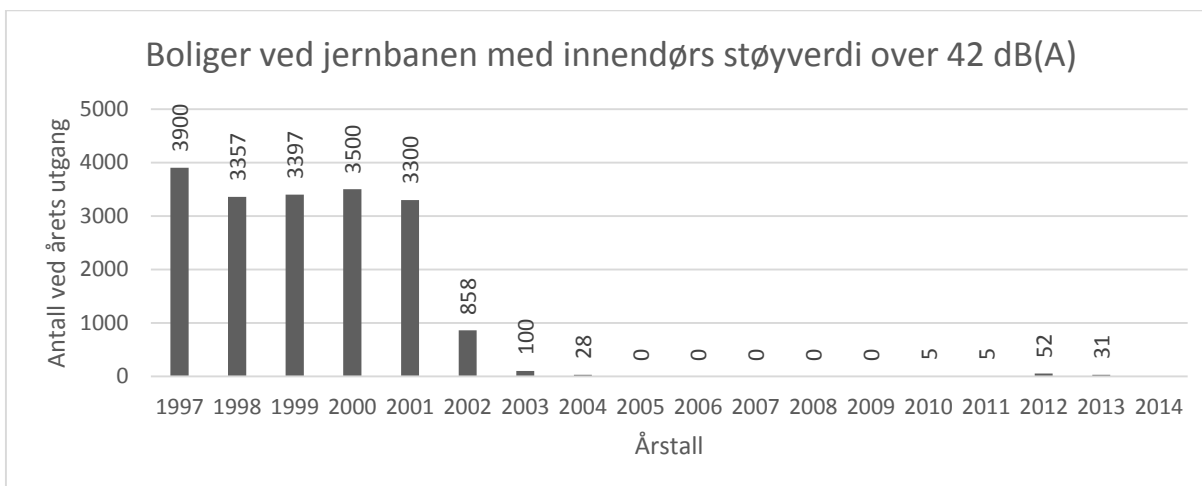
Det er utarbeidet en noe mindre, men tilsvarende klassifisering for norske skinner til korreksjoner for beregningsmodellen Nord96 (se kapittel 4.4.3 *Støyberegninger*). En rapport fra Jernbaneverket fra 2004 om støy og skinnesliping viser til en praktisk inndeling av rifler og bølger etter bølgehøyden. Denne baseres på at nøyaktigheten til Roger 1000 begrenser størrelsen på intervallene i en eventuell klassifisering (Jernbaneverket, 2004). Inndelingen er i tre kategorier etter målt topp-til-bunn-verdi: mindre enn 0,035 mm (<21,9 dB), mellom 0,035 og 0,15 mm (21,9-34,5 dB) og større enn 0,15 mm (>34,5 dB). Den midterste kategorien representerer normalt vedlikeholde skinner. Skinner med rifler og bølger i dette intervallet vil derfor ikke ha en støyreduksjon i beregninger. Den første kategorien gir en støyreduksjon på opptil 3 dB, mens den tredje kategorien innebærer en støyøkning på opptil 3 dB. I følge Trygve Aasen fra Jernbaneverket benyttes ikke dette aktivt. Allikevel aksepteres en 3 dB for Gardemobanen på grunn av hyppig vedlikehold.

I Storbritannia har Hardy og Jones laget et forslag til en akustisk skinneslipningsstrategi. Denne tar utgangspunkt i den gjennomsnittlige forskjellen mellom beregnet støynivå fra beregningsmodellen og støynivået under et togsett målt av NoiseMon (Hardy and Jones, 2004). Denne forskjellen brukes til å gi en korreksjon av støyberegninger, og som et krav for når akustisk skinneslipning skal igangsettes. NoiseMon omtales i kapittel 4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*.

4.4 Jernbanestøy i Norge

4.4.1 Generelt om jernbanestøy

Støy er et problem Jernbaneverket har fokusert på de seneste årene. Arbeidet har dreid seg om støyreducerende tiltak, endring av regelverk og standarder. Det er gjort studier om forstyrrelser på grunn av støy, utvikling av verktøy til støyberegninger, kartlegging av støyproblemer, og informasjon til publikum (Jernbaneverket, 2000-2014). Beslutninger Jernbaneverket tar er et resultat av en samfunnsøkonomisk vurdering, hvor lønnsomme tiltak prioriteres over ikke-lønnsomme tiltak. Ved beregning av miljøpåvirkning ses støy på som en kvantifiserbar størrelse, med prissetting etter prosentvis endring av støynivå (Wahlquist et al., 2015). Støyreduksjoner har derfor en økonomisk gevinst for samfunnet.



Figur 4.15 - Utviklingen av boliger med høyt innendørs støynivå mellom 1997 og 2014. Økt detaljeringsgrad i beregningene fra 2002 forklarer det store hoppet i antall boliger. (Jernbaneverket, 2000-2014). Trygve Aasen fra Jernbaneverket forteller at det er stor usikkerhet knyttet til disse støyberegningene.

Det er flere krav til støynivå i nærheten av jernbanen, slik at den er til minst mulig sjenanse for befolkningen. I 1999 kom et krav om at alle boliger ved banen skulle ha et lavere innendørs støynivå enn 42 dBA, innen 2005. Figur 4.15 viser at kravet har ført til en betydelig reduksjon i antall boliger berørt av innendørs støy over 42 dBA. I tillegg til kravet om innendørs støy ved banen er det også kommet to nasjonale støykrav, som gjelder for alle typer støy. Det første kravet er at den totale støyplagen for befolkningen skal reduseres med 10% mellom 1999 og 2020. Det andre er en 30 % reduksjon i antall mennesker som opplever innendørs støy større enn 38 dBA, i 2020 sammenlignet med 2005 (Jernbaneverket, 2011). I 2010 ble det registrert 850 boliger ved banen med innendørs støy over 38 dBA, innen 2020 må støynivået i 250 av dem være redusert.

Rullestøy i Norge har til en viss grad blitt redusert. I flere år har Jernbaneverket slipt skinner på Østlandet med det formål om å redusere rullestøy. Støyreduksjon har også kommet med utskifting av togsett og oppgradering av bremsesystem på passasjertog. På godstog har utskiftingen av gamle bremsklosser i støpejern latt vente på seg. Nyere tids utvikling har allikevel gjort at Jernbaneverket nå ser på muligheten for å oppgradere bremsere på eksisterende togsett (Jernbaneverket, 2014c). I det europeiske regelverket for baner og rullende materiell har bremsklosser i kompositt tidligere vært unntatt for bruk i Norge. Unntaket er fjernet fra 1. januar 2015, slik at godstog i Norge nå kan utrustes med bremsklosser i kompositt (European Railway Agency, 2014).

4.4.2 Prosjektering og vedlikehold

I følge André Negård fra Multiconsult kommer valg av komponenter til sporet av hensyn til støy og vibrasjoner ikke i første rekke ved prosjektering. Selv om akustikerne er tidlig inne i planfasen er det mange hensyn som må tas. Derfor blir ikke støy og vibrasjoner avgjørende for hvor en jernbanetrasé skal ligge. Arbeidet akustikerne gjør retter seg mest inn mot å skjerme for støy og vibrasjoner. Det er flere årsaker til dette, men økonomi og sikkerhet er de viktigste. Dersom økonomien tilsier det, vil det imidlertid i størst mulig grad prosjekteres med løsninger som reduserer støy og vibrasjoner.

Generelt kan støyreducerende tiltak deles inn på følgende måte: Tiltak ved arealplanlegging som skal unngå støyproblemer, tiltak på komponentene for å forhindre støy, og tiltak som skal minimere støy. Den første kategorien går i prinsippet ut på å legge sporet der det ikke forstyrrer andre. Tiltak i den andre kategorien er valg av tekniske løsninger som gir mindre støy, for eksempel skinnestegsdemping eller skinneslipning. Den siste kategorien går ut på å skjerme for eller redusere støy og vibrasjoner, for eksempel støyskjerming eller støydemping på fasader.

Jernbanen i Norge har i dag noen eksempler på av støyreducerende komponenter. For eksempel bevegelige kryss for å unngå skinneløse partier. Et annet tiltak er skinnestegsdemping, hvor et støyisolerende materiale legges inntil skinnesteget. Vibrasjonsisolerende svillematter, ballastmatter og høyelastisk skinnbefestigelse benyttes for å redusere strukturlyd. Ballastvalg virker på støynivået ettersom ballastens grove overflate reflekterer lyd i alle retninger. Det samme kan sies om valg av svilleteype, men i noe mindre grad. Effekten av tiltakene varierer etter sted og ulike forhold (Pika, 2012).

Et annet støyreducerende tiltak er skinneslipning, da som en del av en vedlikeholdsstrategi. En slik strategi kan bygges opp slik at skinneslipning utføres etter faste slipeintervall eller på grunn av forverret tilstand. I en vedlikeholdsstrategi må en vite når kravene til rifler og bølger er overgått, og om skinneslipningen har hatt den ønsket effekt. Dette er tankegangen bak skinneslipningsstrategiene med ARRoW og SMW.

4.4.3 Støyberegninger

Dagens beregninger av jernbanestøy bygger på beregningsmodellen Nord96. Modellen er utviklet i et samarbeid mellom flere nordiske transportetater og private aktører. Nord96 er utviklet som et nøyaktig verktøy som tar hensyn topografi, distanser, og forskjellen mellom ulike lydkilder. Eksempler på det siste er ulike togtyper i varierende hastigheter. I tillegg tar Nord96 også hensyn til omgivelsene rundt sporet (Nielsen and Ringheim, 1996).

Nord96 inkluderer rifler og bølger ved å avgjøre om sporet er godt, gjennomsnittlig eller dårlig vedlikeholdt. Dette defineres med gjennomsnittlig korrugering. Et normalt vedlikeholdt helsveist spor på tre- eller betongviller og ballast har ingen støykorreksjon. Dersom skinnhodet er noe korrugert kan beregningene korrigeres med 1-3 dBA økning. Hvis skinnen har veldig store verdier for rifler og bølger kan det legges til 4-6 dBA. Ved lite rifler og bølger der det kan dokumenteres jevnlig vedlikehold, kan 1-3 dBA trekkes fra beregningene. Reduksjon på 4-6 dBA kan gjøres dersom skinnhodet er veldig glatt.

Nord96 inkluderer også støytillegg for sporkomponenter, men dette gjøres ifølge Trygve Aasen ikke i Norge. Skinner med laskede skjøter kan gi 3 dBA i tillegg, sporveksler og skinnekryss 6 dBA, mens spor over broer med og uten ballast kan få henholdsvis 3 dBA og 6 dBA i tillegg. Andre korreksjoner kan også legges til dersom de kan dokumenteres med målinger.

Det er laget en ny støyberegningsmodell, Nord200. Denne bygger på Nord96, men er ikke i bruk i Norge for jernbanestøy. Nord2000 inkluderer klima, og tar i større grad hensyn til grunnforhold og variasjoner i omgivelsen ved banen (Jonasson and Storeheier, 2001).

Den tyske beregningsmodellen Schall 03 2006 inkluderer en korreksjonsfaktor for sportype og overflateforhold på skinnen, samt en mulighet for støyreduksjon for bremsesystem og om skinnen slipes. En reduksjon på omlag 8 dBA kan oppnås med jevnlig skinnsliping for togsett med bremseklosser av komposittmateriale. 4 dBA oppnås dersom det er skivebremses på togsettet og 1 dBA dersom bremsesystemet ikke er oppgradert (Moehler et al., 2008). Schall 03 2006 inkluderer også en støyreduksjon på 3 dB på grunn av akustisk skinnsliping.

I Sveits blir korrugeringen av både skinne og hjul tatt med i støyberegninger. Basert på referansemålinger av 15 000 forskjellige togsett i varierende hastigheter på 18 forskjellige målesteder i Sveits, er det funnet referansetall på sporkomponenter og togtype. Disse benyttes direkte sammen med korrugeringen for å komme fram støynivået ved banen. Sammenlignet med målinger er nøyaktigheten til modellen god, med en feil på mindre enn 2,5 dBA (Hecht et al., 2012).

4.5 Rullestøy i Europa

Problemene rundt rullestøy takles ulikt i Europa. Noen land tar i bruk tradisjonelle støyreducerende tiltak som støyskjermer, fasadeisolering, skinnedemping og smøring i kurver for å unngå kurveskrik. Andre ser på oppgradering av togsettenes bremsesystem. Noen land har satt seg mål om å gjennomføre denne oppgraderingen fullt ut, for eksempel har Sveits varslet at bremsesklosser i støpejern forbyes fra 2020. Sveits, Nederland og Tyskland har også innført et avgiftssystem som straffer operatører med støyende tog, og belønner støysvake tog.

De fleste land måler rifler og bølger med målevogner tilsvarende Roger 1000, enkelte land har også prøvd ut akustisk måling av sporet. Disse er omtalt i delkapittel 4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*.

4.5.1 Belgia

Infrastruktureier i Belgia, Infrabel, reduserer jernbanestøy med ulike former for støyskjerming, og med utskifting av gamle laskeskjøter til helsveist spor. Omlag 90 % av banen er helsveist spor. De belgiske skinnene sjekkes jevnlig for rifler og bølger, og byttes eller slipes om nødvendig (INFRABEL S.A., 2015). Infrabel jobber med å utvikle et akustisk målesystem for å registrere skinnens beskaffenhet.

4.5.2 Danmark

I Danmark har Banedanmark satt opp støyskjermer, dempet vibrasjoner fra sporet og skriftet ut bremsesystem på togene for å redusere jernbanestøy, og spesielt rullestøy. Skinnenslipning på skinner og sporveksler gjøres jevnlig. I Danmark skal rifler og bølger være mindre enn 0,04 mm på 85% av skinnene på lokalbaner, regionalbaner, hovedbaner og S-banen i København. Rifler og bølger i Danmark måles 2-4 ganger i året av en målevogn tilsvarende Roger 1000, og i 2010 ble akustiske målinger av sporet mellom Århus og København prøvd ut (Mortensen, 2013).

4.5.3 Frankrike

Franske Réseau Ferré de France (RFF) har de seneste årene konsentrert seg om å identifisere og forbedre "black spots", det vil si områder ved og på banene med store støy og vibrasjonsverdier. For å forbedre disse områdene har RFF benyttet tradisjonelle løsninger som støyskjermer og fasadetiltak, men også helsveiste skinner, skinnedemping og skinneabsorbenter (Réseau Ferré de France, 2015). I 2011 ble 289 "black spots" forbedret, sammenlignet med 12 stykker i 2009.

4.5.4 Italia

Italienerne vektlegger arbeidet med støyskjerming ved sporet og på togene. Infrastruktureieren i Italia, Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., ser på antall bygde støyskjermer som et mål for støyreduksjon. Antall

nybygde skjermer har hatt en nedgang fra 24 931 meter i 2009 til 0 meter i 2013, og skyldes få nybygde baner. Dette resulterte i at antallet støyreduerte italienske baner er nesten 354 km i 2013, av totalt 16 752 km (Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., 2011-2013).

4.5.5 Nederland

På grunn høy befolkningstetthet har nederlenderne et stort fokus på støyplager fra jernbanen. Reduksjon gjøres med strenge støykrav, skinneslipning, fasadetiltak, skinnedempning, skjerming og samarbeid med operatørene. For å fjerne noen av de mest støyende togene, har nederlenderne laget et avgiftssystem som straffer støyende tog og lønner støysvake. Dette har ført til at togeiere har oppgradert bremsesystemene sine (Sinderen, 2014). Også i Nederland er det utviklet et akustisk målesystem.

4.5.6 Spania

I Spania skal det på alle hovedbaner utarbeides tiltaksplaner for støyreduksjon, med fasadetiltak, støyskjerming, skinnedemping og svilledemping. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, som er tilsvarende Jernbaneverket i Spania, jobber også med å bytte bremsesystem på alle tog, til enten bremseklosser av kompositt eller skivebremser. I Spania brukes skinneslipning, smøring, reprofilerings av hjul og helsveist spor for å redusere rullestøy (Iñigo, 2011).

4.5.7 Storbritannia

Etter et forskningsprosjekt i 2003 begynte en infrastruktureier i Storbritannia, NetworkRail, med systematisk akustisk skinneslipning. Omfattende kontroll og et strengt vedlikeholdsregime har redusert rifler og bølger på britiske skinner, slik at det fra 2012 ble innført en generell støyreduksjon over hele nettet (NetworkRail, 2015). Støyreduksjonen kontrolleres av det akustiske målesystemet NoiseMon.

4.5.8 Sveits

SBB CFF FFS er den sveitsiske ekvivalenten til NSB og Jernbaneverket, og har i mange år jobbet med støyreduksjon. Sveits har gått inn for å oppgradere bremsesystemet på alle togsett. Selv om bremsene på de sveitsiske togene er oppgradert, er ikke problemet løst. Omlag halvparten av alle tog i Sveits er utenlandske, og det er derfor foreslått et forbud mot støyende godstog fra 2020. Forbudet vil også gjelde alle utenlandske tog. Sveitserne ser på forbudet som det viktigste tiltaket for støyreduksjon, men vurderer også skinnedemping, akustisk skinneslipning og støyskjerming. I Sveits er det også innført et avgiftsregime som straffer støyende tog (Frabetti and Mezger, 2014).

4.5.9 Sverige

Det svenske Trafikverket arbeider med tilsvarende målsetning som Jernbaneverket, altså en støyreduksjon for hele transportnettet. I Sverige har Riksdagen satt et mål om 5% reduksjon av antall mennesker som

utsettes for innendørsstøy daglig, mellom 1998 og 2010. I 1998 var 390 000 personer utsatt for store støyplager, men målet om ble ikke nådd da støyplagen ikke hadde blitt merkbart redusert i 2010. Derfor ble tilsvarende mål også satt for perioden 2010-2021.

I Sverige ser Trafikverket mye på hvordan støy kan avskjæres mellom mottakeren og støykilden. Dette har ført til et fokus på støyskjerming, oppgradering av bremsesystem og fasadetiltak. Det har blitt forsket på akustisk skinnesliping og i lang tid har det vært planlagt en omfattende slipekampanje, men denne har av økonomiske grunner blitt utsatt (Törnquist, 2012).

4.5.10 Tyskland

I Tyskland bruker DB Netz AG årlig omlag 100 millioner euro på støyreducerende tiltak. Disse fordeles på skinneslipning, støyskjerming, vibrasjonsdempning og oppgradering av bremsesystem (DB Netz AG, 2015). Til det sistnevnte har DB Netz AG innført et avgiftsregime som vil gjøre det mest gunstig for operatørene å bruke stille togsett (DB Netz AG, 2013). Et annet tiltak er en omfattende akustisk skinneslipningsstrategi på ca. 1000 km spor (Asmussen et al., 2006).

4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*

Datainnsamling om jernbanens infrastruktur og materiell med lydbølger er en ny idé i Norge, men ikke internasjonalt. Flere land og infrastruktureiere har tatt i bruk akustiske målesystemer for å kunne registrere støysignaturen til komponenter og skader. Blant dem Storbritannia, Tyskland, Nederland, Japan, Danmark og Belgia.

4.6.1 Statiske støymålinger ved sporet

Statiske målinger av jernbanestøy brukes i dag til å sammenligne forskjellige tog. Vanlige emisjonsmålinger etter NS-EN 3095:2013 egner seg ikke til å vurdere skader på infrastrukturen, da målinger etter NS-EN 3095:2013 krever skinner fri for rifler og bølger. NS 8177:2010 inneholder derimot ikke krav til korrugering, og kan benyttes for sammenligning mellom støy og korrugering (Standard Norge, 2010b).

Støymålinger ved sporet skal i utgangspunktet måle støynivået ved togpasseringer, men målinger kan muligens også utføres for å vurdere tilstanden til materiell og spor. Et av systemene som vurderer tilstanden til materiell er utviklet i Australia, og består av måleenheter for å lytte etter skader på boggien og hjulet, kalt RailBAM. Fordelen med enhetene er at tilstanden til hjulene kan vurderes uten å ta toget ut av drift (Trackside Intelligence PTY LTD, 2015). Jernbaneverket har en slik akustisk detektor stående mellom Lier og Drammen, og planlegger en ny ved Skatval (Holtet, 2014)



Figur 4.16 – RailBAM-enhet i bruk på Huseby mellom Drammen og Lier. Foto: TRACKIQ

Et annet eksempel på støymåling ved sporet er en lytterigg utviklet av DB i Tyskland for å lokalisere jernbanestøy. Prinsippet bak riggen er at en støykildes plasseringen og lydtrykk ikke kan finnes med bare én mikrofon. Derfor har DB laget en stor rigg med 90 mikrofoner. Disse er plassert i en spiral med gitt diameter på 4 eller 2 meter. Ved å endre måledistansen eller størrelsen på spiralen kan riggen fange opp frekvenser fra 200 Hz til 3,4 kHz, ved 7,5 meter måledistanse. Ut fra dette kan plassering og lydtrykk beregnes (Schulte-Werning et al., 2003).

Et tredje eksempel er måling av kurveskrik. I Storbritannia i 2000 ble tre mikrofoner, to kameraer og en fuktighetssensor installert ved en kurve med horisontalradius på 300 meter, for å finne konsekvensen av skader på sporet. Instrumentene målte lydtrykknivå og lydfrekvens, med spesielt fokus på kurveskrik, i tillegg ble også fuktighet og værdata registrert. Resultatet fra over 6000 passeringer var at lydtrykket og frekvensen til et kurveskrik hadde sammenheng med hvor tørr skinnen var (Jones, 2000).

4.6.2 NoiseMon (Storbritannia)

Etter ønske om å økt nøyaktighet og innsamlingshastighet av data, er det britiske NoiseMon-systemet utviklet. Oppsettet er enkelt, en mikrofon er plassert ved boggien under en passasjervogn og måler lydtrykknivå over omlag 200 meter. Via mobilnett overføres lydtrykknivå, hastighet og posisjon målt med GPS til en sentral datamaskin. Støynivået og frekvensen korrigeres for hastigheten til vognene slik støyverdier for nominell hastighet på 160 km/t oppnås (Jones, 2000).

NoiseMon avhenger ikke av målevogner, og systemet kan dekke et stort område på relativt kort tid. Systemet øker nøyaktigheten til støyberegninger ved å gi korreksjonsfaktorer. Støynivået under vognen varierer mellom 90 til 120 dB (Hardy and Jones, 2004). En fordel med systemet er at med flere kjøring med NoiseMon kan data om utviklingen over tid samles slik at utsatte områder kan identifiseres (Jones and Packham, 2006).

For å unngå feilmålinger og skader på mikrofonene har AEA Technology Rail laget kriterier som bør følges ved bruk av NoiseMon. Mikrofoner er sensitive instrumenter og bør beskyttes mot vann og flyvende ballast. For å sørge for dette foreslås en plassering med lite vann. Et skjold sørger for beskyttelse mot flyvende ballast. Skjoldet kan også redusere aerodynamisk støy over mikrofonen. Plasseringen under vognen bør være slik at andre støykilder på toget minimeres. Hjulet og bremsene kan påvirke målingene, slik at en må ha kontroll på og vite hvilket bremsesystem som benyttes, og om det er trekk på hjulet. Til databehandling og analyse brukes MATLAB (Cawser, 2002).

4.6.3 SMW – Schallmesswagen (Tyskland)

I Tyskland avgjøres akustisk skinnsliping med et egenutviklet akustisk målesystem. For å oppnå ønsket støyreduksjon ved sporene, opererer DB med en skinnslipingsstrategi som krever periodisk måling av rullestøy hver sjette måned med SMW-målevognen. Dette er en ombygd passasjervogn med glatte hjul og en mikrofon montert i et lydisolert kammer med åpning over en av boggiene. Det er ingen bremses på denne boggien for å sikre at hjulene er glatte, hjulene må også måles hvert år. Lydtrykknivået som registreres korrigeres for hastighet, togets lengde og togsettets bremses. Nominell hastighet er satt til 100 km/t og sporet er inndelt i seksjoner på 2 m.

Det er funnet en sammenheng mellom målinger gjort av SMW-målevognen og statiske støymålinger for en rekke togtyper. Støynivået til et togsett kan derfor uttrykkes med målinger gjort av SMW-vognen. Sammenheng er også funnet mellom målinger av SMW og direkte målinger av rifler og bølger (Asmussen et al., 2006).



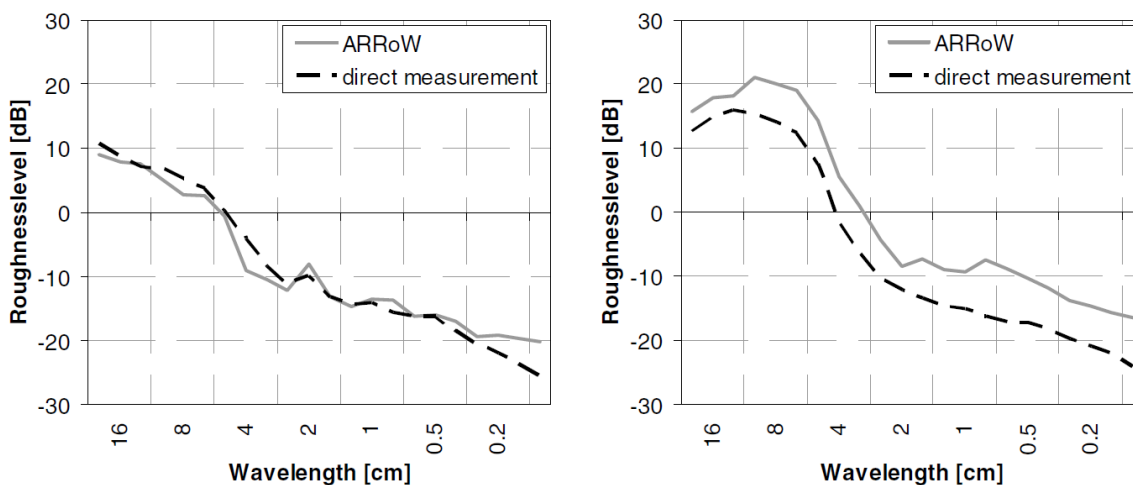
Figur 4.17 - Mikrofonens plassering inne i SMW-vognen (Asmussen et al., 2006)

4.6.4 ARRoW – Acoustic Rail-influence Recording on Wheels (Nederland)

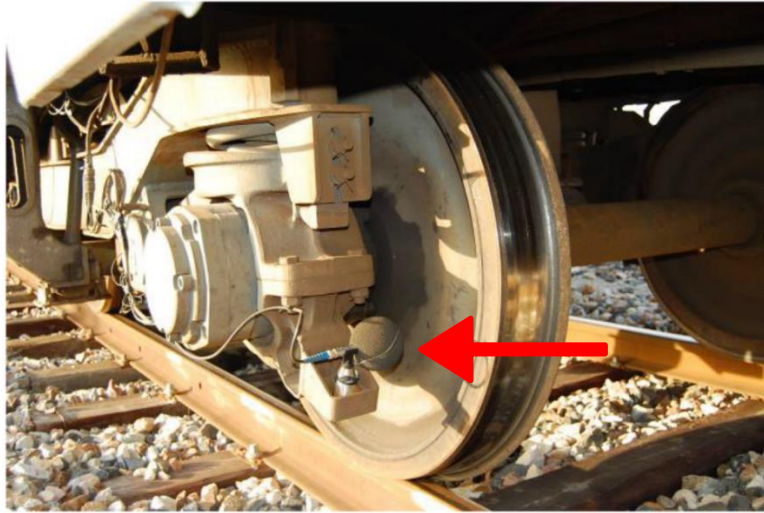
I Nederland kombineres både direkte og indirekte målinger for å finne rifler og bølger. Dette gjøres av hensyn til både nøyaktighet og til hva som er mest praktisk. Direkte målinger har best nøyaktighet, men tar lengst tid å utføre. Indirekte målingene gjøres akustisk med ARRoW-systemet, som måler rullestøy, posisjon og hastighet. Systemet består av fire flyttbare mikrofoner og en GPS-mottaker. Ved å måle ved fire hjul, to på hver side, skiller systemet mellom høyre og venstre skinne slik at usikkerhet i systemet minker. Mikrofonene plasseres nært kontaktflaten mellom hjulet og skinnen, og måler støy i forskjellige frekvensspekter uten forstyrrelser fra andre støykilder. Hver mikrofon plasseres omlag 30-40 cm unna kontaktflaten, se Figur 4.19. Systemet kommer med egen programvare som sammenligner målinger, og gir et komplett bilde av korrugeringen. Programvaren fjerner impulslyder ved å midle støynivået over lengre strekninger. ARRoW kan monteres på vanlige togsett og kan brukes til å avgjøre skinnesliping.

Mikrofonene samler informasjon over 0,05 sekunder, tilsvarende ca. 2 meter med en hastighet på 160 km/t. Posisjon og hastighet registreres hvert sekund. Støydata, posisjon og hastighet sammenstilles i programvaren, og justeres med hensyn til hastighet slik at støydataene presenteres ved nominell hastighet på 120 km/t. Datamengden reduseres ved å beregne gjennomsnittet over 20 meter. De indirekte støymålingene er relative i sin natur og gjøres absolutte for sammenligning. Dette gjøres med kalibrering av de indirekte resultatene mot direkte målinger over en referansestrekning.

Praktiske erfaringer med ARRoW viser at nominell hastighet på vognen ikke bør være så langt unna skiltet hastighet på banen som måles. Dette skyldes at frekvensen må omregnes når hastigheten på toget er langt unna ønsket hastighet, og er således en ekstra feilkilde. Et annet problem er at støyen endres på grunn av andre faktorer, for eksempel skifte i overbygning og refleksjoner fra plattformer (Kuijpers, 2008).



Figur 4.18 - Sammenligning mellom ARRoW og direkte målinger med Müller-BBM. Figuren til venstre er målinger på betongsviller og figuren til høyre er på tresviller. Forskjellen mellom dem forklares med at tresviller er lettere enn betongsviller, slik at spordynamikken endres (Kuijpers et al., 2012).



Figur 4.19 - Mikrofonenes plassering i ARRoW-systemet (Kuijpers et al., 2012)

En sammenligning mellom ARRoW og direkte målinger, viser at nøyaktigheten til ARRoW avhenger av overbygningen. Den samme sammenligningen viser at ved korte bølgelengder (< 5 mm) med liten korrugering (< -20 dB) vil ARRoW registrere for store verdier for rifler og bølger. Dette skyldes at ved så liten korrugering vil overflaten på hjulet avgjøre støynivået. I sammenligningen ble det også funnet at hastigheten ikke har stor innvirkning på måling over lange bølgelengder. For korte bølgelengder, mindre enn 63 mm, er det derimot sammenheng mellom hastighet og nøyaktighet (Kuijpers et al., 2012). Systemet tar ikke hensyn til spordynamikken, slik at spor med store svingninger vil kunne gi feilmåling. For eksempel spor med lette tresviller, se Figur 4.18.

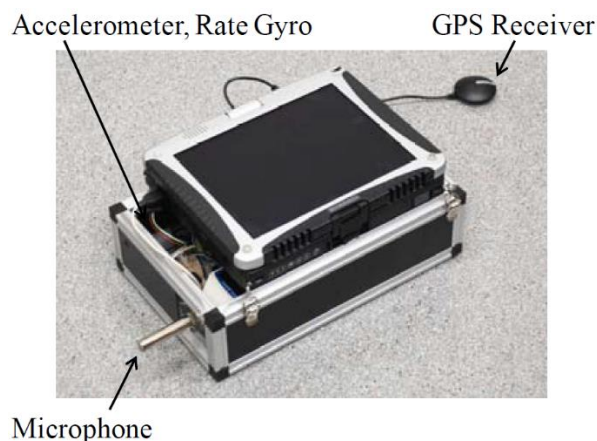
Målingene fra ARRoW brukes til å avgjøre hvor det må slipes, og til å kontrollere resultatet. Måledata kontrolleres mot et spesifikt støynivå for den strekningen som måles. Dersom målt støynivå er for stort må skinnen slipes. Kontroll etter sliping gjøres med et passasjertog med skivebrems, i 120 km/t. Dersom gjennomsnittlig støyreduksjon ikke er mer enn 2 dB, må skinnene slipes på nytt eller andre tiltak vurderes. Dette medfører at alle spor kontrolleres hvert andre år (Scossa-Romano and Oertli, 2012).

4.6.5 Passasjertog som sonder (Japan)

I Japan er det utviklet et metode for å detektere rullestøy og korrugering med vanlige passasjertog. En mikrofon, et akselerometer, et gyroskop og en GPS-mottaker brukes til å avgjøre uregelmessigheter i sporet. En kompakt og bærbar enhet som inkluderer disse komponentene er utviklet og plasseres på gulvet i et godt vedlikeholdt passasjertog. (Tsunashima et al., 2011). Måleresultatet fra akselerometeret og gyroskopet brukes med en overføringsfunksjon for å avgjøre rifler og bølger på skinnen, og etter videre

undersøkelser er det funnet at også lydmålinger fra kabinen kan benyttes til å avgjøre rifler og bølger. Databehandling gjøres i egenprodusert programvare.

Ved å bruke passasjertog som sonder, oppnås tilnærmet sanntidsdata om rifler og bølger. Nøyaktigheten og omfanget av et slikt systemet er utformet slik at sondene hele tiden gir god kontroll på skinnenes beskaffenhet. Dette gjør at det kan etableres en forebyggende vedlikeholdsstrategi (Tsunashima et al., 2008).



Figur 4.20 - Det japanske kompakte akustiske målesystemet (Tsunashima et al., 2008)

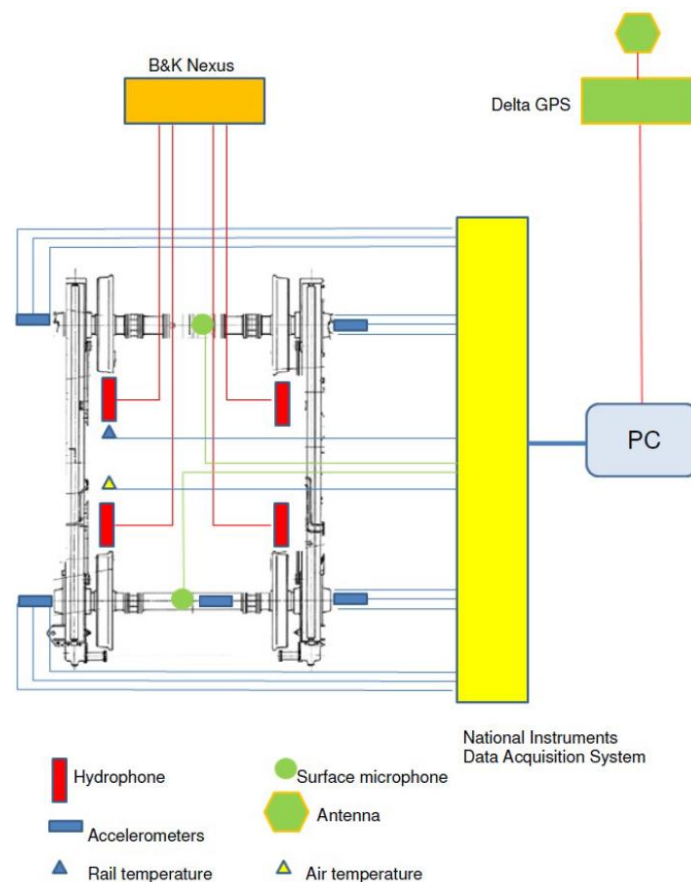
4.6.6 Registrering av kurvskrik, flensstøy slagstøy (Australia)

For å skille de ulike bidragene til jernbanestøy fra hverandre, er det i Australia utviklet og tatt patent på et akustisk lyttesystem til tog. Bakgrunnen for patentet er at tilsvarende akustiske detektorer på tog kun fokuserer på rullestøy. Med mikrofoner plassert nært kontaktflaten kan støysignaturen til ulike støyfenomener registreres, som både lydtrykk og frekvens. Slik at kurveskrik, flenslyd og hjulslag kan avgjøres (Dwight and Jiang, 2006).

4.6.7 IWEN11 (Danmark)

I 2010 ble det startet opp et pilotprosjekt med støymålinger fra mikrofoner festet til den midterste vognen på et DSB IC3-tog mellom København og Århus. To mikrofoner ble festet like under gulvet og fire hydrofoner ble festet like ved kontaktflatene mellom hjul og skinne. Vibrasjoner ble målt med tri-aksiale akselerometer på boggienes fire akselbokser, samt to en-aksiale akselerometre på selve akslingene. På grunn av den lange måledistansen kunne variasjon i sporkonstruksjon og grunnforhold settes i sammenheng med vibrasjoner fra rullende materiell. Dette anga de ulike forholdenes og komponentenes støysignatur. Dataene ble i tillegg stedfestet med GPS-koordinater.

Målinger ble gjennomført over flere dager, ved forskjellig hastigheter i varierende klima. Dette bedret nøyaktigheten til datainnsamlingen, siden eksterne faktorer kunne neglisjeres. I første omgang valgte man å se på lydmålinger. For å forenkle databehandlingen ble datasettet inndelt i to klasser: «Non Event» og «Event», der førstnevnte var hendelser uten en markant støysignatur. Sistnevnte klasse ble videre inndelt i «Shock», «Crossing», «Squeal» og «Other», altså sjokk, kryssing, hyl og andre. Sjokk ble sett på som en kort impuls i signaler relatert til én spesifikk komponent. Kryssing var likedan, men kunne skilles fra sjokk med koordinatene til plankryss. Karakteristisk for hyl var at de hadde en høyfrekvent lyd. De resterende hendelsene ble kategorisert som andre hendelser. Ved å lytte til målingene avgjorde en referansegruppe klassifiseringen til de ulike støyhendelsene. Gruppen greide å klassifisere 84% av hendelsene riktig (Jensen et al., 2015).



Figur 4.21 - Måleoppsettet til det danske målesystemet IWEN11 (Jensen et al., 2015)

4.6.8 Akustisk tilstandsovervåkning av skinner (Belgia)

Belgierne benytter sin EM130-målevogn for å måle rifler og bølger på alle belgiske skinner to ganger. Målingene skjer i opptil 120 km/t. Rifler og bølger måles med et lignende lasersystem som på Roger 1000, men hjulene kontrolleres fire ganger i året. Målevognen er også utrustet med en mikrofon som registrerer støynivået under vognen, ca. 20-30 cm fra kontaktflaten. MATLAB brukes til databehandling og analyse av støydata.

Erfaringer fra akustiske målinger tilsier at de foreløpig ikke kan brukes til å definere akustisk beskaffenhet for skinnen, men kan benyttes til å registrere rifler mindre enn 30 mm. Støydata fra vognene brukes til å produsere støykart og for avgjøre støysignaturen til komponenter og skader i sporet (Verhelst, 2014).



Figur 4.22 - Plassering av mikrofon på det belgiske målesystemet (Verhelst, 2014)

5 Målesystem

Dette kapitlet beskriver et akustisk målesystem for rifler og bølger, der rullestøy brukes for å avgjøre bølgedannelse på skinnhodet. Foreslått metode er grunnlagt og diskutert i kapitlet. Feilkilder og en sammenligning med tilsvarende akustiske måleutstyr er også beskrevet. Foreslått målesystem baseres på informasjon presentert i kapittel 3 *Teoretisk grunnlag* og 4 *Rullestøy og jernbanestøy*.

5.1 Akustisk måling av rifler og bølger

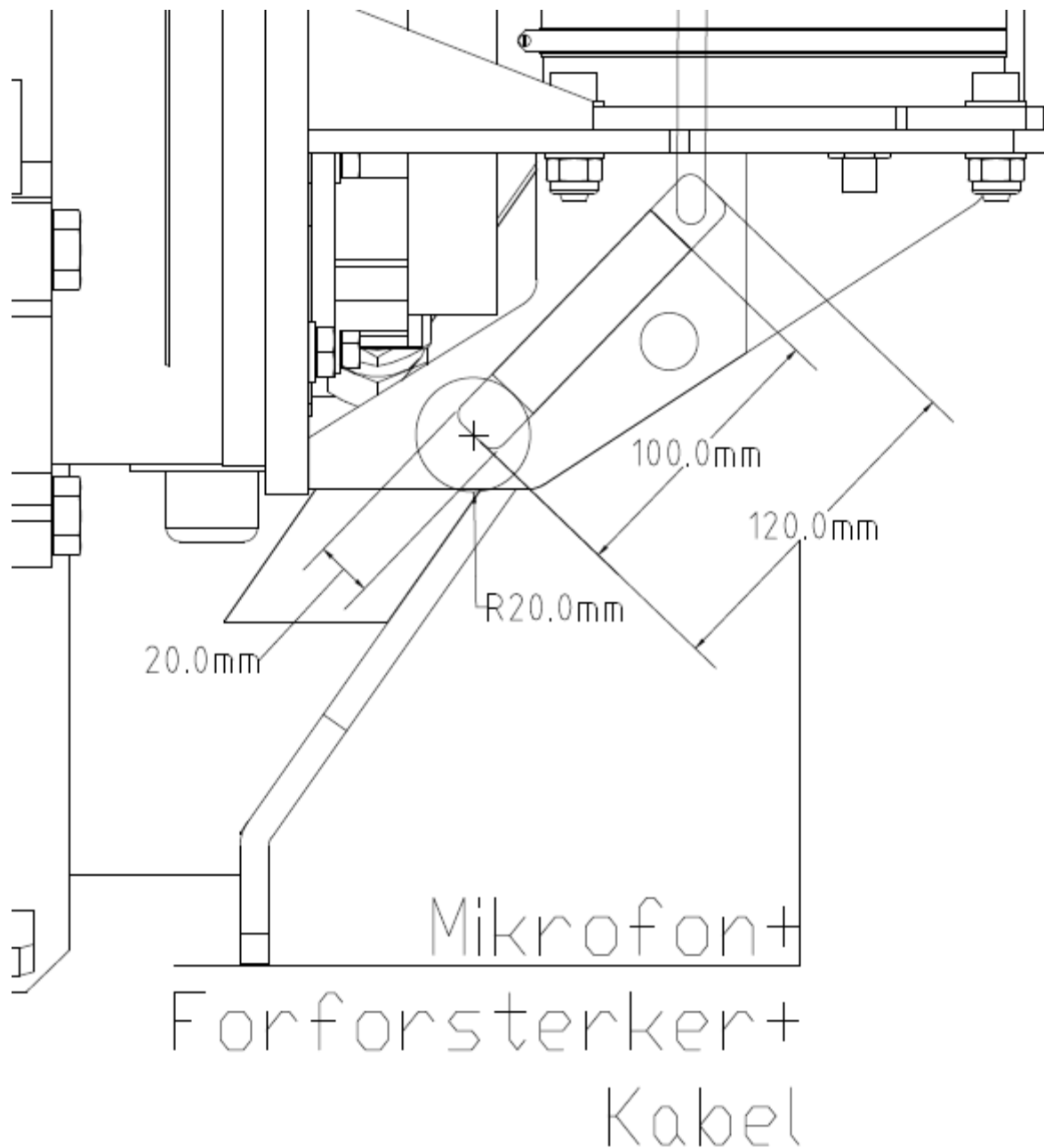
To mikrofoner monteres under målevognen Roger 1000, nært kontaktflaten mellom hjul og skinne. Mikrofonene registrerer lydtryknivå. En kabel strekkes fra hver mikrofon til en datamaskin inne i målevognen. Lydtryknivå sammenlignes med målinger utført av Roger 1000. Korrelasjon mellom dataene gir informasjon om skinnens beskaffenhet.

5.2 Målemetode

En konkret målemetode for hver skinnestreng er foreslått, og inndelt i 22 steg. Bakgrunn for disse stegene er grunnlagt og diskutert i delkapittel 5.2 *Målemetode*

- 1- En Nor1225 mikrofon monteres på undersiden til en av akselboksen på Roger 1000. Mikrofonen kobles til en Nor1209 forforsterker, og en Nor140 lydmåler inne i Roger 1000 med kabel på målevognens utside, se Figur 5.1. Et skjold plasseres foran mikrofonen.
- 2- Målinger utføres under kontrollerte forhold på rette strekninger med tørre skinner, i samsvar med ISO 3095:2013. Vær, klima og området rundt sporet registreres fortløpende. Hjulene på Roger 1000 er kontrollert og tilnærmet fri for korrugering. Hastighet bestemmes av lokfører.
- 3- Lydtryknivå måles som en funksjon av tid. Måling av lydtrykk startes samtidig som Roger 1000 begynner med målinger av rifler og bølger. Mikrofonen måler lydtrykket over 1/8-sekund. Data lagres på Nor140.
- 4- Etter måling gir Nor140 lydtryknivå for hele målestrekningen.
- 5- Databehandling utføres i et egnet program, for eksempel som MATLAB eller Excel.
- 6- FFT "Fast Fourier Transform" utføres på dataene. Lydtrykk som funksjon av tid transformeres til frekvensdomenet.
- 7- Frekvenser normaliseres med et frekvensskifte for gjennomsnittshastigheten i hvert tidsintervall.
- 8- Frekvenser filtreres med båndpassfilter for bølgelengdene:
 - A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 9- Invers FFT utføres, og data transformeres tilbake til tidsdomenet.
- 10- Lydtryknivå normaliseres til nominell hastighet. Denne velges som gjennomsnittshastigheten til Roger 1000 over 40 km/t.

- 11- Data sammenstilles med måletidspunkt for data fra Roger 1000 og måletidspunkt for akustiske målinger.
- 12- Data koordinatfestes med tidspunkt som grunnlag. Roger 1000 leverer data om måletidspunkt, hastighet, koordinater.
- 13- Impulslyder filtreres vekk med glidende median over datasettet.
- 14- Resterende impulslyder fjernes med informasjon om installasjoner i sporet.
- 15- Gjennomsnittlig lydtrykknivå beregnes over enhetslengder på 0,5 m, for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 16- Gjennomsnittlig korrugert nivå beregnes over enhetslengder på 0,5 m, for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 17- Data sammenlignes og analyseres med korrelasjon og regresjon for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 18- Samsvar vurderes mellom verdier for korrugert nivå og lydtrykknivå med 0,5 m oppløsning.
- 19- Gjennomsnittlig korrugert nivå beregnes over delstrekninger på 100 m, for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 20- Gjennomsnittlig lydtrykknivå beregnes over delstrekninger på 100 m, for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 21- Data sammenlignes og analyseres med korrelasjon og regresjon for bølgelengdene:
- A. 10-30 mm
 - B. 30-100 mm
 - C. 100-300 mm
 - D. 300-1000 mm
- 22- Samsvar vurderes mellom verdier for korrugert nivå og lydtrykknivå med 100 m oppløsning.



Figur 5.1 – Foreslått plassering av en mikrofon under akselboksen til Roger 1000. Mikrofonen plasseres under akselboksen på den akslingen som måler rifler og bølger. Mikrofonen er rettet mot kontaktflaten mellom hjulet og skinnen.

5.3 *Bakgrunn for målemetoden*

5.3.1 Valg av utstyr

Valg av utstyr gjøres på flere grunnlag: Prisen på utstyret og installasjonen må være akseptabel. Måleutstyret må være robust for både lydtrykkene som måles og ytre påkjenninger. Det kan antas at mikrofonene vil oppleve store lydtrykknivå. Det lignende NoiseMon-systemet har registrert lydtrykknivå på opptil 120 dB. Dette og plasseringen nært støykilden gir derfor grunn til å forvente et høyt lydtrykknivå også for Roger 1000. Dersom lydtrykknivået er så stort at mikrofoner blir upresise, kan hydrofoner vurderes.

Effekten av impulslyder varierer med tidsintervall. Ved å bruke et stort tidsintervall på 1 sekund, vil en få serier med stabile lydtrykk. Der effekten av impulslyder jevnes noe over intervallene. Alternativt kan et kortere tidsintervall på 0,125 sekunder velges. Da fanges impulslyder bedre opp, men vil føre til et mer ustabil lydtrykk. Valg av tidsintervall påvirker derfor hvorvidt impulslyder forurenses målinger av stabile lydilder. For å oppnå best nøyaktighet velges derfor det tidsintervallet som gir mest synlige impulser, som lettest kan fjernes med databehandling i etterkant av målingen. Siden korte tidsintervall gir mest synlige impulser, foretrekkes korte fremfor lange tidsintervaller.

I teorien skal frekvensintervallet til rullestøy ligge mellom 20 Hz og 12 kHz. Dette skyldes relasjonen mellom hastighet, bølgelengde og passeringsfrekvens i formel (4.2), og at norske tog ikke kommer opp i hastigheter over 210 km/t. Allikevel bør utstyret være i stand til å registrere større frekvenser enn 12 kHz. Grunnen er at hastigheten på norske baner kan øke i framtiden, og at utstyret muligens kan benyttes til å måle andre støyfenomen enn rullestøy.

Måleutstyret kan ikke ha en for høy kostnad, og bør være lett å anskaffe. Jernbaneverket eier Roger 1000, samt utstyret om bord. De kommer også til å stå som eier av det akustiske målesystemet. For Jernbaneverket er det viktig at utstyrets kostnad kan rettfærdiggjøres av dets resultat. I første omgang kan derfor kostnaden på utstyret og utførelsen av målingene være til et prisnivå som kan begrunnes som en forskningsmessig investering. Større summer kan investeres dersom innledende resultat er positivt. Tilgang til reservedeler eller behov for oppgradering og utvidelse av systemet, tilsier at utstyret bør være enkelt å skaffe.

Trygve Aasen fra Jernbaneverket foreslår å bruke Norsonic sin Nor140 Lydmåler. Da han er kjent med lydmåleren, og Norsonic er en anerkjent norsk leverandør av akustisk måleutstyr. Nor140 er en håndholdt måleenhet bestående av en Nor1225 mikrofon, en Nor1209 forforsterker og selve Nor140 datamaskinen. Utstyret leveres med programvaren NorReport som kan konvertere data til Excel- eller tekstfiler. Nor140 kan samle inn data i 1/1- og 1/3-oktavnband fra 0,4 Hz til 20 kHz med en spennvidde på 120 dB, fra 15 dBA til 137 dBA. Ved hjelp av programvaren NorReview kan målinger av lydtrykk vises med en

oppløsning fra 25 ms til 199 timer, og vektet med A, C eller Z vekting. Mikrofonen Nor1225 omtales som en generell flerbruksmikrofon, med 13,2 mm i diameter og lengde 16,2 mm. Mikrofonen kan måle frekvenser mellom 3,25 Hz og 20 kHz, og tilsvarer en klasse 1 mikrofon etter standarden NEK EN 61672-1:2013. Mikrofonen leveres med en vindskjerm. Forforsterkeren Nor1209 forsterker lave lydssignaler fra mikrofonen til datamaskinen (Norsonic, 2013).

Det foreslås å bruke Nor140 i første omgang, for å bevise at systemet kan fungere, finne data om skinnene og skaffe erfaringer om hvordan systemet kan optimeres.



Figur 5.2 - Nor140 Lydmåler med forforsterker og mikrofon (Norsonic, 2015)

5.3.2 Måleoppsettet

Plasseringen av mikrofonen er nært kontaktflaten mellom hjulet og skinnen. Mikrofonen er da plassert inne i direktelydfeltet til rullestøyen, og måler lyden som er totalt dominert av rullestøyen. Fra måleesystemene i Tyskland, Nederland og Belgia erfares det at en slik plassering omlag 0,5-1 m fra kontaktflaten. For å få best mulig lydssignal er mikrofonen rettet mot kilden, der veien mellom kilden og mikrofonen er fri for hindringer.

Målinger foregår uavhengig av sporets komponenter. Sporet består av flere ulike typer skinner, sviller med mer. Dette gjør at måleutstyret må takle varierende spor uten at oppsettet eller at selve utstyret må justeres. Utstyret kan da brukes overalt med minimal påvirkning fra operatører.

Mikrofonen Nor1225 plasseres på akselboksen under reflektoren, for at boggiens fjæring ikke skal påvirke målingene. Lasermålingene til Roger 1000 og lydmålingen måler samme hjul, slik at en feil på hjulet kan behandles som en systematisk feil, lik for begge. En kabel fra mikrofonen og forforsterkeren trekkes inn i Roger 1000 og kobles sammen med datamaskinen Nor140. Muligens må det borres hull i gulvet eller veggene på Roger 1000 for å trekke kabelen inn. Plasseringen går ikke utover fritt profil, da dette kunne

skadet selve måleutstyret og gjenstander eller personer ved sporet. Plasseringen settes derfor til yttersiden av boggien nært akselboksen, slik at mikrofonen kan måle lydtrykk og er tilgjengelig for operatørene, se Figur 5.1 og Figur 5.3.



Figur 5.3 - Plassering av måleutstyr på Roger 1000 Foto: Geir Harald Ingvaldsen, Jernbaneverket

Festeanordning er ikke foreslått. I første omgang gjennomføres målinger for å bevise konseptet. Til dette trengs det et feste som sørger for at mikrofonen ikke blir skadet, eller i seg selv avgir lyd som kan forurense målingene. I neste omgang er det verdt å se på dempingen av festeanordningen, slik at vibrasjoner fra vognen ikke forplanter seg gjennom festet og forstyrrer målingen. Festeanordning kan være lett å montere, for eksempel strips, bolter eller teip.

5.3.3 Måleforhold

For å avgjøre om lydmålingene kan fortelle noe om skinnens beskaffenhet, ser en i første omgang på spor der eksterne faktorer neglisjeres. Hvis utstyret fungerer vil dette kunne gi erfaringstall på referanseverdier for rifler og bølger. Senere er det aktuelt å endre på eksterne faktorer for å finne ut hvor og når systemet fungerer optimalt.

For enkelthetens skyld foreslås det å gjøre målinger mest mulig etter den eksisterende standarden for emisjonsmålinger; ISO 3095:2013. Målinger under Roger 1000 gjort etter ISO 3095:2013 kan sammenlignes med vanlige statiske målinger ved sporet. En oppsummering på hvordan eksterne forhold ved sporet skal være, er gitt i avsnitt 3.6.1 *Støymålinger*. For sammenligning gjøres målinger på baner der eksterne forhold og sporkomponenter er tilnærmet identiske, slik at man kan skaffe riktige erfaringstall til senere bruk.

Målinger skal derfor kun foregå på vanlige norske ballastspor uten nevneverdige lydpåvirkende faktorer ved sporet. Dette ekskluderer målinger i tunneller, på broer, ved veldig tykk vegetasjon eller mye snø, like ved reflekterende flater og i tett bebyggelse. Været må registreres og bør holde seg stabilt i måleperioden. For å hindre vann på skinnene kan det ikke regne. Måleutstyret bør også fysisk skjermes, slik at det ikke gir feilmålinger på grunn av aerodynamisk støy, og ikke skades på grunn av flyvende ballast. Til dette foreslås det et skjold foran mikrofonen i kjøreretningen.

Hjulets overflate skal være så glatt som mulig. Rullestøyen forårsakes av korrugering på både skinnen og hjulet, så dersom hjuloverflaten er tilnærmet perfekt unngås påvirkning på rullestøyen. Hjulene på Roger 1000 må derfor jevnlig kontrolleres. I dag gjøres dette én gang i året, til sammenligning kontrolleres hjulene fire ganger i året i Belgia. Dette indikerer at en hyppigere kontroll av hjulene bør vurderes i Norge. I RIVAS-prosjektet ble det avklart at slitasten av hjulene må være mindre enn 0,5 mm for at de ikke skal påvirke målinger av grunnvibrasjoner, se avsnitt 4.3.6 *Reduksjon av rullestøy*. Et tilsvarende krav til hjulene på Roger 1000 kan undersøkes for akustiske målinger. Det skal nevnes at en nedre grense for glatte hjul kan vurderes. Dersom Roger 1000 bruker hjul som er langt bedre enn normalen, vil lydtrykket som registreres være kunstig lavt sammenlignet med vanlige tog. Omregning av dataene for å kunne gjelde vanlig togsett, får dermed en feilkilde det må tas hensyn til.

Valg av hastighet påvirker nøyaktigheten til resultatet. Rullestøyen øker med hastigheten, slik at måleresultatet må normaliseres til en nominell hastighet med en regresjonsanalyse⁵ basert på erfaringsdata. Normaliseringen og regresjonen gjør at data som finnes for hastigheter langt fra den nominelle hastigheten, har en større feilkilde ved seg enn de data som samles ved den nominelle hastigheten. I første omgang testes systemet under vanlige kjøring av Roger 1000 over 40 km/t. Akustisk måling vil derfor ikke ha hovedprioritet under kjøring, slik at nominell hastighet velges til gjennomsnittlig hastighet for Roger 1000. En eventuell optimalisering av systemet kan vurdere hvilke hastigheter som gir størst nøyaktighet, og bruke disse dersom de også er akseptable for driften av Roger 1000, og kapasiteten til sporet. Det er også mulig å bruke flere nominelle hastigheter for å redusere feilkilden.

5.3.4 Målinger

Akustisk måling av rifler og bølger starter samtidig med andre målinger som utføres av Roger 1000. Dette gjøres ved at en operatør starter datainnsamlingsprogrammet på Nor140, som lagrer data fortløpende. Målingene avsluttes på samme måte etter endt kjøring. Data overføres til en datamaskin for senere bearbeiding og analyse. Justeringer på utstyret under drift skal ikke gjøres, da dette utsetter operatørene for fare ved sporet. Ingen justeringer under måling hindrer også påvirkning fra operatørene.

⁵ Forklaring på lineær regresjon er lagt i vedlegg 2

Etter endt måling leverer det akustiske målesystemet lydtrykknivå som en funksjon av tid. Roger 1000 har registrert hastighet, koordinater og tidspunkt. Eksterne lydpåvirkende faktorer ved og i sporet er funnet manuelt, fra værdata eller fra fotografiene tatt av Roger 1000. Dette, samt informasjon om sporet, utgjør inndata for databehandling.

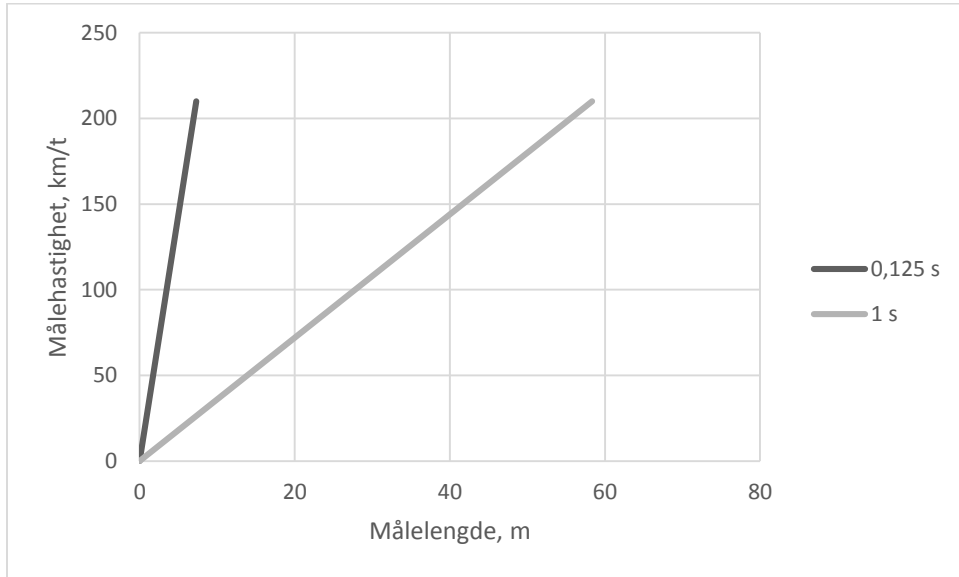
5.3.5 Databehandling⁶

Datasettene fra Roger 1000 og Nor140 leveres som numeriske verdier i Excel-format eller txt-format. En kan derfor benytte numeriske dataverktøy som matrisebaserte Matlab eller regnearkbaserte Excel, for analyse. Enkle regneoperasjoner kan utføres manuelt med nevnt programvare, men for å lette arbeidsmengden bør det etterhvert lages programvare for å utføre regneoperasjonene. NorReview kan utføre FFT og invers FFT, slik at datasett leveres som lydtrykknivå over frekvenser.

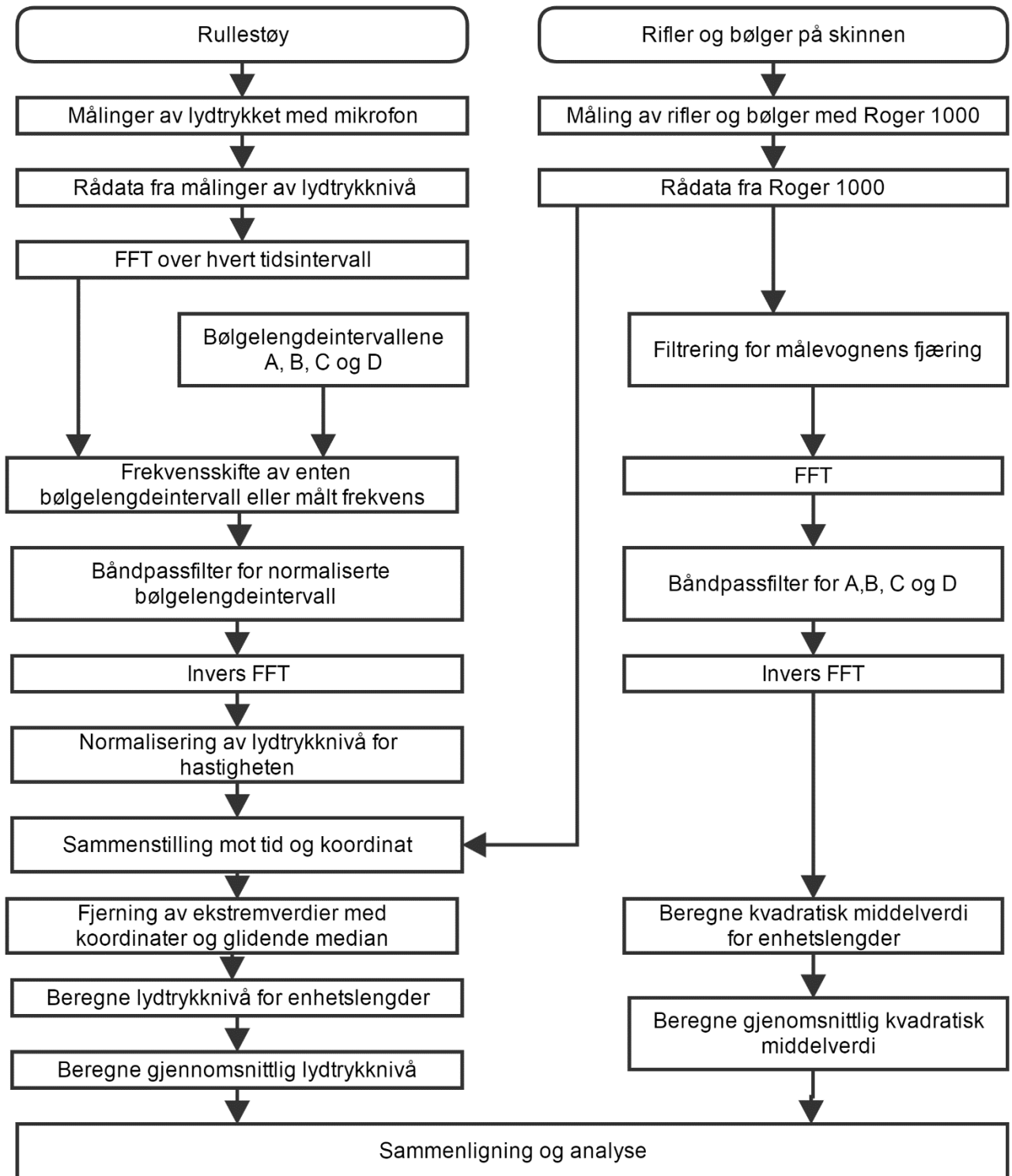
Programvaren må ta hensyn til datasettets størrelse. Målinger i 80 km/t med tidsintervall 0,125 sekund over én kilometer, produserer 360 målepunkt, for hver skinnestreng. For hele det norske jernbanenettet tilsvarer dette i overkant av 2,9 millioner målepunkter. Dette er et grovt anslag som er avhengig av hastighet på banen og tidsintervallet, men det gir en pekepinn på datamengden. Størrelsen gjør at MATLAB kan foretrekkes fremfor Excel, da førstnevnte er vesentlig bedre til å håndtere større datasett. For å spare lagringsplass skal data lagres internt under en måling, og overføres til en ekstern datamaskin for analyse etter måling. På denne måten sikres langtidslagring av data til senere analyse.

Måledistansen varierer, men måletidspunktet er fast. Roger 1000 måler rifler og bølger omtrent hver femte millimeter, og beregner den kvadratiske middelveidien over omlag 0,5 m. Mikrofonen måler lyd over 1/8-sekund, altså 0,125 sekund. Dette gjør at måledistansen varierer på grunn av hastighetsvariasjon. Eksempelvis er måledistansen 1,39 m ved 40 km/t og 5,56 m ved 160 km/t. På grunn av dette må målingene koordinatfestes. For å oppnå sammenlignbare resultat og en god analyse må koordinatfestingen gjøres med tilstrekkelig nøyaktighet.

⁶ I vedlegg 4 og 5 er det lagt ved systematiske og detaljerte flytskjema for databehandling, sammenstilling og analyse.



Figur 5.4 - Målelengden øker med hastigheten og tidsintervallet



Figur 5.5 - Skjematisk fremstilling av målesystemets databehandling.

Data fra Roger 1000 er koordinatfestet og tidfestet. Det akustiske målesystemet trenger ikke å levere både tid- og stedfestet data, da det er tilstrekkelig med en av dem. Tid eller sted kan brukes for å sammenstille dataene fra akustiske målinger og Roger 1000. Nor140 leverer data avhengig av måletidspunkt, det samme gjør Roger 1000. Ved å sammenstille måletidspunktene knyttes lydtrykket opp mot koordinater for banen, videre deles skinnen opp i enhetslengder med hvert sitt målte lydtrykknivå. Ettersom Roger 1000 bruker enhetslengder på 0,5 m, foreslås også 0,5 m til de akustiske målingene. Normalisering etter formel (4.7) kan gjøres siden lydtrykknivået nå knyttes til hastighet via tidskoblingen. Roger 1000 leverer ikke gode resultater for hastigheter lavere enn 40 km/t, så målinger ved hastigheter lavere enn 40 km/t sees vekk fra.

Båndpassfilter brukes for å filtrere vekk noen av de frekvensene som ikke er knyttet til rullestøy. Generelt kan høyfrekvente lyder over ca. 11,11 kHz elimineres, ettersom bølgelengdene mellom 5 og 500 mm er viktigst for rullestøy, og fordi målevognen ikke kan brukes i mer enn 200 km/t. Ved å bruke relasjonen i formel (4.2) kommer en derfor fram til at ca. 11,11 kHz er høyeste teoretiske frekvens for rullestøy. Dette kan brukes som en øvre grense og slik at alle lyder over, neglisjeres. Tilsvarende vil 20 Hz representere en nedre grense.

Ettersom Roger 1000 allerede benytter bølgelengdeintervallene 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm, velges disse også for rullestøyen. Dette er hensiktsmessig, da en omregning av verdier for rifler og bølger til andre bølgelengdeintervall ville gitt unødvendig merarbeid. Roger 1000 kjører selv i 160 km/t, slik at en ny grense for høyfrekvente lyder kan defineres. Med formel (4.2) kommer en fram til at omlag 4,44 kHz er høyeste praktiske frekvens på rullestøy fra Roger 1000. Lavere skiltet hastighet kan redusere frekvensen ytterligere. For å fjerne irrelevante data filtreres derfor målingene med båndpassfilter for bølgelengdene 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm. Dette deler også målingene opp i fire datasett, ett for hvert bølgelengdeintervall.

Kurveskrik kjennes lett igjen på målinger i kurver, på grunn av et sterkt høyfrekvent skrik mellom 250 Hz og 5 kHz. Noen kurveskrik kan derfor elimineres på grunn av et unormalt stort lydtrykknivå i et lite frekvensintervall. Kurveskrik elimineres helt ved å kun se på målinger fra rette strekninger. Dersom frekvensene som opptrer på en gitt kurve er kjent, kan et også båndstoppfilter brukes.

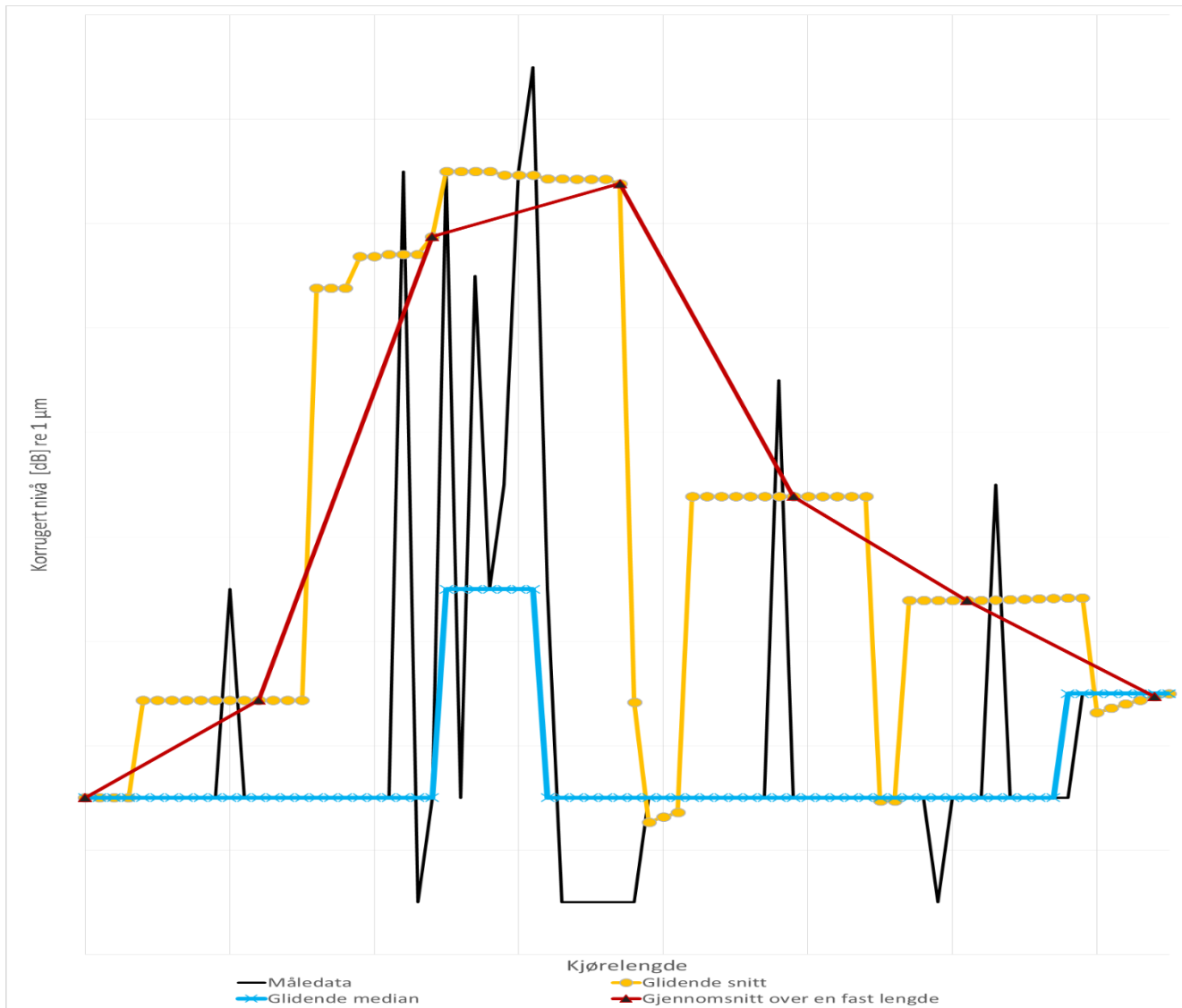
Generelt opptrer impulslyder på grunn av brå endringer i infrastrukturen eller materiell. De blir synlige i målingene da støynivået endres raskt over veldig kort tid. Enkelte impulslyder kommer av komponentene i sporet, for eksempel laskede skjøter eller skinnekryss. Noen komponenter er koordinatfestet, og kan brukes sammen med støydata til å neglisjere impulslyder. Det forventes heller ikke voldsomme endringer av rifler og bølger, slik at de fleste korte lydsignaler kan kategoriseres og elimineres som impulslyder.

Midling av støynivå over en lengre strekning gjør at noen impulslyder elimineres. Lydtrykknivået kan midles med gjennomsnitt over glidende vindu⁷. Dette gjør at ekstremverdier utjevnes og gjennomsnittlig rullestøy kan beregnes for gitte enhetslengder. Tilsvarende er gjort med ARRoW-systemet, se avsnitt 4.6.4 *ARRoW – Acoustic Rail-influence Recording on Wheels (Nederland)*. En slik midling er problematisk når det kommer til store raske variasjoner for kvadratisk middelverdi. Ettersom kvadratiske middelverdi er i annen potens, vil høyt lydtrykknivå gi et enormt bidrag til gjennomsnittlig verdi, sammenlignet med et lavere lydtrykknivå. Hvis for eksempel målt lydtrykknivå på en lengre strekning ligger på 60 dB, og målevognen kjører over en lasket skjøt slik at lydtrykknivået hopper til 110 dB, vil det oppleves et stort hopp også i beregningene for glidende gjennomsnitt. Problemet kan unngås ved å bruke glidende median. Der avvikende impulslyder elimineres da de ikke er typiske verdier i datasettet. Forskjellen mellom glidende median og gjennomsnitt over faste lengder og glidende vindu er vist i Figur 5.6. Etter filtrering for ut kurveskrik og impulslyder representerer lydtrykknivået rifler og bølger

Enhetslengdene midles til større delstrekninger. Dataene midles over en optimal lengde som er praktisk å bruke, og gir en tilstrekkelig nøyaktighet. Dette er gjort både for NoiseMon og ARRoW, og erfaringene fra disse prosjektene tilsier at enhetslengdene kan midles over ca. 100 meter. Se delkapittel 4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*. En slik midling er ikke nødvendig for måleløsningen i startfasen, men bør vurderes ved videre drift av systemet da det gir et betydelig mindre datasett å håndtere. Midlingen kan skje både med glidende vindu, eller over en fast lengde med vanlig akustisk midling fra formel (3.9).

GPS-koordinatene fra Roger 1000 er gitt med én meters nøyaktighet. Enhetslengder på 0,5 meter vil da ikke kunne koordinatfestes med høy nøyaktighet, ettersom usikkerheten er større enn objektet som skal koordinatfestes. En midling over en større måledistanse på 100 meter vil ikke ha dette problemet, da usikkerheten er liten sammenlignet med måledistansen.

⁷ Glidende gjennomsnitt og median er gitt i vedlegg 2



Figur 5.6 - Forskjellen mellom glidende gjennomsnitt, glidende median og aritmetisk middelværdi for en hypotetisk måling. Fordelen med å bruke glidende median fremfor gjennomsnitt over glidende vindu er tydelig; Førstnevnte fjerner i størst grad impulser i måledata.

5.3.6 Analyser

Etter endt databehandling leveres lydtryknivå for bølglengdeintervallene 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm, for hver halvmeter. Roger 1000 leverer fra før av kvadratisk middelværdi for de samme bølglengdeintervallene, og disse omgjøres til korrugert nivå med formel (4.2). Etter databehandlingene leveres også korrugert nivå og lydtryknivå for delstrekninger på 100 m.

Validering av målemetoden gjøres med dataplott, og korrelasjon mellom lydtryknivå og korrugert nivå. Modelleringer i TWINS kan også benyttes til verifisering. Dersom rullende materiell, sporkomponenter og belastning er kjent, kan TWINS brukes til å modellere rullestøy. Slik at målinger av rullestøy kan sammenlignes med modelleringer. TWINS har usikkerhet knyttet til modellering, slik at en fullkommen validering kan bli vanskelig. En omvendt tankegang er mulig, der TWINS valideres med det akustiske målesystemet. Om inndata i programmet kan endres fra rifler og bølger til rullestøy. Kan TWINS bruke lydtryknivå over 1/3-oktavgbånd til å modellere korrugert nivå for rifler og bølger. Dette kan så brukes til sammenligning mot faktiske målinger av rifler og bølger med CAT eller Roger 1000.

Både korrugert nivå og lydtryknivå kan uttrykkes med desibel over 1/3-oktavgbånd, og kan dermed plottes i samme graf med de samme aksene. Dette vil gi et inntrykk over hvilke bølgelengder som akustiske målinger kan registrere, og hvilke systemet bommer på. Dette vil indikere systemets begrensninger.

Korrelasjon beregnes mellom lydtryknivå og korrugert nivå. Korrelasjonen vil gi en indikasjon på hvilke bølgelengder som akustiske målinger kan registrere og til hvilken nøyaktighet. Sagt på en annen måte, resultatet kan fortelle hvilke bølgelengder som bidrar mest til rullestøy.

5.4 Feilkilder

Det er flere potensielle feilkilder i måleoppsettet, knyttet til lydproduksjonen, måleutstyret og databehandlingen. Vedlegg 6 lister opp de ulike feilkildene og hvordan de kan reduseres. Enkelte feilkilder er systematiske og påvirker nøyaktigheten, mens andre er tilfeldige og øker måleusikkerheten.

5.5 Sammenligning med tilsvarende målesystem

Det foreslåtte systemet er sammenlignet med de tilsvarende akustiske målesystemene, omtalt i delkapittel 4.6 *Akustiske målinger av jernbanens infrastruktur*. Tabell 5.1 viser at det foreslåtte systemet minner mest om ARRoW og det belgiske målesystemet. Naturligvis er det et problem at målinger ikke er utført, og at nøyaktigheten til systemene dermed ikke kan sammenlignes. Et annet problem er mangel på utviklet programvare for databehandling, analysering og visualisering. I framtidig arbeid med systemet er utvikling av egen programvare en naturlig oppgave.

Tabell 5.1 - Sammenligning av tilsvarende målesystem. - Strek markerer ingen informasjon. *Nominell hastighet settes til gjennomsnittlig hastighet for Roger 1000.

	ARRoW, Nederland	SMW, Tyskland	Akustisk måling, Belgia	NoiseMon, Storbritannia	IWEN11, Danmark	Akustisk måling, Japan	Foreslått akustisk måling, Norge
Måling							
Testet	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei
Operativt	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	-	Nei
Montert på målevogn	Nei	Ja	Ja	Nei	Nei	Nei	Ja
Montert under vognen	Ja	Nei	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja
Måledistanse	20 m	2 m	-	200 m	0 m	0 m	100 m
Målehyppighet	-	6 mnd	6 mnd	-	-	-	1 år
Databehandling							
Utviklet programvare	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja	Nei
Lvert over 1/3- oktavnband	Ja	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja	Ja
Filtrering av frekvenser	Ja	Nei	Ja	-	Nei	Nei	Ja
Normalisert lydtrykknivå	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei	Ja
Frekvensskifte for hastigheten	Ja	Nei	Ja	Ja	Nei	Nei	Ja
Nominell hastighet	120 km/t	100 km/t	120 km/t	160 km/t	-	-	*
Bruksområder							
Tilstandskontroll	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Støymåling	Ja	Nei	-	Ja	-	-	Ja
Støykorreksjoner	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	-	Ja
Skinneslipning	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja	Ja

6 Diskusjon

Følgende kapittel diskuterer nytteverdien av et akustisk målesystem for rifler og bølger. Hvem har nytte av systemet og til hva? I tillegg omtales også Jernbaneverkets bruk av begrep for rifler og bølger.

6.1 *Nytteverdi av akustiske målinger*

Informasjon om det akustiske målesystemets ytelse og nøyaktighet foreligger ikke. Derfor vil nytteverdien av systemet avgjøres etter hva som er nyttig og hvem som har nytten. Nyttverdien vurderes for både målinger av rifler og bølger, og generell støyregistrering av jernbanen. Både målinger fra Roger 1000 og tankegangen rundt kontinuerlige målinger på alle togsett blir diskutert. En oppsummering er gitt i Tabell 6.1.

Tabell 6.1- Oppsummering av områder der til akustiske målinger av sporet kan ha verdi

Hva?	For hvem?	Hvordan?	Utfordringer
Støykorreksjoner	Jernbaneverket	Gi støykorreksjoner for rifler og bølger	Korrelasjon mellom rifler og bølger, og rullestøy
Støymålinger	Jernbaneverket	Støymålinger ved banen, fra toget	Korrelasjon mellom rullestøy og jernbanestøy
Skinneslipning	Jernbaneverket, entreprenører	Måling av støyreduserende effekt av skinneslipning	Valg av akustiske inngrepskrav
Vedlikehold/ Tilstandsovervåkning	Jernbaneverket, entreprenører	Vedlikehold på grunn av målt støy under Roger 1000	Måling av alle støyfenomen
Komponentvalg	Jernbaneverket, entreprenører, konsulenter	Grunnlag for valg av sporkomponenter med tanke på støy	Måling av alle støyfenomen
Tilstandsovervåkning	Jernbaneverket, togeier	Overvåkning av togenes tilstand	Akustiske målinger på alle tog

6.1.1 Støyberegninger

Sammenlignet med den tyske og sveitsiske støyberegningsmodellen, tar ikke Nord96 store hensyn til rifler og bølger på skinnene. Beregningsmodellen baseres på typiske verdier for rifler og bølger, og om de er større eller mindre enn gjennomsnittet. Dette er ugunstig til å estimere rullestøy, da modellen ikke sier noe om veldig store eller veldig små avvik fra gjennomsnittet, og kan resultere i unøyaktige støyberegninger. Bygninger og aktiviteter risikeres å legges for nære sporet slik at personer opplever økte støyplager som ikke er fanget opp av beregningsmodellen. Noe som igjen gir økte kostnader til støyreducerende tiltak på banen og fasader. Et enkelt alternativt til Nord96 er modellen til Nielsen og Ekberg, omtalt i avsnitt 4.3.5 *Modellering av rullestøy*. Med bruk av en slik modell påvirkes støyberegningene direkte av verdier for rifler og bølger, og avhenger av deres nøyaktighet.

Målenøyaktigheten til Roger 1000 er ikke spesielt god for rifler. Den svenske studien omtalt i 4.3.5 *Modellering av rullestøy* har funnet at akkurat disse gir det største bidraget til rullestøy. Dersom Jernbaneverket skal skaffe data om rifler må de derfor bruke CAT, som har god nøyaktighet og lav hastighet. Dette legger beslag på sporet i større grad enn Roger 1000, og medfører også en økt risiko for operatøren som må gå i sporet.

Ut ifra et støymessig hensyn er det viktig å påpeke forskjellen mellom de forskjellige målemetodene for rifler og bølger. Indirekte målemetoder tar utgangspunkt i konsekvensene av rifler og bølger, slik at en må regne seg tilbake for å finne størrelsen til rifler og bølger. Direkte metoder måler rifler og bølger for så å regne seg fram til konsekvensene. Støy er en konsekvens av rifler og bølger, og ved å bruke målt rullestøy kan en komme fram til en beregning av jernbanestøy, der feilkilden med omregning utelates.

Akustiske målinger kan brukes i støyberegninger. Dette fordi rullestøy ofte er dominerende i støybildet til togsett. For at rullestøy under Roger 1000 skal kunne brukes til å avgjøre vanlig jernbanestøy, må et forholdstall mellom dem finnes. Ved å måle jernbanestøy for Roger 1000 og andre typiske togsett kan dette forholdstallet avgjøres, og brukes til å definere korreksjonsfaktorer til jernbanestøy for typiske baner. Av samme grunn må en kobling mellom rullestøy og passeringsstøy til selve Roger 1000 finnes. Korrelasjon mellom støymåling ved sporet og under Roger 1000 brukes for å avgjøre når rullestøyen dominerer støybildet. Eventuelt kan en sammenligne emisjonsmålinger etter ISO 3095:2013 med rullestøy, 7,5 m fra sporet, beregnet med formel (3.7). Forholdet mellom rullestøy og passeringsstøy kan brukes kun når rullestøy er dominerende.

En slik metode er ikke helt uten feilkilder. Støy kan variere med været og forskjellige objekter ved sporet, men flere målinger vil redusere denne feilen. Rullestøy er ikke den eneste støykilden i jernbanestøy. Enkelte støyfenomener kan under de rette omstendighetene overgå rullestøyen og ta over dominansen.

For eksempel slagstøy, kurveskrik, tyfoner eller pådrag fra motoren. Reduksjon av disse kan gjøres med filtrering i databehandlingen.

Figur 4.15 fra delkapittel 4.1 *Generelt om jernbanestøy* forteller viktigheten av målekampanjer og nøyaktige beregninger. På slutten av 90-tallet viste beregninger at antall boliger med høyt innendørs støynivå lå på omlag 3000. Etter noen år viste mer detaljerte beregninger at tallet lå nærmere 850 boliger. På disse boligene utførte Jernbaneverket støyreducerende tiltak, men det ble allikevel i 2012 funnet 51 boliger med for store støyverdier, så nye tiltak måtte gjøres. Nøyaktighet i beregninger og kontinuerlige målinger er derfor viktig for å beholde et lavt støynivå ved jernbanen til enhver tid.

Basert på forholdstallet kan støyverdier for spesifikke spor beregnes. Forskjellen mellom disse og beregningene fra Nord96 gir støykorreksjonen. I tillegg kan støyverdiene benyttes til kontrollmåling og støymåling generelt. Det akustiske målesystemet er dermed nyttig for nøyaktigheten til støyberegninger og støymåling, og kan for eksempel brukes til arbeid med reguleringsplaner eller til å avgjøre fasadetiltak.

6.1.2 Målinger av rifler og bølger

Med et konsistent måleresultatet og liten usikkerhet kan akustiske målinger brukes til å registrere de faktiske verdiene til rifler og bølger. Korrelasjon mellom lydtrykknivå under Roger 1000 og korrugert nivå på flere strekninger brukes for å avgjøre om støyverdiene representerer rifler og bølger. Naturligvis krever dette en overføringsfunksjon som tar høyde for kontaktfiltereffekten og dynamikken til sporet og toget. Målesystemet kan da brukes på lik linje med vanlige målinger fra Roger 1000.

Hvis nøyaktigheten viser seg å være for dårlig til å avgjøre rifler og bølger kan muligens resultatet fortsatt brukes, da som estimat på rifler og bølger. Estimater vil finne deler av skinnen som ikke trenger videre måling med Roger 1000. Det vil si at systemet brukes for å friskmelde noen skinner, og kan fungere som et supplement til Roger 1000. I en slik supplerende løsning kan vanlige togsett utrustes med mikrofoner som rapporterer dersom rifler og bølger er over gitte krav, og må måles av Roger 1000 eller CAT.

6.1.3 Støyreduksjon og vedlikehold

Målesystemet kan bidra til å avgjøre faktorer som påvirker både støyproduksjon og dannelse av rifler og bølger. I dag arbeider Jernbaneverket ut fra en strategi om å måle rifler og bølger en gang i året. Ved å måle rifler og bølger, og sette dette i sammenheng med kunnskap om sporet og materiell kan en med store datasett finne sammenhenger mellom utvalgte parametere. Potensielt kan det finnes erfaringstall på utviklingen til rifler og bølger. Det samme kan også sies for andre skader og sporkomponenter, om systemet oppgraderes til å registrere dem. Nyten av dette er til prediktivt vedlikehold da forutsigbarheten til skinnene økes.

Fra en akustikers synspunkt er det problematisk at nye spor ikke prosjekteres med komponenter som i seg selv er støyreduserende. Gjennomgangen i delkapittel 4.5 *Rullestøy i Europa* viser at mange fokuserer på å skjerme for støy, ikke redusere selve støyproduksjonen. Med andre ord er støy en konsekvens mange prøver å ta høyde for i etterkant av trasévalg og valg av sporkomponenter. Valg gjøres ofte av hensyn til økonomi, dermed er nøyaktige mål på effekt og kostnad viktig for beslutningstakere.

Akustiske målinger på typiske spor under reelle kjøreforhold gir etter hvert støydata for de ulike komponentene i sporet, og sørger for et nøyaktig tallgrunnlag til valg og prosjektering av nye baner. En fordel med dette er at komponenter som ikke ligger inne i jernbaneverkets database BaneData, kan koordinatfestes på grunnlag av lydsignatur.

Hvilke støyreduserende tiltak som bør brukes og effekten av dem kan avgjøres av akustiske målinger. Støynivået før og etter et tiltak forteller noe om tiltakets støyreduserende effekt. Dette gjelder naturligvis ikke for alle støyreduserende tiltak, men bør fungere greit på de tiltak som reduserer støy fra kontakten mellom hjulet og skinnen. Til eksempel smøring av skinner i kurver, reprofilerings av hjul og skinneslipning.

Det er et problem at Jernbaneverket i dag kun har ett anbefalt krav til rifler og bølger av støyhensyn, ca. 25 dB, gitt i avsnitt 4.2.5 *Krav til rifler og bølger*. Avsnitt 4.3.5 *Modellering av rullestøy* viser at rullestøy øker med faktor på 0,9 og 0,3 for passasjertog og godstog, for rifler med bølgelengder under 80 mm. Dette gir en støyøkning på 22,5 dBA for passasjertog og 7,5 dBA for godstog for Jernbaneverkets støykrav. Allerede før kravet overskrides kan altså støybidraget sees på som betraktelig. Kontrollkravene etter skinneslipning er derimot bedre, med kun 9,9 dBA støyøkning for passasjertog og 3,3 dBA for godstog. Enda bedre er det for kravet fra ISO 3095:2013 der støyøkningen er på 2,6 dBA for passasjertog og 0,9 dBA for godstog. Krav til rifler på grunn av støy kan da vurderes. Til dette er muligens kontrollkravene etter skinneslipning et godt utgangspunkt siden måleutstyret til dette allerede er i bruk.

På grunn av faktoren på 0,9 indikerer store støyverdier at skinnen bør slipes. Tilstandskontroll av rullestøy kan derfor inngå i en forebyggende vedlikeholdsstrategi av skinner. Der formålet er vanlig skinneslipning på grunn av økte støyverdier. Kontroll og korrektivt vedlikehold planlegges ut ifra akustiske målinger av rifler og bølger. Faktisk er en korrektiv akustisk skinneslipningsstrategi forebyggende for vanlig skinneslipning, siden kravene til akustisk skinneslipning blir lavere enn vanlig skinneslipning. Dette gjør at dersom akustisk skinneslipning utføres vil ikke rifler og bølger bli så store at de må slipes på grunn av sikkerhet mot avsporing, nedbryting og komfort. Ergo er skader oppdaget og fjernet før de er blitt et problem.

Målesystemet gir en mulighet for å lage en klassifisering av skinner for rifler og bølger. Det er naturlig at en slik klassifisering settes i sammenheng med en eventuell akustisk skinneslipningsstrategi, tilsvarende

som i Danmark, omtalt i 4.3.6 *Reduksjon av rullestøy*. Da gitt at måleutstyret som brukes greier å skille de forskjellige klassene fra hverandre. Klassifiseringen trenger ikke å basere seg på krav til rifler og bølger, den kan like så godt basere seg på krav til rullestøy. For eksempel som absolutte støykrav som i Nederland, eller som relative krav til støyøkning som i Tyskland.

En akustisk skinnslipningsstrategi trenger primært to prosesser, kontroll av rifler og bølger, og selve slipingen. Det første kan muligens unngås ved å slippe skinner etter en gitt periode eller en gitt antall passeringer. Likevel må det kontrollmåles for at strategien skal være gyldig. På denne måten kan det etableres en forebyggende skinnslipningsstrategi med utgangspunkt i faste slipeintervaller. Alternativt kan tilstandsbasert vedlikehold benyttes, der skinnen slipes dersom målinger indikerer at korrugeringen kommer til å gå over kravene før neste kontroll. Dette betyr at måling av rullestøy kan brukes i forebyggende vedlikehold til tilstandsovervåking og kontroll.



Figur 6.1 - Dansk slipetog i november 2011. Foto: Peter Elmholt, Banedanmark

6.1.4 Kontroll av hjul

I dag inspiseres hjulene og boggien primært manuelt. Det finnes en automatisk lyttestasjon på Østlandet, men den greier ikke å kontrollere alt materiell i landet. En kontinuerlig akustisk måling av alle tog kan avgjøre tilstanden til selve toget, da en endring i frekvens og lydstyrke kan skyldes en endring av tilstanden til materiell. Ved innsamling til store datasett kan en etter hvert få erfaringstall på tilstanden til rullende materiell. Feil på hjul og togsett kan finnes fordi de gir systematisk "feil" lydtrykknivå og "feil" frekvens. Eksempelvis vil slitte hjul øke rullestøy og slagstøy. Måleutstyr av denne sorten har derfor nytteverdi for vedlikehold av materiell.

Hjulenes tilstand inngår i vedlikeholdsstrategier for støyreduksjon i mange land. Tar en utgangspunkt i en korrektiv tankegang, utføres tiltak dersom kravene til hjulets overflate er overgått. Dette gjør at et hvert

togsett må kontrolleres. For akustisk kontroll vil det si at alle togsett må ha mikrofoner ved hvert hjul, noe som gir betydelige kostnader for togeier. Et billigere alternativ er en intervallbasert tankegang med utgangspunkt i vedlikehold etter et bestemt antall kjørte kilometer, på bakgrunn av erfaringer fra et utvalg av togsett. Da utrustes færre tog med mikrofoner, men vil allikevel ha en økt målekostnad sammenlignet med dagens situasjon.

6.1.5 Kostnad

Det akustiske målesystemet må sees på i en større økonomisk sammenheng der den totale kostnaden veies opp mot fordelene og ulempene av systemet. Noen av kostnadene er engangsinvesteringer, slik som prisen på selve måleutstyret og installasjonen. Andre er løpende utgifter, som drift og vedlikehold. Kostnaden kommer også som en økt arbeidsmengde for operatørene på Roger 1000, og for de som skal behandle data i ettertid. Dersom systemet skal implementeres kan noe av kostnadene reduseres med store innkjøp og optimalisering av arbeidsrutiner. Målesystemet har også en potensiell gevinst eller inntjening. Dette er den potensielle økonomiske besparelsen samfunnet kan få med økt nøyaktighet på støyberegninger, bedre vedlikeholdsrutiner og økt levetid til spor og materiell. For at akustiske målinger kan implementeres må dermed metoden og utstyret være økonomisk bærekraftig slik at inntjeningen veier opp for kostnaden.

6.2 *Bruk av korrugert nivå*

Jernbaneverket og andre infrastruktureiere bruker forskjellige uttrykk for amplituden til rifler og bølger. Jernbaneverkets tekniske regelverk bruker kvadratisk middelvei og topp-til-bunn-verdi, Jernbanekompetanse.no bruker bølgedybde og amplitude, ansatte i Jernbaneverket bruker bølgehøyde og bølgedybde, og Norsk standard bruker topp-til-topp-verdi. Det er hensiktsløst å operere med så mange forskjellige uttrykk for den samme størrelsen, spesielt når flere av dem betyr akkurat det samme. Dette er noe som kan skape forvirringer og problemer ved beregninger.

Fra et akustisk ståsted kan korrugert nivå settes som den foretrukne standarden. Den største fordelen med dette er til sammenligning og visualisering med støy, da lydtrykknivå og korrugert nivå er begge definert med enheten desibel. Problemet med denne størrelsen er at den ikke er så intuitiv for mange på grunn av den logaritmiske skaleringene av verdiene. Altså at en halvering av kvadratisk middelvei kun tilsvarer ca. 3 dB reduksjon i korrugert nivå.

Alternativet er den kvadratiske middelveien. Størrelsen brukes slik at både positive og negative verdier registreres. Til motsetning vil negative verdier i vanlig aritmetisk middelvei eliminere de positive. Lydtrykk oppgis vanligvis i kvadratisk middelvei, i tillegg bruker Teknisk Regelverk og Roger 1000 verdier i kvadratisk middelvei så størrelsen er ikke ukjent. På grunn av dette kan derfor Jernbaneverket vurdere å bruke kvadratisk middelvei eller korrugert nivå som uttrykk for størrelsen til rifler og bølger.

7 Konklusjon og anbefalinger

Dette kapitlet kommer med konklusjoner og anbefalinger vedrørende det foreslåtte akustiske målesystemet for rifler og bølger. Med bakgrunn i problemstillingen for oppgaven: Hvordan kan rifler og bølger måles som rullestøy fra Roger 1000, og hvilke muligheter gir dette?

En målemetode for rullestøy er utviklet. Denne tar utgangspunkt i målinger med mikrofoner montert under den norske målevognen Roger 1000. Lydtrykknivå under vognen måles og behandles, slik at målesystemet leverer lydtrykknivå for bølgelengder på 10-30 mm, 30-100 mm, 100-300 mm og 300-1000 mm. Selv om teori og tilsvarende målemetoder viser at metoden skal fungere, er ikke det foreslåtte systemet testet, så endelig konklusjon er derfor umulig. Oppgavens hovedmål er derfor kun delvis oppfylt.

Sammenlignet med tilsvarende akustiske måleløsninger minner det foreslåtte målesystemet mest om ARRoW-systemet og målesystemet brukt i Belgia. Kostnad og nøyaktighet er ikke identifisert, så en fullstendig sammenligning med tilsvarende system er ikke gjort.

Akustiske målinger av rifler og bølger er nyttige til flere formål. For støyberegninger kan målesystemet gi realistiske støykorreksjoner til jernbanestøy, da målesystemet gjør at rullestøy blir tatt mer hensyn til enn i dag. Akustiske målinger er nyttig for vedlikeholdsplanlegging ettersom systemet kan brukes til tilstandsovervåkning av skinnene. Slik at forebyggende vedlikehold som skinneslipning, kan utføres på grunn av målte støyverdier over sporet. Målesystemet vil også kunne kontrollere støyreducerende effekt av skinneslipning. Videre vil utviklingen til rullestøy over tid kan også registreres, som kan brukes til å planlegge prediktivt vedlikehold. Det konkluderes derfor med at det foreslåtte akustiske målesystemet er nyttig for vedlikehold og vedlikeholdsplanlegging av skinner.

I utvidet forstand med målinger av flere støyfenomen, vil akustiske målinger kunne avgjøre støysignaturen til sporets komponenter. Dette kan brukes til valg av sporkomponenter i prosjektering. Systemet vil da også kunne registrere flere skader, som igjen er nyttig for videre vedlikehold. Med mikrofoner på flere togsett kan i tillegg togenes tilstand overvåkes, spesielt gjelder dette for hjulene og boggien. Et utvidet akustiske målesystemet vil dermed være nyttig for valg av sporkomponenter og vedlikehold av tog.

Det anbefales at Jernbaneverket ser videre på prinsippet om å bruke akustiske målinger til å avgjøre sporets tilstand. Metoden som er beskrevet i 5 *Målesystem* bør utprøves. Anbefalinger går videre på å optimalisere oppsettet og metoden. I tillegg bør det lages et eget program til å analysere måledataene. Kostnader til utstyr, installasjon og drift bør også undersøkes. Eventuelt kan et innkjøp av tilsvarende måleutstyr fra Belgia eller Nederland vurderes.

Jernbaneverket anbefales også å konsekvent bruke korrugert nivå og kvadratisk middelvei som uttrykk for størrelsen på rifler og bølger. Da dagens ordbruk kan virke forvirrende.

8 Videre arbeid

Videre arbeid med det foreslåtte akustiske målesystemet anbefales. Siden systemet ikke er utprøvd er det naturlig å utføre tester av metoden, beskrevet i delkapittel 5.2 *Målemetode*. Det er også naturlig å se på hvilke kostnader dette systemet vil ha, og hvordan den foreslåtte målemetoden kan forbedres.

Dersom Jernbaneverket anskaffer to Nor140 lydsmålere med mikrofoner, forforsterkere, kabler og fester bør systemet testes. Det er to grunner til dette; det første er å demonstrere at systemet fungerer, og den andre er å avgjøre hvilken datakvalitet systemet kan levere. Om kvaliteten er god nok kan den brukes til å registrere rifler og bølger, klassifisere skinner, lage støykorreksjoner og finne effekten av skinnestlipning.

Jernbaneverket bør arbeide med å lage en klassifisering basert på rullestøy. Denne må være logisk, med intervall som kan gjenkjennes igjen av det akustiske målesystemet. Det vil si at intervallene i klassifiseringen er større enn usikkerheten til målingene. Klassifiseringen brukes til å avgjøre når skinnestlipning skal utføres eller til å lage støykorreksjoner til beregningsmodellen. Ettersom det er rullestøy som avgjør klassene, kommer hjulets overflate til å definere den beste klassen. Det vil si at for skinner bedre enn den beste klassen, er det hjulet som bidrar mest til rullestøy.

Akustisk skinnestlipning basert på akustiske målinger med Roger 1000 kan utføres. Det foreslås at Jernbaneverket vurderer den tyske eller den nederlandske akustiske skinnestlipningsstrategien. Spesielt på baner tett på bebyggelsen i byer. For å tilpasse disse strategiene til norske forhold kan Jernbaneverket bruke akustiske målinger av sporet til å avgjøre inngrepskrav for skinnestlipning, med hensyn til støyreduksjon.

En videre arbeidsoppgave er å utvikle et eget program som automatiserer databehandlingen vist i vedlegg 4 og 5. Programvaren kan også utformes til å lage støykorreksjoner, og for å klassifisere skinnene.

Kostnadene til målesystemet må avklares før det settes i drift. Hvis akustisk registrering av sporet skal ha en framtid, må informasjonen målesystemet gir veies opp mot den kostnaden det pålegger Jernbaneverket. Med kostnad menes ikke bare de rent økonomiske, men også tidsbruk for installasjon, drift og vedlikehold. Eventuelt kan Jernbaneverket se på muligheten for innkjøp av tilsvarende akustiske målesystem.

Målesystemet kan optimaliseres slik at driften av systemet gjøres enkel, og gir et nøyaktig resultat. Ved kjøring i flere hastigheter under relativt like forhold kan hastigheten som gir best nøyaktighet finnes. Kjøring kan også gjøres på spor med varierende omgivelser og varierende klima for å avgjøre når metoden ikke kan benyttes. Dette gir systemets begrensninger og potensielle utviklingsområder.

Store datamengder om støy i sporet kan over tid opparbeides med å bruke målesystemet. Innsamlet støydata kan behandles for gjenkjenne skader i sporet på grunn av støysignatur, og for å avgjøre

støybidraget til enkelte sporkomponenter. Analyse av datasettene kan også gi informasjon om utviklingen til sporet over tid. Videre arbeid går også på å utruste flere togsett med mikrofoner, da for å undersøke overvåkning av togenes tilstand. Det foreslås at målinger fra flere togsett innføres dersom det bevises at systemet kan måle flere støyfenomener, og at systemets effekt kan forsvare kostnaden.

9 Referanser

1. ASMUSSEN, B., ONNICH, H., STRUBE, R., GREVEN, L. M., SCHRÖDER, S., JÄGER, K. & DEGEN, K. G. 2006. *Status and perspectives of the “Specially Monitored Track”*. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 1070-1077.
2. CAWSE, S. H., AEJ.; WRIGHT, CE.; 2002. *Feasibility of detecting rail flaws using acoustic equipment fitted to vehicles. Acoustic Track Monitoring: Phase 1: Initial Data Gathering and Analysis (T060a Report)*. United Kingdom: RSSB; AEA Technology.
3. DANNESKIOLD-SAMSØE, U. 2004. *Noise as part of a European rail grinding strategy*. EU Research Programme GROWTH.
4. DB NETZ AG 2013. *Silent freight wagons – funding systems for rail freight noise mitigation*. In: AG, D. N. (ed.). Frankfurt am Main: DB Netz AG.
5. DB NETZ AG. 2015. *Noise protection measures and innovative new technologies [Online]*. DB Netz AG. Available: http://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-en/start/technic/noise/8843064/noise_protection_2.html?start=0 [Accessed 13.03 2015].
6. DINGS, P., VERHEIJEN, E. & KOOTWIJK-DAMMAN, C. 2000. *A TRAFFIC-DEPENDENT ACOUSTICAL GRINDING CRITERION*. *Journal of Sound and Vibration*, 231, 941-949.
7. DIREKTORATET FOR BYGGEKVALITET 2011. *Veiledning om tekniske krav til byggverk, Generelle krav om lyd og vibrasjoner*. In: DIREKTORATET FOR BYGGEKVALITET (ed.). Oslo: Direktoratet for byggkvalitet.
8. DWIGHT, R. A. & JIANG, J. 2006. *Analysis of wheel-rail noise*. Australia patent application PCT/AU2005/001291.
9. DYBVIG, D. D., DYBVIG, M. & ØRDAL, S. L. 2003. *Det tenkende mennesket: filosofi- og vitenskapshistorie med vitenskapsteori*, Trondheim, Tapir akademisk.
10. EUROPEAN RAILWAY AGENCY 2014. *Commission Regulation (EU) No 1304/2014 of 26 November 2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem ‘rolling stock – noise’ amending Decision 2008/232/EC and repealing Decision 2011/229/EU Text with EEA relevance* In: AGENCY, E. R. (ed.). European Railway Agency.
11. FERROVIE DELLO STATO ITALIANE S.P.A. 2011-2013. *Rapporto di sostenibilità*. In: FERROVIE DELLO STATO ITALIANE S.P.A. (ed.). Roma: Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A.,
12. FODIMAN, P. & STAIGER, M. 2006. *Improvement of the noise Technical Specifications for Interoperability: The input of the NOEMIE project*. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 475-484.
13. FRABETTI, P. & MEZGER, S. 2014. *Lärmsanierung Standbericht Nr. 30*. In: AG, S. (ed.). Bern: SBB AG.
14. GRASSIE, S. & KALOUSEK, J. 1993. *Rail corrugation: characteristics, causes and treatments*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 207, 57-68.

15. GRASSIE, S. L., SAXON, M. J. & SMITH, J. D. 1999. MEASUREMENT OF LONGITUDINAL RAIL IRREGULARITIES AND CRITERIA FOR ACCEPTABLE GRINDING. *Journal of Sound and Vibration*, 227, 949-964.
16. GRATACOS, R. M. P., MORA, P., NIELSEN, J., FENG, J. & CERVELLO, S. 2013. Definition of wheel maintenance measures for reducing ground vibration. SBB, Alstom, Chalmers University of Technology, DB, Lucchini.
17. HARDY, A. & JONES, R. 2004. Rail and wheel roughness-implications for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise procedure. *AEA Technology Rail*, 1, 46-52.
18. HECHT, M., WUNDERLI, J., THRON, T. & SEHU, D. 2012. sonRAIL–The New Swiss Calculation Model for Railway Noise. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer.
19. HOLTET, T. 2014. Smartere Vedlikehold. *Jernbanemagasinet*, p.24.05.
20. HOMMEDAL, I. & RINGHEIM, M. 2010. Støy frå passerande tog Samanheng mellom skinnetilstand og støy. Voss: Kilde Akustikk AS.
21. HUSØY, L. J. 2014. Korrugering og rullestøy. NTNU.
22. IGELAND, A. 1996. Railhead corrugation growth explained by dynamic interaction between track and bogie wheelsets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 210, 11-20.
23. INFRABEL S.A. 2015. Blending into the landscape [Online]. Brussels: INFRABEL S.A. Available: <http://www.infrabel.be/en/about-infrabel/environment/blending-landscape> [Accessed 12.03 2015].
24. IÑIGO, G. C. 2011. Plan de Acción Lote 1. Área de Madrid-Castilla-La Mancha. In: DIRECCIÓN GENERAL DE SEGURIDAD, O. Y. R. H. D. D. C. Y. M. A. (ed.). Madrid: Ministerio de Fomento, Dirección General de Infraestructuras Ferroviarias.
25. IWNICKI, S. 2006. *Handbook of railway vehicle dynamics*, Boca Raton, CRC/Taylor & Francis.
26. JENSEN, T., CHAUHAN, S., HADDAD, K., SONG, W. & JUNGE, S. 2015. Monitoring Rail Condition Based on Sound and Vibration Sensors Installed on an Operational Train. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer.
27. JERNBANEVERKET 1999. I535. Lærebøker i Jernbaneteknikk Jernbaneverket.
28. JERNBANEVERKET 2000-2014. Miljørappport 1999 - Miljørappport 2013. In: JERNBANEVERKET (ed.).
29. JERNBANEVERKET 2004. Evaluering av støyeffekt som følge av skinnesliping. Jernbaneverket.
30. JERNBANEVERKET 2011. Miljørappport 2010. In: JERNBANEVERKET (ed.).
31. JERNBANEVERKET 2014a. Jernbanestatistikk 2014. In: JERNBANEVERKET (ed.).
32. JERNBANEVERKET. 2014b. Overbygning/Vedlikehold/Skiner [Online]. Available: https://trv.jbv.no/wiki/Overbygning/Vedlikehold/Skiner#Rifler_og_b.C3.B8lger [Accessed 21. november, 2014].
33. JERNBANEVERKET. 2014c. Støy [Online]. Available: <http://miljørappport2013.jernbaneverket.no/omgivelser/stoy/> [Accessed 22.05 2015].

34. JONASSON, H. G. & STOREHEIER, S. 2001. *Nord 2000. New Nordic prediction method for rail traffic noise. SP rapport, 11.*
35. JONES, R. *Remote monitoring systems for rail corrugation and curve squeal. Proceedings of the Railway Technology Conference Railtex 2000, 2000.*
36. JONES, R. R. K. & PACKHAM, A. J. *Acoustic Monitoring of Rail-Head Roughness for Targeted Grinding and Noise Modelling. Railway Condition Monitoring, 2006. The Institution of Engineering and Technology International Conference on, 29-30 Nov. 2006 2006. 61-62.*
37. KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B. & SANDERS, J. V. 2000. *Fundamentals of acoustics, New York, Wiley.*
38. KRYLOV, V. V. 2001. *Noise and vibration from high-speed trains, London, Thomas Telford.*
39. KUIJPERS, A. 2008. *Rail roughness monitoring in the Netherlands. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Springer.*
40. KUIJPERS, A. 2015. *Rapid measurement of sound, roughness and defects of railway track with ARRoW [Online]. M+P consulting engineers, Müller-BBM Gruppe. Available: <http://www.mplusp.eu/products/rapid-measurement-sound-roughness-and-defects-railway-track-arrow> [Accessed 23.05 2015].*
41. KUIJPERS, A., SCHWANEN, W. & BONGINI, E. 2012. *Indirect rail roughness measurement: the ARRoW system within the LECAV project. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Springer.*
42. LUTZENBERGER, S. 2015. *Noise and vibration control on railway tracks [Online]. München: Müller-BBM Gruppe. Available: <http://www.muellerbbm.com/technology/railway-technology/track-systems/> [Accessed 23.05 2015].*
43. MEO, M. 2014. *6 - Acoustic emission sensors for assessing and monitoring civil infrastructures. In: WANG, M. L., LYNCH, J. P. & SOHN, H. (eds.) Sensor Technologies for Civil Infrastructures. Woodhead Publishing.*
44. MERMEC 2000. *Prinsipp Rifler og Bølger. In: S.P.A., M. M. (ed.). Monopoli.*
45. MOEHLER, U., LIEPERT, M., KURZE, U. & ONNICH, H. 2008. *The New German Prediction Model for Railway Noise "Schall 03 2006"–Potentials of the New Calculation Method for Noise Mitigation of Planned Rail Traffic. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Springer.*
46. MORTENSEN, F. R., FINNE, P. & DEIGAARD, L. 2001. *Rail Grinding as a Noise Control Measure. København: ScanRail Consult Danish National Railway Agency.*
47. MORTENSEN, L. 2013. *Banedanmarks støjhandlingsplan. In: BANEDANMARK (ed.). Banedanmark.*
48. MURPHY, E. & KING, E. A. 2014. *Chapter 2 - Principles of Environmental Noise. In: KING, E. M. A. (ed.) Environmental Noise Pollution. Boston: Elsevier.*
49. MÜLLER, G. & MÖSER, M. 2013. *Handbook of Engineering Acoustics, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.*
50. NETWORKRAIL. 2015. *Reducing track noise [Online]. Available: <http://www.networkrail.co.uk/improvements/reducing-track-noise/?cd=1> [Accessed 16.03 2015].*

51. NIELSEN, H. L. & RINGHEIM, M. 1996. *Railway traffic Noise: the Nordic prediction method*, København, Nordisk Ministerråd.
52. NIELSEN, J. B., ERIC; LÖLGEN, THOMAS; MÜLLER, ROGER; STALLAERT, BERT; PESQUEUX, LISE 2013. *Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities Important for Ground-Borne Vibration*. Chalmers University of Technology; Trafikverket; DB; SBB; D2S International; Alstom.
53. NIELSEN, J. C. O. 2003. *Numerical prediction of rail roughness growth on tangent railway tracks*. *Journal of Sound and Vibration*, 267, 537-548.
54. NIELSEN, J. C. O. & EKBERG, A. 2011. *Acceptance criterion for rail roughness level spectrum based on assessment of rolling contact fatigue and rolling noise*. *Wear*, 271, 319-327.
55. NORSONIC 2013. *Sound Analyser Nor140*. Lierskogen: Norsonic.
56. NORSONIC. 2015. *Sound Analyser Nor140 - "MULTI-TOOL"* [Online]. Lierskogen: Norsonic. Available: http://www.norsonic.com/no/en/products/sound_level_meters/sound_analyser_nor140/Sound+Analyser+Nor140.9UFRjQYk.ips [Accessed 29.05.2015 2015].
57. OOSTERMEIJER, K. H. 2008. *Review on short pitch rail corrugation studies*. *Wear*, 265, 1231-1237.
58. PIKA, S. A. 2012. *Støy og vibrasjoner* [Online]. *jernbanekompetanse.no*. Available: http://jernbanekompetanse.no/wiki/St%C3%B8y_og_vibrasjoner#Tiltak_mot_jernbanest.C3.B8y [Accessed 23.03 2015].
59. PIKA, S. A. 2015. *Vedlikeholdsmetodikk* [Online]. *jernbanekompetanse.no*. Available: http://jernbanekompetanse.no/wiki/Vedlikeholdsmetodikk#Strategi_for_skinner [Accessed 24.05 2015].
60. RAILMEASUREMENTS LTD. 2015. *What is CAT?* [Online]. Cambridge: RailMeasurements Ltd. Available: <http://railmeasurement.com/corrugation-analysis-trolley-cat/> [Accessed 23.05 2015].
61. RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE. 2015. *luttre contre le bruit* [Online]. Réseau Ferré de France: Paris. Available: <http://www.rff.fr/fr/developpement-durable/nos-projets/lutter-contre-le-bruit> [Accessed 13.03 2015].
62. SAMSET, K. 2014. *Kvalitativ forskning. Forskningsmetodekurset 2014*. Trondheim.
63. SCHULTE-WERNING, B., JÄGER, K., STRUBE, R. & WILLENBRINK, L. 2003. *Recent developments in noise research at Deutsche Bahn (noise assessment, noise source localization and specially monitored track)*. *Journal of Sound and Vibration*, 267, 689-699.
64. SCOSSA-ROMANO, E. & OERTLI, J. 2012. *Rail Dampers, Acoustic Rail Grinding, Low Height Noise Barriers*. Bern: International Union of Railways.
65. SINDEREN, M. G.-V. 2014. *Jaarverslag 2013*. In: PRORAIL (ed.). Utrecht: ProRail.
66. STANDARD NORGE 2009. NS-EN 15610:2009. *Jernbane Støy Måling av skinneruhet relatert til støytvikling*. Standard Norge.
67. STANDARD NORGE 2010a. NS-EN 13306:2010. *Vedlikehold Vedlikeholdsterminologi*. Standard Norge.

68. STANDARD NORGE 2010b. NS 8177: 2010. *Akustikk Måling av lydtrykknivå fra togtrafikk. Standard Norge.*
69. STANDARD NORGE 2012. NS-EN 13231-3:2012. *Jernbane Spor Godkjenning av arbeid Del 3: Godkjenning av reprofilerings av skinner i spor. Standard Norge.*
70. STANDARD NORGE 2013. NS-EN ISO 3095: 2013. *Jernbane Akustikk Måling av støy fra skinnegående kjøretøy Standard Norge.*
71. THE TRANSPORTATION SAFETY BOARD OF CANADA. 2013. *Railway Investigation Report R07M0017 [Online]. Transportation Safety Board of Canada. Available: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rappports-reports/rail/2007/r07m0017/r07m0017.asp> [Accessed 28.05 2015].*
72. THOMPSON, D. J., JONES, C. J. C. & GAUTIER, P.-E. 2009. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control, Amsterdam, Elsevier.*
73. TORSTENSSON, P. 2012. *Rail corrugation growth on curves, Chalmers University of Technology.*
74. TRACKSIDE INTELLIGENCE PTY LTD 2015. *RailBAM. Adelaide, Australia: Trackside Intelligence PTY LTD.*
75. TSUNASHIMA, H., KOJIMA, T., MARUMO, Y., MATSUMOTO, A. & MIZUMA, T. *Condition monitoring of railway track and driver using in-service vehicle. Railway Condition Monitoring, 2008 4th IET International Conference on, 18-20 June 2008 2008. 1-6.*
76. TSUNASHIMA, H., NAGANUMA, Y., MATSUMOTO, A., MIZUMA, T. & MORI, H. *Japanese railway condition monitoring of tracks using in-service vehicle. Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), 5th IET Conference on, 29-30 Nov. 2011 2011. 1-6.*
77. TÖRNQUIST, T. 2012. *Trafikverkets miljörappport 2011. In: TRAFIKVERKET (ed.) 2 ed.: Trafikverket.*
78. VASSET, T. 2014. *Vurdering av slipebehod SB. Slipeseminar 2014. Kristiansand: Jernbaneverket.*
79. VERHELST, W. 2014. *Direct and indirect monitoring of vibration sources at the INFRABEL network. Vienna: INFRABEL I-AM.23.*
80. VOSSLOH RAIL SERVICES 2015. *Rail care at full speed. Seevetal: Vossloh Rail Services GmbH.*
81. WAHLQUIST, H., HOLMLEID, T. & BRUVOLL, A. 2015. *Metodehåndbok. In: JERNBANEVERKET (ed.) Samfunnsøkonomiske analyser for jernbanen 2015. Hamar: Jernbaneverket.*
82. WEISSTEIN, E. W. 2015a. *Correlation Coefficient [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/CorrelationCoefficient.html> [Accessed 05.06 2015].*
83. WEISSTEIN, E. W. 2015b. *Least-Square Fitting [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html> [Accessed 05.06 2015].*
84. WEISSTEIN, E. W. 2015c. *Moving Average [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/MovingAverage.html> [Accessed 2015].*
85. WIBETOE, G. 2009a. *nøyaktighet [Online]. Store Norske Leksikon. Available: <https://snl.no/n%C3%B8yaktighet> [Accessed 05.06 2015].*

86. WIBETOE, G. 2009b. *presisjon - kjemi* [Online]. *Store Norske Leksikon*. Available: <https://snl.no/presisjon%2Fkjemi> [Accessed 05.06 2015].

10 Vedleggsliste

- 1) *Oppgavetekst*
- 2) *Matematiske og statistiske uttrykk*
- 3) *Måling*
- 4) *Databehandling*
- 5) *Analyse*
- 6) *Feilkilder*
- 7) *Støymålinger*

1) Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4955 Jernbane, masteroppgave)

VÅREN 2015

for

Leiv Jørgen Husøy

Akustisk måling for kontroll av jernbanens infrastruktur

BAKGRUNN

En sikker, punktlig og miljøvennlig jernbane krever en godt vedlikeholdt infrastruktur. Til å avgjøre infrastrukturens tilstand benyttes i dag blant annet målevognen Roger 1000. Målesystemet til Roger 1000 er sammensatt av fire delmålesystem som måler sporgeometri, skinneprofil, kontaktledningen, og rifler og bølger på skinnhodet. Målevognen registrerer den vertikale differansen mellom vognkassen og hjulakselen ved hjelp av en laser, og tar hensyn til fjæringen i systemet for å beregne riktig relativ høyde på skinnen. Dette gjør at Roger 1000 måler konsekvensene av varierende høyde på skinnen, med andre ord er dette en indirekte målemetode. Fordelen med å benytte Roger 1000 til dette er at man kan samle mye data på relativt kort tid uten å legge et stort beslag på sporet, sammenlignet med direkte målemetoder. Dagens måleteknikk tillater målinger med Roger 1000 opptil 160 km/t. Alternativt kan også skinnens overflate måles direkte, men dette er en langsom og tidkrevende prosess som krever av sikkerhetsmessige årsaker, at tog ikke kan kjøre på strekningen. Fordelen med direkte målinger er nøyaktighet, og muligheten til å måle små bølgelengder. Roger 1000 måler bølgelengder ned til 40 mm.

For hastigheter lavere enn 300 km/t domineres jernbanestøy av rullestøy. Dette er den lyden som skapes når rullende materiell vibrerer på grunn av en vertikal forskyvning, som igjen skyldes høydeforskjeller

eller ujevnheter på både skinne og hjul. Denne høydevariasjonen på skinnen kan som regel sees på som en gjentakende sinusbølge, der bølgelengden avgjør frekvensen på lyden, og amplituden er lydtryknivået. Dette er kjent som korrugering av skinnen, og kan gi en ekstra belastning på skinnene, befestigelsen, svillene, ballasten og det rullende materiellet selv.

Enkelt land har tatt i bruk mikrofoner på rullende materiell for indirekte å måle korrugeringen av skinnen. Mikrofoner festes under togmateriell med relativt fine og glatte hjul uten bremses. Mikrofonene er festet så nært hjulets kontaktflate med skinnen at støymålingene ikke påvirkes av andre støykilder. Det er utviklet flere ulike oppsett for dette, men prinsippet og resultatet for disse er de samme. Støymålinger knyttes direkte opp mot målinger av rifler og bølger, og man får dermed data om feil i infrastrukturen.

De landene som i dag bruker slikt akustisk målesystem for å detektere korrugering av skinnen er blant annet Belgia, Tyskland og Nederland. Det er i utgangspunktet ikke noe som hindrer at dette systemet også kan gi indirekte data om slagstøy, kurvehyl og eventuelt andre skader på infrastrukturen som skaper støy fra tog. I Tyskland og Nederland benyttes systemet til å bestemme når man må utføre skinnsliping for å redusere rullestøy⁸.

OPPGAVE

Jernbaneverket vil undersøke om et akustisk målesystem for kontroll av infrastrukturen kan opprettes i Norge og benyttes på Roger 1000. Jernbaneverket vil se på et system som i dag benyttes av belgiske InfraBEL. Denne masteroppgaven skal derfor utarbeide et akustisk målesystem for å detektere rullestøy. I tillegg vil det være aktuelt å vurdere hvilken nytteverdi et slikt system kan ha.

Beskrivelse av oppgaven

Oppgaven går ut på å etablere et akustisk målesystem til Roger 1000 for å registrere rifler og bølger på skinnehodet. Ved å sammenligne målinger av rullestøy og vanlige rifle- og bølgemålinger, kan det akustiske målesystemet valideres. Dette betyr at målt støy under Roger 1000 kan uttrykkes som rifler og bølger på skinnehodet. I tillegg kan også andre støyfenomen fra sporet vurderes. En vurdering av nytteverdien til et slikt akustisk system bør også være med i oppgaven.

Målsetting og hensikt

Målet og hensikten med oppgaven er å etablere et målesystem for lyd som kan detektere rifler og bølger på jernbaneskinner. Et målesystem som har god nok nøyaktighet for å benyttes i vurderinger av vedlikehold for rifler og bølger.

⁸ Hentet fra: HUSØY, L. J. 2014. *Korrugering og rullestøy*. NTNU.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

- En enkel oppdeling av oppgaven er følgende:
- Avgjøre hvilket utstyr som kan benyttes i et slikt målesystem
- Lage et oppsett for måleutstyret på Roger 1000.
- Definere hvordan målinger skal utføres.
- Avgjøre hvordan databehandlingen vil utføres, og hvilke analysemetoder som skal benyttes på innsamlet data.
- Vurdere potensielle feilkilder til systemet. Hva påvirker målingene, og hvordan feilkildene reduseres?
- Hva kan målingene brukes til?
- Undersøke hvordan utarbeidet målesystem er sammenlignet med tilsvarende system?

GENERELT

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs. Besvarelsen skal inneholde:

- Standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- Tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- Sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- Hovedteksten
- Oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>.

Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.

Avtaleskjema er signert med Leiv Jørgen Husøy, Jernbaneverket v/Trygve Aasen og NTNU v/Instituttleder på BAT Carl Thodensen og Professor Elias Kassa.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren ”Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU”.

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i ”Retningslinje ved feltarbeid m.m.”. Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i ”Laboratorie- og verkstedhåndbok”. Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til sonja.hammer@ntnu.no

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskedeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Oppstart og innleveringsfrist:

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

Faglærer ved instituttet: Professor Elias Kassa

Veileder hos ekstern samarbeidspartner: Trygve Aasen og Dr.Ing. Alf Helge Løhren, begge fra Jernbaneverket

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato:

Underskrift

Faglærer

2) Matematiske og statistiske uttrykk

i) Gjennomsnitt over glidende vindu⁹

Gjennomsnitt over glidende vindu brukes for å glatte ut skarpe overganger slik at langtids effekter fremheves. Den enkleste formen for gjennomsnitt over glidende vindu er det sentrale ikke-vektede lineært glidende gjennomsnittet, der aritmetisk gjennomsnitt beregnes for et punkt 0 fra de n tidligere og n senere verdiene i et datasett med like intervaller. Denne er vist under, men glidende gjennomsnittet kan også beregnes med vektete verdier, både lineært og eksponentielt. Alternativt kan man også finne medianen over et glidende vindu.

$$\overline{x_{SGG}} = \frac{1}{2n + 1} \sum_{i=-n}^n x_i \quad (V 1)$$

$\overline{x_{SGG}}$ – Sentralt glidende gjennomsnitt for et datasett der x_0 er sentral

n – Antall verdier på hver side av x_0 . Størrelsen på vinduet.

x_i – Verdi nummer i

ii) Korrelasjon¹⁰

Korrelasjon er et mål på samsvar mellom to størrelser. Det vanligste målet for korrelasjon mellom to datasett er Pearsons produkt-moment korrelasjonskoeffisient. Denne størrelsen måler samsvar mellom to variabler med kovariansen dividert på produktet av standardavvikene til variablene. Koeffisienten varierer mellom 1 og -1 der koeffisienten er 1 ved perfekt lineær korrelasjon, -1 ved lineær antikorrelasjon og 0 ingen korrelasjon.

$$\rho_{xy} = \frac{Cov[X, Y]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (V 2)$$

ρ_{xy} – Korrelasjonskoeffisient

$Cov[X, Y]$ – Kovarians mellom to stokastiske variabler X og Y

σ_X og σ_Y – Standardavvik til de stokastiske variablene X og Y

⁹Hentet fra: WEISSTEIN, E. W. 2015c. *Moving Average* [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/MovingAverage.html> [Accessed 2015].

¹⁰ Hentet fra: WEISSTEIN, E. W. 2015a. *Correlation Coefficient* [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/CorrelationCoefficient.html> [Accessed 05.06 2015].

For et utvalg kan uttrykket estimeres til følgende:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (V 3)$$

r_{xy} – Estimert korrelasjonskoeffisienten for utvalget

\bar{x} og \bar{y} – Gjennomsnittlig verdi for x og y i utvalget

x_i og y_i – Verdi nummer i for x og y i utvalget

n – Antall verdier i utvalget

Det er viktig å påpeke at korrelasjon mellom to variable ikke må forveksles med årsakssammenheng. Det vil si at dersom to variabler korrelerer utelukker det ikke alle andre årsaker til variablenes størrelse, og korrelasjonen kan derfor ikke brukes som bevis for årsak mellom dem. Bevis oppnås kun når alle mulige årsaker er undersøkt. Korrelasjon bør derimot brukes som en indikator på sammenheng, slik at noe som korrelerer ikke kan avfeies uten å videre undersøkes.

vi) **Lineær regresjon**¹¹

Lineær regresjon brukes for å avgjøre en lineær funksjon som forklarer et innsamlet utvalg av data. Den mest brukte metoden for dette er ved minste kvadraters metoder, der en linje er trukket mellom datapunktene slik at kvadratene til avstanden mellom punktene og linjen i vertikalretningen er minst mulig. Minste kvadraters metode beregner den «beste» plasseringen av den lineære regresjonslinjen, hvor god plasseringene er avgjøres av residualverdien.

$$y = \alpha + \beta x \quad (V 4)$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (V 5)$$

$$\beta = r_{xy} \frac{s_y}{s_x} \quad (V 6)$$

y – Funksjon av variabelen x, regresjonslinja

α – Estimert skjæring mellom y-aksen og regresjonslinjen

β – Estimert lineære regresjonskoeffisient

r_{xy} – Estimert korrelasjonskoeffisienten for utvalget

\bar{x} og \bar{y} – Gjennomsnittlig verdi for x og y i utvalget

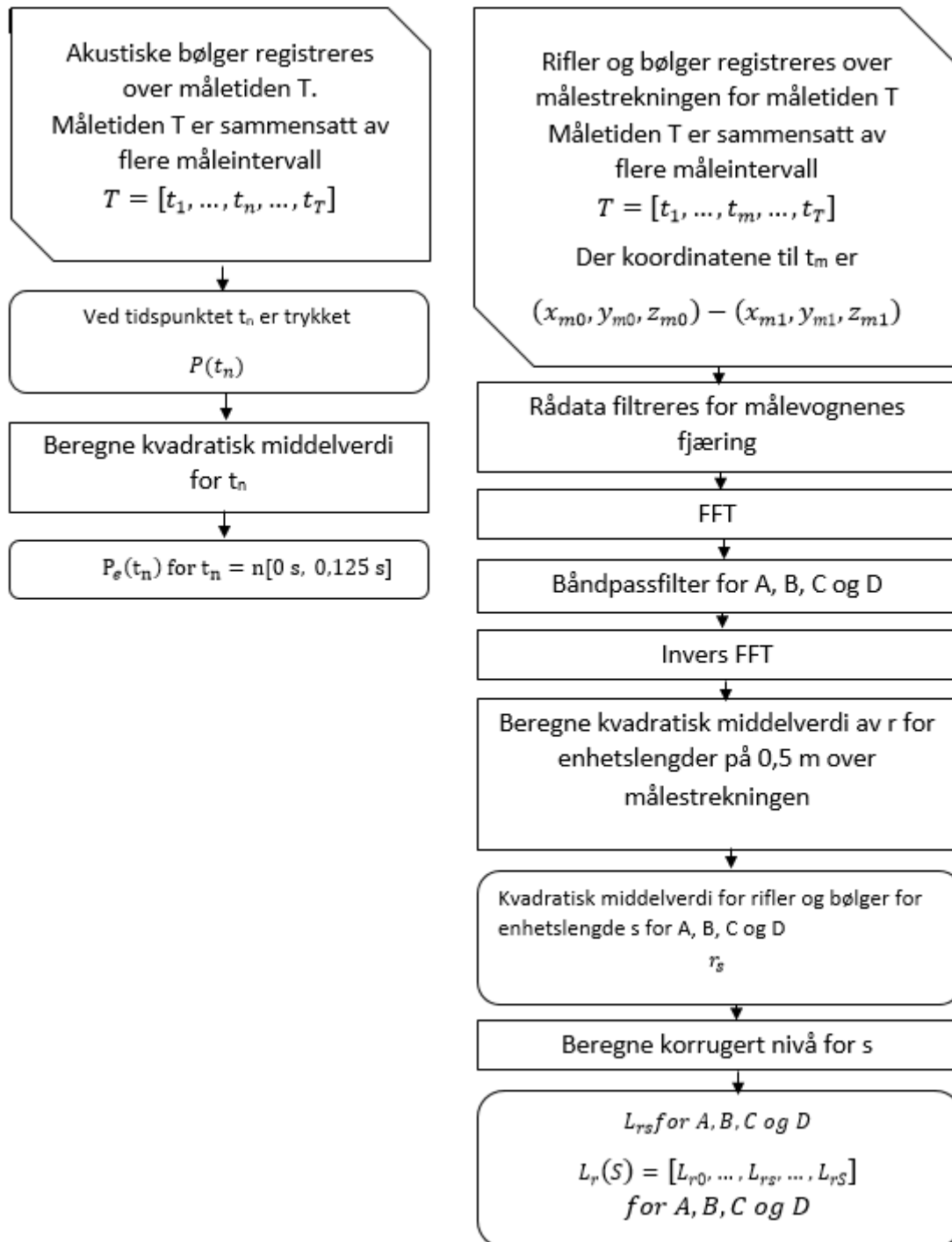
s_x og s_y – Standardavvikene til x og y i utvalget

¹¹ WEISSTEIN, E. W. 2015b. *Least-Square Fitting* [Online]. MathWorld. Available: <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html> [Accessed 05.06 2015].

$$r^2 = (r_{xy})^2 \quad (V 7)$$

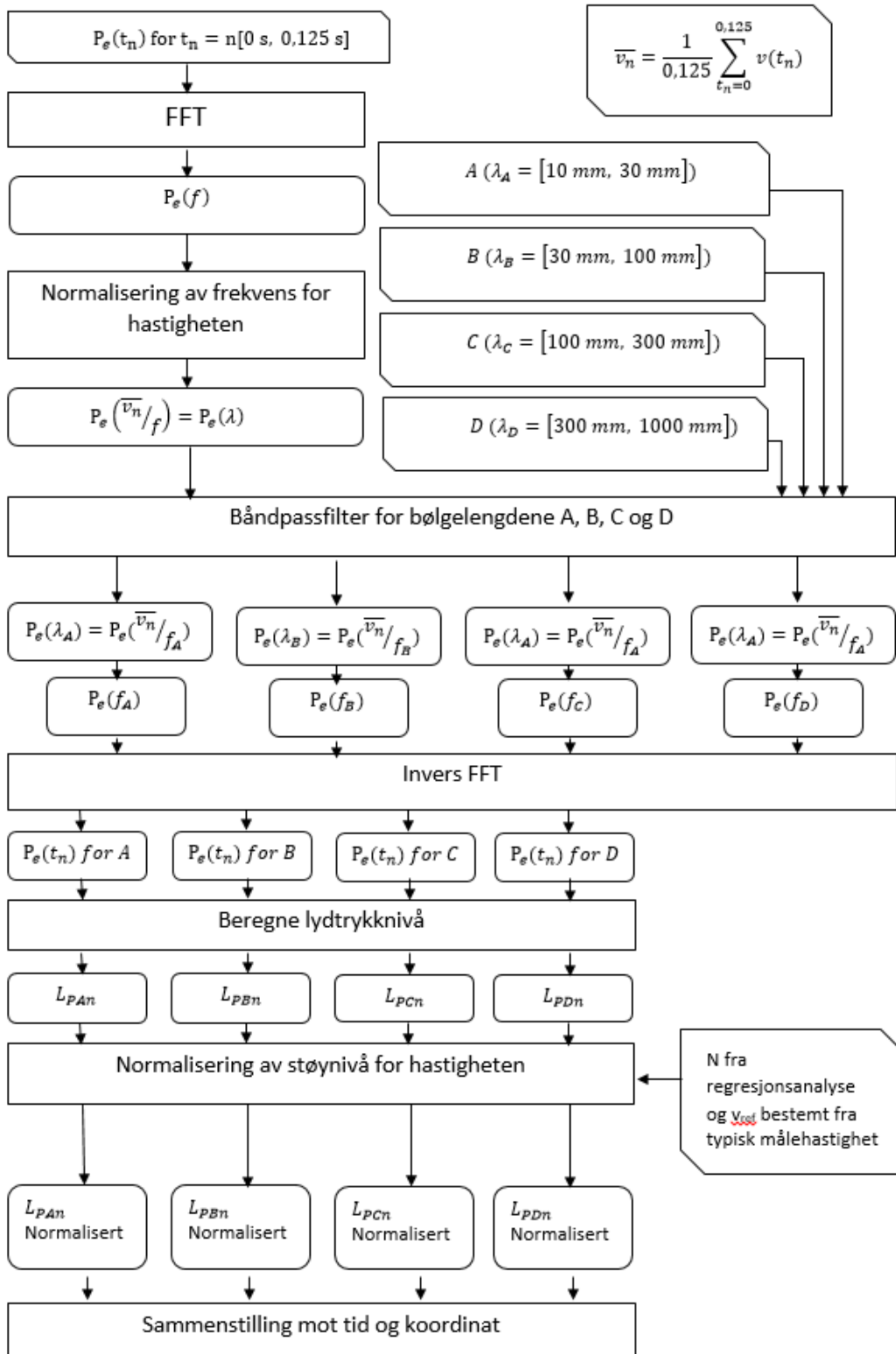
r^2 – Residual. Hvor godt funksjonene passer til utvalget, varierer mellom 0 og 1 der 1 er perfekt.

3) Måling

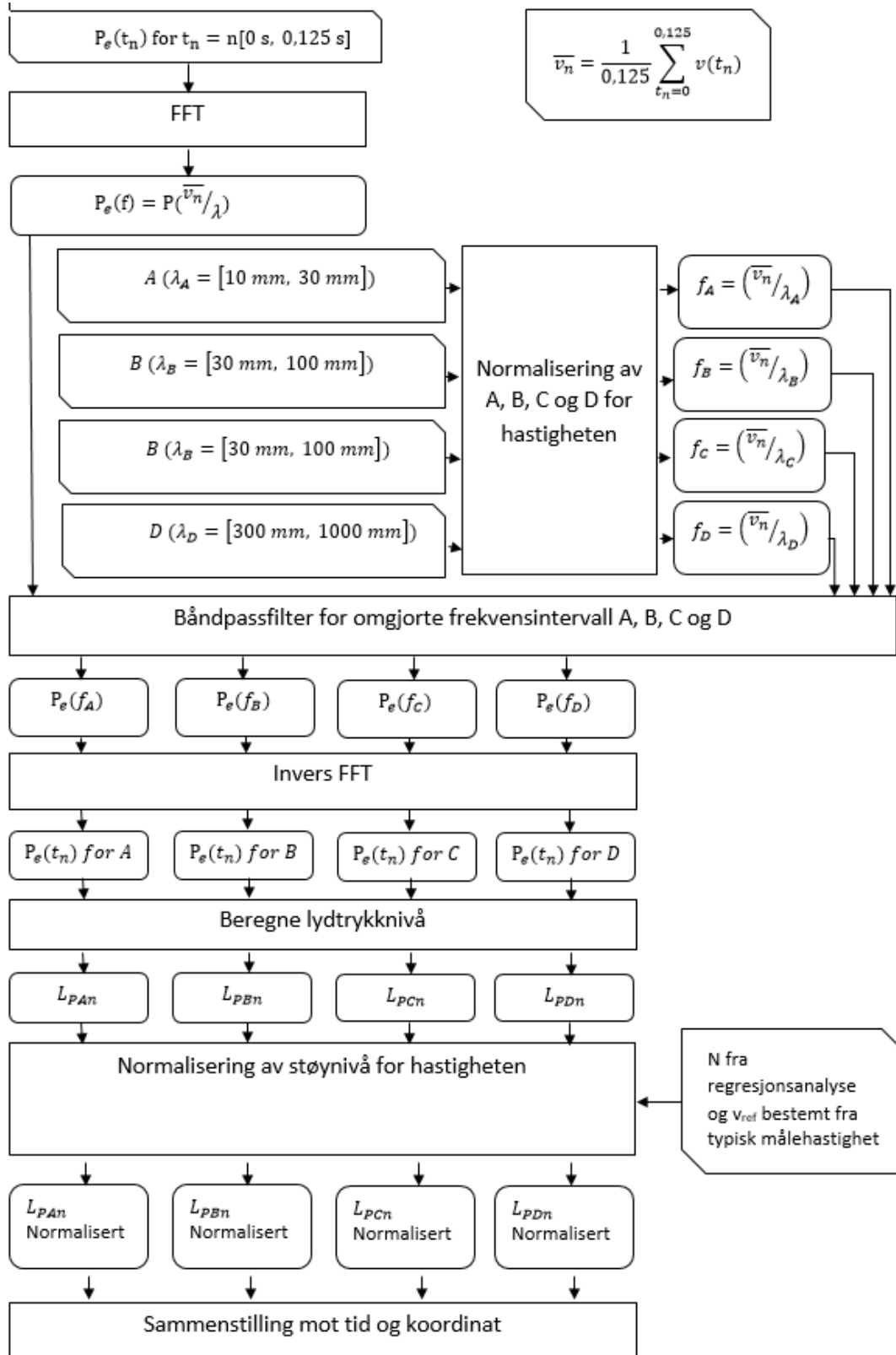


4) Databehandling

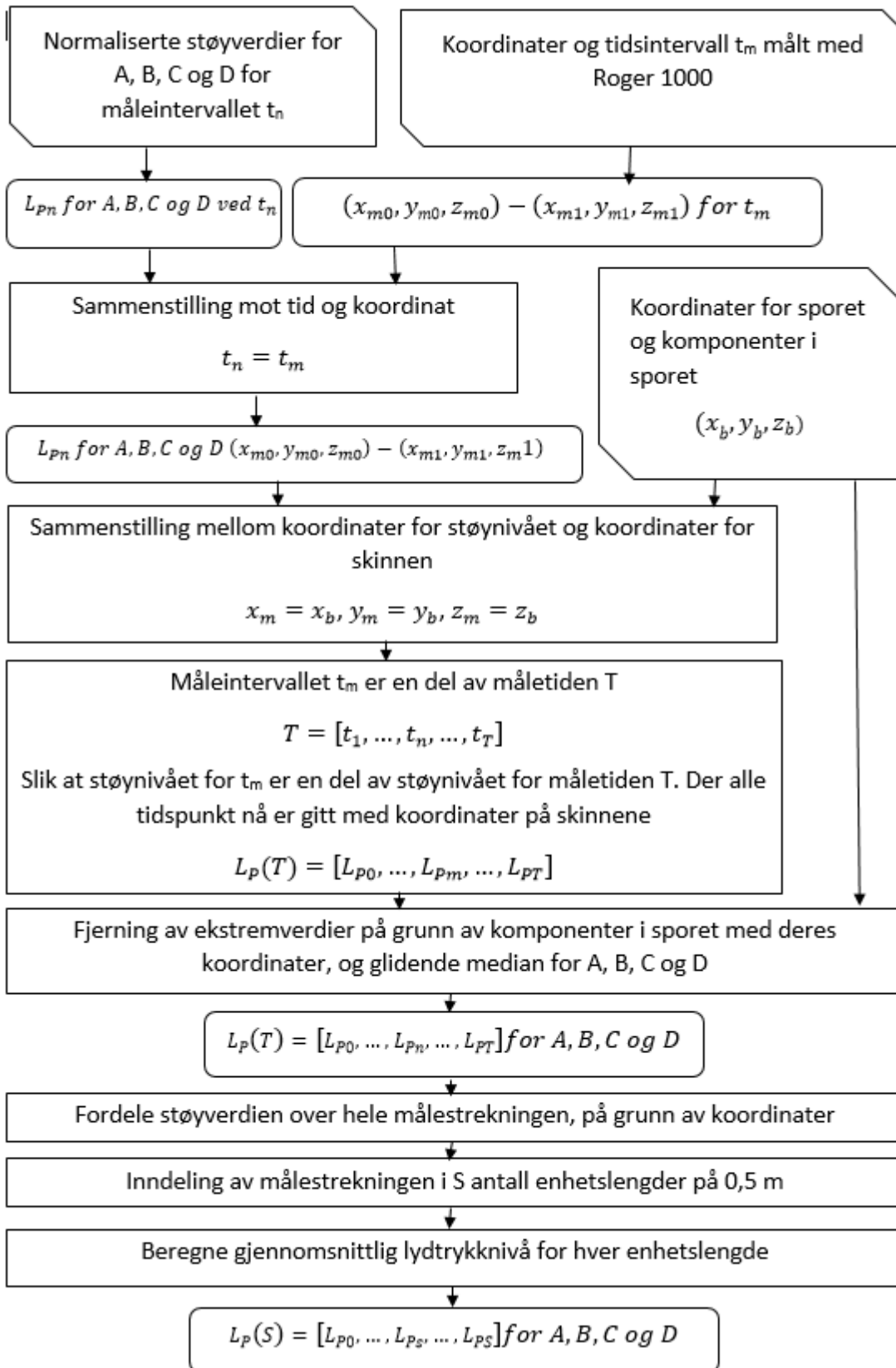
i) Normalisering av frekvens



ii) *Normalisering av bølgelengdeintervall*

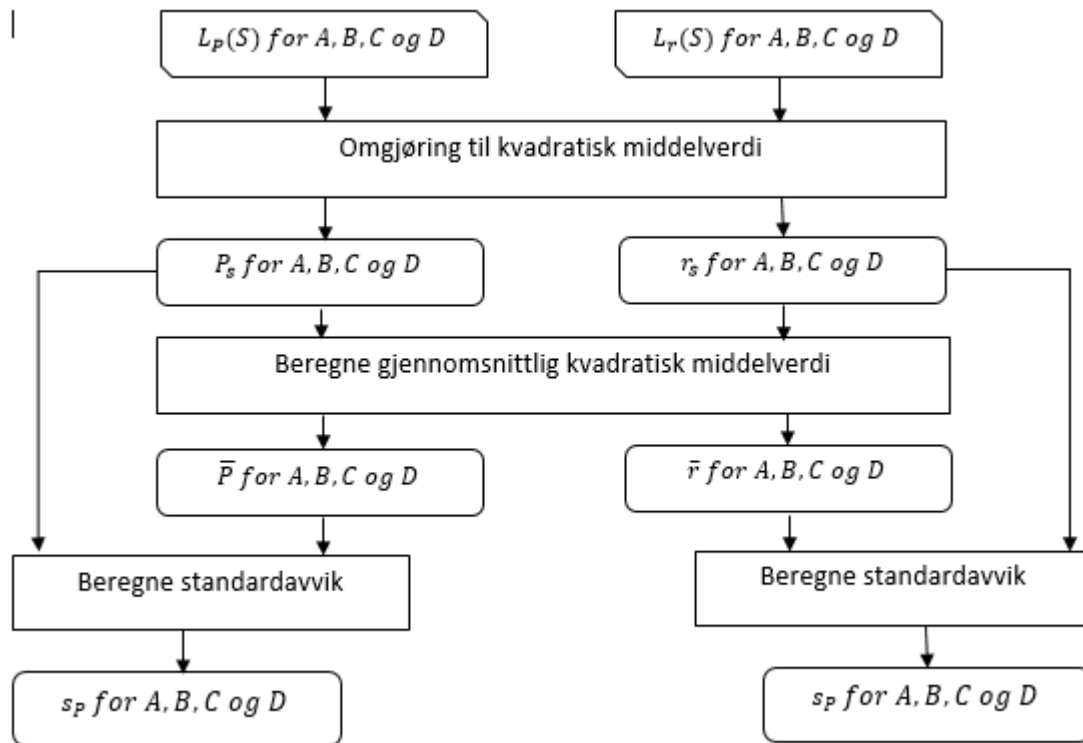


iii) **Sammenstilling av data**

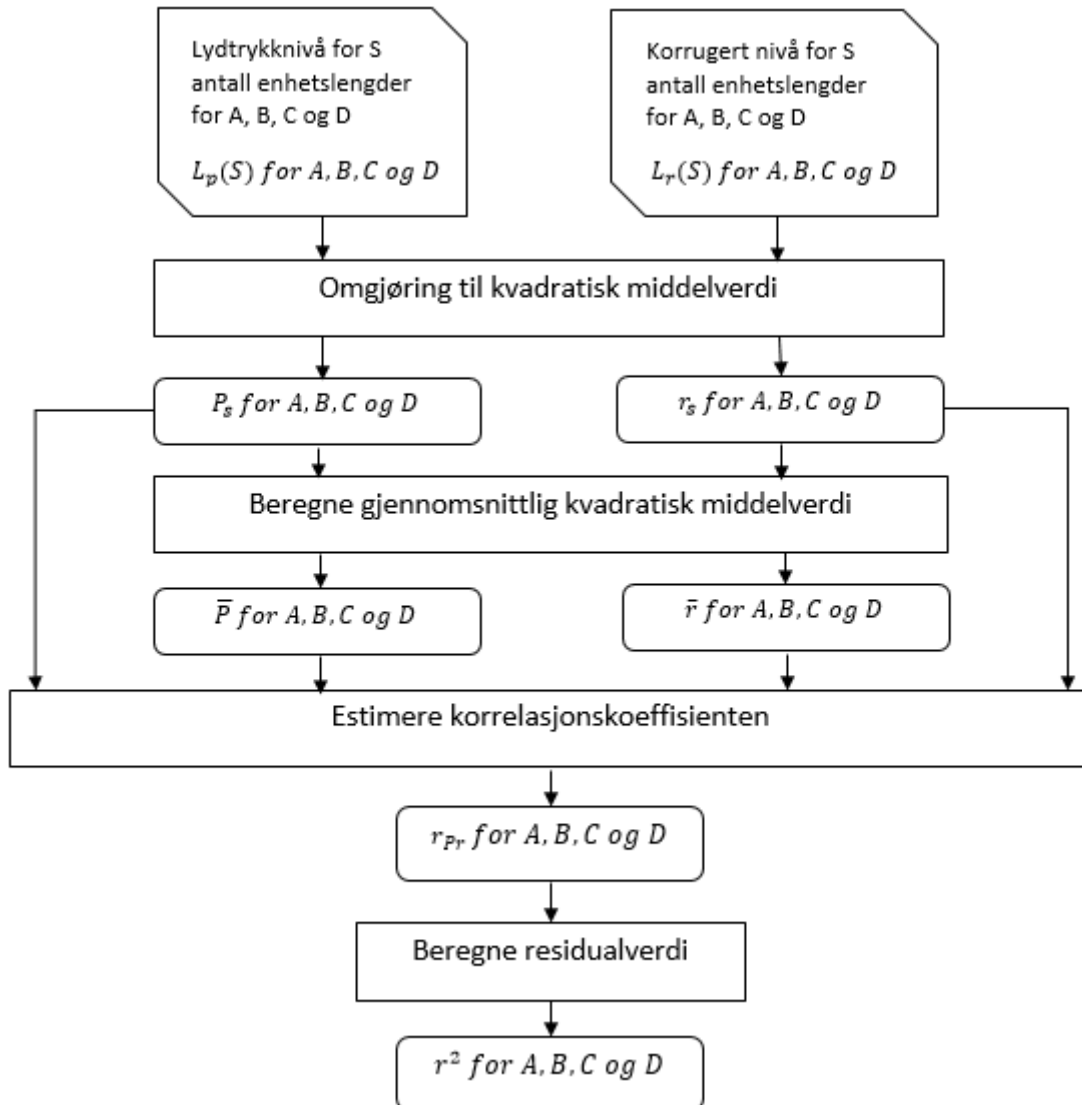


5) Analyse

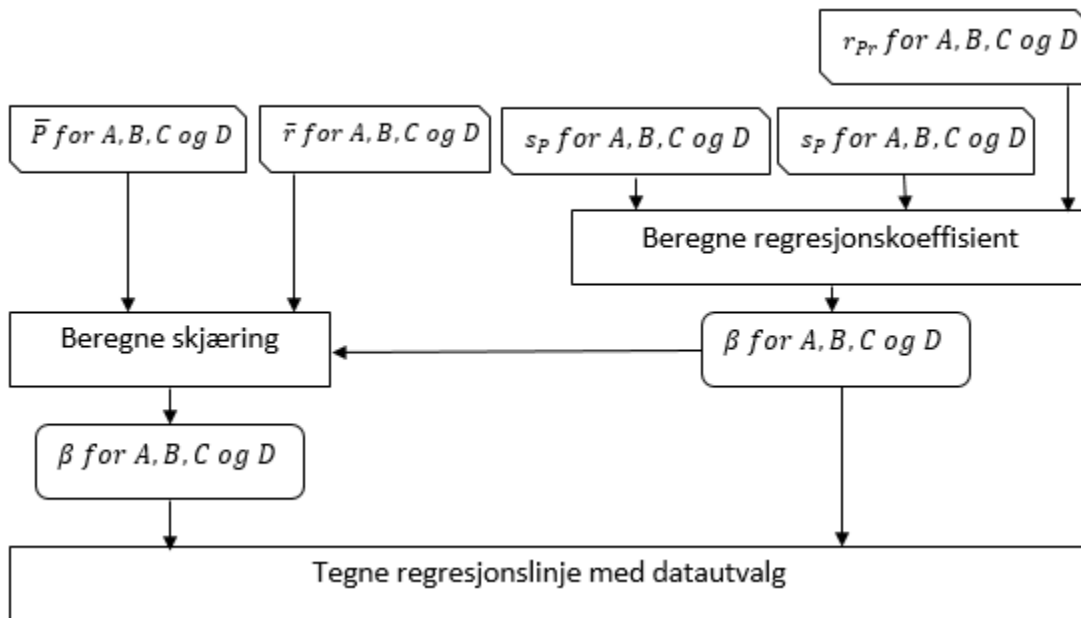
iii) Standardavvik



iv) **Korrelasjon**



v) *Regresjon*



6) Feilkilder

Identifiserte feilkilder med foreslått målemetodikk og oppsett fra delkapittel 5.2 *Målemetode*

Kategori	Feilkilde	Påvirkning	Reduksjon av feilkilde	Systematisk eller tilfeldig
Eksterne faktorer	Bakgrunnsstøy	Naturlig bakgrunnsstøy kan føre til et kunstig høyt rullestøynivå	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden 2. Utføre målinger på natten da det er mindre bakgrunnsstøy	Tilfeldig
	Kraftig vind	Kraftige vindforhold kan føre til økt aerodynamisk støy over mikrofonen	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden 2. Beskytte måleutstyr mot vindpåvirkning med skjold 3. Systemet skal ikke brukes under ekstreme værforhold	Tilfeldig
	Regn	Regn gjør skinnen våt, påvirker kontaktmekanikken mellom hjul og skinne	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden 2. Systemet skal ikke brukes i eller like etter regnvær	Tilfeldig
	Passerende tog	Passerende tog på kryssningsspor og dobbeltspor øker støynivået og vibrasjoner	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden 2. Utføre målinger på natten da det er færre tog på sporet 3. Eliminere helt spor der tog passerer	Tilfeldig
	Andre støykilder på vognen (hjulslag, tyfon, aerodynamisk støy, motorpådrag)	Andre støykilder på vognen kan føre til et kunstig høyt målt rullestøynivå	1. Minimere støykilder på vognen med støydemping og avskjerming	Systematisk

	Andre lydilder fra sporet (kurveskrik, slagstøy)	Andre lydfenomener i sporet gir et kunstig høyt rullestøynivå	1. Eliminasjon på grunn av frekvensspekter, koordinat og impuls	Systematisk
	Feilmålinger Roger 1000	Usikkerhet til måleresultatet til Roger 1000 gir et redusert sammenligningsgrunnlag	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden	Tilfeldig
	Feilmålinger Roger 1000	Feil på måleresultatet til Roger 1000 gir et redusert sammenligningsgrunnlag	1. Kontroll av data fra Roger 1000 mot tidligere erfaringstall fra Roger 1000. 2. Kontroll av målevognen	Systematisk
	Andre tilfeldig feil	Små tilfeldige feil øker standardavviket til målingen	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden	Tilfeldig
	Andre systematiske feil	Systematiske feil på en strekning gir feil på måleresultatet	1. Øke antall strekninger som måles, sammenligning mellom dem kan avsløre systematiske feil	Systematisk
Lydproduksjon	Hjuloverflaten	Korrugering på hjuloverflaten kan øke rullestøyen	1. Jevnlige kontroll og vedlikehold av hjul	Systematisk
	Demping av hjul og valg av hjulform	Demping av hjulet reduserer utstrålt rullestøy, hjulets form påvirker også utstrålt lyd	1. Sammenligne og finne korreksjonsfaktorer mellom forskjellige hjul	Systematisk
	Demping av spor og valg av sporkomponenter	Demping av sporets komponenter reduserer utstrålt rullestøy, valg av komponenter påvirker også rullestøyen	1. Sammenligne og finne korreksjonsfaktorer mellom varierende sporkomponenter	Systematisk
	Støyavskjerming mellom kilde og mottaker	Støyavskjerming mellom støykilde og støymottaker reduserer støynivået	1. Fjerne avskjerming mellom kilde og mottaker	Systematisk
Måleutstyr	Måleusikkerhet	Alt måleutstyr leveres med en tilfeldig måleusikkerhet	1. Oppgrader måleutstyr til noe med bedre sikkerhet 2. Jevnlig kontroll og kalibrering av måleutstyr 3. Øke antall målinger	Tilfeldig

	Skader på måleutstyr	Skader på måleutstyret kan inntreffe under måling og mellom måling, dette kan påvirke resultatet	1. Beskytte måleoppsett med skjold 2. Jevnlig kontroll av oppsett og utstyr	Systematisk
	Valg av måleinnstillinger	Innstillingene på måleutstyret kan føre til at noe data registreres feil eller midles unødvendig	1. Måleinnstillinger settes til å måle mest mulig nøyaktig	Systematisk
	Måleoppsett	Utstyrets oppsett kan føre til en feilregistrering av data fordi mikrofonene ikke er riktig rettet eller montert feil	1. Kontroll av oppsett før og etter måling	Systematisk
	Festeanordning	Måleutstyrets festeanordning på Roger 1000 kan overføre vibrasjoner til mikrofonen, og fører til feilmåling	1. Velge en dempet festeanordning	Systematisk
Datafangst	Signalfeil	Signal forvrenges mellom mikrofon og datamaskin	1. Jevnlig kontroll og testing av utstyr	Systematisk
Datalagring	Komprimering	Komprimering av data fører til at noe informasjon forvrenges eller slettes	1. Velge lagringsmetode som ikke går på bekostning av datakvalitet	Systematisk
Databehandling	Sammenstilling	Unøyaktig tid og koordinat gir feil på data som skal sammenstilles, dette gir et redusert sammenligningsgrunnlag	1. Øke antall målinger 2. Bruk av utstyr med tilstrekkelig nøyaktighet	Tilfeldig
	Fourier-transformasjon	Valg av algoritme til å utføre FFT kan medføre en feil på grunn av estimering	1. Velge algoritme som gir tilstrekkelig nøyaktighet på levert data	Systematisk
	Normalisering	Feil lydtrykknivå etter normalisering på grunn av usikkerhet for regresjon	1. Velge flere nominelle hastigheter 2. Øke antall kjøring på samme strekning i forskjellig hastighet, øker nøyaktigheten til regresjonen	Tilfeldig
	Normalisering	Feil lydtrykknivå etter normalisering på grunn av varierende og usikker målehastighet	1. Øke antall kjøring på samme strekning, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden	Tilfeldig

	Normalisering av frekvenser	Bruk av gjennomsnittshastighet gjør at noen frekvenser ikke normaliseres korrekt	1. Øke antall kjøring på samme strekning i forskjellig hastighet, mange erfaringsdata eliminerer feilkilden 2. Bruk av korte tidsintervaller gir mindre usikkerhet til gjennomsnittlig hastighet	Tilfeldig
	Filtrering	Data om rifler og bølger filtreres vekk fordi de ligner signaturen til kurveskrik eller impulslyder	1. Kontroll av data etter filtrering	Systematisk
	Filtrering	Frekvensen rett utenfor båndpassfilterer dempes ikke helt vekk.	1. Velge båndpassfilter med tilstrekkelig dempning utenfor aktuelt område	Systematisk
	Median over glidende vindu	Kan risikere å skape "falske" verdier i overganger på sporet eller over tydelige sporkomponenter, der verdier for rifler og bølger varierer mye	1. Velge vindusstørrelse som kun fjerner impulslyder	Systematisk
	Gjennomsnitt over delstrekninger	Kan øke usikkerheten siden store lydtrykk dominerer i gjennomsnittsberegningen	1. Velge korte delstrekninger	Systematisk

7) Støymåling¹²

NS 8175:2012 definerer to målestørrelser for støy, L_{den} og L_{natt} . Den første baserer seg på at folk opplever støyplager forskjellig etter tidspunkt i døgnet, en lyd oppleves mer plagsom på natten enn på dagen. Man tar hensyn til dette ved å gi et ”straffetillegg” til støymålinger fra kvelden og natten, 5 dB ekstra for kvelden og 10 dB for natten. Døgnet deles inn i tre perioder, dag 07.00-19.00, kveld 19.00-23.00 og natt 23.00-07.00, se (V 8).

$$L_{den} = 10 \log \left[\frac{12}{24} * 10^{\frac{L_d}{10}} + \frac{4}{24} * 10^{\frac{L_e+5}{10}} + \frac{8}{24} * 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (V 8)$$

L_{den} – A-veid vektet lydtrykknivå over døgnet [dBA]

L_d – A-veid lydtrykknivå mellom 07.00 og 19.00 [dBA]

L_e – A-veid lydtrykknivå mellom 19.00 til 23.00 [dBA]

L_n – A-veid lydtrykknivå fra 23.00 til 07.00 [dBA]

I tillegg til L_{den} ser man også på støynivået på natten separat for enkelte støykilder, da uten ”straffetillegget”, se (V 9).

$$L_{natt} = (L_{P,Aeq,8t})_{natt} \quad (V 9)$$

L_{natt} – A-veid lydtrykknivå fra 23.00 til 07.00 uten ”straffetillegg” [dBA]

$(L_{P,Aeq,8t})_{natt}$ – A-veid lydtrykknivå over åtte timer, på natten [dBA]

For jernbanetransport der trafikkmengden er kjent, kan den videre sammenhengen med $L_{P,A,24t}$ finnes fra:

$$L_{den} = L_{P,Aeq,24t} + 10 \log \left[\frac{T_{dag}}{100} + \frac{T_{kveld}}{100} * \sqrt{10} + \frac{T_{natt}}{100} * 10 \right] + \Delta L_{met} \quad (V 10)$$

$$L_{den} = L_{P,Aeq,24t} + \Delta L_e + \Delta L_{met} \quad (V 11)$$

$L_{P,Aeq,24t}$ – A-veid lydtrykknivå over 24 t [dB]

T_{dag} – Andelen av trafikkmengden mellom 07.00 og 19.00

T_{kveld} – Andelen av trafikkmengden mellom 19.00 og 23.00

T_{natt} – Andelen av trafikkmengden mellom 23.00 og 07.00

ΔL_e – Tillegg fra varierende støyemisjon på grunn av trafikken. Typisk 4,0 [dBA]

ΔL_e – Tillegg på grunn av metrologiske forhold. Typisk 0,5 [dBA]

¹² Direkte avskrift. Utdrag side 10-14 i prosjektoppgave fra høsten 2014. HUSØY, L. J. 2014. *Korrugering og rullestøy*. NTNU.

Utendørs deles områder inn i to støysoner etter T-1442, rød og gul sone. Rød sone er nærmest lydkilden, og aktivitet i dette området kan ikke være støyfølsom. Aktivitet i gul sone bør vurderes etter hvilke tiltak man har for å redusere støyplagen, en kan akseptere støyfølsom aktivitet hvis det iverksettes støyreducerende tiltak. For jernbanen vil gul sone være der $L_{den} \geq 58$ dBA og rød sone der $L_{den} \geq 68$ dBA. I tillegg til disse eksisterer det også krav til store støyhendelser. Disse er vurdert med L_{5AF} , som beskriver A-veid lydtrykknivå målt over 125 ms og overgås ved kun 5 % av støyhendelsene, i løpet av en angitt tidsperiode. L_{5AF} angis for nattperioden mellom 23.00 og 07.00, og er 75 dBA for gul sone og 90 dBA for rød sone.

Fra ISO 3095:2013 har et praktisk mål på lydtrykknivået, det A-veide lydtrykknivået over et tidsintervall, $L_{P,Aeq,T}$. Dette er en størrelse som angir gjennomsnittlig lydtrykk ved en måletid.

$$L_{P,Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_{ref}^2} dt \right) \quad (V 12)$$

$L_{P,Aeq,T}$ – A-veid lydtrykknivå over en måletid [dBA]

T – Måletiden [s]

$P_A(t)$ – A-veid lydtrykk ved tiden t [Pa]

P_{ref} – Referansetrykket. 20 μ Pa [Pa]

Transit Exposure Level, TEL, defineres også i ISO 3095:2013, og kommer av at $L_{P,Aeq,T}$ må korrigeres på grunn av at måletiden T er for stor. Måletiden T for en togpassering starter når lydtrykknivået er 10 dB lavere enn når togfronten er rett ved mikrofonen, og slutter når lydtrykknivået er 10 dB lavere enn når enden av toget er rett ved mikrofonen. Passeringstiden T_p starter derimot når togfronten passerer mikrofonen, og slutter når enden på toget passerer mikrofonen. Det vil si at T_p er passeringstid, og er lavere enn måletiden T , dette medfører at TEL alltid er større enn $L_{P,Aeq,T}$

$$TEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_{ref}^2} dt \right) \quad (V 13)$$

TEL – A-veid lydtrykknivå for togpasseringer [dBA]

T_p – Måletiden, kun for togets passering [s]

$P_A(t)$ – A-veid lydtrykk ved tiden t [Pa]

P_{ref} – Referansetrykket. 20 μ Pa [Pa]

