

Toekomst van de Eindige-Elementenmethode in de geotechniek

Ronald B.J. Brinkgreve
Plaxis BV & Technische
Universiteit Delft



Inleiding

In de afgelopen decennia heeft het gebruik van de Eindige-Elementenmethode (EEM) voor het berekenen van spanningen, deformaties, stabiliteit en grondwaterstroming in de geotechniek een enorme vlucht genomen. Naast ontwikkelingen rondom de methode zelf (denk aan nieuwe materiaalmodellen, modellerings- en berekeningsfaciliteiten) heeft de EEM zich vooral door de toename van de rekenkracht en de gebruiksvriendelijkheid van de softwarepakketten, ontwikkeld van een specialistische onderzoeksmethode tot een dagelijks ontwerpgebedschap. Het heeft zich een plaats verworven naast conventionele ontwerpmethoden en biedt vooral meerwaarde in complexe situaties, zoals bij de aanleg van tunnels en het ontwerp van diepe bouwputten in binnenstedelijke gebieden. Maar zoals elke methode kent ook de EEM nadelen en beperkingen, die overigens niet altijd door iedere gebruiker worden herkend. Samen met de be-

hoefte vanuit het ontwerpproces om te werken aan steeds complexere situaties die in minder tijd (efficiëntie), tegen geringere kosten en met een minimaal risico moeten worden ontworpen terwijl de grondgegevens vaak beperkt zijn, vormen deze nieuwe uitdagingen waar we in het licht van de toekomst van de Eindige-Elementenmethode in de geotechniek voor staan. Deze presentatie geeft een visie op de toekomst, maar begint eerst met een korte terugblik op het verleden.

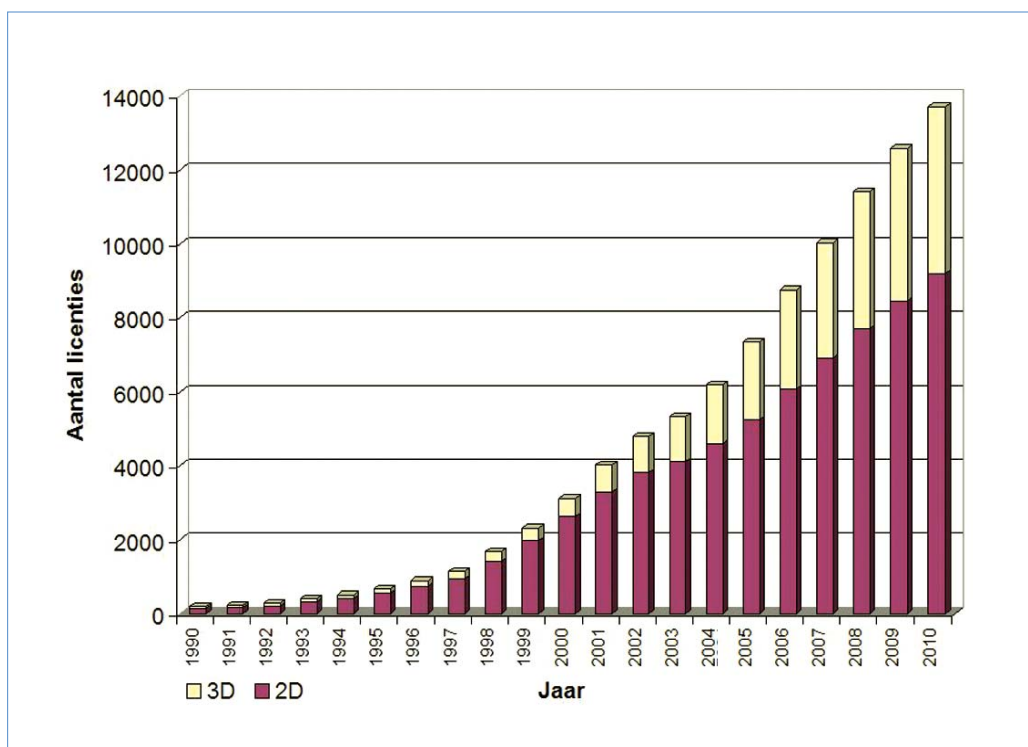
Ontwikkelingen afgelopen decennia

Terwijl in de vliegtuigindustrie en de werktuigbouw in de jaren '65 t/m '80 het gebruik van de EEM een enorme vlucht nam, bleef het gebruik in de geotechniek beperkt tot universiteiten in het kader van wetenschappelijk onderzoek. Met name het sterk niet-lineaire karakter en de vaak onbekende eigenschappen van het materiaal grond waren (en zijn nog steeds) een handicap ten opzichte van

andere vakgebieden. De doorbraak in de geotechnische ingenieurspraktijk kwam pas ruimschoots na de introductie van de Personal Computer.

Als we terugkijken op de afgelopen decennia dan is er een groot aantal ontwikkelingen geweest dat heeft bijgedragen aan het succes van de EEM en het toenemend gebruik ervan binnen de geotechniek. De meest kenmerkende ontwikkelingen staan hierna puntsgewijs weergegeven:

- **Materiaalmodellen:** Van het eenvoudige lineair-elastisch perfect-plastische Mohr-Coulomb model via Cam-Clay en Hardening modellen naar tijdsafhankelijk gedrag, anisotropie en softening. Hierdoor kon het grondgedrag steeds realistischer worden gemodelleerd.
- **Robuuste numerieke methoden:** Het niet-lineaire karakter van de materiaalmodellen voor grond vereist een stapsgewijze aanpak en heeft geleid tot de ontwikkeling van robuuste numerieke methoden zoals arc-length control, phi-c reductie, load-advancement en line search.
- **Toename van de rekenkracht, beschikbaar voor elke ingenieur:** Toename van de processor snelheid en het interne geheugen van PC's heeft een grote toename van het aantal elementen in een model mogelijk gemaakt, en daarmee een (potentiele) verhoging van de nauwkeurigheid van de resultaten. De laatste jaren neem de processor snelheid niet echt meer toe, maar wel het aantal processoren in een computer. Hierop is ingespeeld door aanpassing van de architectuur van de rekenprogramma's, gericht op slimme domein decompositie en parallel processing.
- **Van 2D naar 3D:** De toename van de rekenkracht in combinatie met 64-bit geheugenadressering, maar ook nieuwe meshgeneratie technieken en verbeterde visualisatiemogelijkheden (grafische kaart; OpenGL) hebben de stap naar 3D modellen mogelijk gemaakt.
- **Toename van de gebruiksvriendelijkheid van softwarepakketten:** De introductie van grafisch gestuurde operating systemen zoals Windows heeft dit bevorderd, maar gebruiksvriendelijkheid en intuïtiviteit gaan verder dan een grafisch invoerscherm met muisbediening. Sommige wetenschappers zijn fel tegenstander van



Figuur 1 - . Ontwikkeling aantal EEM licenties in de geotechniek (Bron: Plaxis BV)

Samenvatting

In deze bijdrage wordt een beeld geschetst van trends en ontwikkelingen die bepalend zijn voor de toekomst van de eindige-elementenmethode in de geotechniek. Er is de afgelopen 20 jaar veel bereikt. Naast ontwikkelingen rondom de methode zelf heeft de EEM zich ontwikkeld van een specialistische onderzoeksmethode tot een dagelijks ontwerpgereedschap. Het heeft zich een plaats verworven naast conventionele ontwerpmethoden en biedt vooral meerwaarde in complexe situaties. Maar zoals elke methode kent ook de EEM nadelen en beperkingen, die overigens niet altijd door iedere gebruiker worden

herkend. Samen met de behoefte vanuit het ontwerpproces om te werken aan steeds complexere situaties die in minder tijd (efficiëntie), tegen geringere kosten en met een minimaal risico moeten worden ontworpen terwijl de grondgegevens vaak beperkt zijn, vormen deze nieuwe uitdagingen waar we in het licht van de toekomst van de Eindige-Elementenmethode in de geotechniek voor staan. De bijdrage geeft een visie op de toekomst, waarbij tevens de deskundigheid van de gebruiker aan de orde wordt gesteld.

gebruiksvriendelijke EEM pakketten omdat dit het gebruik door 'ondeskundigen' in de hand werkt. Daar zou men de vraag tegenover kunnen stellen waarom 'deskundigen' onnodig gecompliceerde software zouden moeten gebruiken; zij profiteren immers ook van gebruiksvriendelijkheid en intuïtiviteit.

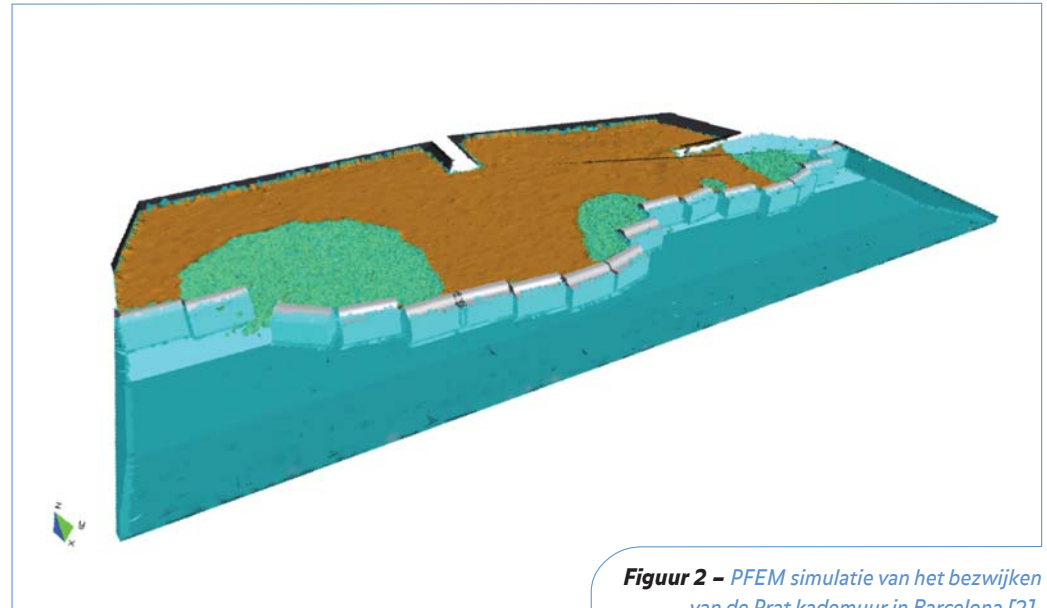
De toename van het gebruik van de Eindige-Elementenmethode heeft vanzelfsprekend een relatie met het aantal uitstaande licenties van bekende eindige-elementen cq. eindige-differentie softwarepakketten. *Figuur 1* geeft de grafiek weer van het totaal aantal licenties van bekende pakketten die wereldwijd in de geotechniek worden gebruikt. De toename wordt ook bevestigd door het aantal publicaties over praktische toepassingen waarbij de EEM methode (in brede zin) is gebruikt op grote internationale geotechnische congressen.

Trends en uitdagingen

Ondanks het succes is er een aantal situaties waarin de EEM (nog) geen afdoende oplossing biedt voor complexe vraagstukken uit de geotechnische ingenieurspraktijk. Dat heeft niet alleen te maken met beperkingen in de methode, de materiaalmodellen of de beschikbare software, maar ook met het (lokaal) ontbreken van de benodigde kennis en gegevens. Daarnaast vormen het voortdurend streven naar efficiëntieverbetering en risicobeheersing, als ook trends en externe ontwikkelingen, kansen om met de EEM op in te spelen. Vanuit de wetenschap wordt hard gewerkt aan fundamentele oplossingen voor de technische vraagstukken, maar daarmee zijn deze nog niet direct beschikbaar voor de praktijk. Hieronder volgt een beschrijving van een aantal actuele trends en uitdagingen die bepalend zijn voor de toekomst van de EEM in de geotechniek:

GROTE DEFORMATIES

Hoewel de meeste geotechnische deformatie- en stabiliteitsvraagstukken kunnen worden opgelost op basis van de kleine deformatietheorie (waarbij berekende deformaties niet leiden tot een verandering van de basisgeometrie), is er een aantal speciale situaties dat een zogenoemde 'large defor-



Figuur 2 – PFEM simulatie van het bezwijken van de Prat kademuur in Barcelona [2].

mation' (LD) aanpak vereist. Een eenvoudig voorbeeld hiervan is de membraanwerking in een geotextiel ter verbetering van de stabiliteit van een grondconstructie. Deze situatie kan nog met de beschikbare Updated Lagrange methode worden gemodelleerd. Complexere situaties waarbij sprake is van stroming van grond (of andere materialen) over grotere afstand waardoor de geometrie drastisch verandert, vereisen andere methoden zoals ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), CEL (Coupled Eulerian Lagrangian), MPM (Material Point Method) of PFEM (Particle Finite Element Method; ref. [1]). Toepassingsvoorbeelden zijn aardverschuivingen, bezwijken van dammen en het inbrengen van zuigankers in de zeebodem. *Figuur 2* toont een PFEM simulatie van het bezwijken van de Prat kademuur in Barcelona (met dank aan Prof. Antonio Gens en Prof. Eugenio Oñate; ref. [2]). Deze aan de EEM gerelateerde methoden zijn inmiddels volop in ontwikkeling (o.a. in het kader van het Europese GEOINSTALL project), maar het op grote schaal beschikbaar maken voor algemene geotechnische toepassingen is zeker nog een uitdaging te noemen.

Heterogeniteit van de ondergrond

Een groot deel van het ontwerpproces heeft te maken met onzekerheden in en heterogeniteit van de ondergrond, terwijl ontwerpmodellen vooralsnog uitgaan van homogene grond. Volgens Euro-Code 7 dienen partiële factoren te worden gehanteerd om onzekerheden in de belasting, de grondparameters, de gronddrukken en/of de resulterende krachten in rekening te brengen. Het zou natuurlijk beter zijn om de heterogeniteit zelf te modelleren (3D!), maar daarvoor ontbreekt het in de praktijk veelal aan de benodigde gegevens. Toch zijn er wetenschappelijke ontwikkelingen gaande die hier wel op inspelen. Zo wordt o.a. aan de Technische Universiteit Delft gewerkt aan Stochastische EEM technieken (ref. [3]) en aan Inverse Analyse op basis van Kalman filtering (ref. [4]). Laatstgenoemde techniek speelt in op een trend in de geotechniek genaamd 'The Observational Method' waarbij tijdens de uitvoering van een project voortdurend metingen worden gedaan. De metingen kunnen tijdens de uitvoering worden gebruikt om een verbeterde modellering en voorspelling te maken, en te toetsen of nog aan de

ontwerpcriteria wordt voldaan. Ook kunnen hypothesen over onzekerheden in de ondergrond (bv. de mogelijke aanwezigheid van oude funderingsresten) worden getoetst. Voor de Stochastische EEM kan op basis van meerdere sonderingen of seismische metingen een beeld worden verkregen over de mate van heterogeniteit (gebieden, lengteschalen) in de ondergrond. Hiermee kunnen zogenoemde 'random fields' worden gegenereerd die representatief zijn voor de variabiliteit in de ondergrond. De resultaten van dergelijke Stochastische EEM berekeningen geven een realistischer beeld en verkleinen de onzekerheden (zie *figuur 3*; met dank aan Prof. Michael Hicks). Ook hier is het echter nog wel een uitdaging om deze methode beschikbaar te maken voor praktische toepassingen, waarbij het succes vooral afhangt van de beschikbaarheid van gegevens.

THM KOPPELING EN MULTI-PHYSICS

De ontwikkeling van speciale uitvoeringstechnieken zoals vacuumconsolidatie, grondbevriezen en biogrouting, waarbij de 'klassieke' grondmechanica niet meer volstaat, vraagt om nieuwe analyse- en ontwerpmodellen. Daarbij moeten we ons realiseren dat het gebruik van deze nieuwe modellen tot andere resultaten kan leiden dan we tot nu toe gewend waren.

Alleen al het meenemen van zuigspanningen in de onverzadigde zone in een dijk leidt tot een ogenschijnlijk hogere stabiliteitsfactor dan volgens een klassieke Terzaghi effectieve spanningsbenadering. Hierbij moet men zich realiseren dat een hevige regenbui deze hogere veiligheid teniet kan doen.

Ook de introductie van temperatuur als onafhankelijke variabele biedt nieuwe mogelijkheden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat fase-overgangen

als gevolg van temperatuurveranderingen (water > damp; water > ijs) grote invloed hebben op het (hydro-)mechanische gedrag van de grond. Bij grondbevriezen maken we daar dankbaar gebruik van. Thermo-hydro-mechanische (THM) koppeling maakt het mogelijk om dergelijke situaties te kunnen ontwerpen.

Ook de verbreding van de geotechniek naar geotechniek en geotechnologie, waarbij vraagstukken op het gebied van olie- en gaswinning, geothermische energie (*figuur 4*), warmte-/koude opslag, opslag van nucleair afval en CO₂ moeten worden opgelost, leiden tot de behoefte om verschillende fysische en chemische processen te kunnen combineren in een multi-fysisch analyse model. Het is de vraag of dergelijke toepassingen nog steeds kunnen worden gerekend tot het vakgebied van de geotechnisch ingenieur. Dat zal zeker niet voor iedereen gelden, maar het is een feit dat dergelijke complexe vraagstukken zich in toenemende mate voordoen en op het bureau van een geotechnisch ingenieur terecht komen.

KOPPELING VAN GEGEVENS

In navolging van het DinoLoket is TNO begonnen met de ontwikkeling van een on-line model voor de 'ondiepe' Nederlandse ondergrond, genaamd GeoTOP [6]. Vanuit grondboring gegevens worden grensvlakken bepaald, die vervolgens naar een voxelmodel met een nauwkeurigheid van 100x100x0.5m³ worden omgezet (zie *figuur 5*; met dank aan Ir. Jan Kooijman, TNO). Door een EEM model hiermee te koppelen kan voor een willekeurige projectlocatie in Nederland de geometrie van de ondergrond direct worden ingelezen. Ook voor andere landen zijn dergelijke initiatieven gaande.

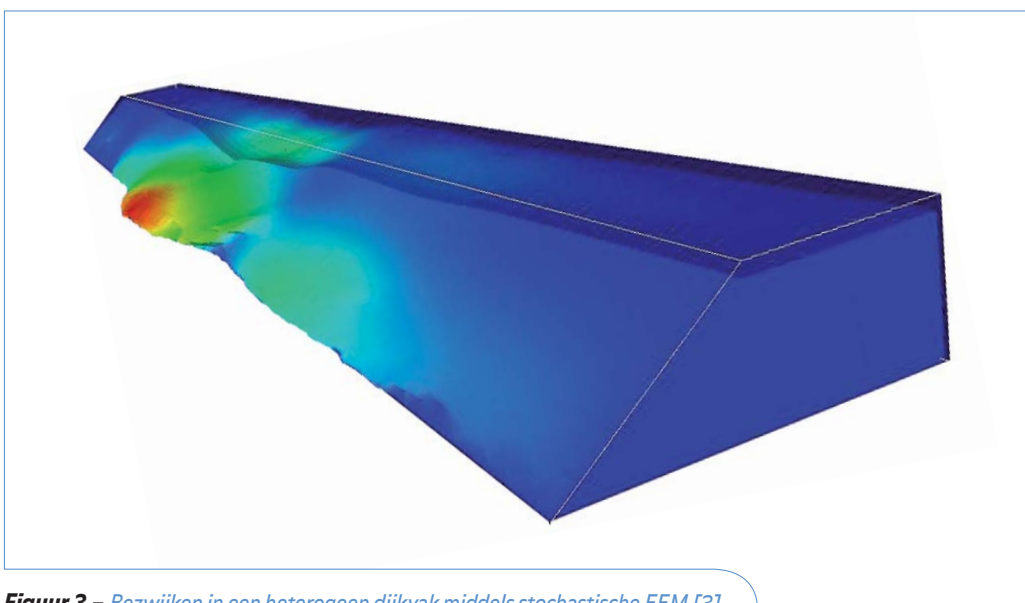
Een adequaat gebruik van de EEM voor praktische geotechnische toepassingen vraagt om de beschikbaarheid van betrouwbare grondgegevens. Vooral in de beginfase van een project zijn die vaak schaars. De koppeling tussen een Eindige-Elementenmodel en een dergelijk ondergrondmodel zal leiden tot snellere modelvorming en parameterbepaling.

Stelt u zich eens voor: Via Google Earth cliken we op onze projectlocatie. In het window dat verschijnt zien we een of meer boorprofielen van de ondergrond met een indicatie van de grondlagen. De grondprofielen cq. grondlagen kunnen direct in ons eindige-elementenmodel worden ingelezen. Tegelijkertijd worden de grondeigenschappen opgevraagd en vertaald in modelparameters, die aan de betreffende grondlagen worden toegekend. Utopie of werkelijkheid? De toekomst zal het leren, maar wellicht eerder dan u denkt.

Wat betreft het koppelen en uitwisselen van gegevens zijn er vanuit de constructieve hoek ontwikkelingen als Building Information Modelling (BIM) die inmiddels ook zijn doorgedrongen tot de geotechniek. Deze ontwikkelingen, die voortkomen uit een voortdurend streven naar meer efficiëntie en kostenreductie, zullen leiden tot een integratie van het ontwerpproces waarbij constructeurs en geotechnici gezamenlijk werken aan een integraal ontwerp. Geotechnische EEM pakketten zullen hier op inspelen door, naast bestaande import mogelijkheden voor CAD modellen, aan te sluiten bij BIM en interactieve koppelingen te maken met pakketten voor het ontwerpen van constructies.

Evenzo zijn er voor waterbouwkundige en offshore toepassingen ontwikkelingen die uitgaan van een koppeling tussen een dynamisch stromingsmodel en een EEM model voor grondconstructies. Hierbij worden stromingskrachten overgebracht op de ondergrond en de constructies in het EEM model.

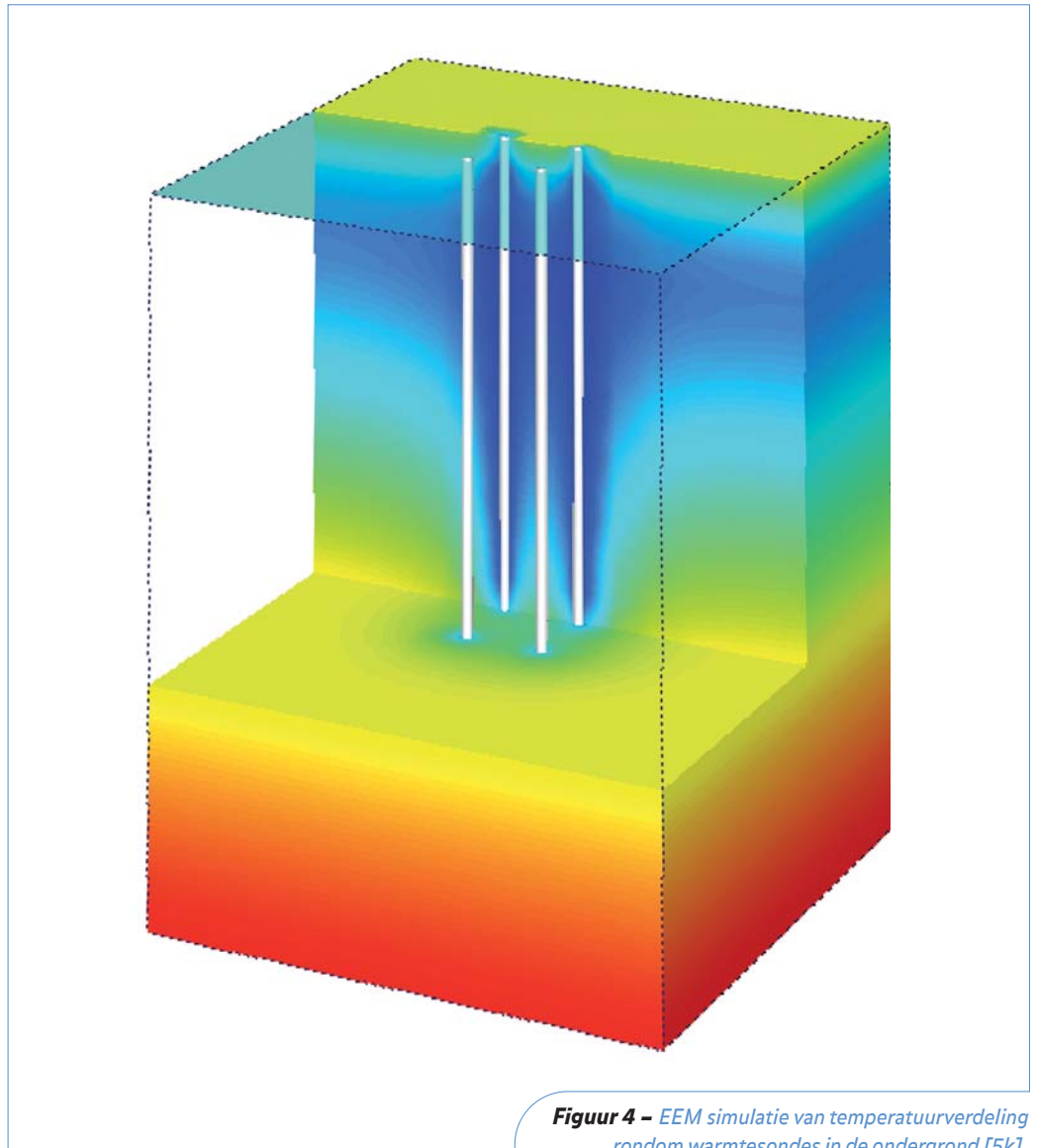
Een andere ontwikkeling die gaande is, is die van een geautomatiseerd dijken analyse systeem. Hierbij worden via observatie vanuit de lucht en vanaf het water, aangevuld met sondeergegevens, dijkvakken in kaart gebracht en omgezet naar een drie-dimensionaal dijkmodel. In dit 3D dijkmodel kunnen doorsneden worden gemaakt (zie *figuur 7*; met dank aan Ir. Bob Woldringh, Fugro), waarvoor, indien noodzakelijk (bijvoorbeeld ten tijde van zeer hoog water), automatisch stabiliteitsberekeningen worden uitgevoerd op basis van de actuele condities. De huidige ontwikkelingen gaan uit van conventionele stabiliteitsberekeningen, maar het ligt voor de hand om hiervoor 2D of zelfs 3D eindige-elementenberekeningen te hanteren.



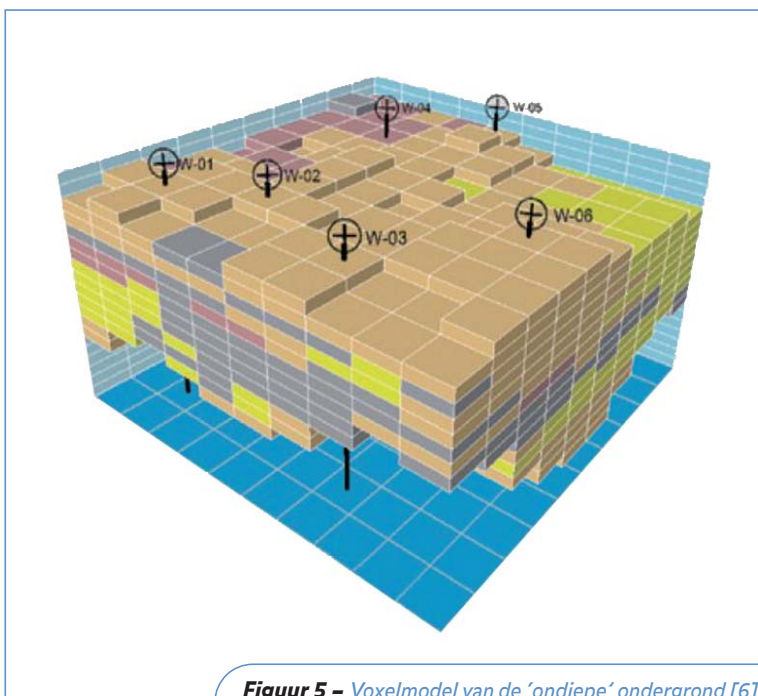
Figuur 3 – Bezwingen in een heterogeen dijkvak middels stochastische EEM [3]

(GEBREK AAN) KENNIS EN KUNDIGHEID

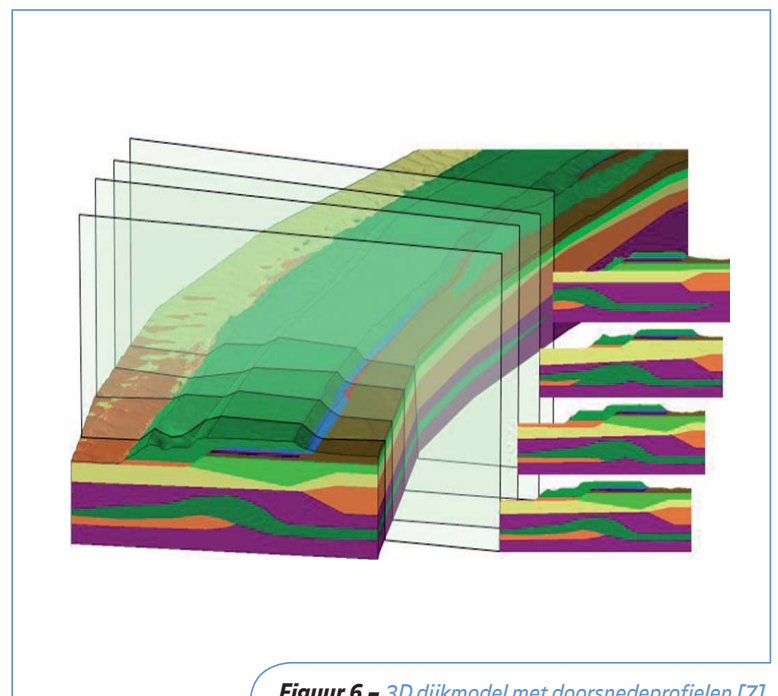
Zelfs in een wereldwijd stagnerende economie blijft de behoefte aan geotechnisch ingenieurs groot, terwijl de aanwas van nieuw afgestudeerden in de geotechniek achter blijft. De reden hiervoor is simpelweg dat de geotechniek een 'stoffig' imago heeft en dat er met andere opleidingen meer te verdienen valt. Ook 'verdwijnen' ervaren geotechnici om dezelfde redenen richting management functies of andere vakgebieden. Deze trend geldt niet alleen voor Nederland, maar voor een aanzienlijk deel van de wereld. Het gevolg is dat vanuit aanpalende vakgebieden de geotechniek 'erbij' wordt gedaan, waardoor steeds meer mensen die niet primair een geotechnische opleiding hebben wel geotechnische ontwerpen maken. Daar komt bij dat EEM berekeningen veelal worden uitgevoerd door relatief jonge en weinig ervaren mensen. Deze trends hebben onmiskenbaar geleid tot een afname van de gemiddelde kennis en kundigheid van de gebruiker van geotechnische EEM software. Hier liggen zowel kansen als bedreigingen voor de EEM. De grootste bedreiging is dat deze beperktere kennis en kundigheid kan leiden tot slechtere ontwerpen en meer schadegevallen. Daar staat als kans tegenover dat ontwikkelaars van EEM pakketten meer specifieke geotechnische en numerieke kennis in de software kunnen stoppen. De deskundige geotechnicus hoeft hier geen gebruik van te maken en kan zich onderscheiden in complexe projecten, die voor hem of haar ook nog eens extra uitdagingen bieden. Het is natuurlijk wel zaak dat een opdrachtgever zich realiseert wanneer een situatie complex is en dat een iets grotere investering vooraf extra kosten achteraf kan voorkomen.



Figuur 4 – EEM simulatie van temperatuurverdeling rondom warmtesondes in de ondergrond [5k].



Figuur 5 – Voxelmodel van de 'ondiepe' ondergrond [6].



Figuur 6 – 3D dijkmodel met doorsnedeprofielen [7].

DE ROL VAN HET INTERNET

Hoewel de opkomst van het internet onze dagelijkse werkprocessen enorm heeft veranderd, heeft dit tot nu toe slechts weinig invloed gehad op het gebruik van de EEM in de geotechniek. Evenals 20 jaar geleden kunnen EEM modellen worden gegenereerd en uitgerekend op een desktop computer, en kunnen de resultaten worden bekeken en gerapporteerd zonder gebruik te maken van het internet. Dat zal in de toekomst gaan veranderen. Eerder is al gesproken over de koppeling van pakketten en de uitwisseling van grote hoeveelheden gegevens (via internet). Dat is mogelijk vanwege de sterk toegenomen bandbreedte, welke in de toekomst nog veel verder zal toenemen, onder meer door het gebruik van glasvezelverbindingen. Ook de wereldwijde groei van data warehouses zal steeds verder toenemen, waardoor gegevens niet zozeer meer lokaal worden opgeslagen maar 'in the cloud'. Deze ontwikkelingen maken het ook mogelijk om EEM berekeningen op externe servers te draaien ('cloud computing') waardoor de PC geen eigen rekenkracht meer nodig heeft maar vooral de interface vormt tussen de gebruiker en de computer op afstand.

Een andere ontwikkeling is die van het mobiele internet. Nu al zijn smartphones bijna even krachtig als een laptop computer. Middels handige 'Apps' kan letterlijk 'engineering in the field' worden bedreven en hebben we overal de beschikking over een oneindige hoeveelheid gegevens. Dit biedt ook kansen voor de geotechniek en uitdagingen voor de EEM. Nu al kunnen we via 'Augmented Reality' op een braakliggend terrein een gebouw zien dat nog gebouwd moet worden. Dat zou natuurlijk ook moeten kunnen voor een paalfundering of een tunnel. En wat te denken van het virtueel inspecteren van deformaties van bouwputwanden of het virtueel controleren van de dikte van een vrieswand. Het internet is er in principe klaar voor. Nu de geotechniek nog.

Toekomst van de Eindige-Elementenmethode

De toekomst van de EEM en aanverwante methoden in de geotechniek wordt bepaald door de mate van economisch voordeel dat het gebruik ervan oplevert en de mogelijkheid tot het verkleinen van risico's. Fundamenteel en toegepast onderzoek zijn noodzakelijk om te komen tot echt vernieuwende oplossingen voor de wetenschappelijke uitdagingen die dit met zich meebrengt.

Een voorbeeld: In een poging om het grondgedrag beter te beschrijven heeft menig zich zelf respecterend onderzoeker op het gebied van de numerieke grondmechanica de afgelopen 20 jaar wel een nieuw constitutief model ontwikkeld. Het aantal model parameters is daarbij steeds verder toege-

nomen en er zijn ingewikkelde tests nodig om alle parameters te bepalen. Dergelijke tests worden in de praktijk zelden of nooit uitgevoerd, zodat dit soort modellen geen echte bijdrage leveren aan de geotechnische ontwerppraktijk. Het zou een echte innovatie zijn wanneer een materiaalmodel wordt ontwikkeld in nauwe samenhang met een handig apparaat waarmee het grondgedrag (bij voorkeur in het veld) in diverse spanningspaden kan worden gemeten en waarmee het model direct kan worden gecalibreerd. Deze gegevens worden vervolgens automatisch toegevoegd aan een wereldomvattende database van grondgegevens, waar elke gebruiker van EEM software via Google Maps gebruik van kan maken. Utopie of werkelijkheid? De toekomst zal het leren.

Even zo belangrijk als wetenschappelijke ontwikkelingen is de verdere ontwikkeling van innovatieve (software)gereedschappen die ingenieurs in staat stellen om uitgekende ontwerpen te maken. Het ontwerpproces zal steeds complexer en integraler worden, waarbij communicatie en beschikbaarheid van gegevens essentieel zijn. Dat stelt eisen aan de kennis en kundigheid van de ingenieur. Natuurlijk is geotechnische basiskennis nodig om ontwerpverantwoordelijkheid te kunnen dragen voor een project met een geotechnische component. Maar de toenemende verbreding van vaardigheden zal ongetwijfeld ten koste gaan van een stuk diepgang. Softwarebedrijven met een link naar de wetenschap zullen hierop inspelen door meer geotechnische kennis in de software te verpakken. Door tevens geautomatiseerd gebruik te maken van mondiaal beschikbare gegevens kunnen meer realistische modellen worden voorzien van de juiste invoergegevens. Dat heeft als voordeel dat zowel de 'menselijke factor' in het ontwerprisico als ook de modelonzekerheid kunnen worden verkleind. De ervaren geotechnisch ingenieur van nu zal dit in eerste instantie misschien als een bedreiging zien, maar de behoefte aan 'echte' geotechnici met diepgang zal altijd blijven bestaan; ze worden alleen steeds schaarser en daar wordt op deze manier ook een oplossing voor geboden.

Conclusies

In deze bijdrage is een beeld geschetst van trends en ontwikkelingen die bepalend zijn voor de toekomst van de eindige-elementenmethode in de geotechniek. Er is de afgelopen 20 jaar veel bereikt: 3D modellering en meshing, geavanceerde modellen voor grondgedrag, robuuste numerieke methoden, parallel rekenen en visualisatietechnieken. Nieuwe uitdagingen zijn grote deformaties, heterogeniteit van de ondergrond, koppeling van diverse fysische processen, beschikbaarheid van gegevens, en, last but not least, de kennis en kundigheid van de gebruiker.

Door toenemende gebruiksvriendelijkheid en automatisering van het rekenproces is het aantal gebruikers van EEM programma's sterk toegenomen, terwijl nog maar weinigen over de fundamentele achtergrondkennis van de methode zelf beschikken. Is dat erg? Nee, zolang men de mogelijkheden en beperkingen maar onderkent. Ter vergelijking: De meeste automobilisten hebben geen flauw idee wat er zich onder de motorkap afspeelt, maar zijn prima in staat om een auto te besturen. Daarvoor is het wel noodzakelijk om een rijbewijs te hebben. Bij een vrachtauto wordt het al ingewikkelder, en bij een vliegtuig is het noodzakelijk om naast een gedegen opleiding bij herhaling proeven van bekwaamheid af te leggen.

In analogie hiermee doet zich de vraag voor of er, naast een geotechnische basiskennis, specifieke eisen moeten worden gesteld aan gebruikers van de EEM. Een vervolgvraag is dan wat deze eisen zouden moeten zijn en wie de licentie moet afgeven. Kennisinstituten en commerciële aanbieders zijn prima in staat om de benodigde opleiding te verzorgen, maar de licentiering is een taak van de overheid of overkoepende branche organisaties. Ik ben benieuwd wanneer deze taak wordt opgepakt.

Referenties

- [1] Andresen L. (2011). *Large deformation and installation effects*. GEOINSTALL workshop, Glasgow.
- [2] Oñate E. et al. (2007). *Intern rapport CIMNE*, Barcelona.
- [3] Hicks M.A., Spencer W.A. (2010). *Influence of heterogeneity on the reliability and failure of a long 3D slope*. Computers and Geotechnics 37, 948-955.
- [4] Hommels A., Molenkamp F. (2005). *Inverse analysis of an embankment using the Ensemble Kalman Filter including heterogeneity of the soft soil*. In: Proceedings NUMGE 2006, Graz.
- [5] Brinkgreve R.B.J. (2006). *Finite element program for geothermic analysis*. Presentation at Delft University of Technology.
- [6] TNO (2011). *GeoTOP, Driedimensionale modellering van de bovenste 30 meter van de Nederlandse ondergrond*. www.tno.nl (zoekterm: GeoTOP).
- [7] Fugro (2011). *REAL®, Rapid Engineering Assessment of Levees*. www.fugrowaterservices.com/07-innovations/ ●