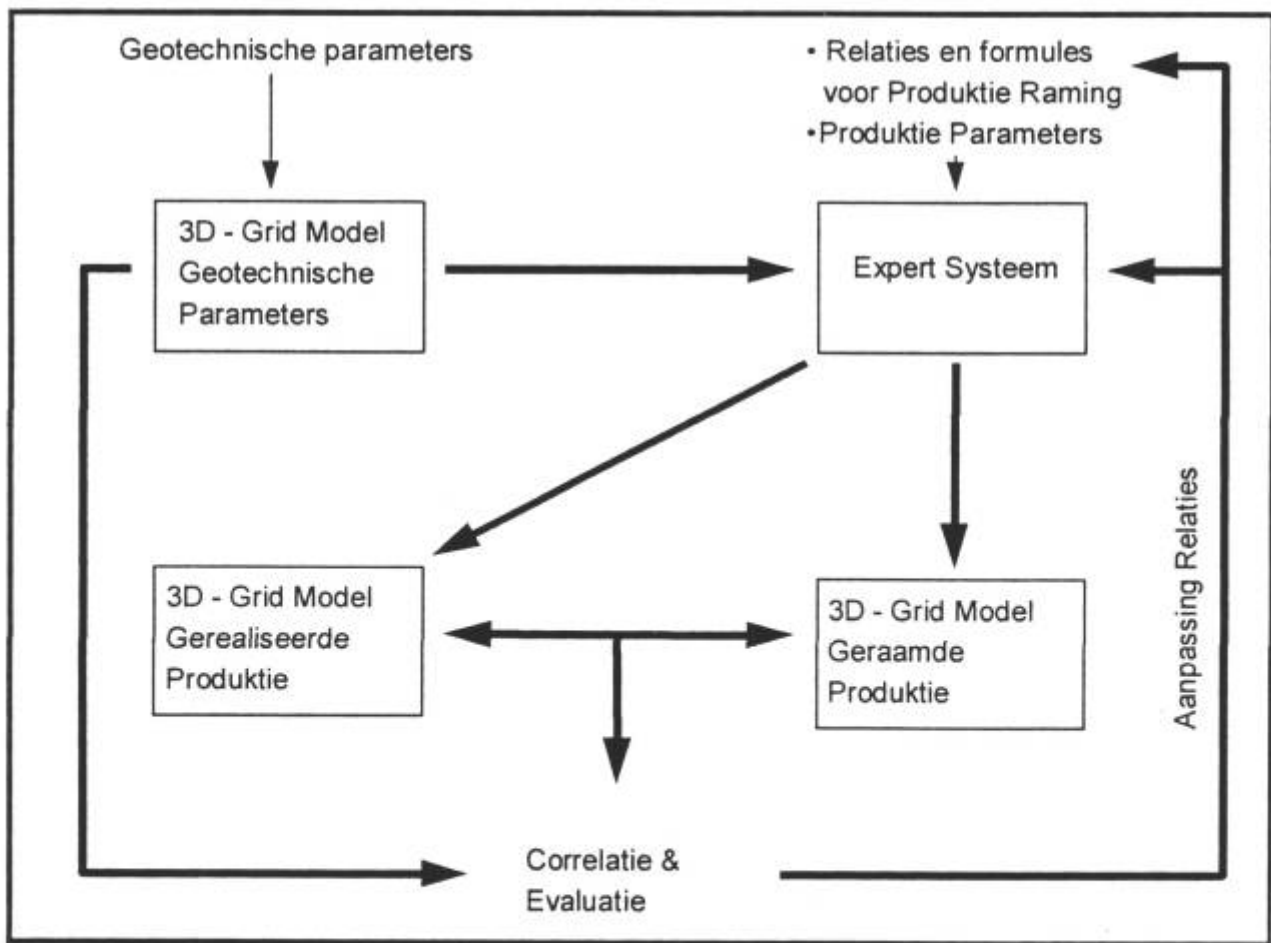


# Een drie-dimensionaal systeem voor de raming van baggerproducties in rots

- ir. M.H.A. Brugman, Fugro Engineers B.V.
- Dr. H.R.G.K. Hack, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC)
- ir. W.G. Dirks, Ballast Nedam Baggeren

Het maken van een betrouwbare raming van de productiesnelheid die een baggerschip kan leveren onder bepaalde condities is een belangrijk onderdeel van het plannen en budgeteren van projecten in de baggerindustrie. Bij het baggeren van rots met een snijkopzuiger is het lossnijden van het gesteente met de snijkop vaak de limiterende factor in het baggerproces. Invloed van de geotechnische eigenschappen op het snijproces is essentieel bij het ramen van snijproducties en is in het algemeen met beperkte nauwkeurigheid te bepalen. De druksterkte van het ongebroken gesteente en de gebrokenheid van de rotsmassa hebben tot nu toe hun weg gevonden in de relaties

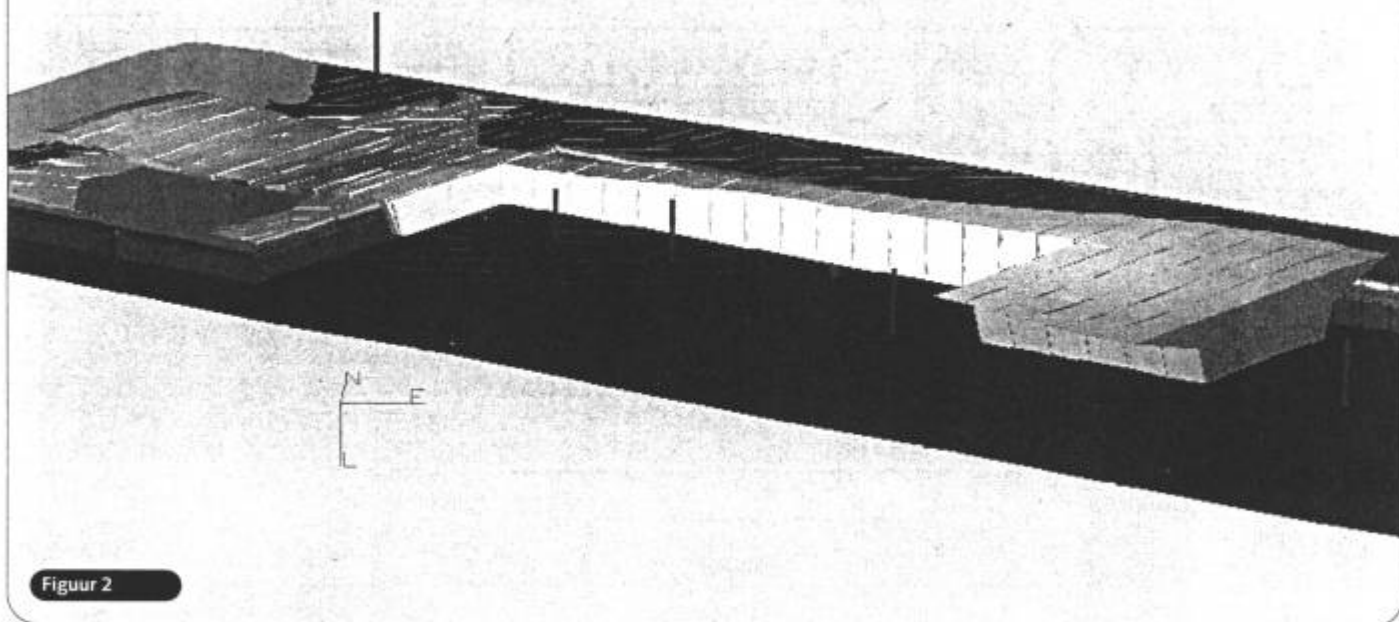
die over het algemeen voor productie ramingen toegepast worden. Er bestaan nog veel onzekerheden wat betreft de ideale methode van geotechnische karakterisatie van rotsmassa's voor baggerdoeleinden. Ook omtrent de exacte processen die plaatsvinden tijdens het lossnijden van rots bestaan nog veel onduidelijkheden. Hierdoor wordt, vooral wanneer het te baggeren materiaal uit rots bestaat, het ramen van productiesnelheden een complex proces. Tot op heden worden productieramingen dan ook meer op empirische relaties en eerdere ervaringen met baggermateriaal onder vergelijkbare omstandigheden gebaseerd dan op theoretische modellen.



Figuur 1

Vereenvoudigd stromingsdiagram van het ontworpen Expert 3D-GIS

## ØRESUND GEOLOGY CHAINAGE 2400 - 2700



3D-model van de geologie. Weergegeven zijn de verschillende geotechnische rotseenheden en de gebaggerde sleuf. De glaciële sedimenten zijn niet in de figuur weergegeven. De verticale lijnen duiden de boorgat locaties aan.

### 3D-GIS en expert systemen

Een nieuwe ontwikkeling op dit gebied, is de introductie van 3D GIS\* (Drie-dimensionale Geotechnische Informatie Systemen) en expert systemen. 3D GIS systemen worden al langer succesvol toegepast in de mijnbouw- en petroleum industrie voor het drie dimensionaal modelleren en karakteriseren van de ondergrond. 3D GIS vinden de laatste jaren steeds meer toepassing in de geotechniek. Het voordeel van de toepassing van expert systemen ligt in het feit dat er empirische kennis en menselijk redeneren in verwerkt kunnen worden. Deze systemen zijn hierdoor vooral geschikt om problemen op te lossen waarbij de relaties tussen de verschillende parameters wel kwalitatief maar niet kwantitatief te formuleren zijn, zoals bijvoorbeeld de relatie tussen geotechnische parameters en baggerproductiesnelheden.

Om de mogelijkheden van gekoppelde 3D GIS en expert systemen voor de baggerindustrie nader te onderzoeken is een dergelijk systeem ontworpen. Het systeem biedt de mogelijkheid baggerproducties te ramen gebaseerd op een drie-dimensionaal geotechnisch model van de te baggeren grondmassa dat met hetzelfde systeem gemodelleerd kan worden. Reeds bestaande produktieramingsmethoden en -formules zijn in het systeem opgenomen. Naast produktieramingen is het systeem ook ontworpen om gerealiseerde produktiesnelheden te berekenen uit continue gemeten parameters aan het baggerproces. Hierdoor is een terugkoppeling van de produktieramingen naar uiteindelijk behaalde produktiesnelheden mogelijk. Het hele proces wordt vereenvoudigd weergegeven in *figuur 1*.

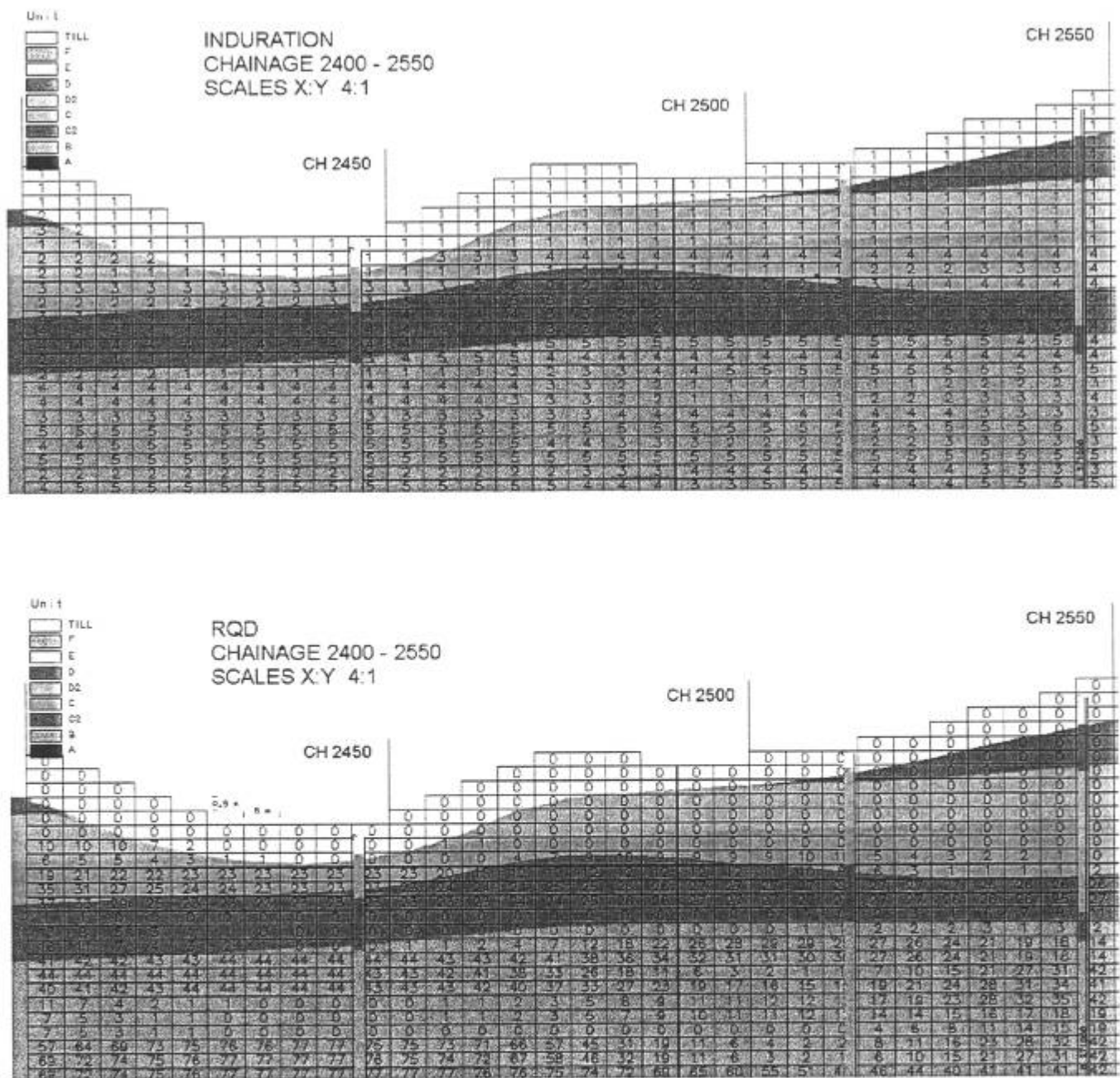
### Het Øresund Link Project

Om het ontworpen systeem te toetsen is gebruik gemaakt van een dataset verkregen tijdens het Øresund Link Project.

Het Øresund Link Project heeft als doel een verbinding tot stand te brengen tussen Denemarken en Zweden. De zestien kilometers lange verbinding zal gevormd worden door een tunnel aan de Deense zijde en een brug aan de Zweedse zijde. De tunnel en brug worden verbonden door een kunstmatig opgespoten eiland. De tunnel wordt aangelegd door middel van de zogenaamde 'cut and cover' methode. Ten behoeve van deze methode moest een sleuf gebaggerd worden, waarin later de tunnel elementen afgezonken zouden worden. De voornaamste taken van Ballast Nedam Baggeren tijdens het Øresund Link Project waren de aanleg van de sleuf voor de tunnel en de aanleg van het eiland ter verbinding van de tunnel en de brug. Het studiegebied voor dit onderzoek werd gevormd door een sectie van de te baggeren sleuf. De gebruikte datasets bestaan uit geotechnische gegevens verkregen tijdens het veldonderzoek en parameters die tijdens het baggerproces continu gemeten zijn.

### Geologische en geotechnische karakterisatie

De rotsbodem langs het tunnel alignment, waarin tevens het grootste deel van de baggeractiviteiten is uitgevoerd, wordt gevormd door kalksteen formaties van Tertiaire leeftijd. Over de rotsbodem zijn glaciële sedimenten afgezet, tot een dikte van over het algemeen twee tot vijf meter. Door lithificatie processen in de kalkstenen zijn sterk gecementeerde lagen, massieve vuursteen lagen en lagen met een hoge concentratie van onregelmatig gevormde bolvormige inclusies van vuursteen ontstaan. Een tweede belangrijke geotechnische eigenschap die waargenomen kan worden in de kalkstenen zijn horizontale en verticale breuken. De breuken zijn waarschijnlijk ontstaan door relaxatie van het gesteente na de ijstijden en compressie tektoniek waar het gebied aan onderhevig is geweest. De



**Figuur 3**

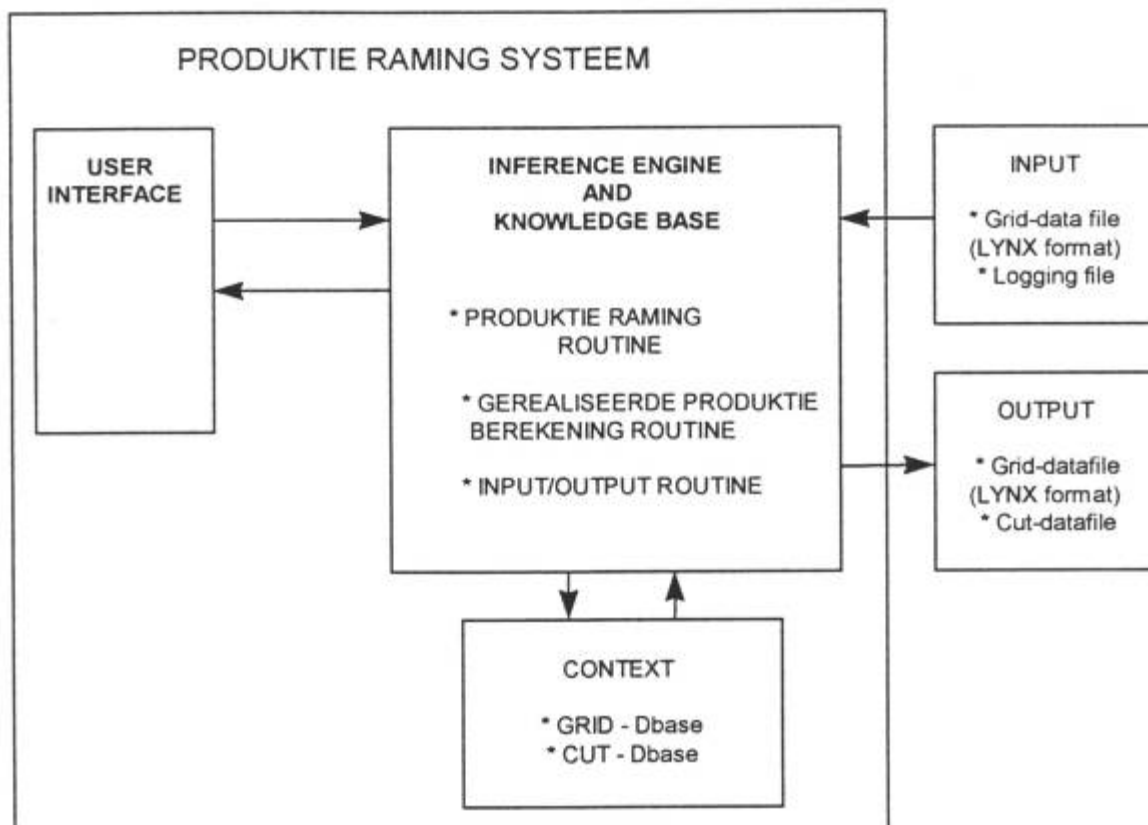
Lengte doorsneden van het geotechnisch model. Gemodelleerd zijn induration en RQD over een tracélengthe van 150 meter.

kalksteen formaties zijn op basis van verschillen in geotechnische eigenschappen onderverdeeld in een aantal geotechnische sub-eenheden.

**Drie-dimensionale modellering met het 3D GIS**

Voor drie-dimensionale geologische en geotechnische modellering van het studiegebied is gebruik gemaakt van het Lynx Geosystem. De basis voor zowel geologische als geotechnische modellering wordt gevormd door gegevens verkregen uit geotechnische boorgaten en ondiepe reflectie seismiek. Het gehele modelleringstraject kan opgedeeld worden in drie stappen, die nauw verweven zijn met elkaar. Deze stappen zijn:

- 1 Data management en geostatistische analyse van beschikbare gegevens. De geostatistische analyse wordt uitgevoerd om te onderzoeken of er een ruimtelijk verband bestaat tussen de gegevens verkregen uit de diverse boorgaten. Dit ruimtelijk verband wordt in een later stadium van de modellering gebruikt om de grondmassa die tussen de boorgaten in ligt te karakteriseren.
- 2 Geologische modellering. Voor de geologische modellering is gebruik gemaakt van de zogeheten oppervlakte modellering methode. De kracht van deze methode is haar efficiëntie en de beperkte tijd waarin het model gemaakt kan worden. Een nadeel van deze methode is de



Figuur 4

Stromingsdiagram van de organisatie van het expert systeem.

bepaalde mogelijkheid tot interactie en de methode is enkel geschikt voor minder complexe geologische modellen. Voor het doel van dit onderzoek was de methode zeer geschikt omdat door het voorkomen van de vele vuursteen lagen de scheidingsvlakken tussen de geotechnische eenheden goed gedefinieerd konden worden met behulp van de seismiek. *Figuur 2* geeft een 3D model van het resultaat van de geologische modellering weer.

3 Geotechnische modellering. De geotechnische modellering bestaat hoofdzakelijk uit de interpolatie van de geotechnische boorgatgegevens. Het gedefinieerde gebied wordt voorgesteld door een grid model. Dit grid model bestaat uit een aantal blokken en wordt gesneden met het geologisch model. Interpolatie van de boorgatgegevens vindt nu plaats en aan elk blok in het grid model wordt een waarde voor de verschillende geotechnische parameters toegekend. De doorsnijding met het geologisch model zorgt ervoor dat er niet buiten de geotechnische eenheden geïnterpoleerd wordt. Randvoorwaarden voor de interpolatie worden gevormd door de ruimtelijke verbanden tussen de geotechnische gegevens die gevonden zijn uit de geostatistische analyse. *Figuur 3* geeft een doorsnede van het 3D model van de geotechnische modellering weer.

Het uiteindelijke drie-dimensionale model van de ondergrond bestaat uit zeven verschillende geotechnische units. Voor elke unit zijn de volgende geotechnische

parameters gemodelleerd:

- Induration (combinatie van cementatie en hardheid van het gesteente)
- Fissuring (de gebrokenheid van het gesteente)
- Rock Quality Designation (RQD)
- Unconfined Compressive Strength (UCS)
- Brazilian Tensile Strength (BTS)
- Point Load Strength (PLS)
- Flint Content (procentuele hoeveelheid flint)

#### Het expert systeem

De expert systeem component is ontworpen voor de volgende doeleinden:

- 1 Realisatie van productiesnelheidsramingen gebaseerd op het geotechnische model
- 2 Berekening van gerealiseerde productiesnelheden op basis van digitale files waarin de continue metingen aan het baggerproces zijn vastgelegd.
- 3 Uitvoer van de geraamde- en gerealiseerde producties in verschillende file formats ter vergelijking en evaluatie van de geraamde en gerealiseerde producties.

Voor realisatie van het ontwerp van het systeem is gebruik gemaakt van de 'Extended Common Lisp' implementatie van het Lispworks programmeer pakket van Harlequin™. Het systeem is georganiseerd zoals weergegeven in het vereenvoudigde stromingsdiagram in *figuur 4*. Voor de architectuur van het systeem is in principe de architectuur van het 'Knowledge Based System' (KBS) gevolgd. De



kracht van de KBS is de isolatie van de kennis in een 'Knowledge Base' zodat de 'kennis' van het systeem overzichtelijk geordend is en eenvoudig en flexibel aangepast en uitgebreid kan worden. De volgende onderdelen van het systeem kunnen onderscheiden worden:

- 1 De context, ook wel met kort termijn geheugen aangeduid, bevat alle gegevens die direct nodig zijn voor het probleem dat op dat moment opgelost wordt. Het is georganiseerd in twee databases die opgebouwd zijn naar de geometrie van het gebied en zowel de randvoorwaarden voor de diverse berekeningen bevatten als ook de afgeleide gegevens.
- 2 De 'inference engine' en 'knowledge base'  
De inference engine is dat gedeelte van het systeem dat de routines en procedures nodig om tot een oplossing van het gestelde probleem te komen los laat op de toegeleverde gegevens. De routines maken gebruik van de 'kennis' en 'ervaring' opgeslagen in de 'knowledge-base'. De belangrijkste routines waaruit de inference engine is opgebouwd zijn de volgende:
  - Input/output routines. Deze verzorgen voornamelijk de communicatie tussen het 3D GIS en de databases van het expert systeem.
  - De produktieramingroutine voert de eigenlijke produktie raming uit. De produktieraming wordt gedaan per blok van het geotechnisch model. De raming valt op te delen in twee stappen. Allereerst wordt de specifieke energie ( $J/m^3$ ) bepaald uit de geotechnische parameters van de grondmassa. Vervolgens wordt de produktiesnelheid bepaald uit de specifieke energie. Geotechnische parameters die in de schatting worden meegenomen zijn onder andere UCS, RQD, induration en fissuring.
  - De derde routine voert de berekening van de gerealiseerde produktiesnelheden uit. De berekening is gebaseerd op continue metingen aan het baggerproces, die digitaal zijn vastgelegd. Gerealiseerde produkties worden bepaald over een ononderbroken periode van baggeractiviteiten. Er worden dus 'netto' baggerprodukties berekend waaruit vertragingen door toedoen van bijvoorbeeld reparaties aan baggermaterieel geen effect hebben op de produktiesnelheid. Parameters die door de routine gebruikt worden zijn onder andere RPM van de snijkop, het koppel op de snijkop, coördinaten van de snijkop en krachten op de ankerkabels.

Doordat de gerealiseerde produktie wordt berekend over een periode van ononderbroken baggeractiviteiten, is het baggervak (uitgegraven volume grond) groter dan een blok uit het grid model. Hierom moeten voor de vergelijking van gerealiseerde en geraamde produktiesnelheden de geraamde snelheden (over een aantal blokken per baggervak) uitgemiddeld worden.

Zowel de resultaten van de produktieraming als de resultaten van de berekening van gerealiseerde produkties kunnen gevisualiseerd worden met het 3D-GIS.

### Evaluatie

Het geotechnisch model van de te baggeren ondergrond voor de tunnel trench beslaat een sectie van ongeveer driehonderd meter in lengte richting. Gebruik makende van het ontworpen expert systeem is, gebaseerd op voornoemd geotechnisch model, een aantal verschillende produktieramingen gemaakt. Voor elke produktieraming worden de invloeden van de verschillende geotechnische parameters gevarieerd om het effect van deze parameters op de uiteindelijk geraamde produkties te kunnen onderzoeken. Als controlerende factor voor elke

verschillende produktieraming zijn de berekeningen van de gerealiseerde produkties gebruikt. Het ontworpen Expert-3D GIS biedt nieuwe inzichten in het proces van het ramen van baggerprodukties in rots. Door de efficiënte en overzichtelijke modellering met het 3D GIS wordt een betrouwbaarder beeld van de ondergrond verkregen. Het expert systeem is flexibel in de methodes van produktieramen en staat een snelle en eenvoudige terugkoppeling van ramingen naar gerealiseerde produktiesnelheden toe. Door deze flexibiliteit en mogelijkheid tot snelle terugkoppeling worden de invloeden van veranderingen in geotechnische parameters op het baggerproces doorzichtiger.

### Literatuur

Bray, R.N., Bates, A.D., Land, J.M., 1997, *Dredging: A Handbook for Engineers*, Arnold, London

Brugman, M.H.A., 1997, *A Three-Dimensional Production Estimation System, Memoir of the Centre for Engineering Geology in The Netherlands, No. 157*  
Houlding, S.W., 1994, *3D Geoscience Modeling, Computer Techniques for Geological Characterization*, Springer-Verlag, Berlin

Knudsen, C., Andersen, C., Foged, N., Jakobsen, P.R., Larsen, B., 1995, 'Stratigraphy and engineering geology of Kobenhavn Limestone', *DGF-BULLETIN 11*, pp. 5.117-5.126

Moula, M., Toll, D.G., Vaptismas, N., 1995, 'Knowledge-based systems in geotechnical engineering', *Geotechnique 45*, No. 2, 209-221.

Siezen, M., 1996, *A Three-Dimensional Dredgeability Classification System, Memoir of the Centre for Engineering Geology in The Netherlands, No. 140*