



UPPSALA  
UNIVERSITET

Examensarbete 30 hp  
Juni 2020

# Analys av drivdonsslitage vid Forsmarks kärnkraftverk

## För drivdon på Forsmark 1 och 2

---

Emma Ekberg Berry



UPPSALA  
UNIVERSITET

**Teknisk- naturvetenskaplig fakultet  
UTH-enheten**

Besöksadress:  
Ångströmlaboratoriet  
Lägerhyddsvägen 1  
Hus 4, Plan 0

Postadress:  
Box 536  
751 21 Uppsala

Telefon:  
018 – 471 30 03

Telefax:  
018 – 471 30 00

Hemsida:  
<http://www.teknat.uu.se/student>

## Abstract

### **Analysis of wear in control rod drives at Forsmark's nuclear power plant**

*Emma Ekberg Berry*

This master thesis is done within the Energy Systems Engineering program at Uppsala University and performed for Forsmarks Kraftgrupp, Vattenfall. Forsmark is a nuclear power plant that consists of three BWR units and is an important component for the Swedish power system. An important part of the system inside the nuclear power plant is the control rod drives, which controls the motion of the control rods inside the core to adjust the power production of the plant. Currently the wear of the control rod drives has increased thus the economic costs due to the wear increases.

The aim of this thesis is to analyse the current wear of the control rod drives at Forsmark 1 and Forsmark 2. Moreover the thesis presents possible reasons for the origin of the wear together with derived methods for possible identifications of wear in the control rod drives at an early stage, which is analysed in the simulation program MATLAB. Furthermore the report presents a new maintenance plan for the control rod drives at Forsmark 1 and Forsmark 2 based on the evaluation of the current wear together with knowledge from other nuclear power plants regarding an optimal maintenance plan for the control rod drives.

Handledare: Caroline Bohlin och Mikael Seppälä  
Ämnesgranskare: Mattias Lantz  
Examinator: Petra Jönsson  
ISSN: 1650-8300, UPTEC ES 20015  
Tryckt av: Uppsala

## **Exekutiv sammanfattning**

Bakgrund till examensarbetet är ett önskemål om en undersökning kring slitaget av drivdon i Forsmark 1 och Forsmark 2. På senare år har flertalet drivdon slitits och gått på den så kallade säkerhetsgången, vilket är ett problem av främst ekonomisk karaktär. Det är därför av intresse, för att minska antalet drivdon som går på säkerhetsgången, att undersöka orsaken till slitaget samt att undersöka möjliga förebyggande åtgärder som kan tillämpas vid framtida underhåll av drivdonen under verkens kvarvarande livslängd. Syftet med arbetet är följaktligen att undersöka och kartlägga det historiska slitaget av drivdonen i Forsmark 1 och Forsmark 2, för att därefter identifiera möjliga orsaker till slitaget samt möjliga åtgärder som kan tillämpas för minimering av framtida slitage. Resultatet av arbetet ger således ett beslutsunderlag för hur framtida drivdonsunderhåll bör utföras samt tar fram förslag till övriga åtgärder som kan tillämpas för minimering av slitaget av drivdonen. Vidare presenterar rapporten en grund till en analys av hur drivdonsmotorernas effektkurvor i den så kallade SODEM-datorn kan ge indikationer på att drivdonet är slitet. Resultatet av dessa analyser ger en grund till framtida studier om exakta indikationer i effektkurvorna på att drivdonen håller på att slitas.

Resultatet av undersökningen visar att underhållsintervallet för drivdonen i härdens randpositioner bör ändras till 7 år, istället för nuvarande 10 år, vilket emellertid är det intervall som i rapporten rekommenderas för övriga positioner i härden. Vidare bör undersökningar göras med simuleringar kring hur crudborthållningsflödets påverkar ansamlingen av crud i härdens randpositioner. Baserat på erfarenheter från liknande verk bör ett återinförande av mutterglappsmätning under tank utvärderas för att på så sätt minska slitaget av drivdonen. I arbetets simuleringsdel tyder resultatet av analyserna på att indikationer på att slitage har uppstått i drivdonet kan ses i effektkurvans medelamplitud. Vidare tyder resultatet på att indikationer i störningsamplitud samt i frekvensamplituder även kan finnas i effektkurvorna för drivdon som håller på att slitas men som ännu inte börjat gå på säkerhetsgången. Således rekommenderas vidare analyser av dessa parametrar på ett bredare urval av drivdon. Det kan vara intressant att utvärdera huruvida det går att identifiera specifika indikationer på att drivdonet är slitet samt att donet håller på att slitas, vilket skulle innebära att slitage kan undvikas.

## **Tack till**

Jag vill rikta ett stort tack till Forsmarks Kraftgrupp och mina handledare Caroline Bohlin och Mikael Seppälä för möjligheten att göra detta examensarbete hos er. Vidare vill jag rikta ett stort tack till Jan-Erik Kull och övriga medarbetare på NMQP för all hjälp i mitt arbete samt för allt stöd ni gett. Jag vill även tacka Thomas Smed för hjälp med dataanalyser kring slitaget av drivdon samt Ulf Engrup för hjälp med informationsinsamlande kring drivdonens historik. Jag vill slutligen tacka min ämnesgranskare Mattias Lantz på Uppsala universitet för hjälp och stöd i mitt arbete.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Detta är ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i Energisystem vid Uppsala Universitet. Examensarbetet har utförts i samarbete med Forsmarks Kraftgrupp, Vattenfall. Forsmarks kärnkraftverk består av tre kärnkraftsblock, samtliga är kokvattenreaktorer (BWR), benämnda Forsmark 1, 2 respektive 3. I detta examensarbete fokuseras undersökningen på Forsmarks kärnkraftsblock 1 respektive 2. En kokvattenreaktor skapar energin ur en process av kärnreaktioner där tunga radioaktiva atomkärnor klyvs och blir till lättare atomkärnor. Denna process skapar energi vilken avges som strålning och kokar vatten i reaktorn för att på så sätt utvinna elektricitet. En av huvudkomponenterna i en kokvattenreaktor är drivdonen. Drivdonen har till uppgift att skjuta reaktorns styrstavar in och ut i härden. Styrstavarna är långa stavar bestående av neutronabsorberande material och genom inskjutning av styrstavarna i reaktorns härd kan reaktorns effekt regleras.

Ett drivdon består av flertalet komponenter varav drivmutter är en av dessa. Drivmutterns uppgift är att med så kallad skruvtransmission skruva in drivdonet och styrstavarna i härden. Inuti drivdonet finns även en drivdonsskruv vilken vid skruvtransmission skruvas in i härden med hjälp av ovannämnd drivmutter samt en drivdonsmotor. Inuti drivmuttern finns ett lager av grafit vilken kan slitas då drivdonet skruvas in. I förekommande fall har lagret med grafit slitits så pass mycket att lagret nästan helt försvunnit och drivmuttern har därmed gått metall mot metall med drivdonsskruven. Då detta sker förstörs drivdonsskruven och måste bytas ut mot en ny drivdonsskruv vid nästkommande underhåll. Ett sådant slitage kallas att drivdonet har gått på säkerhetsgängen och är ett problem av främst ekonomisk karaktär. Att ett drivdon har gått på säkerhetsgängen är den största orsaken till behovet av underhåll för drivdonen på Forsmark 1 och 2. På senare år har en ökad mängd slitna drivdon i Forsmark 1 respektive 2 identifierats. Detta examensarbete har undersökt orsaken till uppkomsten av slitage i drivdonen på Forsmark 1 och 2 samt åtgärder som kan vidtas för att minimera framtida drivdonsslitage. I dagsläget underhålls alla drivdon i Forsmark 1 och 2 på ett kontinuerligt underhållsintervall där förebyggande underhåll genomförs var 10e år för att förebygga slitage i donen. För identifikation av eventuellt slitna drivdon vilka slitits innan intervallet för förebyggande underhåll löpt ut, används analys av effektkurvor från drivdonsmotorn. Vid varje revisionsstart skruvas samtliga drivdon in i härden och en effektkurva vilken visar effekten från samtliga drivdonsmotorer vid inskrivningen erhålls då. I dagsläget görs en okulär besiktning av dessa effektkurvor för bedömningen om något ytterligare drivdon, utöver dem som planerat underhåll för gällande år, måste tas ut för underhåll vid revisionen. En annan metod som kan användas för identifiering av slitage i drivdonens drivmuttrar är så kallad mutterglappsmätning under tank. Mutterglappsmätning under tank innebär att slitaget av drivmutterns grafit mäts då drivdonet sitter kvar inne under tanken och att eventuellt slitna drivdon då på så sätt kan identifieras. I dagsläget används inte mutterglappsmätning under tank i Forsmark men flertalet andra liknande kärnkraftverk i Norden använder denna metod för identifiering av slitna drivdon.

Genom litteraturstudier av Forsmarks Kraftgrupps interna dokument för genomförda revisionsarbeten har det historiska slitaget av drivdonen i Forsmark 1 respektive 2 identifierats. Baserat på detta kan konstateras att slitaget i drivdonen i härdens yttersta positioner, så kallade randpositioner, har varit större till antalet slitna drivdon jämfört med resten av positionerna i härden. Detta samband gäller för båda verken. Vidare kan konstateras att slitaget har varierat under åren och att det ökade antalet drivdon som har gått på säkerhetsgängen kan ha ett samband med borttagandet av den så kallade mutterglappsmätningen under tank, vilken frångicks i Forsmark under 90 talet. Baserat på litteraturstudier och intervjuer kan konstateras att det ökade slitaget i randpositionerna

sannolikt beror på en annorlunda konstruktion i härdens randpositioner av de så kallade styrstavsledrören. Denna annorlunda konstruktion leder till ett annorlunda flöde i randen vilket medför att en ökad mängd smuts, så kallat crud, ansamlas i randpositionerna och därmed orsakar ett ökat slitage.

Vidare har samband mellan drivdonens effektkurvor undersökts i simuleringsprogrammet MATLAB för identifiering av potentiella indikationer på att ett drivdon håller på att gå på säkerhetsgången. Undersökningen gjordes baserat på den dokumentation vilken beskriver de drivdon som historiskt sett gått på säkerhetsgången och därefter undersöktes potentiella samband mellan effektkurvorna för de slitna respektive ej slitna drivdonen. För identifiering av slitna drivdon i ett tidigt stadie undersöktes även om samband fanns mellan drivdon som dokumenterats ej vara slitna med drivdon som i rapporten kategoriserats som *nästan slitna*. Till kategorin drivdon som var nästan slitna sattes samtliga drivdonskörningar där respektive drivdon hade gått på säkerhetsgången under det kommande året. Målet med denna kategorisering var att om möjligt identifiera ett drivdonsslitage innan drivdonet gått på säkerhetsgången och därmed förhindra slitage av drivdonsskruven. I jämförelsen av drivdonens effektkurvor analyserades fem parametrar. Dessa var medelamplitud av respektive effektkurva och maximal störningsamplitud, båda analyserade i tidsdomänen. Vidare analyserades även i frekvensdomänen medelfrekvensamplituden samt den maximala frekvensamplituden av effektkurvorna vid två specifika frekvensintervall som identifierats som intressanta för undersökningen. Resultatet av analysen och jämförelsen av de fem parametrarna för samtliga drivdons effektkurvor genom åren visar att det går att identifiera indikationer på att ett drivdon håller på att slitas i både medelamplituden, maximala störningsamplituden samt i medelfrekvensamplituden för effektkurvorna. Emellertid har inget samband identifierats mellan slitna, nästan slitna och inte slitna drivdon gällande maximal frekvensamplitud för de två specifika frekvensintervallen som analyserades.

Baserat på litteraturstudier och intervjuer presenterar rapporten ett förslag till ny underhållsplan för drivdonen på Forsmark 1 och 2. Underhållsplanen innebär att samtliga drivdon vilka inte sitter i härdens randpositioner behåller nuvarande underhållsintervall på 10 år, samt att drivdonen i randpositionerna erhåller ett nytt underhållsintervall på mellan 7-8 år. Målet med denna revidering av befintlig underhållsplan är att slitaget av drivdonen i Forsmark 1 och 2 ska minska. I undersökningen föreligger flertalet felkällor dels i form av tvetydig samt bristande information gällande det historiska drivdonsslitage i Forsmark speciellt vad gäller den äldre interna dokumentationen. Vidare bör nämnas att analysen för identifiering av drivdonsslitage i ett tidigt stadie dels baseras på ovannämnda litteraturstudie av det historiska slitaget, vilket därmed innebär att felkällorna avspeglas även i denna analys. I simuleringarna har även, som tidigare nämnts, kategorisering av drivdonskörningar gjorts baserat på när i tiden respektive drivdon dokumenterats ha slitits. Det är svårt att veta exakt när i tiden som ett drivdon har slitits och gått på säkerhetsgången samt när drivdonen inte varit slitna då detta nästan enbart identifieras på årlig basis i samband med revisionerna. Simuleringarna för identifieringar av slitage bör således enbart ses som indikationer och inte som fullständiga bevis för att ett slitage har eller kommer att uppstå i ett drivdon. För vidare studier rekommenderar rapporten att ytterligare undersökningar görs kring samband mellan drivdonens effektkurvor för slitna respektive ej slitna drivdon för att om möjligt öka säkerställandet av pålitliga parametrar som i ett tidigt skede kan påtala om ett slitage i ett drivdon håller på att uppstå. Vidare rekommenderas en uppföljning av det nya underhållsintervallet för drivdonen och om slitaget av drivdonen inte minskar rekommenderas en utvärdering om huruvida mutterglappsmätning under tank bör införas som ett alternativt tillägg i underhållsplanen för identifiering av slitna drivdon.

# Ordförklaring

AU - Avhjälpande underhåll

BWR - Kokvattenreaktor

F1 - Forsmarks kärnkraftverk 1

F2 - Forsmarks kärnkraftverk 2

FKA - Forsmarks Kraftgrupp

FU - Förebyggande underhåll

HC - flöde - Huvudcirkulationsflöde

Hz - Hertz, enhet för frekvens.

IQR - Interquartile range,  $IQR=Q1+Q3$ .

O2 - Oskarshamns kärnkraftverk 2

OKG - Oskarshamns kärnkraftverk

OL1 - Olkiluotos kärnkraftverk 1

OL2 - Olkiluotos kärnkraftverk 2

Q1 - Första kvartilen 25% av den totala datamängden

Q3 - Tredje kvartilen, 75% av den totala datamängden

R1 - Ringhals kärnkraftverk 1

RAB - Ringhals AB

TVO - Olkiluotos kärnkraftverk

W - Watt, enhet för effekt.

## Innehåll

1. Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Metodik .....	3
1.3 Avgränsningar .....	4
2. Teori.....	5
2.1 Grundläggande kärnkraftsteknik.....	5
2.2 Drivdon .....	7
3. Experimentell metod för analys av drivdonens effektkurvor.....	18
3.1 Val av analysmodeller.....	19
3.2 Urval av mätdata .....	20
3.3 Jämförda parametrar .....	22
3.4 Jämförelse mellan alla drivdonskurvor .....	24
4. Resultat och diskussion .....	25
4.1. Slitage av drivdon under livstiden för Forsmark 1 och 2.....	25
4.2. Analyserade möjliga orsaker till att slitaget av drivdon har uppstått .....	37
4.3. Jämförelser med underhållsplaner från liknande verk .....	41
4.4. Möjliga observationer för identifiering av slitage i ett tidigt stadie.....	42
4.5 Förslag till ny underhållsstrategi för drivdonen i Forsmark 1 och 2.....	61
4.6 Praktisk tillämpning av undersökningens resultat .....	65
5. Slutsatser .....	66
6. Reflektioner .....	67
7. Rekommendationer för vidare studier.....	68
Referenser .....	70
Appendix.....	73

# 1. Introduktion

## 1.1 Bakgrund

### 1.1.1 Forsmarks kärnkraftverk

Forsmarks kärnkraftverk består av tre kärnkraftsreaktorer Forsmark 1, 2 respektive 3. Samtliga av dessa tre reaktorer är så kallade kokvattenreaktorer, förkortat BWR. Kokvattenreaktorer (BWR) är den näst vanligaste reaktortypen i världen idag. Reaktorn använder vatten som förångas för att driva turbiner och på så sätt producera elektricitet. Vattnet fungerar vidare även som moderator och kylmedel i processen (Soleimani-Mohseni 2012). Forsmark 1 och 2 är av samma reaktormodell, så kallade BWR69, medan Forsmark 3 är av reaktortypen BWR75. Forsmark 1 togs i kommersiell drift år 1980, Forsmark 2 år 1981 och Forsmark 3 år 1985. Forsmark 1 har en termisk reaktoreffekt på 2928 MW, Forsmark 2 på 3253 MW och Forsmark 3 på 3300 MW (FKA 2020b). År 2019 stod kärnkraften för 39% av Sveriges totala elproduktion (Energimyndigheten 2020). Enligt Forsmarks Kraftgrupps strategiska inriktning år 2020 har samtliga tre verk en beräknad livslängd på 60 år. Verken planeras därmed att köras till någon gång in på 2040-talet (Sjöberg 2019).

### 1.1.2 Drivdonsslitage, problematisering

Varje kärnkraftsreaktor är omsluten av en reaktortank, vars syfte bland annat är att skydda härden mot omgivande miljö samt förhindra spridning av radioaktiva ämnen. Reaktortankens systemkomponenter beskrivs i detalj i avsnitt 2.1.1. En av huvudkomponenterna inuti tanken är drivdonen. Drivdon har till uppgift att styra inskruvning eller inskjutning av styrstavar in i härden. Det är därmed av stor vikt att drivdonens funktioner behålls intakta under hela drifttiden, för att säkerställa säker inskruvning av styrstavarna. Drivdonens funktion och uppbyggnad beskrivs närmare i avsnitt 2.2. På senare år har flertalet drivdon i både reaktor 1 och 2 felanmälts då berörda drivdons inskruvningsfunktion rapporterats ha försämrats. En av orsakerna till försämrad inskruvning är en ökad friktion i den drivmutter som är en av delkomponenterna i varje drivdon. I drivmuttern finns ett grafitlager vars syfte är att minska friktionen mellan drivmutter och skruv i drivdonet. I takt med att drivdonet används slitits benämnda grafitlager i drivmuttern ner, vilket orsakar en högre friktion mellan mutter och skruv. I förekommande fall kan grafitlagret efter ett visst antal år, helt slitits ner och därmed uppstår hög friktion i berört drivdon vid inskruvning (Blom 2019). Detta kallas att drivdonet har gått på "säkerhetsgången". Då ett drivdon har gått på säkerhetsgången kan inte skruven i drivdonet längre återanvändas utan måste helt bytas ut på grund av slitaget. Detta problem är främst ekonomiskt och inte ett reaktorsäkerhetsproblem (Al-Afifi 2015a).

Slitaget då drivdonen går på säkerhetsgången är den, för Forsmark 1 och 2, tidsbestämmande faktorn för underhållsintervallet av drivdonen (Seppälä 2020). På grund av detta slitage krävs därmed underhåll av respektive drivdon inom ett visst tidsbestämt underhållsintervall. Hur långt detta underhållsintervall bör sträcka sig för Forsmark 1 och 2 är däremot inte fastslaget och olika underhållsintervall har genom åren prövats för att underhållsintervallet av drivdonen ska leda till maximal tid för drivdonen inne i reaktorn utan byte, men med minimal skada på donen gällande bland annat slitage av grafitlagret inne i drivmuttern (Blom 2019).



### **1.1.3 Syfte**

Arbetet har som syfte att kartlägga det historiska slitaget av drivdon som skett på Forsmark 1 och 2 och att baserat på detta framlägga en ny underhållsplan som gemensamt omfattar underhållet av drivdonen i både Forsmark 1 och 2. Underhållsplanen ämnar omfatta ett tidsintervall som är optimerat för verkens kvarvarande livslängd. Arbetet har vidare som syfte att via en systematisk analys av effektkurvor identifiera indikeringar som gör att drivdonsslitage kan upptäckas under revision innan ett drivdon går på säkerhetsgången.

### **1.1.4 Mål**

Examensarbetet har som mål att ta fram en alternativ underhållsplansstrategi för drivdonen på Forsmark 1 och 2 optimerad för minimalt slitage. Vidare har arbetet som mål att hitta slitageindikationer på drivdonens effektkurvor för att i ett tidigt skede identifiera kommande drivdonsslitage i anläggningarna.

### **1.1.5 Frågeställningar**

Rapporten avser besvara följande frågeställningar baserat på ovan formulerat syfte och mål.

- Hur ser drivdonens slitage ut historiskt sett i Forsmark 1 respektive 2?
- Vad är den optimala underhållsplanen för drivdonen på Forsmark 1 och Forsmark 2 under verkens kvarvarande livslängd?
- Baserat på kartläggningen av det historiska slitaget i Forsmark 1 och 2, vad är den totala mängden reservdrivdonsskruvar som rekommenderas att ha i lager för att klara verkens kvarvarande livslängd?
- Vad finns det för indikationer som visar på att ett drivdon inom en snar framtid kommer att gå på säkerhetsgången?
- Finns det åtgärder som kan införas för att minimera risken att ett drivdon kommer att gå på säkerhetsgången inom verkens resterande livslängd?

## **1.2 Metodik**

### **1.2.1 Data- och informationsinsamling**

För att besvara arbetets frågeställningar samt uppsatta syfte och mål, har en litteraturstudie av befintliga system på Forsmark 1 och 2 gjorts. Studier har gjorts av reaktortanken på Forsmark 1 och 2 samt av tankens systemkomponenter med fokus på drivdon. Arbetet fokuserades till en början på att kartlägga de berörda områdenas historiska slitage. Detta gjordes med hjälp av Forsmarks Kraftgrupps interna dokumentationssystem samt från äldre revisionsrapporter. Vidare har arbetet bestått av studiebesök inne i Forsmark 1 och 2 vid revision för observation av byte av drivdon. Arbetet har därutöver bestått av intervjuer med anställda på Forsmarks Kraftgrupp AB gällande berörda system och systemkomponenter. Intervjuer har även gjorts med personal från Ringhals-, Oskarshamns- och Olkiluotos kärnkraftverk för jämförelser av underhållsplaner för drivdon samt för erfarenhetsutbyten.

### **1.2.2 Analys av effektkurvor**

Baserat på den historiska kartläggningen av slitage på Forsmark 1 och 2 har effektdata från drivdonsmotorn vid inskrivningen av drivdon i härden plockats ut och analyserats för identifikation av eventuella tidiga indikationer på slitage i drivdonen. Syftet med detta var att undersöka möjligheten att kunna förutse slitage innan dessa sker och därmed kunna byta ut drivdonen i ett tidigt stadie. För identifiering av slitage av drivdonen valdes fyra parametrar i drivdonens effektkurvor ut att analyseras. Dessa var:

- Medelfrekvens för effektkurvan, vilket även motsvarar standardavvikelsen.
- Frekvensamplituder vid specifikt utvalda intervall i frekvensdomänen.
- Medelamplitud för den totala effektkurvan.
- Amplitudskillnad mellan effektkurvan och en trendlinje som beräknats som ett polynom längs med hela effektkurvan.

För detaljerad beskrivning av den experimentella metod som användes vid analysen av effektkurvor från drivdonen, se avsnitt 3.

### **1.2.3 Analys av rapporter och intervjuer**

Baserat på insamlad information och data undersöktes möjliga orsaker till det historiska slitaget av drivdonen. De områden som analyserades som möjliga orsaker till slitagen var temperatur och flödes hastigheter av de flöden som finns i reaktortanken, material- och konstruktionsegenskaper hos drivdonskomponenterna, nuvarande och historiska underhållsplaner och underhållsstrategier av drivdonen, styrtavarnas sekvenskörning i härden, snabbstoppsgruppernas placering i härden, samt styrtavsmotioneringens påverkan på drivdonen.

## 1.3 Avgränsningar

### 1.3.1 Avgränsningar i arbetet

Denna studie ämnar enbart analysera slitage hos drivdonen i form av slitage i det grafitlager vilket är placerat mellan donets skruv och drivmutter. Övriga potentiella slitage i donet, såsom slitage i övriga delar av drivdonskomponenterna tas ej i beaktande i studien. Detta då ovan nämnda slitage historiskt sett har orsakat flest byten av drivdon samt är den största enskilda faktorn till att drivdonen idag behöver bytas ut med ett visst tidsintervall.

Vidare avgränsas projektet till att endast analysera slitagen på drivdonen i Forsmark 1 och 2. Analyserna av slitaget på drivdonen i Forsmark 1 och 2 kommer att göras separata för respektive block. Emellertid kommer det framtagna förslaget till ny underhållsplan för utbyte av drivdon vara tillämpbar för båda verken, då dessa är mycket lika varandra. Därmed kommer den framtagna underhållsplanen, vilken är tillämpbar för båda verken, vara baserad på båda de slitageanalyser som gjorts i respektive verk.

### 1.3.2 Information kring sekretessanpassat material

Till följd av Forsmarks Kraftgrupps regler kring sekretess har samtlig känslig information tagits bort från denna version av rapporten kring drivdons slitage i Forsmark 1 och 2. Rapporten i sin kompletta version tillhör FKA och går att finna i sin helhet i FKAs interna dokumentationssystem. På grund av detta har samtliga presenterade värden kring samtliga komponenters egenskaper samt systemnummer markerats med värdena X alternativt Y. Vidare är samtliga effektberäkningar beräknade och presenterade i enheten *Effekt enhet [E.e.]* och samtliga frekvensamplituder i enheten *Frekvensamplitud [F.a.]*. Den av undersökningen framtagna nya underhållsplanen för drivdonen presenteras inte i sin helhet i denna rapport liksom fullständiga intervjuer med personal från liknande kärnkraftverk som Forsmark 1 och 2.

## 2. Teori

### 2.1 Grundläggande kärnkraftsteknik

Ett kärnkraftverk är ett kraftverk som arbetar inom samma grundprinciper som ett generellt termiskt kraftverk där ånga genereras och skapar rörelseenergi från termisk energi i en turbin, för att sedan vidare skapa elektrisk energi i en generator. I ett kärnkraftverk förångas vatten då det upptar energi från bränslet. Energin från bränslet frigörs i en kärnfysikalisk process där atomer i bränslet klyvs och skapar en kedjereaktion, så kallad fission. I fissionsprocessen träffas en tung atomkärna av en neutron och klyvs därefter till två lättare kärnor samt 2-3 neutroner vilka frigjorts i processteget. De frigjorda neutronerna kan vidare orsaka nya klyvningar och således skapas en kedjereaktion. Vid varje sönderfall av en atom frigörs en viss mängd energi. Bränslet som används i kokvattenreaktorer idag är en kombination av uran 238 och uran 235. Då en atomkärna av uran 235 klyvs frigörs omkring 200 MeV energi där den största delen omvandlas till friktionsvärme från de båda fissionsfragmenten när de bromsas in av omgivande atomer (Soleimani-Mohseni 2012).

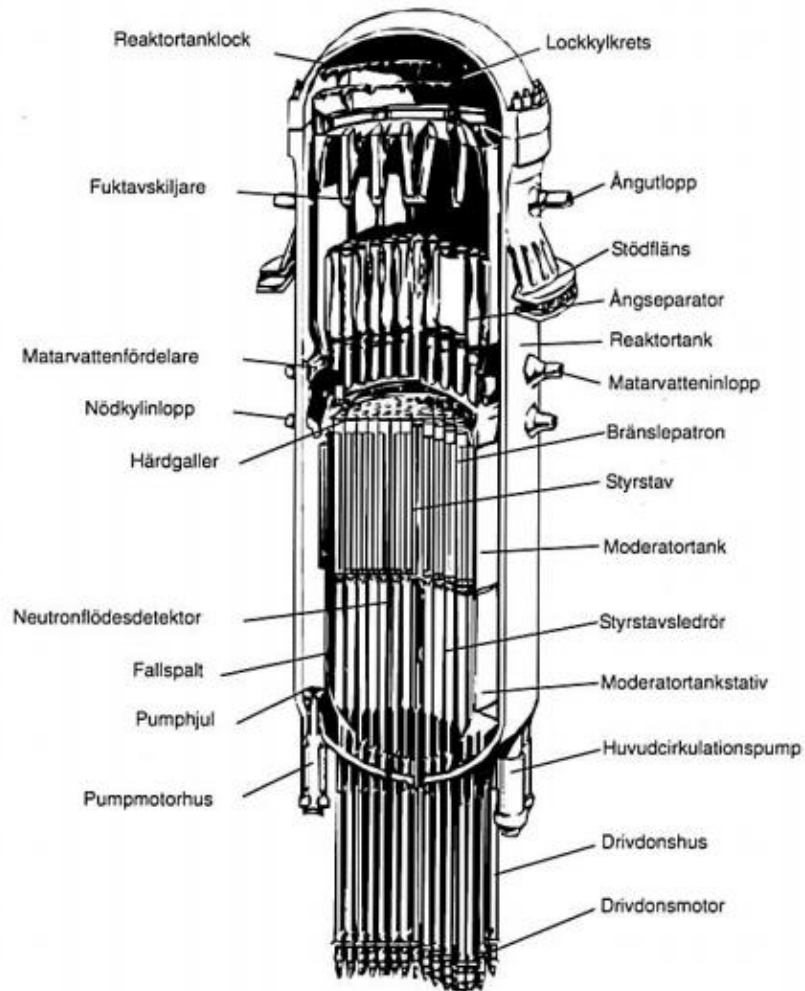
Genom att styra neutronernas flöde kan fissionsprocessen i reaktorn styras. Därmed kan reaktorns effekt kontrolleras. Detta görs med hjälp av styrstavarna. Styrstavar är långa stavar placerade i härden. Styrstavar innehåller material såsom bor, gadolinium eller kadmium, vilka alla är neutronabsorberande material. Då dessa skjuts in i härden absorberar de neutroner och minskar därmed neutronflödet i reaktorn. På detta sätt styrs effektutvecklingen i ett kärnkraftverk (Soleimani-Mohseni 2012).

#### 2.1.1 Reaktortanken, en översikt

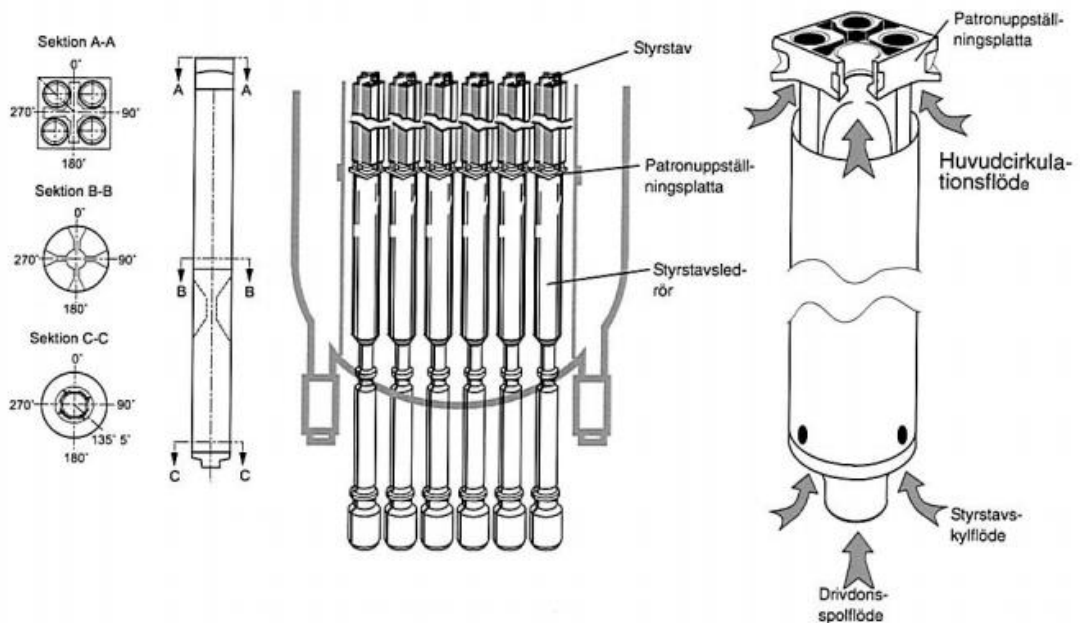
För en kokvattenreaktor (BWR) av den typ som finns i Forsmark 1 och 2 framgår huvudkomponenterna inne i reaktortanken av figur 1. Moderatortanken och stativet separerar härden från fallspalten. Bränslepatronerna fixeras med hjälp av härdgallret i horisontellt led. Vidare drivs ett vattenflöde, så kallat HC-flöde, genom härden med hjälp av åtta huvudcirkulationspumpar. Då vattenflödet når de övre delarna av tanken övergår det till ånga som via ångseparatorn och fuktavskiljaren tas ut till turbinerna. I fuktavskiljaren avskiljs vatten från ångan för att skapa torr och mättad ånga som sedan kan föras in i turbinerna. Det vatten som avskiljs återförs in i huvudcirkulationsflödet via fallspalten (KSU 2005b).

Bränslepatronerna är placerade på en patronuppställningsplatta. Fäst i denna platta är styrstavsledröret vilken omsluter styrstaven då denna är i en helt utdragen position. Patronuppställningsplattan består av fyra positioner för bränsle samt ett korsformat hål där den korsformade styrstaven skall kunna köras upp. Patronuppställningsplatta tillsammans med styrstavsledrör i reaktortanken visas i figur 2 (KSU 2005b).

Styrstaven består av ett så kallat absorbatorkors, ett lyfthandtag, samt ett skaft vilket förbinder korset till drivdonet. Absorbatorkorset är gjort av borkarbid. Styrstavsledröret är i sin nedre del fäst vid drivdonshusets överändar, vilka är instuckna och fastsvetsade i reaktortankens botten. Drivdonshuset omsluter drivdonet vilken har till uppgift att föra styrstavarna in och ut i härden och därmed styra reaktorns effekt (KSU 2005b).



Figur 1 - Reaktortankens huvudkomponenter (KSU 2005b).



Figur 2 - Reaktortankens nedre del (KSU 2005b).

## 2.2 Drivdon

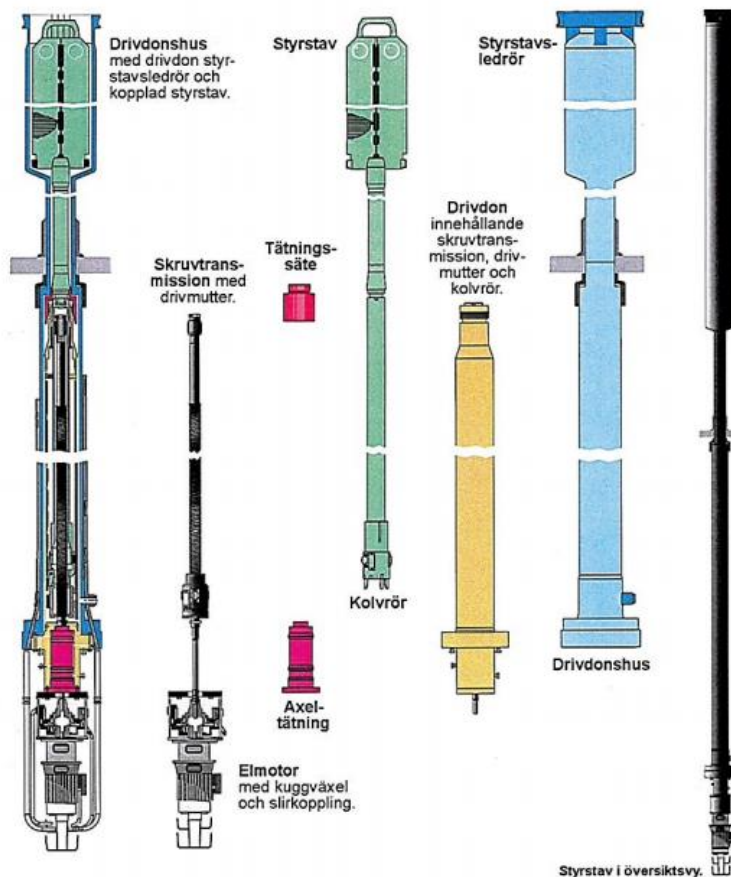
Drivdon är en väsentlig del i funktionen i en kokvattenreaktor (BWR) för att styra reaktorns effekt. I en BWR är drivdonen som visas i figur 2 fästa i styrstavarnas nedre ände.

Manövreringen av en styrstav sker via en drivmutter på en skruv placerad inne i drivdonet och som drivs av en elmotor, en så kallad drivdonsmotor. I dagens svenska BWR finns 109-169 styrstavar med tillhörande drivdon fästa i nederdelen.

Drivdonet består av följande huvuddelar:

- Skruvtransmission
- Kolvrör
- Styr rör
- Lägesindikeringsgivare

Drivdonets olika delar visas i figur 3. I nedanstående avsnitt kommer respektive huvuddelars ingående komponenter och funktion att beskrivas (KSU 2005a).



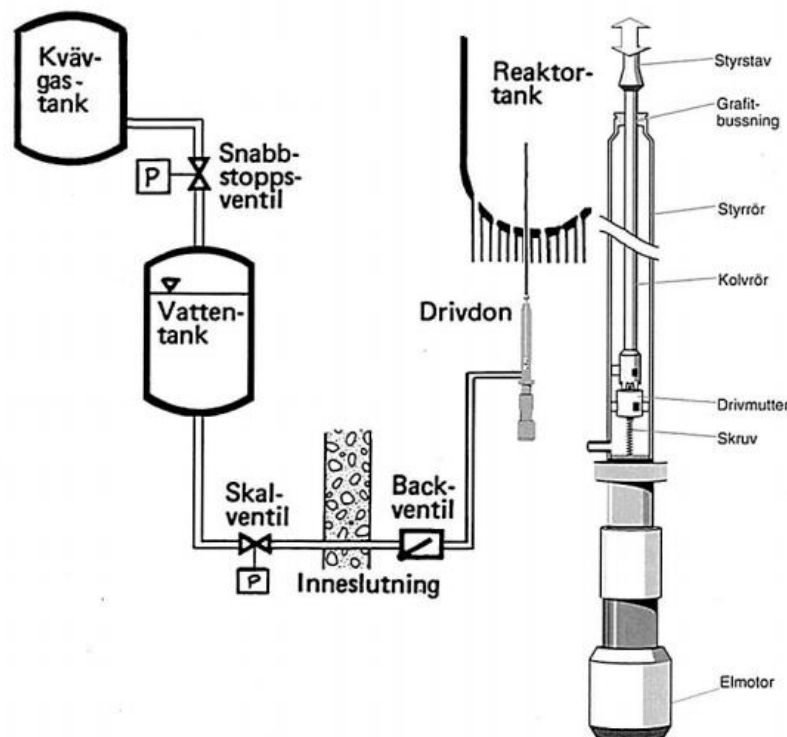
Figur 3 - Drivdonets huvudkomponenter (KSU 2005a).

### 2.2.1 Systemets funktioner

Drivdonens uppgift är att manövrera styrstavarna i reaktorhärden upp och ner för att på så sätt styra reaktiviteten och effektfördelningen i härden. Utöver att föra in styrstavarna i härden har drivdonen även till uppgift att medverka till en bestämning av styrstavens lägesposition i härden med hjälp av lägesindikeringsgivare (KSU 2005a).

På insidan av drivdonets drivmutter finns ett skyddande lager av grafit, så kallad grafitgänga, som underlättar inskrivningen av drivdonet. För att uppnå en ökad redundans i systemet kan styrstaven skruvas in även om drivmutterns ordinarie grafitgångar är slitna. Drivmuttern är därför försedd med en så kallad säkerhetsgänga som möjliggör inskrivning oavsett grafitens slitage (FKA 2019a).

Drivdonens viktigaste funktion är att med hjälp av hydraulisk inskjutning skjuta in styrstavarna i härden vid reaktorstopp, så kallat snabbstoppsfunktion. Detta tar mindre än 4 sekunder och innebär att reaktorn på ett snabbt och säkert sätt kan stoppas. Det hydrauliska systemet består av en ventil där trycksatt vatten släpps igenom och trycker upp kolvröret, vilken styrstavarna är fästa vid. På så sätt säkerställs en snabb inskjutning av styrstavarna. För att öka redundansen i systemet är härden alla drivdon uppdelade i ett antal stycken olika snabbstoppsgrupper vilka var och en är ett oberoende system som var och en oberoende av varandra kan skjuta in sina styrstavar via sitt eget hydrauliska snabbstoppsystem. Varje snabbstoppsgrupp består av en kvävgastank, en vattentank och en snabbstoppsledning (FKA 2019b). Drivdonens snabbstoppsfunktionssystem visas översiktligt i figur 4.



Figur 4 - Systemet för drivdonens snabbstoppsfunktion (KSU 2005a).

Drivdonssystemet har även en diversifierad säkerhetsfunktion vars uppgift är att vid störningar och andra missöden föra in samtliga styrstavar i härden automatiskt. Denna funktion kallas för skruvstoppsfunktionen. Vid inskrivningen manövreras varje drivdon av en elektrisk kuggväxelmotor. Motorn roterar drivdonsskruven, vilken kolvröret är fäst vid. Kolvröret i sin tur är fäst vid styrstaven, vilket innebär att styrstaven på detta sätt skruvas in i härden. Ett momentskydd är placerat mellan skruven och kuggväxelmotorn, vilken indikerar då momentet på skruven blir för högt. Ett högt moment kan innebära att skruven går trögt att skruva in, vilket bland annat kan bero på slitage av grafiten i drivmuttern (FKA 2019c).

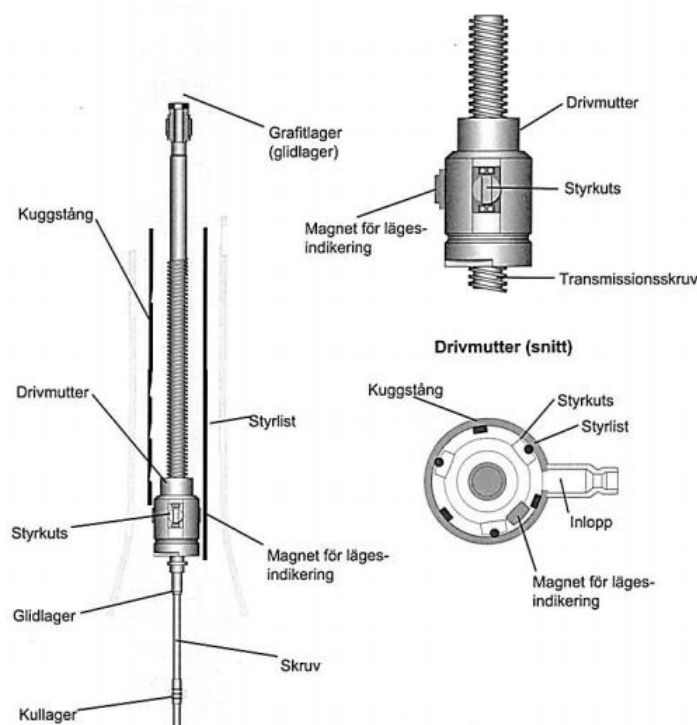
## Skruvtransmission

Skruvtransmissionen har till uppgift att föra in styrstaven i härden då staven manövreras normalt. Den sköter även all utdragning av styrstavarna samt är reserv för inskjutningen av stavar med hydraulsystemet.

Skruvtransmissionen i ett drivdon består av följande huvuddelar:

- Flänsparti med axeltätning
- Skruv med drivmutter
- Elmotor med kuggväxel och momentkoppling

Flänspartiet är placerat längst ner på drivdonet och bär upp donet samt avtätar donet mot trycket i reaktorn, se figur 3. Skruven går igenom flänsen och vidare upp i drivdonet. Då skruven passerar genom flänsen tätas denna av en dubbel axeltätning. I skruvens övre del finns ett grafitlager som centrerar skruven. Drivmuttern är placerad längst ner på skruven, se figur 5. Muttern har ett självsmörjande grafitlager på insidan vilket minskar friktionen mellan skruv och drivmutter då skruven skall skruvas in. Under lagret av grafit finns i drivmuttern även ett metallager av stål vars uppgift är att säkerställa säker inskruvning av skruven oavsett slitning på grafitlagret i muttern. Detta metallager har benämningen säkerhetsgangan (KSU 2005a).

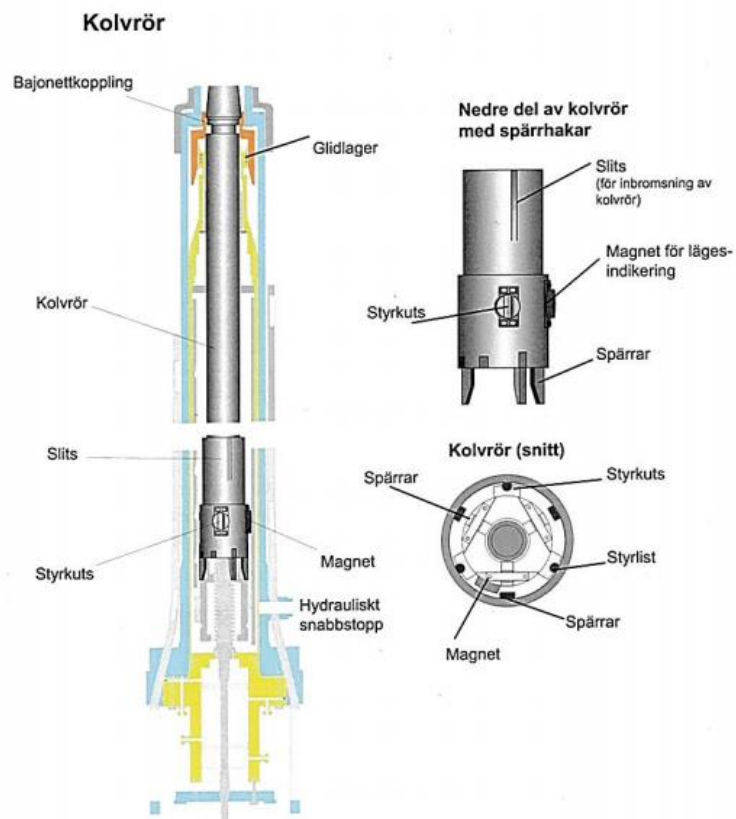


Figur 5 - Skruvtransmission och drivmutter (KSU 2005a).

## Kolvrör

Kolvröret, se figur 6, består av ett långt rör som i nedre änden är fäst i drivmuttern, vilken reglerar kolvrörets läge. I kolvrörets övre ände är styrstaven fäst med hjälp av en så kallad bajonettkoppling. Vid ett snabbstopp skjuts kolvröret in med hydraulfunktionen beskriven ovan. I detta läge skiljs kolvröret från drivmuttern och skjuts upp i härden. Vid normal inskruvning tar det omkring 4 minuter att skruva in skruven i härden, vilket gör att detta inte kan ske vid snabbstopp, utan funktionen finns till som en viktig reservåtgärd om snabbstoppsfunktionen skulle falla. I kolvrörets nedre ände finns tre spärrar vilka hindrar kolvröret från att åka ner efter den hydrauliska inskjutningen. Efter den snabba inskjutningen skruvas skruven in i härden för att efter 4 minuter fästa i kolvröret igen (KSU 2005a).

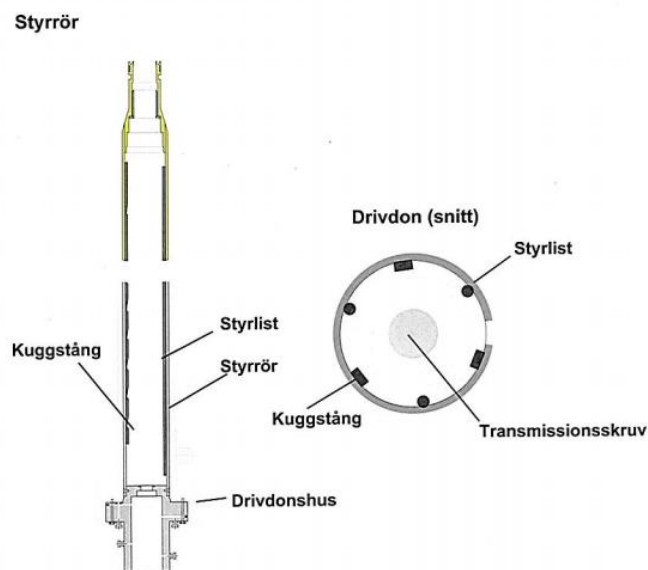




Figur 6 - Kolvrörets komponenter (KSU 2005a).

### Styrrör

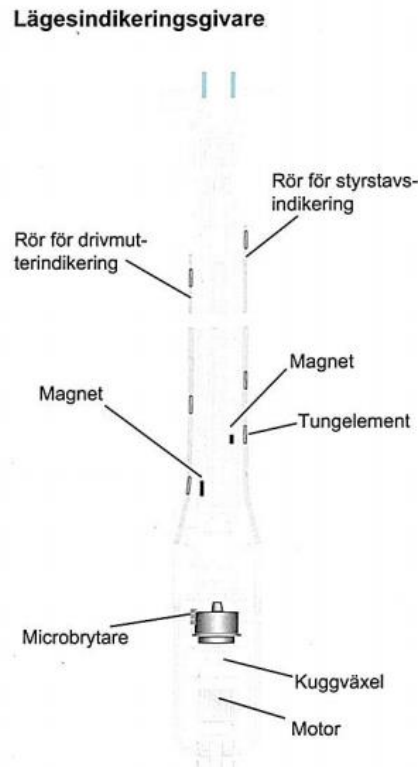
Styrröret är ett rör placerat runt kolvröret. Styrröret styr kolvrörets och skruvens rörelser. Styrrörets nedre del är fäst i flänsen. Styrröret omsluts av drivdonshuset, jämför figur 3 med figur 7 (KSU 2005a).



Figur 7 - Styrrörets komponenter (KSU 2005a).

## Lägesindikeringsgivare

Lägesindikeringsgivare, se figur 8, ger signaler till kontrollrummet om styrstavens position i härden. Lägesindikeringsgivarna består av grovindikeringar och finindikeringar. Grovindikeringarna indikerar varje 10%-läge med hjälp av tungelement fästa på en skena i ett rör utanför drivdonshuset. Finindikeringsgivarna indikerar varje 1% läge av stavens position, vilket görs med tre permanentmagneter eller kamskiva (KSU 2005a).



Figur 8 - Lägesindikeringsgivare (KSU 2005a).

## 2.2.2. Anslutande system

### Styrstavar och styrstavsledrör

Runt varje styrstav i utdraget läge finns ett styrstavsledrör vars nedre ändar är fästa vid drivdonshusets övre ändar. Då styrstaven skjuts in i härden med hjälp av kolvröret, exponeras staven för bränslet eftersom det skyddande styrstavsledröret sitter fäst vid drivdonshuset. I varje styrstavsledrörs övre del finns en så kallad supercell, där fyra bränslepatroner är placerade på en platta med korsformade öppningar för styrstaven. Det är genom denna öppning som styrstaven skjuts in. Längden på styrstavsledrören beror på längden av styrstavarna då krav finns att stavarna måste ha möjlighet att vara helt utdragna ur härden och därmed omsluten av styrstavsledröret. Styrstavsledröret har vidare till uppgift att fördela huvudcirkulationsflödet i bränslet för att på så sätt motverka hydraulisk instabilitet i bränslepatronerna (FKA 2017).

I botten av majoriteten av styrstavsledrören finns vardera åtta stycken borrarade hål, se figur 2 där de benämns styrstavskylflöde. Dessa hål är inte borrarade för någon av positionerna i härdens ytterkant. En viss del av det tidigare beskrivna huvudcirkulationsflödet, vilket flödar genom tanken från botten till toppen, kommer via hålen i styrstavsledrören inuti styrstavsledrören (FKA). Anledningen till att hål är borrarade i de centralare delarna av härdens

styrstavsledrör är för att styra vattnet till högeffektzonen, vilket innebär de centrala delarna av härden (FKA 2020a). Kokning i spalterna mellan bränslepatronerna kan även uppkomma till följd av absorption av strålning i styrstavar, mätsonder och i vatten. Hålen i styrstavsledrörens botten motverkar detta (Andersson 2008).

Bränsleingenjörer på Forsmarks Kraftgrupp tar fram en styrstavsplanering för en femårig cykel för varje reaktorblock. Denna planering baseras på den uträknade förväntade utbränningen av varje bränslestav. Varje bränslecykel är beräknad utifrån att ett visst antal styrstavar i härden är så kallade reglerstavar, vilka har som syftet att behållas inne i härden under reaktorns drift för att på så sätt styra reaktorns effekt. Vilka styrstavspositioner i härden som är reglerstavar varierar mellan olika cykler (Halonen 2015).

I Forsmark Kraftsgrupps simuleringsprogram POLCA7 kan utläsas hur styrstavarna körts över åren, även kallat styrstavarnas sekvenskörning. Där kan även avläsas vilka stavar som varit reglerstavar över åren. Exempel på sekvenskörningar av styrstavar ur POLCA7 över åren för Forsmark 2 kan ses i den fullständiga rapporten tillhörandes FKA (Lindahl 2009).

### **Crudborthållningsflöde (spolflöde)**

Crudborthållningsflöde, även kallat spolflöde, är ett uppåtgående flöde i drivdonen vars uppgift är att spola rent drivdonen och hindra så kallat crud från att komma ner i drivdonen och orsaka slitage på drivdonets komponenter, se figur 2. Crud innebär små partiklar, det vill säga smuts, vilka kommer från reaktortanken (Blom 2019). Crudborthållningsflödet i Forsmark 1 och 2 har idag samma temperatur och flödes hastighet, medans Forsmark 3 jämförelsevis har en annan temperatur på spolflödet, men samma flödes hastighet som övriga verken (FKA 2019b). En högre crudflödes hastighet bidrar till en minskning av risken för deponering av crud på drivdonsskruven (Engrup 1998). Spolflödesledningarna går till respektive snabbstoppsgrupp och förgrenar sig från en gemensam stamledning ut till varje drivdon (FKA 2019b).

## **2.2.3 Slitage av drivdon, nuvarande identifieringsmetoder**

Slitage av drivdon räknas inom projektets avgränsningar som slitage i drivmutterns grafit vilket orsakar glapp, även kallat att drivdonet "går på säkerhetsgången". Skadade och nötta grafitmuttrar har inneburit slitage i drivdonsskruven. Slitaget uppstår till följd av att det grafitlager som sitter på insidan av drivmuttern, se figur 5, slits bort och att skruven därmed går metall mot metall vilket orsakar slitaget. Ett ökat slitage på drivmuttrar har tidigare identifierats i härdens randpositioner på Forsmark 1 och 2 (Blom 2019). Det historiska slitaget av drivmuttrar i Forsmark 1 och 2 diskuteras mer i avsnitt 2.2.5. För identifiering av slitage av drivdon kan flertalet metoder tillämpas. I nedanstående avsnitt förklaras två metoder som kan användas för identifiering av drivdonsslitage.

### **Avläsning av effektkurvor**

Vid revisionsstopp stoppas reaktorn med hjälp av det diversifierande inskruvningssystemet av drivdon in i härden, beskrivet ovan. Detta kallas för att man "löser V-kedjan". Då drivdonsskruven skruvas in i härden registreras detta på en så kallad SODEM-dator inne i kontrollrummet, vilken plottar effekten som elmotorn i drivdonet använder, mot tid för inskruvning. Ju mer effekt elmotorn måste använda för att skruva in donet, desto trögare är inskruvningen. Dessa kurvor fås ut via SODEM-datorn, en kurva per drivdon i härden. För Forsmark 1 och 2 analyseras dessa kurvor för upptäckt av eventuella drivdon vars effekt varit

hög och oregelbunden vid inskruvning. Sannolikheten att dessa drivdon gått på den så kallade säkerhetsgången bedöms vara hög. För exempel på en kurva vars drivdon gått på säkerhetsgången, se avsnitt 2.2.6. Avläsning av effektkurvorna samt urvalet av vilka drivdon som tycks vara slitna görs idag i Forsmark enbart genom okulär besiktning av kurvorna och varje kurva bedöms från fall till fall huruvida den tycks vara slitna. Vid snabbstopp och planerade avställningar i reaktorn under driftsäsongen kan avläsning av effektkurvorna, vilka visar på drivmotorernas effektförbrukning, också tyda på slitage av drivdonen. Ett beslut får då tas, beroende på hur allvarliga effektförändringarna i drivdonskurvan ser ut, huruvida ett underhåll av drivdonet behövs för åtgärd av det specifika drivdonet (Seppälä 2020). Ett drivdon bedöms vara driftklart då effektkurvorna från SODEM-datorn inte ökar markant vid manövrering sedan föregående provtillfälle (Stenmark 2004).

### **Mutterglappsmätning**

Genom så kallad mutterglappsmätning finns möjlighet att mäta glappet mellan drivdonsmutter och drivdonsskruv. Med mutterglapp menas avståndet mellan drivdonsmuttern och drivdonsskraven. Mutterglappet mäts genom att drivmuttern skruvas till sitt maximala läge och i det läget mäts antalet grader som drivmuttern roterat från sin ursprungliga position som muttern hade då mätningen startade. Det maximala läget visar på hur stor andel av grafiten som finns kvar i drivmuttern. Ett stort mutterglapp (>70 grader), indikerar att grafiten inne i drivmuttern är väldigt slitna och att drivdonet har gått på säkerhetsgången.

Drivmutterglappsmätning kan göras i början av varje revision, efter det att reaktorn stängts ner. Möjligheten finns då att mäta drivmutterglapp på drivdon utan att montera ner hela drivdonet från härden. På så sätt kan ett slitage i en drivmutter identifieras innan drivdonet går på säkerhetsgången. I Forsmark 1 och 2 måste emellertid flertalet komponenter anslutna till drivdonet monteras ner för att mätningen skall kunna genomföras på drivdonet (Charoenrung 2020). I appendix 3, figur 55, kan en bild ses av hur mutterglappsmätning kan genomföras.

Då Forsmark 1 och 2 startades valdes att drivmutterglappsmätning skulle göras på drivdon inne i härden för att på så sätt upptäcka slitage och därmed välja ut vilka drivdon som skulle tas ut för service. Från och med revisionen 1996 valde Forsmark emellertid att övergå till att ha ett fast underhållsintervall på drivdonen på Forsmark 1, utan att genomföra mutterglappsmätning under tanken på ett bestämt antal drivdon, som tidigare (Liljedahl 1995). År 1997 skedde samma förändring för Forsmark 2. Motiveringen till detta var bland annat tidseffektivisering av underhållet av drivdon under revisionerna, då den extra tid av revisionen det tar att mäta mutterglapp inne under härden för drivdonen, därmed skulle försvinna. Möjligheten för identifiering av slitage av drivdon via mutterglappsmätning försvann i och med denna förändring i underhållsstrategi (Meyer 1997). År 2004 gjordes en utredning på Forsmark 1-3 kring möjligheterna att utveckla en metod för kontroller av mutterglapp på drivdon under drift. Utredningens resultat blev att flertalet automatiska mätmetoder som kan användas för kontroll av mutterglapp räknas som förstörande provning då drivmuttern vid mätningarna utsätts för okontrollerade stötar då drivdonet körs in ända till dess att slirkopplingen löser ut mekaniskt. En mätmetod där mutterglappet kan mätas mot ut-position rekommenderas därför av utredningens rapport. För manuell kontroll av mutterglapp rekommenderar utredningen att Ringhals modell för manuell mätning av mutterglapp skall användas. Mätningen utförs av en förlängd mätadapter och en lös drivdonsmotor för manövrering av kolvrör och styrrör, vilka sedan flyttas mellan varje nytt mätobjekt. Körningen körs utanför reaktortanken och gör därför att den erhållna stråldosen hos personalen sänks (Fosstveit 2004). Enligt nuvarande underhållsstrategi för drivdon i Forsmark 1 och 2 (Seppälä 2018d), har ovanstående föreslagna metod att mäta mutterglapp enligt Ringhals modell ännu inte tillämpats.

## 2.2.4 Byte av drivdon

Bytesstrategin och underhållsstrategin för drivdonen bestäms av donens nuvarande underhållsstrategi och underhållsplan. De drivdon som under varje revision byts enligt denna underhållsplan, byts för förebyggande underhåll (FU). Drivdon som byts med FU underhålls vid uttag ur härden oavsett slitagenivå på donet. Detta för att förebygga eventuella framtida slitage. Utöver dessa drivdon tillkommer i förekommande fall drivdon som byts under revisionerna på grund av att de har gett indikationer, beskrivna i avsnitt av slitageidentifiering av drivdon, på att de är slitna. Tillkommande drivdon servas med så kallat avhjälpande underhåll (AU). Vid identifiering av slitna drivdon under inskrivning av den tidigare nämnda ”V-kedjan”, så kan fler så kallade AU-drivdon tillkomma vilka istället läggs in i underhållsplaneringen av drivdonen för kommande revision. För de drivdon som identifieras som slitna vid snabbstopp, men som inte bedöms vara av akut slitage, görs därmed inget underhåll av drivdonen för åtgärd, utan dessa drivdon servas istället kommande revision (Seppälä 2020).

### Nuvarande underhållsstrategi

Från och med år 2021 har en ny revisionscykel om X-X-Y antal dygn tagits fram för Forsmark 1 och 2. Denna nya revisionscykel har medfört att drivdonsunderhåll måste planeras på samtliga revisioner för att förebyggande underhåll skall hinna genomföras inom drivdonens underhållsplan. Intervallet för förebyggande underhåll, så kallat FU-intervall, för respektive drivdon är enligt nuvarande underhållsplan 10 år. För att anpassa drivdonsunderhållet efter den nya revisionsplanen är underhållsstrategin att från och med år 2021 byta x antal drivdon under revisionerna om X dygn, samt att byta y antal drivdon på revisionerna om Y dygn. På så sätt överskrids inte det 10 åriga FU-intervallet och samtliga drivdon underhålls inom ett intervall av 10 år. Vid eventuell tillkomst av drivdon som kräver avhjälpande underhåll kan vissa FU-drivdon komma att flyttas till kommande års revision (Seppälä 2018d). För information om nuvarande underhållsplan för drivdonen i Forsmark 1 och 2, se appendix 1.

## 2.2.5 Historik

### Tidigare underhållsstrategier

Från och med år 2016 infördes nuvarande förebyggande underhållsintervall (FU-intervall) på drivdonen på 10 år. Innan dess var FU-intervallet 8 år. Anledning till ändringen av FU-intervall är optimering av revisionstiderna (Al-Afifi 2015b). Under 90 talet genomfördes flertalet underhållsfria revisioner på drivdonen. Detta medförde svårigheter att senare komma i fas med FU-intervallerna av drivdon. I början av 2000 talet valdes att göra en underhållsplan för drivdonen till 8 årigt FU-intervall. År 2005-2006 genomfördes stora underhåll av drivdon på Forsmark 1 och 2 vilket medförde en viss ändring i det dåvarande schemat för drivdonens FU-intervall (Al-Afifi 2015a).

### Riskbedömning för slitage av drivdon under 10 års serviceintervall

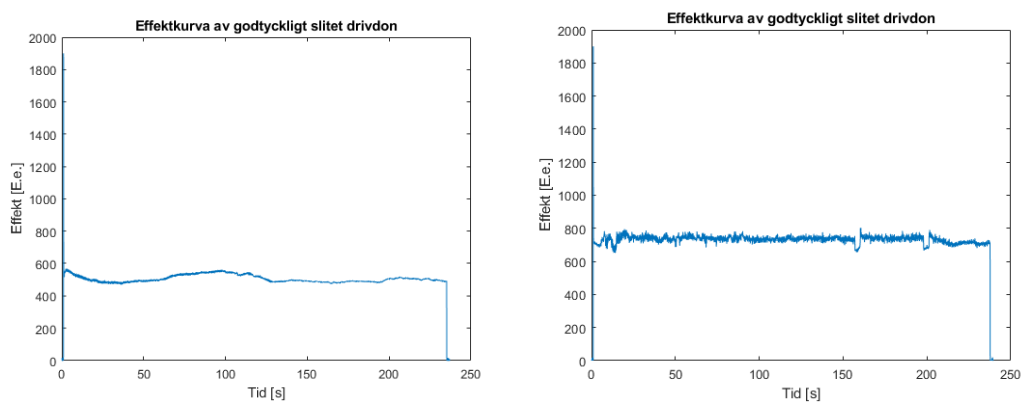
En konsekvensbedömning har genomförts med avseende på risken av slitage på drivdonen vid det ökade FU-intervallet från 8 år till 10 år. Efter utvärdering av nytt underhållsintervall konstaterades att en höjning av underhållsintervallet från 8 år till 10 år skulle medföra att den “acceptabla risknivån” för drivdonet höjs med avseende på slitagemånen i grafiten. Undersökningen som gjordes då visade emellertid att det ökade slitaget inte skulle påverka drivmuttern och skruven i drivdonet då slitagemånen för grafiten bedömdes vara tillräckligt

stor för att klara av ytterligare 2 år innan service, utan att drivdonet skulle gå på säkerhetsgängen (Al-Afifi 2015a).

## 2.2.6. Teori för analys av drivdonens effektkurvor

### Kurvornas utseende

För en tydlig analys av effektkurvorna, de så kallade ovan beskrivna SODEM-kurvorna, kan parametrar i både tidsdomänen och frekvensdomänen analyseras för respektive kurva och drivdon. Två exempel på hur effektkurvor från ett drivdon kan se ut ses i figur 9. I båda exemplen har drivdonen upptäckts ha gått på säkerhetsgängen vid förebyggande underhåll samma år. Båda kurvorna, trots deras olikheter, kan därmed antas visa slitna drivdon. I figur 10 kan ses ett drivdons effektkurva vilken ej har gått på säkerhetsgängen. Således kan figur 9 och 10 jämföras för identifikationer av likheter och skillnader mellan slitna och ej slitna drivdons effektkurvor.



Figur 9 - Effektkurvor från SODEM-datorn av ett godtyckligt drivdon nr 1 och 2, slitna.



Figur 10 - Effektkurva från SODEM-datorn av ett godtyckligt drivdon nr 3, ej slitet.

## Drivdonsmotorernas egenskaper

Drivdonsmotorerna utövar mekanisk kraft vilken överförs till drivdonet och ger upphov till inskrivningen av drivdonet i härden. För att enkelt kunna tyda framtagna effektkurvor i frekvensdomänen krävs information om drivdonskomponenternas egenskaper vilka påverkar frekvenskurvornas utseende. Följande relevanta egenskaper hos drivdonskomponenterna visas i tabell 1. Då SODEM-kurvorna enbart visar den totala effekten som drivdonsmotorn drar ger kurvorna således ingen information om relationen mellan den aktiva och den reaktiva effekten, vilket visar på förhållandet mellan ström och spänning. Därmed är dessa parametrar inte lika relevanta att analysera jämfört med frekvensen. I tabell 1 visas egenskaper hos samtliga drivdonsmotorer och kuggväxlar på Forsmark 1 och Forsmark 2.

Tabell 1 - Egenskaper hos samtliga drivdonsmotorer och kuggväxlar på Forsmark 1 och Forsmark 2 (FKA 2019a), (Asea Atom 1975).

	Varvtal [rpm]	Frekvens [Hz]	Samplingstid [s]	Samplingsfrekvens [Hz]
Drivdonsmotor	1410	23,5		
Utgående varvtal på kuggväxeln	~ 90	1,5		
Effektkurva från varje drivdonsmotor			0,04	25

## Linjärtrendning

Linjärtrendning är ett samlingsnamn på metoder som används för identifikation av linjära trender i en samling av olika datapunkter. Det finns ett flertal metoder som kan användas för identifikation av linjära samband. I denna rapport har metoden kallad *Forward-backward filtering* använts, vilken används i MATLAB och skapar en linjärisering av en kurva av godtyckliga diskreta datapunkter (Math Works 2020). Funktionen fungerar på så sätt att ett linjärt filter  $Y(t)$  appliceras på den givna datamängden. Filtret  $Y$  kan beskrivas enligt ekvation (1):

$$Y = HU + Ox \quad (1)$$

I ekvation (1) beskriver vektorn  $U$  inparametrarna till filtret  $Y$  och matrisen  $H$  beskriver den så kallade Toeplitz-matrisen vilken beskriver impulssvaret. Matrisen  $O$  kallas för observationsmatris och beskriver antalet inparametrar som observeras av filtret (Gustafsson 1994).

## Fouriertransformation

En fouriertransformation omvandlar en periodisk funktion med periodlängden  $L$  för att beskriva denna med avseende på dess frekvenser. Vid en fouriertransformation skapas en komplex funktion vars absolutvärde motsvarar mängden av de frekvenser som går att återfinna i ursprungsfunktionen. Argumentet av fouriertransformationen motsvarar fasförskjutningen av den huvudsakliga sinusformen i den aktuella frekvensen. För analyser av frekvensvariationer i en samling av diskreta datapunkter är därför fouriertransformation ett lämpligt verktyg att använda. Fouriertransformationen av en integrerbar funktion  $f(t)$ , vilken går mot oändligheten, kan definieras enligt ekvation (2) (Lindahl 2013).

$$F(\omega) = F(f(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad \omega, t \in R \quad (2)$$

Genom fourieranalys kan egenskaperna hos drivdonet analyseras och i de låga frekvenserna kan drivmutterns mekaniska egenskaper identifieras. Analys av de låga frekvenserna i fourieranalysen kan därmed ge en indikation på det mekaniska tillståndet på drivdonsmotorn

(Granjon 2011). I fallet med drivdonens effektkurvor innebär en hög frekvensamplitud vid en låg frekvens därmed att motståndet för drivdonsmotorn att skruva in drivdonsskruven är lågt. Ju högre frekvensamplituder som fås vid högre frekvenser desto mer motstånd kan antas komma från drivdonsskruven. Vidare kan en frekvensanalys även urskilja specifika motoregenskaper i frekvenskurvas nedre intervaller vilka skiljer sig från resterande mängd frekvensamplituder och visar, i fallet med effektkurvornas analys, drivdonsskruvens varvtal. För analys av frekvenserna i effektkurvorna används kurvornas samplingsfrekvens, vilket visas i tabell 1.



### 3. Experimentell metod för analys av drivdonens effektkurvor

Genom observation av effektkurvor som tidigare nämnts i avsnitt 2.2.6, har drivdon som är slitna identifierats på Forsmark 1 och 2. Genom en förbättrad observation av dessa effektkurvor vid lösning av "V-kedjan", kan en bättre analys av slitageläget för respektive drivdon göras inför varje revision. Detta skulle innebära att slitna drivdon skulle kunna identifieras i ett tidigt stadium, innan slitaget har blivit så stort att grafiten slitits ner så pass långt att donet gått på säkerhetsgången.

För att förbättra analysen av effektkurvorna inför varje revision har effektkurvor från tidigare revisioner analyserats. Effektkurvor vars drivdon är dokumenterade att ha gått på säkerhetsgången, se resultatdel 4.1, har varit i fokus för analysen. En jämförelse gjordes av dessa drivdons effektkurvor från den revision då de dokumenterades att ha gått på säkerhetsgången, med effektkurvorna från samma drivdon åren före donet gått på gången. På så sätt kunde möjliga indikationer på kurvorna åren innan donet gått på säkerhetsgången identifieras. Vidare analyserades flertalet drivdon vilka inte dokumenterats ha gått på säkerhetsgången, för jämförelse av de drivdon vilka slitits och gått på säkerhetsgången. Analyserna gjordes genom att respektive effektkurva plottades i MATLAB. I nedanstående avsnitt beskrivs den experimentella metoden samt valda analysmodeller för undersökningen av drivdonens effektkurvor. I appendix 2 visas de koder i sin helhet som framtagits för genomförande av analysen.

## 3.1 Val av analysmodeller

För att undersöka huruvida indikationer på fel i drivdonen kan avläsas ur effektkurvorna i ett tidigt stadi valdes två modeller ut för undersökningen. Ur dessa två modeller valdes fem parametrar ut att analyseras separat för varje drivdons effektkurva, för exakt beskrivning av vilka parametrar som togs fram se avsnitt 3.4.

### 3.1.1 Linjärtrendning

Den första metoden som valdes var linjärtrendning av mätdatan i tidsdomänen för varje enskilt drivdon. För identifiering av skillnader i medelamplitud på effektkurvan i tidsdomänen kan enkelt medeleffekten beräknas baserat på samtliga punkter i effektkurvan. För identifiering av lokala svängningar i effektkurvan kan en jämförelse göras mellan en trendlinje och effektkurvan. Trendlinjen skapas med hjälp av en linjäranpassning vilken kan skapas med hjälp av MATLABs inbyggda funktion, *Forward-backward filterning (filtfilt)*, för linjäranpassning.

### 3.1.2 Analys av frekvensvariationer

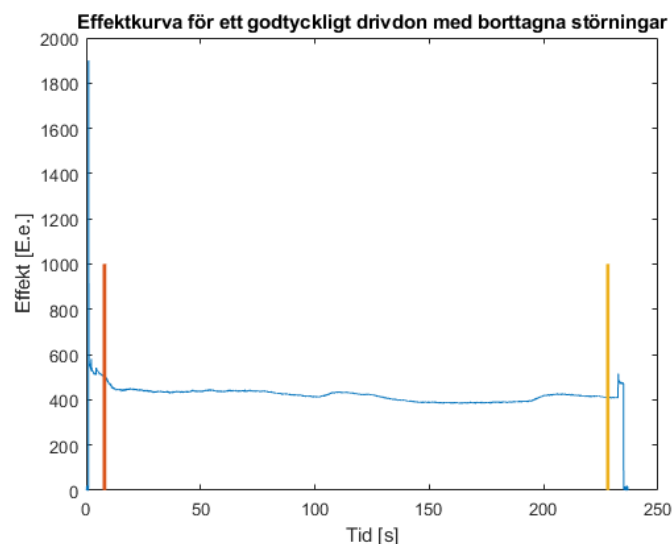
Den andra metoden som användes för identifiering av intressanta slitageindikationer var fouriertransformation. För identifiering av indikationer i frekvensdomänen på att drivmuttern har slitits kan som tidigare nämnts frekvensanalys användas. Genom fourieranalys kan mutterns egenskaper analyseras och i de låga frekvenserna i analysen kan drivmutterns mekaniska egenskaper identifieras. Analys av de låga frekvenserna i fourieranalysen ger indikationer på det mekaniska tillståndet på drivdonsmotorn. I frekvensdomänen kan även den totala medelfrekvensen beräknas för varje specifik effektkurva.

I analysen transformerades således samtliga effektkurvor för varje enskild körning till frekvensdomänen genom MATLABs inbyggda *Fast Fourier Transformation* funktion. Baserat på denna transformering till frekvensdomänen framtoogs sedan en kurva för varje enskilt drivdon vilken visade frekvens [Hz] i förhållande till frekvensamplitud.

## 3.2 Urval av mätdata

### 3.2.1 Extrahering av data

Samtliga mätpunkter i samtliga drivdonskörningar beräknades med undantag för de höga variationerna i effekt som uppkom i kanterna av varje kurva till följd av den startström som tillkom för drivdonsmotorn i början av varje inskrivning. Ändpunkterna togs således bort enligt figur 11 för en mer korrekt analys. Vidare analyserades enbart kurvor av 100 % inskrivning i härden. Detta för att få en så jämförbar analys som möjligt mellan respektive drivdons effekt. Övriga drivdonskörningar vilka inte innehöll data för 100 % inkörning i härden sållades därför bort. Analyserna av effektkurvorna från drivdonens inskrivning valdes enbart att göras för drivdonen på Forsmark 2. Valet baserades på den något större slitagebild som observerats för Forsmark 2, jämfört med Forsmark 1, de senaste 10 åren. Detta gjorde Forsmark 2 mer intressant att analysera. Resultatet av analysen bedöms dock kunna appliceras även på Forsmark 1, då verkens uppbyggnad är mycket lika.



Figur 11 - Exempel på borttagningar av ändpunkter i effektkurvorna.

### 3.2.2 Kategorisering av data

För identifiering av indikationer på att drivdonen gick samt var nära att börja gå på säkerhetsgången, gjordes ett visst urval av de effektkurvor som undersöktes. Urvalet av effektkurvor baserades till största del på det framtagna historiska slitaget av drivdonen. Urvalet bestod av ett visst antal drivdon som dokumenterats ha gått på säkerhetsgången samt ett visst antal drivdon som dokumenterats inte ha gått på säkerhetsgången vid något tillfälle under verkets livstid. Samtliga valda drivdon att undersöka analyserades för ett tiotal år tillbaka i tiden. I undersökningen delades samtliga effektkurvor in i kategorierna "Sliten" (1), "Nästan sliten" (2), samt "Ej sliten" (3). I kategorin "Sliten" klassificerades alla drivdonskörningar där drivdonet dokumenterats ha gått på säkerhetsgången. Kategorin "Nästan sliten" definierades för samtliga drivdonskörningar som genomförts under hela året innan drivdonet i fråga hade dokumenterats gå på säkerhetsgången. Övriga drivdonskörningar klassificerades under kategorin "Ej sliten". Dessa tre kategorier av slitage kommer vidare i rapporten benämnas som slitagekategori (1) *Sliten*, (2) *Nästan sliten* respektive (3) *Ej sliten*. Totalt undersöktes 19 stycken drivdonskörningar i kategori 1, 27 stycken drivdonskörningar i

kategori 2 samt 1683 stycken drivdonskörningar i kategori 3. Samtliga tre kategorier sammanställs i tabell 2.

*Tabell 2 – Sammanställning av de tre kategorierna för analys av drivdonsslitagets påverkan på effektkurvorna.*

<b>Kategori</b>	<b>Namn</b>	<b>Antal körningar (st)</b>
1	Slitna drivdon	19
2	Nästan slitna drivdon	27
3	Ej slitna drivdon	1683

## 3.3 Jämförda parametrar

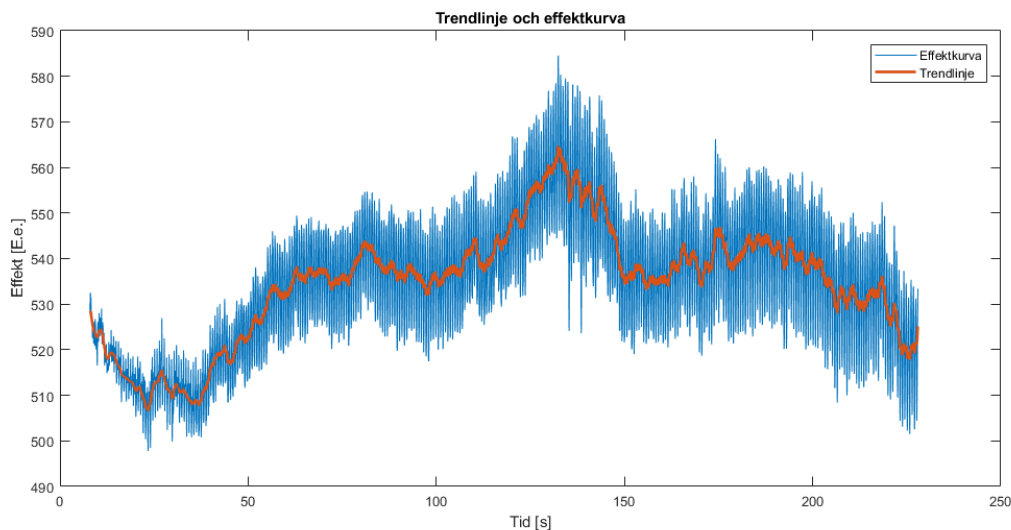
För jämförelse mellan de tre kategorierna för identifikation av skillnader mellan slitagekategorierna 1, 2 samt 3, valdes fem parametrar att analyseras i effektkurvorna. Samtliga parametrar samt hur respektive parameter framtoogs ur analysen beskrivs i nedanstående avsnitt.

### 3.3.1 Tidsbaserade värden

Baserat på den ursprungliga effektkurvan framtoogs följande parametrar för samtliga drivdonskörningar i kategori 1, 2 och 3.

- Medelamplitud av den totala effektkurvan exklusive störningar i kurvans ändpositioner.
- Maximal amplitud av bruset i effektkurvorna, se figur 12, hädanefter benämnt som störningarna i respektive effektkurva.

Exempel på en linjärtrendning, med hjälp av MATLABs inbyggda funktion *filtfilt*, av en effektkurva från ett godtyckligt drivdon visas i figur 12. Ur figur 12 kan störningsamplituden av effektkurvan beräknas genom en beräkning av skillnaden mellan trendlinjen (röd) och effektkurvan (blå), för ett visst tidsintervall. Således kan den maximala störningsamplituden beräknas.



Figur 12 - Linjärtrendning av godtyckligt drivdons effektkurva med hjälp av MATLABs inbyggda funktion *filtfilt*.

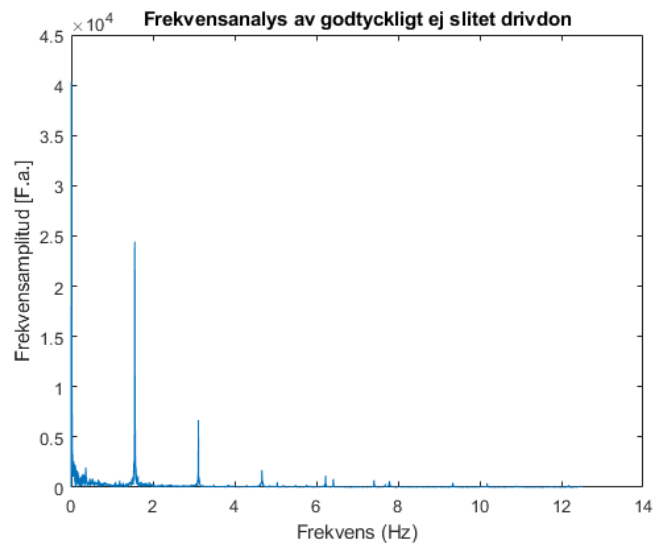
### 3.3.2 Frekvensbaserade värden

Baserat på framtagen effektkurva i frekvensdomänen framtoogs följande parametrar för samtliga drivdonskörningar i kategori 1, 2 och 3. I samtliga frekvenskurvor kan en ökad frekvensamplitud identifieras i intervallen 1.4-1.7 Hz samt 3.0-3.3 Hz, se figur 13, vilken visar ett godtyckligt drivdon i frekvensdomänen. Anledningen till detta är de mekaniska egenskaperna hos drivdonet vilken beskrivs i tabell 1. Som tidigare nämnts i avsnitt 2.2.6, tabell 1, kan de mekaniska egenskaperna urskiljas i de lägre frekvenserna. Samplingsfrekvensen för samtliga analyserade drivdons effektkurvor var 25 Hz. Detta eftersom samplingstiden var 0.04 sekunder, se tabell 1. Således är det analyserade

frekvensintervallet för identifiering av slitage 0-12.5 Hz, eftersom fourieranalysen visar en spegling av frekvenserna efter halva intervallet för samplingsfrekvensen.

De mest intressanta frekvensområdena är således:

- Medelamplitud av frekvensen för hela analyserade frekvensintervallet om 12.5 Hz.
- Maximal amplitud av frekvensen för frekvensintervallet 1.4-1.7 Hz.
- Maximal amplitud av frekvensen för frekvensintervallet 3.0-3.3 Hz.



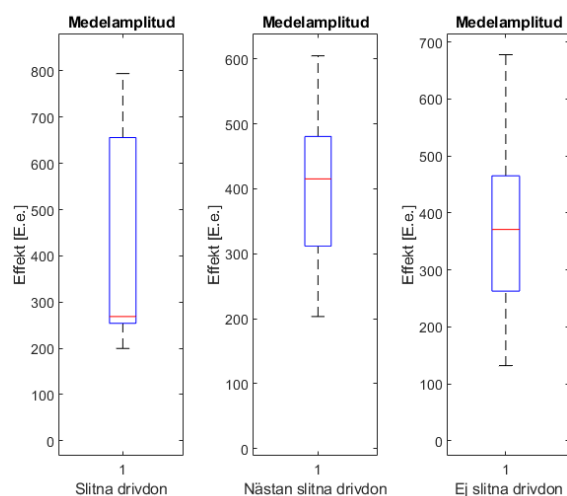
Figur 13 - Fouriertransformation av godtyckligt drivdons effektkurva.

### 3.4 Jämförelse mellan alla drivdonskurvor

För jämförelse av de fem framtagna parametrar mellan respektive kategori beräknades först ett medelvärde, en median och en standardavvikelse ut för respektive kategori 1, 2 och 3. För förtydligande framtogs således följande parametrar.

- Ett medelvärde, en median och en standardavvikelse av medelamplituden för samtliga körningar i kategori 1, 2 respektive 3.
- Ett medelvärde, en median och en standardavvikelse av den maximala störningsamplituden för samtliga körningar i kategori 1, 2 respektive 3.
- Ett medelvärde, en median och en standardavvikelse av medelamplituden av frekvensen (inom intervallet 0-12.5 Hz) för samtliga körningar i kategori 1, 2 respektive 3.
- Ett medelvärde, en median och en standardavvikelse av maximala frekvensamplituden för intervallet 1.4-1.7 Hz för samtliga körningar i kategori 1, 2 respektive 3.
- Ett medelvärde, en median och en standardavvikelse av maximala frekvensamplituden för intervallet 3.0-3.3 Hz för samtliga körningar i kategori 1, 2 respektive 3.

Vidare ritades kurvor upp för samtliga jämförda parametrar i respektive kategori, för en tydlig illustration av likheter och skillnader hos egenskaperna av drivdonen i respektive kategori. För tydlig identifiering av skillnader mellan slitna, nästan slitna och ej slitna drivdon valdes låddiagram att användas se figur 14. För samtliga låddiagram visas medianen av samtliga analyserade punkter i respektive kategori som en röd markering i den blå lådan. Lådans övre kvartil illustrerar de 25 % av punkterna som befinner sig över medianen och lådans nedre kvartil visar de 25 % av punkterna som befinner sig nedanför medianen. Den blå lådan, se avsnitt 4.4, illustrerar således 50 % av det totala antalet punkter i analysen, vilket även benämns som kvartilavståndet, IQR. Utanför kvartilavståndet markeras det streckade avståndet till  $1,5 \cdot \text{IQR}$  stycken punkter som befinner sig utanför samt under lådan. Mätpunkter som hamnar utanför detta maximala avstånd markeras med röda kryss och benämns som utliggare av den totala datamängden. Således kan utstickande punkter i den totala datamängden enkelt identifieras. Vidare illustrerar låddiagrammen spridningen av mätpunkterna i varje analyserat fall. Resultatet av samtliga uträknade parametrar, samt ritade kurvor för respektive kategori av drivdons slitage visas i avsnitt 4.4.

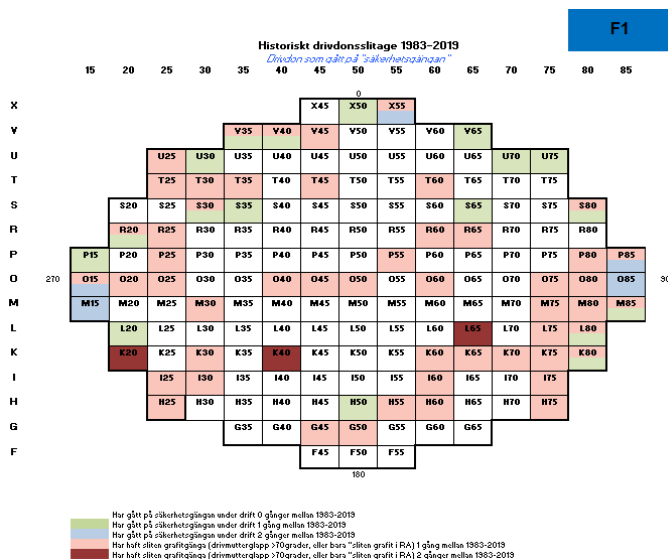


Figur 14 - Exempel på låddiagram som användes vid jämförelser av resultatet för kategori 1, 2 respektive 3.

# 4. Resultat och diskussion

## 4.1. Slitage av drivdon under livstiden för Forsmark 1 och 2

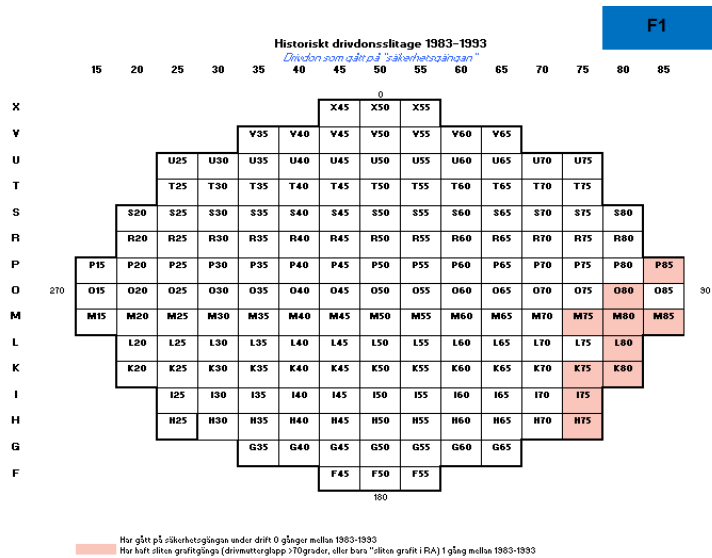
Baserat på en omfattande litteraturstudie och kartläggning av revisionsrapporter för Forsmark 1 och Forsmark 2 mellan åren 1983-2019 har ett resultat av det totala historiska slitaget av drivdonens säkerhetsgंगा på respektive verk tagits fram. Litteraturstudien baseras även på inläsning av arbetsorderna för avhjälpande underhåll (AU) av samtliga drivdon i Forsmark 1 och 2. Resultatet av litteraturstudien visas schematiskt i figur 15-22. I figur 14 visas det totala dokumenterade drivdonsslitage på Forsmark 1 för hela den analyserade tidsperioden om 36 år. Figur 18 visar respektive slitage för Forsmark 2. För att tydligt identifiera trender i slitage mellan olika tidsperioder under det totala analyserade tidsförloppet har slitaget i respektive verk även delats in i kortare tidsperioder, för att enkelt illustrera slitaget under respektive period, se figur 16-18 samt figur 20-22. För ytterligare information om exakta årtal då varje drivdonsslitage uppstod hänvisas till den fullständiga rapporten tillhörande FKA.



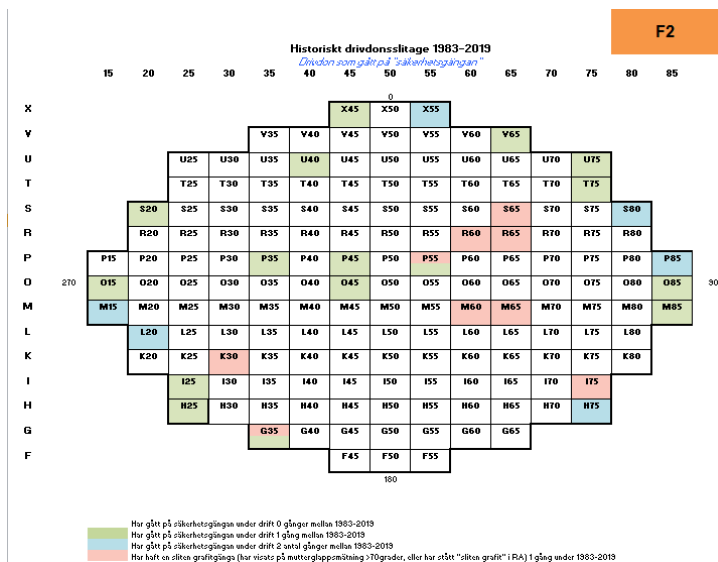
Figur 15 – Drivdon som gått på säkerhetsgängen på F1 mellan 1983 och 2019 (Bäversten 1983a), (Ode 1984), (Wadsten 1985a), (Wadsten 1986a), (Liljedahl 1988), (Liljedahl 1989), (Stötsberg 1990a), (Stötsberg 1991), (Liljedahl 1993), (Liljedahl 1994), (Liljedahl 1995), (Liljedahl 1996), (Liljedahl 1997), (Liljedahl 1998), (Liljedahl 1999a), (Johansson 2000a), (Liljedahl 2001), (Liljedahl 2002a), (Johansson 2004), (Johansson 2005), (Kylengren 2006), (Kylengren 2007), (Kylengren 2008), (Salonpää 2009), (Svanholm 2010), (Svanholm 2011), (Svanholm 2012a), (Svanholm 2013), (Svanholm 2014a), (Svanholm 2015a), (Svanholm 2016a), (Svanholm 2017a), (Seppälä 2018b), (Seppälä 2019a).



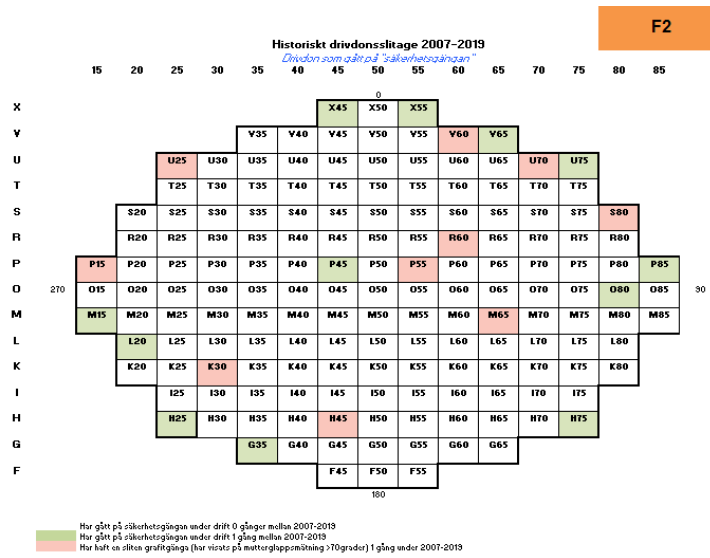




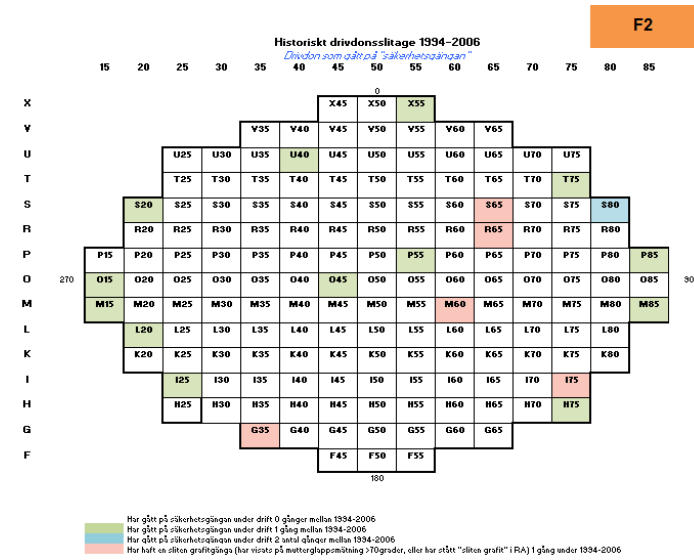
Figur 18 – Drivdon som gått på säkerhetsgöngen på F1 mellan 1983 och 1993.



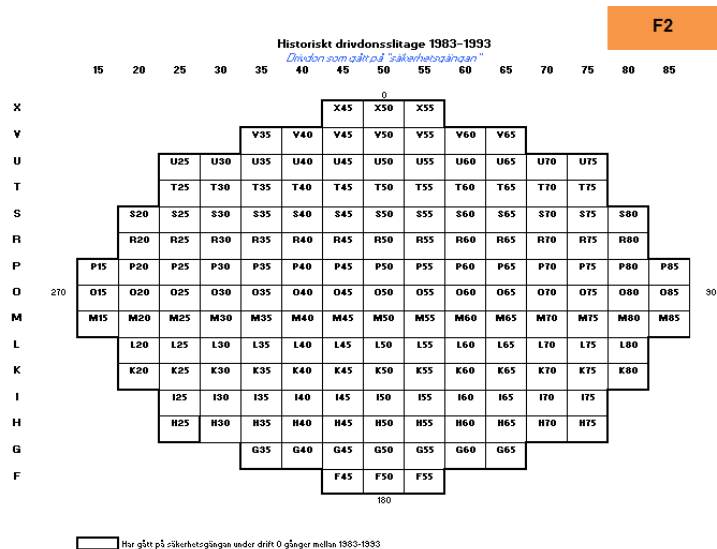
Figur 19 – Drivdon som gått på säkerhetsgöngen på F2 mellan 1983 och 2019 (Bäversten 1983b), (Wadsten 1985b), (Wadsten 1986b), (Stötsberg 1990b), (Stötsberg 1992), (Persson 1994), (Söderström 1995), (Meyer 1996), (Meyer 1997), (Meyer 1998), (Liljedahl 1999b), (Johansson 2000b), (Petersson 2001), (Liljedahl 2002b), (Liljedahl 2003), (Liljedahl 2004), (Kylengren 2005), (Lundgren 2006), (Salonpää 2007), (Salonpää 2008), (Kylengren 2009), (Kylengren 2010), (Kylengren 2011), (Svanholm 2012b), (Salonpää 2013), (Svanholm 2014b), (Svanholm 2015b), (Svanholm 2016b), (Svanholm 2017b), (Seppälä 2018c), (Seppälä 2019b).



Figur 20 – Drivdon som gått på säkerhetsgölgngen på F2 mellan 2007 och 2019.



Figur 21 – Drivdon som gått på säkerhetsgölgngen på F2 mellan 1994 och 2006.



Figur 22 – Drivdon som gått på säkerhetsgömslans på F2 mellan 1983 och 1993.

Enligt figur 15 och 19 kan en tydlig trend urskiljas gällande hur de drivdon som gått på säkerhetsgömslans över åren är placerade i härden. Drivdonen i randpositionerna för Forsmark 1 och 2 har slitits i högre utsträckning jämfört med drivdonen i övriga positioner i härden. Orsaken till detta ökade slitage i randen har inte tidigare fastslagits av Forsmarks Kraftgrupp AB (Blom 2019) och i kommande avsnitt av rapporten framläggs flertalet möjliga orsaker till det historiska slitaget av drivdonen som gått på säkerhetsgömslans, samt kring orsaker till varför randpositionerna i härden utsatts i en högre utsträckning för slitaget. Vidare visar figur 18 och 22 även på bristen av information kring slitage av drivdon som gått på säkerhetsgömslans. I förekommande fall har information kring slitage inte funnits att tillgå, vilket är anledningen till att figur 22 inte har några slitage markerade. Mer om detta i avsnitt 4.1.3.

För de drivdon i Forsmark 1 respektive 2 som gått på säkerhetsgömslans, har respektive dons livstid analyserats för undersökning kring hur länge varje drivdon suttit inne i reaktorn innan den gått på säkerhetsgömslans. I tabell 3 kan läsas att tiden då dessa aktuella drivdon suttit inne i tanken, innan de upptäcks ha gått på säkerhetsgömslans, varierar mellan de olika drivdonen. Det går inte att se någon tydlig trend mellan antal år drivdonen suttit inne i tanken och slitaget av donen. Detta gäller för drivdonen på både Forsmark 1 och Forsmark 2. Detta innebär således att ett samband inte kan dras mellan det historiska slitaget av drivdonen och den tid respektive drivdon har suttit inne i tanken vid slitagets uppkomst.

#### 4.1.1 Påverkan av antalet år som drivdon suttit inne i tanken samt position

I tabell 3 och tabell 5 presenteras antalet år för respektive slitet drivdon i en sammanfattande tabell för respektive reaktor.

##### Slitage på Forsmark 1

Tabell 3 visar antalet år respektive drivdon som gått på säkerhetsgömslans för Forsmark 1 har suttit inne i tanken innan slitaget uppstått. Tabellen visar samtliga drivdon som gått på säkerhetsgömslans under verkets livstid.

Tabell 3 - Antalet år respektive drivdon som gått på säkerhetsgöngen för Forsmark 1 har suttit inne i tanken innan slitaget har uppstått.

F1 Drivdon	År inne i tank innan slitage	Drivdon i randposition
DH50	11	nej
DK80	11	ja
DL20	7	ja
DL80	10	ja
DM15	XX* 8	ja
DM85	8, 2	ja
DO15	5	ja
DO85	8, 10	ja
DP15	4	ja
DP85	6, 2	ja
DR20	11	ja
DS30	3	nej
DS35	8	nej
DS65	7	nej
DS80	8	ja
DU30	11	ja
DU70	9	ja
DU75	8	ja
DV35	7	ja
DV40	10	ja
DV65	10	ja
DX50	11	ja
DX55	3, 2	ja

\*Information om årtal saknas.

För en enkel sammanfattning av slitagen visade i tabell 3 har slitagebilden sammanställts i tabell 4 vilken visar medelvärde, median samt procentuellt slitage av drivdonen på Forsmark 1.

Tabell 4 - Medelvärde, median och procentsats av antal drivdon som slitits i randpositioner respektive ej i randpositioner, i Forsmark 1.

F1	Medelvärde (antal år inne i tank)	Medianvärde (antal år inne i tank)	Antal drivdon totalt	Procentuellt slitage av totala antalet drivdon [%]
Slitna drivdon <b>ej i Randposition</b>	7,25	7,5	4	14,3
Slitna drivdon <b>i Randposition</b>	7,43	8	24	85,7

### Slitage på Forsmark 2

Tabell 5 visar antalet år respektive drivdon som gått på säkerhetsgöngen för Forsmark 2 har suttit inne i tanken innan slitaget uppstått. Tabellen visar samtliga drivdon som gått på säkerhetsgöngen under verkets livstid.

Tabell 5 - Antalet år respektive drivdon som gått på säkerhetsgöngen för Forsmark 2 har suttit inne i tanken innan slitaget har uppstått.

F2 Drivdon	År inne i tank innan slitage	Drivdon i randposition
DG35	11	ja
DH25	5	ja
DH75	9, 10	ja
DI25	9	ja
DL20	11, 12	ja
DM15	11, 6	ja
DM85	1	ja
DO15	10	ja
DO45	9	nej
DO85	10	ja
DP35	5	nej
DP45	9	nej
DP55	11	nej
DP85	8, 10	ja
DS20	10	ja
DS80	9, 8	ja
DT75	10	ja
DU40	7	nej
DU75	11	ja
DV65	9	ja
DX45	10	ja
DX55	7, 8	ja

För en enkel sammanfattning av slitagen visade i tabell 5 har slitagebilden sammanställts i tabell 6 vilken visar medelvärde, median samt procentuellt slitage av drivdonen på Forsmark 2.

Tabell 6 - Medelvärde, median och procentsats av antal drivdon som slitits i randpositioner respektive ej i randpositioner, i Forsmark 2.

F2	Medelvärde (antal år inne i tank)	Medianvärde (antal år inne i tank)	Antal drivdon totalt	Procentuellt slitage av totala antalet drivdon [%]
Slitna drivdon <b>ej i randposition</b>	8,20	9	5	17,9
Slitna drivdon <b>i randposition</b>	8,91	10	23	82,1

### Total slitagepåverkan

I tabell 4 och 6 visas förhållandet mellan de drivdon som gått på säkerhetsgöngen för Forsmark 1 respektive 2 och vilken placering i härden respektive drivdon haft. Skillnaden i år mellan drivdonen i randpositionerna och drivdonen innanför randpositionerna är liten. Detta gäller för båda verken. Emellertid kan sägas att de slitna drivdonen i randpositionerna har marginellt högre antal år i både medelvärde och median för både Forsmark 1 och 2 jämfört med icke randpositionerna. Skillnaden mellan verken är dock så pass liten mellan antal år som drivdonen i och innanför randpositionerna suttit inne att detta samband kan vara av slumpmässig karaktär. Emellertid kan noteras att samtliga medelvärden samt medianer för rand-, respektive icke randpositioner är av storleksordningen ett år högre i ålder för Forsmark

2 jämfört med Forsmark 1, vilket svagt skulle kunna tyda på att det generella drivdonet slits snabbare i samtliga positioner i Forsmark 1 jämfört med i Forsmark 2. Vidare bör det tas med i beaktande att antalet drivdon i randpositionerna är många fler än antalet drivdon utanför randpositionerna. Således är de båda medelvärdena och medianerna mindre relevanta att jämföra med varandra.

Vad som emellertid tydligt går att fastslå är av tabell 7-8 att för det totala antalet drivdon som gått på säkerhetsgången under livslängden på Forsmark 1 tillsammans med Forsmark 2 har 83.9 % av antalet drivdon suttit i en randposition, medans enbart 16.1 % har suttit i en position innanför randen.

Tabell 7 - Medelvärde och median av antal drivdon som slitits i randpositioner respektive ej i randpositioner, i Forsmark 1 tillsammans med Forsmark 2.

F1+F2	Medelvärde (antal år inne i tank)	Medianvärde (antal år inne i tank)
Slitna drivdon <b>ej i randposition</b>	8,17	9
Slitna drivdon <b>i randposition</b>	7,78	8

Tabell 8 - Procentsats av antal drivdon som slitits i randpositioner respektive ej i randpositioner, i Forsmark 1 tillsammans med Forsmark 2.

F1+F2	Antal drivdon totalt i respektive position [st]	Antal slitna drivdon i respektive position [st]	Procentuellt slitage av totala antalet slitna drivdon [%]	Procentuellt slitage av totala antalet drivdon i respektive position [%]
<b>Ej i randposition</b>	242	9	16,1	3,7
<b>I randposition</b>	80	47	83,9	58,8

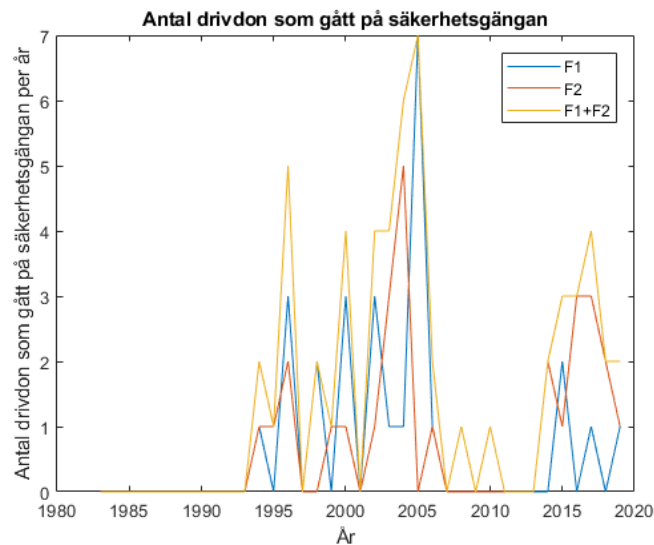
Baserat på tabell 3 och 5 kan ses att de drivdon som gått på säkerhetsgången inte har något tydligt samband med antalet år som drivdonet har suttit inne i tanken. Slutsatsen kan dras eftersom variationen av antal år inne i tank för de slitna donen varierar mellan allt ifrån 1-12 år. Vidare har den omfattande kartläggning som gjorts av drivdonsslitage visat att flertalet drivdon som suttit inne i mer än 10 år, (11-14 år), innan underhåll inte har slitits. Således kan sägas att om ett drivdon suttit inne i tanken i mer än 10 år är detta inte en nödvändig orsak till att detta drivdon slits. Undersökningen har även visat att underhållsintervallet för drivdonen i Forsmark 2 har över åren varit något längre än på Forsmark 1. Orsaken till detta är troligtvis bristen på information som finns tillgängligt gällande vilka drivdonspositioner i härden som underhållits under verkens första 10-20 år. Sannolikt beror de långa underhållsintervallen på Forsmark 2 på att data på utbytta drivdon saknas för Forsmark 2 från sent 80-tal eller tidigt 90-tal. Slutsatsen som kan dras av denna analys är att antalet år ett drivdon suttit inne i tanken inte har ett tydligt samband med att drivdonet slits och går på säkerhetsgången. Flertalet drivdon har suttit inne länge utan att ha gått på säkerhetsgången och flertalet drivdon har även gått på säkerhetsgången långt innan det att perioden för underhållsintervallet löpt ut.

Slutligen bör noteras i tabell 8 att det totala antalet drivdon som gått på säkerhetsgången i Forsmark 1 tillsammans med 2 är mycket större sett till den procentuella andelen drivdon i

respektive jämförd position. Slutsatsen som kan dras av denna tabell är således att randpositionerna i både Forsmark 1 och 2 har slitits till en mycket högre grad jämfört med resten av härden sett till det historiska slitaget.

#### 4.1.2 Analys av behovet av ett reservlager av drivdonsskruvar

Baserat på resultatet i figur 15-22 kan en svag skillnad urskiljas gällande slitaget för Forsmark 2 då dessa drivdon under de senaste fem åren haft en något större andel slitage jämfört med övriga år. För Forsmark 1 syns ingen sådan trend. Figur 23 visar antal drivdon som gått på säkerhetsgången för varje år, från 1983 till 2019 för Forsmark 1 respektive 2, samt det totala antalet som gått på säkerhetsgången för båda verken tillsammans för verkens nuvarande livstid.



Figur 23 - Det sammanlagda behovet av nya drivdonsskruvar som funnits för Forsmark 1 och 2 mellan åren 1983-2019.

I tabell 9 visas det samtliga behovet av drivdonsskruvar för Forsmark 1+2 för varje år inom den analyserade tidsperioden. I samma tabell är behovet av nya drivdonsskruvar även summerat för varje tioårsperiod. Detta för att skillnader mellan olika tidsperioder enkelt ska identifieras.



Tabell 9 - Samtliga punkter plottade i figur 23 för Forsmark 1+2 mellan åren 1983-2019 för det totala behovet av nya drivdonsskruvar.

År	Behov av nya drivdonsskruvar F1+F2	Summering efter varje 10-års period
1983	0	
1984	0	
1985	0	
1986	0	
1987	0	
1988	0	
1989	0	
1990	0	<b>0</b>
1991	0	
1992	0	
1993	0	
1994	2	
1995	1	
1996	5	
1997	0	
1998	2	
1999	1	
2000	4	<b>11</b>
2001	0	
2002	4	
2003	4	
2004	6	
2005	7	
2006	2	
2007	0	
2008	1	
2009	0	
2010	1	<b>28</b>
2011	0	
2012	0	
2013	0	
2014	2	
2015	3	
2016	3	
2017	4	
2018	2	
2019	2	
<b>Summa:</b>	<b>56</b>	<b>17</b>

Tabell 10 - Medelvärde och median av behovet av drivdonsskruvar för Forsmark 1+2 under tioårsintervaller mellan åren 1983-2019.

Behov av nya skruvar Tidsperiod	Medelvärde (skruvar per år)	Median (skruvar per år)
<b>1983-1989</b>	0	0
<b>1990-1999</b>	1,10	0,50
<b>2000-2009</b>	2,80	3
<b>2010-2019</b>	1,70	2
<b>Totalt: 1983-2019</b>	1,51	1

Som kan avläsas i tabell 9 och 10 har behovet av antalet nya skruvar för drivdonen på Forsmark 1 tillsammans med Forsmark 2 varierat mellan 0-28 st, på ett intervall om tio år. Behovet av antalet skruvar har varierat mellan 0-7 per år. I figur 23 samt i tabell 9 kan avläsas att för år 2005 hade ett stort antal drivdonsskruvar gått på säkerhetsgången. Förklaringen till varför detta år skiljer ut sig från resterande år är troligtvis på grund av det stora underhåll som år 2005 genomfördes på drivdonen på Forsmark 1 och 2, vilket omnämns i avsnitt 2.2.5. Till följd av att fler drivdon detta år togs ut för underhåll upptäcktes således även fler slitage i drivmuttrarna än vad som annars skulle ha kunnat identifieras. Anledningen till den ökade slitagebilden som även kan identifieras i figur 23 för Forsmark 2 år 2004, det vill säga året innan den omfattande drivdonsservicen 2005-2006, har däremot inte kunnat identifieras.

Baserat på ovanstående information kan en approximation göras av behovet av antalet nya drivdonsskruvar som tillsammans behövs i reserv under båda verkens livslängd. För en uppskattning av hur många skruvar som behövs i lager måste även hänsyn tas till att den av rapporten presenterade nya underhållsplanen för drivdon troligtvis kommer att minska antalet slitna drivdon i tanken. Det är emellertid omöjligt att säga exakt hur stor denna minskning kommer att vara då ett kortare underhållsintervall för drivdonens yttre positioner, så kallade randpositioner, inte tidigare undersökts. Ett rimligt scenario är dock att antalet slitna skruvar på ett tio-årsintervall för Forsmark 1 och 2 kommer att ligga under 17 stycken, vilket varit antalet de senaste tio åren. Vidare kan konstateras att anledningen till att behovet av nya skruvar är 0 under 80-talet dels beror på brist på dokumenterad information, samt på att verken vid den tidpunkten var så pass nya att risken för slitage därmed skulle kunna tänkas vara lägre. Mellan åren 1983-1999 utfördes som tidigare nämnts även mutterglappsmätningar under tank vid ett flertal tillfällen. Detta kan vara en bidragande orsak till att slitaget är relativt lågt även under 90-talet, eftersom slitna skruvar då upptäcktes i ett tidigare stadiet. Om mutterglappsmätning under tank inte återinförs i Forsmark 1 och 2 kommer således behovet av nya skruvar vara något högre än det hade varit om mätningen återinförts.

Med utgångspunkt i ovanstående diskussion kan ett lämpligt intervall för behovet av antal drivdonsskruvar i reserv till Forsmark 1 och 2 approximeras till mellan 12-16 st per tio-årsintervall. Då verken har en beräknad livslängd fram till någon gång inpå 2040-talet kan en beräkning göras av behovet av nya skruvar under en 25 års period. Behovet av antal skruvar i reservlager för Forsmark 1 och 2 är således approximerat till mellan 30-40 st. Det totala medelvärdet per år av behovet av skruvar för Forsmark 1+2 är 1.54 stycken, vilket under en 25 års period innebär  $1.54 \cdot 25 = 38.5$  stycken. Detta stärker även riktigheten i det approximerade intervallet av behovet av skruvar under den kommande 25 års perioden. Approximationen av behovet av antalet nya drivdonsskruvar är taget med hänsyn till den antagna minskningen av slitage till följd av den nya underhållsplanen.

### **4.1.3 Felkällor i slitagehistoriken för Forsmark 1 och 2**

I figur 23 kan noteras att för Forsmark 1 är 7 drivdon markerade att ha gått på säkerhetsgången för år 2005. I revisionsrapporten för Forsmark 1 från 2005 står följande anmärkning i rapporten för samtliga av dessa 7 drivdon "Transmissionsskruven skadad servicen avbruten". Här uppstår en problematik i skillnaden att benämna slitaget i drivmuttern mellan olika år och olika revisionsrapporter. I senare revisionsrapporter, såsom till exempel revisionsrapporten från drivdonsservice av F2 från 2018 står slitaget av drivdon istället benämnt som "Säkerhetsgånga, skruv bytt". Värt att notera är således att benämningarna på slitaget av drivdonsskruven skiljer sig åt även i samma rapport.

Vidare kan noteras enligt figurerna i figur 15-22 att slitage av grafit i drivmutter också har markerats in i figurerna. Detta gjordes med motiveringen att flertalet revisionsrapporter innehöll bristfällig information om slitaget och där rapporterna enbart angav informationen "drivmuttern har sliten grafit", eller "drivmuttern har mycket sliten grafit", så valdes att även detta skulle markeras i figurerna för identifiering av eventuella trender även för detta slitage. I samtliga av revisionsrapporterna vilka angivit att grafiten var mycket sliten, fanns ingen angivning angående om slitaget av grafiten hade lett till att drivdonet börjat gå på säkerhetsgången eller inte. Noteras bör även att slitaget för Forsmark 1 under tidsintervallet 1983-1993 enbart skett på ena sidan av härden. Anledningen till denna slitagebild är bristen på dokumentation från tidsintervallet i fråga.

I figur 15-22 visas det totala historiska slitaget för drivdonen med avseende på säkerhetsgången, men figurerna visar även slitage för tidsintervallerna 1983-2006 samt 2007-2019 för respektive reaktor. Det är värt att notera att en viss osäkerhet föreligger i slitageinformationen tagen från revisionsrapporterna ju äldre dessa rapporter är. Detta då slitage av drivdon vilket innebär att donet har gått på säkerhetsgången inte alltid framkommer tydligt i de äldre rapporterna. Dessutom har viss information som framkommit från revisionsrapporterna angående drivmuttrar som gått på säkerhetsgången inte överensstämmt med flertalet övriga interna dokument från FKA som har analyserats. Därför valdes att göra en indelning av slitaget av drivdonen för information tagen från äldre revisionsrapporter (äldre än 2007), samt för den information om slitage som är tagen från senare rapporter (2007 och framåt). Under kartläggningen av drivdonsslitage i Forsmark 1 och 2 framkom även viss tvetydig information främst gällande att revisionsrapporternas dokumentation om vilka drivdon som har underhållits samt drivdon som gått på säkerhetsgången, inte har överensstämde med övrig FKA dokumentation gällande drivdonsslitage. Noteras bör att samtlig information kring slitaget av drivdon har inkluderats i rapportens vidare slitageanalyser. Detta eftersom den tvetydiga informationen är svår att validera gällande vilka av FKAs interna källor som är riktiga och inte. Således kan slitageinformationen på ett fåtal ställen vara felaktig, till följd av den olika information som givits i dokumentationerna.

## **4.2. Analyserade möjliga orsaker till att slitaget av drivdon har uppstått**

### **4.2.1 Tidigare underhållsstrategiers inverkan**

Baserat på inläsning av tidigare underhållsstrategier för Forsmark 1 och 2 samt på den presenterade undersökningen gjord för ett ökat underhållsintervall på drivdonen i verken, enligt avsnitt 2.2.3, kan konstateras att det ökade underhållsintervallet av drivdonen, från 8 års FU-intervall till 10 år, kan ha bidragit till ett ökat slitage av drivdonens drivmuttrar. Detta går som tidigare nämnts att urskilja i figur 19-22, där slitaget för drivdonen på Forsmark 2 tydligt påvisas ha ökat de senaste åren.

Då slitageinformationen är något bristfällig för historiska slitage går ingen tydlig slutsats att dra gällande underhållsintervallens totala påverkan på drivdonen. Emellertid går att nämna att metoden med att mutterglappsmäta drivdonen under tank tycks, enligt de äldre revisionsrapporterna, ha minimerat slitaget av donen eftersom slitaget då upptäcktes vid ett tidigare stadie.

### **4.2.2 Styrstavarnas sekvens i härden**

Analyser av filer av styrstavarnas sekvenskörning i Forsmark 2 över en period av tio år, taget från POLCA7, gjordes i jämförelse med det historiska slitaget av drivdonen i Forsmark 2. Efter denna jämförelse kan en slutsats dras om att styrstavarnas sekvenskörning i härden samt reglerstavarnas positioner i härden inte har något tydligt samband med de positioner i härden som utsatts för stora slitage på drivdonens säkerhetsgänga över åren.

### **4.2.3 Materialkvalité hos grafiten**

Samtlig information om grafitmaterial som används i drivdonen är sekretessbelagd och går att återfinna i den fullständiga rapporten tillhörandes FKA. Den grafitkvalité som idag används i drivdonen i Forsmark 1 och 2 höll fram tills år 2013 god kvalité. Efter år 2013 bedömde kvalitetsgranskarna av den levererade grafiten, Westinghouse, att grafiten inte längre höll samma kvalité som tidigare. Detta gjorde att nya grafitmaterial analyserades för framtida användning. Analysen resulterade i att en ny grafitort rekommenderas för framtida användning i drivdonen på Forsmark 1 och 2, vilken bedöms hålla den kvalité som krävs (Seppälä 2018a). Till följd av denna utredning bedöms i nuläget inte grafitens nuvarande materialkvalité, av varken den nya eller gamla sorten, vara orsaken till slitaget av drivmuttrarna som gått på säkerhetsgängen (Cocco 2020).

### **4.2.4 Crudborthållningsflöden (Spolflöden)**

#### **Flödesschemats- och styrstavsledrörshålens inverkan**

Spolflödet är som tidigare beskrivits ett uppåtgående flöde i drivdonet vars uppgift är att föra bort crudansamlingar i drivdonet. Då drivdonet möter styrstaven och styrstavsledröret möter även spolflödet styrstavsledröret. De borrarade hål som finns placerade i botten av majoriteten av styrstavsledrören har redan ett genomgående flöde av huvudcirkulationsflödet från tanken genom styrstavsledrören. Detta innebär att det i styrstavsledrörets nedre del sker ett möte mellan det svagare spolflödet från drivdonen och det starkare huvudcirkulationsflödet från tanken genom styrstavsledrörshålen. Mötet av dessa två flöden är av intresse att analysera då

analyser kan ge svar på huruvida det svagare spolflödet eventuellt kan påverkas av det starka huvudcirkulationsflödet. Eftersom spolflödet innehåller potentiellt crud (skräp), vilka kommer från ansamlingar inne i drivdonen och spolansamlas med crudflödet, så innebär en ändring av crudflödet vid mötet med huvudcirkulationsflödet, att flödet för bortförsl av cruddet kan ändras.

Ett resonemang som diskuterats under en längre tid på FKA är huruvida crudflödet får en extra flödehastighet då det möter huvudcirkulationsflödet och transporteras då med en ökad kraft upp i styrstavsledröret. För de positioner i härden som saknar borrarhål i botten av styrstavsledrören kan denna teori därmed innebära att spolflödets kraft i styrstavsledrören är mindre i randpositionerna jämfört med för resten av positionerna i härden. Detta skulle i sådant fall i längden innebära en ökad mängd crud i randpositionerna jämfört med i övriga positioner i härden, då cruddet enklare förs bort i de positioner där huvudcirkulationsflödet via styrstavsledrörshålen hjälper till att föra bort cruddet. Denna teori styrks även i en revisionsrapport för drivdon på Forsmark 1 och 2 från 1992 där det konstateras att avsaknaden av styrstavsledrörshål troligtvis innebär att den crudmothållande effekten för randdonen blir lägre (Lundgren 1992).

Den skillnad i huvudcirkulationsflödet som skapas av avsaknaden av hål i styrstavsledrörens botten är liten, då hålen som är borrarhål är små, vilket gör att flödesskillnaden för de olika händpositionerna troligtvis är marginell. För en vidare och djupare undersökning av hur huvudcirkulationsflödet genom styrstavsledrörshålen påverkar det uppåtgående spolflödet från drivdonen samt påverkan på eventuellt medföljande crud i flödena, krävs detaljerade flödessimuleringar. Simuleringar som detaljerat simulerar området då drivdonshuset möter styrstavsledröret samt flödehastigheter på respektive flöden hade således visat på hur ansamlingen av crud i drivdonen potentiellt sett kan variera mellan olika drivdon i härden. Detta beroende på om drivdonet är placerat i en randposition, utan hål i styrstavsledrören, eller inte.

### **Spolflödestemperaturens inverkan**

Undersökningar som gjorts på grafitmaterialet, vilka sitter i drivdonsskruvarna i Forsmark 1-3, har visat att temperaturen har en stor inverkan på grafiten. Emellertid har undersökningar visat att nuvarande temperaturer på spolflödet i Forsmark 1-3 är väl anpassat efter grafitmaterialets egenskaper vilket innebär att nuvarande spolflödestemperatur inte har någon märkbar påverkan på grafiten, eftersom ingen utfällning av grovkristallin magnetit på drivdonsskruvarna erhålls vid denna temperatur. Således har en slutsats redan dragits om att en spolflödestemperatur inte har någon påverkan på slitaget av drivdonens drivmuttrar (Wegemar 2011).

### **Spolflödets flödehastighets inverkan**

Enligt utvärderingar gjorda på ett tidigt stadium av livstiden för Forsmark 1 och 2, konstaterades att spolflödehastigheten har en påverkan på mängden crud som fastnar i drivmuttern (Jönsson 1986). Det är därav av intresse att undersöka huruvida den nuvarande spolflödehastigheten kan höjas för att på så sätt minska mängden slam i drivmuttern och därmed minska slitaget på grafiten i muttern. I intervju med Ulf Engrup (Engrup 2020), tidigare anställd vid Asea Atom, framgår att flödehastigheten för spolflödet i drivdonen har varierat historiskt sett i Forsmark 1 och 2. Då de två verken startades upp hade samtliga drivdon ett visst spolflöde. På grund av att slitaget i drivmuttrarna identifierats efter ett antal år då reaktorerna varit i drift valdes att justera ner spolflödet för alla 161 drivdon i Forsmark 1 samt 2 till det minsta spolflödet som beräknades vara möjligt för att säkerställa drivdonens

funktion (Ode 1972). Detta gjordes främst för att utvärdera och undersöka hur det dåvarande grafitmaterialet i drivmuttern påverkades av ett annat spolflöde. Efter utvärdering av den sänkta spolflödeshastigheten upptäcktes istället att det minskade flödet hade lett till att en ökad mängd flagor bildades på bränslet, vilka lossnade för att sedan flöda fritt ut i tanken. Flagorna uppkom till följd av tillväxt av oxid i bränslestavarna. Huruvida dessa flagor från bränslet hade en inverkan på drivmuttrarnas slitage är inte klarlagt, emellertid kan sägas att flagorna bidrog till ökat slitage i andra delar av reaktortanken vilket gjorde att denna flaggbildning var tvungen att minimeras. Således ökades spolflödet från den nedsänkta hastigheten tillbaka till det ursprungliga flödet för samtliga 161 drivdon i Forsmark 1 och Forsmark 2. Dokumentation på undersökningar kring ett ökat spolflöde i drivdonen har inte hittats. Emellertid kan konstateranden kring att undersökningar om en ökad spolflödeshastighet borde göras, återfunnits i dokumentation från ett tidigt stadie av verkens livslängd (Jönsson 1986).

#### **4.2.5 Motionering av styrstavar i härden**

För prov av samtliga styrstavars och drivdons rörlighet i härden görs så kallade motioneringsprov där varje enskild styrstav skruvas in i härden och därefter åter till dess utgångsposition. Detta prov görs för Forsmark 1 och 2 med jämna mellanrum och intervallet som stavarna skjuts in är ett visst antal procent in i härden. Detta prov kallas för motionering av styrstavarna (FKA 2014). Genom rörelse av styrstavarna, till följd av rörelse i drivdonen, kommer drivdonsskruven att röra sig i förhållande till drivmuttern, denna specifika procentandel av den totala längden av drivdonet. Detta innebär att eventuellt grafit slam från drivmuttern, eller andra små partiklar från reaktortanken, vilka ansamlats inuti drivmuttern, nu har en möjlighet att justeras i position. Ju större procentandel av drivdonet som skjuts in i härden desto mer rör sig det eventuella cruddet inne i drivmuttern (Seppälä 2020). En åtgärd som därmed är relevant att analysera är möjligheten att öka motioneringsintervallet för att därmed få ut mer grafit slam ur drivmuttern och på så sätt minska slitaget på drivmuttrarna under drift till följd av de lösa partiklarna i muttern.

Forsmark 1 och 2 har ett bestämt motioneringsintervall om en viss procentandel av den totala längden av donet, vilken baseras på den påverkan som motioneringsintervallet har på bränslet i härden. Ett ökat motioneringsintervall ökar slitaget på bränslet. I Forsmark 3 är ett annat motioneringsintervall ansatt till drivdonen. Detta är motiverat till följd av den lägre temperatur på spolflöde som Forsmark 3 har jämfört med Forsmark 1 och 2. Denna lägre temperatur ger mindre slitage på bränslet i härden vid en ökad motionering av styrstavarna (Eriksson 2020). Således är en rekommendation för framtida åtgärder till att förebygga slitage i drivmuttrarna att via simuleringar undersöka möjligheten till ett ökat motioneringsintervall i förhållande till vilken påverkan det ökade motioneringsintervallet skulle ha på bränslet.

#### **4.2.6 Påverkan från olika snabbstoppsgrupper i härden**

Snabbstoppsgrupperna i härden (FKA 2016) vilka tidigare beskrivits, har analyserats med avseende på respektive snabbstoppsgrupps individuella påverkan på slitaget av drivmuttrarna. Då figurer innehållandes samtliga snabbstoppsgrupps positioner i härden har jämförts med det historiska slitaget i Forsmark 1 och 2 kan en tydlig slutsats dras att inget samband kan hittas mellan placeringen av snabbstoppsgrupperna och det historiska slitaget av drivdon som gått på säkerhetsgången. En slutsats kan därav dras att det inte är någon snabbstoppsgrupp som är mer sliten än någon annan i härden. Detta gäller för både Forsmark 1 och 2.

#### **4.2.7 Mutterglappsmätning**

Brist på mutterglappsmätning kan vara orsaken till ett ökat slitage. Då mutterglappsmätning genomförs i tanken i inledningen av en revision kan, som beskrivits i avsnitt 2.2.3, drivdon vars drivmuttrar är slitna identifieras innan slitaget blir för stort. En revision av drivdonsunderhåll som genomförs utan drivmutterglappsmätning i härden kan därmed minska möjligheten för identifiering av slitna drivmuttrar. Detta kan därmed vara en av flera möjliga orsaker till den tidigare beskrivna problematik som uppstått i Forsmark 1 och 2 med ett ökat slitage av drivdon som gått på säkerhetsgängen under de senaste åren. Som tidigare beskrivits slutade Forsmark 1 och 2 att genomföra mutterglappsmätningar under tank år 1997. Denna möjlighet till identifiering av drivmutterslitage i ett tidigt stadium, innan slitaget blivit så stort så att drivdonet gått på säkerhetsgängen, kan ha minskat drastiskt i och med borttagandet av mutterglappsmätning. Denna slutsats påtalas även i utredningen från 2004 om drivmutterslitage i Forsmark 1-3, vilken konstaterar att en metod för manuell mätning av mutterglapp bör införas enligt Ringhals modell (Fosstveit 2004). Då metoden ännu inte har införts i underhållsplanen bör vidare undersökningar göras kring möjligheterna att införa manuell mutterglappsmätning i nuvarande underhållsstrategi för drivdonen i Forsmark 1 och 2, för att på så sätt minimera slitaget av drivmuttrarna som går på säkerhetsgängen.

#### **4.2.8 Materialkvalité hos drivdonsskruven**

I analysen av potentiella orsaker till att slitage i drivmuttrarna uppstått bör även nämnas att det ojämna slitaget av drivmuttrar i härden inte beror på olika materialegenskaper hos drivdonsskruvarna i härden. Samtliga drivdonsskruvar som sätts in i härden efter underhåll har samma egenskaper och antas därför inte vara orsaken till det ojämna slitaget mellan härdens randpositioner och resterande delar av härden (Seppälä 2020). För jämförelse mellan slitna och inte slitna drivdonsskruvar, se bilder från drivdonsverkstaden i Forsmark 1, i appendix 3.

### **4.3. Jämförelser med underhållsplaner från liknande verk**

För att hitta ytterligare orsakssamband till slitagen av drivdonens drivmuttrar i Forsmark 1 och 2 gjordes intervjuer med personal, samt inläsning av underhållsstrategier av drivdon, från kärnkraftverk liknande Forsmark 1 och 2. Dessa verk var Ringhals (RAB) (Johansson 2020), Oskarshamn (OKG) (Aldebert 2020) samt Olkiluoto (TVO) (Seikola 2020). I omnämnda verk jämfördes Ringhals 1 (R1), Oskarshamn 2 (O2) och Olkiluoto 1 och 2 (OL1 och OL2).

Ur dessa intervjuer framkom information av stor relevans för utredningen av Forsmarks drivdonsslitage och dessa intervjuer ligger till stor del till grund för rapportens förslag till nya underhållsstrategier för drivdonen i Forsmark 1 och 2. Intervjuerna är sekretessbelagda och går att återfinna i den kompletta versionen av rapporten som tillhör FKA.



## 4.4. Möjliga observationer för identifiering av slitage i ett tidigt stadie

I nedanstående avsnitt presenteras framtagna resultat från analyserna av drivdonens effektkurvor och huruvida slitage i drivdonen kan upptäckas i ett tidigt stadie baserat på effektkurvornas utseende. Resultatet presenteras uppdelat i de fem kategoriserade parametrarna vilka enskilt studerats för varje analyserat drivdon, se avsnitt 3.3. För samtliga fem parametrar presenteras resultatet i form av ett medelvärde för varje analyserat drivdon vid varje tillfälle där samtliga parametrar sedan illustreras grafiskt i figurer under respektive kategori. Samtliga fem parametrar kommer sedan att diskuteras separat och för var och en av de fem parametrarna kommer en jämförelse att göras mellan resultatet i de respektive tre kategorierna (*Slitna (1)*, *Nästan slitna (2)* samt *Ej slitna (3)*) för identifiering av skillnader mellan resultaten i de tre olika kategorierna. För analys av likheter och skillnader mellan de olika kurvorna har en godtycklig enhet på effekt samt på frekvensamplitud valts. Dessa enheter har döpts till *Effekt enhet* vilket förkortas i rapporten som [E.e.] samt till *Frekvensamplitud* vilket förkortas i rapporten som [F.a.]. I samtliga effektfigurer visas effekt i förhållande till antalet körningar, vilket då visas på x-axeln. På grund av den stora skillnaden i antalet körningar mellan de olika kategorierna, som tidigare presenterats, så blir kurvorna mycket längre i samtliga figurer för kategori 3 jämfört med för resten av kategorierna. Detta kan ses i jämförelsen för samtliga fem parametrar.

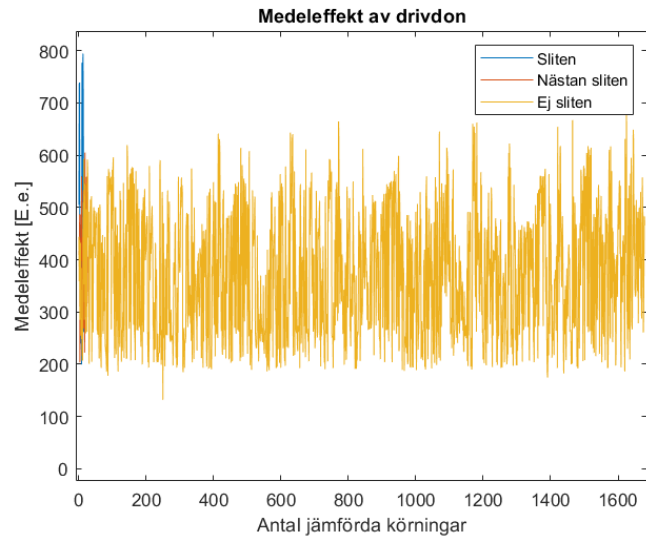
### 4.4.1 Resultat framtagna i tidsdomänen för samtliga drivdon i urvalet

#### Medelamplitud av effektkurvorna [E.e.]

Baserat på undersökningen om effektkurvornas medelamplitud och hur denna ändras då drivdonen slits, togs figur 24 fram. Figur 24 visar medelamplituden på samtliga körningar av slitna (blå), nästan slitna (röd), samt ej slitna (gul), drivdon. Baserat på figur 24 har en standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median beräknats separat för samtliga tre kategorier, vilket visas i tabell 11.

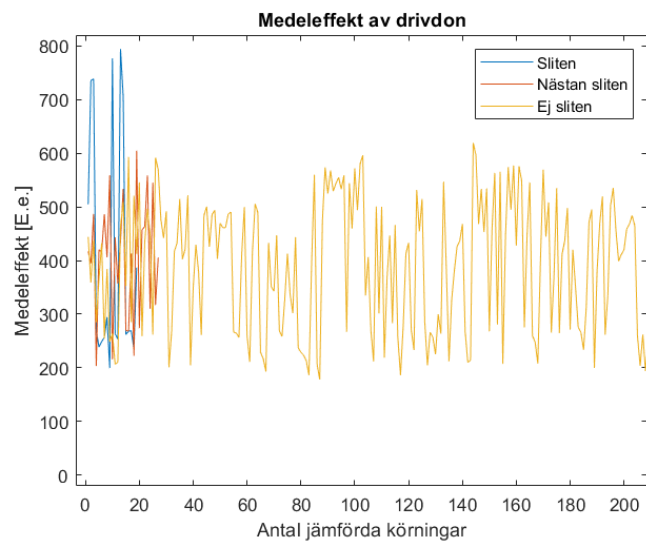
Tabell 11 - Standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median har beräknats separat för samtliga tre kategorier.

Medelamplitud av effektkurvorna [E.e.]	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Medelvärde	405,3	403,1	372,6
Median	268,8	415,4	370,9
Standardavvikelse	222,2	112,5	118,6



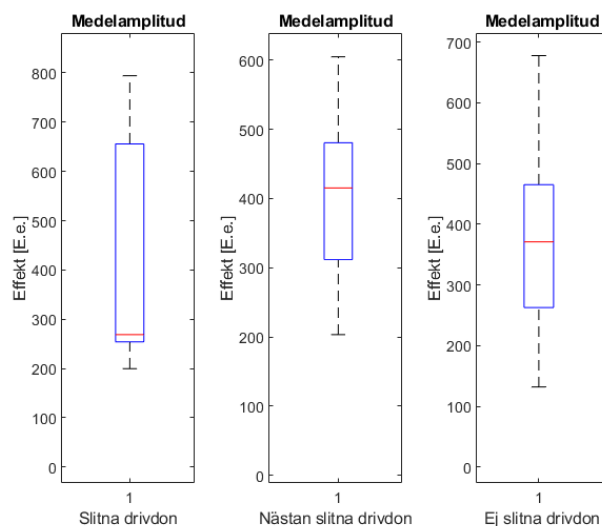
Figur 24 - Medeleffekt av samtliga analyserade drivdon indelat i tre kategorier.

För tydligare identifiering av skillnaden mellan medeleffekten av drivdonen i respektive kategori visas de första 200 körningarna av drivdon i figur 25.



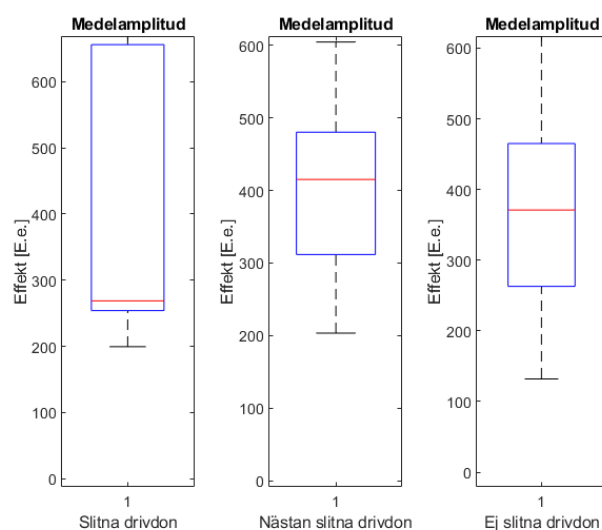
Figur 25 - Medeleffekt av ett urval av de analyserade drivdonen indelat i tre kategorier.

I figur 26 visas låddiagram för samtliga punkter i figur 24.



Figur 26 - Låddiagram för samtliga punkter vid analysen av medelamplituden på effektkurvorna.

I figur 27 visas samma låddiagram som i figur 26, men med omskalade y-axlar, för en mer överskådlig jämförelse mellan kategorierna.



Figur 27 - Låddiagram för punkter närmast medianvärdet i vid analysen av medelamplituden på effektkurvorna.

Tabell 12 - Värden framtagna ur låddiagram i figur 26.

Medelamplitud av effektkurvorna [E.e.]	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Värde för första kvartilen	254,0	311,7	262,8
Värde för tredje kvartilen	655,9	480,6	465,0
Antal utliggare	0	0	0
Maximalt värde	794,4	604,9	677,8
Minimalt värde	199,5	203,3	131,9
Antal mätpunkter	19	27	1683

### Diskussion kring medelamplitud av effektkurvorna

I figur 24 kan urskiljas att medelamplituden av effekten för den totala analyserade urvalet av drivdon är högre för slitna drivdon jämfört med för ej slitna drivdon. Emellertid syns ingen skillnad i medelamplitud på effektkurvorna mellan *slitna*, kategori 1, drivdon och *nästan slitna*, kategori 2 drivdon. I tabell 11 kan avläsas att det totala medelvärdet för medelamplituden av de *slitna*, kategori 1, drivdonen enbart är något högre än medelvärdet för övriga kategorier. Emellertid är standardavvikelsen för de *slitna* drivdonen betydligt högre jämfört med för de övriga. Detta går även att avläsa ur låddiagrammet i figur 26 där en tydlig skillnad syns i den tredje kvartilen för de *slitna* drivdonen jämfört med för övriga. Detta innebär att de 25 % av mätpunkterna vilka befinner sig över kurvans medianvärde, i fallet med de *slitna* drivdonen, befinner sig på en betydligt högre effekt jämfört med respektive 25 % för de *nästan slitna* och *ej slitna* drivdonen. I samma figur kan även ses att flertalet mätpunkter för de slitna drivdonen är centrerade runt medianen för kategori 1 jämfört med för kategori 2 och 3. Detta kan ses eftersom lådans första kvartil för de slitna drivdonen (kategori 1), är mindre jämfört med den första kvartilen för resterande kategorier. Orsaken till denna skillnad tros främst bero på att flertalet av amplituderna för de slitna drivdonen ligger inom ett kortare spann jämfört med för övriga drivdon, men att det även förekommer slitna drivdon vars medelamplitud för effektkurvan är betydligt högre jämfört med för övriga drivdon, vilket syns i den tredje kvartilen för de slitna drivdonen.

I figur 24 samt i tabell 12 kan den totala spridningen av mätpunkter för respektive kategori ses och där är det tydligt att spridningen av medelamplituden är högre för de slitna drivdonen jämfört med övriga. Baserat på detta samt på ovanstående resonemang kan en slutsats dras om att de slitna drivdonen inte nödvändigtvis har en högre medelamplitud för alla analyserade fall då donet gått på säkerhetsgängen, men att i de fall då medelamplituden för effektkurvan är hög, så har drivdonet med stor sannolikhet gått på säkerhetsgängen. Denna slutsats grundar sig i tabell 12 där värdet av den tredje kvartilen för de *slitna* drivdonen är betydligt högre jämfört med värdet för de *nästan slitna* och *ej slitna* drivdonen. Vidare har inget tydligt samband identifierats enbart mellan kategori 2 (*nästan slitna*) och kategori 3 (*ej slitna*) då samtliga parametrar i tabell 12 är likartade för båda kategorierna.

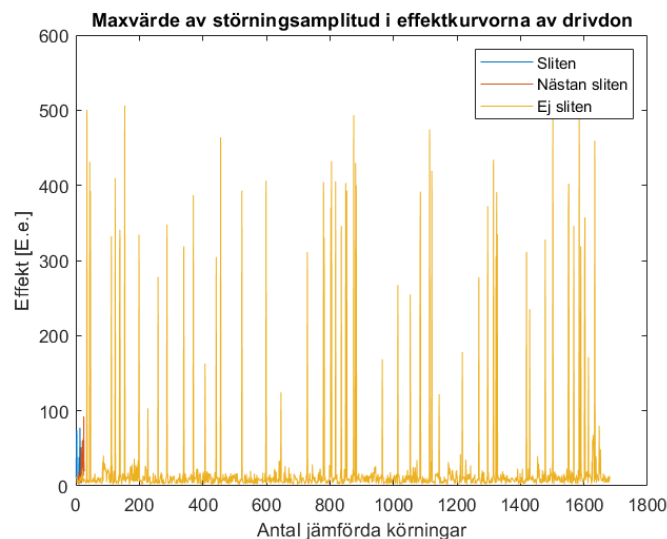
Slutsatsen som kan dras av analysen av medelamplituden för effektkurvorna är således att det inte finns något tydligt effektintervall för vilken man med säkerhet kan säga att drivdonets slitage går över från kategori 3 till kategori 2. Emellertid har identifierats indikationer på att drivdonet går från slitagekategori 2 till slitagekategori 1, vilket är i de fallen då medelamplituden för effektkurvan är hög. Om medelamplituden för effektkurvan överskrider 480,6 [E.e], vilket är värdet för den tredje kvartilen för de *nästan slitna* drivdonen, så kan med en viss sannolikhet sägas att drivdonet har gått från en kategori 2 till 1 och att det därmed går på säkerhetsgängen. För projektets syfte, vilket bland annat var att identifiera möjliga indikationer på drivdonsslitage innan dessa sker, fyller denna identifiering av medelamplituden emellertid ingen funktion eftersom drivdonet vid identifieringen av den ovannämnda höga medelamplituden i effektkurvan, troligtvis redan har börjat gå på säkerhetsgängen. För en mer generell bedömning av huruvida en effektkurva går från kategori 2 till 1 kan därför sägas att en medelamplitud på effektkurvan som överstiger 480 [E.e], bör ses som en indikation på att drivdonet har övergått från en kategori 2 till en kategori 1.

### Maximal störningsamplitud av effektkurvorna [E.e.]

Baserat på undersökningen om effektkurvornas maximala störningsamplituder och hur denna ändras då drivdonen slits, togs figur 28 fram. Figur 28 visar maximala störningsamplituden på samtliga körningar av slitna (blå), nästan slitna (röd), samt ej slitna (gul), drivdon. Baserat på figur 28 har en standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median beräknats separat för samtliga tre kategorier, vilket visas i tabell 13.

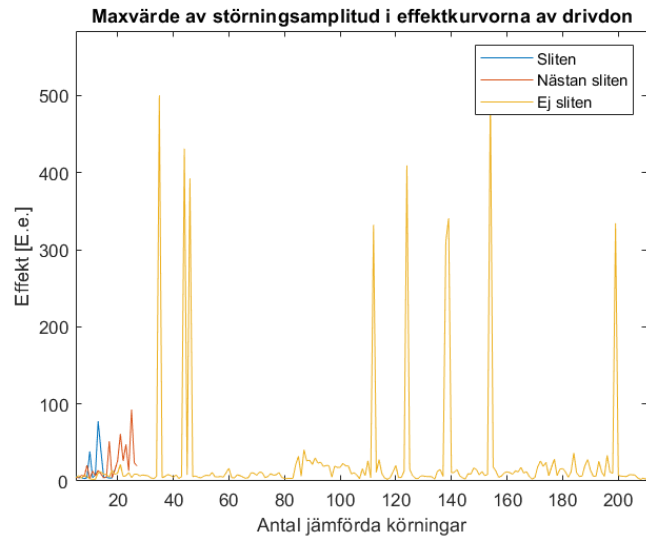
Tabell 13 - Standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median har beräknats separat för samtliga tre kategorier.

Maximal störningsamplitud av effektkurvorna [E.e.]	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Medelvärde	20,3	18,5	21,6
Median	6,1	9,1	8,4
Standardavvikelse	26,1	21,4	65,9



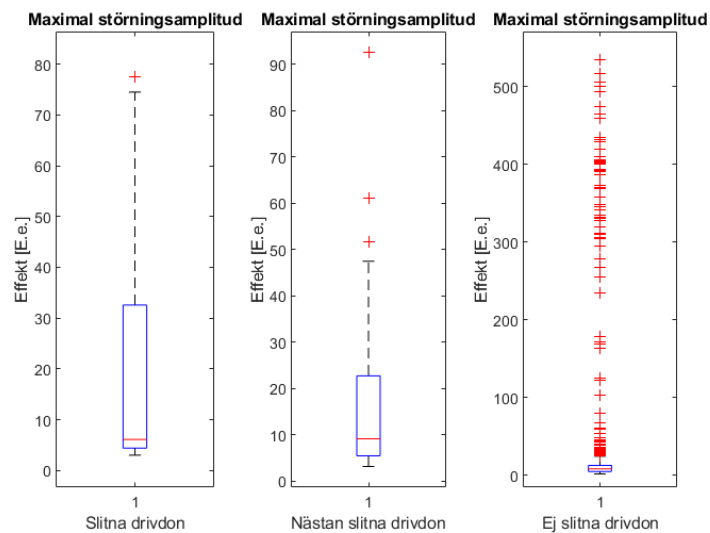
Figur 28 - Medelvärde av störningsamplituden för samtliga analyserade drivdon indelat i tre kategorier.

För tydligare identifiering av skillnaden mellan maximala störningsamplituden av drivdonen i respektive kategori visas de första 200 körningarna av drivdon i figur 29.



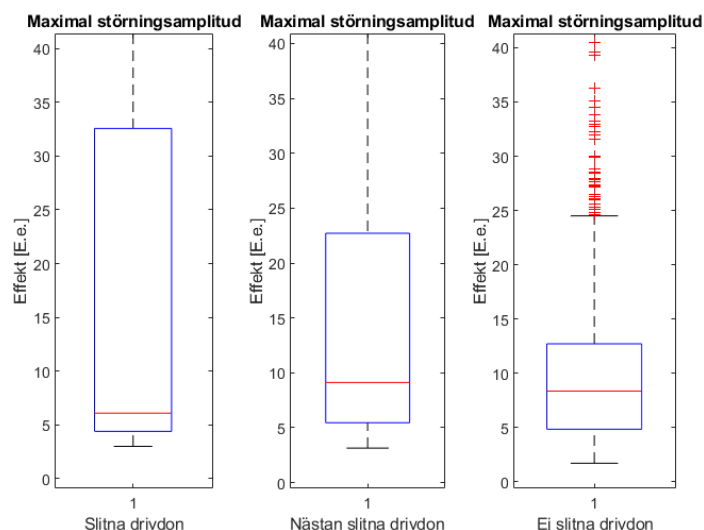
Figur 29 - Medelvärde av störningsamplituden för ett urval av de analyserade drivdonen indelat i tre kategorier.

I figur 30 visas låddiagram för samtliga punkter i figur 28.



Figur 30 - Låddiagram för samtliga punkter vid analysen av den maximala störningsamplituden på effektkurvorna.

I figur 31 visas samma låddiagram som i figur 30, men med omskalade y-axlar, för en mer överskådlig jämförelse mellan kategorierna.



Figur 31 - Låddiagram för punkter närmast medianvärdet, vid analysen av den maximala störningsamplituden på effektkurvorna.

Tabell 14 - Värden framtagna ur låddiagram i figur 30.

Maximal störningsamplitud [E.e.]	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Värde för första kvartilen	4,4	5,5	4,9
Värde för tredje kvartilen	32,6	22,7	12,7
Antal utliggare	1	3	109
Maximalt värde	77,5	92,6	534,5
Minimalt värde	3,0	3,1	1,7
Antal mätpunkter	19	27	1683

### Diskussion kring maximal störningsamplitud

I figur 28 visas maximala störningsamplituden av effekten. Figuren av det totala antalet analyserade drivdonskörningar visar en bred variation mellan störningsamplituden för de *ej slitna* drivdonen, vilket även kan ses i den stora mängden utliggare för kategori 3. Utliggarna kan ses som röda punkter utanför lådan i figur 30 och förklaras närmare i avsnitt 3.4. Detta visas även i tabell 13 där standardavvikelsen för de *ej slitna* drivdonen är betydligt högre jämfört med för de övriga kategorierna. I figur 30 visar även låddiagrammen för samtliga analyserade mätpunkter att spridningen mellan mätpunkterna är stor och att flertalet mätpunkter är så kallade utliggare, vilket innebär att de ligger utanför intervallet om  $1.5 \cdot IQR$ , se avsnitt 3. Emellertid bör här tas i beaktande att antalet utliggare i varje kategori måste ses i relation till antalet mätpunkter i datamängden för respektive kategori. Om en jämförelse görs med antalet utliggare för kategori 1, vilket är 109 stycken, med antalet utliggare för kategori 2, vilket är 3 stycken, så kan en slutsats dras om att det procentuella antalet utliggare av den totala datamängden i båda fallen är likartade. Således är inte antalet utliggare i kategori 3 en utstickande faktor i undersökningen.

De höga värdena som erhålls för flertalet kurvor i kategori 3, *ej slitna* drivdon, har sannolikt uppkommit till följd av att en viss störning i kurvornas ändpunkter, jämför med figur 11, har kommit med i analysen av skillnaden mellan trendlinje och effekttopp på kurvan, enligt figur 12. Störningarna tros ha inkluderats i analysen, trots borttagandet av effektkurvans ändpunkter i början av analysen, till följd av att samtliga drivdons effektkurvor inte är exakt lika långa och inte följer samma typ av störningsmönster vid ändpunkterna av kurvorna. För en mer

exakt analys hade analysområdet för samtliga effektkurvor därmed behövt minskas ännu mer än enligt figur 11, för att minimera påverkan från ändpunkternas störningar i analysen av framförallt maximal störningsamplitud. Vidare kan även de höga värdena i kategori 3 ha uppkommit till följd av att den maximala störningsamplituden enbart jämför ett värde, den maximala skillnaden mellan trendlinjen och effektkurvan. En enda stor störning kan därmed bidra till stora felkällor för det totala resultatet.

Vid en inzoomning av låddiagrammet, se figur 31, kan avläsas att spridningen av den tredje kvartilen är lägre för de *ej slitna* drivdonen jämfört med för övriga kategorier. Medianvärdet av den maximala störningsamplituden är emellertid likartad för samtliga tre kategorier, vilket även kan avläsas i tabell 13. Således kan en slutsats dras om att det inte finns någon tydlig trend i störningsamplitud mellan *slitna*, *nästan slitna* och *ej slitna* drivdon. Emellertid kan en liknande trend som för medelamplituden av effekten urskiljas, att den tredje kvartilen för de slitna drivdonen har en högre effekt jämfört med för övriga kategorier. Lägst effekt i den tredje kvartilen har de *ej slitna* drivdonen.

Slutsatsen som kan dras av detta är därför likartad som för medelamplituden, nämligen att den maximala störningsamplituden inte nödvändigtvis är hög bara för att drivdonet har slitits, men att om den maximala störningsamplituden är hög, så har drivdonet med stor sannolikhet slitits.

I låddiagrammet i figur 31 samt i tabell 14 kan ses att det även finns skillnader i den tredje kvartilen mellan de *ej slitna* drivdonen och de *nästan slitna*. En bra indikation på att ett drivdon håller på att gå från kategorin *Ej slitna* (3), till kategorin *Nästan slitna* (2), kan därmed vara om den maximala störningsamplituden för effektkurvan överskrider värdet på effekten på den tredje kvartilen i kategori 3, vilket är 12.7 [E.e.]. Eftersom 75 % av värdena för de *ej slitna* drivdonen ligger under 12.7 [E.e.] ger det därmed en viss indikation, om drivdonet maximala störningsamplitud överskrider 12.7 [E.e.], på att drivdonet håller på att slitas, och kanske bör bytas ut i förebyggande syfte för att undvika att denna går på säkerhetsgängen. En generell indikation på att drivdonet håller på att gå på säkerhetsgängen kan därmed anses vara om den maximala störningsamplituden överskrider 13 [E.e.].

#### 4.4.2 Värden framtagna från frekvensdomänen för samtliga drivdon i urvalet

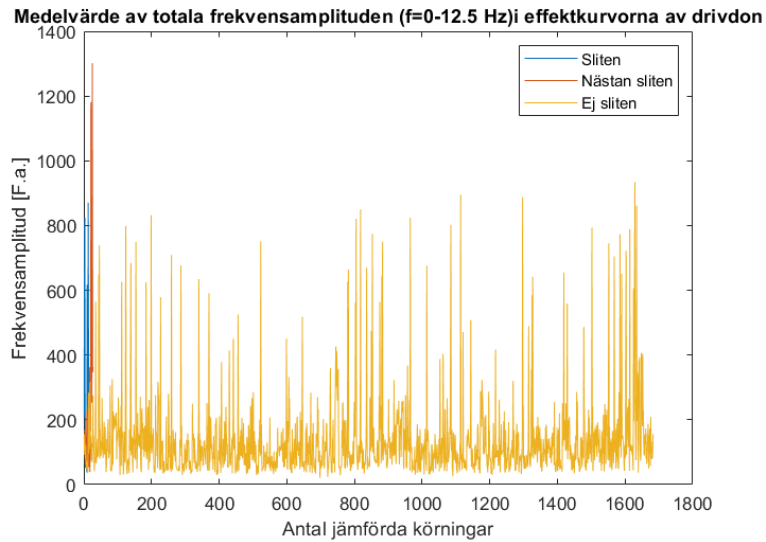
##### Medelvärde av frekvensamplitud för det totala frekvensintervallet (0-12.5 Hz) [F.a.]

Baserat på undersökningen om medelvärde av frekvensamplituden i frekvensdomänen samt hur denna ändras då drivdonen slits, togs figur 32 fram. Figur 32 visar medelamplituden av frekvensen på samtliga körningar av slitna (blå), nästan slitna (röd), samt ej slitna (gul), drivdon. Baserat på figur 32 har en standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median beräknats separat för samtliga tre kategorierna, vilket visas i tabell 15.

Tabell 15 - Standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median har beräknats separat för samtliga tre kategorier.

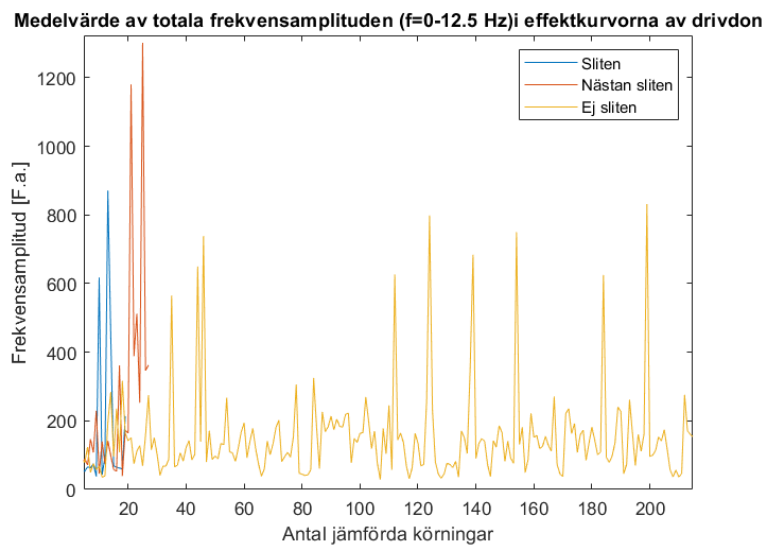
Medelvärde av Frekvensamplitud [F.a.] (0-12.5 Hz)	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Medelvärde	248,6	254,2	132,5
Median	69,1	146,8	101,6
Standardavvikelse	229,3	310,0	121,1





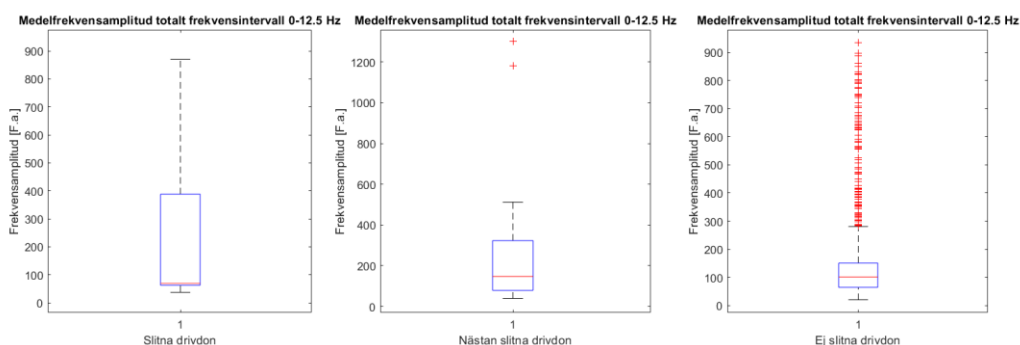
Figur 32 - Medelvärde den totala frekvensamplituden [F.a.] för samtliga analyserade drivdon indelat i tre kategorier.

För tydligare identifiering av skillnaden mellan frekvensamplituderna av drivdonen i respektive kategori visas de första 200 körningarna av drivdon i figur 33.



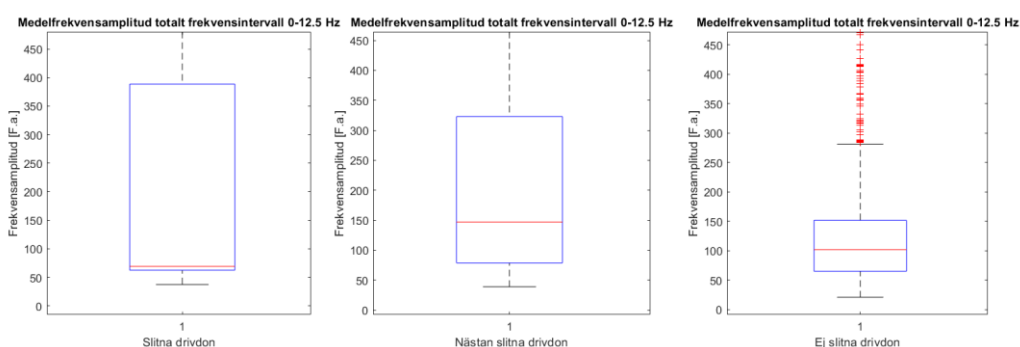
Figur 33 - Medelvärde av den totala frekvensamplituden [F.a.] för ett urval av de analyserade drivdonen indelat i tre kategorier.

I figur 34 visas låddiagram för samtliga punkter i figur 32.



Figur 34 - Låddiagram för samtliga punkter vid analysen av medelvärdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 0-12.5 Hz.

I figur 35 visas samma låddiagram som i figur 34, men med omskalade y-axlar, för en mer överskådlig jämförelse mellan kategorierna.



Figur 35 - Låddiagram för punkter närmast medianvärdet, vid analysen av medelvärdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 0-12.5 Hz.

Tabell 16 - Värden framtagna ur låddiagram i figur 34.

Medelvärde av Frekvensamplitud [F.a.] (0-12.5 Hz)	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Värde för första kvartilen	62,4	78,7	64,9
Värde för tredje kvartilen	388,6	323,1	151,6
Antal utliggare	0	2	98
Maximalt värde	870,9	1301,7	934,2
Minimalt värde	37,5	38,9	20,7
Antal mätpunkter	19	27	1683

### Diskussion kring medelvärdet av frekvensamplituden för frekvensintervallet (0-12.5 Hz)

Vid analysen av medelvärdet av frekvensamplituden för det totala frekvensintervallet (0-12.5 Hz) kan avläsas ur tabell 15 att medianvärdet för samtliga *slitna* drivdon är lägre jämfört med medianvärdet för övriga två kategorier. Vidare kan konstateras att spridningen av data är stor för de *ej slitna* drivdonen, vilket kan ses i låddiagrammen i figur 34 samt i tabell 16 där antalet utliggare är 98 stycken av det totala antalet mätpunkter för kategori 3, men då antal utliggare i respektive kategori jämförs procentuellt sett finns ingen märkbar skillnad mellan kategorierna.

Medelvärdet av frekvensamplituden för det totala frekvensintervallet kan även tolkas som standardavvikelsen av effektkurvan i tidsdomänen. Medelvärdet av frekvensamplituden visar alltså den vanligaste frekvensen i effektkurvan, vilket innebär den vanligaste avvikelsen från

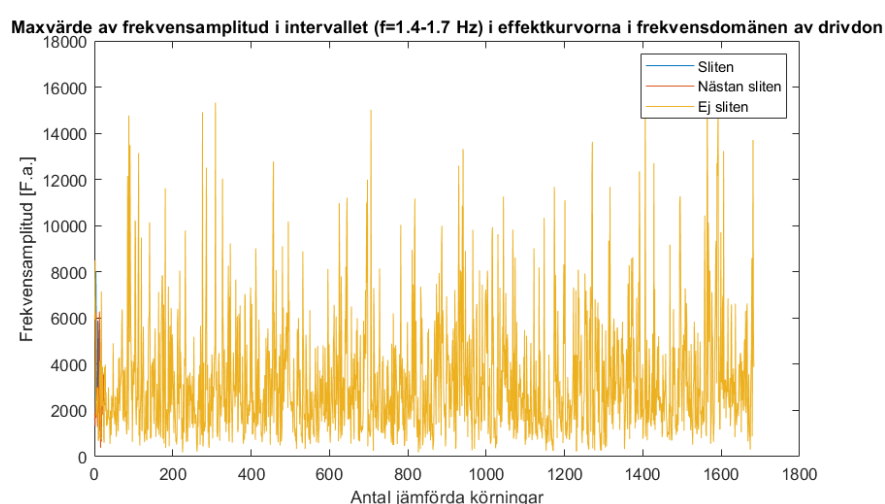
effektkurvan. I tabell 15 går att avläsa att det totala medelvärdet av frekvensamplituden är lägre för kategori 3 jämfört med övriga kategorier. Kategori 1 och 2 har emellertid liknande totala medelvärden för frekvensamplituden. Trots att medianvärdet för kategori 1 är lägre än för övriga kategorier kan ur figur 35 samt ur tabell 16 konstateras att värdet för den tredje kvartilen är högre för kategori 1 jämfört med för kategori 2 och 3. Skillnaden mellan värdet för den tredje kvartilen för kategori 1 jämfört med kategori 3, är stor. Emellertid är skillnaden mellan kategori 1 och 2 mindre. Det går även att identifiera en viss skillnad i värdet av den tredje kvartilen mellan kategori 2 och 3, enligt tabell 16. Således kan en indikation på att ett drivdon övergår från kategori 3 till kategori 2 vara att drivdonskurvans medelvärde av frekvensamplituden överskrider 151, 6 [F.a.], vilket är det värde som 75% av samtliga drivdon i kategori 3 (*ej slitna drivdon*), hamnar under. En generell indikation på att ett drivdon håller på att övergå till en kategori 2 från en kategori 3 kan därmed vara att medelvärdet av frekvensamplituden överskrider 150 [F.a.]. I beaktande bör även tas att denna jämförelse, som tidigare nämnts, är ekvivalent med en jämförelse av den vanligaste standardavvikelsen för varje enskilt drivdons effektkurva.

### Maximal frekvensamplitud för intervallet (1.4-1.7 Hz) [F.a.]

Baserat på undersökningen om det maximala värdet av frekvensamplituden vid de specificerade intervallen i frekvensdomänen togs figur 36 fram för identifieringsindikationer på slitage i drivdonen vid 1.4-1.7 Hz. Figur 36 visar maximala amplituden av frekvensen på samtliga körningar av slitna (blå), nästan slitna (röd), samt ej slitna (gul), drivdon. Baserat på figur 36 har en standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median beräknats separat för samtliga tre kategorier, vilket visas i tabell 17.

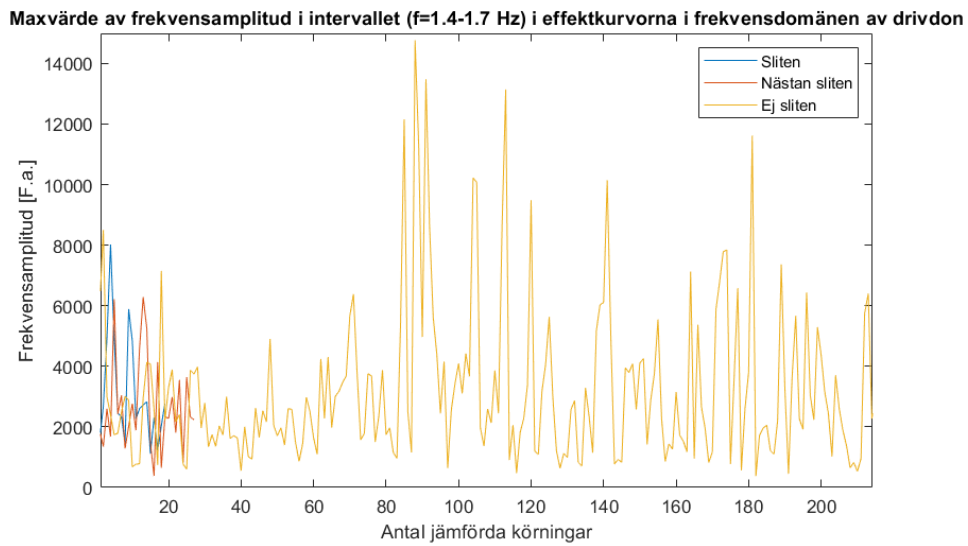
Tabell 17 - Standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median har beräknats separat för samtliga tre kategorier.

Maximal frekvensamplitud [F.a.] (1.4-1.7 Hz)	Slitna drivdon (1)	Nästan slitna drivdon (2)	Ej slitna drivdon (3)
Medelvärde	3103,1	2661,4	3259,2
Median	2607,0	2324,7	2547,8
Standardavvikelse	1801,3	1545,9	2534,8



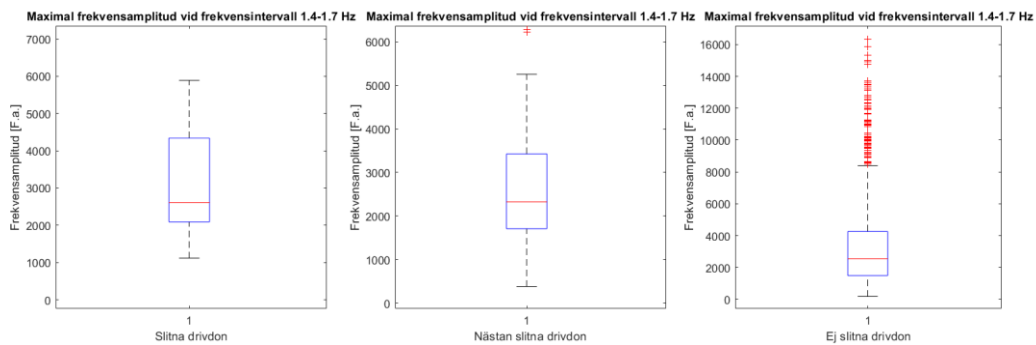
Figur 36 - Medelvärde av frekvensamplituden [F.a.] i intervallet (1.4-1.7 Hz) för samtliga analyserade drivdon indelat i tre kategorier.

För tydligare identifiering av skillnaden mellan frekvensamplituderna av drivdonen i respektive kategori visas de första 200 körningarna av drivdon i figur 37.



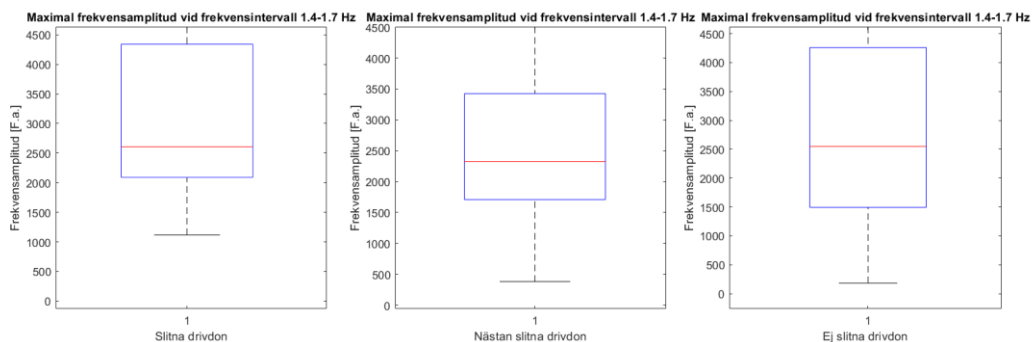
Figur 37 - Medelvärde av frekvensamplituden [F.a.] i intervallet (1.4-1.7 Hz) för ett urval av de analyserade drivdonen indelat i tre kategorier.

I figur 38 visas låddiagram för samtliga punkter i figur 36.



Figur 38 - Låddiagram för samtliga punkter vid analysen av maximala värdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 1.4-1.7 Hz.

I figur 39 visas samma låddiagram som i figur 38, men med omskalade y-axlar, för en mer överskådlig jämförelse mellan kategorierna.



Figur 39 - Låddiagram för punkter närmast medianvärdet, vid analysen av maximala värdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 1.4-1.7 Hz.

Tabell 18 - Värden framtagna ur låddiagram i figur 38.

<b>Maximal frekvensamplitud [F.a.] (1.4-1.7 Hz)</b>	<b>Slitna drivdon (1)</b>	<b>Nästan slitna drivdon (2)</b>	<b>Ej slitna drivdon (3)</b>
Värde för första kvartilen	2089,6	1709,5	1494,3
Värde för tredje kvartilen	4340,8	3424,4	4260,5
Antal utliggare	1	2	80
Maximalt värde	8022,7	6284,2	16328,6
Minimalt värde	1118,0	382,1	183,7
Antal mätpunkter	19	27	1683

### Diskussion kring maximal frekvensamplitud i intervallet (1.4-1.7 Hz)

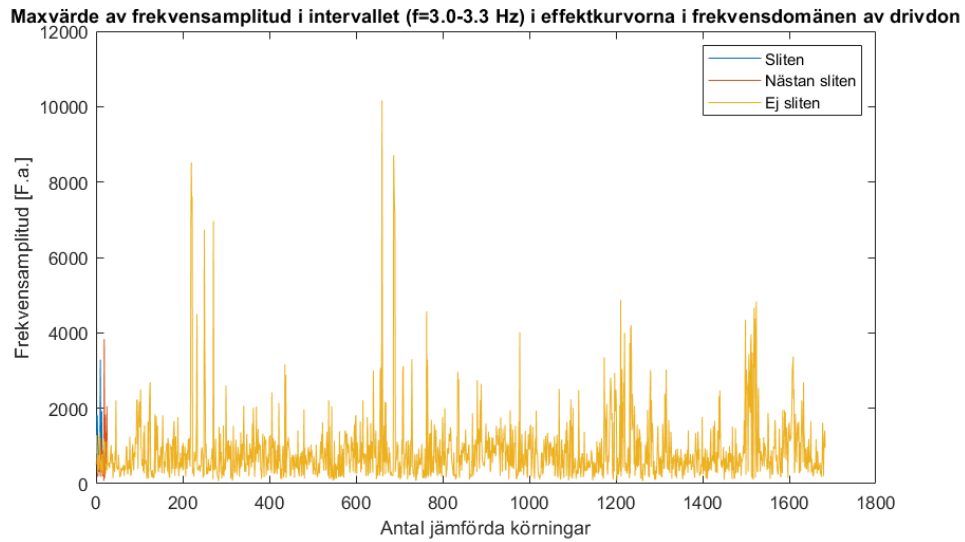
Baserat på analysen kring den maximala frekvensamplituden i det intressanta identifierade området om 1.4-1.7 Hz, kan konstateras att det inte går att urskilja något samband mellan de tre kategorierna vad gäller både totalt medelvärde eller total median för frekvensamplituden inom detta frekvensintervall. Ur tabell 18 och figur 36-39 kan inte heller identifieras någon tydlig korrelation mellan vare sig kategori 1 och 2, eller mellan kategori 2 och 3. Noteras bör emellertid att värdet av den första kvartilen är lägst för kategori 3 och högst för kategori 1. På samma sätt ökar det minimala värdet av frekvensamplituden, lägst för kategori 3 och högst för kategori 1. En indikation på en övergång mellan kategori 2 och 3 skulle därmed kunna tänkas vara då värdet för den första kvartilen överstiger 1709,5 [F.a.], mer generellt kan 1700 [F.a.] ansättas som en bra gräns. Detta är dock en indikation som enbart går att avläsa vid tillämpning av låddiagram i mängden data som analyseras. Således är det inte en bra indikation och bör enbart ses som ett möjligt ytterligare tillägg till de indikationer på slitage som redan presenterats. Samtliga övriga analyserade parametrar för den maximala frekvensamplituden i frekvensintervallet 1.4-1.7 Hz, påvisar inte några tydliga samband mellan drivdonens slitagekategorier.

### Maximal frekvensamplitud för intervallet (3.0-3.3 Hz) [F.a.]

Baserat på undersökningen om det maximala värdet av frekvensamplituden vid de specificerade intervallen i frekvensdomänen togs figur 40 fram för identifieringsindikationer på slitage i drivdonen vid 3.0-3.3 Hz. Figur 40 visar maximala amplituden av frekvensen på samtliga körningar av slitna (blå), nästan slitna (röd), samt ej slitna (gul), drivdon. Baserat på figur 40 har en standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median beräknats separat för samtliga tre kategorier, vilket visas i tabell 19.

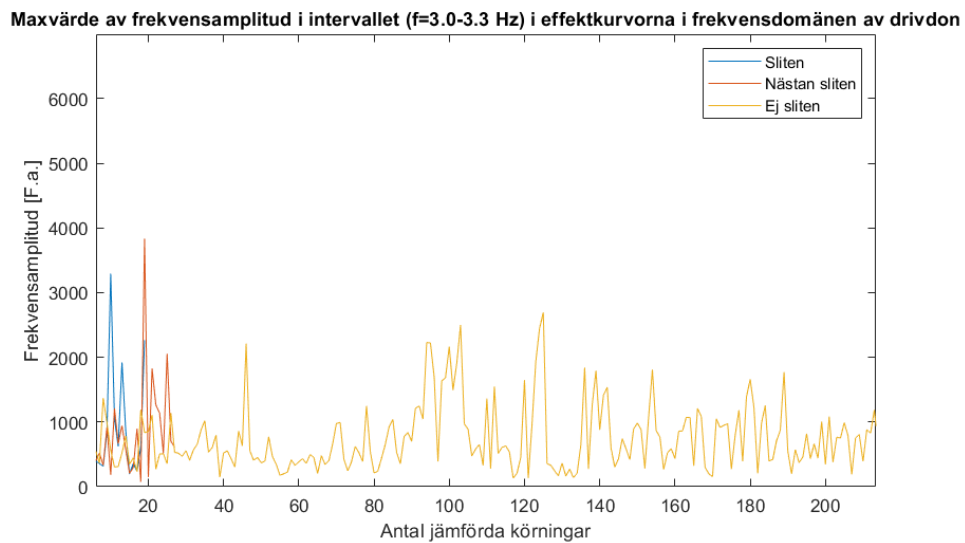
Tabell 19 - Standardavvikelse, ett medelvärde, samt en median har beräknats separat för samtliga tre kategorier.

<b>Maximal frekvensamplitud [F.a.] (3.0-3.3 Hz)</b>	<b>Slitna drivdon (1)</b>	<b>Nästan slitna drivdon (2)</b>	<b>Ej slitna drivdon (3)</b>
Medelvärde	1024,0	796,7	866,5
Median	836,0	574,4	647,5
Standardavvikelse	833,2	779,0	881,0



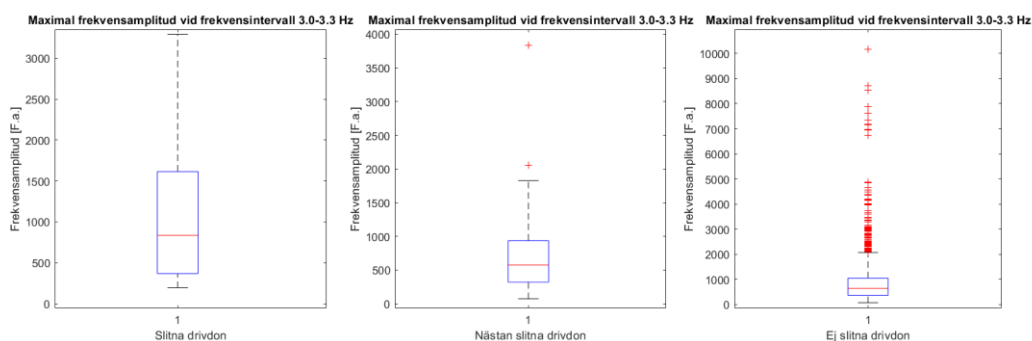
Figur 40 - Medelvärde av frekvensamplituden [F.a.] i intervallet (3.0-3.3 Hz) för samtliga analyserade drivdon indelat i tre kategorier.

För tydligare identifiering av skillnaden mellan frekvensamplituderna av drivdonen i respektive kategori visas de första 200 körningarna av drivdon i figur 41.



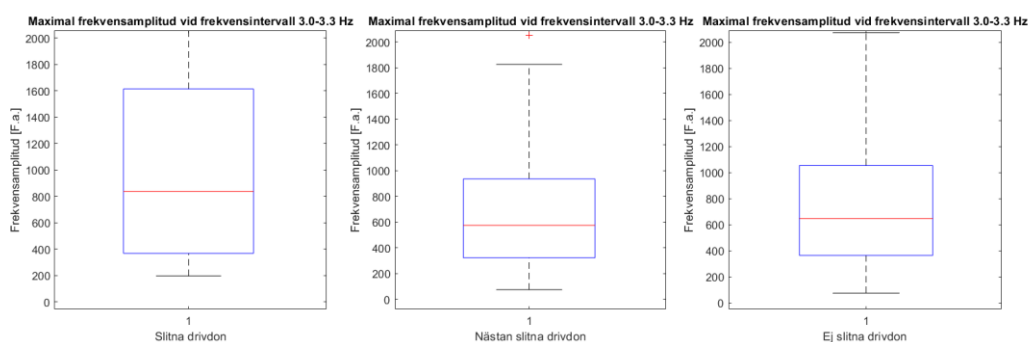
Figur 41 - Medelvärde av frekvensamplituden [F.a.] i intervallet (3.0-3.3 Hz) för ett urval av de analyserade drivdonen indelat i tre kategorier.

I figur 42 visas låddiagram för samtliga punkter i figur 40.



Figur 42 - Låddiagram för samtliga punkter vid analysen av maximala värdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 3.0-3.3 Hz.

I figur 43 visas samma låddiagram som i figur 42, men med omskalade y-axlar, för en mer överskådlig jämförelse mellan kategorierna.



Figur 43 - Låddiagram för punkter närmast medianvärdet, vid analysen av maximala värdet av den totala frekvensamplituden [F.a.] inom intervallet 3.0-3.3 Hz.

Tabell 20 - Värden framtagna ur låddiagram i figur 42.

Maximal frekvensamplitud [F.a.] (3.0-3.3 Hz)	Slitet drivdon	Nästan slitet drivdon	Ej slitet drivdon
Värde för första kvartilen	367,6	321,7	364,6
Värde för tredje kvartilen	1614,6	936,0	1054,0
Antal utliggare	0	2	102
Maximalt värde	3292,3	3835,1	10165,2
Minimalt värde	195,5	74,2	74,9
Antal mätpunkter	19	27	1683

### Diskussion kring maximal frekvensamplitud i intervallet (3.0-3.3 Hz)

På liknande sätt som för den maximala frekvensamplituden vid frekvensintervallet 1.4-1.7 Hz, finns inte heller vid frekvensintervallet 3.0-3.3 Hz, ett tydligt samband mellan vare sig totalt medelvärde eller total median mellan kategorierna. Detta går både att urskilja i tabell 20 såsom i figur 40-43. Vidare finns inte heller något samband för värdet av den tredje kvartilen mellan de tre kategorierna. Till skillnad från analysen av frekvensamplituden gjord på intervallet 1.4-1.7 Hz, finns i intervallet 3.0-3.3 Hz inte något samband för värdet av den första kvartilen mellan de tre kategorierna. Anledningen till att det går att urskilja ett samband i intervallet 1.4-1.7 Hz men inte i intervallet 3.0-3.3 Hz kan bero på att de amplitudhöjningar som identifierats för samtliga drivdonskörningar i dessa intervaller, i majoriteten av fallen är lägre för intervallet 3.0-3.3 Hz jämfört med för intervallet 1.4-1.7 Hz. Skillnaden i frekvensamplitudstoppar mellan de olika intervallen går att se i figur 13 i rapportens experimentella metoddel. Slutsatsen som kan dras av analysen av den maximala

frekvensamplituden i frekvensintervallet 3.0-3.3 Hz är således att det inte har hittats några tydliga indikationer som kan visa på om ett drivdon är på väg att övergå från vare sig kategori 3 till 2, eller från kategori 2 till 1.

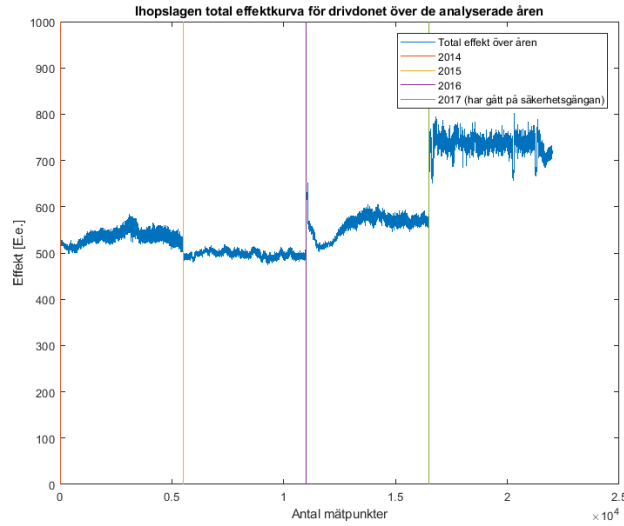
#### 4.4.3 Sammanfattning av möjliga indikationer för upptäckt av drivdonsslitage

- **Medelamplitud:**  
Det finns inte något tydligt effektintervall för vilken man med säkerhet kan säga att drivdonets slitage går över från kategori 3 till kategori 2. Emellertid har identifierats indikationer på att drivdonet går från slitagekategori 2 till slitagekategori 1, vilket är i de fallen då medelamplituden för effektkurvan är hög. Om medelamplituden för effektkurvan överskrider 480 [E.e.] så kan med en viss sannolikhet sägas att drivdonet har gått från en kategori 2 till 1 och att det därmed går på säkerhetsgängen.
- **Maximal störningsamplitud:**  
En indikation på att ett drivdon håller på att gå från kategorin *Ej slitna*(3), till kategorin *Nästan slitna* (2), kan vara om den maximala störningsamplituden för effektkurvan överskrider värdet på effekten på den tredje kvartilen i kategori 3, vilket är 13 [E.e.]. Felkällor förekommer emellertid för jämförelserna av de olika kategorierna i denna parameter.
- **Medelvärde av frekvensamplituden i frekvensintervallet (0-12.5 Hz):**  
En indikation på att ett drivdon övergår från kategori 3 till kategori 2 har identifierats till att kunna vara då drivdonskurvans medelvärde av frekvensamplituden överskrider 150 [F.a.].
- **Maximal frekvensamplitud i frekvensintervallet (1.4-1.7 Hz):**  
Ingen tydlig indikation har identifierats.
- **Maximal frekvensamplitud i frekvensintervallet (3.0-3.3 Hz):**  
Ingen indikation identifierad.

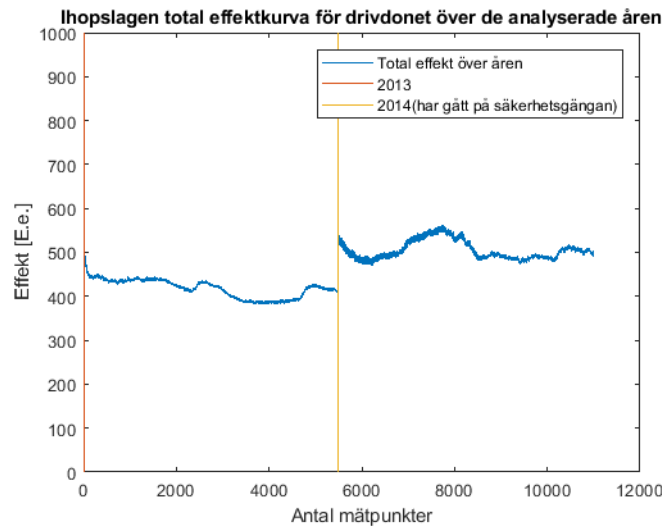
#### 4.4.4 Exempel på resultat framtagna i tidsdomänen för två specifika drivdon

För jämförelse av medelamplitud, störningsamplitud, och frekvensamplituder mellan ett specifikt drivdons olika år i drift valdes två slumpmässiga drivdon ut för att illustrera effektkurvornas skillnader mellan åren. Båda kurvorna har dokumenterats att ha gått på säkerhetsgängen vid tiden för förebyggande underhåll, se figur 44 och 45. Skillnaden mellan dessa två drivdon går dock att tydligt se då effekten i tidsdomänen jämförs för de båda kurvorna. Skillnader går även att se då effektkurvan i frekvensdomänen jämförs mellan de olika drivdonen, se figur 46. Här visas samma drivdon, vilka båda gått på säkerhetsgängen vid ett av åren, men det går tydligt att se skillnaderna mellan de båda drivdonens effektkurvor i frekvensdomänen, detta trots att båda har gått på säkerhetsgängen. Vidare kan en frekvenskurva för ett drivdon som inte gått på säkerhetsgängen ses plottad i frekvensdomänen i figur 47. Figur 47 kan jämföras med figur 46 för identifikation av skillnaderna mellan frekvenskurvorna för drivdon som gått på säkerhetsgängen jämfört med som inte gått på säkerhetsgängen.

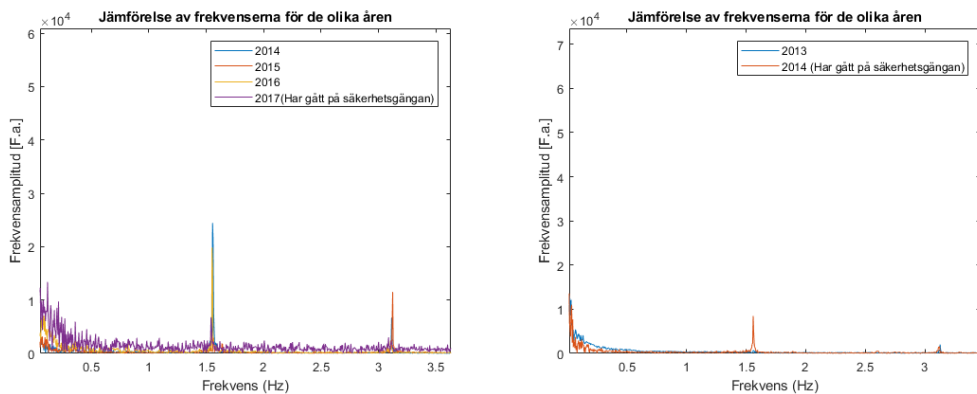




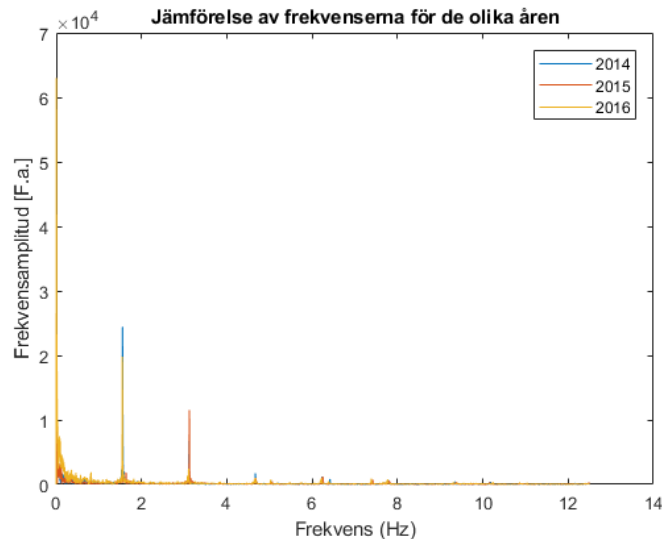
Figur 44 - Ihopslagning av ett slumpmässigt valt drivdons effektkurvor i tidsdomänen mellan åren 2014-2017.



Figur 45 - Ihopslagning av ett slumpmässigt valt drivdons effektkurvor i tidsdomänen mellan åren 2013-2014.



Figur 46 - Ihopslagning av två slumpmässigt valda drivdons effektkurvor i frekvensdomänen, vilka båda gått på säkerhetsgängen mellan åren 2013-2014, samt 2014-2017.



Figur 47 - Ihopslagning av ett slumpmässigt valt drivdons effektkurvor i frekvensdomänen, vilken ej har gått på säkerhetsgången mellan åren 2014-2016.

#### Diskussion kring jämförelser mellan olika drivdonskörningar för samma drivdon

Skillnaden mellan de olika drivdonens medelamplitud är tydlig. För drivdonet i figur 44 kan tydligt urskiljas en förändring i medelamplitud för effekten då drivdonet har gått på säkerhetsgången. För drivdonet i figur 45 kan emellertid inte denna förändring i medelamplitud identifieras lika tydligt. Trots detta har bägge drivdon dokumenterats att ha gått på säkerhetsgången. Vidare bör även noteras att liknande trender går att urskilja vid en jämförelse av drivdonen i figur 46 där det ena drivdonet har tydliga toppar i frekvensamplituden medan den andra kurvan inte har lika tydliga toppar. I figur 46 visas en inzoomning av frekvenskurvas lägre frekvenser för att en tydligare jämförelse skall kunna göras mellan frekvenstopparna i dessa båda kurvor eftersom de båda har varierande storlek på frekvenstopparna. Figur 46 kan även jämföras med figur 47 som visar ett drivdons effektkurva i frekvensdomänen, som inte gått på säkerhetsgången. I figur 47 kan tydliga frekvenstoppar urskiljas i de lägre frekvensintervallen. Generellt sett kan sägas att de lägre frekvenserna dominerar för drivdonen i både figur 46 och 47, men i den högra kurvan i figur 46 kan en något större dominans urskiljas för de lägre frekvenserna i förhållande till resterande frekvenser i intervallet 0-12.5 Hz. Med avseende på drivmutterslitage bör detta tolkas som att drivdonsmotorn inte har mött lika mycket motstånd vid inskrivningen av drivdonet i den högra kurvan, jämfört med den vänstra, i figur 46.

En slutsats som kan dras av detta är således att alla drivdon som har gått på säkerhetsgången inte följer samma trend vare sig gällande effektamplituder eller frekvensamplituder. Samtliga slutsatser som dras av analyserna gjorda i detta arbete bör således enbart anses vara indikationer på slitage och inte slutgiltiga bevis på slitage.

#### 4.4.5 Felkällor kring analysen av drivdonens effektkurvor

En stor felkälla som bör tas i beaktande är den stora skillnad i mängden av mätdatapunkter som föreligger mellan kategori 1 och 2 jämfört med kategori 3. Anledningen till den stora skillnaden i antal datapunkter är det begränsade antal drivdon som med åren har slitits i Forsmark 2 och som därmed klassificeras inom någon av kategorierna 1 eller 2. För en korrekt analys av ovanstående resultat bör således nämnas att de utstickande höga värdena på flertalet mätpunkter för kategori 3, såsom till exempel det maximala värdet av

störningsamplituden i kategori 3, sannolikt beror på den stora skillnad i mängd data som finns tillgängligt för respektive kategori. Den större spridning som kan anses identifieras för samtliga parametrar i kategori 3 jämfört med kategori 1 och 2 måste därför utvärderas med avseende på den procentuella andelen mätpunkter som föreligger som utliggare i respektive kategori. Då detta analyseras kan en slutsats dras om att den procentuella skillnaden i antalet utliggare för respektive kategori inte skiljer sig märkbart mellan kategorierna. För en korrekt jämförelse baserat på den stora skillnaden i mängden datapunkter som finns att tillgå bör således istället medelamplitud och kvartiler vara i fokus vid analyserna och jämförelserna. Slutligen bör även sägas att på grund av de få mätpunkter som finns att tillgå för kategori 1 och 2 jämfört med kategori 3 så kan resultatet i kategori 3 anses vara mer tillförlitligt jämfört med resultatet i kategori 1 och 2. Således kan indikationer som visar på en övergång från kategori 3 till kategori 2 anses vara statistiskt säkrare jämfört med indikationer som visar på en övergång från kategori 2 till kategori 1.

Som en ytterligare felkälla bör även noteras att den maximala störningsamplituden enbart jämför ett specifikt värde, den maximala skillnaden mellan trendlinjen och effektkurvan. Detta gör att en enda störning kan ge ett väldigt stort värde på den maximala störningsamplituden och därmed bidra till stora felkällor. Vidare är det därför bättre att jämföra medelfrekvensamplituden, det vill säga standardavvikelsen, mellan de olika drivdonskörningarna. Detta då standardavvikelsen ger ett värde på avvikelserna med hänsyn till samtliga punkter på kurvan och inte bara ett specifikt värde. Stora felkällor förekommer därmed inte för dessa jämförelser.

Vidare är klassificeringen av samtliga drivdonskörningar en stor felkälla då klassificeringen som tidigare nämnts enbart baserats på dokumentationen kring vilket år drivdonen identifierats gå på säkerhetsgången. Det är därför mycket troligt att flertalet av de drivdonskörningar vilka i ovanstående analyser ingår i kategori 3 (*ej slitna drivdon*), troligtvis egentligen tillhör kategori 2 (*nästan slitna drivdon*) eller till och med kanske kategori 1 (*slitna drivdon*), men att detta av olika anledningar inte upptäckts vid tiden för drivdonskörningen. Det är svårt att undvika denna felkälla då det är omöjligt att identifiera exakta tidpunkter för när drivdonsslitage inträffar. Ovanstående analyser ger således enbart en indikation på intressanta parametrar och gränsvärden som kan vara av intresse att hålla under uppsikt för en tidig identifiering av slitna drivdon och för att på så sätt om möjligt undvika att drivdonen slits så pass mycket att de går på säkerhetsgången.

Sammanfattningsvis kan sägas att samtliga parametrar jämförda för de tre kategorierna enbart kan ses som indikationer på slitage och inte som fullständiga bevis på slitage. Emellertid kan sägas att ju fler av indikationerna som kan identifieras i ett och samma drivdons effektkurva, desto större sannolikt är det att drivdonet är slitet, eller nästan slitet.

## **4.5 Förslag till ny underhållsstrategi för drivdonen i Forsmark 1 och 2**

### **4.5.1 Sammanfattning av undersökningens resultat av det historiska slitaget**

Undersökningen av det historiska slitaget visar på att en ökad mängd drivdon i Forsmark 1 och 2 har slitits under de senaste åren, enligt figur 15-22. Detta resultat beror främst på två separata orsaker. Dels beror det ökade slitaget på borttagandet av mutterglappsmätning under tank, vilket gjordes i slutet av 90-talet. Dels beror det ökade slitaget på en ändring av det förebyggande underhållsintervallet (FU-intervallet), från 8 år till 10 år. Efter jämförelser med andra nordiska verk är det tydligt att den största bidragande orsaken till varför Forsmarks slitage av drivdon skiljer sig så markant från övriga verks slitage, är avsaknaden av mutterglappsmätningen under tanken. För information kring innehållet i intervjuerna med anställda i de liknande verken hänvisas till den kompletta rapporten som är sekretessbelagd och tillhör FKA. Efter jämförelser och intervjuer med experter inom området, anställda vid andra liknande kärnkraftverk, har det framkommit att uppbyggnaden och strukturen i de jämförda verken är näst intill identisk med Forsmark 1 och 2, men trots det har slitagebilden för drivdonen i de olika verken varierat. En slutsats kan därmed dras att för att i framtiden kunna undvika att drivdon går på säkerhetsgängen i Forsmark 1 och 2, bör underhållsstrategier från dessa liknande verk tas i beaktande vid framtagandet av en ny underhållsplan för Forsmark 1 och 2. Då konstruktionen och materialen i respektive verk är likartade bör fokus i arbetet mot ett minskat slitage av drivdonen i Forsmark 1 och 2 ligga på att förbättra nuvarande underhållstrategi baserat på de liknande verkens erfarenheter för att på enklast sätt uppnå minimalt slitage av drivdonen.

Vidare kan även konstateras att ett större slitage i härdens randpositioner har under de senare åren upptäckts för Forsmark 2 jämfört med för Forsmark 1, enligt tabell 3-8. En orsak till denna slitageskillnad har ännu inte identifierats då verken är identiska och ingen skillnad gällande varken konstruktion, flöde, eller material bedöms finnas mellan verken. Orsaken till det ökade slitaget på Forsmark 2 kan därmed vara enbart slumpmässig då slitagetrenden inte är tillräckligt tydlig för att vara statistiskt signifikant. Således ges även fortsättningsvis samtliga rekommendationer i denna rapport för underhållet av drivdon, till både Forsmark 1 och 2 tillsammans.

Noteras bör dock att ingen tydlig historisk trend identifierats efter den historiska kartläggningen på specifika drivdonspositioner vilka slitits mindre än andra i härdens. Baserat på framtagen data för slitage, kan således inte dras någon slutsats om specifika positioner i härdens för varken Forsmark 1 eller 2 vilka potentiellt sett kan ha mindre risk att slitas jämfört med andra positioner. Det enda samband och slutsats som går att avläsa är därmed att de positioner som inte är randpositioner, historiskt sett har slitits mindre.

### **4.5.2 Praktiska åtgärder som kan genomföras för att förhindra slitage**

Baserat på den genomförda undersökningen av drivdonens slitage kan en slutsats dras om att drivdonsslitaget där drivdonen gått på säkerhetsgängen beror på flera olika faktorer. Efter undersökningen kan emellertid konstateras att en ökad ansamling crud (smuts) i randpositionerna i härdens verkar vara den största bidragande faktorn till ett ökat slitage i dessa positioner jämfört med i resten av härdens. En ökad ansamling crud innebär ett ökat slitage av drivdonen i randpositionerna. Efter en mindre analys av HC-flöde och spolflöde i

randpositionerna kan sägas att en trolig anledning till den ökade crudansamlingen i randen beror på skillnaden i flöde mellan randpositionerna och positionerna längre in i härden. Vidare kan sägas att den analyserade skillnaden mellan styrstavsledrören i randpositionerna jämfört med i resten av härden antas ha en bidragande påverkan på skillnaden i flöde mellan randen och de inre delarna av härden. För säkerställande av och kunskap om exakt till vilken grad flödena kring drivdonen och styrstavsledrören skiljer sig i randpositionerna jämfört med i resten av härden krävs detaljerade flödessimuleringar, vilket även kommer att rekommenderas från denna rapport för vidare studier inom området. Vidare bör flödessimuleringar göras kring påverkan av ett ökat spolflöde för crudborthållningsflödet i drivdonen, för att på så sätt undersöka om en höjning av flödeshastigheten kan minska andelen crud som ansamlas i drivmuttern.

Baserat på resultatet av ovanstående nämnda simuleringar skulle förebyggande åtgärder mot crudansamling i drivdonen kunna sättas in, till exempel i form av en ökad hastighet på crudborthållningsflödet till drivdonen.

Ytterligare förebyggande åtgärder mot slitage som kan genomföras är införandet av en ökad motionering av drivdonen i härden. Som tidigare nämnts kräver detta ytterligare undersökningar för säkerställande och utvärdering om påverkan på ytterligare komponenter i härden. Emellertid tycks denna åtgärd minska ansamlingen av crud i drivdonen, vilket minskar risken för slitage i drivmuttern.

#### **4.5.3 Förslag till ny underhållsplan**

Baserat på undersökningen som lagts fram i denna rapport kommer två separata förslag till ny underhållsplan för drivdonen på Forsmark 1 och Forsmark 2 att läggas fram. För att minimera risken att drivdonen går på säkerhetsgången kan en slutsats dras, baserat på det historiska slitaget vilket framtagits i undersökningen, att en ändring i den nuvarande underhållsplanen för drivdonen i Forsmark 1 och 2 krävs för att minimera slitaget av drivdonen.

Rapportens primära rekommendation till ny underhållsstrategi för drivdonen innebär att de positionerna i härden som slits mest, det vill säga randpositionerna, kommer att bytas ut oftare jämfört med resten av härden. Strategin baseras delvis på erfarenheter från liknande verk vilka framkommit under intervjuer och studier av liknande verks underhållsstrategier.

Utifrån undersökningens resultat framläggs även ett ytterligare alternativ till ny underhållsstrategi för drivdonen på Forsmark 1 och 2. Denna är baserad på erfarenheter framtagna från liknande verk i Norden gällande mutterglappsmätning under tank. Denna metod är av majoriteten av experterna inom området den enskilt viktigaste faktorn till skillnaden mellan slitaget på Forsmark 1 och 2 jämfört med de övriga jämförda verken. Informationen av vad som framkommit under intervjuerna går att återfinna i FKAs interna material. Således kommer det sekundära förslaget till ny underhållsstrategi för drivdonen i Forsmark 1 och 2 innebära införande av mutterglappsmätning under tank. I vilken form detta sker beror på hur lång tid som finns att tillgå, men en rekommendation baserat på undersökningens resultat, är att prioritera mutterglappsmätning under tank i positionerna i randen, vilka slits mest.

Nedan presenteras de två förslag till ny underhållsplan vilka rapportens undersökning kommit fram till:

#### **Förslag 1:**

- Underhållsintervallet för positionerna i härden som inte är randpositioner behålls till att ha nuvarande 10 års underhållsintervall, enligt figur 48-49.
- Randpositionerna har ett underhållsintervall på 7-8 år enligt figur 48-49.

#### **Förslag 2:**

- Underhållsintervallet för samtliga drivdon behålls till att vara nuvarande 10 års intervall.
- Mutterglappsmätning under tank införs. Mutterglappsmätningen införs antingen på en specifik andel av den totala härden varje år. Alternativt införs mutterglappsmätningen enbart på randpositionerna i härden.

Baserat på intervjuer av experter från liknande verk rekommenderas primärt att förslag 1 genomförs. Om slitaget av drivdonen inte minskar med den nya revisionsplanen rekommenderas istället förslag 2 som en alternativ åtgärd för arbetet mot ett minskat slitage av drivdonen.

Då hänsyn tagits till den nya revisionstiden från 2016 har följande nya underhållsplaner tagits fram för drivdonen i Forsmark 1 samt i Forsmark 2, enligt figur 48-49. Den nya revisionsplanen, vilken presenterats som *Förslag 1* har sin utgångspunkt i den gamla revisionsplanen från 2016 med ett underhållsintervall på 10 år för samtliga drivdon, men har justerats baserat på ett nytt underhållsintervall för härdens randpositioner. För jämförelse av ny och gammal underhållsplan visas den gamla underhållsplanen i appendix 1 för Forsmark 1 och för Forsmark 2.

För att anpassa det nya förslaget till drivdonsunderhåll efter den nya revisionsplanen är underhållsstrategin att från och med år 2021 byta 15-16 drivdon under revisionerna om X dygn, samt att byta 24-26 drivdon på revisionerna om Y dygn. På så sätt överskrids inte det 10 åriga FU-intervallet på de drivdon som inte sitter i randpositioner, samt att drivdonen i randpositionerna inte överskrider ett underhållsintervall på 8 år. Majoriteten av drivdonen i randpositionerna har ett planerat underhållsintervall på 7 år, men efter att drivdonsunderhållet anpassas efter den nya revisionsplanen kan fåtalet drivdon i randpositionerna uppnå ett underhållsintervall på 8 år istället för 7 år, för att revisionstiderna inte skall överskridas. Följande figurer visar ett urval som exemplifierar den nya föreslagna underhållsplanen för drivdonen på Forsmark 1 och 2. Figuren visar underhållsplanen för Forsmark 1 mellan åren 2021-2028. I figuren går att avläsa vilka drivdonspositioner i härden om, enligt den nya underhållsplanen, ska tas ur tanken och underhållas under vilken revision. Som kan ses i figur 48-49 kommer samtliga av de drivdon som finns med i den tidsperiod som figuren visar, att underhållas som maximalt vart tionde år. Samtliga drivdon i randpositionerna kommer att underhållas var 7-8e år, enligt figur 48-49. I figuren går även att avläsa hur länge respektive drivdon har suttit inne i tanken då drivdonsunderhåll utförs samt vilket år respektive drivdon senast underhölls. De av undersökningen framtagna förslagen till ny underhållsplan för Forsmark 1 respektive Forsmark 2 går att finna i sin helhet i FKAs interna dokumentationssystem.



## 4.6 Praktisk tillämpning av undersökningens resultat

Syftet med detta arbete var att dels undersöka det historiska slitaget av drivdonen på Forsmark 1 och 2, vilka gått på den så kallade säkerhetsgången. Syftet var vidare att undersöka möjliga orsaker till det funna historiska slitaget samt att finna indikationer på hur det analyserade slitaget av drivdon kan upptäckas i ett tidigt stadie för att undvika att drivdonen går på säkerhetsgången. Baserat på den framtagna och analyserade data var ett av målen att ta fram ett förslag till en ny underhållsplan för drivdonen på Forsmark 1 och 2. Målet med den nya underhållsplanen presenterad i denna rapport är att minimera slitaget av drivdonen, vilket innebär att drivdonen går på säkerhetsgången.

Vidare kan de analyser gjorda av drivdonens effektkurvor bidra till en ökad förståelse för utvecklingen av slitaget av drivdonen. Analyserna av de historiska effektkurvorna på drivdonen i Forsmark 1 och 2 har inte gett något entydigt svar på exakta indikationer för vilka drivdon som med säkerhet har slitits. Således kan slutsatsen, vilken även besvarar delar av arbetets frågeställning, dras om att det inte går att utläsa enbart ur effektkurvorna tagna från SODEM-datorn, exakt vid vilken tidpunkt drivdonen börjar att gå på säkerhetsgången. Detta eftersom slitaget av drivdonen kan se väldigt olika ut och därmed yttra sig olika på effektkurvorna som fås ut vid inskrivning av drivdonen. Emellertid har flertalet indikationer på att drivdonet är nära att slitas och gå på säkerhetsgången, hittats i rapportens undersökning, vilka presenterats närmare i avsnitt 4.4. Med hjälp av dessa indikationer kan slitaget av drivdonen på ett tidigt stadie upptäckas. Emellertid bör noteras att på grund av den stora variation i hur slitaget av drivdonen som går på säkerhetsgången uttrycker sig i effektkurvorna, så är de presenterade indikationerna enbart ett tecken på att drivdonet i fråga håller på att bli sliten. De presenterade indikationerna i avsnitt 4.4.3 bör således enbart ses som ett eventuellt framtida komplement till nuvarande avläsning av effektkurvor för bedömning av slitaget av drivdonen inför varje revision.

Noteras bör även att om alternativet att återinföra mutterglappsmätning under tanken inte väljs att genomföras, bör mer fokus läggas på analyserna av effektkurvorna från SODEM-datorn. Detta för att potentiellt slitna drivdon vilka ligger utanför FU intervallet, och vilka annars skulle upptäckts med hjälp av mutterglappsmätning, nu enbart kan upptäckas med hjälp av analys av effektkurvorna. Således rekommenderas att ytterligare analyser av effektkurvorna för drivdonen görs om rapportens rekommenderade förslag om att införa mutterglappsmätning under tank, inte genomförs.



## 5. Slutsatser

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras baserat på rapportens presenterade resultat. Drivdonens historiska slitage har varierat med åren för både Forsmark 1 och 2. Emellertid syns en ökad mängd slitna drivdon under de senare 20 åren av verkens livslängd. Vidare kan en slutsats dras att det största slitaget av drivdon historiskt sett skett på randpositionerna i härden. För att minimera framtida slitage föreslås en ny underhållsplan enligt avsnitt 4.5.3 där ett minskat underhållsintervall sätts på drivdonen i randpositionerna för att på så sätt undvika att donen går på säkerhetsgängen. Rapporten framlägger även flertalet rekommendationer kring vidare studier som kan göras för att om möjligt motverka uppkomsten av slitage i drivdonen, se avsnitt 7. Slutligen har potentiella indikationer på slitageidentifiering i ett tidigt stadium undersökts genom analyser i MATLAB. Indikationerna kan påvisa slitage av drivdon samt i vissa fall påvisa om slitage i drivdonet håller på att uppstå. Se avsnitt 4.4.3 för framtagna indikationer på drivdonsslitage.

## 6. Reflektioner

Undersökningens resultat bidrar till en ökad förståelse för hur slitaget av drivdon sett ut, både på Forsmark men även på andra liknande verk i Norden. Vidare ger rapportens resultat en sammanfattande och bredare bild av möjliga orsaker till det slitage av drivdon som historiskt sett skett i Forsmark 1 och 2. Förhoppningen är att undersökningens resultat kan bidra till att minimera antalet drivdon som går på säkerhetsgången i Forsmark 1 och 2. Då problemet med drivdon som går på säkerhetsgången, som tidigare nämnts, främst är av ekonomisk karaktär, så kommer ett minskat slitage vara mycket positivt för Forsmark ur ett ekonomiskt perspektiv. Ett minskat slitage av drivdon är även positivt ur ett hållbarhetsperspektiv då färre drivdonsskruvar behöver kasseras ju mindre antal skruvar som går på säkerhetsgången. Således kan fler drivdonsskruvar i Forsmark 1 och 2 återanvändas och konsumtionen av skruvarna minskar. Ur ett hållbarhetsperspektiv bör det även tas i beaktande att kärnkraftverken, vilken i dagsläget står för en väsentlig del av den svenska elproduktionen, bör underhållas på ett hållbart sätt för att en så säker energitillförsel som möjligt skall kunna uppnås. Då drivdonen fyller en viktig roll, och är en väsentlig del i elproduktionen i ett kärnkraftverk, är det av stor vikt att underhållet av dessa drivdon sker på ett kontrollerat och utvärderat sätt. Detta examensarbete har därmed bidragit till en hållbar utveckling för underhållet av drivdonen vid Forsmark 1 och 2 samt bidragit med väsentlig information och resultat för vidare studier inom området kring drivdonsslitage och hur detta kan minimeras i framtiden.

Slutligen har även potentiella indikationer till slitage identifierats vilka kan bidra till en mer exakt avläsning av de så kallade SODEM-effektkurvorna för identifiering av slitage av drivdon. Detta kan ge en ytterligare positiv ekonomisk aspekt då potentiella slitna drivdon enklare kan identifieras och möjligheten att minimera slitaget av drivdonen blir ännu större. Det bör emellertid tas i beaktande att den informationsinsamling av det historiska slitaget av drivmuttrarna som undersökningen baseras på stundtals har varit bristfällig och tvetydig. Detta beror främst på avsaknaden av information som finns att tillgå gällande drivmutterslitage historiskt sett, framförallt från de tidigaste åren av verkens livslängd.

## 7. Rekommendationer för vidare studier

Utifrån studiens framtagna resultat har flertalet områden framkommit vilka kan vara av intresse att analysera vidare kring, för att om möjligt få ytterligare information kring slitaget av drivdon som gått på säkerhetsgången. Rapportens rekommendationer för vidare studier är således följande:

- Det rekommenderas att studier görs kring hur motioneringen av styrvagnarna kan ökas i härden utan att detta påverkar resterande delar av reaktortanken negativt. Ett ökat motioneringsintervall kan som tidigare nämnts minska ansamlingen av crud i drivmuttrarna och därmed minska slitaget i drivmuttrarna.
- Rekommendationer görs även kring vidare undersökning av hur ansamlingen av crud påverkas av den tidigare presenterade avsaknaden av hål i botten av styrvagnsledrörshålen i randpositionerna i härden. För en mer exakt undersökning av huvudcirkulationsflödets påverkan på crudborthållningsflödet då dessa möts, krävs detaljerade flödessimuleringar.
- För vidare studier rekommenderas även att en utvärdering görs efter ett antal år av den nya underhållsplanen för drivdonen. Detta för undersökning kring om antalet drivdon som gått på säkerhetsgången för Forsmark 1 och 2 har minskat.
- Om en minskning ej har skett av slitaget av drivdon vid implementering av underhållsplanen enligt *Förslag 1* rekommenderas vidare undersökningar kring huruvida det av rapporten benämnda *Förslag 2* bör implementeras i drivdonens underhållsplan som ett nytt alternativ, eller som ett komplement till nuvarande ny underhållsplan.
- Om mutterglappsmätning under tank väljs att införas, enligt *Förslag 2*, bör ytterligare utvärderingar göras kring huruvida mutterglappsmätningen under tank bör genomföras för samtliga drivdon i tanken eller enbart för drivdonen i randpositionerna, för att på så sätt upptäcka slitage i ett tidigt stadie.
- För vidare studier kring grafitens slitning rekommenderas även vidare undersökning kring om snabba slitage kan uppstå i drivdonens grafitgångor. Exempel på sådant slitage skulle kunna tänkas uppkomma vid indikeringskontroller av drivdonen. Risken för ett sådant slitage som uppstår under en kort tidsperiod bör undersökas vidare för förebyggande av slitage i grafiten i drivmuttern.
- För identifiering av drivdonsslitage i ett tidigt stadie rekommenderas en implementering av framtagna slitageanalyser i framtida revisioner av drivdonsunderhållet. För att analyserna baserade på effektkurvorna från SODEM-datorn ska vara användbara i praktiken krävs att ett system arbetas fram där samtliga kurvor inför varje revision, då "V-kedjan" löses, enkelt kan föras in i MATLAB där en enkel analys av kurvan då kan indikera på om drivdonet i fråga håller på att slitas eller inte. På så sätt skulle flertalet drivdon, i den av rapporten benämnda kategori 2, kunna identifieras. Detta innebär att drivdonsslitage identifieras innan dess att donet har gått på säkerhetsgången och därmed skulle drivdonet kunna bytas ut i tid. Med ytterligare analyser dels kring de av rapporten analyserade parametrar men även av andra möjliga indikationsparametrar finns möjligheten att ta fram säkrare indikationer på att drivdon håller på att slitas. En implementering av MATLABs Machine Learning funktioner kan även vara av intresse för framtida analyser. Eftersom det finns mycket data på olika drivdonskörningar finns det därför stor möjlighet till att kunna skapa ett program som lär sig att med högre precision identifiera slitna drivdon, samt identifiera drivdon som håller på att slitas. I denna rapport presenteras flertalet indikationer som finns på

att ett drivdon är slitet samt på att ett drivdon eventuellt håller på att slitas. Således har denna rapport påvisat att det föreligger samband mellan både det av rapporten kallade kategorierna 3 och 2 samt mellan kategorierna 2 och 1. Baserat på rapportens framtagna analyser och presenterade resultat har en slutsats dragits om att det föreligger ett svagare samband mellan slitagekategorierna och det kan därmed vara av intresse att undersöka möjligheten till vidare analyser med exempelvis Machine Learning i MATLAB, för att om möjligt identifiera säkra slitageindikatorer och kunna använda dessa i framtida drivdonsunderhållsarbeten.

- För vidare undersökning rekommenderas även att liknande undersökningar kring samband i drivdonens effektkurvor genomförs för drivdonen på Forsmark 1 respektive på Forsmark 3. För ytterligare studier bör vidare analyser genomföras på liknande kärnkraftverk i Norden för att om möjligt identifiera om liknande samband mellan drivdonens effektkurvor och slitage föreligger hos drivdon i andra reaktorer av liknande modell såsom Forsmark 1 och 2.
- För ytterligare analyser kring slitage av drivdon rekommenderas även att specifika frekvensintervall på effektkurvan analyseras djupare. Resultatet av denna undersökning visade att medelfrekvensamplituden, vilket även motsvarar standardavvikelsen, för det totala intervallet, (0-12.5) Hz, gav vissa indikationer på slitage, men att frekvensamplituderna vid frekvenstopparna som visade drivdonets mekaniska egenskaper (1.4-1.7 Hz), samt vid (3.0-3.3 Hz) inte gav några indikationer på slitage. Det kan därför vara av intresse att vidare analysera kortare frekvensintervall på kurvan för att se hur stora slitageindikationer specifika delar av frekvenskurvan kan ge.
- Slutligen rekommenderas även att liknande slitageanalyser som i denna rapport har genomförts för 100 % inskrivning av drivdon, även genomförs för inskrivning av drivdon för andra inskrivningslängder. Detta för att analysera huruvida slitagesamband även går att finna då drivdonen enbart skruvas in bitvis i härden.

# Referenser

- Al-Afifi, I. (2015a). Risk och konsekvensanalys gällande ökat FU intervall för drivdonsunderhåll från 8 till 10 år i F12 samt förslag till optimering/likriktning i DD-underhåll mellan F1, F2 och F3. (F-0005001). FKA.
- Al-Afifi, I. (2015b). Underhållsstrategi för drivdon som anpassas efter 4-årig revisionscykel. (F-0005159). FKA.
- Aldebert, M. (2020). Intervju - information om drivdonsunderhåll på OKG
- Andersson, B. (2008). Beskrivning av härdens konstruktion och egenskaper. (FT-2008-2857). FKA.
- Asea Atom, I. (1975). Motor specification. Asea Atom.
- Blom, M. (2019). Sammanställning av analysläget för sprickbildning i drivdonsskruv. (F-0097168). FKA.
- Bäversten, B. (1983a). Revisionsrapport F1 1983. (SM 83-269). Asea Atom.
- Bäversten, B. (1983b). Revisionsrapport F2 1983. (SM 83-269). Asea Atom.
- Charoenrung, T. (2020). Intervju - information om förutsättningarna för mutterglappsmätning under tank i Formark 1 och 2
- Cocco, M. (2020). Intervju - information om materialkvalité hos nuvarande grafitmaterial i drivdonsmutter
- Energimyndigheten (2020). 2019 rekordår för svensk elproduktion. energimyndigheten.se. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2020/2019-rekordar-for-svensk-elproduktion/> [2020-05-26]
- Engrup, U. (1998). Funktionsanalys drivdon. FKA.
- Engrup, U. (2020). Intervju - historisk information om drivdon
- Eriksson, A. (2020). Intervju - information om styrvastavsmotioneringens påverkan på härd
- FKA (2014). STF Forsmark 1, 4.3 Reaktivitetskontroll. (F1-STF-4.3). FKA.
- FKA (2016). Forsmark 1- Driftinstruktion för drivdon. (1 221:21). FKA.
- FKA (2017). Forsmark 1- Säkerhetsrapport, System 212-Härdstomme. (F1-FSAR-212). FKA.
- FKA (2019a). Forsmark 1- Säkerhetsrapport, System 221-Drivdon. (F1-FSAR-221). FKA.
- FKA (2019b). Forsmark 1- Säkerhetsrapport, System 354-Snabbstoppsystem. (F1-FSAR-354). FKA.
- FKA (2019c). Forsmark 1- Säkerhetsrapport, System 532-Manövrering och indikering av styrvastavar. (F1-FSAR-532). FKA.
- FKA (2020a). Forsmark 3 - Säkerhetsrapport, System 260 - Härd. (F3-FSAR-260). FKA.
- FKA (2020b). Teknisk data om vår anläggning. Tillgänglig: <https://canalen/Ledning/Produktion/Driftinformation/Teknisk-data-om-var-anlaggning/>
- Fosstveit, L. (2004). UH-Utveckling-Förstudie avseende OFP-metod för mutterglappsmätning. (FM-2004-5). FKA.
- Granjon, P. (2011). Condition monitoring of motor-operated valves in nuclear power plants. (hal-00586633)
- Gustafsson, F. (1994). Determining the initial states in forward-backward filtering Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:315708/FULLTEXT02>
- Halonen, K. (2015). Instruktion för styrvastavsplanering. (F-0006936). FKA.
- Johansson, M. (2000a). Revisionsrapport F1 2000. (SMR 00-347). Westinghouse Atom AB.
- Johansson, M. (2000b). Revisionsrapport F2 2000. (SMR 00-294). Westinghouse Atom AB.
- Johansson, M. (2004). Revisionsrapport F1 2004. (SRS 04-129). Westinghouse.
- Johansson, M. (2005). Revisionsrapport F1 2005. (SRR 05-145). Westinghouse.
- Johansson, M. (2020). Intervju - Information om drivdonsunderhåll på RAB
- Jönsson, E. (1986). Forsmark 1 och 2 - Föröreningar i drivdon. (RUC 86-169). Asea Atom.
- KSU (2005a). Drivdonsservice Kraftindustrins grundutbildningspaket
- KSU (2005b). Reaktorsystem
- Kylengren, T. (2005). Revisionsrapport F2 2005. (SRR 05-052). Westinghouse.
- Kylengren, T. (2006). Revisionsrapport F1 2006. (SRR 06-139). Westinghouse.

Kylengren, T. (2007). Revisionsrapport F1 2007. (SRR 07-218). Westinghouse.

Kylengren, T. (2008). Revisionsrapport F1 2008. (NOO 08-041). Westinghouse.

Kylengren, T. (2009). Revisionsrapport F2 2009. (NOO 09-240). Westinghouse.

Kylengren, T. (2010). Revisionsrapport F2 2010. (NOO 10-084). Westinghouse.

Kylengren, T. (2011). Revisionsrapport F2 2011. (NOO 11-132). Westinghouse.

Liljedahl, S. (1988). Revisionsrapport F1 1988. (SM 88-422). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1989). Revisionsrapport F1 1989. (SM 89-577). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1993). Revisionsrapport F1 1993. (SAR 93-1120). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1994). Revisionsrapport F1 1994. (SAR 94-233). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1995). Revisionsrapport F1 1995. (SAR 95-111). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1996). Revisionsrapport F1 1996. (SRP 96-195). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1997). Revisionsrapport F1 1997. (SRP 97-413). Asea Atom.

Liljedahl, S. (1998). Revisionsrapport F1 1998. (SRP 98-309). Asea Atom AB.

Liljedahl, S. (1999a). Revisionsrapport F1 1999. (SMR 99-180). Asea Atom AB.

Liljedahl, S. (1999b). Revisionsrapport F2 1999. (SMR 99-212). Westinghouse Atom AB.

Liljedahl, S. (2001). Revisionsrapport F1 2001. (SOOF 01-017). Westinghouse Atom AB.

Liljedahl, S. (2002a). Revisionsrapport F1 2003. (SRR 03-020). Westinghouse.

Liljedahl, S. (2002b). Revisionsrapport F2 2002. (SOA 02-036). Westinghouse Atom AB.

Liljedahl, S. (2003). Revisionsrapport F2 2003. (SRR 03-003). Westinghouse Atom AB.

Liljedahl, S. (2004). Revisionsrapport F2 2004. (SRR 04-034). Westinghouse.

Lindahl, L. (2013). Fourieranalys. Uppsala: Matematiska institutionen, Uppsala universitet.

Lindahl, S. (2009) POLCA 7 - BWR Thermal Hydraulics Model. (BR 94-700, rev 6). Westinghouse.

Lundgren, P. (1992). Granskning av drivdonsstörningar. (PF-RAPP 92/442). FKA.

Lundgren, S. (2006). Revisionsrapport F2 2006. (SRP 98-196). Westinghouse.

Math Works (2020). Math Works Help Center filtfilt. Math Works Help Center. Tillgänglig:  
<https://se.mathworks.com/help/signal/ref/filtfilt.html> [2020-05-30]

Meyer, T. (1996). Revisionsrapport F2 1996. (SRP 96-217). Asea Atom.

Meyer, T. (1997). Revisionsrapport F2 1997. (SRP97-331). Asea Atom AB.

Meyer, T. (1998). Revisionsrapport F2 1998. (SRP 98-196). Asea Atom AB.

Ode, B. (1972). F1-System 354, spolflöde för drivdon. Asea Atom.

Ode, B. (1984). Revisionsrapport F1 1984. (KUC 84-99). Asea Atom AB.

Persson, Ö. (1994). Revisionsrapport F2 1994. (SAR 94-188). Asea Atom AB.

Petersson, R. (2001). Revisionsrapport F2 2001. (SOOF 01-021). Westinghouse Atom AB.

Salonpää, P. (2007). Revisionsrapport F2 2007. (SRO 07-177). Westinghouse.

Salonpää, P. (2008). Revisionsrapport F2 2008. (NOO 08-111). Westinghouse.

Salonpää, P. (2009). Revisionsrapport F1 2009. (NOO 09-238). Westinghouse.

Salonpää, P. (2013). Revisionsrapport F2 2013. (NO 13-051). Westinghouse.

Seikola, J. (2020). Intervju - Information om drivdonsunderhåll på TVO

Seppälä, M. (2018a). Forsmark 1, 2 och 3- Godkännande av Drivdonsgrafit- Ersättningsmaterial. (F-0049973). FKA.

Seppälä, M. (2018b). Revisionsrapport F1 2018. FKA.

Seppälä, M. (2018c). Revisionsrapport F2 2018. (F-0088280). Forsmarks Kraftgrupp.

Seppälä, M. (2018d). Underhållsstrategi för drivdon. (F-0075070). FKA.

Seppälä, M. (2019a). Revisionsrapport F1 2019. FKA.

Seppälä, M. (2019b). Revisionsrapport F2 2019. FKA.

Seppälä, M. (2020). Intervju - Information om historiskt slitage i drivdon på Forsmark

Sjöberg, H. (2019). Forsmarks kraftgrupp AB strategisk inriktning 2020.

Soleimani-Mohseni, M. (2012). Grundläggande kärnkraftsteknik. 1. uppl. Lund: Studentlitteratur AB.

Stenmark, J. (2004). Diversifiering av drivdon. (F2-2001-14). FKA.

Stötsberg, J. (1990a). Revisionsrapport F1 1990. (SO2 90-369). Asea Atom.

Stötsberg, J. (1990b). Revisionsrapport F2 1990. (SO2 90-161). Asea Atom.

Stötsberg, J. (1991). Revisionsrapport F1 1991. (SO291-516). Asea Atom.

Stötsberg, J. (1992). Revisionsrapport F2 1992. (SO2 92-386). Asea Atom.

Svanholm, D. (2010). Revisionsrapport F1 2010. (NOO 10-090). Westinghouse.

Svanholm, D. (2011). Revisionsrapport F1 2011. (NOO 11-113). Westinghouse.

Svanholm, D. (2012a). Revisionsrapport F1 2012. (NR 12-038). Westinghouse.

Svanholm, D. (2012b). Revisionsrapport F2 2012. (NOO 12-092). Westinghouse.

Svanholm, D. (2013). Revisionsrapport F1 2013. (NOO 13-094). Westinghouse.

Svanholm, D. (2014a). Revisionsrapport F1 2014. (NRO 14-024). Westinghouse.

Svanholm, D. (2014b). Revisionsrapport F2 2014. (NRO 14-026). Westinghouse.

Svanholm, D. (2015a). Revisionsrapport F1 2015. (NRO 15-062). Westinghouse.

Svanholm, D. (2015b). Revisionsrapport F2 2015. (NRO 15-085). Westinghouse.

Svanholm, D. (2016a). Revisionsrapport F1 2016. (NRO 16-057). Westinghouse.

Svanholm, D. (2016b). Revisionsrapport F2 2016. (NRO 16-056). Westinghouse.

Svanholm, D. (2017a). Revisionsrapport F1 2017. (NRP 17-129). Westinghouse.

Svanholm, D. (2017b). Revisionsrapport F2 2017. (NRP 17-134). Westinghouse.

Söderström, R. (1995). Revisionsrapport F2 1995. (SAR 95-129). Asea Atom AB.

Wadsten, O. (1985a). Revisionsrapport F1 1985. (SM 85-326). Asea Atom AB.

Wadsten, O. (1985b). Revisionsrapport F2 1985. (SM 85-334). Asea Atom.

Wadsten, O. (1986a). Revisionsrapport F1 1986. (SM 86-393). Asea Atom.

Wadsten, O. (1986b). Revisionsrapport F2 1986. (SM 86-412). Asea Atom.

Wegemar, B. (2011). Forsmark 3- EFFE Engineering, Höjning av drivdonens spolfloedestemperatur, Inverkan på konstruktionsmaterial. (WEFFE 10-0610). Westinghouse.





## Appendix 2

### MATLAB-koder för identifiering av slitage i drivdonens effektkurvor

#### Appendix 2a

Appendix 2a visar den huvudkod i MATLAB som användes för att ta ut och analysera effektkurvorna från Sodem-datorn, med en sökväg till varje specifik mapp med kategoriserade drivdon utifrån den dokumenterade slitagebilden.

```
% Huvudscript för analys
```

```
% Inläsning av drivdonskörningar uppdelat i kategorierna 1, 2 samt 3
```

```
Damage= analyze_files_in_folder('Slitna drivdon');
```

```
Almost_damage= analyze_files_in_folder('Drivdon som håller på att slitas');
```

```
No_damage= analyze_files_in_folder('Ej slitna drivdon');
```

```
% Analys av drivdon som har gått på säkerhetsgängen
```

```
function result = analyze_files_in_folder(folderPath)
```

```
    pow = dir(strcat(folderPath, '*I*.dat'));
```

```
    result = cell(length(pow), 8);
```

```
    for i = 1:length(pow)
```

```
        filePath = strcat(folderPath, pow(i).name);
```

```
        [name, date, index, mean_amp, max_disturbance, mean_freq_dens, max_freq_amp1, max_freq_amp2] =  
        analyze(filePath);
```

```
        result{i, 1} = name;
```

```
        result{i, 2} = date;
```

```
        result{i, 3} = index;
```

```
        result{i, 4} = mean_amp;
```

```
        result{i, 5} = max_disturbance;
```

```
        result{i, 6} = mean_freq_dens;
```

```
        result{i, 7} = max_freq_amp1;
```

```
        result{i, 8} = max_freq_amp2;
```

```
        disp(i); %Skriver ut antalet körningar.
```

```
    end
```

```
end
```

## Appendix 2b

Appendix 2b visar den funktion som användes i MATLAB för att analysera varje effektkurva och få ut värdet på de specifika parametrar som jämfördes i undersökningen.

*%Funktion som tar fram relevanta parametrar i Sodem-effekt-kurvorna för att analysera eventuella slitage*

```
function [name, date, index, mean_amp, max_disturbance, mean_freq_dens, max_freq_amp1, max_freq_amp2]
= analyze(filename)
    mydata = readmatdator(filename);
    filename_matches = regexp(filename, '\\([A-Z0-9]{4})_(\\d{4})-(\\d{2})-(\\d{2})_(\\d{2})_(\\d{3})\\.dat', 'tokens');
    name = filename_matches{1}{1};
    date = filename_matches{1}{2};
    index = filename_matches{1}{3};

    mean_amp = '';
    max_disturbance = '';
    mean_freq_dens = '';
    max_freq_amp1 = '';
    max_freq_amp2 = '';

    T = mydata.t;
    P = mydata.data(:,2);

    if length(T) >= 5700
        time=T(400:5700);
        PowerData=P(400:5700);

        %Beräknar medelvärde av effekten
        mean_amp=mean(PowerData);
        range_power=max(PowerData)-min(PowerData);

        %% Filtrera data (smoothing)
        a=[1 -0.9];
        b=0.1;
        y=filtfilt(b,a,PowerData);

        %Skillnad mellan störningsamplituden och trendlinjen för hela kurvan exklusive ändpunkter:
        diff_power_trendline=PowerData-y;
        %Maximal skillnad mellan trendlinje och störningsamplitud
        max_diff_power_trendline=max(abs(diff_power_trendline));
        max_disturbance = max_diff_power_trendline;

        % Fourieranalys
        fft_data=fft(detrend(PowerData,0));
        fs=1/(mydata.t(2)-mydata.t(1)); %Maximal frekvens
        fNyq=fs/2; %Nyqvistfrekvensen
        N=ceil((length(fft_data)+1)/2);
        f=linspace(0,fNyq,N);
        %Hittar genomsnittliga medelfrekvensen
        max_freq_dens=sum(abs(fft_data(1:N)))/(length(abs(fft_data(1:N))));
        %Hittar maximala amplituden vid områden f=[1.4-1.7 Hz]
        max_freq_amp1= max(abs(fft_data(400:1000)));
        %Hittar maximala amplituden vid områden f=[3.0-3.3 Hz]
        max_freq_amp2= max(abs(fft_data(1100:1600)));

    end

end
```

## Appendix 2c

Appendix 2c visar det script som användes i MATLAB för att rita upp varje effektkurva och få ut värdet på de specifika parametrar som jämfördes i undersökningen. Scriptet baseras på resultatet som tagits fram av ovanstående funktioner där varje undersökt parameter har delats in i respektive kategori *Damage*, *Almost damage*, *No damage* baserat på huvudscriptets resultat, samt namngivits därefter.

```
%% Tar ut jämförande parametrar ut datamängden:
```

```
%Jämförelse av standardavvikelser:
```

```
 %[Damage;Almost damage;No damage]
```

```
std_compare_mean_amp_power=[std([Damage{:,4}]);std([Almost_damage{:,4}]);std([No_damage{:,4}])]
```

```
std_compare_max_disturbance=[std([Damage{:,5}]);std([Almost_damage{:,5}]);std([No_damage{:,5}])]
```

```
std_compare_mean_freq_dens=[std([Damage{:,6}]);std([Almost_damage{:,6}]);std([No_damage{:,6}])]
```

```
std_compare_max_freq_amp1=[std([Damage{:,7}]);std([Almost_damage{:,7}]);std([No_damage{:,7}])]
```

```
std_compare_max_freq_amp2=[std([Damage{:,8}]);std([Almost_damage{:,8}]);std([No_damage{:,8}])]
```

```
%Uttagning av medelvärde för respektive parameter:
```

```
 %[Damage;Almost damage;No damage]
```

```
mean_compare_mean_amp_power=[mean([Damage{:,4}]);mean([Almost_damage{:,4}]);mean([No_damage{:,4}])]
```

```
mean_compare_max_disturbance=[mean([Damage{:,5}]);mean([Almost_damage{:,5}]);mean([No_damage{:,5}])]
```

```
mean_compare_mean_freq_dens=[mean([Damage{:,6}]);mean([Almost_damage{:,6}]);mean([No_damage{:,6}])]
```

```
mean_compare_max_freq_amp1=[mean([Damage{:,7}]);mean([Almost_damage{:,7}]);mean([No_damage{:,7}])]
```

```
mean_compare_max_freq_amp2=[mean([Damage{:,8}]);mean([Almost_damage{:,8}]);mean([No_damage{:,8}])]
```

```
%Uttagning av medianvärde för respektive parameter:
```

```
 %[Damage;Almost damage;No damage]
```

```
median_compare_mean_amp_power=[median([Damage{:,4}]);median([Almost_damage{:,4}]);median([No_damage{:,4}])]
```

```
median_compare_max_disturbance=[median([Damage{:,5}]);median([Almost_damage{:,5}]);median([No_damage{:,5}])]
```

```
median_compare_mean_freq_dens=[median([Damage{:,6}]);median([Almost_damage{:,6}]);median([No_damage{:,6}])]
```

```
median_compare_max_freq_amp1=[median([Damage{:,7}]);median([Almost_damage{:,7}]);median([No_damage{:,7}])]
```

```
median_compare_max_freq_amp2=[median([Damage{:,8}]);median([Almost_damage{:,8}]);median([No_damage{:,8}])]
```

```
%% Plottar figurer:
```

```
%Jämförelse av medelamplituderna för effektkurvorna för de tre olika kategorierna:
```

```
 %1: Har gått på säkerhetsgängen.
```

```
 %2: Håller på att slitas.
```

```
 %3: Är ej sliten.
```

```
figure(1)
```

```
plot(Mean_amp_power_damage)
```

```
hold on
```

```
plot(Mean_amp_power_almost_damage)
```

```
hold on
```

```
plot(Mean_amp_power_no_damage)
```

```
legend('Sliten','Nästan sliten','Ej sliten')
title('Medeleffekt av drivdon')
xlabel('Antal jämförda körningar')
ylabel('Medeleffekt [E.e.]')
hold off
```

```
figure(2)
plot(Max_disturbance_damage)
hold on
plot(Max_disturbance_almost_damage)
hold on
plot(Max_disturbance_no_damage)
```

```
legend('Sliten','Nästan sliten','Ej sliten')
title('Maxvärde av störningsamplitud i effektkurvorna av drivdon')
xlabel('Antal jämförda körningar')
ylabel('Effekt [E.e.]')
hold off
```

```
figure(3)
plot(Mean_freq_dens_damage)
hold on
plot(Mean_freq_dens_almost_damage)
hold on
plot(Mean_freq_dens_no_damage)
```

```
legend('Sliten','Nästan sliten','Ej sliten')
title('Medelvärde av totala frekvensamplituden (f=0-12.5 Hz) i effektkurvorna av drivdon')
xlabel('Antal jämförda körningar')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
hold off
```

```
figure(4)
plot(Max_freq_amp1_damage)
hold on
plot(Max_freq_amp1_almost_damage)
hold on
plot(Max_freq_amp1_no_damage)
```

```
legend('Sliten','Nästan sliten','Ej sliten')
title('Maxvärde av frekvensamplitud i intervallet (f=1.4-1.7 Hz) i effektkurvorna i frekvensdomänen av drivdon')
xlabel('Antal jämförda körningar')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
hold off
```

```
figure(5)
plot(Max_freq_amp2_damage)
hold on
plot(Max_freq_amp2_almost_damage)
hold on
plot(Max_freq_amp2_no_damage)
```

```
legend('Sliten','Nästan sliten','Ej sliten')
title('Maxvärde av frekvensamplitud i intervallet (f=3.0-3.3 Hz) i effektkurvorna i frekvensdomänen av drivdon')
xlabel('Antal jämförda körningar')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
hold off
```

```

figure(6)
subplot(1,3,1)
boxplot(Mean_amp_power_damage)
title('Medelamplitud')
xlabel('Slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')
subplot(1,3,2)
boxplot(Mean_amp_power_almost_damage)
title('Medelamplitud')
xlabel('Nästan slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')
subplot(1,3,3)
boxplot(Mean_amp_power_no_damage)
title('Medelamplitud')
xlabel('Ej slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')

```

```

figure(7)
subplot(1,3,1)
boxplot(Max_disturbance_damage)
title('Maximal störningsamplitud')
xlabel('Slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')
subplot(1,3,2)
boxplot(Max_disturbance_almost_damage)
title('Maximal störningsamplitud')
xlabel('Nästan slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')
subplot(1,3,3)
boxplot(Max_disturbance_no_damage)
title('Maximal störningsamplitud')
xlabel('Ej slitna drivdon')
ylabel('Effekt [E.e.]')

```

```

figure(8)
subplot(1,3,1)
boxplot(Mean_freq_dens_damage)
title('Medelfrekvensamplitud totalt frekvensintervall 0-12.5 Hz')
xlabel('Slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,2)
boxplot(Mean_freq_dens_almost_damage)
title('Medelfrekvensamplitud totalt frekvensintervall 0-12.5 Hz')
xlabel('Nästan slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,3)
boxplot(Mean_freq_dens_no_damage)
title('Medelfrekvensamplitud totalt frekvensintervall 0-12.5 Hz')
xlabel('Ej slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')

```

```

figure(9)
subplot(1,3,1)
boxplot(Max_freq_amp1_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 1.4-1.7 Hz')
xlabel('Slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,2)
boxplot(Max_freq_amp1_almost_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 1.4-1.7 Hz')

```

```

xlabel('Nästan slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,3)
boxplot(Max_freq_amp1_no_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 1.4-1.7 Hz')
xlabel('Ej slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')

figure(10)
subplot(1,3,1)
boxplot(Max_freq_amp2_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 3.0-3.3 Hz')
xlabel('Slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,2)
boxplot(Max_freq_amp2_almost_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 3.0-3.3 Hz')
xlabel('Nästan slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')
subplot(1,3,3)
boxplot(Max_freq_amp2_no_damage)
title('Maximal frekvensamplitud vid frekvensintervall 3.0-3.3 Hz')
xlabel('Ej slitna drivdon')
ylabel('Frekvensamplitud [F.a.]')

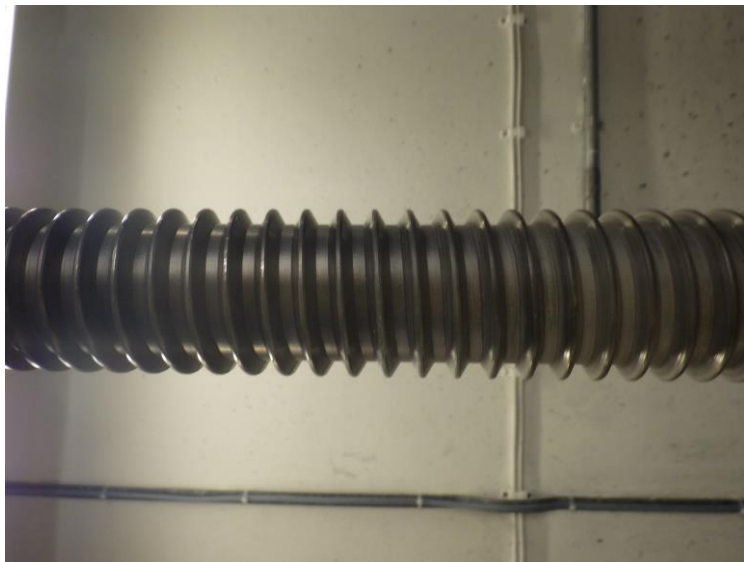
```

## Appendix 3

Appendix 3 visar bilder av drivdonsskomponenter tagna vid studiebesök inne på Forsmark 1 och 2. Figur 52 visar en sliten drivdonsskruv i närbild. Som kan ses i figuren syns slitaget av skruven med den mörknande färgen mellan skruvens gängor. Vidare kan repor i skruvens gängor urskiljas i bilden. Detta kan jämföras med figur 53 som visar en ny drivdonsskruv. Till skillnad från den slitna skruven visar figur 53 en drivdonsskruv utan repor samt med en jämnare färg över hela skruven.



*Figur 52 - Närbild på en drivdonsskruv som är sliten och som har gått på säkerhetsgängen.*



*Figur 53 - Närbild på en ny drivdonsskruv som inte är sliten.*

Figur 54 visar en drivmutter monterad på en drivdonsskruv. I figur 55 illustreras sedan hur mutterglappsmätning genomförs av drivmuttern för att kontrollera hur långt drivmuttern kan rotera och därmed säkerställa kvalitén på det skyddande grafitlagret som finns mellan drivmuttern och drivdonsskruven för att förhindra slitage av drivdonsskruven, såsom i figur 53. Mutterglappsmätning kan göras både under tank då drivdonet sitter inne i reaktorn, men även vid underhåll, såsom i figur 55, för säkerställande av drivmutterns grafitkvalité.



*Figur 54 - Montering av drivmutter i drivdonsverkstaden på Forsmark 1.*



*Figur 55 - Drivmutterglappsmätning i drivdonsverkstaden på Forsmark 1.*