

Verslag van een bezoek aan het Laboratoire de Mécanique et Technologie op 2 mei 1989

Citation for published version (APA):

Paas, M. H. J. W., & Schreurs, P. J. G. (1989). *Verslag van een bezoek aan het Laboratoire de Mécanique et Technologie op 2 mei 1989*. (DCT rapporten; Vol. 1989.020). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1989

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Verslag van een bezoek aan het

Laboratoire de Méchanique et Technologie

op 2 mei 1989

door Michel Paas en Piet Schreurs

WFW-rapport 89.020

Inhoud.

1. Organisatie en aard van het onderzoek.
2. Verloop van het bezoek.
3. Continuüm Damage Mechanics ; Jean Lemaitre.
4. Damage bij metaalomvormprocessen ; Luc Chevalier.
5. Damage in beton ; Christo Saouridis.
6. Damage in laminaten ; Olivier Allix.
7. Damage bij high cycle fatigue ; Michel Paas.
8. Discussie.
9. Conclusies.
10. Literatuur.

1. Organisatie en aard van het onderzoek.

Het Laboratoire de Méchanique et Technologie (LMT) is als instituut verbonden met de Université Paris VI (30000 studenten, grootste universiteit van Parijs) en de Ecole Normale (lerarenopleiding). Onderzoekers van het LMT geven les aan een of beide van bovengenoemde onderwijsinstellingen, terwijl studenten op het LMT les krijgen en er afstudeer- of promotiewerk verrichten.

Hoofd van het LMT is Didier Marquis. Er zijn ca. 70 personen te werk gesteld. Het LMT is werkzaam op een aantal onderzoekterreinen :

- * Computer Aided Design
- * Artificial Intelligence
 - betrouwbaarheid van EEM-berekeningen,
 - aanpassing van elementverdeling ter minimalisering van de fout in de berekeningsresultaten.
- * Metaalvormprocessen
- * Civiele constructies (m.n. beton)
- * Composieten en laminaten

In de laatste drie gebieden speelt "damage analysis" een belangrijke rol.

De Continuüm Damage Mechanics is door Kachanov (1958) en Rabotnov (1968) geïntroduceerd. Lemaitre, Chaboche en Ladeveze hebben de theorie uitgewerkt, nieuwe concepten geïntroduceerd en toegepast op een scala van probleemgebieden. Dit onderzoek heeft voor een groot gedeelte plaatsgevonden aan het LMT, waar de drie laatstgenoemde personen werkzaam zijn (geweest). Het is dan ook niet verwonderlijk dat er op dit LMT een hele cultuur is ontstaan rond damage analysis. Een groot aantal personen (12) is op dit gebied actief, men is voor dit onderzoek goed geëquipeerd en de financiering is gewaarborgd. De financiering van het onderzoek dat op het LMT wordt uitgevoerd, komt voor 80% van derden (overheid en industrie). Dit is niet verwonderlijk gezien het feit dat Frankrijk een belangrijke vliegtuig-, ruimtevaart-, kernenergie-, defensie- en automobielenindustrie bezit.

Hoewel de behuizing van het LMT niet riant genoemd kan worden,

staat er een grote hoeveelheid beproevingsapparatuur opgesteld. Tevens beschikt men over veel computerfaciliteiten (APOLLO's, ALLIANT), die zowel voor data-acquisitie en -verwerking als voor numerieke simulatie gebruikt wordt. De gebruikte software is grotendeels zelf ontwikkeld. Het pakket ABAQUS wordt gebruikt voor oplossen van "standaardproblemen" maar ook om er eigen ontwikkelingen in te implementeren.

2. Verloop van het bezoek.

- 9.30 Ontvangst door Pierre Ladeveze en Olivier Allix.
Wij maken duidelijk wie we zijn, waar we vandaan komen (TUE, W, WFW) en in welk kader het onderzoek "damage analysis" plaatsvindt (korte uiteenzetting van het project hartklepprothese).
- 10.00 Korte rondleiding door laboratoriumruimten met experimentele opstellingen en computerapparatuur.
- 10.30 Inleiding van Jean Lemaitre over Continuüm Damage Mechanics.
Aansluitend een uiteenzetting van Michel Paas over de door hem gevolgde werkwijze, waarna discussie.
- 11.30 Voordracht van Luc Chevalier over ontstaan en groei van schade bij omvormen van metalen, c.q. het draadtrekproces.
- 12.30 Lunch.
- 14.00 Voordracht van Christo Saouridis over "damage analysis" van betonconstructies.
- 15.00 Voordracht van Olivier Allix over "damage analysis" van laminaten.
- 16.00 Voordracht van Michel Paas over de door hem gevolgde werkwijze m.n. de opvatting dat de intrinsieke schade een stochastische variabele is waarvan de kansverdelingsfunctie bepaald kan worden.
- 17.00 Discussie met Pierre Ladeveze en Olivier Allix.
- 18.30 Einde bezoek.

3. Continuüm Damage Mechanics ; Jean Lemaitre.

Jean Lemaitre is het voormalige hoofd van het LMT. Hij is hoogleraar aan de Université Paris VI en geeft ook les aan de Ecole Normale. Hij heeft veel gepubliceerd over CDM en heeft een aantal nieuwe concepten geïntroduceerd. Zijn onderzoekinspanningen zijn vooral gericht op metalen. Hij heeft getracht om een unificatie van verschillende vormen van schade bewerkstelligen. Zijn inleiding over CDM wordt hieronder kort samengevat. Een en ander staat uitvoerig beschreven in [1,2].

Om het microscopisch mechanisme van een bepaald fenomeen op macroscopische schaal te beschrijven, worden een aantal interne variabelen geïntroduceerd. Samen met macroscopisch waarneembare variabelen vormen ze de toestandsgrootheden. Met elk van deze toestandsgrootheden is een afhankelijke variabele geassocieerd.

De toestandsgrootheden en bijbehorende geassocieerde variabelen, die beschouwd worden, zijn :

<i>observable</i>	<i>internal</i>	<i>associated</i>
<i>state var.</i>	<i>state var.</i>	<i>variable</i>
ε rektensor		σ Cauchy sp.tensor
T temperatuur		s entropie
	ε^p plast. rektensor	$-\sigma$
	r straal vloeioopp.	R
	α transl. vloeioopp.	X
	D damage	Y
	a veroudering	Z

De thermodynamica van irreversibele processen stelt dat er een thermodynamische potentiaal Ψ bestaat, een scalaire functie van alle toestandsgrootheden :

$$\Psi = \Psi(\varepsilon, T, \varepsilon^p, r, \alpha, D, a)$$

Voor de geassocieerde variabelen R, X, Y en Z geldt :

$$R = \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \quad X = \frac{\partial \Psi}{\partial \alpha}, \quad Y = \frac{\partial \Psi}{\partial D}, \quad Z = \frac{\partial \Psi}{\partial a},$$

ofwel met de set interne variabelen $\underline{q}^T = \{r, \alpha, D, a\}$ en de set geassocieerde variabelen $\underline{\Lambda}^T = \{R, X, Y, Z\}$:

$$\underline{\Lambda} = \frac{\partial \Psi}{\partial \underline{q}}.$$

Niet alle microscopische fenomenen zijn gekoppeld. Hierdoor zal de potentiaal geschreven kunnen worden als de som van een aantal termen. Volgens Lemaitre wijzen experimenten erop dat er geen invloed is van de totale rek, de plastische rek en thermo-elasticiteit op de overige variabelen en dat er bovendien geen invloed is van plasticiteit en veroudering op elasticiteit. Dit resulteert in onderstaande uitdrukking voor de thermodynamische potentiaal :

$$\Psi = \underbrace{\Psi_e(\varepsilon^e, T, D)}_{\text{elasticiteit schade}} + \underbrace{\Psi_p(r, \alpha, D, a, T)}_{\text{(visco-)plast. schade}} + \underbrace{\Psi_T(\varepsilon^e, T, D)}_{\text{thermische effecten}}$$

Analytische uitdrukkingen voor Ψ_e , Ψ_p en Ψ_T moeten worden opgesteld op grond van bekende theorieën en experimentele ervaringen. De door Lemaitre voorgestelde uitdrukkingen zijn beschreven in [1].

De tweede hoofdwet van de thermodynamica beschrijft in welke richting een bepaald proces verloopt. Alweer volgens de thermodynamica van irreversibele processen bestaat er een dissipatiepotentiaal, waarmee een uitdrukking voor de flux van de afzonderlijke toestandsvariabelen kan worden verkregen. De dissipatiepotentiaal is een functie van de geassocieerde variabelen met als parameters de toestandsgrootheden. De flux van deze toestandsgrootheden kan worden bepaald als partiële afgeleide van de dissipatiepotentiaal naar de bijbehorende geassocieerde variabelen. De aldus verkregen uitdrukkingen, die evolutiewetten worden genoemd, zijn zodanig dat altijd voldaan wordt aan de 2^e hoofdwet.

Behalve de reeds genoemde toestandsgrootheden met hun geassocieerde variabelen, wordt, als gevolg van het principe van equipresentie, $\frac{\vec{q}}{T}$ als toestandsgrootheid geïntroduceerd, waarbij \vec{q} de warmtestroomdichtheidsvector is. De bijbehorende geassocieerde variabele is de zgn. thermodynamische kracht $\vec{\nabla}T$.

Voor de dissipatiepotentiaal kunnen we nu schrijven :

$$\Phi = \Phi(\sigma, \underline{A}, \vec{\nabla}T; T, \varepsilon^e, g).$$

Beschouwingen over het al dan niet gekoppeld zijn van bepaalde fenomenen leiden er ook nu weer toe dat de dissipatiepotentiaal geschreven kan worden als som van een aantal termen :

$$\Phi = \underbrace{\Phi_p(\sigma, R, X; D, T)}_{(visco)plast.} + \underbrace{\Phi_D(Y; \dot{r}, D, T, a)}_{damage} + \underbrace{\Phi_a(Z; T, r, a)}_{veroudering} + \underbrace{\Phi_T(\nabla T; T, D)}_{warmtestroom}$$

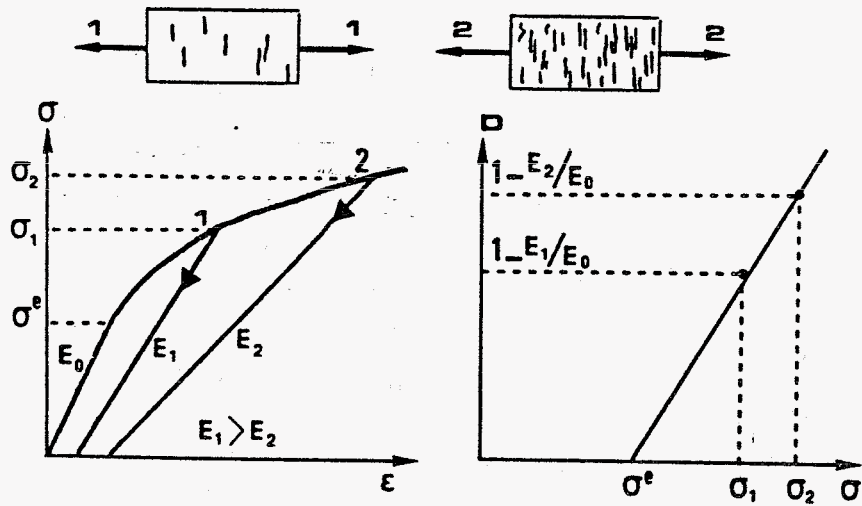
Analytische uitdrukkingen voor de afzonderlijke termen moeten op grond van bekende theorieën en experimentele resultaten worden geformuleerd. Lemaitre doet in [1] hiervoor een aantal suggesties en kiest tenslotte één potentiaal, waarmee hij in metalen verschillende schademechanismen kan beschrijven.

De isotrope damage wordt gekarakteriseerd m.b.v. een damage variabele D, die niet gekoppeld wordt aan een fysische grootheid. De grootheid wordt indirect gemeten, gebruikmakend van een van onderstaande definities (zie figuur) :

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad \text{of} \quad D = 1 - \frac{H}{H_0} ,$$

waarbij E, E₀ en H, H₀ de elasticiteitsmodulus en de hardheid van het materiaal zijn resp. momentaan en initieel (index 0).

Als de schade zeer gelokaliseerd is, doet zich het probleem voor dat D niet meer eenvoudig op bovenstaande manier gemeten kan worden. Het relateren van D aan een fysische grootheid is dan gewenst. Zeer gelocaliseerde schade komt voor bij high cycle fatigue, waar in het hartkleprothese project de aandacht naar uitgaat.



4. Damage bij metaalvormprocessen ; Luc Chevalier.

Tijdens plastische deformatie van metalen kan schade in het materiaal ontstaan. Initiatie van deze schade vindt plaats op de grens van verontreinigingen of aan korrelgrenzen. De ontstane holtes groeien vervolgens uit en samen tot microscheuren (ordegrootte μm). De schade is meestal niet gelokaliseerd. Tengevolge van deze verdeelde microscopische schade zal het elastisch gedrag van het materiaal veranderen. De schade wordt dan ook gekarakteriseerd met de variabele D , die gedefinieerd is als :

$$D = 1 - \frac{E(\bar{\epsilon}^P)}{E_0} ,$$

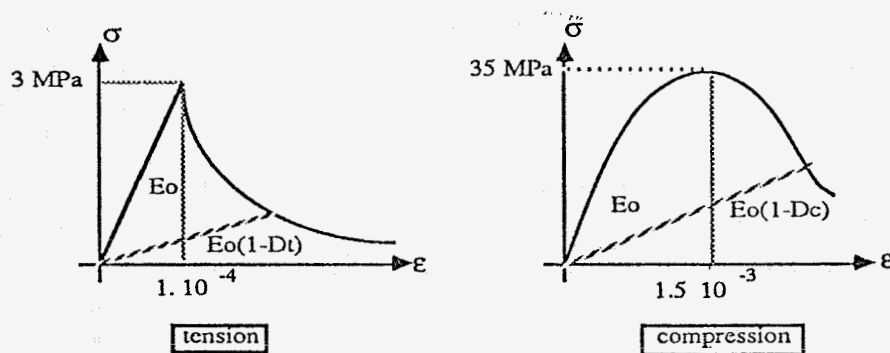
waarbij E_0 de initiële elasticiteitsmodulus is en $E(\bar{\epsilon}^P)$ de modulus bij een effectieve plastische rek $\bar{\epsilon}^P$. Het verloop $E - \bar{\epsilon}^P$ kan m.b.v. een intermitterende trekproef worden bepaald.

Analyse van de schadeontwikkeling bij het draadtrekproces, biedt de mogelijkheid om de parameters van dit proces zodanig te optimaliseren dat de schade minimaal is.

Als de micro-defecten te ver doorgroeien, ontstaan op een of meer plaatsen in het materiaal macro-scheuren. Uiteraard moet in de praktijk vermeden worden dat dit gebeurt.

5. Damage in beton ; Christo Saouridis.

Bij de numerieke analyse van het ontstaan en de uitgroei van schade in beton m.b.v. CDM moet rekening worden gehouden met de sterk verschillende materiaaleigenschappen bij trek- en drukbelasting en met het strain-softening gedrag van beton.



Uniaxial behaviour in tension and compression

De karakterisering van de schade gebeurt m.b.v. een schade variabele D , die een functie is van de equivalente (3D) rek $\bar{\epsilon}$: $D = D(\bar{\epsilon})$. Het verband tussen D en $\bar{\epsilon}$ moet experimenteel worden bepaald. Hierbij wordt geconstateerd dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de afmetingen van het proefstuk, waarmee de experimenten worden uitgevoerd. Dit hangt samen met het feit dat de kans op grote imperfecties in een groot proefstuk groter is. Voor bros breukgedrag kunnen dergelijke mechanismen m.b.v. Weibull-statistiek beschreven worden.

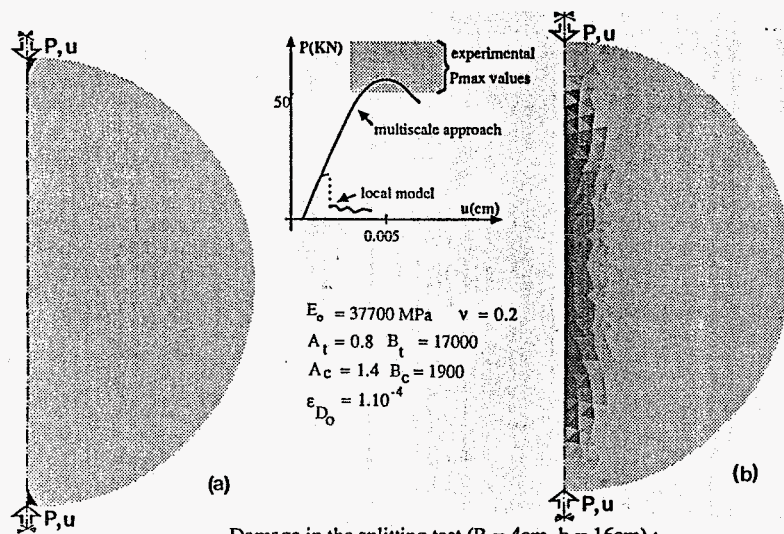
Bij een bepaald verband tussen D en $\bar{\epsilon}$ blijken de numerieke resultaten van de damage analyse sterk afhankelijk van de gebruikte elementverdeling.

Bovenstaande problemen kunnen worden voorkomen als D niet opgevat wordt als functie van $\bar{\epsilon}$ maar als functie van $\tilde{\bar{\epsilon}}$, waarbij $\tilde{\bar{\epsilon}}$ het gemiddelde is van $\bar{\epsilon}$ in een zogenaamd Representatief Volume Element (RVE), het zgn. meso-domein. De grootte van het RVE is niet à priori bekend, maar moet experimenteel/numeriek worden bepaald, waarna deze grootte opgevat kan worden als een materiaalparameter. Deze toepassing van CDM wordt "multi-scale approach" van CDM genoemd, in tegenstelling tot de "local

approach", die bij homogene materialen gevolgd wordt, waarbij de afmetingen van het RVE infinitesimaal klein zijn.

De "multi-scale approach" is toegepast voor de numerieke damage analyse van de "splitting test" (zie figuur) en de buigproef van een gekerfde balk. De numerieke resultaten kwamen goed overeen met experimentele waarnemingen, terwijl ze onafhankelijk waren van de grootte van het proefstuk en de gebruikte elementverdeling.

In literatuur [4] wordt een en ander uitvoerig beschreven.



Damage in the splitting test ($R = 4\text{cm}$, $b = 16\text{cm}$):
 (a) original local approach (b) multiscale approach (nonlocal formulation).

6. Damage in laminaten ; Olivier Allix.

In een laminaat kunnen verschillende vormen van schade voorkomen. In de afzonderlijke layers kan "transverse matrix cracking" en "fibre rupture" optreden. Bovendien kan delaminatie plaatsvinden, waarbij het verband tussen twee aangrenzende layers verbroken wordt. Deze laatste vorm van schade kan worden opgevat als de uiteindelijke vorm van schade in een interface-zone, die geïdentificeerd wordt als een isotrope layer zonder dikte, waarvan de eigenschappen afhangen van de structuur - oriëntatie van de vezels - in de aangrenzende layers. De interface-schade is anisotroop en treedt op in de nabijheid van de laminaatrand vanwege de daar optredende 3D-spanningstoestand.

Essentieel bij de damage analyse is de introductie van 2 scalaire elasticiteitsparameters in een bepaalde richting, aangegeven door de eenheidsvector \vec{n} :

$$E(\vec{n}) = \frac{\Delta\sigma(\vec{n})}{\Delta\varepsilon_L(\vec{n})} \quad ; \quad \gamma(\vec{n}) = \frac{\Delta\sigma(\vec{n})}{\Delta\varepsilon_L(\vec{n}) + \Delta\varepsilon_T(\vec{n}) + \Delta\varepsilon_{T'}(\vec{n})}$$

Hierbij staan de indices voor longitudinaal (L) en transversaal (T en T').

Met deze twee elasticiteitsparameters zijn twee scalaire schadeparameters geassocieerd nl. :

$$d(\vec{n}) = 1 - \frac{E(\vec{n})}{E_0(\vec{n})} \quad \text{en} \quad \delta(\vec{n}) = 1 - \frac{\gamma(\vec{n})}{\gamma_0(\vec{n})} ,$$

waarbij de index (0) de initiële waarde aanduidt.

Deze beide schadeparameters worden gebruikt in de numerieke analyse van het ontstaan en de groei van schade m.b.v. CDM. Een en ander staat uitvoerig beschreven in [7].

7. Damage bij high cycle fatigue ; Michel Paas.

In het kader van het hartklepprotheseproject gaat de aandacht uit naar vermoeiing onder invloed van snel en langdurig wisselende belasting, zgn. high cycle fatigue. Bij deze vorm van vermoeiing treedt schade op die sterk gelokaliseerd is. Bovendien is de groei van de schade sterk afhankelijk van de schade in het basismateriaal de zgn. intrinsieke schade. Deze intrinsieke schade, gekwantificeerd m.b.v. de damage variabele D_0 , is een stochastische grootte.

Een methode om de kansverdelingsfunctie van D_0 te bepalen uit experimenten is uitgewerkt en aan onafhankelijke experimenten (uit de literatuur) getoetst. Voor deze bepaling is het noodzakelijk om D te relateren aan een fysische grootte : $D = \frac{c^2}{\delta S}$, waarbij c een effectieve scheurlengte is en δS het volume van een Representatief Volume Element.

Ten gevolge van de snelle aangroei van D tot een kritische waarde D_c , als een bepaald aantal belastingwisselingen doorlopen is, is het geoorloofd om de schade in en de elasticiteit van het materiaal te ontkoppelen. Dit leidt tot een essentiële beperking van rekentijd en levert nagenoeg dezelfde resultaten als een volledig gekoppelde analyse.

De elastische deformatie in het materiaal zijn groot, zodat een lineair verband tussen σ en ε het materiaalgedrag niet goed zal kunnen beschrijven.

Bovenstaande aspecten wijken alle af van de diverse damage analyses die op het LMT worden uitgevoerd. Een en ander staat uitvoerig beschreven in [8].

8. Discussie.

Aan het eind van de middag werd een en ander besproken door Pierre Ladeveze, Olivier Allix, Michel Paas en Piet Schreurs.

Van de kant van Pierre Ladeveze werden de volgende vragen naar voren gebracht m.b.t. het onderzoek van Michel Paas :

1. CDM is gebaseerd op de veronderstelling dat schade niet gelocaliseerd is maar continu verdeeld. In de werkwijze ter bepaling van de kansverdelingsfunctie van D worden experimenten uitgevoerd waarbij de schade juist wel en met opzet sterk gelokaliseerd is. Hoe is dit met elkaar in overeenstemming te brengen?

Het antwoord luidt dat bovengenoemde werkwijze een handige manier is om m.b.v. stochastiek de intrinsieke schadeverdeling en de afmetingen van de cel (het RVE) te bepalen.

2. Zijn de verkregen resultaten reproduceerbaar, m.a.w. worden voor de parameters van de kansverdelingsfunctie van D dezelfde waarden gevonden als er experimenten worden uitgevoerd met proefstukjes van andere afmetingen?

Het antwoord luidt dat in het model rekening wordt gehouden met het feit dat een groter proefstuk een grotere kans op falen heeft. In het limietgeval mondt dit uit in een Weibull-verdeling, waarvan de parameters onafhankelijk van het volume zijn. Deze parameters dienen natuurlijk wel m.b.t. het referentievolume bepaald te worden.

3. Zijn de numerieke resultaten afhankelijk van de gebruikte elementverdeling?

Dit moeten we nader onderzoeken.

9. Conclusies.

Wat betreft de toepassing van CDM op het LMT valt het volgende op te merken :

1. De schadeparameter wordt niet gekoppeld aan een fysische grootheid. Dit is voor de toepassing op het LMT ook niet nodig, omdat de schade niet of nauwelijks gelokaliseerd is. Bij de damage analysis in beton, is de schade wel gelokaliseerd. Middeling van de schade-veroorzakende effectieve rek over een Representatief Volume Element is dan noodzakelijk.
2. Men beperkt zich tot quasi-statische belastingen.
3. Er wordt vanuit gegaan dat er initieel geen schade in het materiaal aanwezig is. Onder de beperking tot niet-wisselende belasting, is dit een geoorloofde veronderstelling.

Hoewel de toepassing in het hartklepprotheseproject bovenstaande veronderstellingen niet toelaat, zijn de in dit verslag genoemde onderzoekers van het LMT, door hun grote ervaring, zeer waardevolle discussiepartners. Men bleek bereid om op een enthousiaste manier het eigen onderzoek toe te lichten en vragen daarover te beantwoorden. Van hun kant was er een grote belangstelling voor het werk van Michel Paas, enerzijds omdat dit op een aantal punten het onderzoek van het LMT aanvult, anderzijds omdat problemen en rol spelen, die ook op het LMT aan de orde zijn. De vragen die dienaangaande werden opgeworpen, bleken zeer zinvol en bieden stof tot nadenken. Van beide kanten is de bereidheid uitgesproken om de contacten in de toekomst te hernieuwen.

10. Literatuur.

1. Lemaitre, Jean; Marquis, Didier
Modelling Elasto-Plasticity, Damage and Ageing as Coupled
Behaviours in Engineering Materials.
Applied Solid Mechanics - 2
Ed.: A.S. Tooth and J. Spence
Elsevier applied science
2. Lemaitre, Jean
Micro-mechanics of crack initiation
I.U.T.A.M. Symposium on Recent Advances in non-linear Fracture
Mechanics
Pasadena, California (U.S.A.), March 1988
3. Mazars, J.; Ramtani, S.; Berthaud, Y.
The unilateral behaviour of damaged concrete
Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock, 1988
4. Saouridis, Christo; Mazars, Jacky
A multiscale approach to distributed damage and its usefulness for
capturing structural size effect
France-USA Workshop on "Strain Localization and Size Effect Due to
Damage and Cracking", Cachan, France, September 1989
5. Ladeveze, P.
Sur une théorie de l'endommagement anisotrope
Rapport interne n^o 34, Laboratoire de Mécanique et Technologie
Mars 1983
6. Dumont, J.P.; Ladeveze, P.; Poss, M; Remond, Y.
Damage Mechanics for 3-D Composites
Composite Structures, 1987 (8), pp. 119-141
7. Allix, Olivier; Ladeveze, Pierre; Le Dantec, Eric; Vittecoq, Eric
Damage Mechanics for Composite Laminates under Complex Loading
I.U.T.A.M./I.M.C. Symposium Yielding, Damage and Failure of
Anisotropic Solids
Grenoble, 24-28 Août 1987
8. Paas, M.H.J.W.; Oomens, C.W.J.; Schreurs, P.J.G.; Janssen, J.D.
The mechanical behaviour of continuous media with stochastic damage
Submitted for publication, 1989