

# Levensduurbewaking voor de F-16 vloot van de Koninklijke Luchtmacht

ing. J.A.J.A. Dominicus - kapitein van de Koninklijke Luchtmacht\*  
ing. J.F. van Eijk - majoor van de Koninklijke Luchtmacht

## Inleiding

In de periode 1979-1992 nam de Koninklijke Luchtmacht (KLU) de F-16 als opvolger van de F-104 Starfighter (en later ook als opvolger van de NF-5) in gebruik. De belangrijkste kenmerken van de F-16 zijn de aërodynamische eigenschappen, de vormgeving, de wendbaarheid en het elektronisch *fly-by-wire* besturings-systeem. Dit maakt de F-16 tot één van de meest wendbare gevechts-vliegtuigen ter wereld die dan ook voor een veelheid van taken wordt ingezet.

Met de introductie van de F-16 kreeg de KLU voor het eerst een wapensysteem in huis dat volgens een nieuw concept ontworpen was: het zogenaamde *Durability/Damage Tolerance*-concept. Dit nieuwe concept bracht wijzigingen ten opzichte van het bestaande onderhoudsconcept met zich mee. De onderhoudsfilosofie van de KLU is erop gericht een optimum in missiegereedheid, operationele kosten en vliegveiligheid te vinden. Als gevolg hiervan is samen met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) een levensduurbewakingsprogramma opgezet om dit doel te realiseren. In dit artikel zal de levensduurbewaking zoals die door de KLU wordt uitgevoerd voor het *air-frame* besproken worden, alsmede de achterliggende principes.

\* De auteurs zijn resp. projectingenieur, en hoofd bureau vliegtuigmechanica F-16 (MPFTT) op het hoofdkwartier in Den Haag.

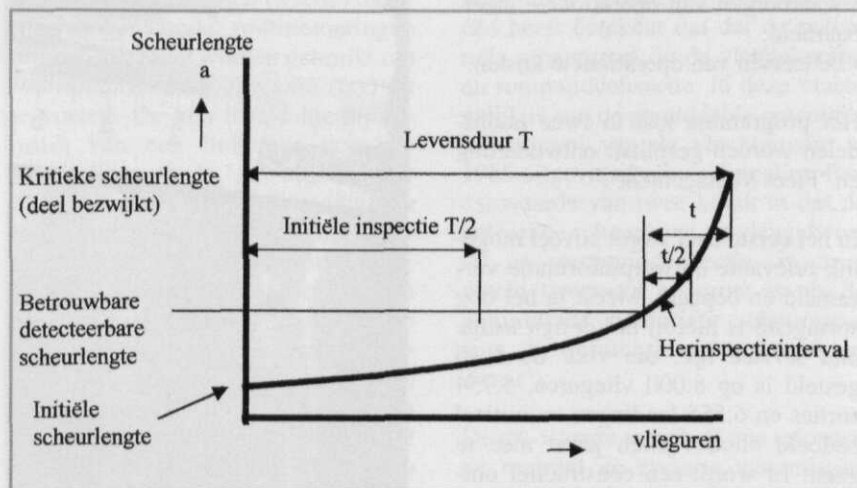
## Ontwerpconcepten

Vermoeïng is een belangrijk aspect waarop een vliegtuig gedimensioneerd wordt. Vermoeïng is het verschijnsel van herhaalde wisselende belastingen op een constructie die ieder op zich niet tot bezwijken leiden. Zij zijn daar op zich niet groot genoeg voor, maar door de vele herhalingen kunnen ze uiteindelijk wel tot het bezwijken van de constructie leiden. Om een vliegtuig tegen vermoeïng te beschermen kan gebruik gemaakt worden van verschillende *structural design* principes. Twee belangrijke concepten zijn het *Safe-Life* en het *Durability/Damage Tolerance*-concept.

In het 'Safe-Life' concept is het onwaarschijnlijk dat vermoeïngsverschijnselen (scheuren) optreden bin-

nen de vooraf bepaalde veilige levensduur. Het einde van de levensduur is bereikt wanneer een scheur optreedt in de constructie. Voordat dit tijdstip is bereikt, wordt het constructiedeel vervangen of uit de roulatie gehaald. Inspecties geven geen toegevoegde waarde met betrekking tot de huidige staat van de constructie: ze zijn in de regel dan ook niet voorzien.

In het 'Durability/Damage Tolerance'-concept wordt aangenomen dat scheuren vanaf het allereerste begin aanwezig zijn. Ze kunnen het gevolg zijn van afwijkingen in het materiaal, het productieproces en/of ontstaan zijn tijdens assemblage. Gedurende het operationele gebruik groeien de scheuren en neemt de sterkte van de constructie af. Om zeker te stellen dat de scheuren ontdekt worden voordat ze te groot zijn, voert de gebruiker in-



'Durability/Damage Tolerance' scheurgroeikromme

specities uit en gaat, indien nodig, over tot reparaties en/of tot vervanging. Opgemerkt wordt dat 'Damage Tolerance' voorziet in veiligheid in het geval van scheurvorming. 'Durability' bepaalt de tijdsduur: hoe lang kan de constructie op een economisch acceptabele wijze in gebruik blijven.

Beide concepten trachten veiligheid te verschaffen, met een gecalculeerd risico van bezwijken, gedurende het operationele leven van het vliegtuig door uitvoering van preventieve maatregelen. Voor 'Safe-Life'-constructies gebeurt dit door uitfasering of vervanging (zonder inspecties). Voor 'Durability/Damage Tolerance'-constructies bestaan de preventieve acties in de eerste plaats uit inspecties gevolgd door reparaties of vervanging indien noodzakelijk.

### Aircraft Structural Integrity Program

Het ontwikkelen van een vliegtuig is een complex proces. Om dit goed te kunnen uitvoeren stelt de fabrikant een zogenaamd *Aircraft Structural Integrity Program* (ASIP) op. Dit is een proces dat zich gedurende het operationele leven van het wapensysteem afspeelt. De primaire doelen die worden nagestreefd zijn:

- voorkomen van *structural failure* in operationele vliegtuigen;
- waarborgen van operationele inzetbaarheid;
- beheersen van operationele kosten.

Het programma kan in twee hoofddelen worden gesplitst: ontwikkeling en 'Fleet Management'.

In het eerste deel wordt zoveel mogelijk relevante ontwerp-informatie verzameld en bepaald. Meest in het oog springend is hierbij het *design usage and service life*, die voor de F-16 gesteld is op 8.000 vliegreuren, 5.754 sorties en 6.555 landingen en initieel bedoeld circa vijftien jaren mee te gaan! Er wordt een constructief ontwerp gemaakt. Vervolgens wordt het constructieve ontwerp analytisch

geverifieerd en theoretisch doorgerekend, waarna tests op ware grootte worden uitgevoerd. Deze tests hebben tot doel de theoretische berekeningen te onderbouwen, de constructie verder te evalueren, te kwalificeren en te certificeren. Op basis van de testdata worden aanpassingen gedaan aan het ontwerp. Dit kan doordat er kritische locaties naar voren komen waar men op voorhand geen problemen verwachtte en die dus als niet-kritisch bestempeld zijn. Ook kan de locatie wel correct geïdentificeerd zijn, maar niet voldoende sterk geconstrueerd. Aan het eind van deel één is het vliegtuig ontworpen en getest, de productie kan worden gestart en de eerste exemplaren kunnen worden afgeleverd aan de klant.

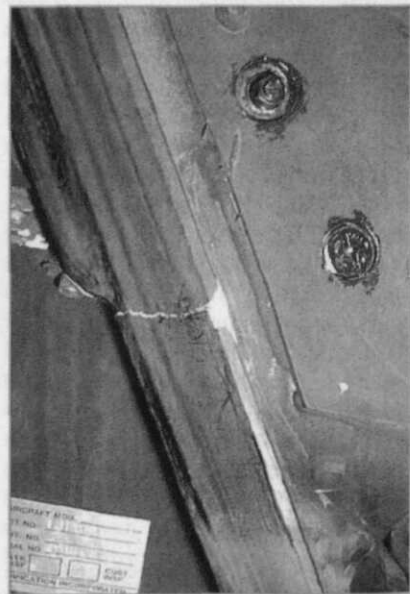
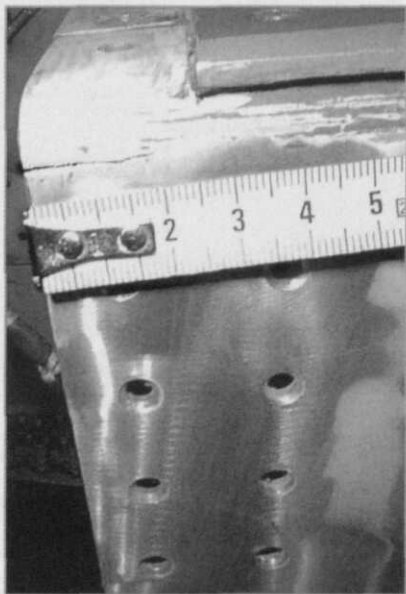
Dan begint deel twee, het 'Fleet Management'. Tijdens het operationele gebruik van de F-16 neemt de kwaliteit van het 'airframe' af als gevolg van veroudering, ervaren belastingen, en omgevingsinvloeden (corrosie, vochtigheid, temperatuur, enz.). Als gevolg daarvan moet onderhoud uitgevoerd worden om het vliegtuig operationeel inzetbaar te houden. Dit onderhoud bestaat uit inspecties, reparaties of vervanging. Een van de belangrijkste taken van de

fabrikant is het definiëren wanneer, hoe en waar geïnspecteerd dient te worden. Dit staat beschreven in het *Fleet Structural Maintenance Plan* (FSMP). Het FSMP vormt dan ook de basis voor het onderhoud dat de KLU aan het 'airframe' van de F-16 uitvoert.

Voornaamste taak van de KLU binnen het 'Fleet Management'-deel is het aanleveren van gebruiksgegevens en onderhoudsgegevens uit de praktijk (ervaringsgegevens).

### Onderhoudsgegevens

Onderhoudsgegevens zijn van belang omdat in de praktijk blijkt dat er tijdens het gebruik scheuren voorkomen op locaties waar deze niet verwacht worden. Door hierover gegevens te verstrekken aan de fabrikant kan deze de kwaliteit en nauwkeurigheid van het ASIP verbeteren. Dit is ook voor de KLU van belang, omdat de oplossing die aangedragen wordt door de fabrikant op (geactualiseerde) ASIP-analyse gebaseerd is. Verder zijn deze gegevens voor de KLU rechtstreeks van belang om de inhoud van toekomstige modificatieprogramma's te kunnen bepalen.



Gevonden scheurtjes in F-16-constructiedelen



F-16 tijdens operationele missie

### Gebruiksgegevens

Er zijn twee soorten gebruiksgegevens die de KLU aanlevert. Ten eerste zijn er de *Loads Environment Spectra Survey (LESS)* gegevens. Dit is een uitgebreide gegevensset die de fabrikant gebruikt om nieuwe analyses uit te voeren. Op basis hiervan wordt het 'Fleet Structural Maintenance Plan' aangepast aan het KLU-gebruik.

De inspectie-intervallen zoals die in het FSMP zijn opgenomen, zijn dus gebaseerd op een bepaald gebruik. Als het daadwerkelijke gebruik hiervan afwijkt, heeft dit consequenties voor het uit te voeren onderhoud en de verwachte levensduur. Het is dus belangrijk om het werkelijke gebruik tijdens operaties zo goed mogelijk te

bepalen, zodat gevolgen voor het onderhoud inzichtelijk zijn.

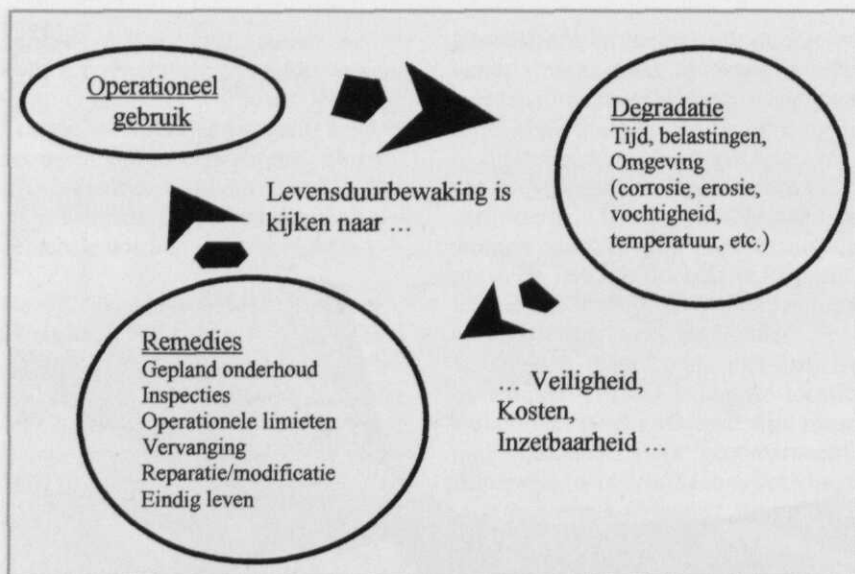
Daarom worden er (ten tweede) dagelijks zogenaamde routinemetingen uitgevoerd. Deze worden gebruikt om *Individual Aircraft Tracking (IAT)* uit te voeren. De KLU maakt hierbij gebruik van een indicator voor de vermoeiingsschade, de zogenaamde *Crack Severity Index (CSI)* die het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) heeft ontwikkeld. De CSI-waarde is een relatief getal en geeft de verhouding in schade tussen het werkelijk gebruik en een referentiegebruik. Als referentie wordt tot op heden een verzameling vluchten genomen die de KLU in 1985 heeft gemeten. Deze vluchtgegevens zijn in die tijd ook aan de fabrikant verstrekt en vormen de basis voor het huidige

'Fleet Structural Maintenance Plan' van de KLU.

Indien een vlucht een CSI-waarde van één heeft betekent dat dat de potentiële scheurgroei, in de vleugelwortel en rompmiddensectie, in deze vlucht gelijk is aan de gemiddelde potentiële scheurgroei van de vluchten die in 1985 uitgevoerd zijn (referentie). Een CSI-waarde van twee houdt in dat de potentiële scheurgroei, in vleugelwortel en rompmiddensectie, in deze vlucht tweemaal zo groot is als de gemiddelde potentiële scheurgroei van de referentie ('tweemaal zo zwaar').

De CSI-waarde verschaft dus informatie omtrent de zwaarte van missies van individuele vliegtuigen, per squadron, vliegbasis en voor de gehele





### Levensduurcyclus

vloot ten opzichte van het veronderstelde referentiegebruik in het 'Fleet Structural Maintenance Plan'.

De CSI-waarde en daaraan gekoppelde schade-uren zijn een belangrijk hulpmiddel bij het bewaken van de constructieve staat waarin het 'airframe' zich bevindt. Een schade-uur wordt bepaald door de berekende CSI-waarde van een vlucht te vermenigvuldigen met de vluchtduur. De berekende CSI-overzichten verschaffen de KLU de informatie voor:

- *Evenwichtige consumptie van de levensduur binnen de vloot.* Door vliegtuigen met een hoge cumulatieve CSI in te zetten voor 'lichte' missies (missie die een lage CSI-waarde genereert).
- *'Individual Aircraft Tracking' met koppeling aan het geplande onderhoud.* Door het onderhoud niet op vliegreuren maar op schade-uren uit te voeren. Per vliegtuig worden de inspecties pas uitgevoerd als het aantal schade-uren bereikt is, in plaats van het aantal vliegreuren.
- *Uitfasering.* Vliegtuigen met de meeste schade-uren kunnen als eerste uitgefaseerd worden. Dit hoeft niet het vliegtuig te zijn met de meeste vliegreuren.
- *Modificatieprogramma's.* Door inzicht in de stand van de vloot kan een

schatting gegeven worden of er in de toekomst problemen te verwachten zijn in specifieke gebieden.

- *Inzicht in de zwaarte van een specifieke gebruik en/of taak* (out-of-area operaties).
- *Beïnvloeding* (configuratie en missie-inhoud). De zwaarte van een vlucht kan wijzigen door een andere minder belastende configuratie te vliegen en de inhoud van de missie aan te passen.

De CSI-overzichten worden door de KLU voor alle bovenvermelde punten, met uitzondering van de 'Individual Aircraft Tracking' koppeling aan het geplande onderhoud, gebruikt.

### Levensduurbewaking

Het aanleveren van de gebruikgegevens (L/ESS en IAT) gebeurt heden met behulp van een geavanceerd elektronisch systeem. In de eerste jaren van de F-16 gebeurde dat met behulp van een *Flight Loads Recorder* (FLR) en *Mechanical Strain Recorder* (MSR). De 'Mechanical Strain Recorder' registreerde door middel van een kras op een metalen film, de rek die proportioneel is met het vleugelwortel-buigmoment. De tijdsduur die nodig was voor verwer-

king van alle gegevens, de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van de 'Mechanical Strain Recorder' bleken echter te beperkt. Daarom besloot de KLU in 1989 de 'Mechanical Strain Recorder' te vervangen door een ander belastingregistratiesysteem. Dit werd, op advies van het NLR, de Spectrapot-1, waarbij op de MSR-locatie een volledige rekstrookbrug bevestigd werd. De rekstrookbrug meet een rek die representatief is voor het wortel-buigmoment van de vleugel. In de loop der tijd is door constructieve wijzigingen (modificatieprogramma's) en veranderd gebruik van de F-16 de behoefte ontstaan aan meer meetgegevens. Dit resulteerde, na onderzoek uitgevoerd door het NLR, in de introductie van het *Fatigue Analyzer Air Combat Evaluation System* (FACE)-systeem in alle F-16's.

Tijdens de vlucht worden met het FACE-systeem vooraf gedefinieerde signalen geregistreerd. Het *Logistic Debriefing Station* leest en werkt de gemeten gegevens uit en stuurt deze naar het NLR. Het NLR verwerkt de gegevens en vult ze aan met additionele administratieve gegevens die benodigd zijn, zoals missietype en store configuratie. Uiteindelijk worden alle gegevens verwerkt en opgeslagen in een database.

### Samenvatting en afronding

Sinds de introductie van de F-16 in de zeventiger jaren voert de Koninklijke Luchtmacht een levensduurbewakingsprogramma uit. Het programma gebruikt een elektronisch systeem, dat gedurende de jaren geëvolueerd is tot het zeer geavanceerde en flexibele 'Fatigue Analyzer Air Combat Evaluation System' (FACE)-systeem, geïnstalleerd in alle F-16's. Het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) verwerkt en analyseert alle meetgegevens die tijdens de vlucht met het FACE-systeem geregistreerd worden. Voor het 'airframe' heeft het NLR een schade-indicator, de zogenaamde 'Crack Severity Index' (CSI)



Tijdens de vlucht worden met het FACE-systeem vooraf gedefinieerde signalen geregistreerd

ontwikkeld. Het is een maat voor de relatieve potentiële vermoeiingsschade die het 'airframe' (deel) tijdens de vlucht ziet. De CSI wordt gebruikt om het aantal schade-uren te bepalen en afwijkingen ten opzichte van het 'Fleet Structural Maintenance Plan' inzichtelijk te maken.

Het levensduurbewakingsprogramma vormt een essentieel onderdeel van het F-16 'Fleet Management'-programma. Het 'Fleet Management'-programma is weer deel van het 'Aircraft Structural Integrity Program' (ASIP) dat door de fabrikant van de F-16 opgezet is. Algemeen doel van het ASIP is het voorkomen van falen van het 'airframe' in operationele vliegtuigen, het bedenken van methodes die de levensduur nauwkeurig bepalen en een manier verschaffen van ontwerpen en testen die vermoeiingsproblemen in toekomstige wapensystemen voorkomt. Deze alge-

mene doelen vormen de basis van ASIP. De onderhoudsfilosofie van de KLU sluit hierbij aan en streeft verder, als specifiek doel, naar het vinden van een optimum in missiegereedheid, operationele kosten en vliegveiligheid.

Tot slot nog een overzicht van activiteiten gepland voor de (nabije) toekomst.

- Begin 2003 wordt gestart met een meetcampagne, met behulp van het FACE-systeem, van circa zes maanden. In deze periode worden met 35 vliegtuigen actuele 'Loads Environment Spectra Survey' meetgegevens verzameld. Na analyse worden de gegevens gebruikt voor het updaten van het 'airframe' onderhoud zoals het 'Fleet Structural Maintenance Plan' dat voorschrijft.

- Het onderhoud aan het 'airframe' op basis van schade-uren in plaats van vlieguren kan worden uitgevoerd.

- Tot op heden is, door het ontbreken van een goede referentie, het CSI-concept beperkt tot die vliegtuigdelen in de vleugelwortel en rompmiddendeel. Een onderzoek loopt om de beschreven methode ook op andere gebieden van de F-16 toe te passen.

#### Literatuur

J.B. de Jonge - *Fatigue and Airworthiness Introductory remarks, Fatigue of aircraft materials*. Delftse universiteitspers, Delft, 1992.

H.A. Wood and R.M. Engle Jr - *USAF damage tolerant design handbook: Guidelines for the analysis and design of damage tolerant aircraft*, AFFL-TR-79-3021. Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1979.

F.C. te Winkel en D.J. Spiekhout - *RNLAF/F-16 Loads and Usage Monitoring Program*, NLR, Amsterdam, 2002.

J.B. de Jonge - *The Crack Severity Index of monitored load spectra*. NLR, Amsterdam, 1993.