

Tillståndsövervakning baserat på
billiga sensorer och öppen elektronik
För snabbare utveckling av IoT inom järnväg

Christer Stenström, JVTC
Jonas Lindqvist, Trafikverket
Fredrik Andersson, Sweco Rail

Tryck: Luleå tekniska universitet, Grafisk produktion 2018

ISSN 1402-1528

ISBN 978-91-7790-264-5 (tryckt)

ISBN 978-91-7790-265-2 (pdf)

Luleå 2018

www.ltu.se

Tillståndsovervakning baserat på billiga sensorer och öppen elektronik

För snabbare utveckling av IoT inom järnväg

Christer Stenström, JVTC
Jonas Lindqvist, Trafikverket
Fredrik Andersson, Sweco Rail

November 2018

Damill AB
Mätteknik & Diagnostik

eMaintenance³⁶⁵ INFRANORD

JVTC
VID LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET

L
LULEÅ
TEKNISKA
UNIVERSITET

SWECO 

 TRAFIKVERKET

VINNOVA

vossloh

Förord

Denna rapport innehåller resultatet från projektet *Tillståndsbaserat underhåll av järnvägsinfrastruktur baserat på sakernas internet-lösningar*, med stöd från det strategiska innovationsprogrammet InfraSweden2030, en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten. Projektet är till hälften finansierat av deltagande projektparter och till hälften finansierat av InfraSweden2030.

Syftet med projektet är att utveckla och fälttesta mätsystem för tillståndsbedömning och underhåll av järnvägsinfrastruktur. Mätsystemen bygger på öppen hård- och mjukvara.

Projektgruppen består av Damill, eMaintenance365, Infranord, Järnvägstekniskt centrum (JVTC), ämnet drift- och underhållsteknik på Luleå tekniska universitet (LTU), Sweco Rail, Trafikverket och Vossloh. Projektet har pågått mellan okt 2016 – okt 2018.

Följande personer har bidragit till projektet och denna rapport:

Dan Larsson, Damill
Anton Nilsson, eMaintenance365
Jesper Westerberg, eMaintenance365
Roland Bång, Infranord
Veronica Jägare, JVTC/LTU
Christer Stenström, JVTC/LTU
Fredrik Andersson, Sweco
Arne Nissen, Trafikverket
Jonas Lindqvist, Trafikverket
Lars Wikberg, Trafikverket
Peter Söderholm, Trafikverket
Björn Lundwall, Vossloh

Denna rapport är utan blanka sidor för att underlätta vid läsning i digitalt format och för att spara papper vid utskrift.

Sammanfattning

Järnvägstransport är i många fall det säkraste och mest hållbara transportmedlet, vilket gör en övergång av vägtransporter till järnväg ett viktigt hållbarhetsmål. Detta kan uppnås genom kapacitetsutbyggnad och ökad tillförlitlighet på järnvägen. Högre tillförlitlighet kan i sin tur uppnås genom effektivare underhåll. Förebyggande underhåll i form av kontinuerlig tillståndsovervakning är ofta fördelaktigt för att identifiera den mest optimala tidpunkten för underhållsinsatser. Dock är mätsystem för tillståndsovervakning vanligtvis dyra i inköp, och även dyra i drift ifall uppkoppling sker via mobila nätverk. Men i takt med att elektroniska kretsar och mobila nätverk har blivit billigare, kraftfullare och mer tillgängliga, kan mätsystem för tillståndsovervakning konstrueras och appliceras mer kostnadseffektivt. I stor skala, kombinerat med mobila nätverk, kallas detta sakernas internet (Internet of Things – IoT).

Trots denna utveckling kostar en mätenhet vanligtvis 5-10 kkr eller mer. Avser mätenheten mätning av acceleration (vibration), kostar enbart sensorn vanligtvis 5-10 kkr om den köps in separat. Den snabba utvecklingen av MEMS-tekniken sätter emellertid press mot billigare sensor, inte minst på accelerometrar. Denna utveckling drivs på av mobiltelefon- och fordonsbranschen. Vidare sätter öppen elektronik press på billigare proprietär teknik.

Accelerometrar kan användas för att mäta slag och rörelser i järnvägsspåret vid tågpassager. Slag och rörelser i spåret uppkommer från enheter som ger upphov till diskontinuiteter i spåret, så som växlar, trummor och broövergångar. Dessa dynamiska rörelser är en stor bidragande orsak till degradering och krav på underhåll av järnvägen.

Sammanfattningsvis kräver ett hållbart samhälle tillförlitligare järnvägar, som i sin tur kräver bättre tillståndsovervakning, vilket i sin tur drivs på av bättre MEMS-teknik och öppen elektronik.

Syftet med detta projekt är att utveckla en mätenhet för tillståndsovervakning av järnväg baserat på billiga sensorer och öppen elektronik. Målet med projektet är att vid projektavslut fastställa prototypens funktioner och användbarhet i spärväxlar eller rakspår.

I detta projekt har vi valt att arbeta med vibration och accelerometers. Anledningen till valet är att mätning av acceleration har många tillämpningar. Insamling av accelerationsdata medför en kraftfull analog till digital omvandlare, högre strömförbrukning och mer dataöverföring jämfört med dataloggning av enskilda värden, så som temperatur. Datainsamling i en "IoT-skala" avser vanligtvis enskilda värden, men inom järnväg är det önskvärt att kunna utföra denna typ av mätning batteridrivet i en IoT-skala just pga. dess många tillämpningsområden.

Vidare har vi valt att arbeta med accelerometers baserade på MEMS-teknik, dvs. mikroelektromekaniska system, p.g.a. att den snabba utvecklingen inom MEMS har satt press mot billigare sensorer. En MEMS-baserad accelerometer kan kosta en hundradel av en piezoelektrisk accelerometer, t.ex. 50 kr gentemot 5 000 kr, dock med skillnader i specifikationer och kalibrering.

En viktig egenskap inom järnvägstransport är spårgeometri, vilket påverkar åkkomfort och nedbrytningshastigheten på rullande materiel och infrastruktur. Spårgeometrin i järnvägsnätet mäts regelbundet med mättåg som bland annat använder sig av accelerometrar och gyroskop. Denna typ av mätning är kostsam och ger i tiden endast punktvisa mätningar. Detta kan kompletteras med hjälp av fasta eller mobila sensorer, för kontinuerlig tillståndsövervakning i särskilt utsatta delar av järnvägen. De flesta enheter eller geometrier som ger upphov till diskontinuiteter i järnvägsspåret kan inräknas som särskilt utsatta delar. Fast installerade sensorer är intressant i exempelvis växlar och broar, medans mobila tillfälliga sensorer kan vara intressant före och efter underhåll, exempelvis vid sättning av spår ovan trumma. Vid axelpassager kan de dynamiska rörelserna i form av förskjutning mätas med accelerometrar. Något av ett problem är att frekvensen av axelpassager ligger i frekvensområdet för geofoner, vilket kräver en accelerometer eller geofon specificerad för detta frekvensband. I detta projekt har vi valt att studera mobila sensorer för mätning av denna typ av rörelse med MEMS-sensorer.

Projektet omfattar litteraturstudier, idégenerering, utveckling av en mätenhet, labbtester och fältprov. Fältprov avser förskjutning av järnvägsslipper vid axelpassager.

För att svara på var, vad och hur ska vi mäta, genomförde vi inom projektgruppen en workshop med 635-metoden. Workshopen resulterade i ca. 40 frågeställningar vid införelse eller utökade av sensorer i järnvägar, samt ca. 80 idéer på tillämpningar/fenomen för sensorer i järnvägar. Frågorna/idéerna kan vara behjälpliga vid arbete eller tankeverksamhet kring tillståndsövervakning av järnvägar och rullande materiel. Resultatet från workshoppen återfinns i bilaga A.

Vid utveckling av prototypen för mätning av acceleration och förskjutning har två MEMS-accelerometrar utvärderats. Utifrån mätning i labb och fält kan vi dra följande slutsatser:

- I labbmiljö uppvisade accelerometer Dytran 7509A4 ett absolut relativt fel på 1,7–4,4 % och ADXL326 ett fel på 2,8–11,7 % vid mätning av förskjutning.
- Mätdata från slipper i järnväg uppvisar betydligt lägre precision än mätdata i labb. I lådagrammet från mätning i labb återfinns 50 % av värdena inom 1,58–1,65 mm. I lådagrammet från fältprov återfinns 50 % av värdena inom 1,47–1,88 mm, men spridningen varierar från större till mindre beroende på hur det digitala filtret designas.
- Brusnivå enligt databad på Dytran 7509A4 och ADXL326 stämmer överens med uppmätt brusnivå.

Fortsatta studier av förskjutning av järnvägssliper kan inkludera:

- Mätningarna i labb och i fält skiljer sig åt mycket. Mätning i fält bör verifieras med en alternativ mer direkt mätmetod, så som void-meter med induktiv-/hall effect-sensor eller optisk mätning.
- För att minska brus kan upphängning av sensor i inkapslingen studeras vidare.
- För att minska brus kan flera accelerometrar av samma modell användas för att beräkna ett medelvärde.
- Jämföra olika AD-omvandlare, t.ex. HBM med ADS1115.
- Studera vidare MEMS-accelerometrar med låg brusnivå, t.ex. ADXL354, men gärna med större mätområde ($\pm g$).

Vidare bör kostnads-nytta-analys tas i beaktning innan sensorer införs i en IoT-skala, dvs. stor skala.

Detta projekt är till hälften finansierat av InfraSweden2030, vilket har stort fokus på resultat och effekter. Utöver denna rapport har projektet haft följande resultat:

- Teknisk rapport med resultat från workshop med 635-metoden. Rapporten riktar sig till läsare intresserade av praktiska tillämpningar av tillståndsovervakning i järnväg.
- Bidragit med ett avsnitt i In2Rail D2.4 “Smart Infrastructure – Innovative S&C solutions”.
- Utvecklat kursen “Sakernas internet och signalanalys för tillståndsovervakning” (D0020B), LTU, tillsammans med projektet WiRMa; ett projekt finansierat av EU-programmet Interreg Nord.
- Två examensarbeten har genomförts som en effekt av projektet.
- Delar av projektet har använts i kursen “Drift och underhåll – Hydropower” (D0004B) och i externutbildningar.
- Ett konferensbidrag är inskickat till International Heavy Haul STS Conference 2019.
- Projektet förväntas även bidra med kunskapsuppbyggnad inom projektgruppen inför pågående och framtida interna och externa projekt.

Utöver prototypen beskriven mer i detalj i denna rapport har inom projektgruppen även andra mätenheter utvecklats. Dessa är övervakning av växeldriv med sensorer, övervakning av växel med kamera och övervakning från boggi med accelerometer; se kapitel 5.

Nyckelord: järnväg, underhåll, tillståndsbaserat underhåll, sakernas internet, internet of things, IoT, hållbarhet, idégenerering, 635-metoden, brainstorming.

Innehåll

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Problemformulering	9
1.3	Syfte och mål	10
1.4	Forskningsfrågor	10
1.5	Omfattning och avgränsningar	10
1.6	Översikt	11
2	Grunder	12
2.1	Underhållsteknik	12
2.2	Mätteknik	12
2.2.1	Storheter	12
2.2.2	Sampling, bits och AD-omvandlare	14
2.2.3	Kontinuerlig tillståndsovervakning	14
2.2.4	MEMS-accelerometrar	15
2.3	Öppen hårdvara	16
2.3.1	Industriella applikationer – Brottsprevention, säkerhet och robusthet . . .	16
2.4	Mobilnät och trådlöst nätverk	17
2.4.1	Mobilnät	17
2.4.2	Trådlöst nätverk för IoT	18
2.5	Sakernas internet – IoT	20
3	Metod	22
3.1	Idégenerering med 635-metoden	22
3.2	Utveckling av prototyp	22
3.2.1	Strömförsörjning	22
3.2.2	Uppvakningsfunktion	22
3.2.3	Mikrokontroller	23
3.2.4	Accelerometer	23
3.2.5	AD-omvandlare	25
3.2.6	Datalagring	25
3.2.7	Uppkoppling	26

3.2.8	Prototypen	26
3.3	Labbtester och fältprov	27
4	Resultat och diskussion	28
4.1	Idégenerering med 635-metoden	28
4.2	Prototyp	28
4.3	Labbtester	32
4.3.1	Mätning av brus	34
4.4	Fältprov	35
4.5	Vidare utveckling	38
4.6	Kravspecifikation	41
4.7	Svar på forskningsfrågor	43
5	Intill utvecklade mätenheter	45
5.1	Övervakning av växeldriv	45
5.2	Overhead-kamera	48
5.3	Track logger	48
6	Slutsats	51
	Litteraturförteckning	53
	Artiklar	53
	Uppsatser	53
	Reports	53
	Övrigt	54
A	Idégenerering med 635-metoden	55
A.1	Metod	55
A.1.1	Problemklarläggning	56
A.1.2	Målformulering	56
A.1.3	Idégenerering	57
A.2	Resultat	58
A.2.1	Problemklarläggning	58
A.2.2	Målformulering	62
A.2.3	Idégenerering	62
A.3	Slutsats	68
B	Programkod	69

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Järnvägstransport är i många fall det säkraste och mest hållbara transportmedlet (ETSC 2003; IEA-UIC 2017), vilket gör en övergång av vägtransporter till järnväg ett viktigt hållbarhetsmål (EU-kommissionen 2011)¹. Hållbara transporter är även ett mål inom de 17 globala hållbarhetsmålen antagna av FN (Regeringskansliet 2016). Men för att en större andel transporter ska kunna flyttas över till järnväg krävs hög tillförlitlighet². Effektivare tillståndsbaserat underhåll av järnvägar kan leda till högre tillförlitlighet och ökad livslängd, vilket innebär en mer konkurrenskraftig och hållbar järnväg. Effektivare underhåll kan också innebära uppskjutna eller bättre underbyggda reinvesteringar och därmed ytterligare ökad hållbarhet. Men ska utökat tillståndsbaserat underhåll vara möjligt, måste mätsystem (mikrokontrollers och sensorer) vara billiga, effektiva och enkla att använda.

I takt med att elektroniska kretsar har blivit billigare, mindre i storlek, kraftfullare och mer tillgängliga, kan mätsystem för tillståndsovervakning konstrueras och appliceras mer kostnadseffektivt och i större omfattning än tidigare. I stor skala, kombinerat med mobila nätverk, kallas detta sakernas internet (Internet of Things – IoT). Trots denna utveckling kostar en proprietär mätenhet för tillståndsovervakning vanligtvis 5-10 kkr eller mer. Avser mätenheten mätning av acceleration (vibration), kostar enbart sensorn vanligtvis 5-10 kkr om den köps in separat. Motsatsen till proprietära system är öppna system. Öppen elektronik har de senaste åren inneburit påföljden att elektronikintresserade personer kan programmera och koppla elektronik utan att vara utbildad elektronikingenjör. Inom forskning och prototyputveckling kan kostnader kapas med 90 % (Pearce 2012). Denna trend sätter press på billigare proprietär teknik och stödjer öppen innovation³. Inom detta projekt nyttjas öppen hård- och mjukvara. Mer om öppen elektronik hittas i nästa kapitel, t.ex. avseende industriella tillämpningar.

Tillståndsovervakning kan avse ett flertal olika storheter, så som temperatur, fuktighet, elektrisk spänning, töjning och vibration. Av dessa uppräknade storheter är töjning via töjningsgivare utmanande p.g.a. liten resistensskillnad i töjningsgivaren, vilket kräver signalförstärkning och en kraftfull analog till digital omvandlare (AD-omvandlare)⁴. Vid mätning av vibration med accelerometer höjs kraven ytterligare om avsikten är att integrera signalen för att mäta förskjutning, t.ex. hur en järnvägsslipper rör sig upp och när vid tågpassager. Detta ställer höga krav på AD-omvandlaren, accelerometern och signalbehandlingen.

I detta projekt har vi valt att arbeta med vibration och accelerometers. Anledningen

¹Mål 3: 30 % av vägtransporterna på mer än 300 km bör fram till 2030 flyttas över till andra transportmedel, exempelvis järnväg eller sjötransporter.

²Driftsäkerhet, funktions säkerhet, underhållsmässighet och underhållssäkerhet (SIS 2016).

³En organisation som tillämpar öppen innovation använder sig av både intern och extern kompetens och forskning för kunskapsutveckling och produktutveckling, och anser sig kunna tjäna på att dela med sig.

⁴Även kallad digitiser eller ADC från engelskans analog to digital converter.

till valet är att mätning av acceleration har många tillämpningar. Utöver högre krav på mättekniken, medför datainsamling av acceleration även högre strömförbrukning och mer dataöverföring jämfört med dataloggning av enskilda värden, så som temperatur. Det är önskvärt att kunna utföra denna typ av mätning batteridrivet i en "IoT-skala" just pga. dess många tillämpningsområden.

Vidare har vi valt att arbeta med accelerometers baserade på MEMS-teknik, dvs. mikroelektromekaniska system, p.g.a. att den snabba utvecklingen inom MEMS har satt press mot billigare sensorer. En MEMS-baserad accelerometer kan kosta en hundradel av en piezoelektrisk accelerometer, t.ex. 50 kr gentemot 5 000 kr, dock med skillnader i specifikationer och kalibrering.

En viktig egenskap inom järnvägstransport är spårgeometri, vilket påverkar åkkomfort och nedbrytningshastigheten på rullande materiel och infrastruktur. Spårgeometrin i järnvägsnätet mäts regelbundet med mättåg som bland annat använder sig av accelerometrar och gyroskop⁵. Denna typ av mätning är kostsam och ger i tiden endast punktvisa mätningar. Denna typ av mätning kan kompletteras med hjälp av fasta eller mobila sensorer, för kontinuerlig tillståndsövervakning i särskilt utsatta delar av järnvägen. De flesta enheter eller geometrier som ger upphov till diskontinuiteter i järnvägsspåret kan inräknas som särskilt utsatta delar. Exempel på detta är järnvägsväxlar, broar, tunnlar, isolskarvar och trummor. Fast installerade sensorer är intressant i exempelvis växlar och broar, medans mobila tillfälliga sensorer kan vara intressant före och efter underhåll, exempelvis vid sättning av spår ovan trumma. Vid axelpassager kan de dynamiska rörelserna i form av förskjutning mätas med en eller flera accelerometrar. Något av ett problem är att frekvensen av axelpassager ligger i frekvensområdet för geofoner, vilket kräver en accelerometer eller geofon specificerad för detta frekvensband. I detta projekt har vi valt att studera mobila sensorer för mätning av denna typ av rörelse med MEMS-sensorer.

Projektet omfattar litteraturstudier, idégenerering, labbtester och fältprov. Fältprov avser förskjutning av järnvägssliper vid axelpassager. Fokus ligger på IoT-lösningars användbarhet, driftsäkerhet och kostnad/nytta för tillståndsövervakning av system i järnvägar.

1.2 Problemformulering

Ett viktigt steg i ett hållbart samhälle är övergång av vägtransport till järnväg. Detta kan uppnås genom kapacitetsutbyggnad och ökad tillförlitlighet på järnvägen. Högre tillförlitlighet kan i sin tur uppnås genom effektivare underhåll. Förebyggande underhåll i form av kontinuerlig tillståndsövervakning är ofta fördelaktigt för att identifiera den mest optimala tidpunkten för underhållsinsatser. Dock är mätsystem för tillståndsövervakning vanligtvis dyra i inköp, och även dyra i drift ifall uppkoppling sker via mobila nätverk. Men i takt med att elektroniska kretsar och mobila nätverk har blivit billigare, kraftfullare och mer tillgängliga, kan mätsystem för tillståndsövervakning konstrueras och appliceras mer kostnadseffektivt. Trots denna utveckling kostar en proprietär mäthenhet vanligtvis 5-10 kkr eller mer. Öppen elektronik sätter emellertid press på billigare proprietär teknik. Vidare sätter den snabba utvecklingen av MEMS-tekniken press på billigare sensor, inte minst på accelerometrar. Accelerometrar kan användas för att mäta slag och rörelser i järnvägsspåret vid tågpassager. Slag och rörelser i spåret uppkommer från enheter som ger upphov till diskontinuiteter i spåret, så som växlar, trummor och broövergångar. Dessa

⁵Metoden är dylik den som används i flygplan för navigering.

dynamiska rörelse är en stor bidragande orsak till degradering och krav på underhåll av järnvägen.

Sammanfattningsvis kräver ett hållbart samhälle tillförlitligare järnvägar, som i sin tur kräver bättre tillståndsövervakning, vilket i sin tur drivs på av öppen elektronik och bättre MEMS-teknik.

1.3 Syfte och mål

Syftet med projektet är att utveckla en mätenhet för tillståndsövervakning av järnväg baserat på billiga sensorer och öppen elektronik. Målet med projektet är att vid projektavslut fastställa prototyps funktioner och användbarhet i spårväxlar eller rakspår.

1.4 Forskningsfrågor

1. Var, vad och hur ska vi mäta för tillståndsövervakning i järnväg?
2. Har MEMS-baserade accelerometrar specifikation och prestanda tillräcklig för tillståndsövervakning i järnväg?
3. Hur kan mätenheter för tillståndsövervakning strömförsörjas i järnväg?
4. Vad för nätverksuppkopplingar är relevanta avseende mätenheter för tillståndsövervakning i järnväg?
5. Vad är relevant att ta med i en kravspecifikation avseende mätenheter för tillståndsövervakning i järnväg?

Även om projektet i problemformuleringen blivit avgränsat till mätning av acceleration är det fortfarande intressant att kartlägga var, vad och hur vi kan mäta, för framtida IoT-lösningar. Vidare ska fråga 1 ska utgå ifrån vilka fenomen som är intressanta att mäta och inte utifrån tillgängliga sensorer.

1.5 Omfattning och avgränsningar

Projektet omfattar kontinuerlig tillståndsövervakning av järnvägar. Forskningsfråga 1 är inte avgränsad till några specifika typer av sensorer, utan omfattar alla typer av degradering intressanta att mäta inom järnväg. Därefter är projektet begränsat till mätning med accelerometrar, vilket är en krävande tillämpning. Dock är samplingshastigheten relativt låg och omfattar därmed exempelvis inte precisa mätningar av slag från hjul (transienter). Vidare är projektet avgränsat till några få accelerometrar och en tillämpning, vilket är den vertikala sliperförskjutningen som uppstår från axelpassager. Denna guppande rörelse ligger på mindre än 10 Hz. Därmed bör ingående accelerometrar vara designade för detta frekvensområde. Ingående accelerometrar är dock inte det, utan av en mer universell karaktär. Denna begränsning tas till hänsyn i diskussionskapitlet.

Utöver prototypen beskriven i detalj i denna rapport har inom projektet utvecklats andra mätsystem av projektparterna. Vissa av dessa prototyper presenteras kort i diskussionskapitlet, kap. 5.

1.6 Översikt

Nästkommade kapitlen är teori, metod, resultat, diskussion och slutsats. Teoridelen kan läsas efter behov.

För att svara på forskningsfråga 1 och identifiera möjliga praktiska tillämpningar av mätsystem i järnvägsinfrastruktur, utfördes en workshop för idégenerering. Metoden som tillämpades är 635-metoden, en typ av brainstorming, idékläckning, där deltagare i grupp skriver ner idéer på varsitt papper, skickar runt pappren i gruppen, bygger på med text och sedan sammanställer. En riktlinje är att vara sex personer, där varje person skriver ner tre idéer under fem minuter, innan man skickar runt papperna, dvs. 635. Resultatet återfinns i bilaga A.

2. Grunder

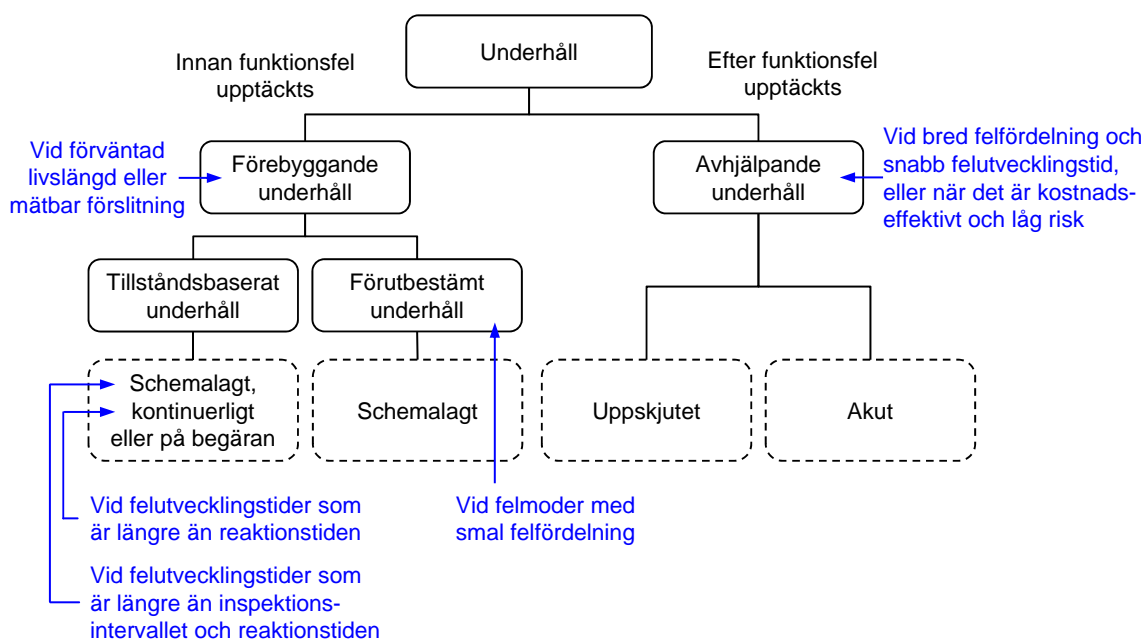
Kortfattad teori ges i detta kapitel avseende underhållsteknik, sakernas internet, mätteknik, öppen hårdvara och mobila telekommunikationssystem.

2.1 Underhållsteknik

Underhåll är samtliga tekniska, administrativa och ledningsåtgärder under en enhets livstid för att vidmakthålla eller återställa krävd funktion (SIS 2016); se figur 2.1. Krävd funktion exemplifieras i figur 2.2

Vanliga felmekanismer till degradering och plötsliga fel är nötning, utmattning och korrosion. En annan vanlig felmekanism är överbelastning, exempelvis orsakad av operatör. Degradering illustreras i figur 2.3.

Ytterligare ett koncept som bör kännas till inom underhållsteknik är tillförlitlighet; se figur 2.4.

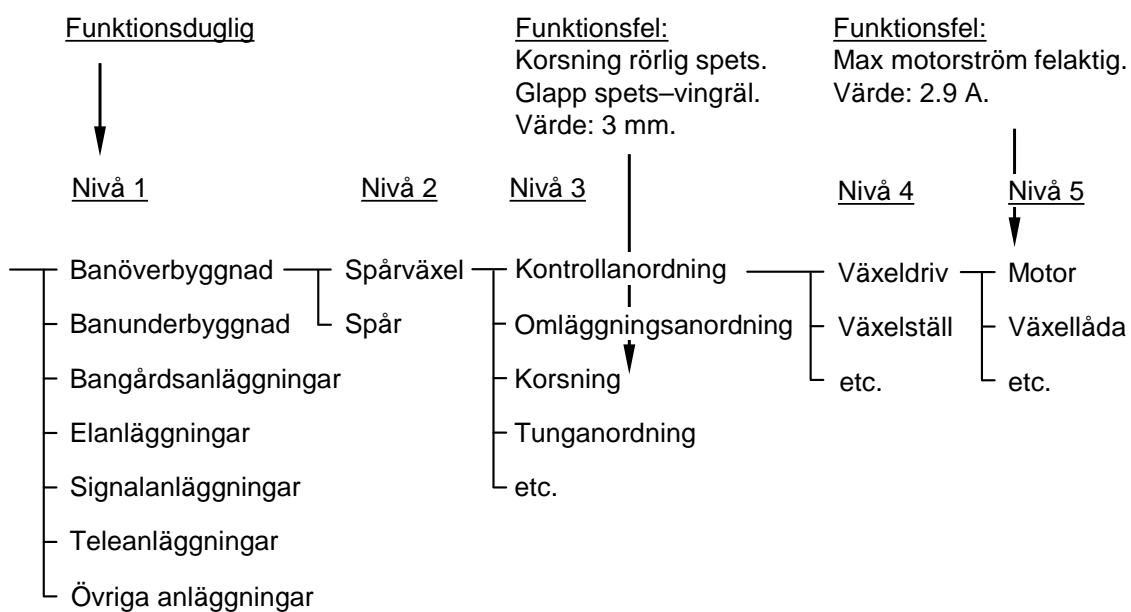


Figur 2.1: Underhåll (SIS 2016). Tillägg i blått förklaras vidare i figur 2.3.

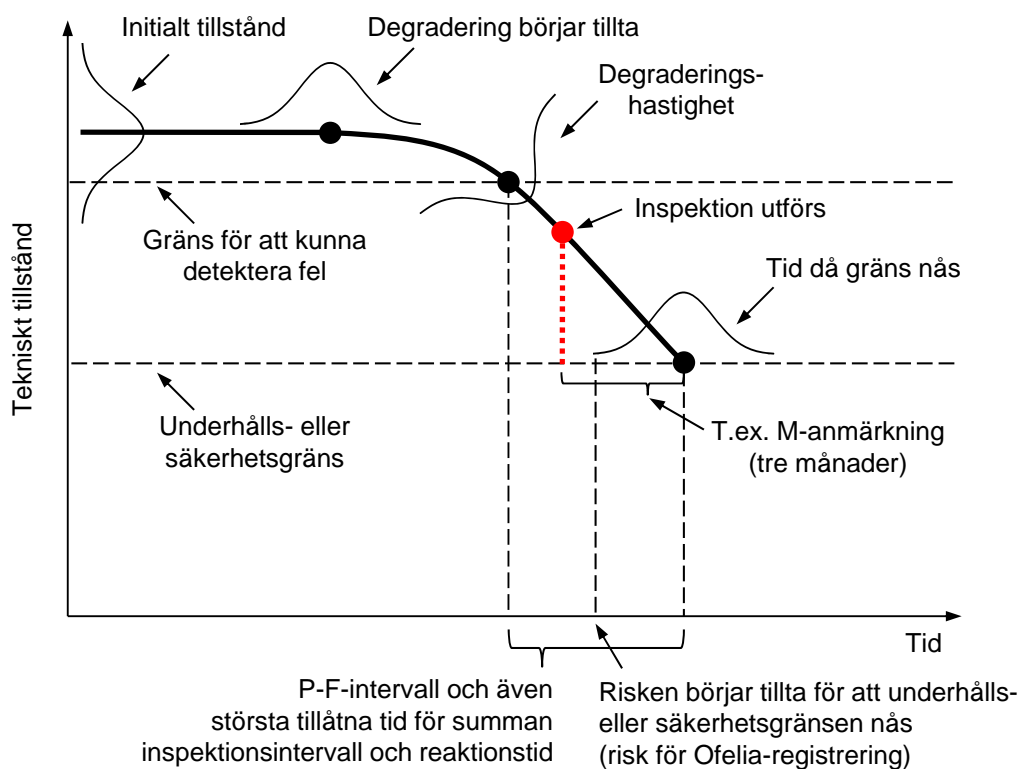
2.2 Mätteknik

2.2.1 Storheter

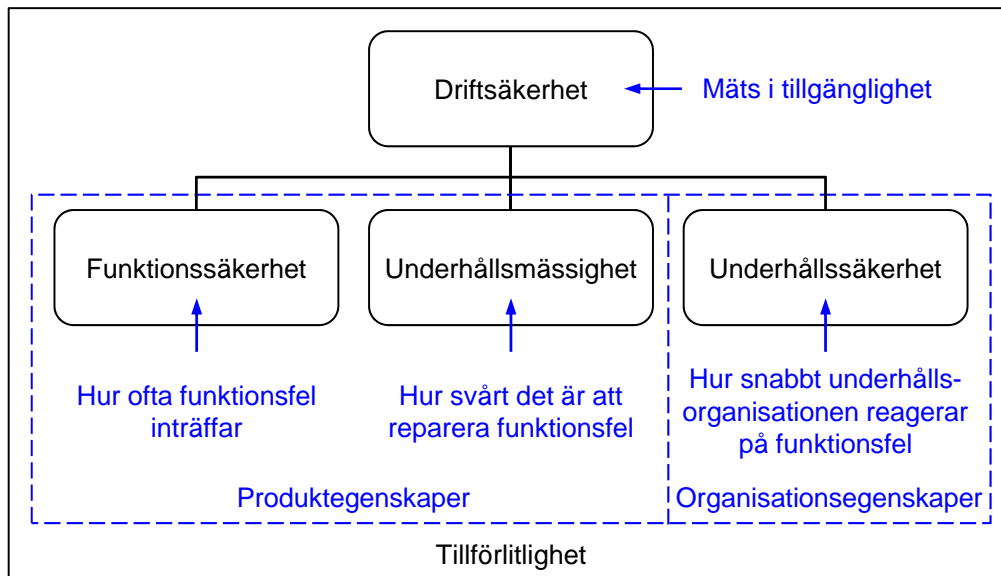
Mätteknik handlar om hur olika fysikaliska storheter mäts. Storheter delas in i grundstorheter och härledda storheter. Grundstorenheter är längd, massa, tid, elektrisk ström,



Figur 2.2: Exempel på samtidiga fel och funktion i anläggningsstruktur järnväg.



Figur 2.3: Degradering. Inspektion utförs innan risken börjar tillta för att underhålls- eller säkerhetsgränsen nås, dvs. innan funktionsfel nås.



Figur 2.4: Tillförlitlighet (SIS 2016) med förklaringar i blå text.

temperatur, substansmängd och ljusstyrka. Härledda storheter baseras på dessa sju grundstorheter. Exempelvis är elektrisk spänning $V = \text{kg m}^2 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-3}$ i SI-enheter.

2.2.2 Sampling, bits och AD-omvandlare

Vid mätning av tidskontinuerliga signaler, t.ex. vibration, genomför man en serie av mätningar. Hur ofta man mäter kallas sampling och anges i Hz eller samples per second (SPS). För att kunna återskapa en signal utan förlust av information måste man sampla med en hastighet som är minst dubbla signalens bandbredd (Nyquist samplingsteorem). För tågaxelpassager i 1 Hz motsvarar detta en sampling på 2 Hz; två mätningar per vågrörelse. För ytterligare ett praktiskt exempel, läs om ljud-CD.

För att behandla en signal digitalt måste den representeras i ett digitalt format. Digital elektronik arbetar i enheten bit som formar binära representationer. Exempelvis kan en lampa representeras av en bit, 0 eller 1, dvs. på eller av. 8 bitar representeras av åtta binära siffror, t.ex. 0000 0010, vilket motsvarar $2^8 = 256$ tillstånd. I praktiken betyder 8 bitar att amplituden i en vågrörelse, t.ex. från tågaxelpassager, delas upp i 256 intervall.

Prestandan hos analog till digital-omvandlare (AD-omvandlare), även kallad digitiser eller ADC från engelskans analog to digital converter, anges i bits och samplingshastighet, t.ex. 12 bit och 2 kHz eller 14 bit och 2 GHz. Bit är enkelt beskrivet upplösningen längs med y-axeln och samplingshastigheten är upplösningen längs med x-axeln.

För den intresserade ges en mer ingående beskrivning av Lindqvist (2017).

2.2.3 Kontinuerlig tillståndsovervakning

Tillståndsovervakning kan t.ex. avse rondning, okulär besiktning, oförstörande provning och kontinuerlig tillståndsovervakning. Med kontinuerlig tillståndsovervakning avses vanligtvis övervakning med sensorer, vilket kan vara lågfrekvent eller högfrekvent. Exempel på lågfrekvent insamling av data är temperatur och exempel på högfrekvent är vibration och töjningsgivare. Insamling av data kallas även för loggning eller sampling, och en enhet

som samlar in data kan kallas för datalogger.

Vid behov av högfrekvent insamling är samplingshastigheten på AD-omvandlaren en viktig parameter. Avser mätningen vibration, dvs. acceleration med accelerometer, är även mätområdet på accelerometern viktig. Vid harmonisk rörelse är accelerationen proportionerlig till förskjutningen; $a = -\omega^2 x = -(2\pi f)^2 x$. En järnvägsslipper som gungar med två millimeters amplitud vid två Hertz ger således en acceleration på $3,2 \text{ m/s}^2$. Fyra Hertz ger $12,6 \text{ m/s}^2$ eller 1,3 g. I praktiken är det ofta en mängd olika frekvenser som exciteras i mekaniska system. Vid mätning direkt på räl eller vid korsningsspetsen i en järnvägsväxel kan accelerationen överstiga 100 g. Vid mätning av acceleration, beroende på tillämpning, kan några hundra Hertz samplingshastighet räcka och t.ex. $\pm 16 \text{ g}$ mätområde på accelerometer vara att föredra, medans slag (transienter) kräver högre värden.

2.2.4 MEMS-accelerometrar

Mikroelektromekaniska system (MEMS) är elektromekaniska system i mikrometerskala. MEMS-accelerometrar återfinns t.ex. i mobiltelefoner. Ytermåtten på en MEMS-accelerometer är vanligtvis omkring $4 \times 4 \times 2 \text{ mm}^3$. Mekaniken kan illustreras med en konsolbalk vars rörelse ger upphov till en elektrisk potential.

Några viktiga egenskaper på MEMS-accelerometer är bandbredd (ink. linjäritet), känslighet, mätområde och brus. Ytterligare egenskaper är temperaturkänslighet, slagkänslighet och känslighet mot vinkelrät excitering. Är utgången digital är även den inbyggda AD-omvandlaren av intresse. Bandbredden kan t.ex. vara 0-400 Hz. 0 Hz signalen kallas DC-komponent eller DC-respons, och den alternerande signalen över 0 Hz kallas AC-komponent. Känslighet och mätområde definierar max och min acceleration, t.ex. $\pm 16 \text{ g}$.


Notera att i datablad framställs MEMS-accelerometrar utifrån sin bästa sida. Exempelvis för accelerometrar med digital utsignal, marknadsförs ofta antal bitar på utsignalen, t.ex. 16 bit, men antal bitar på den interna AD-omvandlaren måste räknas fram utifrån tabell.

Ett alternativ till MEMS är piezoelektriska accelerometrar. Dessa kostar dock mer än en MEMS, t.ex. 5-15 kkr jmf. med 50-500 kr. Men det finns även MEMS-accelerometrar förpackade i ett metallhölje med skärmad kabel för flera tusen kronor. För pris på MEMS-accelerometrar som enskilda komponenter/IC-kretsar, se t.ex. mouser.com, digikey.se eller se.rs-online.com. Piezoelektriska givare kan inte mäta 0 Hz och inte gravitationskraften eftersom de är piezoelektriska. För detta krävs geofoner eller MEMS.


Brus i MEMS-accelerometrar

Brus i MEMS-accelerometrar anges vanligtvis i μV , μg , $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ eller i $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. De först två måtten fås genom att ta det kvadratiske medelvärdet på ett stickprov vid statistiskt obelastat läge. Eftersom brusnivån tenderar att gå ner vid högre frekvenser brukar brus specificeras i de två senare enheterna. Detta blir synligt genom att använda sig av snabb fouriertransform för att gå från tidsdomän till frekvensdomän. Spektrumet i frekvensdomän kan uttryckas som ett effektspektrum, varvid signalen kvadreras för att bli proportionerlig mot effekten. Enheten blir g^2/Hz för att integrering ska resultera i ett värde proportionerlig till effekten, dvs. g^2 . Tar vi roten ur signalen får vi $\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, vilket är enheten som brukar anges i datablad. Är bruset, angett i $\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, konstant över sensors bandbredd kan vi multiplicera värdet med bandbredden i kvadrat och få μg . Krav på brus inom järnväg framgår i avsnitt 4.6.

2.3 Öppen hårdvara

Motsatsen till proprietära system är öppna system. Öppen hårdvara inkluderar mekanik och elektronik, och brukar symboliseras med  för visuell igenkänning. Den troligtvis mest kända öppna elektroniken är Arduino utvecklingsplattform (arduino.cc). Arduino har de senaste åren inneburit att elektronikintresserade personer kan programmera och koppla elektronik utan att vara utbildad elektronikingenjör. Exempel på detta är wearables i form av elektronik som sys in i kläder och bärs vid festligheter (se tex. adafruit.com). Inom forskning och prototyputveckling kan kostnader kapas med 90 % (Pearce 2012). Ett känt exempel var Arduino används är RepRap 3D-skrivare, vilket även beskrivs av Pearce (ibidem). RepRap 3D-skrivare är öppen hårdvara och den mest utbredda (reprap.org). Orsaken till de senaste årens tillväxt av 3D-skrivare och till stor del tillskrivas patent som gått ut och RepRap. Arduino programmeras i C++ med vissa förenklingar.

Ett annat exempel på öppen hårdvara är OpenBuilds (openbuilds.com). Med OpenBuilds mekanik är det möjligt att kapa 90% vid bygge av enklare CNC-maskiner, tex. RepRap 3D-skrivare baserat på OpenBuilds mekanik.

Öppen hårdvara kan jämföras med Creative Commons (CC), känns igen av , och är motsvarigheten inom kulturell produktion. Exempelvis är en stor mängd av bilderna på Wikipedia licensierade under Creative Commons, vilket medför att privatpersoner, forskare och företag kan använda materialet på olika sätt utan att fråga.

I sammanhanget bör det även nämnas att crowdfunding och crowdsourcing spelar en stor roll inom öppen hårdvara och programvara. Exempelvis OpenBuilds fick finansiering via crowdfunding.

Denna öppna trend medför billigare proprietär teknik och stödjer öppen innovation. En organisation som tillämpar öppen innovation använder sig av både intern och extern kompetens och forskning för kunskapsuppbyggnad och produktutveckling, och anser sig kunna tjäna på att dela med sig. Öppen hård- och mjukvara kan innebära snabbare, billigare och skräddarsydd design, vilket även ger effekter på kravspecifikation och på antalet möjliga leverantörer vid upphandling.

2.3.1 Industriella applikationer – Brottsprevention, säkerhet och robusthet

Crackning av proprietär och öppen programvara skiljer sig åt. Vid proprietär programvara måste externa crackare testa sig fram och endast ägarna av programvaran kan garantera säkerheten gentemot intrång. Vid öppen programvara kan vem som helst testa och utveckla programvaran. Schryen (2011) testade åtta öppna och nio stängda programvaror och kom till slutsatsen att det går inte att avgöra om ena typen är säkrare än den andra. Istället beror det på utvecklarna och incitament.

Beroende på applikation är säkerhet olika viktigt, t.ex. kontrollsystem av hiss, airbag eller fordon. Historiskt sett har logiska funktionerna inom styrteknik utförts med hjälp av reläer och liknande, men har övergått mer till PLC, mikrokontrollers och datorer. PLC anses generellt vara av hög kvalitet. Originaltillverkarens basenheter inom PLC är oftast väl beprövade och testade, men mjukvara för specifika funktioner är nödvändigtvis inte testad lika rigoröst. Funktionssäkerheten i en programvara beror därmed till stor del på utvecklarna och incitament. Men tittar vi hårdvaru- och mjukvarumässigt är redundans troligtvis det viktigaste verktyget oavsett teknik.

Tillverkningsmässigt är det ingen skillnad mellan öppen hårdvara, så som Arduino, och t.ex. PLC tillverkare. Robustheten på kretskortet kan vara densamma. Inom Arduino

finns det även leverantörer av mikrokontrollers för tuffare miljöer, så kallade “rugged”. För robusthet är kablar, kopplingar och inkapsling avgörande.

För den intresserade är förslag på sökord på Interet “Reliability of the arduino platform for industrial use”.

2.4 Mobilnät och trådlöst nätverk

2.4.1 Mobilnät

GSM/GPRS (2G) är de vanligaste mobilnäten som används idag, med både för- och nackdelar. En stor begränsning är dess strömförbrukning. Vid dataöverföring kan strömtoppar nå två Ampere. Av den anledningen har IoT-band utvecklats. Tre sådana band är LTE-M (LTE Cat-M1), NB-IoT (LTE Cat-NB1) och EC-GSM-IoT. LTE-M och NB-IoT-tekniken ingår i LTE-standarden, ibland märkt som 4G LTE, men eftersom den inte uppfyller alla kraven i 4G, kallas den också 3.9G. EC-GSM-IoT är en del av EDGE (eGPRS) och kallas ibland 2.5G.

Liberg m. fl. (2017), författare på Ericsson, beskriver LTE-M som “intended to achieve low device cost, deep coverage, and long battery lifetime, while maintaining capacity for a large number of devices per cell, with performance and functionality suitable for both low-end and mid-range applications for the IoT”. Vidare beskriver de NB-IoT som “intended to achieve deployment flexibility, ubiquitous coverage, ultra-low device cost, long battery lifetime, and capacity sufficient for supporting a massive number of devices in a cell”. Teknikerna fokuserar således på något olika områden inom IoT.

EC-GSM-IoT beskrivs av GSM Association (GSMA) som “based on eGPRS and designed as a high capacity, long range, low energy and low complexity cellular system for IoT communications”.

En egenskap som de tre teknikerna har gemensamt är att basstationerna bara behöver mjukvaruuppdatering och inte någon hårdvaruuppdatering. En basstation kan ses som två delar, en digital del och en radiodel.

Datahastigheter för de tre teknikerna visas i tabellerna 2.1–2.3. Skillnaden mellan momentan och max är att den senare innehåller olika kontrollsignaler. 144 dB avser 144 dB kopplingsförlust; ett mått på täckning. Varje teknik stöder en rad datahastigheter, vilket beror på många faktorer, såsom täckning och sändningseffekt. Se Liberg m. fl. (ibidem) för en detaljerad beskrivning av tekniken. Specifikation för några vanliga mobila nätverksmoduler ges i Tabell 2.4.

Effektförbrukningen för dataöverföring (Tx) är cirka 500 mW vid 23 dBm för alla tre IoT-banderna och 4 W för EC-GSM-IoT vid överföring vid 33 dBm (ibidem). Typisk strömförbrukning för GPRS i Tx, t.ex. som för modulen SIM900, är 250-500 mA vid 3,3 V; 0,83-1,65 W.

Tabell 2.1: LTE-M HD-FDD hastigheter. 23 dBm. Ver. 13 av 3GPP (Liberg m. fl. 2017).

	144 dB [kb/s]	Max [kb/s]	Momentan [kb/s]
Downlink	77	300	1000
Uplink	40	375	1000

Tabell 2.2: LTE-NB-IoT NPUSCH Format 1 hastigheter. 23 dBm. Ver. 13 av 3GPP (Liberg m. fl. 2017).

	144 dB [kb/s]	Max [kb/s]	Momentan [kb/s]
Data rate, multi-tone	28	63	250

Tabell 2.3: EC-GSM-IoT hastigheter. 23 and 33 dBm. 8PSK och GMSK (Liberg m. fl. 2017).

	144 dB [kb/s]	Max [kb/s]	Momentan [kb/s]
23 dBm device: Uplink, 8PSK	2.7	98	490
23 dBm device: Uplink, GMSK	2.7	51	154
33 dBm device: Uplink, 8PSK	40	98	490
33 dBm device: Uplink, GMSK	40	51	154

Relevant för sensorer på tåg är att band NB1 tillåter rörelse men kopplar ner och upp mellan master för att spara ström. Auto-övergång tar batteri. Band M1 är mer anpassat för rörelse.

Tabell 2.4: Specifikationer på några vanliga moduler för mobilt nätverk.

	SIM7000E ¹	SARA-N211 ²	SIM900 ¹
Supported bands	Quad-Band FDD-LTE B3/B8/B20/B28 GPRS/EDGE 900/1800Mhz	B8, B20	Quad-Band GSM/GPRS, 850/900/1800/1900 MHz
IoT support	CAT-M1 and Cat-NB1	Cat-NB1	—
Hastighet -- LTE-M	UL \leq 375 kbps DL \leq 300 kbps	—	—
Hastighet -- NB-IoT	UL \leq 66 kbps DL \leq 34 kbps	UL \leq 62.5 kb/s, DL \leq 27.2 kb/s (single-tone)	—
Hastighet -- EDGE	UL \leq 236.8 kbps DL \leq 236.8 kbps	—	—
Hastighet -- GPRS	UL \leq 85.6 kbps ³ DL \leq 85.6 kbps	—	UL \leq 42.8 kbps DL \leq 85.6 kbps

UL: Uplink. DL: Downlink. ¹SIMCom datablad. ²u-blox datablad, ³Mer troligt 43 kbps.

2.4.2 Trådlöst nätverk för IoT

Faktorer som styr valet av trådlöst nätverk för IoT inkluderar:

- Energiförbrukning (avgörande för batteridrift)
- Räckvidd (avstånd till gateway eller motsvarande)
- Möjlighet till MESH-nätverk (kan delvis kompensera kort räckvidd)

- Datahastighet
- Lämpligt frekvensband (utifrån hur frekvensspektrat används på platsen)

Nedan följer en kort beskrivning av ett antal för IoT intressanta standarder.

WPAN – Wireless personal area network

WiFi (IEEE 802,11):

- Världens dominerande standard för trådlöst nätverk
- Begränsat antal anslutningar per router, normalt <50/router
- Wide Band
- Frekvensband: 2,4 GHz och 5,8 GHz
- Begränsad räckvidd (normalt <100 m utan riktade antenner)
- Hög energiförbrukning, ej lämplig för batteridrift (normalt dagar)
- Lämpligt för strömmande data eller överföring av stora informationsmängder
- Hög datahastighet (normalt >20 Mb/s)

WiFi kommer fortsatt spela en stor roll även inom IoT i framtiden. Specifika tillämpningar för lång räckvidd såsom Wifi 802.11ah (900 MHz) finns framme, även mer energieffektiva lösningar är på väg fram.

BT-BLE BlueTooth (IEEE 802.15.1):

- Dominerande standard för trådlöst nätverk mellan smartphones, datorer och tillbehör
- Wide Band
- Frekvensband: 2,4 GHz
- Begränsad räckvidd (normalt <100 m)
- Hög energiförbrukning (normalt månader)
- Hög datahastighet (2 Mb/s)
- MESH-funktionalitet (native)

Nya standarden BT 5.0 ger dubbel hastighet och 4×räckvidd jämfört med BT 4 samtidigt som energiförbrukningen i vissa tillämpningar är lägre än tidigare.

ZigBee, 6LoWPAN, Thread (low-rate WPAN - IEEE 802.15.4):

- Dominerar marknaden smarta hem"
- Billigare än BLE
- Frekvensband: normalt 868 MHz i Europa
- Begränsad räckvidd (normalt <100 m)
- Batteridrift i (normalt månader)
- Låg datahastighet (20-250 kb/s)
- MESH-funktionalitet (native)

LPWAN – Low power wide area network**LoRa:**

- Erkänd standard, spritt i stora delar av världen
- Wide Band
- LoRa kan användas P2P eller i form av “stjärnätverk”, operatörlöst
- Frekvensband: 868 MHz i Europa
- Lång räckvidd (>10 km)
- Låg energi förbrukning (möjligt med batteridrift i flera år), kräver långa perioder av inaktivitet och få skickade meddelanden per dag
- Låg datahastighet (max 100 b/s)

Sigfox:

- Erkänd standard, spritt i stora delar av världen
- Härstammar från projekt med smarta elmätare i Frankrike
- Ultra Narrow Band
- “Stjärnätverk” som kräver operatör
- Frekvensband: 868 MHz i Europa
- Lång räckvidd (>10 km)
- Låg energi förbrukning (batteridrift i flera år)
- Låg datahastighet (100 b/s)
- Begränsad längd på telegram (12 bit)
- Begränsning i antal telegram per dag (150 telegram/dag)

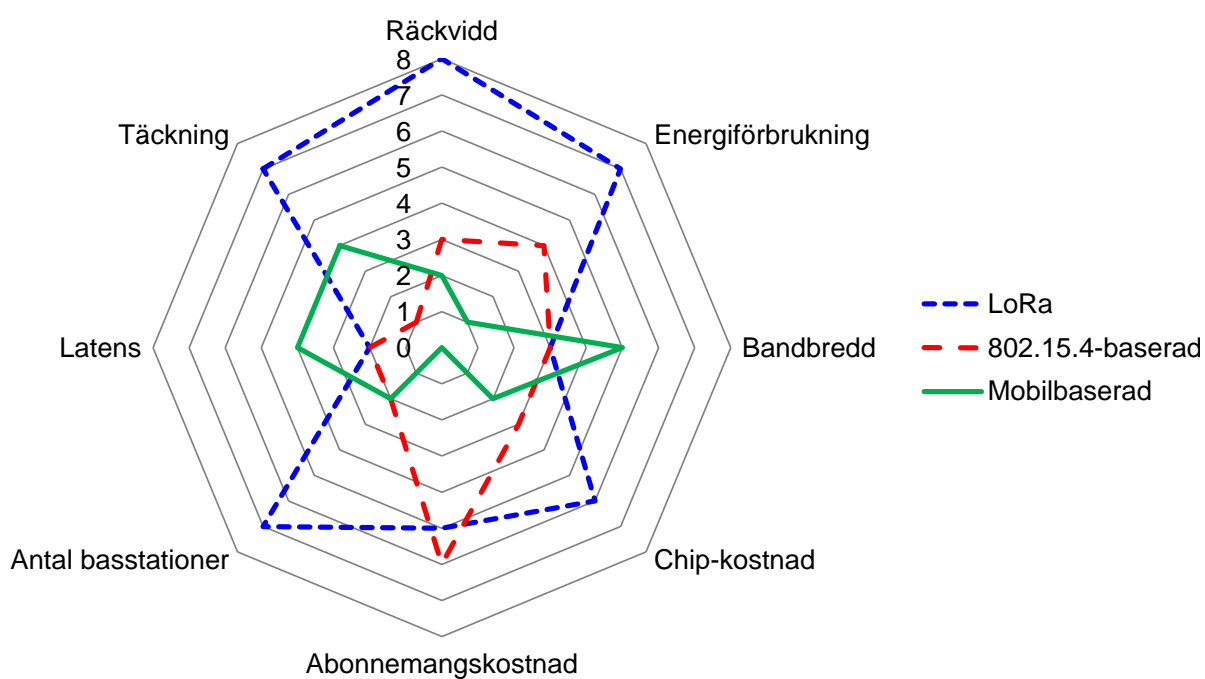
Det finns ingen enskild standard som är lämplig i alla tillämpningar. När batteridrift krävs önskas normalt minst 3 års batteridrift, detta begränsar utformningen av hela mätsystemet. Normalt behöver edge computing användas för att slippa skicka rådata, detta begränsar flexibiliteten avsevärt och leder ofta till en nedskalad lösning med endast en eller ett fåtal funktioner och ofta fasta larmgränser. För realtidsapplikationer och/eller möjlighet att ladda upp all rådata till ett moln finns inga tillräckligt bra lösningar med lång batteritid, här gäller fortsättningsvis fast installerad kraftmatning.

Sigfox och LoRa är utmärkt på att skicka liten datamängd relativt sällan över långa avstånd med batteridrift. WiFi är enklast att tillämpa när större datamängder ska skickas och det finns möjlighet till fast kraftmatning och tillgänglig router.

En jämförelse av LPWAN (LoRa), 802.15.4 (tänk hemnätverk) och mobilnätverk ges i figur 2.5. Högre värde på skalan 1–8 betyder bättre. Exempelvis i fallet antal basstationer är färre antal basstationer bättre, dvs. högre värde på skalan, och på abonnemangskostnad innebär lägre siffra högre kostnad.

2.5 Sakernas internet – IoT

Sakernas internet, engelska Internet of Things (IoT), är ett begrepp inom informationsteknik avseende alla de enheter som via inbyggda sensorer eller datorer är uppkopplade mot internet (NE 2018). ISO/IEC JTC1 (2015) beskriver sakernas internet med: “An infrastructure of interconnected objects, people, systems and information resources together with intelligent services to allow them to process information of the physical and the virtual world and react”. Bland annat skriver ISO/IEC att marknaden för IoT kommer att drivas av tillgängligheten på enheter som är billiga, strömsnåla och sammankopplade. För svensk standardutveckling, se Swedish Standards Institute (sis.se) och sök på TK 611.



Figur 2.5: Relativ jämförelse av LPWAN (LoRa), 802.15.4 och mobilnätverk (Pietrosemoli 2017).

3. Metod

Tillämpade metoder är litteraturstudie, idégenerering, labbtester och fältprov. Litteraturstudien innefattar sökning i Scopus databas på nyckelorden listade i sammanfattningen och teknikerna diskuterade i kapitel 2, t.ex. MEMS accelerometer. I kapitel 4 diskuteras resultatet med referens till andra studier.

3.1 Idégenerering med 635-metoden

635-metoden har tillämpats i en workshop för att identifiera möjliga praktiska tillämpningar av dataloggers/sensorer i järnvägsinfrastruktur (Stenström 2013). 635-metoden är en typ av brainstorming, idékläckning, där deltagare i grupp skriver ner idéer på varsitt papper, skickar runt papperna i gruppen, bygger på med text och sedan sammanställer. Workshopen avsåg idégenerering för tillståndsövervakning av järnvägar och fordon. Manual för utförande av metoden tillhandahölls av projektet OptiKrea, som startades av Järnvägstekniskt centrum (JVTC) vid Luleå tekniska universitet (LTU) (Petersson 2017).

Workshopen bestod av elva deltagare och varade i tre timmar. Se bilaga A för metod och resultat.

3.2 Utveckling av prototyp

3.2.1 Strömförsörjning

För att demonstrera en lösning som kan användas av infrastrukturförvaltare, entreprenörer och forskare, föredras en batteridrivna lösning. Alla batterier förlorar kapaciteten vid låga temperaturer. Vissa batterier blir emellertid mer eller mindre oanvändbara vid temperaturer under noll, medan andra kan tåla exempelvis -20 °C och -40 °C . Litiumbatterier (ej laddningsbara) och blybatterier (laddningsbara) kan fungera vid -20 °C och -40 °C . Blybatterier kan emellertid ha en tvåsiffrig urladdningshastighet per månad och är därför inte en långsiktig strömkälla om de inte laddas. Litiumbatterier kan å andra sidan ha en självurladdningshastighet på 0,5 % per månad. En nackdel med litiumbatterier är dess höga inköpskostnad. Ett alternativ är litiumjonbatterier, men lika kostsamma, med sämre självurladdningshastigheter på exempelvis 2 % per månad. Andra vanliga batterityper är alkaliska och li-po, men båda typer fungerar dåligt i låga temperaturer. Av dessa anledningar använder vi oss av litiumbatteri.

3.2.2 Uppvakningsfunktion

Uppvakningsfunktion, eller wake-up-funktion, baserat på MEMS-accelerometer har visats vara effektiv i järnvägsspår; se figur 3.1. Figuren visar en bildruta från en filmsekvens, vid den tidpunkt då enheterna precis vaknat av vibrationerna i rälen och aktiverat varsin vit LED (blå pilar). Enheterna är likadana och består var och en av ett batteri, en Sparkfun

Wake-on-Shake (art. SEN-11447) och en LED. Enheterna skiljer sig åt avseende inställt gränsvärde för uppvakning.

I detta projekt har vi använt oss av den fristående uppvakningsenheten från Sparkfun, men det finns även MEMS-accelerometrar med integrerad wake-up-funktion.



Figur 3.1: Test av uppvakningsfunktion (Lindqvist 2017).

3.2.3 Mikrokontroller

Mikrokontrollern vid utveckling av prototyp kan vara en dedikerad mikrokontroller, dvs. en programmerad från grunden, eller vara av en mer allmän typ, t.ex. Arduino-kompatibel eller Raspberry Pi. Notera att Raspberry Pi är mer av en mikrodator och kan inte försättas i viloläge med låg strömförbrukning och väckas snabbt. Oavsett val av mikrokontroller är det driftsäkerheten på den uppladdade programkoden som i stor utsträckning avgör driftsäkerheten på prototypen. I tabell 3.1 har vi sammanställt egenskaper på några mikrokontrollers. Eftersom vi vill ha låg strömförbrukning och inte behöver beräkningskraft i nivå med en dator, använder vi oss av Arduino mikrokontroller. Vidare erbjuder Arduino också ett insteg i programmering av mikrokontroller på kretskort, med tanke på möjligheten till support och guider. Exempelvis har Internet-forumet forum.arduino.cc 650 000 medlemmar.

Programkod och kopplings-/kretsschema för prototypen utvecklad i detta projekt ges i nästa kapitel och bilaga B. Från Arduino är det enkelt att gå till kraftfullare mikrokontrollers som är Arduino-kompatibla, t.ex. Teensy eller Particle (ARM-processor) och ESP32. Arduino programmeras i C/C++.

3.2.4 Accelerometer

Trafikverket och Luleå tekniska universitet har testat ett antal olika MEMS och piezoelektriska accelerometrar; se tabell 3.2. Dytran 7509A4 ger tillfredsställande resultat ner till 1 Hz. Med tanke på brusnivån är ADXL354 en annan intressant sensor, men mätområdet

Tabell 3.1: Strömförbrukning på några vanliga mikrokontroller på kretskort.

Mikrokontroller på kretskort:	Arduino Uno	Arduin Nano	Arduino Mega 2560	Rasp Pi 3 Model B	Rasp Pi 1 Model B+	Rasp Zero
Mikrokontroller	ATmega328p	ATmega328	ATmega2560	BCM2837	BCM2835	BCM2835
Strömförbrukning [mA]	144 ⁽¹⁾ 47 ⁽⁵⁾	19 ⁽²⁾ 35 ⁽¹⁾	79 ⁽¹⁾ 53 ⁽⁶⁾	340 ⁽³⁾ 400 ⁽⁴⁾	190 ⁽³⁾ 330 ⁽⁴⁾	100 ⁽⁴⁾
Spänning [V]	5	5	5	5	5	5
Klockfrekvens	16 MHz	16 MHz	16 MHz	4×1.2 GHz	4×1.2 GHz	1 GHz
Flash-minne [kB]	32	32	256	–	–	–
SRAM	2 kB	2 kB	8 kB	1 GB	256 MB	512 MB
EEPROM [kB]	1	1	4	–	–	–
Endast mikrokontroller:	ATmega328p	ATmega328	ATmega2560	ESP32		
Strömförbrukning [mA]	0,2 @ 1 MHz och 1,8 V ⁽⁷⁾ 5,2–9 @ 8 MHz & 5 V ⁽⁷⁾	0,2 @ 1 MHz och 1,8 V ⁽⁷⁾ 5,2–12 @ 8 MHz & 5 V ⁽⁷⁾	11 @ 8 MHz och 5 V ⁽⁷⁾ 20 @ 16 MHz och 5 V ⁽⁷⁾	30–50 @ 240 MHz ⁽⁸⁾ 20–25 @ 80 MHz ⁽⁸⁾		

⁽¹⁾tlextrait.svbtile.com, ⁽²⁾arduino.cc., ⁽³⁾Pi-Top på Youtube. Utan kringutrustning.

⁽⁴⁾raspberrypi.org. Utan kringutrustning., ⁽⁵⁾gadgetmakersblog.com., ⁽⁶⁾tpcdb.com.

⁽⁷⁾Microchip datablad., ⁽⁸⁾Espressif Systems datablad.

på ± 8 g är litet för mätning på järnvägsslipper. Accelerationen på sliper intill ett växelkruss kan för enstaka tåg uppgå till 13 g i medel och för enstaka axlar kan accelerationen uppgå till 50 g (Nissen 2018). ADXL354 kostar ca. 400 kr jämfört med Dytran 7509A4 för 7 380 kr. Dytran kommer inkapslad, med en skärmad kabel och böjskydd.

Tabell 3.2: Accelerometrar testade inom projektet.

Modell	Mätområde [\pm g]	Brus	Bandbredd [Hz]	Shock ⁽¹⁾ [g]	Tillverkare
ADXL326, MEMS	16	300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0,5–550 för z-axeln	10000	Analog Devices
ADXL354, MEMS	8	20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0–1500	5000	Analog Devices
7509A4-05, MEMS	25	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0–1500	5000	Dytran
8315A100, MEMS	100	1.25 $\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$, 0–100 Hz 12.5 mg, 0–100 Hz	0–1000	6000	Kistler
8703A50, Piezoelektrisk	50	–	–	–	Kistler

⁽¹⁾Shock avser stöt givaren klarar av utan att ta skada.

Mätområde, bandbredd, känslighet och brus hänger ihop med varandra. Detta inses genom att illustrera MEMS-accelerometer med en konsolbalk av varierande längd, dimension och vikt. Ett exempel på detta samband hittas i databladet för Dytrans MEMS-serie 7509A4-xx; se tabell 3.3.

Om endast förskjutning av sliper avses mätas, skulle ± 5 Dytran-sensor (tabell 3.3) räcka för tåg som passerar med en hjulaxelfrekvens upp till 7 Hz. Harmonisk rörelse $a = -\omega^2 x = -(2\pi f)^2 x \approx 4 \text{ g}$, vilket med gravitationen adderad blir 5 g. Detta förutsätter att högre frekvenser kan filtreras bort mekaniskt.

Tabell 3.3: Dytran datablad 7509A4-xx.

Modell	Mätområde [\pm g]	Bandbredd [Hz]	Känslighet [mV/g]	Shock [g]	Brus [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]
7509A1-xx	± 2	0–400	200	2000	5
7509A2-xx	± 5	0–600	800	2000	7
7509A3-xx	± 10	0–1000	400	5000	10
7509A4-xx	± 25	0–1500	160	5000	25
7509A5-xx	± 50	0–2000	80	5000	50
7509A6-xx	± 100	0–2500	40	5000	100
7509A7-xx	± 200	0–3000	20	5000	200
7509A8-xx	± 400	0–4000	10	5000	400

Accelerometrarna testade inom projektet kalibreras genom att mäta en stabil konstant gravitationskälla. Om vi sätter accelerometern ovanpå ett bord, med accelerometers plusriktning parallellt med bordets normalvektor, får vi 1 g. Sätter vi sedan accelerometern på undersidan av bordsskivan, med accelerometers plusriktning mot jordens centrum, får vi -1 g . Om vi antar att accelerometern är linjär i mätområdet, kan vi använda räta linjens ekvation för att räkna om utspänningen, eller digits från AD-omvandlaren, till acceleration.

3.2.5 AD-omvandlare

Exempel på ett antal AD-omvandlare ges i tabell 3.4. ADS1174:s och ADS1158:s höga samplingshastigheter gör dem lämpade för vibrationsövervakning i högre frekvenser. För mätning av sliperförskjutning räcker samplingshastigheten på ADS1115. Exempelen i tabellen har single-ended och differentiell ingångstyp. ADS1115, ADS1220 och ADS1158 har multiplex flerkanaliga ingångar och ADS1262 är av typen simultaneous sampling. ADS1220 levereras med en integrerad temperatursensor. I detta projekt har vi använt ADS1115 och ADS1202.

3.2.6 Datalagring

Insamlad data kan lagras med hjälp av ett integrerat eller utbytbart flashminne. Livslängden för ett flashminne beror på om det har wear levelling eller inte. Antalet raderingscykler i ett minnessegment räknas i tusentals, och för ett flashminne med wear levelling är det 100 000 till 1 000 000 cykler. Wear levelling innebär att data sparas och raderas jämnt

Tabell 3.4: Analog till digital-omvandlare från ti.com.

Modell	Bits	kSPS	Kanaler	mW	Buss	Typ	V	°C	V ref.
ADS1115	16	0,86	4	0,3	I2C	Delta-sigma	2–5,5	-40–125	Intern
ADS1220	24	2	4	1,4	SPI	Delta-sigma	2,3–5,5	-40–125	Intern, extern
ADS1174	16	52	4	135	SPI	Delta-sigma	1,65–1,95	-40–85	Extern
ADS1158	16	125	16	42	SPI	Delta-sigma	2,5–3,6	-40–105	Extern

över alla minnessegment. Antalet raderingscykler i ett flashminne beror således på dess lagringskapacitet. Ett överdimensionerat minne kan därför användas för längre livslängd. Därav behöver inte valet mellan integrerat eller utbytbart minne ha någon betydelse i många järnvägstillämpningar, men antalet skriv/raderingscykler bör anges vid specifikation.

3.2.7 Uppkoppling

Något IoT-band har inte funnits till hands under projektets gång. Därav har GSM/GPRS, dvs. 2G, använts. Modulen är en SIM 900 från Seeed Studio av modell GPRS Shield V3.0. Det bör noteras att långsammare uppkoppling kräver längre uppkopplingstid för att överföra data. Vid sampling av data kan det därför vara fördelaktigt utifrån strömförbrukning att använda sig av t.ex. 5G för att korta ner uppkopplingstiden. Om insamlad data komprimeras kan uppkopplingstiden kortas ytterligare. Text och siffror kan komprimeras med omkr. 90%. Det kan då vara intressant att titta på en mer avancerad mikrokontroller.

Samplad data kommer skickas till en ftp-server. ftp-server är fortfarande den allra vanligaste lösningen för överföring av vibrationsdata (personligt kommunikation med 65nord.se)

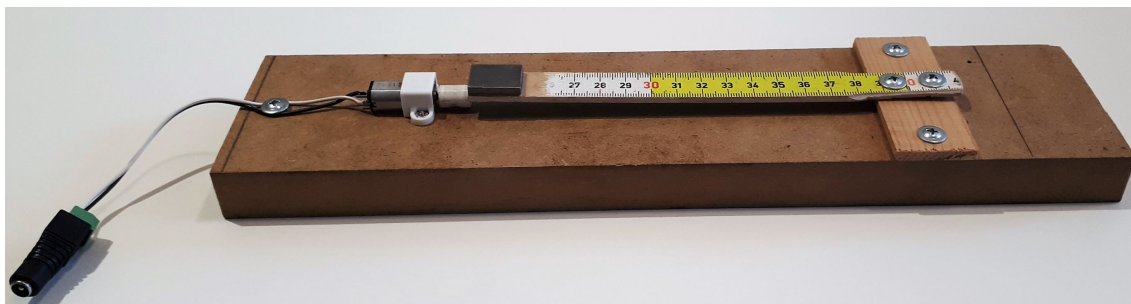
3.2.8 Prototypen

Prototypen ska ha följande design:

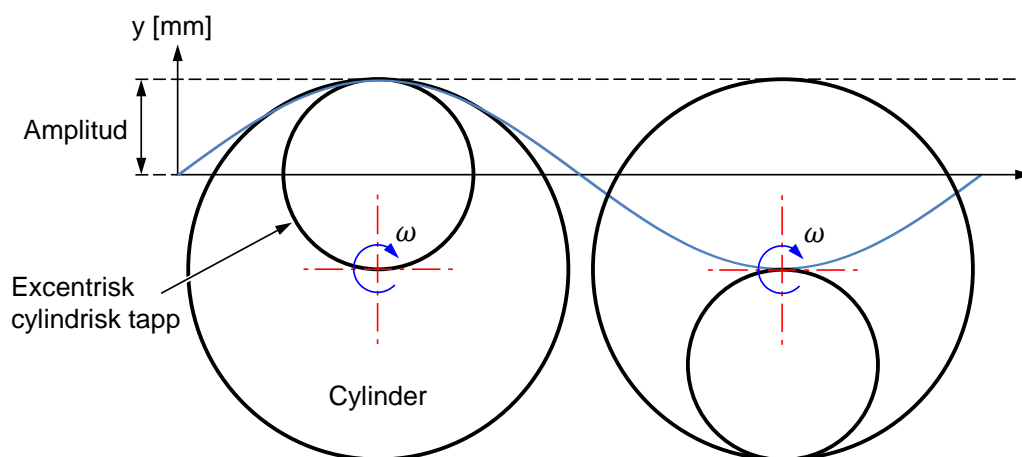
- Litiumbatteri för drift i låga temperaturer
- Fristående uppvakningsfunktion
- Arduino mikrokontroller för låg strömförbrukning
- Accelerometer av MEMS-typ
- AD-omvandlare med bitar för hög precision och några hundra SPS
- mikroSD-kort för lagring
- Klocka för tidsstämpling
- GPRS för att ladda upp insamlad data

3.3 Labbtester och fältprov

Labbtester genomfördes på en sinusvåg-generator; se figur 3.2. Under det vita fästet intill likströmsmotorn sitter en växellåda. Från växellådan går det ut en axel med en vit cylinder i plast monterad centriskt. I änden av plastcylindern sticker en excentrisk cylindrisk tapp ut. På tappen vilar en bit från en tumstock, som i sin tur har en stålbit fastlimmad. Principen för sinusvåg-generatorn illustreras i figur 3.3. Amplituden på sinusvågen som genereras är $\approx 1,8$ mm.



Figur 3.2: Sinusvåg-generator. Accelerometer-sensor monteras på stålplattan med magnet.



Figur 3.3: Princip för sinusvåg-generator.

Utöver en sinusvåg, genererar uppställningen brus utifrån tre källor; dels från att tappen skrapar mot tumstocksdelen, dels från växellådan, och dels från att kraftvektorn i växellådan ändrar riktning två ggr per varv.

Fältprov kommer att ske på sliper för att testa lågfrekvensförmågan på MEMS-accelerometer. Förskjutning av sliper ger information om spårunderbyggnaden, så som styvhet och degradering över tid.

4. Resultat och diskussion

Vi börjar med att kort presentera resultatet från idégenerering. Några av idéerna är kopplade till att mäta vibration eller förskjutning, vilket är en av anledningarna till att vi i detta projekt valt att gå vidare med vibrationsmätning på sliper. De andra anledningarna är att det sätter relativt höga krav på strömförsörjningen, mikrokontrollern, accelerometern, AD-omvandlaren och uppkopplingen (se kap. 1).

4.1 Idégenerering med 635-metoden

Workshopen resulterade i ca. 40 frågeställningar vid införelse eller utökade av sensorer i järnvägar, samt ca. 80 idéer på tillämpningar/fenomen för sensorer i järnvägar. Många frågor och idéer på tillämpningar är väl kända sedan tidigare, men vissa frågor/idéer är mer sällan uttryckta. Se avsnitt A.2 och tabellerna A.1–A.3 i bilaga A för resultatet.

Frågorna/idéerna kan vara behjälpliga vid arbete eller tankeverksamhet kring tillståndsovervakning av järnvägar och rullande materiel. Frågorna/idéerna behandlar både småskalig tillämpning av sensorer och storskalig tillämpning, dvs. sakernas internet / internet of things.

För att gå vidare med frågorna/idéerna kan de väljas ut i en workshop i grupp eller genom individuellt arbete. Att utveckla eller diskutera idéerna vidare är dock utom denna rapports räckhåll.

4.2 Prototyp

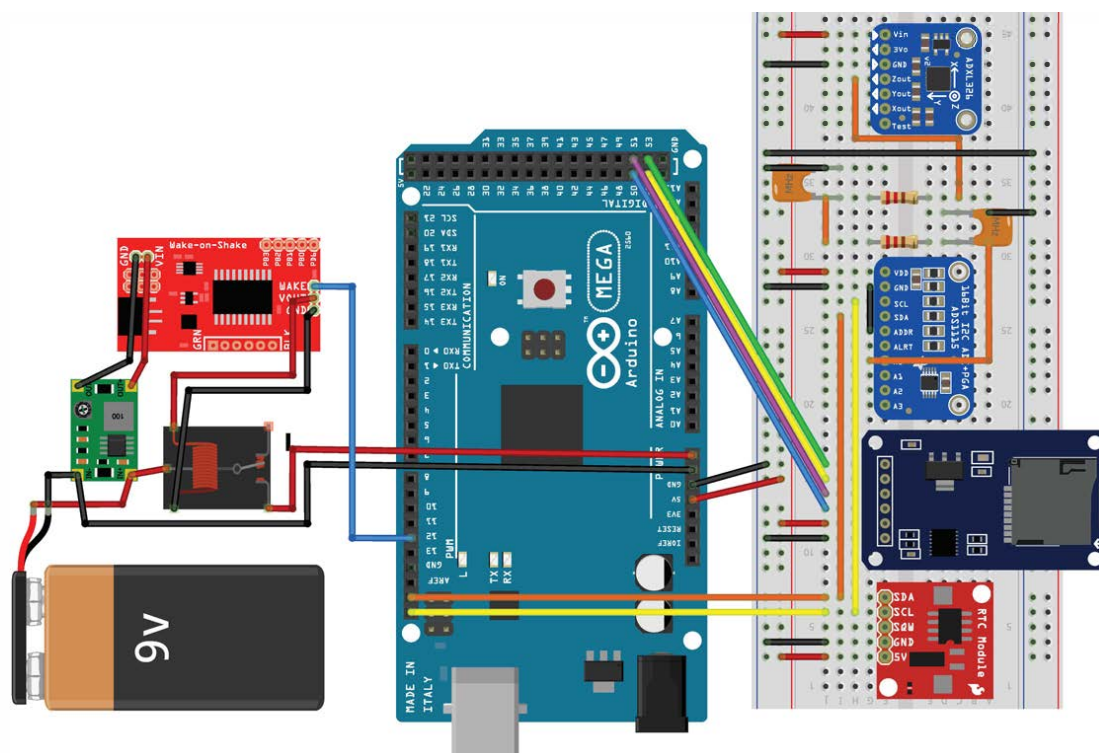
Utifrån resonemanget i metodkapitlet har prototypen i tabell 4.1 och figurerna 4.1 och 4.2 tagits fram. Dess funktion är enligt följande: Spänningsregulatorn reglerar spänningen till wake-on-shake, som i sin tur slår på ett relä för strömförsörjning till mikrokontrollern (Mega 2560). Mikrokontrollern samlar in data från accelerometern via AD-omvandlaren. Accelerometern har en analog utsignal som filtreras via ett andra ordningens lågpasfilter, innan signalen digitaliseras. Samplingen av vibrationsdata ligger på 630–650 Hz och sker under ett förvalt antal sekunder. Insamlad data sparas temporärt i arbetsminnet (SRAM). Efter data samlats in under förvalt antal sekunder sparas det ner på microSD-kort i en txt-fil. Därefter kopplar SIM900 upp sig mot en ftp-server och laddar upp txt-filen. Efter uppladdning stänger mikrokontrollern av sig själv genom signalkabel till Wake-on-Shake. I nedstängt läge kan ett 9 Volts batteri strömförsörja enheten i några hundra dagar (200–300).

Arduino Mega 2560 valdes framför Arduino Uno för att koden är något för stor för Uno och för att Uno klarar endast av att sampla data i ca. 10 sekunder innan arbetsminnet blir fullt och måste sparas ner på microSD-kortet. Programkoden lagras i flashminnet, vilket är 32 kB på Uno och 256 kB på Mega. Insamlad data sparas temporärt i SRAM-minnet, och är 2 kB på Uno och 8 kB på Mega.

Klockan DS1307 används för att tidsstämpla insamlad data. Om insamlad data alltid laddas upp till ftp i samband med insamlingen, kan klockan tas bort. Samma gäller mikroSD-läsaren och mikroSD-kortet. Mega-kortet bör kunna spara 40 sekunder data i arbetsminnet innan det blir fullt. Ska data längre än 40 sekunder samlas i behövs ett mikroSD-kort för att tömma minnet emellanåt.

Tabell 4.1: Specifikation på framtagen prototyp.

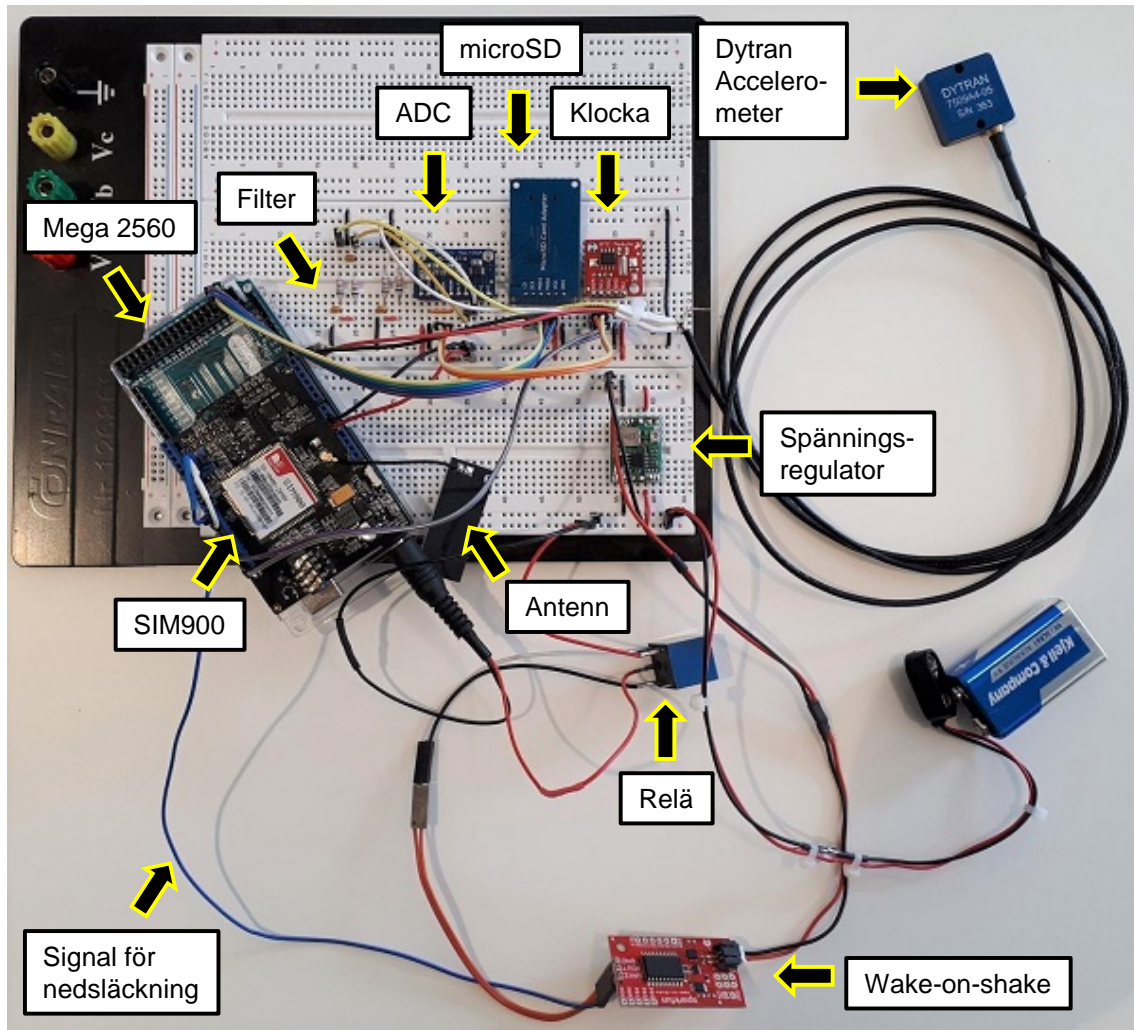
Delsystem	Produkt
Strömförsörjning	Litium- eller blybatteri för temp. $\leq 0^{\circ}\text{C}$
Uppvakningsfunktion	Sparkfun Wake-on-Shake
Mikrokontroller	Arduino Mega 2560
Accelerometer	Dytran 7509A4 och ADXL326
AD-omvandlare	ADS1115, 16 bit, 860 SPS och intern referensspänning
Datalagring	microSD-kort
Uppkoppling	SIM900 GPRS-modul från Seeed Studio
Klocka	DS1307 RTC, med datum
Spänningsregulator	MP1584 från Luxorpart



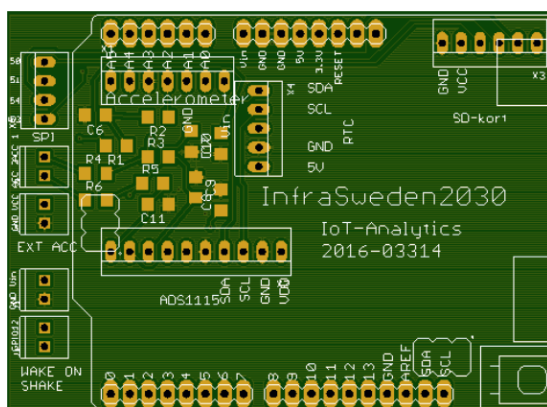
Figur 4.1: Kopplingsschema för prototyp. GRPS-skölden saknas i bilden. (ritad i Fritzing)

I figur 4.1 saknas SIM900-skölden som syns i figur 4.2 pga. avsaknaden av grafisk modell. När SIM900-skölden monteras sätts kopplingstrådarna på samma vis som i figur 4.1. Därefter adderas den blåa och den vita kopplingstråden på SIM900-skölden i figur 4.2, för att koppla förbi den manuella knappen för påslagning.

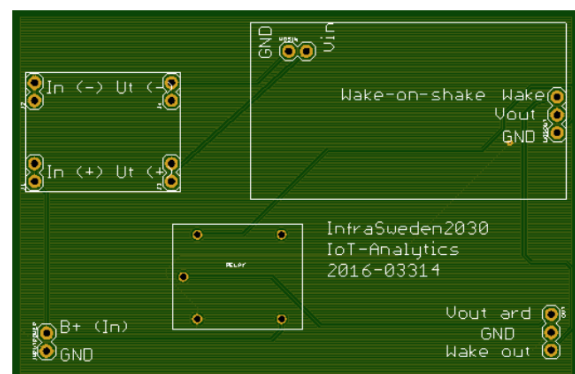
För att lättare kunna montera prototypen i en apparatlåda och öka funktionssäkerheten har en mönsterkort designats; se figurerna 4.3, 4.4 och 4.5.



Figur 4.2: Prototyp på kopplingsdäck med Dytran accelerometer.

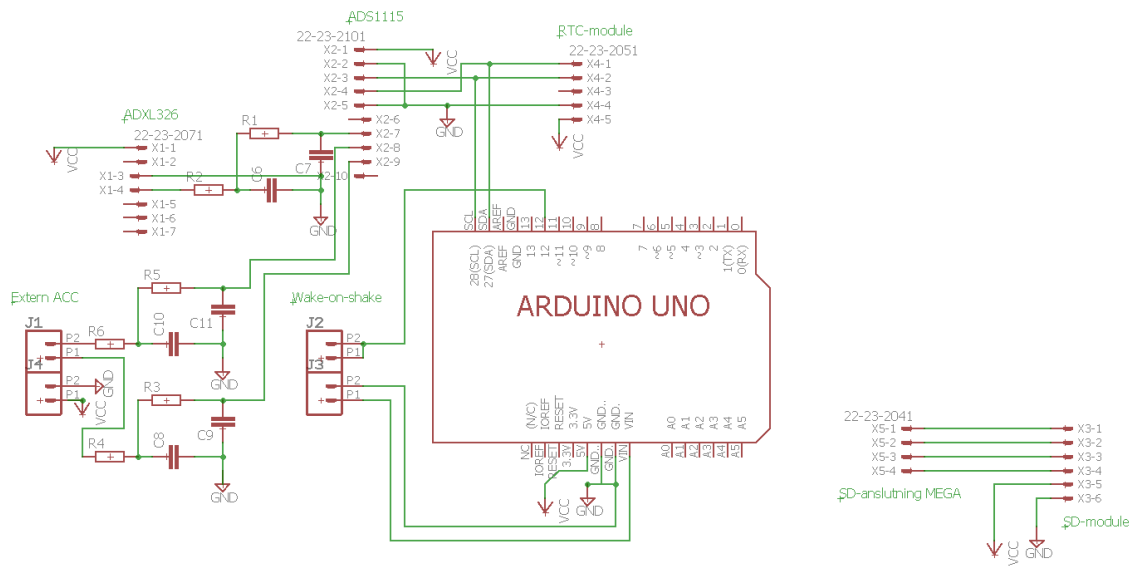


(a) Sköld för komponenterna på kopplingsdäcket till höger i figur 4.1.

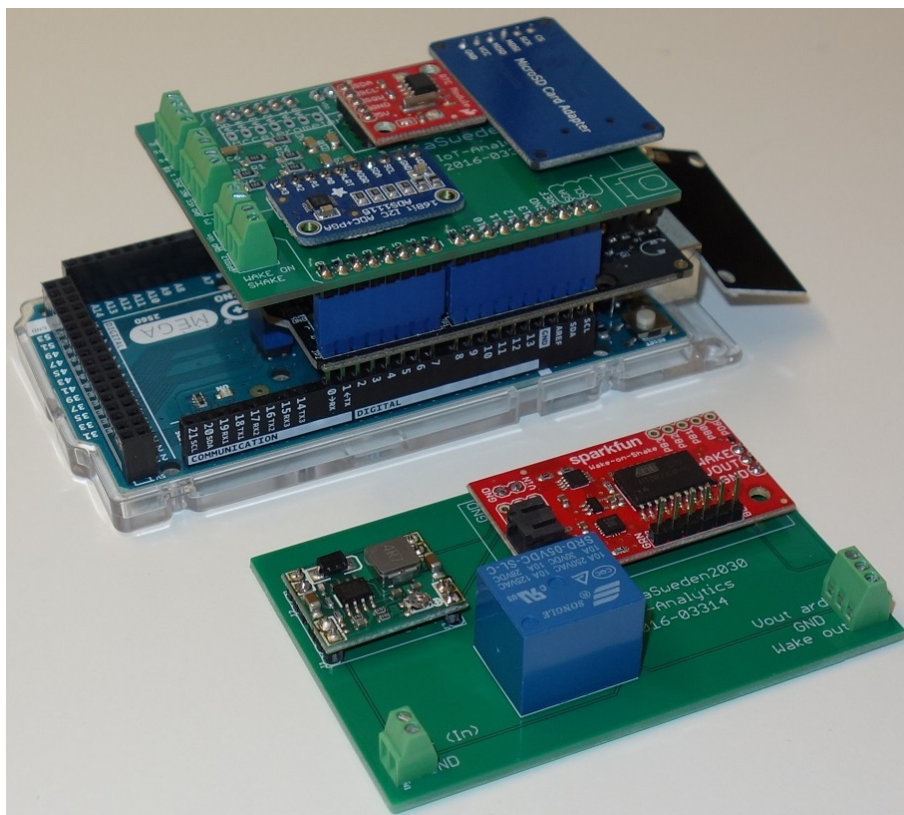


(b) Kort för uppvakningsfunktion och strömförsörjning; komponenterna till vänster i figur 4.1.

Figur 4.3: Mönsterkort för sköld och strömförsörjning.



Figur 4.4: Kretsschema för prototyp.



Figur 4.5: Prototyp utan kablage och utan strömförsörjning).

Notera att ett analogt filter har använts. Filtret är en andra ordningens lågpasfilter med resistorer på 33 k Ω och kondensatorer på 100 nF, vilket medför en gränshfrekvens på 50 Hz. Det analoga filteret ger en signal med betydligt mindre brus tillsammans med AD-omvandlaren ADS1115. Detta filter i första ordningens utförande användes av Milne m. fl. (2016) för mätning på sliper med givare ADXL326. Milne m. fl. (ibidem) gjorde mätningar i labb ner till 2 Hz och i fält på tåg i 60 m/s.

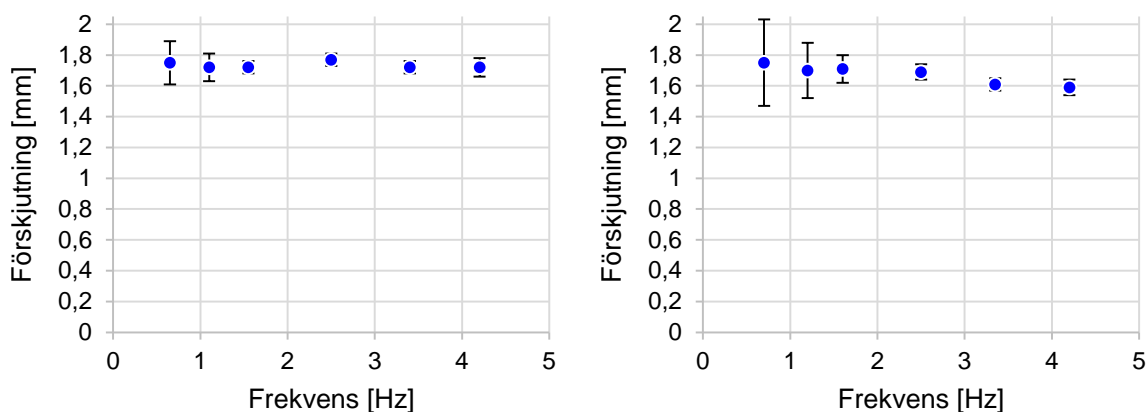
För programkoden, se bilaga B.

4.3 Labbtester

Resultat från test av Dytran 7509A4-05 och Analog Devices ADXL326 från test på sinusvåg-generator (figur 3.2) ges i figur 4.18 och tabell 4.2. Skillnaden i samplingshastighet, 128 Hz gentemot 650 Hz, beror på att Dytran-givaren är kopplad med differential och ADXL326 är kopplad med single-ended, och vid programmering av AD-omvandlaren justerades samplingshastigheten upp endast för single-ended. Detta medförde att samma värde loggades fem gånger för Dytran-givaren ($128 \times 5 = 640$). I praktiken har detta ingen nämnvärd påverkan vid dessa låga frekvenser, vilket visas i fältprovet.

Det absoluta relativa felet i tabell 2.3 ges av $|(x-x_0)/x_0|$ där x är det uppmätta värdet och x_0 är det sanna värdet. Verklig förskjutning (amplitud) är ≈ 1.8 mm.

Mellan de två accelerometrarna skiljer sig median-värdena åt ovanför två hertz och spridningen skiljer sig åt under två hertz. Dytran-sensorn har högre precision och noggrannhet. Dytran-sensorn kostar 7 380 kr och ADXL326 kostar omkring 50 kr. Tillverkare och modell av MEMS-accelerometern i Dytran-sensorn är okänd inom detta projekt. Ett alternativ till Dytran kan vara ADXL354 pga. dess likvärdiga brusnivå enligt (tabell 3.2).



(a) Dytran 7509A4-05 MEMS-accelerometer med samplingsfrekvens på 128 Hz.

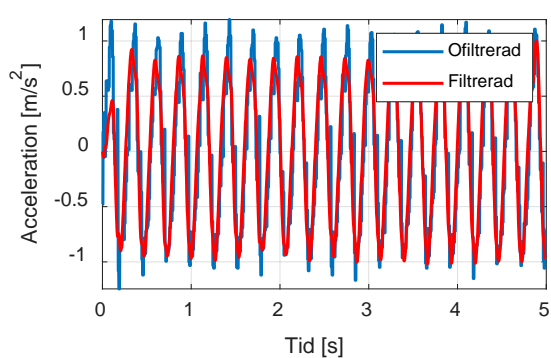
(b) ADXL326 MEMS-accelerometer med samplingsfrekvens på 650 Hz.

Figur 4.6: Resultat från mätning på sinusvåg-generator. Datapunkter (blåa) är det aritmetiska medelvärdet av absolutbeloppet på minima och maxima utifrån 20 sekunders sampling. Morrhåren är standardavvikelsen. Verklig förskjutning (amplitud) är ≈ 1.8 mm.

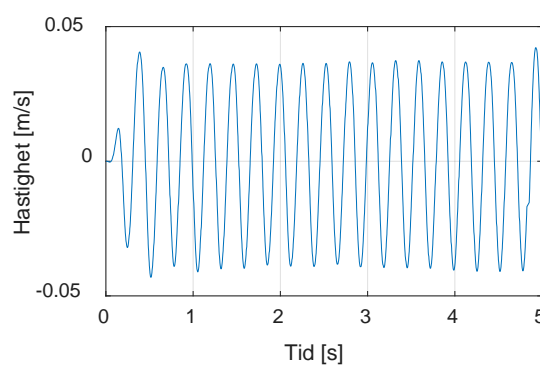
I figurerna 4.7 och 4.8 ser vi hur mätningen genomförs, samplat i 128 Hz. Filtrering och dubbelintegrering genomförs i Matlab; se bilaga B. Lådagrammet i figur 4.8b baseras på absolutbeloppet av minima och maxima i figur 4.8a. Lådagrammets 25:e percentil är på 1,58 mm och 75:e percentil är på 1,65 mm, dvs. 50 % av värdena är inom dessa gränser.

Tabell 4.2: Absolut relativ fel på medianvärde gentemot 1,8 mm.

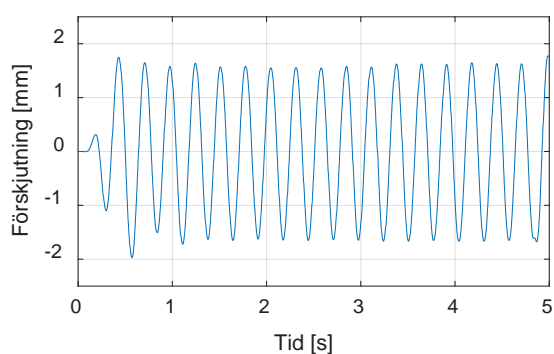
Dytran 7509A4-05		ADXL326	
Förskjutning [mm]	Abs rel. fel [%]	Förskjutning [mm]	Abs rel. fel [%]
1,75	2,8	1,75	2,8
1,72	4,4	1,70	5,6
1,72	4,4	1,71	5,0
1,77	1,7	1,69	6,1
1,72	4,4	1,61	10,6
1,72	4,4	1,59	11,7



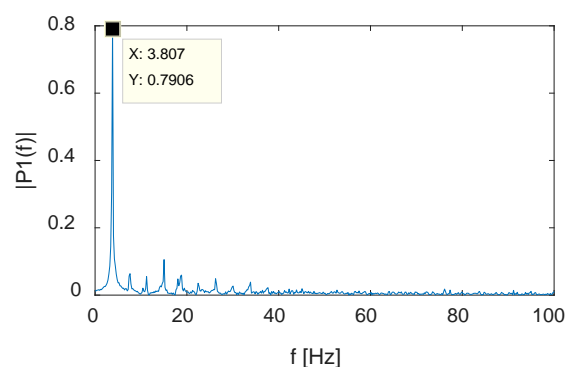
(a) Acceleration.



(b) Hastighet.

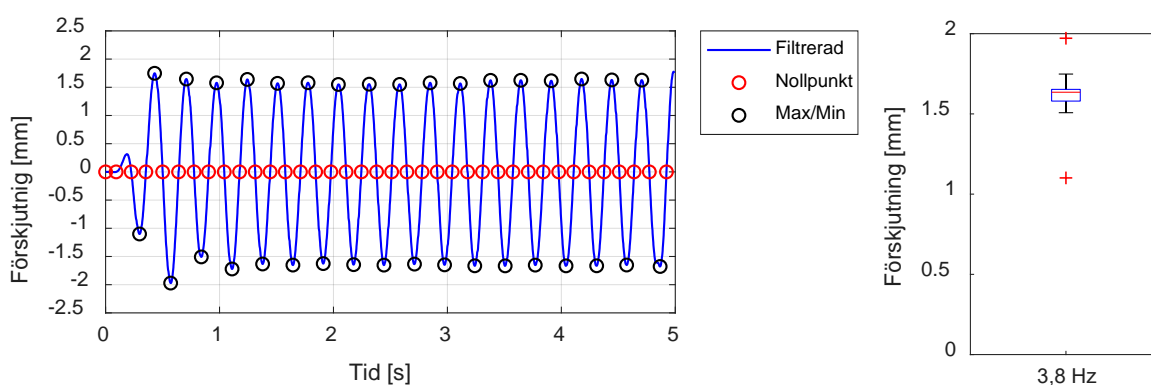


(c) Förskjutning.



(d) Frekvensdomän innan filtrering.

Figur 4.7: Resultat från mätning på sinusvåg-generator i fem sekunder och 3,8 Hz. Data-punkt på 3,8 Hz återfinns inte i figur 4.18 eftersom denna data samlades in vid ett annat tillfälle via GPRS till ftp-server.



(a) Minima och maxima datapunkter för lådagram till höger. Första och tredje minima är utliggarna som syns i lådagrammet.

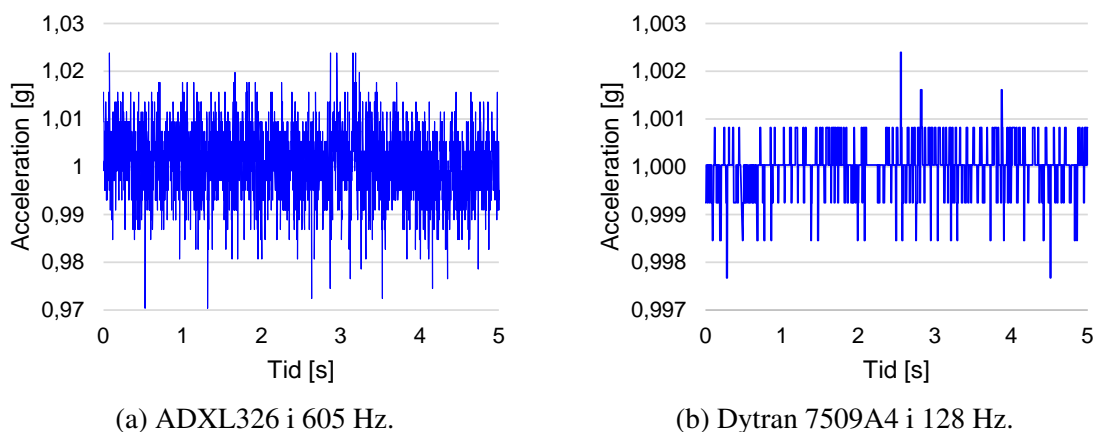
(b) Lådagram med median på 1,64 mm.

Figur 4.8: Resultat från mätning på sinusvåg-generator i fem sekunder och 3,8 Hz, som visar framtagning av minima och maxima värden.

4.3.1 Mätning av brus

Brusnivån i ADXL326 och Dytran 7509A4 har mätts upp för att jämföra med angivet värden i datablad. Mätning vid 1 g visas i figur 4.9. Uppmätt brusnivå är inom värden angivna i datablad; se tabell 4.3. Kolumn fyra i tabellen, Brus [g], beräknas t.ex. för ADXL326 genom $300 \times 10^{-6} \times \sqrt{550}$. Den uppmätta brusnivån beräknas med kvadratiska medelvärdet på datapunkterna i figur 4.9, dvs. $\sqrt{1/n (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$.

En faktor som kan ha påverkat det uppmätta resultatet kan vara den höga men dock begränsade upplösningen på AD-omvandlaren ADS1115.



(a) ADXL326 i 605 Hz.

(b) Dytran 7509A4 i 128 Hz.

Figur 4.9: Mätning av brus vid 1 g ($9,82 \text{ m/s}^2$).

Tabell 4.3: Brusnivå enligt datablad och mätning.

	Brus enligt datablad [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms]	Bandbredd [Hz]	Brus [g]	Uppmätt brus [g _{rms}]
ADXL326	300	550	$0,007 \approx 0,01$	$0,0067 \approx 0,01$
Dytran 7509A4	25	1500	$0,00097 \approx 0,001$	$0,00063 \approx 0,001$

4.4 Fältprov

Fältprov har genomförts på en sliper i en järnvägsväxel på Malmbanan, Notviken, Luleå. Monteringen visas i figur 4.10. Mätresultat från malmtåg visas i figurerna 4.11, 4.12 och 4.13. I jämförelse med mätning i labb är spridningen i amplitud betydligt större. I figur 4.12 återfinns 50 % av värdena inom 1,07–1,64 och i figur 4.13 återfinns 50 % av värdena inom 1,47–1,88 mm, att jämföra med labbtestet (figur 4.8b). Enda skillnaden mellan dessa två figurer är att passbandet ligger på 1,2–8 Hz i ena fallet och 1,0–8 Hz i andra fallet. Detta medför en stor spridning i det första lådagrammet eftersom minima-värdena under x-axeln ligger på omkring –1 mm.

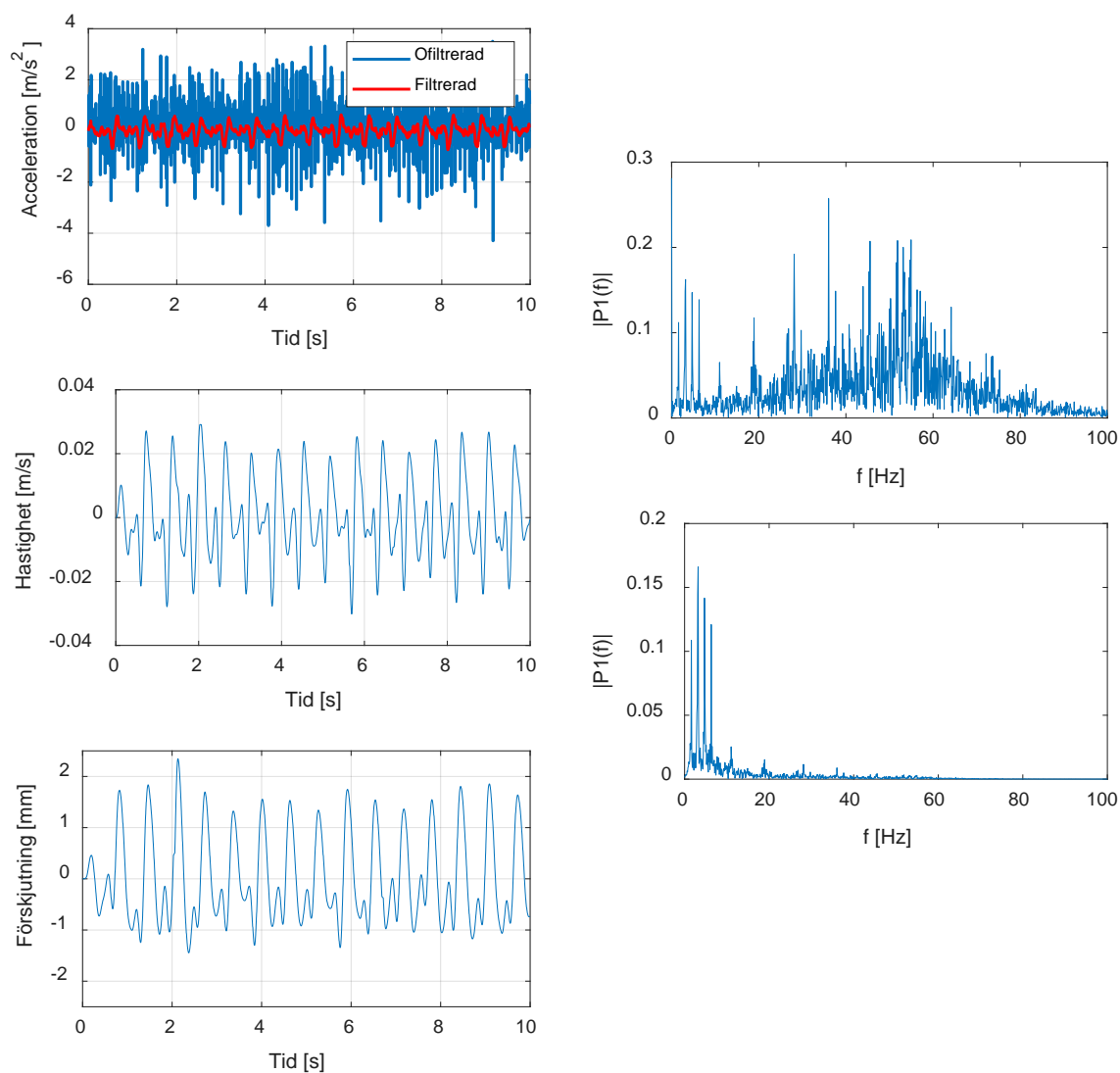
Filtret är ett andra ordningens Butterworthfilter som appliceras innan, mellan och efter integrering, dvs. tre ggr. Detta reducerar brus som ackumuleras vid integrering.



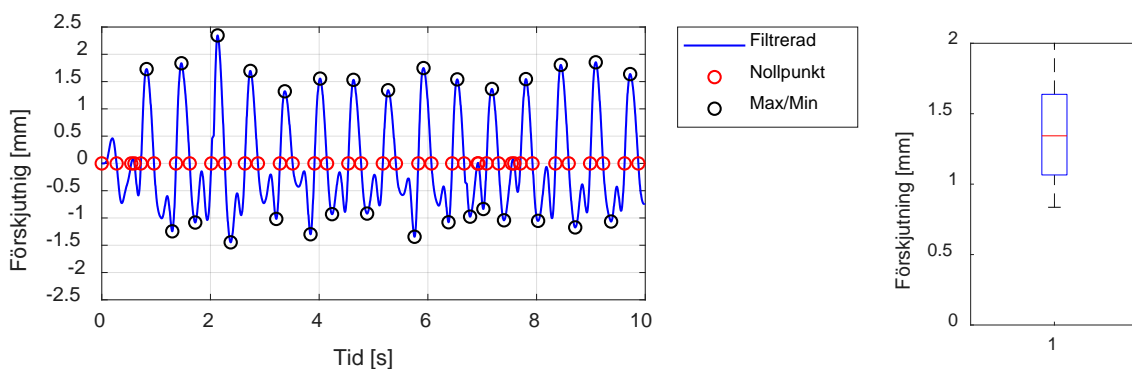
Figur 4.10: Dytran-sensor monterad på sliper med neodymbiummagnet på bricka limmad med epoxi, i Notviken, Luleå.

En andra mätning omkring en dag senare visas i figur 4.14. Vid tiderna 0,5 och 6 sekunder förlorade vi en del data. Förlust av data har inte inträffat under mätningar i labb. En möjlig orsak kan vara höga g-krafter som slår av sensorn. De höga g-krafterna syns inte i figur 4.14a pga. det analoga filtret med en gränshfrekvens på 50 Hz.

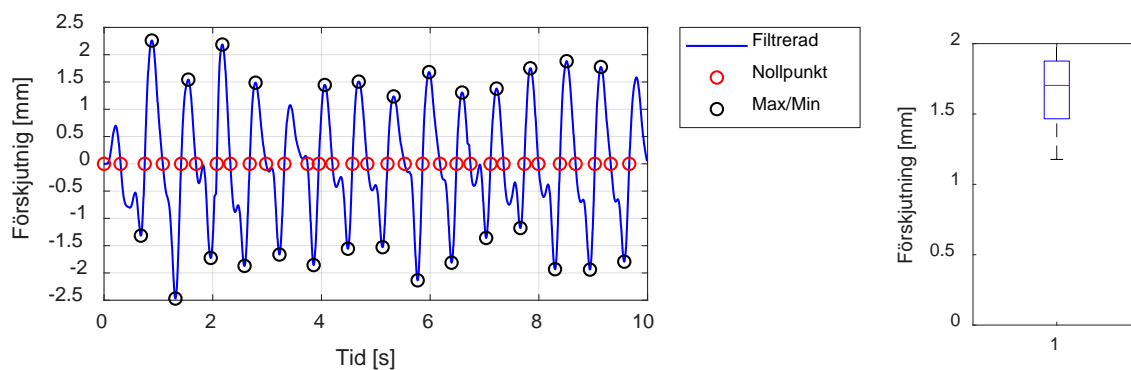
I lådagrammet återfinns 50 % av värdena inom 1,45–2,01 mm. Ändras bandpassfiltret till 1,2–8 Hz blir detta intervall 1,43–1,68 mm (figur 4.15b). Den övre gränsen i bandpassfiltret påverkar inte resultatet nämnvärt eftersom dessa frekvenser handlar mer om rena vibrationer än om förskjutning av hela slipern.



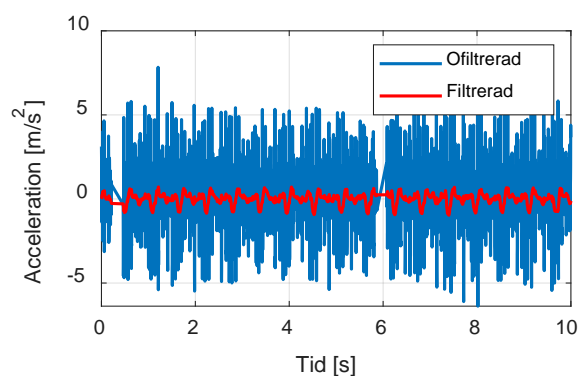
Figur 4.11: Första mätningen i Notviken, malmtåg. Samplat i 128 Hz. Andra ordningens Butterworthfilter med passband 1.2-8 Hz.



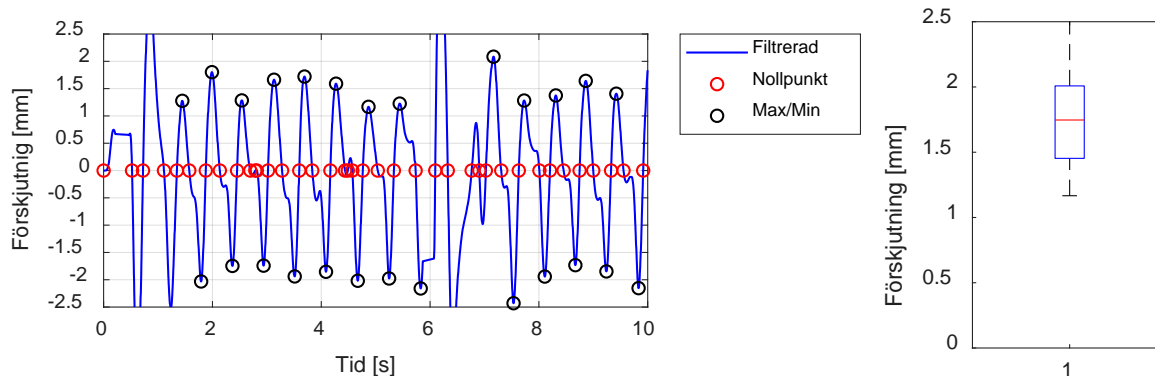
Figur 4.12: Första mätningen i Notviken på malmtåg samplat i 128 Hz. Andra ordningens Butterworthfilter med passband 1.2-8 Hz.



Figur 4.13: Första mätningen i Notviken på malmtåg samplat i 128 Hz. Andra ordningens Butterworthfilter med passband 1.0-8 Hz.



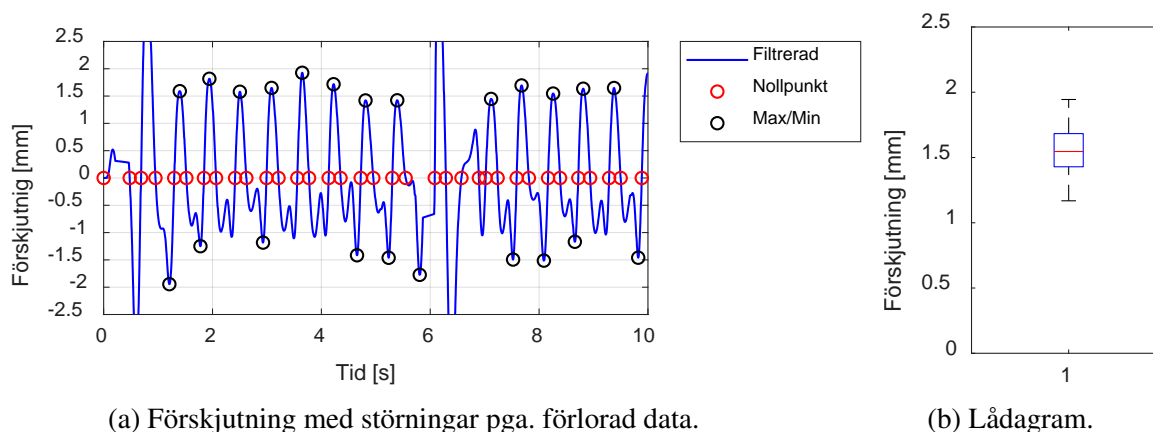
(a) Acceleration med förlorad data vid 0,5 s och 6 s.



(b) Förskjutning med störningar pga. förlorad data.

(c) Lådagram.

Figur 4.14: Andra mätningen i Notviken på malmtåg samplat i ≈ 500 Hz. Max-/minvärden utanför 2,5 mm ej inkluderade i lådagrammet. Andra ordningens Butterworthfilter med passband 1.0-8 Hz.



Figur 4.15: Andra mätningen i Notviken på malmtåg samplat i ≈ 500 Hz. Max-/minvärden utanför 2,5 mm ej inkluderade i lådagrammet. Andra ordningens Butterworthfilter med passband 1.2-8 Hz.

Notera att i labbförsöket avsåg mätningar en sinusvåg med en enskild mycket dominant frekvens. I fältprovet är det ett stort antal dominanta frekvenser som är överlagrade på varandra. Detta syns i frekvensdomän i figurerna 4.7d och 4.12. Exempel på överlagrade frekvens är sliperns egenfrekvens i x-, y- och z-led samt dess övertoner. Vid superpositionering vibrerar slipern slumpmässigt, t.ex. upp och ner. När slipern förskjuts ner som mest av en förbipasserande hjulaxel vibrerar den antingen upp eller ner på samma gång. Detta innebär större spridning i minima och maxima.

Resultaten i denna studie är i linje med Milne m. fl. (2016). I Milne m. fl. (ibidem) framgår det dock inte vad för AD-omvandlare de använt sig av och studien avser 2 Hz och uppåt.

Detta filter i första ordningens utförande användes av Milne m. fl. (ibidem) för mätning på sliper med givare ADXL326. Milne m. fl. (ibidem) gjorde mätningar i labb ner till 2 Hz och i fält på tåg i 60 m/s.

Vid monteringen av sensorn upptäcktes en skada i vingrälen i huvudspåret (figur 4.16). Skadan svetsades tre dagar innan den första mätningen och fyra dagar innan den andra mätningen. Efterslipning sker vanligtvis två dagar efter påsvetsning. Under denna tid förändras de dynamiska rörelserna relativt snabbt gentemot en väl inkörd korsning. Detta kan påverka mätresultatet.

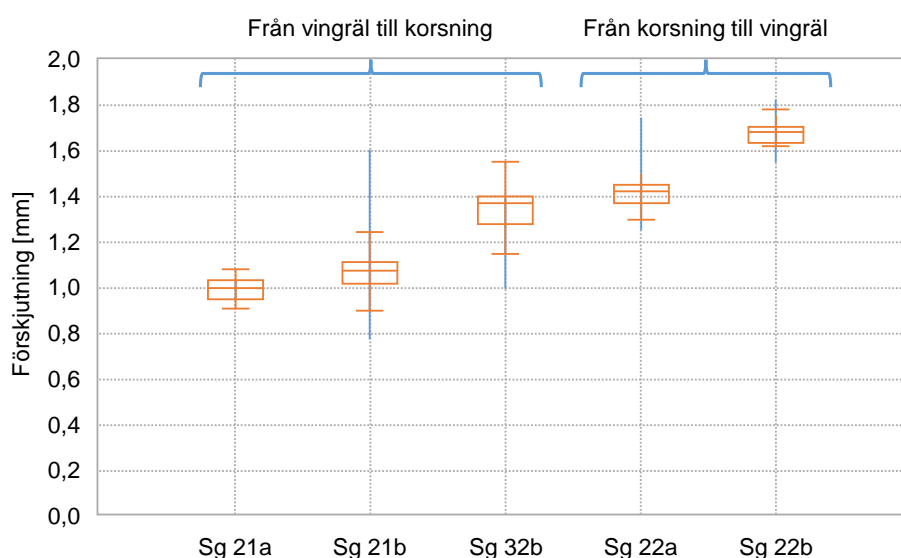
Trafikverket har under projektet gjort egna mätningar baserat på egen utvecklad mätenhet och därefter upphandlat ett antal mätenheter från Konux. Ett exempel på förskjutning ges i figur 4.17. Detaljerad information hittas i Nissen (2018). Bland annat framgår det att medelvärdet på enstaka tåg kan uppgå till 13 g i acceleration intill växelkryss och för enstaka axlar kan accelerationen uppgå till 50 g. För växlar och tåg i gott skick är värdena betydligt lägre.

4.5 Vidare utveckling

Den utvecklade prototypen och mättekniken av förskjutning på sliper med accelerometer kan studeras på flera punkter. Mätningarna i labb och i fält skiljer sig åt mycket. I labb på sinusvåg-generatorn (figur 3.2), har mätning med dämpande elastomer på 5 mm mellan



Figur 4.16: Skada i vingräl på 2 cm × 25 cm.



Figur 4.17: Förskjutning från mätenheter monterade intill växelkrysset på växlar i Steghag av Trafikverket. Texten på x-axeln är id-nummer på växlarna.

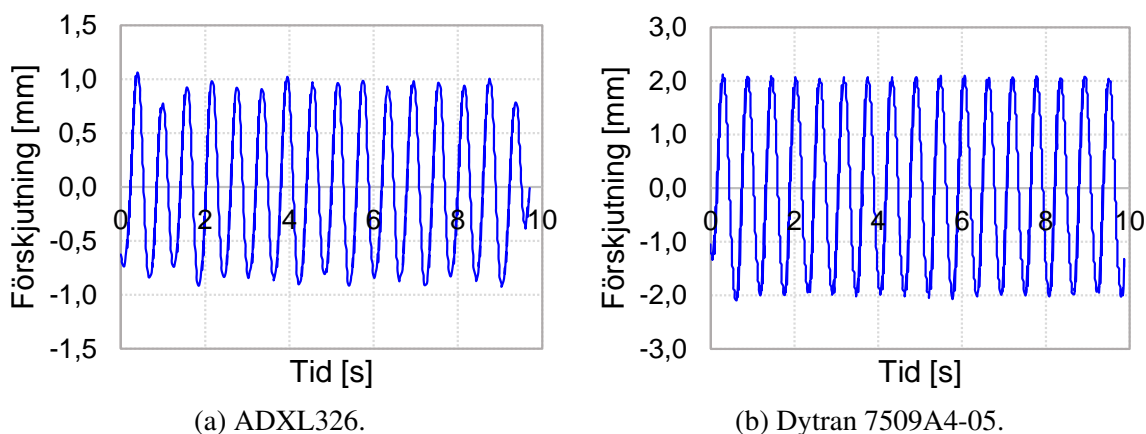
stålplattan och sensorn testats. Någon skillnad i mätresultat var inte synligt. Tumregeln för vad en våg kan "se" är att den inte kan se något som är mindre än halva våglängden. Om vi antar en ljudhastighet i elastomeren på 1 500 m/s, ger t.ex. 100 Hz en våglängd $\lambda = v/f = 15$ meter. Detta säger något om svårigheten med att mekaniskt filtrera oönskade frekvenser. Oavsett kan det vara intressant att försöka dämpa högre frekvenser med upphängning av sensor i inkapslingen. Ett alternativ som sänker brusnivån är att använda sig av flera accelerometrar och beräkna medelvärdet.

Mät noggrannhet i fält på sliper bör verifieras innan data kan användas. Verifiering kan göras med en mer direkt mätmetod, t.ex. void-meter eller optiskt. En void-meter mäter förskjutning med induktiv-/hall effect-sensor och kan monteras med ett spett som slås ner i ballasten. Möjliga nackdelar med metoden är att spettet kan röra sig med tiden från vertikal position och att tåg kan slå sönder mätenheten, t.ex. vid spärriktning. Men för kortare mätningar är metoden intressant som alternativ till accelerometer.

Prototypen utvecklad i denna studie är onödigt stor. Arduino Mega är $102 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$ i storlek, medans Arduino Nano är $45 \times 18 \text{ mm}$. Enda anledningen Megan användes var för dess större minnen. Inom projektet har även Nanon använts för denna typ av mätning. För prototyper kan även andra kraftfullare mikrokontroller på kretskort väljas; se t.ex. Sparkfun. För massproduktion efter prototyp kan mönsterkort och kretsschema designas om, vilket kan spara 90 % av vikten.

Dytran-sensorn använd i denna studie kostade 7 380 kr och ADXL326 kostade 50 kr. ADXL354 som kostar omkring 400 kr och har en brusnivå i linje med Dytran-givaren ($400/7380 = 5,4\%$). ADXL354 har ett mindre mätområde ($\pm g$) än Dytran-givaren, men mätområde är inte en kostnadsdrivande faktor i detta sammanhang. Dytran säljer utrustning för tillståndsovervakning. Andra leverantörer av tillståndsovervakning har dylika priser, t.ex. Safran Colibrys VS1000-sensor kostar omkr. 3 500 kr utan inkapsling. För att mäta acceleration används både piezoelektriska och MEMS-givare. Få antal tillverkare och återförsäljare av piezoelektriska givare, samt liten marknad, gör att de kostar mycket, t.ex. 5-20 kkr. Med de senaste decenniernas utveckling av MEMS-sensorer har antalet tillverkare och återförsäljare ökat; därav det låga priset. Detta tillsammans med ökande medvetenhet leder till att återförsäljare av tillståndsovervakningsutrustning tvingas sänka sina priser. Branscher som driver på denna utveckling är mobiltelefon- och fordonsbranschen. I fordonsbranschen krävs sensorer av hög prestanda och tillförlitlighet. Dessutom, eftersom mjukvaruutvecklingen är densamma oavsett antalet mätenheter, är det hårdvarupriset som behöver gå ner.

Det kan även vara intressant att titta närmare på olika AD-omvandlare. I denna studie har ADS1115 använts tillsammans med ett andra ordningens analogt RC-filter. Utan det analoga filtret gav ADS1115 en brusig digitaliserad signal med relativt stor spridning i minima och maxima gentemot HBM QuantumX MX440B. Figur 4.18 visar mätning i labb med HBM utan analogt filter mellan givare och AD-omvandlare. Spridningen i minima och maxima är liten i båda fallen. Skillnaden i amplitud mellan ADXL326 och Dytran beror på kalibrering.



Figur 4.18: Mätning på sinusvåg-generator med HBM.

4.6 Kravspecifikation

Vid upphandling har specificering av krav en stor betydelse på anbud, förhandling och avtal. Efter anbudstiden för en upphandling gått ut och förhandling med leverantörer påbörjas, krävs vanligtvis sakkunskap för att reda ut eventuella oklarheter kring krav. Krav som initialt framstod som uppfyllda, obesvarade eller otydliga ändras många gånger under förhandlingsfasen. Målet med förhandling är att båda avtalsparter ska känna att de kunnat påverka och är nöjda med avtalet.

Utifrån erfarenheterna inom detta projekt har nedan punktlistor på egenskaper tagits fram för beaktande vid specificering av krav och önskemål. De första två punktlistorna avser mätenhet på systemnivå, medans de efterföljande punktlistorna avser krav på delsystem.

Systemnivå – Hårdvara:

- Batterityp, inspänning och byte
- Batteritid vid olika inställningar på datainsamling och uppkoppling
- Samplingshastighet och reellt antal bitar på insamlad data
- Mätnoggrannhet och precision för olika frekvenser på vibrationer och över tid
- Mätnoggrannhet på förskjutning verifierat med alternativ mer direkt metod, t.ex. void-meter
- Typ av uppkoppling
- Dataöverföringshastighet/-tid
- Uppvakning och vilolägen
- Kontakttyper och klass
- Prestanda vid låga temperaturer
- Apparatlåda, klass och montering
- Yttre dimensioner och vikt

Systemnivå – Mjukvara:

- Mjukvaruuppdatering på distans (metod och typ)
- Programmeringsspråk
- Protokoll för överföring, t.ex. FTP, och verifiering
- Format på data
- Säkerhet

Batteri:

- Typ
- Prestanda vid låga temperaturer
- Spänning och maximal ström
- Storlek (Ah)
- Yttre dimensioner och vikt

Mikrokontroller(-kort):

- Modell
- Antal kärnor och klockfrekvens
- Flashminne, SRAM, EEPROM
- Antal digitala in- och utgångar samt typer
- Antal analog in- och utgångar

- Specifikation på inbyggd AD-omvandlare
- Maximal ström på utgångar
- Specifikation på inbyggda sensorer, klocka/kalender, uppkoppling och minneskort
- Inspänning, strömförbrukning och vilolägen
- Temperaturområde för drift
- Yttre dimensioner och vikt
- Programmeringsspråk som stöds

Accelerometer med analog utgång:

- Typ (piezoelektrisk eller MEMS)
- Antal axlar
- Bandbredd per mätaxel
- Inspänning
- Mätomfång ($\pm g$)
- Mätnoggrannhet och precision över tid
- Brus
- Kalibrering och self-test
- Stöttålighet
- Signalförstärkning
- Analogt filter (internt och extern)
- Temperaturprestanda och linjäritet
- Modell på temperatursensor
- Dimensioner och metod för montering

Accelerometer med digital utgång:

- Typ (MEMS)
- Antal axlar
- Bandbredd per mätaxel
- Inspänning och referensspänning
- Mätomfång ($\pm g$)
- Mätnoggrannhet och precision över tid
- Brus
- Kalibrering och self-test
- Tvärkänslighet
- Stöttålighet
- Signalförstärkning
- Analogt och digitalt filter
- Specifikation på inbyggd AD-omvandlare för accelerometer och temperatursensor
- Antal bitar på utsignal (skiljer sig ofta från AD-omvandlaren.)
- Temperaturprestanda och linjäritet
- Modell på temperatursensor
- Dimensioner och metod för montering

AD-omvandlare:

- Modell
- Typ av digital utgång
- Inspänning och referensspänning
- Bitar och samplingshastighet
- Modell på temperatursensor
- Yttre dimensioner

Uppkoppling:

- Typ, t.ex. Bluetooth, WiFi, GSM/GPRS eller smalband
- Modell
- Strömförbrukning
- Överföringshastighet

Avseende mätnoggrannhet på förskjutning vid olika frekvenser på vibrationer ligger Trafikverkets krav på att noggrann mätning ska kunna ske ner till 0,5 Hz vibrationer, dvs. inte allt för stor spridning i mätresultatet vid 0,5 Hz. Detta värde baseras på att 20 m långa järnvägsvagnar i 20 m/s medför en axelpassage-frekvens på omkring 1 Hz. För att mäta förskjutning från axellast behövs mätning då under 1 Hz. 0,5 Hz kan då anses vara en rimlig kravnivå. Detta ställer höga krav på accelerometrars brusnivå. Bruset in en accelerometer tenderar att vara som högst vid låga frekvenser; se avsnitt 2.2.4.

4.7 Svar på forskningsfrågor

Forskningsfråga 1: *Var, vad och hur ska vi mäta för tillståndsovervakning i järnväg?*

Var, vad och hur valde vi att svara på genom att genomföra en workshop 635-metoden inom projektgruppen. Workshopen resulterade i ca. 40 frågeställningar vid införelse eller utökade av sensorer i järnvägar, samt ca. 80 idéer på tillämpningar/fenomen för sensorer i järnvägar. Frågorna och idéerna kan vara behjälpliga vid: planering av tillståndsovervakning av järnvägar och rullande materiel; småskalig och storskalig tillämpningar; samt vid kravspecifikation och upphandling. Se avsnitt A.2 och tabellerna A.1–A.3 i bilaga A för resultatet.

För att gå vidare med frågorna/idéerna kan de väljas ut i en workshop i grupp eller genom individuellt arbete. Att utveckla eller diskutera idéerna vidare är dock utom denna rapports räckhåll.

Forskningsfråga 2: *Har MEMS-baserade accelerometrar specifikation och prestanda tillräcklig för tillståndsovervakning i järnväg?*

Prestandakrav avser främst noggrannhet, precision och driftsäkerhet. I labbmiljö uppvisade accelerometer Dytran 7509A4 ett absolut relativt fel på 1,7–4,4 % och ADXL326 ett fel på 2,8–11,7 %; se figur 4.18 och tabell 4.2.

Mätningar i fält har inte verifierats med någon alternativ metod, så som void-meter eller optisk mätning. Precisionen är i alla fall betydligt lägre i fältprov gentemot labb sett på spridningen i lådagran. I lådagranen från mätning i labb återfinns 50 % av värdena inom 1,58–1,65 mm (figur 4.8b). I lådagranen från fältprov i labb återfinns 50 % av värdena inom 1,47–1,88 mm (figur 4.13).

Forskningsfråga 3: *Hur kan mätenheter för tillståndsovervakning strömförsörjas i järnväg?*

Installation och underhåll av mätenheter fysiskt på plats i spåret medför personalkostnader. Mätenheter behöver därmed kunna ligga i spår under flera år utan funktionsfel. Tiden det tar att byta en mätenhet påverkar detta krav i stor utsträckning. Vid enkelt byte kan detta ske i samband med växelinspektion. Möjliga strömkällor är batteri, skördning eller nät. Vid batteri krävs en typ som tål minusgrader (avsnitt 3.2.1: strömförsörjning). Skördning är möjligt på tåg. Möjliga "nät"-källor inkluderar spårledning, växeldriv, ställverk och ATC-antenn.

Spårledning har en kortslutningsström på 2 A och en spänning på 5-6 V, med en säkerhetsklass SIL4 (Safety integrity level). Det är därmed inte tillåtet att ta ström mellan rälererna.

Bombardier har vid muntlig kontakt gjort en överslagsräkning på överföring från en ATC-antenn till en anpassad "energilagringbalis", med samma storlek och antennelement som serie- och parallellbaliserna. Det går att överföra en medeleffekt om ca 3 W under 0,8 m. Exempelvis om vi kör 30 m/s får vi en kontakttid på $0,8/30 = 27$ ms. Energin blir $3 \times 27 = 81$ mWs. Detta räcker inte för mätning av acceleration.

Strömförsörjningen beror på applikation, t.ex. kan det vara möjligt att ta ström från växel driv eller strömklämma i ställverk. Men strömförsörjning med batteri anses inom projektgruppen vara ett viktigt alternativ. Detta ställer höga krav på vilofunktion och uppkoppling. Prototypen baserad på Arduino utvecklad i detta projekt klarar endast några hundra dagar i viloläge med ett 9 Volts batteri. Uppkoppling sker med GSM/GPRS, vilket drastiskt ökar energiförbrukningen.

Forskningsfråga 4: *Vad för nätverksuppkopplingar är relevanta avseende mätenheter för tillståndsovervakning i järnväg?*

Val av uppkoppling är viktigt vid batteridrift. Långsammare uppkoppling kräver längre uppkopplingstid för att överföra data. Vid sampling av data kan det därför vara fördelaktigt utifrån strömförbrukning att använda sig av t.ex. 5G för att korta ner uppkopplingstiden. Om insamlad data komprimeras kan uppkopplingstiden kortas ytterligare. Text och siffror kan komprimeras med omkr. 90%. Det kan då vara intressant att titta på en mer avancerad mikrokontroller. Inom projektet har det inte funnits tillgång till 5G eller narrowband. Mätning av överföringstider och strömförbrukning i praktiken har därmed inte varit möjligt. Se avsnitt 2.4: mobilnät och trådlöst nätverk för vidare diskussion.

Forskningsfråga 5: *Vad är relevant att ta med i en kravspecifikation avseende mätenheter för tillståndsovervakning i järnväg?*

Denna fråga har besvarats i avsnitt 4.6: kravspecifikation.

5. Intill utvecklade mätenheter

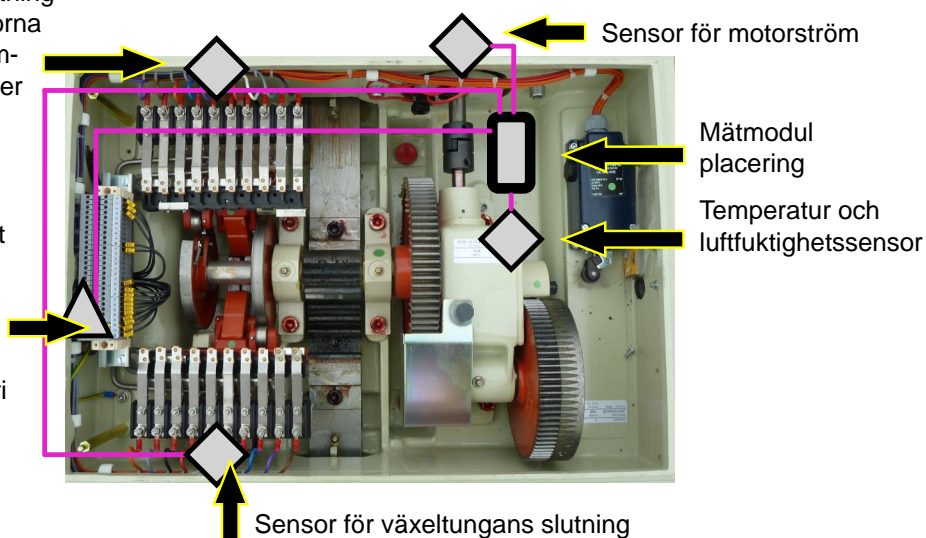
Utöver prototypen beskriven i detalj i denna rapport har inom projektgruppen även andra mätenheter utvecklats. Dessa är övervakning av växeldriv med sensorer, övervakning av växel med kamera och övervakning från boggi med accelerometer.

5.1 Övervakning av växeldriv

Sweco Rail har inom projektet utvecklat en Mätenheten för övervakning av växeldriv; se figur 5.1. Mätenheten beskriver vi här genom att svara på ett antal frågor.

Sensor för växeltungans slutning monterar under skyddskåporna för drivlinjalerna, neodymium-magnet fästs på kontrollinjaler

Kraftmatning ansluts på plint A27/A28 Drivvärme-kretsen (förutsatt att testet utförs under den kallare perioden på Året. Alternativt strömförsörjs modulen med batteri under testperioden



Figur 5.1: Övervakning av växeldriv.

Varför placera mätnod i växeldriv?

Växeldrivet ger ett flertal fördelar jämfört med en placering i ren spårmiljö:

- Skyddad miljö från ex regn och snö
- Tillgång till kraftmatning (ex. via växeldrivsvärme krets, normalt ca 24–28 V AC)
- Tillgång till att mäta motorströmmen direkt på motorn
- Ger möjlighet att mäta växeltungans slutning
- Ger möjlighet till vibrationsmätning på drivslipen utan extern sensor i ren spårmiljö

Vad mäter vi?

- Vibrationsnivåer i tre axlar (x, y, z) för drivslipern, kan detektera och utvärdera samtliga tågpassager samt växelomläggningar

- Växeltungans slutning i båda ändlägena, ger en kontinuerlig övervakning av växeltungans slutning med en noggrannhet av ca 0,5 mm (mäter mellan 0–10 mm i respektive ändläge)
- Motorströmv id omläggning, ger ett mått på energiåtgången vid respektive växelomläggning
- Temperatur och luftfuktighet i växeldrivet, kan med fördel användas för att justera ev temperaturdrift för mätelektroniken men kan även ge trenddata för hur ex temperatur påverkar energiåtgången vid växelomläggning.
- Möjligt att komplettera med sensor för att mäta hastighet vid omläggning i syfte att detektera var tröghet uppstår under omläggning (ej testat ännu)

Hur mäter vi?

- Vibrationsnivåer mäts med accelerometer av MEMS typ, upp till 1 kHz samplingsfrekvens
- Växeltungans slutning mäts med linjära och stationära halleffektsgivare tillsammans med kraftiga neodymiummagneter som placeras på kontrollinjalerna under respektive kåpa (utanför växeldriv)
- Motorström mäts via spole runt motorledaren vid AC-motorer eller strömtång vid DC-motorer (betydligt dyrare än sensor som kopplas in i serie med motorn dock helt isolerad mätning)
- Temperatur och luftfuktighet mäts med kombinerad temperatur- och luftfuktighets-sensor

Hur lagras och presenteras mätningarna?

- Samtliga mätningar laddas i realtid upptill en tidsseriedatabas - mätvärden streamas
- Ett webbgränssnitt med säker inloggning nyttjas för tillgång till data
- Respektive mätnod har en egen “dashboard” med möjlighet till trendanalys, individuella gränsvärden och larmnivåer, aktuell status
- Respektive mätetal och dess trender kan samköras inom exempelvis ett geografiskt område eller för samtliga mätnoder
- Samtliga mätningar kan samköras mot vilken annan mätning (i tidsserieformat) i syfte att hitta korrelationer
- Samtliga mätvärden kan i efterhand skalas om eller redovisas i olika statistiska mätvärden över en aktuell tidsperiod såsom median, medel, min, max osv.
- Då data sparas i råformat ger detta möjlighet till all tänkbar “postprocessing” såsom filtrering av data (lågpas- eller högpasfiltrering) eller analys i frekvensspektrat via ex FFT/DFT.
- Samtliga mätningar kan exporteras (direkt från vyn på webbsidan) till CSV- eller JSON-format som möjliggör analyser i andra verktyg ex. matlab och excel

Förutsättningar

- Mätmodulen kommunicerar via Wifi och kräver en trådlös router inom täckningsområdet för mätmodulens antenn (upp till ca 100 m från mätmodulen). Kommer i steg 1 (prototype testing on site) att lösas med 3G/4G-routrar (en per växel) men kan även med fördel ansluta till en i området redan befintlig gateway. Ett önskvärt scenario för storskalig installation (liten kostnad) vore att komplettera befintliga växelvärmestyrningssystemet med trådlös anslutning (någon några per driftplats).

Inom en snar framtid kommer även stationsområdena erbjuda Wifi och detta ger då möjlighet till en billig lösning för datakommunikationen.

- Mätmodulen kräver kraftförsörjning motsvarande ca 0,3 W för kontinuerlig drift, löses lämpligen via befintlig växeldrivsvärmekrets som är helt separat från säkerhetskretsarna i växeldrivet (mindre kraftförsörjningsmodul tillkommer 28 V AC till 5/3,3 V). Kan även anordnas via befintlig krets för lyse och värme i växelkopplings-skåp, detta kräver dock ett par extra tråddragningar i respektive växelkopplings-skåp.

Begränsningar

- Mätnoggrannheten styrs av respektive sensors mätbegränsningar. I huvudsak är data tänkt att jämföras relativt sig själv (för att upptäcka degradering) eller aggregerat för en population och utvärderat med olika trendfunktioner ej primärt för absoluta mätningar av exempelvis vibrationsnivåer.
- Samtliga mätningar är elektriskt isolerade från växeldrivets säkerhetskretsar, sensorn för strömmätning ansluts i serie med motorlindning men sensorn i sig är elektriskt isolerad via en strömmätande halleffektsgivare (lösningen är vald med avseende på minsta möjliga kostnad men med hög noggrannhet och hög isolationsförmåga, en annan lösning är mätning med strömtänger dock kostar då strömtången lika mycket som hela mätnoden och, framförallt vid likströmsmätning, ger en sämre noggrannhet)
- Användandet av sensorer baserade på halleffektsgivare ger en risk för påverkan från yttre starka magnetfält som kan ge påverkan på mätnoggrannheten (då flera sensorer i respektive driv är av halleffektstyp ger detta möjligheten att upptäcka varierande magnetfält och möjlighet att justera alternativt förkasta vissa mätvärden utifrån detta)
- Noggrannheten i tidstämplingen beror på hela nätverkets totala latency som varierar över tid. En av finesserna med att streama mätvärdena blir dock att det relativa mätfelet i tidstämplingen mellan två mätnader blir litet då samma gateway används för båda mätnoderna i samma växel.
- Begränsning med streaming, är insamlingsnoden ej redo att ta emot eller finns annan störning på vägen från mätnod till databas förkastas mätvärdet.

Nyttan

- Respektive mätnod ger tillgång till information som idag ej finns tillgänglig
- Enbart mätningen av växeltungans slutning ger möjlighet att glesa ut (eller i framtiden helt ta bort och ersätta med justering endast vid växelrevision) kontroller och justering av måtten 3 och 5 mm
- Indirekta nyttor är exempelvis att genom att mäta vibrationerna i växelns olika växeldriv kan vi räkna ut respektive fordons hastighet när denne passerade växeln, kan i sin tur ge underlag för växelindividens individuella nedbrytningsmodell. Eller att accelerometermätningen ger möjlighet att upptäcka när drivet påverkas av annan än tåg eller omläggning yttre påverkan exempelvis vid service/UH i drivet (när personalen öppnar drivet) eller annan otillbörlig påverkan på växeldrivet sker
- Som ett direkt övervakningssystem ger mätningarna mer precis information än idag om vad ett uppkommet funktionsfel direkt orsakas av, ex om växeln går ur kontroll: Sluter tungan i respektive växeldriv, isåfall är det en TKK som "strular"? Är det nära att tungan sluter (ex när snö hindrar omläggning)? Gick växeln trögt vid

senaste omläggning (hög friktion på underlagsplattor eller kanske snö som hindrar omläggning)? Onormala vibrationsnivåer vid omläggning kan vara tecken på att växellådan i drivet gått sönder eller är på väg att gå sönder.

- Som ett processövervakningssystem ger mätningarna underlag för justerade utbytes- och serviceintervall, beslutsunderlag för utbytes- och underhållspaket (rätt åtgärd på rätt plats), underlag för att analysera vilka fordon som sliter på växeln och på vilket sätt

Möjlighet till uppgradering

- Möjlighet finns att ansluta andra sensorer om/när behov finns eller att uppgradera sensorerna när nya framkommer
- Mjukvaran i mätnoden kan uppdateras OTA (over the air), detta medger flexibel uppdatering av mätmodulerna
- Möjlighet finns att koppla samman flera mätmoduler i ett sk mesh-nätverk för att minimera behovet av det totala antalet gateways (uppkoppling mot internet) detta får dock påverkan på noggrannheten i tidsstämplingen och bör testas utförligt om behovet uppkommer
- Data lagrad i databasen kan när som helst portas till andra datakällor och även samköras med andra databaser
- Mätmodulen kan hantera flera olika protokoll för dataöverföring som anpassa mot kundens egna lösningar ex MQTT/UDP eller annan speciallösning
- Mätmodulen kan installeras, kalibreras och triggernivåer justeras på plats via teknikerns mobiltelefon (webbläsare) genom uppkoppling mot mätnodens egna lösenordsskyddade webbserver (aktiveras endast vid service/installation och är annars avaktiverad)

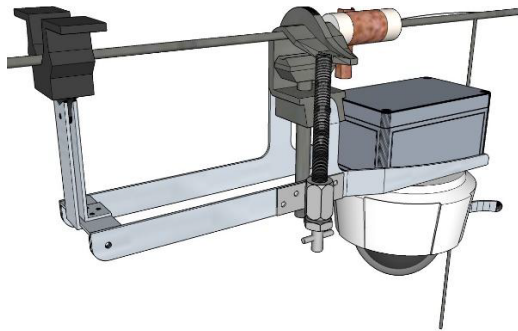
5.2 Overhead-kamera

Overhead-kamera, OH-kamera, är en mätenhet utvecklad av Damill inom EU-projektet AUTOMAIN (Rusu och Roberts 2014) och inom ePilot (Larsson 2016). Under projektets gång har Damill utvecklat och fälttestat kameran vidare, bland annat i Luleå och Narvik. Kameran är högupplöst med 30x optisk zoom, 4G-uppkopplad, distansstyrd och stormförsörd från kontantledningen. Se figurer 5.2 och 5.3.

5.3 Track logger

Track logger är en annan mätenhet utvecklad av Damill inom ePilot (Rengmyr 2017; Larsson 2016); se figurer 5.4 och 5.5. Inom ePilot 2.0, parallellt med detta projekt, har Damill vidareutvecklat track loggern till en version 2. Inom ePilot 2.0 är mätenheten monterad på SJ:s nattåg Luleå–Stockholm och mäter sträckan 4 ggr/vecka. Positionering sker med GPS och rörelser loggas med accelerometrar. Insamlad data dubbelintegreras för att få förskjutning.

Enheten mäter våglängder i spårhöjd som motsvarar frekvens på ca 0,5–500 Hz; med krav på ökad noggrannhet 2–500 Hz. Med ett persontåg i exempelvis 130 km/h innebär det våglängder på 7 cm – 18 m. Typiska amplituder som mäts i spåret är 0–10 mm. Vid behov kan samplingshastigheten ökas till 50 kHz. Enheten kan användas tillsammans med MEMS och piezoelektriska accelerometrar.

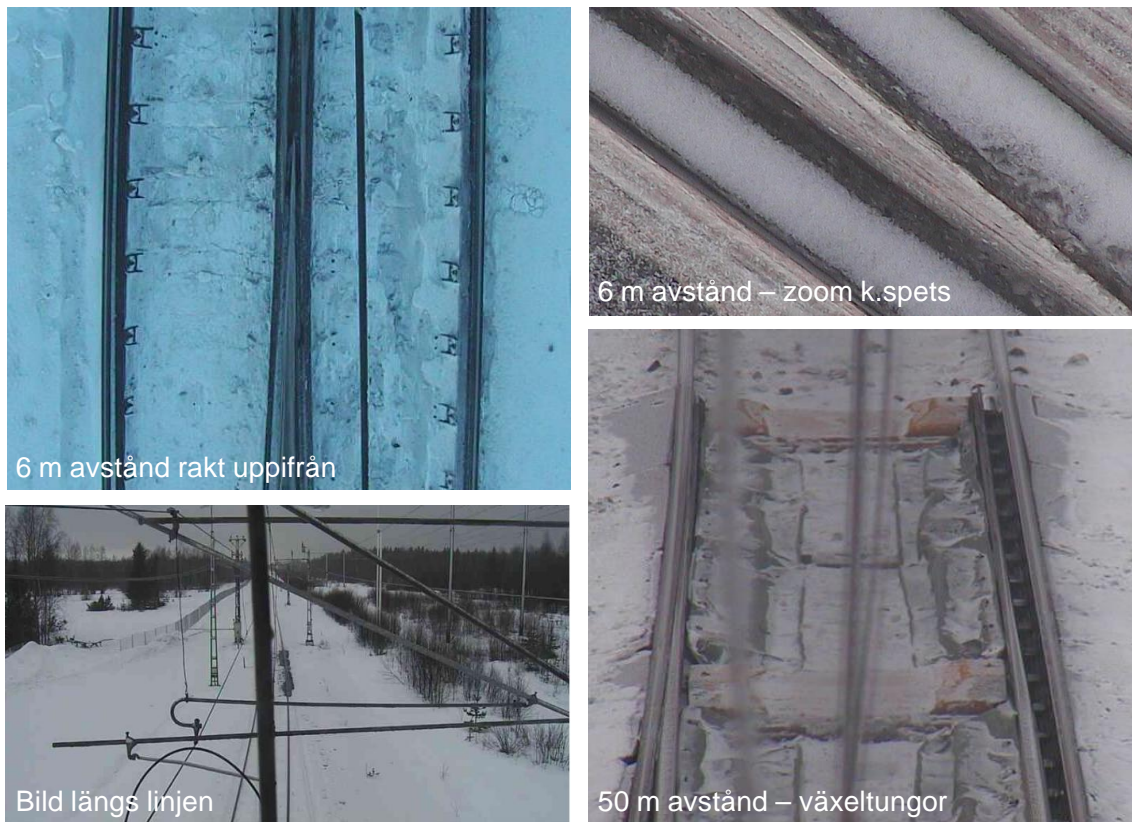


(a) Skiss på upphängning och OH-kamera.



(b) OH-kamera på Luleå bangård.

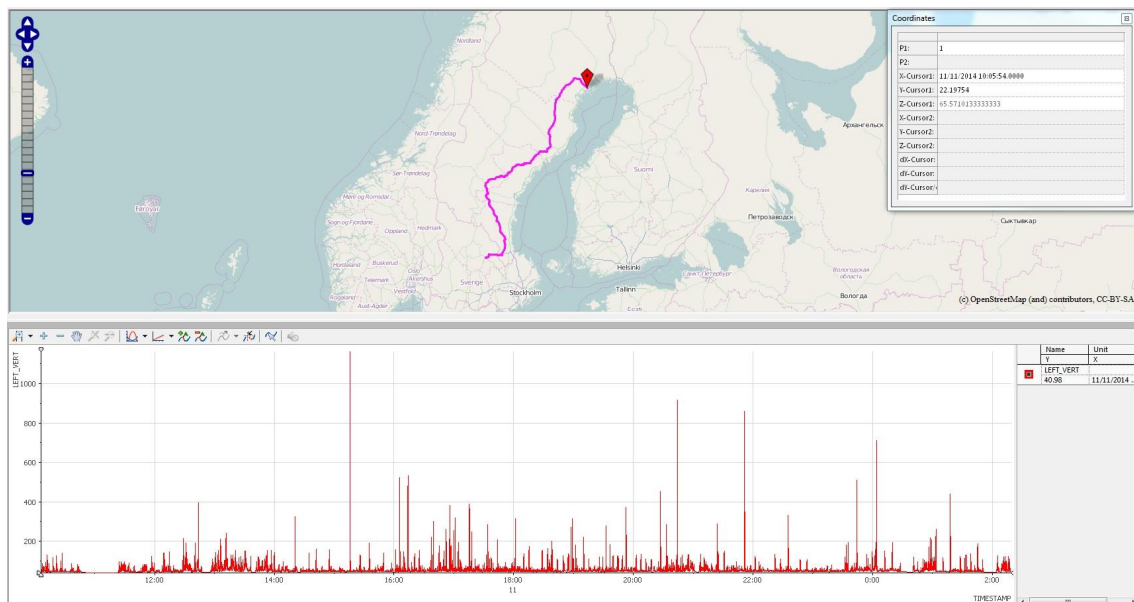
Figur 5.2: Skiss på overhead-kamera.



Figur 5.3: Bilder tagna med overhead-kamera (Larsson 2016).



Figur 5.4: Track logger monterad på boggi.



Figur 5.5: Exempeldata från track logger.

6. Slutsats

Slutsatser

Utrifrån resultat och diskussion kan vi dra följande slutsatser:

- I labbmiljö uppvisade accelerometer Dytran 7509A4 ett absolut relativt fel på 1,7–4,4 % och ADXL326 ett fel på 2,8–11,7 % (figur 4.18 och tabell 4.2).
- Mätdata från sliper i järnväg uppvisar betydligt lägre precision än mätdata i labb. I lådagrammet från mätning i labb återfinns 50 % av värdena inom 1,58–1,65 mm (figur 4.8b). I lådagrammet från fältprov återfinns 50 % av värdena inom 1,47–1,88 mm (figur 4.13), men spridningen varierar från större till mindre beroende på hur det digitala filtret designas.
- Brusnivå enligt databad på Dytran 7509A4 och ADXL326 stämmer överens med uppmätt brusnivå (figur 4.9).

Vidare utveckling

Fortsatta studier av förskjutning av järnvägssliper kan inkludera:

- Mätningarna i labb och i fält skiljer sig åt mycket. Mätning i fält bör verifieras med en alternativ mer direkt mätmetod, så som void-meter med induktiv-/hall effect-sensor eller optisk mätning.
- För att minska brus kan upphängning av sensor i inkapslingen studeras vidare.
- För att minska brus kan flera accelerometrar av samma modell användas för att beräkna ett medelvärde.
- Jämföra olika AD-omvandlare, t.ex. HBM med ADS1115.
- Studera vidare MEMS-accelerometrar med låg brusnivå, t.ex. ADXL354, men gärna med större mätområde ($\pm g$).

Vidare bör kostnads-nytta-analys tas i beaktning innan sensorer införs i en IoT-skala, dvs. stor skala.

Resultat av projektet

Detta projekt är till hälften finansierat av InfraSweden2030, vilket har stort fokus på resultat och effekter. Utöver denna rapport har projektet haft följande resultat:

- Teknisk rapport med resultat från workshop med 635-metoden (Stenström 2013). Rapporten riktar sig till läsare intresserade av praktiska tillämpningar av tillståndsovervakning i järnväg.
- Bidragit med ett avsnitt i In2Rail D2.4 “Smart Infrastructure – Innovative S&C solutions” (Nissen 2018).

- Utvecklat kursen “Sakernas internet och signalanalys för tillståndsovervakning” (D0020B), LTU, tillsammans med projektet WiRMa; ett projekt finansierat av EU-programmet Interreg Nord.
- Två examensarbeten har genomförts som en effekt av projektet: Lindqvist (2017) och Kristiansen och Postnikov (2018).
- Delar av projektet har använts i kursen “Drift och underhåll – Hydropower” (D0004B) och i externutbildningar.
- Ett konferensbidrag är inskickat till International Heavy Haul STS Conference 2019.
- Projektet förväntas även bidra med kunskapsuppbyggnad inom projektgruppen inför pågående och framtida interna och externa projekt.

Litteraturförteckning

Artiklar

- Milne, D. m. fl. (2016). "Proving mems technologies for smarter railway infrastructure". I: *Procedia engineering* 143, sidorna 1077–1084. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.222 (se sidorna 32, 38).
- Pearce, J. (2012). "Building research equipment with free, open-source hardware". I: *Science* 337.6100, sidorna 1303–1304. DOI: 10.1126/science.1228183 (se sidorna 8, 16).
- Schryen, G. (maj 2011). "Is open source security a myth?" I: *Commun. acm* 54.5, sidorna 130–140. DOI: 10.1145/1941487.1941516 (se sidan 16).

Uppsatser

- Kristiansen, P. och R. Postnikov (2018). "Tillståndsovervakning av järnvägsinfrastruktur. Tillståndsovervakning av rullningslager med hjälp av e-näsa". Examensarbete, Högskoleingenjör. Luleå tekniska universitet, Avd. för drift, underhåll och akustik. URL: urn:nbn:se:ltu:diva-71064 (se sidan 52).
- Lindqvist, J. (2017). "Tillståndsovervakning av järnvägsinfrastruktur. En studie för framtidens sakernas internet-lösningar". Examensarbete, Högskoleingenjör. Luleå tekniska universitet, Avd. för drift, underhåll och akustik. URL: urn:nbn:se:ltu:diva-64273 (se sidorna 14, 23, 52).
- Petersson, A. M. (2017). "Collaborative conceptual design methods in the context of the swedish deregulated railway market. From the perspectives of maintenance, infrastructure management, product provision, and research". Doktorsavhandling. Luleå tekniska universitet, Avd. för drift, underhåll och akustik. ISBN: 978-91-7583-773-4 (se sidorna 22, 55).
- Rengmyr, S. (2017). "Tillståndskontroll av spårväxlar med mätutrustning monterad på tåg i reguljärtrafik". Examensarbete, Högskoleingenjör. Luleå tekniska universitet, Avd. för drift, underhåll och akustik. URL: urn:nbn:se:ltu:diva-66129 (se sidan 48).

Rapporter

- ISO/IEC JTC1 (2015). *Internet of things (IoT): Preliminary report 2014*. Switzerland: Internationella standardiseringsorganisationen (ISO) och International Electrotechnical Commission (IEC), Joint Technical Committee 1 (se sidan 20).
- Nissen, A. (2018). *Embedded & integrated sensors: System design selection (deliverable D2.4)*. In2Rail (se sidorna 24, 38, 51).

- Rusu, M. och C. Roberts (2014). *Demonstration of modular, self-inspecting switch technology (Deliverable D6.2)*. AUTOMAIN, FP7 (se sidan 48).
- Stenström, C. (2013). *Idégenerering för tillståndsövervakning av järnvägar och fordon: En workshop med 635-metoden*. Luleå tekniska universitet. ISRN: 978-91-7583-989-9 (se sidorna 22, 51, 55).

Övrigt

- ETSC (2003). *Transport safety performance in the EU: A statistical overview*. Bryssel: European Transport Safety Council (ETSC) (se sidan 8).
- IEA-UIC (2017). *Railway handbook: Energy consumption and CO₂ emissions*. Paris: Internationella energirådet (IEA) och Internationella järnvägsunionen (UIC) (se sidan 8).
- EU-kommissionen (2011). *Färdplan för ett gemensamt europeiskt transportområde: Ett konkurrenskraftigt och resurseffektivt transportsystem*. Bryssel (se sidan 8).
- Larsson, D. (2016). *Track logger och OH-camera: Tillsyn utan att störa*. ePilot Resultatkonferens 2016. ePilot (se sidorna 48, 49).
- Liberg, O., M. Sundberg, E. Wang, J. Bergman och J. Sachs (2017). *Cellular internet of things: Technologies, standards, and performance*. Amsterdam: Academic Press. ISBN: 978-0-12-812459-8 (se sidorna 17, 18).
- NE (2018). *Nationalencyklopedin, sakernas internet*. URL: <http://www.ne.se/> (senast hämtad 2018-03-16) (se sidan 20).
- Pietrosemoli, E. (2017). *Wireless standards for IoT: WiFi, BLE, SigFox, NB-IoT and LoRa*. Workshop on Open Source Solutions for the Internet of Things, June 27 – July 7, 2017, ICTP, Trieste, Italy. International Centre of Theoretical Physics (ICTP) (se sidan 21).
- Regeringskansliet (2016). *Att förändra vår värld: Agenda 2030 för hållbar utveckling*. Stockholm (se sidan 8).
- SIS (2016). *SS-EN 13306:2010: Underhåll – Terminologi*. Swedish Standards Institute (SIS) (se sidorna 8, 12, 14).

A. Idégenerering med 635-metoden

Denna bilaga beskriver metoden och presenterar resultatet från en workshop med 635-metoden för idégenerering (Stenström 2013). Se avsnitt 3.1 för motivering.

Idéerna i denna rapport kan vara behjälpliga vid arbete eller tankeverksamhet kring tillståndsovervakning av järnvägar och rullande materiel. Idéerna behandlar både småskalig tillämpning av sensorer och storskalig tillämpning, dvs. sakernas internet eller internet of things. För att gå vidare med frågorna/idéerna kan de väljas ut i en workshop i grupp eller genom individuellt arbete.

A.1 Metod

Inom forskningsprojektet OptiKrea studerades ett flertal metoder för idégenerering (Peterson 2017). Bland annat fann projektgruppen 635-metoden vara effektiv för idégenerering. Inom projektet vindareutvecklades metoden och sammanställdes även i en lathud för genomförande. Utifrån utvärdering i OptiKrea valdes metoden ut för idégenerering i detta projekt.

OptiKrea-lathunden beskriver kortfattat de metoder som utvecklats inom OptiKrea-projektet. Metoderna som inkluderades i workshopen är problemklarläggning, målformulering och idégenerering. Problemklarläggningen och målformulering förbereddes innan workshopen för att kunna sätta mer tid på idégenereringen. Detta är ett val man gör beroende på tid till förfogande. Workshopen började med genomgång och revidering av problemklarläggningen och målformuleringen under en timme, följt av idégenerering under två timmar. Deltagarna bestod av:

- Specialist banöverbyggnad, 13 års erfarenhet, Trafikverket
- Produkt och metodutvecklare, 30 års erfarenhet, Infranord
- Utvecklare, 3 års erfarenhet, eMaintenance 365
- Utvecklare, 1 års erfarenhet, eMaintenance 365
- Konsult, 15 års erfarenhet, Sweco Rail
- Utredare underhåll, 15 års erfarenhet, Trafikverket
- Student, 0 års erfarenhet, LTU
- Verksamhetsledare, 6 års erfarenhet, LTU
- Student, 0 års erfarenhet, Residensskolan
- Produktutvecklare, 30 års erfarenhet, Vossloh
- Biträdande lektor, 7 års erfarenhet, LTU

där erfarenhet avser järnväg. Tillvägagångssätt beskrivs nedan och är utdrag ur handboken från OptiKrea.

A.1.1 Problemklarläggning

Process

1. Initiativtagaren ger en kort introduktion till problemet.
2. Alla deltagare jobbar individuellt med problemklarlägningsfrågorna.
3. Gruppen går igenom en fråga åt gången. Deltagarna turas om att presentera sina svar på frågan. Svaren från alla deltagare dokumenteras där alla kan se dem (t.ex. dator kopplad till projektor eller whiteboard). Gruppen diskuterar och summerar svaren på en fråga innan gruppen fortsätter till nästa fråga. Punkt 3 upprepas för alla frågor.
4. Etablera preliminär LCC-modell och samhällskostnadsmodell och gör en LCC- och samhällskostnadsberäkning för dagens befintliga produkt/situation (om relevant) för att se var kostnadsdrivarna finns.
5. Check av att problemklarläggning och speciellt orsakerna till problemet är tillräckligt väl belysta och förstådda för att det ska vara vettigt att gå vidare i processen.

Problemklarlägningsfrågor

1. Vad är problemet med nuvarande lösning/situation? Varför behöver den bytas eller modifieras?
2. Vad handlar problemet egentligen om och var ligger det största behovet?
3. Vem vill att problemet ska lösas och varför?
4. Vad är (rot)orsakerna till problemet?
5. Vilka funktioner ska produkten kunna utföra, nu och i framtiden? Vilka uppgifter ska produkten lösa?
6. Vilka egenskaper måste produkten ha/inte ha?
7. Vilka krav ställer miljön som produkten ska placeras i på lösningen?
8. Vilka icke uttalade önskemål, krav och förväntningar existerar?
9. Vilka vägar står öppna/stängda för anskaffning av produkten?
10. Vilka alternativa produkter finns?
11. Vilka standardkrav finns? Vilka lagstiftningar?
12. Vilka krav/önskemål finns på ändringsmöjligheter?
13. Vilka tekniska, miljömässiga och ergonomiska trender finns?
14. Finns det tidigare projekt (eller upphandlingar) som är relevanta för frågeställningen?
15. Hur många produkter finns det behov av? Hur stor förväntas produktvolymen bli?
16. Finns det andra aspekter som inte berörts redan?

A.1.2 Målformulering

Process

1. Syftet med att formulera en målsättning är att förvissa sig om att alla deltagarna har samma tolkning av vad projektet ska uppnå samt att vara en ledstjärna under projektet. Målsättningen bör vara 1-3 meningar lång.
2. Alla deltagare skriver individuellt ned en målsättning.
3. Deltagarna turas om att presentera sina målsättningar för resten av gruppen, diskuterar därefter bidragen och kommer överens om en gemensam målsättning som alla är

klar över vad den innebär.

A.1.3 Idégenerering

Generella anvisningar

1. Maximera antalet idéer (gamla och nya).
2. Undvik negativ kritik.
3. Noggrann genomgång av förslagets potential görs i ett senare skede.
4. Utse en person som ansvarar för att hålla reda på tiden (ställ in timern så att det ringer när tiden är slut i varje steg).
5. Skriv bara på ena sidan av papperna. Ta ett nytt papper istället för att skriva på baksidan.
6. Metoden rekommenderas för maximalt 6 deltagare i gruppen (alternativt max 6 rundor i Steg 1).

Steg 1: Modifierad 635 (10 min × antalet deltagare)

1. Under 10 minuter kommer varje deltagare med minst tre förslag på hur frågeställningen kan lösas. Förslagen dokumenteras med hjälp av skisser och/eller text på ett A3-papper.
2. Varje deltagare skickar "sitt" papper med förslag till sin vänstra granne.
3. Grannen läser igenom förslagen och lägger sedan till minst tre förbättringar, kombinationer av tidigare förslag eller nya förslag under 10 min. Det är OK att fråga grannen till höger vad de menat med förslagen man mottagit.
4. Papperna med förslagen passerar alla deltagare (dvs. denna fas är slut när man får tillbaks det papper man börjat med). Om gruppen har fler än sex deltagare rekommenderas att steg b och c upprepas max fem gånger och att varje deltagare sedan får det papper som han/hon började med.

Steg 2. Presentation och feedback på förslagen (5 min + 10 min × antalet deltagare)

1. Deltagarna använder 5 min på att läsa igenom förslagen och idéerna på det papper som de själva startade med i Steg 1.
2. Varje person presenterar förslagen på det papper som de själva började med, vid behov hjälper övriga deltagare till att förklara om det är något presentatören inte förstår.
3. Efter varje presentation skickas det presenterade A3-pappret laget runt och deltagarna turas om att ge muntlig feedback på förslagen (t.ex. frågor, förbättringar och potential). Eventuell återstående tid kan användas för diskussioner av förslagen.
4. Maximalt 10 minuter per papper för presentation och feedback.

Steg 3: Galleristeg (10 min)

1. Papperna med förslag från Steg 1 sätts upp på en vägg, läggs ut på bordet eller arrangeras på annat vis så att alla deltagare kan se dem.
2. Varje deltagare jobbar individuellt med att utveckla och kombinera idéer från idésamlingen från Steg 1 efter presentation och diskussion av dessa i Steg 2. Nya idéer är

också välkomna. Använd nya A3-papper för att dokumentera idéerna med hjälp av skisser och/eller text (10 min).

3. Syftet är fortfarande att samla så många idéer som möjligt!

Steg 4. Presentation och feedback på förslagen (5 min × antalet deltagare)

1. Varje deltagare presenterar förslagen på sitt papper för resten av gruppen.
2. Efter varje presentation skickas det presenterade A3-pappret laget runt och deltagarna turas om att ge muntlig feedback på förslagen (t.ex. frågor, förbättringar, potential). Eventuell återstående tid kan användas för diskussioner av förslagen.
3. Maximalt 5 minuter per deltagare för presentation och feedback.

A.2 Resultat

Resultatet presenteras i samma följd som tillvägagångssättet; problemklarläggning, målformulering och idégenerering. Eftersom problemklarläggningen och målformuleringen förbereddes innan workshopen är några steg i tillvägagångssättet exkluderade.

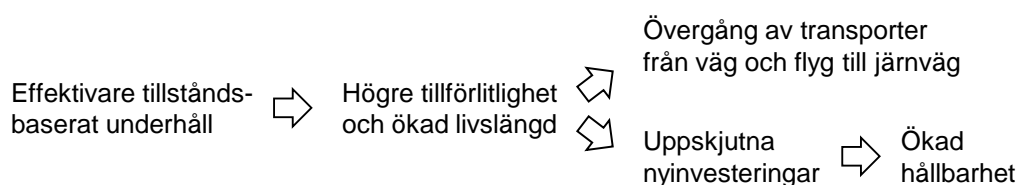
A.2.1 Problemklarläggning

Problemklarläggningen reviderades av deltagarna under workshop.

Initiativtagaren ger en kort introduktion till problemet.

Sakernas internet har växt i takt med att dataloggers har blivit billigare, effektivare, mindre i storlek och tillgängligare, samt att mobila nätverk har utvecklats med bättre täckning och lägre strömförbrukning för uppkopplade enheter. Dock kostar en datalogger vanligtvis mellan 5-10 kkr. Detta InfraSweden2030 projekt har således startats för att studera möjligheten att använda billig öppen hård- och mjukvara för tillståndsovervakning av järnvägsinfrastruktur. Detta ökar kunskapen inom projektgruppen, t.ex. vid upphandlingar, och ökar pressen på billigare sensorer och dataloggers. Projektet stödjer även öppen innovation.

Viktiga steg för internationellt konkurrenskraftig och hållbar infrastruktur är effektivare tillståndsbaserat underhåll och övergång av transporter från väg och flyg till järnväg. Effektivare tillståndsbaserat underhåll av järnvägar kan leda till högre tillförlitlighet och ökad livslängd, vilket innebär uppskjutna nyinvesteringar, och därmed ökad hållbarhet (Figur A.1).



Figur A.1: Konkurrenskraftig och hållbar infrastruktur.

Bakgrunden till problemet är därmed att vi kontinuerligt behöver effektivisera driften och underhållet av våra järnvägar för konkurrenskraft och miljö. Vi kommer således fram till problemet i fråga för OptiKrea-workshopen:

Var, vad och hur ska vi mäta för tillståndsovervakning i järnvägsinfrastrukturen?

Problemklarlägningsfrågor

1. Vad är problemet med nuvarande lösning/situation? Varför behöver den bytas eller modifieras?

Nuvarande situationen är att schemalagt förebyggande underhåll (FU) står för en stor kostnad av budgeten för förvaltningen av våra järnvägar. Tillståndsbaserat FU har potentialen att vara mer kostnadseffektivt med bibehållen eller ökad säkerhet, ge högre tillgänglighet och bättre planerbarhet. Schemalagt FU är inte alltid optimalt, men billigare än avhjälpande underhåll (AU).

2. Vad handlar problemet egentligen om och var ligger det största behovet?

Problemet handlar om att vi vill ha färre Uh-personal och besiktningsmän ute i spår. Behovet ligger i:

- Det schemalagda FU med täta besiktningar (t.ex. var tredje månad) som en sensor istället skulle kunna mäta
- Besiktningsanmärkningar som kräver täta kontroller eller åtgärd för att undvika täta kontroller av UH-personal som åker ut till spåret. En temporär sensor kan användas
- Åtgärder i järnvägen som behöver efterkontroll; en temporär sensor kan istället användas
- Stöd för den som besiktar. Inte mål att ta bort besiktningsmän; inte det primära, men kan fördela om medel. Bättre underlag för han/hon som är i spår.
- Vad vi inte kan mäta med trafik (tåg), utan måste ha fasta sensorer.
- Stöd vid efterkontroll. Är något som saknas i dagsläget.
- I många fall är en sensor mer 'exakt'/pålitliga, eller i alla fall mer konsekvent, dvs. mer objektiv.

3. Vem vill att problemet ska lösas och varför?

Konkurrenskraftig järnvägstransport avseende driftsäkerhet och monetär kostnad ökar transportvolymerna och investeringarna. Detta är av intresse för alla organisationer med affärer inom järnvägar. Underhåll och hållbarhet får större och större betydelse.

4. Vad är (rot)orsakerna till problemet?

Den egentliga rotorsaken till underhåll är entropi (termodynamikens andra huvudsats), dvs. oordningen ökar och allt strävar efter sänka sin energi, vilket ger förslitning och åldring, främst i form av korrosion, nötning och utmattning, men även t.ex. årstider. Effekter i järnvägar kan vara:

- Korrosion/rost/fukt/vatten
- Utmattning
- Nötning
- Dynamiska mekaniska spänningar
- Friktion i rörliga delar
- UV-nedbrytning av polymerer
- Elektrisk ström utanför bestämda intervall

- Tjäle och snö
- Överbelastning (mekanisk spänning)
- Funktionsfel i elektroniska komponenter
- Geometrifel
- Avrinning
- Dålig design avseende t.ex. korrosion och nötning

5. Vilka funktioner ska produkten kunna utföra, nu och i framtiden? Vilka uppgifter ska produkten lösa?

Avgörande funktion och uppgift att lösa är att kostnadseffektivt kunna mäta storheter, t.ex.:

- Temperatur
- Volt
- Ampere
- Acceleration/vibrationer
- Avstånd
- Luftfuktighet
- Ljus (kamera)
- Infraröd strålning (termografi)
- Mekanisk spänning (töjningsgivare)
- Luftburet ljud (mikrofon)
- Magnetfält och magnetiskt ledande metall (stål)

Storheterna ska kunna mätas med upplösning (bit) och frekvens (sampling) enligt applikation och behov. Vidare ska dataloggers kunna lagra och trådlöst skicka vidare insamlad data enligt applikation och behov.

6. Vilka egenskaper måste produkten ha/inte ha?

Egenskaper en datalogger måste ha oavsett temporär eller permanent installation är:

- Robust mot tapp/fall och slag från t.ex. is i dess driftmiljö
- Vattentät
- Användarvänlig; enkel installation och uppstart
- Enkelt och driftsäkert byte av batteri vid batteridrift
- Batterilivslängd och temperaturtålighet enligt applikation/behov
- Kalibrering (enkelt), behov av manuell kalibrering eller självkalibrerande
- Tillförlitlighet över tid, t.ex. falsklarm och batteri
- Billigt inköp, dvs. hundralappar eller under tusen kr
- Livslängd i antal år enligt applikation/behov
- Säker strömförsörjning gentemot strömförsörjare

Egenskaper och krav bör separeras mellan sensor och själva datalogger och dess funktioner. Fungerande grejer får kosta uppåt 5 kkr i många fall, t.ex. växlar. Jmf t.ex. med kostnad för uh-pers att gå ut i fält. Kan paketera på olika sätt, t.ex. vid upphandling.

7. Vilka krav ställer miljön som produkten ska placeras i på lösningen?

Produkten/produkterna måste vara:

- Robust mot tapp/fall och is/snö från tåg i dess driftmiljö
- Vattentät
- Enkel att installera, starta och vidmakthåll/drifta. Ska inte behöva lägga massa tid på att få data till information (visualisera). Install and forget
- Övervaka sig själv
- Tåla vibrationer (≥ 100 g i vissa fall)

8. Vilka icke uttalade önskemål, krav och förväntningar existerar?

- UH-personalen ska inte störas av den. Finns arbetsmiljöfrågor kring sensorer i spår, t.ex. ska inte kunna snubbla på grejerna. Ska inte se ut som ett suspekt objekt/anordning
- Samordning mellan t.ex. 10 sensor
- Varje sensor ska inte prata sitt eget språk
- Måste vara kopplat till en standard/protocol så sensorer/data kan samköras och data är jämförbart
- Framförallt att leverantörerna inte ska låsa in saker t.ex. med hjälp av kontrakt. Jämför med t.ex. signalsystem
- Någonstans en nod som alla sensorer kan prata till

9. Vilka vägar står öppna/stängda för anskaffning av produkten?

Utbudet av dataloggers¹ eller datainsamlingsenheter är begränsat när tidigare givna funktioner tas i beaktning. Blir t.ex. problem om man vill ha både trådlös överföring av data och batteri. Även begränsat när det kommer till att installera egen programmering

Vanligtvis kostar varje datalogger eller enbart sensor 5-10 kkr. Utbudet och priset förväntas fortsätta i en positiv trend, och framförallt med introduktion av 5G omkring år 2020. Utbudet och priset förväntas fortsätta i en positiv trend, och framförallt med introduktion av 5G omkring år 2020.

Tillhandahålla tjänsten är separat från att sälja produkten. För- och nackdelar; t.ex. ansvarsfördelning. Regelverk även om ansvar kan överföras från TRV till annan organisation. Der är en avtalsfråga om vem som äger data och även hur man kan använda och dela med sig av data.

10. Vilka alternativa produkter finns?

Kommersiella produkter är dyra och därmed inte kostnadseffektivt i nuläget. Exempelvis montering av endast en sensor i varje järnvägsväxel blir en stor inköpskostnad med tanke på omkring 10 000 växlar och en sensorkostnad på 5-10 kkr. Dock i växelfallet kan mätenhet få kosta uppåt 5 kkr, men beror på vad för data som ska loggas; data är olika värdefullt, t.ex. vibration/förskjutning gentemot temperatur.

11. Vilka standardkrav finns? Vilka lagstiftningar?

Dataloggers får inte påverka säkerheten eller driftsäkerheten negativt. Måste även ta hänsyn till informationssäkerhet.

¹Termen datalogger brukar avse loggning av data med låg frekvens, t.ex. en gång per dag eller per sekund. Datainsamling kan dock avse t.ex. 100 MSPS (miljoner mätningar per sekund).

12. Vilka krav/önskemål finns på ändringsmöjligheter?

Vid internetuppkopplad dataloggers är det önskvärt att kunna ändra inställningar i dataloggrarna på distans; nästan en förutsättning eftersom vi inte kan åka ut till spår för att byta programvara på t.ex. 10 000 sensorer.

13. Vilka tekniska, miljömässiga och ergonomiska trender finns?

Elektroniska kretsar förväntas fortsätta bli billigare, energieffektivare, beräkningskraftigare, miniatyriserade och erhålla fördelar från öppen hård- och mjukvara². 5G förväntas öka på denna trend eftersom 5G inkluderar frekvens för sakernas-internet. Även miljöfrågor angående återvinning av elektronik förväntas få större betydelse.

14. Finns det tidigare projekt (eller upphandlingar) som är relevanta för frågeställningen?

Mer eller mindre relaterade tidigare projekt finns men litteraturstudien är inte komplett.

15. Hur många produkter finns det behov av? Hur stor förväntas produktvolymen bli?

Frågan går inte att svara på eftersom Idégenereringen handlar om att ta fram möjliga praktiska tillämpningar. Men ett exempel är montering av endast en sensor i varje järnvägsväxel blir en stor inköpskostnad med tanke på omkring 10 000 växlar och en sensorkostnad på 5-10 kkr.

16. Finns det andra aspekter som inte berörts redan?

Inget anmärkt.

A.2.2 Målformulering

Målet med idégenereringen reviderades av deltagarna under workshopen till att:

Identifiera möjliga praktiska tillämpningar av dataloggers/sensorer i järnvägsinfrastruktur för insamling av data för mer kostnadseffektivt FU; Tänk inte sensorer, utan tänk fenomen som vi vill kunna lösa

A.2.3 Idégenerering

Resultatet består av 10 st A3 bilder; see bilaga B. Bilderna är sammanfattade i text i bilaga A. I detta avsnitt är bilderna sammanfattade ytterligare och kategoriserade enligt:

- Frågor avseenden syfte med mätning
- Frågor avseenden datasäkerhet och tillgång till data
- Kostnadsfrågor
- Frågor utan kategorisering
- Praktiska tillämpningar av sensorer med typ av mätning / fenomen

Identifierade frågor avseenden syfte med mätning:

²Se t.ex. marknaden för Arduino och 3D-skrivare.

- Analysera data från flera olika källor. Kombinera mätning av exempelvis spårläge, dels från mätvagn, dels från reguljär trafik, dels från fasta sensor installationer. Samband mellan kontaktledningsslitage och spårläge. Samanalysera spårläge, kontaktledning och pantograf. Data från flera olika källor som ovanstående kan utesluta vissa fel eller ge en bild av okända fel. Sensorer och datafusion – Få en mer komplett lägesbild då felet uppstår; vilka kombinationer är kritiska?
- Möjliggöra grundlig orsaksanalys vid fel. Bättre kunna ringa in vad som felat: Felupptäckt, fellokalisering, orsaksidentifiering – Feldiagnostik
- Samla data för att skapa/förfina generell nedbrytningsmodell. Effektsamband: tillstånd–åtgärd–effekt. Övervaka att nedbrytning ej sker snabbare än förväntat
- Data-information-kunskap = Hela kedjan bör beaktas och helst från ett besluts- perspektiv, ej teknikperspektiv
- Data ska vara enkel att hantera och analysera så information erhålls. Därmed kan större delen av tiden ägnas åt lösningar av uppkommet fel
- Viktigt med erfarenhetsåterföring för att förbättra systemet/produkter
- Stöd inför upphandlingar; att ha historik
- Mätningar måste vara tillförlitliga
- Temporära sensorer för mätning innan/efter/under spårarbeten
 - Accelerometer/vibrationsmätning
 - Bonus/vite utifrån resultat
 - Mäta effekten av en uh-åtgärd
 - Mät skillnader före och efter spårriktning. Följ upp efter spårriktning. Rälprofil kontrolleras efter att slipning gjorts för att se bland annat ekvivalent konicitet
- Temporära sensorer för misstänkta fel på tåg
- Sensorer i både spår och tåg för att upptäcka skillnader mellan feltyper och lastvikter
- Kan vi använda ATC-data? Kombinera med annan data
- Accelerometer mäter förändring av hastighet per tidsenhet. Om den rörliga massan är okänd så förblir kraft och arbete okänt.
- Analysera behov utifrån linjära objekt och punktobjekt samt frekventa och sproadiska fel.
- Uppkoppling är i många fall nödvändigt och i vissa fall inte nödvändigt.
- Förregling (lägga säker tågväg) – Händelsestyrd övervakning / kontinuerlig övervakning. Process/rutin för händelsestyrd övervakning intressant
- Kartlägga applicering vid kritiska punkter (där fel orsakar stor skada, effekter)
- Förmåga att ta hand och analysera stora mängder data
- Nyttja filtrering vid tågpassage så att det som mäts vid 10 000 Hz skickas filtrerat till 100 Hz
- Förmåga att förstå om datakvalitet är dålig. Tillförlitlig data
- Tillåta under uppbyggnadsskede fler mättekniker och inte bara satsa på en leverantör och en teknik
- Processbeskrivning från det förutsagda slitaget till åtgärd i spår
- Förutsäga vad som kommer att hända för bättre planering
- Mer automatiserad insamling av data på sikt
- Koppla hjuldata mot belastningar i spårväxlar, se samband?
- Koppla samman mätning av tillstånd på hjul och bana. Ser vi någon trend?
- Skaksensor

- Interface med vanligt uh så det inte 'förstör' för varandra
- Ranka största problemområden. Hur mäta/övervaka dessa? Hur tolka/analysera data? Prediktioner
- Mäta total trafikbelastning
 - Trafikdata som idag lagras i Opera kan koordineras med tågviikt. Detta kan ge bättre uppgifter än idag. Sensorer efter spårledningssuppgifter kan användas för att följa vilken väg tåget gått och om den kört enligt plan
 - Billiga loggers med töjningsgivare som mäter detta. Alltså en stor kabinett på sidan om spåret ska inte behövas
- Identifiera högkonsekvens-platser

Identifierade frågor avseenden datasäkerhet och tillgång till data:

- Öppen data så långt det går
- Data för vem, t.ex. allmänheten. Databas tillgänglig för leverantörer av material/tjänster för att förbättra dessa
- Informationssäkerhet måste hanteras över anläggningens hela livscykel
- Förhindra manipulering
- Lagring av historisk data som skall vara tillgänglig för parter kring systemet
- Bestämna var data ska förädlas
- Ägande/delande av data

Identifierade kostnadsfrågor:

- Behöver inte alltid vara TRV som betalar för sensorer då annan part önskar informationen
- Affärsmodeller win-win

Identifierade frågor utan kategorisering:

- Linjära objekt (spår) vs. punktobjekt (växlar) kan kräva olika lösningar; övervakning via fordon vs. infra
- Felet försvann? När belastning från tåget försvann. Inträffar de intermittenta felen 'alltid' i samband med tågpassage? Belastad vs. obelastad mätning
- Datalogger som appliceras där fel uppträder och försvinner med jämna mellanrum (intermittenta) för att konstatera orsaken till problemet
 - Koppla samman med ATC-data från fordon eller balis
 - Mobila enheter enkla att koppla in/ut, plug & play
 - Kan vara: kamera, termografi, ström, volt och töjning
 - Be leverantörer förbereda de olika komponenterna med logger och gränssnitt.
 - Lista kravspecifikation (examenarbete?)
- Vilka alternativ finns istället för batteridrift? (t.ex. självuppladdande enheter, solcell?)
 - Vid spår: solcell. På tåg beroende på placering: energi från tåget, omvandla rörelseenergi och batterier
 - Vid spår: Batteriladdare som nyttjar tågets rörelseenergi
 - Energi från ATC-antenn. Energi från piezo-elektrisk film som fladdrar/vibrerar

- från tåg
– Trådlös överföring av energi som ligger i kabelrännorna

Praktiska tillämpningar av sensorer med typ av mätning / fenomen är sammanfattade i tabellerna A.1–A.3.

Tabell A.1: Praktiska tillämpningar av sensorer.

System	Delsystem	Typ av mätning / fenomen
Kontaktledning	Kontakttråd	<ul style="list-style-type: none"> • Mäta strömavtagning. Mäta hur jämt strömavtagningen sker såväl elektriskt som mekaniskt (elektrisk kontakt) • Mäta mekanisk belastning i kontakttråden • Filma kontakttråden från tåg • Montera töjningsgivartråd längs med tråden • Logga när och var ljusbågar uppstår
	Bärlina/bärtråd	<ul style="list-style-type: none"> • Montering av sensor på tåg för mätning av bärlina
	—	<ul style="list-style-type: none"> • Nedriven kontaktledning – Identifier orsak och mäta
Banunderbyggnad	Dränering	<ul style="list-style-type: none"> • Övervaka dränering
	Underballast	<ul style="list-style-type: none"> • Utsliten underballast. • Mäta storleken på sättningar i spår i belastat läge. Höghastighetsfotografering med referenspunkter • Markradar (georadar)? Mättåg vs. reguljär trafik • Horisontell och vertikal geometristabilitet • Mäta fuktighet i ballast kontinuerligt • Sensorer på tåg i ordinarie trafik mäter läge på spår för att detektera förändringar. Kan även mäta fel i banöverbyggnad. • Accelerometermätning med bra GPS-koordinater och tidmätning kombinerat med hastighet • Övervakning med 3D skanner för att se på absolut spårläge över lång tid. Kan användas för att övervaka stabiliteten i en bank/slänt. Kan användas för att följa upp spårsjustering. Hur snabbt återkommer felen? • Satellitövervakning malmбанan vid 35 ton test InSAR
Spår	Räl	<ul style="list-style-type: none"> • Accelerometer/vibrationsmätning (Impulser/stötar) • Akustisk emission mäter spricktillväxt och ultraljudssensor används för att skicka och analysera om det finns sprickor • Rälstemperatur • Mekanisk spänning med ultraljud som mäter kornstrukturens utsträckning/kompression. Trådtöjningsgivare • Mäta rälprofil så noggrant att det kan användas för beräkningar • Mät vibration i räl. Kan ge indikera behov av slipning/påläggssvetsning • Mikrofon som hör gnissel i kurva
	Sliper	<ul style="list-style-type: none"> • Mäta vibrationer i sliper. Det kan ge behov av stoppning. Koppla vibration mot passerande tåg? Finns samband? • Mätning på sliper kan även göras med geofon

Tabell A.2: Praktiska tillämpningar av sensorer.

System	Delsystem	Typ av mätning / fenomen
Spår	Trumma	<ul style="list-style-type: none"> • Punktfel höjdläge. Mäta punktfel (värden) i växlar (tungspets och korsningsparti) i horisontal och vertikalplan
	Isolskarv	<ul style="list-style-type: none"> • Överledning. Använda kamera • Punktfel höjdläge. Mät acceleration i skarvjärnen. Hög acceleration påvisar fel spårläge • Mäta magnetfält vid magneten för att ta bort spånor från isolskarvar • Kamera som övervakar isolskarv avseende övervalsning, 'iselmellanlägg' och sprickor vid skruvförband • Magneter används för att fånga spånor. Kameran kan användas för att larva när magneterna är fulla • Om det var tillåtet skulle man kunna mäta upp krypströmmen mellan sektioneringarna • Höghastighetsfotografera i belastat läge
	Rälsskarv (skarvspår)	<ul style="list-style-type: none"> • Följ upp problemen med skarvar i skarvspår. Mät skillnader med skimsning av skarvar
Spårväxel	Omläggnings- /kontroll -anordning	<ul style="list-style-type: none"> • Omläggningstid. Mäta om anläggningen går tungt • Energiåtgång • Inkommande spänning för låg • Ljud • Accelerometer/vibrationsmätning • Växeltungans position. Växel ej i kontroll. Mäta/övervaka om det finns hinder mellan tungan/stödräl • Övervaka med kamera från kontaktledningssystem (bärlina) • Korrelation med ström vid växling • Antal omläggningar • Fuktighet i växeldriv • Smutsiga/ojämna/hela glidplattor • Värme på glidplattan; kan den mätas? • På något sätt övervaka reläer och fingrar i växeldrivet • Omläggningskraft
	Korsning	<ul style="list-style-type: none"> • Mäta krafter från olika tåg • Punktfel höjdläge • Mäta punktfel (värden) i växlar (tungspets och korsningsparti) i horisontal och vertikalplan • Ojämnheter i farbana/farkant som genererar kraftiga impulser/stötar i: Tungspets, korsningsparti: korsning och moträl, och efter långsliparna • Mät vibration i sliper vid korsning • Kameraövervakning kan upptäcka snöklumpar i växeltunga/stödräl. Kan även användas vid plankorsning för att minska spårspring. Använd drönare • Slag och antal slag i växelkryss. Koppla mot passerande fordon för att hitta samband

Tabell A.3: Praktiska tillämpningar av sensorer.

System	Delsystem	Typ av mätning / fenomen
Plankorsning	Bom	<ul style="list-style-type: none"> • Energiåtgång • Omläggningstid • Ljud • Kameraövervakning kan upptäcka snöklumpar i växeltunga/stödräl. Kan även användas vid plankorsning för att minska spårspänning
Rullande materiel	Strömavtagare (lok)	<ul style="list-style-type: none"> • Filma pantograf, mäta yttergränser eller glapp? • Mäta krafter vid sinussvängningar från tåg
	Hjul	<ul style="list-style-type: none"> • Övervakning av tillstånd/kvalitet på hjul. Kan använda mikrofon • Mäta tågpassage avseende: rörelse/vibration/slag, vikt/belastning/kraft, ljud, antal passager • Mikrofon som hör gnissel och slag från hjul. Påbyggnad på hjulplatta: Även vibration kan mäta
Elanläggningar	–	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuerlig övervakning av kraftförsörjning. Övervaka kraftförsörjning, exempelvis till signalanläggningar. Höga startströmmar vid induktiv last. Hitta samband mellan säkring som löser ut och exempelvis omkoppling av matande nät eller avvikelser i återgångsström • Mäta värmesignatur för olika delar
	Växelvärme	<ul style="list-style-type: none"> • Externt billiga temperaturloggrar (10-50 kr) som kan tala med varandra. Kan tala om temperaturen är inom lämpligt intervall • Mät temperatur på känsliga platser, t.ex. stödknap, ipl • Fast installerad värmekamera. Alternativt värmekamera på vissa tåg. Tillräcklig upplösning?
Signalanläggningar	Likströms-spårledning	<ul style="list-style-type: none"> • Mäta utmatningsström och spårspänning • Fellokalisering till specifik skarv • Tolerans för avvikelse av spårspänning
Övriga anläggningar	Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • Mäta dropp i tunnel. Kanske med mikrofoner. Termografi mäta avdunstning. Mäta fuktighet
Övriga anläggningar	–	<ul style="list-style-type: none"> • Filmning från tåg. Kan en detektor känna skillnaden på djur och människa? Bildanalys? (Hemlarm bedömer massa på föremål) Vem kollar på dagens filmer? Ny roll?
	Viltövergångar	<ul style="list-style-type: none"> • Kameraövervakning för att övervaka vilt. Använd drönare
Generellt	–	<ul style="list-style-type: none"> • Portabla mätutrustningar signal: Flerkanalig mätning i exempelvis reläställverk för att ringa in intermittenta fel • Fellokalisering till komponentnivå • Spår bunden drönare. Drönare på räls (kliva av/på) • Lukt sensor

A.3 Slutsats

En variant av 635-metoden genomfördes i en workshop under tre timmar med elva deltagare, för att identifiera möjliga praktiska tillämpningar av dataloggers/sensorer i järnvägsinfrastruktur. Sammanställt resultat består av ca. 40 frågeställningar vid införsel eller utökade av sensorer i järnvägar, samt ca. 80 idéer på tillämpningar/fenomen för sensorer i järnvägar. Antal frågor och idéer är endast en subjektiv fingervisning på metodens effektivitet avseende idégenerering. En annan aspekt är om frågorna/idéerna är utförligt beskrivna och utvecklade. För att gå vidare med frågorna/idéerna kan de väljas ut i en workshop i grupp eller genom individuellt arbete, t.ex. med delfi-metoden, där sammanställningen av frågorna/idéerna delas ut till deltagarna, som i sin tur arbetar vidare med dem individuellt, för att sedan åter sammanställas. Att utveckla eller diskutera idéerna vidare är utom denna rapports räckhåll.

Deltagarna i workshoppen uppfattar många frågor och idéer på tillämpningar kända sedan tidigare, men ser även mer nyuppkomna frågor/idéer. För en person eller organisation med betydande erfarenhet kan en enskild ny frågeställning eller idé vara av intresse. Antigen själva frågan/idén i sig eller som ingående information i tankeverksamhet avseende andra frågor/idéer. En sammanställning av frågeställningar och idéer i textform kan även vara värdefullt för spridning inom organisationer.

B. Programkod

Denna bilaga innehåller Arduino-kod för prototypen (figur 4.1) och Matlab-kod för att integrera insamlad data till förskjutning. Har man inte tillgång till Matlab kan man använda sig av t.ex. GNU Octave eller Scilab.

Se nästa sida →

```

1  #include <SoftwareSerial.h> //For GPRS shield
2  #include <SD.h> //Load SD card library
3  #include <SPI.h> //Load SPI Library for microSD
4  #include <Wire.h> //I2C, i.e. using SCL and SDA, for RTC and ADC
5  #include <SparkFunDS1307RTC.h> //For RTC
6  #include <Adafruit_ADS1015.h> //For ADC
7  #include <EEPROM.h> //For EEPROM
8
9  //-GPRS-----
10 SoftwareSerial GPRS(10, 11); //Software serial port 1 (GPRS)
11 unsigned char buffer[64]; //Buffer array for data recieved from the GPRS shield over software serial port (GPRS)
12 int count = 0; //Counter for buffer array (GPRS)
13
14 //GPRS settings
15 String pin = "9968";
16 String apn = "online.telia.se";
17 String ftp = "83.255.178.75";
18 String ftp_port = "800";
19 String ftp_user = "username";
20 String ftp_pw = "password";
21
22 char filename[] = "00000000.txt"; //Define a file (GPRS)
23 int randNum; //Def. int for random number, for file content (GPRS)
24
25 //-Millis-----
26 //For readFile() using millis()
27 unsigned long startReadFile;
28 unsigned long currentTimeReadFile;
29 unsigned long deltatReadFile = 200;
30
31 //-microSD-----
32 int chipSelect = 53; //chipSelect pin for the SD card Reader
33 File mySensorData; //Data object you will write and read your sesnor data to
34 int dummy_variable = 2; //Variable for storing data to SD card
35 int ID;
36
37 //-ADC-----
38 Adafruit_ADS1115 ads;
39
40 //-Time-----
41 int starttime; //For collecting sensor data
42 int endtime; //For collecting sensor data
43
44 void setup() {
45     #define wakePin 12 // Wake-on-Shake "Keep Awake" Pin
46     pinMode(wakePin, OUTPUT);
47     digitalWrite(wakePin, HIGH);
48
49     randomSeed(analogRead(0)); //For generating random numbers
50
51     Serial.begin(19200); //Open serial communications
52     GPRS.begin(19200); //Software serial port 1 (GPRS)
53     pinMode(9, OUTPUT); //For powering up the GPRS shield
54
55     startReadFile = millis(); //Initial start time
56
57     //-ID-----
58     // Reading from address 0 and 1:
59     byte high = EEPROM.read(0);
60     byte low = EEPROM.read(1);
61     ID = word(high,low);
62     if (ID > 99){
63         ID = 1;
64         EEPROM.write(0,highByte(ID));
65         EEPROM.write(1,lowByte(ID));
66     } else {
67         ID++;
68         EEPROM.write(0,highByte(ID));
69         EEPROM.write(1,lowByte(ID));
70     }
71     Serial.println("ID: " + String(ID));
72
73     //-RTC-----
74     rtc.begin(); //Initialisation of the RTC library
75     //rtc.autoTime(); //Sets the time automatically
76     //rtc.setTime(30, 14, 8, 1, 18, 3, 18); //rtc.setTime(s, m, h, day, date, month, year). No preceding zeros
77     //After setting the time, comment out immediately and upload again
78
79     //-microSD-----
80     pinMode(chipSelect, OUTPUT); //Must declare CS an output and reserve it for SD
81     SD.begin(chipSelect); //Initialize the SD card reader
82
83     //-ADC-----
84     // The ADC input range (or gain) can be changed via the following
85     // functions, but be careful never to exceed VDD +0.3V max, or to
86     // exceed the upper and lower limits if you adjust the input range!
87     // Setting these values incorrectly may destroy your ADC!
88     //
89     //
90     // ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // 2/3x gain +/- 6.144V 1 bit = 3mV 0.1875mV (default)
91     ads.setGain(GAIN_ONE); // 1x gain +/- 4.096V 1 bit = 2mV 0.125mV
92     // ads.setGain(GAIN_TWO); // 2x gain +/- 2.048V 1 bit = 1mV 0.0625mV
93     // ads.setGain(GAIN_FOUR); // 4x gain +/- 1.024V 1 bit = 0.5mV 0.03125mV
94     // ads.setGain(GAIN_EIGHT); // 8x gain +/- 0.512V 1 bit = 0.25mV 0.015625mV
95     // ads.setGain(GAIN_SIXTEEN); // 16x gain +/- 0.256V 1 bit = 0.125mV 0.0078125mV
96     ads.begin();
97     TWBR = ((F_CPU / 400000) - 16) / 2; // Change the i2c clock to 400KHz
98
99     //-Running_once-----
100    //RTC: Printing time to serial monitor
101    rtc.update(); // Call rtc.update() to update all rtc.seconds(), rtc.minutes(),

```



```

102 printTime(); // Print the new time from RTC
103
104 //Making a filename
105 randNum = random(10000, 32000); //Random number for file content (GPRS)
106 getFilename(filename); //Function for making a filename (GPRS)
107
108 //Collecting data to file at microSD
109 rtc.update(); // Call rtc.update() to update all rtc.seconds(), rtc.minutes(),
110 mySensorData = SD.open(filename, FILE_WRITE);
111 if (mySensorData) {
112     delay(10); // To get the first lines of the file
113     printTime2(); // Print the new time from RTC
114
115     starttime = millis();
116     endtime = starttime;
117     while ((endtime - starttime) <= 10000) { // do this loop for x ms
118
119         //int16_t adc1; //, adc1, adc2;
120         int16_t adc01;
121         //adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
122         adc01 = ads.readADC_Differential_0_1();
123         //adc1 = ads.readADC_SingleEnded(1);
124         //adc2 = ads.readADC_SingleEnded(2);
125
126         //mySensorData.print(adc0); // write x to card
127         //mySensorData.print(" ");
128         mySensorData.print(millis()); // write time to card
129         mySensorData.print(" ");
130         mySensorData.println(adc01); // write y to card
131         //mySensorData.print(" ");
132         //mySensorData.println(adc2); // write z to card
133
134         endtime = millis();
135     }
136     mySensorData.println("end");
137     mySensorData.close(); //close the file
138 }
139
140 powerUp(); // Power up the GPRS shield
141
142 //Making a file at FTP and uploads data to that file (GPRS)
143 Serial.println("FTP file upload");
144 uploadFile(); //Uploading a file (GPRS)
145
146 Serial.println("FTP file upload 2nd time");
147 uploadFile(); //Uploading a file (GPRS)
148
149 powerDown(); // Power down the GPRS shield
150
151 Serial.println("Done");
152
153 digitalWrite(wakePin, LOW); // Power down the system
154 }
155
156 //The loop is only for sending AT commands and receiving responses
157 void loop() {
158     //gprsResponseIf(); //GPRS shield response (to user input) (GPRS)
159     //User input to GPRS shield in terms of AT commands (GPRS)
160     //if (Serial.available()) { //If data is available on hardware serial port ==> data is coming from PC or notebook
161     //    GPRS.write(Serial.read()); //Write it to the GPRS shield (GPRS)
162     //}
163 }
164
165 //-----
166 // Seed GPRS functions
167 //-----
168
169 void powerUp() {
170     digitalWrite(9,LOW);
171     delay(1000);
172     digitalWrite(9,HIGH);
173     delay(2000);
174     digitalWrite(9,LOW);
175     delay(3000);
176 }
177
178 void powerDown() {
179     digitalWrite(9,LOW);
180     delay(1000);
181     digitalWrite(9,HIGH);
182     delay(2000);
183     digitalWrite(9,LOW);
184     delay(3000);
185 }
186
187 void gprsResponseIf() { //GPRS shield response. If data available, not waiting for data to come available
188     if (GPRS.available()) { //If data is coming from software serial port ==> data is coming from gprs shield
189         while (GPRS.available()) { //Reading the data into a char array
190             buffer[count++] = GPRS.read(); //Writing the data into 'buffer' array
191             if (count == 64)break;
192         }
193         Serial.write(buffer, count); //When data transmission ends, write buffer to hardware serial port
194         clearBufferArray(); //Call clearBufferArray function to clear the stored data from the array
195         count = 0; //Set the counter for the while loop to zero
196     }
197 }
198
199 //This function is 'gprsResponseIf()' -function with a delay of 500 ms
200 void gprsResponseDelay() { //GPRS shield response. If data available, not waiting for data to come available
201     if (GPRS.available()) { //If data is coming from software serial port ==> data is coming from gprs shield
202         while (GPRS.available()) { //Reading the data into a char array

```

```

203     buffer[count++] = GPRS.read(); //Writing the data into 'buffer' array
204     if (count == 64)break;
205 }
206 Serial.write(buffer, count); //When data transmission ends, write buffer to hardware serial port
207 clearBufferArray(); //Call clearBufferArray function to clear the stored data from the array
208 count = 0; //Set the counter for the while loop to zero
209 }
210 delay(500);
211 }
212
213 void clearBufferArray() { //Function to clear buffer array
214     for (int i = 0; i < count; i++)
215     {
216         buffer[i] = NULL; //Clear all index of array with command NULL
217     }
218 }
219
220 void uploadFile() {
221     //Writing to the GPRS shield
222     GPRS.println("AT"); //Checking if it is responding
223     gprsResponseDelay();
224     GPRS.println("AT+CPIN?"); //Check if the pin is required
225     gprsResponseDelay();
226     GPRS.println("AT+CPIN=" + pin); //Write the pin
227     gprsResponseDelay();
228     GPRS.println("AT+CREG?"); //Check network registration
229     gprsResponseDelay();
230     GPRS.println("AT+CBAND?"); //Check band
231     gprsResponseDelay();
232
233     //FTP bearer profile
234     GPRS.println("AT+SAPBR=3,1,\"Contype\", \"GPRS\"");
235     gprsResponseDelay();
236     GPRS.println("AT+SAPBR=3,1,\"APN\", \"" + apn + "\"");
237     gprsResponseDelay();
238     GPRS.println("AT+SAPBR=1,1");
239     gprsResponseDelay();
240     GPRS.println("AT+SAPBR=2,1");
241     gprsResponseDelay();
242
243     //FTP put method
244     GPRS.println("AT+FTPCID=1");
245     gprsResponseDelay();
246     GPRS.println("AT+FTPSERV=\"" + ftp + "\"");
247     gprsResponseDelay();
248     GPRS.println("AT+FTPPORT=" + ftp_port);
249     gprsResponseDelay();
250     GPRS.println("AT+FTPU=" + ftp_user + "\"");
251     gprsResponseDelay();
252     GPRS.println("AT+FTPPW=\"" + ftp_pw + "\"");
253     gprsResponseDelay();
254     GPRS.print("AT+FTPPUTNAME=\"");
255     GPRS.print(filename);
256     GPRS.println("\"");
257     gprsResponseDelay();
258     GPRS.println("AT+FTPPUTPATH=\"/\");
259     gprsResponseDelay();
260     GPRS.println("AT+FTPPUT=1");
261     gprsResponseDelay();
262     delay(2500); //The module needs some time to respond
263     gprsResponseDelay(); //It gives two replies
264
265     //-----
266     //Reading data from file (microSD)
267     Serial.println("Reads file");
268
269     readFile2(filename);
270
271     GPRS.println("AT+FTPPUT=2,0"); //Closing the FTP session
272     gprsResponseDelay();
273     gprsResponseDelay(); //It gives two replies
274     //-----
275 }
276
277 //-----
278 // Making a filename
279 //-----
280
281 void getFilename(char *filename) {
282     // DateTime now = RTC.now(); int year = now.year(); int month = now.month(); int day = now.day();
283     rtc.update(); // Call rtc.update() to update all rtc.seconds(), rtc.minutes(),
284
285     //if (rtc.minute() < 10)
286     // Serial.print('0'); // Print leading '0' for minute
287     //Serial.print(String(rtc.minute()) + ":"); // Print minute
288
289     int year = rtc.year();
290     int month = rtc.month();
291     int day = rtc.date();
292     filename[0] = year / 10 + '0';
293     filename[1] = year % 10 + '0';
294     filename[2] = month / 10 + '0';
295     filename[3] = month % 10 + '0';
296     filename[4] = day / 10 + '0';
297     filename[5] = day % 10 + '0';
298     filename[6] = ID / 10 + '0';
299     filename[7] = ID % 10 + '0';
300     filename[8] = '.';
301     filename[9] = 't';
302     filename[10] = 'x';
303     filename[11] = 't';

```

```

304     return;
305 }
306
307 //-----
308 // microSD
309 //-----
310
311 void readFile2(char *filename) {
312     mySensorData = SD.open(filename); //Open the file for reading:
313     if (mySensorData) {
314         while (mySensorData.available()) { // read from the file until there's nothing else in it
315             int noChar = 1200;
316             char tempString[noChar];
317             int spot = 0;
318             while (mySensorData.available()) {
319                 tempString[spot++] = mySensorData.read();
320                 if (spot == noChar) break;
321             }
322             tempString[spot] = '\0';
323             String spotStr = String(spot);
324             GPRS.println("AT+FTPPUT=2," + spotStr); //For 'spot' bytes. No reply before text is entered "AT+FTPPW=" + ftp_pw
325             gprsResponseDelay();
326             GPRS.print(tempString); //'Spot' characters
327             GPRS.print("\n"); //1 character
328             gprsResponseDelay();
329             gprsResponseDelay(); //It gives two replies (3rd)
330         }
331         mySensorData.close(); //Close the file:
332     } else { //If the file didn't open, print an error:
333         Serial.println("error opening PTDATA.TXT");
334     }
335 }
336
337 //-----
338 // RTC
339 //-----
340
341 void printTime() {
342     Serial.print(String(rtc.hour()) + ":"); // Print hour
343     if (rtc.minute() < 10)
344         Serial.print('0'); // Print leading '0' for minute
345     Serial.print(String(rtc.minute()) + ":"); // Print minute
346     if (rtc.second() < 10)
347         Serial.print('0'); // Print leading '0' for second
348     Serial.print(String(rtc.second())); // Print second
349
350     Serial.print(" | ");
351
352     // Few options for printing the day, pick one:
353     Serial.print(rtc.dayStr()); // Print day string
354     Serial.print(" - ");
355
356     Serial.print(String(rtc.date()) + "/" + // (or) print date
357                 String(rtc.month()) + "/" // Print month
358                 String(rtc.year())); // Print year
359 }
360
361 void printTime2() {
362     mySensorData.print(String(rtc.year())); // Print year
363
364     if (rtc.month() < 10) {
365         mySensorData.print('0'); // Print leading '0' for month
366     }
367     mySensorData.print(String(rtc.month())); // Print month
368
369     if (rtc.date() < 10) {
370         mySensorData.print('0'); // Print leading '0' for date
371     }
372     mySensorData.print(String(rtc.date()) + " "); // Print date
373
374     if (rtc.hour() < 10) {
375         mySensorData.print('0'); // Print leading '0' for minute
376     }
377     mySensorData.print(String(rtc.hour())); // Print hour
378
379     if (rtc.minute() < 10) {
380         mySensorData.print('0'); // Print leading '0' for minute
381     }
382     mySensorData.println(String(rtc.minute())); // Print minute
383 }
384 //-----

```

```

1 clear, close all, clc
2
3 %% Inputs
4 file = 'data_18102029_3.xlsx'; %File to read
5 timeData = 1; %1: Yes, 0: No
6 T = 5;
7 dataCol = 2;
8 sheet = 1; %Sheet of file
9 fcl = 2; %Cut-off freq.
10 fch = 10; %Cut-off freq.
11 fo = 2; %Filter order
12
13 %% Read data
14 num = xlsread(file,sheet);
15 dataPoints = length(num(:,1));
16 if timeData == 1
17     t = (num(:,1)-num(1,1))/1000;
18     T = t(end,1)-t(1,1); %Total time
19 else
20     t = 0:T/dataPoints:(T-T/dataPoints);
21     t = t';
22 end
23 y = num(:,dataCol);
24 N = length(y(:,1)); % number of signal samples
25 fs = N/T; %Sampling frequency
26
27 %% Converting to ms^2
28 k = 1256.82; %1258.49;
29 m = -50.5476; %-52.5847;
30 y = ( (-m+y)/k - 1) * 9.82;
31
32 %% Filter
33 %Filter 1
34 fc = [fcl fch]; %Cut-off
35 [B,A] = butter(fo,fc/(fs/2),'bandpass');
36 ybp = filter(B,A,y);
37
38 %% Integration
39 yvel = cumtrapz(t,ybp);
40 yvel = filter(B,A,yvel);
41 ydisp = cumtrapz(t,yvel);
42 ydisp = filter(B,A,ydisp);
43
44 %% FFT
45 %Before filtering
46 Y = fft(y);
47 P2 = abs(Y/N);
48 P1 = P2(1:N/2+1);
49 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
50 f = fs*(0:(N/2))/N;
51
52 %After filtering
53 Y_2 = fft(ybp);
54 P2_2 = abs(Y_2/N);
55 P1_2 = P2_2(1:N/2+1);
56 P1_2(2:end-1) = 2*P1_2(2:end-1);
57
58 %Dominant frequency
59 [~,peakIdx] = max(P1_2);
60 df = f(peakIdx);
61
62 %% Plotting
63 left = 600; width = 400; height = 250;
64 fig1 = figure('Position',[left 550 width height]); %[left, bottom, width, height]
65 fig2 = figure('Position',[left 550 width height]); %[left, bottom, width, height]
66 fig3 = figure('Position',[left 550 width height]); %[left, bottom, width, height]
67 fig4 = figure('Position',[left 550 width height]); %[left, bottom, width, height]
68 fig5 = figure('Position',[left 550 width height]); %[left, bottom, width, height]
69
70 figure(fig1)
71 plot(t,y,t,ybp,'r','linewidth',1.5);
72 xlabel('Time [s]')
73 ylabel('Acceleration [m/s^2]')
74 legend('Original noisy signal','Filtered signal');
75 grid on
76
77 figure(fig2)
78 plot(t,yvel);
79 xlabel('Time [s]')
80 ylabel('Velocity [m/s]')
81 grid on
82
83 figure(fig3)
84 plot(t,ydisp*1000);
85 xlabel('Time [s]')
86 ylabel('Displacement [mm]')
87 %title('2^nd order filter')
88 grid on
89
90 figure(fig4)
91 plot(f,P1)
92 title('Single-sided amplitude Spectrum')
93 xlabel('f [Hz]')
94 ylabel('|P1(f)|')
95
96 figure(fig5)
97 plot(f,P1_2)
98 title('Single-sided amplitude Spectrum')
99 xlabel('f [Hz]')
100 ylabel('|P1(f)|')

```