

Monitoring van de werkelijke comfortbeleving?

Geregeld wijkt de werkelijke comfortbeleving van gebouwgebruikers af van wat het comfortniveau theoretisch, op basis van het ontwerp, zou moeten zijn. Monitoringtools worden vandaag de dag gebruikt om de prestatie van het gebouwstelsel te meten en optimaliseren. In dit afstudeeronderzoek aan de TU/e, in samenwerking met DWA, is onderzocht wat de mogelijkheden zijn om de werkelijke comfortbeleving te monitoren.

P.L.W. (Peer) van Kemenade^{1,2}, M.G.L.C. (Marcel) Loomans¹, S. (Siem) Opschoor² en J.L.M. (Jan) Hensen¹

1.Department of the Built Environment, Technische Universiteit Eindhoven;
2.DWA

Een comfortabel binnenmilieu speelt een belangrijke rol in de productiviteit en tevredenheid van gebouwgebruikers [2,3]. Hoewel normen en richtlijnen voorzien in de wijze waarop een comfortabel binnenklimaat gecreëerd kan worden, bestaat er toch regelmatig een verschil tussen deze theorie en de werkelijke comfortbeleving van gebouwgebruikers [4,5,6]. Daarnaast zijn monitoringtools een opkomende niche in de prestatiebeoordeling van het gebouwstelsel, waarbij de verzamelde data door het gebouwbeheersysteem (GBS) geanalyseerd en beoordeeld worden. Naast monitoring van de klimaatinstallatie voorziet de monitoringtool ook in een beoordeling van het binnenklimaat (comfort) van een gebouw, gebaseerd op gemeten prestatie-indicatoren zoals temperatuur en CO₂-concentratie. Figuur 1 toont een voorbeeld van de web-interface van de beschouwde monitoringtool.

In dit onderzoek is de wijze van de waardering van het comfortniveau door de monitoringtool Monvisa [7] geëvalueerd. Daarnaast is ook een mogelijke methode onderzocht waarmee in de toekomst de beoordeling van het binnenklimaat met behulp van een monitoringtool

uitgevoerd kan worden. De volgende vragen worden in het onderzoek beantwoord:

- hoe representatief zijn de temperatuur- en CO₂-metingen die geregistreerd en gemiddeld worden voor de omstandigheden in een

- hele ruimte?;
- in hoeverre komt de beoordeling van het binnenklimaat door de monitoringtool overeen met de ervaring van de gebouwgebruikers?;



-Figuur 1- Web-interface en de verschillende niveaus waarop informatie getoond wordt. Van boven naar beneden: algemeen overzicht voor iedere categorie; overzicht van de dagelijkse, wekelijkse en maandelijkse prestatie van iedere gemonitorde ruimte; gedetailleerd overzicht en beoordeling voor iedere tijdstap met meldingen voor iedere ruimte (www.monvisa.info)

- welke mogelijkheden biedt een monitoringtool in combinatie met enquêtes in het bereiken van een comfortabel binnenmilieu?

METHODE

Het onderzoek bestaat uit drie delen (zie ter verduidelijking figuur 2). Eerst worden de data die door de monitoringtool gebruikt en gegenereerd worden vergeleken met data van aanvullend geplaatste meetapparatuur. Dit om de representativiteit van de gemonitorde data voor een ruimte te bepalen. De gemonitorde data zijn afkomstig uit het gebouwbeheersysteem, dat per ingestelde tijdstap een waarde wegschrijft. Dit kan bijvoorbeeld iedere seconde zijn of iedere x minuten. Van deze data worden door de monitoringtool ieder uur, al naar gelang de KPI, bijvoorbeeld de gemiddelde waarde berekend of de maximum- of minimumwaarde genomen. In het tweede deel van het onderzoek worden de gemeten en gemonitorde data getoetst aan grenswaarden voor een comfortabel binnenklimaat, die gegeven worden door bijvoorbeeld de ISO- of ISSO-normen (bijv. ISSO-publicatie 74 [13]). Hierbij worden ook de waarden die de monitoringtool als comfortgrenzen hanteert meegenomen, die kunnen afwijken van de waarden in de normen. Deze grenzen zijn gebaseerd op bijvoorbeeld instellingen in het GBS, of de regeltechnische omschrijving van de installatie, en kunnen dus per gebouw verschillen. Uit deze data-analyse volgt een voorspelling over de tevredenheid van de gebouwgebruikers met het binnenklimaat. In het laatste deel worden deze resultaten vergeleken met de werkelijke beleving van het binnenklimaat door de gebruikers, die bepaald wordt door middel van enquêtes. Hieruit wordt de overeenstemming met de verwachte resultaten op basis van de normen en de analyse door de monitoringtool bepaald.

Voor deze analyse zijn aanvullende metingen gedaan in drie gebouwen die gemonitord worden. Twee van deze gebouwen bevatten kantoren die elk plaats bieden aan ongeveer zes medewerkers. Het andere gebouw bevat een vrij recentelijk gerenoveerd deel met enkele grote kantoorruimten (ongeveer 30 personen). In dit gebouw wordt gebruikgemaakt van flexplekken. In elk gebouw is meetapparatuur geplaatst in drie ruimten. De opzet van de metingen is naar voorbeeld van Wagner et al. [8] en Choi et al. [9]. Met behulp van dataloggers zijn de volgende klimaatparameters gemeten: temperatuur, CO₂-concentratie en relatieve vochtigheid. Deze parameters worden ook als prestatie-indicatoren gebruikt door de monitoringtool voor de beoordeling van het binnenklimaat. Daarnaast is een klimaatboom gebruikt voor



-Figuur 2- De onderzochte relaties tussen de verschillende manieren van het bepalen van comfort

aanvullende metingen om de lokale PMV en PPD te bepalen. In de PMV-berekening zijn de waarden voor het metabolisme (met) en de kledingweerstand (clo) geschat op basis van observaties en enquêtes. De meetapparatuur is nabij werkplekken opgesteld. De metingen zijn gedaan gedurende de maanden mei, juni en juli 2013. De data van deze aanvullende metingen worden vergeleken met de meetdata uit het GBS (temperatuur en CO₂), om te achterhalen hoe groot de overeenstemming is en waar zich eventuele afwijkingen voordoen. De gebouwsensoren bevonden zich over het algemeen tegen de wand of in het verlaagd plafond. In dit artikel wordt slechts een deel van de meetresultaten getoond.

Als richtlijn voor een (theoretisch) comfortabel temperatuurbereik is de ISO 7730-norm [10] gehanteerd in dit onderzoek. Deze norm is gebaseerd op het thermisch comfortmodel van Fanger. Volgens klasse B, zoals gedefinieerd in de informatieve Annex van deze norm, zou een temperatuurbereik van $24,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$ (1,2 met; 0,5 clo) comfortabel moeten zijn voor de meeste gebruikers in de zomer. De monitoringtool hanteert voor de beschouwde gebouwen echter een temperatuurbereik van $21 \pm 2^\circ\text{C}$ als comfortabele zone, dit op basis van het persoonlijk inzicht van de verantwoordelijke ingenieur en de instellingen in het gebouwbeheersysteem. Het klimaatstelsel zal daarom op dit bereik voor de binnentemperatuur aansturen.

Naast de metingen zijn ook enquêtes onder de medewerkers van de bestudeerde gebouwen verspreid, waarin hen gevraagd is hoe zij het binnenklimaat ervaren. De resultaten hiervan zijn vergeleken met de meetresultaten. Hiervoor is een aparte enquête samengesteld, op basis van gangbare enquêtes zoals die van het CBE [11] en HOPE [12]. De vragen zijn voornamelijk gericht op de beleving van het thermisch binnenklimaat en de binnenluchtkwaliteit. In twee gebouwen is gedurende zes weken iedere week een enquête verspreid, naast een algemene enquête voorafgaand

aan de meetperiode. De resultaten van deze wekelijkse enquêtes zijn vergeleken met de dagelijkse beoordeling van het binnenklimaat door de monitoringtool. Hiermee wordt de waarde van de klimaatbeoordeling door de tool, op basis van de ingestelde comfortabele grenswaarden, bepaald. In het andere gebouw zijn twee enquêtes verspreid: één aan het begin van de meetperiode van tien weken, en één aan het eind.

RESULTATEN EN DISCUSSIE

Wanneer de waarden voor de temperatuur, gemeten door de geplaatste apparatuur op de werkplekken en het GBS, vergeleken worden, blijkt dat op verschillende plaatsen de temperatuur gemeten op de werkplekken significant hoger is dan de temperatuur gemeten door het GBS. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 3 (linksboven). De posities van de werkplekken en de gebouwsensor in de ruimte in oenschouw genomen, valt dit temperatuurverschil toe te schrijven aan de invloed van zoninstraling. Wanneer personen op hun werkplek andere invloeden ervaren dan de gebouwsensoren waarnemen (bijvoorbeeld wanneer de werkplekken zich in de zon bevinden en de sensor niet in de zon hangt), is het effect daarvan op de comfortbeleving van de gebouwgebruikers niet goed te meten. Dit kan daardoor leiden tot een afwijkende beoordeling van het (thermisch) binnenklimaat door de monitoringtool. Toch is ook goede overeenstemming gevonden tussen de meetresultaten op enkele posities (zie figuur 3, rechtsboven). Vergelijking van de CO₂-metingen (figuur 3, onder) laten een voorbeeld zien van een constant verschil tussen de waarden gemeten door de apparatuur en het GBS. Dit is hoogstwaarschijnlijk toe te schrijven aan afwijkingen in de gebouwsensor en/of de gebruikte meetapparatuur. Hierdoor kan ook een vertekend beeld in de beoordeling van het binnenklimaat ontstaan. De verkregen meetresultaten impliceren dat de omstandigheden in een ruimte representatiever gemonitord kunnen

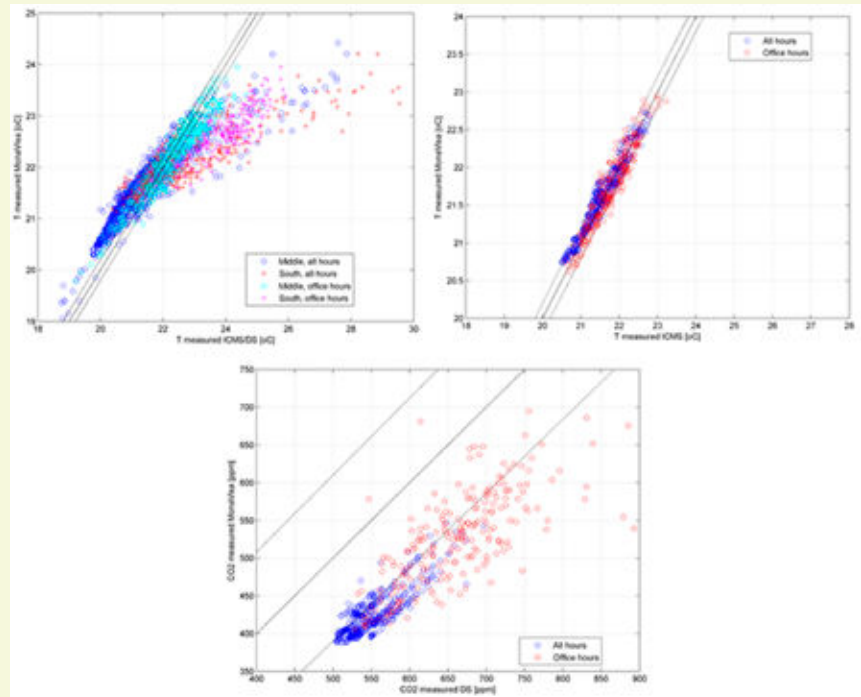
worden door meerdere sensoren te gebruiken (afhankelijk van de lay-out van de ruimte en het gebouw).

De temperaturen gemeten in één van de gebouwen lagen over het algemeen rond de 21°C (het setpoint ingesteld in het GBS), en daarmee onder het door ISO 7730 geadviseerde temperatuurbereik in de zomer van 23–26°C. Bij deze temperaturen, en uitgaande van de berekende PMV-waarden zoals getoond in figuur 4 (boven), valt te verwachten dat gebouwgebruikers het thermisch binnenklimaat over het algemeen zullen beoordelen als 'enigszins koel'. Hierbij moet de gevoeligheid van de PMV-berekening voor de aangenomen waarden voor kledingweerstand en metabolisme in ogenschouw genomen worden.

Uit de resultaten van enquêtes voor dit gebouw blijkt dat de respondenten eerder richting 'enigszins warm'/'warm' gestemd hebben dan 'enigszins koel'/'koel' (figuur 4, onder). Dit kan het gevolg zijn van het feit dat de respondenten door invloed van de zon hogere temperaturen ervaren hebben, terwijl dit effect door de meetapparatuur niet geregistreerd is. Dit sluit aan op de eerder gepresenteerde meetdata. Deze resultaten suggereren daarnaast dat, wanneer de (gemeten) temperaturen binnen het theoretisch comfortabele bereik van 23–26°C zouden liggen, dit niet zozeer zou leiden tot een comfortabeler (thermisch) binnenklimaat. In die zin kan analyse van de gemeten data met een monitoringtool, in combinatie met enquêtes, leiden tot een beter begrip van de werkelijk optredende situatie. Hiermee is een betere afstemming mogelijk van het binnenklimaat op wat de gebruikers als comfortabel binnenklimaat beoordelen. Daarnaast kan deze bevinding interessante consequenties hebben voor de instellingen van de klimaatinstallatie en het bijbehorende energiegebruik.

In het ontwerp zijn temperaturen (overschrijdingsuren) en PMV over het algemeen maatgevend. Hieraan gekoppeld is ook een bepaald percentage ontevreden gebouwgebruikers volgens het Fanger-model, voor verschillende klimaatklassen (A, B of C). In ISSO 74 is dit vertaald naar klimaatklassen, waarbij een bepaalde acceptatie van het binnenklimaat hoort. Meestal wordt uitgegaan van klasse B, waarbij 80% van de gebouwgebruikers het (thermisch) binnenklimaat comfortabel zou moeten vinden, wanneer de temperatuur binnen het gestelde bereik blijft. Deze klassen en bijbehorende percentages komen ook terug in de vergelijkbare klimaatklassen van het ATG-model in deze norm [13].

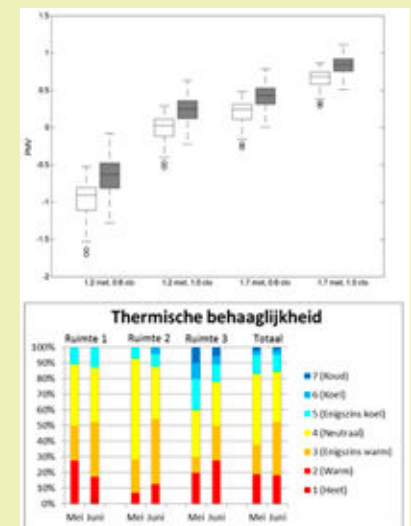
In de enquêtes is ook gevraagd in hoeverre de gebruikers tevreden of ontevreden zijn over de verschillende aspecten van het binnenmilieu,



-Figuur 3- Links-/rechtsboven: temperatuur gemeten door de geplaatste apparatuur (horizontale as), uitgezet tegen de temperatuur gemeten door het gebouwstelsel (GBS) (verticale as). Onder: CO₂-concentratie gemeten door de geplaatste apparatuur (horizontale as), uitgezet tegen de CO₂-concentratie gemeten door het gebouwstelsel (GBS) (verticale as). De zwarte lijnen tonen de meetnauwkeurigheid van de meetapparatuur.

en over het binnenmilieu in het algemeen. Hiervoor konden zij hun oordeel invullen op een zevenpuntsschaal, waarbij 1 tot en met 3 beschouwd wordt als 'tevreden', 4 als 'tevreden noch ontevreden' of 'acceptabel' en 5 tot en met 7 als 'ontevreden'. Een deel van de resultaten is getoond in figuur 5. Op basis van de berekende PMV zou men meer dan 20% ontevreden gebouwgebruikers verwachten (omdat de temperatuur te laag is (figuur 4, boven)), op basis van de enquêteresultaten voor thermische behaaglijkheid zou men ongeveer 20% ontevreden verwachten (hierbij worden 3, 4 en 5 over het algemeen als acceptabel beschouwd (figuur 4, onder)). Figuur 5 laat zien dat meer dan 20% van de gebruikers ontevreden is over het thermisch binnenklimaat, maar niet vanwege de reden die men op basis van de PMV-berekening (figuur 4) zou verwachten. De resultaten van de enquête geven hierbij meer inzicht in de relatie tussen theorie en praktijk. Deze verdeling laat daarnaast zien dat wanneer men niet ontevreden is over het binnenklimaat, men ook nog niet direct tevreden hoeft te zijn. In die zin kan er nog steeds genoeg ruimte voor verbetering zijn, ook al wordt het maximum van 20% ontevreden gehaald.

Daarnaast kan het ook nog verschil maken op welke manier men naar tevredenheid over het binnenmilieu kijkt. In ISSO-publicatie 103 [14] zijn bijvoorbeeld richtwaarden opgenomen voor het percentage ontevreden gebouwgebruikers per aspect van het binnenmilieu (zie



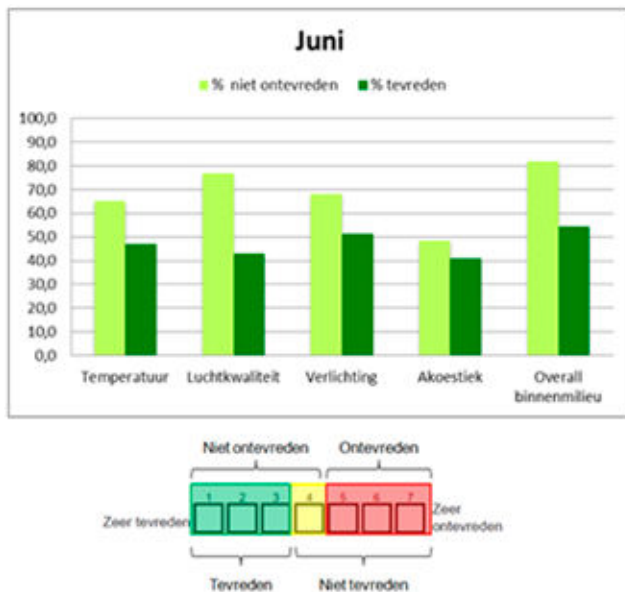
-Figuur 4- Boven: PMV-waarden berekend uit de gemeten temperaturen, voor verschillende combinaties van clo- en met-waarden (wit=mei, grijs=juni). Gezien de omstandigheden gedurende de meetperiode was de combinatie '1,2 met, 0,6 clo' het meest te verwachten, wat overeenkomt met een PMV-waarde van -1 tot -0,5 ('enigszins koel'). Onder: resultaten van de enquête voor de thermische beleving van het binnenklimaat voor dezelfde ruimte.

tabel 1).

Als deze categorieën ieder apart beschouwd worden zou het onderzochte gebouw nog buiten de categorie 'acceptabel' vallen. Uit figuur 5 blijkt echter dat het overall binnenmilieu hier beter gewaardeerd wordt dan

Prestatieniveau	Zeer goed	Goed	Acceptabel
Thermisch binnenklimaat	Max. 10% ontevredenen Hoge mate gebruikersinvloed	Max. 10% ontevredenen	Max. 15% ontevredenen
Luchtkwaliteit	Max. 10% ontevredenen	Max. 15% ontevredenen	Max. 20% ontevredenen
Visueel binnenklimaat	Max. 10% ontevredenen	Max. 15% ontevredenen	Max. 20% ontevredenen
Akoestisch binnenklimaat	Max. 10% ontevredenen	Max. 20% ontevredenen	Max. 30% ontevredenen

-Tabel 1- ISSO 103 tabel 5.3 (overgenomen uit cahier R2 van het Praktijkboek Gezonde Gebouwen). Richtwaarden voor maximale percentages ontevreden gebouwgebruikers, per aspect van het binnenmilieu.



-Figuur 5- Resultaten van de enquête, gehouden in één van de onderzochte gebouwen, voor de tevredenheid van de gebruikers met de individuele aspecten van het binnenklimaat en het algehele binnenmilieu. Een onderverdeling is gemaakt tussen gebruikers die een aspect als 'niet ontevreden' (optie 1-4) en 'tevreden' (optie 1-3) beoordeeld hebben.

categorieën apart. Het algehele binnenmilieu blijkt hierin meer dan de optelsom der delen; daarbij spelen ook andere onderdelen van de (werk)omgeving die niet ondervraagd zijn een rol [15]. Het onderscheid hierin kan van belang zijn wanneer men dit bijvoorbeeld onderdeel wil maken van een prestatiecontract. Want uiteindelijk is het niet alleen van belang of de klimaatinstallatie naar behoren functioneert, maar ook of de gebruikers tevreden zijn met het klimaat dat deze installatie realiseert. Verder is belangrijk op welke aspecten de installatie überhaupt wel of geen invloed heeft. Enquêtes kunnen dan waardevolle aanvullende informatie naar boven halen.

CONCLUSIES

Wanneer het comfortniveau van het binnenklimaat beoordeeld wordt met behulp van een monitoringtool, is het van belang te controleren of de gemeten data representatief is voor de omstandigheden op de werkplekken van de gebouwgebruikers. De meetresultaten voor de onderzochte gebouwen laten zien dat, wanneer invloeden zoals zoninstraling niet waargenomen worden door het gebouwstelsel, dit kan leiden tot een afwijkende beoordeling van het (ervaren) binnenklimaat. Het is daarom aan te bevelen de positie van de meet sensoren ten opzichte van de werkplekken mee te nemen in de interpretatie van deze beoordeling. Daarnaast zijn er nog verschillende aspecten

van het binnenmilieu die niet gemonitord (kunnen) worden, maar wel van invloed zijn op de beleving van het binnenmilieu. Voorbeelden hiervan zijn geluidhinder en vluchtige organische stoffen (VOS).

Wat dat betreft zijn er nog redelijk wat open eindjes tussen een volledige overeenstemming van de werkelijke beleving van het binnenklimaat en het (theoretisch) ontworpen binnenklimaat. Een combinatie van continue monitoring, aangevuld met enquêtes, kan echter wel inzicht geven in hoe dit gat te dichten is. Er ligt kortom nog een mooie uitdaging om gebouwgebruikers het comfortabele binnenklimaat te bieden dat we met een ontwerp voor ogen hebben.

REFERENTIES

1. Kemenade P.L.W., 2013: 'Building comfort performance assessment using a monitoring tool. An analysis of the Monavisatool: current practice and future possibilities'. MSc thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven
2. Cabanac M., 1986: 'Pleasure and joy, and their role in human life', in Clements-Croome, D. (ed.), Creating the Productive Workplace, 2nd edn, Taylor & Francis, London, p. 3-13.
3. Clements-Croome D., 2006: Creating the Productive Workplace, 2nd edn, Taylor & Francis, London
4. Humphreys M.A. and Nicol J.F., 2002: The

validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. Energy and Buildings, no. 34, p. 667-684

5. Humphreys M.A. and Hancock M., 2007: Do people like to feel 'neutral'? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the Ashrae scale. Energy and Buildings, no. 39, p. 867-874
6. Hoof J. van, 2008: Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? Indoor Air, no. 18, p. 182-201
7. Opschoor S., 2013: Vergelijken van werkelijke prestatie met prestatie-eisen. TVVL Magazine, no. 11, p. 34-35
8. Choi J.-H., Loftness, V. and Aziz A., 2012: Post-occupancy evaluation of 20 office buildings as basis for future IEQ standards and guidelines. Energy and Buildings, no. 46, p. 167-175
9. Wagner A., Gossauer E., Moosmann C., Gropp Th. and Leonhart R., 2007: Thermal comfort and workplace occupant satisfaction - Results of field studies in German low energy office buildings. Energy and Buildings, no. 39, p. 758-769
10. International Organization for Standardization (ISO), 2005: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO 7730:2005, International Organization for Standardization, Geneva
11. CBE (2012), Center for the Built Environment, laatst gezien 28 januari 2014 <<http://www.cbe.berkeley.edu>>
12. HOPE (2005), Health Optimisation Protocol for Energy-efficient Buildings, laatst gezien 28 januari 2014 <<http://hope.epfl.ch/index.htm>>
13. ISSO-publicatie 74: Thermische behaaglijkheid: eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen. Stichting ISSO, maart 2004
14. ISSO-publicatie 103: Monitoren van Duurzaam Beheer en Onderhoud. Stichting ISSO, mei 2013
15. Moezzi M. and Goins J., 2011. Text mining for occupant perspectives on the physical workplace. Building Research & Information, no. 39, p. 169-182