

Modelleren van asfalt verdichting met de discrete elementen methode en laboratorium onderzoek

T.J. Ormel, H.L. ter Huerne, V. Magnanimo, S. Luding
Tire-Road Consortium, CTW, Universiteit Twente

SAMENVATTING:

Asfalt is een belangrijk verhardingsmateriaal. Naast een acceptabele prijs, zijn duurzaamheid, stroefheid en voldoende weerstand tegen veroudering en verkeersbelastingen belangrijke aspecten. Een goede conditie van de asfaltverharding is noodzakelijk voor veilig gebruik van de mogelijkheden voor verkeer en vervoer binnen onze maatschappij. Het verdichtingsproces is hierin erg belangrijk, want dit bepaald de uiteindelijke kwaliteit van de verharding bij gebruik van het asfalt. Tijdens het verdichtingsproces wordt het aggregaat in het asfalt dichter op en in elkaar gedrukt en lucht verdreven uit het asfalt. Het verdichten is hoofdzakelijk gebaseerd op ervaringskennis (een vakmanschap), men weet welk resultaat bij benadering mag worden verwacht als onder vergelijkbare omstandigheden met vergelijkbare mengsels wordt gewerkt. Echter als er buiten het ervaringsgebied gewerkt moet worden, zoals bij het intreden van nieuwe mengsels, is het te verwachten resultaat onzeker. Numerieke modellen zouden hier meer inzicht kunnen bieden. Het blijkt echter lastig om een complex materiaal als asfalt te modelleren, huidige gedetailleerde, realistische modellen zijn vaak complex en worden op een kleine schaal, of slechts tweedimensionaal toegepast. In deze studie is een eenvoudig driedimensionaal model opgesteld, gebaseerd op de discrete elementen methode (DEM), waarmee door het aanbrengen van een eenassige belasting verdichting is nagebootst. Het gedrag van het asfalt wordt voorgeschreven door het gebruikte contactmodel (in DEM), opgetreden vervormingen blijken goed overeen te komen met laboratorium proeven waar eveneens eenassige verdichting is nagebootst. Zodat relevante contactmodel parameters gelinkt kunnen worden aan de fysische aspecten van het asfalt. In de bijdrage beschrijven we beknopt het model, de uitgevoerde simulaties en vergelijking van numerieke resultaten met laboratorium testen.

Inleiding

Asfalt is een composiet materiaal dat bestaat uit vaste deeltjes (aggregaat, vulstoffen en zand), een viskeuze component (de bitumen), en poriën gevuld met lucht. Bij het beschouwen van asfalt kan er onderscheid gemaakt worden in de staat waarin het mengsel zich bevindt: a) heet en niet verdicht en b) verdicht en bij omgevingstemperatuur. Tijdens het verdichtingsproces wordt het asfalt aggregaat dichter op elkaar gedrukt en lucht verdreven uit het asfalt. De vloeistof in het mengsel (die heet of koud kan zijn, dat wil zeggen meer of minder viskeus) smeert de contactvlakken tussen de aggregaat componenten en maakt beweging gemakkelijker. De eigenschappen van het asfalt hangen af van de oorspronkelijke componenten: het aggregaat (modulus, vorm en afmetingen) en de eigenschappen van het bindmiddel. Daarnaast is ook het mineraal skelet en de interactie tussen mastiek (de combinatie van bitumen, zand en vulstoffen) en aggregaat bepalend voor het materiaalgedrag.

Voor de analyse van asfalt is het zinvol om drie lengte schalen te introduceren: de micro-, meso- en macroschaal. De interactie tussen mastiek en het oppervlak van één enkele steen van het aggregaat vindt plaats op de microschaal. De interactie tussen meerdere stenen met mastiek vindt plaats op de mesoschaal. Het gedrag van de gehele weg wordt beschreven op de macroschaal. De kinematica op de verschillende schalen is bepalend voor het totale materiaalgedrag. Echter, in de professionele asfaltwereld zijn fundamentele constitutieve modellen die het gedrag op de micro- en mesoschaal beschrijven nauwelijks of niet aanwezig. In de praktijk worden empirische modellen op de macroschaal gebruikt om fenomenen als scheurvorming, spoorvorming en rafeling te beschrijven. Echter, het gedrag van aggregaat en mastiek en hun interactie, kan door gebruik te maken van empirische modellen niet goed fundamenteel beschreven en bestudeerd worden. Realisatie van een betrouwbaar model dat op micro en mesoschaal het gedrag van een asfalt mengsel zou kunnen simuleren, zou een welkome aanvulling zijn op huidige bestaande empirische modellen [10,18].

De interactie tussen mastiek en aggregaat kan effectief gemodelleerd worden met behulp van de Discrete Elementen Methode (DEM) [2]. Binnen DEM wordt een systeem van deeltjes gesimuleerd door het beschrijven van de translatie en rotatie van deeltjes volgens Newton's wetten. Krachten volgen uit de beschrijving van het contact tussen deeltjes. In studies waar DEM is toegepast voor het modelleren van asfalt wordt er onderscheid gemaakt in drie verschillende fasen: grof aggregaat, mastiek (fijn aggregaat, zand, bitumen en vulstoffen) en holle ruimte [4, 6, 14]. Deze fasen worden gemodelleerd met bolvormige of cirkelvormige deeltjes. Het meeste uitgevoerde onderzoek is tweedimensionaal, hoewel onlangs driedimensionale modellen zijn verschenen [7, 19]. Eén enkele steen uit het aggregaat kan worden beschouwd als één enkel deeltje of als een groep van deeltjes in DEM, zodat onregelmatige (niet bol- of cirkelvormige) vormen kunnen worden gemodelleerd. Vergelijkbare aannames gelden voor het mastiek. Het aggregaat in DEM gedraagt zich "piece wise" lineair elastisch met grote stijfheid, en het mastiek meestal visco-elasto-plastisch met duidelijk lagere stijfheid. Deeltjes kunnen willekeurig georiënteerd of in een rooster geplaatst worden. Een willekeurig georiënteerd systeem [7] heeft als voordeel dat deeltjes bewegingsvrijheid hebben binnen het domein. In modellen waar gebruikt gemaakt wordt van een rooster worden deeltjes soms geclusterd [4, 6]. Ook is getracht om een realistische asfalt structuur in DEM simulaties te gebruiken: door gebruik van beeld-technologie of CT-scan apparatuur wordt het oppervlak van een asfalt monster geïmiteerd en gebruikt in simulaties [19, 14].

Naast de discrete elementen methode is ook de eindige elementen methode (EEM) toegepast om het materiaalgedrag van asfalt te modelleren [9, 15]. De eindige elementen methode is een numerieke techniek, waar oplossingen gevonden worden door discretisatie van het continue domein. In EEM studies over asfalt wordt de discretisatie aggregaat, mastiek, "adhesive zone" (dient voor verbinding tussen aggregaat en mastiek) en holle ruimten gemaakt. Aggregaat, mastiek en "adhesive zone" kunnen opgebouwd zijn uit verschillende elementen, of dezelfde elementen met een ander materiaalmodel worden gebruikt [6, 8, 15]. EEM wordt o.a. gebruikt om een bepaald onderdeel van het asfalt te modelleren; bijvoorbeeld mastiek onder belasting, of de interacties tussen twee aggregaat

componenten [8]. Daarnaast wordt EEM gebruikt om vermoeiing te voorspellen, zoals scheurvorming en spoorvorming [6]. Een nadeel van EEM is de relatief lange rekentijd om het gedrag van een complex materiaal als asfalt te modelleren. Een klein asfalt monster bevat reeds vele minerale deeltjes, waardoor het volledig modelleren hiervan buiten de mogelijkheden van de moderne computercapaciteit gaat. Zelfs indien vereenvoudigingen worden gemaakt voor de definitie van aggregaat en mastiek.

Momenteel is er immers niet zomaar een numeriek model beschikbaar om verdichting te modelleren, men vertrouwt op de ervaringskennis gebaseerd op empirische modellen. Dit kan problemen geven bij introductie van nieuwe asfalt mengsels waarvan men niet weet hoe deze zich zullen gedragen tijdens verdichting. DEM is meest geschikt om deeltjes gedrag te modelleren, als deeltjes zich kunnen reorganiseren en structureren en zou hierin kunnen bijdragen. Indien echter een DEM simulatie van een asfalt mengsel uitgevoerd zou worden, moet men er rekening mee houden dat een mengsel tot op het kleinste vulstof niveau bijna oneindig veel deeltjes bevat en dit ontzettend veel rekenkracht zou vergen. Dit maakt DEM niet geschikt om een gehele verhardingsconstructie op alle schalen te modelleren.

Binnen dit project werken we er dan ook aan om, het met DEM bepaalde gedrag op micro-mesoschaal, te vertalen naar parameters voor continuüm materiaal modellen, waarmee wel betrouwbaar en snel EEM sommen kunnen worden gemaakt om gehele asfalt constructies door te rekenen. Hiervoor is een eenvoudig DEM model opgesteld, dat de verdichting van asfalt nabootst, door alleen de grove delen van het aggregaat (> 2mm) te modelleren als enkele bolvormige deeltjes (variabel in grootte). De mastiek zelf wordt niet gemodelleerd, maar het gedrag hiervan wordt beschreven door het contactmodel tussen de deeltjes. Deze beschrijving omvat onder andere: wrijving, adhesie, demping en elastisch-plastisch materiaal gedrag [11]. De ruimte tussen de deeltjes stelt lucht voor tussen het asfalt. Door de voorgestelde vereenvoudigingen reduceert het aantal deeltjes aanzienlijk, wat het modelleren efficiënter maakt. In deze studie is een proefstuk van 1kg asfalt (aggregaat en mastiek) gemodelleerd bestaand uit 1331 deeltjes, die de steenslag groter dan 2 millimeter voorstellen. Getracht wordt resultaten hiervan te gebruiken in materiaalmodellen die toepasbaar zijn op de macroschaal. Nader moet worden getoetst en uitgezocht tot welke fijnheid deeltjes dienen te worden gemodelleerd om het gedrag van asfalt voldoende nauwkeurig te kunnen simuleren, zonder dat de benodigde rekenkracht tot onbruikbare proporties toeneemt.

In praktijk vindt verdichting plaats door het walsen (gedurende de uitvoering), of door gyatorapparatuur (verdichting in laboratorium), maar deze methoden zijn in eerste instantie te complex om te simuleren in DEM. Daarom is er gekozen om een eenvoudige manier van verdichting na te bootsen door een simpel eenassig belastingspatroon op het monster aan te brengen. Ter validatie van het DEM model zijn in het laboratorium tevens eenassige vervormingsproeven uitgevoerd die verdichting nabootsen. Op basis hiervan wordt getracht de fysische eigenschappen van het asfalt te relateren aan de modelparameters, zodat door het veranderen van modelparameters het gedrag van verschillende asfalt mengsels gesimuleerd kan worden.

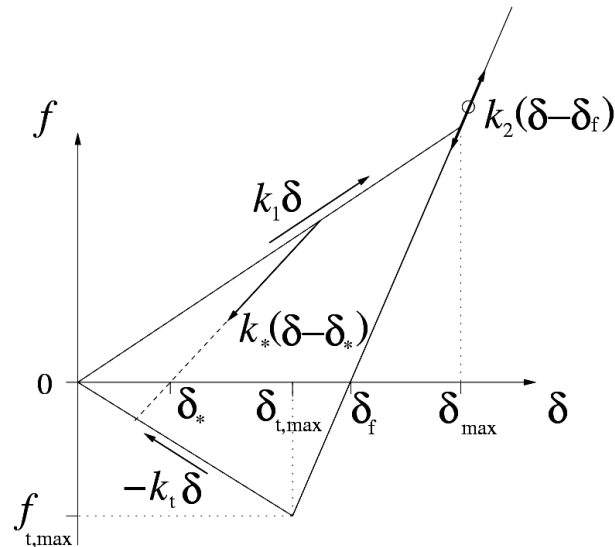
Discrete elementen model

Zoals eerder gemotiveerd zou het zinvol kunnen zijn om het gedrag van asfalt mengsels numeriek te simuleren. Om bewegingen van de aggregaat delen betrouwbaar te kunnen modelleren is echter tevens een contactmodel nodig dat de interactie tussen aggregaat delen, en dus het gedrag van mastiek, beschrijft. De holle ruimte in DEM (ruimte tussen de deeltjes) wordt beschouwd als lucht.

Contactmodel

Het contactmodel voorgesteld door Luding [11, 12, 13], wordt geschikt geacht en gebruikt om het gedrag van deeltjes te beschrijven binnen het asfalt mengsel. Dit zal nader verklaard worden in dit hoofdstuk.

Omdat het realistisch modelleren van vervormingen van deeltjes te moeilijk is, wordt in dit contactmodel de interactie kracht f (de kracht die werkt tussen de middelpunten van twee deeltjes in contact) gerelateerd aan de contactoverlap δ (de deformatie van de deeltjes in contact). In figuur 1 is de interactiekracht (normaalkracht) f uitgezet tegen de contactoverlap δ . Contact vindt plaats als $\delta > 0$; als $\delta < 0$ is er geen contacten dus $f = 0$. In dit onderzoek wordt geen temperatuur afhankelijkheid meegenomen in het model.



Figuur 1. Normaal contactmodel geplot als de kracht-verplaatsing relatie, kracht f , versus deformatie δ .

Contact tussen twee deeltjes begint op $\delta = 0$; tijdens initiële belasting (door externe krachten) stijgt de repulsieve kracht (positief, drukkracht tussen twee deeltjes) met de overlap $\delta > 0$ op de lijn met helling k_1 ($f = k_1 \delta$), met k_1 gedefinieerd als elastische-plastische contactstijfheid. Als de externe krachten gecompenseerd zijn met de repulsieve kracht vindt ontlasting plaats; langs de lijn met (variabele) helling k_* , of maximale helling k_2 , afhankelijk van de bereikte overlap. Alstijdens belasting reeds de maximale overlap (δ_{max}) bereikt is vindt ontlasting plaats op de lijn met (maximale) helling k_2 en wordt een contactkracht van nul bereikt op $\delta = \delta_f$. Als door belasting δ_{max} nog niet wordt bereikt vindt ontlasting plaats met een lagere (variabele) stijfheid k_* (afhankelijk van de bereikte overlap) en wordt een contactkracht van nul bereikt op $\delta^* < \delta_f$.

Na ontlasting ($f = 0$) is er plasticiteit opgetreden ($\delta > 0$). Deeltjes zijn dus nog (geometrisch) met elkaar in contact, door de samengeperste mastiek massa tussen de aggregaat componenten. Voor het terugbrengen van deze overlap (bijvoorbeeld voor het verbreken van het contact) wordt de contactkracht attractief (negatief, trekkracht). Deze stijgt totdat de maximale attractieve kracht ($f_{t,max}$) bereikt is op $\delta_{t,max}$, en neemt daarna af naar nul op de lijn met helling $-k_t$. De parameter k_t wordt ook wel de adhesiestijfheid genoemd, dit is een maat voor de sterkte van de verbinding tussen twee deeltjes.

De maximale plastische deformatie (δ_f) tussen twee deeltjes is gerelateerd aan de dimensieloze plasticiteit parameter ϕ in het model ($\delta_f = \phi * \text{gereduceerde radius deeltje}$). Als tijdens belasting de overlap groter wordt dan δ_{max} wordt de maximale (constante) stijfheid k_2 gebruikt. Wat betekent dat tijdens belasting de stijfheid plotseling verandert van k_1 naar een hogere stijfheid k_2 bij een overlap gelijk aan δ_{max} . Tegelijkertijd wisselt het gedrag van elastisch-plastisch naar puur elastisch. Deze omslag in stijfheid geeft volgens ons erg goed het gedrag van asfalt weer, waarin een zachtere mastiek laag de hardere stenen (aggregaat componenten) omringt. Tijdens initiële belasting zal eerst de zachtere mastiek laag worden samengedrukt of weggeperst (lage stijfheid k_1 , plastische deformatie), en na verder stijgende belasting ($\delta > \delta_{max}$) vindt krachtoverdracht via de hardere stenen plaats (hoge stijfheid k_2 , elastische deformatie). De plasticiteitsparameter die het moment van omslag bepaalt tussen

de lagere en hogere stijfheid kan worden gezien als een maat voor de hoeveelheid mastiek die de aggregaat componenten omhult.

De tangentiële kracht (die leidt tot het over elkaar heen schuiven van deeltjes) ontwikkelt zich parallel aan het contactvlak tussen twee deeltjes en is lineair elastisch gerelateerd aan de tangentiële verplaatsing conform de tangentiële stijfheid k_s . De tangentiële verplaatsing hangt af van de translaties en rotaties van de deeltjes. Tijdens het glijden van deeltjes t.o.v. elkaar is de verhouding tussen de tangentiële kracht en de normaalkracht gerelateerd door de (constante) dynamische wrijvingscoëfficiënt μ_d . Als deeltjes nog niet glijden is dezelfde relatie gedefinieerd als μ_s . Voor een gedetailleerde beschrijving van de tangentiële kracht zie Luding2008 [11].

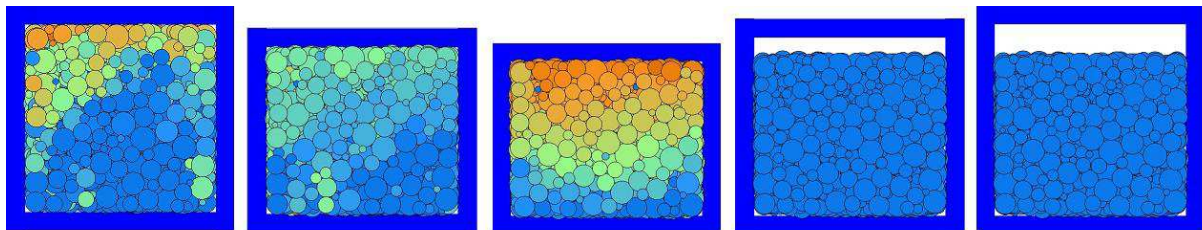
DEM simulatie in relatie tot Laboratorium proeven

Verdichting is nagebootst in DEM simulaties door een verzameling van 1331 deeltjes (variabel in grootte) opgesloten in een kubische ruimte eenassig te belasten. Deze simulatie correspondeert met de laboratorium proeven, waardoor het eenassig belasten van een open asfalt mengsel verdichting heeft plaatsgevonden. Zoals eerder beschreven, worden in de DEM simulaties alleen de grove aggregaat componenten (>2 mm) gemodelleerd als enkele bolvormige deeltjes. Een open asfalt mengsel kenmerkt zich met een hoog percentage holle ruimte (meer dan 20 %). Er is gekozen voor een open asfalt mengsel, omdat deze overeenkomt met de filosofie van het DEM model: waarin deeltjes beschouwd worden als een “harde” steen (stijfheid k_2) met daaromheen een “zachtere laag” mastiek (stijfheid k_1)

Eenassige verdichting in DEM simulaties

Vooraf aan de verdichting is een vaste stof (isotroop) bestaand uit 1331 deeltjes gecreëerd in een opgesloten kubisch systeem. Dit stelt asfalt in een niet verdichte (vaste) toestand voor. De exacte procedure van deze initiële stap kan gevonden worden in Luding en Bauer 2010, Magnanimo en Ter Huerne en Luding[13,16]. De initiële volumefractie (ν_{DEM}) bedraagt 0.5. Merk op dat deze aanzienlijk lager is dan de initiële volumefractie van de proefstukken gebruikt in het laboratorium ($\nu_{proef} \approx 0.65$). Dit wordt veroorzaakt doordat in DEM enkel bolvormige deeltjes worden gemodelleerd, hiertussen zal een grotere holle ruimte aanwezig zijn vergeleken met de steenskelet opbouw van “echte” hoekige deeltjes, zoals gebruikt in de laboratorium proeven. Uit recent onderzoek is gebleken dat het modelleren van hoekige deeltjes met DEM ook mogelijk is [1, 3]; echter voor de eenvoud van het model beperken wij ons tot bolvormige deeltjes.

Verdichting is nagebootst door het bovenzvlak van het kubische systeem naar beneden te verplaatsten, tot een rek van $\varepsilon = 0.2$ ($\varepsilon = \Delta L / L_{tot}$) bereikt is. Tijdens deze belasting (waarbij impliciet verdichting ontstaat) verplaatsen deeltjes zich ten opzichte van elkaar (voornamelijk neerwaarts gericht), terwijl tegelijkertijd nieuwe contacten gevormd met andere deeltjes. Op het moment dat een rek van 0.2 bereikt is, start ontlasting van het bovenzvlak naar de originele positie, tijdens deze gehele exercitie is het verdichtende effect duidelijk zichtbaar (zie ook figuur 3). De in deze simulatie gebruikte en in dit hoofdstuk beschreven modelparameters (zie Luding2008 [11] voor aanvullende informatie) zijn vermeld in tabel 1.



Figuur 3: Overzicht van verdichting: links is de verdichting net gestart, rechts is de verdichting compleet (de kleur geeft de kinetische energie van de deeltjes weer, de kleur schaling verschilt per figuur).

Property	Symbol	Values	SI units
Length Unit	x_u	1	1 m
Mass Unit	m_u	1	1.164 kg
Time Unit	t_u	1	0.003412 s
Average radius	R	0.004	4 mm
Materialdensity	ρ	2000	2328 kg/m ³
Elasticstiffness	$k = k_2$	100	10 ⁷ kg/s ²
Plastic stiffness	k_1 / k_2	1/5	
Adhesion "stiffness"	k_t / k_2	1/5	
Friction stiffness	k_2 / k_2	1/5	
Plasticity range	ϕ	0.1	
Coulomb friction	$\mu = \mu_s = \mu_d$	0.1, 0.2, 0.3	
Normalviscosity	$\gamma = \gamma_n$	1 · 10 ⁻³	0.3411 kg/s
Tangentialviscosity	γ_t / γ_n	0.1	
Background viscosity	γ_b / γ_n	0.1	
Background torque	γ_{br} / γ_n	0.1	

Tabel 1: Materiaaleigenschappen van het model. De derde kolom geeft de dimensie loze variabelen gebruikt in de simulatie, terwijl de vierde kolom geschaalde variabelen geeft in SI-units. Het schalen houdt in dat de spanningswaarden van de simulaties geschaald zijn met een factor 10⁵.

Eenassige verdichting in laboratorium proeven

Om de werking van het model voor asfalt te testen zijn vergelijkbare DEM simulaties en laboratorium testen uitgevoerd. Aldus was het mogelijk meer inzicht te verkrijgen in de gebruikte modelparameters. Er is gekozen voor het eenassig belasten van een relatief weinig verdicht open asfalt mengsel (aggregaat componenten variërend van 2-24.6 mm, zand, vulstoffen en bitumen). Het mengsel wordt in een mal geplaatst (binnendiameter 112.5 mm, hoogte 150 mm, zie figuur 4), hier bovenop komt een stempel en het geheel wordt opgesloten onder een pers.



Figuur 4. Schematische voorstelling van eenassige verdichting.

Door de pers langzaam (0.85 mm/s) naar boven te laten bewegen wordt het monster belast waardoor verdichting van het mengsel ontstaat. De kracht die het asfalt tijdens deze beweging uitoefent op het stempel, wordt aan de bovenkant van de pers gemeten. De beweging van de pers wordt automatisch

afgebroken als de maximale compressiekracht (50 kN), of maximale slag (30 mm) bereikt is. De proeven zijn uitgevoerd met twee verschillende soorten bitumen: (1) warm (± 140 °C), gebruik makend van standaard bitumen (70/100) en (2) koud, door gebruik te maken van een “fake bitumen”¹. Door twee soorten bitumen te gebruiken kunnen modelparameters gerelateerd worden aan de invloed van de bitumen.

Proefstuk	Symbol	hete bitumen	'fake' bitumen
Initiële proefstuk hoogte [mm]	h_0	63,9	66,7
Totale massa [gr]	m_0	999,0	1000,0
Initieelvolume proefstuk [mm ³]	V_0	635180	662640
Initiële dichtheid [Kg/m ³]	ρ_0	1570	1510
Hoeveelheid grof aggregaat in proefstuk [gr]	m_a	819,9	820,8
Volume mastiek in proefstuk [mm ³]	V_m	100022	101538
Volume aggregaat in sample [mm ³]	V_a	310819	311130
Volume percentage vaste stof[%]	-	64,7	62,3
Volume percentage of aggregaat [%]	-	48,9	46,9

Tabel 2. Gegevens asfalt proefstukken gebruikt voor eenassige verdichting.

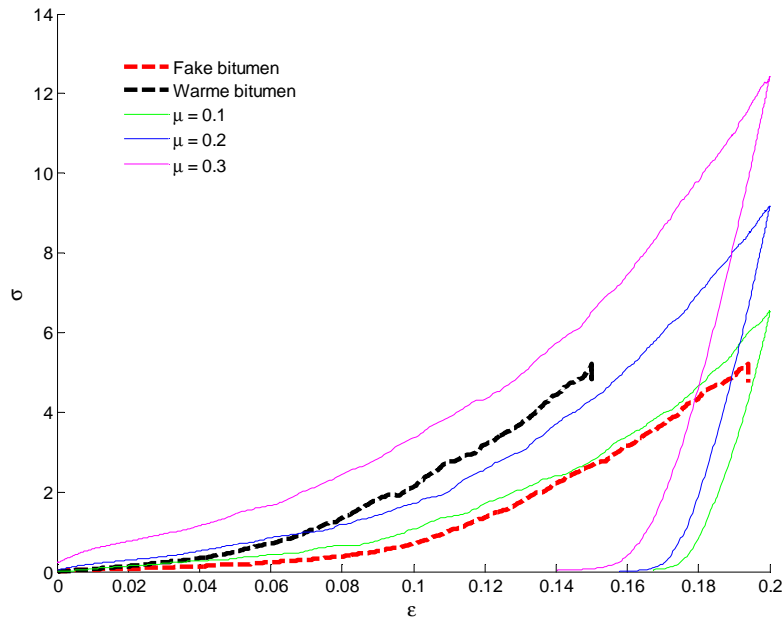
De krachten werkend op het ondervlak van de kubische mal (in DEM simulaties) en op het stempel (in laboratorium proeven) zijn vertaald naar spanningen. Evenals de verplaatsing van het bovenvlak (DEM) en de bodemplaet (proeven) vertaald is naar rek.

Resultaten

Binnen dit project is in het laboratorium op een eenvoudige manier verdichting gerealiseerd door een relatief weinig verdicht asfalt mengsel eenassig te belasten. In de DEM omgeving is deze belasting nagebootst door een verzameling aggregaat deeltjes (hetgeen een niet verdicht asfalt mengsel voorstelt) vergelijkbaar eenassig te belasten. De resultaten van deze proeven en simulaties zijn verwerkt naar spannings-rek relaties; zie figuur 5. In de DEM simulaties is voor de plasticiteit parameter een waarde van $\phi = 0.1$ aangenomen. Deze waarde is bepaald uit de laboratorium proeven, door van de beproeven monsters de hoeveelheid mastiek (zand, bitumen en vulstoffen) te relateren aan de hoeveel aggregaat (steenslag > 2mm) in het mengsel. DEM simulaties zijn uitgevoerd met drie verschillende wrijvingscoëfficiënten $\mu = \mu_s = \mu_d = 0.1, 0.2, 0.3$.

In zowel het *spanningsrek-rek diagram* van de simulaties als dat van de proeven zijn duidelijk twee takken zichtbaar: (1) een lage toename van stijfheid voor $\varepsilon < 0.1$ en (2) een veel hogere toename in stijfheid (steilere helling) voor $\varepsilon > 0.1$. Dit komt overeen met de beschrijving van het contact in DEM: waar eerst deformatie met een lager stijfheid (k_1) plaats vindt, en daarna met hogere stijfheid (k_2). In het *spannings-rek diagram* van de laboratorium proeven is ook duidelijk het verschil tussen gebruikte bitumen (warm, of “fake bitumen”) zichtbaar; het proefstuk met “fake bitumen” laat zich gemakkelijker verdichten (bij een lagere spanning deformerend) dan het mengsel met de warme “echte” bitumen. De exacte oorzaak hiervan zal onderzocht moeten worden in een vervolgstudie, maar waarschijnlijk komt dit doordat de “fake bitumen” viskeuzer gedrag vertoont dan de warme “echte” bitumen.

¹ een zeer zachte bitumen die vergelijkbare eigenschappen heeft als de warme bitumen maar dan op omgevingstemperatuur, zie ook *ter Huerne* [9]



Figuur 5. Spannings-rek diagram van simulaties (met verschillende wrijvingscoëfficiënten, de niet onderbroken lijnen) en experimenten (met verschillende bitumen, de onderbroken lijnen).

Conclusies

De overeenkomst tussen simulatie- en proef resultaten zijn bemoedigend: het voorgestelde model blijkt in staat deze simpele vorm van verdichting na te kunnen bootsen; aangezien de vorm van de simulatie- en proef curves sterk op elkaar lijken. Verder laat het zich aanzien dat de plasticiteitsparameter van het DEM model gebruikt kan worden als maat voor de hoeveelheid mastiek in een mengsel, terwijl de wrijvingscoëfficiënt in staat blijkt om het effect als gevolg van een ander type bitumen te modelleren. Nader onderzoek naar verhouding tussen stijfheden (k_1 en k_2) en wrijvingscoëfficiënten ($\mu = \mu_s = \mu_d$) moet nog uitgevoerd worden voor het verkrijgen van nog betere overeenkomsten tussen simulaties en experimenten.

In dit inleidende onderzoek is de kracht van het meso-schalige DEM model aangetoond; door het constitutieve gedrag van een asfalt mengsel te kunnen beschrijven voor een eenvoudig (eenassig) belasting scenario. Met behulp van DEM simulaties kan het gedrag op mesoschaal (interactie tussen deeltjes met mastiek) gerelateerd worden aan waarneembare verschijnselen (spanningen en rekken) in een asfalt monster. In verder onderzoek wordt getracht de resultaten van DEM (het gedrag van het mengsel op microschaal) toe te passen om meer continuüm materiaalmodellen te voeden, die op hun beurt weer in staat zouden moeten zijn het gedrag van een gehele asfalt constructie op macroschaal te modelleren.

Mogelijke volgende stappen zijn het voorspellen van constitutieve vergelijkingen voor het gedrag van koud (verdicht) asfalt m.b.v. DEM, die wederom in macroscopische continuüm modellen gebruikt kunnen worden.

Referenties

- [1] Alonso-Marroquin, F., Luding, S., Herrmann, H. J. and Vardoulakis, I. 2005. Role of anisotropy in the elastoplastic response of a polygonal packing. *Phys. Rev. E* 71:051304
- [2] Cundall, P.A. and Strack O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique* 29:47–65
- [3] D'Addetta, G.A., Kun, F., Ramm, E. 2002. On the application of a discrete model to the fracture process of cohesive granular materials. *Granular Matter* 4(2):77-90
- [4] Sadd, M.H., Dai, Q. 2005. A comparison of micro-mechanical modeling of asphalt material using finite elements and doublet mechanics. *Mechanics of Materials* 37:641-661
- [5] Dai, Q., You, Z. 2007. Prediction of creep stiffness of asphalt mixture with micromechanical finite-element and discrete-element models. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, February 2007
- [6] You, Z., Dai, Q. 2007. Review of advances in micromechanical modeling of aggregate interactions in asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34:239-252
- [7] Huanan, Y., Shen, S. 2012. Impact of aggregate packing on dynamic modulus of hot mix asphalt mixtures using three dimensional discrete element method. *Construction and Building Materials* 26:302-308
- [8] Huurman, M., Mo, L., Woldekidan M.F., Khedoe, R.N., Moraal, J. 2009. *Overview of the LOT meso mechanical research into porous asphalt raveling*.
- [9] TerHuerne, H.L. 2004. *Compaction of Asphalt Road Pavements*, Proefschrift Universiteit Twente
- [10] Jacobs, M.M.J. 1995. *Crack Growth in Asphaltic Mixes*, Proefschrift TU Delft
- [11] Luding, S. 2008. Cohesive, frictional powders: contact models for tension, *Granular Matter* 10: 235-246.
- [12] Luding, S., Suiker, A. 2008. Self-healing of damaged particulate material through sintering, *Philosophical magazine* 88 (28-29): 3445-3457
- [13] Luding, S., Bauer, E. 2010. Evolution of swelling pressure of cohesion-frictional, rough and elasto-plastic granulates. *Geomechanics and Geotechnics: From micro to macro*.
- [14] Kim, H., Buttler W.G. 2009. Discrete fracture modeling of asphalt concrete, *International Journal of Solids and Structures* 46: 2593-2604
- [15] Kringos, N., Scarpas, A., De Bondt, A.H. 2008. Fundamenteel experimenteel en numeriek onderzoek naar rafeling in zoab door waterschade. *Crow infradagen Delft*
- [16] Magnanimo, V., ter Huerne, H.L., Luding, S. Durability and self-healing modelling with discrete particles approach. *Asphalt Tire-Road Consortium*, CTW, University of Twente, Netherlands
- [17] Mo, L.T., Huurman, M., Wu, S.P., Molenaar, A.A.A. 2007. Investigation into stress states in porous asphalt concrete on the basis of FE-modeling. *Finite Elements in Analysis and Design* 43:333-343
- [18] Muraya, P.M. 2007. *Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*, Proefschrift TU Delft
- [19] You, Z., Adhikari, S., Dai, Q. 2008. Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures. *Journal of Engineering Mechanics ASCE* (December 2008)