ETH-Energieffektiva och Tillståndsövervakade Hydraulsystem

Slutrapport: Tillståndsövervakade Hydraulsystem, del II

Detta material är framtaget med stöd från *EU:s regionala strukturfondsprogram för stärkt konkurrenskraft och sysselsättning* och i samarbete med Länsstyrelsen Västernorrlands län, Örnsköldsviks kommun & Bosch Rexroth Mellansel AB.

SAMMANFATTNING

Arbetet som presenterats i denna rapport har genererat en mängd lärdomar om partikelräkning i synnerhet och oljeanalys för tillståndsövervakning i allmänhet. Det förefaller tydligast att sammanfatta slutsatserna i punktform.

- Det finns ett flertal oljeanalyser som genererar värdefull information om systemets tillstånd i förhållande till nötning.
    - FT-IR kan påvisa förbrukning av anti-wear tillsatser
    - ICP kan påvisa nötningsgrad. Vid svårare arbetsförhållanden genereras mer järnföroreningar.
    - ICP kan dessutom indikera förändrad nötningsgrad; en ökande nötningstakt visar då på annalkande haveri.
    - ICP har visat att små partiklar som skapas vid nötningen inte filteras bort utan fortsätter cirkulera i systemet.
    - ICP kan utvärderas med olika metoder av olika underleverantörer – vilket påverkar noggrannheten i analysen
    - En jämförelse mellan ICP och partikelräkning ger indikation på att mindre partikelstorlekar (< 4 µm) ger tidigare indikation på haveri.
    - Partikelräkning kan visa på förhöjd nötning, men utvärdering av flaskprover visar på flera problem såsom provtagningsosäkerhet och mätosäkerhet vid låga partikelnivåer.
- Partikelräkning online genererar en mängd värdefull information om systemets tillstånd på ett sätt som gör analysen tillgänglig omedelbart och kan därmed användas för snabba varningar och larm.
- Genom att identifiera kända systemtillstånd, och kända förändringar som systemet genomgår, kan förmågan att urskilja och identifiera okända tillstånd och tillståndsförändringar förbättras avsevärt. Detta visas i arbetet genom en förbättrad larmsituation då systemets körvariabler används för att identifierar förändrade körförhållanden och därigenom undertrycka larm baserade på de medföljande förändringarna i partikeldetektion.
- Multivariat analys är ett kraftfullt verktyg som kan tolka en mängd olika data och mätningstyper parallellt och därigenom identifiera avvikande tillstånd. Denna metod är kapabel att sortera in mätpunkter i grupper motsvarande olika körförhållanden och dessutom visa på trend närmare haveri.
- Databehandling och beräkning har utvecklats som kan
    - Följa och utvärdera onlinedata
    - Sätta larmgränser baserat på historisk data
    - Använda kördata för att filtrera partikeldata och därigenom förfina tolkningsmöjligheterna.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING 2

INNEHÅLL 3

1. INLEDNING 6

1.1. Tillståndsövervakning 6

1.2. Forskningsprojektet 6
1.2.1. Motivation 6
1.2.2. Mål 6
1.2.3. Deltagare 7
1.2.4. Teoretisk grund 7

2. METODER 8

2.1. Generellt 8

2.2. Oljeanalyser (Offline) 8
2.2.1. LNF – Laserbaserad partikelräkning 9
2.2.2. ICP – Grundämnesanalys 9
2.2.3. RULER – Tillsatsanalys 9
2.2.4. FT-IR – Spektrografisk Analys 11

2.3. Online Partikelräkning 12
2.3.1. Ljusoptisk partikelräkning 12
2.3.2. Operativt inflytande på mätning 12
2.3.3. Induktiv partikelräkning 12

2.4. Principen bakom Multivariat dataanalys 13

3. TESTER 14

3.1. Uppställningar 14
3.1.1. Lagertestrigg, del 2 14
3.1.2. Hydraulik 15
3.1.3. Montering 16
3.1.1. Lokal 16
3.1.2. Givare 17

3.2. Testomgångar 18
3.2.1. Test 1 18
3.2.2. Test 2 18
3.2.3. Test 3 18
3.2.4. Test 4 18
3.2.5. Test 5 18

4. RESULTAT, DEL 1 20

4.1. Partikelkurvor 20
4.1.1. Test 1 20
4.1.2. Test 2 21
4.1.3. Test 3 22
4.1.4. Test 4 23
4.1.5. Test 5 24

4.3. Utmärkande drag 25
4.3.1. Startup 25
4.3.2. Justering/förändring 25
4.3.3. Inför haveri 27
4.3.4. Sammanfattning 27

4.4. Inför signalbehandling 27

4.5. Resultat Oljeanalyser 29
4.5.1. LNF 29
4.5.2. RULER 30
4.5.3. ICP 31
4.5.4. FT-IR 32

4.6. Jämförelse offline/online 32
4.6.1. Online 33
4.6.2. Oljeprovtagare 33
4.6.3. Prov via mätuttag 33
4.6.4. Diskussion av jämförelsen 34
4.6.5. Slutsatser om jämförelsen 34

5. RESULTAT, DEL 2 36

5.1. Multivariat Analys 36

6. DISKUSSION 38

6.1. Antaganden och begränsningar 38

6.2. Diskussion av resultat 38
6.2.1. Testförhållanden och nötningstakt 38
6.2.2. Skillnad i online- och labbmätningar 38

6.3. Förslag på fortsatt arbete 38

7. SLUTSATSER 40

8. PUBLIKATIONER 41

9. REFERENSER 42

10. BILAGOR 44

10.1. ISO-klass tabell 44

10.2. Multivariat dataanalys av oljeprovsdata för ITH 45

10.3. CMU1000 – Utdrag ur manual gällande dataöverföring 70

10.4. Testrapport 1 77

10.5. Testrapport 2 97

10.6. Testrapport 3 112

10.7. Testrapport 4 132

10.8. Testrapport 5 154

1. INLEDNING

1.1. Tillståndsövervakning

Tillståndsövervakning, *Condition Monitoring*, är ett område under stark utveckling. *Tillståndsövervakning* innebär regelbunden mätning och utvärdering av ett systems nyckelvariabler på ett sätt som genererar värdefull information om tillståndet (hälsan, funktionen) hos komponenter och system.

1.2. Forskningsprojektet

Vid ITH drivs projektet *Energieffektiva och Tillståndsövervakade Hydraulsystem* (ETH) där Tillståndsövervakning utvärderas. Huvudaktiviteten är centrerad kring accelererade belastningstester av axiallager i en testrigg. På testriggen utförs kontinuerlig mätning av partikelnivåer med ljusblockerande partikelräknare, och data från denna utvärderas för att bedöma förändringar i lagerhälsa. Under arbetet med den första delen av projektet har en tolkningsalgoritm utvecklats som genererar larm baserat på trend i kumulativt sammanräknad föroreningsgrad enligt detektioner i partikelräknare, se [1] [2]. Det har visats att denna metod resulterat i tidigare detektion av annalkande haveri jämfört med indikation på magnetplugg.

1.2.1. Motivation

Genom tillståndsövervakning och aktiva underhållsstrategier kan man maximera livstiden hos komponenter och maskiner samtidigt som man minimerar, framförallt oförutsedda, kostnader förknippade med haverier. Rätt tillämpad tillståndsövervakning minimerar oplanerade stopp och maximerar på detta sätt produktivitet.

> *”För våra kompletta drivsystems fortsatta framgång på världsmarknaden är condition monitoring ett verktyg som måste införlivas för att vi ska kunna visa på att vi vet hur det kompletta drivsystemet mår och kunna beskriva dess kondition. Kan vi bestämma dess resterande livslängd, vilket under lättas efter att en skada detekterats, finns möjlighet att planera underhåll och minimera underhållskostnader. Detta är betydelsefullt eftersom processindustrier är ständigt på jakt att optimera och effektivisera sin verksamhet för bättre nyttjande och att erhålla större vinster.”*
>
> -Från ***Condition Monitoring hos Hägglunds Drives AB - Förstudie i projektet Condition Monitoring, Ulf Skytte af Sätra***

1.2.2. Mål

Forskningsarbetet inom ETH är fokuserat på mätning av partikelnivåer i hydraulolja som ett sätt att skaffa information om slitage i systemet. Systemet består av en modifierad Hägglunds-motor, rekonstruerad med ändamålet att testa sfäriska axiallager, samt ett antal givare där kärnan är en ljusoptisk partikelräknare. Genom kontinuerlig övervakning av partikelnivåerna i oljan är förväntningen att skadligt slitage skall kunna identifieras i ett tidigt stadium. Inom projektet är målet även att tolkningen av partikelnivåerna skall ske automatiskt och att automatiska varningar och åtgärder skall vara möjliga.

> *“Huvudmål: Att identifiera feltyper och bestämma vad som skall mätas I våra system för att på så tidigt stadium som möjligt kunna larma och om möjligt reglera för att minimera antalet felfall.*
> *Att finna sätt att överföra och analysera mätdata så att vi får ut tillräcklig information utan att detta skall förbruka stora arbetsinsatser.”*
>
> -Från ***Condition Monitoring hos Hägglunds Drives AB - Förstudie i projektet Condition Monitoring, Ulf Skytte af Sätra***

1.2.3. Deltagare

Tillståndsövervakning inom ETH utvärderas vid Stiftelsen ITH i samarbete med Bosch Rexroth Mellansel AB (BRMAB). Finansiering av projektet kommer i huvudsak från Europeiska Unionen via Tillväxtverket. Projektet bedrivs till viss del som ett forskarutbildningsprojekt i samarbete med Luleå Tekniska Universitet. Under projektets första del deltog även Hydac Fluidteknik AB.

1.2.4. Teoretisk grund

Den här rapporten ämnar inte ge någon omfattande teoretisk genomgång utan hänvisar till en exemplarisk beskrivning av problematiken runt lagernötning och tillståndsövervakning som står att finna i [3].

2. METODER

2.1. Generellt

Bedömning av systemhälsa genom regelbundet tagna oljeprover är en vedertagen metod för att övervaka hydraulsystem. Oljan som cirkulerar genom systemet bär på en mängd information i form av föroreningar och restprodukter, och även genom sina egna (förändrade) egenskaper.

Man kan se på ett hydraulsystem som fyra samverkande delar[1]:

- Mekaniska komponenter
- Hydraulvätskans basolja
- Hydraulvätskans tillsatser
- Föroreningar i systemet

För syftet att utföra tillståndsövervakning är alla dessa delar av intresse. Genom att mäta på och utvärdera de olika delarna var för sig kan man generera värdefull kunskap om systemets tillstånd som helhet. Exempelvis:

- Mekaniska komponenter kan utvärderas genom mätningar av vibrationer, akustiska emissioner, ljud och komponentfunktion/prestanda
- Basoljan och förändringar av denna kan bedömas genom viskositetsmätning, syratalsmätning och FT-IR
- Förändringar, eller framförallt förbrukning, av tillsatser i oljan kan bedömas genom mätningar med RULER, FT-IR eller grundämnesanalys
- Förekomst av och trender i föroreningar kan mätas med hjälp av ett flertal metoder beroende på vilken typ av förorening det gäller:
    - Vattenhalt utvärderas med s.k. Karl-Fisher titrering
    - Fasta föroreningar kan mätas med partikelräknare, LNF, gravimetrisk analys, filtrering och mikroskopi eller grundämnesanalys
    - Organiska föroreningar kan utvärderas med FT-IR

2.2. Oljeanalyser (Offline)

Parallellt med onlinemätningarna på systemet har oljeprover tagits för utvärdering med laboratorieutrustning. Det finns flera metoder tillgängliga för kvantitativ och kvalitativ analys av oljeföroreningar. Mängden partiklar i olja kan bestämmas genom filtrering, Ijusblockerande, eller gravimetriska metoder. Filtrering, och de mer avancerade Ijusblockerande metoderna, möjliggör även karakterisering av partiklarna genom deras storlek, form och utseende. Den vanligaste metoden när det gäller övervakning maskin tillstånd är ljusoptisk partikelräkning för att ge en kvantitativ utvärdering av föroreningar, oftast enligt standarder som ISO 4406: 1999. Regelbunden provtagning möjliggör följning och trendning av partikelföroreningar. Ljusblockerande partikelräknare använder en enkel princip där oljan passerar mellan en ljuskälla och en ljusdetektor. Partiklar i oljeströmmen medför skuggning av ljusdetektorn, vilket genererar en förändring i den elektriska signalen. Utifrån denna förändrings magnitud kan ett värde på partikelstorleken beräknas.

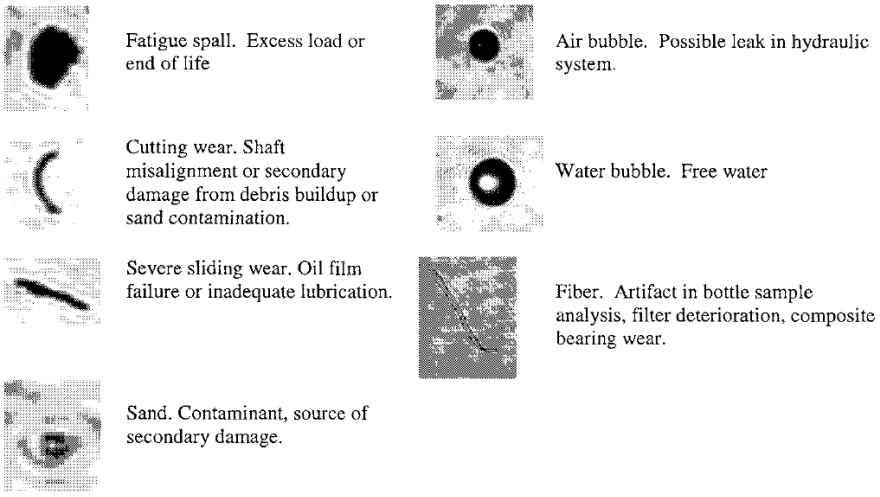
[1] Här bortser vi för enkelhets skull från kringliggande delar som elsystem, elektronik, etc som skulle kunna anses vara delar av systemet men som för denna diskussions skull är ovidkommande.

2.2.1. LNF – Laserbaserad partikelräkning

LNF-tekniken är en utveckling av ljusoptisk partikelräkning där ljuskällan är en LASER med dess karaktäristiskt parallella strålning. Genom att dessutom fånga upp ljuset, och därigenom skuggorna från partiklar i oljeprovet, med en CCD- sensor kan formen på partiklar registreras. Skuggbilderna jämförs med hjälp av ANN-teknik med en databas av olika typer av partiklar vilket resulterar i en automatisk klassificering av föroreningarna i provet. De grundläggande klasserna som rapporteras är:

- Utmattningsrelaterade partiklar
- Bearbetningsrelaterade partiklar
- Glidnötningsrelaterade partiklar
- Icke-metalliska partiklar
- Fibrer
- Vattenbubblor
- Luftbubblor

För en mer detaljerad genomgång av tekniken kan hänvisas till [4], [5] och [6].



Figur 1. Exempelbilder från LNF analys. Bilden är hämtad från [ref]

2.2.2. ICP – Grundämnesanalys

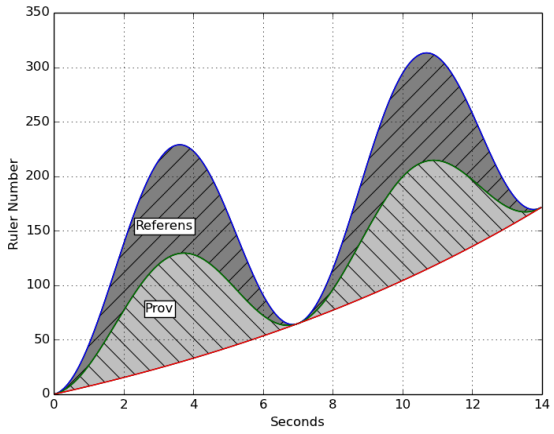
En metod för att utvärdera föroreningar i hydrauloljor är med grundämnesanalys. Med vissa variationer består metoden i att förånga ett oljeprov vid mycket höga temperaturer så att även fasta föroreningar förångas. Den resulterande gasen analyseras sedan genom spektroskopi för att bestämma grundämnessammansättningen av fasta föroreningar. Detta ger en mycket värdefull kvalitativ information, som kan användas för att härleda föroreningars ursprung, tillsammans med kvantitativa uppgifter om halten av föroreningarna.

2.2.3. RULER – Tillsatsanalys

RULER® mätningen bygger på att skapa en spänning mellan två elektroder i en kontrollerad elektrolyt. Genom att variera spänningen[2] och mäta oxidationen, genom en strömsignal vid den 3:e (mittersta) elektroden, kan karaktäristiska tillsatser identifieras i och med att oxiderande aktiviteter påverkar strömmen. Det är viktigt att notera att metoden på detta sätt kan anses förändra provet och repeterade

[2] 0-1.7 V rampas under 11 eller 17 sekunder

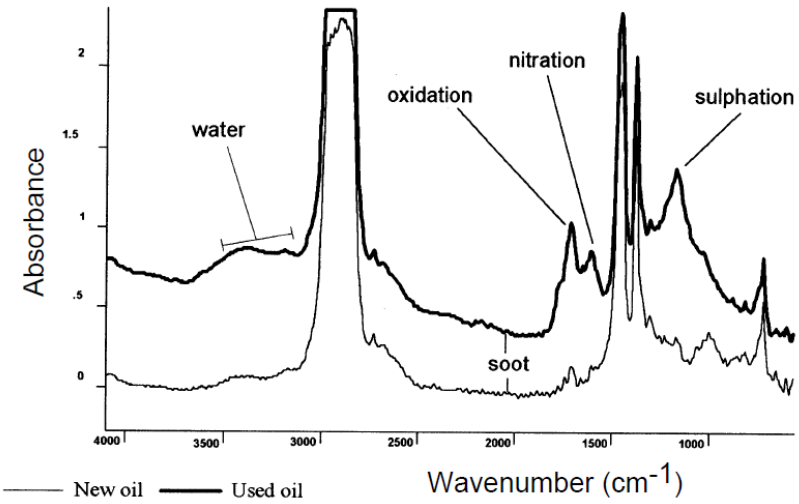
mätningar på samma prov innebär drift. Även restprodukter som fastnar på den mittersta elektroden medför drift. Detta har varit en av lärdomarna under det experimentella arbetet.



Figur 2. Idealiserat exempel för att illustrera analysmetoden. Mängden kvarstående aktiva antioxidanter bestäms som arean under topparna i mätkurvan. En referensolja representerar 100 % och förbrukad olja bedöms relativt referensen.

Under mätningen skapar den oxidativa aktiviteten en ökad anodström. Detta gör att man kan rita upp en kurva som visar toppar vid karaktäristiska spänningar (anges som tider i instrumentet). Genom att jämföra rena referenser, där innehållet antioxidanter definieras till 100 %, med använd olja kan man göra en bedömning av hur stor mängd aktiva antioxidanter som finns kvar i oljan. Mängden bestäms genom att helt enkelt jämföra arean under topparna i RULER-mätningen (se Figur 2). Tillverkaren anger vissa riktlinjer för tolkning. Dessa sammanfattas i tabell.

Den praktiska svårigheten i analysen kommer när man skall bedöma topparnas utbredning och placering. De experimentella resultaten visar i flera fall hur det kan vara svårt att identifiera de dalar mellan vilka topparnas area skall uppskattas. Detta försvåras ytterligare av att toppar i använda prov kan befinna sig med viss förskjutning jämfört med referensprovet. Generellt beror breddning och förskjutning av toppar på förändrat ledningsförmåga i det använda provet. Detta skall kompenseras genom att manuellt välja dalar runt **hela** toppen vid analys. I vissa fall kan förskjutning eller breddning av en topp bero på nybildning eller kontaminering av en oväntad och oxidativt aktiv förening [7]. I och med dessa svårigheter blir den experimentella noggrannheten svår att bedöma men ligger säkerligen över +/- 10 %.



Figur 3. FT-IR spectrum showing typical regions of interest for identifying specific degradation issues. From [8].

2.2.4. FT-IR – Spektrografisk Analys

Fourier Transform InfraRed Spectroscopy (FT-IR), är en kemisk analysmetod som mäter ljusabsorptionen i ett oljeprov över ett spektrum av våglängder. På detta sätt kan specifika organiska bindningar detekteras i oljeprovet och man kan analysera förekomsten av många organiska komponenter, både föroreningar och specifika molekylära strukturer i hydraulvätskans basolja. På så sätt kan den användas för att mäta förekomsten av tillsatser i oljan och för att identifiera typen av basolja. En kort men upplysande introduktion till FT-IR för slitageanalys ges av Robinson [8]. Genom att jämföra oljeprov med referensprov kan man analysera viktiga parametrar som beskriver nedbrytning eller förorening av den använda oljan. Upprepade mätningar kan användas för att visa på trender i maskinens tillstånd. Den typ av nedbrytning som kan hittas med hjälp av FT-IR är exempelvis oxidation, nitrering och svavling. Spädning av olja och vatten kontamination kan också detekteras med FT-IR. Långtids oxidation kan öka risken för korrosivt angrepp på maskinkomponenter och ändra vätskans viskositet och därmed arbetsförhållandena för maskinen. Nitrerings- och svavlingsprodukter är relaterade till uppbyggnaden av beläggningar (”varnish or lacquer”). Sulfater kan också orsaka allmän nedbrytning av oljan och öka konsumtionen av tillsatser.

Agoston [9] har beskrivit en möjlig metod för att skapa en onlinegivare, som utnyttjar styrkan i FT-IR instrumentet men begränsar mätningen till några viktiga våglängdsområden som möjliggör övervakning av oxidationstal:

> *"An indicator for the oil oxidation is the oxidation number, which is defined as the difference in absorbance between used and fresh oil at the wave number 1710cm^{-1} where the relative absorbance is referred to a baseline defined by the absorption values at 1970cm^{-1} and 580cm^{-1} according to the standard DIN method (DIN 51453: 2004–10)."*

Agoston drar slutsatsen att det är möjligt att konstruera en enkel IR-sensorutrustning för online- eller ronderingsbruk. Man visar sedan hur oxidationstal kan fastställas med rimlig korrelation till laboratorieresultat. Övervakning med FT-IR ger en indirekt indikation på slitage och resultaten kan visa på antingen 1) arbetsvillkor som leder till en ökad risk för slitage eller 2) konsumtion av tillsatser som är direkt relaterade till nötning (Anti-Wear tillsatser). Genom att övervaka sådana parametrar kan mycket värdefull information för förebyggande underhåll ges, så att serviceåtgärder kan utföras innan situationen har blivit svår.

2.3. Online Partikelräkning

Efter en inledande litteraturöversikt som visar på möjlighet att använda partikeldetektion för att indikera annalkande haveri ([10] [11] [12] [13]), och även med hänsyn till BRMABs erfarenhet på området valdes partikelräkning som övervakningsmetod i projektet Metoden har även viss analogi med en utbredd metod för systemövervakning, nämligen regelbunden inspektion av magnetisk indikator. Fördelarna med partikelräknare är att:

1) Den kan fjärrövervakas via modem eller internetanslutning
2) Den genererar kvantitativ data som kan samlas in, sparas och trendas
3) Med automatisk tolkning av data blir metoden operatörsoberoende

Dessutom tillkommer en avsevärt förbättrad detektionsnivå, då en ljusoptisk partikelräknare detekterar partikelföroreningar ner till 4 µm i storlek, en tiondel av vad det mänskliga i bästa fall klarar av. Slutligen medför fungerade elektronisk övervakning en responstid i storleksordningen minuter från det att fenomenet detekterats till dess att larm kan skickas ut.

2.3.1. Ljusoptisk partikelräkning

Online optiska partikelräknare, som fungerar enligt samma princip som offline-mätningen beskriven ovan, har fördelen av att kunna detektera mindre partiklar än räknarna som förlitar sig på ferromagnetisk interaktion (se nedan). De flesta typer rapporterar partikelföroreningar enligt ISO 4406:1999, det vill säga ner till 4 µm ekvivalent cirkulär diameter. Trade-off är att de bara kan analysera en liten vätskeflöde, typiskt <1 L/min.

När man överväger tillståndsövervakning med hjälp av optiska partikelräknare är det troligt att liknande metoder kan tillämpas som för induktiva partikelräknare, det vill säga att utnyttja liknande parametrar som *Cumulative Wear Mass* [10] [11] [12] [13] och *Total Debris Quantity / Effective Mass* [14]. Isaksson [15] föreslog en utvecklad version av detta synsätt där *Accumulated Mass*, *Accumulated No. of Particles* and *Accumulated Time Above Threshold* används som härledda parametrar från partikelräknardata. Efter slutsatsen att enkelt tröskelvärde för dessa parametrar inte gav en fungerande indikation om lagerskador behandlades data med hjälp av ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) som resulterade i tidig varning om skador. Genom att bearbeta alla parametrar på en gång förbättrades tidig varning och resulterade dessutom i särskild indikation om feltyp [15]. Ytterligare metoder har föreslagits där användning av ISO-klassificeringen i storleksintervall kan utnyttjas för att identifiera förändringar i genomsnittlig partikelstorlek. Större medelpartikelstorlek skulle vara indikativ för graden av förslitning [16].

2.3.2. Operativt inflytande på mätning

Det finns några återkommande uttalanden i litteraturen avseende effekten av förändringar i systemet på detektion av partikelräknare. I synnerhet är det förväntat att höga värde rapporteras vid start av systemet. Detta har noterats av vissa forskare [17] [18]. Verdegan fortsätter med att föreslå att detta kan delvis bero på minskad filtereffektivitet under flödesstötar som resulterar i spikar i föroreningsnivåer [18]. Andra faktorer som påverkar partikelräkningsresultat är vattenhalt, luft / gasbubblor och rubbning av partiklar i vila vid flödesförändringar [19]. De långa stabiliseringstider som noteras vid online mätningar har också tagits som en indikation på låg tillförlitlighet vid flaskprovtagning [20].

2.3.3. Induktiv partikelräkning

Mycket av det arbete som publicerats om partikelövervakning har utförts med hjälp av induktiva partikelräknare. Vätskeflödet riktas genom en serie av induktiva spolar som reagerar på partiklarna i väts-

kan. Denna typ av sensor ger ofta fullflödesanalys (in-line mätning) vilket är en viktig fördel. Det metoden begränsas av är storleken på partiklarna som sensorn kommer att registrera. Som framgår i flera av referenserna är storleksgränser >100 µm vanliga.

Utmärkt arbete har utförts av Dempsey et al. vid NASA Glenn Research Center. Deras fokus har varit på att upptäcka slitage och skador i helikopterväxellådor och de har visat att beräkning av *Cumulative Wear Mass* från induktiv partikelräknare och databehandling med *Fuzzy Logic* är en bra metod för att ge klassificering av slittillståndet [10] [11] [12] [13]. Partiklarna som utvärderades var av storlekar >100 µm. Slutsatsen var att partiklar, och den kumulativa massan av partiklar i synnerhet, var en bra indikator på att skada uppstår på växlarna. Dock var inte dessa värden framgångsrika i att avgöra hur omfattande skadorna var [13], och individuella tröskelvärden behövde bestämmas för varje test [11]. Efter en metodjämförelse drog man slutsatsen att partikelövervakning resulterade i mer tillförlitlig detektering än vibrationsanalys, då denna var känslig för drifteffekter och indikerade inte skadans framväxande [11]. Liknande tillvägagångssätt har använts vid utvärdering av lagerskador. En rapport menar att den *Total Debris Quantity* eller E*ffective Mass* var ett effektivt mått på graden av skador på lagren [14]. En annan rapport visar hur vibrationer och partikelräknarsignaler är båda effektiva sätt att uppnå tidig indikation på lagerslitage [21]. En nyare jämförande studie drog slutsatsen att nivån på >100 µm i partikelstorlek var otillräcklig för tidig indikation och att 5-15 µm intervallet var bättre lämpat för detta, baserat på resultat från off-line partikelanalys [22].

2.4. Principen bakom Multivariat dataanalys

Världen är en komplex plats där det i princip alltid är många olika faktorer, eller variabler, som styr. Detta oavsett om det rör sig om en kemisk process i en fabrik eller om vad som får en person att välja att göra något. Det är rätt naivt att tro att dessa processer kan mätas genom att bara mäta en faktor, undersöka denna för att sedan dra slutsatser om hur processen går. Dock, ibland fungerar detta men allt för ofta dras det slutsatser från mätningar där det som mätts inte har varit helt relevant. För att förstå vår omvärld behöver man mäta många faktorer, kanske tusentals faktorer eller fler, vid många tidpunkter och utifrån många olika aspekter. Det är multipla variabler som mäts på multipla prover och/eller vid multipla tidpunkter [23]. Denna sorts data, även kallad Big Data, innehåller mycket information och det krävs metoder som kan utvinna den information som är mest relevant för att beskriva det man vill mäta. Multivariat dataanalys (MVA) är ett samlingsnamn för en grupp av statistiska tekniker som kan analysera multipla variabler från multipla mätningar. MVA förknippas ofta med analyser av mycket stora mängder data där det krävs en stor beräkningskraft hos datorer för att ha möjligheten att utföra analyserna [24]. I traditionell statistisk utvärdering kan viktig information försvinna då datamängden är begränsad till endast ett fåtal variabler.

Det finns en mängd olika tekniker för multivariat datahantering och beroende på vilket problem som ska lösas så kan en lämplig teknik väljas.

3. TESTER

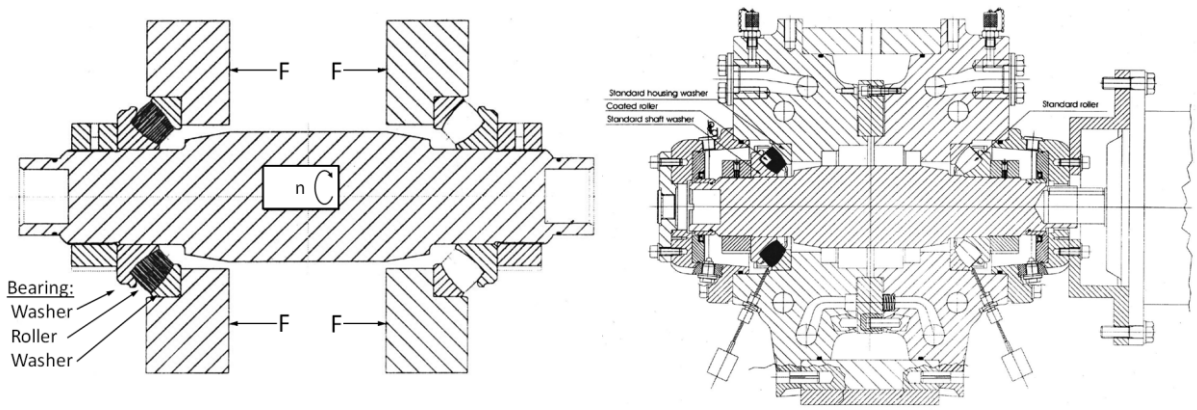
Projektets kärna har varit utförandet av en rad tester av förstörande typ där komponenter utsatts för belastning på ett sådant sätt att slitage och slutligen skador uppstått. Definitionen på skador skiljer mellan projektets två delar, del ett och del två. I del ett innebar komponentskada att pittingskador kunde identifieras inom kolvpartiet hos testriggen. I del två anses en skada ha uppkommit då antingen pitting är synlig på ytan hos testriggens axiallager eller då lagrets gods spruckit.

Genom att mäta kontinuerligt på systemen under dessa tester har ett underlag för signalbehandling byggts upp. Utifrån detta underlag har signalbehandlingsalgoritmer utvecklats vars uppgifter är att

1) förbehandla signalen
2) utföra relevanta beräkningar på signalen
3) anpassa larmnivåer utifrån signalens historik
4) generera larm baserat på avvikande signal

3.1. Uppställningar

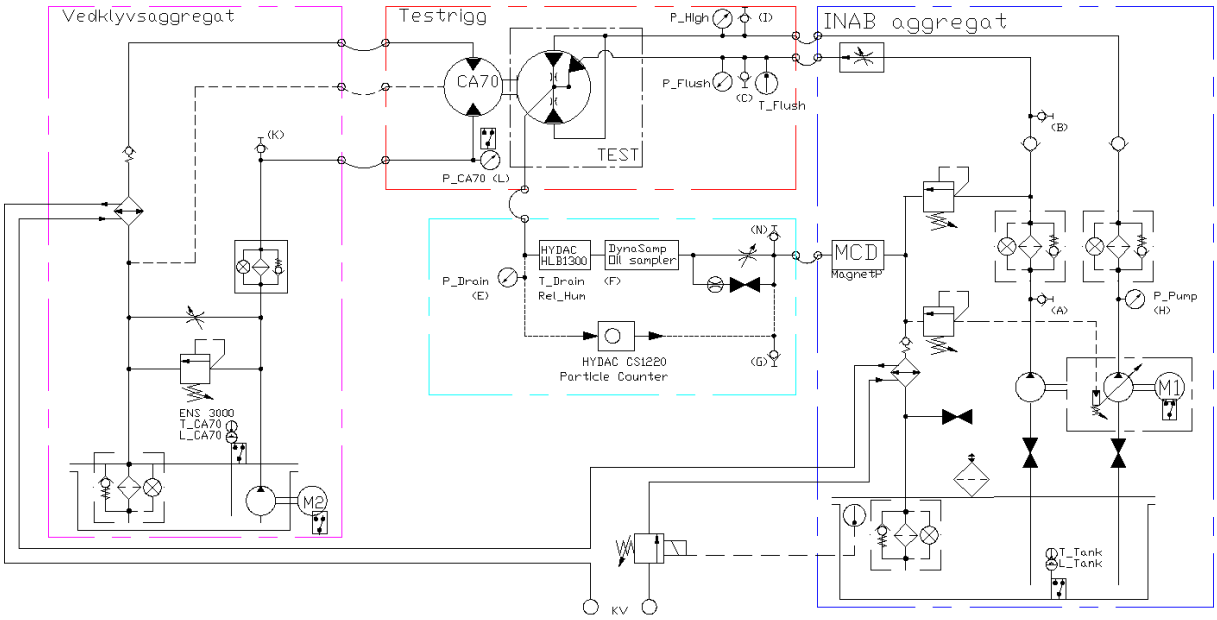
Under projektets två delar har två olika testuppställningar använts. Testuppställning för del ett var förlagd till BRMABs lokaler i Mellansel och bestod i en modifierad Viking-motor med rak kamring (statisk belastning på alla kolvpartier) och en extern motor monterad för rotationsrörelse. Genom belastning av kolvarna har accelererat slitage orsakats inuti kolpartierna. Mätutrustningen har monterats i uppställningens dräneringskrets och partikelnivåerna övervakats. Del ett omfattas inte av denna rapport och vidare beskrivning får sökas på annan plats, exempelvis i [1].



Figur 4: Principskiss (vänster) och sprängskiss (höger) av lagertestriggen. Kraften F byggs av hydrauliskt tryck och överförs till de sfäriska axiallagren.

3.1.1. Lagertestrigg, del 2

Det experimentella arbetet inom projektet har utförts på en lagertestrigg från Bosch Rexroth Mellansel AB. Lagertestriggen är konstruerad så att hydrauliskt tryck överförs till belastning (F) på två stycken sfäriska axiallager monterade på en roterande axel. Genom hög belastning och låg rotationshastighet uppnås ett accelererat nötningstest där lagrens livstid blir begränsad (<1000 timmar). Ritningar och illustrationer finns i bilaga. Testutrustningen beskrivs också utförligt i [25].



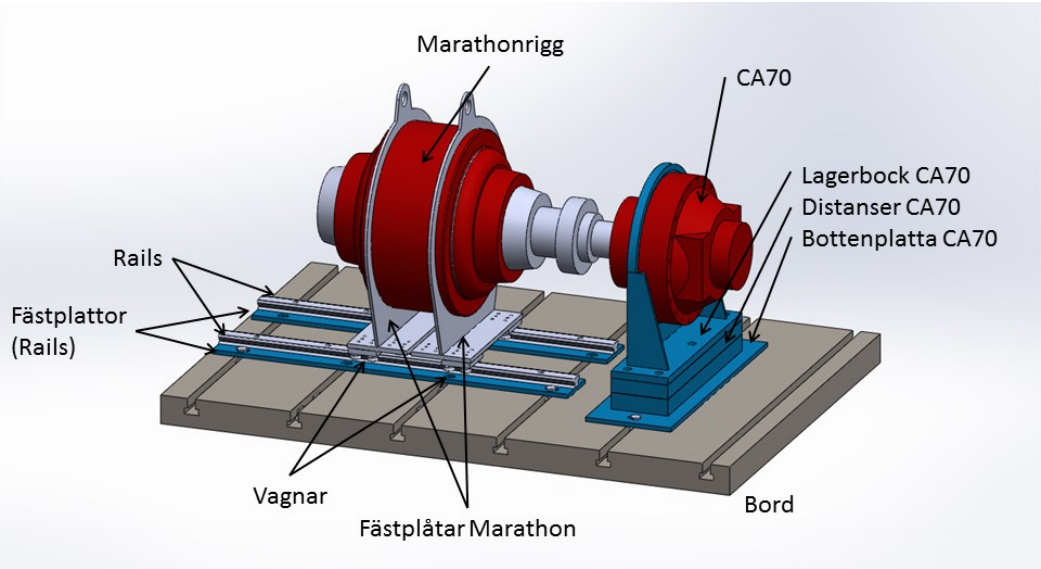
Figur 5: Hydraulschema över testrigg, INAB huvudaggregat, Vedklyvsaggregat och mätkrets. Not: sedan denna ritnings upprättande har en HYDAC RedFox oljerenare anslutits till tanken.

3.1.2. Hydraulik

Från ”INAB” hydraulaggregat tillför en hydraulisk krets högtryck till riggen medan en annan krets fungerar som spolningskrets för att uppnå kylning, smörjning samt för att garantera ett tillräckligt dräneringsflöde från riggen. Genom att placera partikelräknaren på ett biflöde till dräneringsflödet från riggen kan nötningsprodukter detekteras och på så sätt skapa grunden för tillståndsövervakning av nötningssituationen i testriggen. I dräneringskretsen finns även oljeprovtagare (FRAS DynaSamp), en magnetplugg (Hägglunds Early Warning Kit) och en HYDAC givare för fukt och konduktivitet (HLB 1300).

Ett separat hydraulaggregat (”Vedklyvsaggregat”) driver en Hägglunds CA70-40 som driver den roterande axeln.

Aggregaten kyls av en gemensam kylvattenkrets som regleras av temperaturen i dräneringskretsen. Båda aggregaten har 10 µm tryck- och returfilter.



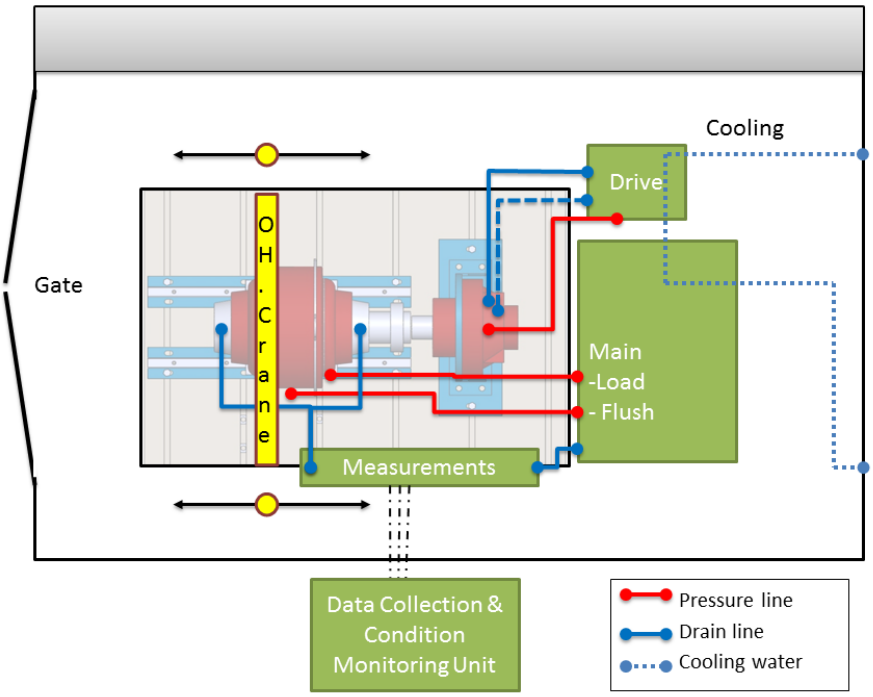
Figur 6: Testriggen. Kompletterande delar i blått.

3.1.3. Montering

Huvuddelen av testutrustningen beskriven ovan har tillhandahållits av BRMAB. Detta inkluderar huvudaggregatet, testriggen, drivmotor CA 70-40, vagnar och skenor samt provbordet som utrustningen monterats på. Inför montering vid ITH krävdes kompletterande delar för infästning i bordet och montering av utrustningen. Thordab tillverkade delar enligt ritning från BRMAB (lagerbock CA 70-40) och enligt nya ritningar för fästplattor och förhöjningsblock.

3.1.1. Lokal

En testcell har iordningställts för projektet. Syftet med en dedikerad lokal är att kontrollera testmiljön samt att begränsa oljud i omgivande lokaler. En schematisk skiss visas i Figur 7. Väggarna är ljudisolerade.

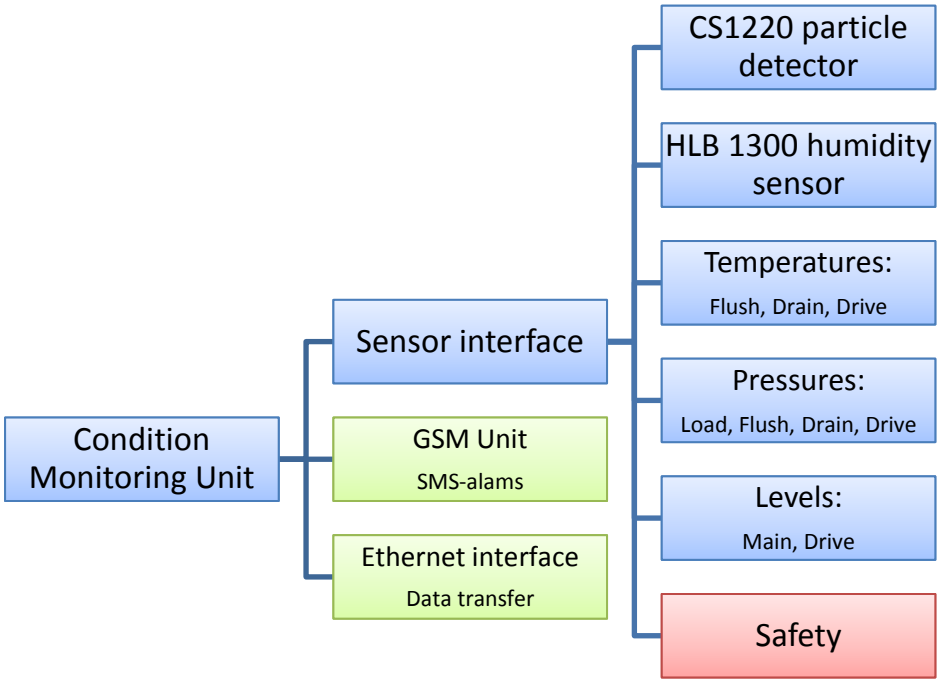


Figur 7: Skiss över lokalens utformning.

3.1.2. Givare

Systemet för övervakning är uppbyggt runt en ljusoptisk partikelräknare (Typ: HYDAC CS1220) och en övervakningsenhet för datainsamling, övervakning och larm/nödstopp (Typ: HYDAC CMU1000). En oljekonditionsgivare mäter oljans relativa fuktighet och konduktivitet i dräneringskretsen (Typ: HYDAC HLB1300).

Övervakning av samtliga parametrar sker genom att CMU samlar in data var 10:e sekund och sparar data lokalt. Dessa data överförs sedan till PC för analys och utveckling av larmalgoritmer, filtrering etc. Ett antal interna larm- och brytnivåer har programmerats för systemsäkerhet, dvs brytning vid max-temperaturer, maxtryck, låg oljenivå etc. Larm av denna typ genererar ett meddelande som skickas via GSM-modemet som SMS till projektansvarig.



Figur 8. Översiktsdiagram för CMU (Condition Monitoring Unit)

3.2. Testomgångar

Testomgångarna finns rapporterade i detalj, se bilagor 10.4 - 10.8. Här ges endast en kort sammanfattning.

3.2.1. Test 1

Test 1 utfördes under kvasi-konstanta belastningsförhållanden i fråga om belastningstryck (350 bar) på lager och rotationshastighet. Två stycken lager utan ytbeläggning monterades i riggen. I och med att det var det första provet och riggen fortfarande utvecklades var inte arbetsbelastningen kontinuerlig utan innebar ett signifikant antal stopp/start samt en förändring i rotationshastighet från 9 till 6 rpm vid 350 h. Vid ca 400 hs arbetstid detekterades en tydligt ökande trend och vid 500 h gjordes ett avbrott i testet för att inspektera lagerytorna. Kraftig ytnötning kunde konstateras men fullt utvecklad pitting återfanns inte. Testet återupptogs och avbröts därefter vid ca 600 h för att gå vidare med nästa lagerpar.

3.2.2. Test 2

Test 2 utfördes under statisk belastning med två stycken axiallager med ytbeläggning. Ytbeläggningen gör att lagren livslängd ökar betydligt med avseende på utmattningsskador och testet avbröts efter ca 780 h (ingen pitting konstaterades) för att byta ut ett av lagren till ett obelagt lager och därmed nå snabbare resultat.

3.2.3. Test 3

Test 3 utfördes med ett obelagt lager och ett lager med ytbeläggning. Arbetscykeln under test 3 innehöll en period med hög belastning (350 bar) och en med lägre belastning (200 bar) samt ett stopp/start per dygn (vardag). Rotationshastigheten hölls konstant genom testet, vid 9 rpm. Resultaten visar tydligt hur yttre förändringar på systemet, både justering av belastning (minskad likaväl som ökad) och stopp/start, orsakar tillfälligt höjda nivåer i detekterad partikeltäthet i hydraulvätskan. Haveriförloppet för prov 3 var snabbt och föregicks inte av någon tydlig period av ökad partikeltäthet i hydraulvätskan. Vid demontering kunde det konstateras att pittingskador uppstått på (det obelagda) lagrets inre ring. Ringen har därefter spruckit. Närmare utvärdering av signalen från partikelräknaren visade två mindre toppar, perioder av ökad föroreningsgrad, under de 48 hna som föregick haveriet. Själva haveriet innebar en tvärt ökad partikelnivå följt av en plötslig blockering av rotationsaxeln.

3.2.4. Test 4

Test 4 utfördes med ett obelagt lager och ett. lager med ytbeläggning (samma som i test 2 och 3). Arbetscykeln under test 4 innehöll en period med sänkt belastning per dygn, dock inget stopp/start. Testet utfördes vid lägre rotationshastighet (6 rpm) samt med en lägre maxbelastning (300 bar jämfört med 350 bar i föregående tester). Resultaten visar på ökade partikelnivåer mer än 48 h innan haveri. Liksom i prov 3 innebar det slutgiltiga haveriet att lagrets inre ring sprack efter att pittingskador utvecklats.

3.2.5. Test 5

Test 5 pågår fortfarande och har därmed nått den längsta testtiden hittills (1300 h). Provet utför under konstant belastningstryck (300 bar) men med växlande varvtal [9.4 rpm / 4.5 rpm / 2.2 rpm]. Resultaten visar återigen tydligt hur förändring i arbetsläge innebär förändrade nötningsvillkor. Framförallt ökar partikelnivåerna vid det lägsta varvtalet. En gradvis ökning av partikelnivåerna har dessutom pågått sedan 1000 h, något som indikerar att nötningen övergått i ett intensivare stadium. Redan tidigt under prov 5, efter 100 hs testtid, skedde en tillfällig (ca 100 h) intensifiering av nötningen som sedan avtog. Eftersom det skedde så tidigt i förhållande till tidigare tester så är hypotesen att det kan vara en

indikation på att det belagda lagret gått in i pitting-stadiet. Detta lager hade vid det tillfället belastats under drygt 2000 h (prov 2-5).

4. RESULTAT, DEL 1

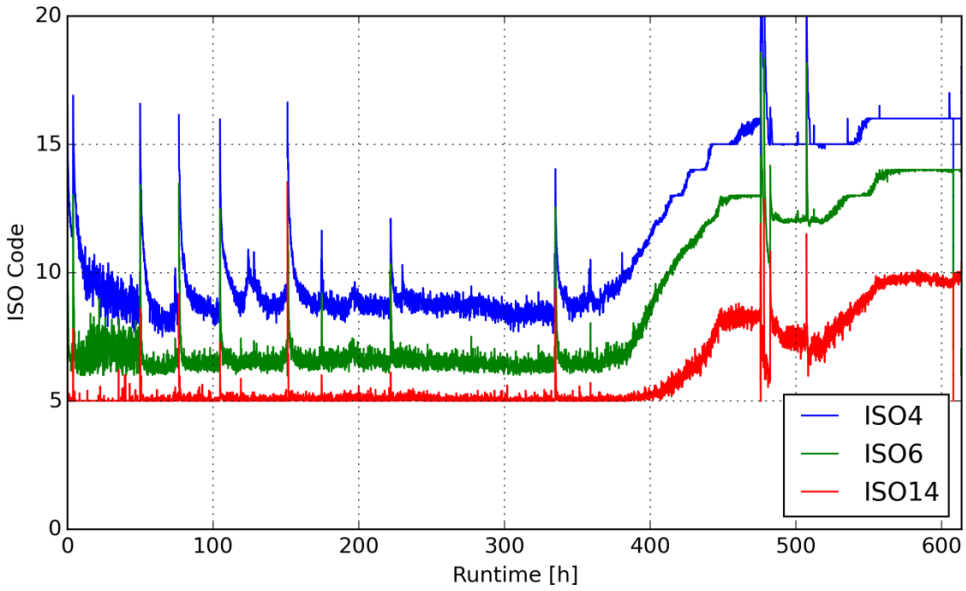
4.1. Partikelkurvor

Under denna rubrik visas ISO-kodsdata för de fem genomförda testen.

4.1.1. Test 1

Test 1 visar karaktäristiska stabiliseringstoppar vid uppstart (se Figur 9, exempelvis t=0 h , 60 h, 80 h, 105 h…). Nivåerna precis efter start kan ligga så mycket som 10 klasser över basnivån. Notera att de högsta nivåerna inte syns pga. att data i figurerna är 5 min medelvärden. Nivåerna sjunker därpå relativt snabbt till en basnivå; 1-3 h för större partikelklasser och upp till 10 h för den minsta partikelklassen som omfattar alla partiklar större än 4µm. Dessutom kan tre justeringstoppar identifieras vid 110 h då varvtalet sänktes från 9 RPM till 6 RPM, och vid 180 h samt 230 h då spolflödet justerades. Man kan dessutom härleda de små korta topparna (exempelvis vid 235 h, 370 h och 385 h) till oljeprovtagning.

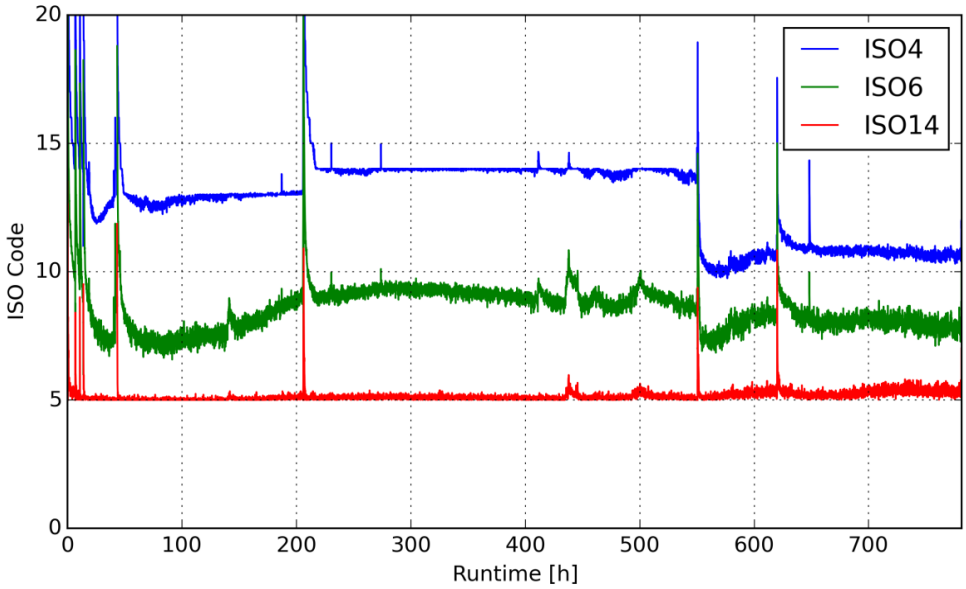
Nästa viktiga observation är en gradvis ökning i detekterade nivåer strax innan 400 h. Denna ökning motsvarar den förväntade exponentiella ökningen i partikelnivåer som indikerar att nötningen övergår i en okontrollerad fas och att haveri är nära. Analys av lagren vid demontering visade tydlig ytnötning men ingen utvecklad pitting. Vid slutgiltig demontering efter 670 h kunde en spricka i lagergods konstateras.



Figur 9. Partikelnivåer (ISO-kod) under Test 1. Runtime är tid i timmar.

4.1.2. Test 2

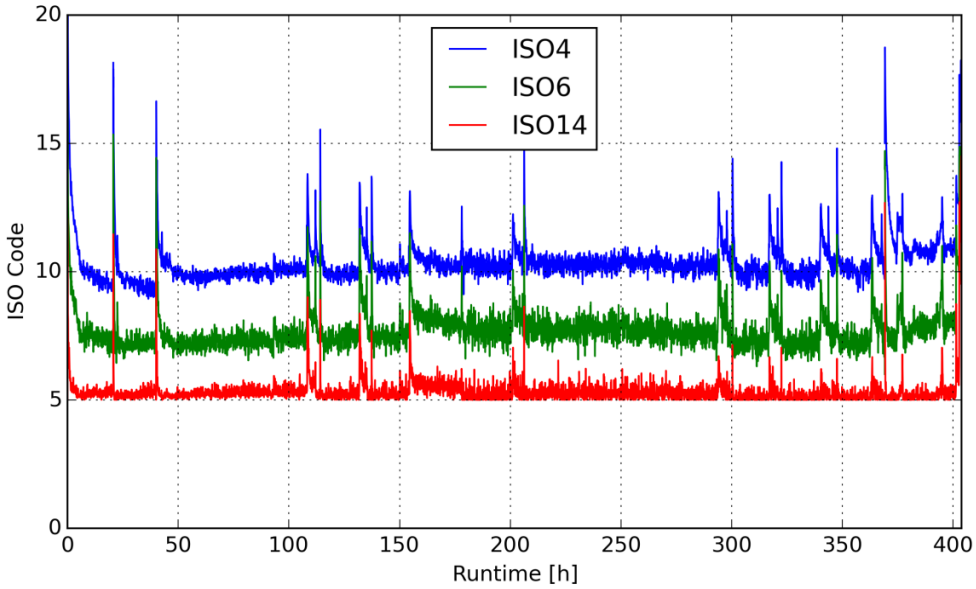
Test 2 har uteslutits ur analysarbetet pga. att båda lagren som monterats hade ytbeläggning, vilket avsevärt förbättrar motståndskraften mot just utmattningsskador. Insamlad data från testet visas i Figur 10. Trenden för testet visar på en gradvis ökning av partiklar under de första 300 h. Detta hänger eventuellt samman med kvarvarande smuts från Test 1. Filter indikerar vid 213 h och byts först vid 570 h. Testet avbröts vid 800 h. De installerade lagren, med härdad ytbeläggning, resulterar som väntat i högre motstånd mot utmattningsskador och är därmed ej lämpade för accelererade tester.



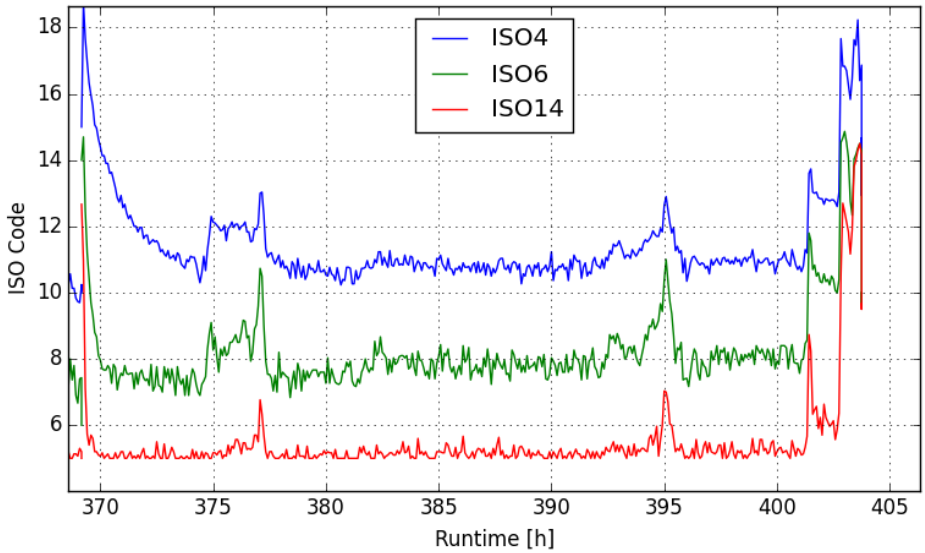
Figur 10. Partikelnivåer (ISO-kod) under Test 2. Runtime är tid i timmar.

4.1.3. Test 3

Med undantag för de förväntade topparna vid justering av belastning och stopp/start har partikelnivåerna under testets gång i princip visat sig stabila, se Figur 11. En viss ökning anas efter 390 h. Toppen vid 369 h motsvarar en typisk systemstart med en hög topp som följs av relativt hastigt minskande nivåer. Värt att notera är skillnaden mellan partikelstorlekarna där små partiklar avtar långsammast. I figuren kan ytterligare två stycken toppar urskiljas, vid 375 h och 393 h. Dessa toppars betydelse är ej känd, men kan ev. vara tidiga varningar på annalkande haveri. Under testets sista 4 h svarar partikelnivåerna med tvära ökningar, som speglas av tvära bromsningar i rotationen (Figur 12).



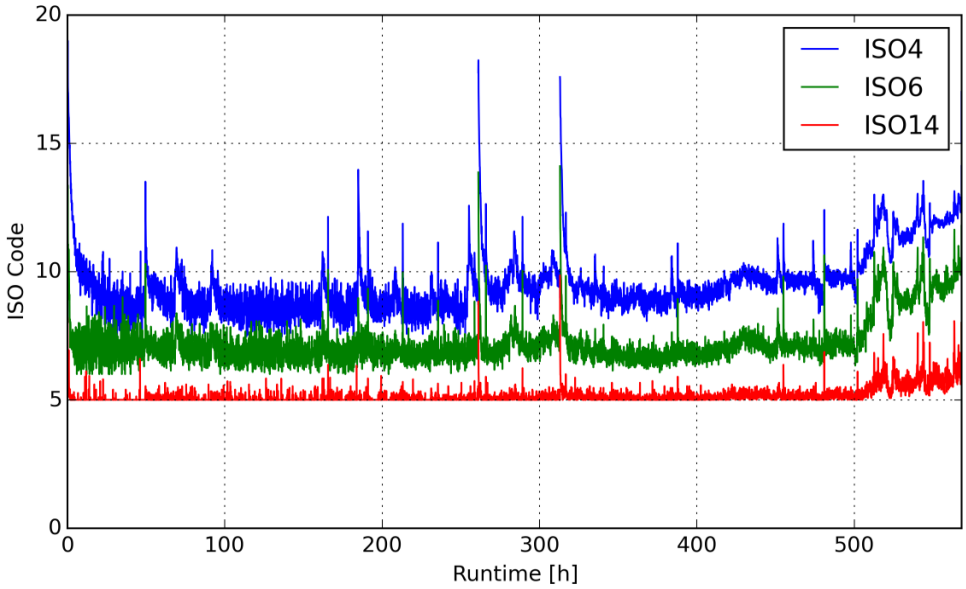
Figur 11. Partikelnivåer (ISO-kod) under Test 3. Runtime är tid i timmar.



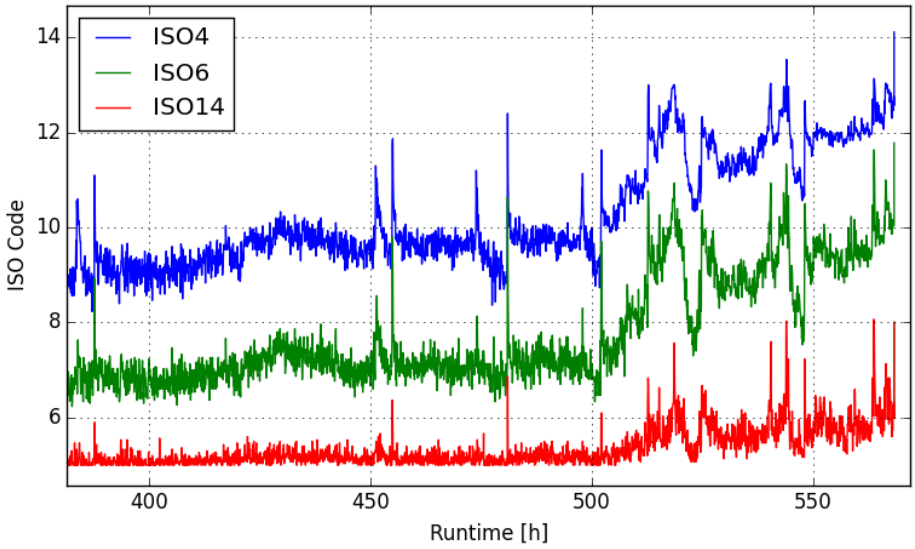
Figur 12. Sista 48 h av test 3 visar två perioder av ökade nivåer (vid 390 h och 408 h) samt den trappliknande stegringen i slutet.

4.1.4. Test 4

Med undantag för de förväntade topparna vid justering av belastning och stopp/start har partikelnivåerna under testets gång i princip visat sig stabila fram till 420 h, se Figur 13. Runt 450 h finns en oförklarad, bred, topp i föroreningsgrad. Efter 520 h är de ökade nivåerna tydliga ända fram till haveriet vid 585 h. I Figur 14 visas en tydligare bild av partikeltrenderna närmare haveriet. Vid 290 och 310 h har kortare perioder av ökade nivåer identifierats.



Figur 13. Partiklenivåer (ISO-kod) under Test 4 . Runtime är tid i timmar.



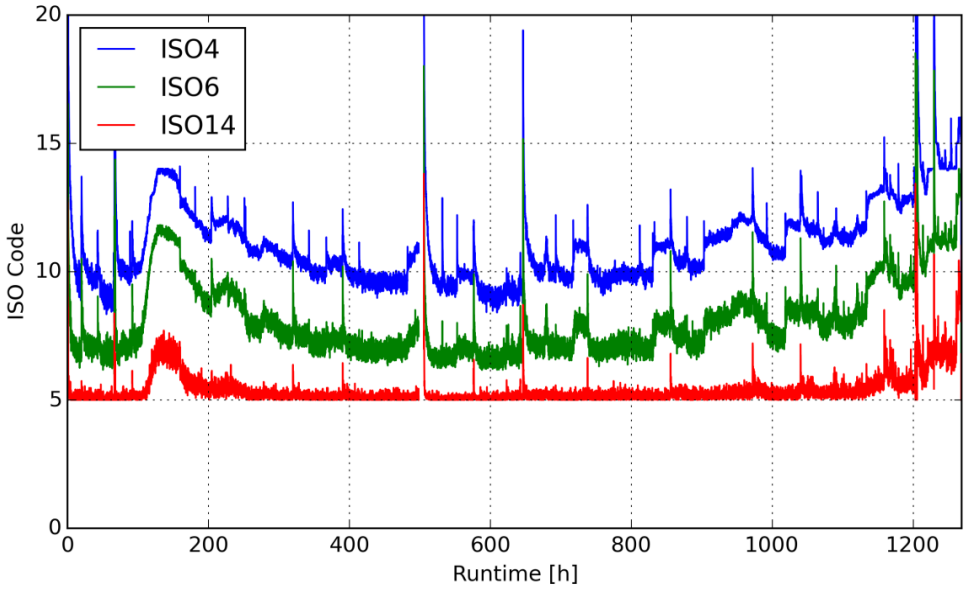
Figur 14. Testets sista 200 timmar.

4.1.5. Test 5

Resultat från partikelräknare visas i Figur 15. Det finns några framstående karaktärsdrag. Man kan se kraftigt förhöjda nivåer redan vid 150 h. En ”puckel” visar sig som ser ut precis som förväntad pittingskada; en hastig och kraftig ökning i detektion (lösgörande av material vid pittingskadan och spridning av partiklar) följt av en långsamt avklingande detektion.

Generellt motsvaras lägst varvtal (2.1 RPM) av högre partikelnivåer i oljan, medan 9 RPM och 4.5 RPM ligger på ungefär samma nivå. Det finns dock undantag, då en sänkning av varvtal från 9 RPM till 4.5 RPM resulterat i lägre partikelnivåer.

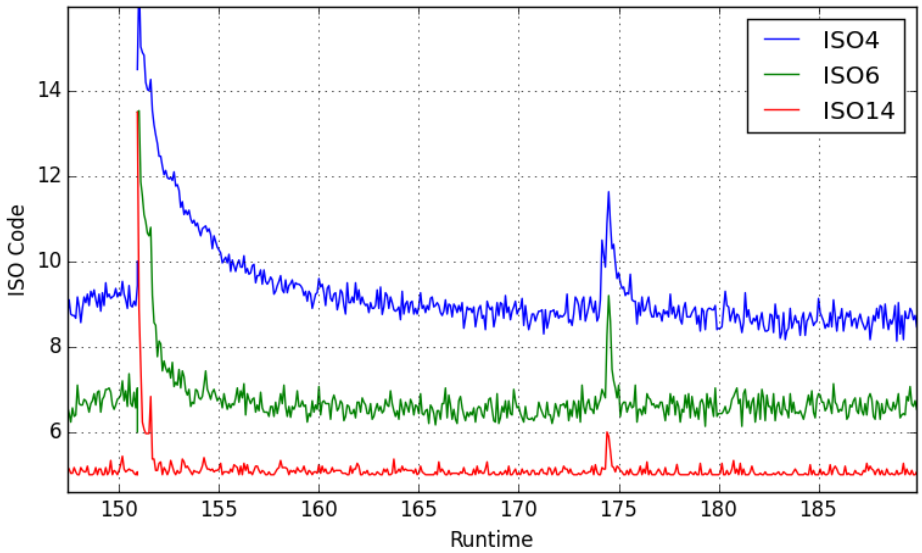
Redan vid ca 850 h kan man uppskatta att nivåerna börjar gradvis öka. Strax före 1200 h verkar nötningen gå in i ett nytt stadium, där högre nivåer noteras även från ’14 µm’–klassen. Testet avbröts vid 1300 h för inspektion och då kunde kraftig pitting konstateras samt sprickor i godset för det obehandlade lagret (se 10.8). Även det ytbehandlade lagret uppvisade tydliga pittingskador (se 10.8).



Figur 15. Partikelnivåer (ISO-kod) under Test 5. Runtime är tid i timmar.

4.3. Utmärkande drag

Lärdomarna från partikeltrenderna under testen är många. Det är påfallande hur olika resultaten ser ut från test till test. Detta kan attribueras delvis till att testförhållandena har varierats och att alla test därmed är unika. Det kan dessutom bero delvis på grundproblemet med accelererade utmattningstester; nämligen att komponenterna i sig kan bete sig på olika sätt under haveriförloppet. Här summeras de mest utmärkande dragen i partikelkurvorna i olika skeden av testen.



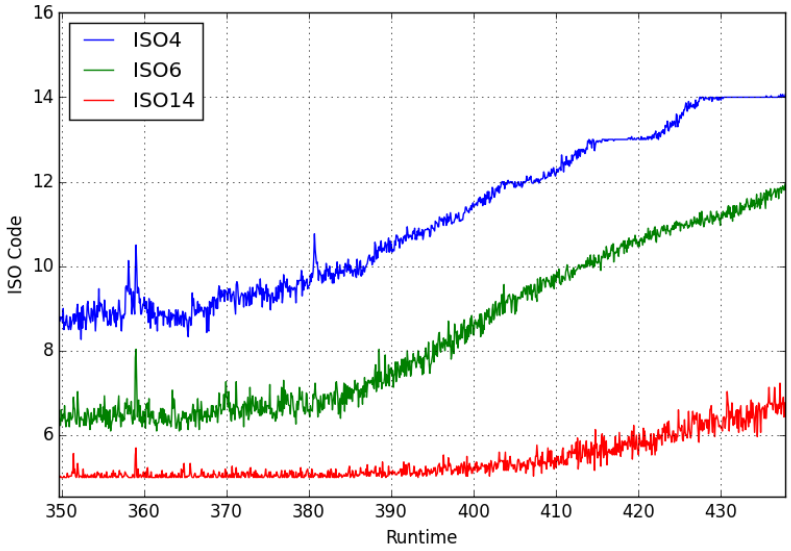
Figur 16. Typisk uppstartstopp vid 151 h visar på stabiliseringstider i storleksordningen 2 h för 14 µm och 4-8 h för 6 µm/4 µm. Vid 174 h en justeringstopp (justerat flöde i spolkrets) som visar liknande resultat men med lägre topp och snabbare stabilisering. Runtime är tid i timmar.

4.3.1. Startup

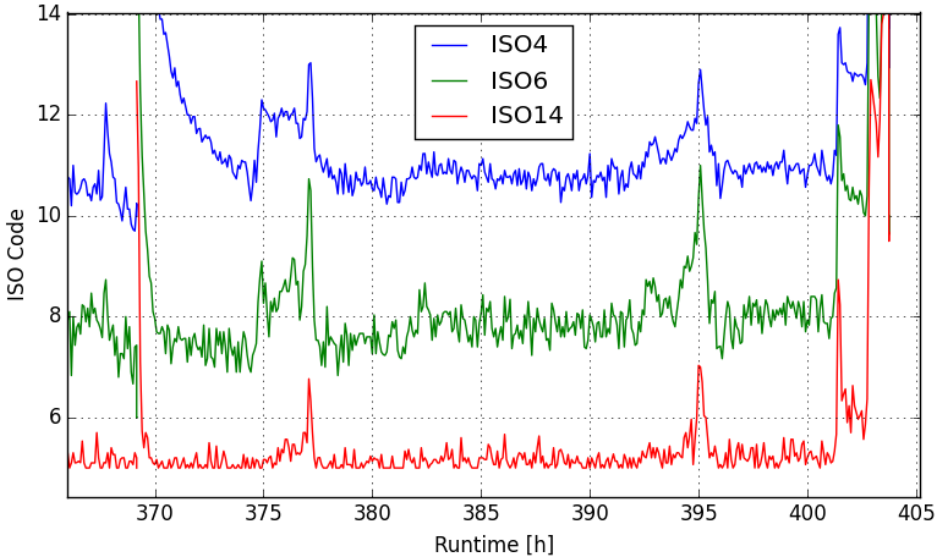
Uppstart av systemet resulterar konsekvent i att partikeldetektorn rapporterar mycket högre nivåer, se Figur 16. De högsta värdena klingar snabbt av, men full stabilisering av signalen kan dröja i storleksordningen 10 h. Detta behöver man ta hänsyn till då partikelsignalen skall utvärderas för att påvisa signifikanta förändringar. Om höga nivåer räknas med i bedömningen av normaltillståndet kan larmresponsen på förhöjda nivåer senareläggas vilket leder till senare, eller helt uteblivna, varningar.

4.3.2. Justering/förändring

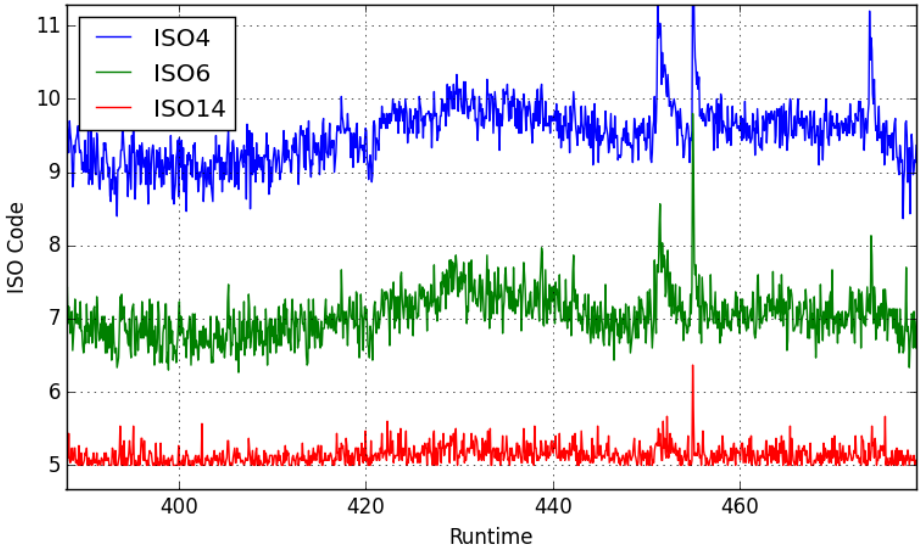
Justeringar av arbetsförhållanden och systemegenskaper ger i många fall liknande effekter som en uppstart. I Figur 16 kan man se effekten av en justering i flödet genom spolkretsen vid 174 h. En topp med förhöjda värden genereras som klingar av inom 2-3 h. Utseendet liknar det vid uppstart men är av en mindre magnitud; lägre maxvärde och snabbare stabilisering.



Figur 17. Långsamt accelererande partikeldetektion (Test 1) är det förväntade beteendet vid utmattningsskador. Runtime är tid i timmar.



Figur 18. Oförklarad kortare ökning under Test 3 som visar sig under 2-3 h vid 375 h och 393 h. Tolkas som relevant varning om kommande haveri.



Figur 19. Oförklarad ökning under Test 4 som visar sig under 30-40 h från 410 h. Tolkas som relevant varning om kommande haveri. Runtime är tid i timmar.

4.3.3. Inför haveri

Potentiella haveriindikatorer visas i Figur 17 - Figur 18. Den förväntade indikationen är en mjukt ökande partikelnivå av exponentiell karaktär, som exemplifieras av resultaten från Test 1. Utöver detta har det noterats oförklarade, mjuka, ökningar i partikelnivåer från Test 3 (kort period, se Figur 18) och Test 4 (längre period, se Figur 19). Dessa ”kullar” har tolkats som indikationer på kommande haveri och därigenom klassats som ”indikation för haveri” när larmalgoritmen utvärderats (se, **Fel! Hittar inte eferenskälla.**).

4.3.4. Sammanfattning

Vissa partikeldetektioner är nära sammanlänkade med ändrade arbetsförhållanden. Därför är det av stort värde att kunna mäta och/eller logga förändringar på systemet som kommer att ge utslag i partikeltrenden. Detta för att underlätta pålitlig tolkning av partikeltrenderna. Se vidare nedan (lägre andel falsklarm då förändringar tas hänsyn till).

4.4. Inför signalbehandling

Utifrån de ovan visade effekterna på partikeldetektion har följande insikter om signalbehandling uppkommit:

- Uppstartsfenometet uppvisar plötslig ökning till höga nivåer och en långsam stabilisering. För att kunna utvärdera ”normal” nivå bör både topp och stabiliseringsperioden bortses ifrån.
- Justeringar, ändringar och provtagning kan orsaka liknande, plötsliga ökningar i detektion med en stabiliseringsperiod. Dessa behöver också tas hänsyn till.
- Olika arbetsförhållanden kan ha olika ”normal” nivå, se Test 3, 4 och 5. Tolkning av data och skapande av larmnivåer kan eventuellt förbättras om data kan delas upp i olika klasser beroende på arbetsförhållanden.
- Haverier och skador har föranletts av olika effekter på partikeldetektionskurvan. Dels det förväntade, långsamt accelererade nivån partiklar. Dels en något otydligare effekt av långsamt ökande nivåer som blandas upp med toppar och nivåförändringar orsakade av ändrade arbetspunkter. Och dels kortare (Test 3) och längre (Test 4) perioder av kontinuerligt förhöjda nivåer

(”kullar”). Själva haveriförloppet har också uppmätts med partikelräknaren som tvär ökning av partikelnivåer uppdelad i trappliknande steg (”Test 3”).

Inför signalbehandling har detta formulerats som några rekommendationer/önskemål:

- Identifikation eller digital loggning av systemförändringar såsom uppstart, justeringar, ändrade belastningsförhållanden och provtagning är viktigt för att kunna göra bedömning av partikeldata.
- Filtrering av data vid uppstart
- Filtrering av data vid justering/förändring/provtagning
- Separat behandling av data från olika belastningsklasser för ökad noggrannhet i beräkning av larmnivåer
- **Larmsystemet måste vara kapabelt att varna för mer komplexa händelser än det förväntade accelererande förloppet. Endast ett av haverierna uppvisade detta beteende.**

4.5. Resultat Oljeanalyser

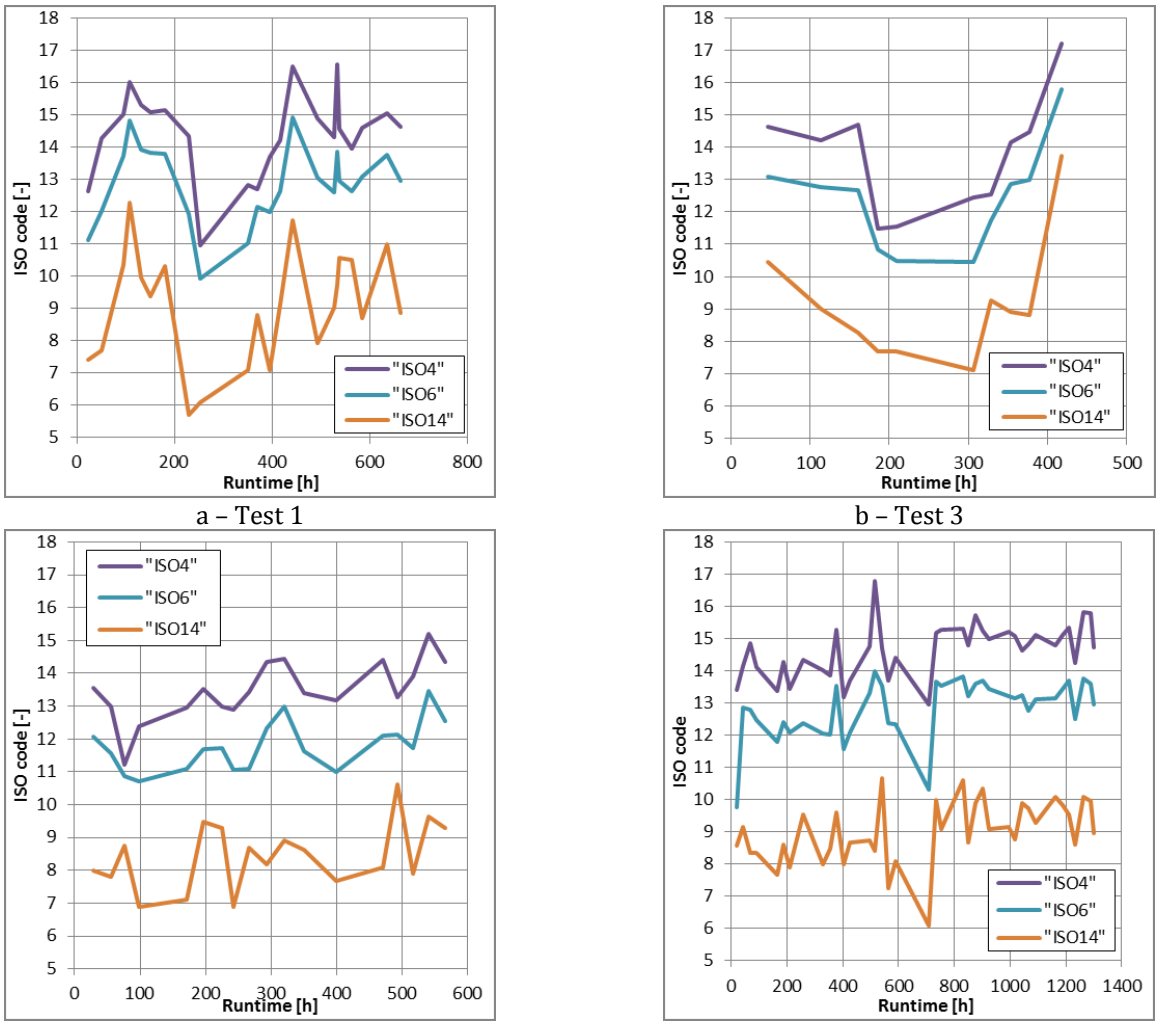
4.5.1. LNF

Resultat från partikelräkning med LNF-räknare på flaskprover visas i Figur 20. Under Test 1 förelåg vissa oklarheter gällande användandet av oljeprovtagaren (DynaSamp), samt hårdvaruproblem med densamma. Detta misstänks ha bidragit till den kraftiga variationen i partikelnivåer från prover tagna under Test 1 (a).

Baserat på resultaten kan man göra vissa iakttagelser

- Spridningen i resultaten är stor, dvs från prov till prov. En skillnad i 2 klasser är inte ovanligt mellan två prover. Denna skillnad kan vara både ökande och minskande.
- Test 3, som från onlineräkning inte uppvisar någon tydlig trend över längre tid, framstår som det enda testet där en tydlig trend går att urskilja, i form av en konsekvent stigning från 300 h.
- Test 4 och 5 visar en svag ökande trend genom hela testet.

Den höga spridningen tillsammans med den låga frekvensen i mätningarna är flaskprovernas största motargument. För att belägga en trend krävs konsekvent ökande partikelnivåer under flera provtagningstillfällen. Endast långsamma förlopp kan fångas upp.



Figur 20. Resultat från partikelräkning på flaskprover under Test 1 (a), Test 3 (b), Test 4 (c) och Test 5 (d). Den höga variationen under Test 1 (a) antas bero på problem med provtagare.

4.5.2. RULER

Olja från testriggen som används i tillståndsövervakningsprojektet har analyserats, se Tabell 1. Dessa oljor har endast analyserats med grön elektrolyt. Resultaten visare på en minskning av både ZDDP och Fenoliska tillsatser. Kurvans utseende, med en tydligt bredare första topp, antyder att det eventuellt kan röra sig om en minskning av ZDDP parallellt med en ökning av aktiv substans i området 9 – 12 s (aminer). Eftersom det är svårt att urskilja två toppar är det också svårt att säkerställa analysen. I sådant fall handlar det om betydligt lägre RUL% för ZDDP som mildras av bildandet av en annan aktiv substans. Detta har visats kunna ske i [7]. När analysen gjordes med olja från testriggen innan testerna påbörjats (20130124) som referens, gör också den breda toppen resultaten svåra att tolka.

I båda fallen visar betydligt mer använd olja på högre RUL% för Additiv 1, något som också kan förklaras av att någon förening som är aktiv i Amin-området bildas under användandet av oljan vilket leder till en breddning av toppen som tolkas som ökning av ZDDP.

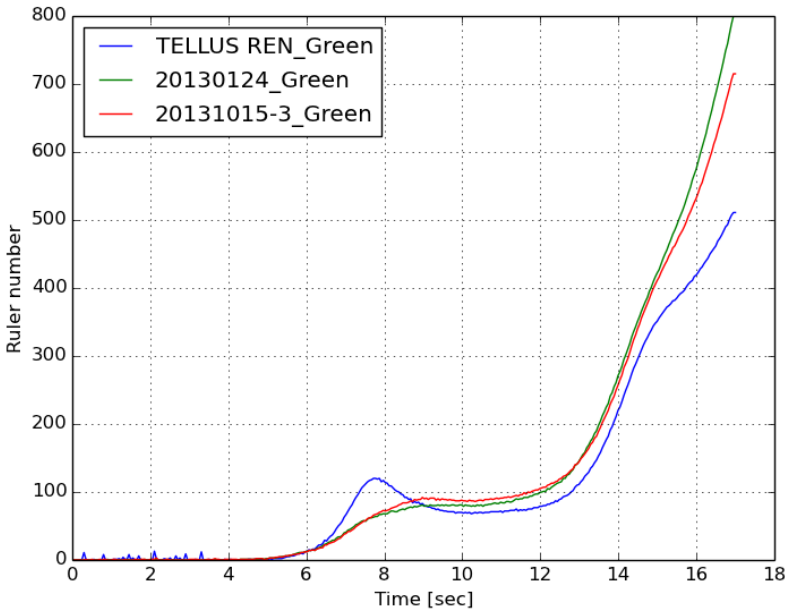
Additiv 3, Fenoler, visar en oklar trend enligt siffrorna, men detta beror säkerligen på att den toppen är svag redan i referensmätningen och mycket svag i den använda oljan. Osäkerheten i uppskattningen av toppens area är förmodligen delvis orsaken till att det mer använda provet visar ett högre värde. Kort sagt kan dessa resultat ses som att Fenol förbrukats nästan helt i båda proverna jämfört med referensen.

Dessa resultat visar också tydligt på oklarheten i att tolka värdet för ”Total RUL%” då använd olja tenderar att ge betydligt högre värden.

Tabell 1. Resultat på olja från testrigg för tillståndsövervakning. Dessa resultat kommer från mätningar >5 min efter uppskakning (enligt instruktioner).

Prov	RUL %	Add1 %	Add2 %	Add3 %
		Grön elektrolyt		
	Tot	ZDDP 7-10s.	Amin 9-12s.	Fenol 14-17s.
Ref: Tellus S68	**100**	100	-	100
Oljeprov 20130124	**141 !**	60*	-	2
Oljeprov 20131015	**136 !**	65*	-	13
Tellus S68 [15-25 min]	**113**	110	-	112
Ref: Oljeprov 20130124	**100**	100	-	***
Tellus S68	**73**	132**	-	***
Oljeprov 20131015	**98**	110	-	***
Oljeprov20130124	**104**	108	-	***

* Toppen breddas tydligt. Ev. kan det röra sig om två toppar, en som byggs upp bredvid den som bryts ner
** Referenstoppen betydligt bredare, ev två toppar.
*** Referenstoppen ej kvantifierbar.



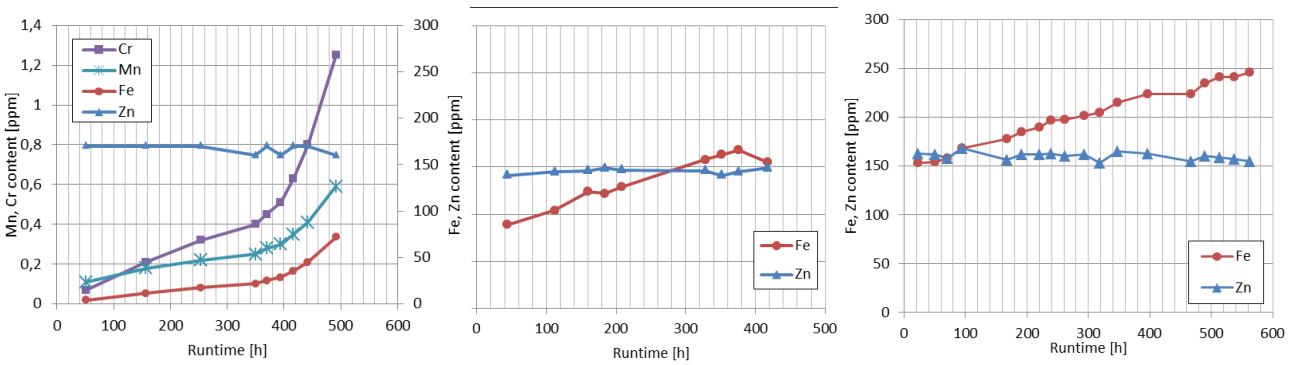
Figur 21. Kurvor för testriggens olja. Den använda oljan visar minimala toppar för additiv samt en tydlig breddning av den första toppen (ZDDP).

4.5.3. ICP

Resultat från ICP-mätningar för Test 1, 3 och 4 visas i Figur 22. Under Test 1 visar resultaten en överensstämmande trend i jämförelse med partikelnivåerna. Efter ca 400 h sker en tydlig förändring mot avsevärt ökad nötningstakt. För Test 3 och 4 uteblir dylik varning. Metoden har inte tillräcklig mätfrekvens för att kunna fånga upp de snabba förloppen i systemet. Det man kan se från resultaten är att

1) En grundläggande nötningstakt reflekteras i hur snabbt Fe-nivån höjs. Test 3 visar den högsta takten och Test 1 den lägsta (innan accelerationen).
2) Partiklarna som mäts är så små att filtrering har ringa effekt på Fe-nivån. Nivån ökar kontinuerligt genom hela projektet. Detta bidrar till att de senare testen de facto arbetat under sämre förhållanden än det första pga. en högre nivå av recirkulerande nötningsprodukter
3) Zn-nivån skulle kunna indikera förbrukning av tillsatser (ZDDP) men trenden uteblir

I resultaten från Test 1 har även Cr och Mn inkluderats. Dessa metaller är beståndsdelar i stål och indikerar också tydligt den accelererade trenden hos Fe. Skillnaden är i innehållet; Cr och Mn innehållet i oljeproverna ligger på en nivå som är mycket lägre och därmed svårare att mäta. I och med att olika leverantörer valts för analysen kunde det konstateras att känsligheten hos metoden kan varier och för Test 3 och 4 var mätmetodens känslighet ej tillräcklig för att producera jämförbara resultat från Cr och Mn.



Figur 22. Resultat från grundämnesanalys för Test 1, 3 och 4. Det går att identifiera den accelererade nötningen som inträder i slutet av Test 1. En jämförelse av ökningstakten mellan testen indikerar att Test 3 höll den högsta takten (brantast). För Test 3 och 4 uteblir varningar om kommande haveri i form av accelererad nötning.

4.5.4. FT-IR

Den initiala analysen av FT-IR resultaten gav ingen värdefull information då provernas spektra ej skiljde sig åt på ett iögonfallande vis. Vid vidare undersökning med Multivariat Analys visade det sig att viss information gick att utvinna, se avsnitt 5.1.

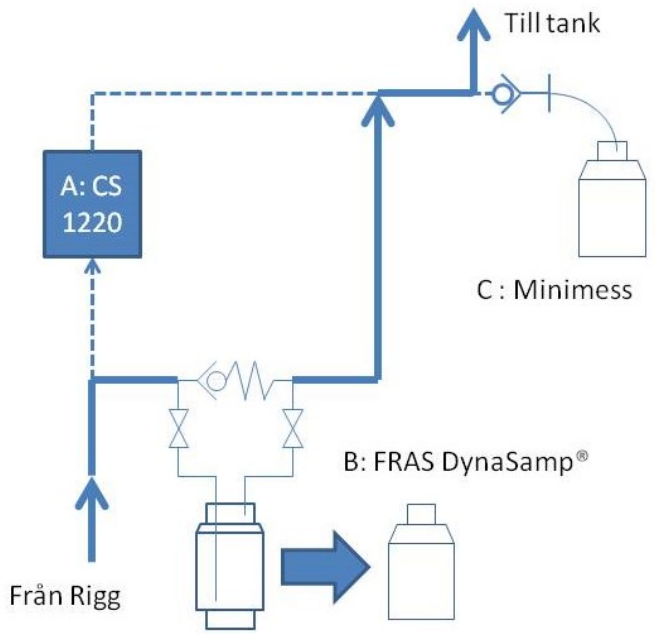
4.6. Jämförelse offline/online

En jämförelse har gjorts mellan resultat från partikelmätning online och partikelmätning gjorda på flaskprover av två olika typer. Syftet med jämförelsen är att illustrera eventuella fördelar med onlinemätning och påvisa eventuella problem med flaskprover och hur dessa delvis kan motverkas med hjälp av oljeprovtagare.

Tabell 2. Provtagningsschema

Tidpunkt	B: FRAS	C: Minimess
t = 0 min	Teststart	Teststart
5 min	Spoltid 5 min	Spoltid 5 min
10 min	*	Spoltid 10 min
30 min	Spoltid 10 min	Spoltid 30 min
60 min	Spoltid 20 min	Spoltid 60 min
120 min	Spoltid 5 min	Spoltid 120 min
240 min	Spoltid 10 min	Spoltid 240 min
360 min	Spoltid 20 min	Spoltid 360 min

* Av tidsskäl ej möjligt



Figur 23. Provtagningsmetoderna. A – kontinuerlig onlinemätning med ljusblockeringssensor. B – flaskprover tagna med FRAS DynaSamp® oljeprovtagare. C – flaskprov tagna via slang från minimess uttag.

4.6.1. Online

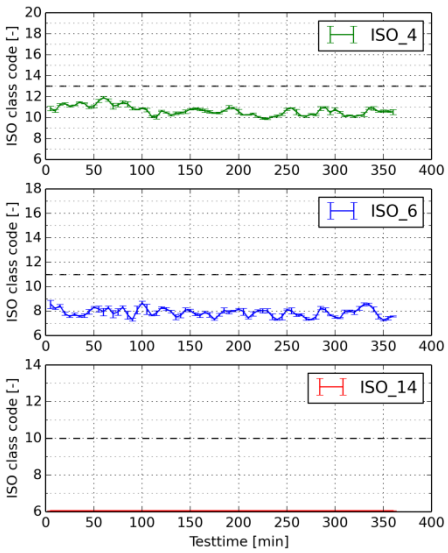
Resultatet från onlinemätningen visas i Figur 24. En viss variation i resultatet är tydlig för klasserna >4 µm och >6 µm där det rör det sig om +/- 1 ISO klass. För partiklar >14 µm har inga detektioner gjorts vilket är konsekvent med filtreringsgraden (10µm). Den tydliga variationen kan bero på att ISO värdena konsekvent befinner sig tydligt under nivåerna för vilka instrumentet är kalibrerat (ISO 13/11/10). Ett renare prov innebär färre partiklar att mäta på och därigenom större osäkerhet i mätresultatet. Variationen kan dessutom bero på en sann variation i föroreningsgraden vid tidpunkten för mätning, dvs. en naturlig variation i ett dynamiskt system. Om man godtar variationen som sådan visar trenden under testtiden på en stabil situation och en renhetsgrad på ISO 11/8/6.

4.6.2. Oljeprovtagare

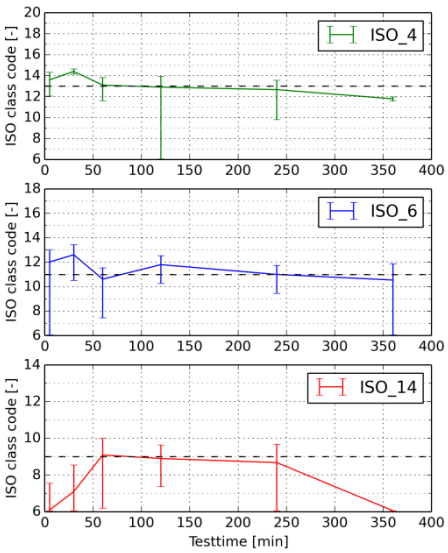
Resultaten från mätningarna på prover från oljeprovtagare (FRAS DynaSamp®) visas i Figur 25. Spridningen är relativt stor mellan individuella mätningar vilket visas av den höga standardavvikelsen (felstaplar). ISO-nivåerna ligger precis vid mätmetodens rapporteringsgränser (ISO-kod 13/11/9), se streckade linjer i graferna, vilket ger denna kraftiga spridning, framförallt neråt i resultaten. Detta är särskilt tydligt för de största partiklarna (>14 µm) då det endast handlar om enstaka partiklar i den analyserade mängden. I och med den stora osäkerheten bör det bortses från denna klass när man diskuterar trenden. Medelvärdet för >4 µm och >6 µm visar på en svag trend av sjunkande nivå, dock är osäkerheten stor pga. spridningen. Det överensstämmer dock väl med utvecklingen i onlinemätningen som också ligger högst under de första 100 minuterna.

4.6.3. Prov via mätuttag

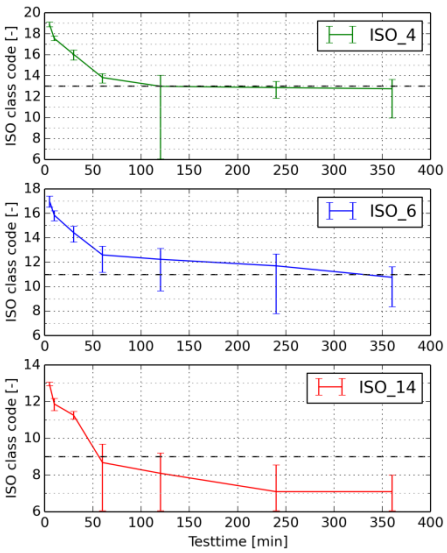
Resultaten från partikelmätningar på flaskprover tagna via mätuttag visas i Figur 26. Här kan man tydligt se trenden av minskande partikelnivåer ju längre spoltiden är. Man kan också notera hur spridningen mellan mätningar ökar markant ju renare provet är och blir signifikant när man är vid metodens rapporteringsgräns (streckade linjer). De första tre proverna sprider +/-1 ISO-klass medan efterföljande prov ökar kraftigt i spridning (se Figur 26). Med tanke på spridningen då resultaten ligger vid metodens rapporteringsgräns (se ovan) är det svårt att säga säkert när provtagningen är stabiliserad. Från och med 120 min är den avtagande trenden dock inom mätosäkerheten och får betraktas som stabil.



Figur 24. Partikelnivåer enligt onlinemätning



Figur 25. Partikelnivåer enligt prover från oljeprovtagare.



Figur 26. Partikelnivåer enligt flaskprover från mätuttag.

4.6.4. Diskussion av jämförelsen

Det som framförallt kräver diskussion när dessa resultat skall utvärderas är den stora spridningen vid mätning på flaskprover. Spridningen hänger samman med provens renhet och mätinstrumentets kapacitet (se ASTM standard D7596-10). Det är viktigt att vara medveten om att vid mätning med partikelräknaren (**SpectroInc LNF Q200)** utvärderas < 1mL provvolym för att bestämma värdet av antalet partiklar per mL. Det enda sätt man skulle kunna undvika denna problematik för rena prover vore att kraftigt öka den analyserade volymen.

Dessutom finns en inverkan av slumpfördelning även vid själva provtagningen, då man tar en begränsad provvolym (50-100 mL) som får representera den totala oljevolymens kondition (10-tals till 1000-tals liter). Resultaten från kontinuerlig online-mätning indikerar en variation med tiden som skulle innebära att flaskprover tagna vid olika tidpunkter skulle få olika grad partikelinnehåll trots att systemet är stabilt.

Sammantaget innebär detta att:

1) Flaskproverna är unika och kan skilja signifikant trots att de representerar samma system.

2) Mätningarna är individuella och kan skilja signifikant trots att det representerar samma oljeprov.

Hur det kommer sig att online-mätningen i detta försök visar på betydligt renare hydraulvätska än flaskproverna är ännu osäkert. En förklaring skulle till exempel kunna vara att ett noggrannare mätförfarande av flaskproverna, t.ex. med ett system som har en rapporteringsgräns vid ISO 9/7/6, skulle bekräfta den lägre nivån. Bortser man från mätfel, skulle en annan förklaring kunna vara att det är en korrekt representation av verkligheten och att hydraulvätska av denna renhetsgrad är oerhört svår att ta ut för flaskprov utan att viss kontaminering sker. En annan förklaring som givits är att vissa tillsatser i hydraulvätskan klumpar ihop sig hastigt i stillastående tillstånd, vilket leder till att de detekteras som partiklar [26]. I syftet tillståndsövervakning bör det understrykas att den absoluta nivån förorening inte är det avgörande utan möjligheten att identifiera förändringar och trender. Ur det hänseendet är det alltså av mindre vikt vad som är den ”sanna” föroreningsgraden.

4.6.5. Slutsatser om jämförelsen

Som förväntat visar resultat från oljeprovtagaren och onlinemätningen liknande trend och denna är relativt stabil under testets genomförande. Variationen mellan individuella mätningar på flaskprover är dock stor vilket försvårar identifikationen av trender. Detta beror delvis på mätnoggrannheten vid så rena prover som det rör sig om i detta fall.

Flaskprover tagna genom spolning från mätuttag visar att det krävs långa spoltider innan ett representativt prov kan tas. I detta fall 120 min eller motsvarande ca 2 L vätska. Analysen av dessa prov illustrerar också hur smutsigare prover, med fler partiklar, innebär bättre repeterbarhet i mätningen medan mycket rena prover är svårare att mäta på.

Online-mätningens stora fördelar är den höga frekvensen av mätningar och den snabba återkopplingen av resultat till användaren. Genom att hålla en hög mätfrekvens kan pålitligare resultat utvinnas eftersom individuella mätningars spridning blir mindre viktig. Mätresultatet kan dessutom utvärderas kontinuerligt och finnas tillgängligt för användaren som återkoppling på maskinstatus eller för larmfunktioner som identifierar onormalt slitage.

Flaskprover innebär en osäkerhet, dels på grund av provtagningsförfarandet där risken för kontaminering finns och dels genom att endast enstaka mätningar görs på en begränsad volym som får representera systemet. Risken för feltolkningar av trender blir därmed större. En olycklig följd skulle kunna vara att ett system bedöms vara på väg mot haveri trots att så inte är fallet, eller att ökade partikelnivåer inte med säkerhet identifieras. Däremot minskar användandet av oljeprovtagare risken för kontaminering av provet och kortar ner provtagningstiden betydligt.

Fördelen med att ta flaskprover är mängden av tillgängliga analyser. Ett oljeprov kan analyseras med en rad analysinstrument som kan ge oerhört detaljerad information om oljans kondition. Föroreningens natur kan bedömas både genom dess form (LNF, mikroskopi) och beståndsdelar (ICP, ferrografi). Tillsatsinnehållet kan bedömas (FT-IR, RULER) likaväl som oljans kondition (viskositet, vattenhalt) grad av åldring och nedbrytning (TAN, FT-IR). Alla dessa faktorer är relevanta om en helhetsbedömning av systemhälsa skall göras.

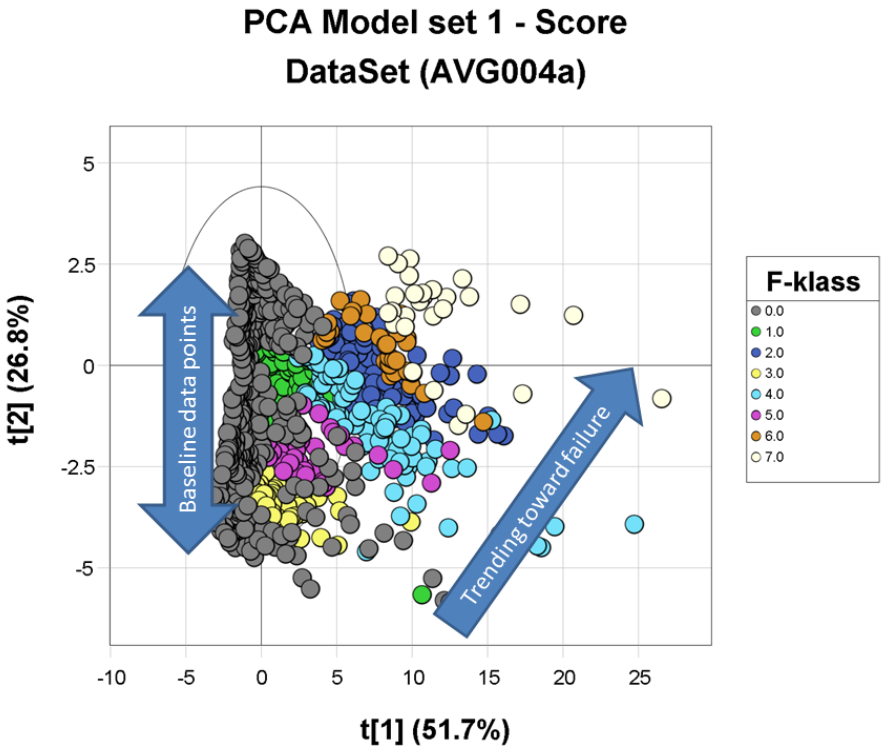
Det är sannolikt att med tillståndsövervakade system kommer flaskprover fortfarande att spela en stor roll för detaljerad analys av oljekonditionen. Fler och fler faktorer kan nu övervakas kontinuerligt, så att flaskprover kommer att tas då indikation från övervakningssystemen finns och man vill gå vidare med djupare analys. Då, liksom nu, är det avgörande att flaskprover tas med största möjliga renhet och minsta möjliga risk för kontaminering.

5. RESULTAT, DEL 2

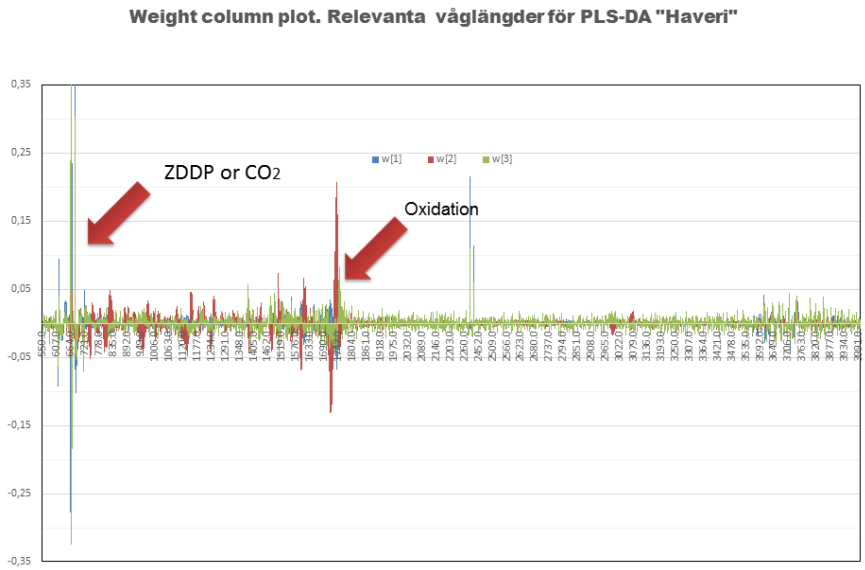
5.1. Multivariat Analys

En mer omfattande genomgång av resultaten från IVIDA finns i bilaga (Multivariat dataanalys av oljeprovsdata för ITH, sida 45). En sammanfattning av resultaten, och de insikter som resultaten lett fram till, ges här:

- Genom att behandla resultaten från partikelräkning med Multivariat analys, gärna inklusive andra oberoende variabler som arbetstemperatur och motstånd i systemet, kan information fås om trenden i systemet. Det finns anledning att förvänta sig att tillstånd närmare haveri kommer att dra bort ifrån steady-state tillståndet. För att få en kraftfullare tolkningsmöjlighet bör kördata loggas och användas för att klassificera tillståndsmätningarna. Enkelt uttryckt: *Normalt tillstånd vid hög belastning kan vara en indikation på nära förestående haveri vid lägre belastning.* Ju mer data som samlas in och används för att bygga en datamodell, desto tydligare kan man förvänta sig att resultattolkning blir.
- Principal Component Analysis (PCA) på data från partikelräkning grupperar resultaten på ett lovande sätt. Det finns en skillnad mellan haveri-relaterade resultat och steady-state resultat. Dessutom grupperar olika arbetsförhållanden tillsammans.
- Det går utmärkt att använda onlinedata för att skapa modeller som predikterar ett haveri. Om man ökar på antalet variabler som beaktas i analysen (dvs. inkluderar systemvariabler – såsom temp, tryck i drivande motor – utöver partikeldata) så ökar exaktheten, i detta exempel från 91% till 93%.
- Genom att kombinera online-data med analysresultat från oljeprover kan man få tydligare grupperingar av ”normaldata” och data som förekommer i närhet till haveri. Detta har påvisats med kombination av online-data och ICP-analyser.
- Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) på FT-IR spektra används för att identifiera de spektrala toppar vid vilka en skillnad kan identifieras i en grupp oljeprover. Genom att knyta dessa våglängder till specifika komponenter i hydraulvätskan (basolja, tillsatser eller föroreningar) kan man därigenom kartlägga hur dessa förändringar indikerar haveritillstånd. Denna typ av analys utfördes på 10 st oljeprover. Våglängder som sannolikt korresponderar till antiwear-tillsatsen skiljer sig tydligt mellan det prov som är taget vid fullbordat haveri och de prov som är tagna innan haveri. Över tid ser vi dessutom en generell förändring vid våglängder som associeras med oxidation.



Figur 27. Resultatplot från PCA. Plotten visar hur mätpunkter närmare haveri tenderar att placera sig högre och åt höger i grafen medan mätpunkter från huvuddelen av testet placerar sig nära t[1]=0 i ett band längs t[2]-axeln. Dessutom grupperar sig data utifrån olika arbetspunkt.



Figur 28. PLS-DA "Weights"-plot identifierar två våglängder inom FT-IR spektrumet som skiljer oljeproven åt. Den ena relaterar till oxidation medan den andra misstänks indikera på förbrukning av ZDDP (anti-wear tillsatts).

6. DISKUSSION

6.1. Antaganden och begränsningar

Signalbehandlingen beskriven i detta arbete utgår från antagandet att flödet är konstant. Om inte detta kan antas måste förbehandlingen inbegripa ett steg där detekterad partikelförekomst [n partiklar / mL] multipliceras med totala flödet [L/min] för att ge en korrigerad bild av partikelförekomsten.

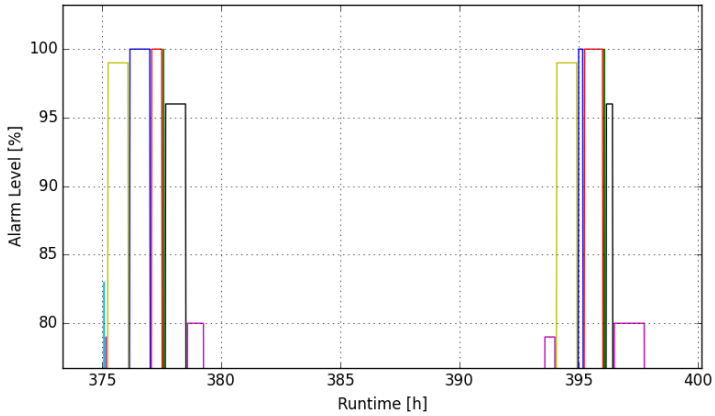
6.2. Diskussion av resultat

6.2.1. Testförhållanden och nötningstakt

Man kan konstatera att utifrån 4 olika tester har vi sett 4 olika resultat. Test 1 har utförts med konstant belastning och varvtal uppvisar tydligast ökning av partikelnivåer. Test 3 och 4 med växlande belastning visar lika tydlig exponentiell partikelökning och ICP-analysen indikerar högre nötningstakt än Test 1. Det förefaller logiskt att växlande belastningsförhållanden utsätter lagren för mer påfrestning än statisk belastning och därmed orsakar mer nötning. Detta styrks också av att haveriförloppet varit relativt snabbt för Test 3 och 4, där lagret i båda fallen spruckit helt igenom och kilat fast rotationsaxeln. Test 5, med varierande varvtal som påfrestning, hamnar någonstans mittemellan, med en långsam ökning av nötning under lång period utan att lagret spruckit. Test 5 visade också tydligt att även referenslager, med ytbeläggning, förr eller senare går in i pittingstadiet av ytnötning.

6.2.2. Skillnad i online- och labbmätningar

Den tydliga skillnaden i partikeldetektion mellan onlinemätningar och lab-mätningar är av intresse att undersöka vidare. Det föreligger uppfattningar om att det har med förorening av prov att göra, men när skillnaden är 3-4 klasser (8-16 gånger mer partiklar) verkar detta osannolikt, särskilt med tanke på att trender till viss del ändå följer varandra. Ihopklumpning av tillsatser har också föreslagits och detta skulle kunna påvisas genom snabb partikelanalys direkt efter provtagning.



Figur 29. De små "kullarna" i partikelkurvan för Test 3 uppvisar samma sekvens av larmkoder.

6.3. Förslag på fortsatt arbete

Med de lärdomar vi har nu är det tydligt att insamlande av data från system i drift kommer att krävas för att utvecklingen av ett system för tillståndsövervakning skall kunna drivas vidare. Små förändringar i testriggens arbetssätt har tydligt illustrerat att styrdata (yttre förändringar i belastning, varvtal, etc) behöver tas hänsyn till då förändringar i partikelföroreningen skall bedömas och larmsignaler skapas. Fortsatt arbete bör diskuteras gemensamt och nedanstående reflekterar endast våra funderingar i nuläget.

Som förslag på fortsatt arbete inom ITH så finns vidareutveckling av ett Oljeanalysdatasystem, där labbanalyser och onlinedata kan samlas och utvärderas parallellt. Dessutom ser vi möjlighet att ta våra lärdomar ut till processindustrin och skapa dialog om behovet för tillståndsövervakning men även samla in kunskap om andra mätmetoder och tolkningar som kan användas inom tillståndsövervakning. Man kan se behov för Bosch Rexroth Mellansel AB att arbeta med att integrera datainsamlingen (baserat på algoritmer och resultat från detta projekt) i sina egna system, samt att i förlängningen implementera en eller flera pilotsystem för att kunna bedöma hur larmfunktionerna svarar i riktiga system. Vi kan även se behovet av att skapa kopplingar mellan oljeanalysdatabaser och den kontinuerligt insamlade övervaknings- och driftsdata. Gemensamt ser vi möjlighet till fortsatt testarbete både i labbet och i eventuella externa drifter. Utbildning av servicepersonal samt utveckling av utbildningsmaterial behöver också göras.

För framtida testuppställningar bör en gedigen experimentdesign (Design of experiment, DOE) genomföras först. Med hjälp av experimentdesign kan man genomföra ett minimalt antal test där många beroende faktorer undersöks på en gång för att få ut maximal information om de olika faktorernas betydelse för experimentet. När det kommer till tillståndsövervakning är det alltid många faktorer som spelar in och att förändra en faktor i taget skulle ta allt för lång tid.

7. SLUTSATSER

Arbetet som presenterats i denna rapport har genererat en mängd lärdomar om partikelräkning i synnerhet och oljeanalys för tillståndsövervakning i allmänhet. Det förefaller tydligast att sammanfatta slutsatserna i punktform.

- Det finns ett flertal oljeanalyser som genererar värdefull information om systemets tillstånd i förhållande till nötning.
    - FT-IR kan påvisa förbrukning av anti-wear tillsatser
    - ICP kan påvisa nötningsgrad. Vid svårare arbetsförhållanden genereras mer järnföroreningar.
    - ICP kan dessutom indikera förändrad nötningsgrad; en ökande nötningstakt visar då på annalkande haveri.
    - ICP har visat att små partiklar som skapas vid nötningen inte filteras bort utan fortsätter cirkulera i systemet.
    - ICP kan utvärderas med olika metoder av olika underleverantörer – vilket påverkar noggrannheten i analysen
    - En jämförelse mellan ICP och partikelräkning ger indikation på att mindre partikelstorlekar (< 4 µm) ger tidigare indikation på haveri.
    - Partikelräkning kan visa på förhöjd nötning, men utvärdering av flaskprover visar på flera problem såsom provtagningsosäkerhet och mätosäkerhet vid låga partikelnivåer.
- Partikelräkning online genererar en mängd värdefull information om systemets tillstånd på ett sätt som gör analysen tillgänglig omedelbart och kan därmed användas för snabba varningar och larm.
- Genom att identifiera kända systemtillstånd, och kända förändringar som systemet genomgår, kan förmågan att urskilja och identifiera okända tillstånd och tillståndsförändringar förbättras avsevärt. Detta visas i arbetet genom en förbättrad larmsituation då systemets körvariabler används för att identifierar förändrade körförhållanden och därigenom undertrycka larm baserade på de medföljande förändringarna i partikeldetektion.
- Multivariat analys är ett kraftfullt verktyg som kan tolka en mängd olika data och mätningstyper parallellt och därigenom identifiera avvikande tillstånd. Denna metod är kapabel att sortera in mätpunkter i grupper motsvarande olika körförhållanden och dessutom visa på trend närmare haveri.
- Databehandling och beräkning har utvecklats som kan
    - Följa och utvärdera onlinedata
    - Sätta larmgränser baserat på historisk data
    - Använda kördata för att filtrera partikeldata och därigenom förfina tolkningsmöjligheterna.

8. PUBLIKATIONER

Isaksson, O. (2010). Tydligare koppling mellan tillståndskontroll och affären. *Fluid Scandinavia nr 3/2010.*

Sjödin, E. (2012). Metoder för detektering av pittingskador i motorer. *Fluid Scandinavia nr 2/2012.*

Sjödin, E., & Westin, P-O. (2013). Comparison of optical and magnetic particle detection systems for detection of pitting damage in low speed hydraulic motors. *In Proceedings of The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, SICFP2013, June 3-5, 2013, Linköping, Sweden.

Westin, P-O., Marklund, P., & Sandström, J. (2013). Wear detection by monitoring hydraulic oil contamination – an experimental comparison between on-line and off-line measurements. In *Proceedings of World Tribology Congress*, WTC'13, Torino, Italy.

Westin, P-O. (2014). Jämförelse mellan onlinemätning och flaskprover vid mätning av partikelinnehåll i tryckmedier. *Fluid Scandinavia nr 3/2014.*

Westin, P-O. & Bodén, I. (2015). Tillståndsövervakning med hjälp av Multivariat dataanalys. *Fluid Scandinavia nr 1/2015.*

Westin, P-O. Sammanfattning av lärdomar om Tillståndsövervakning. (MANUSKRIPT)

9. REFERENSER

[1] E. Sjödin och P.-O. Westin, ”Comparison of optical and magnetic particle detection systems for detection of pitting damage in low speed hydraulic motors,” i *Proceedings of the 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Linköping, 2013.

[2] E. Sjödin, ”Metoder för detektering av pittingskador i motorer,” *Fluid Scandinavia,* vol. 2, 2012.

[3] J. Halme och P. Andersson, ”Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics - state of the art,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,* vol. 224, pp. 377-393, 2010.

[4] J. Reintjes, J. E. Tucker, S. E. Thomas, A. Schultz och L. L. Tankersley, ”Lasernet Fines Wear Debris Analysis Technology: Application to Mechanical Fault Detection,” *AIP Conf. Proc. 657; doi: 10.1063/1.1570320,* p. 1590, 2003.

[5] T. G. Barraclough, D. P. Anderson och M. Lukas, ”Direct Image Analysis for Detecting Abnormal Wear and Contamination in Used Oil Samples,” Spectro Incorporated, Littleton. MA 01460, 2002.

[6] K. Hughes, ”Partikelräkning till en ny nivå,” *Fluid Scandinavia,* nr 3, 2003.

[7] E. Maguire, ”Monitoring of Lubricant Degradation with RULER and MPC,” Linköping University, Linköping, 2010.

[8] N. Robinson, ”Monitoring oil degradation with infrared spectroscopy,” *Wearcheck AfricaTechnical Bulletin,* nr 18, 1998.

[9] A. Agoston, C. Schneidhofer, N. Dörr och B. Jakoby, ”A concept of an infrared sensor system for oil condition monitoring,” *Elektrotechnik & Informationstechnik,* vol. 125, nr 3, pp. 71-75, 2008.

[10] P. J. Dempsey, ”Gear damage detection using oil debris analysis,” i *14th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, 2001.

[11] P. J. Dempsey och A. A. Afjeh, ”Integrating oil debris and vibration gear damage detection technologies using fuzzy logic,” i *International 58th Annual Forum and Technology Display*, 2002.

[12] P. J. Dempsey, G. Krieder och T. Fichter, ”Investigation of Tapered Roller Bearing Damage Detection Using Oil Debris Analysis,” i *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2006.

[13] D. G. Lewicki, P. J. Dempsey, G. F. Heath och P. Shanthakumaran, ”Gear Fault Detection Effectiveness as Applied to Tooth Surface Pitting Fatigue Damage,” NASA Center for Aerospace Information, Hanover, MD, 2009.

[14] J. L. Miller och D. Kitaljevich, ”In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment,” i

IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000.

[15] O. Isaksson, ”Particle counter and neural network used to detect sliding wear and pitting in a radial hydraulic motor,” *International Journal of Fluid Power,* vol. 11, nr 2, pp. 5-13, 2010.

[16] M. Smith, ”Oil analysis vs. microscopic debris analysis: when and why to choose,” *Practicing Oil Analysis,* nr May-June 2004, 2004.

[17] M. S. Ozogan, A. I. Khalil och P. S. Katsoulakos, ”Tribological failure detection and condition monitoring for diesel engines,” *Wear,* vol. 130, nr 1, pp. 189-201, 1989.

[18] B. Verdegan, A. True-Dahl, W. Haberkamp, N. Blizard, D. Genter och E. Quillen, ”Filtration solutions for high pressure common rail fuel systems,” i *American Filtration and Separation Society Annual Conference*, 2008.

[19] A. Östgren, ”Mätning av föroreningar i hydraulolja med automatisk partikelräknare,” Luleå Tekniska Universitet, 1996.

[20] G. Svedberg, ”Assessing particle generation /ingression in fluid power systems - a field study,” KTH, 1993.

[21] T. J. Harvey, R. J. K. Wood och H. E. G. Powrie, ”Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings,” *Wear,* vol. 263, nr 7-12, pp. 1492-1501, 2007.

[22] M. Craig, T. Harvey, R. Wood, K. Masuda, M. Kawabata och H. Powrie, ”Advanced condition monitoring of tapered roller bearings, Part 1,” *Tribology International,* vol. 42, nr 11-12, pp. 1846-1856, 2009.

[23] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettane-Wold och S. Wold, Multi- and Megavariate data analysis: principles and applications, Umeå: Umetrics Academy, ISBN: 91-973730-1-X, 2001.

[24] J. Hair, R. Andersson, R. Tatham och W. Black, Multivariate data analysis, Upper Saddle River, New Jersey. ISBN: 0- 13-930587-4.: Prentice-Hall International, Inc, 1998.

[25] U. Olofsson, H. Sjöström och U. Sjödin, ”Increased Wear Resistance of Roller Bearings Using Me-C : H Coated Rollers,” *Transactions of the ASME, 122(October), .,* p. 682–688, 2000.

[26] J. Kleber, Interviewee, *Personlig kommunikation.* [Intervju]. 27 11 2014.

[27] P.-O. Westin, P. Marklund och J. Sandström, ”Wear detection by monitoring hydraulic oil contamination – an experimental comparison between on-line and off-line measurements,” i *Proceedings of the 2013 World Tribology Congress*, Turin, Italien, 2013.