

VERBETERING VAN ENERGIEPRESTATIE VOOR NIEUWBOUWWONINGEN

Verslag eerste fase project Ecobuild Research

W. Giljamse
E.J. Bakker
N.C. Sijpheer

Verantwoording

Dit rapport is gemaakt in het kader van het Ecobuild project fase I en is bij ECN uitgevoerd onder projectnummer 7.4856.

Abstract

Improving the energy performance of new houses will contribute largely to energy policy and climate policy objectives. The objective of the project Ecobuild Research is to develop an energy concept for new houses that reduces primary energy consumption to 50% of the present standard. In terms of the Dutch energy performance coefficient (EPC) this is a reduction from 1,0 tot 0,5. This report presents the results of the first phase of this project. In this phase, several energy concept variations have been evaluated experimentally in three test houses that have been built on the premises of ECN in Petten.

The main building blocks of the basic energy concept are improved insulation, advanced glazing systems, heat recovery from ventilation air and solar water heating. Results of the evaluation show that with this combination the objectives of the project can be met. An important condition is to pay sufficient attention to the air-tightness of the houses. Also, consideration should be given to the indoor comfort under summer conditions. Energy-efficient cooling systems that make use of ground source heat exchangers have been tested and evaluated positively.

The project has also delivered valuable results that can be used for energy concepts that lead to an EPC under 0,5. Options for further reduction are advanced ventilation control systems, enlarged solar thermal systems contributing to space heating, building integrated photovoltaic systems and heat pumps. In the next phase of the project these options will be combined to a zero-energy concept.

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	4
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
1.1 Waarom energieprestatieverbetering nieuwbouwwoningen?	7
1.2 Het project Ecobuild-Research	7
2. HET ENERGETISCH CONCEPT	9
2.1 Algemene uitgangspunten	9
2.2 Vermijden van energievraag	9
2.3 Energie-aanbodstelsel	11
2.4 Maatregelpakketten	11
3. MEET- EN TESTPROGRAMMA	13
3.1 De testwoningen	13
3.1.1 Woning A	13
3.1.2 Woning B	15
3.1.3 Woning C	16
3.2 Het meetprogramma	18
3.2.1 Algemene aanpak	18
3.2.2 Het data-acquisitie systeem	19
3.2.3 Bewonerssimulatie	19
3.2.4 Binnencomfort	20
3.2.5 Gezondheid	20
3.2.6 Geluid	20
4. SAMENVATTING DEELRESULTATEN MEET- EN TESTPROGRAMMA	21
4.1 Energieprestatie en thermisch comfort	21
4.1.1 Lekdichtheid van de woningen	21
4.1.2 Isolatiecoëfficiënt van de gevels	21
4.1.3 Warmte-afgifte systemen	21
4.1.4 Warmteterugwinning douchewater	22
4.1.5 Een lucht-bodemwarmtewisselaar in combinatie met warmteterugwinning van ventilatielucht	22
4.1.6 Koelen met een lucht-bodemwarmtewisselaar	22
4.1.7 Koelen met bodemslangen	22
4.1.8 Rendement HR-combiketel	22
4.1.9 Rendement zonnecollectoren	23
4.1.10 Warmte-opslag in een waterzak	23
4.1.11 Energieprestatie warmtepomp woning A	23
4.1.12 Energieprestatie warmtepomp woning C	23
4.1.13 PV luchtcollector	23
4.2 Gezondheid	24
4.2.1 Luchtverversing, vocht-huishouding en binnenmilieu	24
4.2.2 Overige gezondheidsaspecten	24
4.3 Geluid	24
4.3.1 Geluidsisolatie tussen woningen	24
4.3.2 Geluid van installaties	25
5. HAALBAARHEID ENERGETISCH CONCEPT	26
5.1 Een basispakket met EPC=0.53	26
5.2 Zomercomfort en koelbehoefte	28
5.3 Verdere verbetering van de energieprestatie	28

5.3.1	Energievraagreductie	28
5.3.2	Zonverwarmingssystemen	28
5.3.3	PV	29
5.3.4	Warmtepomp	29
	ACHTERGRONDSTUDIES EN MEETVERSLAGEN	30

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 2.1	<i>Maatregelpakketten uit de voorstudie voor nieuwbouwwoningen</i>	12
Tabel 5.1	<i>Maatregelpakket woning B vergeleken met pakket 2 uit voorstudie</i>	26
Tabel 5.2	<i>Basispakket en warmtepompvarianten doorgerekend voor woning B</i>	29

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1.1	<i>De testwoningen op het terrein van ECN in Petten</i>	8
Figuur 3.1	<i>De zuidzijde van de testwoningen op het ECN-terrein. Voor woning B wordt overlegd over de toegang tot de woningen</i>	13
Figuur 3.2	<i>Visualisatie van de in woning A toegepaste systemen</i>	14
Figuur 3.3	<i>Het aanbrengen van vloerverwarming</i>	15
Figuur 3.4	<i>Warmteterugwin unit zoals toegepast in woning B</i>	15
Figuur 3.5	<i>Visualisatie van de in woning B toegepaste systemen</i>	16
Figuur 3.6	<i>Detail van drievoudig glas</i>	16
Figuur 3.7	<i>Lucht-bodem warmtewisselaar van woning C tijdens het aanbrengen</i>	17
Figuur 3.8	<i>Visualisatie van de in woning C toegepaste systemen</i>	18

SAMENVATTING

Verbetering van de energieprestatie van woningen zal in sterke mate bij kunnen dragen aan de doelstellingen van het Nederlandse energie- en klimaatbeleid. Innovaties op dit gebied beginnen in de nieuwbouw van woningen. De eerste fase van het project Ecobuild Research, waarover hier wordt gerapporteerd, heeft als doelstelling te komen tot een energieconcept voor nieuwbouwwoningen dat leidt tot een halvering van het primair energiegebruik voor de gebouwgebonden energiefuncties ten opzichte van de huidige norm. In termen van de energieprestatiecoëfficiënt betekent dit een EPC van 0.5. Randvoorwaarden daarbij zijn een goed comfort, een gezond binnenklimaat, lage kosten en een lage milieubelasting over de hele levensketen van het gebouw. Het project wordt uitgevoerd door een consortium van marktpartijen en onderzoeksinstituten.

Een integrale aanpak van de energievoorziening in een woning vraagt om een “bottom-up” benadering van het energetisch ontwerp volgens de energieladder “vermijden-duurzaam-efficiënt”. De belangrijkste maatregelen ter vermindering van energiegebruik in nieuw te bouwen woningen liggen in het woningontwerp en het ontwerp van de comfortinstallaties. Met dit ontwerp wordt de vraag naar warmte, koude en verlichting vastgelegd. Ontwerp-principes die tot beperking van de energievraag kunnen leiden zijn het passief gebruik van zonnewarmte, een goede isolatie van de gebouwschil, beperking van ventilatieverliezen door toepassing van warmteterugwinning uit ventilatielucht, en het gebruik van buitenlucht of bodem voor koeling. Voor het dekken van de resterende energievraag komen verschillende vormen van duurzame energie benutting in aanmerking: zonnecollectoren die zonlicht omzetten in benutbare warmte, PV-systemen die elektriciteit uit zonlicht maken, en warmtepompen die omgevingswarmte benutten.

Om deze maatregelen te kunnen uitwerken en testen is op het ECN terrein een drietal testwoningen gebouwd. Gedurende ongeveer een jaar is in deze woningen een uitgebreid meet- en testprogramma uitgevoerd. De woningen waren onbewoond. Bewoning van de woningen is nagebootst om de eigenschappen van de woningen zo realistisch mogelijk maar wel onder gecontroleerde omstandigheden te kunnen onderzoeken. Met de resultaten van de metingen zijn simulatiemodellen die de warmtevraag van de woning benaderen, gevalideerd. Deze simulatiemodellen zijn beter in staat de warmtevraag te voorspellen en te optimaliseren dan de standaard normberekening voor het bepalen van de energieprestatiecoëfficiënt (de EPC).

Met behulp van de metingen en de op basis van de metingen opgestelde simulatiemodellen kan niet alleen een evaluatie van de energieprestatie van de woning en de toegepaste componenten worden uitgevoerd, maar ook een evaluatie van het binnencomfort. Om de effecten van de genomen maatregelen op de gezondheid van bewoners te kunnen inschatten zijn de risico's van allergische reacties en longaandoeningen bepaald. Ook zijn de risico's van geluidshinder bepaald door geluidsmetingen.

Aan de hand van de meet- en testresultaten kan een basispakket van maatregelen worden opgesteld die goed toepasbaar zijn, en in combinatie met elkaar leiden tot een energieprestatie die het streefniveau EPC=0.5 dicht benadert. Hoofdkenmerken van dit pakket zijn:

- Isolatie van dak en gevel tot een niveau van $R_c = 5.8(m^2.K)/W$, begane grond vloer tot $R_c = 8.7(m^2.K)/W$ en ramen (glas+kozijn) tot $U = 1.2 W/(m^2.K)$;
- Warmteterugwinning uit ventilatielucht met een rendement van 90%;
- Een zonneboiler van 140 liter met een collectoroppervlak van $5.5 m^2$.

Belangrijke randvoorwaarden voor het daadwerkelijk realiseren van de energieprestatie is dat tijdens de bouw voldoende aandacht wordt besteed aan de luchtdichtheid van de woning. Zonwering om oververhitting te vermijden is belangrijk en noodzakelijk om de

energiebesparing voor ruimteverwarming niet 'te niet te doen' door energiegebruik in de zomer voor koeling. Toepassing van het genoemde pakket aan maatregelen leidt tot een goed comfort en een goede binnenluchtkwaliteit. Randvoorwaarde voor het daadwerkelijk realiseren van een gezonde woning is wel dat het gebalanceerde ventilatiesysteem zo wordt ontworpen dat het geluidsniveau laag is en het kanalsysteem goed reinigbaar is.

Voor de acceptatie van een gebouw en gebouwinstallatie door bewoners is van belang dat het comfort ook in de zomer aan hun eisen voldoet. Dit voorkomt ook dat bewoners achteraf airconditioning gaan aanschaffen waardoor het energiegebruik weer toeneemt. Effectieve zonwering is daarbij een noodzaak en het opnemen daarvan in nieuwbouwwoningen verdient aanbeveling. Aanvullend kan gebruik gemaakt worden van bodemkoelte. Een systeem bestaande uit bodemslangen direct gekoppeld aan plafondkoeling blijkt op zeer efficiënte wijze de woning te kunnen koelen. Ook veelbelovend is een systeem waarbij ventilatielucht door de bodem wordt gekoeld, waarbij ook nog in de winter hetzelfde systeem de ventilatielucht voorverwarmt hetgeen tot extra besparingen leidt.

Om tot een nog betere energieprestatie te komen dan het hierboven beschreven niveau van EPC=0.5 blijken verschillende wegen open te staan:

- Een verdere reductie van de energievraag. Een bijdrage hieraan valt te verwachten van geavanceerde ventilatiesystemen die gestuurd worden op luchtkwaliteit en/of aanwezigheid.
- Een grotere bijdrage van het zonverwarmingssysteem in de warmtevraag. Vergroting van het collectoroppervlak in combinatie met een warmte-opslag in de vorm van een flexibele waterzak in de kruipruimte van de woning kan er toe leiden dat 66% van de totale warmtevraag gedekt wordt door zonnewarmte.
- Een PV-installatie op het dak. Om het aandeel duurzame energie in de energievoorziening van de woning te maximaliseren zal het dakoppervlak zoveel mogelijk moeten worden benut. De grootste zonbijdrage kan worden verwacht als hetzelfde dakoppervlak wordt gebruikt voor opwekking van zowel warmte als elektriciteit. Dit kan door lucht achter de PV-installatie te leiden en deze te gebruiken als bron voor een warmtepomp. Hiermee kan een thermisch rendement van 37% worden gehaald. Het tegelijkertijd opwekken van elektriciteit en warm water in een zogenaamde PV-Thermische collector lijkt tot hogere rendementen te kunnen leiden.
- Inzet van een warmtepomp. Een systeem waarbij bodemwarmte via een verticale bodemwarmtewisselaar wordt toegevoerd aan een warmtepomp kan tot een aanzienlijke verbetering van de energieprestatie leiden. Voorwaarde daarbij is wel dat de apparaatspecificaties van de warmtepomp in de praktijk ook daadwerkelijk worden gehaald. Ook dient veel aandacht aan beperking van het geluidsniveau in de woning te worden besteed.

In de hierna volgende fase van het project zal het concept worden doorontwikkeld tot het punt van energieneutraliteit, waarbij het energiegebruik geheel wordt gedekt door lokaal gewonnen duurzame energie.

1. INLEIDING

1.1 Waarom energieprestatieverbetering nieuwbouwwoningen?

In Nederlandse woningen wordt steeds efficiënter met energie omgegaan. Met name het gasverbruik is de afgelopen decennia sterk gedaald. In 1980 was het jaarlijks gasverbruik voor verwarming in een centraal verwarmde woning gemiddeld 3200 m³, in 2002 was dit gedaald naar 1600 m³. Steeds betere isolatie en verhoging van het rendement van CV-ketels zijn de belangrijkste maatregelen die deze daling hebben veroorzaakt. Nieuwe woningen zijn het zuinigst: een woning gebouwd na 2000 verbruikt gemiddeld nog geen 800 m³ per jaar voor verwarming.

De energiezuinigheid in nieuwbouwwoningen wordt bevorderd door de zogenaamde energieprestatienormering. In het Bouwbesluit is vastgelegd dat voor nieuw te bouwen woningen de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) niet boven een bepaalde norm, Energie Prestatie Norm (EPN) mag uitkomen. De EPC is een maat voor het primair energiegebruik dat samenhangt met ruimteverwarming, ventilatie, warm tapwatergebruik en verlichting, en is inclusief hulpenergie voor pompen etc.

Verdere verlaging van de EPN draagt bij aan de realisatie van overheidsdoelstellingen op energiegebied. Allereerst zullen daardoor nieuwe woningen een kleiner beslag leggen op fossiele energiebronnen, hetgeen voor lange tijd doorwerkt in het nationale energiegebruik gezien de lange levensduur van woningen. Maar ook heeft verlaging van de EPN een belangrijke uitstraling naar de bestaande bouwvoorraad. Toepassing van innovaties op energiegebied worden er immers door gestimuleerd en deze vinden langs de “kraamkamer” van de nieuwbouw vervolgens ook hun weg in de bestaande voorraad.

1.2 Het project Ecobuild-Research

Het project Ecobuild-Research heeft als doelstelling het ontwikkelen van een energieconcept voor woningen dat tot een lage energie- en milieubelasting leidt, en geschikt is om grootschalig te worden toegepast. Het project wordt uitgevoerd door een samenwerkingsverband van kennisinstellingen en marktpartijen.

In de periode 1998-1999 is een voorstudie uitgevoerd, waarbij de uitgangspunten van het energetisch concept zijn vastgelegd. Voor deze voorstudie werd ondersteuning verkregen vanuit het E.E.T.-programma. De hierop volgende hoofdstudie is gestart in 2000, en wordt ondersteund vanuit het door Senter uitgevoerde programma Technologische Samenwerking. De hoofdstudie is opgedeeld in twee fasen.

Fase 1 van Ecobuild-Research, waarover hier wordt gerapporteerd, heeft als doelstelling te komen tot een energieconcept voor nieuwbouwwoningen dat leidt tot een halvering van het primair energiegebruik ten opzichte van de huidige norm. In termen van de energieprestatiecoëfficiënt betekent dit een EPC van 0.5. Om tot grootschalige toepassing te komen zal het energieconcept aan een aantal randvoorwaarden dienen te voldoen:

- Een positieve invloed op comfort en binnenluchtkwaliteit;
- Beperkte meerkosten, zodanig dat de kosten uit de behaalde energiebesparing gefinancierd kunnen worden;

- Milieuvordelen die met het lagere beslag op fossiele energiebronnen gedurende de gebruikersfase behaald worden, mogen niet teniet worden gedaan door extra milieubelasting die verbonden is aan productie of afdanking van de toegepaste materialen.

De ontwikkeling en evaluatie van maatregelpakketten die aan de doelstelling beantwoorden is ter hand genomen in een drietal testwoningen die voor dit doel op het ECN-terrein in Petten zijn gerealiseerd. In deze testwoningen is een uitgebreid meet- en testprogramma uitgevoerd. In de woningen wordt bewonersgedrag gesimuleerd aangezien er geen 'echte mensen' wonen. Deze gesimuleerde en dus gecontroleerde woonomstandigheden zijn bij uitstek geschikt om onderzoek te doen aan concepten. De volgende partners maakten deel uit van het consortium: Wilma Bouw (inmiddels opgegaan in BAM Wilma), Econosto, Unidek, Limburg Kozijnen, Heembeton, Aedes Vereniging van Woningcorporaties, Onderzoeksinstituut OTB (TU Delft) en ECN.

De woningen zijn in de eerste fase gericht op nieuwbouwconcepten zoals die grootschalig op bijvoorbeeld VINEX locaties kunnen worden gerealiseerd. De woningen zijn qua bouw en indeling gebaseerd op de tuinkamer woning zoals die door NOVEM is gedefinieerd. Benutting van duurzame energie is gericht op de directe omgeving van de woning.

In fase 2 van het project zullen de in de eerste fase ontwikkelde maatregelpakketten worden doorontwikkeld, waarbij de in de eerste fase geconstateerde knelpunten worden aangepakt en het energieprestatieniveau verder wordt verbeterd. Uiteindelijk doel daarbij is het behalen van een situatie van energieneutraliteit, waarbij het energiegebruik geheel wordt gedekt door lokaal gewonnen duurzame energie. Ook in fase 2 zal uitgebreid gebruik worden gemaakt van de testwoningen op het ECN-terrein.



Figuur 1.1 *De testwoningen op het terrein van ECN in Petten*

2. HET ENERGETISCH CONCEPT

In de voorstudie voor het project Ecobuild-Research zijn vanuit de doelstellingen van het project uitgangspunten voor het energetisch concept afgeleid, en zijn deze uitgangspunten uitgewerkt in globale maatregelpakketten^{1 2}. Dit hoofdstuk beschrijft deze uitgangspunten en maatregelpakketten. In volgende hoofdstukken wordt beschreven hoe deze globale maatregelpakketten zijn uitgewerkt in testconfiguraties, waarna kon worden getoetst in hoeverre de testresultaten voldoen aan de doelstellingen van het project.

2.1 Algemene uitgangspunten

De energetische doelstelling van de eerste fase van het project is een halvering van het primair energiegebruik voor de gebouwgebonden energiefuncties: ruimteverwarming, warm tapwater, ventilatie en verlichting. Drie categorieën van maatregelen kunnen bijdragen aan de realisatie van deze doelstelling:

- De eerste categorie bestaat uit maatregelen die zorgen voor het *vermijden* van onnodig energiegebruik. Isolatie, warmteterugwinning uit ventilatielucht en het gebruik van efficiënte ventilatoren zijn voorbeelden van maatregelen die tot vermindering van energievraag leiden.
- De tweede categorie maatregelen omvat het gebruik van lokale *duurzame energiebronnen*, om zoveel mogelijk in de resterende energiebehoefte te voorzien. Op gebouwniveau gaat het hierbij met name om zonne-energie en gebruik maken van omgevingswarmte in het stookseizoen en omgevingskoude in het zomerseizoen.
- Voor zover lokale duurzame energiebronnen niet toereikend zijn, zullen traditionele energiedragers zoals aardgas en elektriciteit uit het landelijk net worden ingezet. Deze energiedragers zo *efficiënt* mogelijk in te zetten vormt de derde categorie van maatregelen. Hoog-rendementsketels en warmtepompen zijn voorbeelden van technieken die kunnen zorgen voor efficiënte omzetting van gas of elektriciteit in warmte. Aangezien een warmtepomp ook omgevingswarmte benut, kan deze ook in de tweede categorie worden ondergebracht.

Deze drie categorieën samen vormen de zogenaamde energieladder “vermijden-duurzaam-efficiënt”.

2.2 Vermijden van energievraag

Een integrale aanpak van de energievoorziening in een woning vraagt om een “bottom-up” benadering van het energetisch ontwerp volgens de energieladder “vermijden-duurzaam-efficiënt”. De reden om met “vermijden” te beginnen is dat een warmtevoorzieningssysteem alleen optimaal kan worden gedimensioneerd als de energievraag goed gedefinieerd is, hetgeen inhoudt dat alle maatregelen om tot beperking van die vraag te komen dienen te zijn overwogen.

De belangrijkste maatregelen ter vermindering van energiegebruik in nieuw te bouwen woningen liggen in het woningontwerp en het ontwerp van de comfortinstallaties. Met dit ontwerp wordt de vraag naar warmte, koude en verlichting vastgelegd. Ontwerp-principes die tot beperking van de energievraag kunnen leiden zijn:

- *Passief gebruik van zonnewarmte*. Dit houdt in dat zoveel mogelijk gebruik gemaakt wordt van op de woning invallende zoninstraling om de gewenste binnentemperatuur te handhaven. Dit kan door optimalisatie van het raamoppervlak op de zuidgevel, en een woningindeling die daaraan is aangepast.
- *Vasthouden van warmte*. Dit kan door toepassen van een hoog isolatieniveau en warmteterugwinning uit ventilatielucht.
 - Voor de dichte delen in de gebouwmhulling wordt gestreefd naar een warmteweerstand van minimaal $R_c = 5 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$. In daken en begane grond vloeren is dit haalbaar zonder aanpassing van de bouwpraktijk. Om deze isolatiewaarde ook in

gevels te halen binnen een totale geveldikte van 30 cm (de gebruikelijke maat) ligt het voor de hand om houtskeletbouw binnenspouwbladen toe te passen. Daarbij kan een deel van de isolatie in het binnenspouwblad worden verwerkt. Ook kan isolatie in de spouw worden aangebracht, eventueel als één geheel met het binnenspouwblad. De dikte van het buitenspouwblad kan worden beperkt door elementen te gebruiken die dunner zijn dan de gebruikelijke steenlaag van ca. 10 cm, waardoor ook weer extra ruimte ontstaat voor isolatie.

- In beglazingssystemen zijn door ontwikkelingen in coatings en spouwvulling steeds betere isolatiewaarden haalbaar. Dubbele beglazing (2 glasplaten) met een U-waarde van 0,9 W/m².K is commercieel leverbaar. Met drievoudige beglazing (3 glasplaten) kunnen nog lagere waarden worden behaald. Aandacht dient besteed te worden aan de kozijnen, omdat de U-waarde daarvan in het algemeen slechter is dan van de beglazing. De U-waarde van kozijnen kan worden beperkt door het inpassen van koudebrugonderbrekingen. Hierbij dient zowel de warmtestroom langs de glasrand als de warmtestroom door het aangrenzende gevelelement te worden betrokken.

- Beperking van ventilatieverliezen is mogelijk door toepassing van warmteterugwinning uit ventilatielucht. De nieuwste generatie systemen op basis van tegenstroom-warmtewisselaars heeft een warmteterugwinrendement van minimaal 90%. Het hulpenergiegebruik dat samenhangt met het hiervoor benodigde systeem van gebalanceerde ventilatie kan worden gereduceerd door toepassing van DC-ventilatoren. Aandacht dient te worden besteed aan alternatieve oplossingen voor het functioneren onder wintercondities, waarbij condens uit de ventilatielucht de warmtewisselaar kan doen dichtvriezen. Verdere reductie van het ventilatieverlies kan worden gerealiseerd door regeling van het ventilatieniveau op binnenluchtkwaliteit, waarbij zowel CO₂-concentratie als de relatieve vochtigheid als kwaliteitsindicatoren in aanmerking komen.

- Om energieverliezen door ongewilde luchtverversing te reduceren, zal luchtdicht gebouwd moeten worden. Dit komt ook de werking van balansventilatiesystemen ten goede.

- *Passief koelen.* Een gebouwoontwerp dat gericht is op het zoveel mogelijk benutten en vasthouden van invallende zonnestraling bergt het gevaar in zich van oververhitting in de zomersituatie. Hoewel bij de oplevering van woningen in het algemeen geen koeling wordt geïnstalleerd, zullen bewoners mogelijk hun toevlucht nemen tot het achteraf aanschaffen van airconditioning, hetgeen een groot deel van de in de wintersituatie bereikte besparingen weer teniet kan doen. Een goed zomercomfort is dan ook niet alleen van belang voor de acceptatie van het concept door bewoners, maar ook om de energetische doelstelling in de praktijk te realiseren. Preventie van oververhitting kan langs verschillende wegen:

- Zonwering. Mechanische zonwering kan afdoende zijn, maar is duur en werkt alleen bij tijdige bediening. Een alternatief is het toepassen van een overstek, zodat bij hoge zonnestand in de zomer de zoninval wordt geblokkeerd, terwijl in de winter bij lage zonnestand geen belemmering optreedt. Een meer geavanceerd alternatief is het toepassen van hoekafhankelijke coatings op beglazingssystemen, die bij hoge zonnestand de zontoetreding in de woning verminderen.

- Extra ventilatie. In het Nederlandse klimaat kan in veel gevallen gebruik gemaakt worden van buitenlucht om te koelen. Tijdens de warmste periode van het jaar wordt dan vooral van de nachtelijke afkoeling gebruik gemaakt door toepassen van zomernachtventilatie. Inbraakwerende natuurlijke ventilatiemogelijkheden zijn hiervoor van belang.

- Thermische massa. Voldoende gebouwmassa zorgt voor een buffer die oververhitting kan tegengaan. Met name woningscheidende wanden en tussenvloeren leveren een grote bijdrage aan de gebouwmassa.

- Benutting van bodemkoelte. Op enkele meters diepte is de ongestoorde bodemtemperatuur over het gehele jaar vrij constant: ca. 8-12°C. In de zomer kan deze bodemkoelte worden gebruikt voor het koelen van woningen.

- *Daglichtbenutting*. Gevelindeling en gebouwplattegrond bepalen in hoge mate hoeveel het daglicht kan bijdragen aan de verlichtingsbehoefte.
- *Hulpenergie*. Pompen en regelingen van installatiecomponenten gebruiken elektriciteit. Door een juiste dimensionering van het leidingwerk voor cv en tapwater verwarming, kan de benodigde pompenergie worden verminderd. Het toepassen van energie efficiënte regelapparatuur en efficiënte pompen met gelijkstroommotoren kan deze energiepost verder omlaag brengen.

2.3 Energie-aanbodstelsel

Om tot een zo laag mogelijke inzet van fossiele energiebronnen te komen kunnen naast het “vermijden” van energiegebruik de andere twee elementen van de energieladder worden overwogen: toepassing van duurzame energie en de efficiënte inzet van toegevoerde energiedragers zoals aardgas en elektriciteit.

Uitgangspunt binnen het project Ecobuild is dat alleen gekeken wordt naar energie-conversiesystemen die lokaal – dus in de onmiddellijke nabijheid van de woning – kunnen worden toegepast. Daarbij wordt uitgegaan van individuele verwarmingssystemen. Systemen op basis van warmtedistributie vallen hierdoor buiten het project. Energie-aanbodssystemen die onderdeel uitmaken van de te overwegen energieconcepten zijn:

- *Actieve thermische zonne-energie*. Een zonverwarmingssysteem, bestaande uit ca. 3 m² zonnecollector en een warmte-opslagvat, kan in de zomerperiode de volledige behoefte aan warm tapwater dekken. Uitbreiding van het collectoroppervlak en vergroting van de opslagcapaciteit maken het mogelijk ook nog voor een deel aan de warmtebehoefte voor ruimteverwarming bij te dragen. Een aandachtspunt is de integratie met een HR-combiketel of warmtepompstelsel.
- *Fotovoltaïsche systemen (PV)*. Met behulp van een fotovoltaïsch systeem kan elektriciteit worden opgewekt. Met het op dit moment meest gebruikelijke type zonnecel – op basis van multikristallijn silicium – kan per m² zuidgeoriënteerd dak ongeveer 80 kWh per jaar worden opgewekt.
- *Warmtepomp*. Met een warmtepomp kan warmte van lage temperatuur op een bruikbaar temperatuurniveau worden gebracht. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen gasgestookte absorptiewarmtepompen en elektrische compressiewarmtepompen. Belangrijkste toepassingen in woningen liggen in het benutten van omgevingswarmte of het benutten van warmte uit ventilatielucht. Omgevingswarmte kan betrokken worden via het dak (een “energiedak”) of via de bodem waarbij van verticale of horizontale bodemwarmtewisselaars gebruik kan worden gemaakt. Ten aanzien van ventilatielucht als warmtebron dient te worden opgemerkt dat deze toepassing concurreert met warmteterugwinning uit ventilatielucht via een gebalanceerd ventilatiesysteem.

Zowel zonverwarmings-installaties als warmtepompen kennen een hoger rendement als de warmte-afgifte op een laag temperatuurniveau kan plaatsvinden. Met name vloerverwarming en wandverwarming komen hiervoor in aanmerking, waardoor deze dus bij uitstek geschikt zijn voor toepassing in combinatie met warmtepompen en zonverwarmings-installaties.

2.4 Maatregelpakketten

Voor nieuwbouw-laagbouwwoningen zijn maatregelpakketten samengesteld die tot reductie van het primair energiegebruik kunnen leiden. De in de voorstudie van Ecobuild ^{1 2} overwogen maatregelpakketten zijn op energiegebruik doorgerekend voor een referentie-tuinkamerwoning. Tabel 2.1 toont enkele maatregelpakketten met de bijbehorende energieprestatiecoëfficiënt. De maatregelpakketten zijn totstandgekomen door de hierbovengenoemde uitgangspunten te doorlopen, en de daarbij horende maatregelen te rangschikken aan de hand van een eerste inschatting van de kosten/baten verhouding. De maatregelen die naar verwachting het goedkoopst zijn worden daarbij het eerst genomen. De tabel laat zien dat zelfs het meest

vergaande pakket nog niet aan de doelstelling van een EPC van 0.5 voldoet. Daarvoor zijn dus nog aanvullende maatregelen nodig. Overigens dient te worden opgemerkt dat niet alle in het bovenstaande genoemde maatregelen in de hier gehanteerde EPC berekening gewaardeerd kunnen worden. Voor een beoordeling van het primair energiegebruik zal dan ook naast de EPC berekening gewerkt worden met meer geavanceerde berekeningsmethoden die met meetresultaten zijn gevalideerd. Hier zal in de volgende hoofdstukken nader op worden ingegaan.

Tabel 2.1 *Maatregelpakketten uit de voorstudie voor nieuwbouwwoningen*

Pakket	EPC	Bouwkundig	Installatie
1	0,69	Dak, gevel, bg-vloer $R_c = 5,0(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$ beglazing/kozijn $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ Deuren $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	HR-combiketel, wtw ventilatielucht (90%)
2	0,62	Dak, gevel, bg-vloer $R_c = 5,0(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$ beglazing/kozijn $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ Deuren $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	3 m ² zonneboiler + HR-combiketel, wtw ventilatielucht (90%)
3	0,55	dak, gevel, bg-vloer $R_c = 5,0(\text{m}^2.\text{K})/\text{W}$ beglazing/kozijn $U = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ deuren $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	3 m ² zonnecollector, wtw ventilatielucht (90%), elektrische warmtepomp met bodem- warmtewisselaar

3. MEET- EN TESTPROGRAMMA

Om de in het vorige hoofdstuk aangeduide maatregelen en maatregelpakketten te kunnen uitwerken en testen is op het ECN terrein een viertal testwoningen gebouwd. Drie daarvan maken deel uit van het project Ecobuild-Research. De vierde woning is de zogenaamde “domotica” woning waarin in het kader van een parallel project wordt onderzocht of de toepassing van geavanceerde regelsystemen kan bijdragen aan energiebesparing en een comfortabel en gezond binnenmilieu. Deze vierde woning blijft in deze publicatie buiten beschouwing. Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de overige drie testwoningen en het in deze woningen uitgevoerde meetprogramma³.

3.1 De testwoningen

De testwoningen zijn als rijwoningen uitgevoerd.



Figuur 3.1 De zuidzijde van de testwoningen op het ECN-terrein. Voor woning B wordt overlegd over de toegang tot de woningen.

De woningen zijn van links naar rechts aangeduid als respectievelijk A, B, C en D. Woning D (de “domotica-woning”) valt buiten het project Ecobuild-Research. De langsgevel op de foto is pal zuid georiënteerd.

3.1.1 Woning A

Bouw

Deze hoekwoning (links op figuur 3.1) bestaat uit een prefab betonnen casco met baksteen gevels. De dichte gevelschil, het dak en de vloer hebben een R_c waarde van $>5 \text{ m}^2\text{K/W}$, de ramen bestaan uit dubbel glas met Ar-vulling ($U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Verwarming

De verwarming wordt verzorgd door een warmtepompboiler voor de basis-warmtelast en een modulerende HR-ketel voor eventueel benodigde bijstook. De warmtepompboiler haalt zijn warmte deels uit de afgevoerde ventilatielucht en deels uit de onder de PV-panelen opgewarmde buitenlucht. Warmteafgifte gebeurt door wand- en vloerverwarming. De woning is tevens uitgerust met plafondverwarming/plafondkoeling in de woonkamer. Daartoe zijn aan de onderzijde van het plafond van de begane grond (en dus van de vloer van de verdieping) kunststof slangen ingestort.

Ventilatie

Toevoer van lucht vindt plaats via natuurlijke ventilatie (roosters boven de ramen), afvoer van lucht via de al genoemde warmtepompboiler. In de zomer kan worden overgegaan op een systeem van volledig natuurlijke ventilatie (zowel toe- als afvoer van lucht op basis van natuurlijke trek).

Warm tapwater

Warm tapwaterbereiding wordt ondersteund door o.m. een 4.5 m² grote zonnecollector. Eventueel benodigde naverwarming gebeurt door de warmtepompboiler en de HR-ketel. In een warmtewisselaar wordt een deel van de warmte van het afgevoerde douchewater overgedragen op het koude water dat naar het boilervat stroomt.

Koeling

Op een diepte van ca. 1 m onder de woning is een aantal horizontale slangen aangebracht, waar water door wordt gecirculeerd. In de zomer neemt de vloeistof in deze slangen bodemkoude op en deze vloeistof wordt vervolgens door de buizen van de wand/vloerverwarming of plafond geleid om de woning te koelen.

Overig

Voor het gedeeltelijk dekken van de elektriciteitsvraag zijn op het zuidoak PV-panelen met een oppervlak van ongeveer 20 m² geplaatst. Ze wekken per jaar naar schatting $20 \text{ m}^2 \times 80 \text{ kWh/m}^2 = 1600 \text{ kWh}$ op.



Figuur 3.2 Visualisatie van de in woning A toegepaste systemen

3.1.2 Woning B

Bouw

Deze tussenwoning (tweede van links in figuur 3.1) bestaat uit een prefab betonnen casco met gevels van keramische tegels. De dichte gevelschil, dak en vloer hebben een R_c waarde van $>5 \text{ m}^2\text{K/W}$, de ramen bestaan uit dubbel glas met een vulling van Argon en een voorztraam van enkel glas ($U=0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Verwarming

De verwarming wordt verzorgd door een modulerende HR-ketel. Warmteafgifte gebeurt naar keuze door wandverwarming, vloerverwarming of radiatoren.

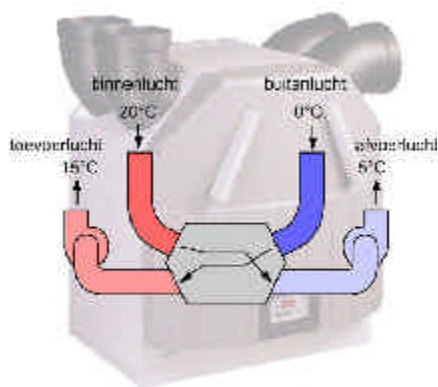


Figuur 3.3 *Het aanbrengen van vloerverwarming*

In de tussenseizoenen (bij geringe warmtevraag, bijvoorbeeld alleen 's ochtends of 's avonds) kan de ventilatielucht worden verwarmd met een warmtewisselaar, die met warm water uit de zonnecollector wordt gevoed.

Ventilatie

Er wordt gebruik gemaakt van gebalanceerde ventilatie met een warmteterugwin unit, die ca. 90% van de met de ventilatielucht afgevoerde warmte kan terugwinnen.



Figuur 3.4 *Warmteterugwin unit zoals toegepast in woning B*

In de winter kan de ventilatielucht worden voorverwarmd via een horizontale bodemwarmtewisselaar, die in de bodem onder de woning is aangebracht.

Warm tapwater

Warm tapwater kan worden geleverd door een 5,5 m² grote zonnecollector en een 140 liter boiler. Eventueel benodigde naverwarming gebeurt door de HR-ketel.

Koeling

In de zomer kan de woning worden gekoeld met ventilatielucht, die bodemkoude opneemt uit hetzelfde systeem van PVC-bodembuizen.



Figuur 3.5 Visualisatie van de in woning B toegepaste systemen

3.1.3 Woning C

Bouw

Deze tussenwoning (derde van links in figuur 3.1) bestaat uit een houtskelet casco met gevels van gestapelde betonstenen. De dichte gevelschil, dak en vloer hebben een R_c waarde van >5 m²K/W, de ramen bestaan uit drievoudig glas met Kr-vulling ($U=0.7$ W/m²K).



Figuur 3.6 Detail van drievoudig glas

Verwarming

De verwarming wordt verzorgd door een warmtepomp, die warmte aan de bodem kan onttrekken m.b.v. een drietal verticale bodemwarmtewisselaars of aan een met water gevulde zak geplaatst in de kruipruimte onder de woning (ca. 6 m³, voor middellange termijn opslag). Warmteafgifte gebeurt door wand- of vloerverwarming.

Ventilatie

Net als in woning B wordt er gebruik gemaakt van gebalanceerde ventilatie met een warmteterugwin unit, die ca. 90% van de met de ventilatielucht afgevoerde warmte kan terugwinnen. In de winter kan de ventilatielucht worden voorverwarmd via een PVC-buis in de bodem. De buis is, in tegenstelling tot die bij woning B, buiten de woning aangebracht en ligt ook op een grotere diepte dan bij woning B (ca. 3 m diep, onder het grondwaterniveau).



Figuur 3.7 *Lucht-bodem warmtewisselaar van woning C tijdens het aanbrengen*

Warm tapwater

Warm tapwater kan worden geleverd door twee zonnecollectoren (2 x 5,5 m²). Eventueel benodigde naverwarming gebeurt door de warmtepomp.

Koeling

De woning kan op diverse manieren worden gekoeld. Net als bij woning B kan de woning worden gekoeld met ventilatielucht, die bodemkoude opneemt in de bodembuis. Daarnaast kan koude aan de bodem worden onttrokken met de verticale bodemwarmtewisselaars en vervolgens worden overgedragen op het CV-water, dat vervolgens door de wand- en vloerverwarming stroomt. Ook kan eventueel in de waterzak opgeslagen koude hiervoor worden gebruikt.



Figuur 3.8 Visualisatie van de in woning C toegepaste systemen

Overig

In woning C zijn in feite 3 vormen van warmte-opslag mogelijk. Geoogste warmte uit de zonnecollectoren kan worden opgeslagen in de boiler voor de korte termijn (1 à 2 dagen), in de waterzak voor de middellange termijn (maanden) en de bodem (seizoen).

3.2 Het meetprogramma

Doel van het meetprogramma is om kwantitatief te kunnen bepalen of de energetische doelstelling van het project – een halvering van het primair energiegebruik voor de gebouwgebonden energiefuncties – wordt gehaald. Om deze evaluatie goed te kunnen uitvoeren worden ook voor de afzonderlijke onderdelen van het energieconcept de energetische prestaties bepaald. Daarnaast dienen de metingen als basis voor een beoordeling van comfort, binnenklimaat en geluidshinder in de woningen.

3.2.1 Algemene aanpak

Om de energieprestatie van een woning of een component daarvan in de praktijk te kunnen bepalen, moet het energiegebruik (of opbrengst) gedurende zekere tijd worden gemeten. Echter, vaak is de meetperiode beperkt, zal er door onderbrekingen in de meetperiode niet altijd continu gemeten kunnen worden en hangt het energiegebruik af van het weer in de betreffende meetperiode (buitentemperatuur, zoninstraling, windsnelheid etc.). Daarnaast is het ook moeilijk om woningen in dezelfde periode met elkaar te vergelijken door de onderlinge verschillen in bouwstijl (houtskeletbouw/betoncascos), massa (zwaar/licht) en type (tussen/hoekwoning).

Om bovenstaande bezwaren te kunnen ondervangen is ervoor gekozen om het gedrag van de woningen en de woninginstallaties te simuleren met behulp van het gebouwsimulatiepakket TRNSYS. De kenmerken van elke woning en installatie, die zoveel mogelijk uit experimenten worden bepaald, worden in het model ingevoerd. De energievraag wordt vervolgens voor de betreffende meetperiode met het model berekend op basis van de gemeten klimatologische variabelen, waarvan buitentemperatuur, windsnelheid, en zoninstraling de belangrijkste zijn. De berekende waarden worden vervolgens vergeleken met de gemeten waarden en bij eventuele afwijking worden parameters in het model aangepast.

Met het geverifieerde model van woning en installatie kan vrij eenvoudig de energieprestatie voor een bepaald maatregelenpakket worden berekend op basis van het testreferentiejaar. Dit

testreferentiejaar bevat de uurlijkse meteorologische gegevens van een representatief jaar voor Nederland. Met model en testreferentiejaar kan ook het effect van afzonderlijke maatregelen op het totale energiegebruik worden bepaald, en kan het energetisch ontwerp worden geoptimaliseerd.

3.2.2 Het data-acquisitie systeem

Om een meetprogramma uit te kunnen voeren is een data-acquisitie- en controle systeem geïnstalleerd. Dit systeem vervult drie functies:

- Het binnenhalen en opslaan van meetgegevens (temperaturen, warmtestromen, elektriciteitsgebruik, klepstanden, CO₂ gehalte, relatieve vochtigheid alsmede klimatologische gegevens uit het meteo-systeem);
- Het aansturen van de bewonerssimulatie via verwarmingselementen en bevochtigers (zie paragraaf 3.2.3);
- Het binnenhalen van gegevens van de regelingen zoals bijvoorbeeld klepstanden en bedrijfstoestanden die benodigd zijn voor het juist interpreteren van de meetgegevens.

De verschillende klimaatsystemen in de woningen (verwarming, koeling en ventilatie) werken autonoom. Ze staan los van het data-acquisitie- en zo goed als los van het controle systeem.

3.2.3 Bewonerssimulatie

Een huis is bedoeld om in te wonen. De bewoners van het huis hebben een grote invloed op zaken als het energiegebruik en het binnencomfort. Met deze invloeden moet rekening worden gehouden. Echter, door de grote variatie in gedrag en wensen van individuele bewoners, is het moeilijk 'standaard' bewoners te vinden, die representatief zijn voor de gemiddelde bewoner. Daarnaast verdraagt het testen en voortdurend wijzigen van (componenten in) de woning zich slecht met bewoning. Er is daarom voor gekozen de bewoning te simuleren, oftewel, de woningen te bewonen met elektronische bewoners. Voordeel hiervan is dat de eigenschappen van de woningen onder gecontroleerde omstandigheden kunnen worden onderzocht en in een computermodel kunnen worden ingevoerd. Hoe groot de variatie in bewonersgedrag is en wat het effect daarvan is op bijvoorbeeld het energiegebruik kan worden nagegaan in demonstratieprojecten, die daadwerkelijk worden bewoond.

De bewonerssimulatie omvat de volgende zaken:

- De binnentemperatuur in het stookseizoen wordt volgens een gebruikerspatroon voorgeprogrammeerd met het in de woning aanwezige 'Cenvax' systeem. Dit systeem stuurt per vertrek (huiskamer, keuken, hal, badkamer en drie slaapkamers) de verwarming aan afhankelijk van de warmtevraag. De warmtevraag hangt o.m. af van de gewenste binnentemperatuur, die is ingesteld aan de hand van het gebruikerspatroon volgens de NEN5128 norm (verschillend voor woon- en slaapzone).
- Productie van een interne warmtelast wordt gesimuleerd middels elektronische aansturing van elektrische heaters. Deze simuleren warmteafgifte van bewoners, warmte van verlichting, en andere elektrische gebruikers zoals koelkast, TV, computer etc.. Ook deze patronen zijn ontleend aan de NEN5128 norm.
- Productie van vocht wordt gesimuleerd middels elektronische aansturing van bevochtigers. Deze zullen bewoners, vochtproductie tijdens kookbeurten etc., elk met hun eigen vochtproductiepatroon moeten simuleren. Dit gebruikerspatroon is geschat in overeenstemming met de bewoningspatronen zoals die in de NEN5128 zijn opgenomen.
- Productie van warm tapwater wordt gesimuleerd door het met een elektrische klep openzetten van de warm tapwaterkraan. Ook dit patroon is gebaseerd op de NEN5128. Het betreft zowel warm tapwater in de keuken als in de doucheruimte.
- De woning wordt in de regel met een vaste ventilator instelling geventileerd. Afhankelijk van de uitgevoerde experimenten kan de ventilatie ook worden uitgezet en kan worden gevarieerd op de instelling van de ventilatieniveaus.

3.2.4 Binnencomfort

Met de metingen kan niet alleen een evaluatie van de energieprestatie van de woning en de toegepaste componenten worden uitgevoerd, maar ook een evaluatie van het binnencomfort. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van continu uitgevoerde metingen van luchttemperatuur, luchtvochtigheid (relatieve vochtigheid) en stralingstemperatuur (temperatuur van wanden, vloer etc.).

3.2.5 Gezondheid

Om de effecten van de genomen maatregelen op de gezondheid van bewoners te kunnen evalueren is gebruik gemaakt van risicobepalingen⁴. Deze risico's zijn in te delen in vier groepen:

- Ongevalsrisico (vallen, stoten, snijden) en de gevolgen van rook of brand;
- Stress door geluidshinder;
- Allergische reacties door huisstofmijt, schimmels en fijn stof;
- Longaandoeningen door radon, rookgassen, emissies, fijn stof en legionellabesmetting.

Ongevalsrisico's die verbonden zijn aan de in woningen genomen maatregelen zijn kwalitatief ingeschat. Mogelijke geluidshinder wordt apart behandeld (zie volgende paragraaf). Inzicht in de beide andere risicocategorieën is verkregen door de eerder genoemde binnencomfortmetingen, aangevuld met een reeks specifiek op gezondheid gerichte metingen.

Risico's van allergische reacties op schimmels en huisstofmijt kunnen worden bepaald door meting van vochtigheid en de effectiviteit van ventilatie. Luchtvochtigheid wordt continu gemeten in alle vertrekken. Bovendien is in de winterperiode onder een vloerkleedje de temperatuur en de relatieve vochtigheid bepaald tijdens gebruik van vloerverwarming, wandverwarming en radiatorenverwarming. Om de effectiviteit van het ventilatiesysteem te bepalen zijn incidentele metingen uitgevoerd van de debieten per ventiel en zijn CO₂ concentraties gemeten bij gecontroleerde inblaas van CO₂. Bovendien zijn rookproeven gedaan om een kwalitatieve indruk te krijgen van de luchtstromingen. Tenslotte is incidenteel bemonsterd op schimmels en bacteriën.

Om de risico's van longaandoeningen te bepalen zijn metingen uitgevoerd waarbij de concentraties van de relevante stoffen op verschillende plaatsen in de woningen zijn bepaald. Aan radonconcentraties is daarvoor gedurende langere tijd gemeten. De aanwezigheid van NO₂, formaldehyde, vluchtige organische verbindingen, stof en legionella is middels incidentele metingen bepaald.

3.2.6 Geluid

Geluidhinder en de beleving daarvan zijn van groot belang voor het welbevinden van de bewoners. Om tot een goede acceptatie van maatregelen te komen zal additionele geluidhinder vermeden moeten worden. Er is gemeten aan twee mogelijke bronnen van geluidhinder:

- Lucht- en contactgeluid tussen afzonderlijke woningen;
- Het geluid van installaties zoals warmtepompen en ventilatiesystemen.

De metingen zijn incidenteel uitgevoerd.

4. SAMENVATTING DEELRES ULTATEN MEET- EN TESTPROGRAMMA

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het in hoofdstuk 3 beschreven meet- en testprogramma weergegeven. Eerst wordt ingegaan op de resultaten betreffende energieprestatie en thermisch comfort. Vervolgens wordt ingegaan op gezondheid en geluid.

4.1 Energieprestatie en thermisch comfort

4.1.1 Lekdichtheid van de woningen⁵

Uit de metingen volgt dat woning A en B aan het bouwbesluit voldoen ($q_{v10} < 120 \text{ dm}^3/\text{s}$ bij een inhoud van 300 m^3). Woning A heeft een q_{v10} van $82 \text{ dm}^3/\text{s}$ op overdruk en een q_{v10} van $120 \text{ dm}^3/\text{s}$ op onderdruk. Woning B heeft q_{v10} waarden van $82 \text{ dm}^3/\text{s}$ (overdruk) en $100 \text{ dm}^3/\text{s}$ (onderdruk). Ondanks dat deze waarden binnen de grenzen van het bouwbesluit vallen, zijn ze volgens de bepalingsmethode (NEN 2686) verkregen met te weinig meetpunten.

De meetwaarden van woning C zijn hoger. Het is niet te zeggen of deze woning niet aan het bouwbesluit voldoet of dat de bepaalde resultaten het gevolg zijn van de te hoge winddruk op het moment van meten (te hoog volgens de bepalingsmethode NEN 2686). De gemeten waarde voor woning C is alleen een onderdrukmeting met een q_{v10} van $169 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Bij onderzoek naar de lekkages in de woningen is gebleken dat de meeste lekkages in de aansluiting van verschillende bouwdelen en de doorgangen naar het dak zitten. Ondanks de inspanning die is verricht door toeleveranciers van bouwmaterialen en bouwer om energieverliezen door infiltratie van koude lucht te minimaliseren, kan worden gesteld dat de lekdichtheid van de woning niet goed is.

De relatief slechte lekdichtheid van de woning leidt tot grote warmteverliezen door infiltratie van koude lucht ten opzichte van de warmteverliezen door ventilatie en transmissie.

4.1.2 Isolatiewaarde van de gevelschil⁶

De isolatiewaarde van de schil van de woningen is bepaald door het warmteverlies te meten bij uitgezette ventilatie en lage windsnelheid. De daaruit volgende inschatting van het warmteverlies voor transmissie was 90 à 100 W/K . Uit de verschillende isolatiewaarden waaruit de gevels zijn opgebouwd, volgt een warmteverlies voor transmissie van 48 W/K voor de hoekwoningen en 37 W/K voor de tussenwoningen. Doordat de onzekerheden omtrent alle energieverliezen in de woningen te groot waren tijdens het onderzoek is niet met zekerheid te zeggen dat de gemeten 90 à 100 W/K aan energieverlies het gevolg is van transmissie. Hierdoor kan *niet* worden geconcludeerd dat het verschil van zo'n 50 W/K toe te schrijven is aan koudebruggen. De extra warmteverliezen kunnen ook zijn ontstaan door infiltratie of transmissie naar de kruipruimte en de aangrenzende woningen.

4.1.3 Warmte-afgifte systemen⁷

Drie warmte-afgifte systemen zijn vergeleken ten aanzien van energiegebruik en thermisch comfort: radiatorenverwarming, vloerverwarming en wandverwarming. De wandverwarming zoals hier is toegepast, blijkt tot een hoger energiegebruik te leiden dan de beide andere systemen. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een groter warmteverlies door de woningscheidende wanden. Het thermisch comfort bleek voor alle warmte-afgiftesystemen regelmatig buiten de behaaglijkheidsgrenzen te liggen. De stralingstemperatuur kon oplopen tot 30 °C . Naast het ontbreken van zonwering blijkt ook de regeling op luchttemperatuur daar debet aan te zijn. Temperatuurregeling op stralingstemperatuur is beter in staat om het thermisch comfort te handhaven bij warmte-afgiftesystemen die een hoog aandeel stralingswarmte kennen. Dit geldt in nog sterkere mate als de zonnijdrage in de verwarming hoog is. De relatieve vochtigheid in de woning lag in het algemeen binnen de behaaglijkheidsgrenzen.

4.1.4 Warmteterugwinning douchewater⁸

In woning A is een concentrische douchewarmtewisselaar toegepast met een lengte van 1,9 meter. In thermisch evenwicht, dat na ca. 2 minuten wordt bereikt, heeft de warmtewisselaar een rendement van 30%. De warmtewisselaar is zodanig aangesloten dat de massabalans (aan- en afgevoerd water) niet in balans is. De energiebesparing die dit oplevert komt in een standaard situatie overeen met 6 m³ aardgas per persoon per jaar, ca. 10% van het totale verbruik voor douchen. De energiebesparing kan worden vergroot door de lengte van de warmtewisselaar te vergroten, en ook het bijgemengde koude water via de warmtewisselaar te laten lopen.

4.1.5 Een luchtbodewarmtewisselaar in combinatie met warmterugwinning van ventilatielucht⁹

In de woningen B en C kunnen bodembuizen worden gebruikt om ventilatielucht voor te verwarmen. In combinatie met het in deze woningen toegepaste systeem van warmteterugwinning uit ventilatielucht bestaat de winst van deze voorverwarming er vooral uit dat bevrozing van de warmteterugwin-unit wordt voorkomen en de effectieve bedrijfstijd van het systeem groter wordt. De voorverwarming blijkt goed te werken: verse lucht wordt door de bodem tot een temperatuur van 9-10°C opgewarmd. De energiebesparing die dit oplevert hangt sterk af van het rendement van de warmtewisselaar. Bij een rendement volgens de specificaties (95%) kan de besparing 1,6 GJ per jaar bedragen, hetgeen bij opwekking in een HR-ketel overeenkomt met ruim 40 m³ aardgas. De rendementen van de warmteterugwin-unit blijken in de praktijk lager te liggen. Bij een dergelijk rendement is het aantal uren dat bevrozing kan worden voorkomen klein, en de daarmee samenhangende energiebesparing slechts gering (0,15 GJ). Onbalans in het systeem kan een oorzaak zijn van de te lage rendementen van de warmteterugwinning in de praktijk.

4.1.6 Koelen met een luchtbodewarmtewisselaar¹⁰

De bodembuizen bij woningen B en C kunnen ook gebruikt worden voor koeling van ventilatielucht. Het systeem bij woning C blijkt het meest effectief. De temperatuur rond de bodembuis bleef constant 15°C, en het koelvermogen was maximaal 400 W. Het systeem bij woning B – waarbij de bodembuizen onder de woning zijn aangebracht en op geringere diepte, heeft een koelvermogen dat een factor 3-4 lager ligt. Met name bij bodembuizen die dieper liggen dan 2 meter in waterverzadigd zand, zoals het geval bij het systeem van woning C, kan condensatie optreden. Dit condenswater is inderdaad aangetroffen in de speciaal daarvoor aangebrachte verzamelput van de betreffende bodembuis. De bypassvoorziening van de warmteterugwin-unit is zodanig ontworpen, dat een deel van de lucht nog door de warmtewisselaar stroomt als de bypass is ingeschakeld. Daardoor wordt in de zomer lucht voorverwarmd, hetgeen bij kan dragen aan mogelijke oververhitting als het binnen warmer is dan buiten en koeling gewenst is.

4.1.7 Koelen met bodemslangen¹¹

In woning A is een plafondkoelsysteem aangebracht dat gekoppeld is aan 125 meter kunststof leiding die in de bodem onder de fundering van de woning is ingegraven. Het koelvermogen van het plafond blijkt ca. 250 W per graad temperatuurverschil tussen plafond en vloestof. Gemiddeld over de hele meetperiode was het koelvermogen ca. 900 W. De gemiddelde Coefficient Of Performance (COP) van het koelsysteem is 12. Afkoeling van de woonkamertemperatuur bij inzet van het koelsysteem verloopt zeer langzaam. Versnelling hiervan, en vergroting van het koelvermogen, kan worden bereikt door de buizen van het plafondverwarmingssysteem dichter aan het oppervlak van het plafond te leggen.

4.1.8 Rendement HR-combiketel¹²

De HR-combiketel in woning B is gemodificeerd tot een lager maximaal vermogen. De gemeten rendementen – betrokken op de onderste verbrandingswaarde van aardgas - zijn voor warm tapwater 74%, voor ruimteverwarming 98%, en voor de combinatie van beide 99%. De

verwachting was dat de laatste waarde tussen de beide eerste in zou liggen. De hogere waarde wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat in de betreffende meetperiode de aanvoertemperatuur voor de ketel ca. 10°C lager was dan bij de andere metingen.

4.1.9 Rendement zonnecollectoren¹³

Voor de 5,5 m² vlakke plaat collectoren op de woningen B en D zijn de rendementscurven bepaald. De rendementen liggen lager dan de TNO referentie. Dit wordt gedeeltelijk veroorzaakt doordat de metingen bij een lager debiet zijn uitgevoerd. Een optimale debietregeling kan tot een hoger rendement leiden. Verder is het rendement kleiner omdat bij de buitenomstandigheden waaronder gemeten is de absorptie van zonlicht groter is doordat de zinstraling niet loodrecht invalt, en het warmteverlies groter is door een hogere windsnelheid. Voor de 11 m² collector op woning C kon geen volledige rendementscurve worden bepaald door gelijktijdige uitvoering van het experiment met de waterzak.

4.1.10 Warmte-opslag in een waterzak¹⁴

In woning C is een warmte-opslagsysteem beproefd dat bestaat uit een thermisch geïsoleerde flexibele waterzak met een inhoud van ca. 6 m³. De waterzak ligt in de kruipruimte van de woning, en wordt gevoed vanuit de 11 m² vlakke plaat collectoren op het dak van de woning. Met behulp van de metingen aan het systeem is een model opgesteld voor het functioneren. Uit simulaties met dit model blijkt dat het geïnstalleerde systeem de warmtevraag voor warm tapwater en ruimteverwarming voor ca. 37 % zou kunnen dekken. Dit dekkingspercentage is aanzienlijk te verhogen door het collectoroppervlak te verhogen of vacuümcollectoren toe te passen. Door de waterzak te combineren met 22 m² (CPC) vacuümcollector is een dekkingsbijdrage van 66% mogelijk.

4.1.11 Energieprestatie warmtepomp woning A¹⁵

Voor de lucht-water warmtepomp in woning A is een Seasonal Performance Factor (SPF) vastgesteld van 1,6 over de gehele meetperiode. De Coefficient Of Performance (COP) wordt geschat op 2,8. De meetperiode betrof een wintermaand, waarbij de warmtepomp warmte leverde voor warm tapwater en ruimteverwarming. Deze periode was te kort om de gevonden SPF te extrapoleren naar een heel gebruiksjaar. De warmtepomp kon onvoldoende warmte leveren op momenten dat de ventilatieroosters geheel waren geopend.

4.1.12 Energieprestatie warmtepomp woning C¹⁶

Voor de water-water warmtepomp in woning C is een SPF vastgesteld van 1,8 over het deel van de meetperiode dat de warmtepomp storingsvrij heeft gefunctioneerd. De COP wordt geschat op 2,2 over een periode waarin 2 keer zoveel warmte wordt geleverd voor tapwater als voor ruimteverwarming en op 2,8 voor een periode waarin 19 keer zoveel warmte wordt geleverd voor tapwater als voor ruimteverwarming. Er traden veel storingen op in de warmtepomp, en het regelsysteem voor de inzet van het elektrisch element bleek niet goed te functioneren. De bodemwarmtewisselaars die als warmtebron fungeren leverden warmte op een vrij constant temperatuurniveau van 8 °C. Het temperatuurverschil over de verdampers was ca. 3°C, zodat het water met een temperatuur van 5°C terug in de bodem werd gevoerd.

4.1.13 PV luchtcollector¹⁷

Op het dak van woning A is een PV-systeem van 22 m² aangebracht. Door de luchtsponw onder de PV-panelen wordt lucht aangezogen die door de PV verwarmd wordt. Deze warmte wordt via een warmtepomp overgedragen aan een opslagvat met water. Bij het debiet waarmee is gemeten (130 m³/uur) blijkt het thermisch rendement laag te zijn: ca. 5%. Bovendien bleek de lucht in veel gevallen te warm om als bron voor de gebruikte warmtepomp te dienen. Mogelijke systeemverbeteringen zijn het toepassen van hogere debieten, en het verhogen van de maximale toevoertemperatuur van de warmtepomp. Ook kan overwogen worden met de warmte van het dak zonder tussenkomst van een warmtepomp water voor te verwarmen. Uit simulaties blijkt dat

bij hogere debieten het thermisch rendement verhoogd kan worden tot 37%. Door de stralingsafgifte van de PV-panelen blijkt een nachtelijk koeffect op te treden dat gebruikt kan worden voor koeling van de woningen.

4.2 Gezondheid¹⁸

4.2.1 Luchtverversing, vochtuithouding en binnenmilieu

De mate waarin gezondheidsrisico's optreden (zie paragraaf 3.2.5) blijkt in sterke mate samen te hangen met het ventilatiesysteem.

Het systeem van gebalanceerde ventilatie leidt in de testwoningen tot een egale temperatuurverdeling. Met relatief weinig lucht wordt een goede doorspoeling met verse lucht bereikt in alle ruimten, waardoor het temperatuurcomfort en de ventilatie-effectiviteit hoog is. Dit geldt voor het systeem in de normaalstand. Het geluidsniveau van het in de testwoningen toegepaste systeem van gebalanceerde ventilatie blijkt hoog te zijn (zie ook paragraaf 4.3). Bij een dergelijk geluidsniveau zal in de praktijk door bewoners voor een lagere stand gekozen worden, hetgeen de risico's van binnenmilieuproblemen verhoogt. Een ander risico is dat door vervuiling van ventilatiekanalen de luchtkwaliteit na verloop van tijd achteruit gaat. In de testwoningen is na een jaar geen verhoging van micro-biologische vervuiling waargenomen, ook niet in de door de bodembuizen voorverwarmde lucht. Om een goede luchtkwaliteit te behouden is periodieke reiniging nodig van ventilator, warmtewisselaar, ventielen en kanalen. Het in de testwoningen toegepaste kanalenstelsel is slecht reinigbaar.

Een systeem van mechanische afzuiging en natuurlijke luchttoevoer leidt eveneens tot een goede doorspoeling van de ruimten, met name door dwarsventilatie bij winderig weer. Het ventilatievoud is gemiddeld hoger dan bij toepassing van gebalanceerde ventilatie. Natuurlijke luchttoevoer verhoogt het tocht risico, en leidt tot een slechtere temperatuurverdeling. Dit laatste geeft een hogere relatieve vochtigheid op plaatsen die gevoelig zijn voor schimmels en huisstofmijt.

4.2.2 Overige gezondheidsaspecten

In de testwoningen is geen sprake van ontoelaatbare emissies uit bouwmaterialen, mits het op comfortabele wijze mogelijk is het minimum ventilatievolume volgens het Bouwbesluit te ventileren (zie paragraaf 4.2.1). Uit opnamen van inhaleerbaar stof, vluchtige organische verbindingen en micro-organismen valt geen indicatie van wenselijke veranderingen in de keuze van bouwmaterialen op te maken. Het formaldehyde gehalte is te hoog, in acht nemend dat de wettelijk toegestane waarde als te hoog wordt bevonden.

Er is geen legionella besmetting geconstateerd. De gemeten temperatuurniveaus duiden echter wel op een hoog legionellarisico. Een doorstroomnavarmer is door de geringe verblijfstijd niet in staat om te desinfecteren. Wel een veilige oplossing is het toepassen van buffersystemen waarbij een voorraad gebruikswater op een hoog temperatuurniveau wordt gehouden.

Er is geen indicatie gevonden voor schimmelvorming in houtskeletbouwconstructies.

4.3 Geluid

4.3.1 Geluidsisolatie tussen woningen¹⁹

Er bestaat een toenemende tendens tot de toepassing van harde vloerafwerkingen in woningen. Indien het gaat om gezonde en allergeenarme woningen is dit een gunstige ontwikkeling. Dit verhoogt echter het risico van geluidshinder tussen woningen. Om deze reden is gestreefd naar verhoogde geluidseisen.

In de woningen is door BAM Wilma een nieuwe, inmiddels gepatenteerde, funderingstechniek toegepast. Hierdoor blijken inderdaad zeer hoge waarden voor lucht- en contactgeluidsisolatie te zijn gerealiseerd. Naast de akoestische voordelen zijn er overigens ook voordelen ten aanzien van bouwlogistiek en arbeidsomstandigheden aan verbonden.

Zowel het gescheiden prefab Heembeton casco als de houtskeletbouwconstructies blijken hoge geluidsisolatiewaarden mogelijk te maken. De geluidsisolatie van de polystyreenschuim dak- en gevelelementen zal verder moeten worden verbeterd om grootschalige toepassing in de geschakelde woningbouw mogelijk te maken.

4.3.2 Geluid van installaties²⁰

De introductie van geavanceerde installaties ten behoeve van ruimteverwarming, warm tapwaterbereiding en luchtverversing veroorzaakt een toenemend aantal klachten van bewoners met betrekking tot geluidshinder. In het Bouwbesluit is de geluidsproductie van installaties binnen de eigen woning niet geregeld. De regelgever is er van uit gegaan dat geluidhinder binnen de eigen woning door de bewoners zelf wordt opgelost doordat men hier zelf actief op kan ingrijpen. In relatie tot gezond wonen is dit een ongewenste situatie omdat geluidhinder voor bewoners aanleiding kan zijn om bijvoorbeeld het ventilatiesysteem uit te schakelen.

De resultaten van de metingen aan installatiegeluid in de testwoningen zijn alarmerend. De gemeten geluidsniveaus overschrijden in vrijwel alle meetsituaties de geformuleerde doelstellingen voor zowel de dag- als de nachtperiode. Er zijn waarden gemeten tot 49 dB(A) in verblijfsruimten. Naar verwachting zijn de geluidsniveaus dermate hoog dat bewoners zullen gaan ingrijpen met alle gezondheidsrisico's van dien.

Om deze problemen in de praktijk te vermijden zal bij het realiseren van comfortinstallaties voor ruimteverwarming en warm tapwaterbereiding veel meer aandacht besteed moeten gaan worden aan de bouwkundige randvoorwaarden. Het is noodzakelijk om installaties zoveel mogelijk akoestisch te ontkoppelen, af te schermen en te monteren aan zware constructies. Ook is daarbij de lay-out van de woning belangrijk.

5. HAALBAARHEID ENERGETISCH CONCEPT

In hoofdstuk 2 is het energetische concept van het project Ecobuild-Research uitgewerkt tot globale maatregelpakketten. Aan de hand van de resultaten van het in de testwoningen uitgevoerde meet- en testprogramma kan nu worden geëvalueerd in hoeverre deze maatregelpakketten voldoen aan de doelstellingen van het project. Ook zal meer in detail worden ingegaan op de geconstateerde knelpunten, en op de richting waarin maatregelpakketten verder kunnen worden ontwikkeld zodat aan de doelstellingen kan worden voldaan.

Er is een grote hoeveelheid kwantitatieve informatie verzameld omtrent energieprestatie, comfort, gezondheidsrisico's en geluidsaspecten. Het project kent ook toetsingscriteria op het gebied van kosten en integrale milieuprestatie. Op deze laatste twee aspecten is in deze fase geen kwantitatieve toetsing mogelijk gebleken. Van kwantitatieve kostenbepaling is afgezien omdat veel toegepaste maatregelen nog in een ontwikkelingsfase zitten waarin nog slechts indicaties mogelijk zijn van de kosten bij grootschalige toepassing. Ook is afgezien van kwantitatieve evaluatie van de integrale milieuprestatie van maatregelen of maatregelpakketten. Hiervoor bleken onvoldoende gegevens beschikbaar. Globale milieuafwegingen, op basis van berekeningen met het programma Sima-Pro, hebben op componentniveau wel aangrijpingspunten opgeleverd voor installatiekeuzes.

5.1 Een basispakket met EPC=0.53²¹

In woning B is een combinatie van maatregelen toegepast dat kan worden beschouwd als een aangescherpte versie van maatregelpakket 2 uit tabel 2.1. In de voorstudie van Ecobuild werd de EPC van dat pakket voor een referentie tuinkamerwoning op 0.62 vastgesteld. Voor het aangescherpte pakket in woning B wordt een EPC van 0.58 berekend als wordt uitgegaan van de ontwerpwaarden voor de luchtdichtheid in de woning. Als wordt uitgegaan van de werkelijk gemeten luchtdichtheid is de EPC 0.63. Het gebruik van een gemeten luchtdichtheid in EPC berekeningen is zeer ongebruikelijk maar wordt hier toch gedaan omdat er alleen op die manier een zinvolle vergelijking met de gemeten energieprestatie mogelijk is.

Tabel 5.1 *Maatregelpakket woning B vergeleken met pakket 2 uit voorstudie*

Pakket	EPC	Bouwkundig	Installatie
Tuinkamerwoning Pakket 2 uit voorstudie	0.62	Dak, gevel, bg-vloer $R_c = 5,0(m^2.K)/W$ Beglazing/kozijn $U = 1,1 W/(m^2.K)$ Deuren $U = 1,0 W/(m^2.K)$	3 m ² zonneboiler + HR-combiketel, wtw ventilatielucht (90%)
Woning B Luchtdichtheid vlgs. ontwerp	0.58	Dak, gevel $R_c = 5.8(m^2.K)/W$ Bg-vloer $R_c = 8.7(m^2.K)/W$ Beglazing/kozijn $U = 1.5 W/(m^2.K)$	5,5 m ² zonneboiler + HR-combiketel, wtw ventilatielucht (90%)
Woning B Luchtdichtheid werkelijk	0.63	Idem	Idem

Zoals beschreven in paragraaf 3.2.1 is het werkelijk energiegebruik niet direct uit metingen afgeleid omdat de meetperiodes daarvoor te kort waren, en bovendien het klimaat altijd zal verschillen met het referentie klimaatjaar dat voor energieprestatie berekeningen wordt gebruikt. De gedurende één wintermaand uitgevoerde metingen zijn gebruikt om een simulatiemodel van de woning te valideren²². Het model blijkt ten opzichte van de metingen een 6% lagere totale

warmtevraag te berekenen, en gemiddelde ruimtetemperaturen die niet meer dan 0.3°C afwijken.

Met het gevalideerde model is het te verwachten warmtegebruik over een referentie klimaatjaar berekend. Ook zijn de installatierendementen en het te verwachten hulpenenergiegebruik uit de metingen afgeleid. De uitkomsten zijn volgens de ook in de EPC berekening gebruikte methode en formules vertaald naar een totaal primair energiegebruik en een energieprestatie coëfficiënt. Deze wordt de “gemeten energie prestatie coëfficiënt” (GPC) genoemd. Omdat zoals vermeld de energieprestatie niet direct gemeten is en bij de omrekening naar een jaarverbruik nogal wat aannames nodig zijn zou ook van een “geschatte energie prestatie coëfficiënt” gesproken kunnen worden.

De GPC voor woning B is vastgesteld op 0.71. Het verschil met de berekende EPC van 0.63 is voor een belangrijk deel terug te voeren op het verschil in primair energiegebruik voor warm tapwater. En dat laatste verschil wordt weer veroorzaakt door een afwijkend tappatroon en opwekkingsrendement. In de experimenten is namelijk tapwaterklasse 3 gehanteerd, terwijl de forfaitaire tapwaterhoeveelheid die in de EPC berekening wordt gehanteerd lager is. Een ander verschil in rekenkundige aanpak tussen de EPC en GPC berekening is de berekening van de U-waarde van een raam. De in tabel 5.1 genoemde waarde $U=1.5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ volgt uit de standaardbepaling volgens NEN 5128. In de GPC-berekening is uitgegaan van een meer gedetailleerde berekeningsmethodiek die een $U=1.1-1.3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ oplevert, afhankelijk van de raamafmetingen.

Worden bovenstaande verschillen weggenomen (voor beide berekeningsmethoden het laagste tapwatergebruik en de gedetailleerde warmtedoorgangsbepaling voor ramen), dan blijkt de EPC uit te komen op 0.59 en de GPC op 0.62. Indien bovendien wordt uitgegaan van een luchtdichtheid volgens ontwerpspecificaties en het toepassen van vloer- of wandverwarming in plaats van radiatorenverwarming dan blijken EPC en GPC beide uit te komen op 0.53. Het maatregelpakket met deze specificaties wordt verder aangemerkt als “basispakket” (zie tabel 5.2).

Uit de overeenkomst tussen EPC en GPC voor dit “basispakket” mag niet geconcludeerd worden dat de EPC onder alle omstandigheden een correcte afspiegeling is van het te verwachten primair energiegebruik in nieuwbouwwoningen, en het gebruik van meer geavanceerde dynamische simulatiemodellen geen meerwaarde zou bieden boven het gebruik van het vereenvoudigde EPC-model. Bij nadere inspectie van alle deelsuitkomsten blijkt de uiteindelijke overeenkomst tot stand gekomen als de resultante van een groot aantal verschillen in de bepaling van energiestromen voor de verschillende verbruiksposten. Andere maatregelpakketten dan het basispakket laten ook aanzienlijke verschillen zien tussen het primair energiegebruik vastgesteld volgens de EPC-methodiek en dat vastgesteld met een meer dynamisch simulatiemodel. Het gevalideerde simulatiemodel mag als het meest betrouwbare uitgangspunt worden beschouwd voor verdere optimalisatie van het concept.

Geconcludeerd kan worden dat de energetische doelstelling van het project – een EPC van 0.5 – met het in woning B toegepaste maatregelpakket nog niet gehaald wordt. De energieprestatie van het maatregelpakket komt uit op ongeveer 0.6. Wordt meer aandacht besteed aan luchtdicht bouwen en wordt uitgegaan van het gebruik van vloer- of wandverwarming – het “basispakket” – dan komt een EPC van 0.5 binnen bereik hoewel deze nog niet geheel wordt gehaald.

Toepassing van het genoemde pakket aan maatregelen leidt tot een goed comfort en een goede binnenluchtkwaliteit. Een belangrijke randvoorwaarde daarbij is dat het gebalanceerde ventilatiesysteem zo wordt ontworpen dat het geluidsniveau laag is en het kanalsysteem goed reinigbaar is.

5.2 Zomercomfort en koelbehoefte

Koeling is niet opgenomen in de energieprestatieberekening volgens de thans geldende norm NEN 5128. Het handhaven van een goed comfort in de zomer is wel één van de doelstellingen in het project Ecobuild-Research. Deze doelstelling is opgenomen omdat het voor de acceptatie van een gebouw en gebouwinstallatie door bewoners belangrijk is dat het comfort ook in de zomer aan hun eisen voldoet. Bovendien geldt dat ondanks het niet opnemen van koeling in de normberekening er wel degelijk een besparing op het energiegebruik te realiseren is met het voorkomen van oververhitting in de zomer. In de praktijk blijkt immers dat in woningen die niet aan de comforteisen voldoen in toenemende mate airconditionings-systemen worden geïnstalleerd, hetgeen tot een forse stijging in het energiegebruik leidt. Het verdient dan ook aanbeveling koeling op te nemen in de normberekening voor energieprestatie in woningen.

In de testwoningen zoals die zijn gerealiseerd werden in de zomersituatie regelmatig te hoge temperaturen gemeten. Het niet aanwezig zijn van zonwering is de belangrijkste oorzaak daarvan. Het opnemen van zonwering in nieuwbouwwoningen is dan ook een voor de hand liggende aanbeveling. Aanvullend kan gestreefd worden naar een koelsysteem dat gebruik maakt van bodemkoelte. Met twee varianten daarvan is in het project ervaring opgedaan. Het systeem met bodemslangen dat in woning A werd toegepast geeft veelbelovende resultaten en zou bij toepassing van de in paragraaf 4.1.7 gedane aanbevelingen grootschalig kunnen worden toegepast. Ook kan doorontwikkeling van het systeem met bodembuizen worden overwogen, met als belangrijk voordeel dat dit systeem ook tot vermindering van de warmtevraag in de winter leidt.

5.3 Verdere verbetering van de energieprestatie

Om tot een betere energieprestatie te komen dan het hierboven beschreven niveau van 0.53 blijken verschillende wegen open te staan:

- Verdere energievraagreductie;
- Een grotere bijdrage van het zonverwarmingssysteem in de warmtevraag;
- Een PV-installatie op het dak;
- Inzet van een warmtepomp.

De behandeling van deze ontwikkelingsrichtingen beperkt zich hier tot wat uit de eerste fase van het project Ecobuild-Research kan worden afgeleid, aangevuld met enkele indicaties van opties die in de tweede fase van het project kunnen worden opgenomen.

5.3.1 Energievraagreductie

In het project is ervaring opgedaan met reductie van de vraag naar warm tapwater door toepassing van een douchewaterwarmtewisselaar. Deze ervaring is positief en het systeem is toepasbaar. De te bereiken energiebesparing is echter beperkt.

Ten aanzien van reductie van de overige energievraag is een mogelijkheid het ontwikkelen van meer geavanceerde ventilatiesystemen. Besparingsmogelijkheden liggen met name in de sturing van ventilatiehoeveelheden op luchtkwaliteit en/of aanwezigheid, en in het gebruik van zogenaamde “hybride” ventilatiesystemen waarbij een deel van het jaar wordt overgeschakeld van mechanische op natuurlijke ventilatie. Hiermee is ervaring opgedaan in een project dat parallel aan Ecobuild-Research is uitgevoerd in de zogenaamde “domotica” woning (zie paragraaf 3.1).

5.3.2 Zonverwarmingssystemen

Om de bijdrage die zonnearmte levert aan de vraag naar ruimteverwarming en warm tapwater te verhogen is het nodig om het collectoroppervlak te vergroten in combinatie met een groter warmte-opslagsysteem. Met 22 m² vacuümcollector en een warmte-opslagsysteem in de vorm van een geïsoleerde flexibele waterzak van 6 m³ blijkt 66% van de totale warmtevraag gedekt te kunnen worden.

5.3.3 PV

Om het aandeel duurzame energie in de energievoorziening van de woning te maximaliseren zal het dakoppervlak zoveel mogelijk moeten worden benut. De grootste zonnibijdrage kan worden verwacht als hetzelfde dakoppervlak wordt gebruikt voor opwekking van zowel warmte als elektriciteit. In de eerste fase van het project is ervaring opgedaan met een PV-luchtdak, waarbij door de luchtsponw onder de PV-panelen lucht wordt aangezogen die door de PV verwarmd wordt. Het geteste systeem heeft een laag thermisch rendement van ca. 5%. Dit rendement kan worden verhoogd tot ca. 37% door een hoger luchtdebiet toe te passen.

Een andere variant van een dergelijk zogenaamd PV-Thermisch systeem is die waarbij geen lucht maar water wordt verwarmd.

5.3.4 Warmtepomp

Benutting van omgevingswarmte door middel van een warmtepomp werd reeds in de voorstudie van het project Ecobuild-Research gezien als belangrijke mogelijkheid voor verdere verbetering van de energieprestatie. In tabel 2.1 is te zien dat in het meest vergaande maatregelpakket een warmtepomp is opgenomen die warmte onttrekt aan de bodem. In de eerste fase van het project is ervaring opgedaan met een dergelijke configuratie. De prestaties van de toegepaste configuratie waren slechter dan verwacht. Met de uit de metingen af te leiden Seasonal Performance Factor (SPF) van 1,8 is nauwelijks sprake van besparing op het primair energiegebruik. Het vervangen van de HR-ketel in het basispakket door een warmtepomp leidt in dat geval slechts tot een marginale verbetering van de energieprestatie (zie tabel 5.2). Het geluidsniveau in de woning was in de toegepaste configuratie te hoog.

Een warmtepomp die functioneert volgens als haalbaar geldende specificaties zal bij de gegeven temperatuurniveaus een SPF halen van 3. Tabel 5.2 laat zien dat in dat geval de energieprestatie substantieel verbetert. Overigens is de waardering van de warmtepomp in de EPC-berekening laag omdat het verbeterde rendement in die berekeningssystematiek alleen geldt voor de functie ruimteverwarming en niet voor de warm tapwater bereiding.

Tabel 5.2 *Basispakket en warmtepompvarianten doorgerekend voor woning B*

Pakket	EPC	GPC	Bouwkundig	Installatie
basis	0,53	0,53	Dak, gevel $R_c = 5.8 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ Bg-vloer $R_c = 8.7 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ Beglazing/kozijn $U = 1.2 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ Luchtdichtheid $q_{v,10} = 45 \text{ dm}^3/\text{s}$	5,5 m ² zonneboiler + HR-combiketel, wtw ventilatielucht (90%), wand- of vloerverwarming
2	0,74	0,69	Idem	Elektrische warmtepomp SPF=1,8, Wtw ventilatielucht (90%), Wand- of vloerverwarming
3	0,50	0,52	Idem	Elektrische warmtepomp SPF=1,8, 5,5 m ² zonneboiler , wtw ventilatielucht (90%), wand- of vloerverwarming
4	0,72	0,51	Idem	Elektrische warmtepomp SPF=3, Wtw ventilatielucht (90%), Wand- of vloerverwarming
5	0,48	0,40	Idem	Elektrische warmtepomp SPF=3, 5,5 m ² zonneboiler, wtw ventilatielucht (90%), wand- of vloerverwarming

ACHTERGRONDSTUDIES EN MEETVERSLAGEN

In deze rapportage wordt verwezen naar de volgende achtergrondstudies en meetverslagen die in de voorbereiding en uitvoering van het project Ecobuild-Research tot stand zijn gekomen. Er moet op gewezen worden dat een deel van de meetverslagen een vertrouwelijke status heeft.

¹ G.Klunder en F.Meijer, Duurzaam bouwen van eengezinswoningen – Haalbaarheidsonderzoek Ecobuild-concept, reeks Duurzaam bouwen en beheren nr. 4, Delft University Press, 2000.

² W.Gilijamse, J.Römer en R.H.Wassenaar, Resultaten simulatieberekeningen voor de ontwerpvarianten van nieuwbouwwoningen, ECN, april 1998.

³ F.G.H.Koene en W.G.J.van Helden, Meetprogramma Ecobuild, ECN-I--01-002, februari 2001.

⁴ E.Hasselaar, Hoe gezond is de Nederlandse woning?, DUP Science, 2001.

⁵ R.Schuitema en E.J.Bakker, Ecobuild meetverslag, Infiltratiemetingen van de Ecobuild woningen en de ICT woning, ECN-C--02-031, april 2002.

⁶ R.Schuitema, Ecobuild meetverslag, Bepaling van de isolatiewaarde van de gevelschil, ECN-C--02-032, april 2002.

⁷ K.J.Strootman, Ecobuild meetverslag, Vergelijking warmteafgiftesystemen, ECN-C--02-047, mei 2002.

⁸ K.J.Strootman, Ecobuild meetverslag, Warmteterugwinning douchewater, ECN-C--02-028, maart 2002.

⁹ R.Schuitema, Ecobuild meetverslag, Functioneren van een bodembuissysteem in combinatie met warmteterugwinning van ventilatielucht in het stookseizoen, ECN-C--02-038, april 2002.

¹⁰ K.J.Strootman, Ecobuild meetverslag, Koelen met een luchtbodempwisselaar in de woningen B en C, ECN-C--02-033, april 2002.

¹¹ N.C.Sijpheer, Ecobuild meetverslag, Koeling met bodemslangen, ECN-C--02-041, mei 2002.

¹² K.J.Strootman, Ecobuild meetverslag, Rendement HR-ketel, ECN-C--02-036, april 2002.

¹³ M.J.Elswijk, Ecobuild meetverslag, Rendementscurven zonnecollectoren, ECN-C--02-025, april 2002.

¹⁴ K.Visscher, Ecobuild meetverslag, Warmteopslag in de waterzak in woning C, ECN-C--02-029, maart 2003.

¹⁵ N.C.Sijpheer en E.J.Bakker, Ecobuild meetverslag, Prestatie warmtepomp woning A, ECN-CX--02-064, juni 2002.

¹⁶ E.J.Bakker en N.C.Sijpheer, Ecobuild meetverslag, Prestatie warmtepomp woning C, ECN-CX--02-066, mei 2002.

¹⁷ H.A.Zondag en M.J.Elswijk, Ecobuild meetverslag, PV luchtcollector, ECN-C--02-026, maart 2003.

¹⁸ E.Hasselaar, Rapportage gezondheidsaspecten testwoningen project Ecobuild Research, Onderzoeksinstituut OTB, Delft, oktober 2002.

¹⁹J.J.M.van Bree, Onderzoek naar geluidsisolatie testwoningen Ecobuild Research te Petten, BAM Wilma BV, oktober 2002.

²⁰ J.J.M.van Bree, Onderzoek naar installatiegeluid testwoningen Ecobuild Research te Petten, BAM Wilma BV, oktober 2002.

²¹ E.J.Bakker, Ecobuild meetverslag, Energieprestatie woning B, ECN-CX--02-126, februari 2003.

²² J.C.Römer, M.J.M.Jong, E.J.Bakker, W.G.J.van Helden, W.Maassen en J.Berben, Vergelijking tussen numerieke gebouwsimulatie en experimentele gegevens op woningniveau, ECN-C--02-091, november 2002.