Volumestabiliteit van bouwstoffen in de (wegen)bouw.

Ir Nico van den Berg, Bouwstofadvies Bergen, Bergen(L)
Ir Gerlinde Roskam, Deltares, Utrecht
Copyright 20 januari 2018

Inleiding

In Nederland worden al sinds jaren recyclingmaterialen in de fundering van wegen toegepast. Materialen, zoals meng- of betongranulaat 0/31,5 mm zijn daar bekende voorbeelden van. Met deze producten zijn ook al jarenlang positieve ervaringen opgedaan. De eigenschappen van het materiaal zijn goed bekend en in het geval dat het materiaal afwijkt, betreft dat meestal een afwijking van de samenstelling of korrelverdeling met beperkt effect op het gedrag van het materiaal.
Er worden soms echter ook recyclingproducten op de markt gebracht, die voor onaangename verrassingen hebben gezorgd door volumevergroting. Voorbeelden zijn het gebruik van ontijzerd industrieel puin (OIP) en AVI-bodemas (tegenwoordig AEC-bodemas). De AVI-bodemas is zowel geïmmobiliseerd met cement als in ongebonden IBC-toepassingen toegepast. Over het gedrag van deze materialen, die vrijkomen uit thermische processen als smelterijen en verbrandingsinstallaties, is veel minder bekend en dat is meteen ook de reden dat ze in wegfunderingen niet of nauwelijks worden toegepast. Wegbeheerders moeten zorgen dat de mobiliteit gegarandeerd kan worden en zijn daarom huiverig om onbekende materialen toe te passen op plaatsen dicht onder het wegdekoppervlak. Overigens is AVI-bodemas wel succesvol op grote schaal toegepast als ophoogmateriaal onder bijvoorbeeld snelwegen en moet daarvoor voldoen aan de zeer beperkte civieltechnische eisen van artikel 22.52 van de Standaard RAW Bepalingen 2015, zonder eis aan de volumestabiliteit.
Gebleken is dat deze alternatieve bouwstoffen in de utiliteitsbouw wel met enige regelmaat hun weg hebben gevonden. Ze worden daar toegepast als alternatief voor in het bestek voorgeschreven opvullingen of funderingen van zand of menggranulaat onder bedrijfsvloeren van bijvoorbeeld distributiecentra. De combinatie van het grote volume waarin ze kunnen worden toegepast en de negatieve prijs (je krijgt er als afnemer een zak met geld bij), zorgt ervoor, dat de bouwkosten op korte termijn vaak met enkele tienduizenden tot enkele honderdduizenden euro's kunnen worden verlaagd. Helaas blijken deze schijnbaar goedkope alternatieven regelmatig op termijn voor problemen te zorgen, doordat er soms lokaal en soms meer globaal expansie optreedt. Als deze volume-instabiliteit optreedt, kunnen de herstelkosten gemakkelijk een veelvoud van de bouwkostenreductie bedragen. Er zijn gevallen bekend, waarbij na 7 jaar, de waarde van het gebouw met een bebouwd oppervlak ca 100.00 m^2 op nul Euro werd getaxeerd. In het meest extreme geval heeft de expansie zelfs zulke vormen aannemen, dat de constructieve veiligheid van het gebouw in het gedrang is gekomen.

In dit artikel wordt ingegaan op de oorzaken van volumetoename. Tevens wordt ingegaan op methoden om de zwelpotentie van materialen in te schatten en wordt tenslotte een voorstel gedaan om een eis te stellen aan de volumestabiliteit, die recht doet aan de omvang (=laagdikte) van de toepassing en de aard van de beoogde toepassing.

Het effect van expansie op de verharding of vloer

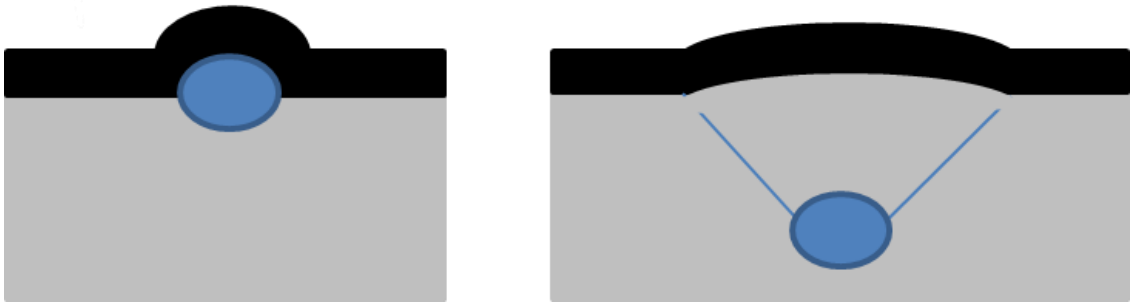
Volumestabiliteit betekent, dat een materiaal in zijn toepassing (nagenoeg) hetzelfde volume behoudt. Echter, sommige materialen uit thermische processen, zoals AVI-bodemas, OIP en soms ook slakkenmengsels bevatten reactieve stoffen. Door deze reactiviteit kunnen soms bulten en heffingen ontstaan tot wel 100 mm of meer (zie Figuur 1 en 2). Wanneer dit, zoals inmiddels al meermaals is vastgesteld, optreedt onder een vloer van een distributiecentrum, waar heftrucks of automatische stellingsystemen en sorteerlijnen moeten functioneren, kunnen ernstige problemen ontstaan door veelvuldige storingen in het bedrijfsproces. Ook kunnen problemen ontstaan met deuren die niet meer open of dicht kunnen. Zelfs kunnen gevels worden ontzet als gevolg van zijwaartse expansiekrachten tegen de funderingsbalken en zijn er, nabij leidingdoorvoeren door de vloer, lekkages opgetreden als gevolg van heffing.

Figuur 1 Voorbeeld van ernstige bultvorming in een asfaltverharding ca. 3 maanden na aanleg (fundering van ca. 0,5 m cementgebonden mengsel van AVI-bodemas en zeefzand)

Figuur 2 Voorbeeld van ernstige heffing van een vloer van staalvezelbeton ongeveer 3 jaar na aanleg (opvulling van ca. 1,3 m van ongebonden AVI-bodemas)

In alternatieve bouwstoffen afkomstig uit thermische processen kunnen reactieve stoffen aanwezig zijn die reageren met bijvoorbeeld water, koolzuurgas of zuurstof. Wanneer de reactieproducten een groter volume innemen dan het oorspronkelijke materiaal, kunnen er vervormingen optreden. Daarbij speelt ook de verdeling van de reactieve stoffen een grote rol. Komen deze fijn verdeeld in het materiaal voor, dan kan de expansie zich uiten in een min of meer gelijkmatig verdeelde heffing. Zijn de reactieve stoffen echter niet homogeen verdeeld, dan kan de aanwezigheid van brokstukken of pitten reactief materiaal leiden tot lokale expansie met bultvorming als gevolg.
Hoe lokale expansie zich uit, is mede afhankelijk van het type verharding. In een asfaltverharding kunnen door het pasteuze gedrag van asfalt geprononceerde bulten met scheuren van bovenaf ontstaan, maar bij een betonvloer zal door de stijfheid van het beton de gehele vloer iets opbollen rond de lokale zwelling(en). Er is dan sprake van ongelijkmatig verdeelde ondersteuning. Bij beton leidt dit vaak pas in een vrij laat stadium tot scheurvorming. Ook meer globale heffingen door gelijkmatig verdeelde reactieve delen kunnen bij verhinderde vervorming van bijvoorbeeld de rand van de betonvloer, leiden tot ernstige scheurvorming (zie Figuur 2).

Verder is in flexibele (asfalt)constructies de omvang van de bulten afhankelijk van de diepteligging van de pitten in de constructie. Als de pitten hoog in de fundering onder een asfaltverharding liggen, zal de bult relatief steile flanken en een kleine diameter krijgen. Bij dieper liggende pitten worden de flanken vlakker en wordt de diameter groter. Het bovengelegen materiaal vangt ook een deel van de expansie op, waardoor het effect kleiner is. Een vuistregel die door Bouwstofadvies Bergen wordt gehanteerd, is: de diameter van de bult die in asfalt ontstaat is ongeveer gelijk aan twee- tot driemaal de diepteligging van de pit. In Figuur 3 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 3 Hoog en laag gelegen expanderende pit onder een asfaltverharding

Wanneer een bult in een asfaltverharding voldoende sterk gekromd is, kan de rek aan de bovenzijde zo groot worden, dat er een scheur in het asfalt ontstaat (Figuur 4). Deze scheur bevindt zich recht boven de pit van reactief materiaal.
Wanneer onder een betonverharding lokale zwellingen optreden, wordt de vloer opgedrukt maar daarbij ontstaat een glooiende vervorming, die veel groter is dan de schaal waarop deze bulten ontstaan op. Als er scheuren ontstaan, hebben deze vaak een grote lengte en worden in het algemeen vooral veroorzaakt door globale heffing

van het funderingsmateriaal. Het is daarbij niet mogelijk om op basis van de vervorming en de scheurvorming, de exacte locatie van de lokale zwellingen te bepalen.

Figuur 4 Scheur in asfalt op de top van een bult (fundering van cementgebonden AVI-bodemas en zeefzand)

De volumevergroting van een deeltje in een granulaire fundering leidt tot het verstoren van de korrelstapeling. Naverdichting ten gevolge van gebruik van de vloer zal dit effect deels teniet doen, maar het geëxpandeerde deeltje neemt in de herschikte korrelstapeling wel meer ruimte in. Bij zwellende deeltjes in een gebonden fundering wordt de expansie verhinderd. Het gebonden materiaal rond deze zwelpit wordt echter van binnenuit belast op trek. Zodra de treksterkte in de omgeving van de pit wordt overschreden, ontstaat er een scheur. Omdat de constructie het gemakkelijkst naar boven kan uitwijken, zal de oriëntatie van de ontstane scheuren in de fundering min of meer horizontaal zijn. Het samengroeien van scheuren vanuit verschillende pitten, kan uiteindelijk tot een gelaagde structuur leiden (Figuur 5). De gelaagde structuur is zwakker dan de oorspronkelijke, gebonden laag en kan daardoor verder vergruizen. Pitten die hoog in een gebonden fundering aanwezig zijn, kunnen een soort pop-outs veroorzaken en bij gebruik onder asfalt vergelijkbare schade opleveren als hiervoor voor ongebonden funderingen werden beschreven (zie Figuur 1, Figuur 3 en Figuur 4).

Figuur 5 Samengroeiende scheuren in gebonden fundering

Welke reacties veroorzaken expansie?
Er zijn diverse stoffen die expansie kunnen veroorzaken, maar stoffen die we frequent aantreffen zijn metalen en metaaloxiden. Metalen als aluminium (Al) en ijzer (Fe) kunnen door oxidatie een aanzienlijke volumevergroting opleveren. Maar ook metaaloxiden als calciumoxide (CaO) en magnesiumoxide (MgO) kunnen door reactie met water of koolzuurgas nog fors expanderen. Voorwaarden voor expansief gedrag zijn:

- De reactie moet in voldoende mate en met zekere snelheid optreden. Daarvoor moeten zowel de reactieve stof als water, zuurstof of koolzuurgas beschikbaar zijn;
- De reactieproducten moeten niet of slecht oplosbaar zijn, of de oplosbaarheid moet door oververzadiging van het water worden beperkt.

Verschillende chemische reacties verlopen alleen in aanwezigheid van vocht. Daarbij speelt water soms zelf een rol in de reactie. In toepassingen op of in de bodem is altijd voldoende water beschikbaar om de reacties mogelijk te maken. Het grondwater staat in Nederland zelden ver onder de fundering, en ook boven het grondwaterpeil circuleert er bodemvocht in de vorm van waterdamp in de poriën van de zand- en funderingslagen. Door afkoeling van een verharding kan tegen de onderzijde daarvan condensatie optreden, waardoor het bovenste deel van de fundering extra vochtig kan zijn. De poreuze bouwstof neemt dit vocht op en maakt reacties mogelijk. Ook capillaire opzuiging van grondwater kan aanvoer van water naar de reactieve bouwstof verzorgen. Wisselingen in de beschikbaarheid van vocht zijn waarschijnlijk ook de oorzaak van variaties in opgetreden heffingen.

Wanneer zuurstof een rol speelt in de reactie, verloopt de reactie vaak trager. Zuurstof is in de bodem slechts beperkt aanwezig en wordt bijvoorbeeld ook gebruikt door micro-organismen en de afbraak van organische stof. Door wisselende grondwaterstanden of diffusie kan zuurstof worden aangevoerd, maar de toevoer van zuurstof is hierdoor beperkt.

Goed oplosbare reactieproducten lossen op in het poriewater en kunnen zo door diffusie verdwijnen richting de omgeving. Niet of slecht oplosbare reactieproducten worden niet of nauwelijks door het poriewater afgevoerd en blijven dus op de plaats van het reactieve materiaal achter.

IJzer en aluminium kunnen voorkomen in slakken maar ook in AVI-bodemas. Met name AVI-bodemas is een zeer agressief materiaal met een hoge pH en hoge chloride- en sulfaatconcentraties. Bij gebruikelijke toepassingen van aluminium, wordt het beschermd door de vorming van een oxidehuidje, maar in een agressief milieu, zoals in AVI-bodemas, oxideert en hydroxyleert het aluminium volledig, met een grote volumetoename tot gevolg. Vergelijkbare processen doen zich voor met ijzer en zelfs roestvaststaal kan onder deze condities worden aangetast. Omdat de gevormde reactieproducten slecht oplosbaar zijn in water, zetten ze zich direct op het moedermateriaal af en drukken omliggende korrels uiteen.

Metaaloxiden als calcium- en magnesiumoxide zijn in de aanwezigheid van water niet stabiel en vormen slecht-oplosbare hydroxiden. De omzetting van CaO verloopt bijvoorbeeld volgens de reactie:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad [1]$$

Uit 1 mol calciumoxide ontstaat dus 1 mol calciumhydroxide. De dichtheid van calciumoxide is ongeveer 3,3 g/cm^3, met een molmassa van 56 g/mol levert dat een specifiek volume van ca. 17 cm^3/mol. Voor calciumhydroxide geldt een dichtheid van ca. 2,24 g/cm^3, met een molmassa van 74 g/mol en daarmee een specifiek volume van 33 cm^3/mol. Dat betekent dus dat 1 mol CaO een volume van 17 cm^3 heeft en dat het reactieproduct van 1 mol $Ca(OH)_2$ ongeveer tweemaal zoveel volume heeft als het moedermateriaal. Een vergelijkbare reactie met een nagenoeg even grote volumetoename treedt op bij MgO.

Een andere reactie die tot expansie kan leiden is de reactie van aluminium of ijzer met zuurstof en water. Hier is als voorbeeld de reactie van aluminium weergegeven:

$$4Al + 3O_2 \rightarrow 2\ Al_2O_3\ [2]$$
$$2\ Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 4Al(OH)_3\ [3]$$

De omzetting van 4 mol aluminium met zuurstof levert dus 2 mol aluminiumoxide op, en na reactie met water 4 mol aluminiumhydroxide. Het specifiek volume van aluminium is 10 cm^3/mol (dichtheid 2,7 g/cm^3, molmassa 27 g/mol), van aluminiumoxide ca. 25 cm^3/mol (dichtheid 4 g/cm^3, molmassa 102 g/mol) en voor aluminiumhydroxide 32 cm^3/mol (dichtheid 2,4 g/cm^3, molmassa 78 g/mol) Uitgaande van 4 mol aluminium (4x10 = 40 cm^3) levert de oxidatie een volumevergroting van 25% op (2 mol aluminiumoxide heeft een volume van 50 cm^3). Deze 2 mol aluminiumoxide levert na reactie met water 4 mol aluminiumhydroxide met een volume van 128 cm^3 op, een volumevergroting van ruim 320% ten opzichte van het oorspronkelijke uitgangsmateriaal.

In Tabel 1 zijn voorbeelden gegeven van moedermateriaal met een reactieproduct. De resulterende volumevergroting van de hier gepresenteerde stoffen is enkele tientallen tot honderden procenten. Dat betekent dat als deze stoffen in discrete deeltjes van enige omvang aanwezig zijn in een fundering, er lokale verstoringen kunnen optreden.

Tabel 1 Voorbeelden van volume vergroting*

Moedermateriaal				Reactieproduct					
	molmassa	dichtheid	specifiek volume		molmassa	dichtheid	specifiek volume	mol verhouding moedermateriaal/reactieproduct	volumetoename
stofnaam	g/mol	g/cm^3	cm^3/mol	stofnaam	g/mol	g/cm^3	cm^3/mol	-	(%) V/V
CaO	56,1	3,35	16,7	$Ca(OH)_2$	74,1	2,24	33,5	1	198 %
CaO	56,1	3,35	16,7	$CaCO_3$	100,1	2,71	36,9	1	221 %
MgO	40,3	3,58	11,3	$Mg(OH)_2$	58,3	2,34	24,9	1	220 %
Al	27,0	2,70	10,0	Al_2O_3	102,0	3,97	25,5	2	128 %
Al_2O_3	102,0	3,97	25,5	$Al(OH)_3$	78,0	2,42	32,2	0,5	253 %
Al	27,0	2,70	10,0	$Al(OH)_3$	78,0	2,42	32,2	1	322 %
Fe	55,8	7,86	7,1	Fe_2O_3	159,7	5,24	30,5	2	215 %
Fe_2O_3	159,7	5,24	30,5	$Fe(OH)_3$	106,9	4,25	25,1	0,5	165 %
Fe	55,8	7,86	7,1	$Fe(OH)_3$	106,9	4,25	25,1	1	354 %

* Bronnen:

- Handbook of Chemistry and Phisics 64th edition, 1983-1984, CRC Press, Boca Raton, Florida
- Wikipedia

Herkomst en voorbehandeling

De reactieve restproducten komen veelal uit processen waarin hoge temperaturen een rol spelen, zoals verbrandingsovens en smelterijen. Door de hoge temperatuur worden carbonaten en hydroxiden omgezet naar oxiden (het omgekeerde van wat in de vorige paragraaf is beschreven). Bij de productie van staal wordt bijvoorbeeld calciumoxide in een overmaat toegepast, waardoor er CaO in de staalslak achterblijft.

Magnesiumoxide komt in hoge gehalten voor in vuurvaste bekledingen. Door slijtage van de vuurvaste bekleding kan een kleine hoeveelheid in de slakken belanden. Wanneer de vuurvaste bekleding versleten is en uit de ovens wordt verwijderd, belandt het als ovenpuin bij het industriële puin. Na ontijzering daarvan wordt het aangeboden als ontijzerd industrieel puin, ofwel OIP.

Bij gebruik in contact met water kan het in dit materiaal aanwezige MgO hydroxyleren. Aangezien in de vuurvaste bekleding zeer hoge aandelen MgO voorkomen, kan de volumetoename van OIP ook zeer extreem zijn, afhankelijk van het aandeel vuurvaste bekleding. In verschillende projecten is meermaals onderzoek aan OIP-monsters uitgevoerd met de stoomproef volgens NEN-EN 1744-1 artikel 19.3. Daarbij zijn volumetoenamen van ongeveer 40% in 1 week waargenomen. Ook materiaal dat al enkele jaren eerder was toegepast onder de vloer van distributiecentra, vertoonde na

een week (de standaardduur van de proef) nog 25 - 30 % zwel. Pas na drie tot vier weken trad er geen noemenswaardige zwel meer op maar op dat moment , was de totale volumetoename toch nog ca. 40%, ondanks dat er al de nodige expansie in de praktijk was opgetreden.
In een ander project zijn brokjes vuurvaste bekleding in een verder onverdachte fundering van menggranulaat aangetroffen. Deze hebben tot ernstige schade geleid (zie Figuur 6). Met name de deeltjes die vrijwel aan het oppervlak van de fundering waren beland, veroorzaakten al binnen enkele weken na aanbrengen van het asfalt ernstige bultvorming. De aanwezigheid van vuurvaste bekleding in het menggranulaat is in eerste instantie vastgesteld op basis van het magnesiumgehalte van ca. 70 % m/m in enkele brokstukken Later werd dit bevestigd aan de hand van de voorraad ovenpuin op het terrein van de producent van het menggranulaat.
Van dit ovenpuin wordt soms gesteld, dat het geïnertiseerd is door de hoge temperatuur waaraan het is blootgesteld. Dat blijkt in de praktijk echter niet het geval. De grotere kristallen MgO reageren weliswaar alleen aan de buitenkant maar de reactie gaat wel door. Doordat het water in het reactieproduct wordt opgenomen wordt de balans in de vochtverdeling verstoort. Er ontstaat als het ware een tekort aan water, dat vanuit de omgeving zal worden aangevuld via waterdampdiffusie of capillaire zuiging.
Net als vuurvaste bekleding is calciumoxide in staalslakken langdurig aan hoge temperaturen blootgesteld, waarna bij afkoeling relatief grote kristallen gevormd kunnen worden. Deze kristallen worden ook wel dood gebrande kalk genoemd, hetgeen betekent dat ze traag reageren. Dit in tegenstelling tot gebrande of ongebluste kalk, dat als fijn amorf poeder extreem snel reageert met water. Dat de reactie van deze dood gebrande kalk traag verloopt, betekent, dat het proces langdurig kan doorgaan met traag toenemende vervormingen als gevolg. Vergroting van het specifieke oppervlak door verkleining van de deeltjes kan helpen het proces te versnellen. Staalslak wordt daarom na het ontstaan gebroken en “gerijpt” door het enige weken tot maanden op te slaan en goed te bevochtigen. Een groot deel van de calciumoxide zal daardoor reageren tot hydroxide waardoor de expansie al vóór de toepassing in een fundering kan optreden. Het doel is dat na de rijping de expansie in de fundering vrijwel nihil is geworden. Hierbij moet men bedenken dat het gehalte calciumoxide in dit soort materialen vak slechts enkele procenten bedraagt.
Voor materialen als ovenpuin en OIP met extreem hoge aandelen magnesiumoxide is rijping geen optie. Er moet zeer veel materiaal reageren, wat veel tijd kost, omdat water dat het depot binnen dringt wordt geconsumeerd in de reactie. Het duurt daardoor zeer lang voordat de totaal beschikbare hoeveelheid MgO heeft kunnen reageren. Daarbij komt, dat door de reactie de harde dichte korrels van het moedermateriaal uiteenvallen en verpulveren. Het gevolg is, dat de resten uit fijn poeder bestaan en niet meer geschikt zijn als fundering.
AVI-bodemas komt vrij bij de verbranding van afvalstoffen. De grove assen worden gekoeld en zo goed mogelijk ontdaan van metalen. De verse bodemassen worden gedurende enkele maanden opgeslagen en nat gehouden om de reactiviteit te reduceren. Tegenwoordig worden AVI-bodemassen steeds verder opgewerkt, zodat ze milieuhygiënisch minder bezwaar

Figuur 6 Bult met scheurvorming ten gevolge van expanderend deeltje vuurvaste bekleding in fundering van menggranulaat (ca. 3 weken na aanbrengen van het asfalt)

Onderzoeksmethoden

De Standaard RAW Bepalingen 2015 verwijzen in artikel 80.16.10 voor LD-staalslakmengsel naar NEN-EN 1744-1 artikel 19.3, de stoomproef (zie Figuur 7). In deze proef wordt een monster in een mal met geperforeerde bodem verdicht en gedurende 1 week met stoom doorblazen. De gemiddelde heffing wordt gemeten op het hart van het proefstuk.

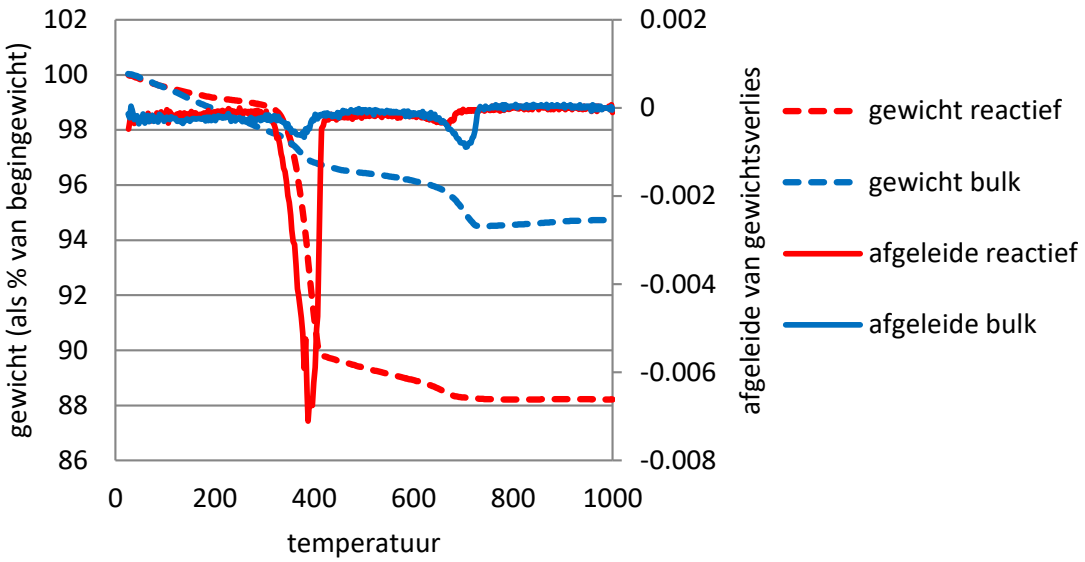
Voor AVI-bodemas is in Duitsland een andere test ontwikkeld, omdat de zwel niet door hydroxylering van calcium- en magnesiumoxide wordt veroorzaakt (zoals in staalslakken), maar juist door de fijne fractie en door oxidatie van de metalen. Hiervoor is een proef ontwikkeld waarbij een monster in een mal met geperforeerde bodem wordt verdicht en vervolgens gedurende 30 dagen in een laagje water van 50 °C wordt gezet. In tegenstelling tot de stoomproef, kan er in deze proefopzet nog steeds zuurstof en kooldioxide bij het monster komen.

Figuur 7 Stoomproefapparaat

Naast de directe meting van de heffing kan ook naar de mineralogische samenstelling van het monster worden gekeken. Hierbij kunnen we gebruik maken van verschillende technieken:

- Thermogravimetrische analyse (TGA);
- Koolstof en zwavel analyse (CS);
- Röntgen fluorescentie (XRF);
- Röntgen diffractie (XRD).

De TGA maakt gebruik van de eigenschap dat verschillende zouten bij verschillende temperaturen ontleden. Door de TGA zo te programmeren dat de temperatuur met 1 °C per minuut stijgt tot 1000°C en het gewicht van het monster continue wordt bepaald, is de gewichtsafname aan verschillende mineralen toe te schrijven. Wanneer meerdere processen in hetzelfde temperatuurtraject een gewichtsafname veroorzaken of wanneer een mineraal niet volledig heeft gereageerd op het moment dat het volgende mineraal ontleedt, wordt de interpretatie door het overlappen pieken bemoeilijkt. Magnesiumhydroxide ontleedt bijvoorbeeld bij ongeveer 350 °C; een gewichtsafname rond deze temperatuur kunnen we, toeschrijven aan het ontwijken van water uit deze magnesiumverbinding (zie Figuur 8). Eventuele storende factoren zijn de verbranding van organische stof en het ontwijken van water uit kleimineralen in hetzelfde temperatuurtraject.



Figuur 8 Gewichtsafname door de aanwezigheid van magnesiumhydroxide

In Figuur 8 is op de linker as het gewicht ten opzichte van het begingewicht (gestippelde lijnen) en op de rechter as de afgeleide van de gewichtsafname (doorgetrokken lijnen) weergegeven. In het specifiek bemonsterde reactieve materiaal treedt een sterke gewichtsafname rond 350 °C. In het bulk materiaal zien we deze gewichtsafname ook, maar minder geprononceerd, en daarnaast een gewichtsafname door de aanwezigheid van calciumcarbonaat (bij 700 °C). Slechts één derde deel van het magnesiumoxide in het reactieve materiaal is al omgezet in magnesiumhydroxide. Conclusie: er kan lokaal nog forse zwel optreden.

Door de resultaten van de TGA-analyse te combineren met de resultaten van een XRF- (totaal gehalte van o.a. Si, Al, Fe, Ca, Mg) en CS-analyse (totaal koolstof en zwavel), kan de mineralogische samenstelling van een monster ontrafeld worden. Op basis van de verhouding tussen het oorspronkelijke materiaal en het reactieproduct, kan een schatting gegeven worden van de nog beschikbare reactiviteit in het materiaal en dus van het risico op expansie.
Vooral als er sprake is van verse reactieproducten (nieuwvormingen) komen deze meestal voor in amorfe toestand. Daarom wordt er in eerste instantie gebruik gemaakt van XRF en niet van XRD. Als er meer kristallijne structuren aanwezig zijn, kan met XRD een nauwkeuriger determinatie van de mineralen worden uitgevoerd.

Eisen
In de praktijk zijn er distributiecentra gebouwd met toepassingsdikten van 1,3 en 1,6 m AVI-bodemas onder de vloer, waarin na enkele jaren zodanige heffingen zijn opgetreden, dat de stelmogelijkheden van daarop aanwezige installaties onvoldoende bleken. In alle gevallen was de ongebonden AVI-bodemas onder certificaat (BRL 2307) geleverd, zodat het materiaal vóór toepassing minimaal zes maanden gerijpt moest zijn.

Kennelijk is deze periode te kort om het materiaal geschikt te maken voor grootschalige toepassing in dit soort grote laagdikten onder een bedrijfsvloer.
Omdat er voor een opvulling onder een bedrijfsvloer vaak geen specifieke bouwstofeisen geformuleerd zijn, wordt voor de beoordeling van alternatieve bouwstoffen regelmatig teruggegrepen op de Standaard RAW Bepalingen. Maar helaas worden daarin geen algemene eisen gesteld aan de volumebestandheid van bouwstoffen voor aanvulling en ophoging of fundering, zodat dit aspect bij het aanbieden van een alternatief materiaal vrijwel altijd buiten beschouwing blijft. Alleen voor staalslakmengsel wordt een bovengrens aan de volumetoename gesteld: 5% volumetoename na 168 uur stomen. Wanneer staalslak aan de eis voldoet kan een toepassingsdikte van 0,3 m in principe leiden tot 15 mm heffing. Er wordt in deze stoomproef echter niet gekeken naar de helling van de zwelcurve. Vermoedelijk is dat niet in het voorschrift opgenomen, omdat de proef specifiek voor (staal)slakkenmengsels is ontwikkeld en op basis van ervaring de reactie na 168 uur (1 week) was afgelopen. Voor alternatieve bouwstoffen als OIP, waarvoor deze test ook zeer geschikt is, blijkt deze termijn echter veel te kort om het einde van de reactie te hebben bereikt.
Voor een weg zonder hoogtebeperkingen is een expansie van 5% in het funderingsmateriaal in het algemeen geen groot probleem als het fenomeen voldoende gelijkmatig optreedt. Voor kritische infrastructuur is variabele expansie onacceptabel. Bij hoge snelheden leiden bulten tot discomfort of zelfs gevaar door verticale versnellingen en bij transportlijnen in bijvoorbeeld sorteerinstallaties leiden deze ongelijkmatige heffingen tot storingen in het proces.
Bouwstofadvies Bergen pleit er dan ook voor om voor kritische toepassingen van alternatieve bouwstoffen, een eis voor de maximaal toelaatbare heffing in het werk te formuleren. Daarbij wordt dus niet een alleen eis aan de maximaal toelaatbare volumetoename gesteld, omdat de potentiële heffing ook afhankelijk is van de toepassingsdikte. Omdat de zijdelingse opsluiting vaak zeer groot is, uit de volumetoename zich voornamelijk als een heffing van de vloer.
De eis zou bijvoorbeeld vastgesteld kunnen worden op maximaal 10 mm absolute theoretische heffing. Als dan een opvulling wordt gerealiseerd van 1 m dikte, dan is in laboratoriumproeven maar 1% heffing toelaatbaar en bij een toepassingsdikte van 0,3m kan 3% worden geaccepteerd.
Ter vergelijking: In Duitsland wordt in de expansietest voor AVI-bodemas een volumetoename van maximaal 0,3% in 30 dagen of, bij overschrijding daarvan 0,5% na 120 dagen toegestaan, ongeacht de toepassingsdikte. Dit zou bij een toepassingsdikte van 1 m, theoretisch tot maximaal 3 tot 5 mm heffing leiden of in meer gebruikelijke laagdikten in wegfunderingen van ca. 0,3 m komt dit dus in de orde van 1 á 2 mm.

Conclusie

Hergebruik van restproducten uit thermische processen als alternatieve bouwstof in kritische toepassingen vergt extra aandacht. Na toepassing van dit soort materialen is al veel schade ontstaan als gevolg van het optreden van expansie van reactieve deeltjes. Door het ontbreken van een algemene eis aan de volumestabiliteit van bouwstoffen in Standaard RAW Bepalingen worden potentiële gebruikers niet geattendeerd op eventuele risico's aan een product. Zeker voor recyclingmaterialen die een thermische

behandeling hebben ondergaan of die ontstaan zijn bij temperaturen boven 400 °C zou om die reden uit voorzorg een onderzoek uitgevoerd moeten worden naar de volumestabiliteit. De uit te voeren proeven zijn afhankelijk van het soort product en de op te leggen eis aan de maximaal toelaatbare volumetoename zou afgeleid moeten worden van de maximaal toelaatbare heffing van de vloer en de toepassingsdikte van het potentieel reactieve materiaal.