
**Project: Schade-analyse en
schadepreventie, technieken voor
schade-onderzoek "in het veld"**

Eindrapport

Opdrachtgever : PMP
Postbus 541
Apeldoorn
-

Rapportnummer : SO 97-74

Auteur : Ing. J.E. Buter

Datum rapport : 18 februari, 1998

Aantal bladen : 10

Classificatie : n.v.t.

Distributie : Stuurgroep Fractografie "Technieken voor schade-onderzoek in het veld" 25x
Archief Stork FDO 1x

INHOUDSOPGAVE

1	SAMENVATTING	3
2	INLEIDING	4
	2.1 Deelnemers	4
	2.2 Algemeen	4
3	INHOUD VAN HET PROGRAMMA	7
	3.1 Beoordelen en consolideren van de toestand na schade	7
	3.2 Diagnose en beslissen over de te gebruiken methoden en middelen	7
	3.3 Evaluatie van onderzoekresultaten in het veld	8
	3.4 Bepalen wanneer en hoe het onderzoek in het laboratorium moet worden voortgezet	9
	3.5 Nagaan van de waarde van computerhulpmiddelen in het stellen van de diagnose	10
4	DOELSTELLING VAN HET PROJECT	11
5	UITVOERING EN RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK	12
	5.1 Beoordelen en consolideren van de toestand na schade	12
	5.2 Diagnose en beslissen over de te gebruiken methoden en middelen	13
	5.2.1 Vastleggen van schadebeelden	13
	5.2.2 Schade-atlas	13
	5.2.3 Prepareren van oppervlakken	14
	5.2.4 Draagbare hardheidsmeters	15
	5.2.5 Replicatetechnieken voor bewerkte en onbewerkte oppervlakken	16
	5.2.6 Herkennen van risico's	16
	5.2.7 Aanbevolen minimum inventaris velduitrusting	17
	5.2.8 Evaluatie van methoden voor rck- en spanningsmeting in het veld	18
	5.3 Evaluatie van de resultaten in het veld	20
	5.3.1 Overzichten en schadeklassen (onderzoekdoelstellingen)	20
	5.3.2 Besiistructuur	20
	5.3.3 Stoppen veldonderzoek en monstername	21
	5.3.4 Stappenplan	22
	5.3.5 Overzicht gereedschappen	23
	5.4 Nagaan van de waarde van computerhulpmiddelen in het stellen van de diagnose	24
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	32

1 SAMENVATTING

Schade-onderzoek in het veld vindt plaats onder aanzienlijk minder goed geconditioneerde omstandigheden dan in het laboratorium en de gebruikers van installaties weten doorgaans niet hoe, afhankelijk van het type schade, een schadebeeld moet worden geconsolideerd en gevolgschade kan worden beperkt. Voor de onderzoeker ontbraken richtlijnen voor een eenduidige en reproduceerbare uitvoering en de interpretatie van de resultaten. Nederland had hierin een achterstand. Met Duitsland als voorbeeld valt te zien dat grote verzekeringsmaatschappijen (Alianz Versicherungs AG) zelf bedreven moeten zijn in het adviseren over reparatie-opties en schadebeperkende maatregelen. De acceptatie van schade-onderzoek bij gebruikers van de installatie en hun betrokkenheid is daardoor groter, maar ook de verantwoordelijkheid van de schade-onderzoeker. Verificatie achteraf in het laboratorium moet dus mogelijk blijven. De relaties tussen veld- en laboratoriumonderzoek waren echter voor de 'normale' constructiematerialen, maar meer nog voor de moderne lichtmetalen, kunststoffen, keramiek en composieten, nog onduidelijk en het ontbrak aan inzicht en procedures voor het ondubbelzinnig uitnemen van monsters.

Met de resultaten van dit project is het schade-onderzoek in het veld en de hiervan af te leiden beslissingen beter te structureren. Het geldigheidsgebied en de betrouwbaarheid van veldtechnieken en uitrusting zijn nu goed af te bakenen voor zowel metallische als niet-metallische materialen. Door gebruik te maken van snelle en moderne, geautomatiseerde informatietechnieken kan, zoals uit de volgende hoofdstukken zal blijken, een belangrijk deel van het schade-onderzoek worden verplaatst naar het veld en kan schade door verkeerde of te late beslissingen worden voorkomen.

De sleutelwoorden hierin zijn *snel* en *betrouwbaar* door **voldoende** kwaliteit en in het veld. Dus ook geen hogere kwaliteit dan nodig, dit kost onevenredig veel tijd en geld. Met andere woorden:

Het moment waarop wordt beslist het onderzoek in het laboratorium voort te zetten kan worden uitgesteld als er snel informatie van voldoende kwaliteit in het veld beschikbaar is.

Het project laat zien wat nodig en haalbaar is bij veldonderzoek.

2 INLEIDING

2.1 Deelnemers

De navolgende bedrijven/instellingen hebben een bijdrage geleverd aan het project en waren in de stuurgroep vertegenwoordigd door:

Akzo Nobel Central Research BV, Arnhem	J. Ferreira Duarte
Bodycote Materials Testing BV, Spijkenisse	A.C. Rienslag
Bond voor Materialenkennis	H.M. Brüggemann
Contactgroep Fractografie, Apeldoorn	H.B. Zeedijk (projectleider)
DSM-MPS, Geleen	J.A.M. Godschalk
GASTEC NV, Apeldoorn	R.B. Zefrin
Gerechtelijk Laboratorium, Rijswijk	J.H.L.M. Lelieveld
Dr. Ettemeyer GmbH & Co., Neu-Ulm	A. Ettemeyer
KEMA Nederland, Arnhem	L.B. Dufour
Kemet Europe BV, Bergen op Zoom	W.J.A. Verhaaren
Ministerie van Defensie, DMKM, afd. Scheepsbouw, Den Haag	C. van Sevenhoven
PMP, Apeldoorn	J.H. Heerings (projectcoördinatie)
	G.H.G. Vaessen
Shell Research and Technology Centre, Amsterdam	K. Orzessek
Schielab BV, Breda	L.H. Brantsma
Stork FDO BV, Amsterdam	S. Baas (voorzitter)
	J.E. Buter (projectleider)
Stork FDO BV, Hengelo	W.H.M. Welman
Technische Universiteit Delft, Laboratorium voor Metaalkunde	A.B. Wachters
TNO Industrie, Apeldoorn	H. van Stiphout
	M. de Wacht

Daarnaast zijn wij dank verschuldigd aan de heren P. van der Wee van AIMS NDT B.V. te Bloemendaal en E.T.M. Derksen van E.D.-Data-Design Computertechniek B.V. te Hoogkarspel voor hun ondersteuning bij deelproject 5.

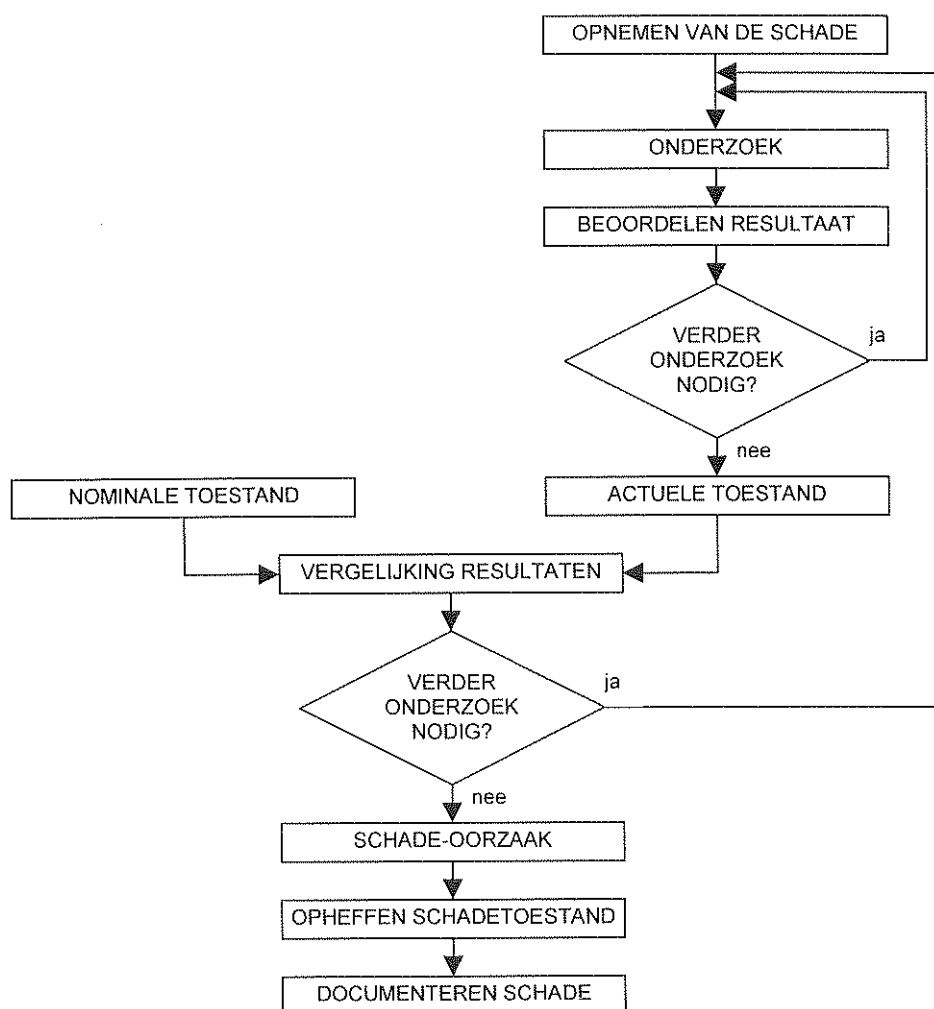
2.2 Algemeen

In Nederland is schade-onderzoeker een vrij beroep. In andere landen gelden soms strenge eisen. Volgens het VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik in Duitsland bijvoorbeeld moet een schade-onderzoeker over de volgende kennis en ervaring beschikken¹:

- Verschijningsvormen van schade.
 1. Schadebeelden
 2. Kenmerken
 3. Invloed van overbelasting op geometrie en oppervlak
 4. Scheuren
 5. Breukvlakken
- Schade door (thermo)mechanische belasting en/of corrosie
- Schade door hoge temperatuur aantasting
- Schade en zwakke plekken bij onderdelen uit technisch keramiek, kunststoffen of vezelversterkte materialen
- Methoden voor onderzoek naar microstructuur en morfologie
- Methoden voor prepareren van monsters uit verschillende materialen
- Breukmechanische onderzoek- en analysemethoden
- (Elektro)chemisch corrosie-onderzoek, spanningscorrosie, corrosievermoeding
- Onderzoek van schade door oxydatie en kruip
- Mechanisch gedrag van materialen
- Bewaking en kwaliteitscontrole
- Experimentele en rekenkundige spanningsanalyse

- PROSA (Programmierten Schadensanalyse)
 1. structuur van de diagnose
 2. classificatie van hypothetische oorzaken en hun symptomen
 3. mogelijkheid om de schade-oorzaak weg te nemen
 4. voorkomen van schade
 5. planning en traceerbaarheid

Deze lijst geeft slechts in hoofdlijnen weer van waar een schade-onderzoeker mee kan worden geconfronteerd. Duidelijk is dat de schade-onderzoek een duizendpoot moet zijn, waardoor het gevaar dat dingen over het hoofd worden gezien niet denkbeeldig is. Een schade-onderzoeker die zich in het veld niet op zijn gemak voelt zal de neiging hebben de plaats des onheils zo snel mogelijk te verlaten om in de beschermende omgeving van het laboratorium achter de microscoop te gaan zitten. Daarom is het belangrijk een schade-onderzoek goed gestructureerd uit te voeren. In Duitsland wordt dit herkend getuige de ruime aandacht in de opleiding voor het systeem PROSA, waarvan het schema wordt getoond in figuur 1.



Figuur 1: opbouw PROSA systeem

In Nederland is voor een zo gestructureerde aanpak pas recent aandacht ontstaan bij de contactgroep Fractografie van de Bond voor Materialenkennis. In een omvangrijk project is hun gezamenlijke ervaring vastgelegd in een serie rapporten die als basis dienden voor het goed onderbouwd uitvoeren van schade-onderzoek in het laboratorium². Dit project is bedoeld om deze ervaring ook in het veld te kunnen toepassen en onder de aandacht van anderen te brengen. Een schade-onderzoek uitvoeren in het veld brengt echter op een aantal punten restricties mee ten opzichte van werken in het laboratorium. Werken aan de hand procedures kan bijvoorbeeld het omgaan met onverwachte situaties zoals in het veld vaak nodig is, in hoge mate frustreren. De

procedures moeten de onderzoeker dus enerzijds voldoende vrijheid laten en mogen anderzijds uit het oogpunt van kwaliteitsborging de traceerbaarheid van beslissingen geen geweld aandoen. Hiervoor bestond nog geen oplossing, zodat het project vooral diende om eenduidige en betrouwbare procedures voor diagnose en uitvoering in het veld te ontwikkelen. Bovendien moet de relatief grote hoeveelheid informatie en referenties die ook in het laboratorium nodig zijn onder handbereik van de onderzoeker blijven. Omdat in het veld onder verschillende en vaak onbekende omstandigheden beslissingen moeten worden genomen is deze hoeveelheid eerder groter dan kleiner. In het project werd daarom gekeken naar de mogelijkheden van de informatie- en communicatietechnologie. Verder is te verwachten dat het werken onder moeilijker omstandigheden de kwaliteit van het onderzoek negatief beïnvloedt. Het is noodzakelijk dit eventueel verlies aan kwaliteit te kennen voordat beslissingen kunnen worden genomen. In het project werd dit bereikt door de gezamenlijke ervaringen van de Contactgroep Fractografie, aangevuld met ervaring uit het buitenland, te verzamelen en te rubriceren. Tenslotte geldt dat door de toenemende economische belangen bij grote (gevolg)schade de druk om de oorzaak van falen snel te achterhalen zo groot kan zijn dat voor het schade-onderzoek zelf nauwelijks tijd beschikbaar is. Het is dus belangrijk een zo groot mogelijk deel van het onderzoek direct op de schadelocatie uit te voeren. Het bepalen van het juiste moment verlangt een scherp inzicht in de volledigheid en de kwaliteit van het lokaal bereikte resultaat. Hiervoor zijn in het project beoordelingscriteria ontwikkeld.

Schade-onderzoek is doorgaans destructief. Uit het beschadigde object worden monsters genomen en naar het laboratorium vervoerd voor onderzoek. Omdat soms verdere beschadiging van het object ongewenst is, bijvoorbeeld omdat de installatie in bedrijf moet blijven, zijn er in het verleden niet-destructieve onderzoeksmethoden ontwikkeld voor gebruik op locatie. Lucht- en ruimtevaart hebben hierin een belangrijke stimulans gegeven, waardoor thans enkele methoden beschikbaar zijn, zoals het onderzoek van oppervlakken met replica's (hiermee wordt in kunststof een afdruk van het oppervlak gemaakt) die, ook door keurende instanties, inmiddels geaccepteerd zijn als voldoende onderzoeksmethode. Onderzoek op locatie gaat hierdoor sneller en bij een toenemende tijdsdruk lijkt het daarom logisch een zo groot mogelijk deel van het schade-onderzoek naar het veld te verplaatsen.

De techniek en de achtergronden van het schade-onderzoek op zich zijn goed bekend. Het project kon zich daardoor volledig concentreren op de typische veldaspecten. Het uitgangspunt voor dit project was daarom dat zowel gebruikers van installaties als schade-onderzoekers er behoefte aan hebben de reeds bestaande kennis ook onder de moeilijker omstandigheden in het veld met vertrouwen te kunnen gebruiken.

Tegen deze achtergrond is een onderzoekprogramma² uitgevoerd met de volgende deelprojecten:

1. Het beoordelen en consolideren van de toestand na schade.
2. Diagnose en beslissen over de te gebruiken methoden en middelen.
3. Evaluatie van onderzoeksresultaten in het veld.
4. Bepalen wanneer en hoe het onderzoek in het laboratorium moet worden voortgezet.
5. Nagaan van de waarde van computerhulpmiddelen in het stellen van de diagnose.

3 INHOUD VAN HET PROGRAMMA

3.1 Beoordelen en consolideren van de toestand na schade

Bij schades ontstaan vaak kwetsbare nieuwe oppervlakken in de vorm van scheuren, breuk- en slijtagevlakken die voor de beoordeling van de schade essentiële informatie bevatten. Hun toestand tijdens of direct na het ontstaan van de schade moet kunnen worden geconsolideerd door te beschermen tegen verdere degradatie. Hiervoor zijn vele middelen beschikbaar maar er is geen goed overzicht van hun specifieke voor- en nadelen, hun toepassingsgebied (materialen) en de manier waarop ze waarop ze het beste in het veld gebruikt kunnen worden. Sommige schoonmaakmiddelen zijn voor de ene groep materialen agressief en hebben bij andere materialen zelfs geen reinigingseffect. Beschermende coatings zijn voor het onderzoek niet op alle breukvlaktypen even gemakkelijk weer te verwijderen. Daar komt bij dat de gebruiker van de installatie zonder het te weten een breukvlak door verkeerd (be)handelen kan beschadigen omdat het inzicht over wat mag en niet mag ontbreekt. Tenslotte kan het consolideren van bijvoorbeeld corrosieschade onmogelijk blijken als de corrosieproducten zelf ook agressief zijn. Het is dan zaak dit te kunnen herkennen en ze tijdig, zonder verdere schade te verwijderen.

Deze en andere vragen, die een belangrijke rol spelen in de voorbereiding en uitvoering van een schade-onderzoek zijn in het project aan de orde gesteld met het volgende onderzoekprogramma.

- Identificeren van middelen voor het beschermen van breukvlakken
- Identificeren van middelen voor het reinigen van te onderzoeken oppervlakken
- Het verkrijgen van een overzicht van de belangrijkste eigenschappen en beperkingen
- Het vinden en zo nodig opstellen van procedures voor opslag, transport en gebruik.
- Het opstellen van instructies voor schadelijdende bedrijven en/of andere belanghebbenden (verzekering, rechtelijke macht, brandweer, expertise bureau, beredderingsbedrijf etc.) voor het behandelen van een schade-object.

Er is gebruik gemaakt van de gezamenlijke ervaringen van de projectgroep aangevuld door eigen onderzoek en gerichte navraag bij leveranciers.

3.2 Diagnose en beslissen over de te gebruiken methoden en middelen

Bij schade is het zaak het schadebeeld snel te kunnen herkennen en klasseren. Een goede referentie is alleen beschikbaar voor corrosieschades. Voor andere schadevormen is men aangewezen op case-studies van verschillende oorsprong. De manier waarop een schadebeeld wordt vastgelegd kan behoorlijk veel invloed hebben op de mogelijkheden om zaken later in de juiste context te evalueren.

Breukvlakken zijn soms te groot om naar het laboratorium over te brengen, of mogen niet worden verwijderd omdat de schade moet worden gerepareerd. De schade-onderzoeker is dan aangewezen op het maken een afdruk (replica) waarmee wordt getracht alle relevante details van het breukvlak over te nemen. Verschillende typen breukvlakken stellen in dit opzicht verschillende eisen, waarbij het niet altijd duidelijk is of een beschikbaar middel geschikt is voor het onderhavige breukvlak.

Schade-onderzoek in het veld vereist gereedschappen waarmee producteigenschappen als hardheid kunnen worden gemeten en onbekende materialen snel kunnen worden geïdentificeerd. Oppervlakken moeten efficiënt en zonder onnodig extra schade te veroorzaken voor onderzoek geschikt kunnen worden gemaakt. Daarnaast kan het nodig zijn in detail kennis te hebben van de spanningsopbouw en -verdeling.

In het project is aan deze zaken aandacht besteed door:

- Ontwikkelen van middelen en methoden voor het registreren, herkennen en klasseren van schadebeelden aan de hand van macroscopische breukkenmerken.
- Onderzoeken apparatuur voor het prepareren van oppervlakken en hardheidsmetingen.
- Onderzoeken van de mogelijkheden van replica's voor bewerkte en onbewerkte oppervlakken, waarmee samenhangend de invloed van de wijze van prepareren.
- Ontwikkelen van een methode voor het herkennen van risico's.

- Uitvoeren van een vergelijkend onderzoek met 3 methoden voor het meten van inwendige (rest)spanningen in het veld en voor verificatie van eindige elementen modellen.

3.3 Evaluatie van onderzoekresultaten in het veld

Wanneer een onderzoeker wordt geconfronteerd met een schade, dan zal na een eerste algemene beoordeling en het bespreken van de situatie en achtergronden met belanghebbenden moeten worden overgegaan tot actie. Bij het uitvoeren van een veldonderzoek moet ter plaatse worden beslist welke methoden en middelen in de gegeven situatie het best kunnen worden toegepast. In de deelprojecten 1 en 2 worden overzichten opgesteld voor het reinigen, conserveren en (voor)bewerken van oppervlakken c.q. breukvlakken en het herkennen van schadebeelden. De procedure van deelproject 2 voor registratie van de toestand na schade en het beoordelen van de veiligheid voorziet in het vastleggen van de begintoestand. Daarna moet worden vastgesteld of de beschikbare methoden en middelen voldoende waarde hebben voor het onderzoek. Dit betekent dus een weging op vooraf bekende criteria. Dit is in het laboratorium al lastig, voor veldonderzoek zijn er geheel geen criteria, anders dan de algemene verwachting dat de kwaliteit van veldonderzoek in vergelijking met laboratoriumonderzoek minder zal zijn. Dit leidt ertoe dat onderzoek relatief snel naar de laboratoriumomgeving wordt overgebracht. Dit kost extra tijd en er is een risico dat dingen ter plekke over het hoofd worden gezien, wat in een later stadium vaak niet kan worden hersteld. Met de deelprojecten 3 en 4 wordt getracht dit zo veel mogelijk te beperken.

Deelproject 3 beoogt voor de verschillende methoden en middelen criteria op te stellen waarmee in het veld kan worden nagegaan met welke diepgang en met welke haalbare kwaliteit onderzoek kan worden uitgevoerd. Het haalbare kwaliteitsniveau wordt afgezet tegen het vereiste kwaliteitsniveau. Op grond hiervan kan worden besloten over een bepaalde veldtechniek voldoet. Het vereiste kwaliteitsniveau is afhankelijk van wat men met (veld)onderzoek wil bereiken, met andere woorden er zijn verschillende soorten schade-onderzoek. In het project wordt daar op ingespeeld met de indeling van schade in klassen met een standaard onderzoekdoelstelling. De klassen stellen in toenemende mate eisen aan de diepgang en de betrouwbaarheid van het onderzoek.

Op een zeker moment zal bij de uitvoering blijken dat onderzoek in het veld niet meer mogelijk of zinvol is. Het tijdstip waarop dit wordt geconstateerd hangt sterk af van de onderzoekdoelstelling en de situatie ter plaatse. Dit kan bijvoorbeeld variëren tussen een directe beslissing dat veldonderzoek niet zinvol is, of een keuze voor volledige uitvoering van het schade-onderzoek in het veld. In veel gevallen zal dus het op een zeker moment nodig zijn dat monsters moeten worden genomen om het onderzoek in het laboratorium voort te zetten. Het moment waarop deze beslissing wordt genomen vormt het aandachtsgebied van deelproject 4.

Er is voor veldonderzoek nog nooit een directe afweging gemaakt van de betrouwbaarheid (uitgedrukt in termen van reproduceerbaarheid, toegankelijkheid, nauwkeurigheid, gebruiksgemak en kwaliteit) die werkelijk nodig is. Daarnaast is weinig bekend van wat er met de diverse onderzoekstechnieken in dit opzicht kan worden bereikt. In het project zijn daarom voor een groot aantal aspecten criteria vastgesteld.

Omdat criteria alleen van betekenis zijn wanneer zij op het juiste moment worden gehanteerd, wordt als afsluiting van deelproject 3 een Algemene Richtlijn opgesteld. Deze Algemene Richtlijn is een procedure waarmee die voorwaarden stelt om schade-onderzoek in het veld op verantwoorde wijze uit te voeren. De richtlijn structureert het aanleggen van de criteria. De Algemene Richtlijn wordt ontwikkeld op basis van de opgestelde overzichten, ervaringen binnen de Contactgroep Fractografie, ervaringen van buitenstaanders en literatuur, en wordt getoetst aan enkele praktijkgevallen. Door deze praktische evaluatie worden de grenzen verkend en op grond hiervan wordt de richtlijn bijgesteld. Opgemerkt dient te worden dat de Algemene Richtlijn betrekking heeft op de techniek en niet op de onderzoeker zelf.

Criteria voor het beoordelen van de benodigde en praktisch haalbare kwaliteit in het veld bij:

- registreren van schadebeeld en -omvang (checklist)
- verzamelen van historische informatie (checklist)
- beoordelen van schadebeelden (o.a. het opzetten van een referentie-atlas)
- reinigen
- voorbereiden (referentiebeelden, ruwheidmeting)

- uitvoeren van metingen (bijv. hardheids- of ferrietmetingen)
- uitvoeren van microscopisch onderzoek

Criteria voor het beoordelen van replica's voor:

- microstructuuronderzoek
- breukvlakonderzoek
- onderzoek van oppervlakteverschijnselen (bijv. slijtage-, corrosiebeelden)
- bewijsvoering (bijv. 'bewaren' visueel beeld, overzichtsafdruk)

Criteria voor het kiezen van locaties voor uittomen van monsters

Criteria voor het beoordelen van de betrouwbaarheid

- reproduceerbaarheid
- toegankelijkheid (beperkingen)
- nauwkeurigheid (bijv. oplossend vermogen)
- gebruiksgemak
- aanbevelingen voor het omgaan met betrouwbaarheid

Om deze criteria onder de gegeven condities in het veld op het juiste moment te kunnen gebruiken werd een richtlijn opgesteld:

Algemene Richtlijn voor uitvoering van schade-onderzoek in het veld

- schadeklassen
- kwaliteitseisen
- werkplannen

Met praktisch uitgevoerd schade-onderzoek werd de Algemene Richtlijn op bruikbaarheid getoetst in de loop van het project. De criteria werden grotendeels bepaald door vergelijkend experimenteel onderzoek. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten van deelproject 2.

3.4 Bepalen wanneer en hoe het onderzoek in het laboratorium moet worden voortgezet

Tijdens een schade-onderzoek wordt een groot aantal beslissingen genomen en moeten keuzes worden gedaan ten aanzien van uitvoering, verzamelen en verwerken van gegevens en presentatie van de resultaten. Omdat in het veld de omstandigheden en voorwaarden steeds anders zijn moet een schade-onderzoeker zijn beslissingen kunnen toetsen aan een structuur. Deze structuur mag echter nooit dwingend zijn, maar moet ruimte bieden voor de lokale omstandigheden en de kennis en ervaring van de onderzoeker respecteren. Als wordt beslist dat (verder) veldonderzoek geen positieve bijdrage levert aan de vereiste betrouwbaarheid, moeten monsters worden genomen met een betrouwbaarheid die voortzetting in het laboratorium op de juiste wijze kan garanderen.

Hiervoor gelden drie afwegingen:

- De kwaliteit van het onderzoek ter plekke voldoet niet, of kan verder niet meer voldoen aan de eisen voor betrouwbaarheid die onderzoeksklasse stelt,
- Om aan de doelstelling van de onderzoeksklasse te kunnen voldoen zijn onderzoeken nodig die ter plekke niet mogelijk zijn (bijvoorbeeld REM-onderzoek),
- Het te onderzoeken object is voor onderzoek in het veld niet toegankelijk vanwege de opstelling en/of bedrijfsvoering.

De eerste en de laatste afweging kan doorgaans van te voren worden gemaakt en in de aanpak, zoals die in een werkplan wordt vastgelegd, worden meegenomen. De tweede afweging kan ook achteraf een rol spelen, als bijvoorbeeld bij de evaluatie van de (eerste) resultaten blijkt dat de condities waaronder gewerkt moet worden ongunstiger waren dan werd verwacht.

Bovenstaande overwegingen hebben tot het volgende programma geleid:

- Ontwikkelen van een beslissingsstroom met weegcriteria om op basis van diagnose verdere stappen voor het veld- en laboratoriumonderzoek te definiëren.
- Opstellen van criteria voor het bemonsteren:
 - apparatuur, constructie en hanteerbaarheid
 - te verwachten resultaten (kwaliteit)

- het gebruik van NDO-technieken bij het uithalen van monsters
 - het beperken en eventueel repareren van schade ontstaan door uithalen van monsters.
- Het in tweede instantie toetsen (na bijstellen van de 'Algemene Richtlijn') door de uitvoering van schade-onderzoek in het veld.

Voorop werd gesteld dat de resultaten geschikt moeten zijn voor meerdere (groepen) materialen en betrouwbaar zijn te gebruiken. Daarom werd een deel van het onderzoek bij de toetsing ook in het laboratorium uitgevoerd. De 'Algemene Richtlijn' moet na toetsing definitief en algemeen toepasbaar zijn en vormt daarmee het eindproduct van dit project. De ultieme toets hierop was de implementatie als computerprogramma in deelproject 5.

3.5 Nagaan van de waarde van computerhulpmiddelen in het stellen van de diagnose

Vandaag de dag worden vele vormen van industriële bedrijvigheid ondersteund door computers. Bij laboratoriumonderzoek in het algemeen zijn inmiddels vele meetsystemen voorzien van computertechniek en worden rapporten aangemaakt met tekstverwerkers. Bij schade-onderzoek in het veld zouden computers met hun huidige grote opslagcapaciteit het gemis aan bibliotheken met referentiemateriaal kunnen compenseren. Daarnaast is bekend dat computers een enorme hulp kunnen zijn bij het stellen van diagnoses en het bewaken van procedures. Ter afsluiting was daarom een deskstudie voorgenomen naar:

- de mogelijkheden om schadebeelden en de resultaten van veldonderzoek in een computer op te slaan en te vergelijken met op CD-ROM geselecteerde referenties,
- de mogelijkheden van het op afstand zoeken in databanken met referentie-gegevens met de mogelijkheid het resultaat direct te vergelijken met lokaal gemaakte schadebeelden,
- de mogelijkheden voor 'on-line' discussie over lokaal opgenomen beelden,
- de voorwaarden om de Algemene Richtlijn onder computerbewaking uit te kunnen voeren,
- de stand van zaken bij het gebruik van neurale netwerken voor het stellen van diagnoses en het voorkomen van schade.

4 DOELSTELLING VAN HET PROJECT

De doelstelling is te komen tot een belangrijke beperking van de economische gevolgen van schade, door een betere en snellere onderbouwing van reparatiebeslissingen. Opbouw en verspreiding van kennis op het gebied van technieken voor schade-onderzoek voor gebruik in het veld, zowel voor conventionele constructiematerialen als voor moderne, zoals composieten, is daardoor een randvoorwaarde. Enerzijds moet dit uitmonden in praktijkaanbevelingen voor de gebruikers van installaties voor consolidatie van het schadebeeld en het beperken van gevolgschade, anderzijds in praktijkaanbevelingen en werkprocedures voor de uitvoering van het schade-onderzoek en het gebruik van apparatuur en het uitnemen van monsters. Als doelgroep geldt de Nederlandse industrie en in het bijzonder het MKB dat in brede zin kennis moet kunnen nemen van de resultaten door deze in te bedden in het netwerk van de Bond voor Materialenkennis.

5 UITVOERING EN RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK

In de volgende paragrafen wordt een samenvatting gegeven van de onderzoeksresultaten. Deze zijn in detail beschreven in een groot aantal rapporten die in bijlage 1 worden genoemd.

5.1 Beoordelen en consolideren van de toestand na schade

In dit deelproject (1) is een matrix opgesteld die informatie bevat over conserverings- en reinigingsmiddelen. De informatie die in de matrix is verwerkt heeft betrekking op verkrijgbaarheid, levering, het gebruik van de middelen en het effect van de middelen op diverse materialen. Aan de hand hiervan is er een korte lijst van middelen voor reinigen en beschermen opgesteld. Voor de in de lijst opgenomen middelen zijn procedures opgesteld die een beknopte gebruiksaanwijzing voor elk middel bevatten. Tenslotte is een aanbeveling gedaan welke middelen het best kunnen worden meegenomen in de gereedschapskoffer van de schade-onderzoeker.

Opgemerkt dient te worden dat het onderzoek geen volledigheid pretendeert. De selectie heeft plaatsgevonden op basis van bekendheid bij de projectdeelnemers.

Bovenstaand resultaat werd bereikt door eerst de diverse, veel gebruikte, constructiematerialen in te delen in diverse clusters. Materialen die een overeenkomend gedrag vertonen t.a.v. de chemicaliën die voorkomen in conserverings- en reinigingsmiddelen vormen een cluster. Gelet werd op:

- Effect van reinigings-/conserveringsmiddelen op verschillende materiaalgroepen
 - Ongelegeerd en laaggelegeerd staal;
 - Roestvaste stalen;
 - Nikkellegeringen;
 - Aluminium en aluminiumlegeringen;
 - Koper en koperlegeringen;
 - Thermoplasten;
 - Thermoharders;
 - Elastomeren.

De groep thermoplasten kreeg een van de rest wat afwijkende behandeling, waarvoor een extra verdieping werd aangebracht bestaande uit enkele veel voorkomende thermoplasten, te weten PE, PP, PVDF, PA 6.6, PEI, PVC, UHMWPE en PTFE.

- Eigenschappen van geselecteerde reinigings-/conserveringsmiddelen;
- Gebruiksaspecten van geselecteerde reinigings-/conserveringsmiddelen;
- Beperkingen van geselecteerde reinigings-/conserveringsmiddelen;
- Leveringsvoorwaarden en verkrijgbaarheid
- Compatibiliteit met het te onderzoeken materiaal
- Omgevingscondities
- Speciale eisen

De gegevens hiervoor werden verkregen via productspecificaties, informatie van leveranciers, laboratoriumproeven en literatuur.

Deze gestructureerde aanpak bleek goed te werken. Van de aanvankelijk verwachte aparte matrices voor de acht materiaalgroepen bleek uiteindelijk maar één algemeen geldende matrix nodig te zijn. Deze matrix werd door een ordening naar belangrijkheid van de aangelegde selectiecriteria gereduceerd tot een lijst van 10 conserveringsmiddelen en 13 reinigingsmiddelen, waarvoor 16 gebruikprocedures werden ontwikkeld. Reinigingsmiddelen die in combinatie met ultrasoon trillen worden toegepast nemen een speciale plaats in. Verkeerd gebruik kan tot onherstelbare aantasting van het schade-object leiden. Een en ander bleek afhankelijk van:

- de combinatie met het type reinigingsmiddel;
- de materiaalkwaliteit van het te reinigen object (kunststof, metaal);
- de duur van het trillen.

Een moderne methode voor mechanisch reinigen, waarbij een borsteltje met een hoge frequentie over het oppervlak wordt bewogen, bleek bijzonder effectief voor het reinigen van breukvlakken voor rasterelektronenmicroscopisch onderzoek.

5.2 Diagnose en beslissen over de te gebruiken methoden en middelen

Dit deelproject (2) heeft geresulteerd in: procedures voor:

- het vastleggen van schadebeelden in het veld.
- het opstellen en gebruiken van een atlas met schadebeelden
- het prepareren van oppervlakken van metalen in het veld, zowel mechanisch als elektrolytisch.
- het maken van replica's van zowel geprepareerde oppervlakken als breukvlakken.
- het controleren op risico's tijdens het veldwerk.
- overzicht van:
 - methoden voor het identificeren van polymeren in het veld aan de hand van tabellen met eigenschappen van de verschillende polymeren.
 - beschikbare draagbare hardheidsmeters.
- Aanbevolen inventaris voor middelen en apparatuur van een velduitrusting.

5.2.1 Vastleggen van schadebeelden

Door het unieke karakter van een schade-situatie kon geen algemeen geldende procedure worden opgesteld. Wel zijn randvoorwaarden en een lijst van aandachtspunten opgesteld met een advies voor welke gereedschappen onder bepaalde condities gebruikt kunnen worden. Een compleet schade-beeld omvat de volgende elementen:

- Welk verhaal moet worden verteld
 - Welke informatie is nodig en wat is hiervan beschikbaar
 - Samenhang tussen schade-object en omgeving
 - Plaats en verdeling van brokstukken
 - Gevolgen van schade en gevolgschade
 - Schade-kenmerken, vormen van beschadiging
- Heel belangrijk is dat de onderzoeker aangeeft in hoeverre naar zijn oordeel het schadebeeld compleet is en of ontbrekende delen nog later kunnen worden toegevoegd.

5.2.2 Schade-atlas

Voor het herkennen en klasseren van schade-beelden is een formaat opgezet waarin relevante informatie met enkele figuren een gecondenseerde casehistorie vormen (zie figuur 1). De toegevoegde waarde van de schade-atlas ligt vooral in de aanbevelingen die in de bladen worden opgenomen voor (vervolg)onderzoek in het veld of het laboratorium. Binnen het project zijn 30 voorbeeldbladen gemaakt. Eén ervan is opgenomen in bijlage 2.

De schadebeelden zijn ingedeeld volgens een eerder door de contactgroep Fractografie gemaakte opzet³. De eerste niveaus voor indeling worden getoond in figuur 2.

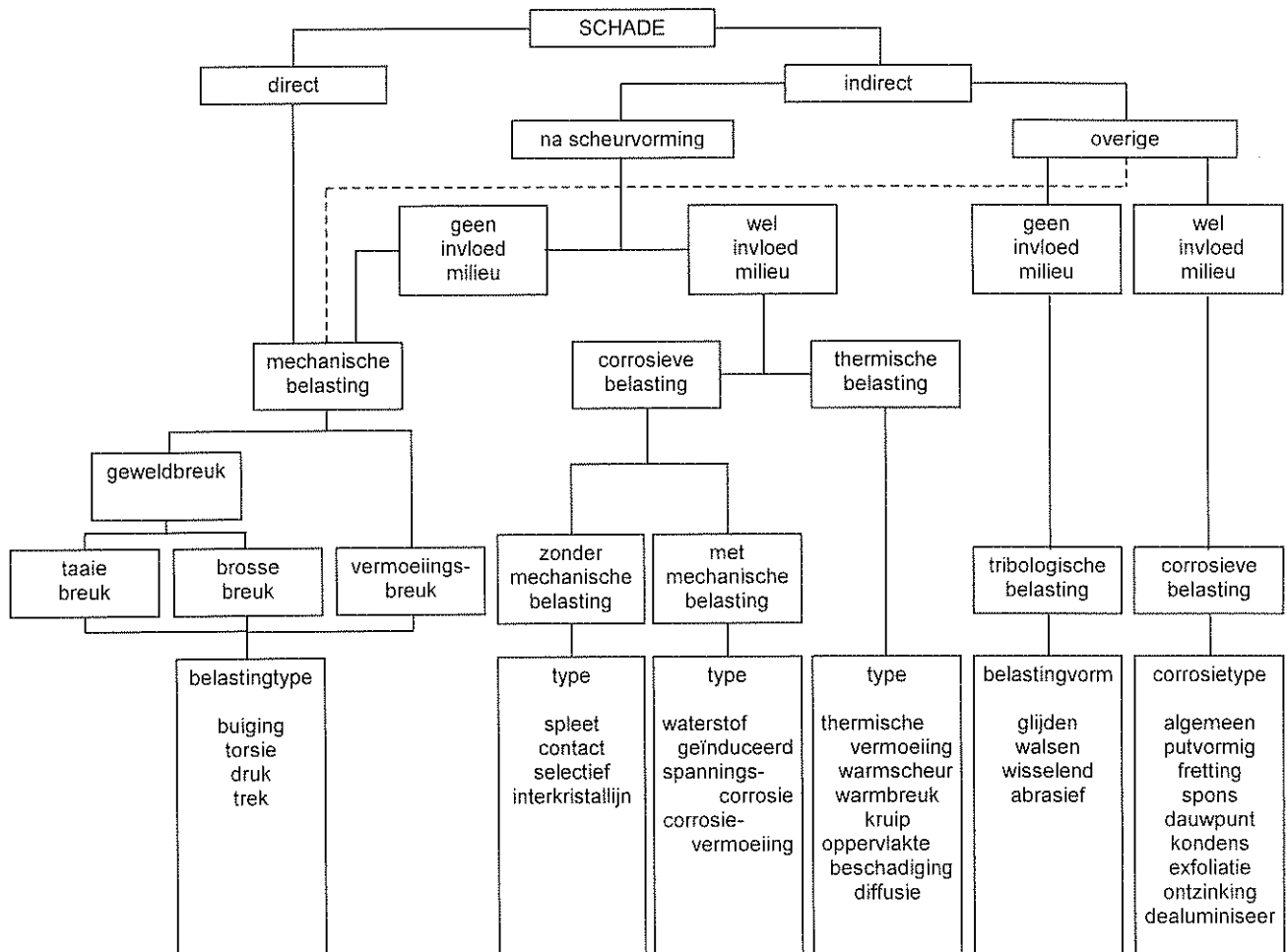
Schadebeeld:	X1-Y1
Materiaal	X2-Y2
Toepassingsgebied::	X3-Y3
Datum	Bladnummer

SCHADEBEELDEN

Figuur 1: Verg.:
Figuur 2: Vergr.:

Bedrijfscondities:
Materiaalgegevens:
soort:
microstructuur:
hardheid:
warmtebehandeling:
vervaardigingsmethode:
toegankelijkheid NDO:
BLADZIJDE 1
Schadeverloop:
Aanbevelingen onderzoek in het veld:
Aanbevelingen Onderzoek in het lab.:
Literatuur:
Conclusie:
BLADZIJDE 2

Figuur 1: Formaat schade-atlas



Figuur 2: Indeling schadebeelden

5.2.3 Prepareren van oppervlakken

Voor het prepareren van oppervlakken voor onderzoek zijn procedures ontwikkeld voor drie polijsttechnieken:

- Mechanisch
- Ultrasoon
- Elektrolytisch

De procedures zijn in het laboratorium ontwikkeld en in het veld getoetst. Met de nodige ervaring blijken met het *mechanisch* polijsten in het veld dezelfde resultaten te kunnen worden gebruikt als in het laboratorium. Er moet wel aan enkele voorwaarden worden voldaan:

- Er is modern hoogwaardig gereedschap nodig dat met hoge toerentallen werkt,
- Eenniaal gevonden instellingen voor de bewerkingsparameters moeten strak worden aangehouden
- Men moet ervaren zijn in het hanteren van het gereedschap.

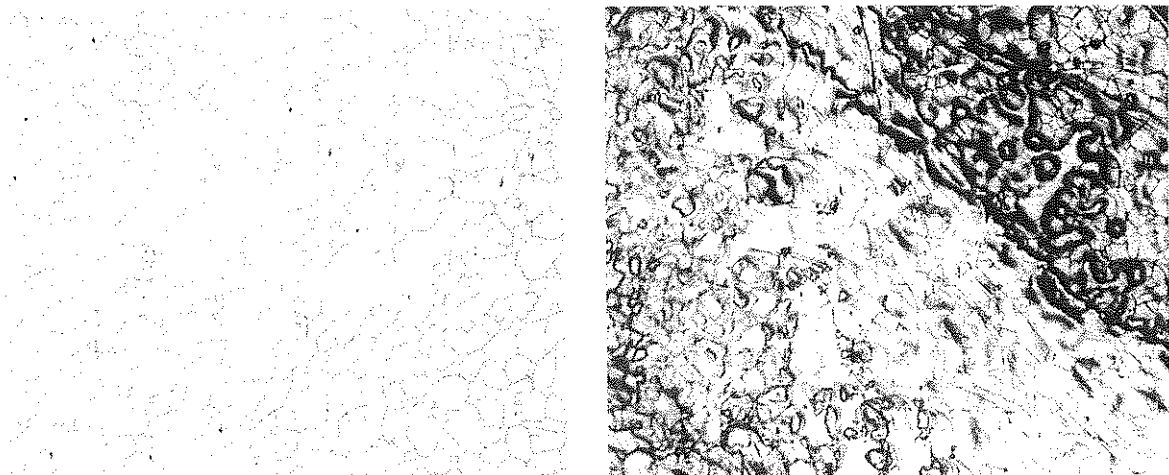
Het *ultrasoon* polijsten dat in de matrijzenbouw veel wordt toegepast heeft de potentie snel en nauwkeurig te zijn. De resultaten bleven echter duidelijk achter bij zowel het mechanisch als het elektrolytisch polijsten. Gebruik voor het maken van micropreparaten wordt daarom ontraden.

Het *elektrolytisch* polijsten werkt sneller en levert een goed resultaat. Het is noodzakelijk de procedure goed aan te houden. Deze techniek vraagt ook veel ervaring, vooral om het resultaat te kunnen beoordelen. De methode is gevoelig voor fouten en de kwaliteit van het elektrolyt moet goed in de gaten worden gehouden. Corrigerende maatregelen voor veel voorkomende fouten worden gegeven in tabel 1.

FOUT	AANBEVELING
Oppervlakte is gedeeltelijk gepolijst	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stroomdichtheid verhogen 2. vloeistofstroom verlagen (betere vorming van de viskeuze laag) 3. verversing van het elektrolyt
kleine vlekjes die niet zijn gepolijst als gevolg van gasbelletjes	<ol style="list-style-type: none"> 1. hogere vloeistofstroom 2. lagere spanning
Gepolijst oppervlak is geëet	<ol style="list-style-type: none"> 1. minder agressief polijstmiddel gebruiken of preparaat direct na polijsten verwijderen. 2. hogere spanning
Diverse fasen zijn in reliëf aanwezig	<ol style="list-style-type: none"> 1. verhogen van de spanning 2. polijst-tijd verlagen
Putvorming	<ol style="list-style-type: none"> 1. verlagen van de spanning 2. polijst-tijd verlagen 3. gebruik een ander elektrolyt
Aantasting aan de rand van het monster	<ol style="list-style-type: none"> 1. verlagen van de spanning 2. verhogen van de vloeistofstroom

Tabel 1: fouten bij elektrolytisch polijsten

Een voorbeeld van een goed en slecht gepolijst oppervlak wordt hieronder gegeven in figuur 3.



Figuur 3: Goed elektrolytisch gepolijst oppervlak (links), rechts slecht gepolijst (gasbellen en putvorming) door te hoge spanning

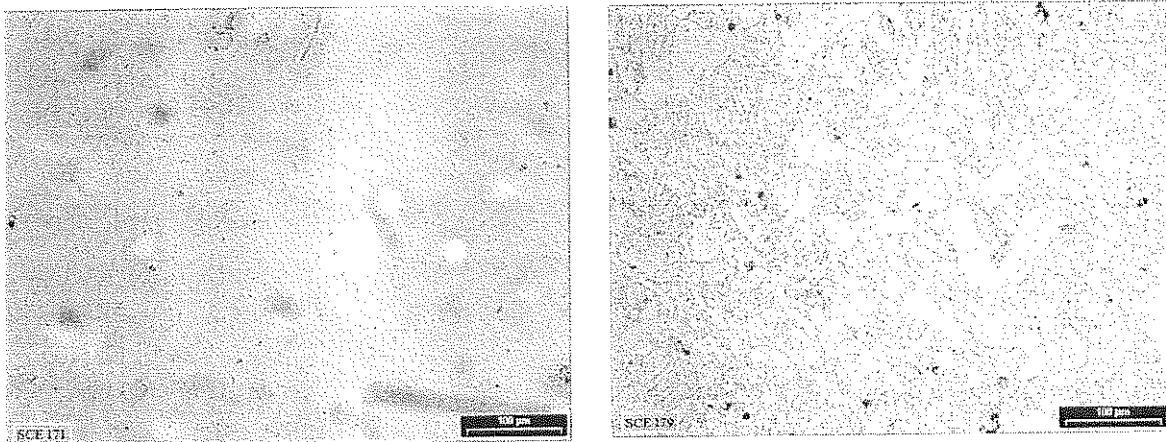
Een vergelijking tussen *mechanisch* en *elektrolytisch* polijsten bij kruipschade liet zien dat beide methoden geschikt zijn. Bij elektrolytisch polijsten moet de onderzoeker wel voldoende vertrouwd zijn met zowel het typisch gedrag van het elektrolyt als het fenomeen kruip. Dit onderwerp krijgt speciaal de aandacht in het project: "Levensduurverlenging van hoogtemperatuur installaties".

5.2.4 Draagbare hardheidsmeters

De hardheid geeft informatie over de eigenschappen en de toestand waarin een materiaal verkeerd. Het is te verwachten dat draagbare hardheidsmeters ten opzichte van de zware laboratoriummachines beperkingen hebben. Het onderzoek heeft dit bevestigd, maar tevens duidelijk gemaakt dat wanneer met deze beperkingen rekening wordt gehouden de meeste meters resultaten geven die voldoende betrouwbaar zijn voor vier van de vijf schadeklassen. Meters die gebaseerd zijn op de methode van Leeb en meters die gebruik maken van de UCI techniek blijken zeer geschikt voor all-round veldtoepassing.

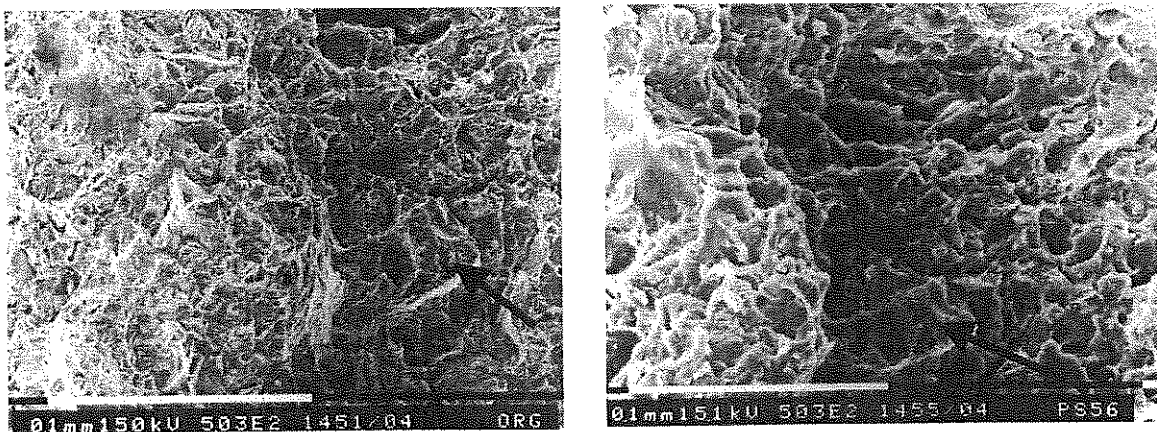
5.2.5 Replicatetechnieken voor bewerkte en onbewerkte oppervlakken

Structuurreplica's (bewerkte oppervlakken) geven afbeeldingen van het oppervlak met voldoende kwaliteit voor vier van de vijf schadeklassen. Dit geldt vooral voor folie replica's. Voor onderzoek in de rasterelektronenmicroscopie moet wel met goud worden opgedampt (zie figuur 4).



Figuur 4: foliereplica (links onbehandeld, rechts opgedampt met goud)

Met deze materialen zijn ook goede afdrucken te maken van niet te ruwe onbewerkte oppervlakken (breukvlakken, slijtage etc.). Met gietbare siliconenrubbers zijn, vooral in combinatie met een in een harde kunststof afgegoten positief daarvan, zeer goede replica's van zeer ruwe breukvlakken te maken zijn (zie figuur 5). In de elektronenmicroscopie zijn vergrotingen tot ca. 2000 x nog bruikbaar. Voor het maken van afdrucken van ruwe oppervlakken boven het hoofd zijn kneedbare siliconenrubbers meer geschikt. Voor kunststoffen geldt ten opzichte van metalen de restrictie dat de breukmerken niet te teer mogen zijn. Het oppervlak moet daarbij goed 'lossend' zijn anders trekt de replica details van het oppervlak mee.



Figuur 5: links origineel breukvlak, rechts positief afgietsel in kunstharis van siliconenrubber replica (vergroting beide foto's ca. 500x)

5.2.6 Herkennen van risico's

Veel bedrijven verlenen tegenwoordig pas toegang tot hun terreinen en installaties als men beschikt over een VCA certificaat en een werkvergunning. Deze zaken regelen uitstekend de verantwoordelijkheid van de bezoeker naar de gastheer toe. Het is echter niet vanzelfsprekend dat het omgekeerde ook goed is geregeld. Bovendien zijn er nog veel, vaak kleinere bedrijven, waar ten aanzien van veilig werken voor derden niets formeel is geregeld. Om een schade-onderzoeker in staat te stellen de situatie ter plekke vanuit zijn eigen perspectief te beoordelen is een veiligheids-checklist opgesteld. Mocht hiermee worden vastgesteld dat de lokaal onvoldoende is geregeld dan kan de onderzoeker zelf een overeenkomst voor veilig werken opstellen, waarvoor in het project een model ontwikkeld is (zie bijlage 3).

De bruikbaarheid van checklist en standaard veiligheidsovereenkomst zijn door praktisch gebruik geëvalueerd. De checklist bleek adequaat, maar voor het aanbieden van de overeenkomst bleek weinig draagvlak. Dit wordt geweten aan de onbekendheid bij de ontvangende bedrijven. Het belangrijkste is dat de onderzoeker nu de mogelijkheid heeft een goede beoordeling te maken van zijn situatie.

5.2.7 Aanbevolen minimum inventaris velduitrusting

Deze aanbeveling is gebaseerd op de resultaten van deelproject 1 (zie paragraaf 5.1) en deelproject 2 (zie paragraaf 5.2) en vormt daarmee, naast de opzet voor de schade-atlas, één van de eindproducten van dit deelproject. Het overzicht is niet volledig en dient naar eigen inzicht te worden aangevuld. Vooral voor het uitnemen van monsters bestaan veel meer goede mogelijkheden dan hieronder aangegeven.

Vastleggen schadebeeld op locatie

- (digitale) foto- en/of videocamera met macroinstelling
- tekengerei (logboek enz)
- millimeterpapier
- meetlat (ook voor op foto's)
- hulpmiddelen om eventueel onduidelijke kenmerken te markeren
- (rechte) rei (om b.v. verbuigingen vast te stellen)
- tandartshaken
- inspectiespiegel(s) met buigbaar handvat

Beslissen over te ondernemen vervolgonderzoek, ter plaatse of in het laboratorium

- loep (min. 10x vergroting)
- zakmicroscop (30-60x vergroting)
- opgestelde schadeatlas
- Algemene Richtlijn (zie verderop in paragraaf 5.3.2)

Prepareren van oppervlakken voor onderzoek

- haakse slijptol eventueel met lamellenschuurschijven
- mechanische (min. 15.000 tpm) of elektrolytische polijstapparatuur met toebehoren. De keuze hangt daarbij af van het beoogde doel.
- watervast SiC handschuurpapier in verschillende grofheden
- lichtmicroscop voor het beoordelen van het polijstresultaat
- föhn of perslucht (voor droog/schoon blazen van een geprepareerd oppervlak)
- beschermingsmiddelen:
 - latex handschoenen
 - stevige werkhandschoenen
 - bril
 - veiligheidshelm en veiligheidsschoenen
 - gehoorbescherming

Hardheidsmeters

- hardheidsmeter die werkt volgens de methode van Leeb of met de UCI-techniek

Replicamaterialen

structuurreplica's:

- folie

breukvlak- en slijtageoppervlakken

- gietbare epoxyhars voor replica's
- gietbare siliconenrubber
- kneedbare siliconenrubber voor replica's boven het hoofd

Reinigingsmiddelen

ontvetten

- NPU
- ethanol

Verwijderen van corrosieproducten

- roestverwijderaar
- hoge temperatuur oxydeverwijderaar

Conserveringsmiddelen

- vaseline
- waterverdringende conserveerolie met lage viscositeit
- conserveerolie met hoge viscositeit
- middelen op basis van tectyl of molykote

Uitnemen van monsters

- haakse slijptol
- handzaag
- hamer
- beitel
- stevig mes
- scalpelmessjes, schraapstaal
- stevige, beschrijfbare monsterzakken, potjes etc.
- trechter

Risico's

- de veiligheids-checklist en –overeenkomst (zie bijlage 3)

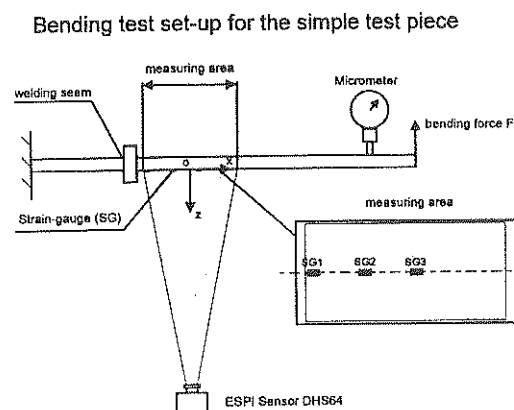
Vanzelfsprekend horen ook alle hierop betrekking hebbende procedures te worden meegenomen.

5.2.8 Evaluatie van methoden voor rek- en spanningsmeting in het veld

Drie technieken zijn vergeleken met resultaten van eindige elementen berekeningen (FEM):

- Speckle interferometrie (ESPI)
- Röntgenspanningsmetingen (XR) en Barkenhausen-noise metingen (BN)
- Rekstrookmetingen

De metingen werden uitgevoerd aan twee objecten. Een eenvoudig proefstuk bestaande uit een strip materiaal met aan weerszijde een opgelaste dwarsrib (zie figuur 6) en een complex proefstuk, bestaande uit een T-pijpverbinding voor hoge temperatuur met opgelaste verstijvingsribben (zie figuur 7). Het eenvoudige proefstuk werd op trek belast en op buiging. Dit proefstuk werd ook gebruikt om de meetmethoden te kalibreren. Het complexe proefstuk werd belast op inwendige druk.



Figuur 6: Eenvoudig proefstuk voor rek- en spanningsonderzoek⁴

De ESPI methode geeft betrouwbare resultaten bij relatief kleine rekniveau's. Bij de gebruikte stand van de ontwikkeling moet wel rekening worden met een offset. Dit is inmiddels oplost door miniaturisering van de sensor. De methode is geschikt voor gebruik in het velden heeft laten zien zeer geschikt te zijn voor verificatie van FEM modellen. Het FEM model van het T-stuk wordt getoond in figuur 8.