

Thermisch discomfort bij vloerverwarming en goed geïsoleerde gevels

Onderzoek naar de meest invloedrijke parameters met betrekking tot thermisch discomfort bij bewoners van woningen met vloerverwarming en zeer goed geïsoleerde gevels

- Bachelor eindopdracht -

Reinier Ijmker
(s1073745)

Civiele Techniek
Universiteit Twente

Afstudeercommissie:

dr. ir. A.G. Entrop

dr. J.J. Warmink

Bedrijfsbegeleider:

ir. G.H. ten Bolscher

19 februari 2015

Voorwoord

De rapportage die voor u ligt is de door mij uitgevoerde bachelor eindopdracht voor de studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Ik heb deze bachelor eindopdracht uitgevoerd bij 'DWA installatie- en energieadvies', een bedrijf dat overheden, bedrijven, woningcorporaties, scholen en gezondheidszorginstellingen over de volle breedte van installatie- en energietechniek, bouwfysica en integrale duurzaamheid adviseert met als primair doel om de kwaliteit van de werk-, productie- en woonomgeving te verhogen en gelijktijdig het energiegebruik en de milieudruk te verlagen. Ik heb een werkplek gekregen bij het kantoor van DWA in Rijssen waar ik gedurende 10 weken full time onderzoek heb verricht. Ik ben daar meegenomen in de bedrijfsvoering en heb mogen zien hoe kennis en vaardigheden op het gebied van installatie- en energietechniek in de bouw in de praktijk worden toegepast.

Ik heb veel geleerd over innovaties en mogelijkheden in installatie- en energietechnieken en hun effecten op de energieprestaties van een gebouw. Daarnaast heb ik ervaring opgedaan met een breder scala aan onderzoekstechnieken, heb ik gewerkt aan mijn vermogen om vooruit te kijken en te plannen en heb ik mogen zien hoe het er in het bedrijfsleven aan toe gaat.

Vanaf deze plaats wil ik graag mijn begeleidend docent Bram Entrop bedanken voor de prettige samenwerking en waardevolle feedback die uiteindelijk tot deze rapportage heeft geleid. Daarnaast wil ik graag Rik Altena en Leendert Vreemann, mijn kamergenoten bij DWA, bedanken voor het meedenken, de vele waardevolle adviezen, tips en aangedragen contactpersonen. Tevens wil ik Gert Harm ten Bolscher bedanken voor de mogelijkheid die hij mij gegeven heeft om bij DWA mijn bachelor eindopdracht uit te voeren. Ook wil ik de bewoners van de drie woningen waarin ik mocht meten en die mee wilden doen aan het belevingsonderzoek en alle personen die de enquête ingevuld hebben hartelijk bedanken voor het mogelijk maken van mijn onderzoek. Tot slot wil ik mijn vriendin, Jacqueline Aalbers, bedanken voor de hulp bij het plannen en de onophoudelijke motivatie en steun waarmee ik dit onderzoek succesvol heb kunnen afronden ondanks de tegenslagen, o.a. door een virus en bijkomend data verlies op mijn laptop, en de krappe tijdsplanning doordat ik reeds met master vakken begon voor deze bachelor eindopdracht afgerond was.

Reinier IJmker

Samenvatting

In 2009 raakte de financiële crisis de Nederlandse woningmarkt wat er voor zorgde dat er een grotere focus werd gelegd op concepten die de kwaliteit van de woonomgeving verhogen en de woning duurzamer maken, naar de wens van de consument. Deze ontwikkeling, samen met een groeiend milieubewustzijn in de maatschappij en een aanscherping van de EPC-eis die daarmee gepaard ging heeft er voor gezorgd dat in meer nieuwbouwwoningen vloerverwarming werd toegepast. Vloerverwarming werd gepromoot als een comfortabel en energiebesparend warmteafgiftesysteem omdat de temperatuur op de thermostaat tot anderhalve graad lager ingesteld zou kunnen worden met dezelfde comfort beleving. Verscheidene installateurs kregen echter van bewoners van woningen met goed geïsoleerde woningen (R_c groter dan $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) te horen dat zij de thermostaat regelmatig hoger moesten draaien dan ze gewend waren om een thermisch comfortabel binnenklimaat te realiseren. De discrepantie tussen de gepromootte energiebesparing en comfort bij een lage temperatuur en de ervaring van thermisch discomfort die bewoners van goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming ervaarden was de oorzaak van een vraag naar meer informatie over hoe vloerverwarming in combinatie met een zeer goed geïsoleerde gevel op een zodanige manier toegepast kan worden dat zowel thermisch comfort als een lager energiegebruik kan worden bereikt.

De hoofdvraag van het onderzoek luidt als volgt: “Hoe ziet een model eruit waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan over hoe het thermisch discomfort bij de gebruikers van vloerverwarming in combinatie een zeer goed geïsoleerde gevel verholpen kan worden?”. Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn vier deelvragen opgesteld. Deze deelvragen behandelen respectievelijk de verschillende systemen in woningen die mogelijk van invloed zijn op het thermisch comfort, thermisch comfort, de relatie tussen thermisch comfort en de aanwezige systemen in woningen, de relatie tussen fysische parameters en de beleving van bewoners. Om deze vragen te beantwoorden zijn vier onderzoeksmethoden toegepast, namelijk: literatuuronderzoek, expert interviews, een online enquête en metingen in woningen (inclusief voorafgaand experimenteel onderzoek).

Op basis van de bij Deelvraag 1 en 2 verkregen informatie, expert interviews, belevingsonderzoek en een online enquête zijn de verbanden tussen de systemen die in woningen te vinden zijn en de parameters voor algemeen en lokaal thermisch comfort in kaart gebracht. Door de uitkomsten van het belevingsonderzoek, de enquête en de expert interviews te analyseren zijn de belangrijkste parameters vastgesteld die volgens de respondenten invloed hebben op de ervaring van thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming. Vervolgens zijn metingen verricht in drie goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming om de parameter waarden te kunnen vergelijken met de beleving van de bewoners. Uit de resultaten van het onderzoek is geconcludeerd dat stralingsasymmetrie, vloer-, stralings- en ruimtetemperatuur de parameters zijn die het meeste invloed hebben op thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming. De relaties tussen de aanwezige systemen in een woning en de comfort parameters zijn in een overzichtelijk causaal-relatie diagram weergegeven waarmee inzichtelijk is gemaakt aan welke ‘knoppen’ gedraaid kan worden om thermisch discomfort te reduceren.

Tot slot zijn aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan. Het gedane onderzoek is niet representatief voor de gehele Nederlandse woningmarkt. Vervolgonderzoek zou meer verschillende typen woningen kunnen onderzoeken om zo gefundeerde conclusies te kunnen trekken over de hoofdoorzaken van thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming en de effecten van andere aanwezige systemen zoals ventilatiesystemen in kaart brengen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
1 Inleiding	5
1.1 Aanleiding.....	5
1.2 Probleem- en doelstelling	6
1.3 Leeswijzer	6
2 Onderzoeksopzet.....	7
2.1 Afbakening.....	7
2.2 Onderzoeksvragen.....	7
3 Bouwkundige en installatietechnische elementen	10
3.1 Fysische kenmerken van scheidingsconstructies	10
3.2 Installatietechnische systemen	11
3.2.1 Warmteafgiftesystemen.....	11
3.2.2 Ventilatiesystemen.....	12
3.3 Beïnvloeding energiegebruik door aanwezige systemen.....	13
3.3.1 Invloed gebouwschil op energiegebruik.....	13
3.3.2 Invloed verwarmingsinstallaties op energiegebruik	13
3.3.3 Invloed ventilatiesystemen op energiegebruik	14
3.4 Deelconclusie bouwkundige en installatietechnische elementen	14
4 Thermisch disomfort	16
4.1 Theorie thermisch comfort	16
4.1.1 Definitie thermisch comfort	16
4.1.2 Grootheden van thermisch comfort.....	16
4.1.3 Bandbreedthe thermisch comfort.....	17
4.2 Empirisch onderzoek	18
4.2.1 Belevingsonderzoek.....	18
4.2.2 Expert interviews.....	19
4.2.3 Online Enquête.....	20
4.3 Deelconclusie thermisch comfort.....	21
5 Relatie systemen in woning en thermisch comfort.....	23
5.1 Analyse relatie aanwezige systemen en thermisch comfort.....	23
5.1.1 Analyse belevingsonderzoek	23
5.1.2 Analyse expert interviews	23

5.1.3	Analyse enquête	24
5.2	Deelconclusie relatie aanwezige systemen en thermisch comfort.....	25
6	Relatie beleving thermisch comfort en fysische parameters.....	27
6.1	Meetmethodiek.....	27
6.2	Case analyse fysische parameters.....	28
6.2.1	Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 1	28
6.2.2	Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 2	29
6.2.3	Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 3	29
6.3	Cross case analyse fysische parameters.....	30
6.4	Deelconclusie relatie belevings- en fysische parameters.....	31
7	Discussie	33
8	Conclusie	34
9	Aanbevelingen	36
	Referenties	38
	Bijlage A: Bouwkundige elementen	41
	Bijlage B: Installatietechnische systemen	43
	Bijlage C: Invloed systemen op energiegebruik	48
	Bijlage D: Logboek activiteiten en beleving ruimtetemperatuur	50
	Bijlage E: Mail experts en interviewschema.....	51
	Bijlage F: Proefmetingen	52
	Bijlage G: Meetplan woning 1	59
	Bijlage F: Formules en meetresultaten	62

1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal allereerst de aanleiding van de opdracht aan de orde komen (1.1), vervolgens zullen probleem- en doelstelling opgesteld worden (0) en tot slot zal een leeswijzer gegeven worden (1.3).

1.1 Aanleiding

Voor het ontstaan van de financiële crisis in Amerika, eind 2008, waren er weinig problemen voor de Nederlandse woningmarkt. De vraag naar koopwoningen was immer aanwezig, waardoor projectontwikkelaars grootschalig woningen lieten bouwen. Om de winst op deze woningen zo hoog mogelijk te maken, werden deze woningen zo goedkoop mogelijk gebouwd. Hierbij werden extra's om de woning comfortabeler of duurzamer te maken, zoals goede en duurzame ventilatiesystemen en akoestische kanalen (Quist, 2008; ten Bolscher, 2009), veelal achterwege gelaten werden. De consument had weinig keuze in opties, aangezien aanbieders genoeg vraag kregen naar gestandaardiseerde woningen. In 2009 raakte de financiële crisis echter ook de Nederlandse woningmarkt. Hierdoor nam het aantal transacties met 50% af (van de Pas, 2012), waardoor de balans tussen vraag en aanbod veranderde en de eisen van de consument belangrijker werden (Entrop, 2014; Stadsgewest Haaglanden, 2011). Er kwam zodoende halverwege 2009 een grotere focus op concepten die de kwaliteit van de woonomgeving verhogen en de woning duurzamer maken. Het groeiende milieubewustzijn dat door de afname van fossiele brandstoffen al in opkomst was, werd dus gesterkt door de economische crisis (Biojournaal.nl, 2011).

In 2012 werd een nieuw Bouwbesluit gepubliceerd waarin de Energieprestatiecoëfficiënt (EPC) verlaagd werd naar 0,6 (VROM, 2012). Mede als reactie op de aangescherpte EPC-eis kwam er meer aandacht voor het toepassen van (zeer) lage temperatuurverwarming (ZLTV) en het toepassen van zeer goed geïsoleerde gevels. In vele relatief nieuwe wijken zijn ZLTV systemen aangebracht in combinatie met goed geïsoleerde gevels (met een Rc-waarde van 2,5 m²K/W, volgens Bouwbesluit 2003) en niet altijd met het gewenste resultaat. Zo ontstonden er grote problemen in de wijk Vathorst in Amersfoort met energiebesparende systemen, voornamelijk door de toegepaste ventilatiesystemen (Quist, 2008; ten Bolscher, 2009). Ook in nieuwbouwwijk de Beljaart (begonnen met de bouw in 2008) in Dongen hadden veel mensen klachten over het thermisch comfort in hun woningen, die uitgerust waren met ZLTV systemen (Scholten & de Jong, 2013).

Vloerverwarming werd als comfortabel verwarmingssysteem gepromoot. Bij hogere isolatiewaarden klaagden bewoners echter bij hun installateur dat zij de thermostaat geregeld hoger moesten draaien dan ze gewend waren om een thermisch comfortabel binenklimaat te realiseren. Uneto-VNI, de ondernemersorganisatie voor de installatiebranche en de elektrotechnische detailhandel, kreeg deze klachten ook te horen en stelde vast dat er onderzoek nodig is naar de schijnbare discrepantie tussen de beleving van thermisch comfort door bewoners van een woning met een isolatiewaarde groter dan 2,5 m²K/W en de verwachting van thermisch comfort die bij isolatiewaarden tot 2,5 m²K/W ervaren werd. Ook ISSO, het kennisinstituut voor de installatiesector heeft aangegeven belang te hebben bij een onderzoek aangezien er op dit moment nog onvoldoende gefundeerde informatie is om gebruikers te informeren over hoe zij thermisch discomfort kunnen voorkomen, installateurs goede normen te verschaffen of verbeteringen voor geconstateerde problemen rond thermisch discomfort bij vloerverwarming in goed geïsoleerde woningen te ontwikkelen.

1.2 Probleem- en doelstelling

In de aanleiding kwam al naar voren dat veel mensen die een woning hebben, die uitgerust is met vloerverwarming (ZLTV) en een goed geïsoleerde gevel, klachten hebben over het thermisch comfort in hun woning. Daarbij werd gesteld dat de thermostaat vaak hoger moest worden gezet, dan mensen gewend zijn om een thermisch comfortabel binnenklimaat te realiseren. Het idee achter het toepassen ZLTV in combinatie met zeer goed geïsoleerde gevels is dat er weinig energie wordt gebruikt om de woning te verwarmen. De warmte blijft tevens lang in de woning blijft hangen waardoor er veel energie bespaard kan worden bij de verwarming van de woning. Daarnaast is vloerverwarming als besparende maatregel gepromoot omdat de thermostaat een halve graad lager kon dankzij vloerverwarming. Het verhogen van de temperatuur op de thermostaat van bijvoorbeeld de gebruikelijke 20°C naar 21°C om een behaaglijk thermisch binnenklimaat te bereiken is het tegenovergestelde van hetgeen beoogd en gepromoot wordt met de toepassing van ZLTV in combinatie met een zeer goed geïsoleerde gevel. Het omhoog zetten van de thermostaat verhoogd immers het energieverbruik. De probleemstelling luidt als volgt:

“Er is een gebrek aan informatie om vloerverwarming (ZLTV) in combinatie met zeer goed geïsoleerde gevels op een zodanige manier toe te passen dat zowel thermisch comfort als een lager energiegebruik worden bereikt.”

Uit onderzoek is gebleken dat ZLTV systemen voor een lager energiegebruik kunnen zorgen, als ze op de juiste manier toegepast worden (Hesaraki & Holmberg, 2013). De nadruk van het onderzoek zal dan ook niet liggen op hoe door middel van het gebruik van ZLTV een lager energiegebruik kan worden bereikt, maar op hoe er met het toepassen van ZLTV bij standaard instellingen tevens een thermisch comfortabel binnenklimaat kan worden bereikt. Het doel van het onderzoek is als volgt:

“Het aandragen van een model waarmee voorspellingen gedaan kunnen worden over hoe thermisch discomfort bij de gebruikers van vloerverwarming (ZLTV) in combinatie met een zeer goed geïsoleerde gevel verholpen kan worden, door de belangrijkste oorzaken van thermisch discomfort in kaart te brengen.”

Aan de hand van de doelstelling kunnen vervolgens onderzoeksvragen opgesteld en gevalideerd worden. Het doel van de onderzoeksvragen zal zijn om tot een model te komen, zoals in de doelstelling genoemd, waarmee thermisch discomfort en het bouwkundige systeem van een woning aan elkaar gekoppeld kunnen worden zodat aan de hand van het model oplossingen aangedragen kunnen worden voor het ervaren thermisch discomfort van de gebruiker.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 zullen de onderzoeksvragen en de methoden die gebruikt zullen worden om een antwoord op de opgestelde onderzoeksvragen behandeld worden evenals een korte afbakening van het onderzoek. In de Hoofdstukken 3, 4, 5 en 6 zullen achtereenvolgens de vier opgestelde onderzoeksvragen behandeld worden. In Hoofdstuk 7 zal de conclusie van het onderzoek gegeven worden en tot slot zal in Hoofdstuk 8 de conclusie bediscussieerd worden en zullen aanbevelingen voor vervolgonderzoek gedaan worden.

2 Onderzoeksopzet

In dit hoofdstuk zal de onderzoeksopzet aan de orde komen. In Paragraaf 2.1 zal het onderzoek op basis van vooronderzoek afgebakend worden en in Paragraaf 2.2 zullen onderzoeksvragen opgesteld worden met daarbij vermeldt welke methode gebruikt zal worden om een antwoord op de desbetreffende onderzoeksvraag te vinden.

2.1 Afbakening

Met het oog op de Nederlandse installatiebranche zal het onderzoek worden uitgevoerd op basis van Nederlandse maatstaven. Zo zal enkel worden gekeken naar thermisch comfort bij voor in Nederland voorkomende buitentemperaturen. Tevens zal het onderzoek zich enkel richten op in Nederland voorkomende bouwvoorschriften en in Nederland toegepaste installatietechnieken en bouwkundige systemen.

Het onderzoek zal zich richten op bewoners van woningen die uitgerust zijn met lage temperatuurverwarming, zijnde vloerverwarming, als hoofdverwarmingssysteem en een Rc-waarde van ongeveer 3,5 m²K/W hebben voor de gebouwschil en een maximale U-waarde van 1,8 W/m²K voor de gevelopeningen (inclusief kozijnen).

2.2 Onderzoeksvragen

Dit onderzoek heeft als doel om een model aan te dragen waarmee voorspellingen gedaan kunnen worden over hoe het thermisch discomfort bij de gebruikers van vloerverwarming in combinatie met een zeer goed geïsoleerde gevel kan worden verholpen. De hoofdvraag van het onderzoek luidt als volgt:

“Hoe ziet een model eruit waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan over hoe het thermisch discomfort bij de gebruikers van vloerverwarming in combinatie een zeer goed geïsoleerde gevel verholpen kan worden?”

Om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag zijn een viertal deelvragen opgesteld.

Deelvraag 1

De eerste deelvraag luidt als volgt:

1. *“Van welke bouwkundige en installatietechnische elementen in een nieuwbouwwoning kan worden verwacht dat ze invloed hebben op het thermisch comfort en het energiegebruik?”*

Door middel van een literatuurstudie zal een antwoord op de eerste onderzoeksvraag gegeven worden. De resultaten die uit Deelvraag 1 voortvloeien zullen in een figuur visueel weergegeven worden.

Deelvraag 2

Na Deelvraag 1 is bekend welke systemen invloed hebben op het thermisch comfort en het energiegebruik in een woning. Deelvraag twee zal ingaan op de karakteristieken en reikwijdte van thermisch comfort en luidt als volgt:

2. *“Hoe wordt een thermisch comfortabel binnenklimaat gekarakteriseerd?”*

Om een antwoord op deelvraag twee te verkrijgen zullen meerdere onderzoekstechnieken toegepast worden. Allereerst zal door het uitvoeren van literatuurstudie onderzocht worden wat thermisch comfort is en wat volgens de literatuur bevorderende en belemmerende factoren en parameters met betrekking tot thermisch comfort zijn. Ten tweede zullen expert interviews gehouden worden zodat zij hun professionele mening kunnen geven over welke factoren van belang zijn bij dit onderzoek. Bij

deze individuele interviews zal gebruik gemaakt worden van open vragen. Tot slot zal er een belevingsonderzoek (ten Bolscher, 2006) uitgevoerd worden onder bewoners van woningen met zeer goed geïsoleerde gevels. Dit belevingsonderzoek zal omwille van de beschikbare tijd ongeveer 3 respondenten bevatten. Het belevingsonderzoek zal bestaan uit een interview en een inventarisatie van de bouwkundige en installatietechnische systemen die in de huizen van de respondenten te vinden zijn.

Deelvraag 3

Met de antwoorden op Deelvraag 1 en Deelvraag 2 kunnen de relaties worden onderzocht tussen bouwkundige en installatietechnische systemen enerzijds en het thermisch comfort van de gebruiker anderzijds. De derde deelvraag is als volgt geformuleerd:

3. *“Welke relatie is er tussen bouwkundige en installatietechnische systemen enerzijds en een thermisch comfortabel binnenklimaat anderzijds?”*

Om bovenstaande deelvraag te kunnen beantwoorden zullen de antwoorden van de eerste twee deelvragen met elkaar worden vergeleken. Verwacht wordt dat uit de eerste deelvraag informatie wordt gehaald over welke systemen er bij de respondenten te vinden zijn en hoe deze systemen het thermisch comfort beïnvloeden. De tweede deelvraag zal uitwijzen welke systemen er bij de respondenten van het onderzoek te vinden zijn en in welke mate deze systemen als comfortabel worden ervaren. Bij deze derde deelvraag kunnen vervolgens beide resultaten met elkaar vergeleken worden om te kijken of er een verband te ontdekken is tussen de systemen die in de huizen van de respondenten te vinden is en de mate van thermisch comfort die wordt ervaren.

Deelvraag 4

Met de beantwoording van bovenstaande deelvraag wordt inzicht verkregen in welke bouwkundige systemen als comfortabel aangemerkt worden. Om vervolgens te onderzoeken welke fysische parameters bij thermisch comfortabele dan wel thermisch oncomfortabele woningen horen is de volgende en laatste deelvraag opgesteld:

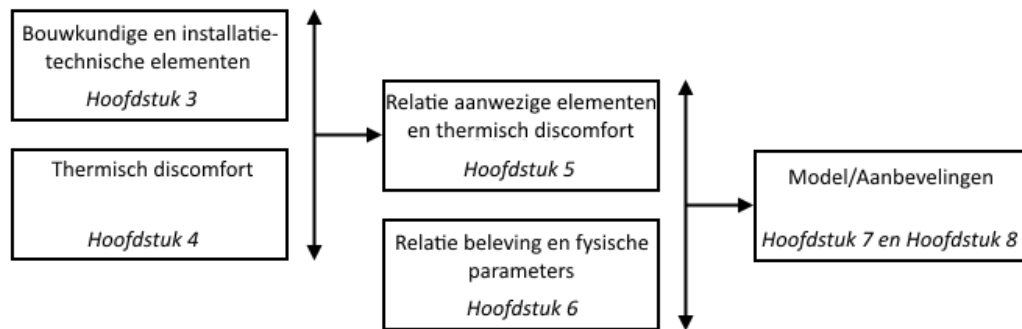
4. *“Wat is de relatie tussen de beleving van thermisch discomfort van een bewoner en de fysische parameters in zijn/haar woning?”*

Om deze vraag te kunnen beantwoorden moeten allereerst meetgegevens worden verzameld. Deze meetgegevens zullen worden verzameld in de woningen van de respondenten van het belevingsonderzoek. De parameters die zullen worden gemeten, zijn gebaseerd op de resultaten van de voorgaande onderzoeksvragen. Met de verkregen meetwaarden kan per respondent gekeken worden of er een verband is tussen de gemeten waarden bij de respondenten en de beleving van de respondenten. Daarnaast kan er worden gekeken of er een verband te vinden is tussen alle gemeten waarden bij de respondenten. Er wordt in lijn met Patton (1990) zowel gebruik gemaakt van case analysis als cross analysis.

Onderzoeksmodel

Met het antwoord op Deelvraag 4 in combinatie met het antwoord op deelvraag 3 zal voldoende informatie vergaard zijn om een model op te kunnen stellen en eventuele andere aanbevelingen ten aanzien van verder onderzoek of mogelijke oplossingen aan te kunnen dragen. Het onderzoeksmodel dat gehanteerd is en hierboven beschreven is staat weergegeven in Figuur 1. Volgens Doorewaard (2014) is de gebruikte pijlenconstructie de enige pijlenconstructie die mag worden gebruikt bij het opstellen van een onderzoeksmodel. De pijlenconstructie staat voor: ‘door een aantal zaken met elkaar te vergelijken’. Zodoende kan deelvraag 3 beantwoord worden door de antwoorden van Deelvraag 1

en deelvraag 2 met elkaar te vergelijken en zullen het model en eventuele andere aanbevelingen voortkomen uit de vergelijking tussen deelvraag 3 en deelvraag 4.



Figuur 1 Onderzoeksmodel

3 Bouwkundige en installatietechnische elementen

In dit hoofdstuk zal in kaart worden gebracht welke bouwkundige en installatietechnische elementen die van invloed zijn op het thermisch comfort en het energiegebruik veelal in nieuwbouwwoningen worden toegepast. In Paragraaf 3.1 zullen bouwkundige elementen geanalyseerd worden, in Paragraaf 3.2 zullen installatietechnische systemen behandeld worden, in Paragraaf 3.3 zal worden behandeld hoe de in Paragraaf 3.1 en 3.2 gevonden systemen het energiegebruik en het thermisch comfort beïnvloeden. Tot slot zal in Paragraaf 3.4 een deelconclusie worden gegeven van dit hoofdstuk.

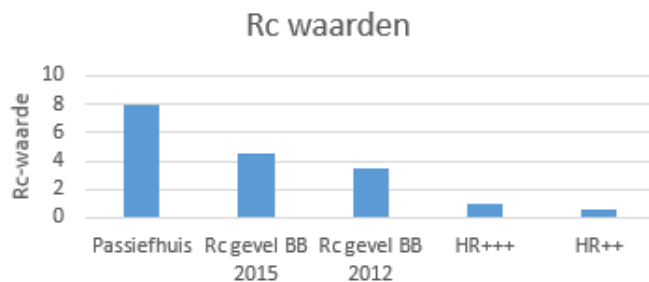
3.1 Fysische kenmerken van scheidingsconstructies

De bouwkundige elementen die zorgen voor een goede isolatie zijn scheidingsconstructies. Scheidingsconstructies worden onderscheiden in uitwendige scheidingsconstructies (ook wel gebouwschil genoemd) en inwendige scheidingsconstructies. In beide typen scheidingsconstructies kunnen ramen, deuren, kozijnen en daarmee gelijk te stellen constructiedelen (ook wel gevelopeningen genoemd) zijn aangebracht (VROM, 2012). Er zal slechts gekeken worden naar de kenmerken van de scheidingsconstructies die van belang zijn voor het energiegebruik en het thermisch comfort van de woning. Onder de gebouwschil vallen de gevel, het dak en de vloer. Inwendige scheidingsconstructies zijn alle binnenmuren, deuren en andersoortige opgetrokken scheidingen. Een gevel heeft als primair doel wind, water, vocht, geluid, ongedierte en ongewenste bezoekers buiten te houden en, afhankelijk van het seizoen, warmte binnen of buiten te houden (gezond bouwen & wonen, 2014). In dit onderzoeksrapport zullen enkel het buiten houden van wind, water, vocht, kou en warmte worden beschouwd. Figuren, tabellen en formules van belang voor scheidingsconstructies zijn weergegeven in Bijlage A.

Een scheidingsconstructie is meestal opgebouwd uit een aantal lagen van verschillende materialen, die ieder hun specifieke thermische eigenschappen hebben. Een laag kan hierbij zowel een vast materiaal (met warmtegeleiding) zijn als een luchtsponw (met warmteoverdracht door straling en convectie). De totale weerstand R_c (in $\text{m}^2\text{K/W}$) van een constructie is gelijk aan de som van de weerstanden van de diverse lagen (Adan et al., 2002). Voor ramen, deuren en kozijnen wordt niet de R_c -waarde gebruikt maar de U-waarde. De U-waarde, uitgedrukt in $\text{W/m}^2\text{K}$ is de warmtedoorgangscoefficiënt en geeft aan hoeveel warmte door een constructie heen gaat bij een temperatuurverschil van 1 Kelvin. De warmtedoorgangscoefficiënt U wordt bepaald door $U = \frac{1}{R_c}$. Om de R_c waarde van een woning te verhogen moet de warmteweerstand van het totale pakket van lagen vergroot worden. Over het algemeen wordt, om de R_c waarde te verhogen, de laag isolatie dikker gemaakt. Om de U-waarde van het glas te verlagen, wordt een soortgelijk principe toegepast. Om van enkel naar dubbel (of triple) glas te gaan worden twee (of zelfs drie) glazen schermen gebruikt met daartussen een spouw.

In Artikel 5.3, lid 1, 2 en 3 van het Bouwbesluit (VROM, 2012) is gesteld dat zowel een uitwendige scheidingsconstructie van een nieuwbouw woning als een inwendige scheidingsconstructie van een nieuwbouw woning die een verblijfsgebied, een toiletruimte, badruimte of kruipruimte scheidt, een volgens NEN 1068 (NEN, 2012) bepaalde R_c -waarde heeft van ten minste $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. In Artikel 5.3 lid 4 wordt gesteld dat ramen, deuren, kozijnen en daarmee gelijk te stellen constructieonderdelen in de hiervoor beschreven uitwendige en inwendige scheidingsconstructies een volgens NEN 1068 bepaalde U-waarde hebben van ten hoogste $1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$. Met ingang van 1 januari 2015 is de EPC-eis bijgesteld van 0,6 naar 0,4. Om dit te bereiken worden de eisen voor de dichte delen van de

gebouwschil bijgesteld naar een Rc-waarde van 3,5/4,5/6,0 m²K/W voor respectievelijk vloer/gevel/dak. De U-waarde van open delen van de gebouwschil, zijnde ramen, deuren, kozijnen en daarmee gelijk te stellen constructieonderdelen zal worden bijgesteld van 1,65 naar 1,4 W/m²K (Bouwbesluitinfo, 2014; Nuiten, Hoiting, Leenaets, & Donze, 2013). Volgens ten Bolscher (2006) en de ARBO Vakbase (2014a) is een minimale Rc-waarde van 3,5 m²K/W en een maximale U-waarde van 1,8 W/m²K voor de gevelopeningen vereist om LTV effectief te benutten. In Figuur 2 is te zien dat beglazing vergeleken met de rest van de gevel waarden een zeer lage isolatiewaarde heeft en dus de zwakste schakel is in de gebouwschil.



Figuur 2 Rc waarden van verschillende standaarden

Om wind, water en vocht buiten te houden en, afhankelijk van het seizoen, warmte binnen of buiten te houden is het van belang dat de gevel luchtdicht is. Het Lente-akkoord (Bouwmeester & Bouwens, 2014) waarschuwt dat lekken in de woning, infiltratie, schade aan de constructie kan ontstaan. De maximaal toegestane lucht volumestroom is 0,2 m³/s (VROM, 2012). Bij goed geïsoleerde woningen kan oververhitting ontstaan door zoninval. De warmte die binnenkomt blijft te lang binnen waardoor de binnentemperatuur oploopt. Bij een goed geïsoleerde gevel is het daarom van belang om goede zonwering te installeren. De Rc-waarde van de gebruikte vloerafwerking mag voor een goede toepassing van vloerverwarming niet groter zijn dan 0,15 m²K/W (ISSO, 2004) aangezien de vloer anders niet genoeg warmte afgeeft.

3.2 Installatietechnische systemen

Installatietechnische systemen die van invloed zijn op het thermische binnenklimaat in een woning zijn de warmteafgiftesystemen (3.2.1) die aanwezig zijn en het ventilatiesysteem (3.2.2) dat in een woning is aangebracht (of het ontbreken hiervan). Een verwarmingsinstallatie zorgt voor de verspreiding van warmte in een woning. Hier zal enkel ingegaan worden op warmteafgifte systemen omdat deze systemen een directe invloed hebben op de thermische gesteldheid van het binnenklimaat in een woning. De werking van diverse soorten ketels en warmtepompen zullen dan ook niet uitgebreid aan de orde komen.

3.2.1 Warmteafgiftesystemen

Mogelijke warmteafgiftesystemen zijn volgens UNETO-VNI (2014a) radiatoren, convectoren, vloerverwarming en wandverwarming. Combinaties van bovenstaande systemen komen tevens veelvuldig voor.

Radiatoren en convectoren

Radiatoren en convectoren maken gebruik van heet water om warmte af te staan aan de ruimte waarin de radiator of convector geplaatst is. In een radiator wordt heet water door een goed geleidend (metalen) systeem geleid. De radiator wordt door het hete water opgewarmd, waardoor de lucht die in aanraking komt met de radiator tevens opgewarmd wordt waardoor convectie ontstaat. De radiator

produceert echter ook stralingswarmte (radiatie) (verwarminghandel.nl, 2014). In een convector stroomt heet water door een buis. De buis warmt de lucht op waardoor onderdruk ontstaat en nieuwe, koude lucht, wordt aangezogen. Zo wordt de ruimte opgewarmd door hete lucht, convectie. Het warm wordende oppervlak van een convector is vele malen kleiner dan bij een radiator waardoor minder energie gebruikt wordt. Tegenwoordig worden meestal combinaties van radiatoren en convectoren toegepast voor een optimaal resultaat.

Vloer- en wandverwarming

Volgens (Bruggema, 2007) bestaat vloerverwarming uit een vloerconstructie waarin een leidingnet in de dekvloer is opgenomen. Door de leidingen loopt warm water, die de vloer opwarmt. Vloerverwarming verwarmt de vloer gelijkmatig door middel van warmtestraling en een beetje convectie, waardoor er nagenoeg geen temperatuurverschillen in de ruimte zijn (vloer & verwarming.nl, 2014a). Er wordt onderscheid gemaakt tussen natte en droge systemen. Bij een nat systeem worden de buizen direct in een chapelaag aangebracht, bij een droog systeem wordt geen gebruik gemaakt van een chapelaag. In Tabel 1 zijn de voor- en nadelen van vloerverwarming aangegeven. Deze voor- en nadelen worden nader uitgewerkt in Bijlage B.

Tabel 1 Voor- en nadelen van vloerverwarming (diverse bronnen, zie Bijlage B)

Voordelen	Nadelen
Comfort	Traag regelgedrag (vooral bij natbouw)
Laag energiegebruik	Belemmering warmteafgifte
Weinig stofcirculatie	Beperkte reparatiemogelijkheden
Inrichtingsvrijheid	

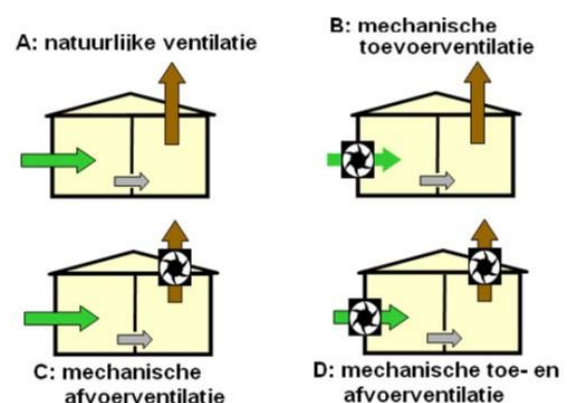
Wandverwarming is in essentie gelijk aan vloerverwarming met als verschil dat de leidingen in de wand zijn opgenomen. Aangezien warme lucht opstijgt en wandverwarming weinig convectie veroorzaakt, is wandverwarming niet goed geschikt als hoofdverwarming.

Aanvoertemperatuur

Naast een indeling naar het type afgiftesystemen kan er tevens een onderscheid worden gemaakt op basis van aanvoertemperatuur. Omdat het oppervlak van vloerverwarming veel groter is dan bij een radiator, kan met lagere temperatuur dezelfde warmte afgegeven worden. Duurzame warmteopwekkingssystemen, zoals warmtepompen, werken beter in combinatie met lage temperatuurafgiftesystemen.

3.2.2 Ventilatiesystemen

Ventilatiesystemen zorgen voor de toevoer van verse en mogelijk koude lucht waardoor ventilatiesystemen invloed hebben op het thermisch comfort van een woning. UNETO-VNI (2014b) onderscheidt de volgende ventilatiesystemen: natuurlijke ventilatie, mechanische ventilatie, een combinatie van natuurlijke en mechanische ventilatie en balansventilatie met warmteterugwinning. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (2011) stelt dat de meeste nieuwbouwwoningen in



Figuur 3 Vier verschillende ventilatiesystemen (vochtbestrijdingsgids.be, 2014)

Nederland worden voorzien van balansventilatie of een mechanische afzuiging in combinatie met een natuurlijke toevoer.

Bij natuurlijke ventilatie (systeem A) stroomt de lucht naar binnen en naar buiten via roosters in de gevel. De roosters kunnen handmatig geopend en gesloten worden. Bij mechanische ventilatie (systeem D) zorgt een ventilator voor de (mechanische) toe- en afvoer van verse lucht. Systeem B en C zijn combinaties van natuurlijke en mechanische ventilatie. Balansventilatie is ventilatiesysteem D met als toevoeging dat de warmte van de afgezogen lucht gebruikt wordt om de verse lucht voor te verwarmen. In Figuur 2 zijn de ventilatiesystemen weergegeven.

3.3 Beïnvloeding energiegebruik door aanwezige systemen

In deze paragraaf zal de invloed van bouwkundige elementen (3.3.1), verwarmingsinstallaties (3.3.2) en ventilatiesystemen (3.3.3) op het energiegebruik en thermisch comfort behandeld worden. Enkel de bouwkundige elementen en installatietechnische systemen voortkomend uit Paragraaf 3.1 en Paragraaf 3.2 worden in deze paragraaf behandeld. Grafieken en tabellen die de uitspraken in de volgende subparagrafen onderbouwen zijn te vinden in Bijlage C.

3.3.1 Invloed gebouwschil op energiegebruik

Uit onderzoek van onder andere Pan, Chan, Deng, en Lin (2012) is gebleken dat isolatiemateriaal het energiegebruik voor het opwarmen van een woning sterk vermindert. Zij concludeerden echter ook dat bij een sterke toename van de dikte van het isolatiemateriaal de benodigde energie om te koelen toe kan nemen. Zij raden dan ook aan eerst een gedetailleerde analyse te doen van de verwachte koeling en verwarming van een gebouw alvorens isolatiemateriaal aangebracht wordt. Kruithof en Valk (2013) van Nieman Raadgevende Ingenieurs hebben in opdracht van de Nederlandse Isolatie Industrie onderzoek verricht naar het effect van de verhoging van de warmteweerstand van constructies (R_c -waarde) op de energiebehoefte (warmte en koude) van woningen in Nederland. Zij tonen aan dat isoleren leidt tot een beperking van de warmtebehoefte. De warmtebehoefte daalt naarmate de isolatiewaarde toeneemt, hoewel de daling minder sterk wordt naarmate de isolatiewaarde blijft stijgen (zie Bijlage C). In hun onderzoek nemen zij een groot verschil waar in warmtebehoefte tussen woningen met HR++ en triple beglazing. Daar de ruiten de zwakste schakel zijn in de gevel wat isolatie betreft valt hiermee dus erg veel winst te halen volgens Kruithof en Valk (2013).

3.3.2 Invloed verwarmingsinstallaties op energiegebruik

De mate waarin een verwarmingsinstallatie energie gebruikt is niet zozeer afhankelijk van het warmteafgiftesysteem maar van de warmteopwekkingsinstallatie. Warmteopwekkingsinstallaties kunnen variëren van gasgestookte ketels tot warmtepompen. De mate van energiezuinigheid hangt samen met het rendement van de warmteopwekkingsinstallatie. Een warmtepomp gebruikt warmte uit de bodem en gebruikt daarom minder brandstof waardoor een lager energiegebruik gehaald wordt. Efficiënte warmteopwekkingsinstallaties zijn veelal efficiënt bij een lage temperatuur. Vloer- en wandverwarming zouden dan het meest voordelige energiegebruik hebben omdat zij water van een relatief lage temperatuur gebruiken en convectoren/radiatoren het hoogste omdat zij een hoge temperatuur water nodig hebben om te functioneren. Uit diverse onderzoeken (Badran, Jaradat, & Bahbouh, 2013; Pineau, Rivière, Stabat, Hoang, & Archambault, 2013) blijkt dat installaties die op lage temperatuur werken het meest energie zuinig zijn. Vloerverwarming kan van 5% (gas ketel) tot 30% (warmtepomp) energie besparen in vergelijking met hoge temperatuur radiatoren. Verwarmingsinstallaties zorgen voor een comfortabele ruimte- en stralingstemperatuur.

3.3.3 Invloed ventilatiesystemen op energiegebruik

Volgens El Fouih et al. (2012) vormen ventilatie belastingen tussen de 20-50% van de warmtevraag voor nieuwe gebouwen. Voornamelijk natuurlijke ventilatie brengt koude lucht in een woning die vervolgens weer moet worden opgewarmd. Warmteterugwinning van afvoerlucht kan volgens hen de energiebehoefte significant verlagen. Tevens geven El Fouih et al. (2012) aan dat balansventilatie voor koude klimaten zoals in Nederland het meest efficiënte systeem is om warmte uit de lucht te hergebruiken. Yang et al. (2008) stellen dat balansventilatie (met warmteterugwinning) significant energie kan besparen. Ventilatiesystemen hebben zodoende invloed op het energiegebruik door koude de woning binnen te laten. De koude lucht die binnengelaten wordt kan voor te hoge luchtsnelheden en tocht zorgen.

3.4 Deelconclusie bouwkundige en installatietechnische elementen

Met behulp van de in de vorige paragrafen gevonden informatie kan antwoord worden gegeven op de eerste deelvraag, zoals hieronder nogmaals geformuleerd:

1. *“Van welke bouwkundige en installatietechnische elementen in een nieuwbouwwoning kan worden verwacht dat ze invloed hebben op het thermisch comfort en het energiegebruik?”.*

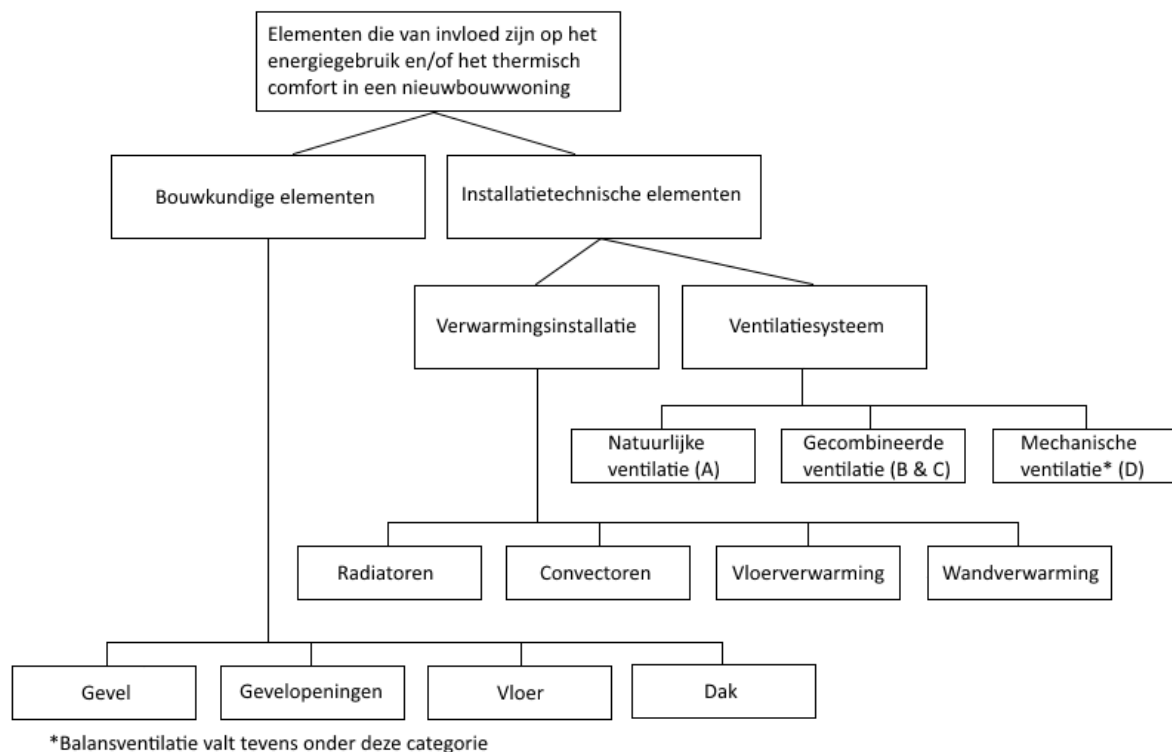
De bouwkundige elementen die invloed hebben op het thermisch comfort en het energiegebruik van een woning zijn de gevel en de daarin te vinden gevelopeningen, de vloer en het dak van de leefruimte. De mate waarin deze bouwkundige elementen van invloed zijn op het thermisch comfort en het energiegebruik hangt samen met de isolatiewaarde van de elementen. Een hoge isolatiewaarde zorgt ervoor dat warmte langer wordt vastgehouden en er dus minder warmte verloren gaat. Uitgangspunt is hierbij dat deugdelijke kierdichting is toegepast om de luchtinfiltratie minimaal te houden en dat koudebruggen zoveel mogelijk voorkomen worden. Luchtinfiltratie veroorzaakt tochtklachten waardoor goede kierdichting van belang is om een thermisch comfortabel binnenklimaat te creëren.

Het energiegebruik van een verwarmingsinstallatie is voornamelijk afhankelijk van het opwekkingstoestel (Badran et al., 2013; Pineau et al., 2013). Uit onderzoek is gebleken dat warmtepompen het hoogste rendement hebben, mits de aanvoertemperatuur laag is, en daarmee de meest energiezuinige warmteopwekkers zijn. Warmtepompen halen het hoogste rendement bij lage watertemperaturen waardoor warmteafgiftesystemen met lage watertemperaturen de meest energiezuinige systemen zijn. Tevens hoeft er weinig energie te worden toegevoegd aan het water bij lage temperaturen, waardoor er energie kan worden bespaard ten opzichte van systemen met een hoge watertemperatuur. Hoe lager de watertemperatuur hoe groter het oppervlak van het afgiftesysteem moet zijn om dezelfde verwarmingscapaciteit te kunnen behalen als een systeem met een hoge watertemperatuur.

Ventilatie is van essentieel belang voor een gezond binnenklimaat maar zorgt er tevens voor dat er veel koude lucht de woning binnenkomt en veel warme lucht de woning verlaat. Hierdoor moeten warmteafgiftesystemen deze verse lucht continue opwarmen wat veel energie kost. Koude lucht met een te hoge luchtsnelheid kan tevens tocht veroorzaken waardoor mensen een oncomfortabel gevoel krijgen. Met warmte terugwin systemen kan de warmte uit de afvoerlucht hergebruikt worden om de verse lucht op te warmen. Hierdoor wordt energie bespaard en worden tochtklachten verminderd.

Bovenstaande aspecten van bouwkundige en installatietechnische elementen die in de voorgaande paragrafen van dit hoofdstuk aan de orde gekomen zijn, zijn in Figuur 4 in één figuur weergegeven.

Aangezien de bouwkundige elementen slechts op het gebied van isolatie en kierdichting van belang zijn is ervoor gekozen om de elementen van de gebouwschil op een zo klein mogelijk detail niveau weer te geven.



Figuur 4 Primair model van elementen die invloed hebben op het energiegebruik en/of het thermisch comfort in een nieuwbouwwoning

4 Thermisch disomfort

In dit hoofdstuk zal onderzocht worden wat thermisch comfort precies inhoud. In Paragraaf 4.1 zal de theorie vanuit de literatuur behandeld worden, in Paragraaf 4.2 de empirie aan de orde komen en in Paragraaf 4.3 zal een deelconclusie van de tweede onderzoeksvraag worden gegeven.

4.1 Theorie thermisch comfort

In deze paragraaf worden door middel van literatuurstudie de definitie van thermisch comfort (4.1.1), de parameters die voor thermisch (dis)comfort zorgen (4.1.2) en de bandbreedte waarin deze parameters als comfortabel worden aangemerkt (4.1.3) onderzocht. In deze paragraaf zal voornamelijk gesproken worden over de term thermisch comfort. Thermisch discomfort treedt op wanneer niet aan de gestelde definities en voorwaarden wordt voldaan en is daarmee het tegenovergestelde van thermisch comfort.

4.1.1 Definitie thermisch comfort

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, & Airconditioning Engineers) definieert (dis)comfort binnenshuis als de geestesgesteldheid die tevreden is met zijn omgeving en minimaal zes dimensies omvat: thermische, lucht kwalitatieve, visuele, akoestische, ergonomische en psychologische comfort (Huebner, Cooper, & Jones, 2013) waarvan thermisch comfort één van de belangrijkste dimensies is (ARBO Vakbase, 2014a; Frontczak & Wargocki, 2011).

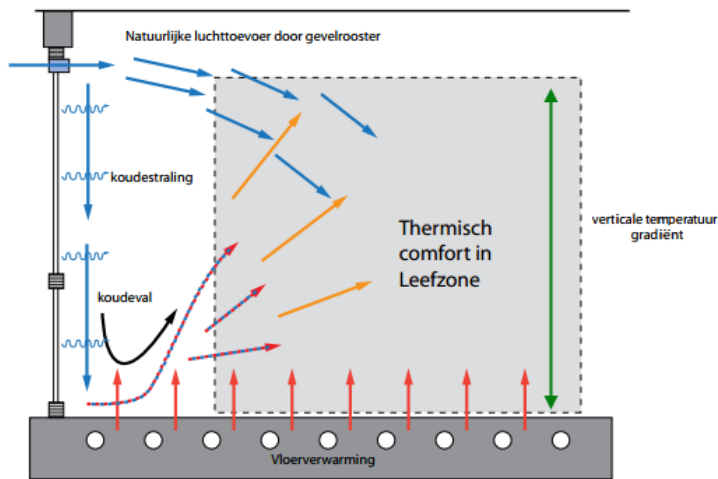
Thermisch comfort is de mate waarin men tevreden is over het thermisch binnenklimaat van een gebouw (ARBO Vakbase, 2014a). Volgens Boerstra et al. (2008) betreft het thermisch binnenklimaat het geheel aan omgevingsparameters die de thermische sensatie van de mens beïnvloeden. Het thermisch binnenklimaat wordt beïnvloed door het buitenklimaat, de isolatie van het gebouw, de hoeveelheid en oriëntatie van beglazing en de kwaliteit en capaciteit van verwarmings-, koel- en ventilatiesystemen (ARBO Vakbase, 2014a). Thermisch comfort treedt dus op als mensen geen behoefte hebben aan een hogere of lagere temperatuur. De definitie volgens ASHRAE en de later in dit hoofdstuk gebruikte norm NEN-EN-ISO 7730 zijn grotendeels gebaseerd op het werk van Fanger (1972).

4.1.2 Grootheden van thermisch comfort

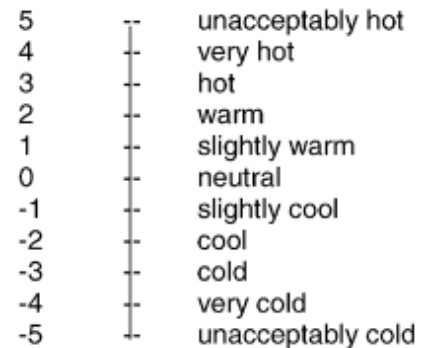
Boerstra et al. (2008) en NEN-EN-ISO 7730 (NEN, 2005) maken onderscheid tussen algemeen thermisch comfort en lokaal thermisch comfort. Algemeen thermisch comfort wordt bepaald door de ruimt(lucht)temperatuur, de luchtsnelheid, stralingstemperatuur, luchtvochtigheid, het activiteitsniveau (metabolisme, met-waarde) en de kledingisolatie (clo-waarde) (ARBO Vakbase, 2014b; Boerstra et al., 2008; NEN, 2005). Er wordt gesproken van lokaal thermisch discomfort als de temperatuur in een ruimte op zich goed is, maar een deel van het lichaam te sterk afkoelt of opwarmt. Onder lokaal thermisch comfort vallen: een te koude of warme vloertemperatuur, stralingsasymmetrie, de verticale stralingsgradiënt en tocht (ARBO Vakbase, 2014b; Boerstra et al., 2008; Bruggema, 2007; NEN, 2005). In Figuur 6 zijn de oorzaken van lokaal thermisch discomfort visueel weergegeven.

Echter houden niet alleen fysieke parameters verband met de gevoelstemperatuur. Thermisch comfort verschilt per land en is tevens afhankelijk van temperaturen uit het verleden en ervaringen met koeling en verwarmingssystemen. Mensen in Bangladesh vinden bijvoorbeeld een hogere temperatuur comfortabel dan mensen in Noord-Europa. Of mensen in Bangladesh ervaring hebben met

airconditioning verandert tevens hun verwachtingen en wensen wat betreft een temperatuur die comfortabel geacht wordt (Brager & de Dear, 1998; Huebner et al., 2013). Zo kunnen bewoners ook thermisch comfort ervaren bij temperaturen die buiten het bereik vallen van “comfortabele temperaturen” zoals gevonden in laboratorium onderzoek (Busch, 1992; Huebner et al., 2013).



Figuur 5 Oorzaken van lokaal thermisch discomfort
(Roijen & Beerens, 2009; bewerkt door R.C. IJmker)



Figuur 6 Zevenpuntsschaal van de PMV voor thermisch comfort (van der Linden, Boerstra, Raue, & Kurvers, 2002)

Een goede beheersing van de temperatuur is van groot belang om thermisch comfort te bereiken. Temperatuurschommelingen moeten dan ook zoveel mogelijk vermeden worden (ARBO Vakbase, 2014a). In de praktijk zijn comfortrichtlijnen, de PMV-index (Predicted Mean Vote), opgesteld (ARBO Vakbase, 2014a). Deze PMV-waarde is gebaseerd op de behaaglijkheidstheorie van Fanger (1972) en gaat over de warmtebalans van het menselijk lichaam (Boerstra et al., 2008). De mens is volgens Boerstra et al. (2008) thermisch evenwichtig als de inwendige warmteproductie in het lichaam gelijk is aan het warmteverlies naar de omgeving. De PMV wordt uitgedrukt in een getal dat ligt tussen de -3,0 en +3,0 waarbij een PMV van 0,0 neutraliteit aangeeft (zie Figuur 5). Door individuele verschillen zal bij een PMV van 0,0 nog altijd 5% van de personen in een ruimte het binnenklimaat als thermisch oncomfortabel beschouwen.

In de norm NEN EN ISO 7730 staat aangegeven hoe de PMV in een ruimte kan worden berekend. De reeds eerder genoemde grootheden luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtsnelheid en luchtvochtigheid zijn benodigd om de PMV te kunnen bepalen (Boerstra et al., 2008) en kunnen daarvoor per ruimte worden gemeten. Daarnaast moet een schatting worden gemaakt van het activiteitsniveau en de kledingfactor van de gebruiker van de ruimte. Aan de hand van de PMV kan ook de PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), het percentage ontevreden bij een bepaalde PMV waarde, worden bepaald (Boerstra et al., 2008).

Ook voor lokaal thermisch comfort is te berekenen hoeveel mensen ontevreden zullen zijn bij gegeven parameters. Voor tocht wordt hiervoor de Draught Rate (DR) gebruikt en voor de verticale temperatuurgradiënt, vloertemperatuur en stralings(temperatuur)asymmetrie kunnen PD (Percentage Dissatisfied) ratio's worden berekend.

4.1.3 Bandbreedthe thermisch comfort

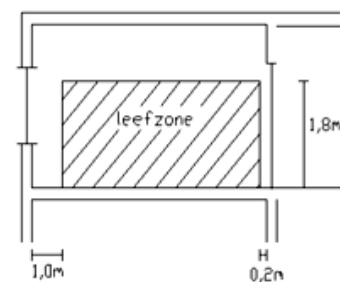
In de praktijk is het lastig om een constante PMV-waarde van 0,0 te realiseren. Daarom wordt als richtlijn voor thermisch comfort een bandbreedte van -0,5 tot +0,5 aangehouden (ARBO Vakbase, 2014a; Boerstra et al., 2008). Bij een PMV binnen deze bandbreedte is slechts 10% van de gebruikers

ontevreden over het thermisch binnenklimaat. Ook voor de andere grootheden zijn bandbreedtes vastgesteld. NEN-EN-ISO 7730 en ISO 49 geven definiëren drie comfort klassen. Waarden die binnen klasse A vallen worden als zeer comfortabel aangemerkt, klasse B is voldoende comfortabel en klasse C is net voldoende. Waarden die buiten klasse C vallen worden als thermisch oncomfortabel aangemerkt. De waarden van deze bandbreedtes zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Bandbreedtes thermisch comfort (ISSO, 2004; NEN, 2005)

		Klasse A	Klasse B	Klasse C
PPD	%	< 6	< 10	< 15
PMV	-	$-0,2 < PMV < +0,2$	$-0,5 < PMV < +0,5$	$-0,7 < PMV < +0,7$
DR	%	< 10	< 20	< 30
Verticale temperatuurgradiënt	°C	< 2	< 3	< 4
Vloertemperatuur	°C	19 – 29	19 – 29	17 – 31
Temperatuurasymmetrie:				
• Warm plafond	°C	< 5	< 5	< 7
• Koele wand	°C	< 10	< 10	< 13
• Koel plafond	°C	< 14	< 14	< 18
• Warme wand	°C	< 23	< 23	< 35

Er zijn enkele richtlijnen opgesteld die kunnen helpen om de parameterwaarden binnen de bovengenoemde bandbreedtes te houden. ARBO Vakbase (2014a) geeft aan dat de externe warmtelast geminimaliseerd kan worden door het raamoppervlak maximaal 30 tot 40% van het geveleppervlak te laten beslaan. De PMV-waarde moet bepaald worden in de leefzone. De leefzone is het gedeelte van een ruimte vanaf 1,0 m uit de gevel en tot 1,8 m boven de vloer zoals weergegeven in Figuur 7 (ARBO Vakbase, 2014b).



Figuur 7 Leefzone (ISSO, 2004)

4.2 Empirisch onderzoek

Om vast te stellen hoe er in de praktijk gedacht wordt over thermisch comfort, met name in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming zijn een belevingsonderzoek, expert interviews en een online enquête gehouden.

4.2.1 Belevingsonderzoek

Het belevingsonderzoek is uitgevoerd onder bewoners van drie goed geïsoleerde woningen (R_c minimaal $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$). De bewoners kregen allen een logboek waarin ze naast wat meer algemene data in konden vullen hoe ze het binnenklimaat beoordeelden op: temperatuur, tocht, vloertemperatuur of een andere categorie. Vervolgens kon de bewoner aangeven hoe hij/zij op een bepaalde situatie reageerde (bijv. de ramen open, ventilatieroosters sluiten etc.). Het logboek is gereviseerd door twee experts en naar aanleiding daarvan aangescherpt. Het logboek zoals gebruikt is weergegeven in Bijlage D. Het belevingsonderzoek is gehouden onder één bewoner per woning.

In de (kleine) week dat het belevingsonderzoek werd gehouden, gaven bewoners te kennen dat zij in die week thermisch discomfort ervaren hadden door:

- Een te hoge ruimtetemperatuur;
- Een te lage ruimtetemperatuur;
- Een te hoge ruimtetemperatuur in combinatie met benauwdheid;
- Tocht (door openstaande ventilatieroosters);

- Het koud aanvoelen van de vloer;
- Het kil aanvoelen van meubels.

De aspecten waardoor de bewoners thermisch discomfort hebben ervaren komen overeen met datgene wat reeds uit de literatuur verkregen is. In Tabel 3 zijn de eigenschappen van de woningen waarin het belevingsonderzoek is uitgevoerd weergegeven (enkel eigenschappen van de woonkamer).

Tabel 3 Eigenschappen onderzochte woningen

Woning 1:	Woning 2:	Woning 3:
Hybride ventilatie*	Natuurlijke ventilatie	Natuurlijke ventilatie
Vloerverwarming (h.o.h. 15 cm)	Vloerverwarming (h.o.h. 15 cm)	Vloerverwarming (h.o.h. 15 cm) en radiatoren
PVC vloerafwerking	Vloerbedekking	Houten vloerafwerking
Erker (glas) (h.o.h. 10 cm)	Vloerverwarming 1 ^e verdieping	Houtskeletbouw
Thermostaat 19,5 °C	Thermostaat 20,5 °C	Thermostaat 20,0 °C
Vloerverwarming uit tussen 19:00 en 22:00 voor warm tapwater	Geen nachtverlaging	Nachtverlaging 17,0 °C

*Natuurlijke ventilatieroosters met mechanische afzuiging per ruimte

4.2.2 Expert interviews

Er zijn zijn interviews afgenomen met elf experts op het gebied van vloerverwarming en isolatie die dicht bij de praktijk staan. Vijf experts van adviesbureau DWA, vier van bedrijven in de installatie-, meet- en regeltechniek, één van het kennisinstituut van de installatiesector en één van de brancheorganisatie van de installatiesector. Het gebruikte interviewschema is te zien in Bijlage E.

4.2.2.1 Genoemde belangrijke factoren

De geïnterviewde experts gaven de volgende aspecten aan die volgens hen voornamelijk voor thermisch discomfort kunnen zorgden bij nieuwbouwwoningen met vloerverwarming:

- de vloertemperatuur (9 keer genoemd, 82%)
- koudeval en koudestraling (9 keer genoemd, 82%)
- het type vloerafwerking (5 keer genoemd, 45%)
- het missen van een stralingscomponent (5 keer genoemd, 45%)
- de operationele temperatuur (3 keer genoemd, 27%)
- lichtsnelheid (2 keer genoemd, 18%)
- luchtvochtigheid (1 keer genoemd, 9%)
- verschillen in metabolisme (1 keer genoemd, 9%)
- verschillen in de warmteweerstand van kleding. (1 keer genoemd, 9%)

De eerste vier aspecten van het bovengenoemde rijtje werden vaak in één adem genoemd. Een veelgenoemde mogelijke oorzaak van het onderzochte fenomeen is dat, doordat de gebouwschil goed geïsoleerd is, de vloerverwarming minder warmte de ruimte in hoeft te brengen waardoor de vloer kouder wordt. De bewoner mist daardoor een stralingscomponent, er is geen voelbare warmtebron meer aanwezig in de woning. Dit gemis treedt volgens Experts 1, 2 en 4 voornamelijk op in de avonden als de zontoetreding wegvalt. Hierdoor wordt het koeler in de woning waardoor men de thermostaat omhoog draait. Door een (meestal) lange opwarmtijd bij vloerverwarming wordt het gevoel van thermisch discomfort echter niet snel verholpen.

Drie experts noemen de operationele temperatuur als belangrijk aspect. De operationele temperatuur is het gewogen gemiddelde van de ruimtetemperatuur (lucht) en de stralingstemperatuur (NEN, 2005). Aangezien men de thermostaat naar een hogere ruimtetemperatuur draait dan voorheen zal er misschien een evenwichtsverschuiving plaatsvinden in de operationele temperatuur.

4.2.2.2 Praktische oplossingen

Voor de verschillende mogelijke oorzaken die de geïnterviewde experts aangedragen hebben zijn tevens diverse mogelijke oplossingen aangedragen. De eerste stap is volgens bijna alle experts de gebruiker meer en betere informatie te verschaffen over de verwarmings- en ventilatiesystemen die in de woning aanwezig zijn. Daarbij zou minstens verteld moeten worden dat het systeem niet per se slechter functioneert als thermisch comfort bereikt wordt met een hogere ruimtetemperatuur. De gebruiker zou, indien thermisch discomfort wordt ervaren, de thermostaat beetje bij beetje moeten bedienen net zo lang tot thermisch comfort wordt bereikt. Daarnaast worden slimme regelingen aangedragen die ondanks dat de ruimte reeds op temperatuur is toch de vloerverwarming laten aanslaan om het comfortabele gevoel van een warme vloer te behouden.

Ook werd het plaatsen van extra stralingsbronnen en warmtebronnen als infraroodpanelen en kleine radiatoren en convectoren genoemd als oplossing om een voelbare warmtebron te creëren en koudestraling te compenseren. Gordijnen zouden tevens helpen tegen koudestraling. Discomfort doordat de (koude) vloer warmte onttrekt aan de voeten zou verholpen kunnen worden door een andere vloerafwerking te kiezen met een gunstigere contactcoëfficiënt. Tapijt (zonder isolerende onderrug), hout en PVC houden langer warmte vast en voelen minder snel koud aan. Als meest eenvoudige oplossing werd door nagenoeg iedere expert gesteld dat het openzetten van een raam en het daarmee kouder maken van de woning alle problemen zou kunnen oplossen aangezien de vloerverwarming dan aan zal slaan en er weer een voelbare warmtebron aanwezig zal zijn.

4.2.2.3 Theoretische oplossingen

Meer theoretisch wordt door een vijf experts gesteld dat de ontwerp temperatuur van 20 °C die ISSO hanteert zou moeten worden verhoogd naar 21 °C dan wel 22 °C voor woningen met hoge Rc-waarden en vloerverwarming.

Enkele experts stelden dat tevens bij LTV-radiatoren koudeval en natuurlijke ventilatie problemen opleveren doordat de warmtebron niet genoeg energie af staat om direct lucht met weinig warmte op te warmen. Er werden resultaten van een aantal studies gedeeld waarin aangetoond werd dat wanneer de bedrijfsduur heel lang is, vloerverwarming voordeliger is dan andere systemen maar als de bedrijfstijd korter wordt andere systemen voordeliger worden (kleine verschillen). Deze tijden werden echter niet gekwantificeerd.

4.2.3 Online Enquête

Naar aanleiding van een van de expert interviews is een online enquête gehouden die via sociale media en via de mail verspreid is. 107 Personen hebben de enquête ingevuld. Ongeveer de helft van de respondenten is werknemer van DWA. In deze enquête werd gevraagd welk type verwarmings- en ventilatiesysteem de respondenten hadden, op welke temperatuur zij hun thermostaat instelden voor een comfortabel thermisch binnenklimaat en welk bouwjaar hun woning heeft (indicatie voor de isolatiewaarde). Tot slot was er ruimte voor algemene opmerkingen t.a.v. het thermisch binnenklimaat.

Vijf respondenten hebben in het opmerkingenvak aangegeven dat het na-isoleren van de woning een grote invloed had op het thermisch comfort van een woning. Twee respondenten gaven aan dat koude straling thermische onbehaaglijkheid veroorzaakt en twee anderen geven aan tochtklachten te hebben door natuurlijke ventilatieroosters en een slechte kierdichting.

4.3 Deelconclusie thermisch comfort

Aan de hand van de in voorgaande paragrafen verkregen informatie kan een antwoord op de tweede deelvraag geformuleerd worden. Deze luidt als volgt:

2. *“Hoe wordt een thermisch comfortabel binnenklimaat gekarakteriseerd?”.*

Thermisch comfort kan volgens de literatuur worden onderverdeeld in algemeen thermisch comfort en lokaal thermisch comfort. De volgende parameters horen bij algemeen thermisch comfort dan wel bij lokaal thermisch comfort.

Algemeen thermisch comfort

- Ruimtetemperatuur
- Stralingstemperatuur
- Luchtsnelheid
- Luchtvochtigheid

Lokaal thermisch comfort

- Vloertemperatuur
- Verticale temperatuurgradiënt
- Stralingsasymmetrie
- Tocht

Deze parameters kunnen uitgedrukt worden in een PMV die aangeeft hoe comfortabel het binnenklimaat is. De waarden van alle parameters kunnen omgerekend worden naar percentages ontevreden (PD-waarden (%)).

Uit belevingsonderzoek kwamen een aantal aspecten naar voren waarop de bewoners van goed geïsoleerde woningen uitgerust met vloerverwarming thermisch discomfort ervaren. Daarnaast zijn uit interviews met experts een aantal aspecten gekomen waarvan de geïnterviewde experts stellen dat ze waarschijnlijk de grootste veroorzakers van thermisch discomfort zijn. Deze aspecten zijn hieronder weergegeven.

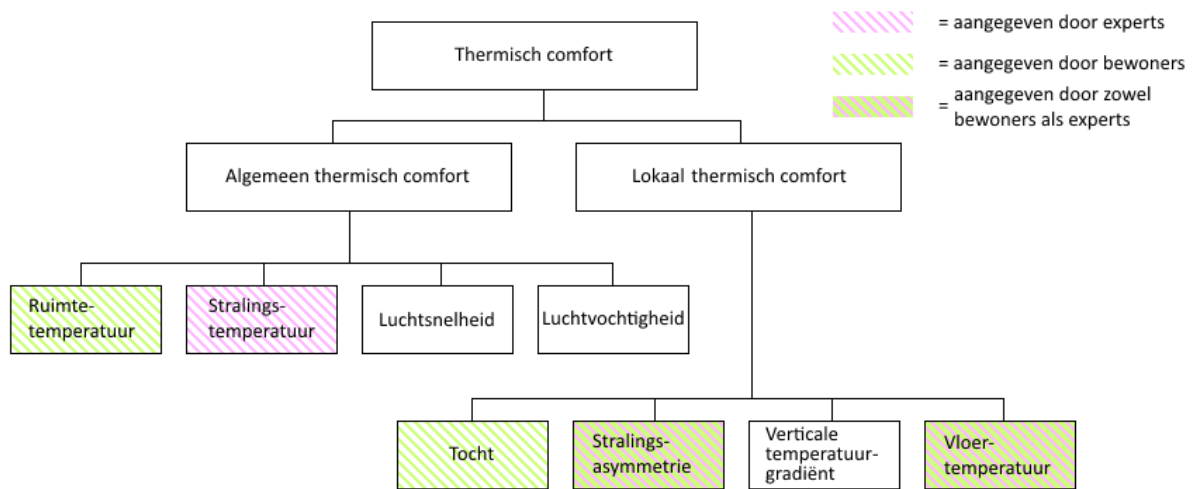
Belevingsonderzoek:

- Een te hoge ruimtetemperatuur;
- Een te hoge ruimtetemperatuur in combinatie met benauwdheid;
- Tocht (door openstaande ventilatieroosters);
- Het kil aanvoelen van meubels.

Expert interviews

- Lage vloertemperaturen en het daardoor ontbreken van een stralingscomponent;
- Ongecompenseerde koudeval en koudestraling door glasoppervlakken;
- Té goed geleidende vloerafwerkingen waardoor warmte onttrokken wordt uit het lichaam

De in dit hoofdstuk genoemde aspecten die van belang zijn op het thermisch comfort in een goed geïsoleerde woning uitgerust met vloerverwarming, zijn visueel weergegeven in Figuur 8.



Figuur 8 Parameters van thermisch comfort

5 Relatie systemen in woning en thermisch comfort

In dit hoofdstuk zal onderzocht worden of er een relatie te vinden is tussen aanwezige bouwkundige en installatietechnische systemen en het thermisch comfort dat optreedt in een woning. Om mogelijke relaties in kaart te brengen zullen de resultaten van en de antwoorden op de voorgaande deelvragen met elkaar vergeleken worden. Paragraaf 5.1 zal deze analyse behandelen, in Paragraaf 6 wordt de deelconclusie van de derde onderzoeksvraag gegeven.

5.1 Analyse relatie aanwezige systemen en thermisch comfort

De analyse zal worden gedaan op het uitgevoerde belevingsonderzoek, de expert interviews en de enquête resultaten. De eerste deelparagraaf zal de literatuur behandelen, de tweede deelparagraaf het belevingsonderzoek en de derde deelparagraaf zal dieper ingaan op de expert interviews.

5.1.1 Analyse belevingsonderzoek

Het belevingsonderzoek is gedaan onder drie bewoners van goed geïsoleerde woningen in combinatie met vloerverwarming. De hoofdeigenschappen van de drie onderzochte woningen die van belang zijn voor dit onderzoek zijn weergegeven in Tabel 3.

De bewoners van Woning 1 hebben aangegeven dat 's avonds de woonruimte regelmatig als koud wordt ervaren. Daarbij wordt als hoofdrede aangegeven dat de vloer niet warm en de woonruimte kil aanvoelt. Indien de natuurlijke ventilatieroosters (langdurig) openstaan wordt tocht ervaren. De bewoners van Woning 2 veranderen de instellingen van de thermostaat zelden tot nooit en laten de natuurlijke ventilatieroosters altijd openstaan. Zij ervaren zelden tot nooit thermisch discomfort in welke vorm dan ook en stellen dat de ruimte het hele jaar door behaaglijk is. Grootste oorzaak daarvan is volgens de bewoner dat het plafond door de vloerverwarming op de 1^e verdieping ook warm is en warmte afstraalt. De bewoners van Woning 3 laten de natuurlijke ventilatieroosters te allen tijde openstaan en veranderen de thermostaat zelden. Indien ze veel bezoek krijgen en veel warmteproductie verwachten stellen ze de nachtverlaging eerder in werking. Thermisch discomfort wordt ervaren door een te hoge ruimtetemperatuur. Hier wordt veelal op gereageerd door de deur naar de hal te openen.

Bij alle drie de woningen is geen hele hoge temperatuur ingesteld op de thermostaat om thermisch comfort te verkrijgen. De Woningen 2 en 3 hebben met de eigenschappen uit Tabel 3 overwegend een thermisch comfortabel binnenklimaat afgezien van het feit dat in Woning 3 regelmatig de warmte te lang blijft hangen waardoor het te warm wordt binnen. In Woning 1 wordt het meest thermisch discomfort ervaren. De verschillen tussen Woning 1 en de Woningen 2 en 3 liggen voornamelijk dat Woning 1 een groter glasoppervlak heeft door de glazen erker en het feit dat de vloer eerder uitkoelt dan in de Woningen 2 en 3 (nachtverlaging treedt pas later in werking en Woning 2 heeft helemaal geen nachtverlaging).

5.1.2 Analyse expert interviews

Ten eerste kwam uit de interviews naar voren dat volgens de experts nog altijd 9 op de 10 woningen gebouwd wordt met een natuurlijk ventilatiesysteem. Resultaten van de uitgevoerde enquête onderbouwen geven hier een aardige onderbouwing voor. Uit verscheidene onderzoeken bij honderden woningen is volgens een expert naar voren gekomen dat in woningen met balansventilatie de thermostaat ongeveer een graad lager werd gezet dan bij natuurlijke ventilatie. Waar bij natuurlijke ventilatie 22 °C op de thermostaat gehanteerd werd, werd bij balansventilatie een temperatuur van 21 °C gehanteerd. Enkele experts benoemden de combinatie van (goed geïsoleerde)

nieuwbouwwoningen en natuurlijke ventilatie een ongelukkige combinatie omdat de koude lucht niet snel genoeg opgewarmd zou kunnen worden. Er waren echter ook experts die stelden dat het type ventilatiesysteem los staat van het fenomeen dat bewoners de thermostaat een graad hoger instellen bij vloerverwarming in woningen met goed geïsoleerde gevels aangezien het vertrek voldoende vermogen zou moeten hebben om de koude binnenkomende lucht op te warmen. Daarbij werd echter wel gezegd dat natuurlijke ventilatie voor meer probleemzones in een woning kan zorgen en een grote factor is in de toevoer van koude in de woning.

De voeten zijn zeer gevoelig voor temperatuurverschillen en ervaren een koude vloer dan ook snel als oncomfortabel. Bij vloerverwarming worden veelal steenachtige vloerafwerkingen gebruikt die zeer goed warmte geleiden en daarom ook snel onttrekken aan het lichaam. De vloerafwerking is volgens een aantal experts dan ook een belangrijke factor bij thermisch discomfort bij vloerverwarming. Daarbij werd gezegd dat er nauwelijks verschil is tussen nat- of droogbouw aangezien een dunne tegel net zo goed warmte kan onttrekken uit het lichaam als een dikke vloer. Daarbij moet wel gezegd worden dat een grotere thermische massa langer warmte vasthoudt waardoor bij natbouw waarschijnlijk minder snel discomfort zal ontstaan door een koude voer. Doordat de vloer weinig warmte afgeeft worden koudeval en koudestraling van (grote) glasoppervlakken waarschijnlijk slecht gecompenseerd wat in de buurt van glasoppervlakken thermisch discomfort kan veroorzaken. Het ontbreken van een stralingscomponent en de stralingsasymmetrie die dat met zich mee brengt in combinatie met het te koud worden van de vloer en het discomfort wat dat met zich meebrengt worden door de experts als grootste veroorzakers gezien van het omhoog draaien van de thermostaat bij woningen met een goed geïsoleerde gebouwschil en vloerverwarming.

5.1.3 Analyse enquête

Vanuit de enquête (Paragraaf 4.2.1) valt geen significant verschil aan te merken tussen de ingestelde temperatuur op de thermostaat voor oude en nieuwe woningen. Zowel bij oudere als nieuwe woningen werden hoge temperaturen (20,5°C en hoger) en lage temperaturen (lager dan 20,0°C) ingesteld. Hetzelfde geldt voor verschillen in ventilatie- en warmteafgiftesystemen voor alle combinaties zijn hoge en lage ingestelde temperaturen uit de enquête gekomen. Het enige opvallende is dat woningen van vóór 1990 met vloerverwarming vaak tevens uitgerust zijn met radiatoren. Woningen van na 1990 hebben vaker alleen radiatoren.

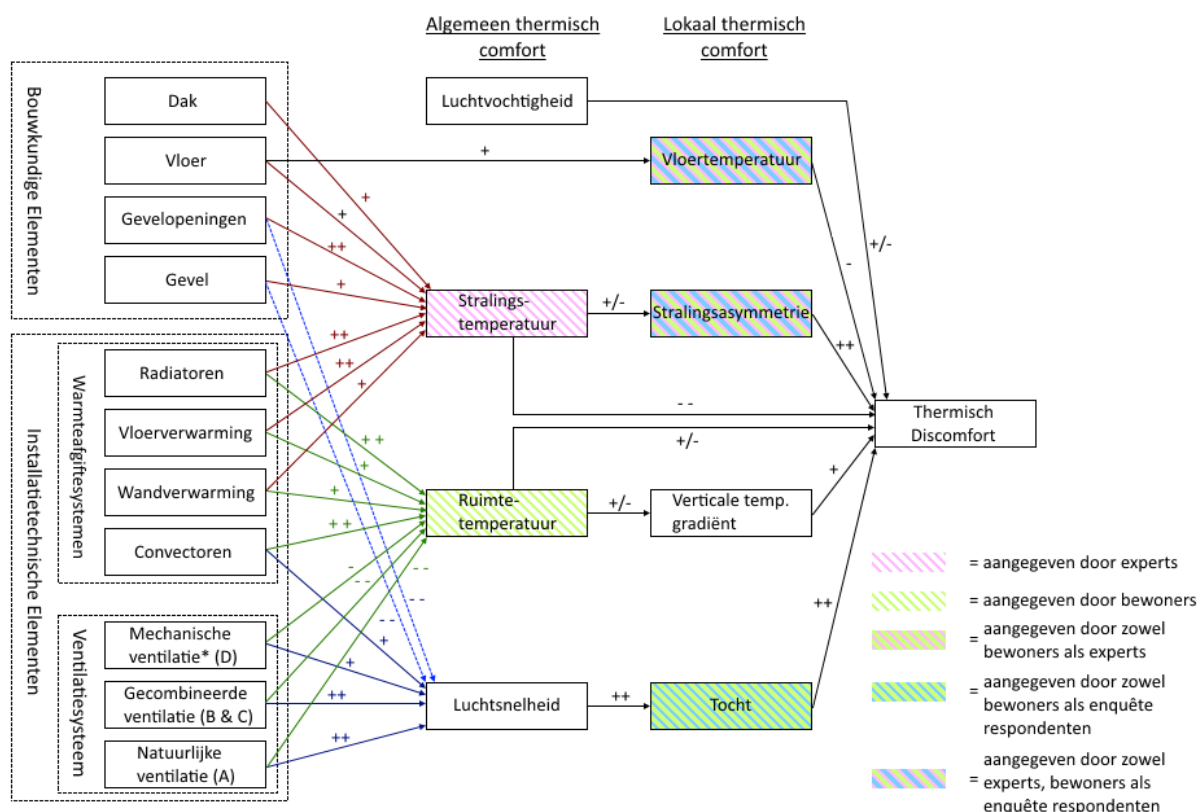
Een aantal respondenten hebben van de mogelijkheid gebruik gemaakt om extra informatie te geven. 9 Van de 107 respondenten hebben informatie gegeven over het thermisch comfort in hun woning. Twee van hen geven aan dat koud glas een bron van thermisch discomfort in hun woning is, twee respondenten geven aan thermisch discomfort te ervaren door een (zeer) koude vloer en twee respondenten geven aan tocht te ervaren door slechte kierdichting en/of openstaande natuurlijke ventilatieroosters.

5.2 Deelconclusie relatie aanwezige systemen en thermisch comfort

Aan de hand van de in voorgaande paragrafen verkregen informatie kan een antwoord op de tweede deelvraag geformuleerd worden. Deze luidt als volgt:

3. “Welke relatie is er tussen bouwkundige en installatietechnische systemen en een thermisch comfortabel binnenklimaat?”.

Vanuit zowel het belevingsonderzoek onder drie bewoners van woningen met een goed geïsoleerde gevel en vloerverwarming, de uitgevoerde enquête als de expert interviews zijn relaties voortgekomen tussen de systemen die in een woning te vinden zijn en de parameters die voor thermisch discomfort zorgen. In Figuur 9 zijn alle relaties weergegeven die in dit hoofdstuk gevonden zijn.



Figuur 9 Relaties systemen in een woning en thermisch comfort

In bovenstaand figuur zijn de bouwkundige en installatietechnische elementen in de meest linker kolom te zien waarbij de installatietechnische elementen weer onderverdeeld zijn in verwarmingsinstallaties en ventilatiesystemen. In de tweede kolom zijn de parameters te zien die voor algemeen thermisch comfort zorgen en in de derde kolom zijn de parameters weergegeven die voor lokaal thermisch comfort zorgen. De parameters die voor lokaal thermisch comfort zorgen volgen, met uitzondering van de vloertemperatuur uit de parameters voor algemeen thermisch discomfort. Zo heeft een plaatselijk te hoge luchtsnelheid tocht tot gevolg en leidt een plaatselijk te hoge of lage stralingstemperatuur tot stralingsasymmetrie. In het figuur zijn er geen lijnen getrokken naar luchtvochtigheid vanuit de systemen. Dit is gedaan om de overzichtelijkheid te behouden aangezien alle systemen in meer of mindere mate invloed hebben op de luchtvochtigheid. Met plus- en mintekens is aangegeven wat de relaties, die de pijlen aangeven, betekenen. De relaties zijn te lezen

als “als A groter, dan B ... “. Dat wil zeggen dat de plus- en mintekens aangeven of de parameter rechts van de pijl groter of kleiner wordt als de parameter vóór de pijl groter wordt.

Een aantal relaties kunnen zowel een positieve als negatieve invloed hebben op het thermisch discomfort (bijvoorbeeld de ruimtetemperatuur kan zowel te hoog als te laag zijn waardoor een verhoging niet altijd een positief effect heeft, het kan ook voor meer discomfort zorgen). Hoe hoger het ventilatiedebiet, hoe hoger de luchtsnelheid in de woning wordt. Ook geldt voor ventilatiesystemen dat hoe groter het ventilatiedebiet, hoe lager de ruimtetemperatuur (als de overige parameters gelijk blijven). De warmteafgiftesystemen zorgen voor een hogere ruimtetemperatuur en een grotere stralingstemperatuur als zij meer warmte afgeven. Indien de vloerkwaliteit toeneemt, zal meer energie aan de bovenkant van de vloer worden afgegeven waardoor de vloertemperatuur hoger is. Een verhoging van de luchtvochtigheid kan zowel een positief als negatief hebben op het thermisch discomfort dat wordt ervaren. Uit de resultaten van het onderzoek bleek dat de vloer vaak als niet warm werd ervaren waardoor een verhoging in vloertemperatuur thermisch discomfort verlaagt. Afhankelijk van de stralingstemperatuur van verschillende vlakken heeft de stralingstemperatuur een positief dan wel negatief effect op de stralingsasymmetrie die ervaren wordt. Hoe groter de stralingsasymmetrie, hoe groter echter het thermisch discomfort zal zijn. Uit de resultaten is gebleken dat de stralingscomponent gemist wordt, een toename in stralingstemperatuur zal hoogstwaarschijnlijk thermisch discomfort verminderen. De ruimtetemperatuur kan zowel een positief als een negatief effect hebben op zowel thermisch discomfort als op de verticale temperatuurgradiënt. De verticale temperatuurgradiënt geeft het verticale temperatuurverschil aan en is zodoende afhankelijk van de ruimtetemperatuur, de gradiënt kan echter groot zijn bij zowel hoge als lage temperaturen. Een grotere verticale temperatuurgradiënt vergroot het thermisch discomfort. Hoe hoger de luchtsnelheid, hoe groter de mate van tocht die ervaren wordt en hoe groter het thermisch discomfort dat ervaren wordt zal zijn. De relatie tussen de gevelopeningen en luchtsnelheid alsook de gevel en luchtsnelheid zijn met een stippellijn weergegeven omdat het onderzoek zich richt op goed geïsoleerde gevels waardoor luchtdoorlatendheid minder effect heeft op de luchtsnelheid dan de andere systemen.

6 Relatie beleving thermisch comfort en fysische parameters

In dit hoofdstuk zal de relatie tussen de beleving van thermisch comfort door bewoners van goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming en de optredende fysische parameters in deze woningen behandeld worden. Om die relatie te kunnen analyseren zullen allereerst meetgegevens verzameld worden. In Paragraaf 6.1 zal de meetmethodiek kort besproken worden, in Paragraaf 6.2 zullen de gemeten parameters per case vergeleken worden met de beleving van de bewoners, in Paragraaf 6.3 zullen de cases onderling met elkaar vergeleken worden en tot slot zal in Paragraaf 6.4 een deelconclusie voor de vierde deelvraag worden gegeven.

6.1 Meetmethodiek

Om vast te kunnen stellen welk effect de, in Paragraaf 3.4 vastgestelde, aanwezige systemen hebben op de verschillende parameters die van invloed zijn op het thermisch comfort in een woning zullen de parameters gemeten worden. De parameters die gemeten worden zijn de uit Hoofdstuk 4 voortgekomen parameters voor algemeen thermisch comfort en lokaal thermisch comfort.

Om vast te stellen hoe de vloertemperatuur op een zodanige manier gemeten kan worden dat de reële temperatuur zo goed mogelijk wordt benaderd, zijn een drietal proefmetingen gedaan op verschillende oppervlakken. Hierbij zijn aanbevelingen van Experts 7, 8 en 11 meegenomen (zie Referentielijst). Het proces van de proefmetingen en de conclusie daaruit zijn te zien in Bijlage F. Op basis van de proefmetingen is uiteindelijk een meetplan opgesteld voor meting 1 die vervolgens als blauwdruk heeft gediend voor de overige metingen. Het opgestelde meetplan is te zien in Bijlage G. In Bijlage G is tevens de gebruikte meetapparatuur met bijbehorende specificaties weergegeven.

Met behulp van een klimaatmeter van Testo zijn de stralingstemperatuur, de ruimtetemperatuur, de luchtvochtigheid en de luchtsnelheid gemeten. Naast bovengenoemde parameters is tevens de hoeveelheid CO₂ in de ruimte gemeten om eventueel te kunnen zien hoeveel personen in de ruimte aanwezig waren bij bepaalde gemeten waarden. Met KeyTag loggers zijn de luchttemperatuur op verschillende hoogten, om de verticale temperatuurgradiënt vast te stellen, en de contacttemperatuur van vloer, wand en glas gemeten. Uit de proefmetingen werd geconcludeerd dat een KeyTag KTL-208 met KT-A-ST100 sensor het beste resultaat had met een aluminium verpakking om de sensor. Dit is dan ook toegepast bij de contactoppervlak metingen. Om de gemiddelde vloertemperatuur te kunnen bepalen zijn drie sensoren op verschillende plaatsen in de ruimte geplaatst. In Woning 3 zijn helaas de contact oppervlakken van muur en beglazing niet gemeten doordat de sensoren niet goed bevestigd waren en het glas slecht bereikbaar was.

De waarden afkomstig uit de klimaatmeter van Testo zijn vervolgens omgerekend naar PMV en PPD waarden. Met de overige parameters en de formules uit NEN-EN-ISO 7730 is berekend welk percentage van de personen (PD) het binnenklimaat onbehaaglijk vindt op basis van de vloertemperatuur, tocht, de verticale temperatuurgradiënt en stralingsasymmetrie voor de verschillende woningen.

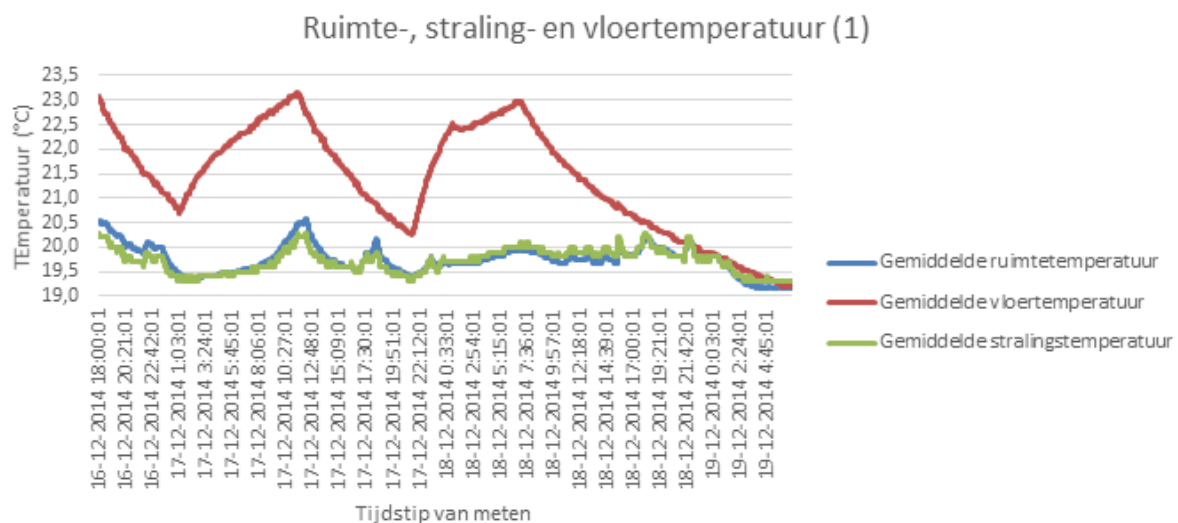
6.2 Case analyse fysische parameters

De drie woningen waarin gemeten zijn zullen elk in een subparagraaf kort behandeld worden. De luchtsnelheid als parameter en de ervaring van tocht worden hierin niet meegenomen. De luchtsnelheid is in alle metingen lager dan 0,5 m/s gebleken (zie Bijlage F) waardoor in de ontevredenheid berekening voor tocht een factor gelijk is aan nul en het percentage ontevreden door tocht zodoende tevens 0% is.

6.2.1 Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 1

In Woning 1 werd thermisch discomfort ervaren doordat (vooral 's avonds) de vloer koud aanvoelt, de ruimte kil aandoet en tocht wordt ervaren. Daarnaast wordt de algemene ruimtetemperatuur geregeld als koud ervaren.

Uit de uitgevoerde metingen zijn PMV en bijbehorende PPD waarden gekomen (zie Bijlage F voor de formules). In de dagen waarop waarin de metingen uitgevoerd zijn fluctueert de PMV tussen de -0,7 en -1,0. Een negatieve PMV betekent dat bewoners het binnenklimaat als koel zullen ervaren. Nagenoeg op ieder gemeten moment vallen de gemeten PMV waarden buiten de comfort klassen in Tabel 2 en kan de woning dus als thermisch oncomfortabel worden aangemerkt. De ervaring van de bewoners komt overeen met de gemeten PMV waarden. Omgerekend naar PPD waarden zouden op het meest gunstig gemeten moment 14,3% van de personen het klimaat als oncomfortabel ervaren en dat loopt op tot maar liefst 26,4%. Opvallend is dat het uitkoelen van de vloer na 19:00 's avonds slechts een heel klein effect heeft op de PMV en PPD.

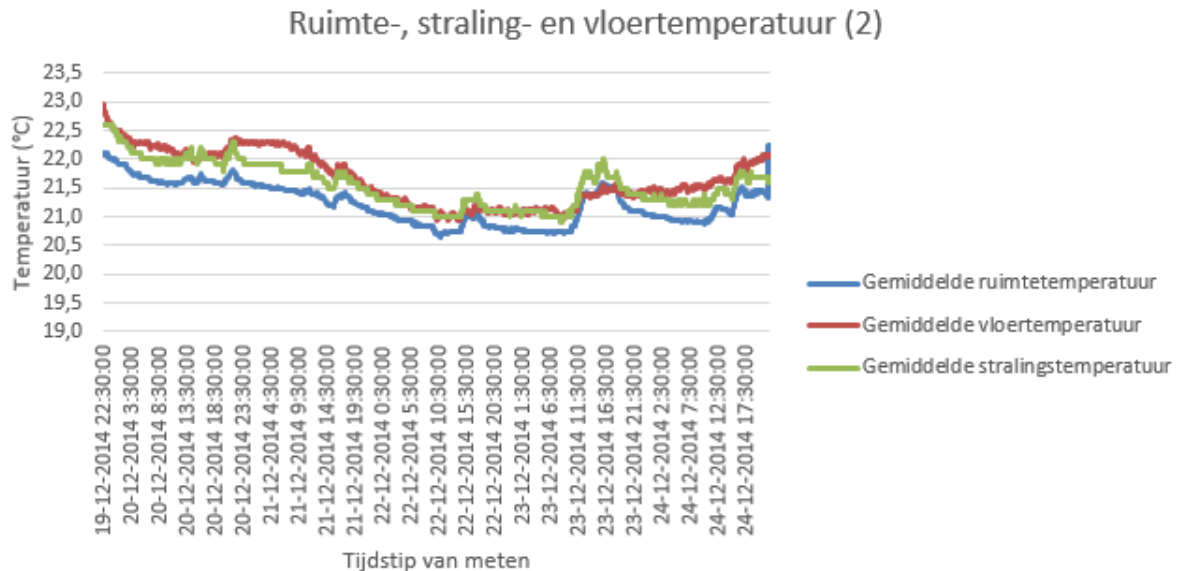


Figuur 10 Ruimte-, straling- en vloertemperatuur woning 1

In Figuur 10 is te zien dat de ruimtetemperatuur met de vloertemperatuur mee loopt. Een extra piek is te zien die begint op 17 december om 16:45. Deze piek loopt gelijk met een toename in ppm CO₂ en is zodoende te verklaren door een toename van het aantal personen in de ruimte. Doordat vloer- en ruimtetemperatuur midden op de dag een piek heeft begint vanaf daar de temperatuur af te nemen. Hierdoor treed 's avonds het dieptepunt op. De thermostaat geeft aan te moeten verwarmen bij een temperatuur lager dan 19,5°C waardoor aan het eind van de avond en in de nacht de vloer warm wordt om de temperatuur omhoog te brengen. De vloer is zodoende 's nachts behaaglijk warm. De stralingstemperatuur verschilt niet significant van de ruimtetemperatuur en de percentages ontevreden door stralingsasymmetrie en de verticale temperatuurgradiënt zijn kleiner dan 1% (zie Bijlage F).

6.2.2 Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 2

In Woning 2 werd nagenoeg nooit thermisch discomfort ervaren. De bewoners veranderen zelden of nooit de instellingen van de thermostaat. De berekende PMV waarden liggen tussen de -0,2 en -0,6 corresponderend met PPD waarden van respectievelijk 6,2% en 14,3%. Voornamelijk 's nachts valt de PMV onder de -0,5 waardoor comfort klasse C aangedaan wordt. Op sommige dagen wordt overdag klasse B gehaald. De PMV waarde suggereert dat het nog enigszins koel in de woning zou moeten zijn, de bewoner herkent dit echter niet.



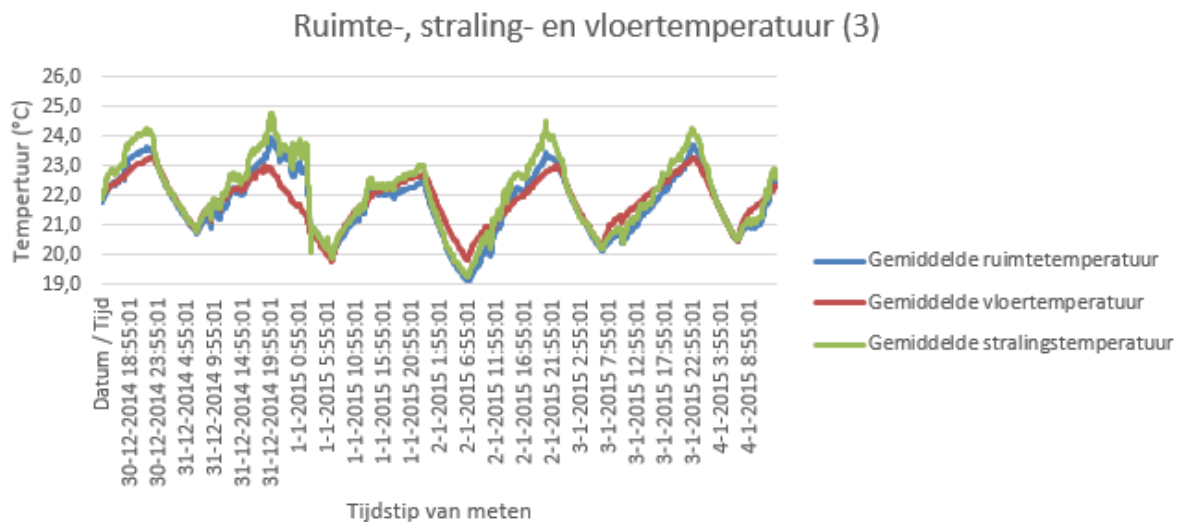
Figuur 11 Ruimte-, straling- en vloertemperatuur woning 2

Aan de temperaturen in Figuur 11 is te zien dat de temperatuur niet onder de 20,5°C komt en het zodoende op geen enkel meetpunt kouder is dan de op de thermostaat ingestelde temperatuur. De weergegeven temperaturen zijn allen vrij constant en geleidelijk wat aanleiding zou kunnen zijn voor de constante comfort beleving van de bewoner. Opvallend is dat de stralingstemperatuur gemiddeld 1,1°C hoger ligt dan de ruimtetemperatuur. Het plafond als extra stralingscomponent zou hier de oorzaak van kunnen zijn.

De percentages ontevredenheid liggen erg laag met een maximaal percentage ontevredenheid over de vloertemperatuur van 7% en percentages ontevredenheid over de verticale temperatuurgradiënt en stralingsasymmetrie komen zelfs niet boven de 0,6%.

6.2.3 Analyse fysische parameters en corresponderende bewoner beleving woning 3

In Woning 3 werd thermisch discomfort enkel ervaren door een te hoge ruimtetemperatuur. De berekende PMV waarden liggen tussen +0,3 en -1,1 met bijbehorende PPD waarden van respectievelijk 5,0% en 31,5%. In Woning 3 wordt nachtverlaging toegepast. Er zijn dan ook duidelijke pieken en dalen te herkennen in Woning 3 (zie Figuur 12) waarbij het 's nachts koel is in de woning en overdag warmer. De PMV waarden liggen het grootste deel van de dag tussen de -0,5 en +0,3 waarmee comfortklassen A en B behaald worden. 's Ochtends is de PMV veelal nog onvoldoende en is het te koud in de woning, in de loop van de ochtend loopt de temperatuur op tot de PMV in comfortklasse A valt. 's Avonds kan de binnentemperatuur oplopen tot 24 °C, de vloertemperatuur loopt samen op met deze binnentemperatuur. De ervaring van de bewoners dat het regelmatig warm is in de woning komt zodoende overeen met de gemeten parameter waarden.



Figuur 12 Ruimte-, straling- en vloertemperatuur woning 3

Opvallend hierbij is wederom dat de stralingstemperatuur gemiddeld hoger ligt dan de ruimtetemperatuur, gemiddeld $1,1^{\circ}\text{C}$. De aanwezigheid van radiatoren als stralingsbron zouden hier de oorzaak van kunnen zijn.

De percentages ontevredenheid liggen erg laag met een maximaal percentage ontevredenheid over de vloertemperatuur van 8,8% en een percentage ontevredenheid over de verticale temperatuurgradiënt van 1,4%. Door de aanwezigheid van een soort stoffen (half doorzichtige) luxaflex en een zeer ruwe muurafwerking zijn de muur- en beglazingstemperaturen niet gemeten en zijn er geen waarden voor stralingsasymmetrie bekend.

6.3 Cross case analyse fysische parameters

De hoogst gemeten luchtsnelheid is in woning 1 met een snelheid van $0,04\text{ m/s}$. In woning 2 en 3 zijn geen snelheden hoger dan $0,02\text{ m/s}$ gemeten. Volgens NEN-EN-ISO 7730 zijn er bij luchtsnelheden onder de $0,5\text{ m/s}$ geen tochtklachten. De percentages ontevredenheid door een verschil in temperatuur tussen hoofd en enkels is in alle drie woningen minder dan 2% en zodoende eveneens te verwaarlozen.

Hoewel op basis van de expert interviews en de uitgevoerde enquête aangenomen werd dat in een woning waarin bij 'standaard' thermostaat instellingen thermisch discomfort optreedt sprake zou zijn van stralingsasymmetrie, is dat in de doorgemeten woningen niet het geval. Het percentage ontevredenheid veroorzaakt door stralingsasymmetrie is maximaal 1%. Mogelijk komt dit doordat in Woning 1 's avonds relatief dikke gordijnen voor de glazen erker hangen die koudeval en koudestraling in de leefruimte tegenhouden.

In alle drie de woningen heeft de vloertemperatuur een omgekeerd evenredig verband met de vloertemperatuur. De trendlijnen van de vloertemperaturen in de gemeten woningen liggen maximaal een halve graad van elkaar. Er is dus geen significant verschil in de vloertemperatuur. Wel significant afwijkend zijn de tijden waarop de vloer aanwarmt en uitkoelt. In Woning 1 is een geleidelijke opwarming van de vloer waar te nemen gedurende 10 uur lang. Vervolgens koelt de vloer over een tijdsbestek van 10 uur weer uit waarna het proces opnieuw begint. In Woning 2 zijn nauwelijks pieken waar te nemen en verloopt de vloertemperatuurcurve veel constanter. In Woning 3 zijn tevens pieken waar te nemen, deze corresponderen met de nachtverlaging. De vloer begint aan het eind van de avond uit te koelen, gedurende zo'n 12 uur, en begint 's ochtends weer aan te warmen gedurende 12

uur. Dit patroon herhaalt zich iedere dag. Het verschil in piek patroon tussen Woning 1 en Woning 3 zit in het feit dat het lage punt in de curve zich bij woning 1 's avonds voordoet op het moment dat de woonruimte het meest gebruikt wordt en bij woning 3 vinden de lage punten in de curve aan het begin van de ochtend plaatst waardoor de vloertemperatuur 's avonds het meest comfortabel is. Opvallend is dat de vloertemperaturen van Woning 1 en 3 sterk overeenkomen maar dat Woning 3 veel hogere binnentemperaturen heeft. De aanwezige radiatoren zorgen hoogstwaarschijnlijk voor de aanvullende warmte. Daar waar in Woning 1 en 3 de vloertemperaturen variëren tussen 20 °C en 23 °C varieert de vloertemperatuur in Woning 2 overwegend tussen de 21 °C en 22 °C.

Zowel de ruimte- als de stralingstemperatuur liggen bij Woning 2 en 3 ongeveer anderhalve graad hoger dan in Woning 1 het geval is. Dit verschil is groter dan het verschil in thermostaat instellingen namelijk respectievelijk 19,5°C, 20,5°C en 20,0°C. Tevens is in Woningen 2 en 3 de stralingstemperatuur hoger dan de ruimtetemperatuur waar in Woning 1 de stralingstemperatuur gelijk of lichtelijk lager is dan de stralingstemperatuur.

Hoewel de geïnterviewde experts de invloed van de luchtvochtigheid minimaal achtten is het opvallend dat in Woning 1 de luchtvochtigheid gemiddeld 15% hoger ligt dan in Woningen 2 en 3.

6.4 Deelconclusie relatie beleavings- en fysische parameters

De deelvraag die met de in het voorgaande hoofdstuk verkregen informatie beantwoord zou moeten worden luidt als volgt:

4. *“Wat is de relatie tussen de beleving van thermisch discomfort van een bewoner en de fysische parameters in zijn/haar woning?”.*

In dit hoofdstuk zijn de metingen die in drie woningen uitgevoerd zijn aan de orde gekomen. Ten eerste is de gebruikte meetmethode besproken. Vervolgens zijn de gemeten waarden per woning geanalyseerd en tot slot zijn de verschillende casussen met elkaar vergeleken om verbanden te ontdekken. In deze slotparagraaf komen de conclusies die uit het voorgaande getrokken kunnen worden aan bod.

Op basis van literatuurstudie, interviews met experts en experimenteel onderzoek is een meetmethode ontwikkelt (Bijlage G) waarmee metingen in drie woningen uitgevoerd zijn. De meetmethode kan in de toekomst gebruikt worden als basis voor vervolg onderzoek.

In Woning 1 werd geregeld thermisch discomfort ervaren in de vorm van een gevoel van koude, in Woning 2 werd zelden tot nooit thermisch discomfort ervaren en in Woning 3 werd af en toe thermisch discomfort ervaren in de vorm van warmteoverschot. De PMV-waarden ondersteunen de belevingen van de bewoners. Er kan geconcludeerd worden dat woningen waarin de ruimtetemperatuur 21 °C of hoger en de stralingstemperatuur hoger ligt dan de ruimtetemperatuur (ongeveer 1,0 °C) als thermisch comfortabeler worden ervaren dan woningen met een ruimtetemperatuur lager dan 20 °C waarbij de stralingstemperatuur onder de ruimtetemperatuur ligt. In de Woningen 2 en 3 waren meer stralingsbronnen aanwezig dan in Woning 1, mogelijk is enkel vloerverwarming onvoldoende stralingsbron om thermisch comfort te bewerkstelligen bij een lage temperatuur. Daarnaast is het zeer comfortabel indien de vloer-, ruimte- en stralingstemperatuur constant zijn en weinig pieken bevatten.

Indien de vloertemperatuur niet constant wordt gehouden, maar de vloer op bepaalde tijden aanwarmt en uitkoelt is het tijdstip van aanwarmen en uitkoelen van groot belang. Thermisch

discomfort wordt ervaren wanneer de vloer in de avonduren uitkoelt en thermisch comfort wordt ervaren indien de vloer aanwarmt vanaf het middaguur tot de avonduren en dan pas uitkoelt.

Uit Hoofdstuk 5 kwam reeds naar voren dat de verticale temperatuurgradiënt geen significante invloed heeft op het thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming. Uit de metingen is een ontevredenheidspercentage van maximaal 1,4% voortgekomen voor de verticale temperatuurgradiënt. Door de aanwezigheid van vloerverwarming op de eerste verdieping in Woning 2 was daar het verticale temperatuurverschil zoals verwacht het kleinst.

Indien de temperatuur lager is dan 20 °C en de luchtvochtigheid relatief hoog (hoger dan 45%) wordt de combinatie van koude lucht en hoge luchtvochtigheid als kil ervaren. De combinatie van een lage temperatuur en hoge luchtvochtigheid moet dan ook vermeden worden.

7 Discussie

In dit hoofdstuk zullen enkele onderzoeksresultaten kritisch worden bekeken. Door de resultaten te bediscussiëren kan beter begrip van de onderzoeksresultaten worden verkregen.

Vanuit de metingen in alle drie woningen kwam naar voren dat de stralingsasymmetrie slechts een maximum van 1% ontevredenen zou opleveren. In Woning 1 is een glazen erker aanwezig die veel koudestraling zou kunnen genereren. Alhoewel in Woning 1 de hoogste stralingsasymmetrie gemeten is, is een maximum van 1% ontevredenen zeer weinig. Vanuit de enquête en expert interviews kwam stralingsasymmetrie naar voren als mogelijke hoofdoorzaak van thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming en dat is niet terug te zien in de metingen. Mogelijk is de toegepaste methode niet geschikt om stralingsasymmetrie goed in kaart te brengen.

Hoewel de bewoners van Woning 1 aangegeven hebben tocht te ervaren, zijn zeer lage luchtsnelheden gemeten. Door de sensor voor luchtsnelheid op één plaats te zetten zijn mogelijk aanwezige tochtstromingen niet gemeten.

Het logboek heeft minder data opgeleverd dan verwacht. De data die wel aangeleverd werd was veelal onvolledig waardoor de data slechts op hoofdlijnen geanalyseerd kon worden. Doordat een beperkte hoeveelheid informatie gebruikt is, geven de conclusies die uit deze data getrokken zijn mogelijk een onvolledig beeld.

De conclusies uit dit onderzoek zijn gebaseerd op bewoner ervaringen van slechts drie bewoners van goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming. Hoewel de woningen door meer dan één persoon bewoond worden is slechts de ervaring van één bewoner per woning meegenomen in het onderzoek. Mogelijk zouden de ervaringen van andere bewoners in dezelfde woning een vollediger beeld geven hebben van hoe het binnenklimaat wordt ervaren.

8 Conclusie

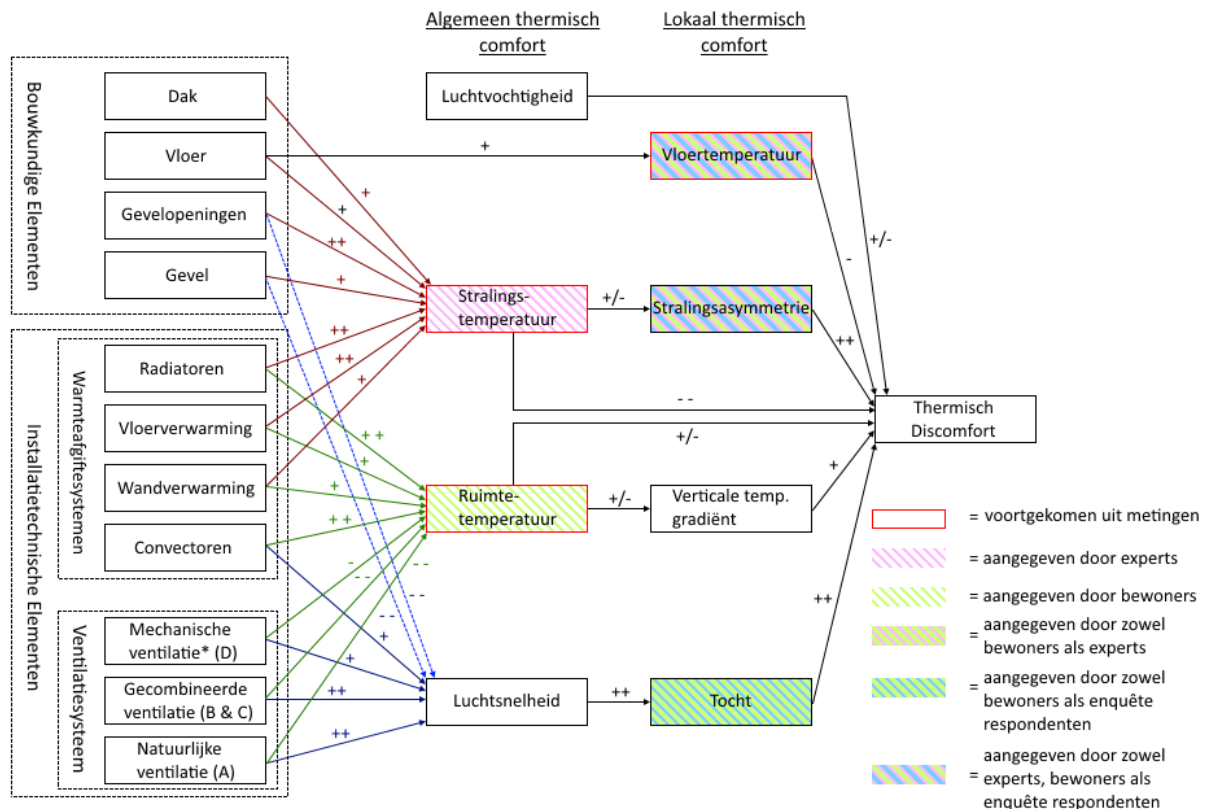
Dit hoofdstuk zal bestaan uit twee delen. Het eerste zal een antwoord geven op de opgestelde hoofdvraag, zoals voortgekomen uit probleem- en doelstelling (Paragraaf 0): *“Hoe ziet een model eruit waarmee voorspellingen gedaan kunnen worden over hoe het thermisch discomfort bij de gebruikers van vloerverwarming in combinatie een zeer goed geïsoleerde gevel verholpen kan worden?”*. In het tweede deel zullen de implicaties en belang van dit document besproken worden.

Uit de eerste deelvraag zijn bouwkundige elementen en installatietechnische systemen gekomen die van invloed zijn op het thermisch comfort in een woning. De bouwkundige elementen zijn dak, gevel, gevelopeningen en vloer. De installatietechnische systemen die van invloed zijn op het thermisch comfort zijn radiatoren, vloerverwarming, wandverwarming, convectoren en de ventilatiesystemen A, B, C en D. Uit de tweede deelvraag zijn parameters die van belang zijn om thermisch comfort te bewerkstelligen, zijnde luchtvochtigheid, stralingstemperatuur, ruimtetemperatuur, luchtsnelheid, vloertemperatuur, stralingsasymmetrie, verticale temperatuurgradiënt en tocht. Op basis van deze systemen en parameters en uitgevoerd expert interviews, belevingsonderzoek en een online enquête kan geconcludeerd worden dat de vloertemperatuur en stralingsasymmetrie de parameters zijn die het meeste invloed hebben op thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen.

Als laatste stap in het onderzoek zijn de gevonden parameters gemeten in drie woningen. Uit de verrichte metingen is te concluderen dat een ruimtetemperatuur van 21 °C en een stralingstemperatuur van ongeveer een graad hoger dan de ruimtetemperatuur comfortabel wordt geacht. Tevens is het comfortabel als de ruimte-, stralings- en vloertemperatuur gedurende de dag constant is. Indien de vloertemperatuur pieken bevat in verband met nachtverlaging is het zaak om ervoor te zorgen dat de hoogste pieken in de avonduren liggen en vooral niet in de nacht. Een dieptepunt in vloertemperatuur in de avond zorgt voor thermisch discomfort. Uit de metingen kan dan ook geconcludeerd worden dat stralings-, ruimte- en vloertemperatuur parameters zijn die het meest invloed hebben op thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen.

De meest onderzochte parameters en hun relaties met de bouwkundige en installatietechnische elementen zijn weergegeven in het opgestelde causaal-relatie diagram zoals te zien in Figuur 13. De relatie tussen twee onderdelen in het diagram is weergegeven door middel van een pijl waarbij met +/-, -, - -, + of ++ de aard van de relatie is aangegeven. De aard van de relatie geeft aan hoe de parameter aan de rechterkant van de pijl verandert als de parameter aan de linkerkant van de pijl groter wordt.

Het onderzoek heeft geen model opgeleverd dat direct aangeeft aan welke ‘knoppen’ gedraaid moeten worden bij een bepaalde systeem combinatie om ervoor te zorgen dat thermisch discomfort niet meer voorkomt. Het onderzoek heeft echter wel een model opgeleverd die aangeeft welke parameters hoogstwaarschijnlijk de grootste veroorzakers zijn van thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming en welke systemen die parameter beïnvloeden. Indien in een goed geïsoleerde woning met vloerverwarming thermisch discomfort ervaren wordt, kunnen de parameters die volgens het model de grootste kans hebben om het thermisch comfort te veroorzaken aangepast worden. Dit model kan tevens richting geven aan mogelijk vervolgonderzoek. Uit de resultaten van het totale onderzoek kan geconcludeerd worden dat de parameters stralingsasymmetrie, vloer-, ruimte- en stralingstemperatuur hoogstwaarschijnlijk de grootste veroorzakers zijn van thermisch discomfort in goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming.



Figuur 13 Causaal-relatie diagram thermisch discomfort bij vloerverwarming en een goed geïsoleerde gevel

Naast een causaal-relatie diagram heeft dit onderzoek een meetplan en een overzicht van meetapparatuur opgeleverd die als basis kunnen dienen voor vervolgonderzoek. Toekomstige metingen zouden op basis van het opgestelde meetplan en de opgestelde apparatuur lijst eenvoudig herhaald kunnen worden. Ook heeft het onderzoek een logboek voor belevingsonderzoek opgeleverd die als basis kan dienen voor vervolgonderzoek. De zaken die in het logboek kunnen worden ingevuld zijn uit expert interviews voortgekomen. Het logboek is door Expert 1 en Expert 2 gecontroleerd.

Tot slot is in dit rapport op een overzichtelijke wijze informatie bijeengebracht. Er is informatie vergaard vanuit de literatuur, bewoners en experts en dit is samengevoegd in één document.

9 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk zullen op basis van de discussie (Hoofdstuk 7) en de conclusie (Hoofdstuk 8) aanbevelingen gedaan worden voor vervolgonderzoek. Aangezien de meetresultaten die in dit onderzoek verkregen zijn, zijn gebaseerd op slechts drie woningen, zijn de meetresultaten niet representatief voor alle nieuwbouwwoningen in Nederland. Vervolgonderzoek is dan ook nodig om de conclusies uit dit onderzoek te verifiëren en te valideren.

In de metingen is het contactoppervlak van gevel en beglazing aan de binnenzijde gemeten en die temperatuur is gebruikt om de stralingsasymmetrie te bepalen. Bij toekomstige metingen is aan te bevelen om nabij plaatsen waar stralingsasymmetrie te verwachten is een tweede zwartebol meting uit te voeren om zo het verschil in stralingstemperatuur beter in kaart te brengen. Hierdoor kan tevens vastgesteld worden of stralingsasymmetrie daadwerkelijk van ondergeschikt belang is of dat de meetmethode ongeschikt was om stralingsasymmetrie te meten. Bij vervolgmetingen zou de luchtsnelheid op verschillende plaatsen in de leefruimte en op verschillende hoogten gemeten moeten worden om tochtklachten beter in kaart te kunnen brengen.

De respondenten van de expert interviews werden in eerste instantie per e-mail benaderd. Niet iedere respondent reageerde hier even snel op waardoor het onderzoek vertraagde. Later werden respondenten ook telefonisch benaderd, wat ervoor zorgde dat er sneller afspraken konden worden gemaakt. Aanbevolen wordt om respondenten voor interviews telefonisch te benaderen.

Voor het belevingsonderzoek en de meetlocaties zijn de bewoners vervolgens telefonisch benaderd. Aanbevolen wordt echter om respondenten voor (langdurig) belevingsonderzoek en metingen schriftelijk (of e-mail) te benaderen omdat zo meer en overzichtelijke informatie kan worden gegeven waardoor men zich onder andere beter voor kan bereiden op de te plaatsen meetapparatuur. Hierdoor hebben respondenten meer bedenktijd en zijn ze zich beter bewust van wat ze toezeggen als ze aan het onderzoek meedoen.

Uit het uitgevoerde belevingsonderzoek zijn niet zoveel resultaten voortgekomen als verwacht. Meer en betere uitleg, ook schriftelijk meegeleverd, zou meer bruikbare informatie van bewoners op kunnen leveren waardoor conclusies kunnen worden getrokken op basis van meer informatie.

De conclusies uit dit onderzoek zijn gebaseerd op bewoner ervaringen van slechts drie bewoners van goed geïsoleerde woningen met vloerverwarming. De metingen zijn uitgevoerd in de woningen van deze drie bewoners. Bij vervolgonderzoek zouden de ervaringen van alle bewoners van een woning moeten worden onderzocht om een completer beeld te verkrijgen van de bewoner beleving in een woning. Tevens zullen bij vervolgonderzoek bij meer woningen simultaan een belevingsonderzoek en metingen moeten worden gedaan om een overtuigende conclusie te kunnen trekken uit de onderzoeksresultaten. Tevens zouden er in meer categorieën woningen metingen en belevingsonderzoek gedaan moeten worden om zo verschillen tussen installaties van woningen in kaart te brengen. Hierdoor kan het onderzoek representatief worden voor de gehele woningmarkt. Aanbevolen wordt om metingen te verrichten in elk van de in Tabel 4 aangegeven kwadranten. Deze kwadranten zijn uit de literatuurstudie en expert interviews naar voren gekomen als woninggroepen die van belang zijn om te meten. Van ieder van deze kwadranten wordt aanbevolen om een groot aantal ($n \geq 45$ (Adunola, 2014)) woningen te onderzoeken om zo de verschillen tussen woningen met en zonder vloerverwarming en de effecten van een goed geïsoleerde gevel en het ventilatiesysteem goed in kaart te kunnen brengen.

Tabel 4 Aanbevolen onderzoekskwadranten

Slecht geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem A	Slecht geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem B	Goed geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem A	Goed geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem B
Slecht geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem C	Slecht geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem D	Goed geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem C	Goed geïsoleerd Zonder vloerverwarming Ventilatiesysteem D
Slecht geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem A	Slecht geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem B	Goed geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem A	Goed geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem B
Slecht geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem C	Slecht geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem D	Goed geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem C	Goed geïsoleerd Vloerverwarming Ventilatiesysteem D

Metingen in ieder van de bovenstaande kwadranten zou helpen om de invloed van de kwaliteit van de gebouwschil en het ventilatiesysteem te elimineren en zodoende de focus te leggen op het warmteafgiftesysteem waardoor daar gegronde conclusies met betrekking tot thermisch comfort over kunnen worden getrokken.

Tot slot dienen bewoners van goed geïsoleerde woningen te worden geïnformeerd over de mogelijke consequenties van een zeer goed geïsoleerde gevel. Bewoners laten zich te vaak leiden door de aanwijzingen van installateurs die zeggen dat bewoners niet aan de thermostaat moeten draaien omdat deze goed ingesteld zou zijn. Bewoners moeten zich niet laten leiden door de thermostaat instellingen om thermisch comfort te bereiken maar door hun eigen ervaring over het thermisch binnenklimaat. Dit zou dan ook duidelijker gecommuniceerd moeten worden naar de bewoners.

Referenties

- Adan, O.C.G., Aerts, J.C., Becqué, C.D., Bedeke, K., van Bergem-Jansen, P.M., Berings, J.B.M., . . . Witte, J. (2002). *Handboek installatietechniek*. Rotterdam: ISSO.
- Adunola, Adewale Oluseyi. (2014). Evaluation of urban residential thermal comfort in relation to indoor and outdoor air temperatures in Ibadan, Nigeria. *Building and Environment*, 75(0), 190-205. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.007>
- ARBO Vakbase. (2014a, 2 oktober). Arboprof. Retrieved 16 oktober, 2014, from <http://www.arbovakbase.nl/artikel/gebouwen-thermisch-comfort-23187.html>
- ARBO Vakbase. (2014b, 12 september 2014). Handboek Ergonomie. Retrieved 17 oktober, 2014, from <http://www.arbovakbase.nl/artikel/achtergrond-lokale-thermische-behaaglijkheid-6872.html>
- Badran, A.A., Jaradat, A.W., & Bahbouh, M.N. (2013). Comparative study of continuous versus intermittent heating for local residential building: Case studies in Jordan. *Energy Conversion and Management*, 65(0), 709-714. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.036>
- Biojournaal.nl. (2011, 5 januari 2011). Stijgend milieubewustzijn onder Nederlanders door crisis. Retrieved 23 oktober, 2014, from <http://www.biojournaal.nl/artikel/2329/Stijgend-milieubewustzijn-onder-Nederlanders-door-crisis>
- Boerstra, A., Coffeng, P., van der Minne, S., & Scheers, P. (2008). Thermisch binnenklimaat: Arbokennisnet.
- Bouwbesluitinfo. (2014, 20 januari 2014). EPC in 2015 toch naar 0,4 voor woningbouw. Retrieved 7 november, 2014, from <http://www.bouwbesluitinfo.nl/pages/posts/epc-in-2015-toch-naar-04-voor-woningbouw-90.php>
- Bouwmeester, H., & Bouwens, C. (2014). Bouwen aan een goede schil. Met aandacht voor comfort en binnenmilieu. Leiden: Lente-akkoord Energiezuinige Nieuwbouw.
- Brager, G.S., & de Dear, R.J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83-96. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)
- Bruggema, H.M. (2007). Vergelijking van systemen; Betonkernactivering, klimaatplafonds, wand- en vloerverwarming. *TVVL Magazine*, 3, 20-28.
- Busch, J.F. (1992). A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand. *Energy and Buildings*, 18(3-4), 235-249. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90016-A](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(92)90016-A)
- chape-info. (2014). Wat is chape? Retrieved 6 november, 2014, from <http://www.chape-info.be/wat-is-chape>
- De Mey, G. (1980). Temperature distribution in floor heating systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23(9), 1289-1291. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90060-5](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(80)90060-5)
- Doorewaard, H. (Producer). (2014, 6 november). Het ontwerpen van een onderzoek. [Flitscollege] Retrieved from <http://www.ontwerpeneenonderzoek.nl/presentaties/7/player.html>
- El Fouih, Y., Stabat, P., Rivière, P., Hoang, P., & Archambault, V. (2012). Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings. *Energy and Buildings*, 54(0), 29-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.008>
- Entrop, A.G. (2014). [Bacheloropdracht voortgangsgesprek 1].
- Fanger, P.O. (1972). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), 922-937. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
- gezond bouwen & wonen. (2014). Bouwdata / Gevels. Retrieved 18 november, 2014, from <http://www.vwg.net/gbw/bouwdata/gevels.html>
- HEATNET. (2014). HEATNET droogbouw vloerverwarmingssystemen. Retrieved 6 november, 2014, from <http://www.heatnet.nl/droogbouw/index.html>

- Hesaraki, A., & Holmberg, S. (2013). Energy performance of low temperature heating systems in five new-built Swedish dwellings: A case study using simulations and on-site measurements. *Building and Environment*, 64(0), 85-93. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.009>
- Huebner, G.M., Cooper, J., & Jones, K. (2013). Domestic energy consumption—What role do comfort, habit, and knowledge about the heating system play? *Energy and Buildings*, 66(0), 626-636. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.043>
- ISSO. (2004). *ISSO-publicatie 49 Kwaliteitseisen vloer- en wandverwarming en vloer- en wandkoeling*
- ISSO. (2012). Addendum Handboek Installatietechniek. Rotterdam: Stichting ISSO.
- Kruithof, A.F., & Valk, H.J.J. (2013). Energiebehoefte woningbouw. Onderzoek effect verhoging Rc-waarde. Zwolle: Nieman Raadgevende Ingenieurs B.V.
- Livos. (2014). Het verschil tussen een nat en droog vloerverwarmingssysteem. Retrieved 6 november, 2014, from <http://www.livos.be/nl/techniek/verwarmingstechniek/vloerverwarming/het-verschil-tussen-een-nat-en-droog-vloerverwarmingssysteem/>
- NEN. (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. (Vol. NEN-EN-ISO-7730). Delft: NEN.
- NEN. (2012). Thermische isolatie van gebouwen - Rekenmethoden (Vol. NEN 1068). Delft: NEN.
- Nuiten, P.W.G., Hoiting, H., Leenaets, C.L.M., & Donze, G.J. (2013). Aanscherpingsstudie EPC woningbouw en utiliteitsbouw 2015. Arnhem: W/E adviseurs | Arcadis.
- Pan, D., Chan, M., Deng, S., & Lin, Z. (2012). The effects of external wall insulation thickness on annual cooling and heating energy uses under different climates. *Applied Energy*, 97(0), 313-318. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.009>
- Pineau, D., Rivière, P., Stabat, P., Hoang, P., & Archambault, V. (2013). Performance analysis of heating systems for low energy houses. *Energy and Buildings*, 65(0), 45-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.036>
- Quist, J. (2008, 26 juni). 'Ventilatie Vathorst blijvend probleem'. *TECHNIEK*.
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. (2011). Het presteren van mechanische ventilatiesystemen in nieuwbouw eengezinswoningen. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Rojien, Erwin, & Beerens, Bastiaan. (2009, december). LTV en natuurlijke luchttoevoer. *Stedebouw & Architectuur*, 26-27.
- Ruiter & de Lange. (2014). Vloerverwarming. Retrieved 17 oktober, 2014, from <http://www.ruiterendelange.nl/verwarming/vloerverwarming/>
- Scholten, J.E., & de Jong, P. (2013). De Beljaart - fase 1; Problemen met warmtelevering in de wijk. Delft: TNO.
- Schreij, S. (2012). Onderzoek gevelventilatie in combinatie met zeer lage temperatuurverwarming. Bodegraven: DWA installatie- en energieadvies.
- Stadsgewest Haaglanden. (2011). Monitor woningmarkt 2011. Den Haag.
- ten Bolscher, G.H. (2006). Onderzoek naar gebruik warmtepompen in woning; Comfortabel wonen met ltv-afgiftesystemen. Rijssen: DWA installatie- en energieadvies.
- ten Bolscher, G.H. (2009). Veel lessen te leren uit Vathorst. Rijssen: DWA installatie- en energieadvies.
- UNETO-VNI. (2014a). Systemen voor warmteafgifte. Retrieved 28 oktober, 2014, from <http://www.uneto-vni.nl/consumenten/klimaat/verwarming-systemen-voor-warmteafgifte-uneto-vni>
- UNETO-VNI. (2014b). Ventilatie. Retrieved 28 oktober, 2014, from <http://www.uneto-vni.nl/consumenten/klimaat/ventilatie-en-airconditioning/ventilatie-uneto-vni>
- van de Pas, L. (2012). Crisis op de woningmarkt. Heerlen: Pasgoed BV.
- van der Linden, K., Boerstra, A.C., Raue, A.K., & Kurvers, S.R. (2002). Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, 34(7), 737-744. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00144-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00144-X)

verwarminghandel.nl. (2014). Verschillende radiator types. Retrieved 28 oktober, 2014, from <http://www.verwarminghandel.nl/Radiator-types>

vloer & verwarming.nl. (2014a). Vloerverwarming isolatie. Retrieved 6 november, 2014, from <http://www.vloerenverwarming.nl/vloerverwarming-isolatie/>

vloer & verwarming.nl. (2014b). Vloerverwarming, ideaal als hoofdverwarming. Retrieved 17 oktober, 2014, from <http://www.vloerenverwarming.nl/>

vochtbestrijdingsgids.be. (2014). Ventilatiesystemen. Retrieved 2 november, 2014, from <http://www.vochtbestrijdinggids.be/vocht oplossingen/ventilatiesystemen.html>

VROM. (2012, 1 april 2014). Bouwbesluit 2012; Hoofdstuk 5. Technische bouwvoorschriften uit het oogpunt van energiezuinigheid en milieu, nieuwbouw. Retrieved 23 oktober, 2014, from <http://vrom.bouwbesluit.com/Inhoud/docs/wet/bb2012/hfd5>

WTH Vloerverwarming BV. (2014). Voordelen van vloerverwarming. Retrieved 17 oktober, 2014, from <http://www.wth.nl/nl-NL/Consumenteninfo/Voordelen-van-vloerverwarming>

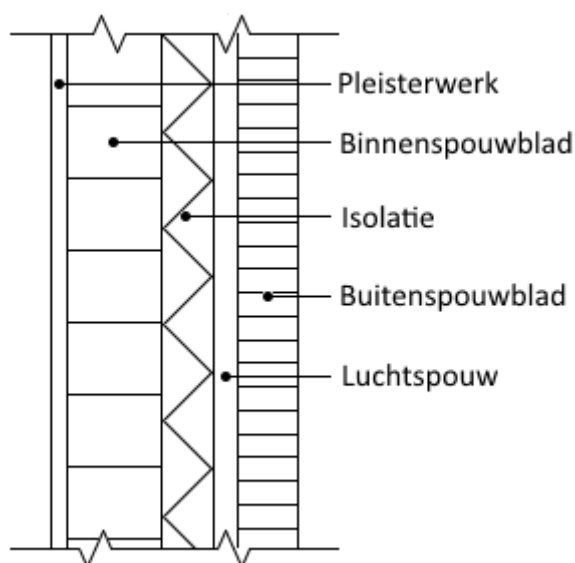
Yang, L., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2008). Comparison of environmental impacts of two residential heating systems. *Building and Environment*, 43(6), 1072-1081. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.007>

Experts

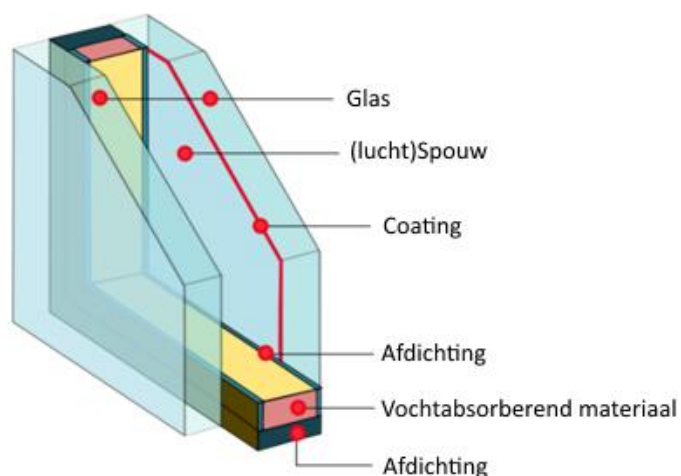
Expert #	Functie	Werkgever	Werkervaring (jr.)
Expert 1	Beleidsmedewerker	Uneto-VNI	20+
Expert 2	Projectmanager	ISSO	30+
Expert 3	Algemeen directeur	Schouten Techniek	20+
Expert 4	Technisch Energiebeheerder	Dubo Techniek Energie	5 - 10
Expert 5	Adviseur	Vedotec	5 - 10
Expert 6	Commercie	Van Dam groep	15 - 20
Expert 7	Energie Technicus	DWA	8 - 10
Expert 8	Adviseur	DWA	8 - 10
Expert 9	Adviseur	DWA	5 - 10
Expert 10	Directeur	DWA	30+
Expert 11	Specialist Beheer & Onderhoud	DWA	20+

Bijlage A: Bouwkundige elementen

In deze bijlage is extra informatie ten behoeve van Paragraaf 3.1 opgenomen.



Figuur 15 Doorsnede spouwmuur, uitwendige scheidingsconstructie



Figuur 14 Doorsnede dubbel HR-glas

In Figuur 16 en Figuur 15 zijn respectievelijk doorsneden van de gevel als uitwendige scheidingsconstructie en een glazen gevelopening weergegeven. De dikte en de soortelijke weerstand van een laag zorgen voor de isolatie per laag. De formule die de totale R_c -weerstand van de constructie bepaald is als volgt:

$$R_c = \sum \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum R_{spj} \quad [(m^2 \cdot K)/W]$$

Waarin:

- R_j = warmteweerstand van laag j $[(m^2 \cdot K)/W]$
- λ_j = warmtegeleidingscoëfficiënt van laag j $[W/(m \cdot K)]$
- d_j = dikte van laag j $[m]$
- R_{spj} = warmteweerstand van de luchtspouw j $[(m^2 \cdot K)/W]$

Tabel 5 Luchtinfiltratie warden (Bouwmeester & Bouwens, 2014)

Luchtdicht- heidsklasse (NEN 2687)	Woningvolume in m ³		Maximale $q_{v,10}$	$q_{v,10}/m^2$
	van	t/m	liter/s	liter/s.m ²
1 Basis	-	250	100	1,0
	250	500	150	1,0
	500	-	200	1,0
2 Goed	-	250	50	0,6
	250	-	80	0,4
3 Uitstekend	-	250	15	0,15
	250	-	31	0,15
4 Passiefbouw				0,15

Het Bouwbesluit (VROM, 2012) is vrij summier over de eis aan de beperking van de luchtdoorlatendheid en stelt slechts dat op basis van NEN 2686 de luchtvolumestroom van het totaal aan verblijfsgebieden, toiletruimten en badruimten van een gebruiksfunctie niet groter mag zijn dan (VROM, 2012). NEN 2687 geeft meer informatie over de luchtdichtheid van een woning. In Tabel 5 worden 4 luchtdichtheidsklassen onderscheiden. Deze klassen zijn onderverdeeld in woningvolumes waarbij een zekere $q_{v;10}$ waarde hoort. De $q_{v;10}$ -waarde is de luchtvolumestroom die ontstaat via de kieren en naden tussen de verschillende bouwdelen in de omhulling van een gebouw bij een drukverschil van 10 Pascal. De $q_{v;10}$ -waarde die bij klasse 1 en een woningvolume vanaf 500 m³ hoort is de waarde zoals die het Bouwbesluit noemt als maximale waarde. De uiterst rechterkolom is tevens een invoer parameter voor de EPC-berekening. Alhoewel het Bouwbesluit slechts klasse 1: Basis als eis stelt is het aan te raden om minimaal volgens 'klasse 2: goed' te bouwen i.v.m. het energiegebruik en eerder genoemde nadelen van infiltratie.

Bijlage B: Installatietechnische systemen

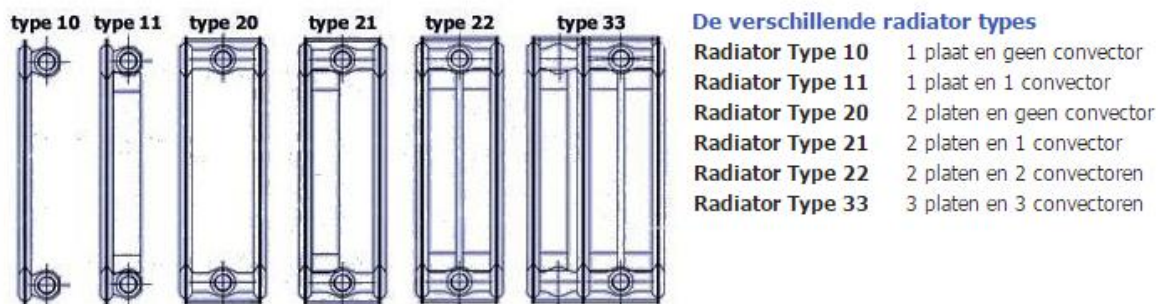
In deze Bijlage is extra informatie ten behoeve van Paragraaf 3.2 opgenomen. In de eerste paragraaf zal aanvullende informatie over verwarmingssystemen gegeven worden en de tweede paragraaf zal aanvullende informatie geven over ventilatiesystemen.

Verwarmingsinstallaties

Radiatoren en convectoren

Een radiator maakt gebruik van heet water om warmte af te staan aan de ruimte waarin de radiator gevestigd is. De warmte-uitwisseling gebeurt meestal volgens het tegenstroomprincipe waarin het warme water van boven af door de radiator stroomt en naar onder toe afkoelt. De opgewarmde lucht stroomt langs de radiator omhoog. Het opwarmen van lucht die vervolgens door de kamer zal circuleren wordt convectie genoemd. De radiator straalt echter zelf ook warmte uit, de radiator verwarmt de ruimte dus zowel door convectie als door straling (radiatie). Er zijn diverse typen radiatoren, zo worden ledenradiatoren en paneelradiatoren onderscheiden (verwarminghandel.nl, 2014). Een ledenradiator bestaat uit een rij aan elkaar gekoppelde verticale holle segmenten waar het warme water doorheen stroomt. Een paneelradiator bestaat uit een gesloten plaat die voorzien is van verticale kanalen en heeft doorgaans een kleiner oppervlak dan een ledenradiator waardoor de warmteafgifte capaciteit van een ledenradiator doorgaans groter is dan die van een plaatradiator. Tegenwoordig worden er ook design radiatoren aangeboden. Zo zijn er radiatoren in de vorm van een handdoek rek waardoor de badkamer verwarmt kan worden en handdoeken gedroogd kunnen worden (verwarminghandel.nl, 2014). Deze design radiatoren werken echter volgens hetzelfde principe en zijn niet meer functioneel dan de meer traditionelere vormen.

Een convector werkt tevens met warm water. Het warme water stroomt door een buis in de convector. Die buis warmt het water op waardoor de lucht opstijgt. Hierdoor ontstaat onderdruk waardoor nieuwe koude lucht aangezogen wordt. Zo wordt de ruimte opgewarmd door hete lucht. Het systeem waarbij lucht door drukverschil aangezogen wordt, wordt ook wel gedwongen convectie genoemd. De buis waardoor het warme water stroomt geeft tevens straling af maar door het kleine oppervlak vele malen minder dan een radiator. Convectoren kunnen op zichzelfstaand worden toegepast als een convectorput die in de vloer gebouwd kan worden. Tegenwoordig worden meestal combinaties van radiatoren en convectoren toegepast voor een optimaal resultaat (zie Figuur 17). De combinatie van convectoren en radiatorplaten zorgt ervoor dat warme lucht gaat circuleren waardoor de lucht in de kamer een comfortabele temperatuur krijgt en er tevens een plaats in huis is waar men handen of kleren (handschoenen, sjaal etc.) kan opwarmen of drogen.



Figuur 16 Verschillende radiator types (verwarminghandel.nl, 2014)

Vloerverwarming en wandverwarming

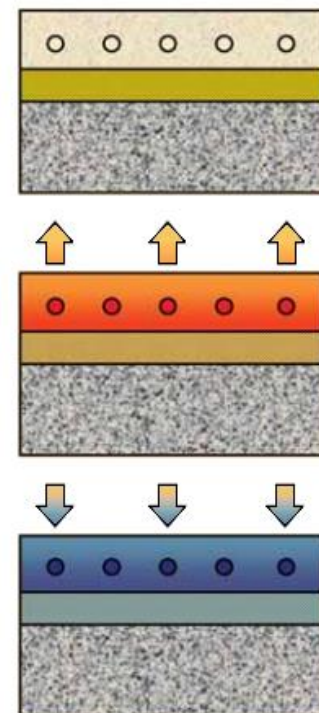
Volgens Bruggema (2007) bestaat vloerverwarming uit een vloerconstructie waarin een leidingnet in de dekvloer is opgenomen (zie Figuur 18). Deze dekvloer wordt d.m.v. isolatie gescheiden van de draagvloer. Hierdoor is vooral de dekvloer thermisch actief en wordt er weinig warmte verloren aan de onderkant maar vindt de warmte-uitwisseling nagenoeg uitsluitend aan de bovenzijde plaats. In het geval waarin de dekvloer van de draagvloer is gescheiden wordt ook wel gesproken van een zwevende dekvloer (vloer & verwarming.nl, 2014a). Het is ook mogelijk om de leidingen direct op de draagvloer aan te brengen wat warmteverlies naar de onderkant tot gevolg heeft. De vloerverwarming verwarmt de vloer gelijkmatig door middel van warmtestraling waardoor er nagenoeg geen temperatuurverschillen in de kamer zijn (vloer & verwarming.nl, 2014b).

Vloerverwarmingssystemen kunnen worden onderverdeeld in natte en droge systemen. Bij een nat systeem worden de buizen direct in een natte chapelaag aangebracht. Bij een droog systeem worden de buizen in voorgevormde isolatieplaten geplaatst die op hun beurt afgedekt worden met een goed geleidende afdekplaat (HEATNET, 2014; Livios, 2014). In natte systemen is er nog onderscheid te maken tussen hoe de chapelaag (dekvloer) aangebracht wordt. De aanwezigheid en locatie van isolatiemateriaal tussen de draag- en dekvloer maakt dat er gesproken wordt van een hechtende dekvloer, niet-hechtende dekvloer of zwevende dekvloer. Bij de laatstgenoemde worden alle koudebruggen met de ombouw voorkomen (chape-info, 2014). De voordelen van vloerverwarming zijn:

Comfort. Zowel onderzoekers als partijen die belang hebben bij de promotie van vloerverwarming stellen dat comfort een belangrijkste voordeel is van vloerverwarming. Dankzij de gelijkmatige verdeling van warmte ontstaat een aangename temperatuur bij een lagere luchttemperatuur. Dit heeft een gunstig effect op de relatieve vochtigheid van de ruimte. Tevens zijn een warm hoofd en koude voeten bij vloerverwarming ondenkbaar volgens WTH Vloerverwarming BV, wat volgens de probleemstelling niet opgaat voor woningen uitgerust met goed geïsoleerde gevels (De Mey, 1980; Ruiter & de Lange, 2014; UNETO-VNI, 2014a; vloer & verwarming.nl, 2014b; WTH Vloerverwarming BV, 2014).

Laag energiegebruik. Naast comfort is een lager energiegebruik het grootste voordeel van vloerverwarming. Doordat met lage temperaturen verwarmd wordt is er minder energie benodigd om een ruimte te verwarmen waardoor het energieverbruik met wel 15% kan afnemen (Huebner et al., 2013; Ruiter & de Lange, 2014; UNETO-VNI, 2014a; vloer & verwarming.nl, 2014b; WTH Vloerverwarming BV, 2014).

Gezondheid. Bij vloerverwarming treedt minimale convectie op waardoor er minder circulatie is van rondwarrelend stof, wat bij radiatoren wel het geval is. Geen radiatoren betekent tevens minder stofnesten en geen last van stofschroei (vloer & verwarming.nl, 2014b; WTH Vloerverwarming BV, 2014).



Figuur 17 Principe vloerverwarming/koeling

Inrichtingsvrijheid. Dankzij de afwezigheid van radiatoren kan de ruimte volledig vrij worden ingericht zonder rekening te hoeven houden met de radiatoren (Ruiter & de Lange, 2014; UNETO-VNI, 2014a; vloer & verwarming.nl, 2014b; WTH Vloerverwarming BV, 2014).

Er kleven echter ook een aantal nadelen aan het gebruik van vloerverwarming. Genoemde nadelen zijn:

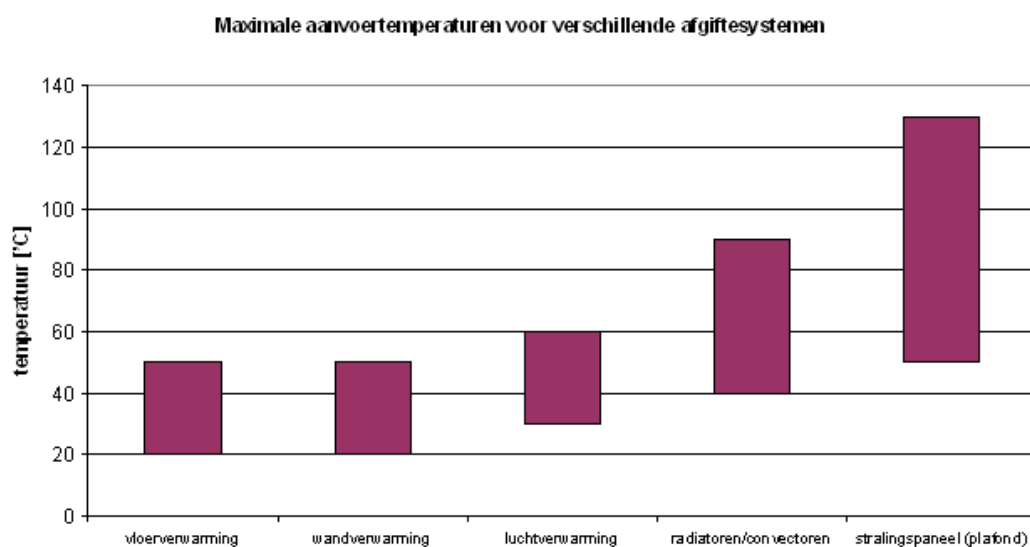
Traag regelgedrag. Na aanzetten van de thermostaat duurt het een tijdje voor de vloer warm geworden is en de warmte naar de ruimte kan afgeven (Bruggema, 2007; Ruiter & de Lange, 2014; vloer & verwarming.nl, 2014b). Dit geldt voornamelijk voor natte systemen aangezien de, relatief, dikke chapelaag lang duurt om opgewarmd te worden en de warmte aan de vloerafwerking door te geven. Droge systemen maken gebruik van metalen platen en goed geleidende droogbouwplaten die de warmte snel doorgeven waardoor traag regelgedrag niet of nauwelijks meer optreedt. Ook verschillen tussen de manier waarop de dekvloer aangebracht is heeft invloed op het regelgedrag. Indien de dekvloer een zwevende dekvloer is wordt er minder warmte verloren naar de draagvloer en muren waardoor meer ruimte naar het vloeroppervlak gaat waardoor deze sneller opwarmt.

Belemmering warmteoverdracht. Meubilair en de isolerende werking van sommige typen vloerenafwerkingen kan de warmteafgifte belemmeren (Bruggema, 2007; Ruiter & de Lange, 2014).

Beperkte reparatiemogelijkheden. Eventuele beschadigingen en lekkages kunnen enkel hersteld worden door de vloer open te breken wat een kostbare ingreep is (Ruiter & de Lange, 2014; vloer & verwarming.nl, 2014b).

Tot slot stelt ISSO (2012) als nadeel dat men zich onbehaaglijk kan voelen door vloerverwarming wanneer de vloer te warm of te koud is.

Naast een indeling naar de vorm van het afgiftesysteem kunnen verwarmingsinstallaties ook onderscheiden worden op basis van hun aanvoertemperatuur. De hierboven genoemde warmteafgifte systemen hebben verschillende temperaturen water nodig om goed te kunnen functioneren. Zo kan vloerverwarming een lagere temperatuur aan dan een radiator omdat de vloerafwerking of de leidingen het anders begeben. De verschillende aanvoertemperaturen zijn weergegeven in Figuur 19.

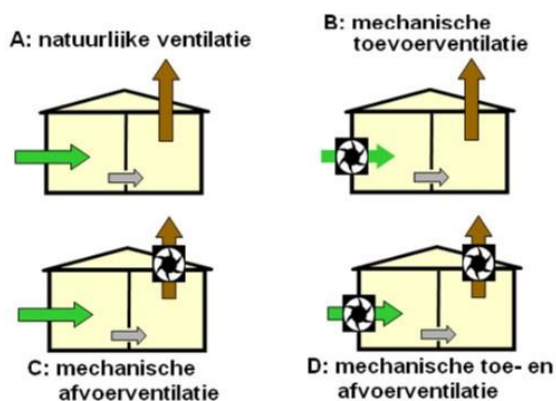


Figuur 18 aanvoertemperaturen voor verschillende afgiftesystemen (ISSO 49)

Hierin is luchtverwarming een buizensysteem in een gebouw die warme lucht via roosters de ruimten in blast en een stralingspaneel een op elektrisch paneel die met infrarood straling warmte afgeeft. Doordat het paneel elektrisch is kan het paneel warmer worden dan andere afgiftesystemen. Hoe lager de aanvoertemperatuur hoe groter het oppervlak van het warmteafgifte systeem moet zijn om voldoende verwarmingscapaciteit te hebben. Warmtepompen werken beter op lagere temperaturen waardoor vloerverwarming vaak in combinatie met een warmtepomp toegepast wordt voor een duurzaam warmteafgifte systeem. De aanvoertemperatuur heeft veel invloed op het energiegebruik van een woning.

Ventilatiesystemen

Doordat woningen steeds beter geïsoleerd zijn komt er niet automatisch voldoende verse lucht binnen. Om de luchtkwaliteit in een woning te kunnen verbeteren is er een ventilatiesysteem nodig. Doordat een ventilatiesysteem verse en mogelijk koude lucht toevoert heeft het ventilatiesysteem invloed op het thermisch comfort in een woning. UNETO-VNI (2014b) onderscheidt de volgende ventilatiesystemen: natuurlijke ventilatie, mechanische ventilatie, een combinatie van natuurlijke en mechanische ventilatie en balansventilatie met warmteterugwinning. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (2011) stelt dat de meeste nieuwbouwwoningen in Nederland worden voorzien van balansventilatie of een mechanische afzuiging in combinatie met een natuurlijke toevoer.



Figuur 19 Vier verschillende ventilatiesystemen (vochtbestrijdingsgids.be, 2014)

Natuurlijke ventilatie

Bij natuurlijke ventilatie (ventilatiesysteem A, Figuur 3) stroomt de lucht naar binnen en naar buiten door roosters in ramen of muren. De roosters kunnen handmatig verder open of dicht gezet worden. Bij natuurlijke ventilatie is geen enkele vorm van mechanische of elektrische aansturing aanwezig.

Mechanische ventilatie

Bij mechanische ventilatie (ventilatiesysteem D, Figuur 3) is er, in tegenstelling tot natuurlijke ventilatie, een ventilator die verse lucht door kanalen naar verschillende vertrekken in de woning brengt. Tevens zuigt de mechanische afvoer de lucht in vochtige ruimtes door kanalen naar buiten.

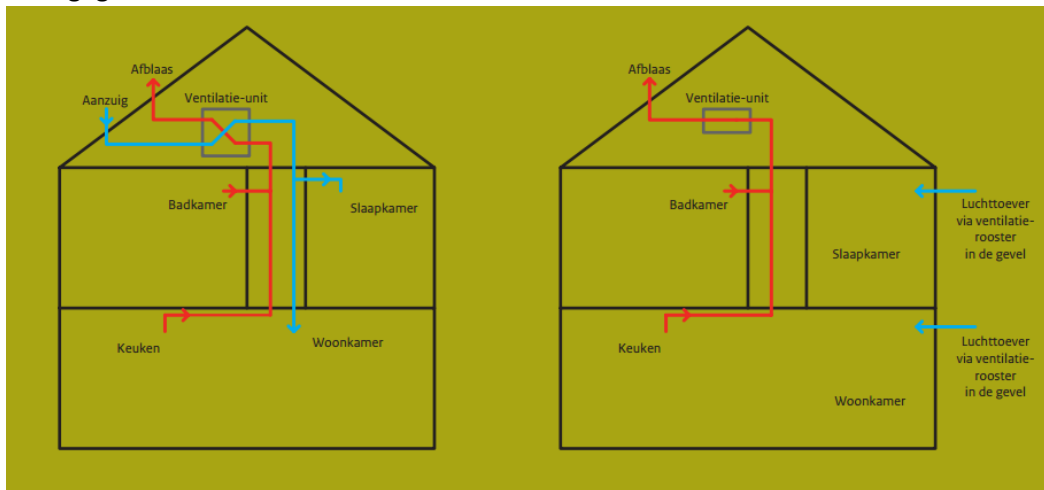
Combinatie van natuurlijke en mechanische ventilatie

Bij een combinatie van natuurlijke en mechanische ventilatie (ventilatiesystemen B en C, Figuur 3) komt verse lucht via natuurlijke ventilatie de woning binnen en wordt gebruikte lucht mechanisch afgevoerd of vice versa.

Balansventilatie met warmteterugwinning

Balansventilatie is in principe hetzelfde als volledig mechanische ventilatie (vochtbestrijdingsgids.be, 2014). De toe- en afvoer van lucht vindt mechanisch plaats waarbij de aanvoer en afvoer met elkaar in balans zijn. Balansventilatie met warmteterugwinning maakt gebruik van de warmte van de af te voeren lucht om de koelere buitenlucht die naar binnen komt op te warmen. Op deze manier wordt de toevoer van lucht voorverwarmd wat energie bespaart en positief is voor het thermisch comfort van de woning.

Het RIVM stelt dat verse lucht bij balansventilatie (ventilatiesysteem D) ingeblazen wordt in de woon- en slaapkamer en dat gebruikte lucht voornamelijk wordt afgezogen in keuken, toilet en badkamer. De combinatie van natuurlijke toevoer en mechanische afvoer wordt door het RIVM 'mechanische afzuiging' genoemd (ventilatiesysteem C). Deze combinatie wordt zo genoemd omdat door het afzuigen van lucht in de keuken, het toilet en de badruimte zorgt voor onderdruk in de rest van de woning waardoor de verse lucht vanzelf aangezogen wordt door de roosters in woon- en slaapkamer. In Figuur 21 zijn de ventilatiesystemen 'balansventilatie' en 'mechanische afzuiging' visueel weergegeven.



Figuur 20 balansventilatiesysteem en mechanische afzuiging (blauw is luchttoevoer, rood is luchtafvoer)
(Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2011)

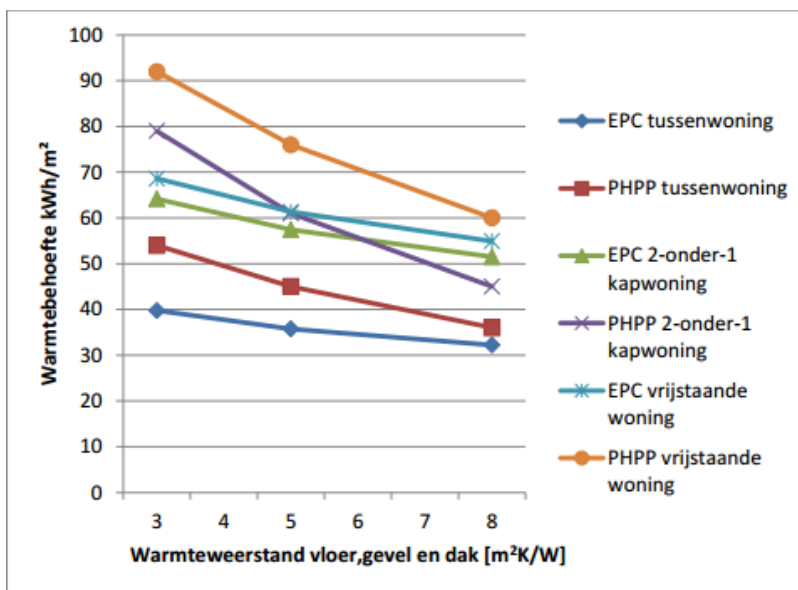
Uit onderzoek in Vathorst is naar voren gekomen dat de gemeten luchttemperatuur en de gemeten luchtvochtigheid van een ventilatiesysteem met natuurlijke toevoer gelijk is aan een ventilatiesysteem met gebalanceerde ventilatie. Schreij (2012) combineert deze informatie met gebruikerservaringen uit eigen onderzoek en stelt dat de verschillen in ventilatie lokaal thermisch discomfort kunnen opleveren, wat volgens Schreij fundamenteel iets anders is dan de algemene thermische comfortbeleving in een ruimte.

Bijlage C: Invloed systemen op energieverbruik

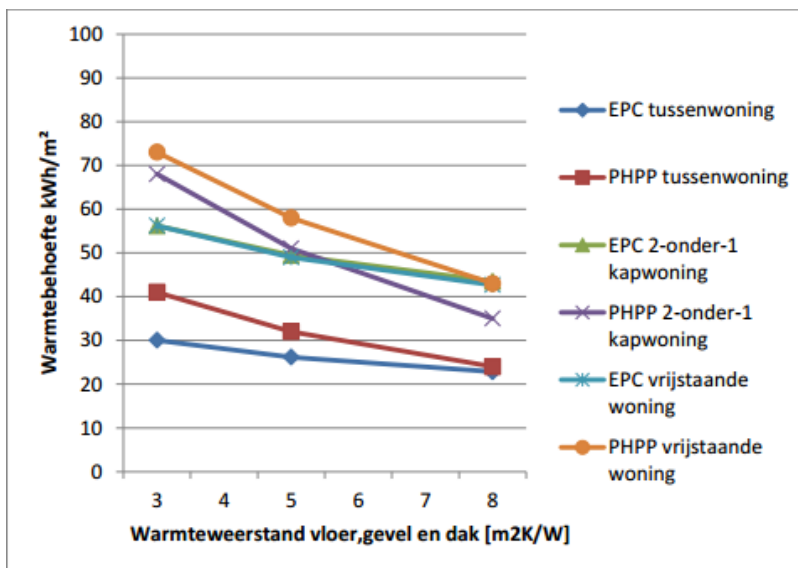
In deze bijlage zullen de invloeden van de in Hoofdstuk 3 gevonden systemen ondersteund worden met meer uitleg, grafieken en tabellen.

Invloed gebouwschil

De warmtebehoefte is in het onderzoek van Kruithof en Valk op twee manieren bepaald, volgens deelresultaten uit de EPC-berekening en volgens de PHPP-berekening. De warmtebehoefte is in de EPC-berekening een deelresultaat; met de EPC-berekening wordt het gebouwgebonden energieverbruik bepaald. De berekening van de warmtebehoefte is in de PHPP-berekening een eindresultaat. De warmtebehoefte is bepaald voor een aantal verschillende woningtypen: een tussenwoning, een twee-onder-een kapwoning en een vrijstaande woning. De onderzoeksresultaten van het onderzoek van Kruithof en Valk zijn te zien in Figuur 23 en Figuur 22.



Figuur 22 warmtebehoefte volgens EPC- en PHPP-berekening bij HR++ beglazing



Figuur 21 warmtebehoefte volgens EPC- en PHPP-berekening bij triple beglazing

Tabel 6 Energiebehoefte per m² raamoppervlak (Bouwmeester & Bouwens, 2014)

Energiebehoefte per m ² raam (MJ/jaar)				
Oriëntatie	Dubbel-glas	HR-glas	HR+- glas	HR++-glas
Zuid	127	85	14	0
Zuidwest en zuidoost	259	198	127	56
West en oost	381	302	231	160
Noordwest en noordoost	450	362	291	220
Noord	469	378	307	236

Het Lente-akkoord (Bouwmeester & Bouwens, 2014) geeft inzicht in de energiebehoefte per m² raam oppervlak voor verschillende typen beglazing (zie Tabel 6). Dit laat duidelijk zien dat een betere isolatie grote invloed heeft op de energiebehoefte en daarmee het energiegebruik van een woning.

Als de gebouwschil goed geïsoleerd is zijn de lineaire warmteverliezen vaak bepalend voor het energieverlies van de woning (Bouwmeester & Bouwens, 2014). Lineaire warmteverliezen treden op waar de isolatielaag van de gebouwschil wordt doorbroken. Dat gebeurt op voornamelijk bij aansluitingen van kozijn en gevel, van geveldelen met het dak en houten rekjes tussen kozijnen en bovengelegen vloeren. Bij hogere Rc-waarden leiden ook plekken met veel hout zonder verdere isolatie tot lineaire warmteverliezen. Warmteverliezen zorgen ervoor dat de verwarmingsinstallatie meer warmte moet produceren waardoor het energiegebruik omhoog gaat. Bovengenoemde aansluitdetails moeten dan ook zorgvuldig worden ontworpen en uitgevoerd om het energiegebruik zoveel mogelijk te kunnen beperken.

Bijlage D: Logboek activiteiten en beleving ruimtetemperatuur

Datum (dd/mm)	Tijd (hh:mm)	Huidige Temp.	Verblijfs- tijd reeds in dezelfde ruimte (min)	Activiteit (Denk aan: a. zitten/lezen, b. regelmatig opstaan/bewegen, c. Actieve bezigheid)	Kleding (Denk aan: a. licht gekleed, b. middelzwaar gekleed, c. warm gekleed)	Beoordeling binnenklimaat op onderstaande aspecten (aangeven wat uw gevoel is over onderstaande aspecten. Merkt u daar iets bijzonders? Prettig of onprettig? Indien u op basis van een onprettig gevoel over de temperatuur een handeling uitgevoerd heeft vult u deze in bij 'Reactie'.)	
						Temp.	
						Tocht	
						Vloertemp.	
						Anders	
						Reactie	
						Temp.	
						Tocht	
						Vloertemp.	
						Anders	
						Reactie	
						Temp.	
						Tocht	
						Vloertemp.	
						Anders	
						Reactie	

Bijlage E: Interviewschema

In deze bijlage staat het interviewschema dat is gehanteerd. Elf experts zijn benaderd en allen hebben toegezegd aan het onderzoek mee te werken.

Voorstellen [naam, opleiding, bedrijf] – (contact gehad via)

1. Bent u op de hoogte van mijn onderzoek en het onderwerp?

Het gaat over vloerverwarming in goed geïsoleerde woningen (Rc-waarde van ~3,5) en het geconstateerde feit dat men de thermostaat een graad hoger draait dan ze normaal zouden doen om thermisch discomfort te voorkomen. [eventueel meer uitleg]

2. Herkent u dit fenomeen? Heeft u hier wel eens eerder van gehoord?
3. Waardoor zou volgens u dit fenomeen kunnen ontstaan?
4. Wat zijn volgens u parameters/factoren die bij onderzoek naar dit fenomeen gemeten/onderzocht zouden moeten worden?
5. Wat zijn volgens u mogelijke oplossingen voor gebruikers die met dit fenomeen te maken hebben?
6. Weet u of er al eerder onderzoek gedaan is naar dit fenomeen?
7. Heeft u nog andere tips of op- of aanmerkingen die mij zouden kunnen helpen met het onderzoek naar het eerder genoemde fenomeen?
8. Mag ik uw antwoorden gebruiken voor mijn onderzoek en zo nodig naar u verwijzen in mijn onderzoeksrapport?
9. Zou u graag het door mij uitgewerkte interview eerst inzien alvorens u toestemming geeft voor het gebruik van de door u verleende informatie?

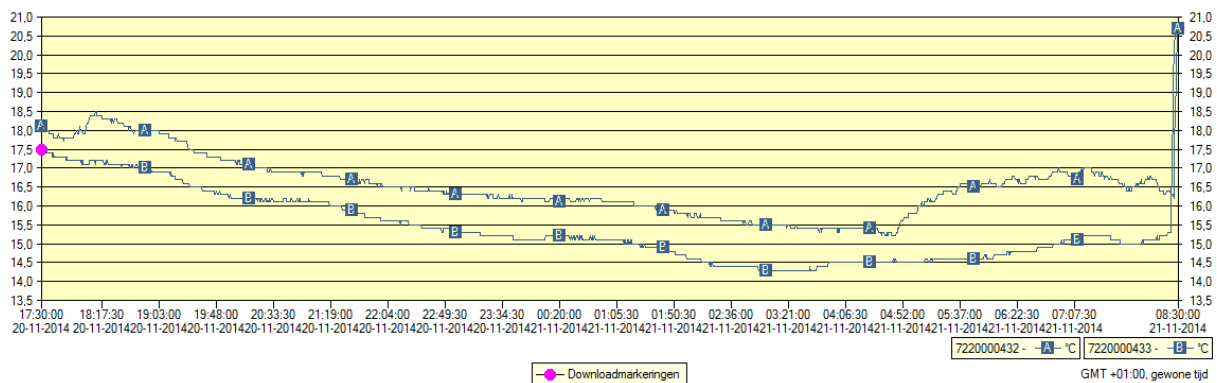
Hartelijk dank voor uw medewerking! [gesprek afronden]

Bijlage F: Proefmetingen

Bij DWA zijn diverse modellen KeyTag recorders beschikbaar, namelijk de KeyTag modellen KTL-508 (meet luchttemperatuur en relatieve luchtvochtigheid), KTL-108 (luchttemperatuur) en KTL-208 met KT-A-ST100 sensor (contactoppervlak). Alvorens de apparatuur gebruikt is voor metingen in woningen is eerst getest hoe de apparatuur werkt en hoe gegevens uit te lezen zijn.

Proefmeting 1

Bij een eerste test is het contactoppervlak van een raam gemeten. Mees Qualm, specialist beheer en onderhoud bij DWA in Bodegraven, adviseerde om de sensor te bedekken met aluminiumfolie om ervoor te zorgen dat de stralings- en luchttemperatuur vanuit de ruimte geen invloed had op de sensor. Om dit te testen heb ik twee contactsensoren (KTL-208 met KT-A-ST100 sensor) op een ruit aangebracht met plakband en gedurende een paar uur elke 30 seconden de temperatuur gelogd. In Figuur 24 zijn de resultaten van deze eerste proefmeting weergegeven waarin A de meting is waarin de sensor bedekt is met een laagje aluminium en B de meting waarin de sensor onbedekt op het raam is aangebracht.



Figuur 23 Resultaten proefmeting 1

Duidelijk te zien is dat er structureel een verschil is tussen beide meetwaarden hoewel de sensoren op slechts 15 cm afstand van elkaar zijn aangebracht op hetzelfde venster. Gemiddeld verschillen beide datareeksen 1,1°C. Daarnaast is duidelijk te zien aan datareeks A, met aluminiumfolie bedekking, dat de verwarming 's nachts om 04:45:00 aanslaat. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat het aluminiumfolie de (stralings)warmte van de ruimte heel snel opneemt en doorgeeft aan de sensor waardoor datareeks A sneller reageert op de ruimtetemperatuur. Helaas is er geen parallelle meting gedaan van de luchttemperatuur in de ruimte om de raamcontacttemperaturen mee te vergelijken. Omdat een gemiddeld verschil van 1,1°C relatief erg groot is, is er een tweede proefmeting gedaan.

Proefmeting 2

Bij de tweede proefmetingen is door middel van een vijftal variaties de contacttemperatuur van een raam gemeten. Wederom is de KeyTag KTL-208 met KT-A-ST100 sensor gebruikt. De geteste meetvarianten zijn:

- Geen bedekking
- Aluminiumfolie bedekking
- Aluminiumfolie inpakking
- Noppenfolie bedekking
- Aluminiumfolie inpakking + noppenfolie bedekking

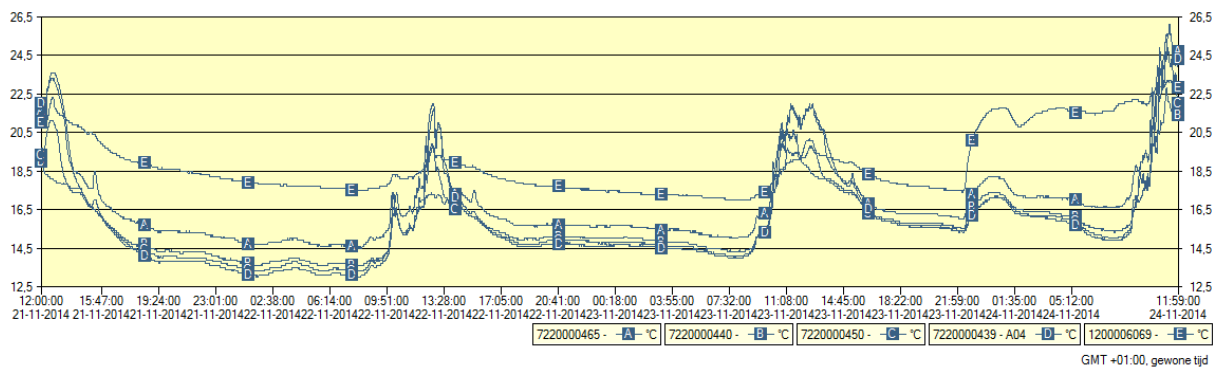
Er is gekozen voor bovenstaande varianten omdat de aluminiumfolie bedekking aangeraden werd door Mees Qualm. Eventueel kon ook aluminiumfolie inpakking bedoeld zijn, dit zou de overdracht van de raamtemperatuur naar de sensor kunnen bevorderen en daarom een beter beeld geven van de reële raamtemperatuur. Noppenfolie zou de invloed van de ruimtetemperatuur op sensor kunnen beperken en daardoor een beter beeld kunnen geven van de raamtemperatuur. Tot slot is een combinatie van aluminium inpakking en noppenfolie getest.

De metingen zijn verricht over een tijdslenge van 72 uur waarbij elke minuut de temperatuur gelogd is wat neerkomt op 4320 meetpunten. De metingen zijn verricht van 12:00 vrijdag tot 12:00 maandag op een raam op het oosten. Naast de raamtemperatuur is tevens de ruimtetemperatuur nabij het raam gelogd over dezelfde tijdslenge. De meetopstelling is te zien in Figuur 25.



Figuur 24 Meetopstelling proefmeting 2

Helaas is het instellen van de logger met aluminiumfolie bedekking niet goed gegaan waardoor de meetgegevens onbruikbaar zijn geworden. Dit bevestigt dat de loggers met grote zorgvuldigheid ingesteld moeten worden om goede metingen te kunnen verrichten. De resultaten van de meting staan weergegeven in Figuur 26.



Figuur 25 Resultaten proefmeting 2

Waarin:

- A. Geen bedekking
- B. Aluminiumfolie inpakking
- C. Noppenfolie bedekking
- D. Aluminiumfolie inpakking + noppenfolie bedekking
- E. Ruimtetemperatuur

Duidelijk te zien is dat er vanaf vrijdag 12:00 eigenlijk niet meer gestookt wordt. De temperatuur neemt af en begint pas vrijdag ochtend door de toenemende buitentemperatuur en zoninval weer toe te nemen waarna vervolgens de temperatuur na het middaguur weer afneemt. Op zondag is een soortgelijke piek te zien. Net voor de piek op zondag begint is de minimum ruimtetemperatuur te zien, om ongeveer kwart voor negen is de laagste temperatuur, 17°C gemeten. Opmerkelijk is dat al om ongeveer 22:15 zondagavond wordt begonnen met het verwarmen van het kantoor om op maandag een goede temperatuur te hebben. Aan de steile curve te zien gaat het opwarmen vrij snel waardoor de verwarming ook later in de nacht aan zou kunnen slaan. Later dit hoofdstuk wordt dit opvallende punt uitgebreider behandeld.

Aangezien, ten tijde van de meting, de buitentemperatuur veel lager was dan de binnentemperatuur is logischerwijs het raam het grootste deel van de tijd kouder dan de ruimtetemperatuur, voor alle meetvarianten. Alleen rond het middaguur is de raamtemperatuur soms warmer dan de ruimtetemperatuur. Dit komt omdat de verwarming in het weekend niet aan staat en het raam door zoninstraling sneller opwarmt dan de warmte. Wanneer de zon weer weg is koelt vervolgens het raam weer sneller af dan de ruimtetemperatuur.

Opmerkelijk aan de verschillen tussen de meetvarianten is dat meetvariant A met een gemiddelde van 16,8°C veel hoger ligt dan de gemiddelden van B (15,8°C), C (15,6°C) en D (15,8°C). Inzoomen op de pieken laat zien dat A en D erg sterk reageren op zoninval, B gemiddeld niet boven de ruimtetemperatuur uitkomt en dat C erg weinig reageert op zoninval. Op maandag, als de verwarming aan staat, lijkt C echter veel meer te reageren dan B. Bij de sterke stijging van de ruimtetemperatuur op zondagavond is dit echter nog niet het geval.

Met een infrarood thermometer zijn op maandagochtend enkele referentiepunten gemeten om vast te kunnen stellen welke meetvariant het meest accuraat de contacttemperatuur van het raam meet. Doordat het raam de infrarood straal weerkaatst is het lastig de temperatuur te meten waardoor een enkel punt eigenlijk een interval rond dat punt zou moeten zijn. De referentiepunten zijn:

- Ma 24-11 9:20 18,5 [°C]
- Ma 24-11 9:41 19,0 [°C]
- Ma 24-11 11:27 20,3 [°C]
- Ma 24-11 12:15 22,2 [°C]

Tabel 7 Referentiepunten en gemeten waarden proefmeting 2

Tijd(24-11)	Referentiepunt	Meetwaarden				Gemiddelde
		A	B	C	D	
9:20	18,5	18,7	17,1	16,8	17,1	17,425
9:41	19,0	18,9	17,9	17,9	17,3	18,0
11:27	20,3	26,0	21,9	24,0	25,8	24,425
12:15	22,2	24,7	21,4	22,0	24,3	23,0

In Tabel 7 zijn de referentiepunten en de daarbij horende gemeten waarden te zien. Groen gearceerd zijn de waarden die het dichtst bij het referentiepunt liggen. Er is niet direct een overtuigende conclusie te trekken over wat de beste manier is om het contactoppervlak te meten op basis van de waarden die het dichtst bij de referentiepunten liggen. Als gekeken wordt naar de gemiddelde meetwaarde en de daar dichtst bij liggende waarden (blauw gearceerd in Tabel 7) valt er ook vrij weinig te zeggen over de manier van meten die het beste de werkelijkheid weergeeft. Er valt te concluderen dat de uitgevoerde proefmeting op glas erg lastig is i.v.m. zoninstraling en verschillende temperaturen aan beide zijden van het glas. Aangezien de meting in eerste instantie bedoeld was om de vloertemperatuur te meten is besloten een derde proefmeting te doen op een tegel, wat beter de werkelijkheid weergeeft.

Proefmeting 3

Bij de derde proefmetingen is wederom door middel van een vijftal variaties de contacttemperatuur gemeten, ditmaal op een tegel. Dezelfde sensoren zijn gebruikt. De geteste meetvarianten zijn wederom:

- Geen bedekking
- Aluminiumfolie bedekking
- Aluminiumfolie inpakking
- Noppenfolie bedekking
- Aluminiumfolie inpakking + noppenfolie bedekking

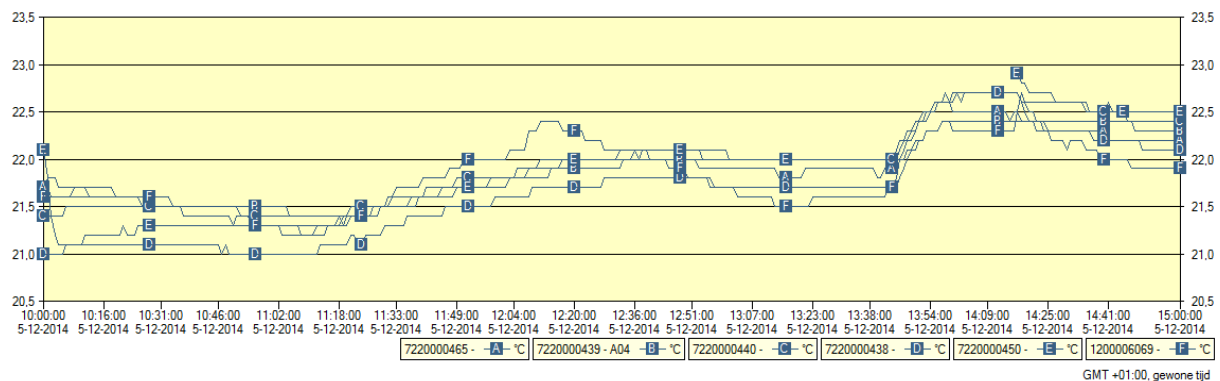
De metingen zijn verricht over een tijdsduur van ongeveer 5 uur waarbij elke minuut de temperatuur gelogd is wat neerkomt op 301 meetpunten. De metingen zijn verricht van 10:00 vrijdag 5 december 2014 tot 15:00 vrijdag 5 december 2014 op een tegel van ongeveer 19 mm dik. Naast de contacttemperatuur van de tegel is tevens de ruimtetemperatuur nabij de meetopstelling gelogd over dezelfde tijdsduur. De meetopstelling is te zien in Figuur 27.



Figuur 26 Meetopstelling proefmeting 3

Om een duidelijk beeld te krijgen van de meting is de tegel met sensoren van een neutrale plaats naar een plaats onder de verwarming geplaatst om duidelijkere referentiepunten te kunnen vaststellen. Met een nagenoeg constante temperatuur is het lastiger om de reële temperatuur met de meetvarianten te vergelijken.

Ook de derde proefmeting is niet vlekkeloos verlopen. Er ontbreekt om onbekende reden een half uur data bij de variant met aluminium inpakking en noppenfolie bedekking. De resultaten van de derde proefmeting staan weergegeven in Figuur 28.



Figuur 27 Resultaten proefmeting 3

Waarin:

- A. Geen bedekking
- B. Aluminiumfolie bedekking
- C. Aluminiumfolie inpakking
- D. Noppenfolie bedekking
- E. Aluminiumfolie inpakking en noppenfolie bedekking
- F. Ruimtetemperatuur

Met een infrarood thermometer referentiepunten gemeten om vast te kunnen stellen welke meetvariant het meest accuraat de contacttemperatuur van de tegel meet. Bij deze proefmeting zijn een stuk meer referentiepunten gemeten om een beter beeld te kunnen vormen van de beste methode. De referentiepunten en bijbehorende meetpunten van de diverse meetvarianten zijn in Tabel 8 weergegeven. Daarbij is de waarde groen gearceerd die het dichtst bij het referentiepunt ligt. Er zijn een vijftal cellen lichtgroen gearceerd omdat deze wel het dichtst bij het referentiepunt liggen, maar de waarden van meetvariant E voor die waarden ontbreken en het dus geen valide resultaat is. Onderaan de tabel zijn de gearceerde cellen opgeteld en tussen haakjes zijn de gearceerde cellen opgeteld inclusief de lichtgroen gearceerde.

Tabel 8 Referentiepunten en gemeten waarden proefmeting 3

Tijd (05-12)	Referentie- punt	Meetwaarden				
		A	B	C	D	E
10:03	21,9	21,8	21,6	21,4	21,0	21,2
10:39	22,2	21,4	21,5	21,5	21,1	21,3
11:12	22,2	21,3	21,4	21,4	21,0	21,3
11:47	21,4	21,7	21,6	21,7	21,5	21,7
12:30	23,0	22,0	21,9	22,0	21,8	22,0
13:20	22,7	21,8	22,0	22,0	21,7	22,0
13:56	23,9	22,6	22,3	22,6	22,6	-
14:16	24,1	22,5	22,4	22,7	22,7	-
14:33	22,7	22,3	22,4	22,6	22,3	22,6
14:52	22,7	22,2	22,3	22,4	22,1	22,5
15:00	22,8	22,2	22,3	22,4	22,1	22,5
# dichtst bij referentiepunt		2 (3)	3	5 (7)	1 (3)	5

Meetvariant C en E zijn met een waarde van 5 de methodes die het beste de werkelijke waarde van het contactoppervlak weergeven. Meetvariant C is met 7 het grootst als de lichtgroen gearceerde waarden ook meegenomen zouden worden. In proefmeting 2 kwam E als slechtst uit de bus, vandaar dat meetvariant C, aluminiumfolie inpakking, als beste meetmethode aangenomen wordt.

Extra meting n.a.v. proefmeting 2

In de tweede proefmeting werd opgemerkt dat op het kantoor van DWA in Rijssen de thermostaat al om ongeveer 22:15 zondagavond aan slaat om het kantoor te verwarmen zodat op maandag een werkbare temperatuur bereikt is. Aan de steile curve te zien (zie Figuur 26) gaat het opwarmen vrij snel waardoor de verwarming ook later in de nacht aan zou kunnen slaan. Omdat DWA zich volledig richt op duurzaamheid en een collega bij DWA ook aangaf dat de temperatuur 's nachts volgens hem vrij hoog bleef is besloten om ook een meting in het kantoor van DWA in Rijssen te doen. Hierbij zijn zes sensoren aangebracht waarvan vier in het kantoor van DWA, één in de algemene ruimte op de begane grond in de Citadel en één op de aanvoerleiding van de ketel om vast te stellen wanneer de verwarming aan slaat. Van de vier sensoren in het kantoor van DWA zijn er twee aangebracht in de kantoren en twee in de algemene ruimte.

Uit de resultaten van de extra metingen bleek dat de ketel geregeld aanslaat en warm water produceert. De temperaturen in de kantoren en gemeenschappelijke ruimten namen echter niet toe in het weekend. Dit zou kunnen komen doordat de ketel aanslaat maar de groepen gesloten blijven waardoor de warmte niet gedistribueerd wordt.

Aangezien het vreemd gevonden werd dat de ketel wel aansloeg in het weekend, schijnbaar zonder reden, maar de ruimten niet verwarmd werden is er nog een laatste meting gedaan waarin ook de drie verschillende groepen gemeten zijn. Deze gegevens zijn echter nog niet geanalyseerd. Vervolgonderzoek zal nog naar dit fenomeen gedaan moeten worden om met zekerheid te zeggen dat onnodig energie gebruikt wordt om de ketel op te stoken in het weekend.

Conclusie proefmetingen

Uit de diverse uitgevoerde proefmetingen bleek dat een KeyTag KTL-208 met KT-A-ST100 sensor de meest realistische waarden contacttemperatuur meet indien de sensor in aluminiumfolie gewikkeld is voor een betere geleiding van de temperatuur. Het is echter niet zeker te zeggen of de contacttemperatuur van glas ook optimaal gemeten werd. In de metingen zullen echter voor alle contactoppervlakken KeyTag KTL-208 met KT-A-ST100 sensoren gebruikt worden omwikkeld met aluminiumfolie aangezien er geen betere methode gevonden is.

Bijlage G: Meetplan woning 1

In dit hoofdstuk zal het meetplan beschreven worden. Metingen verrichten in diverse woningen is één van de methoden van het onderzoek en wordt toegepast om het antwoord op de vierde onderzoeksvraag te vinden, namelijk:

“Wat is de relatie tussen de beleving van thermisch discomfort van een bewoner en de fysische parameters in zijn/haar woning?”.

Het meetplan is van belang om helder voor ogen te hebben waarom er gemeten gaat worden, wat er gemeten gaat worden en tot slot hoe dat gedaan gaat worden. Tevens geeft het meetplan handvatten om hetzelfde onderzoek op een andere locatie op eenzelfde wijze uit te voeren zodat resultaten met elkaar vergelijkbaar zijn. Het meetplan zal opgesteld worden conform NEN 15259.

Meet doelstelling

Het doel van de meting is om parameters die van belang zijn voor thermisch comfort te meten zodat deze vergeleken kunnen worden met de beleving van thermisch comfort van de bewoner(s). Hierdoor kunnen verbanden gelegd worden tussen diverse parameter waarden en het eventuele ontstane discomfort en zouden vervolgens concrete vervolgstappen gedaan kunnen worden om het thermisch discomfort tegen te gaan.

Locatie

De metingen zullen verricht worden in de leefruimte van woningen (woonkamer, woonkeuken of andere ruimte waar de bewoner regelmatig en langdurig veel tijd door brengt) uitgerust met vloerverwarming en een goed geïsoleerde gevel (R_c is $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ en U is $1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$). Woningen met afwijkende waarden kunnen tevens gemeten worden als controlegroep. De woningen zijn gesitueerd in Nederland, de exacte locatie is niet van belang voor het onderzoek. Wel zal de oriëntatie van de woningen genoteerd moeten worden aangezien deze van belang is voor binnentemperatuur.

Apparatus

Apparaat		Parameter	Meetbereik	Nauwkeurigheid
KeyTag KTL-108		Ruimte-temperatuur	-40°C ...+85°C	±0,5°C*
KeyTag KTL-208 + KT-A-ST100		Contact-temperatuur	-40°C ...+99°C	±0,5°C*
Testo 480:				
Behaaglijkheids-sonde		Luchtsnelheid Ruimte-temperatuur	0... +5 m/s 0... +50 °C	±(0.03 m/s +4% v.d. mw.) ±0.5 °C
IAQ-sonde			0...10.000 ppm CO ₂ 0...50 °C 0...+100%RV	±(75 ppm CO ₂ + 3% v.Mw.) (0...+5000 ppm CO ₂) ±0,5 °C ±(1,8 %RV + 0,7% v.Mw.)
Zwartebol Ø150mm TE type K			0 ... +120 °C	±0,5 °C

* Feitelijke nauwkeurigheid kan beduidend beter zijn.

Methode en te meten parameters

De Testo 480 is een klimaatinstrument (zie Figuur 29) waar diverse sensoren aan gekoppeld kunnen worden. In deze meting zullen een behaaglijkheidssonde (luchtsnelheid en luchttemperatuur), zwartebol (stralingswarmte) en IAQ-sonde (CO₂, luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid) gebruikt worden. De Testo 480 zal in de woonkamer in het leefzone geplaatst worden (1,0 meter uit de gevel en tot 1,8 meter boven de vloer. Door middel van de parameters die gemeten worden met de Testo 480 zullen de PMV en PPD berekend kunnen worden.



Figuur 28 Testo 480 klimaat opstelling

[illegible]

61

Bijlage F: Formules en meetresultaten

In deze Bijlage zijn de formules van de PMV en PPD gegeven en zijn enkele onderzoeksresultaten in grafiekvorm weergegeven waar in de hoofdttekst naar verwezen wordt.

Formules

De PMV (Predicted Mean Vote) wordt gebruikt om thermisch comfort uit te drukken. In de formule om de PMV te berekenen zijn o.a. de luchtsnelheid, luchtvochtigheid, luchttemperatuur en stralingstemperatuur opgenomen. De formule om de PMV te berekenen is gegeven in NEN-EN-ISO 7730 en is als volgt:

$$PMV = [0,303 * \exp(-0,036 * M) + 0,028] * \left\{ \begin{aligned} &(M - W) - 3,05 * 10^{-3} * [5733 - 6,99 * (M - W) - p_a] - 0,42 * [(M - W) - 58,15] \\ &- 1,7 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 0,0014 * M * (34 - t_a) \\ &- 3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_d * h_c * (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\}$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 * (M - W) - I_{cl} \\ * \{3,96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_d * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{for } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 * \sqrt{v_{ar}} & \text{for } 2,38 * |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 * \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 l_{cl} & \text{for } l_{cl} \leq 0,078 \frac{m^2 K}{W} \\ 1,05 + 0,645 l_{cl} & \text{for } l_{cl} > 0,078 \frac{m^2 K}{W} \end{cases}$$

Waarin:

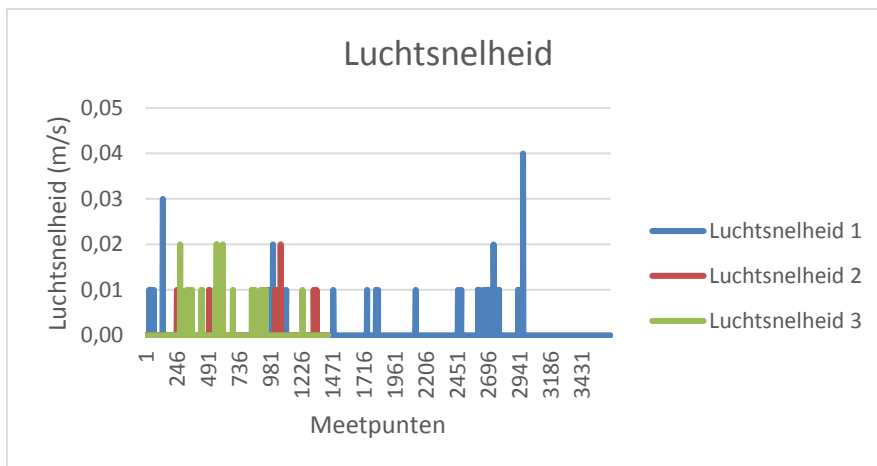
M	de metabolisme waarde in W/m^2 ;
W	de effectieve mechanische kracht in W/m^2 ;
I_{cl}	de kleding isolatie in $m^2 K/W$;
f_{cl}	de kleding oppervlakte factor;
t_a	de luchttemperatuur in $^{\circ}C$;
$\bar{t}_r$	de gemiddelde stralingstemperatuur in $^{\circ}C$;
v_{ar}	de relatieve luchtsnelheid in m/s ;
p_a	de relatieve luchtvochtigheid;
h_c	de convectieve warmtetransport coëfficiënt in $W/(m^2 K)$;
t_{cl}	de kleding oppervlakte temperatuur in $^{\circ}C$.

Deze PMV uitkomsten zijn om te rekenen naar een percentage van mensen die het thermisch binnenklimaat bij een bepaalde PMV waarde niet comfortabel vinden, de PPD (predicted percentage dissatisfied).

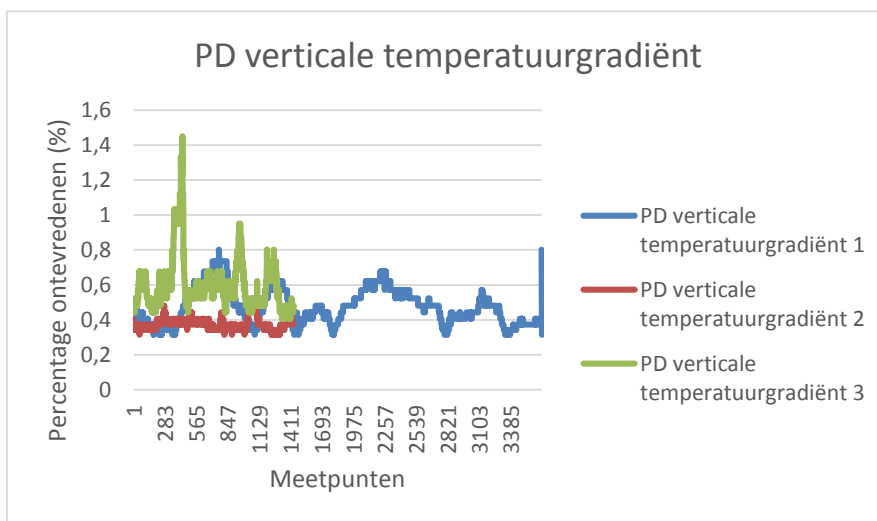
De PPD is als volgt te berekenen:

$$PPD = 100 - 95 * \exp(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2)$$

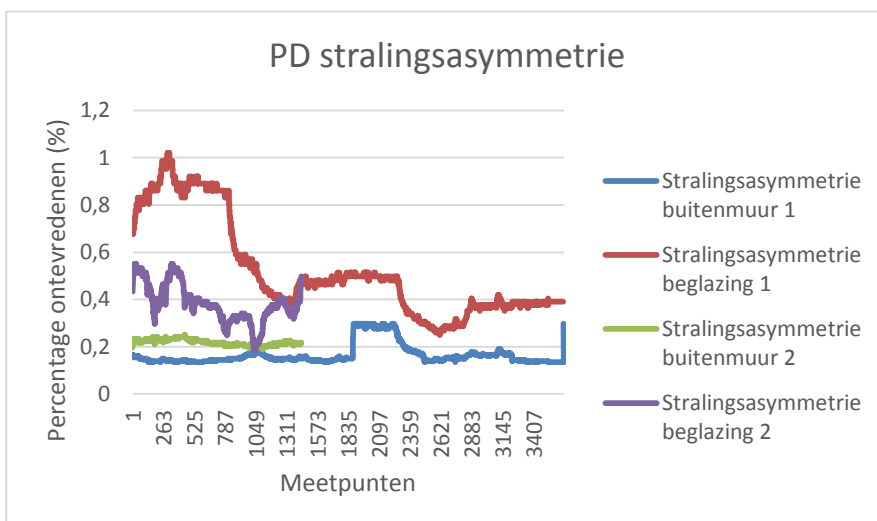
Meetresultaten



Figuur 30 Luchtsnelheden in drie woningen



Figuur 31 Percentage ontevreden door de verticale temperatuurgradiënt in drie woningen



Figuur 32 Percentage ontevreden door stralingsasymmetrie in drie woningen