



Nordisk kernesikkerhedsforskning
Norraænar kjarnöryggisrannsóknir
Pohjoismaiden ydinturvallisuustutkimus
Nordisk kjernesikkerhetsforskning
Nordisk kärnsäkerhetsforskning
Nordic nuclear safety research

NKS-7

ISBN 87-7893-055-3

Systematisk underhållsanalys med beslutsstöd

Metodik och verktyg för effektivisering av underhållsprogram

Kari Laakso och Kaisa Simola
Statens Tekniske forskningscentral
VTT Automatik, Finland

Joan Dorrepaal
Data Analysis Tools BV

Pekka Skogberg
Barsebäck Kraft Ab
Sverige

January 1999

NKS-7

Previous reference number: NKS/RAK-1(97)R12

ISBN 87-7893-055-3

Afd. for Informationservice, Risø, 1999

The report can be obtained from

NKS Secretariat

P.O. Box 30

DK – 4000 Roskilde

Denmark

Phone +45 4677 4045

Fax +45 4677 4046

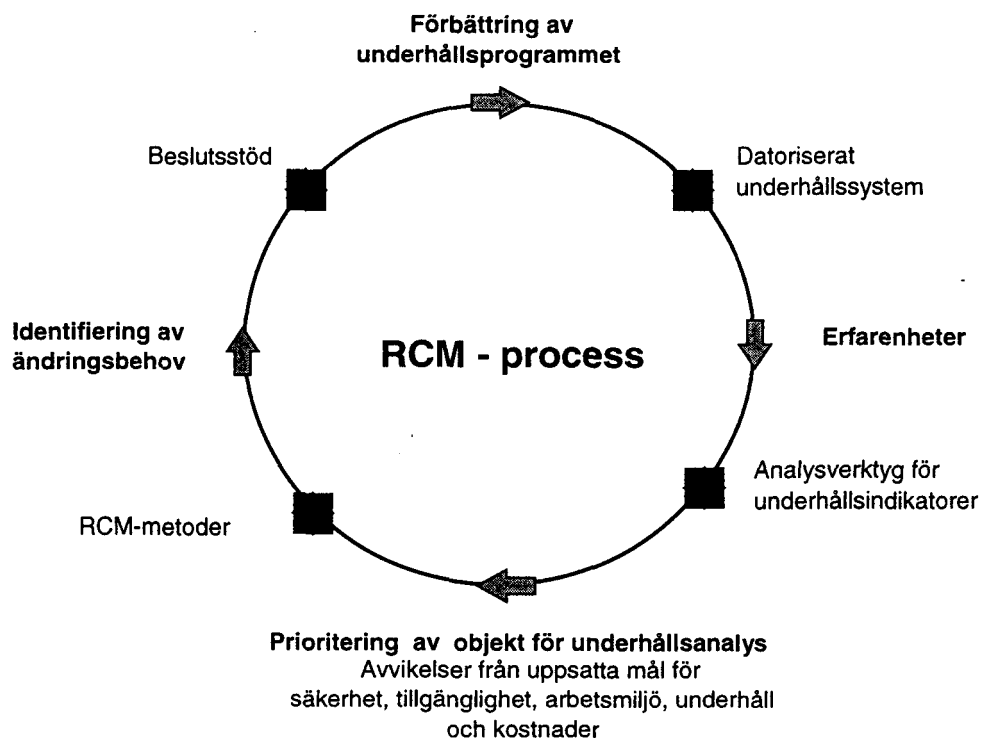
<http://www.nks.org>

e-mail: annette.lemmens@catscience.dk

SYSTEMATISK UNDERHÅLLSANALYS MED BESLUTSSTÖD - METODIK OCH VERKTYG FÖR EFFEKTIVISERING AV UNDERHÅLLSPROGRAM.

Kari Laakso¹, Joan Dorrepaal², Kaisa Simola¹ and Pekka Skogberg³.

January 1999



¹ Statens Tekniska Forskningscentral (VTT Automation)

² Data Analysis Tools BV (t.o.m. 1997 hos Risø National Laboratory)

³ Barsebäck Kraft Ab.

SYSTEMATISK UNDERHÅLLSANALYS MED BESLUTSSTÖD – METODIK OCH VERKTYG FÖR EFFEKTIVISERING AV UNDERHÅLLSPROGRAM.

Slutrapport från Nordiskt delprojekt NKS/RAK-1.4 "Underhållsstrategier och åldring".

Kari Laakso, Kaisa Simola, VTT Automation, Finland

Joan Dorrepaal¹, Data Analysis Tools BV, Holland

Pekka Skogberg, Barsebäck Kraft AB, Sverige

SAMMANFATTNING

Här beskrivs ett systematiskt sätt att utvärdera effektiviteten av provnings- och underhållsprogram för tekniska system som använts under flera år. Metodiken ställer samman en analys av historiska data av fel och reparationer med en analys av historiken av periodiska prov och förebyggande underhållsprogram.

I det följande beskrivs utförandet av en underhållsanalys ur metodsypunkt i RCM (Reliability Centered Maintenance) projektet för Barsebäcksverket. För att spara analysresurser behövs en metodik för prioritering av objekt för underhållsanalys. Preliminära förslag till ändringar i det förebyggande åtgärdsprogrammet bygger på signaler från enkla underhållsindikatorer och kvalitativ analys av deras underliggande erfarenhetsdata rörande fel, underhåll och prov. För att underlätta framtagningen av underhållsindikatorer och effektivisera underhållsanalysen behövs det ett ändamålsenligt och kraftfullt dataverktyg för analys arbetsorderhistoriken. I definitiva beslut om ändringar måste även ytterligare beslutsriterier beaktas och således behövs det ofta en mera formell beslutsanalys som beslutssöd.

ABSTRACT

This report describes an approach to evaluate the effectiveness of test and maintenance programs of technical systems used during several years. The method combines an analysis of the historical data on faults and repairs with an analysis of the history of periodic testing and preventive maintenance action programs.

The application of the maintenance analysis from the methodological point of view in the reliability centered maintenance (RCM) project for Barsebäck nuclear power plant is described. In order to limit the analysis resources, a method for ranking of objects for maintenance analysis is needed. Preliminary suggestions for changes in maintenance action programs are based on signals from simple maintenance indicators and qualitative analysis of underlying data on failures and maintenance. To facilitate generation of maintenance indicators, and make the maintenance analysis more efficient, a powerful and suitable data treatment tool is needed for analysis of the work order history. In the final maintenance decisions, additional decision criteria must be taken into account, and thus a more formal decision analysis is often needed for decision support.

¹ up to 1997 at Risø National Laboratory, Denmark.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING.....	5
1.1. Bakgrund.....	5
1.2. Målsättning	6
2. UNDERHÅLLSANALYS.....	6
2.1. Översikt	6
2.2. Funktionsindelning	9
2.3. Val av analyssignifikanta objekt.....	10
2.4. Analys av fel och reparationer	11
2.5. Analys av effekten av förebyggande åtgärder.....	12
2.6. Uppföljning av effektiviteten medelst underhållsindikatorer	13
2.7. Kvalitativ logikträdsanalys för val av effektiva förebyggande åtgärder ...	16
2.8. Identifiering av potentiella möjligheter till samordnade förbättringar i förebyggande åtgärdsprogram.....	18
3. BESLUTSSTÖD FÖR STRATEGISKA UNDERHÅLLSBESLUT	21
3.1. Introduktion av beslutsanalys för lösning av beslutsproblem vid motstridiga mål	21
3.2. Teoretiska grunder och förutsättningar för beslutsanalys	23
3.3. Beslutsmodeller för underhållsrelaterade beslut.....	24
3.4. En vision av datorstödd beslutsstödsprocedur för motstridiga beslutssituationer	26
3.5. Metodik för val av analyssignifikanta objekt (ASIs).....	27
4. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	33
4.1. Sammanfattande slutsatser och rekommendationer.....	33
4.2. Framtida visioner för underhålls- och ändringsoptimering	34
4.3. Möjliga tillämpningar av beslutsanalyser på andra system	35
REFERENSER	37

FIGURLISTA

Figur 1. Översikt av underhållsanalys.	7
Figur 2. Logikträd för att välja effektiva underhållsåtgärder.....	17
Figur 3. Koppling av systematisk beslutsprocess till RCM-analys.	22

TABELLISTA

Tabell 1. Underhållsåtgärder.....	7
Tabell 2. Indikatorer av effektiviteten av prov och underhåll.	8
Tabell 3. Valkriterier och attributer för identifiering av analyssignifikanta objekt.....	10
Tabell 4. Analys av effekten av förebyggande åtgärder och deras kriticitet	13
Tabell 5. Innehåll av en indikatorspecifikation.	14
Tabell 6. Indikatorer i BiCycle/ReIDAT för BKAB.....	14

Tabell 7. Matris för presentation av förslag till samordnade förbättringsmöjligheter vid förebyggande åtgärdsprogram.	19
Tabell 8. Beslutsanalyssessioner.....	23
Tabell 9. Beslutsmodeller för underhållsrelaterade beslut.....	25
Tabell 10. Sammanfattning av ASI valkriterier, vikter och värderingsskalor.	31
Tabell 11. Exempel på prioritering av analyssignifikanta objekt (ASIs) för objektgrupper.....	32

**BILAGA 1. PILOTSTUDIE FÖR RCM – PROCESS VID BARSEBÄCKS-
VERKET MED HJÄLP AV ANALYSVERKTYG FÖR UNDERHÅLLS-
DATABASER.**

**BILAGA 2. BLOCKSCHEMA. TILLFÖRLITLIGHETSSTYRT UNDERHÅLL
(RCM) - SYSTEMATISK UNDERHÅLLSANALYS MED BESLUTSSTÖD.**

BILAGA 3. ANALYSIS OF MAINTENANCE STRATEGIES.

BILAGA 4. NKS/RAK-1.4 PROJECT ORGANISATION.

1. INLEDNING

1.1. Bakgrund

Ett framgångsrikt underhållsprogram för ett befintligt kärnkraftverk behöver ett gott stöd från planerings- och uppföljningsprocesser inklusive systematisk erfarenhetsåterföring. Sådana stödprocesser är:

- användning av informationssystem för planering och uppföljning av underhåll och drift, och
- användning av metoder för orsaksanalys av fel för att möjliggöra en dokumenterad bas för beslut angående underhåll, t.ex. förbättring av underhållsprogram.

Tidigare finsk och svensk forskning har skapat en metodik för systematisk underhållsanalys. Analysens användbarhet har demonstrerats vid värdering av underhållsprogram för objektgrupper och tekniska system [Laakso & Burns 1984], [Hänninen & Laakso 1993, Simola & Laakso 1992]. Dessa tillförlitlighetsstyrda underhållsanalyser (RCM) byggde på studie av RCM metodiken från amerikansk flygindustri [MSG-3 1988] och anpassningar och förenklingar av metodiken för systematisk erfarenhetsåterföring [Laakso 1984]. Dessutom pekade erfarenheter från kärnkraftsindustrin i USA på att en ekonomisk besparingspotential kan uppnås med hjälp av RCM [EPRI 1989]. Ett viktigt mål har varit att skapa en god modell för att införa begrundade förbättringar i systemtillförlitligheten och underhållseffektiviteten genom att utnyttja resultat från analys av historiska feldata och data på avhjälpande underhåll. Införande av kvantitativa mått för värdering av prov- och underhållseffektivitet har också varit viktigt. Beträffande tillförlitligheten skulle svaga objekt eller komponenter behövas identifieras för att förstärka förebyggande åtgärder för dem. Å andra sidan, systematisk underhållsanalys kan också generera argument för att minska överflödiga periodiska prov och förebyggande underhåll om lämplig och effektiv konditionsövervakning har tagits i bruk. En sådan pilotanalys har gjorts för ett block vid Forsmarksverket i samband med slutet av det tidigare NKS forskningsprogrammet [NKS/SIK-1 1994], [Laakso, Hänninen & Hallin 1995].

Barsebäck Kraft AB (BKAB) är ett svenskt kärnkraftsbolag för elproduktion. Till BKAB hör block med kokarvattenreaktorer (BWR) levererade av ABB Atom AB. De två 580 MWe blockena Barsebäck 1 och 2 togs i bruk i 1975 och 1977 och har varit i drift över 20 år. Grundinställningen för BKAB är att värdera verkets befintliga underhållsprogram. En del av denna värdering görs i RCM projektet (RCM = Reliability Centred Maintenance). Utvecklingen av RCM-konceptet för BKAB började under året 1997 inom området tillförlitlighet och underhållsoptimering som en del av F&U programmet i Barsebäck Kraft AB. Denna utveckling skedde i nära anknytning till arbetet inom det nordiska forskningsprojektet NKS/RAK-1.4 "Underhållsstrategier och åldring".

1.2. Målsättning

Målet för forskarna var att i samverkan med BKAB utveckla och demonstera en underhållsanalysmetodik baserat på RCM principen. Syftet var att granska underhållsstrategier och uppnå ett optimalare underhåll med hänsyn till flera parallella beslutskriterier t.ex. säkerhet, tillgänglighet och underhållskostnad. RCM analysmodellen skulle utformas för att stödja vidareutveckling av BKABs underhållsverksamhet.

RCM kan utnyttjas för att besvara följande typen av frågeställningar [Skogberg 1998]:

- Är det nuvarande förebyggande underhållsprogrammet effektivt ?
- Utförs det rätta förebyggande åtgärder för att identifiera felen tidigt samt för att förhindra feluppkomst ?
- Utförs åtgärderna såsom förebyggande underhåll och periodiska proven vid rätta tidpunkter (intervall) ?

Målet av RCM projektet är också att visa nyttan av den utvecklade metodiken för utvärdering av underhållsåtgärdsprogram av tekniska system. Metodiken skall utgöra en bra modell för introduktion av begrundade förbättringar av systemtillförlitligheten och underhållseffektiviteten. Dessutom förbättras dokumentationen av grunderna för det befintliga underhållsåtgärdsprogrammet. Detta skall ske i kombination med systematisk analys av historiska fel- och underhållsdata från BKABs informationssystem för drift och underhåll (IDUN).

Vid konstruktion av analysmodellen beaktas som vision en fas 3 som skall omfatta beslutsstöd för svåraste underhållsrelaterade beslut, där förbättringsbehoven identifierats under fas 2, men besluten om lösningarna uteblivit på grund av motstridiga kriterier och svårt mätbara mål.

Metodstödsarbetet dokumenteras i den här tekniska rapporten. Rapporten beskriver analysmodellen som den använts av BKAB, men med vissa behovsanpassade modifieringar eller smärre accepterade praktikanpassade förenklingar, vid pilotanalysen på systemet 354 (Hydrauliskt system för drivdon).

2. UNDERHÅLLSANALYS

2.1. Översikt

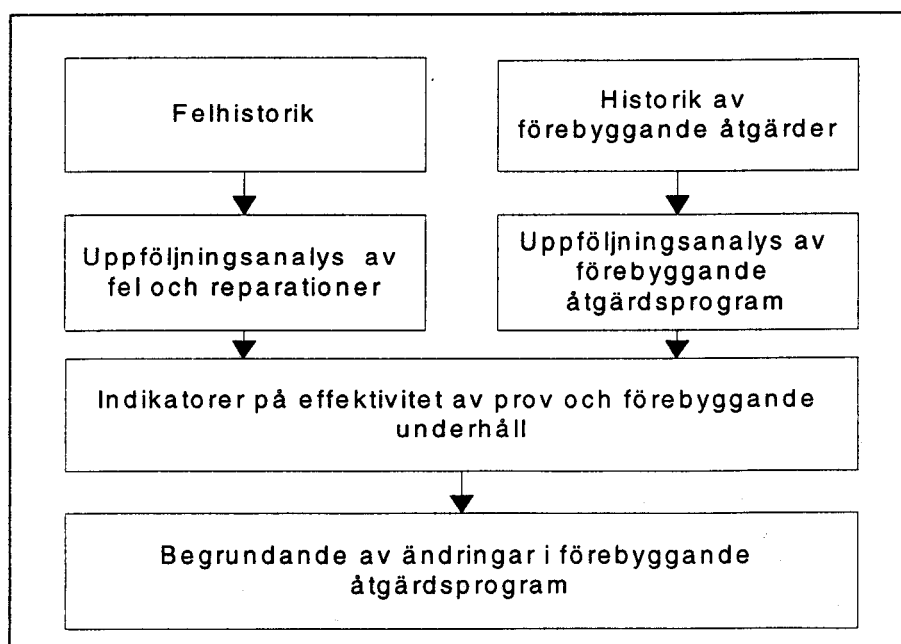
Detta dokument definierar underhåll som en kombination av samtliga tekniska och administrativa aktiviteter inklusive övervakning med syfte att upprätthålla eller återställa ett objekt till ett tillstånd, där den kan utföra sin avsedda funktion [IEC 50(191) 1990]. Således i underhåll ingår mera än åtgärderna för konditions-

övervakning, förebyggande underhåll och reparationer. Åtgärderna i ett "integrerat" underhållsprogram består av både förebyggande och avhjäljande åtgärder i enlighet med Tabell 1 [Laakso, Hänninen & Hallin 1995].

Tabell 1. Underhållsåtgärder.

- Funktionsprov som kan vara periodisk aktivering av skalventiler,
- Kalibreringskontroll, t.ex. kontroll av gränsbrytare,
- Oförstörande provning, t.ex. ultraljudsprovning av svetsskarv,
- Service, t.ex. rengöring och smörjning av en ventilspindel,
- Periodiskt utbyte, t.ex. utbyte av gummidetaljer i en magnetventil,
- Konditionsövervakning, t.ex. mätning av motoreffekt under ventilaktivering ,
- Reparationer, t.ex. dragning av spindelpackboxar, samt
- Modifieringsarbeten baserade på omkonstruktion av utrustningen.

Det främsta syftet av en underhållsanalys är att utvärdera effektiviteten av det integrerade underhållsåtgärdsprogrammet för ett tekniskt system. Underhållsanalysen pekar ut objekt med återkommande fel samt de periodiska prov och förebyggande underhållsåtgärder, där fel upptäckts effektivt. Uppföljningsanalysen av fel, reparationer samt förebyggande åtgärder sammankopplas genom beräkning av enkla indikatorer av effektiviteten av periodiska prov och förebyggande underhållsåtgärder. I Figur 1 ges en översiktsikt av underhållsanalysprocessen [Laakso 1997].



Figur 1. Översikt av underhållsanalys.

Indikatorer på effektivitet av provning och underhåll bygger på klassificering av fel utgående från felupptäcktssättet. En del av felen har upptäckts vid förebyggande åtgärder, t.ex. periodiska prov eller förebyggande underhåll. Emedan övriga fel har upptäckts genom larm eller visningar i kontrollrums-paneler, under ronddringar eller plötsligt vid aktivering av objekt.

Detta tänkande leder till två grupper av underhållsåtgärder:

- 1) avhjälpande underhåll som krävs vid fel och
- 2) förebyggande underhåll och provning.

Antalet åtgärder i båda grupper samt de resulterande hindertider på objektnivå kan beräknas. De resulterande indikatorerna visas i Tabellen 2 [Laakso, Hänninen & Hallin 1995].

Tabell 2. Indikatorer av effektiviteten av prov och underhåll.

CM	=	Antalet upptäckta fel som kräver avhjälpande åtgärder
RT	=	Total hindertid förorsakad av avhjälpande åtgärder
PA	=	Antalet förebyggande åtgärder
PT	=	Total hindertid förorsakad av förebyggande åtgärder
CM/PA	=	Kvoten mellan antalet avhjälpande och förebyggande åtgärder
RT/PT	=	Kvoten av hindertider pga avhjälpande och förebyggande åtgärder

Dessa indikatorer borde räknas utgående från uppföljning av flerårig historisk information av verkets drift. Hindertiderna beräknas endast för de driftlägen, där objekten kan behövas användas.

Uppföljningsperioden av felfrekvenser mm. för de utvalda objekten borde vara minst fem år för att identifiera möjliga trender. Avvikande signaler från dessa indikatorer kommer att peka ut kandidater för övervägande av minskningar eller förstärkningar i periodiska prov eller åtgärdsprogram för förebyggande underhåll.

I det följande behandlas analyserna av fel- och förebyggande underhållshistorik, samt kompletteras beslutsfattande, vid ut- och omvärdering av åtgärdsprogram för underhåll på ett grundligare sätt.

2.2. Funktionsindelning

För att systematiskt kunna fördela de inträffade felen i felmods- och effektsanalysen på berörda objekt behövs en funktionsindelning av utrustningen. Funktionsindelningen borde utformas så lika som möjligt för olika kraftbolag och block för att underlätta jämförelser och erfarenhetsutbyte.

Funktionsindelningen borde då också vara baserad på funktionen. Indelningen borde inte vara baserad på hårdvara (utrustning) och leveransgränser såsom är ofta fallet med de traditionella systemindelningarna [Laakso 1984]. Men man har traditionellt skillnader i systemindelning, systemnummer och namn för utrustning mellan olika kraftbolag, block och leverantörer. Utrustningarna kopplas i funktionsindelningen som bakomliggande hårdvara till den funktionen som de genererar.

Som systemindelning för Barsebäcksverkets fall används systemnummerindelningen per 1996-02-01. För att uppnå en standardisering av klassificeringen av de felade objekten kan objekttypslistan för TUD [TUD= Tillförlitligt, Underhåll, Drift] eller för underhållsinformationssystemet IDUN för Barsebäcksverket användas. Inom Barsebäcksverket består dessutom ett objekt av en eller flera komponenter. För t.ex. objekttypen ventiler kan mekaniska ventilen och manöverdonet vara i olika utrymmen.

Inom BKABs RCM projekt används platsbeteckningar för objekt för att identifiera den felade utrustningen. I samband med upprepade fel på objektnivå analyseras felen även på komponentnivå. Även mera detaljerade indelningar av vissa typiska objekt och komponenter kan utarbetas för att motsvara den åtgärdsnivå där detaljer byts ut av reparatören i korrigerande eller förebyggande underhålls-syfte [Hänninen & Laakso 1993].

För att identifiera felupprepning och underhållseffekt i bredare mening för BKABs RCM-analys behandlas objekt i "objektgrupper" som består av parallella objekt eller komponenter i likadana stråk av systemet. Felmoder i parallella objekt söks eller motverkas ju vanligen av liknande förebyggande åtgärder. Den funktionsindelningssinriktade analysen illustreras av funktionsmodeller som vid BKABs RCM- projekt har konstruerats i form av tillförlitlighetsblockscheman [Skogberg 1998]

2.3. Val av analyssignifikanta objekt

I projektet används verkets underhållsinformationssystem samt datoriserad analys av tillförlitlighetsdata på ett effektivt sätt i samspel med RCM-analysen. Syftet är att minska behovet av överflödiga ingenjörsinsatser vid analysarbetet. För detta syfte väljs först ut analyssignifikanta objekt (ASIs) från ett mångfaldigt större antal objekt och komponenter inom det tekniska systemet. Prioriteringen av objekt för detaljerad analys utnyttjar en undersökning av historiken av fel samt av avhjälpande och förebyggande underhåll från Barsebäcksverkets IDUN databas på arbetsordrar. Verktöget RelDAT¹ (Reliability Data Analysis Tools) används som hjälp vid datoriserad behandling och presentation av den annars dolda informationen inom arbetsorderhistoriken [Dorrepaal 1995]. RelDAT har numera en on-line förbindelse till det lokala underhållsinformationssystemet (IDUN) samt den nordiska TUD (Tillförlitlighet, Underhåll och Drift) - databasen. (Senare version av RelDAT¹ har bytt namn till BiCycle).

Objekt som påverkats av upprepande fel eller omfattande förebyggande resurser bör väljas som ASIs. Säkerhetssignifikanta objekt kan väljas ut genom att använda riskviktighetsmått, FSAR säkerhetsklasser eller möjligen tillåtna hindertider för utrustningen enligt Säkerhetstekniska Föreskrifter (STF). Strålskyddet med tanke på arbete vid objekten kan beaktas som valkriterium genom den klassning av arbetsutrymmen till strålningszoner som tillämpas inom Barsebäcksverket. En detaljerad utvärdering av underhållsåtgärdsprogrammet genomförs sedan endast för de utvalda analyssignifikanta objekten (ASIs).

Tabell 3. Valkriterier och attributer för identifiering av analyssignifikanta objekt.

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Reaktorsäkerhet <ul style="list-style-type: none"> • FSAR säkerhetsklassning • Riskökningsfaktor • Strålskydd <ul style="list-style-type: none"> • Strålningszon • Funktionssäkerhet <ul style="list-style-type: none"> • Felfrekvens • Reparationskostnad <ul style="list-style-type: none"> • Mantimmar • Förebyggande underhållskostnad <ul style="list-style-type: none"> • Mantimmar |
|--|

Vid val av ASIs ges det vikt för valkriterierna och används skalor för attributerna för mätning av hur signifikanta de olika objekten är för att bli utvalda för analys. Den använda kvantitativa prioriteringsmodellen baserar sig på den additiva flerdimensionella värdefunktionen [French 1986], [NKS/SIK-1 1994].

Som analys-signifikanta objekt väljs t.ex. "objektgrupper" bestående av parallella objekt och "enskilda objekt" vars kvantitativa värden hör till de fem eller tio högsta var. Beslutsanalysmetodiken använd för denna tillämpning exemplifieras i detalj i sektionen 3.5 av denna rapport.

I första hand för de de utvalda ASIs studeras möjligheterna och behoven att begrunda ändringsförslag till befintliga underhålls- eller provningsåtgärder eller deras intervaller. Detaljerad genomgång av erfarenhetsdata genom FMECA, CMECA och PMECA enligt följande genomförs sedan för de analys-signifikanta objekten (ASIs).

2.4. Analys av fel och reparationer

Uppföljningsanalysen av fel är en tillämpning av felmod-, effekts-, och kriticitetsanalysen, FMECA [IEC 1985], [MSG-3. 1988]. De inträffade felmekanismerna i FMECA analyseras på ett sådant sätt att framtagning av förslag till korrigerande åtgärder underlättas.

Uppföljningsanalysen av reparationer CMECA, liksom av förebyggande åtgärdsprogram, är vidarebearbetningar av underhållseffekts- och kriticitetsanalysen MECA [Laakso & Burns 1985]. MECA analysen speglar det faktum att underhållsarbetet i ett kraftverk måste följa arbetsbeskedsrutiner som innehåller steg för säker isolering av underhållsobjekt.

FMECA används ofta, och CMECA i specifika fall, som stöd vid konstruktion, och för konstruktionsgranskning, av utrustning och system. I en systematisk underhållsanalys tillämpas dessa metoder för erfarenhetsåterföring. Analys av fel- och reparationshistoriken med FMECA och CMECA kombinerade med besluts-trädslogik (LTA) av tillförlitlighetsstyrt underhåll (RCM) beskrivs mera detaljerat i [Hänninen & Laakso 1993].

Detta analyschema (FMECA, CMECA + LTA) hjälper oss att rangordna behoven att förstärka förebyggande åtgärder eller förkorta intervaller mellan dessa åtgärder för att reducera felfrekvensen på system- och objektnivå.

Behovet av att analysera historiken av förebyggande åtgärdsprogram härstammar från behovet att minska eventuellt överflödiga underhållsåtgärder eller provningar som har ursprungligen definierats av anläggnings- och utrustningsleverantörer. Sådana återkommande förebyggande åtgärder, som upptäckt flera eller inga fel,

letas med PAECA analysen för att utvärdera effektiviteten av olika prov och förebyggande underhållsåtgärder.

Kandidater för en eventuell förstärkning eller minskning av nuvarande periodiska prov- och förebyggande underhållsprogram kan identifieras utgående från identifiering av avvikande signalvärden i indikatorerna.

2.5. Analys av effekten av förebyggande åtgärder

Förebyggande åtgärder är nyttiga för upptäckt och reparation av degradationer och dolda fel innan funktionella fel uppstår vid verkliga behov. Dessutom är förebyggande åtgärder avsedda för att verifiera kondition och driftklarhet av utrustning.

Målet av analysen är att utvärdera om förebyggande åtgärder är rätt balanserade med tanke på funktionssäkerhets- och otillgänglighetskriterier.

Det finns två viktiga steg i ett analyschema av det förebyggande åtgärdsprogrammet [Laakso, K., Hänninen, S. & Hallin, L. 1995]:

- sammanställning av åtgärder för förebyggande underhåll, konditionsövervakning och periodiska provningar samt deras intervaller till ett förebyggande åtgärdsprogram i ett "integrerat" planeringsdokument, samt
- definition av mål samt förväntade och uppnådda effekter av förebyggande åtgärder.

Olika förebyggande åtgärder som täcker objekt kan sammanställas till ett integrerat dokument PAP (Preventive Action Program). En analys av förebyggande åtgärder och deras kriticitet (PAECA) innehåller därtill en undersökning av antalet, typer och hindertider av fel som har upptäckts vid enskilda prov- och förebyggande underhållsprocedurer. Denna sammanställning av kvantitativa indikatorer hjälper även till att identifiera potentiella möjligheter för utvärdering och beslutsfattande om förlängning av förebyggande åtgärdsintervaller.

Indikatorer på effektiviteten av provning och underhåll kan beräknas på olika nivåer, t.ex. system, delsystem, parallella objekt, objekt eller komponent. Kriticitetsanalysen PAECA utvärderar även hindertider orsakade av förebyggande åtgärder och kvoter mellan avhjälpan och förebyggande åtgärder.

Ett exempel på en analys av förebyggande åtgärder och deras kriticitet (PAECA) visas i Tabellen 4. I detta tidigare exempel från ett av Forsmarksblocken undersöktes grupper av fyra redundanta objekt. I det följande exemplet betecknas de fyra motormanövrerade skalventilerna 323VA1, VB1, VC1, VD1 för de redundanta delsystemen av systemet 323 med 323VX1.

Tabell 4. Analys av effekten av förebyggande åtgärder och deras kriticitet.

Identifiering av objektplats	Förebyggande eller avhjälpan åtgärd	Procedur	Förebyggande (PA) åtgärdsprogram	Interval, veckor	Antal PA hitills	Hindertid/PA åtgärd	Summa hinderider (PA), h	Antal upptäckta fel (CM)	Upptäckta felmekanismer	Summa hinderider (CM), h	Kvoten CM/PA, antal	CM/PA, summa hinderider
323VXI	Resistansmätning, meggning, funktions-test och inställning gränsvärde	Åtgärd Nr 20	FU under revisions-avställning	104	12	72	864	0	-	0	0	0
323VXI (VX8)	Ventil moti-onering	DI 3028	PT under drift	4	416	0	0	2	Gränsbry-tare fel inställda (VC1,VD1)	48	0,005	-
323VXI	Täthets-prov skalventil	Sub 323 A01	FU under revisions-avställning	52	32	72	2304	1	VA1 läcker > accep-tansgräns	4428	0,03	1,9
323VXI	CM behov upptäckta på annat sätt		Inspektion	-	-	-	-	1	Gänsindi-kering i ställverket	72	0,002	0,02

FU = förebyggande underhåll, PT = periodisk provning, PA = förebyggande åtgärd, CM = avhjälpan underhåll.

2.6. Uppföljning av effektiviteten medelst underhållsindikatorer

Indikatorer kan användas för identifiering av trender och antal av liknande eller återkommande fel samt deras jämförelse med mål- och referensvärden. Referensvärden kan erhållas genom analys av drifterfarenheter och jämförelse av dessa med historiska värden och övriga liknande kärnkraftverk. Indikatorerna kan användas som signaler för tidig identifiering av negativ utveckling, men de är också lämpliga för signalering av möjliga förbättringar som uppnåtts.

Indikatorer bör användas som en grupp därför att inriktning på endast en enskild indikator kan vilseleda beslutsfattandet samt helhets- och långtidsperspektivet. En grupp av olika underhållsindikatorer kan också användas för att initiera övervägande av ändringar och analyser av underhållsverksamheten. En verifierad grupp av indikatorer kan kopplas till anläggningens informationssystem (IDUN) för att underlätta användningen, datainsamlingen och -presentationen.

För att möjliggöra förståelse och korrekt tolkning av indikatorerna måste det finnas bättre specifikationer på indikatorerna än bara deras namn och mått [NKS/SIK-1 1994]. I det följande anges en lista på vad som borde förslagsvis ingå i en utförligare specifikation av indikatorer [Lehtinen, Heinonen, Wahlström & Piirto 1998]:

Tabell 5. Innehåll av en indikatorspecifikation.

- indikatorns namn,
- syfte,
- definition,
- data som behövs,
- beräkning,
- användning,
- indikatorns ägare, och
- anmärkningar.

Följande underhållsindikatorer kan beräknas och presenteras automatiskt med hjälp Barsebäckswerkets BiCycle/RelDAT analyspaket utgående från arbetsordrar inom IDUN informationssystemet för drift och underhåll.

Tabell 6. Indikatorer i BiCycle/RelDAT för BKAB.

Benämning	Formel	Definition	Anmärkning	Syfte
FRATE	Antal fel/år	Årligt medeltal arbetsordord-rar genererade från felanmälningar.	Arbetsordernummer 1-15630 samt 100 000 - 599999.	Mått på funktionssäkerhet. Ökning/ stort antal indikerar t.ex. åldringsfenomen, dålig FU-effektivitet eller underhållskvalite.
REPHRS: YRS	Antal reparations-mantimmar/år	Årligt medelvärde mantimmar avhjälpande underhåll.	Mantid = antal män x reparation-stid. Reparationstid = tidpunkter för avslut reparation - start för AU.	Mått på reparationskostnader. Ökning av AU indikerar t.ex. att effektivitet av FU försämras
PMRATE	Antal FU-åtgärder /år	Årligt medeltal arbetsordrar genererade från förebyggande underhåll.	Arbetsordernr. 15631- 79000 och > 600 000. Även åtgärder som provning, ändringar, förbered. för underhåll/målning	Mått på underhållsambition. Ökning indikerar att behovet av FU ökat t.ex. pga åldringsfenomen eller förändrade underhållsmål.
PMHRS: YRS	Antal FU - mantimmar/år	Årligt medelvärde mantimmar förebyggande underhåll per år.	Mantid = antal män x tiden för underhållsarbetet. Underhållstid = tidpunkt för avslut FU-arbete -tid för start arbete.	Ett mått på underhållskostnad. Ökning indikerar att förebyggande underhållsarbetet och FU-kostnaden ökar.

Tabellen 6 "Indikatorer i BiCycle/RelDAT" fortsätter på följande sida.

Tabellen 6 "Indikatorer i Bicycle/RelDAT" fortsätter från föregående sida.

Benämning	Formel	Definition	Anmärkning	Syfte
PMHRS: YRS	Antal FU - mantimmar/ år	Årligt medel- värde mantim- mar förebyg- gande underhåll per år.	Mantid = antal män x tiden för under- hållsarbetet. Under- hållstid = tidpunkt för avslut av under- hållsarbete – tid- punkt start arbete.	Ett mått på under- hållskostnad. Ökning indikerar att förebyggande underhållsarbete och FU-kostnaden ökar.
PM: TOTAL	Antal FU/ totalt underhåll	Andelen FU- arbetsordrar av totala antalet arbetsordrar.	"Totala" antalet arbetsordrar om- fattar AU och FU.	Mått på underhållsam- bition. Ökning indi- kerar att underhålls- styrning ändrats. Nor- malt eftersträvas högt värde för att undvika oplanerade insatser.
PMHRS: TOTH	FU- man- timmar/ totala antalet mantimmar	Andelen mantimmar FU av totala antalet mantimmar.	"Totala" antalet mantimmar om- fattar AU och FU.	Mått på underhållsam- bition. Ambitionen relateras till kostnader av stillestånd och AU.
RHRS: REP	Summa AU- mantimmar/ antal AU	Medelvärdet mantimmar för en AU arbetsorder		Mått på reparations- kostnad. Ökning innebär att AU åtgärder blir dyrare.
PMHRS: PM	Summa FU- mantimmar/ antal FU	Medelvärdet mantimmar för en FU – arbetsorder		Mått på FU kostnad. Ökning innebär att FU åtgärder blir dyrare.
TREND	Trendsigni- fikans	Trendtest	Värden mellan - 0,5 till + 0,5, där 0 = ingen trend.	Minusvärde indikerar minskande tid mellan fel. Ett högt (plus) testvärde indikerar ökande tid mellan fel.
EARLY FRATE	Tidiga fel	Anhopning av fel inom inom en 3 - måna- ders period.		Högt värde indikerar tidiga fel och möjligen dålig reparations- kvalite.
TOTAL	Totala antalet arbetsordrar	Summa FU och AU arbetsordrar		Mått på omfattning av underhållsarbete. Ökning indikerar t.ex. försämring av under- hållseffektivitet eller åldringsfenomen.
TOTHRS	Totala antalet mantimmar	Summa FU och AU arbetstimmar		Mått på total under- hållskostnad. Ökning indikerar minskning av underh.effektivitet.

En del av ovan definierade indikatormått (antalet fel/år, antalet reparationsmantimmar/år och antalet FU-mantimmar/år) uppräknade för objekt eller parallella objekt har använts för identifiering och prioritering av analyssignifikanta objekt (ASIs) med hjälp av beslutsanalysmetodiken.

ASI- beslutsanalysmetodiken beskrivs enligt kapitlet 3.5 som följer.

Underhållsindikatorerna “antalet fel/år”, “antalet reparationsmantimmar/år” och även “trendsignifikans” har i första hand pekat ut de ASIs som är underhållskritiska objekt, och i andra hand övriga underhållsignifikanta objekt, där detaljerade analyser behövs.

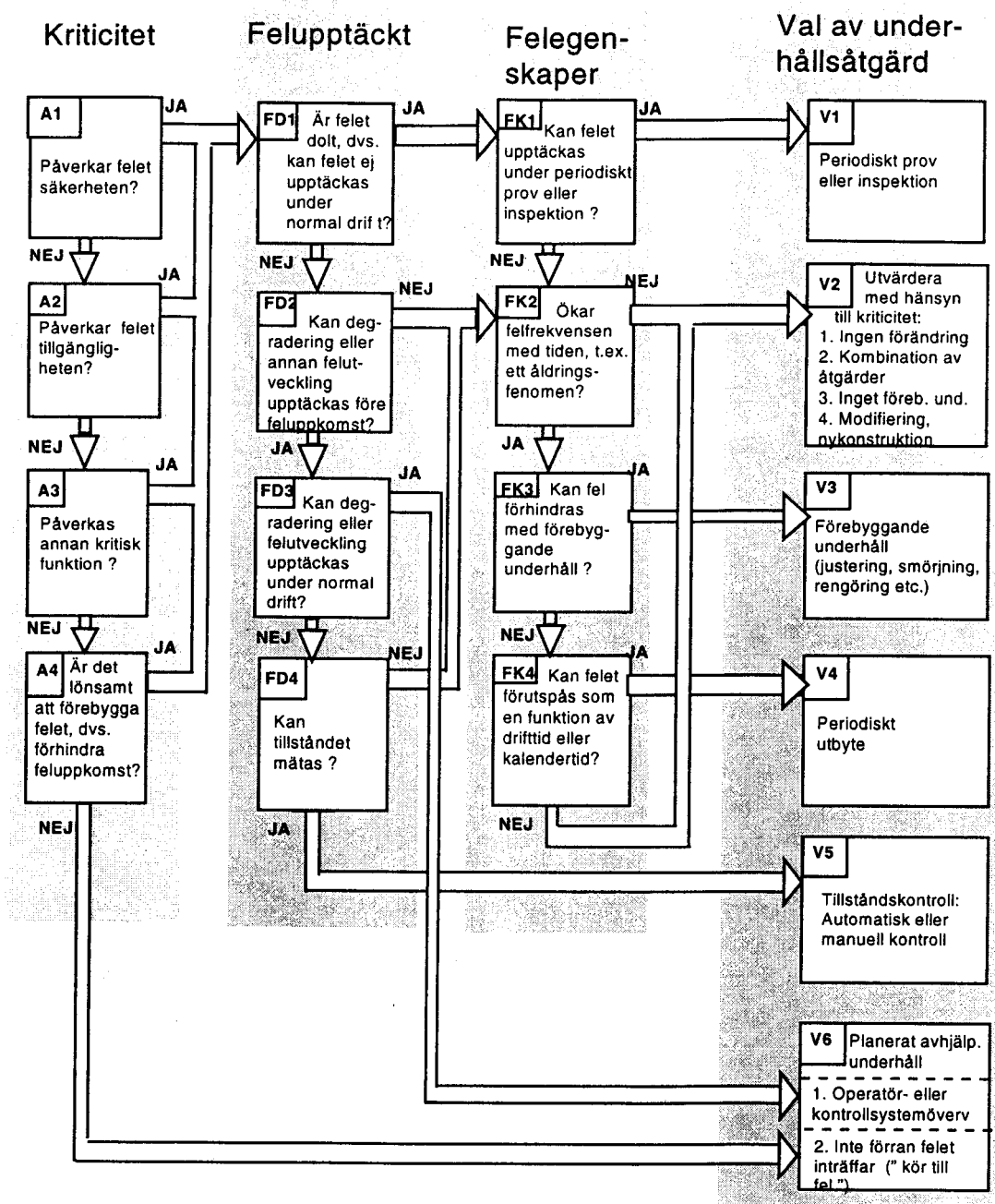
Dessa detaljerade uppföljningsanalyser kan göras med hjälp av FMECA- och PMEAs analyserna tillsammans med kvalitativ genomgång av underliggande arbetsorderhistorik vid BKABs RCM- demonstrationsstudie av systemet 354.

BKABs RCM - demonstrationsstudie och det använda data-analysverktyget sammanfattas i denna rapports Bilaga 1 ”Pilotstudie för RCM – process vid Barsebäcksverket med hjälp av analysverktyg för underhållsdatabaser”.

2.7. Kvalitativ logikträdsanalys för val av effektiva förebyggande åtgärder

Logikträdsanalysens (LTA) olika steg för analys av felupptäckt och felegenskaper kan användas för granskning av befintliga, och val av förstärkta, prov och förebyggande underhållsåtgärder för de analyssignifikanta (ASIs) och underhållskritiska objekten.

Behovet att överväga förstärkningar vid förebyggande åtgärder kan identifieras utgående från signaler från avvikande indikatorvärden samt de underliggande felmod- och effektsanalyserna (FMECA) och avhjälpande underhållseffektivitetsanalyserna (MECA) för dessa utvalda objekt och objektgrupper.



Figur 2. Logikträd för att välja effektiva underhållsåtgärder.

Genomgången av logikträdsanalysen LTA enligt Figur 2 för i första hand underhållskritiska, och i andra hand övriga underhållsignifikanta objekt, genererar förslag till förbättrade prov, konditionsövervakningar eller förebyggande underhåll. LTA- genomgången görs endast då ett behov till att överväga förstärkning av det förebyggande åtgärdsprogrammet har identifierats.

Den ovan angivna logikträdsanalysens frågor (A, FD och FK) har visat sig vara tillämpliga för användning för aktiva idriftvarande tekniska system vid valet av underhålls-åtgärder, eller deras kombination [Vet van der 1989], [IEC 56/560/CDV 1996]. Därmed kan användningen av detta logikträd för t.ex. det hydrauliska

snabbstoppsystemet 354 leda till behov av modifieringar av logikträdet p g a snabbstoppsystemets insatsberedda karaktär och nyaste underhållstekniska rön. Men valet av förebyggande åtgärder måste dessutom bygga på kvalificerade ingenjörsmässiga bedömningar. De logiska frågorna, och typerna av underhållsåtgärderna i LTA, hjälper dock till att styra en underhålls- eller produktionsplaneringsingenjör att med betänksamhet välja rättare åtgärder än utan logiken.

2.8. Identifiering av potentiella möjligheter till samordnade förbättringar i förebyggande åtgärdsprogram

Förslag till övervägande av ändringar vid befintliga förebyggande åtgärdsprogram eller periodiska provningsprogram kan introduceras för underhållskritiska objekt med hjälp av kvalitativ värdering av underliggande data och enkla kvantitativa värderingskriterier utgående från indikatorer enligt Tabeller 6 och 2. Ett exempel på den typen av värdering visades i Tabellen 4 (Analys av effekten av förebyggande åtgärder och deras kriticitet).

Den viktigaste indikatorn i BiCycle/RelDAT för BKABs system 354 är felfrekvensen (FRATE) som motsvarar felantalet (CM) enligt tabellen 2. Stort antal eller ökning av indikatorsignalen kan indikera dålig funktionssäkerhet som man vill förbättra. Som en ytterligare indikatorsignal i systemets 354 sammanhang kan användas "antalet reparationsmanstimmar/år (REPHOURS: YEARS enligt Tabell 6) som kan indikera höga reparationskostnader som man vill kontrollera och reducera. Omvärderingen fortsätter genom kvalitativ utvärdering av underliggande feldata och dess senaste års trender (trendsignifikans enligt Tabell 6). Då utförs även en kvalitativ och ingenjörsmässig värdering av effektiviteten av de befintliga procedurerna för förebyggande underhåll och/ eller prov.

Ifall att det förekommer övriga typer av avvikande värden i indikatorerna, t.ex. när värden av kvoten CM/PA avseende antalet åtgärder närmar sig noll eller är noll (0) för en nämnd förebyggande åtgärdstyp PA, erhålls också en signal. Vid denna signal kan en förlängning av det periodiska provnings- eller förebyggande underhållsåtgärdsintervallet vara önskvärd efter prövning. Förlängningen kan även bli önskvärd i de fall, där summan av hindertider på grund av förebyggande åtgärder (PA) är hög. Det bör dock beräknas hindertider för utrustningen endast vid sådana driftlägen, där verkliga behov av funktionen kan förekomma.

I utvärderingen ingår därmed också att söka möjligheter för tidsmässig och funktionell koordinering av provnings-, förebyggande underhålls- samt konditionsövervakningsaktiviteter som kan vara delvis överlappande. T.ex., en modern on-line konditionsövervakning (se CACTUS- mätinsamling enligt Tabellen 7 nedan) kan vid aktivering av motormanövrerade avstängningsventiler vara effektiv för att registrera symptomen för upptäckt av utvecklande felmekanismer. Analysen av den automatiska konditionsövervakningens registreringar kan därmed i påvisade fall motivera ökning av intervallet av befintliga

förebyggande funktionskontroller och periodiska prov [Laakso, Hänninen & Hallin 1995]. Denna möjlighet exemplifieras för utpekade redundanta motorskalventiler inom ett av Forsmarksblocken i den följande tabellen.

Tabell 7. Matris för presentation av förslag till samordnade förbättringsmöjligheter vid förebyggande åtgärdsprogram.

Förebyggande åtgärd	Prov- eller FU-intervall i veckor								
	1	4	12	48	52	104	208	624	Anm.
Inpumpning 323 (prov)					x				
Inpumpning 327 (prov)					x				
Pumpstart 323 (prov)		x	?						
Manöverprov 323 (prov)		x	?						
Prestandaprov 323- pumpar (prov)			x						Kan samordnas med ventilprov
Täthetsprovning av ska ventil (FU)					x	?			
Smörjning av spindelmutter (FU)				x					
Tillståndskontroll, resistansmätning (FU)						x	?		
MOVATS diagnostik (FU, införd 1992)					?	x			Om möjligt vid ventil
CACTUC-mätningar (aut.datainsamling införd 1994)	?	?							Konditionsdata vid ventilaktiveringar
Översyn, demontage (FU)								x	

Kryssat (x) ovan visar det befintliga och planerade intervallet. Frågetecknet (?) visar ett förslag till att överväga ändring av intervallet.

I detta fall kunde analysen även generera förslag till att förkorta tidsintervallet mellan förebyggande åtgärder. Till exempel, när värdet av förhållandena CM/PA stiger betydligt över noll (0) och fel har under de senaste åren upptäckts vid den befintliga förebyggande åtgärdstypen, kan en förkortning av det befintliga intervallet mellan de förebyggande åtgärderna tänkas. Dessutom, bättre förebyggande åtgärder torde behövas om antalet feltyper som upptäckts på annat sätt (t.ex. larm eller rondering) än genom förebyggande åtgärder är särskilt högt.

Med syftet att förbättra den ekonomiska värderingen av underhållseffektiviteten, borde ekonomiska förluster på grund av otillgängligheter på blocknivå förorsakade av fel och avhjälpande underhåll fördelas på olika objekt, objektgrupper samt blockets tekniska system vid informationssystemet för underhåll och drift.

Kostnader av olika underhållsåtgärder samt deras summor borde också fördelas och sammanställas vid underhållsinformationssystemet utgående från rapportering av mantimmar samt reservdelar och material som har använts vid förebyggande och avhjälpande underhåll.

Vid val av analys-signifikanta objektgrupper och objekt har:

- den årliga felfrekvensen på objektnivå använts som en indikator för funktionssäkerhet,
- antalet mantimmar avhjälpande underhåll (CM) per år som en indikator för reparationskostnad, och
- antalet mantimmar (PA) per år som en indikator för förebyggande underhållskostnad (FU).

Om under uppföljningsperioden på fem år den årliga medelfelfrekvensen FRATE är > 1 på objektnivå för en ASI så är det helt uppenbart att problemet måste undersökas och vid aktuell signalvärde en förstärkning eller en intervallsförkortning av förebyggande åtgärder måste övervägas. Den "uppåtgående trenden" kan också anses ge en signifikant signal för en undersökning, om summan av antalet fel ≥ 3 under de två senaste uppföljningsåren. Även, om medelantalet mantimmar för reparationer (AU) per år är > 20 h på 354 - objektnivå, så bör man överväga att studera det bakomliggande möjliga ekonomiska problemet närmare.

I förebyggande åtgärdsprogram för tekniska system ingår åtgärder som genomförs av kraftverkets driftkontor såsom periodiska prov. Ett syfte med dessa prov är att identifiera tidigt felutvecklingar innan de leder till funktionella fel vid verkliga behov. Periodiska provprogram och deras funktionella komponenttäckning är dock ej ännu införda i informationssystemet för underhåll och drift (t.ex. IDUN). Därför har omfattningen av periodiska prov ej kunnat beaktas vid val av analyssignifikanta objekt (ASIs) eller vid produktionsberäkning av MECA underhållsindikatorerna för BKAB.

3. BESLUTSSTÖD FÖR STRATEGISKA UNDERHÅLLSBESLUT

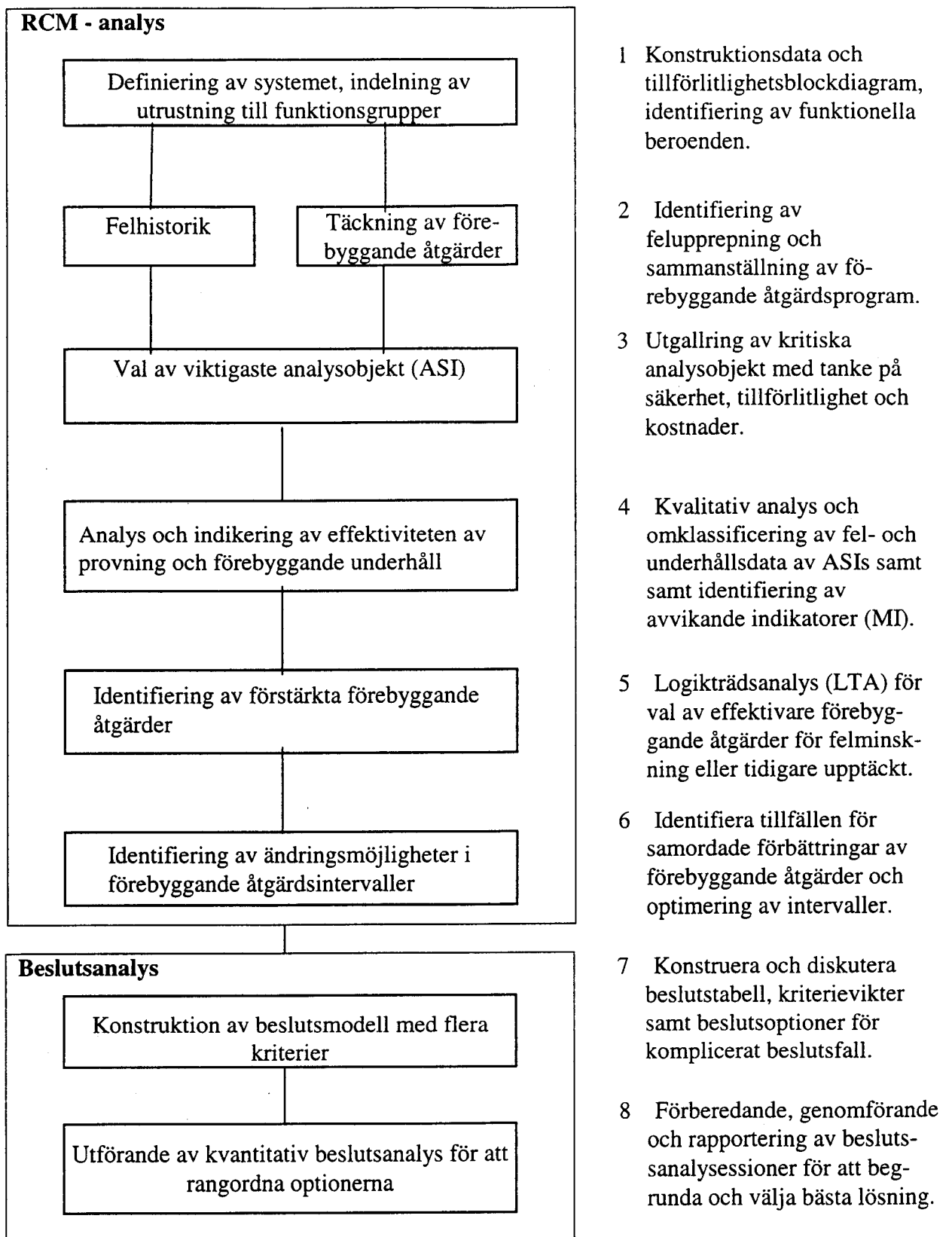
3.1. Introduktion av beslutsanalys för lösning av beslutsproblem vid motstridiga mål

Indikatorer som har diskuterats ovan i sektionen 2.6 och 2.9 genererar signaler till undersökningar som vid befogade leder till förslag för övervägande av ändringar i underhållsåtgärdsprogrammen. Detta sker utgående från systematisk analys av fel- och underhållshistorik. I slutliga beslut rörande optimering av ett underhållsåtgärdsprogram måste dock flera, ofta motstridiga målsättningar betraktas. Drifttillgänglighet, säkerhet, underhållskostnad och arbetskultur kan finnas bland dessa beslutskriterier- och mål. En beslutsanalytisk procedur möjliggör en struktur för identifiering och rangordning av viktiga beslutsalternativ, beslutskriterier och identifiering av ytterligare mest viktigt informationsbehov för beslutsfattandet. Till exempel, resultaten av både en sannolikhetsbaserad säkerhetsanalys och en underhållsanalys kan användas i beslutsanalysen tillsammans med ingenjörsmässiga bedömningar och möjligen andra tillgängliga analyser.

I den följande Figuren 3 sammanfattas de olika stegen i en RCM (Reliability Centred Maintenance) analys och dess översiktliga koppling till beslutsanalysen för begründande och lösning av komplicerade underhållsrelaterade beslut.

Underhållsindikatorerna (MI) täcker in flera år av verkets driftshistorik, när felantalstrender och underhållsarbetsinsatser (mantimmar) följs upp. Beslutsträdslogiken (LTA) används vid utvärdering av hur antalet fel kunde minskas eller fel upptäckas tidigare genom effektivare förebyggande verksamhet, övervakning eller kortare åtgärdsintervaller.

Den första delen av utvecklingsarbetet för BKAB bestod av framtagning av en praktisk RCM analysmodell samt utförande av en demonstrationsstudie för hydrauliskt snabbstopssystem 354. RCM-analysen av systemet 354 gjordes av BKAB/TU. Under den första delen av RCM analysen gjordes redan en första insats av beslutsanalys med BKAB för utgallring och rangordning av mest signifikanta analysobjekt (ASI) för den detaljerade och arbetskrävande RCM analysen. RCM analysen förväntas att fortsätta med en efterföljande del som består av en praktisk beslutsanalysinsats för att underlätta och stödja komplicerade beslut gällande underhåll, ekonomi och säkerhet. Svårare sådana beslut uteblir lätt på grund av beslutsvårda enligt erfarenhet. Exempel på sådana beslut är val av justerade intervaller för periodiska prov för säkerhetsrelaterade objektgrupper, komponentbyten som erfordrar ersättningsinvesteringar samt justeringar i förebyggande underhåll som erfordrar även en väl begrundad dokumentation.



Figur 3. Koppling av systematisk beslutsprocess till RCM-analys.

3.2. Teoretiska grunder och förutsättningar för beslutsanalys

Med beslutsanalys avses olika metoder för operations- och systemanalys som används för att stödja beslutsfattande. Det är svårt att fatta ett beslut, när de olika parternas beslutskriterier och värden har ej exakt definierats. I beslutsanalysen formulerar man med hjälp av systematiska metoder ett problem till delar som utvärderas av beslutsfattaren och experterna. Dessa delar utformar tillsammans beslutsmodellen. Man bör precisera olika mål och få parterna att tala om samma sak. Metodens syfte är att strukturera beslutsproblemet. Med hjälp av en beslutsmodell kan man undersöka hur bra de olika beslutsoptionerna är i förhållande till varandra. Med hjälp av den kvantitativa modellen kan man också utvärdera känsligheten av rangordningen av optionerna med avseende på olika antaganden. Om signifikanta osäkerheter utpekas vid resultatavgörande antagandena, kan man då inrikta sig på att hämta just där mera information.

Beslutsanalysen är ett samarbete mellan beslutsfattaren, experter och beslutsanalytiker. Från ett till tre stycken beslutsanalysessioner bör äga rum vilka täcker in följande ämnen:

Tabell 8. Beslutsanalysessioner.

1. Presentation av metoden och beslutsfallet, formulering av beslutsproblemet,
2. Formulering och ifyllning av beslutsbellen
 - beslutsoptioner
 - beslutsmål och beslutskriterier
 - attributer (mått),
3. Formulering av kvantitativ beslutsmodell
 - skalor av attributer,
 - vikter av beslutskriterier,
4. Presentation och diskussion av resultaten
 - känslighetsstudier,
 - dokumentation.

Den använda kvantitativa beslutsmodellen baserar sig på den additiva flerdimensionella värdefunktionen som definieras av ekvationen:

$$\text{Värde (option } i) = \sum_j w_j x_j (\text{option } i),$$

där w_j är viktcoefficienten för beslutskriteriet j och x_j (alternativ i) är poängsättningen för beslutsalternativet med avseende på kriteriet [French 1986, NKS/SIK-1 1994]. Den vinnande "optionen I " pekas ut därmed av det högsta kvantitativa värdet.

Beslutsanalysen passar för beslutsfall, där problemet har identifierats och det finns ett par alternativa lösningar, varav en kan vara "0-lösningen dvs. kvarstå vid nuvarande lösning".

För den ovan beskrivna poängsättningsmodellen kan man beskriva de faktorer som påverkar beslutet med hjälp av en relativt enkel tabellmodell. Men man bör också identifiera beroenden mellan beslutskriterierna. Kriterierna är fysiskt beroende av varandra om deras uppnående är kopplade till varandra. T.ex. antalet reparationer och reparationskostnaderna är av varandra fysiskt beroende kriterier för val underhållsstrategier. Det kan även förekomma värdeberoenden mellan olika beslutskriterier. Det hur väl målet för det ena kriteriet uppfylls bidrar då också till det hur högt uppfyllandet av det andra beslutskriteriet värderas. T.ex. när man jämför olika rätter i en restaurang är vin och rätt sinsemellan värdeberoende kriterier därför att det prefererade vinet är en konsekvens av den utvalda rätten. Värdeberoende beslutskriterier skall inte behandlas separat vid beslutanalysen.

Värdeberoendet kan vara svårt att konstatera i praktiken, men det kan man upptäcka i den kvantitativa beslutsanalysen, när man definierar viktkoefficienter mellan beslutskriterierna. Värdeberoendet begränsar giltighetsområdet för bytesförhållanden mellan kriteriernas vikter.

Genomförandet och förståelsen av beslutsanalysen underlättas och beslutsanalysen effektivteras om del- och slutresultat av sessionerna kan diskuteras, argumenteras för och följas upp i realtid på bildskärmen och projektionsvägg med hjälp datoriserade hjälpmedel.

3.3. Beslutsmodeller för underhållsrelaterade beslut

De mest kritiska beslutskriterierna för underhållsrelaterade beslut kan identifieras genom att analysera och diskutera ett antal genomförda beslut.

Nedan har beslutskriterier för olika strategiska underhållsrelaterade beslut strukturerats för underlätta förberedelse av beslutsanalysessioner och beslutsgrunder för motstridiga beslutssituationer [Laakso, Sirola & Holmberg 1997]. Dessa översiktliga underhålls- och säkerhetsrelaterade beslutsmodeller har konstruerats utifrån erfarenheter från gjorda besluts-, tillförlitlighets- och underhållsanalyser [NKS/SIK-1 1994, Holmberg & Pulkkinen 1993, Hänninen & Laakso 1993, Laakso, Hänninen & Hallin 1995]. Beslutsmodellerna har uppdaterats och verifierats genom intervjuer och kommentarer från personal på kraftverk och säkerhetsmyndigheter.

Vid t.ex. det fjärde beslutsfallet "investering i konditionsövervakning ?" kunde beslutsoptionerna formuleras på följande sätt:

1. investering i konditionsövervakning, alt A,
2. investering i konditionsövervakning, alt B,
3. bättre diagnos av tillgängliga data,
4. kombination av optionerna 2 + 3, eller
5. nuvarande handlingssätt.

Tabell 9. Beslutsmodeller för underhållsrelaterade beslut.

<u>Optioner</u>	Fortsatt drift av blocket eller avställning vid fel	Byte av komponent med återkommande fel ?	Jämförelse av alternativa tekniska ändringar	Investering i konditionsövervakning ?
<u>Kriterier</u>				
Direkta kostnader	Reparationskostnad.	Anskaffning, montage, driftsättning. Drift, underhåll, reservdelar.	Anskaffning, montage, driftsättning. Drift, underhållsmässighet, reservdelar.	Anskaffning, montage, utbildning. Drift, underhåll.
Produktions-förluster/intäkter	Produktionsförlust • Ersättningskraft • Tillstånd av kraftnätet.	Otillgänglighet av block eller system.	Otillgänglighet pga avställningar.	Otillgänglighet • Avställningar för verkliga behov • Obefogade avställningar. Verkningsgrad.
Risk för hård- eller maskin-Skada	• Effektdrift • Nedkörningsrisk • Avställningsrisk • Uppstartrisk.	• Effektdrift • Avställningsrisk.	• Effektdrift • Avställningsrisk.	Skaderisk-kontroll. Felupprepning.
Säkerhetskultur och licensierbarhet	Förståelse av beslut • Inom bolaget • Myndighetsacceptans • Allmänheten. Arbetskultur.	Förståelse och acceptans av beslutet • Inom bolaget • Myndighetsacceptans Arbetskultur.	Förståelse och acceptans av beslutet • Inom bolaget • Myndighetsacceptans • Allmänheten. Leveranskvalitet Arbetskultur.	Förståelse och acceptans av beslutet • Verksacceptans. • Myndighetsacceptans. - Leveranskvalitet. Arbetskultur.
Strålskydd	Arbetsmiljö • Strålningszon.	Arbetsmiljö • Strålningszon.	Arbetsmiljö • Strålningszon.	Arbetsmiljö • Strålningszon.
Kontroll av livstid	Blockets livskontroll	Blockets livskontroll och -kapacitet.	Blockets livskontroll och -kapacitet.	Diagnostik.
Övrigt	Övriga skäl för avställning • Uppskjutna reparationer • Tidigare avställning.	Underhållsstrategi	Underhållsstrategi	Underhållsstrategi och – flexibilitet • Reparationer • Planerat underhåll.

Beslutsriterier enligt ovan kan vara lagrade i en kunskapsdatabas för att kunna användas för närmare bedömning, uppdatering och val under en beslutsanalys av ett verkligt beslutsfall. Beroende på systemet eller utrustningen som berörs av

beslutet kan ytterligare beslutskriterier såsom t.ex. produktkvalitet, trovärdighet av föreslagen teknik och leverantör samt arbetarskydd tas hänsyn till. Begränsningar, t.ex. rörande oacceptabla prisnivåer eller nya teknologier beaktas också genom beslutskriterierna och kan leda till att någon beslutsoption blir helt slopad. Antalet delkriterier som kan bör tas hänsyn till vid analysen bör inte överstiga omkring 20 på grund av praktiska skäl. Kriterierna uppdateras och gallras vanligen till ett minskat antal viktigaste beslutskriterier och motsvarande attributer under hand, när kvalitativ och kvantitativ analys inklusive viktning kriterier görs vid förberedelse och utförande av en beslutsanalysession.

3.4. En vision av datorstödd beslutsstödsprocedur för motstridiga beslutssituationer

VTT Automation har konstruerat ett datoriserat beslutsanalysverktyg för underhållsrelaterat beslutsfattande [Sirola et al 1997]. Det är ett EXCEL Visual Basic baserat beslutsanalysverktyg. Det omfattar som optioner både kvalitativ och kvantitativ analys. Verktyget används från dialogmeny och dialogknappar. Beslutskriterier, prestationsegenskaper och mått, beslutsalternativ och vikter av olika kriterier kan definieras och väljas. Beslutstabellerna fylls ut genom att skriva kvalitativa och numeriska värderingar i reserverade platser i beslutstabellen. Numeriska resultat av den kvantitativa analysen beräknas och presenteras automatiskt under beslutstabellen och i stapeldiagram. Kvantitativa beslutsmodellen i verktyget bygger på additiv flerdimensionell värdefunktion [French 1986]. Prototypen har demonstrerats i beslutsanalysessioner med SKI och BKAB.

Beslutskriteriemodeller för sju strategiska underhållsrelaterade beslutsfall har lagrats i verktygets databas. Databasen hjälper att identifiera och välja viktiga beslutskriterier särskilt för underhållsrelaterade beslutsfall. Erfarenheten från beslutsanalys med denna metodik har visat, hur en systematisk beslutsanalys kan ge stöd åt beslutsfattaren och experterna i att identifiera de mest kritiska beslutskriterierna, och under det systematiska analyskedet de mest realistiska beslutsoptionerna [Sirola, Holmberg & K. Laakso 1997]. Viktning av de beslutsstyrande kriterierna och värdering av deras uppfyllande öppnade för beslutsfattaren möjligheten att hitta det bästa resultatet. Dessutom kunde de medverkande experterna på ett strukturerat och systematiskt sätt argumentera för sina specifika beslutsgrunder och värderingar, men ändå förstå beslutsproblemet i ett bredare perspektiv.

Det blev också uppenbart för analysisterna att beslutsanalysövningar måste förberedas väl för att ej slösa resurser och ej drabbas av förvirrade diskussionssessioner. Detta mål kan nås med hjälp av experter som förstår beslutsproblemet och har erfarenhet av metodiken för beslutsanalysen. Förberedelserna av sessionen kan förslagsvis innehålla en tankeprocess som resulterar i ett preliminär tabelldokument angående:

- beslutsproblemet,

- preliminära beslutsoptioner, samt
- preliminära beslutskriterier och parvisa jämförelser av preliminära vikter.

Denna sammanställning kan ske vid och efter inledande samtal med personal som berörs av beslutsproblemet. Verktuget och proceduren kan förbättras under hand, när beslutsstödsproceduren utvecklas vid beslutsanalysessioner.

3.5. Metodik för val av analyssignifikanta objekt (ASIs).

Valkriterier. De beslutskriterier som utnyttjas för val av analyssignifikanta objekt (ASI's) är följande enligt BKAB värderingar vid beslutanalysessionen 6.5.1998.

• <u>Reaktorsäkerhet:</u>	Deterministisk attribut: FSAR säkerhetsklassning Probabilistisk attribut: Riskökningsfaktor
• <u>Strålskydd:</u>	Strålningszon
• <u>Funktionssäkerhet:</u>	Antal fel/år
• <u>Reparationskostnad:</u>	Antal mantimmar AU/år (medelvärde)
• <u>Underhållskostnad:</u>	Antal mantimmar FU/år (medelvärde).

Säkerhetsklassen enligt FSAR valdes därför att den är etablerad från konstruktionen och konstruktionsgranskningen av Barsebäcksverket och representerar i huvudsak deterministiskt säkerhetstänkande. Riskökningsfaktorn valdes därför att den representerar probabilistiskt säkerhetstänkande och utnyttjar PSA - resultat vid säkerhetsvärderingen [NKA/RAS-450 1990]. Strålskyddet valdes därför att det är ett viktigt arbetarskyddskriterium för underhållsplanering. Vid val av övriga kriterier och deras värderingsskalor har man utnyttjat signifikant driftsäkerhets- och underhållsrelaterat data, vars behandling har automatiseras utifrån IDUN arbetsoderhistorik med hjälp av BiCycle/RelDAT.

Viktning av valkriterier. Vikterna av beslutskriterierna vid val av ASIs (Analysis Significant Items) blev följande utgående från användning av parvisa bytesaffarer mellan valkriterierna och kontroll av vikterna vid BKAB beslutsanalysessionen.

• Reaktorsäkerhet	=	30 %
- säkerhetsklass enligt FSAR	=	15 %
- riskökningsfaktor enl. PSA	=	15 %
• Strålskydd	=	20 %
• Funktionssäkerhet	=	20 %
• Reparationskostnad	=	10 %
• Underhållskostnad	=	20 %.

Följande skalor definierades i samråd med BKABs personal för jämförelse av attributvärden mot valkriterier.

Säkerhetsklass enligt FSAR. Följande klassindelning fastställdes vid kontroll vid BKAB beslutsanalyssessionen 6.5.1998.

FSAR-klass 1	=>	10 poäng
FSAR-klass 2	=>	7 poäng
FSAR-klass 3	=>	4 poäng
FSAR-klass 4	=>	0 poäng

Riskökningsfaktor. Följande linjära poängsättning definierades för riskökningsfaktorer (r.ö.f) på systemnivå.

$r.ö.f. > 10$	=>	10 poäng
$9 < r.ö.f. \leq 10$	=>	9 poäng
$8 < r.ö.f. \leq 9$	=>	8 poäng
$7 < r.ö.f. \leq 8$	=>	7 poäng
$6 < r.ö.f. \leq 7$	=>	6 poäng
$5 < r.ö.f. \leq 6$	=>	5 poäng
$4 < r.ö.f. \leq 5$	=>	4 poäng
$3 < r.ö.f. \leq 4$	=>	3 poäng
$2 < r.ö.f. \leq 3$	=>	2 poäng
$1 < r.ö.f. \leq 2$	=>	1 poäng
$r.ö.f = 1$ eller ingår ej i PSA	=>	0 poäng.

Om objektet inte täckts in i PSA analysen, så gavs det därmed 0 värderingspoäng.

Strålskydd. Miljön ur arbetarskyddssynpunkt mäts med strålningzonen i lokalen, där objekt eller dess komponent är placerad. Följande poängsättning definierades i samråd med BKABs strålskyddspersonal.

Placerad i röd zon	=>	10 poäng
Placerad i gul zon	=>	4 poäng
Placerad i blå zon	=>	1 poäng.
Placerad i vit zon	=>	0 poäng.

Funktionssäkerhet. Funktionssäkerheten mäts med genomsnittligt antal fel per år, räknat från fem års period 1/93-1/98. Vi använder efter analys av fördelningen av felfrekvenser av 354 objekt följande linjära värderingsskala för antalet fel per år (FRATE) på objektnivå (enskilda objekt).

Frate ≥ 2	=>	10 poäng (motsvarar minst 10 fel under 5 års period)
Frate = 1.8	=>	9 poäng (motsvarar 9 fel under 5 år)
Frate = 1.6	=>	8 poäng (motsvarar 8 fel under 5 år)

Frate = 1.4	=>	7 poäng (motsvarar 7 fel under de 5 år)
Frate = 1.2	=>	6 poäng (motsvarar 6 fel under 5 år)
Frate = 1	=>	5 poäng (motsvarar 5 fel under de 5 år)
Frate = 0.8	=>	4 poäng (motsvarar 4 fel under de 5 år)
Frate = 0.6	=>	3 poäng (motsvarar 3 fel under 5 år)
Frate = 0.4	=>	2 poäng (motsvarar 2 fel under 5 år)
Frate = 0.2	=>	1 poäng (motsvarar 1 fel under 5 år)
Frate = 0	=>	0 poäng (motsvarar inga fel under 5 års period)

Övre gränsen för medelvärde $FRATE \geq 2$ värderades som en otvivelaktig larmnivå för enskilda objekt. Däremot $FRATE \geq 1$ kan betraktas som en signalnivå som kräver en undersökning åtminstone för analytiskt signifikanta objekt.

Reparationskostnad. Reparationskostnaderna fångas upp med medelvärdet för avhjälpande underhållsmantimmar (AU) per år, räknat för fem års period 1/93-1/98. Vi har utgått ifrån principen att om vi drabbas av reparationsstimmor, så erhålls det ett (1) eller flera värderingspoäng för utpekande av ASI intresset. Därmed om vi är reparationsfria, dvs. AU = 0 mantimmar, så ges det 0 värderingspoäng för val av ASIs.

Efter analys av fördelningen av AU-timmar för 354 objekt, som BKAB hade lämnat utifrån arbetsordersammanställningarna, definierade vi tillsammans följande linjära värderingsskala för attributen AU- mantimmar per år (AUHrs:Yrs) på objektnivå :

AUHrs/a	> 90 h/år	=> 10 poäng
80 < AUHrs/a	≤ 90 h/år	=> 9 poäng
70 < AUHrs/a	≤ 80 h/år	=> 8 poäng
60 < AUHrs/a	≤ 70 h/år	=> 7 poäng
50 < AUHrs/a	≤ 60 h/år	=> 6 poäng
40 < AUHrs/a	≤ 50 h/år	=> 5 poäng
30 < AUHrs/a	≤ 40 h/år	=> 4 poäng
20 < AUHrs/a	≤ 30 h/år	=> 3 poäng
10 < AUHrs/a	≤ 20 h/år	=> 2 poäng
0 < AUHrs/a	≤ 10 h/år	=> 1 poäng.
AUHrs/a	= 0 h/år	=> 0 poäng (inga reparationer under 5 år)

Övre gränsen för reparationsmantimmar $RepHrs/Yrs \geq 90$ h värderades som en otvivelaktig larmnivå för enskilda objekt. Efter produktionsberäkning och sammanställning av korrekt MECA-data för systemet 354 på objektnivå kan man dock överväga att lägga signalnivån för initiering av en närmare undersökning av analytiskt signifikanta enskilda 354 objekt (ASIs) på en lägre nivå såsom $RepHrs/Yrs > 20$ h/år.

Underhållskostnad. Förebyggande underhållskostnader mäts genom attributen "medelvärde FU mantimmar per år", räknat för fem års period 1/93-1/98. Vi utgår

nu ifrån att om $FU = 0$ timmar under dessa 5 år, så blir det 0 av värderingen på skalan. Tio (10) poängs värde på skalan erhålls vid förebyggande underhåll FU över 900 timmar per år .

Poängskalan för underhållskostnad och viktförhållandena mellan de två olika kriterierna (reparationskostnad gentemot förebyggande underhållskostnad) har konstruerats enligt följande: Utförande av en (1) AU-timme bedömdes av BKABs underhåll att ha lika "bytesvärde" som fem (5) FU timmar för val av ASIs. Vi använder därmed följande linjära värderingsskala för antalet FU mantimmar per år (PMHrs:Yrs):

FUHrs/a	> 900	=> 10 poäng
800 < FUHrs/a	≤ 900	=> 9 poäng
700 < FUHrs/a	≤ 800	=> 8 poäng
600 < FUHrs/a	≤ 700	=> 7 poäng
500 < FUHrs/a	≤ 600	=> 6 poäng
400 < FUHrs/a	≤ 500	=> 5 poäng
300 < FUHrs/a	≤ 400	=> 4 poäng
200 < FUHrs/a	≤ 300	=> 3 poäng
100 < FUHrs/a	≤ 200	=> 2 poäng
0 < FUHrs/a	≤ 100	=> 1 poäng.
FUHrs/a	= 0	=> 0 poäng (inget FU under 5 års period)

Arbetstiden som nedlagts enligt arbetsorderhistoriken på FU verkade vara relativt låg i de flesta fallen, när vi tittade på arbetstidsfördelningarna på objektnivå. Det viktiga i RCM- projektet är dock att vikta realistiskt AU timmar och FU timmar (eller felminskningar och förebyggande underhållstimmar) mot varandra för val av intressanta objekt (ASIs) och definition av mätskalorna.

Tabell 10. Sammanfattning av ASI valkriterier, vikter och värderingsskalor.

Attribut	Säkerhets- klass (FSAR)	Risk- öknings- faktor	Strålnings- zon	Antal fel/år	AU man- timmar/ år	FU man- timmar/år
Nr (k)	1	2	3	4	5	6
Vikt (w_k)	15 %	15 %	20 %	20 %	10 %	20 %
Poäng						
0	4	ingår ej i PSA eller röf = 1	vit	0	0	0
1		$1 < \text{röf} \leq 2$	blå	0.2	$0 < \text{au} \leq 10$	$0 < \text{fu} \leq 100$
2		$2 < \text{röf} \leq 3$		0.4	$10 < \text{au} \leq 20$	$100 < \text{fu} \leq 200$
3		$3 < \text{röf} \leq 4$		0.6	$20 < \text{au} \leq 30$	$200 < \text{fu} \leq 300$
4	3	$4 < \text{röf} \leq 5$	gul	0.8	$30 < \text{au} \leq 40$	$300 < \text{fu} \leq 400$
5		$5 < \text{röf} \leq 6$		1	$40 < \text{au} \leq 50$	$400 < \text{fu} \leq 500$
6		$6 < \text{röf} \leq 7$		1.2	$50 < \text{au} \leq 60$	$500 < \text{fu} \leq 600$
7	2	$7 < \text{röf} \leq 8$		1.4	$60 < \text{au} \leq 70$	$600 < \text{fu} \leq 700$
8		$8 < \text{röf} \leq 9$		1.6	$70 < \text{au} \leq 80$	$700 < \text{fu} \leq 800$
9		$9 < \text{röf} \leq 10$		1.8	$80 < \text{au} \leq 90$	$800 < \text{fu} \leq 900$
10	1	$\text{röf} > 10$	röd	≥ 2.0	$\text{au} > 90$	$\text{fu} > 900$

Prioritering av "objekten I" med avseende på ASI (Analysis Significant Item) - betydelse B_i beräknas med följande formel:

$$B_i = \sum_{k=1}^6 w_k p_{ik}$$

w_k = vikten för kriteriet k ,

p_{ik} = attributens poängvärde mot kriteriet k för objektet i .

Därmed för de olika enskilda objekten beräknas värdet med formeln:

$$B = 0,15 \times p_{\text{säkerhetsklass}} + 0,15 \times p_{\text{riskökningsfaktor}} + 0,20 \times p_{\text{strålningszon}} + 0,20 \times p_{\text{antal fel/år}} + 0,10 \times p_{\text{AUmantimmar/år}} + 0,20 \times p_{\text{FUmantimmar/år}}$$

För attributerna 1-3 har poängvärdena och viktena bli manuellt matade av BKAB/DAT i en EXCEL tabell för värdeberäkningar. För kriterierna 4-6, dvs. antal fel/år, AU mantimmar/år och FU mantimmar/år genereras beräkningsvärdena utifrån indikatorer och definierade skalor och vikter i BiCycle/RelDAT.

I följande tabell 11 visas ett exempel på produktionsberäkning av ASI värdena för objektgrupper.

Tabell 11. Exempel på prioritering av analys-signifikanta objekt (ASIs) för objektgrupper.

Block	Syst.	Objekt	Stråln zon (drift)	Antal fel per år och komponent	Antal AU mantim. per år	Antal FU mantim. per år	FSAR	Riskökn. faktor	ASI
B*	354	V51-V67	BLÅ	0,476	4,5	2,1	1	10	3,7252
B*	354	T1-T17	GUL	0,035	0,13	0	2	10	3,3863
B*	354	K418-K434	GUL	0,01	0	0	2	10	3,36
B*	354	V401-V417	BLÅ	0,288	0,85	2,6	2	10	3,0517
B*	354	V321-V337	GUL	0,653	4,8	1,6	2	1	2,7042
B*	354	T21-T37	BLÅ	0,0352	0,42	0,93	2	9	2,64126
B*	354	V931-V947	BLÅ	0,006	0	0	2	9	2,606
B*	354	V71-V87	GUL	0,106	2,2	0	1	1	2,578
B*	354	V801-V909	GUL	0,007	0,02	0	1	0	2,3072
B*	354	V381-V397	GUL	0,0235	0,35	0	2	1	2,027
B*	354	V31-V47	GUL	0	0	0	2	1	2
B*	354	V4	GUL	0,4	1,6	7,6	3	1	1,9812
B*	354	K101-K117	BLÅ	0,041	0,08	0,01	4	10	1,74182
B*	354	V11-V27	GUL	0,123	0,38	0,27	3	1	1,67734
B*	354	V2-V3	GUL	0,05	0	0,2	3	1	1,6004
B*	354	V1	GUL	0	0	10	3	1	1,57
B*	354	V911-V927	GUL	0,0176	0,16	0	3	1	1,5692
B*	354	V421-V437	BLÅ	0,12	0,35	0,01	2	1	1,52352
B*	354	V441-V457	BLÅ	0,082	0,38	0,05	2	1	1,4859
B*	354	V951-V967	BLÅ	0,05	0,09	0,06	2	1	1,45102
B*	354	V461-V477	BLÅ	0,006	0,02	2,6	2	1	1,4114
B*	354	V211-V227	GUL	0,123	1,1	0,02	4	1	1,08404
B*	354	K301-K302	GUL	0,1	0,45	0	4	1	1,0545
B*	354	V110	GUL	0,1	0	0	4	1	1,05
B*	354	V111	GUL	0,1	0	0	4	1	1,05
B*	354	K401-K451	GUL	0	0,01	0	4	1	0,9501
B*	354	K501-K520	GUL	0	0	0	4	1	0,95
B*	354	K101-K124	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35
B*	354	T41-T108	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35
B*	354	V481-V497	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35
B*	354	V501-V517	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35
B*	354	V521-V524	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35
B*	354	V591-V594	BLÅ	0	0	0	4	1	0,35

Som analys-signifikanta objekt väljs "objektgrupper" bestående av parallella objekt och dessutom "enskilda objekt" vars kvantitativa ASI värden hör till de högsta.

I första hand för de de utvalda ASIs studeras möjligheterna och behoven att begrunda ändringsförslag till befintliga underhålls- eller provningsåtgärder eller deras intervaller. Övervägande av ändringar vid befintliga förebyggande underhållsprogram eller periodiska provningsprogram kan sedan introduceras och begrundas för underhållskritiska objekt med hjälp av kvalitativ värdering av underliggande data och enkla kvantitativa underhållsindikatorer [Skogberg. 1998].

4. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

4.1. Sammanfattande slutsatser och rekommendationer.

I detta dokument har vi beskrivit en metodik för värdering av ett underhålls-åtgärdsprogram genom att analysera systematisk fel- och underhållsinformation från datoriserade informationssystem. Vi föreslår en integrering av en erfarenhetsbaserad underhållsanalys av RCM typ med beslutsstödmeter. Vi har erfarit att komplexa beslut gällande underhåll kan inte grunda sig enbart på resultat från en teknisk underhålls- och/eller säkerhetsanalys.

Informationen som behövs för en grundlig underhållsanalys måste vanligen uppsamlas från olika datakällor i ett kärnkraftverk. Ett av målen, i av den av BKAB utförda underhållsanalysen, är att visa hur rapportering och behandling av fel och underhåll kan förbättras och integreras i 1) informationssystemet för drift och underhåll och 2) tillförlitlighetsdatasystemen. En mera kostnadseffektiv uppföljning, planering samt utveckling av tillförlitlighet, säkerhet och underhåll kan uppnås genom att förbättra både kvaliteten och utnyttjandet av denna information.

- Ett av de viktigaste förbättringsförslagen är att införa periodiska prov och konditionsövervakning i informationssystem för drift och underhåll [Paulsen & Clementz 1992], [Paulsen et.al. 1998]. Detta föreslås för att uppnå en mera integrerad förståelse och kontroll av effektiviteten av det förebyggande åtgärdsprogrammet.
- Ett annat förslag är att komplettera datauppgifter i underhållsinformationssystem så att felrapporten anger entydigt det prov eller den förebyggande underhållsåtgärd, där felet upptäckts. Det skulle underlätta utvärderingen av effektiviteten av enskilda förebyggande åtgärdsprocedurer.
- Ett förslag är också att införa 1) säkerhetsklasser enligt FSAR och strålningszoner i informationssystem för drift och underhåll för att enklare klarställa och informera om objektens säkerhetsbetydelse.
- För att tillfredsställa behovet för kommande underhålls- och åldringsanalyser föreslås att byte av objekt anges entydigt i fel- och reparationsrapporter så att bytestidpunkter för objekt med samma driftbeteckning kan identifieras.
- För uppföljning av anläggningsändringar föreslås en rutin med kompletterande driftsättningsrapport att övervägas för införande i informationssystem för underhåll och drift. Driftsättningsrapporten skulle på några rader ange problemet, korrigerande åtgärd samt förväntad och uppnådd effekt av ändringen.

- För val av analyssignifikanta objekt (ASIs) tillämpades strategiskt tänkande genom användning av viktade beslutskriterier. För att underlätta framtida underhållsstrategiska överväganden med avseende på kriteriet "tillgänglighet för kraftproduktion" föreslås att förlorade MWh orsakade av fel och underhåll på lämpligt sätt kopplas till objekten i informationssystem för underhåll och drift. Denna information torde gå att hämta från rapporter för händelser och rapportervärda omständigheter och lagras eller länkas på lämpligt sätt i informationssystemet för vidare behandling.
- Kostnader av olika underhållsåtgärder samt deras summor borde lämpligen också fördelas och sammanställas på objekt, objektgrupp och systemnivå vid underhållsinformationssystemet utgående från rapportering av mantimmar samt reservdelar och material som har använts för förebyggande och avhjälpande underhåll. Då skulle man bättre veta och kunna optimera vart de omfattande underhållskostnaderna styrs in.

Övriga kommentarer till kvaliteten av klassificeringen och skrivna texten i fel- och reparationsrapporteringen samt till dess täckningsgrad lämnas ej här. Kommentarer kan lämnas av de parter som på kraftverken och kraftbolagen studerat i detalj felrapportering rörande en lång period för olika system och komponentgrupper. Sådana värderingar har ingått i praktiska RCM pilotanalyser, i tillförlitlighetsdatastudier och i studier för identifiering och grundorsaksanalys av mänskliga gemensamma fel [Skogberg 1998], [Pettersson & Skagerman 1995], [Laakso, Pyy, Reiman 1998].

4.2. Framtida visioner för underhålls- och ändringsoptimering

Det nordiska NKS/SIK-1 projektet har visat, hur en mera systematisk och klar grund för säkerhetsrelaterade beslut kan skapas med hjälp av beslutsanalysmetodiken. Kriterier för säkerhetsrelaterade beslut i det studerade beslutsfallet visade sig vara motstridiga, och den bästa beslutsoptionen var inte klar. Beslutsanalysen hjälpte till att identifiera och dokumentera beslutsstyrande fakta och flera realistiska beslutsalternativ än behandlats i det studerade beslutet. Den första demonstrationen av beslutsanalysen gjordes för en verklig dispensansökningssituation från de säkerhetstekniska föreskrifterna (STF) för ett kärnkraftverksblock i Oskarshamn. Denna specifika dispens från STF hade godkänts av Statens Kärnkraftinspektion (SKI). Den första beslutsanalysen utfördes som en simulerad Nordisk benchmarking efter SKIs beslutet av forskargrupperna från VTT Automation och Studsvik Ecosafe [NKS/SIK-1 1994].

Tidigare utförda erfarenhetsbaserade underhållsanalyser hade också genererat begrundade ändringsförslag till underhållsåtgärdsprogram [Hänninen, & Laakso 1993, Laakso, Hänninen & Hallin 1995]. Flera av förslagen förverkligades av de

berörda kärnkraftverken. Men för en del komplicerade beslutsfall som genererats utifrån underhållsanalyserna visade det sig att en mera systematisk och målstyrd beslutsstödsstruktur skulle behövas för att möjliggöra och begrunda komplicerade beslut.

Flera ofta motstridiga beslutskriterier, t.ex. reaktorsäkerhet, tillgänglighet för kraftproduktion, investeringskostnader, underhållskostnader, arbetarsäkerhet och organisationskultur måste också beaktas vid strategiska underhållsrelaterade beslut.

I blockschemat i bilagan 2 visas för tillförlitlighetsstyrt underhåll (RCM) de olika stegen och kopplingarna mellan dessa steg för systematisk underhållsanalys med beslutsstöd. Som framgår av blockschemat genererar och begrunder underhållsanalysen förslag till övervägande av:

- ändringar av förebyggande åtgärder, inklusive införande av konditionsövervakning, för att förhindra återupprepning av feluppkomst eller för sen upptäck av utvecklande eller dolda fel, och
- optimering av prov- och underhållsintervall [Despujols 1996],[Jacquout et al 1996], byte av åldrade komponenter och anläggningsändringar.

En del av dessa beslut är enligt erfarenhet svåra att fatta utifrån resultaten från underhållsanalysen, då alla nödvändiga värden och begränsningar ej har beaktats i underhållsanalysen av resursskäl. Dessutom måste grunderna för reaktorsäkerhet, säkerhetskultur och/eller funktionssäkerhet för en del av ändringsförslagen dokumenteras väl och strukturerat för myndighetsgodkännande och även nyttan samt riskerna för ledningens investeringsbeslut. Man bör precisera olika mål och få parterna att förstå syftet och strategin för beslutsprocessen. Med hjälp av en kvalitativ beslutsmodell och kvantitativ beslutsanalys kan man undersöka och dokumentera vid beslutsanalysessioner, hur bra de olika beslutsoptionerna är i förhållande till varandra. Med hjälp av den kvantitativa modellen kan man också utvärdera känsligheten av rangordningen av optionerna med avseende på olika antaganden och utvärdera systematiskt behov av tilläggsinformation för beslutet.

Visionen är arbeta mot en anläggningsprocedur för strategiskt beslutsfattande vid beslutsanalystillämpningar av komplexa underhållsrelaterade beslutsproblem, där bl.a. data från informationssystemet för underhåll och drift och även PSA används till nytta. Därtill introduceras analysen av underhållsstrategier på engelska i följande bilaga 3 "Analysis of maintenance strategies".

4.3. Möjliga tillämpningar av beslutsanalyser på andra system

Indelning av anläggningen i underhållsstrategiska klasser. Anläggningens system och objekt kan klassindelas på ett strategiskt sätt med avseende på deras

reaktorsäkerhets-, drifttillgänglighets- och kostnadsbetydelse, dosbelastning samt ekonomiska värde.

För detta ändamål erfordras ett liknande beslutsanalysförfarande som demonstrerades vid val av analys-signifikanta objekt på systemnivån för 354 systemet, men med besluts-mål, vikter för valkriterier och värderingskalor som är ändamålsenliga för en strategiskt analys på anläggningsnivån. Syftet är att rangordna system och komponenter för underhållsoptimering eller för utvärdering av behovet av moderniserings- eller modifieringsarbeten. Därefter kunde undersökningen av en klassindelad anläggning startas på system, objektgrupper eller objekt som hör till den högsta och lägsta underhållsstrategiklassen och som uppvisar avvikande underhållsindikatorer. Man skulle ställa följande frågor:

- Behövs förstärkning av underhåll eller resurser ?
- Har man kanske för mycket underhåll eller resurser ?

Detaljerad analys- och optimeringsprocess. Den detaljerade undersökningen och optimeringen av ändrings- och samordningsbehoven av underhåll eller resurser kunde förslagsvis gå vidare eller undersökningen avslutas enligt följande preliminära eller liknande analysprocess:

- 1) övervägande av förstärkning eller minskning kan initieras utifrån BiCycle data-analys (MECA) samt FMECA- och PMEA analyser,
- 2) övervägande och begrundande av förstärkning eller minskning kan begrundas utifrån analysoptionen 1) kompletterad med PMECA (Preventive Actions Effects and Criticality Analysis) och PSA- riskvärdering, eller
- 3) begrundande och val lösningar avseende möjlig förstärkning eller minskning genomförs med hjälp av beslutsanalys utgående från information från analysoptionerna 1) och 2) eller analysoptionen 1) samt från kompletterande expertis och erfarenheter vid beslutsanalyssessionen.

Det viktiga skulle därvid vara att på ett strategiskt sätt prioritera och välja, var man analyserar och värderar grundligt den förväntade och uppnådda nyttan och nackdelarna av förebyggande åtgärder.

Den ovan presenterade ideskissen på underhållsstrategiska klassningen och anknytande optimeringsprocessen behöver emellertid ytterligare utvecklas och anpassas vid anläggningsvisa demonstrationstillämpningar. På så sätt blir processen mogen för att användas i större skala för uppnående av omfattade besparingar och intäkter samt kontroll av risker vid kärnkraftverken.

REFERENSER

- Despujols, A. et al 1996. - Reliability Centred Maintenance applied to gas turbines. 13 th European Maintenance Conference 96. Copenhagen. Denmark. May 21-23, 1996.
- Dorrepaal, J. 1995. Analysis tools for reliability databases. Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI report 95-67.
- Dorrepaal, J, Skogberg, P. 1998. Bicycle98- analysverktyg för databaser. Manual. Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-217
- EPRI 1989. Demonstration of reliability centered maintenance. Vol. 1-3. EPRI NP-6152. Electric Power Research Institute. Palo Alto. USA. 1989. Vol 1. 43 p.
- French, S. 1986. Decision theory: An introduction to the mathematics of rationality. John Wiley, New York, 1986. 447 p.
- Hänninen, S. & Laakso, K. 1993. Experience Based Reliability Centered Maintenance - An Application on Motor Operated Valve Drives. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, In STUK-YTO-TR 45. ISBN 951-47-7171-0. 61 p.
- Holmberg, J., Pulkkinen, U. 1993. Regulatory decision making by decision analysis. In STUK-YTO- TR 61. November 1993. 34 p.
- IEC 812 1985. Analysis techniques for system reliability - procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). International Electrotechnical Commission. 1985. 40 p.
- IEC 50(191) 1990. International Electrotechnical Vocabulary, International Electrotechnical Commission. 112 p.
- IEC 56/560/CDV 1996. Committee Draft 300-3-11. Dependability management. Part 3: Application guide -Section 11: Reliability centred maintenance. International Electrotechnical Commission. 1996. 101 p.
- Jacquout, J.P. 1996 - A survey of research projects in maintenance optimisation for Electricité de France power plants.- ASME.PVP 96. - Montréal.
- KARU- Project. 1997. Survey of the maintenance program- Final report. T-9709-59. Barsebäck Kraft Ab.
- Laakso, K.J. & Burns, D. J. 1985. A Systematic Maintainability Review for Plant Design. Paper presented in 2nd European Logistics Symposium, Växjö, Sweden, 11 - 12 June 1985. Västerås, Asea Atom. 17 p.
- Laakso, K., 1984. Systematisk erfarenhetsåterföring av driftstörningar på blocknivå i kärnkraftverk. (A systematic feedback of plant disturbance experience in nuclear power plants). Tekniska Högskolan. Institutionen för Energiteknik. Avhandling. Otaniemi. Finland. 1984. 149s. (In Swedish incl. a summary in English 14 p.).

- Laakso, K., Hänninen, S. & Hallin, L. 1995. How to evaluate the effectiveness of a maintenance programme. Baltica III, International Conference on Plant Condition & Life Management. Helsinki-Stockholm, 6-9 June 1995. 10 p.
- Laakso, K., Hänninen, S., Simola, K. 1995. Experience based reliability centred maintenance - a case study of the improvement of the maintenance programme for valve drives. The International Journal Maintenance. Vol. 10. No 1. Pp. 3-7. (Firstly presented at the Euromaintenance 94 Conference. 26-28 April 1994. Amsterdam).
- Laakso, K., Sirola, M. & Holmberg, J. 1997. Decision modelling for maintenance and safety. ESReDA Seminar on Decision Analysis and its Applications in Safety and Reliability, Espoo, Finland, 15-16 May 1997. 10 p. + app.
- Laakso, K. 1997. Assessing the Effectiveness of a Maintenance Programme. Maintenance & Asset Management, Vol 12 N:o 1 1997. Pp. 19-24. (Firstly presented at the 13th Conference and Fair. Euromaintenance 96. 21-23 May 1996. Copenhagen.)
- Laakso, K., Pyy, P., Reiman, L. 1998. Human errors related to maintenance and modifications. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety STUK, Helsinki. STUK-YTO-TR 139. ISSN 0785-9325. 42 p.
- Laakso, K., Simola, K. 1998. Projekt RCM - Systematisk underhållsanalys med beslutsstöd - metodrapport. BKAB.T-9812-216.(VTT/TAU-7009/98), Barsebäck Kraft . Löddeköpinge, SE. 31 p. + app. 1 p.
- Laakso, K., Dorrepaal, J., Skogberg, P. 1998. Maintenance analysis and decision support for safety and availability of active systems. Work documentation from the Nordic research subproject NKS/RAK-1.4 "Maintenance strategies and ageing". June 1998. 101 p.
- Lehtinen, E., Heinonen, R., Wahlström, B & Piirto, A. 1998. Performance indicator system for industrial management. 9th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries Barcelona, Spain, 4-8 May 1998. 10 s.
- MSG-3. 1988. Airline/manufacture maintenance program development document. Maintenance Steering Group-3 Task Force. Air Transport Association of America. Rev. 31.3.1998 No 1.
- NKA/RAS-450 1990. Optimization of Technical Specifications by Use of Probabilistic Methods. A Nordic Perspective. Final Report of the NKA project RAS-450. Laakso, K (editor). Report prepared by Laakso, K., Knochenhauer, M., Mankamo, T. Pörn, K. May 1990. NORD Series 1990:33. Copenhagen. 156 p.
- NKS/SIK-1. 1994. Safety evaluation by living probabilistic safety assessment and safety indicators. Final report of the Nordic Nuclear Safety Research Project SIK-1. Edited by Laakso, K. Report prepared by Holmberg, J., Laakso, K., Lehtinen, E. and Johanson, G. TemaNord 1994:614. Copenhagen. 45 p + app.
- Petterson, L., Skagerman, S. 1995. Driftsäkerhet hos pumpar. Vattenfall Energisystem, GED 95/020.

Paulsen, J.L., Clementz, M. 1992. Pilot study on maintenance indicators. Copenhagen. Risø National Laboratory. Report RAG-02732-90-33. 17 p.

Paulsen, J.L., Olsson, L., Pedersen, C.R. 1998. Condition monitoring of the condenser system of a nuclear power plant. Proceedings of the European Conference on safety and reliability - ESREL'98. Trondheim. Norway. 16 - 19 June 1998. Pp. 235 - 239 in Volume 1 of Safety and Reliability. A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield/1998.

PSK 6201 1994. Maintenance. Terms and definitions (in Finnish). The Finnish Standardisation Centre of Process Industries. Proposal 1994-11-02. 11 p.

Simola K. & Laakso K. 1992. Analysis of Failure and Maintenance Experiences of Motor Operated Valves in a Finnish Nuclear Power Plant. Technical Research Centre of Finland, Research Notes 1322. 57 p. + app.

Simola, K., Laakso, K., Skogberg, P. 1998. Evaluation of existing maintenance programs using RCM methodology. Proceedings of the European Conference on safety and reliability - ESREL'98. Trondheim. Norway. 16 - 19 June 1998. Pp. 207 - 213 in Volume 1 of Safety and Reliability. A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield/1998.

Sirola, M., J. Holmberg & K. Laakso 1997. Computerised decision analysis tool. Decision Tool. Program document. VTT/KUNTO report 5.11.1997. 6 p. + app.

Skogberg, P. 1998. Projekt RCM- Projektbeskrivning. BKAB DNr. T-9802-60. Dat. 1998-02-10. 12 s.

Skogberg, P. 1998, Projekt RCM (Reliability Centered Maintenance). Slutrapport. Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-215.

TUD-Tillförlitlighet, Underhåll och Drift. Tillförlitlighetsdatasystem ägt tillsammans av Barsebäck Kraft AB, OKG AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, Vattenfall AB och Teollisuuden Voima OY.

Vet van der, R.P. 1989. Reliability centered maintenance. Paper presented at MOU Offshore Conference, Norway, Stavanger, 1989, A/S Norske Shell. 14 p.

PILOTSTUDIE FÖR RCM – PROCESS VID BARSEBÄCKSVERKET MED HJÄLP AV ANALYSVERKTYG FÖR UNDERHÅLLS- DATABASER

1. INLEDNING

Här beskrivs kortfattat resultat från det utvecklingsarbete inom området "Driftsäkerhet och underhållsoptimering" som har bedrivits på Barsebäck Kraft Ab för att framtaga ett koncept för att utvärdera och förbättra underhållet [Skogberg 1998]. I konceptet ingår även hjälpmedel och analysverktyg [Dorrepaaal 1995], [Cooke, Dorrepaaal, Hokstad & Paulsen 1996]. Konceptet benämns RCM, Reliability Centred Maintenance [MSG-3 1988]. RCM beskrivs här som en systematisk metod för att utvärdera effektiviteten av nuvarande förebyggande underhållsprogram. Metoden utnyttjas för att utvärdera det förebyggande underhållsprogrammet, inklusive provning, dels för att identifiera överflödiga underhållsinsatser och dels för att identifiera behov av förstärkningar i det förebyggande åtgärdsprogrammet [Laakso 1997].

Metodiken baseras på att initialt välja ut s k ASI's (d.v. s. Analysis Significant Items). Ett beslutsstöd för att välja ut ASI's har utvecklats inom projektet. ASI's är framtagna för prioritering av objekt för underhållsanalys [Laakso & Simola 1998]. De analys-signifikanta objekten har ett signifikant nuvärde för uppnående av väsentliga underhållsmål såsom reaktorsäkerhet, drifttillgänglighet samt kontroll av kostnader och dosbelastning. En detaljerad analys av underhålls-åtgärdsprogrammet fokuseras därför i första hand på den del av de utvalda analys-signifikanta objekten som uppvisar ett högt historiskt felutfall. Därmed är de utvalda objekten relevanta som underhållskritiska objekt tills förbättrande åtgärder har uppvisats. Om däremot utvalda ASI's uppvisar ett lågt felutfall och ett rimligt antal underhållsmantimmar behövs ej någon förstärkning av underhållet, men granskningen tyder på ett framgångsrikt underhåll. I andra hand fokuseras den detaljerade analysen på övriga objekt som likaså uppvisar ett högt felutfall, ökande feltrend eller höga reparationskostnader.

Ett kraftfullt stöd för analysarbetet av arbetsorderhistoriken har utvecklats. Med dataverktyget BiCycle utförs analys (uppföljning/ sammanställning/ presentation) av fel- och underhållsdata ur BKABs datoriserade underhållssystem (IDUN) [Dorrepaaal & Skogberg 1998]. BiCycle beräknar och automatiserar framtagningen av s.k. underhållsindikatorer, vilka utnyttjas för att utvärdera underhålllets effektivitet.

En första tillämpning av RCM på BKAB har utförts på ett insatsberett säkerhetssystem 354, Hydrauliska systemet för drivdon.

Uppdraget har bedrivits som ett forsknings- och utvecklingsprojekt inom området Driftsäkerhet och underhållsoptimering på avdelningen Teknik, Utvecklingsenheten (TU). Metodiken för RCM inkl. beslutsstöd och verktyg har utvecklats i samarbete mellan Barsebäck kraft Ab (BKAB), VTT Automation (Finland) respektive Data Analysis Tools (Holland).

2. BAKGRUND OCH MÅL

Efterhand som anläggningarna åldras ökar behovet av underhållsoptimering för att kunna uppfylla krav på bl. a. säkerhet, produktivitet och kontroll av underhållskostnader erfarenhetsåterföring [Laakso & Paulsen 1995]. Genom att kontinuerligt och systematiskt följa upp komponenternas fel- och underhållshistorik och deras kondition kan avvikelser (degraderingar) indikeras med hjälp av s. k. underhållsindikatorer (hög felfrekvens, ökad feltrend, kostnad etc.) [Paulsen & Clementz 1992]. Detta ger ett dokumenterat beslutsunderlag för underhålls-relaterade beslut som t.ex. behov av moderniseringar eller förbättringar i det befintliga förebyggande underhålls-programmet. Ett effektivt förebyggande underhåll krävs således för att minska antalet fel och att i ett tidigt skede identifiera begynnande degradering, åldringsfenomen eller feluppkomst.

För att bedriva ett effektivt underhåll krävs ett gott stöd från planerings- och uppföljningsprocesser inklusive systematisk erfarenhetsåterföring. Sådana stödprocesser är:

- användning av informationssystem för planering och uppföljning av underhåll och drift, och
- användning av grundorsaksanalys av fel för att möjliggöra en dokumenterad bas för beslut angående underhåll, t. ex. förbättring av underhållsprogram.

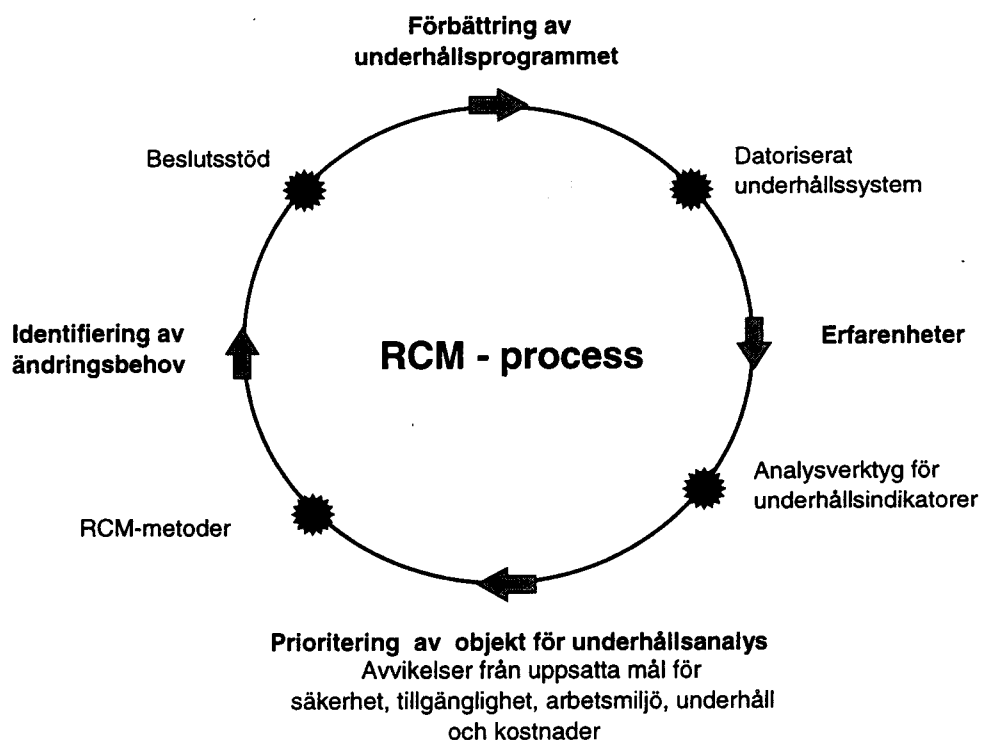
Ett viktigt mål är att skapa en god modell för att införa begrundade förbättringar i systemtillförlitligheten och underhållseffektiviteten genom att utnyttja resultat från analys av historiska feldata och data på avhjälpande underhåll. Införande av kvantitativa mått för värdering av prov- och underhållseffektivitet har också varit viktigt. Beträffande tillförlitligheten skulle svaga objekt eller komponenter behövas identifieras för att förstärka förebyggande åtgärder för dem. Å andra sidan, en systematisk underhållsanalys kan också generera argument för att minska överflödiga periodiska prov och förebyggande underhåll.

Tillgång av ett analysverktyg är en viktig förutsättning för att möjliggöra en effektiv uppföljning och analys av fel- och underhållshistorik. Ett viktigt arbete har därför varit att utveckla ett användarvänligt och kraftfullt analysstöd (BiCycle)

med tillgång till informationsdatabaser för drift- och underhåll, säkerhetsrapportering etc.

Internationella erfarenheter från kraftindustrin pekar på att en besparingspotential kan uppnås med RCM [EPRI 1989]. Förutom kvantitativa fördelar som reduktion av underhållskostnader erhålls kvalitativa fördelar som bättre kontroll/uppföljning av underhållskostnader, allmän ökning av kostnadsmedvetenhet, systematisk metod för att analysera/utvärdera drift- och underhållshistorik, förbättring av "team-work" mellan olika organisationsdelar och motivation, beslutsstöd för underhållsrelaterade beslut samt stöd för underhållsplanering. RCM kan klassas som ett koncept för kvalitetssäkring av underhåll.

Barsebäck Kraft AB har, inom forsknings- och utvecklingsområdet, framtagit en process (strategi) för att kontinuerligt förbättra det förebyggande underhållsprogrammet, se Figur 1 nedan (se även sektion 4).



Figur 1. BKAB-RCM- process för kontinuerlig förbättring av förebyggande underhållsprogram.

3. SAMMANFATTNING AV RESULTAT FRÅN RCM- PILOTSTUDIE PÅ BKAB.

Ett effektivt förebyggande underhåll krävs för att uppnå operativa långsiktiga mål på säkerhet, tillgänglighet, dosbelastning och underhållsekonomi. Syftet med förebyggande underhållsåtgärder är att minska antalet fel och att i ett tidigt skede identifiera begynnande degradering eller feluppkomst. En koncept för kontinuerlig förbättring av det förebyggande underhållet har utvecklats på Barsebäck Kraft AB (BKAB). Ett särskilt beslutsstöd har framtagits för att välja ut s.k. ASIs (*Analys-Signifikanta objekt*) d.v.s. objekt som är relevanta med avseende på deras betydelse för säkerhet, drifttillgänglighet, underhållskostnad och miljö (dosbelastning). Beslutsstödet tillämpning baseras på Barsebäcks egna värderingar och erfarenheter.

Ett ASI-värde beräknas och utnyttjas för att rangordna och prioritera objekt för en fördjupad underhållsanalys. Underhållsanalysen baseras på systematiska metoder enligt RCM (Reliability Centred Maintenance).

Ett kraftfullt verktyg BiCycle har utvecklats inom projektet för att stödja analysarbetet. BiCycle är anslutet till IDUN underhållssystemet och verktyget möjliggör effektivt urval, sortering, sammanställning och statistisk behandling och presentation av fel- och underhållshistorik från arbetsordrar. Därvid beräknas ett antal olika s.k. *underhållsindikatorer*, vilka utnyttjas för uppföljning av underhållets effektivitet.

Resultat från pilotstudien för system 354 pekar på följande; *Genom underhållsanalys med systematiska metoder av fel- och underhållshistorik och med hjälp av ett beslutsstöd erhålls ett relevant underlag för att identifiera förändringsbehov i det förebyggande åtgärdsprogrammet.*

Sammanfattningsvis har pilotstudien [Skogberg 1998] resulterat i följande:

- Modell och metodik för att systematiskt utvärdera effektiviteten av nuvarande underhållsprogram inkl. provning.
- Metodik för beslutsstöd för att identifiera s. k. analys-signifikanta objekt d.v.s. de objekt vars underhåll är relevanta att utvärderas utgående från deras betydelse för säkerhet, drifttillgänglighet samt kontroll av dosbelastning och underhållskostnad.
- Utveckling av ett analysverktyg BiCycle för uppföljning av fel- och underhållsdata ur IDUN informationssystemet för underhållssystemet.
- Specifikation av s.k. underhållsindikatorer, vilka utnyttjas för att utvärdera underhållets effektivitet. Dessa indikatorer kan utnyttjas för framtida styrning av underhållet med hjälp av måltal.

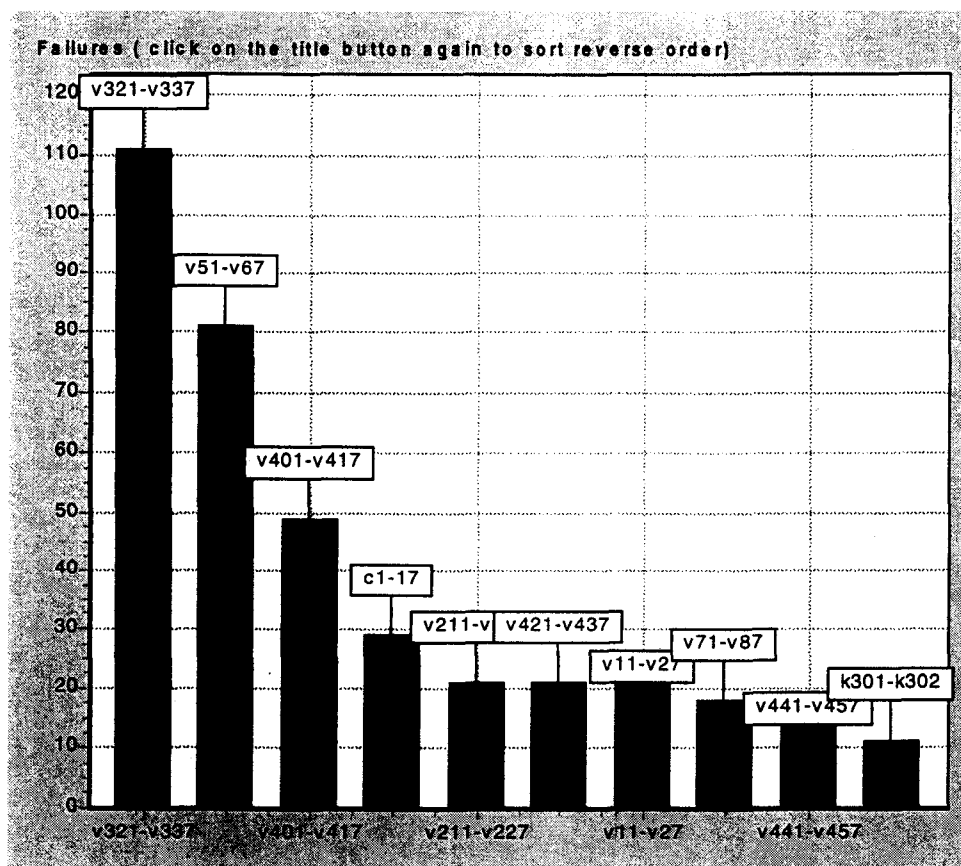
- Begrundade förslag till förbättringar av det förebyggande åtgärdsprogrammet för system 354.
- Begrundade förslag till förbättringar och anpassningar till BKABs underhållsprocess för att underlätta underhållsoptimering.
- Förslag till framtida strategi för tillämpning av underhållsoptimering (RCM) på BKAB.

4. RCM - PROCESS FÖR ATT FÖRBÄTTRA FÖREBYGGANDE UNDERHÅLL

Syftet med RCM är att optimera det förebyggande underhållsprogrammet med avseende på åtgärd och intervall. RCM skall betraktas som en process för underhållsstyrning, enligt Figur 1 ovan, vilken är en strategi för att bedriva en effektiv underhållsverksamhet med hänsyn till mål som t. ex. reaktorsäkerhet, drifttillgänglighet, kostnader och arbetsmiljö (dosbelastning). Processen består i princip av fyra steg:

1. Utnyttja erfarenheter utifrån historiska data på fel, underhåll samt anläggningskondition.
2. Identifiera/välja analyssignifikanta objekt (ASIs; Analysis Significant Items) och avvikande objekt med hänsyn till säkerhet, tillgänglighet, kostnader och arbetsmiljö (dosbelastning) etc.
3. Identifiera ändringsbehov av förebyggande åtgärder för att förhindra feluppkomst eller för sen upptäckt med hänsyn taget till befintliga mål, krav och behov som föreligger. Genomgång av underlag med underhållsansvariga med hjälp av ett beslutsstöd (verktyg) ger beslutsunderlag avseende åtgärder.
4. Införa förbättringar i befintligt förebyggande underhållsprogram. Förebyggande åtgärder inkluderar här alla förebyggande åtgärder som utförs under drift- och revisionsperiod, periodiska prov och återkommande kontroll (rör och tryckkärl). Vidare beaktas tillståndskontroll, vilken ofta utförs i samband med förebyggande underhållsåtgärder eller periodisk provning. Anläggningsändring (modifiering) betraktas här som förebyggande åtgärd.

Ett exempel på presentation av resultat från steget 2, Identifiering/val av ASI's (AnalysSignifi-kanta objekt) och avvikande objektgrupper, visas i Figur 2 nedan.



Figur 2. Identifiering av objektgrupper med högt felutfall utifrån Analyssignifikanta objekt (ASIs), t.ex. de tre första staplarna från vänster.

RCM är troligen den mest förekommande analysmetod som utnyttjas idag för att konstruera lämpliga och effektiva underhållsprogram för tekniska system. Metodiken kan också användas för kvalitetssäkring av underhåll inom kvalitetsområdet. Det som utmärker RCM är att underhåll fokuseras på s.k. kritisk utrustning. Med kritisk utrustning menas dess betydelse för konsekvenser t.ex. reaktorsäkerhet, drifttillgänglighet, kostnader och miljö (dos). Metodiken utnyttjas som stöd för att bl. a. besvara följande frågeställningar:

- Har vi ett effektivt förebyggande underhållsprogram idag?
- Utför vi rätta förebyggande åtgärder idag för att förhindra eller identifiera feluppkomst tidigt?
- Utför vi nödvändiga åtgärder såsom förebyggande underhåll och periodiska prov vid rätta tidpunkter (intervall) idag?

Vid underhållsplanering bör hänsyn tas till samtliga förebyggande underhållsåtgärder för att samordningsvinster skall kunna uppnås.

Den grundläggande iden bakom en RCM-studie är att identifiera de underhållsåtgärder som är rimliga att genomföra i förebyggande syfte för att uppnå sådan tillgänglighet under återstående livslängd för anläggningen att förlusterna blir så små som möjligt och möjligheter för produktion så stora som möjligt. Med

förluster avses här kostnader för underhåll, intäktsförluster uttryckt i otillgänglig produktionskapacitet, säkerhetspåverkan, dosbidrag som genereras etc, d.v.s. de mått på konsekvenser som är av vikt i sammanhanget.

Det gäller att balansera för- och nackdelar för förebyggande underhåll. Nyttan (d.v.s. vinsten) av förebyggande underhåll skall vägas mot de konsekvenser (förluster) som kan uppkomma om inget förebyggande underhåll görs. För att strukturera underhållets "vinster och förluster" krävs dessutom beslutsstöd. Beslutskriterier är ibland motstridiga, vilket kan leda till beslutsvånda. Ett beslutsstöd har därför utvecklats och redovisas i detta projekt [Laakso & Simola 1998]. Beslutsstödet utnyttjas här för att tydliggöra de värderingar som ligger till grund för att prioritera s.k. ASI 's (Analysis Significant Items), d.v.s system, objekt (eller objektgrupper) som bör fokuseras som "analyssignifikanta". Med "analyssignifikant" menas här att ett behov att undersöka om underhållet är relevant med hänsyn till påverkan på reaktorsäkerhet, drifttillgänglighet, arbetsmiljö och underhållskostnader etc.

Underhållsindikatorer kan utnyttjas för identifiering av olika driftsäkerhetsmått t.ex. antal fel, återkommande fel, ökande trender eller underhållskostnader samt jämförelse med definierade mål (referensvärden, larmgränser). Med hjälp av underhållsindikatorer kan således underhållets effektivitet utvärderas.

Indikatorer kan ge "larm" om en förändring har inträffat eller håller på att ske, vilket ger underlag för att studera om "larmet" är befogat. I tillämpliga fall erhålls därmed underlag på ett tidigt stadium för att initiera effektiva förbättringsåtgärder.

En process, vars målsättning är att förbättra underhållet och där indikatorer utnyttjas för att mäta avvikelser från uppsatta mål, kan även betraktas som en strategi för *målstyrning av underhåll*.

5. ORGANISATORISKA REKOMMENDATIONER FÖR UNDERHÅLLSANALYS

Analysresultat från en RCM- pilotstudie för ett specifikt anläggningssystem indikerar att uppföljning och analys av historiska fel- och underhållsdata från underhållssystemet (IDUN), med hjälp av enkla underhållsindikatorer, ger ett relevant och dokumenterat stöd och grunder för att föreslå förbättringsåtgärder i det förebyggande underhållsprogrammet.

RCM bör uppstartas som ett projekt men skall sedan övergå till en kontinuerlig process. Ett förprojekt bör initialt uppstartas, där bl.a strategi för klassindelning, rangordning och prioritering av anläggningens system samt beslutsstödsmetoder bestäms.

Ansvar/organisation bör anpassas, i syfte att skapa en plattform för en kontinuerlig analys- och uppföljningsverksamhet av underhåll. Detta underlättas av ett kraftfullt dataverktyg BiCycle har utvecklats och demonstrerats inom projektet för att stödja analysarbetet och presentation av arbetorderhistoriken.

6. BICYCLE 98, ANALYSIS TOOL FOR MAINTENANCE DATABASES.

6.1. Introduction

Some of the improvement suggestions from the NKA research project RAS-450 [NKA/RAS-450 1990] concerning requirements on the Nordic nuclear power equipment failure and maintenance data were:

- give the utilities on line access to the data;
- update the options for data presentation;
- make better use of the information in the maintenance work order systems.

These recommendations were taken as a starting point for the work that led to the computerised data analysis tool, BiCycle 98. BiCycle 98 is now installed both at the maintenance work order system and incident reporting system of Barsebäck nuclear power plant. Its predecessor RelDAT (Reliability Data Analysis Tools) [Dorrepaal 1995] is also in use in the overall Nordic nuclear power component reliability database [TUD] in Stockholm.

BiCycle 98, analysis tool for maintenance databases:

- allows easy navigation and analysis of the maintenance data
- facilitates improvement of the efficiency and effectiveness of maintenance plans
- has an intuitive user-friendly interface and dedicated user support.

Most industries use databases to plan and track maintenance work on components. As the databases grow, they can help to improve plant performance by analyzing such maintenance records and identifying key problem areas, pinpointing for example components with the highest maintenance costs per year.

Yet the value of the data is limited without the use of proper analytical and presentation tools. Analyzing years of accumulated data on more than 100,000 different components requires sophisticated software tools. This is where e.g. BiCycle 98 comes in.

This analysis tool is a user-friendly software system that improves standards of

component maintenance planning and follow-up. It was developed jointly with the Swedish nuclear power industry and has been tried and tested in practical use.

6.2. Benefits of BiCycle 98

This analysis tool aids maintenance managers to significantly improve the efficiency and effectiveness of their maintenance plans.

- *effectiveness*: BiCycle 98 pinpoints those components and processes with the highest failure rates or maintenance costs, so that subsequent improvement can be concentrated on these areas
- *efficiency*: BiCycle 98 analyzes the plant's own maintenance history, so that preventive maintenance schedules can be optimized.

Who would benefit ?

- industries with complex processes, such as the power plants, chemical industry, aviation etc.
- specialists such as maintenance and production engineers and managers, safety/reliability engineers and equipment designers.

6.3. How does it work?

This analysis tool allows easy navigation and analysis of your maintenance data.

Navigation

BiCycle 98 has an intuitive database navigator called *Generic Datatree*. It allows the user to filter, search and sort more than 200,000 maintenance reports in minutes.

Components with similar problems, for example valve leakage, can be identified and grouped together for an analysis.

Analysis

BiCycle 98 calculates the key maintenance measures (see Table 1) of a selected group of components. In addition, the analysis tool identifies trends, outliers and interdependencies of component failures.

An analysis is performed in a 3 step process. *History* produces a maintenance history report with clarifying charts. *Quick fix* calculates maintenance measures and reliability statistics, including for example trends. *Watchdog* performs advanced calculations to identify such issues as the 10 components that have the highest maintenance costs per year, or the component manufacturer with the highest mean repair time.

All analyses are performed in minutes.

Table 1. Examples of maintenance measures calculated by the analysis tool.

Preventive maintenance, Corrective maintenance	Reliability characteristics
jobs per year	failure rate (Weibull)
hours per year	repair hours per year
hours per job	mean repair time
early jobs after maintenance	early failures after repair

6.4. Some examples of BiCycle 98 in practice

Maintenance History

In the History chart below, the circles on the calendar line represent the maintenance reports over time. The size of the circle is determined by the number of reports in any one month and the colour denotes classification.

Comparing calendar lines of several components can indicate dependency between the components. Clusters of reports could be the result of common cause failures which are of interest to the safety engineer.

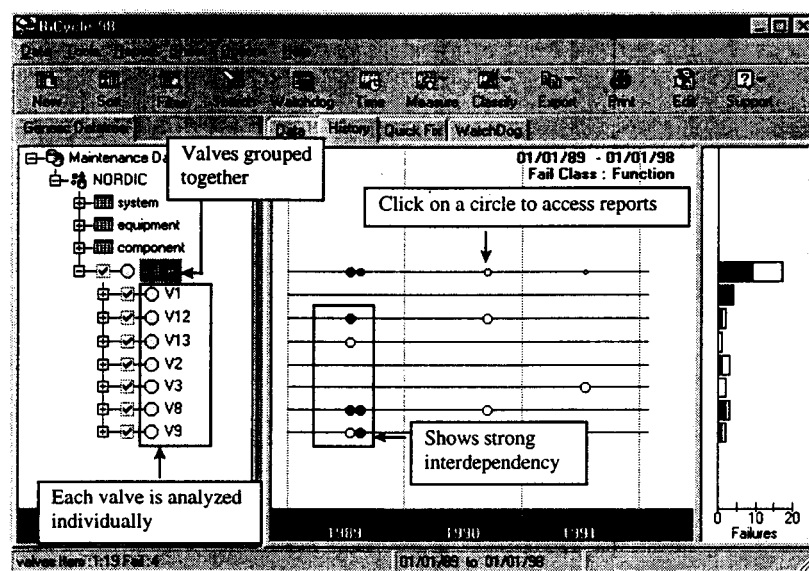


Table 2. Maintenance History chart of a group of valves showing a strong interdependency of failures in 1989.

Trend in repair-hours

The accumulated trend chart is a Quick fix chart. The example below shows a strong negative trend in the measure repair hours for safety valves over the period

1993-1998. Therefore this time period should not be used to estimate the mean repair time, as the result will be skewed.

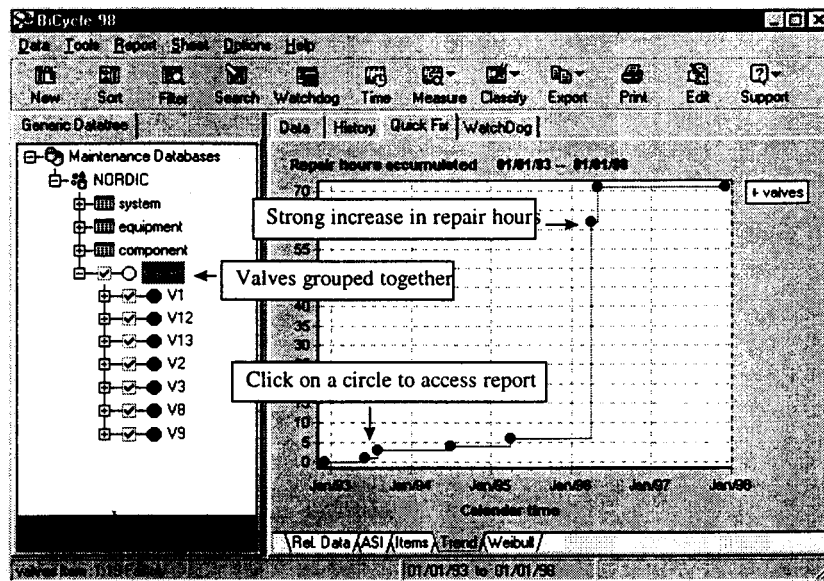


Table 3. Quick fix chart showing a strong negative trend in the measure repair hours.

6.5. The analysis tool is committed to serving users' needs.

Improving maintenance effectiveness and efficiency is not exclusively about software. People are a key part of the equation. A successful Maintenance Improvement Cycle in a plant is based on a positive interaction between the software and the people that use it. Therefore BiCycle 98 provides:

- regular functionality upgrades as requested by users
- extensive Help section and step by step tutorial
- on line support via Email Help service
- regular user meetings.

6.6. Development team.

Since 1996 Joan Willem Dorrepaal, a Dutch statistician, has led the development of BiCycle 98 for the Swedish nuclear power industry, with direct support from risk & reliability groups of the Technical University Delft Holland (Prof. Dr. R.M. Cooke Denmark's), Risø National Laboratory (Dr. K. Petersen) and SINTEF in Norway (Dr. P. Hokstad). The maintenance team at Barsebäck nuclear power plant completed a thorough beta-test of BiCycle 98, before it was introduced to other Swedish nuclear power plants. Pekka Skogberg, development engineer in

Reliability and Maintenance Optimisation at Barsebäck Nuclear Power Station:

"BiCycle 98 has demonstrated that we can make a good use of our maintenance history. With BiCycle 98 we can trace down the components that deviate from our performance goals, so that we can perform our detailed reliability analyses where they are needed.

Moreover, our senior management pays more attention to maintenance issues, because BiCycle 98 allows us to make more informed decisions about plant modifications and modernisation. BiCycle 98 has proven to be an essential part of our Maintenance Improvement Cycle, which will significantly improve our maintenance efficiency and effectiveness."

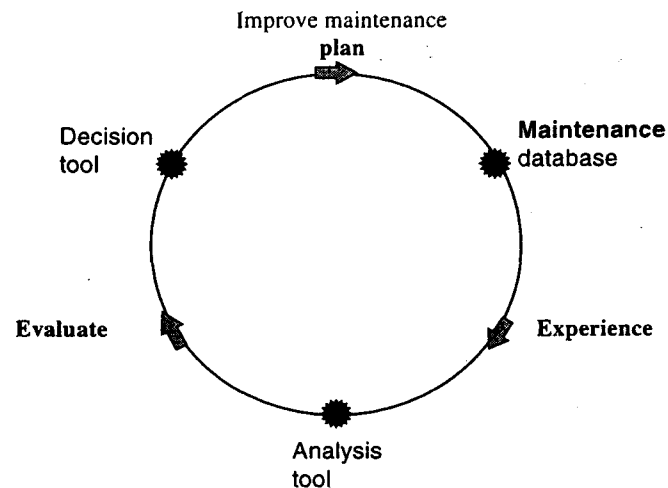


Table 4. Maintenance Improvement Cycle of Barsebäck nuclear power plant.

6.7. Technical specification

Functionality fact-sheet

BiCycle 98 is a Windows based program that works on any maintenance database, regardless of the format or platform.

- single users can download the maintenance databases for analysis anywhere at all times
- multiple users can analyze the maintenance databases that reside on the network server.

Minimal system requirements

- Windows 3.1/95/98/NT
- 486 CPU
- 8 MB RAM
- 33 MHz processor.

Compatible with all databases

- *remote* : Oracle, InterBase, Sybase, MS SQL Server, Informix, DB2 and others
- *local* : MS Access, FoxPro, DBase, Paradox and others.

Fully year 2000 compliant

Navigation capabilities

- intuitive database explorer to navigate any local or remote database
- filter, search and sort large datasets (over 200,000 records)
- export, edit and print data.

Analysis capabilities

- grouping of components for analysis according to user's choice
- user-classification of failures, corrective and preventive maintenance jobs
- user-adjustment of the analysis time window
- interactive charts showing the maintenance history
- summary of maintenance measures including trends, dependability and outliers
- charts showing all maintenance measures
- advanced reliability characteristics designed for preventive maintenance interval planning
- detection of components that deviate from maintenance performance goals.

Support

- regular functionality upgrades as requested by users
- extensive Help section
- step by step tutorial
- on line support via Email Help service
- regular user meetings.

7. KONTAKTPERSONER.

Pekka Skogberg

Utvecklingsingenjör inom området Driftsäkerhet och Underhållsoptimering

Barsebäck Kraft AB

e-mail: pekka.skogberg@bkab.sydskraft.se

Joan Dorrepaal

Data Analysis Tools (DAT)

e-mail: dorrepaal@compuserve.com

BiCycle 98

PO box 81003

3009 GA Rotterdam

The Netherlands

www.bicycle98.com
info@bicycle98.com

REFERENSER

- Cooke R.M., Dorrepaal J., Hokstad P. and Paulsen J 1996. The design and use of reliability database with analysis tool. Risø,-R-896(EN). Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde.
- Cooke, R.M. 1996. The design of reliability data bases Part I. *Reliability Engineering and System Safety*, 51. no. 2. pp. 137-147.
- Cooke, R.M. 1996. The design of reliability data bases Part II. *Reliability Engineering and System Safety*, 51. no. 2. pp 209-225.
- Dorrepaal J. 1995. Analysis tools for reliability databases, mathematical design Thesis, Delft University of Technology, Delft, also published by Swedish Nuclear Power Inspectorate SKI Report 95:67, Stockholm Sweden.
- Dorrepaal J. and Hokstad, P. 1997 "The effect of preventive maintenance on component reliability. European Safety and Reliability Conference. ESREL 97. Lissabon. Advances in Safety and Reliability, Pp. 1775-1783.
- Dorrepaal, J, Skogberg, P. 1998. Bicycle98- analysverktyg för databaser. Manual.Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-217.
- EPRI 1989. Demonstration of reliability centered maintenance. Vol. 1-3. EPRI NP-6152. Electric Power Research Institute. Palo Alto. USA. 1989. Vol 1. 43 p.
- Haugen, K. Hokstad, P. and Sandtorv, H. 1995. The analysis of failure data in the presence of critical and degraded failures. Appearing in *Reliability Engineering and System Safety*.
- Hokstad, P and Frøvig, A.T. 1996. The modelling of degraded and critical failures from components with dormant failures. *Reliability Engineering and System Safety*, 51. no 2. pp 189-201.
- Laakso, K., Paulsen, J. 1995. Evaluation of maintenance strategies and ageing of equipment. Nordic questionnaire survey. NKS/RAK-1 work report. Questionnaire 27.4.1995. 8 p + 1 app.
- Laakso. K. 1997. Assessing the Effectiveness of a Maintenance Programme. *Maintenance & Asset Management*, Vol 12. Nr. 1. 1997. Pp. 19-24.
- Laakso, K., Simola, K. 1998. Projekt RCM - Systematisk underhållsanalys med beslutsstöd. Metodrapport. (Systematic maintenance analysis with decision support, method report in Swedish). Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-216. (VTT Dok. nr. TAU -7009/98). 35 s + 1 bil.
- NKA/RAS-450 1990. Optimization of Technical Specifications by Use of Probabilistic Methods. A Nordic Perspective. Final Report of the NKA project RAS-

450. Laakso, K (editor). Report prepared by Laakso, K., Knochenhauer, M., Mankamo, T. Pörn, K. May 1990. NORD Series 1990:33. Copenhagen. 156 p.

OREDA Committee. 1984. Offshore Reliability Data. Hovik, Norway.

Skogberg, P. 1998, Projekt RCM (Reliability Centred Maintenance). Slutrapport. Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-215.

Tsiatis, A. 1975. A nonidentifiability aspect of the problem of competing risks. *Proc. Nt. Acad. Sci. USA* 72, no 1. pp 20-22

Sandtorv, H., Rausand M. 1996. RCM- Closing the loop between design- and operation reliability. SINTEF Safety and Reliability, Norwegian Institute of Technology EsRedA 10th seminar. Rotating Machinery Performance. Chamonix. April 4-5, 1996. 17 p.

TUD-Tillförlitlighet, Underhåll och Drift. Tillförlitlighetsdatasystem ägt tillsammans av Barsebäck Kraft AB, OKG AB, Forsmarks Kraftgrupp AB, Vattenfall AB och Teollisuuden Voima OY. (Nordic NPP Maintenance and Operation Reliability Data System).

saved 30.1.1999 by kjl as c:\reldat\bicycle981.doc

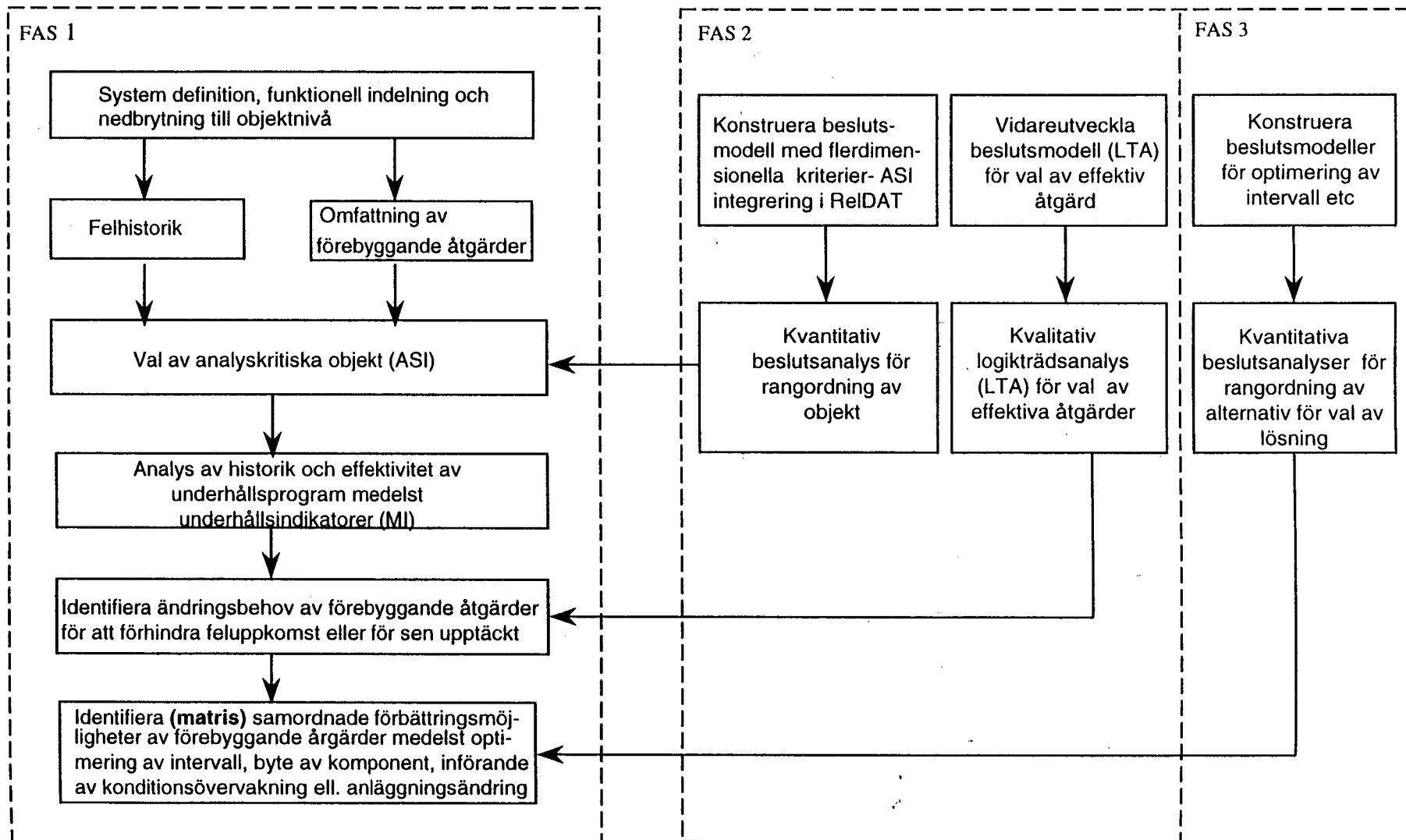
NKS/RAK-1.4.

Tillförlitlighetsstyrt underhåll (RCM)- systematisk underhållsanalys med beslutsstöd

BILAGA 2

Underhållsanalys

Beslutsstöd



Analysis of maintenance strategies

1. Introduction to the maintenance strategy

The most nuclear power utilities have established goals and objectives for their nuclear power plants, including e.g. 1) operating the plant effectively from primarily the safety and secondly the economic point of view, 2) ensuring safety of the public and the plant workers, and 3) providing uninterrupted electric power to the shareholders with long-term minimum cost. The maintenance goals should reflect these goals at a more functional level.

In a larger perspective, the goal of the plant maintenance and operability activities may be assurance of long-term asset management by keeping the plant continuously in a good condition like new [Mokka, 1996]. Avoiding faults causing plant disturbances during the operating period may be the most important performance goal which should not be put in danger by minimising the number of maintenance work during the annual maintenance and refuelling outage. More detailed goals and objectives may be to carry out the necessary work at the optimal time during the outages or operation, and to minimise the unavailability time of safety related equipment. One internal objective may be to carry out the maintenance work at budgeted cost. It is expected that every maintenance organisation will, together with its parent organisation, identify its own goals and objectives [EURO-MAINE 1997].

Figure 1 illustrates a rough idea how a target steered model for maintenance management, including control of ageing, could be constructed [Laakso, Dorrepaal, Skogberg, 1998]. The maintenance *goals* and objectives should have the following characteristics: 1) they are realistic and challenging, 2) they are understandable and clearly communicated to the staff, and 3) action plans are documented describing how the goals or objectives will be achieved. From the maintenance objectives, such as safety, availability and cost related, one can establish quantitative targets or *acceptance criteria*, against which the level and trend of performance can then be measured [Schjølberg & 1996]. *Indicators*, such as unavailability of technical equipment, are compared to some reference value in order to determine if they are significantly deviating [NKS/SIK-1 1994].

The maintenance *strategy* gives guidelines on how the resources should be prioritised and allocated on different systems and components in order to

```

graph TD
    AC((Acceptance criteria))
    subgraph Pyramid
        G[Goals]
        S[Strategy]
        AP[Action plan]
        MP[Maintenance program]
        I[Innovations]
    end
    AC --> Pyramid
    Pyramid --> AC
    
    MA[Maintenance activities]
    OP[Operation]
    
    Pyramid --> MA
    Pyramid --> OP
    
    MA --> D{Deviations?}
    OP --> D
    
    D -- No --> OK((OK))
    D -- Yes --> CA[Comparison, analysis, decisions, actions]
    CA --> Pyramid
    
    subgraph BottomRow [ ]
        direction LR
        M[Maintenance]
        D[Data]
        S[Safety]
        A[Availability]
    end
    
    M --> D
    D --> D
    S --> D
    A --> D
    
    Legend[Maintenance and operability data  
Plant and equipment condition  
External experiences]
    Legend --> BottomRow
  
```

The concrete performance of the maintenance actions requires *support* (resource) *functions* such as people, information, material and tools [SKI Reference Book: Maintenance 1993, Sanden & Chockie 1995]. Based on the maintenance strategy, it will be possible to single out the most important net investments on the maintenance *support elements* to achieve better the maintenance objectives. For instance, a developmental element to be planned can be RCM analysis of technical systems which are most important from the safety, availability and cost point of view. Another project in the *activity plan* may be introduction of a computerised processing system of maintenance indicators to facilitate a user friendly utilisation of the maintenance history data base for experience feedback of maintenance effectiveness.

2. Maintenance analysis

A model was developed for aiding evaluation of the effectiveness of existing maintenance action programs of a power plant. The maintenance actions concerned are given as follows.

Table 1. Maintenance actions.

- Functional testing which can be periodic motioning of a closing valve,
- Calibration control such as check of a limit switch,
- Non-destructive testing which can be ultrasonic testing of a weld,
- Servicing such as cleaning and lubrication of a valve stem,
- Periodic replacements e.g. replacement of rubber items in a solenoid valve,
- Condition monitoring e.g. measurement of motor power during valve actuation,
- Repairs such as stem packings tightened, and
- Modification works based on redesign of equipment.

The analysis model combines a review of historical data on faults and repairs with an analysis of the history of functional testing and preventive maintenance [Laakso 1997]. The results of maintenance analysis pinpoint proposals on changes in maintenance and testing justified for fault reduction and earlier detection [Laakso et al. 1995b].

The model was firstly developed via pilot analyses on the maintenance of motor-operated closing valves and automatic protection systems in Finnish and Swedish nuclear power units [Hänninen & Laakso 1993, Laakso et al. 1995a]. Parallely, the developments benefitted from ageing analyses of certain safety related components and NPP protection automation [OECD 1995, Simola 1998].

The applications of the maintenance analyses resulted in verification of the maintenance action programs and justification of changes in them from the point of view of system reliability, availability and maintenance work cost. The proposed changes were adjustment of the intervals of testing and preventive maintenance and introduction of more effective preventive actions. The analysis model is summarised in the upper part of the Fig. 2.

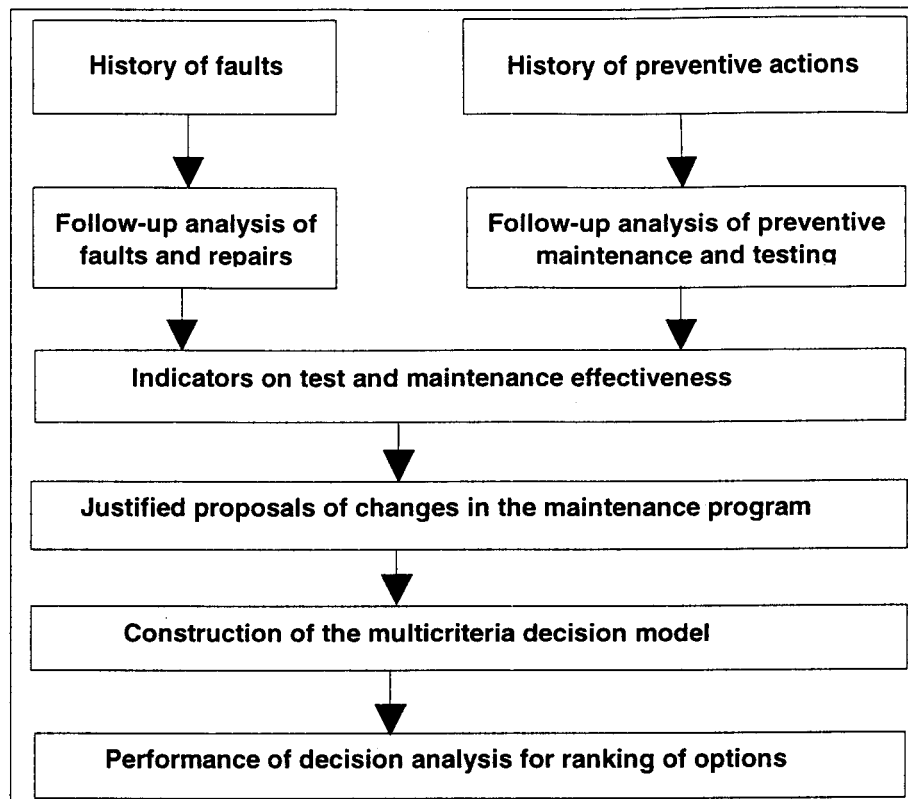


Figure 2. Brief steps in the model of maintenance and decision analysis.

We experienced that several recommendations were implemented at the plants but understood that a proper decision requires consideration of more, often conflicting, decision criteria. Such can be plant safety, availability, maintenance cost, work culture and radiation protection.

Decision analytic approaches were concurrently developed for enhanced use of probabilistic safety assessment in decision making on operational safety issues [NKS-SIK-1 1994, Holmberg & Pulkkinen 1993]. Experiences from these studies indicated that decision and maintenance analyses should be used together to support complex maintenance related decisions.

3. Decision modelling

A systematic decision support structure is needed for identifying and ranking the significant criteria, information needs and options for a decision [Laakso, Sirola & Holmberg 1997]. The results from maintenance analysis can be used in the decision analysis, together with other analyses and expert judgement, to evaluate how well the decision criteria are met. Experiences from the earlier decision analyses, to correspond the needs identified, were operationalized by definition of a decision support tool [Sirola, Holmberg &

Laakso 1997]. The quantitative decision model of the tool is based on an additive multi-attribute value function defined by the equation:

$$v_{tot}(a_i) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a_i), \quad (1)$$

where a_i means the decision option i , w_j is the weight coefficient of the criterion j and $v_j(a_i)$ is the scaled score of the decision option a_i compared to the decision criterion j [French 1986]. The decision model presupposes a mutual preferential independence of the attributes measuring the achievement of the decision objectives j .

By analysing a more extensive collection of decisions, one could apparently identify the most significant decision criteria for different typical decision cases. This approach also identifies the needs for developing decision mechanisms and enhances the understanding and quality of the decisions. Gradually, qualitative decision models related to maintenance and safety have been structured based on experiences from the decision and reliability analyses, e.g. [NKA/RAS-450 1990, Holmberg & Pulkkinen 1993, Laakso 1997]. The drafted models have been completed and updated by using interviews and comments from personnel at Nordic nuclear and conventional power plants and safety authorities [Laakso & Paulsen 1995, Laakso, Dorrepaal & Skogberg 1998]. The models include decision criteria and attributes for selected cases. Such cases are decisions on maintenance program changes, modifications and installation of condition monitoring [Hänninen & Laakso 1993, Laakso et al 1995a, Laakso et al 1995b, Laakso 1997]. Also a model of plant shutdown decision in a questionable fault situation was included [Holmberg & Pulkkinen 1993, Holmberg et al. 1994]. The decision models have been stored in the data base of the decision analysis tool to make the accumulating knowledge operational for the tailored applications.

4. Decision support procedure for maintenance, safety and economy

The tool, its database and the method have been tested and demonstrated with two end users in decision analysis exercises. The first case concerned acceptance of repair of a blocked check valve during power operation with an exception permit [Sirola, Holmberg & Laakso 1997]. In the second case, items from about 1400 components in a standby safety system were ranked for analysis based on several strategic selection criteria, which are presented

in table 2. The most significant components were selected as Analysis Significant Items (ASIs) for further consideration.

Table 2. Criteria and indicators for strategic selection of items for analysis. The weights of criteria are given by comparing them in pairs.

- Reactor safety
 - FSAR safety class,
 - PSA risk importance,
- Functional reliability
 - Failure rates
- Repair costs
 - Man-hours
- Preventive maintenance costs
 - Man-hours
- Radiation protection
 - Radiation zone.

The reactor safety criteria were taken into account through the safety classes in the Final Safety Analysis Report and the risk increase factors from the Probabilistic Safety Assessment. Worker safety was considered through radiation exposures in the work spaces. Items covered by repeated faults or extensive preventive resources were also considered as the selection criteria of Analysis Significant Items (ASIs).

A detailed and resource-demanding re-assessment of the maintenance action program was directed to the selected ASIs. Indicators on maintenance and test effectiveness are automatically calculated for single and redundant components from the maintenance history data in the maintenance information system. A qualitative follow-up analysis of the underlying failure and maintenance data was firstly done on items exhibiting deviating levels or trends of indicators. The analyses resulted in justification of changes compared to the existing preventive maintenance and periodic testing [Simola, Laakso & Skogberg 1998]. The maintenance effectiveness of the remaining significant items was parallely verified.

The formal decision analyses demonstrated the potential of a systematic decision analysis procedure to support the decision maker and experts in identification of the most important decision criteria and best decision options or to rank components in complex decision situations. The structured maintenance and decision analysis also helped to document the

bases, and review, of a maintenance action program with a view to target steered maintenance management [Skogberg 1998].

A further development of the tool, methods and models with an aim to accomplish a proven decision support procedure for maintenance, based on safety and economic targets, continues in future applications.

5. Conclusions

The main areas addressed and studied were:

- analysis model and methods to evaluate maintenance action programs and support decisions to make changes in them, and
- understanding of maintenance strategies in a systems perspective as a basis for future developments.

The subproject showed how systematic models for maintenance analysis and decision support, utilising computerised and statistical tool packages, can be taken into use for evaluation and optimisation of maintenance of active systems from the safety and economic point of view.

Acknowledgements

The reported work was part of the Nordic research project Strategies for Reactor Safety 1994-1997, subproject NKS/RAK-1.4 on Maintenance Strategies and Ageing. The work for Chapter 1 was performed during 1994-1998, Chapter 2 during 1994-1996, Chapter 3 during 1996-1997 and the present work for the Chapter 4 was completed in 1998.

Co-operation with Barsebäck Kraft AB, Karinta-Konsult KB, Risø National Laboratory, Studsvik Ecosafe AB, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Technical Research Centre of Finland and Vattenfall Energisystem AB is gratefully acknowledged. A special thank is directed to the participants from these organisations in the Nordic NKS/RAK-1.4 group (See Enclosure 4). The NKS/RAK-1.4 group members provided information and work and contributed with their expertise in the discussions of the working group meetings. Another special thank is directed to the maintenance, safety and development personnel of Finnish and Swedish nuclear power plants. The involved personnel discussed openly with the researchers their experiences and expert opinions in the interviews on Maintenance Strategies and Equipment Ageing as well as in other informal and innovative meetings.

References

EURO-MAINE 1997. Euromaintenance guidelines. Phase 2. Objectives and strategies. The Swedish part. Eureka-Maine project 1073. July 1997. 104 p.

French, S. 1986. Decision theory. An introduction to the mathematics of rationality. Chichester: Ellis Horwood.

Holmberg, J., Pulkkinen, U. 1993. Regulatory decision making by decision analysis. In STUK-YTO- TR 61. November 1993. 34 p.

Holmberg, J., Pulkkinen, U., Pörn, K., Shen, K. 1994. Risk decision making in operational safety management. Experience from the Nordic Benchmark study. In Risk Analysis, Vol. 14, No. 6, 1994. Pp. 983-991.

Hänninen, S. & Laakso, K. 1993. Experience Based Reliability Centred Maintenance - An Application on Motor Operated Valve Drives. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, STUK-YTO-TR 45. 61 p.

Laakso, K., Hänninen, S. & Hallin, L. 1995a. How to evaluate the effectiveness of a maintenance programme. Baltica III, International Conference on Plant Condition & Life Management. Helsinki-Stockholm, 6-9 June 1995. 10 p.

Laakso, K., Hänninen, S. & Simola, K. 1995b. Experience based reliability centred maintenance - A case study of the improvement of the maintenance programme for valve drives. Presented at Euromaintenance 94 Conference, Amsterdam, 26 - 28 April. International Journal Maintenance, Vol. 10, No. 1, pp. 3 - 7.

Laakso, K. & Paulsen, J. 1995. Maintenance strategies and ageing of equipment. Nordic NKS/RAK-1.4 questionnaire survey. Questionnaire. 29.4.1995. 9 p.

Laakso, K., Sirola, M. & Holmberg, J. 1997. Decision modelling for maintenance and safety. Paper presented at the ESReDA seminar on decision analysis and its applications in safety and reliability. May 15 - 16, 1997, Espoo, Finland. 10 p. + 2 app.

Laakso, K. 1997. Assessing the effectiveness of a maintenance programme. Presented at the Euromaintenance 96 Conference, 21 - 23 May, Copenhagen. Maintenance & Asset Management, Vol. 12, No. 1, pp. 19 - 24.

NKA/RAS-450 1990. Optimization of Technical Specifications by Use of Probabilistic Methods. A Nordic Perspective. Final Report of the NKA project RAS-450. Laakso, K (editor). Prepared by Laakso, K., Knochenhauer, M., Mankamo, T. Pörn, K. May 1990. NORD Series 1990:33. Copenhagen. 156 p.

NKS/SIK-1. 1994. Safety evaluation by living probabilistic safety assessment and safety indicators. Final report of the Nordic Nuclear Safety Research Project SIK-1. Edited by Laakso, K. Report prepared by Holmberg, J., Laakso, K., Lehtinen, E. and Johanson, G. TemaNord 1994:614. Copenhagen. Pp. 29 - 33.

Martin-Onraet, M., Degrave, C., Meuwisse, C. 1996. Integrated logistic support concepts in the design of nuclear power plants. EDF paper. 6 p.

Mokka, R. 1996. O&M Cost Management in TVO NPP. Nuclear Europe Worldscan. Vol. XVI. No. 11-123, November-December, 1996. P. 46.

OECD(NEA/CSNI/R(95)9. 1995. Evidence of aging effects on certain safety related components. A generic study performed by Principal Working Group 1 of The Committee for Safety of Nuclear Installations. Volume 2: Contributions of participating countries. Volume 2B: Finland. 290 p. (Compiled by Laakso, K., Simola, K., Pulkkinen, U. & Hänninen, S., September 1995).

Sanden, P-O, Chockie, A. 1995. A regulatory tool for the assessment of maintenance program improvements. Paper presented at the conference "Human factors and organisation in NPP maintenance outages: Impact on safety". June 18-22, 1995. Stockholm. Sweden. 10 p.

Schjølberg, P., Hunstad, S. 1996. Application of maintenance indicators in maintenance management. Proceedings of the 13th European Maintenance Conference and Fair. Euromaintenance 96 Conference. Copenhagen. May 21-23, 1996. p 249-264.

Skogberg, P. 1998, Projekt RCM (Reliability Centred Maintenance). Slutrapport. Barsebäck Kraft AB. Dok.nr T-9812-215.

Simola, K. 1998. Experience based ageing analysis of NPP protection automation. In Mosleh, A. & Bari, R.A. (ed.): Proceedings of the 4th International Conference on Probability Safety Assessment and Management. Vol. 1. Springer-Verlag, London. Pp. 483 - 488.

Simola, K., Laakso, K., Skogberg, P. 1998. Evaluation of existing maintenance programs using RCM methodology. Proceedings of the European Conference on safety and reliability - ESREL'98. Trondheim. Norway. 16 - 19 June 1998. Pp. 207 - 213 in Volume 1 of Safety and Reliability. A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield/1998.

Sirola, M., Holmberg, J. & Laakso, K. 1997. Computerized decision analysis tool - Decision tool. Program document. VTT/AUT/TAU-7013/97 and KUNTO(96)17 report.. 6 p. + app. 5.11.1997.(Limited distribution of appendices).

SKI Reference Book, Maintenance 1993. Prepared for the Swedish Nuclear Power Inspectorate by Battelle Seattle Research Centre. Seattle, Washington. USA. 97 p.

Vuorenmaa, Arvo. 1997. How to cope with maintenance in a unit requiring a high availability performance, in Finnish. Case: IVO Oy (Kuinka huolehdit kunnossapidosta suurta käyttövarmuutta vaativassa yksikössä?). Seminar in Finnish on improvement of the productivity of machine and equipment investments. 4-5.6.1997. Helsinki. 8 p. + app.

saved by kjl 31.1.1999 as d:\kjl\paa\ratu\kuntoop1kjl99.doc

PROJECT ORGANISATION

The NKS/RAK-1 project forms a part of a four-year nuclear research program (1994-1997) in the Nordic countries. Other projects of the NKS research program deal with severe accident research (NKS/RAK-2), emergency preparedness, nuclear waste disposal, ecosystems and information. The program is financed partly by NKS and partly by national bodies. NKS is the Nordic Committee for Safety Research with members from the authorities, research organisations and industry in the nuclear field. The general objective of the NKS/RAK-1 project is to explore Strategies for Reactor Safety [Andersson 1998]. At a more concrete level the project objectives were to:

- investigate and evaluate the safety work
- increase realism and reliability of safety analysis
- to give ideas how safety can be improved in selected areas.

NKS/RAK-1 consisted of five sub-projects. The work within the fourth sub-project NKS/RAK-1.4, Maintenance Strategies and Ageing, has been conducted within a working group with Kari Laakso and Jette L. Paulsen as sub-project leaders. The NKS/RAK-1.4 working group has jointly produced this report with K. Laakso as the main author. During the work the group has met regularly to present and discuss the planning of research and reporting and the results achieved. The NKS/RAK-1.4 group had the following regular participants:

Kari Laakso, VTT Automation, Finland
Jette L. Paulsen, Risø National Laboratory, Denmark
Kjell Andersson, NKS/RAK-1 Project Leader
Ralph Nyman, Swedish Nuclear Power Inspectorate
Per-Olof Sandén, Swedish Nuclear Power Inspectorate
Joan Dorrepaal, Risø National Laboratory, Denmark
Lasse Pettersson, Vattenfall Energisystem Ab, Sweden
Svenne Skagerman, Vattenfall Energisystem Ab, Sweden
Pekka Skogberg, Barsebäck Kraft Ab, Sweden
Jerry Jönsson, Sydkraft Konsult Ab, Sweden
Kecheng Shen, Studsvik EcoSafe Ab, Sweden.

In addition, Kaisa Simola and Miki Sirola, VTT Automation, have contributed in preparation and review of this report and in selected NKS/RAK-1.4 work meetings.

References:

Andersson, K. 1998. Strategies for reactor safety, NKS/RAK-1 Final Report.
NKS /RAK-1(98)R.