

Kontaktperson RISE

Erik Lindvall

Säkerhet och transport

+46 10 516 58 86

erik.lindvall@ri.se

Datum

2022-07-31

Beteckning

P106071-01

Sida

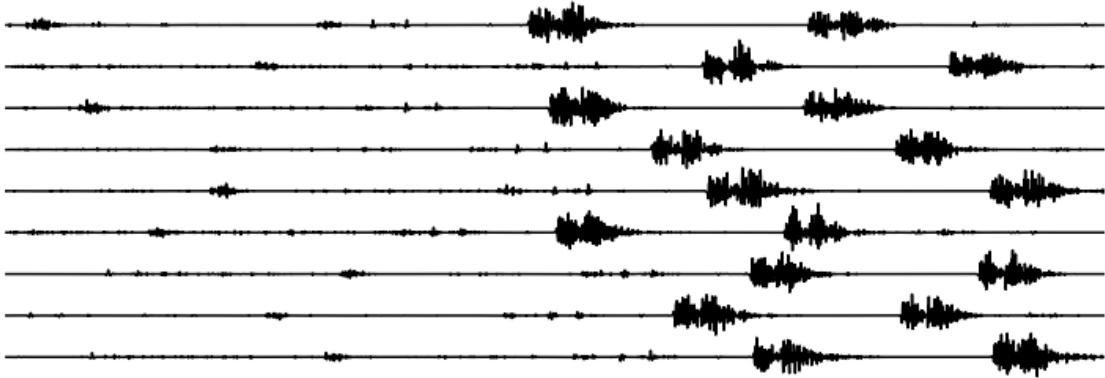
1 (18)

RISE Research Institutes of Sweden AB

Box 857

501 15 Borås

## Digitalisering och optimering av spårinfrastruktur



### RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress  
Box 857  
501 15 BORÅSBesöksadress  
Brinellgatan 4  
504 62 BoråsTfn / Fax / E-post  
010-516 50 00  
033-13 55 02  
info@ri.se

Konfidentialitetsnivå

K1 - Öppen

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE AB i förväg skriftligen godkänt annat.

## Sammanfattning

Projektet *Digitalisering och optimering av spårinfrastruktur* är en genomförbarhetsstudie som har utförts inom det strategiska innovationsprogrammet InfraSweden2030, en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten. Projektet syftar till att undersöka koncept som kan förbättra befintligt arbetssätt kopplat till datainsamling om spårhälsa. För projektet sattes det upp en simulerad, nerskalad miljö som representerade ojämnheter i järnvägsräls, på krockbanan hos RISE Mekanik i Borås. Ojämnheterna i rälsens skenor utgörs av två sprickset om tre sprickor vardera. Sprickornas dimensioner bestämdes med hänsyn till krockbanans slädes (tåget) hjuldimension. På släden monterades två individuella IMUer, varpå släden därefter färdats fram och tillbaka över spricksetten i olika hastigheter och samlat accelerometerdata. Insamlad data utgörs av icke-stationära tidsserier. Efterbearbetning och brusreducering har gjorts med hjälp av wavelet-transformen. Samstämmigheten mellan tidsserier har analyserats med dynamic time warping (DTW). Med DTW undersöks också möjligheten och resultatet av aggregering av tidsserier.

## Abstract

The project *Digitization and optimization of track infrastructure* is a feasibility study that has been carried out within the strategic innovation program InfraSweden2030, a joint venture of Vinnova, Formas and the Swedish Energy Agency. The project aims to investigate concepts that can improve existing working methods linked to acquiring data on track health. For the project, a simulated, scaled-down environment was set up that represented irregularities in railway rails, on the crash track at RISE Mechanic Research in Borås. The irregularities in the rails of the rails consist of two crack sets of three cracks each. The dimensions of the cracks were determined with regard to the wheel dimension of the collision track slide (train). Two individual IMUs were mounted on the sled, after which the sled travelled back and forth over the crack set at different speeds and collected accelerometer data. Collected data consists of non-stationary time series. Analysis and noise reduction have been done using wavelet transform. The consistency between time series has been studied with dynamic time warping (DTW). With DTW, the possibility and results of aggregation of time series are also examined.

## Förord

Projektgruppen har bestått av:

Erik Lindvall RISE Mätteknik

Carsten Rieck RISE Mätteknik

Carl-Henrik Hanquist RISE Mätteknik

Författare till denna rapport är Erik Lindvall medan övriga medlemmar i projektgruppen har bidragit med teknisk och skriftlig granskning av rapporten.

## Innehåll

Sammanfattning .....	2
Abstract .....	3
Förord .....	4
Introduktion .....	6
Metod .....	6
Experiment .....	6
Utförande .....	6
Hårdvara .....	8
Släde och hjul .....	8
Sprickor .....	8
Signalprocessering .....	11
Waveletanalys .....	11
Dynamic Time Warping .....	12
Algoritmutveckling .....	13
Resultat och diskussion .....	13
Slutsats .....	16
Framtidsstudier .....	17
Referenser .....	18

## Introduktion

Projektet *Digitalisering och optimering av spårinfrastruktur* är en genomförbarhetsstudie och har utförts inom det strategiska innovationsprogrammet InfraSweden2030, en gemensam satsning av Vinnova, Formas och Energimyndigheten. Projektet är finansierat utav Vinnova och utlysningen SIP InfraSweden2030 samt genom intern medfinansiering av RISE.

Projektet syftar till att undersöka koncept som kan förbättra befintligt arbetssätt kopplat till datainsamling om spårhälsa. Projektets initiala projektpartner hade kunskap om järnvägshälsa, tåg och boggi, men har dragit sig ur projektet. Projektmedlemmar från RISE besitter inte sådan kunskap. Projektet har därför valt att fokusera på mättekniken och databearbetning kopplad till tidsserier och undersöka möjligheten att detektera ojämnheter med accelerometer.

Projektbudget har inte tillåtit att tester och mätningar har utförts på aktiv järnväg och tåg. Ett försök till datainsamling gjordes på Gräfsnäs museijärnväg utanför Alingsås, men miljön var allt för brusig för att få användbar data. Det gjordes försök med att tysta tåget genom att öka dess last, dock utan framgång. Istället flyttades testerna inomhus. RISE Mekanik driver en krockbana som för detta projekt har simulerat järnvägsräls och tåg. Krockbanan utgörs bland annat av en räls och en släde. Ojämnheter i rälsen skapades genom att fräsa tvärgående sprickor i rälsen. Sprickornas dimension planerades med hänsyn till slädens hjuldimension. Krockbanan är endimensionell och banan är utformad på ett sådant sätt att antal frihetsgrader reducerats så långt som möjligt.

I projektet har möjligheten att implementera, för metrologin, nya analysmetoder undersökts. Wavelet-transformen används för brusreducering och är anpassad för icke-stationära tidsserier och skiljer sig på så sätt från klassisk fourieranalys. Med löpande insamling av mätdata kan en detaljerad digital spårprofil byggas upp efterhand tack vare analys av samstämmigheten mellan tidsserier genom dynamic time warping (DTW). Val av mätinstrument föll på IMU (Inertial Measurement Unit) då IMU förmodas vara snabbare, billigare och enklare att driftsätta än andra mätinstrument, till exempel optiska. Projektet har även bidragit till intern kunskapsutveckling kring analysmetoder kopplade till tidsserier och digitala signaler.

## Metod

Till följande underrubriker redogörs projektets två huvudsakliga metoddelar, den praktiska experimentdelen som går igenom hur tågmiljön simulerats och hur datainsamling gick till samt den analytiska delen om signalprocessering och vilka sorters processering som tillämpats.

## Experiment

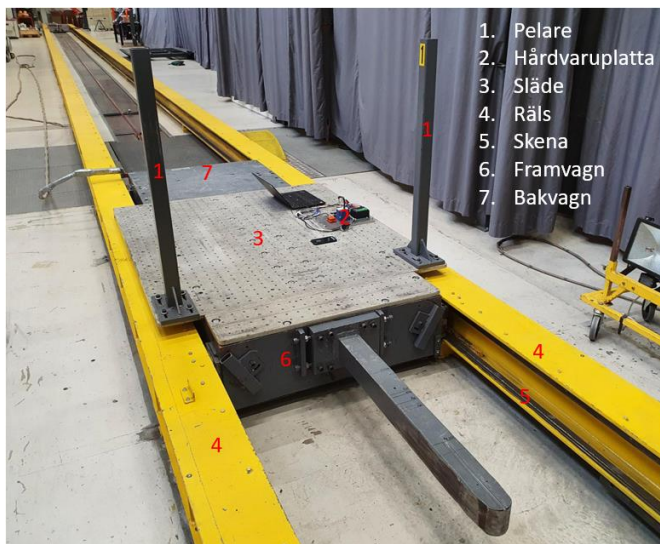
### Utförande

Experimentet gick ut på att föra släden på krockbanan (Figur 1) fram och tillbaka över två stycken sprickset, om tre sprickor vardera, och samtidigt logga accelerometerdata. Släden förflyttades utmed rälsen genom att två personer, en vid vardera pelare, accelererade upp släden till önskad hastighet. Släden körde över båda spricksetten i båda riktningarna. Släden framfördes i tre olika hastighetskategorier: snabb (ca 7-8 km/h), mellan (ca 3-5 km/h) och långsam (ca 1 km/h). För hastigheterna snabbt och mellan kördes totalt tio profiler vardera. En profil utgörs av:

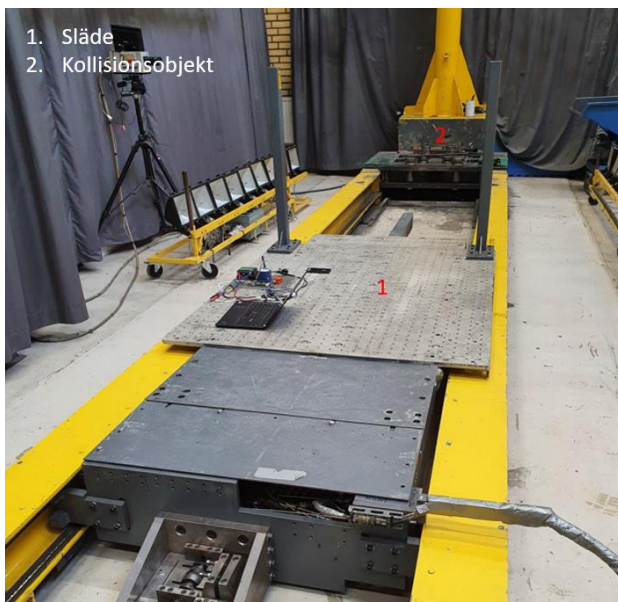
- Accelerera upp, konstant hastighet över båda spricksetten och därefter bromsas till stillastående.
- Därefter acceleration till samma hastighet som innan. Vid en markering innan spricksetten släpps släden så den rullar fritt (deacceleration) över spricksetten för att därefter bromsas till stillastående. Släden är tillbaka på sin startposition.

För hastighet långsam gjordes endast en profil där släden puttades ett antal gånger fram och tillbaka över spricksetten. För denna hastighetskategori gjordes inga mätningar där släden fick rulla fritt på grund av den låga hastigheten.

Vid slutet av dagen gjordes två rekyl-profiler. Släden accelererades upp till både snabbt och mellan-hastighet. Därefter släpptes släden och fick rulla fritt för att med en gång kollidera med kollisionsojektet (Figur 2). Efter kollisionen färdades vagnen i motsatt riktning på grund av rekyl.



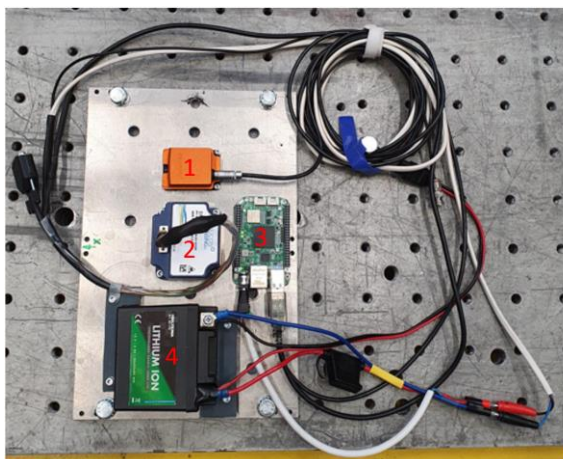
Figur 1 Krockbanan med, för projektet, relevant information markerad.



Figur 2 Släden och kollisionsojektet.

## Hårdvara

Hårdvara kopplad till datainsamling presenteras i Figur 3. Silicon Sensing DMU30-01 accelerometer har samplingfrekvensen 200 Hz. Xsens MTi-100 accelerometer har samplingfrekvensen 2 000 Hz. För enkelhetsskull kommer, i rapporten, IMUerna att refereras till som Xsens respektive DMU.



1. Xsens MTi-100 IMU
2. Silicon Sensing DMU30-01 IMU
3. Beaglebone-dator
4. Litiumbatteri

Figur 3 Hårdvaruplatta. Båda IMUer är orienterade med x-axeln åt samma håll (vänster i bild).

## Släde och hjul

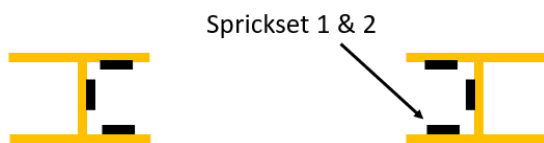
Släden står på totalt åtta stycken hjul, eller kullager (Figur 4). Två främre och två bakre hjulpar. Viss dämpning vid hjulen. Dock saknar projektet insikt i hur kraftig dämpningen är och hur slädens dynamik i sin helhet påverkar insamlad data. Slädens framdel förmodas vara något tyngre än bakkdelen. Detta antas genom visuell inspektion av släden och att ljudnivåmässigt upplevs högre nivåer när de främre hjulen kör över spricksetten än de bakre hjulen.



Figur 4 Slädens hjul (kullager) och dämpning.

## Sprickor

I Figur 5 visas en tematisk skiss av krockbanans räls i genomskärning. Rälsen består av två I-balkar med tre skenor i vardera balk, en skena i golvet, en i väggen och en i taket. Figuren visar i vilken skena som sprickor har frästs in i. Sprickor finns enbart på en sida är för att undvika att accelerometerdata potentiellt skulle varit svårtydd om sprickset funnits på båda sidor men inte varit helt i linje med varann.



Figur 5 Tematisk skiss av genomskärning av krockbanans räls.

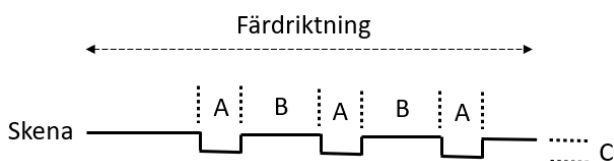
Konceptuell modell och dimensioner av sprickorna visas i Figur 6. Följande dimensioner för vardera set användes:

Sprickset 1 (Figur 7):

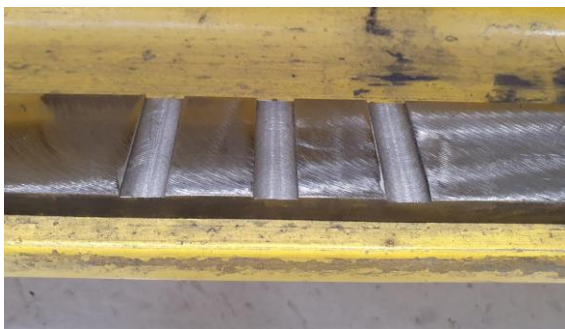
- $A = 11,9 \pm 0,1$  mm
- $B = 22,3 \pm 0,1$  mm
- $C = 1,3 \pm 0,1$  mm

Sprickset 2 (Figur 8):

- $A = 9,8 \pm 0,1$  mm
- $B = 26,3 \pm 0,6$  mm
- $C = 1,4 \pm 0,2$  mm



Figur 6 Konceptuell modell av sprickset 1 och 2.



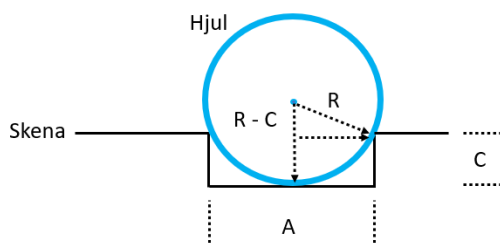
Figur 7 Fotografi av sprickset 1.



Figur 8 Fotografi av sprickset 2.

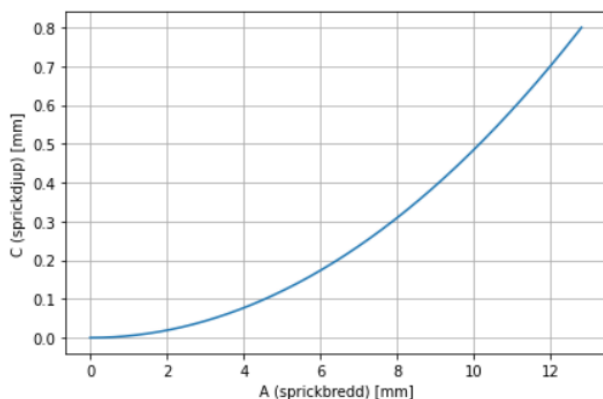
Sprickbredd (A) och sprickdjup (C) är beräknat med avseende på slädens hjuldimensionen. Minsta sprickdjup som behövs för en viss sprickbredd och hjul diameter utan att hjulet vidrör botten av sprickan fås av förhållandet (se även Figur 9):

$$A = 2\sqrt{R^2 - (R - C)^2}$$



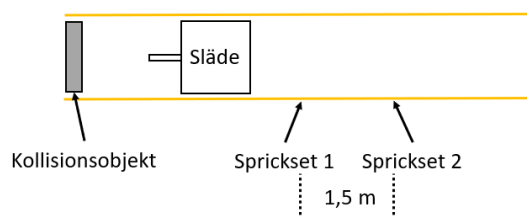
Figur 9 Parameterbeskrivning kopplat till beräkning av minsta sprickdjup. A är sprickbredd, C är sprickdjup och R är hjulets radie.

Hjulens radie var 26 mm vilket genererar grafen i Figur 10. I experimentet användes sprickbredd 10 och 12 mm vilket resulterar i att sprickdjup ska vara minst 0,5 respektive 0,7 mm för att hjulen inte ska vidröra sprickans botten och därmed utnyttjas också hela sprickans potential att orsaka så kraftigt utslag i IMUn som möjligt.



Figur 10 Förhållande mellan sprickdjup och sprickbredd för hjulradie 26 mm.

Spricksettens placering utmed rälsen visualiseras i Figur 11.



Figur 11 Spricksettens placering utmed rälsen.

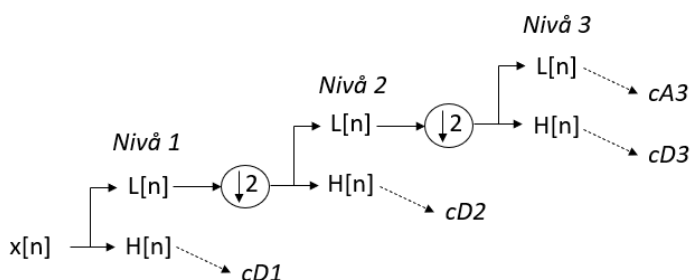
## Signalprocessering

### Waveletanalys

Tidsserierna som samlats in antas vara icke-stationära tidsserier vilket innebär att signalfrekvens varierar över tid. Därmed är diskreta wavelet-transformen (WT) lämplig för brusreducering. WT är, kort sammanfattat, faltning av insignalen  $x$  och impulsresponsen  $g$

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_k x[k]g[n - k]$$

$g$  utgörs av en filterbank, en serie högpäss- (H) och lågpäss-filtrer (L). För varje nivå  $n$  genomförs en H- och L-filtrering. Cut-off-frekvensen för respektive filter är halva bandbredden av insignalen. Därefter nedsamlas utsignalen med en faktor två. När en insignalen har faltats och nedsamlats har signalen genomgått en nivå av wavelet-transform. Figur 12 visar en schematisk bild av diskret wavelet transform i tre nivåer. Varje nivå genererar två serier koefficienter. Högpäss-filtrer genererar så kallade detaljerade koefficienter ( $cD$ ) medan lågpäss-filtrer genererar så kallad approximativa koefficienter ( $cA$ ). I nivå två och högre används  $cA$  från nivån innan som insignal.



Figur 12 Diskret wavelet transform med filterbank i tre nivåer.  $cD1$  står för detaljerade koefficienter i nivå ett medan  $cA3$  står för approximativa koefficienter i nivå tre.

Maximalt antal nivåer  $n_{max}$  en signal av längd  $N$  kan transformeras är

$$n_{max} = \log_2(N)$$

Valet av tröskelvärde har tydlig effekt på resultatet av brusreducering med WT. Ett för lågt tröskelvärde låter brus vara kvar medan ett för högt värde riskerar ta bort information. En metod att välja tröskelvärde  $\lambda$  är

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\text{median}(|cD_i|)}{0,6745}$$

där  $cD_i$  är wavelet-koefficienterna av nivå  $i$ , och vanligt är  $i = 1$ . Att bestämma vilka koefficienter  $c\hat{D}$  som slutligen används i inversa diskreta wavelet-transformen kan antingen göras genom hård avrundning

$$c\hat{D} = \begin{cases} cD & , |cD| \geq \lambda \\ 0 & , |cD| < \lambda \end{cases}$$

eller mjuk avrundning

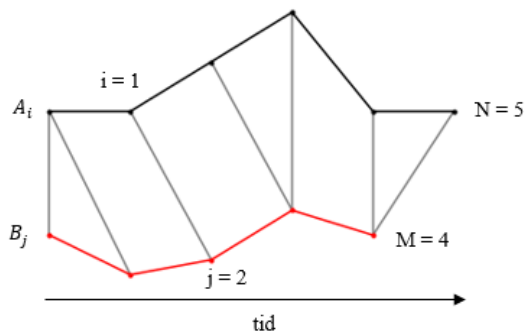
$$c\hat{D} = \begin{cases} \text{sign}(cD)(|cD| - \lambda) & , |cD| \geq \lambda \\ 0 & , |cD| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

Detta projekt har studerat resultatet av både hård och mjuk avrundning och valt att använda mjuk.

### Dynamic Time Warping

Under experimentet färdades släden fram och tillbaka över spricksetten. Syftet med det var bland annat att undersöka möjligheten att aggregera separata tidsserier. Resultatet av aggregeringen blir en sammansatt tidsserie där sanna anomalier är förstärkta (konstruktiv interferens) och ett försvagat signalbrus (destruktiv interferens). Dynamic time warping (DTW) undersöker samstämmigheten mellan två tidsserier. Tidsserierna kan vara ur synk med varandra (förskjutna i tid) och av olika punktdensitet. DTW söker den bästa matchningen mellan tidsserierna genom att beräkna minsta kostnaden att gå från en serie till den andra (Figur 13), eller den parvisa absoluta skillnaden mellan två invärden:

$$d(A_i, B_j) = |A_i - B_j|$$



Figur 13 Konceptuell beskrivning av DTW-analys mellan tidsserie A och B. Gråa traverser anger bästa match.

Algoritmen för DTW ser ut som följande:

Input	:	Signal $A_i$ ( $i = 0, \dots, N$ ) Signal $B_j$ ( $j = 0, \dots, M$ )
Output	:	Kostnadsmatrix $C \in \mathbb{R}^{(N+1) \times (M+1)}$
Steg 1	:	Påbörja kostnadsmatrixen $C_{0,0} = 0$ for $i$ in range(1, N+1): $C_{i,0} = \infty$ for $j$ in range(1, M+1): $C_{0,j} = \infty$
Steg 2	:	for $i$ in range(1, N+1): for $j$ in range(1, M+1): $C_{i,j} = d(A_i, B_j) + \min(C_{i-1,j-1}, C_{i-1,j}, C_{i,j-1})$

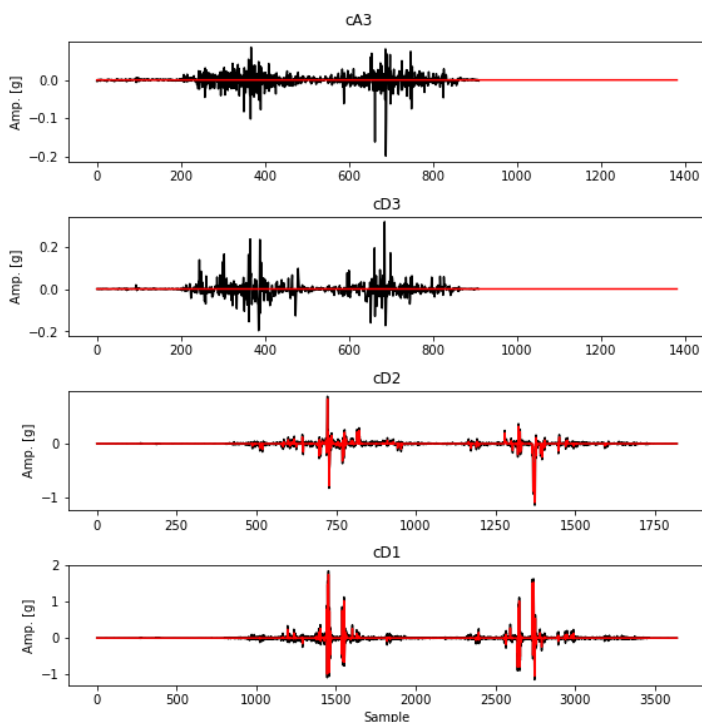
## Algoritmutveckling

Projektet har producerat en algoritm som utför brusreducering med wavelet-transformen och tidsseriematchning och aggregering med dynamic time warping. Algoritmen är skriven i Python 3 (Van Rossum, 2009) och förutom standardbiblioteken har Pandas (McKinney, 2010), NumPy (Harris, 2020), Matplotlib (Hunter, 2007), SciPy (Pauli Virtanen, 2020) och PyWavelets (Gregory R. Lee, 2019) används för att bygga algoritmen. Algoritmen är skriven generellt vilket möjliggör enkel implementering i framtida projekt och studier av andra tidsreor som inte nödvändigtvis är accelerometerdata.

## Resultat och diskussion

Insamlad accelerometerdata hade generellt låga brusnivåer, förmodligen på grund av att experimentet utfördes i laborationsmiljö. Även om wavelet-transformen bidrog till viss brusreduktion kan WT förmodligen visa på större effekt och bättre genomslag på data från riktig miljö, som kan förmodas vara brusigare.

I Figur 14 visas tre nivåer av wavelet-transform med en sorts wavelet vid namn Coiflet. Tröskelvärde är beräknat enligt ekvation (1) och mjuk avrundning enligt ekvation (2). Nivå 3 är helt dämpade med motiveringen att denna nivå bedöms innehålla mestadels högfrekvent brus. Viss respons över spricksetten men av relativt låga amplituder, lägre än  $\pm 0,1$  g. Slutligen genereras den brusreducerade tidsreor genom rekonstruktion med inversen av wavelet-transformen av de två icke-dämpade nivåerna (*cD1* och *cD2*).

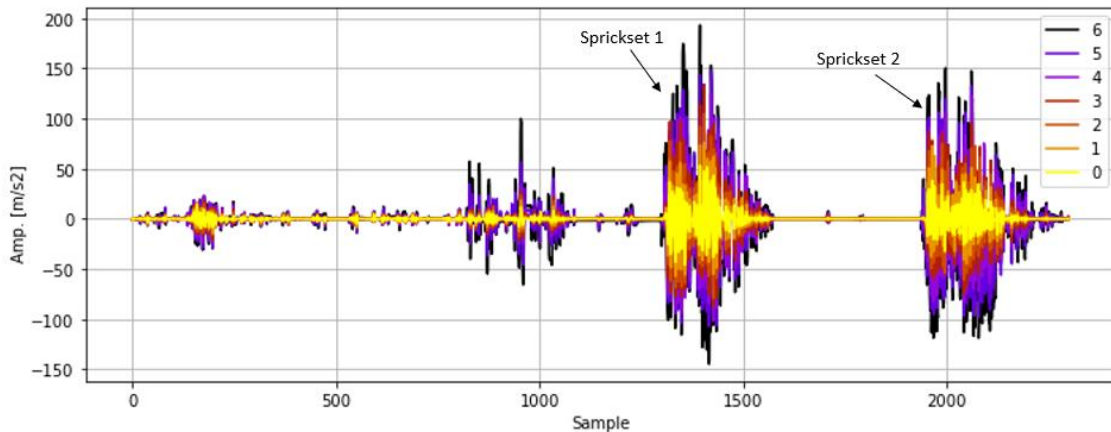


Figur 14 Brusreducering av tidsreor med wavelet-transformen i tre nivåer: *cD1*, *cD2*, *cD3* och *cA3*. Svart graf är rådata. Röd graf är filtrerad rådata. Tröskelvärde 0,054 g och mjuk reducering. Nivå 3 är helt dämpad.

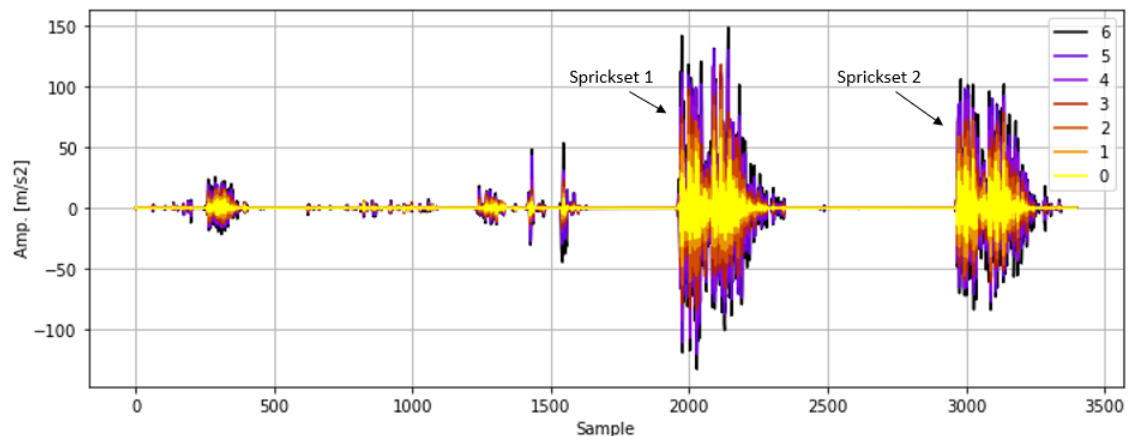
I Figur 15 och Figur 16 visas aggregering i sju respektive sju steg av brusreducerade tidsreor av vertikal acceleration insamlad med Xsens IMU. Tidsreorerna är trunkerade för reducerad processeringstid och visar slädens första passage över sprickset 1 och 2. I figuren syns två tydliga sektioner där accelerometern registrerat ojämnheter. Sektionerna är passager över

sprickset 1 och 2. Vad som även växer fram i takt med aggregeringen är två skarpa anomalier strax innan sprickset 1. Dessa är inte ojämnheter likt sprickset 1 och 2 utan är förmodligen mindre ojämnheter som fanns i rälsen sedan tidigare. Intressant är att innan någon aggregering gjorts är dessa anomalier svåra att urskilja.

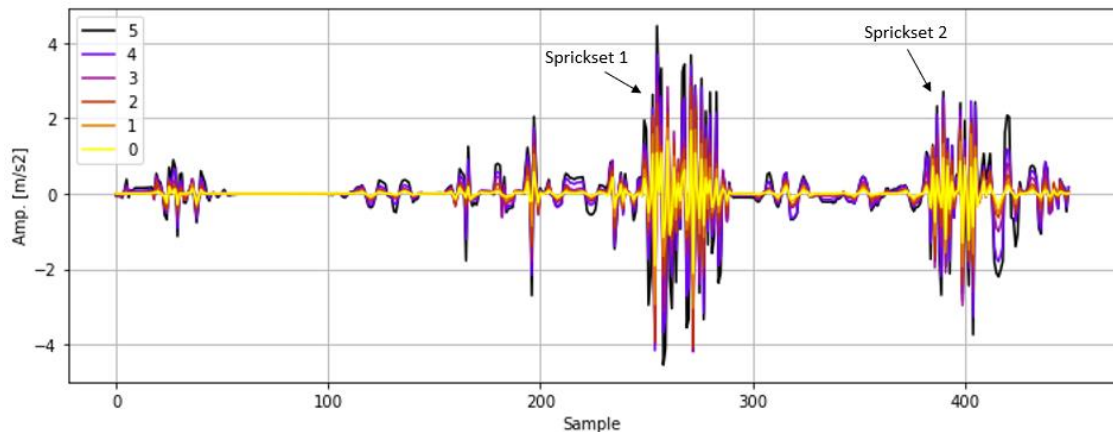
I Figur 17 och Figur 18 visas tidsserie-aggregering i sex respektive sju steg av tidsserier insamlat med DMU IMU. Tidsserierna är trunkerade. Skillnaden mellan figurerna är hastighetskategorin, snabb respektive mellan. I kategori snabb är brusnivåerna något högre, vilket är genomgående för alla individuella tidsserier inom kategorin.



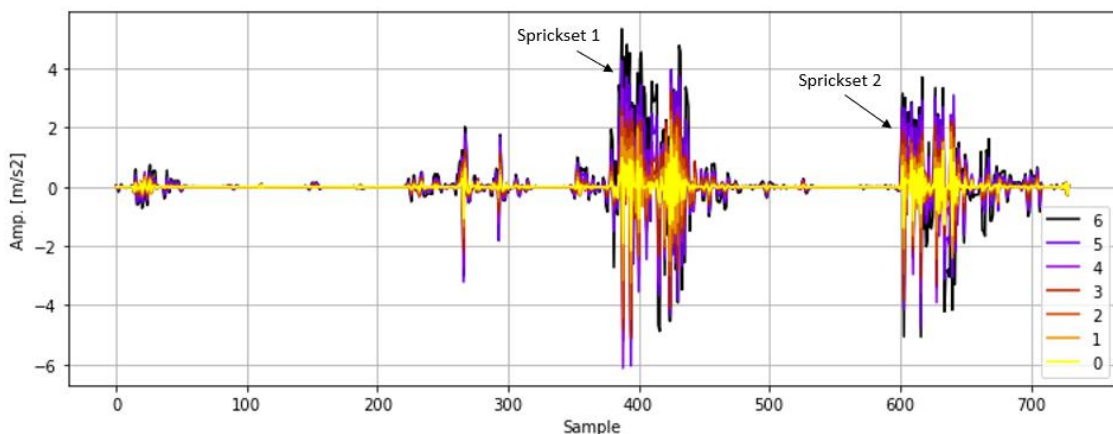
Figur 15 DTW-aggregerade tidsserier från Xsens i hastighetskategori snabb. 0 till 6 är antalet aggregationer.



Figur 16 DTW-aggregerade tidsserier från Xsens i hastighetskategori mellan. 0 till 6 är antalet aggregationer.



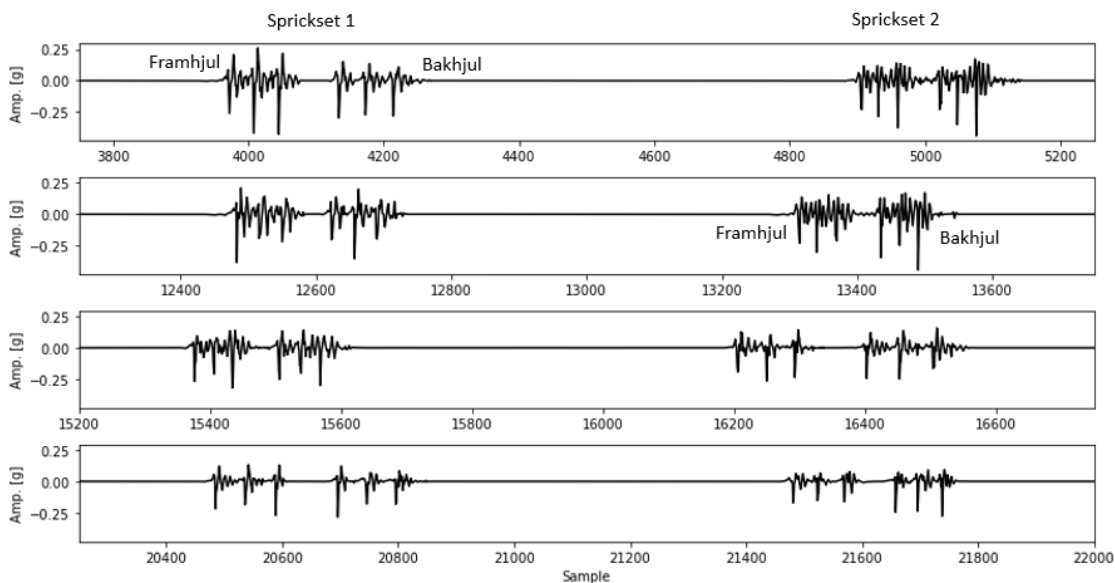
Figur 17 DTW-aggregerade tidsserier från DMU i hastighetskategori snabb. 0 till 5 är antalet aggregationer.



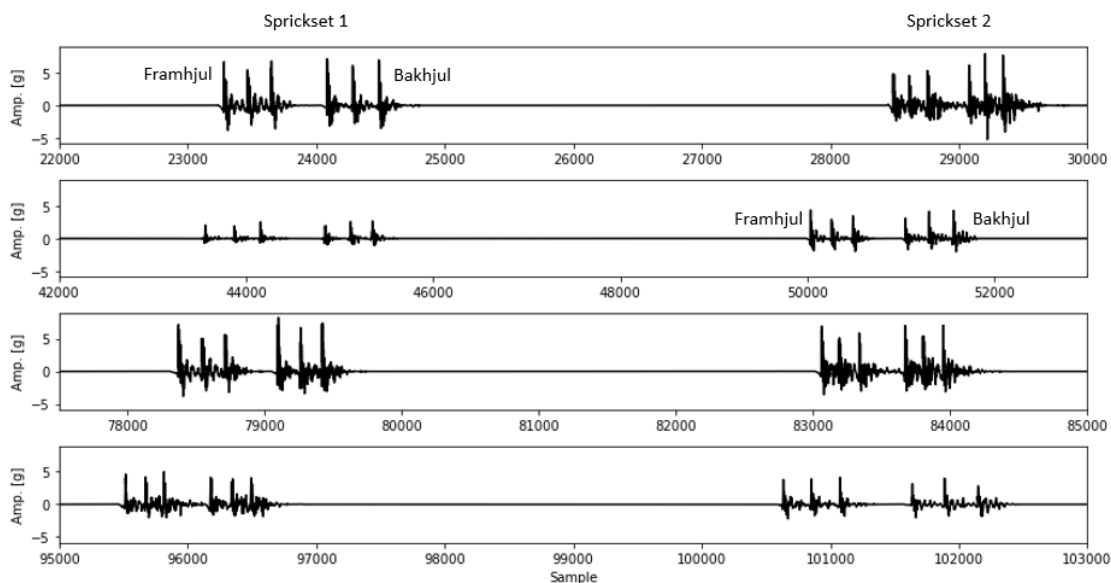
Figur 18 DTW-aggregerade tidsserier från DMU i hastighetskategori mellan. 0 till 6 är antalet aggregationer.

För ett bra resultat av DTW ska det inte förekomma tillfälliga lokala maxima eller minima, så som spikar, i någon eller några av de tidsserier som ämnas aggregeras. Effekten av ett tillfälligt lokalt maxima eller minima blir att den aggregerade tidsserien kan visa på falska anomalier. Därmed bedöms de-spiking och kross-korrelation av tidsserier (time lagged cross correlation (TLCC)) innan DTW medföra gott resultat. TLCC är besläktad med DTW, men en skillnad är att DTW genererar en output oavsett korrelation mellan inputs. TLCC bidrar i så fall till att först skifta en eller några tidsserier för bättre korrelationsfaktor.

Att identifiera individuella sprickor i varje sprickset var möjligt med både Xsens och DMU, men först när slädens framfart var långsam (Figur 19 och Figur 20). För övriga hastighetskategorier gick inte individuella sprickor att identifiera. Orsaken bedöms bero på kombinationen av samplingsfrekvens, sprickornas spatiala täthet och slädens hastighet. Däremot möjligt att särskilja mellan framhjulens och bakhjulens kontakt med spricksetten i alla tre hastighetskategorier.



Figur 19 Fyra passager över sprickset 1 och 2 med DMU i hastighetskategori långsam. Möjlighet att urskilja främre och bakre hjulparens passager samt identifiera individuella sprickor.



Figur 20 Fyra passager över sprickset 1 och 2 med Xsens i hastighetskategori långsam. Möjlighet att urskilja främre och bakre hjulparens passager samt identifiera individuella sprickor.

## Slutsats

Projektet har samlat in och analyserat accelerometerdata. Förutom RISE-intern kunskapsutveckling kring tidsserieanalys och accelerometerdata har även en algoritm byggts för brusreducering av icke-stationära tidsserier genom wavelet-transform och ett sätt att studera samstämmigheten mellan tidsserier samt aggregering av dessa genom dynamic time warping. Algoritmen torde lämpa sig bra för analys av data insamlad i reguljär tågtrafik och kan ses som det främsta resultatet av projektet.

## Framtidsstudier

Under projektets gång har några idéer till framtidsstudier växt fram. Det första är att montera en IMU på tåg i trafik och logga accelerometerdata. Tåg som kör fram och tillbaka mellan två stationer och således trafikerar samma sträcka vore idealt. Detta möjliggör studier om hur tidsserier skulle kunna aggregeras och hur, till synes små, anomalier eventuellt växer över tid. Aggregering kan testas att göras med summering, viktad summering eller annan metod. Det vore också intressant att undersöka och utvärdera effekten av att först kross-korrelera tidsserierna med TLCC innan analys med DTW.

Var på ett tåg en IMU lämpligast placeras är en annan potentiell framtidsstudie. Till exempel intill vagnskoppling eller på dämpad del av boggi. Testerna vid Gräfsnäs museijärnväg visade att om IMU placeras på odämpad del blir tidsserierna av sämre karaktär. Krafterna som genererades vid odämpat visade sig vara för kraftiga. Om IMU placeras i en tågupé kan det finnas en risk att ljud från till exempel fotsteg och rullande väskor registreras av accelerometern. Enkla tester av liknande genomfördes vid krockbanan. IMU reagerade då på stamp i golvet, hård handklapp och kraftig röst intill sensorn.

Att samla in data på riktig järnväg skulle också öka förståelsen för vilka brusnivåer som finns, visserligen för just det tåget och den sektionen räls. Här är valet av IMU även något att ta ställning till. Samplingsfrekvens, sensorns känslighet och tålighet, tågets hastighet och hjuldiameter är faktorer att ta i beaktande.

**RISE Research Institutes of Sweden AB**  
**Mätteknik - Dimension och position**

Utfört av

Erik Lindvall

## Referenser

- Gregory R. Lee, R. G. (2019). PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. *Journal of Open Source Software*, 4(36), 1237. doi:10.21105/joss.01237
- Harris, C. M. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. doi:10.1038/s41586-020-2649-2
- Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95. doi:10.1109/MCSE.2007.55
- McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. i S. v. Millman (Red.), *Proceedings of the 9th Python in Science Conference* (ss. 56-61). doi:10.25080/Majora-92bf1922-00a
- Pauli Virtanen, R. G. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. doi:10.1038/s41592-019-0686-2
- Van Rossum, G. o. (2009). *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.