

Niet-destructief onderzoek

Niet-destructief onderzoek

W.J.P. Vink

© 1995-2007 VSSD

Uitgegeven door de VSSD

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: hlf@vssd.nl

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

webpagina over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/m003.htm>

Voor docenten die dit boek in cursusverband gebruiken zijn de illustraties in het boek digitaal beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij email hlf@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Gedrukte versie:

ISBN 978-90-407-1147-3

Elektronische versie

ISBN 978-90-6562-104-7

NUR 950

Trefw.: niet-destructief onderzoek

Voorwoord

Deze uitgave over niet-destructief onderzoek (n.d.o.) geeft een overzicht van de in de industrie veelvuldig toegepaste onderzoekstechnieken getoetst aan de huidige stand van de techniek. Het boek is opgezet als een leerboek voor studenten aan de Technische Universiteit te Delft. Ook in het hoger beroepsonderwijs is de bruikbaarheid bewezen. Wel zal in het algemeen de docent een keuze bij de behandeling moeten maken omdat delen van het boek een duidelijke naslagfunctie hebben.

Anders dan bij vorige drukken het geval was, is deze herdruk tot stand gekomen zonder de medewerking van ing. N.H.R. Versluis die op veel te vroege leeftijd in 1989 is overleden.

In deze uitgave is de reeds bestaande structuur ten behoeve van de gebruikers gehandhaafd en zijn de relevante recente ontwikkelingen zoals real-time radiografie, beeldbewerking, geavanceerd ultrasoon onderzoek met de time of flight-techniek aan de bestaande hoofdstukken toegevoegd. Opnieuw is veel aandacht aan de principes van de diverse technieken geschonken omdat uit de vakliteratuur blijkt dat veel nieuwe toepassingen terug te voeren zijn tot de realisatie van de algemene principes in bijzondere gevallen en het in gebruik nemen van een nieuw ontwerp met technische verbeteringen op het gebied van de miniaturisatie van componenten, de gewichtsbesparingen in draagbare apparatuur, de toename in de meetgevoeligheid en de sterke vermindering in de benodigde energie tijdens gebruik of dat het apparaat is aangepast aan de huidige eisen van de wetgeving op het gebied van de arbeidsomstandigheden, de veiligheid en het milieu.

Terugkijkend op het afgelopen decennium valt op dat naast de reeds genoemde zaken de grote vooruitgang mede het gevolg is van de computerisering van bestaande onderzoeksmethoden die gepaard ging met de ontwikkeling van de benodigde software. Mede dank zij de toegenomen rekenkracht van de moderne computers kunnen nu grote hoeveelheden data snel worden verwerkt. Reeds nu is duidelijk dat een en ander zijn weerslag zal hebben op de inhoud van de opleiding en het karakter van het n.d.o. als de n.d.o.-er naast een nauwgezette onderzoeker ook een informaticaspecialist moet zijn. In dit boek wordt in dit verband ondermeer uitvoerig ingegaan op de moderne wijze van digitale beeldverwerking en beeldbewerking. De toegenomen rekenkracht heeft ook nog andere gevolgen voor het n.d.o. Zo worden verschillende n.d.o.-technieken steeds meer ingezet als besturingstechnieken bij de fabricage en tijdens gebruik van een constructie waar de ontwikkeling van geschikte sensoren aan meewerkt. Meer dan vroeger het geval is wordt in dit boek aandacht geschonken aan de plaats van het n.d.o. in de levensduur van een constructie vanaf de ontwerpfase tot en met de uiteindelijke sloop.

Het veld overziend kan geconcludeerd worden dat het n.d.o. is gegroeid. Niet alleen is het aantal beoefenaren toegenomen, ook de kwaliteit is verbeterd mede een gevolg van de aanscherping van de normen en de hogere eisen van het bedrijfsleven en van de overheid. In dit verband kan gewezen worden op de invloed van certificatie van bedrijven en personeel. Ook moet de invloed worden genoemd van verenigingen op het gebied van n.d.o. als KINT en NIL, die zich ondermeer hebben ingezet voor het georganiseerde

n.d.o.-onderzoek, veelal met medewerking van de overheid, TNO, universiteiten en de Nederlandse industrie. Aan een aantal projecten wordt in dit boek uitvoerig aandacht besteed.

Dit boek had niet in de voor u liggende vorm geschreven kunnen worden zonder de belangeloze hulp van zeer velen, zowel op persoonlijke titel als met instemming van hun organisatie.

Met name wil vermelden:

ir. H.J. Schoorlemmer, ANRU-NDT B.V. te Delft,
ing. P. van Rooijen, AIB-Vinçotte te Breda,
ing. T. Blok, MTS Matcon B.V. te Spijkenisse,
ing. J. Verkooyen, AEA Sonomatic B.V. te Oosterhout,

die op hun specialismen de bestaande tekst hebben aangepast aan de huidige stand van zaken,

mevr.dr.ir. M.T.C. de Loos-Vollebregt, TU-Delft,
mevr.drs. J.M. Voskuil, TU-Delft,
prof.dr. G. den Ouden, TU-Delft,
prof.dr.ir. A. Bakker, TU-Delft,
C. van der Wiel, AIB-Vinçotte te Breda,
ing. L. Aardewerk, RTD te Rotterdam,
M. van Eyk, RTD te Rotterdam,
ing. E. Zeelenberg, Stoomwezen te Rotterdam,
ir. T. Luijendijk, TU-Delft,
ir. J.P.H. Wuister, Stoomwezen te Rotterdam

voor hun kritisch commentaar en hun suggesties met name ten aanzien van de actualisering van de diverse technieken,

J. Verschoor, SGS te Spijkenisse,
ing. R.F.M. Apon, Agfa -Gevaert,
ing. H. Bodt, NIL te Voorschoten,
ir. L. van Nassau, Lincoln Electric te Nijmegen,
ir. A.S. Woytas, AST-Stress Tech,
B. Möllenkramer, Bruël & Kjaer te Nieuwegein,

en de firma's Inframetics te Alphen en Landré-Intechmij B.V. te Diemen voor het beantwoorden van mijn vragen en voor het aanleveren van materiaal met name op illustratief gebied waar ik dankbaar gebruik van heb gemaakt.

Ook de suggesties tot verbetering van een aantal kleine fouten van technische aard in de vorige druk ondermeer van dr. G.P. van der Meij van de Hogeschool te Amsterdam zijn onder dank in deze uitgave verwerkt.

Naast de hulp van de genoemde personen en bedrijven heb ik gebruik gemaakt van de publicaties van deskundigen zoals in de literatuuroverzichten is aangegeven. Hiervan wil ik met name noemen de beschouwingen met een perspectief op de toekomst van het n.d.o. van enige internationale experts, waarbij ik bij de keuze mij zoveel mogelijk heb beperkt tot publicaties in de tijdschriften International Advances in NDT, Materials Evaluation en NDT & E International, die alle in de bibliotheek van het Laboratorium voor Materiaalkunde in Delft te vinden zijn.

Tenslotte wil ik de hoop uitspreken dat ook deze uitgave zijn weg zal vinden bij het onderwijs in het n.d.o. en zie ik opmerkingen betreffende de inhoud gaarne tegemoet.

november 1995

drs. W.J.P. Vink

N.B. Een aantal in kleur afgedrukte illustraties is opgenomen in het 'kleurenkatern' dat achterin het boek is geplaatst.

Inhoud

1	NIET-DESTRUCTIEF ONDERZOEK	13
	1.1. Inleiding	13
	1.2. Niet-destructieve onderzoeksmethoden	14
	1.3. Niet-destructief onderzoek als onderdeel van de kwaliteitscontrole	15
	1.4. Toepassing van de n.d.o.-methoden	16
	1.5. Keuze van de n.d.o.-methode	17
	1.6. Enkele veel voorkomende fouten, die niet-destructief kunnen worden vastgesteld	18
	1.7. Enkele bij n.d.o. belanghebbende partijen	20
	1.8. Overzicht van niet-destructieve onderzoeksmethoden	21
	1.9. n.d.o. in de nabije toekomst	23
	Literatuur overzicht hoofdstuk 1	27
2	VISUELE INSPECTIE	28
	2.1. Inleiding	28
	2.2. Belichting	29
	2.3. Vergrotingsapparatuur	30
	2.4. Hulpmiddelen voor de inspectie van moeilijk toegankelijke plaatsen	32
	2.5. Toepassingen	40
	2.6. Beeldbewerking en beeldversterking	41
	2.7. Nog enige toepassingen	52
	Literatuur hoofdstuk 2	55
3	MAGNETISCH ONDERZOEK	56
	3.1. Inleiding	56
	3.2. Magnetisme	58
	3.3. Het magnetiseren van het werkstuk	61
	3.4. De grootte van de stroom	67
	3.5. Testmiddelen	68
	3.6. Inspectie	70
	3.7. Het vastleggen van de indicaties	73
	3.8. Demagnetisatie	74
	3.9. Foutdetectie met meetsonden	75
	Literatuur hoofdstuk 3	77
4	PENETRANT ONDERZOEK	78
	4.1. Inleiding	78
	4.2. Werkwijze	78
	4.3. Voorbewerkingen	82
	4.4. De keuze van een penetrant	83
	4.5. Nog enige gegevens, nodig bij het onderzoek	85
	4.6. Veiligheid, hygiëne en milieu	87
	4.7. Penetrant onderzoek als onderdeel van visuele inspectie	88
	4.8. Het penetrant onderzoek nu en straks	88
	Literatuur hoofdstuk 4	89

5	WERVELSTROOMONDERZOEK	91
	5.1. Inleiding	91
	5.2. Principe	92
	5.3. Signaalanalyse	95
	5.4. Onderzoek met doorloopspoel	96
	5.5. Meetmethoden	98
	5.6. Onderzoek met oppervlaktespoelen	101
	5.7. Het wervelstroomonderzoek nu en in de toekomst	109
	Literatuur hoofdstuk 5	110
6	ULTRASOON ONDERZOEK	112
	6.1. Inleiding	112
	6.2. Golfvormen	113
	6.3. Reflectie, transmissie	117
	6.4. Tasters	121
	6.5. Gebruikte inspectiemethoden	129
	6.6. Geluidsverzwakking	134
	6.7. Invloed foutgrootte en -vorm op de echo	136
	6.8. Enige methoden om de foutgrootte te bepalen	137
	6.9. Elektronische verwerking en presentatie van de indicaties	143
	6.11. Enige toepassingen van ultrasoon onderzoek	154
	6.12. Apparatuur voor bijzondere toepassingen	158
	6.13. Ervaring in Nederland	158
	6.14. Nieuw te ontwikkelen methoden	162
	6.15. Een visie op ultrasoon onderzoek, nu en straks	162
	Literatuur hoofdstuk 6	165
7	RADIOGRAFIE EN RADIOSCOPIE	167
	7.1. Inleiding	167
	7.2. Stralingsbronnen	168
	7.3. De interactie tussen straling en materie	173
	7.4. De radiografische film	176
	7.5. Uitvoering van het radiografisch onderzoek	181
	7.6. Real-time afbeelding	195
	7.7. De automatische herkenning van fouten in 'real-time' radioscopie	204
	7.8. Onderzoek met verstrooide röntgenstraling	206
	7.9. Andere opnametechnieken	211
	7.10. Plaatsbepaling	213
	7.11. Inspectie	217
	7.12. Toepassingen	223
	7.13. Stralingsgevaar	225
	7.13. Radiografie nu en straks	226
	Literatuur hoofdstuk 7	227
8	NEUTROGRAFIE	229
	8.1. Inleiding	229
	8.2. Neutronenbronnen	230
	8.3. Moderatie	233
	8.4. Absorptie	233
	8.5. De collimator	234
	8.6. Enige opmerkingen over opnametechnieken	236
	8.7. Minimale te detecteren dikteverschillen	239
	8.8. Toepassingen	240

	Literatuur hoofdstuk 8	243
9	PERSPROEF	244
	9.1. Inleiding	244
	9.2. Doel van de persproef	245
	9.3. Voorbereiding	246
	9.4. Grootte van de persdruk	248
	9.5. Nadere beschouwing van de persproef	252
	9.6. N.d.o. methoden bij de persproef	254
	9.7. De uitvoering van de wetgeving in Nederland voor toestellen onder druk	255
	Literatuur hoofdstuk 9	256
10	LEKDETECTIEMETHODEN	257
	10.1. Inleiding	257
	10.2. De leksnelheid	258
	10.3. Methoden voor lekonderzoek met gas als medium	258
	10.4. Beschrijving van de methoden	259
	Literatuur hoofdstuk 10	265
11	AKOESTISCHE EMISSIE	266
	11.1. Inleiding	266
	11.2. Typen akoestische emissie	267
	11.3. Golfuitbreiding	269
	11.4. Het Kaiser-effect	271
	11.5. Aan te brengen belasting	271
	11.6. Signaalverwerking	272
	11.7. Signaalanalyse	275
	11.8. Lokalisatie	276
	11.9. Discriminatiemethoden	278
	11.10. Opnemers en golfgeleiders	278
	11.11. Basisonderzoek met A.E.	279
	11.12. Scheurinitiatie, scheurgroei en breukverschijnselen	281
	11.13. De akoestische emissie techniek als n.d.o.-methode	282
	11.14. Akoestische emissie nu en straks	286
	Literatuur hoofdstuk 11	289
12	THERMISCHE INSPECTIEMETHODEN	290
	12.1. Inleiding	290
	12.2. Enige wetten en begrippen uit de stralingstheorie	292
	12.3. De emissiefactor	294
	12.4. Het stralingsspectrum in het infrarood	296
	12.5. De detector of sensor voor contactloze methoden	297
	12.6. Optische componenten	299
	12.7. Meetprincipes	299
	12.8. Pyrometers	299
	12.9. Infraroodafbeeldingssystemen	300
	12.10. Thermografische inspectie met contactmethoden	304
	12.11. Infrarood thermografie nu en straks.	306
	Literatuur hoofdstuk 12	307
13	HOLOGRAFISCHE INTERFEROMETRIE; DE MOIRÉMETHODE	308
	13.1. Inleiding	308
	13.2. De opname van een hologram	309
	13.3. De reconstructie van het beeld uit het hologram	310

13.4.	De holografische interferometrie	312
13.5.	Kwantitatieve interferometrie	314
13.6.	De Shearografie	316
13.7.	De spikkelcorrelatiemethode	317
13.8.	Toepassingen	320
13.9.	Akoestische holografie	321
13.10.	De methode met rekstrookjes en de moirémethode	322
	Literatuur hoofdstuk 13	325
14	SCHEURDIEPTEMETINGEN (POTENTIALVALMETHODE)	326
14.1.	De gelijkstroommethode	327
14.2.	De wisselstroommethode	327
14.3.	Invloedsfactoren	328
14.4.	De ACFM-methode	329
	Literatuur hoofdstuk 14	330
15	LAAGDIKTEMETINGEN	331
15.1.	Inleiding	331
15.2.	De magnetische methode	331
15.3.	De β -reflectiemethode	332
15.4.	De diëlektrische vonktest	332
15.5.	De meting van de elektrische weerstand	334
16	VIBRATIE-ANALYSE	335
16.1.	Inleiding	335
16.2.	Lokaal vibratie-onderzoek, akoestische impedantiemeting, Fokker-Bond- tester	335
16.3.	Vibratie-onderzoek van de gehele constructie	338
16.4.	De laser-doppler methode	346
	Literatuur hoofdstuk 16	346
17	METHODEN VOOR MATERIAALIDENTIFICATIE	347
17.1.	Inleiding	347
17.2.	Bepaling van de samenstelling	347
17.3.	Identificatie van ferritisch en austenitisch staal; de ferrietmeting	352
	Literatuur hoofdstuk 17	354
18	MICROGOLFSTRALING	355
	Literatuur hoofdstuk 18	360
19	DIVERSE METHODEN; METHODEN VOOR HET METEN VAN RESIDUELE SPANNINGEN	361
19.1.	Replica	361
19.2.	Kraaklak	362
19.3.	De Fokker-contaminatiemeter	363
19.4.	Ferrografie	364
19.5.	Methoden voor het meten van residuele spanningen	364
	Literatuur hoofdstuk 19	367
20	DE ORGANISATIE VAN HET NIET-DESTRUCTIEF ONDERZOEK	368
20.1.	Inleiding	368
20.2.	De acceptatiespecificatie	368
20.3.	Onderzoekspecificatie	371
20.4.	Kwalificatie en certificatie van de onderzoeker	373

20.5.	Kwaliteitsbeheersing (borging) en kwaliteitsbewaking	375
20.6.	Nederlandse organisaties op het gebied van n.d.o.	378
	Literatuur hoofdstuk 20	379
	Bijlage hoofdstuk 20	380
21	VEILIGHEID	383
21.1.	Inleiding	383
21.2.	Dosimetrie van gamma- en röntgenstraling	383
21.3.	Meetmethoden voor ioniserende straling	391
21.4.	Stralingseffecten bij de mens	393
21.5.	Arbeidshygiënisch beleid, maximaal toelaatbare dosisequivalenten	395
21.6.	Wettelijke regelingen betreffende stralingsbescherming	399
21.7.	Andere vormen van elektromagnetische straling	403
21.8.	Het geluid	405
21.9.	Andere gevarenbronnen	407
	Literatuur hoofdstuk 21	408
22	BEOORDELING VAN HET ONDERZOEKSRESULTAAT	409
22.1.	Inleiding	409
22.2.	Inspectieresultaat in relatie tot kritische foutgrootte	413
22.3.	Oorzaken van variaties in het resultaat van het niet-destructief onderzoek	414
22.4.	Vermijden van ten onrechte goedgekeurde produkten	415
22.5.	Schadeoorzaken	416
22.6.	Reparatie	417
22.7.	Acceptatiecriteria	418
22.8.	Het Nederlandse onderzoeksproject 'Fitness for Purpose'	423
22.9.	De opzet van het praktijkmodel	428
22.10.	Het kostenaspect bij n.d.o.	428
	Literatuur hoofdstuk 22	432
	Bijlage 1 hoofdstuk 22. Detectability and limits for imperfections in butt welds	434
	Bijlage 2 hoofdstuk 22	436
	TREFWOORDEN	444
	KLEURENKATERN	ACHTERIN

1 Niet-destructief onderzoek

1.1. Inleiding

Onder *niet-destructief onderzoek* (n.d.o.) wordt verstaan een werkwijze waarmee een indruk kan worden verkregen van de kwaliteit van een te onderzoeken object zonder dat dit behoeft te worden beschadigd.

Het n.d.o. kan in tegenstelling tot het *destructieve onderzoek*, waarbij wel beschadiging van het te onderzoeken materiaal plaatsvindt, op het gehele object worden toegepast. De ligging, de afmetingen en de aard van zowel macroscopische als microscopische onvolkomenheden kan er mee worden vastgesteld.

Daarnaast is het met de te behandelen methoden mogelijk verschillende mechanische eigenschappen, de microstructuur, de samenstelling en de afmetingen van het werkstuk te bepalen.

Het n.d.o. vangt in de regel aan met een visuele inspectie en veelal kan hiermede worden volstaan. In andere gevallen geeft een dergelijke inspectie belangrijke aanwijzingen voor mogelijke defecten en voor de keuze van een geschikte onderzoekstechniek.

Behalve door bekijken kan door bekloppen van het werkstuk, dus door beoordeling van het geluid, op eenvoudige wijze worden nagegaan of afwijkingen in de kwaliteit zich voordoen. Al van oudsher worden deze methoden toegepast. Het gebruik van ultrasone geluidsgolven is van jongere datum en werd in 1929 door de Rus Sokolov geïntroduceerd (doorstraalmethode) en in 1942 door Firestone verder ontwikkeld (impuls-echomethode) tot een nog heden ten dage uitgebreid toegepaste werkwijze.

Aan het eind van de vorige eeuw werd de methode, die nu bekend staat als penetrant onderzoek, in een primitieve vorm al door machinisten toegepast voor het onderzoek van krukassen van stoommachines. Op verdachte plaatsen werd hete olie gebracht, die in eventueel aanwezige scheuren kon dringen. De scheuren werden vervolgens zichtbaar gemaakt door het opbrengen van krijtpoeder. Het eerste experiment met röntgenstraling bij lasonderzoek vond in 1896 plaats in de Verenigde Staten. In Nederland voerde het Stoomwezen het röntgenonderzoek als goedgekeurde n.d.o.-methode rond 1937 in.

Het n.d.o. heeft vooral na de tweede wereldoorlog een grote vlucht genomen, waarbij niet te ontkennen valt, dat de huidige stand van de techniek voor een zeer groot gedeelte het gevolg is van ontwikkelingen op lasgebied.

Ook de behoeften op andere terreinen, waarbij bijvoorbeeld gedacht kan worden aan de medische wetenschap, de breukmechanica, het corrosieonderzoek, de praktische toepassing van nieuwe materialen en de miniaturisatie hebben aanleiding gegeven tot de ontwikkeling van het n.d.o.

Voorts is en wordt een belangrijke bijdrage geleverd door de inzet van kennis en ervaring

uit disciplines als de fysica en de elektronica. Dit heeft onder meer geleid tot technieken als de akoestische emissie-analyse, het onderzoek met microgolfstraling en de holografische interferometrie.

De belangrijkste bijdrage aan de ontwikkeling van het n.d.o. van de laatste 10 jaar is toe te schrijven aan het toenemend gebruik van *dataverwerkende apparatuur*. De verwachting is, dat deze ontwikkeling bij de toenemende verwerkingssnelheid van deze apparatuur aanleiding zal blijven voor de ontwikkeling en de praktische toepassing van geavanceerde technieken. In § 1.9 zal hier nader op worden ingegaan.

1.2. Niet-destructieve onderzoeksmethoden

In de loop der jaren zijn vele n.d.o.-methoden ontwikkeld, waarvan de meeste berusten op het inbrengen van een bepaalde vorm van energie in het werkstuk, bijvoorbeeld mechanische of elektromagnetische. Via interacties met discontinuïteiten en onvolkomenheden (in dit boek zal conform het spraakgebruik over *defecten* of over *fouten* worden gesproken) kan hiervan een beeld worden verkregen. Op grond van de opgedane ervaring, die bijvoorbeeld is vastgelegd in voorschriften en Codes, kan worden bepaald of de gevonden fout *ongevaarlijk* is en in het werkstuk kan blijven zitten, dan wel dat tot *reparatie* of tot *afkeuring* moet worden overgegaan.

Iedere methode heeft zijn specifieke mogelijkheden en beperkingen. Men moet daarom bij de keuze van de methode terdege rekening houden met factoren zoals materiaal, aard van de mogelijke fouten en toegankelijkheid van het object.

In ieder materiaal, bij elk fabricageproces en tijdens de levensduur van een constructie zullen specifieke fouten verwacht kunnen worden, die soms slechts met één van de beschikbare n.d.o.-methoden gevonden kunnen worden. Het verdient aanbeveling, als dat economisch mogelijk is, meerdere geschikte n.d.o.-methoden te gebruiken, daar de gezamenlijke resultaten veelal pas een goed beeld van de aanwezige fouten geven.

In tabel 1.1 zijn de voornaamste n.d.o.-methoden voor de industriële praktijk vermeld.

Van deze methoden kunnen het ultrasoon (U.S.) en het radiografisch onderzoek als de meest toegepaste worden beschouwd.

Een gedetailleerd overzicht van n.d.o.-methoden is gegeven in tabel 1.3.

Tabel 1.1. Belangrijkste n.d.o.-methoden voor de industriële praktijk.

n.d.o.-methoden	fouten		wand- en laagdiktemetingen, structuurbeoordeling en materiaaleigenschappen
	aan of bij het oppervlak	inwendig	
1. visueel onderzoek	×		
2. penetrant onderzoek	×		
3. magnetisch onderzoek	×		
4. wervelstroomonderzoek	×		×
5. ultrasoon onderzoek		×	×
6. radiografisch onderzoek		×	