

# Belang binnenmilieu in levenscyclusanalyse van woningen

*In de huidige computerprogramma's om levenscyclusanalyses voor woningen uit te voeren wordt de blootstelling van bewoners aan emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu niet meegenomen. In dit onderzoek is een rekenmethode ontwikkeld om de gezondheidsschade als gevolg van deze blootstelling uit te rekenen en te vergelijken met de gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase van de bouwmaterialen en van de woning zelf. Uit de resultaten blijkt dat de bijdrage van emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu een significante bijdrage leveren aan de totale gezondheidsschade van de woning. Met de voorgestelde methode worden de positieve effecten van ventilatiesystemen op de gezondheid van de bewoners zichtbaar in de levenscyclusanalyse van woningen.*

- door dr. A. Meijer\*

**D**uurzaam bouwen staat sinds enkele decennia volop in de belangstelling in de westerse wereld. Er zijn dan ook veel verschillende methodes ontwikkeld om de duurzaamheid van gebouwen te bepalen. Een van deze methodes is levenscyclusanalyse (LCA). Hierin wordt het gebouw van wieg tot graf geanalyseerd, waarbij een breed scala aan milieueffecten wordt meegenomen. Er zijn reeds een aantal computerprogramma's ontwikkeld om de milieubelasting van woningen door middel van LCA's uit te voeren, zoals Ecoquantum en Greencalc in Nederland, en BEAT 2000 in Denemarken [1-3]. In deze programma's wordt tot nu toe echter het binnenmilieu van woningen niet meegenomen [1-2,4]. In het buitenland zijn LCA-methodes ontwikkeld waarin het binnenmilieu wel wordt meegenomen, maar slechts in beperkte mate. In het programma BEES bijvoorbeeld wordt de totale

hoeveelheid vluchtige organische stoffen (VOS) bepaald die uit bouwmaterialen vrijkomt [5]. In dit artikel wordt een meer specifieke methode gepresenteerd om de gezondheidsschade als gevolg van emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu mee te nemen in de LCA van woningen. Deze gezondheidsschade kan dan worden vergeleken met de gezondheidsschade die optreedt in de rest van de levenscyclus van de woning (de productie van de bouwmaterialen en de afvalverwerking).

In levenscyclusanalyse (LCA) wordt de totale milieubelasting van een product (of een service) vastgesteld, waarbij een breed scala aan milieueffecten wordt meegenomen, zoals uitputting van grondstoffen, klimaatverandering en toxiciteit. Eerst wordt er een inventarisatie gemaakt van alle grondstoffen die worden gebruikt en van alle emissies die plaatsvinden in de gehele



Dr. A. Meijer

levenscyclus van het product: de productiefase, de gebruiksfase en de afvalfase (zie figuur 1). Van de zo opgestelde lijst van gebruikte grondstoffen en de emissies wordt met behulp van karakterisatiefactoren per milieueffect de totale milieuschade berekend die voorkomt in de levenscyclus van het product. Deze milieuschade wordt uitgedrukt als een *damage score*. In figuur 2 is dit schematisch weergegeven voor humane gezondheidsschade.

In de LCA van woningen wordt tot nu toe alleen de milieubelasting van de productie- en de afvalfase en het energiegebruik tijdens de gebruiksfase meegenomen. De emissies uit bouwmaterialen tijdens de gebruiksfase worden niet meegenomen. Omdat de concentraties van schadelijke stoffen in het binnenmilieu in Nederlandse woningen erg hoog kunnen zijn door de lage ventilatiesnelheid in veel

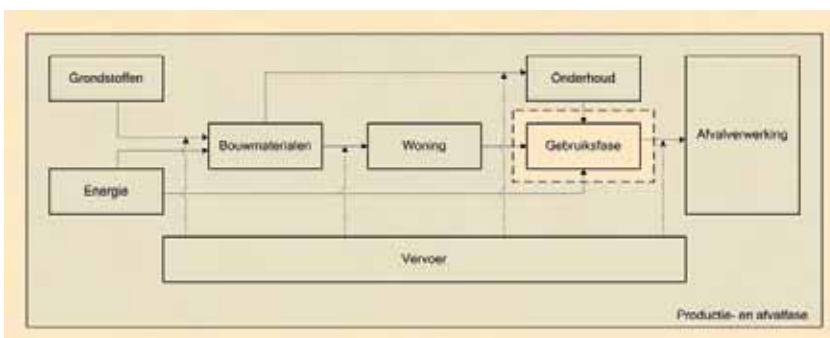
\* TU Delft, Onderzoeksinstituut OTB

"Het in dit artikel beschreven onderzoek maakt deel uit van een afgerond promotieonderzoek aan de afdeling Milieukunde van de Universiteit van Amsterdam."

## NOMENCLATURE

|                    |   |
|--------------------|---|
| $CF_d$             | Dosisconversiefactor  |
| $D_{x,k}$          | Damage factor van stof $x$ voor ziektype $k$  |
| $DS_{p,u,a}$       | Damage score van de gebruiksfase van product $p$ toegepast in compartiment $a$  |
| $E_{x,k}$          | Effect factor van stof $x$ voor ziektype $k$  |
| $f_{e,a}$          | Effectieve uitgaande luchtstroom uit compartiment $a$   |
| $F_{x,a}$          | Fate factor van stof $x$ uitgestoten in compartiment $a$  |
| $F_{x,igamma,p,a}$ | Fate factor van gamma-stralend isotoop $x$ voor straling uitgestoten uit bouw materiaal $p$ in compartiment $a$       |
| $F_{rn,a}$         | Fate factor van radon uitgestoten in compartiment $a$   |
| $IR$               | Ademhalingsnelheid van mensen   |
| $k_x$              | Conversiefactor voor isotoop $x$ van activiteitenconcentratie in het bouw materiaal naar de dosissnelheid in de lucht |
| $L_p$              | Levensduur van bouw materiaal $p$   |
| $M_{x,p,a}$        | Emissie van stof $x$ tijdens de gebruiksfase van product $p$ toegepast in compartiment $a$                            |
| $m_s$              | Totale massa van de bouwmaterialen in de standaardkamer   |
| $n_a$              | Aantal personen dat in de woning woont  |
| $Q_{x,a}$          | Karakterisatiefactor van stof $x$ uitgestoten in compartiment $a$   |
| $SF$               | Gemiddelde afschermingsfactor van de organen tegen straling uit de lucht  |
| $t_a$              | Tijdsfractie die de bewoners doorbrengen in compartiment $a$  |

- KADER 1 -



### Levenscyclus van de woning.

- FIGUUR 1 -

woningen, en men een groot deel van de tijd binnenshuis doorbrengt, kan de gezondheidsschade als gevolg van deze schadelijke stoffen aanzienlijk zijn. Bovendien worden ventilatiesystemen op dit moment in LCA slechter beoordeeld dan wanneer deze zouden worden weggelaten. Wanneer een ventilatiesysteem wordt toegepast, veroorzaakt dit een hogere milieubelasting door de productie van het systeem en het extra energiegebruik tijdens het gebruik van het systeem. Het positieve effect van het systeem – het verbeterde binnenmilieu en de invloed daarvan op de gezondheid van de bewoners – wordt echter nog niet meegenomen, met een negatief resultaat voor de ventilatiesystemen als gevolg. In de hier gepresenteerde methode

wordt de gezondheidsschade van de emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu tijdens de gebruiksfase berekend en vergeleken met de gezondheidsschade die optreedt als gevolg van emissies in de productie- en afvalfase van deze bouwmaterialen. Voor een referentiewoning wordt met behulp van deze gezondheidsschades op woningschaal bepaald welke bouwmaterialen en welke stoffen de grootste bijdrage leveren aan de gezondheidsschade van de woning.

### METHODE

De *damage score* voor emissies tijdens de gebruiksfase van bouw materiaal  $p$  is de som van de hoeveelheden uitgestoten stoffen  $x$  maal de karakterisatiefac-

tor van elke stof (zie ook figuur 2):

$$DS_{p,u,a} = \sum_x M_{x,p,a} \cdot Q_{x,a} \quad (1)$$

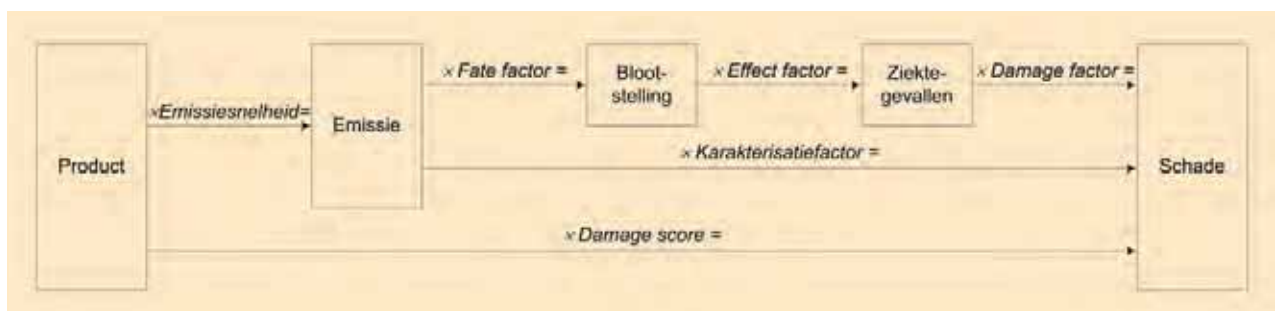
De karakterisatiefactor voor stof  $x$  wordt berekend volgens:

$$Q_{x,a} = F_{x,a} \cdot \sum_k E_{x,k} \cdot D_{x,k} \quad (2)$$

In levenscyclusanalyse wordt de verspreiding van een stof in het milieu uitgedrukt als een *fate factor*. Voor toxische stoffen is de *fate factor* gelijk aan de opnamefractie: de fractie van de uitgestoten hoeveelheid stof dat wordt opgenomen door mensen. *Fate factors* voor stoffen die worden uitgestoten naar de buitenlucht worden normaal gesproken berekend met *multimedia fate models*, waarin op wereldschaal de gemiddelde blootstelling als gevolg van een emissie op een willekeurige plaats kan worden berekend [6,7]. Deze modellen kunnen echter niet worden gebruikt voor het binnenmilieu, omdat de verspreidingsroutes, afbraak en verwijdering binnen de woning verschillen met die van buiten. Daarom is een andere aanpak nodig.

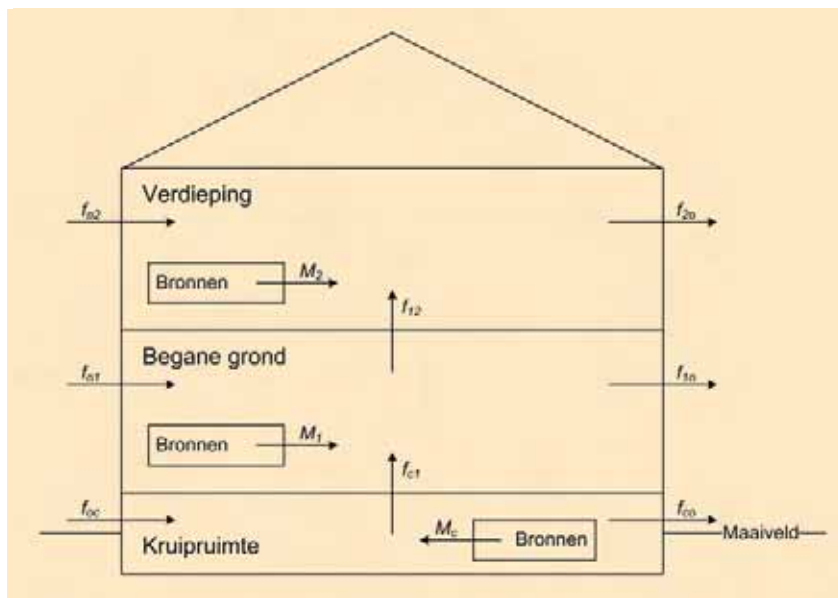
In dit onderzoek wordt de Nederlandse referentie tussenwoning bestudeerd [8]. Er is aangenomen dat de woning door drie mensen wordt bewoond, onder gemiddelde Nederlandse meteorologische omstandigheden. Ook zijn er gemiddelden genomen van de samenstelling van de bouwmaterialen, luchtstromen, ventilatiesnelheden en tijdsfracties die zich bevinden in de verschillende compartimenten van de woning. De woningscheidende muren en de vloeren zijn gemaakt van beton, en de gevels bestaan uit kalkzandsteen en baksteen, met ramen van dubbelglas. De levensduur van de woning is op 75 jaar gesteld.

De referentiewoning is verdeeld in drie compartimenten: kruipruimte, begane grond en verdieping. In figuur 3 is een overzicht gegeven van de compartimenten en de luchtstromen. Aangenomen wordt dat de concentraties binnen een compartiment overal gelijk zijn. Omdat convectiestromen een dominant effect hebben op de concentraties in woningen [9], zijn diffusie en afbraak van de stoffen binnenshuis niet meegenomen in de berekeningen van de *fate factors*.



Overzicht van de stappen van emissies naar damage scores.

- FIGUUR 2 -



Overzicht van de compartimenten en de luchtstromen in de woning.

- FIGUUR 3 -

**ORGANISCHE STOFFEN**

Voor blootstelling aan organische stoffen binnenshuis wordt alleen stofopname via ademhaling meegenomen. De opnamefractie via ademhaling binnenshuis wordt berekend met behulp van de ademhalingsnelheid en de luchtstromen in de woning:

$$F_{x,a} = \frac{IR}{f_{e,a}} \cdot n_a \quad (3)$$

De effectieve uitgaande luchtstroom  $f_{e,a}$  is de gewogen som van de luchtstromen vanuit alle compartimenten van een emissie in compartiment  $a$ . Hierin zijn de ventilatiesnelheid, transport van de stof naar de andere compartimenten, blootstelling in deze compartimenten en de tijdfracties die de bewoners in de verschillende compartimenten doorbrengen verdisconteerd. De berekening van de effectieve uitgaande luchtstromen is beschreven door Meijer *et al.* [10].

De fractie organische stoffen die van binnen naar buiten gaat, is gelijk aan de fractie die niet wordt opgenomen door de bewoners.

**RADON**

De berekening van de blootstelling binnenshuis aan radon is vergelijkbaar met die aan organische stoffen. Alleen blootstelling via ademhaling wordt meegenomen. De humane dosis in de binnenlucht als gevolg van een emissie van radon uit bouw materiaal  $p$  in compartiment  $a$  wordt berekend als volgt:

$$F_{Rn,a} = \frac{CF_d}{f_{e,a}} \cdot n_a \quad (4)$$

**GAMMASTRALING**

Gammastraling ontstaat door de afbraak van de isotopen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  en  $^{40}\text{K}$  in steenachtige bouwmaterialen. Omdat het stralingsveld nagenoeg

gelijkmatig en homogeen is binnen elk compartiment van de woning [11], en er geen significante verschillen zijn voor kamers met uiteenlopende dimensies [12,13] kunnen de berekeningen voor een standaardkamer van 5 x 4 x 2,8 meter met een muurdikte van 20 centimeter worden gebruikt [12,13]. Er is een lineair verband tussen de intensiteit van het stralingsveld en de dichtheid van het bouw materiaal (tot 2.500 kg·m<sup>-3</sup>) [13]. Ook is er een lineair verband tussen de intensiteit van het stralingsveld en de dikte van de muren (tot 30 centimeter dikte) [12]. De gammastraling heeft alleen effect in het compartiment waar het wordt uitgezonden. Deze aanname is empirisch aangetoond voor situaties met muren dikker dan 20 centimeter [12];

De *fate factor* voor isotoop  $x$  in compartiment  $a$  is gelijk aan:

$$F_{x,\gamma, \text{gamma}, p, a} = \frac{k_x}{m_x} \cdot SF \cdot t_a \cdot n_a \cdot L_p \quad (5)$$

De berekening van de *fate factors* voor gammastraling zijn in dit onderzoek uitgevoerd voor een aangenomen levensduur van de bouwmaterialen van 75 jaar, wat gelijk is aan de levensduur van de meeste steenachtige bouwmaterialen in de woning [14]. De gezondheidseffecten van gammastraling dat wordt uitgezonden naar buiten zijn niet meegenomen in dit onderzoek vanwege de relatief lage bevolkingsdichtheid buitenshuis.

**Gezondheidsschade**

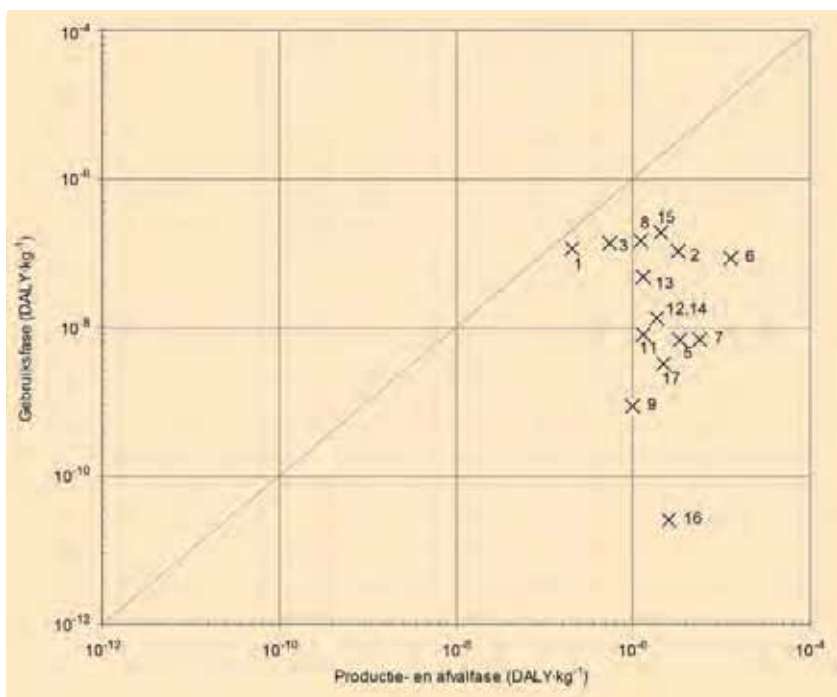
De gezondheidsschade als gevolg van opname van een hoeveelheid gevaarlijke stof of straling kan worden berekend met behulp van effect en *damage factors* (zie figuur 2). De *effect factor* geeft de kans weer dat een gezondheidseffect (bijvoorbeeld irritatie of ziekte) zich voordoet als gevolg van

| Categorie               | Bouwmateriaal                             | Levensduur (a) | Stoffen                         | (Activiteits-) concentratie, totale exhalatie | Eenheid                            |
|-------------------------|---|----------------|---------------------------------|---|------------------------------------|
| Steenachtige materialen |   |                |                                 |   |                                    |
| 1                       | Baksteen, cement, mortel en keramiek      | 75             | Radon                           | $4,7 \cdot 10^3$                              | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 46  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 47  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 519   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 2                       | Cellenbeton                               | 75             | Radon                           | $4,3 \cdot 10^3$                              | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 10  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 7,6   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 179   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 3                       | Overig beton                              | 75             | Radon                           | $5,5 \cdot 10^3$                              | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 20  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 17  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 115   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 4                       | Glas <sup>a</sup>                         | 25             | $^{226}\text{Ra}$               | 12  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 3   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 120   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 5                       | Glaswol <sup>a</sup>                      | 75             | Formaldehyde                    | $7,5 \cdot 10^{-4}$                           | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 12  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 3   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 120   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 6                       | Gips                                      | 60             | Radon                           | $3,6 \cdot 10^3$                              | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 6,1   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 2,2   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 11  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 7                       | Steenwol <sup>a</sup>                     | 75             | Formaldehyde                    | $7,5 \cdot 10^{-4}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 46  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 47  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 519   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 8                       | Kalkzandsteen                             | 75             | Radon                           | $5,9 \cdot 10^3$                              | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 11  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 9,3   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 187   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| Houtproducten           |   |                |                                 |   |                                    |
| 9                       | Gelijmd hout (spaanplaat, hardboard e.d.) | 20             | Formaldehyde                    | $1,0 \cdot 10^{-4}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{226}\text{Ra}$               | 11  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 4   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 26  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 10                      | Ongelijmd hout                            | 30             | $^{226}\text{Ra}$               | 11  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{232}\text{Th}$               | 4   | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | $^{40}\text{K}$                 | 26  | $\text{Bq} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| Verf en lijm            |   |                |                                 |   |                                    |
| 11                      | Acrylaat muurverf                         | <sup>b</sup>   | Propyleenglycol monomethylether | 0,01  | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 12                      | Alkyd muurverf                            | <sup>b</sup>   | Xyleen                          | $5,5 \cdot 10^{-3}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 13                      | Acrylaat houtverf                         | <sup>b</sup>   | 2-Butoxyethanol                 | 0,03  | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | Propyleenglycol monomethylether | 0,02  | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
|                         |   |                | Triethylamine                   | $5,0 \cdot 10^{-3}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 14                      | Alkyd houtverf                            | <sup>b</sup>   | Xyleen                          | $5,5 \cdot 10^{-3}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 15                      | Epoxylijm                                 | <sup>b</sup>   | Tolueen                         | 0,13  | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| Plastics                |   |                |                                 |   |                                    |
| 16                      | Polystyreen                               | <sup>b</sup>   | Styreen                         | $1,0 \cdot 10^{-5}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |
| 17                      | Polyvinylchloride                         | <sup>b</sup>   | Vinylchloride                   | $1,0 \cdot 10^{-3}$                           | $\text{kg} \cdot \text{kg}_p^{-1}$ |

Bronnen: [14,22-30] <sup>a</sup> Geen gegevens over radonexhalatie beschikbaar <sup>b</sup> Niet relevant: geen radon of gammastraling uitgestoten

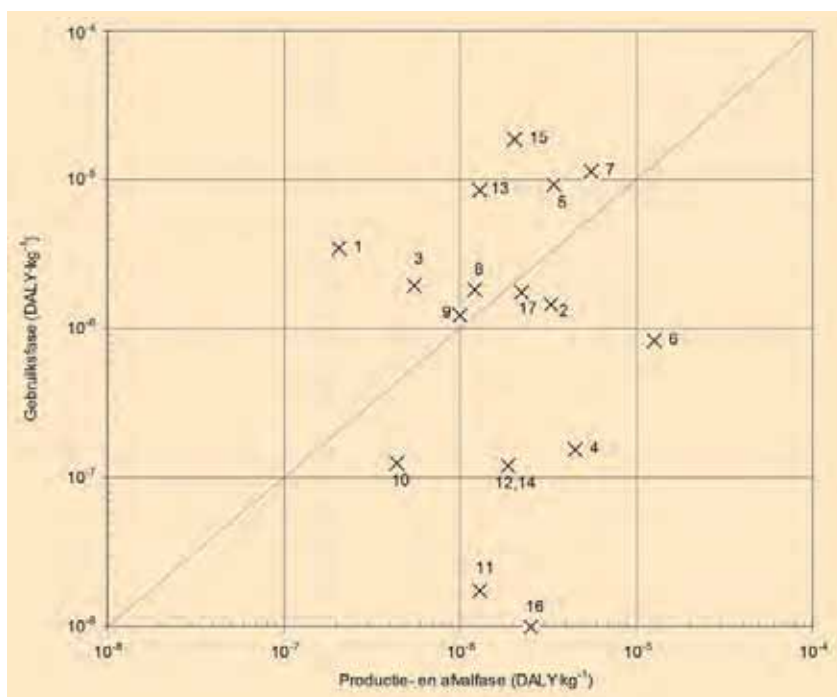
**Gemiddelde concentraties en totale radonexhalatie van verschillende categorieën bouwmaterialen.**

- TABEL 1 -



**Damage scores als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase van bouwmaterialen in de kruipruimte, vergeleken met de damage scores als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase van dezelfde materialen. De beschrijving van de categorie-nummers staat in tabel 1.**

- FIGUUR 4 -



**Damage scores als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase van bouwmaterialen op de begane grond, vergeleken met de damage scores als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase van dezelfde materialen. De beschrijving van de categorie-nummers staat in tabel 1.**

- FIGUUR 5 -

blootstelling aan een stof, en de *damage factor* geeft de ernst van dit gezondheidseffect weer.

*Effect factors* worden berekend met behulp van epidemiologische onderzoeken. De berekening van de *effect factors* wordt gedetailleerd beschreven

door Meijer *et al.* [10]. De gezondheidsschade wordt uitgedrukt in *disability adjusted life years* (DALY's); voor ziekte gecorrigeerde levensjaren [15,16,19]. Dit is de gewogen som van ziektejaren en verloren jaren als gevolg van vroegtijdige sterfte.

## ANDERE GEZONDHEIDSEFFECTEN

De fractie van de schadelijke stoffen die naar het binnenmilieu wordt uitgestoten maar niet opgenomen wordt door de bewoners, wordt via de ventilatie naar buiten getransporteerd. De gezondheidsschade van deze emissie wordt berekend volgens de algemene blootstellingsmodellen zoals in LCA worden gebruikt [6]. Hierbij worden ook andere gezondheidseffecten als gevolg van ademhalingsproblemen, klimaatverandering en ozonlaagaantasting meegenomen, zoals berekend in de Eco-indicator 99-methode [16]. Gezondheidseffecten van gammastraling die naar buiten wordt geëmitteerd, wordt verwaarloosd vanwege de lage blootstellingsniveaus buiten, vergeleken met die van binnen.

## EMISSIES UIT BOUWMATERIALEN

Emissies van organische stoffen worden berekend uit de concentraties in de bouwmaterialen. Hierbij wordt aangenomen dat gedurende de levensduur van het materiaal alle VOS worden uitgestoten. De emissiesnelheid van radon is constant gedurende de levensduur. De hoeveelheid gammastraling is proportioneel met de concentraties van de isotopen <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th en <sup>40</sup>K in steenachtige bouwmaterialen.

Er wordt rekening gehouden met de verdeling van de bouwmaterialen over de woning. Wanneer een materiaal wordt toegepast in een element tussen twee compartimenten (bijvoorbeeld de vloer tussen de begane grond en de verdieping), dan wordt de helft van de betreffende stoffen toegerekend aan het ene compartiment en de andere helft aan het andere compartiment. Wanneer een materiaal wordt toegepast in een muur tussen een compartiment en de buitenlucht, dan wordt de helft van de betreffende stoffen toegerekend aan het compartiment, en de andere helft wordt gezien als een direct emissie naar buiten.

De concentraties van VOS en gammastralers, en de radonemissiesnelheden van zeventien categorieën van bouwmaterialen worden gegeven in tabel 1 [20].

De totale hoeveelheden bouwmaterialen in de woning worden gegeven door Meijer *et al.* [20]. Hierbij wordt

|   | Damage score (DALY) | Fractie |
|---|---------------------|---------|
| <b>Emissies in de gebruiksfase</b>            |                     |         |
| Kruipruimte                                   | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | 0,5%    |
| Begane grond                                  | $8,5 \cdot 10^{-2}$ | 18,6%   |
| Verdieping                                    | $1,2 \cdot 10^{-1}$ | 26,4%   |
| Buitenlucht <sup>a</sup>                      | $2,4 \cdot 10^{-3}$ | 0,5%    |
| <b>Totaal</b>                                 | $2,1 \cdot 10^{-1}$ | 46,0%   |
| <b>Emissies in de productie- en afvalfase</b> |                     |         |
|   | $2,5 \cdot 10^{-1}$ | 54,0%   |

<sup>a</sup> Materialen die emissies naar alleen de buitenlucht hebben (bijvoorbeeld constructies die buiten staan, delen van de gevels en van daken)

**Totale gezondheidsschade die optreedt in de levenscyclus van de referentiewoning.**

- TABEL 2 -

rekening gehouden met meervoudige toepassing van materialen (bijvoorbeeld vervanging bij onderhoud) en verliezen bij de bouw of bij het onderhoud. De hoeveelheid op deze manier verloren bouw materiaal veroorzaken geen uitstoot tijdens de gebruiksfase, en alleen de gezondheidsschade die optreedt tijdens de productie en afvalverwerking van deze materialen wordt meegenomen in de berekeningen.

**RESULTATEN**

**Damage scores voor bouwmaterialen**

In figuren 4 en 5 worden voor de kruipruimte en de begane grond de *damage scores* per kilogram product in de referentiewoning vergeleken voor emissies tijdens de gebruiksfase en tijdens de productie- en afvalfase. De beschrijving van de materiaalcatego-

rieën is gegeven in tabel 1. De schaal van de assen in figuur 4 wijkt af van die in figuur 5. In figuur 4 zijn de *damage scores* voor glas en hout niet gegeven, omdat de waarde ervan voor emissies in de gebruiksfase 0 DALY·kg<sup>-1</sup> is. De *damage scores* voor de tweede verdieping zijn ongeveer gelijk aan die voor de eerste verdieping.

De *damage scores* voor de emissies tijdens de gebruiksfase voor bouwmaterialen in de kruipruimte zijn ongeveer een factor 10 lager dan die voor bouwmaterialen op de begane grond en de verdieping. Voor de bouwmaterialen die zijn toegepast op de begane grond en de verdieping hebben de *damage scores* als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase dezelfde orde van grootte als de *damage scores* als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase.

**Damage scores voor de woning**

In tabel 2 zijn de *damage scores* gegeven als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase en tijdens de productie- en afvalfase van de referentiewoning. Voor de schadelijke stoffen die zijn meegenomen in de analyse geldt dat de totale *damage score* als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase van de referentiewoning ongeveer gelijk is aan de totale *damage score* als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase.

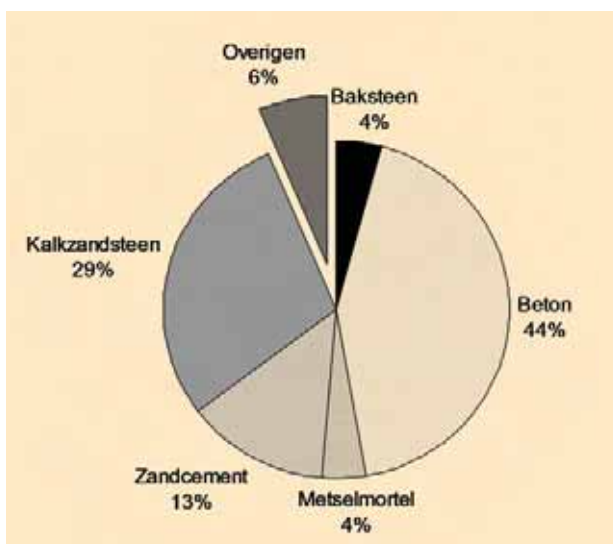
Figuur 6 toont aan dat op woningniveau de bijdrage van bulkmaterialen zoals beton aan de totale gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase domineert over de bijdrage van materialen die in kleine hoeveelheden worden toegepast, zoals verf.

Figuur 7 laat de bijdrage zien van de verschillende schadelijke stoffen aan de totale gezondheidsschade als gevolg van emissies in de gebruiksfase van de referentiewoning. De grootste bijdrage aan de gezondheidsschade blijkt afkomstig van radon en gammastraling.

**DISCUSSIE**

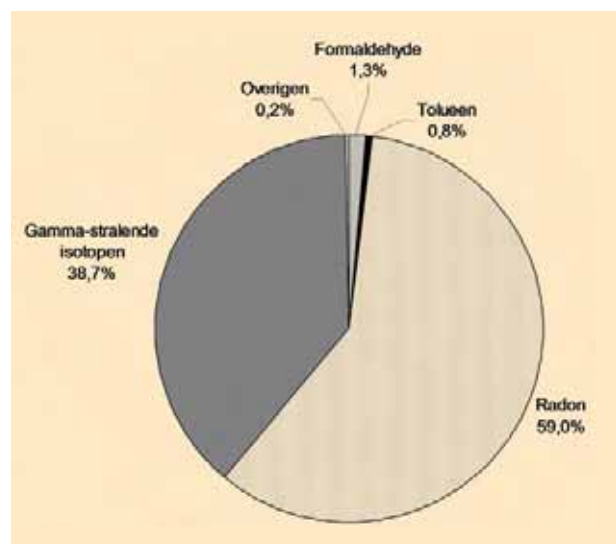
**Invloed van ventilatiesystemen op gezondheidsschade**

Er zijn verschillende mogelijkheden om de gezondheidsschade als gevolg van emissies naar het binnenmilieu te verlagen. Eén mogelijkheid is het verlagen van de emissiesnelheden van



**Bijdrage van de verschillende bouwmaterialen aan de totale gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase van de referentiewoning.**

- FIGUUR 6 -



**Bijdrage van de verschillende vervuulende stoffen en straling aan de totale gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase van de referentiewoning.**

- FIGUUR 7 -

stoffen uit materialen naar het binnenmilieu. Dit kan worden uitgevoerd door bijvoorbeeld materialen toe te passen met lagere concentraties VOS, zoals natuurlijk hout in plaats van spaanplaat. Ook kunnen emissies van schadelijke stoffen worden voorkomen door andere materialen toe te passen, zoals verf op basis van lijnolie in plaats van alkydverf, of door andere technieken toe te passen, zoals houtskeletbouw in plaats van klassieke betonbouw. De invloed van de verlaging van de emissiesnelheid op de totale gezondheidsschade van bewoners is afhankelijk van de bijdrage van die stof aan de totale gezondheidsschade. Vooral vermindering van radonemissies uit steenachtige materialen zal een groot positief effect hebben op de totale gezondheidsschade van de woning.

Een andere mogelijkheid is om de ventilatiesnelheid in de woning te verhogen. Dit heeft invloed op de blootstelling van bewoners aan alle uitgestoten stoffen (maar niet aan gammastraling). Aangezien de luchtstroom van een compartiment naar buiten groter is dan die naar het compartiment erboven, kan aan de hand van formules (3) en (4) worden gesteld dat de blootstelling, en daarmee de gezondheidsschade, omgekeerd evenredig is aan de ventilatiesnelheid. Het positieve effect van ventilatiesystemen op de gezondheid van de bewoners is daarom meteen terug te vinden in de LCA van de woning.

#### **Onzekerheden**

Uit de resultaten blijkt dat de bijdrage van emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu een significante bijdrage leveren aan de totale gezondheidsschade van de woning. Hierbij zijn wel een paar kanttekeningen te plaatsen, hoewel deze de resultaten niet al te zeer zullen beïnvloeden.

Het valideren van het hier gepresenteerde model wordt bemoeilijkt doordat de gezondheidsschade niet kan worden gemeten. Het blootstellingmodel kan echter wel worden gevalideerd, door de berekende concentraties als gevolg van emissies naar het binnenmilieu te vergelijken met meetgegevens. Dit is hier gedaan voor radon. Het is gebleken dat de berekende radonconcentratie in de hier onder-

zochte referentiewoning ongeveer gelijk is aan de concentraties die zijn gevonden in een nationaal onderzoek naar radonconcentraties in Nederlandse woningen [21].

Verder moet men in gedachte houden dat in de resultaten van het binnenmilieumodel onzekerheden zitten. Deze zitten vooral in de berekeningen van de blootstellingsniveaus. De grootste onzekerheden hierin zitten in het gebruik van gemiddelde waarden voor de woningkarakteristieken (dimensies, materiaalgebruik, aantal bewoners, tijdfracties die men in de verschillende compartimenten doorbrengt), voor de luchtstromen en voor de concentraties in bouwmaterialen. Ook zijn de gevolgen van afbraak en verwijdering in de woning niet meegenomen, wat kan leiden tot overschatting van de gezondheidsschade. Ten slotte zitten in de berekeningen voor de gezondheidsschade onzekerheden, die algemeen zijn voor epidemiologisch onderzoek. Ook de weging van de ernst van de verschillende ziektes in de DALY-methode is een bron van onzekerheid.

Als gevolg van deze onzekerheden zijn de berekende *damage scores* als gevolg van emissies uit bouwmaterialen tijdens de gebruiksfase, zoals die in dit onderzoek zijn berekend, ook onzeker. Deze onzekerheid wordt geschat op maximaal één orde van grootte. De conclusie dat de gezondheidsschade als gevolg van emissies uit bouwmaterialen tijdens de gebruiksfase van de woning dezelfde orde van grootte hebben als de gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase van dezelfde woning, verandert echter niet.

De resultaten zoals hier gepresenteerd zijn, zijn representatief voor de referentie tussenwoning. Met het model kunnen ook voor andere typen woningen de gezondheidsschades worden berekend. Hiervoor zijn gegevens nodig over de luchtstromen binnen het gebouw en de blootstellingsgegevens van de bewoners. Ook kunnen voor andere bouwmaterialen de gezondheidsschade worden berekend. Hiervoor zijn de gegevens van de concentraties van VOS en de gammastralende isotopen, en de emissiesnelheid van radon nodig.

#### **CONCLUSIE**

De gezondheidsschade als gevolg van emissies naar het binnenmilieu tijdens de gebruiksfase zijn berekend voor 17 categorieën bouwmaterialen, toegepast in de Nederlandse referentiewoning. Ook is de totale gezondheidsschade bepaald als gevolg van emissies uit bouwmaterialen tijdens de gebruiksfase van de Nederlandse referentiewoning. Deze gezondheidsschade is vergeleken met de gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase van dezelfde woning. Uit de resultaten blijkt dat gezondheidsschade als gevolg van emissies uit bouwmaterialen naar het binnenmilieu dezelfde orde van grootte heeft als de gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de productie- en afvalfase. Radon en gammastraling afkomstig uit steenachtige bouwmaterialen zoals beton en kalkzandsteen blijken de grootste bijdrage te leveren aan de totale gezondheidsschade als gevolg van emissies tijdens de gebruiksfase. Het achterwege laten van de gezondheidseffecten van emissies uit bouwmaterialen naar de binnenlucht zal leiden tot een significante onderschatting van de totale gezondheidsschade die gerelateerd kan worden aan een bepaalde woning. Het is daarom relevant om de emissies naar het binnenmilieu mee te nemen in de LCA van woningen. Hiermee wordt ook het positieve effect van ventilatiesystemen beter weergegeven. 

#### **REFERENTIES**

1. Reijnders, L. & Huijbregts, M.A.J., *Tools for the environmental evaluation and improvement of buildings*. Milieu 15 (2): 89-96, 2000
2. Erlandsson, M. & Borg, M., *Generic LCA methodology applicable for buildings, constructions and operating services – today practice and development needs*. Building and Environment 38 (7): 919-938, 2003
3. Forsberg, A. & Von Malmborg, F., *Tools for environmental assessment of the built environment*. Building and Environment 39 (2): 223-228, 2004
4. Jönsson, Å., *Is it feasible to address indoor climate issues in LCA?* Environmental Impact Assessment Review 20 (2): 241-259, 2000

5. Lippiatt, B., *Building for environmental and economic sustainability (BEES 2.0)*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, United States, 2000. Online: <http://www.bfrl.nist.gov/oae/software/bees.html>
6. European Commission, *EUSES, the European Union System for the Evaluation of Substances*. RIVM, Bilthoven, 1996
7. Huijbregts, M.A.J., Thissen, U., Guinée, J.B., Jager, T., Kalf, D., Van de Meent, D., Ragas, A.M.J., Wegener Sleswijk, A. & Reijnders, L., *Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA*. Chemosphere 41 (4): 541-573, 2000
8. Novem, *Referentiewoningen 1998*. Rapport no. DV1.2.171 99.02, Novem, Sittard, 1998
9. Nazaroff, W.W., Feustel, H., Nero, A.V., Revzan, K.L., Grimsrud, D.T., Essling, M.A. & Toohey, R.E., *Radon transport into a detached one-story house with a basement*. Atmospheric Environment 19 (1): 31-46, 1985
10. Meijer, A., Huijbregts, M.A.J. & Reijnders, L., *Human health damages due to indoor sources of organic compounds and radioactivity in life cycle impact assessment of dwellings – Part 1: Characterisation factors*. International Journal of Life Cycle Assessment 10 (5): 309-316, 2005
11. Blaauboer, R.O. & Pruppers, M.J.M., *Externe straling van bouwmaterialen: Resultaten van MAR-MER-berekeningen aan een referentiewoning*. Rapport no. 610050006, RIVM, Bilthoven, 2000
12. Koblinger, L., *Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms*. Health Physics 34 (5): 459-463, 1978
13. Koblinger, L., *Mathematical models of external gamma radiation and congruence of measurements*. Radiation Protection Dosimetry 7 (1-4): 227-234, 1984
14. W/E Adviseurs, *Eco-Quantum*. W/E Adviseurs, Gouda, 1999
15. Hofstetter, P., *Perspectives in life cycle impact assessment: a structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and value-sphere*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Massachusetts, United States, 1998
16. Goedkoop, M. & Spriensma, R., *The Eco-Indicator 99; A damage oriented method for life cycle impact assessment; Methodology report & Annex*. PRé Consultants, Amersfoort, 1999
17. Crettaz, P., Pennington, D., Rhomberg, L., Brand, K. & Jolliet, O., *Assessing human health response in life cycle assessment using ED10s and DALYs: Part 1 – Cancer effects*. Risk Analysis 22 (5): 931-946, 2002
18. Pennington, D., Crettaz, P., Tauxe, A., Rhomberg, L., Brand, K. & Jolliet, O., *Assessing human health response in life cycle assessment using ED10s and DALYs: Part 2 – Non-cancer effects*. Risk Analysis 22 (5): 947-963, 2002
19. Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P. & Suter, P., *Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment*. Environmental Impact Assessment Review 20 (2): 159-189, 2000
20. Meijer, A., Huijbregts, M.A.J. & Reijnders, L., *Human health damages due to indoor sources of organic compounds and radioactivity in life cycle impact assessment of dwellings – Part 2: Damage scores*. International Journal of Life Cycle Assessment 10 (6): 383-392, 2005
21. Stoop, P., Glastra, P., Hiemstra, Y., De Vries, L. & Lembrechts, J., *Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings*. Rapport no. 610058006, RIVM, Bilthoven, 1998
22. Bosmans, G., *Stralingsaspecten van gangbare bouwmaterialen: Samen-vattend rapport*. Rapport no. 95373, Intron, Sittard, 1996
23. Schaap, L.E.J.J., Bosmans, G., Van der Graaf, E.R. & Hendriks, Ch.F., *De stralingsprestatienorm – Een prestatie-model voor ioniserende straling in het woonmilieu*. Aeneas, Best, 1998
24. IVAM, *IVAM LCA Data 4*. IVAM, Amsterdam, 2002
25. Fraanje, P., Steenhuisen, F., Van Velze, K., Laan, H. & Janus, J., *Vluchtige organische stoffen in het binnenmilieu van woningen*. IVAM-onderzoeksreeks nr. 61, RIVM-rapport no. 222302002, Interfacultaire Vakgroep Milieukunde, Universiteit van Amsterdam & RIVM, Bilthoven, 1993
26. Warenwet, *Spaanplaatbesluit (Warenwet)*. SDU Uitgevers, Den Haag, 1986
27. Terwoert, J., *Persoonlijke mededeling*, IVAM, Amsterdam, 2003
28. GTI, *Stoffenkaart terpentine (Bleko Chemie)*. GTI Utiliteit Zuid BV, Oisterwijk, 2003. Online: <http://www.toxic.nl/html/stoffen/toxic/gti/html/127/158.htm>
29. Verlind, G., *Persoonlijke mededeling*, Unidek, Gemert, 2003
30. Mindfully.org, *Polyvinyl chloride – properties and migration data. 2000*. Online: <http://www.mindfully.org/Plastic/Polyvinylchloride/PVC-2.htm>