

Diverse onderwerpen

3 > Niet-destructief onderzoek aan monumentale gebouwen

Inhoud

1 Samenvatting	2
2 Inleiding	2
2.1 Natuurwetenschappelijk onderzoek	2
2.2 Soorten onderzoek	3
2.3 Kritisch omgaan met technologie	3
3 Traditionele niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden	4
3.1 Visuele inspectie en analyse van gebreken	4
3.2 Meten van lengten en richtingen	5
3.3 Overige methoden	5
4 Moderne niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden	6
4.1 Meten van vervorming	6
4.2 Opbouw van constructieonderdelen	7
4.3 Vocht-/temperatuurverdeling in constructies	14
4.4 Onderzoek van de omgeving	18
Literatuur	19
Verantwoording illustraties	19
Bijlage Overzicht van een aantal niet- of weinig-destructieve meettechnieken op monumentale gebouwen	20

3 Niet-destructief onderzoek aan monumentale gebouwen

1 > Samenvatting

Moderne natuurwetenschappelijke technieken worden nog maar weinig ingezet bij de voorbereiding van een restauratie of van onderhoudswerk. Dat is jammer, want het gebeurt regelmatig dat herstelmaatregelen niet het gewenste effect hebben. Een pleidooi voor het toepassen van natuurwetenschappelijke technieken is daarom op z'n plaats, want hiermee kan meer inzicht in het gebouw en in de schadeprocessen worden verkregen en kunnen adequate herstelmaatregelen worden gekozen.

Ook komt het voor dat in blind vertrouwen een eenmaal bekend onderzoekssysteem wordt gehanteerd, ook als de noodzaak daartoe niet aanwezig is of de uitkomst niet betrouwbaar geacht kan worden. Het geheim zit uiteraard in een goede voorbereiding en analyse vooraf, waarbij ervaring en inzicht een belangrijke rol spelen. Het natuurwetenschappelijk onderzoek wordt ingezet voor het oplossen van de vragen waarop traditionele waarneming geen of onvoldoende antwoord geeft. Een van de voorwaarden waaraan men moet voldoen om herstelwerk te kunnen voorbereiden is daarom kennis van en inzicht in de beschikbare onderzoeksmethoden, met name in hun mogelijkheden en beperkingen.

Voor veel vormen van natuurwetenschappelijk onderzoek worden delen van gebouwen (monsters) ter plaatse of in een laboratorium onderzocht. Om bijvoorbeeld vast te stellen of een geconstateerd verschrompingsverschijnsel inderdaad optrekkend vocht is, worden met een boor op diverse hoogten gruismonsters uit een muur gehaald en vervolgens onderzocht op de hoeveelheid water die in elk monster aanwezig is, en op hun hygroscopisch vochtgehalte. Ook neemt men boormonsters om een zoutschadeprobleem te analyseren. Deze monsters worden verder onderzocht via een eenvoudige geleidbaarheidsmeting van water waarin wat boorgruis is gebracht tot geavanceerde technieken als röntgenspectrometrie. Voor elk mon-

ster moet echter weer een stukje monument worden opgeofferd. In de meeste gevallen zijn enkele monstergaatjes geen ramp, maar toch moet men als stelregel nemen dat bij een onderzoek het monument zelf niet of zo weinig mogelijk wordt beschadigd. Bovendien loopt men bij het nemen van een monster de kans een meting te beïnvloeden. Zo zal bij het nemen van een boormonster een deel van het water door de warmte van de boor verdampen, wat de uitkomst onbetrouwbaarder maakt. Zeker bij monumenten voert men daarom bij voorkeur onderzoek uit waarbij het onderzoeksobject zelf niet of nauwelijks beschadigd raakt: niet- en weinig-destructief onderzoek. In dit artikel worden de belangrijkste methoden van dit type onderzoek aan gebouwen gepresenteerd. Het artikel is noodzakelijkerwijs slechts een inleiding, aangezien aan elk van de hier genoemde technieken een compleet artikel gewijd kan worden. Na de inleiding komen achtereenvolgens de traditionele (§ 3) en de moderne (§ 4) niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden aan de orde.

2 > Inleiding

2.1 Natuurwetenschappelijk onderzoek

Natuurwetenschappelijk onderzoek op de bouwplaats kent geen traditie en komt nog maar weinig voor. Bij de beoordeling van instandhoudingproblemen verlaat men zich meestal op waarneming en ervaring. Maar wanneer men uitsluitend gebruikmaakt van waarneming en ervaring, dan kan dit tot een verkeerde diagnose leiden. Een voorbeeld waarbij het gemakkelijk mis kan gaan is de bepaling van de aard en oorzaak van vochtproblemen. Een verkeerde diagnose kan leiden tot inadequate maatregelen of tot symptoombestrijding in plaats van het aanpakken van de oorzaak.

Een nadeel van natuurwetenschappelijk onderzoek zijn de hoge kosten. De uitvoering ligt in handen van hoogopgeleid en gespecialiseerd personeel en vaak zijn er

dure apparaten nodig, die in relatief korte tijd moeten worden afgeschreven. Daarom moet dit type onderzoek op een verstandige manier worden ingezet. De volgende werkwijze is hierbij aan te raden. Begin altijd met een analyse aan de hand van waarnemingen en ervaring. Bepaal vervolgens welke extra informatie nodig is. Stel ten slotte vast met welke onderzoeksmethode(n) de gesignaleerde problematiek verhelderd kan worden. Een weloverwogen combinatie van op ervaring gestoelde waarneming en natuurwetenschappelijk onderzoek leidt tot een beter onderbouwde diagnose, en maatregelen zullen doeltreffender zijn omdat ze niet op de gok worden genomen. De ervaring leert dat verstandig toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek zichzelf in de meeste gevallen terugverdient.

2.2 Soorten onderzoek

Er wordt onderscheid gemaakt tussen *destructief*, *matig-*, *weinig-* en *niet-destructief* onderzoek.

Destructief onderzoek gaat ten koste van het proefstuk. Voorbeelden hiervan zijn een betonkubus die kapot wordt gedrukt en een balkje dat wordt belast tot het bezwijkt. Destructief onderzoek kan ook ten koste gaan van (een deel van) het monument, omdat voor het onderzoek delen van dat monument worden gebruikt.

Bij niet-destructief onderzoek blijft het onderzoeksobject zelf onaangeroerd. Het wordt slechts afgetast met onder andere licht, radiogolven, geluidsgolven, elektrische stromen en magnetische velden.

Er is een tussengebied dat als matig-destructief of weinig-destructief onderzoek kan worden gekenschetst. Zo leidt de zogenoemde miniaturisering in de elektronica tot de fabricage van zeer kleine sensoren. In plaats van de grote gaten die men voorheen voor het plaatsen van sensoren moest boren, volstaan thans minieme gaatjes. Het onderzoeksobject blijft niet geheel onaangeroerd, maar de schade blijft beperkt.

Onderzoek is ook onder te verdelen naar de *dimensies* en de tijd waarop het betrekking heeft.

Er is onderscheid te maken tussen onderzoek op één punt en één moment versus onderzoek op meerdere

plaatsen en gedurende een langere periode. Welk onderzoek gewenst is, hangt af van de vraagstelling. Zo strekt onderzoek naar de opbouw van een fundering zich over een bepaald grondgebied uit (de funderingszone), maar beperkt het zich wat tijd betreft tot één moment. Hiertegenover staat onderzoek naar verkeerstrillingen, dat zich uitstrekt over een beperkt aantal punten, maar wel over langere tijd wordt uitgevoerd.

Veel aantastingsprocessen vragen om metingen in een bepaald gebied over langere tijd.

Het vaststellen en volgen of het bewaken van (veranderingen van) bepaalde gegevens in de loop van de tijd (al dan niet in samenhang met de wijziging van omstandigheden) noemen we monitoren.

Monumenten en andere historisch waardevolle objecten vragen soms om een specifieke aanpak. Meer dan bij 'normale' objecten is er vraag naar zo min mogelijk destructief onderzoek. Trial and error met inadequate maatregelen zijn hier ook nog minder gewenst. Als extra moeilijkheid geldt dat van oude gebouwen doorgaans minder documentatie aanwezig is – bouwtekeningen ontbreken vaak – of dat de informatie daaruit minder nauwkeurig is.

2.3 Kritisch omgaan met technologie

Meetmethoden hebben de laatste decennia een sterke ontwikkeling doorgemaakt. Vaak is er een blind vertrouwen in de technologie te bespeuren. Het is echter van groot belang kritisch te blijven en een inschatting te maken van de betrouwbaarheid van de resultaten. Daarbij spelen de volgende zaken een belangrijke rol.

In de eerste plaats zijn kennis van de apparatuur en ervaring met het gebruik daarvan noodzakelijk om de mogelijkheden en vooral ook de beperkingen goed te leren kennen. Kennis en ervaring zijn ook nodig voor de interpretatie van de meetgegevens. Verder moet de apparatuur regelmatig worden geijkt en moeten (traditionele) controlemetingen verricht worden. Het is bijvoorbeeld aan te bevelen om de uitlezing van sensoren die temperatuur en luchtvochtgehalte meten zo nu en dan eens te vergelijken met de resul-

taten van een meting met een (ouderwetse) goedgeijkte kwikthermometer en met een natte bol. Ten slotte geldt dat men in elke situatie opnieuw de meest geëigende onderzoekstechniek moet kiezen. Zal men bijvoorbeeld in het ene geval voor de detectie van ankers en doken een surface penetrating radar inzetten, in een ander geval geeft een simpele metaaldetector een voldoende betrouwbaar resultaat.

3 > Traditionele niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden

In dit hoofdstuk worden kort een aantal traditionele methoden aangestipt om te benadrukken dat het gebruik hiervan meestal het logische startpunt van het onderzoek is. Als men moderne niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden wil inzetten, zijn de resultaten van de traditionele methoden nodig om de juiste strategie te kiezen: wat zijn de vragen waarop men antwoord wil hebben, welke moderne methoden zet men in en op welke punten zet men die in. Bij de traditionele onderzoeksmethoden worden in principe alle zintuigen ingezet. We moeten dus niet alleen naar het gebouw kijken, maar ook er naar luisteren, het ruiken, voelen en proeven en bij het lopen over hellende vloeren de scheefstand ervaren.

3.1 Visuele inspectie en analyse van gebreken

Onderzoek begint altijd met het kijken naar het gebouw en het waarnemen van gebreken. Door de geconstateerde gebreken in kaart te brengen en deze waarnemingen te analyseren kan men soms al vergaande conclusies trekken. Een belangrijk hulpmiddel hierbij is het maken van tekeningen. Door de schade te tekenen kan men patronen herkennen die een vingerwijzing naar de oorzaak geven. Een aantal voorbeelden laat zien hoe visuele inspectie in de praktijk werkt.

> Soms moet men voor een visuele inspectie een deel van het gebouw blootleggen. Een kleine ontgraving kan veel vertellen over de opbouw van de fundering en de diepte van de aanleg. Ook een

kijkje achter plafonds of betimmeringen en onder of tussen vloeren kan verhelderend werken. Handige gereedschappen hierbij zijn, behalve destructieve instrumenten als een koevoet en een hamer, niet-destructieve instrumenten als een sterke zaklamp en een spiegelkje (om, om een hoekje, in een klein gaatje te kunnen kijken).

> Houtaantastende insecten kan men signaleren met behulp van insectenvallen (doosjes met kleverige stof). Het Kennis- en Adviescentrum Dierplagen (Wageningen) kan voor determinatie zorgen, als men de aangetroffen insecten niet zelf herkent. Datzelfde geldt voor de kevertjes die men in de uitvliegperiode soms bij ramen en lichtspleten aantreft. Zelfs het boormeel en de vorm en maat van de uitvliegopeningen kunnen voldoende zijn om activiteit vast te stellen en het soort insect te determineren.

Het kan nuttig zijn om een gebouw tijdelijk te onttrekken aan de dagelijkse zorg van de schoonmaker en het een tijdje bewust niet schoon te maken, zodat boormeel, gruis en zoutuitbloei zichtbaar kunnen worden. Uit de plaats waarop en de omvang waarin deze verschijnselen optreden, kunnen aard en ernst ervan duidelijk worden.

> De meeste scheuren in een gebouw bewegen in de loop der tijd. Vaak is er slechts sprake van openen en sluiten in het ritme van de veranderingen van luchtvochtigheid en temperatuur, maar een vervorming kan in de loop van de tijd ook steeds ernstiger worden. Door over een scheur een gipspleister aan te brengen krijgt men na verloop van tijd een indicatie of de scheur nog actief is: is de scheurwijdte veranderd (de pleister is gescheurd) en zo ja, wat is dan de richting van die verandering.

Met een simpele knijpfles met water en met de zogeheten Karstenbuis kan men bepalen of waterafstotende behandelingen (nog) effectief zijn. Wanneer een muur recent behandeld is, loopt het water er parelend af. Is de behandeling effectief geweest, dan zal de hoogte van het water in een op de muur geplaatste Karstenbuis maar weinig teruglopen.

- › Met fotomonitoring, ofwel door regelmatig een foto te maken (vanaf een vast standpunt, steeds met dezelfde lens en liefst met dezelfde belichting), kan het verloop van de schade worden vastgelegd. Deze methode is onder andere toegepast bij de voorbereiding van de restauratie van het grafmonument van Willem van Oranje in de Nieuwe Kerk te Delft. Daar werd van een aantal details van het monument maandelijks een foto gemaakt gedurende ongeveer anderhalf jaar.

3.2 Meten van lengten en richtingen

Behalve door te kijken kan men ook zelf veel gegevens verzamelen met eenvoudige middelen zoals een duimstok, een waterpas (instrument) en een theodoliet.

Scheefstanden kan men eenmalig meten en op grond daarvan de oorzaak bepalen. Vaak worden dergelijke metingen echter herhaald. Zo kan men van een kerktoeren die vermoedelijk onvoldoende is gefundeerd met een theodoliet met tussenpozen de scheefstand meten. Op die manier is eenvoudig vast te stellen of de toren (nog) in beweging is, en zo ja, hoe ernstig dit probleem is. Zo nodig kan bijtijds worden ingegrepen. Ook verzakkingen zijn vrij eenvoudig in kaart te brengen, en wel door de absolute of relatieve hoogte van een of meer vaste punten in een gebouw op gezette tijden in te meten. Bij een absolute meting bepaalt men de hoogte ten opzichte van een meetbout met bekende NAP-hoogte. Dit geeft een extra zekerheid, omdat de hoogte van deze punten regelmatig wordt gecontroleerd en eventuele afwijkingen bekend zijn. Vaak is het echter voldoende om te meten ten opzichte van een vast punt in een nabijgelegen, degelijk gefundeerd gebouw. Door de hoogte van de vaste punten (bij voorkeur meetbouten) van het te onderzoeken gebouw herhaaldelijk in te meten en op die manier door de tijd te volgen, kan men een indruk krijgen van optredende verzakkingen (door onvoldoende fundering of als gevolg van ingrepen in de omgeving).

Het meten van scheurwijdten doet men met een eenvoudige scheurwijdte-lineaal (een kunststoflineaal met lijntjes van 0,05 mm, 0,1 mm en 0,2 mm, oplo-

pend tot 1,5 mm dikte). Herhaalt men de meting, dan kan daarmee inzicht in de variatie van de scheurwijdte worden verkregen. Uiteraard moet er wel steeds op dezelfde plaats gemeten worden; zet bijvoorbeeld een onuitwisbaar lijntje aan te geven op de plaats waar men meet.

3.3 Overige methoden

Vaak is het belangrijk om de externe omstandigheden in kaart te brengen. Zo kan met het plaatsen van een peilbuis en het regelmatig meten van de grondwaterstand achterhaald worden of hout, in de fundering toegepast, altijd onder water blijft dan wel zo nu en dan droog komt te staan.

Het klimaat (vooral binnen in een gebouw) kan gecontroleerd worden met een eenvoudige hygrothermische meetunit met schrijfstiften, die het verloop van vochtgehalte en temperatuur op een grafiekje vastleggen. In veel musea staan nog dergelijke ('ouderwetse') apparaten. In vergelijking met de moderne meetsondes zijn ze bewerkelijk, omdat ze zo nu en dan van nieuw papier moeten worden voorzien en moeten worden opgewonden. Desondanks kunnen ze nog steeds van dienst zijn.

Een eenvoudig maar effectief middel om inzicht te krijgen in luchtstromingen in het gebouw is het afsteken van een rookbom. Het geeft een goede indruk van (natuurlijke) ventilatie, de effecten van verwarming op luchtstromen, en van tocht- en koudevalverschijnselen.

In de tijd dat men soms nog twijfelde aan de kundigheid van constructeurs, plaatste men vaak proefbelastingen. Zo werden op spoorbruggen een aantal locomotieven op de brug gereden, voordat deze bruggen voor het treinverkeer werden vrijgegeven. Op vergelijkbare wijze is de draagkracht van balken beoordeeld door er een 'dood gewicht' op te plaatsen of aan te hangen. Door de doorbuiging te meten kan men herleiden wat de draagkracht van de balk ongeveer moet zijn. Voor een meer nauwkeurige bepaling werkt men met meetklokjes (zie § 4.1). Deze methode is een subtiele variant van een niet-destructieve methode die de timmerman vroeger wel eens toepas-

te om de sterkte van een vloer te beoordelen: een paar keer flink hard springen op het midden van de vloer. Overigens is ook die methode nog steeds effectief als het gaat om het verkrijgen van een eerste indruk.

Door op het oppervlak te kloppen kan men horen of de constructie nog stevig is. Op wandtegels en pleisterwerk klopt men met de vingernagels of een sleutel, op houten balken en op natuursteen en metselwerk met een hamer.

Houtaantasting kan men op het spoor komen door met priem of schroevendraaier in het hout te prikken. Door te proeven kan men vaststellen of een uitbloei inderdaad uit zout bestaat; wie bedreven is in het proeven van zout kan zelfs bij benadering bepalen om wat voor soort zout het gaat ('dit smaakt enigszins bitter, het zal wel ettringiet zijn'). Eertijds had TNO een medewerker in dienst die proefde aan de vruchtlichamen van houtaantastende schimmels en daarmee de soort kon vaststellen.

Ook door te ruiken kan men al een aardige indruk krijgen. Is er schimmelaantasting, ruikt het muff en vochtig? Door aangetroffen verdachte zaken die op vruchtlichamen of strengen van schimmels lijken op kweek te zetten, kan men vaststellen of het een bouwschadelijke schimmel betreft en zo ja, om welke het dan gaat.

Zo zijn er nog tal van andere manieren om constructies eenvoudig te onderzoeken. Veel van de verkre-

gen informatie is betrekkelijk, maar dat geldt overigens tot op zekere hoogte ook voor veel moderne, technologische methoden. Technologische methoden zullen de traditionelere vormen van waarneming nooit geheel vervangen. Het waarnemen en analyseren staat immers altijd voorop, om te weten welke methode waar toegepast moet worden. De technologie kan echter wel een waardevolle aanvulling geven op de traditionele wijzen van onderzoek en vaak meer en exactere informatie opleveren.

4 › Moderne niet- en weinig-destructieve onderzoeksmethoden

4.1 Meten van vervorming

Het meten van vervormingen in en van gebouwen komt regelmatig voor. Veelal gaat het om het volgen in de tijd van scheurbreedten en soms van de scheefheid van gebouwen. Ook bij restauraties waarin ondersteunende constructies worden vervangen dan wel versterkt, of wanneer er sprake is van tijdelijke grondwaterstandwijzingen is het volgen van vervormingen in nabijgelegen constructiedelen een goed middel om de effecten te evalueren. Ten slotte kunnen met vervormingmetingen de gevolgen bestudeerd worden van verkeer en heiwerkzaamheden op het mechanisch gedrag van constructies, in het bijzonder scheurvorming.^{figuur 1} In de bouwpraktijk worden verschillende methoden gebruikt om scheur-



figuur 1

Meetklokje op de St. Stosija
kathedraal te Zadar, Kroatië

breedten op te meten. Een redelijk nauwkeurige manier van meten biedt het vertrouwde meetklokje. Er wordt over de scheur (zie pijltje in figuur 1) gemeten tussen twee in de muur gefixeerde punten (in figuur 1 onder de handen). Er dient zoveel mogelijk onder dezelfde condities (temperatuur, luchtvochtigheid en vochtgehalte van de constructie) te worden gemeten, omdat anders lengteveranderingen van de steen worden meegenomen. De verandering van de afstand tussen de twee punten wordt overgezet in een scheuropening- en sluitingdiagram. In feite zijn de metingen een serie afzonderlijke momentopnamen, waarbij het niet zeker is of belangrijke gebeurtenissen gemist zijn.

Brengt men een proefbelasting ('dood gewicht', zie § 3.3) aan, dan is het aan te bevelen om de doorbuiging zeer nauwkeurig met een meetklokje te meten. Naar mate de doorbuiging exacter bekend is, is ook de (rest)sterkte van de balk beter te berekenen. De prijs van een meetklokjeset bedraagt € 363,02 (DEMEC – Groot-Brittannië).

4.2 Opbouw van constructieonderdelen

In deze paragraaf komen de methoden aan de orde voor de documentatie van het gebouw en voor de plaatsbepaling van de verschillende lagen, van de aanwezige inhomogeniteiten en holtes en van de optredende aantasting.

Stereofotografie

Bij het restaureren of wijzigen van de bestemming van een monument is het gewenst over bruikbare en up-to-date documentatie te beschikken. De basis hiervoor zijn bestaande documenten en tekeningen. Zo nodig kunnen aanvullende technische gegevens verkregen worden via geodetische opmeetmethoden. Al sinds lang wordt daarbij ook gebruik gemaakt van stereofotografie. Deze methode is ontleend aan de cartografie, waar men met twee in een vliegtuig opgestelde fotocamera's ook diepte in het landschap kan zien. Behalve de horizontale projectie kan zo ook het reliëf (de hoogtelijnen op de kaart) worden bepaald.

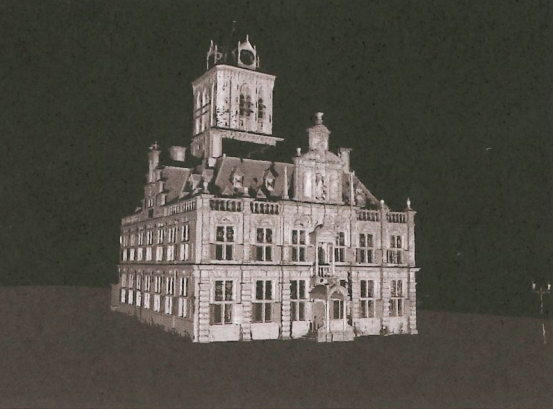
Ook gebouwen of onderdelen daarvan kunnen met

twee (maar dan op een statief op de grond geplaatste) fotocamera's worden opgenomen. In een apparaat waarin beide negatieven worden ingestoken, ziet men de parallax en kan men lijnen op de foto's volgen en zodoende niet alleen aanzichten, maar ook bijvoorbeeld doorsneden tekenen. Tegenwoordig is de verwerking van de foto's gemoderniseerd: de gegevens worden niet meer op papier getekend, maar in een computer ingebracht. Er ontstaat een set driedimensionale gegevens, waarmee de benodigde tekeningen kunnen worden samengesteld en afgedrukt.

Laserscanner

Sinds kort is het ook mogelijk om met een driedimensionale laserscanner constructies nauwkeurig in kaart te brengen. Daarmee kan het probleem van ontbrekende documentatie betreffende oude complexe gebouwen efficiënt worden aangepakt. De scanner verstuurt een laserpulse en meet de tijd tussen het verzenden en het ontvangen van de reflectie. Deze tijd is een maat voor de afstand. Met behulp van de hoekverdraaiing van twee zeer nauwkeurige spiegels plaatst de scanner het punt in de driedimensionale ruimte. Een scan omvat maximaal een miljoen meetpunten (zowel in horizontale als in verticale zin duizend meetpunten) en duurt dan zestien minuten. Bij kleine objecten kan het apparaat op korte afstand staan (meten in binnenruimten is mogelijk), terwijl de maximale afstand tussen het apparaat en een in kaart te brengen gebouw zo'n honderd tot honderdvijftwintig meter bedraagt. De meetnauwkeurigheid per ingemeten punt bedraagt ongeveer zes millimeter; door herhaald of verfijnder meten kan deze onnauwkeurigheid verder worden teruggebracht.^{figuur 2} De kosten verbonden aan het inhuren van een deskundige met apparatuur bedragen € 1.361,34 per dag (vijftien tot twintig scans); begeleiding bij het uitwerken van de meetgegevens kost € 453,78 per dag. (DelftTech B.V., www.DelftTech.com).

Voor een adequate voorbereiding van een restauratie is het van groot belang dat er informatie beschikbaar is over weggewerkte constructieonderdelen, over de



figuur 2
Driedimensionale laserscan van het stadhuis van Delft

plaats van constructielagen, over het voorkomen van onzichtbare gebreken (in het bijzonder holten), over delaminatieverschijnselen, over de plaats van ankers en doken en over vormen van aantasting van het gebouw. Niet-destructieve meetmethoden kunnen uitermate nuttig zijn voor het documenteren van de onzichtbare constructie. Ook aantasting van houten en stenen constructies kan via deze technieken worden opgespoord.

Radar

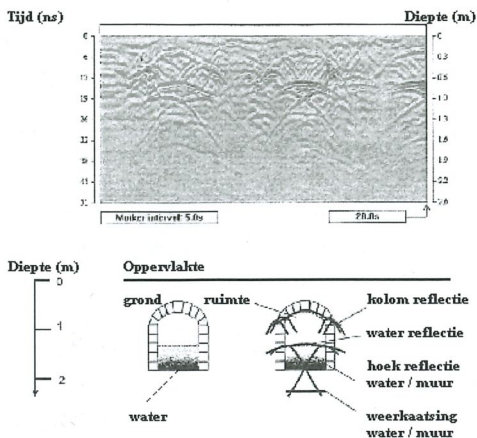
In 1935 werd, geheel onafhankelijk van elkaar, in Engeland, Nederland en de Verenigde Staten een systeem ontwikkeld om met elektromagnetische golven afstand en richting van een voorwerp te bepalen en in beeld te brengen. Dit systeem van Radio Detection and Ranging, kortweg radar, had aanvankelijk vooral militaire toepassingen, maar wordt tegenwoordig ook in de archeologie en de restauratie toegepast. Een radarsysteem bestaat uit twee antennes (een zend- en een ontvangantenne), en een controle-eenheid die de signalen van de ontvangantenne versterkt en overdraagt aan een minicomputer, die de gegevens visualiseert in zogenoemde radargrammen op een beeldscherm. Deze weergave op de monitor (of een afdruk daarvan) kan vervolgens worden geanalyseerd. De werking is als volgt: vanuit de zendantenne wordt een elektromagnetische golf verzonden in de richting van een voorwerp, waarna door de ontvangantenne de aankomsttijd van de gereflecteerde golf wordt geregistreerd. De voortplantingssnelheid van

de golf is afhankelijk van het type materiaal. Hierdoor kunnen overgangen in materialen of in de grond worden vastgesteld. Holtes, delaminaties en verschillen in materiaal (bijvoorbeeld verborgen metaalelementen) kunnen door verschillen in reflecties gedetecteerd worden. Zo zijn ook scheuren en verstoorde of losgekomen zones op grond van reflectiviteitsveranderingen herkenbaar.

Radar is een uiterst nuttig middel gebleken om via niet-destructieve weg meer inzicht in de verborgen opbouw en anomalieën van een monument te krijgen, en de zogenoemde grondradar is inmiddels een onmisbaar instrument in de archeologie. Het is een techniek die door een deskundige moet worden beoefend, omdat de interpretatie van de radargrammen veel ervaring vereist. *figuur 3*



figuur 3
Radaronderzoek aan het fundament in het Franciscanen-klooster te Osijek, Kroatië



figuur 4

Het radargram verkregen via metingen vanuit de oppervlakte en de interpretatie van de meetgegevens: Fountains Abbey, Groot-Brittannië

In figuur 4 wordt een voorbeeld gegeven van een radargram met een bijbehorende interpretatie. In feite geeft het radargram een dwarsdoorsnede van een onzichtbaar gedeelte van de constructie. Uit de figuur is op te maken dat de interpretatie van de meetgegevens niet eenvoudig is. ^{figuur 4}

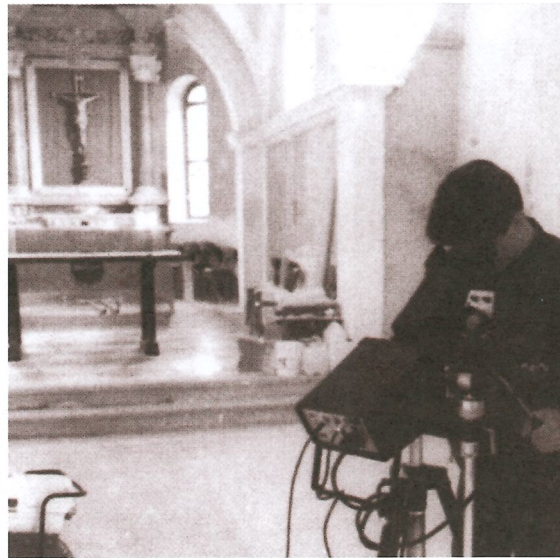
De kosten verbonden aan het inhuren van een deskundige met apparatuur bedragen € 317,65 tot € 408,40 per dag. De prijs van de toegepaste radarsystemen varieert van € 19.058,77 tot € 40.849,22 (Sensor & Software – Canada, Geophysical Survey Systems – USA, ERA – Groot-Brittannië).

Infraroodthermografie

Meet men met de radarsystemen door het oppervlak heen in het materiaal (vandaar de term surface penetrating radar), bij infraroodthermografie meet men juist alleen verschijnselen direct aan het oppervlak van het materiaal. Bij toepassing van infraroodthermografie wordt gebruik gemaakt van het natuurkundige gegeven dat verschillende materialen verschillende warmtestraling afgeven. De infraroodcamera neemt een temperatuurverschil aan het oppervlak waar dat voortkomt uit verschillen in straling vanuit

de ondergrond. Met thermografie kunnen een aantal bouwfysische problemen niet-destructief worden onderzocht, zoals de aanwezigheid van koudebruggen, fouten die zijn gemaakt bij het aanbrengen van warmte-isolatie, en verspreiding van vocht in de constructie (zie voor dit laatste § 4.3). Verschillen in oppervlaktetemperatuur kunnen ook duiden op de toepassing van verschillende materialen, de aanwezigheid van holten, en losliggende lagen. Daar de camera een emissiebeeld van het oppervlak weergeeft, komt er geen informatie vrij over hoe diep onder het oppervlak een wijziging van structuur of materiaal optreedt.

Vergelijken we radar met infraroodthermografie, dan meet radar over de diepte en thermografie aan het oppervlak. De informatie over het optreden van wijzigingen bijvoorbeeld in structuur en materiaal als functie van de diepte is bij surface penetrating radar vrij nauwkeurig en bij infrarood thermografie ongewis. Thermografie geeft echter een goed overzichtsbild van een wand of een gevel, terwijl met radar in feite doorsneden worden gegeneerd. ^{figuur 5}



figuur 5

Thermografisch onderzoek in de kathedraal te Sibenik, Kroatië

Infraroodthermografie wordt succesvol toegepast bij bijvoorbeeld het opsporen van dichtgemetselde openingen in gepleisterde muren en houtwerkconstructies achter pleisterwerk. ^{figuur 6}

De kosten verbonden aan het inhuren van een deskundige met apparatuur bedragen € 317,65 tot € 408,40 per dag. De prijs van een kleurenthermografiesysteem varieert van € 13.613,41 tot € 40.840,22 (Inframetrics – USA, AGA – Zweden, Avio Nipon Avionics – Japan).

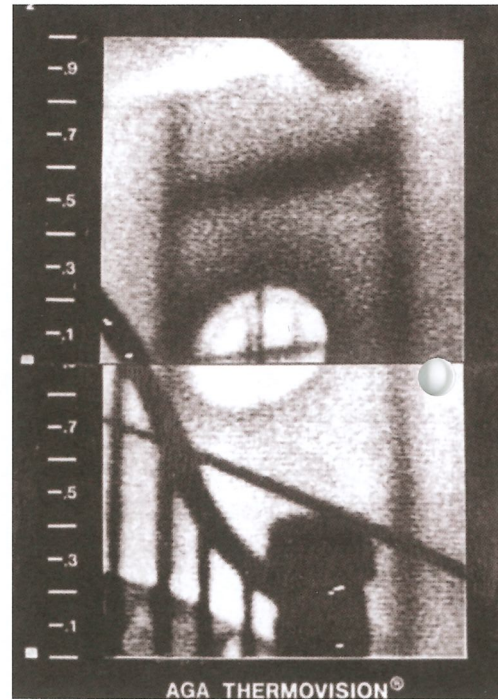
Ultrageluid

Net als met de elektromagnetische golven van de surface penetrating radar kan ook met de geluidsgolven van een ultrageluid (ultrasoon) meetsysteem in het materiaal zelf worden gemeten.

Een ultrageluidssysteem bestaat uit twee antennes (een zend- en een ontvangantenne), een tweekanaals digitale oscilloscoop die de signalen registreert, en een computer voor de opslag en verwerking van gegevens. Het ultrageluid, hoogfrequente geluidsgolven (meer dan twintig kHz), wordt via de

zendantenne het materiaal in gezonden en opgevangen door de ontvangantenne. Afhankelijk van de materiaalsoort en eventuele schade verliest het ultrageluid energie. Hierdoor ontstaan verschillen in de voortplantingssnelheid van het geluid. Op deze wijze kan aantasting van hout (hogere porositeit dan het oorspronkelijke materiaal) worden gedetecteerd. ^{figuur 7} De methode kan ook worden toegepast op natuursteen. De meetmethode is vooral geschikt om afwijkingen op te sporen, zoals scheuren, insluitingen en holten in homogene materialen. De meetresultaten worden geëvalueerd door vergelijking van signalen van onaangestast en aangestast materiaal. ^{figuur 8}

De prijs van een ultrageluidssysteem varieert van € 1588,23 tot € 8168,04 (Krautkrämer – Duitsland, Panametrics – USA, Proceq – Zwitserland).



figuur 6

De detectie van een houtwerkconstructie in het Golden Kreuzgebouw te Regensburg, Duitsland



figuur 7

Ultrageluidsonderzoek naar aantasting van houten balkkoppen in het Opekakasteel te Vinica, Kroatië

ten knaagkarakteristiek van de houtaantaster. Het geluid dat de houtaantastende larve bij het knagen in het hout maakt, blijkt namelijk per soort insect te verschillen. Door dit geluid te registreren en onderzoeken kan worden vastgesteld of er sprake is van een actieve aantasting en zo ja, welke soort of soorten insecten het betreft. De knaagkarakteristiek wordt bepaald met zeer gevoelige sensoren, die de trilling registreren die wordt veroorzaakt door het knagen. Voor meer informatie kan men terecht bij J.D. de Jong van TNO-Bouw.

Endoscopie

Een moderne variant op het aloude spiegelkje waarmee men om een hoekje via kleine gaten, luiken en dergelijke in en tussen constructies kan kijken, is de endoscoop. Bij deze techniek, die in de medische wereld is ontwikkeld, wordt een star of flexibel kijk-instrument (een endoscoop – 'binnenkijker')

figuur 8

Analyse van ultrageluidsmeetresultaten van kolommen in de Gazi Husrevbegmoskee te Sarajevo, Bosnië en Herzegovina



BEETLE

Een geheel andere toepassing van geluidstechniek vormt het zogenoemde BEETLE meetsysteem. Dit systeem is ontwikkeld door TNO-Bouw en wordt gebruikt voor de detectie van houtaantastende insecten. Het systeem is gebaseerd op de bepaling van de zogehe-

gebruikt, dat behalve van een stelsel van lenzen ook van een lichtbron is voorzien.

Bij deze visuele inspectiemethode is het mogelijk om door openingen die niet groter zijn dan een centimeter, inwendige delen van een constructie te observeren en de conditie te controleren. De methode is



figuur 9

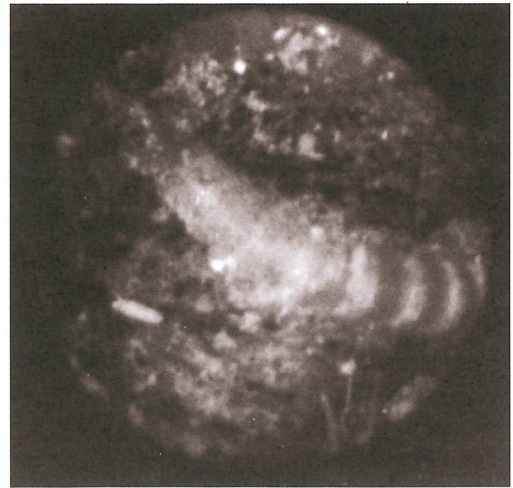
Links endoscopie-onderzoek in het stadhuis te Sommacampagna, Italië, onder een geregistreerde houtboktor (zie pijltje) in het Veliki Tabor-kasteel, Kroatië

meestal wat destructief (wanneer er een gat moet worden geboord), maar de schade is gering. Endoscopie wordt regelmatig toegepast om de conditie van steenachtige materialen en houten constructieonderdelen te evalueren. Een voorbeeld is inwendige inspectie van balkkoppen (onderzoek naar aantasting door schimmels of insecten). *figuur 9*

De prijs varieert van € 589,91 voor stijve endoscopen tot € 93020,49 voor flexibele endoscopen en video-systemen (Olympus – Japan, Jenna – Duitsland enzovoort). *figuur 10*

Voeghardheidsmeter

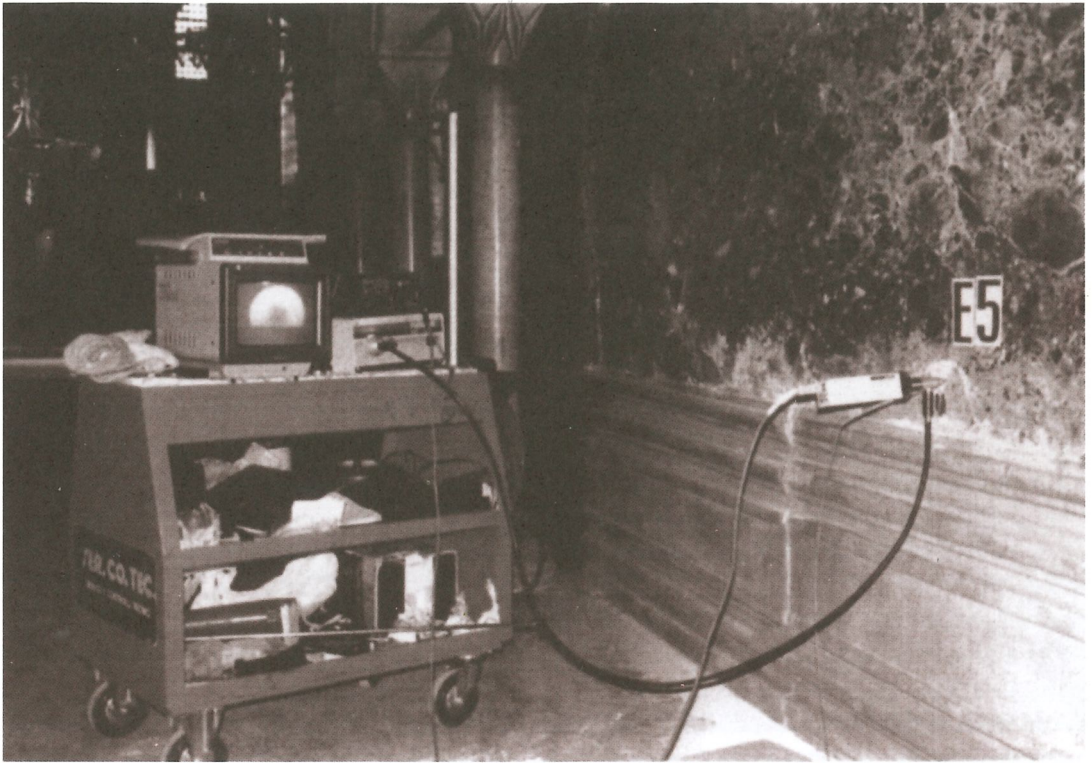
Voor de beoordeling van betonconstructies zijn diverse niet-destructieve onderzoeksmethoden ontwikkeld. Eén groep daarvan wordt gevormd door de terugslaghamers. Naarmate een oppervlak harder is, zal een voorwerp dat erop wordt geslagen een grotere terugslag krijgen. Een variant hierop vormt de door TNO-Bouw ontwikkelde voeghardheidsmeter. De hardheid van een voeg is mede afhankelijk van de samenstelling, mate van verdichting en de hechting. Bij toepassing in de restauratie moet men echter vooral niet uit het oog verliezen dat men slechts een grootheid meet die is afgeleid van bepaalde eigenschappen van de mortel. Het systeem is bovendien vooral ontwikkeld voor en getest op de cement-zand-



mortels die bij nieuwbouw worden toegepast. Bij restauraties worden vaak andere, niet zelden veel zachtere mortels toegepast dan in de nieuwbouw. Wel is het apparaat geschikt om te controleren of een bepaalde, bij proefvlakken vastgestelde kwaliteit en werkwijze constant is toegepast.

Decay Detecting Drill

Een andere indirecte meetmethode, die als weinig-destructief kan worden gekenschetst, is de bepaling van de weerstand die een boor ondervindt wanneer er



figuur 10

Video van endoscopie in de Hagia Sophia te Istanbul, Turkije

een gat in een materiaal wordt geboord. Deze methode wordt in het laboratorium (bijvoorbeeld van het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium in Brussel) onder andere gebruikt om de effectiviteit van steenverstevigende middelen te beoordelen. Een vergelijkbare, in de bosbouw ontwikkelde methode is die van de decay detecting drill of DDD-methode. Met een zeer dunne, lange boor, waarop een constante druk wordt uitgeoefend, boort men in het hout van bijvoorbeeld vloerbalken. De indringdiepte wordt daarbij gedurende het boren geregistreerd, zodat men een indruk krijgt van de snelheid waarmee de boor zich een weg door het hout baant. Dit geeft een beeld van de zwakke plekken, zoals scheuren en aangetaste delen. De schade aan de onderzochte balken beperkt zich tot enkele, millimeter grote gaatjes.

Metaaldetectie

Een inmiddels wat vergeten moderne onderzoeksmethode is de metaaldetectie. Ook hier gaat het om een van oorsprong militaire ontwikkeling, want de eerste metaaldetectoren dienden om verborgen landmijnen op te sporen. Inmiddels is hun militaire betekenis afgenomen omdat veel moderne antipersonenmijnen en antitankmijnen geen metalen onderdelen meer bevatten. Voor het opsporen van leidingen en van ankers en doken in stenen constructies worden nog steeds metaaldetectoren gebruikt, evenals in de archeologie. De apparaten reageren op een verstoring die een magnetisch veld door metalen voorwerpen ondergaat. Bij de meeste detectoren wordt een dergelijke verstoring door een akoestisch signaal kenbaar gemaakt.

Overigens moet hier uitdrukkelijk worden vermeld dat in een aantal gemeenten het gebruik van metaaldetectoren in de Algemene Plaatselijke Verordening is verboden, en verder is het op grond van de Monumentenwet 1988 weliswaar niet verboden om metalen voorwerpen met een metaaldetector op te sporen, maar wel om ze vervolgens op te graven (doet men dit wel, dan begaat men een misdrijf).

4.3 Vocht-/temperatuurverdeling in constructies

Vocht speelt een belangrijke rol bij schadeprocessen in bouwmaterialen. Zo kan het leiden tot ongelijkmatige uitzetting en vorstschade. Vocht dient als transportmiddel voor oplosbare zouten en als medium voor chemische reacties. Beheersing van de vocht-huishouding is absoluut noodzakelijk om de duurzaamheid van gebouwen te verhogen, maar dit lukt lang niet altijd.

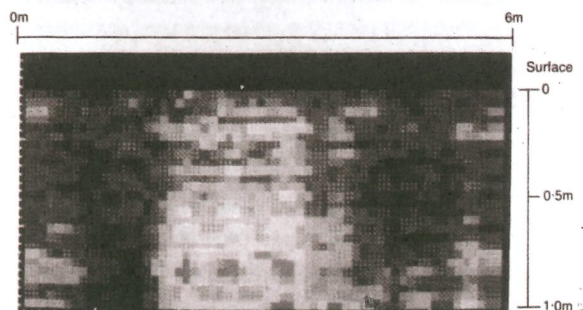
Om informatie te verkrijgen over de vochtverdeling in een bouwwerk kunnen de volgende, al in § 4.2 genoemde technieken gebruikt worden: thermografie, radar en de (elektrische) weerstandsmethode.

Thermografie

Vochtmeting met behulp van thermografie is gebaseerd op het fysische verschijnsel dat door bevochtiging de warmtegeleidbaarheid van materialen verandert. Hierdoor zullen verschillen in vochtgehalte in een muur verschillen in de temperatuurverdeling aan het oppervlak veroorzaken. Het thermogram geeft duidelijk de verschillen tussen droge en vochtige plekken weer. Daar de relatie tussen warmtegeleidbaarheid en vochtgehalte materiaalafhankelijk is, moet men echter voorzichtig zijn bij de interpretatie. Er is per materiaal een ijking nodig om tot enigszins nauwkeurige uitspraken over vochtgehalten te kunnen komen.

Radar

Versillen in vochtgehalte kunnen ook met behulp van radar worden vastgesteld, door het meten van de diëlektrische eigenschappen van de onderzochte bouwdelen. De diëlektrische eigenschap (de mate waarin een stof een isolator van elektrische stroom is) heeft namelijk invloed op elektromagnetische velden en dus ook op elektromagnetische golven in het materiaal. De diëlektrische eigenschappen van een



figuur 11

Vochtverdeling in een negentiende-eeuwse treinbrug (loodrecht op de muur), bepaald met behulp van radaronderzoek, te Brunel, Groot-Brittannië. Lichte kleuren: vochtig; donkere kleuren: droog



figuur 12

Geo-elektrische weerstandmeting in Delfshaven (Albrechtskolk), Rotterdam

bouwmateriaal worden doorgaans zeer sterk beïnvloed door de aanwezige hoeveelheid vocht. Een volkomen droge baksteen is een bijna absolute isolator voor elektrische stroom, een enigszins vochtige baksteen heeft al snel een aanmerkelijke geleidbaarheid. Het meten van diëlektrische eigenschappen van materialen met radar is daarom een effectieve manier om vochtverschillen vast te stellen.^{figuur 11} Evenals voor thermografie geldt dat de radarresultaten vergelijkende informatie geven over de vochtverdeling, en geen absolute waarden.

Elektrische weerstandsmeting

Hetzelfde geldt voor de elektrische weerstandsmeting. Bij deze methode wordt een elektrisch gelijkstroomveld door twee of meer elektroden in het bouwdeel ingebracht. Door het meten van spanningsverschillen tussen de sondes en de stroomsterk-

te in de bedrading kan een schijnbare specifieke elektrische weerstand berekend worden. Door de afstand tussen de sondes te variëren kan men de elektrische weerstand dieper of minder diep in een constructie bepalen. Via een computerprogramma kan een beeld van de vochtverdeling over de diepte van een bouwdeel verkregen worden. Ook hier kan door de grote verschillen in geleidbaarheid van droge en natte bouwmaterialen het vochtgehalte tamelijk nauwkeurig bepaald worden.^{figuur 12}

Voor het meten van de houtvochtigheid zijn diverse eenvoudige apparaten op de markt, die doorgaans werken met twee dunne pinnetjes (de elektroden) die in het hout gedrukt worden. Het apparaat meet de weerstand die een elektrische stroom tussen beide pinnetjes ondervindt en vertaalt dit naar een houtvochtigheidspercentage. Deze apparaten hebben vaak een uitlezing die nauwkeuriger lijkt dan die in

werkelijkheid is (wat men soms al kan vaststellen door het apparaat een kwartslag gedraaid op dezelfde plek nogmaals in het hout te steken), maar als snelle, handige en goedkope methode om een goede indicatie van de houtvochtigheid op verschillende plekken te verkrijgen, voldoen ze zeker.

De prijs van weerstandsmetingsapparatuur varieert van € 81,68 (voor eenvoudige hand-leesmeetapparaten (Koenders – Nederland) tot € 24957,91 voor een geo-elektrisch meetsysteem (Geophysical Survey Systems – USA).

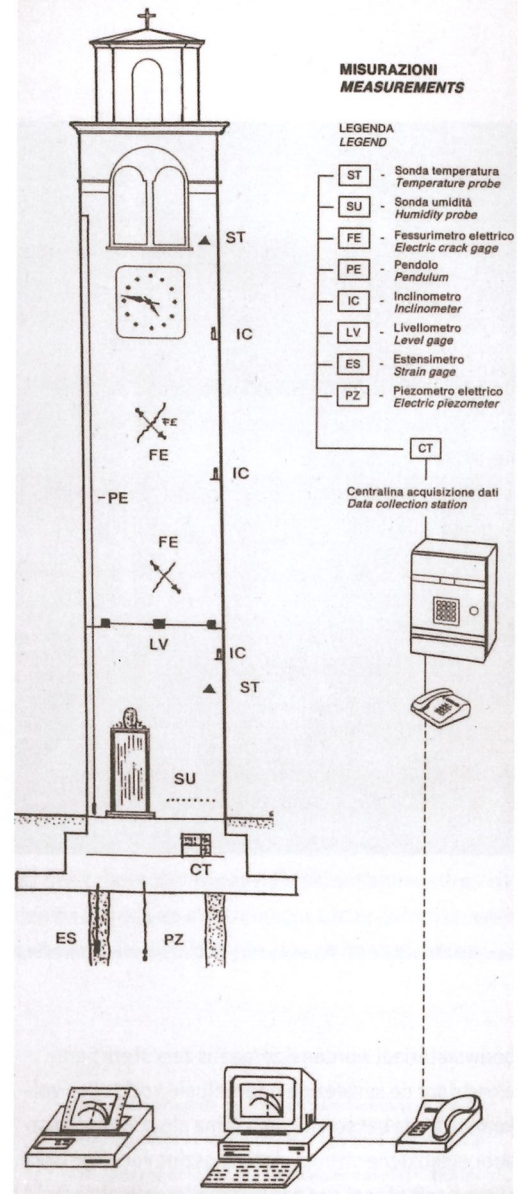
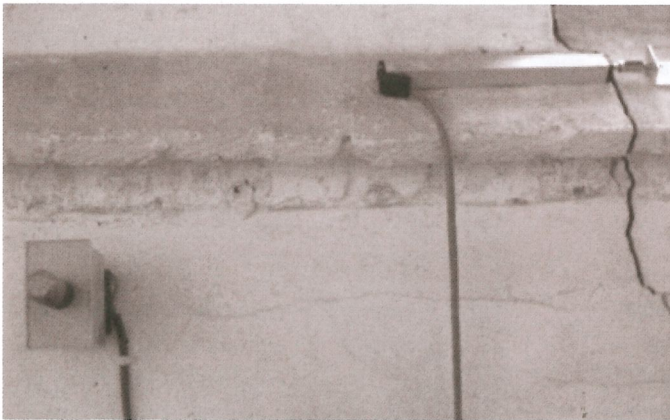
Sensormonitoringssysteem

Is men geïnteresseerd in processen van langere duur, dan is monitoring van veranderingen de aangewezen weg. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van een sensormonitoringssysteem. ^{figuur 13}

Bij monitoringssystemen worden de meetwaarden van de sensoren opgeslagen in een data-acquisitiebox en verder geanalyseerd met een personal computer of laptop en de benodigde software. Soms wordt daarbij ook gebruikgemaakt van modemverbindingen. Het monitoringssysteem stuurt dan via een gsm-verbinding gegevens naar het modem van de computer, waar ze worden verwerkt. Zo kan men op

figuur 13

Sensormonitoring van scheurbreedte (2) en de invloed van omgevingstemperatuur en vochtigheid (1) in de Oude Kerk te Delft



figuur 14

Sensormonitoringsschema

afstand (bijvoorbeeld bij een onderzoeksinstituut) informatie krijgen over een gebouw.^{figuur 14}

In feite kunnen alle digitaal uitleesbare sensoren op een monitoringssysteem worden aangesloten. Zo kan men gelijktijdig heel verschillende grootheden volgen: luchttemperatuur, oppervlaktetemperatuur van materialen en temperatuur in materialen met thermometers; luchtvochtigheid met hygrometers; vochtigheid van materialen met elektrische weerstandsmeters of capacitieve relatieve vochtigheids-sensoren; en bewegingen in gebouwen met verplaatsingsopnemers, snaarrekopnemer en niveauperanderingsopnemers. Eventueel kan men gelijktijdig ook de condities buiten (luchtvochtigheid, temperatuur, neerslag, windrichting, windsnelheid en luchtverontreiniging) meten, of het gedrag van de klimaatbehandelingsinstallaties (verwarming, airconditioning) in de te verzamelen gegevens opnemen. In principe is het zelfs mogelijk om de kassa van een museum (aantal bezoekers) op een kanaal van het data-acquisitiesysteem aan te sluiten. Het is echter van groot belang om vooraf het probleem gedegen te analyseren en te bepalen welke parameters van significante betekenis zijn. Heeft men te veel parameters in de metingen betrokken, dan wordt niet alleen de kostprijs onnodig hoog, maar ook de interpretatie lastiger. Kiest men daarentegen te weinig parameters, dan zal men de optredende verschijnselen niet uit de meetgegevens kunnen verklaren.

Capacitieve relatieve vochtigheidssensoren

Om de effectiviteit van de bestrijding van optrekkend vocht te meten kan men bijvoorbeeld volstaan met een of enkele capacitieve relatieve vochtigheidssensoren. Deze worden in boorgaten (van ongeveer vijftien millimeter) op verschillende diepten geplaatst. Het is uiteraard noodzakelijk dat deze boorgaten hermetisch worden gesloten, om invloed van de omgeving op deze minivochtsensoren te vermijden.^{figuur 15} De prijs van een voor dit doel toepasbare capacitieve relatieve vochtigheidssensor bedraagt € 90,76 (G.R. engineering – Nederland). Eenvoudige vervormingssensoren kosten € 36,60 tot € 102,10 (Gefran – Italië, Gauge Technique – Groot-Brittannië) en data-acquisitiesystemen, onder andere afhankelijk van het aantal meetkanalen, € 372,10 tot € 3085,71 (GR engineering – Nederland, SIAP- Italië, Field electronics – Groot-Brittannië).

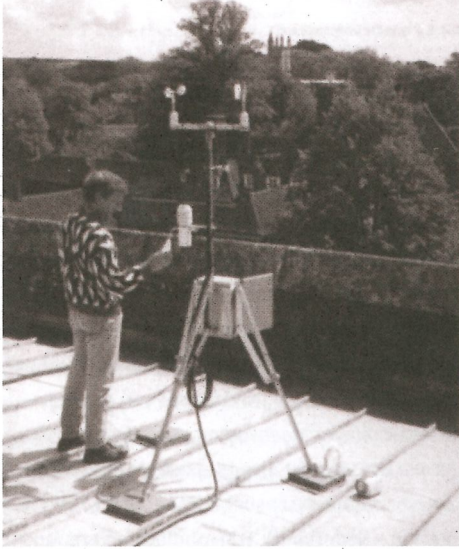
4.4 Onderzoek van de omgeving

Informatie over de omgevingscondities kan van groot belang zijn voor de interpretatie van schadeontwikkeling in bouwwerken, bijvoorbeeld bij vochtschade en zoutschade. Er zijn tal van weerstations op de markt waarmee de veranderingen in de omgevingscondities gevolgd kunnen worden; de belangrijkste parameters zijn luchtvochtigheid, temperatuur, wind en luchtverontreiniging. Uiteraard kan men desgewenst ook sensoren plaatsen in peilbuizen om de

figuur 15

Vochtveranderingsmeting met sensoren in de Suomentinnakastel-Finland





figuur 16

Weerstation op de kathedraal van Winchester,
Groot-Brittannië

hoogte van de grondwaterstand te monitoren of andere significante invloeden uit de omgeving in kaart te brengen.^{figuur 16}

Met dergelijke systemen kunnen bijvoorbeeld de thermohygrische bewegingen (dagelijks en per seizoen) aan de verschillende gevels in kaart worden gebracht met sensoren (de dagelijkse veranderingen op de zuidelijke kant van een gebouw kunnen behoorlijk verschillen met die aan de noordelijke kant). Het is belangrijk dat de luchttemperatuur binnen en buiten het gebouw tegelijkertijd gemeten worden. De sensormeting van zwaveldioxide (SO₂) en stikstofdioxide (NO₂) is nuttig omdat een link gelegd kan worden met het ontstaan van gips aan gemetselde constructies, terwijl de neerslagmeting van belang is voor het volgen van vochttransporten in constructies. De windrichting en windsnelheid kunnen – zeker bij hogere monumentale gebouwen zoals torens – van invloed zijn op de vervormingen en verder uitergaard op de luchtstromingen en temperatuur binnen. De gegevens worden opgeslagen in de data-acquisitie-unit en regelmatig uitgelezen of met een gsm-verbinding verzonden naar het modem van de computer waarmee de berekeningen worden uitgevoerd. De prijs van omgevingssensoren varieert van € 8,17

voor temperatuursensoren tot € 408,40 voor gekoppelde windrichtings- en snelheidssensoren (Oldham – Frankrijk, Figaro – Japan, GR engineering – Nederland). Voor de prijs van de noodzakelijke data-acquisitie: zie § 4.3.

A.J. van Bommel is architect-adviseur restauratie bij het Atelier Rijksbouwmeester (Rijksgebouwendienst).

C.J.W.P. Groot is senior onderzoeker bij de Technische Universiteit Delft, faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Gebouwen en Bouwtechniek.

S. Heruc is toegevoegd onderzoeker bij de Technische Universiteit Delft, faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Gebouwen en Bouwtechniek.

A. de Waal is zelfstandig ondernemer. Hij verwierf vooral bekendheid met zijn methode om op basis van stereofotografie tekeningen te vervaardigen en beweegt zich tot op heden als consultant op het terrein van (geavanceerd) bouwtechnisch onderzoek.

Literatuur

- › Daniels, D.J.: *Surface penetrating radar*. ISBN 0-85296-862-0. London: 1996.
- › Heruc, S.: *Non-destructive testing on historical monuments*. ISBN 90-5269-225-4. Delft: 1997.
- › Kahle, M.: *Verfahren zur Erkundung des Gefügestandes von Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten*. ISBN 3-925285-25-3. Karlsruhe: 1995.
- › Leschnik, W. en H. Venzmer: *Bauwerksdiagnostik und Qualitätsbewertung*. ISBN 3-931681-12-2. Fraunhofer IRB Verlag, 1997.
- › Wenzel, F., Gigla, B., Kahle en G. Stiesch: *Mauerwerk, Sonderforschungsbericht 315*. Universität Karlsruhe: 1997.
- › Bedrijfsdocumentatie van De Waal – Nederland, G.R. Engineering – Nederland, Ridout – UK Van Hoogevest architecten – Nederland en Serco-tec – Italië.

Verantwoording illustraties

- Figuur 1, 3, 5, 7, 9, 14 en 16 – S. Heruc
- Figuur 2 – DelftTech BV
- Figuur 4, 12 – D.J. Daniel, *Surface penetrating radar*
- Figuur 6, 13 – A. de Waal
- Figuur 8, 9, 10, 11, 15 – Almesberger
- Figuur 13 – M. Kahle
- Figuur 17 – Ridout

Bijlage

Overzicht van een aantal niet- of weinig-destructieve meettechnieken op monumentale gebouwen

Meetmethode	Principe	Toepassing	Beperkingen
Meetklokje	Afstandmeting tussen twee gefixeerde punten	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluatie scheuren - Meten doorbuigingen 	Alleen toepasbaar op de oppervlakte
Endoscopie	Visuele inspectie door kijker(s) met externe lichtbron	<ul style="list-style-type: none"> - Constructiemorfologie - Conditie van houten constructies en hun ondersteuning 	Meestal alleen door bestaande openingen
Monitoring	Sensormeting gekoppeld aan een data-acquisitiesysteem	<ul style="list-style-type: none"> - Vervorming - Vocht - Temperatuur 	In geval van draadloze (telemetrie) toepassing in het begin hoge kosten
Radar	Snelheidsmeting van elektromagnetische impulsen tussen twee sondes	<ul style="list-style-type: none"> - Constructiemorfologie - Vochtigheidsprofielen, relatieve vochtgehalten - Holtes - Verborgene metalen onderdelen 	In het begin hoge kosten; de meting van de vochtigheid is slechts mogelijk tot beperkte diepte
Thermografie	Meeting van infrarode straling	<ul style="list-style-type: none"> - Muurmorfologie - Dichtgemetselde ruimtes - Vochtzones 	In het begin hoge kosten Dimensies zijn niet precies te bepalen Geen meting van het vochtgehalte
Ultrageluid	Snelheidsmeting van golven tussen twee sondes	<ul style="list-style-type: none"> - Homogeniteit materiaal - Holtes 	Alleen bruikbaar bij homogene constructieonderdelen, tot maximaal één meter diepte
Weerstandsmeting	Stroomsterktemeting tussen sondes	<ul style="list-style-type: none"> - Vochtzones - Corrosie van metalen onderdelen 	Hoge aanvangskosten; de gegevens worden achteraf in kaart gebracht

