

## Ontwerpen en dimensioneren van steenconstructies (20)

# Onderzoek op locatie: de Wolfswaardwoning

ir. G. Bertram, TU-Eindhoven, leerstoel Steenconstructies

prof. ir.-arch. D.R.W. Martens, TU-Eindhoven, leerstoel Steenconstructies, Studiebureau Dirk Martens bvba, Zingem (B)

Experimenteel onderzoek op bouwconstructies heeft tot doel het evalueren van de respons van de constructie op de externe en interne belastingen. Een van de moeilijkste aspecten hierbij is het correct simuleren van de reële belastingen, zeker in geval van klimatologische belastingen veroorzaakt door variaties in temperatuur, vochtigheid, wind en bezonning in combinatie met krimp en kruip van metselwerk en lijmwerk. Experimenteel onderzoek op locatie biedt in dit geval de beste garanties op betrouwbare resultaten.

In het kader van het onderzoeksproject 'Jas of Harnas' van de leerstoel Steenconstructies van de TU/e inzake scheurbeheersing van buitenspouwbladen in metselwerk en lijmwerk (fig.1), is in maart 2003 op initiatief

van en in samenwerking met Wienerberger Bricks BV een experimenteel onderzoek opgestart aan een nieuwe conciërgewoning bij de baksteenfabriek De Wolfswaard in Opheusden (foto 2) [1]. Het doel van het TU/e-onderzoek was het in situ meten van de temperatuurvariaties en vormveranderingen in spouwmuren, alsmede het detecteren van mogelijke regendoorslag bij lijmwerk met open en gesloten stootvoegen. Parallel met het onderzoek werd door TNO-Bouw een nieuw ventilatieconcept uitgetest en werden metingen verricht om de drukvereffening in de spouw te evalueren. In dit artikel wordt enkel verslag gedaan van de resultaten van de temperatuur- en vervormingsmetingen op de ZW-gevel.

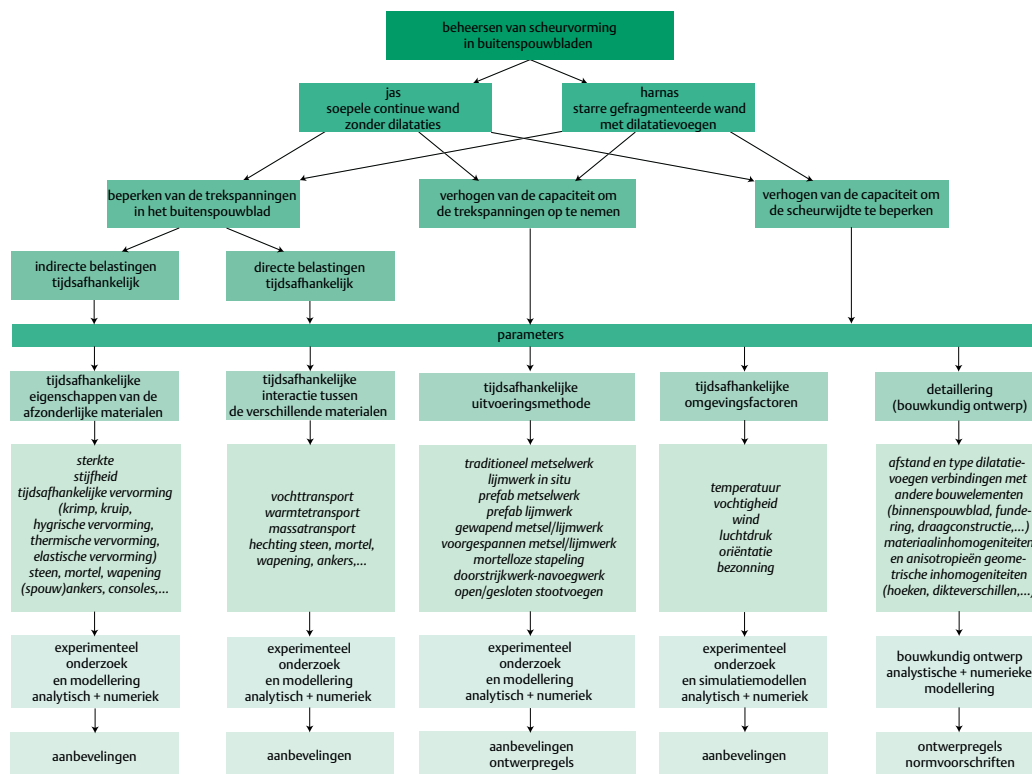
De buitenwanden van de Wolfswaardwoning zijn ontworpen als geïsoleerde spouwmuren. De buitenspouwbladen bestaan uit baksteenlijmwerk van mechanisch gevormde handvormstenen, Terca Lingebont, breed 100 mm, met gedeeltelijk open stootvoegen en zijn gedeeltelijk als klamp verlijmd, breed 50 mm (foto 3). De binnenspouwbladen zijn uitgevoerd met verlijmd

geperforeerde baksteenblokken met open stootvoegen, Terca Poro Light 140 mm (foto 4). De spouw is 95 mm breed, waarvan 55 mm is gevuld met glaswolisolatie.

### Metingen

Om de invloed van de temperatuurvariaties op de vervormingen van de spouwwand te evalueren werden

1 | 'Jas of Harnas' onderzoeksproject





2 | Wolfswaardwoning ZW-gevel

3 | Gewoon lijmwerk (links) en als klamp verlijmde stenen (rechts)

4 | Lijmwerk van snelbouw-baksteenblokken

temperatuurmetingen uitgevoerd aan de binnen- en buitenzijde van respectievelijk het binnen- en buitenspouwblad. Op de als klamp verlijmde ZW-gevel (gesloten stootvoegen) werden deze metingen uitgevoerd op 0,70 m (T5-1 t.m. T5-4) en ongeveer 2,15 m boven het maaiveld (T6-1 t.m. T6-4) (fig. 5 en 6). Op dezelfde plaatsen werd de verschilvorming gemeten tussen het binnenspouwblad en het buitenspouwblad (V5 en V6) door middel van LVDT-meetapparatuur (fig 7).



---

**Meetapparatuur op locatie**

---

Bij experimenteel onderzoek in situ is het essentieel om voorafgaand goede afspraken te maken omtrent de gewenste metingen en de in te bouwen meetapparatuur. Bij de Wolfswaardwoning waren de omstandigheden hiertoe optimaal. Alle betrokken partners werden reeds vanaf het architectonisch voorontwerp betrokken bij de uitwerking van het project. Op de uitvoeringsplannen werden de wachtbuizen voor de bekabeling van de meetapparatuur keurig uitgetekend. Een goede communicatie tussen de aannemer en de onderzoeksinstituten was absoluut noodzakelijk aangezien het inbouwen van gevoelige en kwetsbare apparatuur gelijktijdig met de ruwbouwwerken diende te worden uitgevoerd. Door de goede coördinatie door de opdrachtgever is dit alles nagenoeg vlekkeloos verlopen (foto 8).

---

**Oppervlaktetemperatuur buitenspouwblad**

---

Om een globaal beeld te krijgen van de minimale en maximale oppervlaktetemperatuur van het buitenspouwblad die gedurende één jaar optreden, is het gemiddelde van de gemeten waarden bovenaan en onderaan de wand berekend (fig. 9). De gemiddelde en de extreme waarden per maand zijn gegeven in tabel 1. Het absolute minimum en maximum over de gehele meetperiode is respectievelijk  $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (op 8 december 2003) en  $49,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (op 6 augustus 2004). Op jaarbasis is dit een temperatuurverschil van  $55,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , terwijl het maximaal maandelijks temperatuurver-

schil 42,0 °C bedroeg (september, 47,5 – 7,4). De maximale dagschommeling werd op 22 mei 2004 gemeten en bedroeg 35,8 °C.

### Temperatuurgradiënt spouwmuur

Op een analoge manier is voor het temperatuurverloop over de spouwmuur het gemiddelde berekend van de temperaturen boven en onder in de wand (fig. 10).

Figuur 11 geeft het temperatuurverloop bij drie 'extreme' perioden:

- 8-10 december 2003: minimale temperatuur van het buitenspouwblad;
- 5-7 augustus 2004: maximale temperatuur van het buitenspouwblad;
- 8-10 oktober 2004: extreem dagelijks temperatuurverschil van het buitenspouwblad.

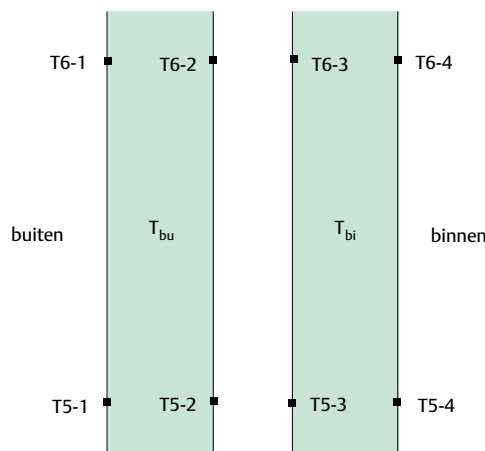
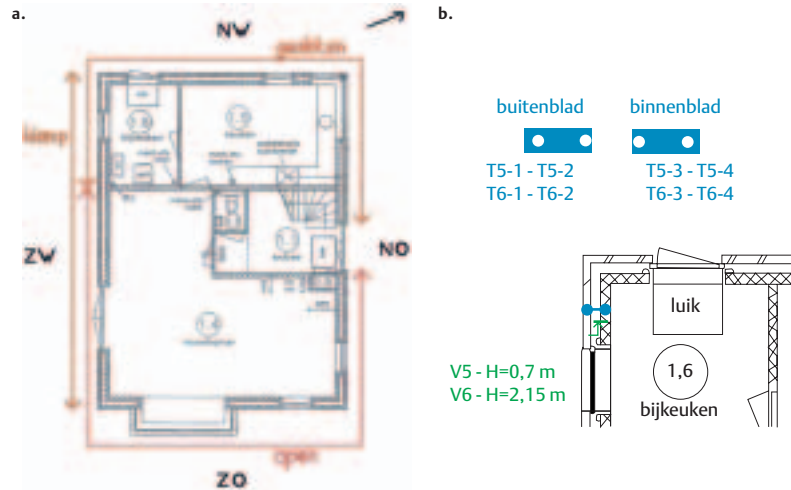
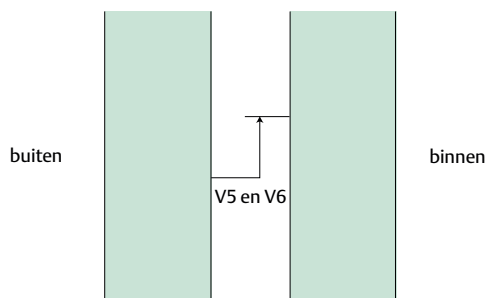
De binnentemperaturen in de winter blijken niet veel te variëren zoals gebruikelijk indien een goede verwarmingsinstallatie is geïnstalleerd. Op zonnige herfst- en winterdagen kan de temperatuur van het buitenspouwblad oplopen tot 40 °C bij buitentemperaturen die lager liggen dan 15 °C. Opvallend is eveneens het relatief grote temperatuurverschil tussen de temperatuur van het buitenspouwblad aan de buitenzijde en de spouwzijde. In extreme omstandigheden kan er een temperatuurverschil van nagenoeg 10 °C worden vastgesteld.

In de zomer loopt de binnentemperatuur op tot ongeveer 30 °C. Dit is nauwelijks minder dan de gemeten buitentemperatuur. Op het buitenspouwblad werden hierbij temperaturen tot bijna 50 °C gemeten, terwijl de temperatuurgradiënt over het buitenspouwblad beperkt bleef tot maximaal 7 °C.

De faseverschuiving tussen de buitentemperatuur en de binnentemperatuur varieert tussen 4 en 6 uur. Bij het buitenspouwblad is een faseverschuiving voor de oppervlaktetemperatuur aan de spouwzijde ten opzichte van de buitenzijde gemeten van 10 minuten in de winter tot bijna 1 uur in de zomer.

### Vervormingsverschillen

Tijdens de meetperiode werden de verschilvervormingen tussen het binnen- en buitenspouwblad gemeten op de hoeken van het gebouw (zie fig. 7). Tabel 2 geeft een overzicht van de gemiddelde en de extreme waarden van de verschilvervorming tussen de spouwbladen per maand.



- 5 | Wolfswaardwoning  
a. plattegrond begane grond  
b. detail westhoek met sensorposities
- 6 | Doorsnede spouwmuur; positie temperatuursensoren  
gem. temperatuur buitenspouwblad  $T_{bu}$  = gemiddelde van T5-1, T5-2, T6-1 en T6-2  
gem. temperatuur binnenspouwblad  $T_{bi}$  = gemiddelde van T5-3, T5-4, T6-3 en T6-4



- 7 | Positie vervormingsensoren in plattegrond
- 8 | Wachtbuizen in de spouw voor meetapparatuur

9 | Verticale wanddoorsnede met temperatuursensoren  
 gem. oppervlaktetempe-  
 raatuur buitenblad  $T_{opvl}$  =  
 gemiddelde van T5-1 en  
 T6-1

10 | Positie temperatuur-  
 sensoren in doorsnede  
 gem. temperatuur bui-  
 tenblad aan buitenzijde  
 $T_{bu:bu}$  = gemiddelde van  
 T5-1 en T6-1  
 gem. temperatuur bui-  
 tenblad aan spouwzijde  
 $T_{bu:sp}$  = gemiddelde van  
 T5-2 en T6-2  
 gem. temperatuur bin-  
 nenblad aan spouwzijde  
 $T_{bi:sp}$  = gemiddelde van  
 T5-3 en T6-3  
 gem. temperatuur bin-  
 nenblad aan binnenzijde  
 $T_{bi:bi}$  = gemiddelde van  
 T5-4 en T6-4

Over de totale meetperiode werd een maximaal ver-  
 schil van 1,28 mm gemeten. Het grootste maande-  
 lijks verschil bedroeg 0,85 mm, terwijl de maximale  
 dagelijkse differentiële vervorming opliep tot  
 0,66 mm.

Opvallend is het verschijnsel dat de vervorming vanaf  
 het begin van de metingen continu oploopt tot okto-  
 ber. Pas dan is een eerste lichte daling zichtbaar. Dit  
 kan erop wijzen dat de vervorming gedeeltelijk ir-  
 reversibel is. Om dit fenomeen te kunnen bevestigen  
 zijn extra meetperioden ingepland (winter 2004-2005  
 en zomer 2005).

**Temperaturen in CUR-Aanbeveling 82**

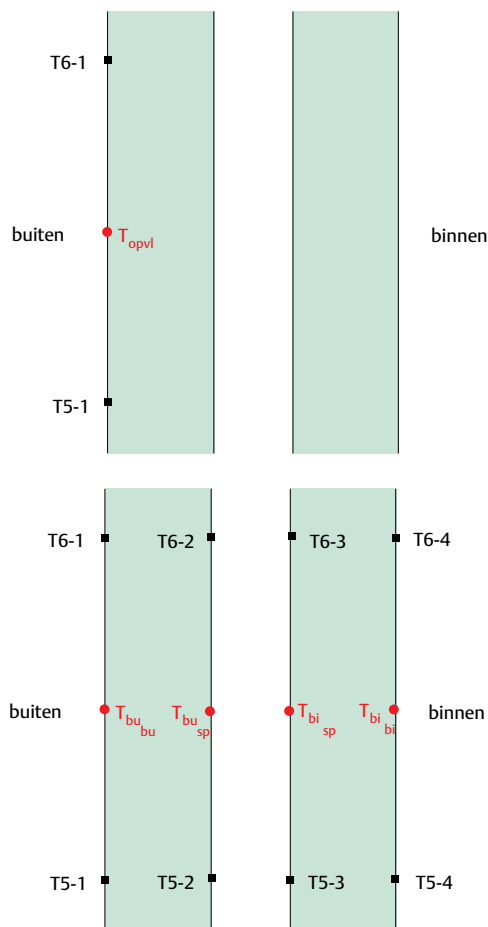
In tabel 7 van CUR-aanbeveling 82 [2] zijn reken-  
 waarden opgenomen voor de temperatuur van bui-  
 ten- en binnenspouwbladen in metselwerk. Om een  
 vergelijking te kunnen maken met deze waarden  
 zijn de gemeten waarden van beide oppervlakken  
 van de spouwbladen gemiddeld (zie fig. 6).  
 Tabel 3 geeft een overzicht van de gemiddelde en de  
 extreme waarden van deze temperatuur per maand.  
 Een vergelijking van deze meetwaarden met de  
 rekenwaarden uit CUR-Aanbeveling 82 (tabel 4)  
 toont aan dat de CUR-richtwaarden goed overeen-  
 stemmen met de werkelijkheid. Enkel de extremen

Tabel 1 | Gemiddelde en extreme oppervlaktetemperaturen in °C

maand		oppervlaktetemperatuur		
		buitenblad		
		min.	gem.	max.
dec.	2003	-5,8	4,1	28,8
jan.	2004	-3,8	3,3	20,0
feb.	2004	-3,9	5,9	25,2
maart	2004	-2,8	7,4	35,8
april	2004	1,9	12,9	38,3
mei	2004	4,8	15,4	40,2
juni	2004	7,5	17,6	45,7
juli	2004	10,1	19,0	44,6
aug.	2004	10,8	21,0	49,2
sept.	2004	7,4	18,2	47,5
okt.	2004	2,7	13,0	38,9

Tabel 2 | Gemiddelde en extreme differentiële maandvervormingen in mm

maand		vervorming		
		min.	gem.	max.
dec.	2003	-0,41	-0,06	0,37
jan.	2004	-0,27	-0,01	0,31
feb.	2004	-0,15	0,11	0,38
maart	2004	-0,12	0,18	0,73
april	2004	0,07	0,30	0,68
mei	2004	0,17	0,36	0,72
juni	2004	0,25	0,42	0,76
juli	2004	0,31	0,46	0,81
aug.	2004	0,22	0,46	0,78
sept.	2004	0,27	0,51	0,87
okt.	2004	0,23	0,47	0,82



zijn minder extreem, wellicht ten gevolge van de  
 relatief korte meetperiode.  
 Hiermee is aangetoond dat een aanpassing van de  
 waarden in tabel 12 van NEN 6702 gerechtvaardigd is  
 [3].

**Vervormingen CUR-Aanbeveling 82**

Voor de evaluatie van mogelijke scheurvorming in  
 metselwerk of lijmwerk is vooral de differentiële ver-  
 vorming tussen verschillende bouwdelen van belang.  
 De verschilvervorming tussen binnen- en buiten-  
 spouwblad kan volgens CUR-Aanbeveling 82 worden  
 berekend op basis van de gemiddelde waarden van de  
 temperaturen, ervan uitgaande dat de vervorming in  
 het midden van de wand nagenoeg gelijk is aan nul.  
 Aangenomen wordt dat de uitzettingscoëfficiënt ( $a$ )  
 van zowel binnen- als buitenblad 0,006 mm/m/°C is  
 (volgens NEN 6790 [4]).  $T_{bu}$  is de laagste temperatuur  
 van het buitenblad en  $T_{bi}$  is de hoogste temperatuur  
 van het binnenblad op de ‘extreme’ dag. De tempera-  
 tuurverschillen voor zomer en winter zijn overgeno-  
 men uit tabel 3.

*dagelijks verschil (9 december 2003):*

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{\Delta T, \text{dag}} &= \alpha_{bu} \cdot T_{bu} - \alpha_{bi} \cdot T_{bi} - T_{metsel} (\alpha_{bu} - \alpha_{bi}) \\ &= 0,006 \cdot -3,125 - 0,006 \cdot 15,8 - T_{metsel} \cdot \\ &\quad (0,006 - 0,006) \\ &= -0,11 \text{ mm/m} \end{aligned}$$

Er is 0,66 mm vervorming gemeten over de helft van de ZW-gevel van 11 m wat resulteert in:

$$\Delta\varepsilon_{\Delta T; \text{dag}} = -0,66 / 5,5 = -0,12 \text{ mm/m}$$

*zomer-winter verschil:*

Temperaturen uit tabel 3:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{\Delta T; \text{seizoen}} &= \alpha_{\text{bu}} (T_{\text{bu}; \text{zomer}} - T_{\text{bu}; \text{winter}}) - \alpha_{\text{bi}} (T_{\text{bi}; \text{zomer}} - T_{\text{bi}; \text{winter}}) \\ &= 0,006 \cdot (46,0 - -5,5) - 0,006 (30,2 - 18,4) \\ &= 0,24 \text{ mm/m} \end{aligned}$$

Er is 1,28 mm vervorming gemeten over de helft van de ZW-gevel van 11 m wat resulteert in:

$$\Delta\varepsilon_{\Delta T; \text{dag}} = 1,28 / 5,5 = 0,23 \text{ mm/m}$$

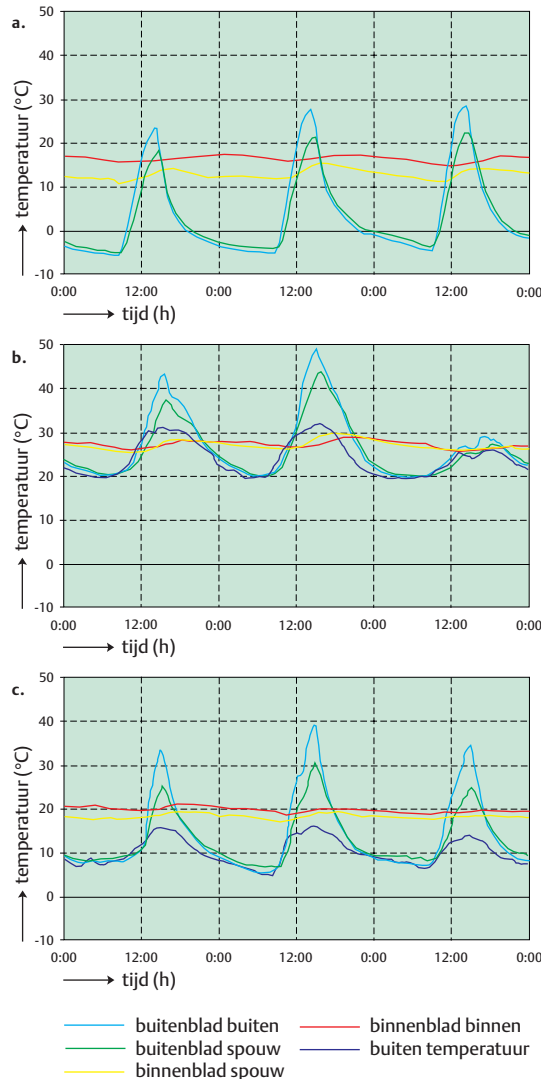
Beide berekende waarden komen goed overeen met de gemeten waarden.

**Conclusies**

In dit artikel is slechts een beperkt aantal aspecten van het in situ onderzoek aan de Wolfswaardwoning belicht. Hierbij werd enkel aandacht besteed aan het gedrag van de spouwmuur in de ZW-gevel. Op basis van de metingen op deze gevel kan worden geconcludeerd dat de richtwaarden die in CUR-Aanbeveling 82 zijn opgenomen voor de buitentemperaturen van buitenspouwbladen een realistischer weergave zijn van de werkelijkheid dan de waarden die in NEN 6702 zijn vermeld. Tevens kan worden vastgesteld dat de maximale gemiddelde temperatuur van het buitenspouwblad aanzienlijk kleiner is dan de extreme oppervlaktetemperatuur aan de buitenzijde. Bij het vervolgonderzoek zal meer in detail worden onderzocht in hoeverre de verschilvervorming tussen beide spouwbladen al dan niet reversibel is. ■

**Literatuur**

- Bertram G., Martens D.R.W., Rapport: Metingen aan de Wolfswaardwoning. TU/e, 2004.
- CUR-Aanbeveling 82, Beheersing van scheurvorming in steenconstructies. CUR, Gouda, 2001.
- NEN 6702, Technische grondslagen voor bouwconstructies - Belastingen en vervormingen. 2001.
- NEN 6790, Steenconstructies - Basiseisen en bepalingsmethoden. 1991.



11 | Temperatuurverloop over de ZW-gevel (spouwmuur) in drie 'extreme' perioden  
a. 8 t.m. 10 december 2003; geen buitentemperatuur gemeten  
b. 5 t.m. 7 augustus 2004  
c. 8 t.m. 10 oktober 2004

Tabel 3 | Gemiddelde en extreme maandtemperaturen in °C

maand	buitensblad			binnensblad		
	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
dec. 2003	-5,5	4,1	25,6	10,0	14,7	18,1
jan. 2004	-3,7	3,4	18,0	10,3	14,4	17,9
feb. 2004	-3,8	5,8	22,3	9,2	15,2	18,4
maart 2004	-2,2	7,3	33,4	10,9	15,5	19,8
april 2004	2,3	12,6	35,5	12,8	17,6	21,8
mei 2004	5,2	15,1	36,9	14,9	19,3	23,0
juni 2004	7,8	17,4	43,2	16,0	20,6	26,3
juli 2004	10,3	18,7	41,6	18,0	21,6	26,3
aug. 2004	11,0	20,8	46,0	17,8	23,1	30,2
sept. 2004	7,6	17,8	44,3	16,2	20,5	25,3
okt. 2004	3,0	12,8	34,7	14,3	17,9	21,0

Tabel 4 | Vergelijking temperatuurmetingen met waarden uit CUR-Aanbeveling 82

(winter: december t.m. februari; zomer: juli en augustus)

situatie	momentaan/gemiddeld		extrem	
	CUR	Wolfswaard	CUR	Wolfswaard
zomer-buiten	17	19,8	30-53	46,0
zomer-binnen	17	22,4	25	30,2
winter-buiten	4	4,4	-25	-5,5
winter-binnen	17	14,8	20	18,4