

## Duurzaam cement

Voor het gebruik in beton en metselspecie wordt wereldwijd jaarlijks meer dan  $3 \cdot 10^9$  ton cement geproduceerd. Portlandcement is de meest gebruikte soort cement. De productie van Portlandcement start met de calcinatie van kalksteen in een zogenoemde cementoven. Bij een temperatuur van 1100 K ontleedt kalksteen (calciumcarbonaat) volgens onderstaande reactievergelijking.



Het gevormde calciumoxide reageert vervolgens in de cementoven met de andere grondstoffen  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in verschillende verhoudingen tot zogeheten cementklinker. Uit cementklinker wordt door toevoeging van calciumsulfaat uiteindelijk Portlandcement bereid. In tabel 1 staat weergegeven welke verbindingen voornamelijk in cementklinker voorkomen.

**tabel 1**

soort stof	molaire massa ( $\text{g mol}^{-1}$ )	massa% in cementklinker
$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	172,3	29
$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	228,3	46
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	270,2	7,1
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	486,0	7,3

De productie van 1,0 ton cementklinker zorgt voor een uitstoot van 0,80 ton  $\text{CO}_2$ . Een groot deel daarvan komt vrij als het reactieproduct van de calcinatie.

- 4p 7 Bereken met behulp van tabel 1 hoeveel massaprocent van deze 0,80 ton  $\text{CO}_2$  geproduceerd wordt door de calcinatiereactie. Neem aan dat de  $\text{CO}_2$  uitstoot uitsluitend ontstaat bij de vorming van de in de tabel genoemde stoffen.

Een ander deel van de  $\text{CO}_2$  uitstoot komt niet vrij als reactieproduct in de calcinatie, maar wordt veroorzaakt doordat in de cementovens de temperatuur zeer hoog is, tot maximaal 1500 K. Bij deze hoge temperatuur verloopt de vorming van de cementklinker. De calcinatie en de vorming van cementklinker zijn beide endotherm.

- 3p 8 Bereken de reactiewarmte van de calcinatie van kalksteen.

Om de  $\text{CO}_2$  uitstoot bij de productie van cement te beperken zoekt men naar alternatieven voor Portlandcement. Het bedrijf Novacem heeft een nieuw proces ontwikkeld, waarbij met andere grondstoffen wordt gewerkt.

In de uitwerkbijlage die bij dit examen hoort, is een vereenvoudigd en onvolledig blokschema voor de productie van het zogeheten Novacemcement na de opstartfase weergegeven. In het productieproces wordt de verpoederde grondstof serpentine ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) in reactor R1 gemengd met water. Onder hoge druk en bij  $T = 440 \text{ K}$  wordt serpentine met  $\text{CO}_2$  vrijwel volledig omgezet tot magnesiumcarbonaat ( $\text{MgCO}_3$ ), siliciumdioxide ( $\text{SiO}_2$ ) en nog een andere stof. Deze reactie is exotherm en omkeerbaar.

- 3p 9 Geef de vergelijking van de reactie van  $\text{CO}_2$  met serpentine. Neem aan dat geen van de betrokken vaste stoffen oplost in het water.

De verblijftijd in R1 is zo gekozen dat zich een evenwicht kan instellen. In het mengsel dat R1 verlaat, bevindt zich dan nog een klein percentage serpentine.

- 2p 10 Leg uit of zich in het mengsel dat R1 verlaat een groter of kleiner percentage serpentine bevindt als de temperatuur in R1 hoger is dan  $440 \text{ K}$ .

De uit R1 afkomstige vaste stoffen worden in ruimte S gescheiden van het water. De vaste stoffen worden naar reactor R2 geleid, waar het magnesiumcarbonaat volledig reageert tot magnesiumoxide en koolstofdioxide ( $T = 970 \text{ K}$ ,  $p = p_0$ ). Deze reactie is endotherm.

Van de uit R2 afkomstige vaste stoffen wordt de helft direct naar een mengruimte gevoerd. De andere helft wordt naar reactor R3 geleid, waar het magnesiumoxide in een exotherme reactie bij kamertemperatuur volledig reageert met water en  $\text{CO}_2$  tot zogenoemd gehydrateerd magnesiumcarbonaat ( $\text{Mg}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ).

In een mengruimte worden vervolgens bij kamertemperatuur de vaste stoffen afkomstig uit R2 en R3 gemengd. Dit mengsel heet Novacemcement.

Voor het gehele proces hoeft geen water van buitenaf te worden aangevoerd.

- 4p 11 Teken in het blokschema op de uitwerkbijlage de ontbrekende stofstromen.
- Zet bij alle stofstromen de stof(fen) die daarbij hoort (horen).
  - Stofstromen voor serpentine hoeven niet te worden weergegeven.
  - Houd rekening met het feit dat men, waar mogelijk, stoffen recirculeert.

Zowel de  $\text{CO}_2$  uitstoot als het energieverbruik zijn bij de productie van Novacemcement lager dan bij de productie van Portlandcement.

- 3p 12 Leg uit dat zowel de  $\text{CO}_2$  uitstoot als het energieverbruik bij de productie van Novacemcement lager is dan bij de productie van Portlandcement.
- Noem daarbij twee aspecten waarin het energieverbruik van beide processen verschilt.
  - Noem daarbij één aspect waarin de  $\text{CO}_2$  uitstoot van beide processen verschilt.

