Auteur Pim Loef[1], Floris Smits[2], Reinier Veenhoff[2], Marc Kooij[2]

1) Schneider Electric
2) SPIE

Predictive maintenance als motor voor circulariteit

De verduurzaming van de gebouwde omgeving vraagt niet alleen om minder energiegebruik, maar ook om een reductie van de materiaalgebonden milieu-impact van klimaatinstallaties. Daarbij groeit ook de aandacht voor circulaire ontwerpprincipes zoals losmaakbaarheid, onderhoudbaarheid en modulariteit: installaties moeten niet alleen efficient functioneren, maar ook zodanig zijn opgebouwd dat onderdelen bereikbaar, vervangbaar en herbruikbaar blijven. Binnen het MOOI-project Circulaire Klimaatinstallaties onderzoekt een consortium van 18 partijen hoe digitalisering – en in het bijzonder voorspellend onderhoud – kan bijdragen aan langere levensduur, minder verspilling en circulair beheer. Dit artikel beschrijft hoe predictive maintenance in de driehoek Techniek-Mens-Omgeving impact heeft op de circulariteit van klimaatinstallaties.

Het MOOI-project is georganiseerd rond zes samenhangende resultaten: van het vaststellen van ontwerp- en evaluatiekaders (resultaat 1), het ontwikkelen van circulaire producten (resultaat 2), nieuwe businessmodellen en ketensamenwerking (resultaat 3), validatie in Living Labs (resultaat 4), het bouwen van een learning community (resultaat 5) tot monitoring en digitalisering (resultaat 6). Binnen resultaat 4 is onder andere de rol van control en predictive maintenance binnen deze

Foto 1: *Continue meting van temperatuur, druk, luchtvochtigheid, trillingen en energieverbruik maakt het mogelijk om met behulp van data-analyse en algoritmen afwijkingen vroegtijdig te detecteren en hier op te anticiperen in het onderhoudproces.*

MOOI-project Circulaire Klimaatinstallaties

De MOOI-regeling (Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie) stimuleert consortia die innovaties ontwikkelen voor de Nederlandse energie- en klimaatdoelstellingen, met als uitgangspunt dat de ontwikkelde oplossingen binnen vijf tot tien jaar praktisch toepasbaar moeten zijn. Binnen deze regeling werken achttien partijen samen aan het vraagstuk rondomcirculaire klimaatinstallaties met als ambitie een halvering van de Whole Life Carbon – Global Warming Potential (WLC-GWP), en op termijn een reductie van 78% van de milieu-impact over de gehele levenscyclus. Dat de urgentie groot is, blijkt uit recent onderzoek: bij de verduurzamingsopgave van bestaande woningen en utiliteitsgebouwen is het grootste deel van de materiaalgebonden milieu-impact toe te rekenen aan installaties.[1] Daarnaast scherpt de EU de eisen aan via de herziene Energy Performance of Buildings Directive (EPBD IV), die lidstaten verplicht tot strengere prestaties en transparantie over de hele levenscyclus van gebouwen.[2]

circulaire opgave onderzocht. Daarbij wordt nadrukkelijk gekeken hoe digitale informatie over de conditie en het gebruik van de installatiedelen kan helpen als input om nieuwe ontwerpprincipes als losmaakbaarheid, modulaire vervanging en levensduuroptimalisatie te ontwikkelen wat bijdraagt in een langer en beter gebruik van de installatiecomponenten in de beheerfase.

Predictive maintenance: van reactie naar voorspelling

Predictive maintenance – voorspellend onderhoud – verschilt van traditionele onderhoudsstrategieën. Waar correctief onderhoud reageert op storingen en preventief onderhoud werkt met vaste schema's, baseert predictive maintenance zich op de werkelijke conditie van de installatiecomponenten. Continue meting van temperatuur, druk, luchtvochtigheid, trillingen en energieverbruik maakt het mogelijk om met behulp van data-analyse en algoritmen afwijkingen vroegtijdig te detecteren en hier op te anticiperen in het onderhoudproces.
Binnen klimaatinstallaties zijn typische slijtagepunten goed bekend: lagers en ventilatoren slijten door continue rotatie, filters raken verstopt, compressoren ondervinden mechanische stress door drukverschillen en kleppen en leidingen kunnen corroderen of verkalken. Onopgemerkte slijtage leidt tot verminderd comfort, hogere energiekosten door inefficiëntie en versnelde slijtage van andere componenten door overbelasting. Door deze signalen tijdig op te vangen, kan een installatie langer op het oorspronkelijke prestatieniveau blijven functioneren.

Wanneer installaties modulair zijn opgebouwd, krijgt deze informatie extra waarde. Predictive maintenance maakt dan niet alleen zichtbaar dát onderhoud nodig is, maar ook welk onderdeel of welke module gericht aandacht vraagt. Daarmee wordt voorkomen dat grotere installatiedelen worden vervangen terwijl slechts één component technisch aan het einde van zijn levensduur is.
De gerapporteerde effecten van predictive maintenance variëren per sector. Binnen industriële maakprocessen wordt een levensduurverlenging van 20–40% en een reductie van ongeplande downtime tot circa 50% beschreven.[3] Voor klimaatinstallaties tonen studies aan dat conditiegestuurd en voorspellend onderhoud de Mean Time Between Failures (MTBF) aanzienlijk verhoogt en storingen substantieel reduceert, met een levensduurverlenging die richting 30–50% kan oplopen bij goed onderhouden systemen. Het is belangrijk te benadrukken dat dit indicatieve cijfers zijn die afhangen van installatietype, gebruik en datakwaliteit; binnen het MOOI-project worden deze referentiegetallen daarom in de Living Labs verder onderzocht.

Waarom is dit relevant voor circulariteit?

De koppeling tussen predictive maintenance en circulariteit ligt niet alleen in het verlengen van levensduur, maar raakt vrijwel alle treden van de R-ladder. Het Nationaal Programma Circulaire Economie van de Nederlandse overheid hanteert R-strategieën die lopen van Refuse en Rethink tot Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture en Recycle.[4] Predictive maintenance werkt vooral in op Reduce, Repair en Refurbish: door onderhoud te baseren op werkelijke conditie in plaats van vaste schema's worden bruikbare onderdelen niet onnodig vervangen en kan de werkelijke maximale levensduur worden benut.
Een aanvullende circulaire meerwaarde ontstaat, wanneer predictive maintenance wordt gekoppeld aan losmaakbaarheid en modulariteit. Losmaakbaarheid maakt het praktisch mogelijk om onderdelen zonder onnodige schade of waardeverlies te demonteren. Modulariteit maakt het mogelijk om afzonderlijke

functionele eenheden te vervangen, te reviseren of opnieuw toe te passen. Predictive maintenance levert hiervoor de conditie-informatie: welke onderdelen zijn nog bruikbaar, welke vragen onderhoud en welke zijn geschikt voor revisie of hergebruik? Vier mechanismen zijn daarbij in het bijzonder relevant. In de eerste plaats voorkomt vroegtijdige detectie dat slijtage van één onderdeel andere componenten beschadigt; dit reduceert de hoeveelheid materiaal die voortijdig wordt afgeschreven. In de tweede plaats maakt slimme aansturing – bijvoorbeeld op basis van druk, temperatuur en energieverbruik – het mogelijk om schakelmomenten van pompen, ventilatoren en koelgroepen te optimaliseren, wat zowel de mechanische slijtage als de operationele CO_2-uitstoot verlaagt en daarmee bijdraagt aan een lagere Whole Life Carbon. In de derde plaats zorgt beheer op afstand voor minder aanrijdbewegingen door servicemonteurs, met directe gevolgen voor zowel emissies als arbeidsproductiviteit in een sector die kampt met personeelstekorten. Tot slot biedt voorspellend onderhoud het fundament voor circulaire businessmodellen zoals Product-as-a-Service, waarin de fabrikant of installateur eigenaar blijft van de installatie en daardoor een direct belang heeft bij langere levensduur, hergebruik en revisie. In dat laatste mechanisme spelen losmaakbaarheid en modulariteit een ondersteunende rol. Wanneer componenten goed toegankelijk en uitwisselbaar zijn, wordt het eenvoudiger om onderhoud te richten op behoud van waarde: repareren waar mogelijk, vervangen waar nodig en onderdelen met restwaarde beschikbaar houden voor hergebruik of refurbishment.

Juist dat laatste punt is een belangrijke verandering. In een Product-as-a-Service-model verschuift het verdienmodel van eenmalige verkoop naar prestatiegerichte vergoeding, gekoppeld aan beschikbaarheid en functioneren. Voorspellend onderhoud levert daarvoor de noodzakelijke informatie: data over conditie, gebruik en restwaarde maken het mogelijk om Service Level Agreements en pay-per-use-contracten realistisch te onderbouwen. Daarmee wordt de waardeketen geherconfigureerd: asset owners, asset managers, service providers, technology suppliers en data-analisten werken nauwer samen, vaak in ketenpartnerschappen of consortia, en delen data om gezamenlijk circulaire waarde te realiseren.

Foto 2: *Het MOOI-project signaleert hier expliciet een skills-gap en bouwt daarom binnen resultaat 5 een learning community en gerichte trainingen op, onder meer met TVVL, DGBC, Techniek Nederland, hogescholen en universiteiten.*

De driehoek Techniek – Mens – Omgeving

Op het technische vlak vereist voorspellend onderhoud een gelaagde infrastructuur: sensoren en regeltechniek op veldniveau, building controllers die meetdata samenbrengen, een open dataplatform voor uitwisseling én rekentools die op basis daarvan adviezen genereren. In een circulaire toepassing kan deze infrastructuur worden verrijkt met informatie over de modulaire opbouw van installaties, productpaspoorten en de losmaakbaarheid van componenten. Zo ontstaat naast inzicht in onderhoudsbehoefte ook inzicht in mogelijkheden voor gerichte vervanging, revisie en hergebruik. Aansluiting bij normen zoals NEN 2767 (conditiemeting) en methodieken zoals BOEI 2.0 zorgt dat onderhoudsbeslissingen aansluiten bij de bredere vastgoedpraktijk. Cybersecurity is hierbij een randvoorwaarde: zonder veilige data-overdracht en betrouwbare authenticatie ontstaat een onaanvaardbaar risico voor zowel de installatie als de organisatie.

Voor de mens verandert de rol van de onderhoudstechnicus en assetmanager. Waar voorheen werd gewerkt met vaste onderhoudsschema's en signalering achteraf, vraagt voorspellend onderhoud om datavaardigheden, vermogen tot interpretatie van trends en bereidheid om beslissingen te baseren op modellen in plaats van gewoonten. Daar komt bij dat monteurs en assetmanagers steeds vaker moeten kunnen beoordelen of een component na demontage geschikt is voor reparatie, revisie of hergebruik. Het MOOI-project signaleert hier expliciet een skills-gap en bouwt daarom binnen resultaat 5 een learning community en gerichte trainingen op, onder meer met TVVL, DGBC, Techniek Nederland, hogescholen en universiteiten. Voor gebruikers van gebouwen betekent voorspellend onderhoud minder ongeplande uitval en daarmee een stabieler binnenklimaat, wat direct doorwerkt in comfort, gezondheid en productiviteit.

De omgeving ten slotte ondervindt zowel directe als indirecte effecten. Directe effecten zijn de lagere materiaal- en energie-impact van langer en efficiënter gebruikte installaties. Indirecte effecten ontstaan doordat predictive maintenance de business case voor circulaire klimaatinstallaties versterkt: opdrachtgevers krijgen onderbouwing voor Total Cost of Ownership-benaderingen in aanbestedingen, fabrikanten worden gestimuleerd te ontwerpen voor losmaakbaarheid

Foto 3: *Monteurs en assetmanagers moeten steeds vaker kunnen beoordelen of een component na demontage geschikt is voor reparatie, revisie of hergebruik.*

(Design for Disassembly) en modulaire vervanging van componenten, en de keten als geheel kan eenvoudiger sturen op de WLC-GWP van een installatie. Dat sluit aan bij de transitieversnellers uit de Actieagenda Circulaire Installaties van TVVL, DGBC en Techniek Nederland.[5]

Onderzoek en validatie binnen het MOOI-project

Binnen het consortium wordt een aantal concrete vraagstukken onderzocht: hoe beïnvloeden minder slijtage en storingen de levensduur van componenten, welke effecten heeft predictive maintenance op vervoersbewegingen en stilstand, welke referentiegetallen zijn beschikbaar over levensduurverlenging, en wat zijn de redenen voor het tot nu toe beperkte gebruik in de gebouwgebonden installatietechniek?
Aan deze onderzoeksvragen kan een circulaire verdieping worden toegevoegd: in hoeverre helpt conditiedata om te bepalen of componenten geschikt zijn voor reparatie, revisie of hergebruik, en welke ontwerpkeuzes rond losmaakbaarheid en modulariteit zijn daarvoor randvoorwaardelijk?
Tijdens het project wordt er in verschillende sessies met partijen, zoals het Rijksvastgoedbedrijf (RVB), onderzocht hoe predictive maintenance en circulariteit aan elkaar kunnen worden gekoppeld binnen een grote publieke vastgoedportefeuille. Een enquête vanuit het consortium onder publieke stakeholders liet zien dat er ruimte is voor toepassing en dat al verschillende sensoren in gebruik zijn, maar dat samenwerking en data- governance een belangrijke randvoorwaarde is. Dat is een belangrijk inzicht: technische volwassenheid alleen is niet voldoende, ook publiek-private samenwerkingsvormen moeten worden ontwikkeld die de informatievoorziening van het RVB respecteren.

Vooruitblik

Predictive maintenance is in dit project geen doel op zich, maar een hefboom voor circulaire installatietechniek. De combinatie van digitalisering, conditiegestuurd onderhoud en nieuwe businessmodellen kan de levensduur van klimaatinstallaties significant verlengen, materiaalverspilling beperken en de Whole Life Carbon verlagen. Wanneer deze aanpak wordt gecombineerd met losmaakbare en modulaire installaties, ontstaat bovendien een betere basis voor gerichte vervanging, revisie en hoogwaardig hergebruik van componenten. Tegelijkertijd vraagt grootschalige toepassing om investeringen in datakwaliteit, cybersecurity, vakmanschap én in vertrouwen tussen ketenpartners. Het MOOI-project levert daarvoor in 2027 zowel concrete gevalideerde concepten als generieke kennis op, die via de learning community breed in de sector beschikbaar komen. ■

Referenties
[1] Copper8, Alba Concepts, Metabolic. Naar Circulaire Energierenovatie: sturen op milieu-impact bij energetische verduurzaming van gebouwen. Rapport in opdracht van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO), Amsterdam, 2024. Beschikbaar via: https://www.copper8.com/grote-kans-voor-circulaire-energierenovaties/
[2] Europese Unie. Richtlijn (EU) 2024/1275 van het Europees Parlement en de Raad van 24 april 2024 betreffende de energieprestatie van gebouwen (herschikking). Publicatieblad van de Europese Unie, L-serie, 8 mei 2024. Beschikbaar via: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj
[3] Mobley, R.K. An Introduction to Predictive Maintenance. Tweede editie, Butterworth-Heinemann / Elsevier, Amsterdam, 2002.
[4] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Nationaal Programma Circulaire Economie 2023–2030. Rijksoverheid, Den Haag, februari 2023. Beschikbaar via: https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie
[5] Techniek Nederland, Dutch Green Building Council (DGBC) en TVVL. Actieagenda Circulaire Installaties. Woerden / Amsterdam / Leusden, 2023. Beschikbaar via: https://tvvl.nl/kennisbank/actieagenda-circulaire-transitie/
[6] Productgroep Circulaire Klimaatinstallaties. Routekaart Circulaire Klimaatinstallaties. Voorlopige versie, maart 2025.
[7] CE Delft en Circonnect. Circulaire criteria voor klimaatinstallaties.
[8] Dutch Green Building Council, Alba Concepts, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland en W/E Adviseurs. Circular Buildings – een meetmethodiek voor losmaakbaarheid v2.0.