

# Belgisch Comité voor Ingenieursgeologie.

## Nationaal colloquium 1994.

### Geotechnisch en geologisch onderzoek bij de bouw van de NMBS-tunnel te Halle (België).

G. Lievens, H. Belmans, F. Theys  
P. De Schrijver

TUC RAIL  
Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap  
Bestuur Geotechniek  
Belgische Geologische Dienst  
TV Antwerpse Bouwwerken - Van Den Cloot

G. De Geyter, W. De Vos, H. Goethals  
J. Vyncke

#### SAMENVATTING.

Bij de aanleg van de HST-lijn Parijs-Lille-Brussel in België wordt de doorgang te Halle als tunnel uitgevoerd.

Ter plaatse van de te bouwen tunnel wordt onder de gemiddeld 10 m dikke Kwartaire deklagen de Vroeg-Paleozoïsche sokkel onderkend. De sokkelgesteenten worden gekenmerkt door een zeer steile gelaagdheid en een vlugge afwisseling van zandsteen, siltsteen en fylliet. Er zijn grote verschillen in verweringsgraad zodat de diepte waarop het hard gesteente wordt aangetroffen op korte afstand sterk varieert. Plaatselijk is het gesteente zeer intens verbrokken en verweerd tot meer dan 25 m diepte.

Het aanzetpeil van de wanden van de tunnel, gevormd uit secanspalen, situeert zich in de primaire sokkel. In uitvoeringsfase is de doorlatendheid van de sokkel maatgevend voor de nodige bemaling.

Ten behoeve van de uitvoering van de tunnel werd een intens geotechnisch en geologisch onderzoek uitgevoerd, omvattende diepsonderingen, onderkenningboringen, diagrafieboringen, dilatometerproeven, lugeonproeven, pompproeven en seismisch onderzoek.

## SUMMARY.

For the construction of the HST-railway-line Paris-Brussels, a tunnel is built near to the city-centre of Halle.

The early Palaeozoic basement is covered by Quaternary sediments with an average thickness of about 10 m. The rocks with steep dips are characterized by a rapid alternation of sandstones, siltstones and phyllites. At the top they show different degrees of weathering and therefore the fresh rock is found at strongly varying depths. Locally disintegration of rock occurs up to a depth of 25 m and more.

The tunnelwalls are made with secantpiles. The base level of the piles is situated in the rocks. For the constructionstage, the permeability of the rocks is normative for waterlowering.

Due to the complex geology, an extensive geotechnical and geological investigation, including CPT-tests, borings, diagraphic drillings, dilatometer and lugeon testing, pumping tests and seismic investigation was performed.

### 1. INLEIDING.

De oorspronkelijke stationsinfrastructuur te Halle bestaat uit de 4 sporen van de lijnen 94 (Brussel-Ath) en 96 (Brussel-Mons-Parijs) en de bijhorende reizigersperrons en ligt geprangd tussen enerzijds het kanaal Brussel-Charleroi en anderzijds de dicht bebouwde kom van de St. Rochuswijk. De gelijkgrondse ligging betekent eveneens een bijna fysische barrière, ongeschikt voor een vlot en aangepast wegverkeer tussen beide stadsgedeelten.

Daarom werd besloten samen met de nieuwe HST-lijn ook de bestaande lijnen voor het binnenlands treinverkeer ondergronds aan te leggen. Dit resulteerde in een projectdefinitie met 3 tunnels, zoals voorgesteld op figuur 1.

- HST-koker lengte 500 m, sectie ca. 13 x 6.2 m;
- kokers lijnen 94 en 96 : lengte 310 m, sectie ca. 11 x 6 m.

De totale lengte met inbegrip van de toegangshellingen bedraagt ruim 1000 m. De werken werden aangevangen eind november 1993 en zullen ca. 6 jaar duren.

De specifieke randvoorwaarden zoals het verzekeren van de continuïteit van het treinverkeer, de zeer beperkte beschikbare ruimte en de daaruit volgende gefazeerde uitvoering, de aard van de ondergrond en het beperken van de invloed op de grondwaterhuishouding zowel in uitvoeringsfase als in definitieve toestand, gaven aanleiding tot de keuze van een uitvoeringsmethode bestaande uit het achtereenvolgend realiseren van wanden met secansboorpalen en dakplaten, het uitgraven in stross van grond- en gesteentelagen, het verwezenlijken van de bodemplaten.

In de ontwerpfase (1989-1990) werd een eerder beperkt geotechnisch en geologisch onderzoek uitgevoerd ter verkenning van grondlagen en grondwaterstanden. De uitvoerings- en detailstudie vereiste een intensiever en meer gericht onderzoek (januari - augustus 1994) met tot doel quantificeren van de grondkarakteristieken naar berekening van de constructie-elementen, dimensioneren van de bemalingsinstallatie en begroten van de bemalingsinvloed op de omgeving.

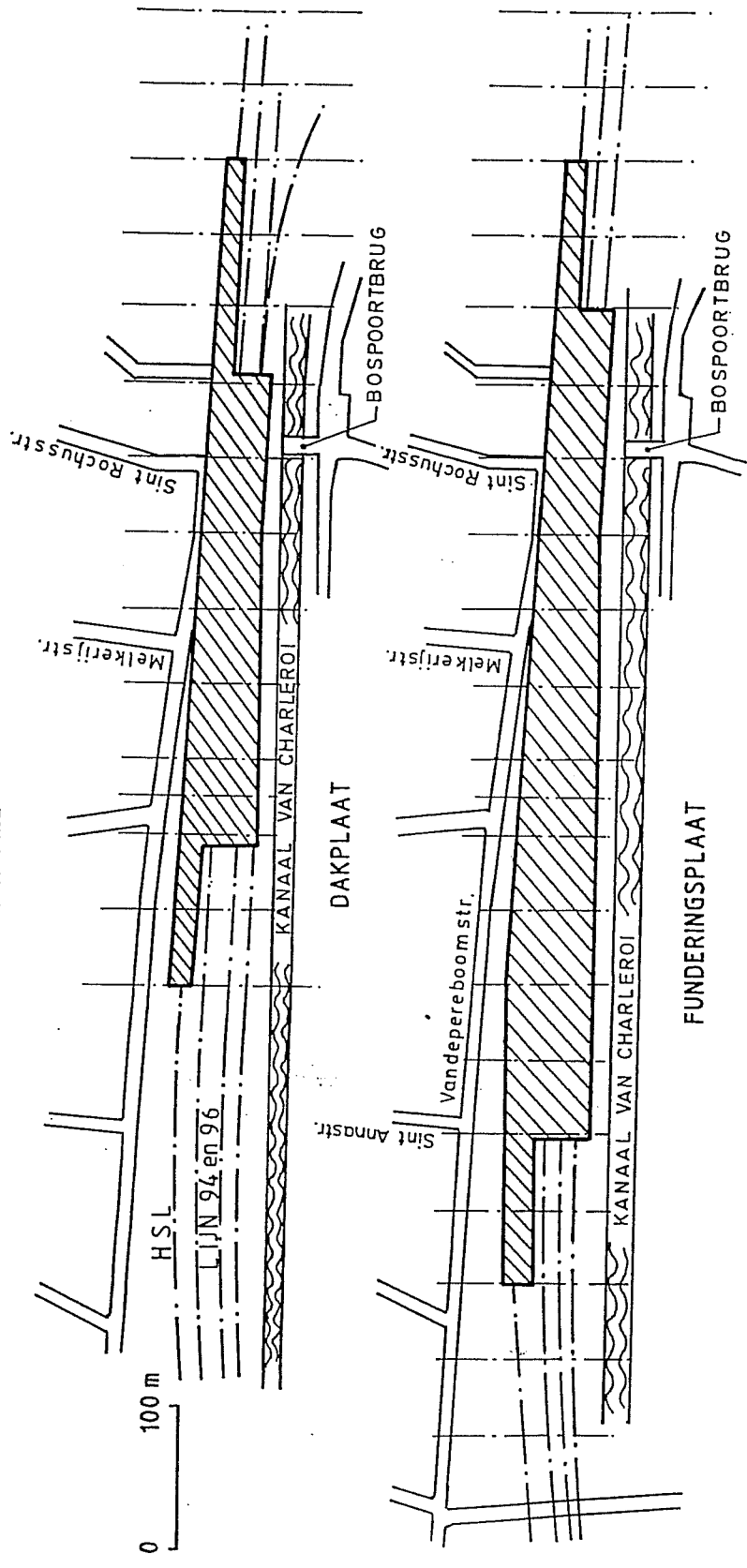
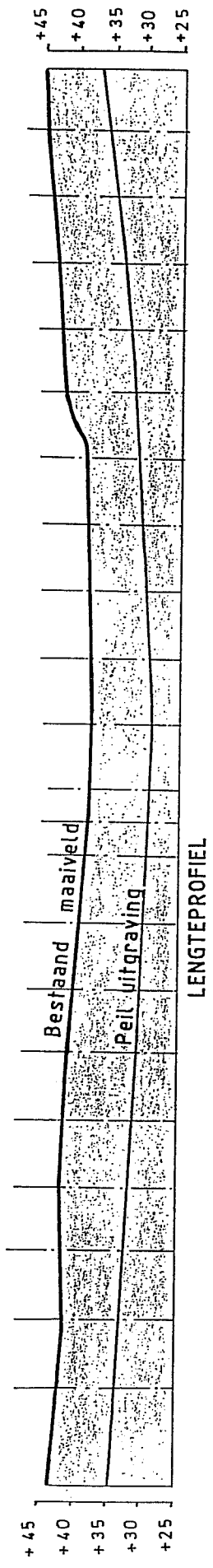


Fig.1 Lengteprofiel en planzichten

Tijdens de uitvoering moet tevens een controle-programma met betrekking tot paalaanzet en injectiebehoeften uitgevoerd worden.

In opdracht van TUC RAIL als bouwdirectie wordt het onderzoek begeleid en gecoördineerd door het BESTUUR GEOTECHNIEK van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, terwijl de uitvoering van de proeven in situ werd toevertrouwd aan verschillende gespecialiseerde privélabo's zoals ADINCO, GEOLAB, OREX, SMET-BORING, VAN VOOREN. De laboratoriumproeven werden uitgevoerd door het BESTUUR GEOTECHNIEK. De gedetailleerde beschrijving van de in de boringen ontnomen grondmonsters en kernen, evenals de geologische interpretatie werden verricht door de BELGISCHE GEOLOGISCHE DIENST.

## 2. GEOTECHNISCH ONDERZOEK.

In het kader van een eerste verkennend geotechnisch onderzoek ten behoeve van de aanleg van de HSL-lijn tussen Lembeek en Brussel werden in 1989 en 1990 een aantal diepsonderingen en boringen uitgevoerd ter plaatse van de te bouwen tunnel te Halle. Aan de hand van de resultaten van deze proeven was af te leiden dat onder de gemiddeld 10 m dikke Kwartaire bovenlagen de primaire sokkel werd onderkend. Evenwel werd vastgesteld dat de top van het sokkelgesteente sterk variabel was en op korte afstand soms belangrijk verschilde. Bovendien toonden de resultaten van de boringen dat de sokkel plaatselijk tot grote diepte sterk was verweerd. Om reden van deze heterogeniteit werd ter plaatse van de te bouwen tunnel een intense geotechnische campagne uitgevoerd, omvattende circa 70 diepsonderingen, 30 onderkenningsboringen, 25 diagrafiëboringen, 10 pressiometerboringen, dilatometerproeven, lugeonproeven, metingen aan open waterstandspijpen, pompproeven en seismisch onderzoek.

De diepsonderingen type 200 kN werden uitgevoerd met de mechanische conus M4. Er werd betracht zo diep mogelijk te sonderen, waartoe soms de kleefvanger werd gebruikt. De diepsonderingen bereikten diepten van minimaal 5 m tot maximaal 17 m. De diepte waarop een diepsondering diende stopgezet kon wijzen op de aanwezigheid van de primaire sokkel of de aanwezigheid van compacte lagen in de verweringszone van de primaire sokkel. Deze conusweerstanddiagrammen werden op een lengteprofiel getekend, waarna een vermoedelijke diepte van het primaire gesteente werd afgeleid.

Uitgaande van de resultaten van de diepsonderingen werden oordeelkundig onderkenningsboringen, diagrafiëboringen en pressiometerboringen ingeplant. De boringen werden systematisch uitgevoerd nabij een voorafgaandelijk uitgevoerde diepsondering of diagrafiëboring. Deze boringen reikten tot 5 m, plaatselijk tot 10 m in de rots. In de bovenlagen werden de boringen uitgevoerd als droogboring. Om de 0.5 m werden geroerde monsters ontnomen. Op bepaalde dieptes werden ongeroerde monsters ontnomen, waarop later laboratoriumonderzoek werd verricht, zoals de bepaling van korrelverdeling, gehalte aan kalk en organische stoffen, volumemassa, watergehalte, triaxiaalproeven en samendrukkingsproeven. In de primaire sokkel werden de boringen uitgevoerd als kernboring met continue ontnome van kernen. Door de boorbaas werden boorstaten opgemaakt met de gegevens omtrent de uitvoeringswijze van de boring, de aangeboorde grondlagen en de waterstandsmetingen in het boorgat. De grondmonsters en boorkernen werden door geologen van de Belgische Geologische Dienst in detail beschreven.

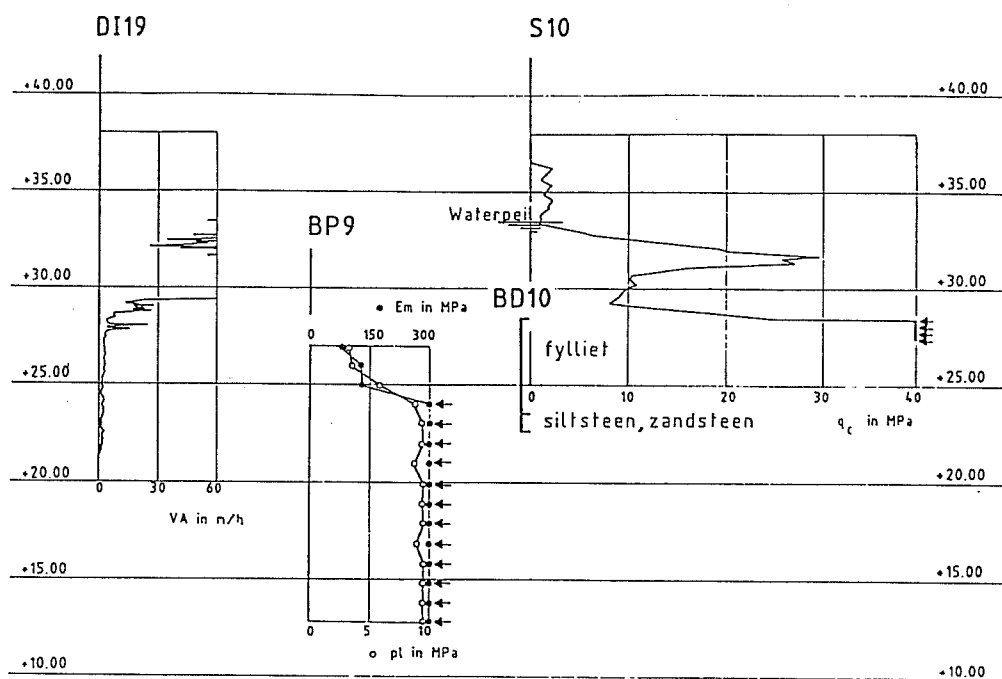
In de boorgaten van een aantal onderkeningsboringen werden in de rots open waterstandspijpen ingebouwd. Op diverse plaatsen in de site rond de voorziene tunnel werden door middel van spoelboringen eveneens open waterstandspijpen geplaatst tot op de primaire sokkel. Het waterpeil in de open waterstandspijpen wordt om de 14 dagen opgemeten en moet toelaten om het effect van de bouwwerken op het waterpeil in de omgeving na te gaan.

De diafragieboringen werden uitgevoerd om de weerstand en homogeniteit van de verweringszone en niet verweerde sokkel na te gaan, vooral onder het peil waarop de diepsonderingen wegens te hoge weerstanden dienden te worden stopgezet. De diafragieboringen werden destructief met de rolbeitel uitgevoerd, onder een constante verticale kracht van circa 780 kg, een constante injectiedruk met zuiver water van 2 à 3 bar, en een constant koppel op de boorstangen van 50 à 55 kgm. Verschillende boorparameters, zoals de ogenblikkelijke vooruitgangssnelheid, de druk in de boorvloeistof, het koppel op de stangen en de teruggekaatste trillingen werden geregistreerd. De variatie van de ogenblikkelijke vooruitgangssnelheid was een maat voor de weerstand en de homogeniteit van de al dan niet verweerde sokkel.

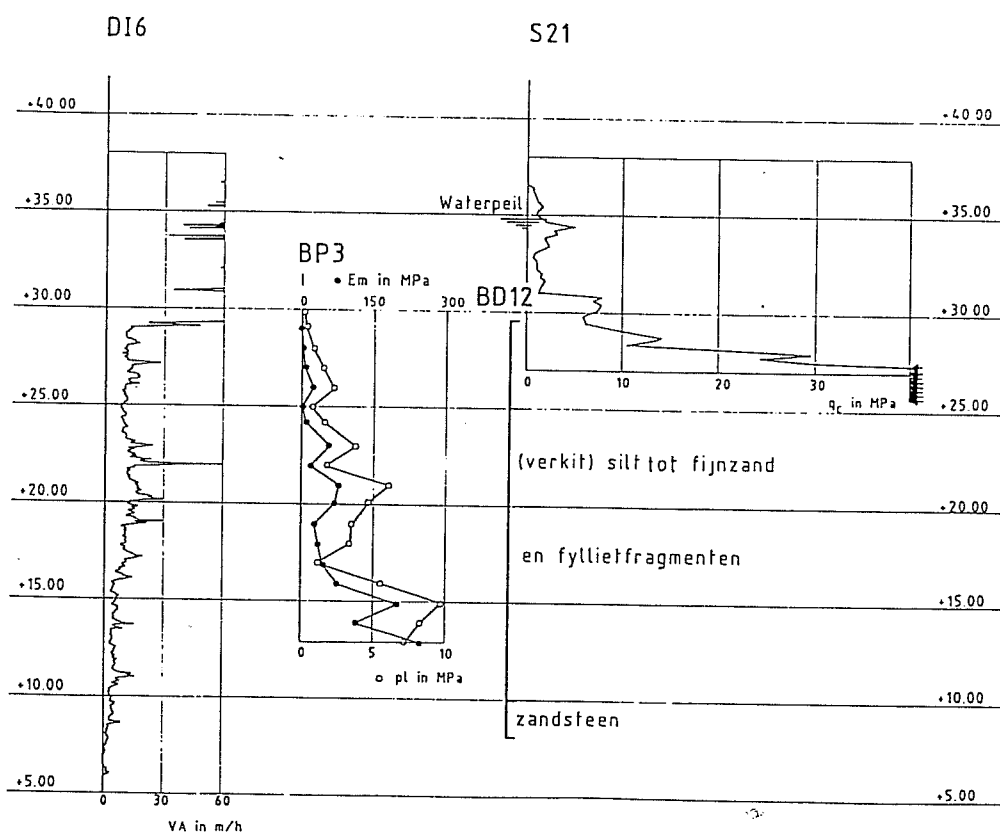
De conusweerstandsdiagrammen van diepsonderingen, de bekomen meetwaarden voor limiet-druk  $P_1$  en elasticiteitsmodulus  $E_m$  afgeleid van pressiometerproeven, en de vooruitgangssnelheid bij diafragieboringen zijn voorgesteld op de figuur 2. Er worden proefresultaten gegeven voor de site met weinig of slechts beperkte vertering van de sokkel, evenals voor de site met belangrijke vertering tot grote diepte.

In de gekernde boorgaten in de sokkel werden dilatometerproeven uitgevoerd. De meetresultaten van deze proeven laten toe de vervormingskarakteristieken van het gesteente te bepalen. De dilatometer bestaat uit een sonde met een vervormbaar membraan. Bij trapsgewijze toenemende drukken en onder drie welbepaalde richtingen wordt de vervorming van het membraan opgemeten. Bij een aantal proeven, vooral bovenaan het primair, werden te grote vervormingen opgemeten, zodat de proef vroegtijdig moest worden stopgezet. Uit de meetresultaten van de proeven, welke tot voldoende grote druk konden worden uitgevoerd, werden een aantal specifieke vervormingsparameters afgeleid, zoals de elasticiteitsmodulus  $E$  en de vervormingsmodulus  $T$ . De meetresultaten verschilden sterk van onderzoekspunt tot onderzoekspunt. Als elasticiteitsmodulus werden waarden afgeleid die varieerden van circa 1000 MPa tot plaatselijk 12.000 MPa. De waarden voor de vervormingsmodulus varieerden van 500 MPa tot plaatselijk 10.000 MPa.

In de gekernde boorgaten werden eveneens lugeonproeven uitgevoerd. Deze proeven verstrekten meer informatie over de doorlatendheid van de rots. Een pakker wordt in het boorgat neergelaten op welbepaalde diepte. Vervolgens wordt het waterdebiet in het boorgat dat onder waterdruk geplaatst wordt, opgemeten bij toenemende en afnemende druk. De lugeonproeven werden uitgevoerd over de hoogte van het gekernde boorgat d.i. tot circa 5 m, plaatselijk 10 m in de sokkel. De pakker werd geplaatst in de bovenste meter van de sokkel. Aan de hand van de uitgevoerde lugeonproeven werden sterk wisselende gemiddelde doorlatendheden afgeleid, welke varieerden van circa  $10^{-5}$  m/s in de meer verweerde zone tot minder dan  $10^{-8}$  m/s in de meer massieve gesteenten.



Proeven in zone met geen of slechts beperkte vertering



Proeven in zone met sterke vertering

Fig. 2 Resultaten diagrafie, pressiometer, diepsondering en boring.

Om op een verantwoorde wijze de bemalingsinstallatie te dimensioneren, werden er een 5-tal pompproeven uitgevoerd. Deze pompproeven reikten tot in de verweerde en onverweerde primaire sokkel. Uit de resultaten van de pompproef kon de doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  afgeleid worden voor de kwartaire bovenlagen, welke varieerde tussen  $10^{-5}$  m/s en  $10^{-4}$  m/s. Ook werd vastgesteld dat de doorlatendheid van de sterk verweerde primaire lagen ongeveer  $10^{-5}$  m/s is. Gelet op de vrij heterogene en complexe primaire lagenconfiguratie, zoals verder omschreven in de geologische beschouwingen, werd aangenomen dat de primaire sokkel is samengesteld uit een vlugge opeenvolging van sterk hellende lagen waarvan de doorlatendheid sterk kan variëren in functie van de aard en verweringsgraad van de betrokken laag.

In het kader van het verkennend onderzoek werd in 1990 eveneens een geofysisch onderzoek verricht met als doel op een continue wijze de diepte van de primaire sokkel en het verloop van de verschillende lagen te achterhalen. In een proefzone werden proeven uitgevoerd met refractieseismiek, reflectieseismiek en met resistiviteitsmetingen. Aan de hand van deze proeven werd afgeleid dat de onderzoekssite zeer ongunstig was voor het degelijk toepassen van geofysische methodes en dit omwille van de aanwezigheid van treinsporen, kabels, leidingen en allerlei metalen voorwerpen op en in de grond, van de zeer moeilijke toegankelijkheid van het spoorwegterrein en van het intense treinverkeer. Enkel de refractieseismiek gaf redelijk betrouwbare en bruikbare resultaten. Gelet op de relatief zwakke resultaten, enkele onvolkomendheden aan de methode en de moeilijke uitvoeringsomstandigheden op het spoorwegterrein werd beslist geen verdere seismische metingen uit te voeren.

### 3. GEOLOGISCHE LAGENOPBOUW.

#### 3.1. Massief van Brabant.

De gesteenten, die te Halle onder het Kwartair worden aangetroffen, behoren tot het Massief van Brabant, de oudste geologische structuur van de Belgische ondergrond. Dit Caledonisch Massief, ook kortweg de sokkel genoemd, komt voor in het grootste gedeelte van west en midden België en is op de meeste plaatsen bedekt door ongeplooiden lagen van Krijt- en Tertiairouderdom. Het dagzoomt plaatselijk in het zuidelijk gedeelte, o.m. in de Zenne vallei. Het Massief heeft een anticlinale structuur waarbij de belangrijkste as (Brussel-Gent-Oostende) wegduikt naar het west-noordwesten. De kern wordt gevormd door gesteenten van Laat-Precambrische tot Vroeg-Cambrische ouderdom, bekend als Groep van Tubize ("Devillien" van de oude geologische kaart). Voor meer informatie over de structuur en de geologische geschiedenis (van Laat-Precambrium t.e.m. Siluur) wordt verwezen naar De Vos et al (1993).

#### 3.2. Kenmerken van het onverweerd gesteente te Halle.

Hoewel slechts in 1 boring (BGM1) het gidsfossiel *Oldhamia* werd aangetroffen mag aangenomen worden dat alle gesteenten aangeboord in de tunnelzone te Halle behoren tot de Tubize groep en ongeveer 550 miljoen jaar geleden werden afgezet (een nauwkeurig tijdsinterval kan voor deze fossielarme gesteenten niet opgegeven worden). Het sokkelgesteente bestaat uit grijsgroene zandsteen, siltsteen en fylliet. De zandsteen kan grofkorrelig zijn en veldspaaathoudend en bevat vaak mica, meestal muscoviet, soms ook wat biotiet.

Magnetiet is vaak verspreid aanwezig en kan in sommige laagjes zelfs met het blote oog worden waargenomen. Chloriet is soms geconcentreerd in diaklazen en in veel boorkernen worden kwartsaders aangetroffen. Individuele lagen hebben een dikte van enkele dm tot enkele meters. Fyllietlaagjes zijn soms slechts enkele cm dik.

Soms is er een gegradeerde gelaagdheid ("graded bedding") zichtbaar, waarbij de korrelgrootte in één laag van onder naar boven (d.i. van oud naar jong) afneemt. In andere gevallen is het gesteente geband, door afwisseling van korrelgrootte (siltsteen, fijne zandsteen, fylliet) of door wisselend ijzergehalte, wat zich uit door de wisselende groene kleurintensiteit en variërende magnetische susceptibiliteit. Het magnetisch karakter van de lagen schijnt overigens onafhankelijk van de korrelgrootte te variëren.

Omdat de gelaagdheid slechts uitzonderlijk zichtbaar is, o.a. bij korrelgroottevariëaties en in gebande gesteenten kan de helling van de lagen enkel in een beperkt aantal boorkernen worden opgemeten : de helling varieert van 50° tot verticaal met een overwicht aan zeer steile gelaagdheid. In sommige gevallen kan worden vastgesteld dat de lagen overhellen, d.w.z. oudere lagen liggen op jongere.

Naar analogie met ontsluitingen te Lembeek kan niet uitgesloten worden dat zowel strekkingen met noordwest-zuidoost als met noordoost-zuidwest oriëntatie voorkomen. In een kleine ontsluiting op ongeveer 200 m ten zuidwesten van boring BD1 kan een noordwest-zuidoost strekking worden vastgesteld. Uit sommige metingen van gelaagdheid en druksplijting in boorkernen kan worden vooropgesteld dat in de ganse tunnelzone een overwicht van deze strekkingsrichting bestaat, zodat de lagen meestal nagenoeg loodrecht op de lengterichting van de tunnel staan en de grootste variatie in lithologie volgens die lengterichting wordt aangetroffen.

De intense plooiing van de gesteenten te Halle is veroorzaakt door verschillende fasen van de Caledonische orogenese (van Midden-Cambrium tot Vroeg-Devoon, zie o.m. Legrand, 1968 en Verniers & Van Grootel, 1991).

Ondanks de sterke plooiing is de graad van regionaal metamorfisme gering (Vander Auwera en André, 1985).

### 3.3. Kwartair en verweerd sokkelmateriaal.

De Kwartaire afzettingen bestaan voornamelijk uit zandhoudende klei, leem, kleihoudend fijn zand met verspreide silexkeien en plaatselijk grindlaagjes. De klei- en leemlagen worden steeds in het bovenste gedeelte (exclusief aanvullingen) aangetroffen. De dikte van het onderliggend kleihoudend zand varieert sterk : in sommige boringen is het zeer dun of zelfs afwezig, in andere is het zand het belangrijkste bestanddeel van het Kwartair. Gerolde gesteentefragmenten komen plaatselijk in de klei- en leemlagen voor maar zijn vooral geconcentreerd aan de basis van de zandlaag. De totale dikte van het Kwartair varieert tussen 7 en 15 m, zoals voorgesteld in figuur 3. Deze diktewisselingen zijn wellicht grotendeels te wijten aan zijdelingse verplaatsingen en oude meanderbochten van de Kwartaire Zennerivier.

Het is niet uitgesloten dat in het noordelijk gedeelte van de onderzochte zone (boringen BGM5, BGM7 en BOM18) enkele meters Vroeg-Tertiaire ("Onder-Landenaan") afzettingen aanwezig zijn onder het Kwartair. Gelijkaardige groene glauconiethoudende fijne zanden werden aangeboord op de oostelijke valleiflank van de Zenne onder Ieperiaanklei.





Het sokkelgesteente vertoont grote verschillen in verweringsgraad. De term verwerking wordt hier gebruikt voor alle processen die leiden tot de afbraak en het uiteenvallen van harde gesteenten in situ. Het sterk verweerde sokkelmateriaal aangetroffen in kernen bestaat uit zeer zachte gesteentefragmenten (d.i. met de hand breekbaar) waarin nog enige structuur kan onderscheiden worden tot nagenoeg volledig losgemaakt verweringsmateriaal waarin de oorspronkelijke structuur niet meer kan herkend worden. Er is geen scherpe scheiding tussen onverweerd en verweerd sokkelgesteente : grote verschillen in hardheid en verbrokkelingsgraad komen voor, soms zelfs in kernen van eenzelfde boring. Omdat de vele variaties niet in detail kunnen voorgesteld worden geeft figuur 3 enkel een sterk vereenvoudigd beeld van de verwerking. Gesteenten die matig tot sterk verbrokkeld zijn (bv. de kernen van boring BD4) worden tot de ("onverweerde") sokkel gerekend en nagenoeg losse intervallen tussen massieve kernen (bv. in boring BD2) worden niet onderscheiden. In nagenoeg alle boorkernen kan chemische verwerking worden opgemerkt. In massieve weinig verbrokkelde kernen is deze verwerking meestal beperkt tot de vorming van ijzeroxiden langs diaklaasvlakken en soms ook in kwartsaders. In verschillende kernen worden bruinrode vlekken aangetroffen in zones zonder diaklazen en in boring BD9 is de zandsteen over de volledige lengte van de kernen bruin verweerd maar matig verbrokkeld en relatief hard.

In het sterk verweerde sokkelmateriaal onder het Kwartair was kernontname praktisch onmogelijk. Het verweringsmateriaal kan in de geroerde monsters doorgaans duidelijk onderscheiden worden van het Kwartair door de kleur en het plaatselijk voorkomen van relatief harde niet gerolde gesteentefragmenten en aderkwarts.

Soms worden oranje, roze en beige kleuren opgemerkt (bv. in de boringen BD11 en BGM5) die wijzen op chemische verwerking; in andere boringen worden gemakkelijk oxideerbare mineralen aangetroffen (zoals volledig intacte pyrietkristallen) die duiden op een zeer sterke verbrokkeling onder niet-oxiderende omstandigheden. Aangezien er in de meeste gevallen een goede overeenkomst is tussen de maximale diepte van de sondering en de top van het sterk verweerde sokkelmateriaal lijkt verspoeling van dit materiaal uitgesloten. De dikte van de sterk verweerde sokkel varieert sterk. In verschillende boringen rust het Kwartair op de onverweerde sokkel, in de boringen BD11 en BD12 in de onmiddellijke omgeving van het station, was de eerste kernontname pas mogelijk op 28 m diepte.

Er lijkt geen duidelijk verband te bestaan tussen de lithologische samenstelling en de dikte van de sterk verweerde zone. In BD11 en BD12 bestaat het sterk verweerde materiaal vooral uit silthoudend zeer fijn zand en zandhoudende silt, in verschillende andere boringen waar aan de top zandsteen wordt aangetroffen is het sokkelgesteente niet verweerd. In boring BOM13, die op 19.5 m diepte werd stopgezet zonder kernontname, wordt voornamelijk siltrijke klei aangetroffen. De diepe intense verbrokkeling lijkt vooral plaatsgebonden maar er moet worden benadrukt dat in figuur 3 enkel rekening gehouden is met boringen. In boring BD11 wordt opvallend veel aderkwarts aangetroffen in de geroerde monsters. Het is niet uitgesloten dat het gesteente hier zeer sterk gespleten was en dat door inwerking van het grondwater diepe verwerking is opgetreden. In boring BD12 is er echter weinig aderkwarts aanwezig en daarenboven lijkt het sokkelmateriaal in de geroerde monsters sterke fysische desagregatie van de korrels te vertonen en slechts een geringe chemische verwerking.

Laboratoriumanalyses (o.m. studie van slijpplaatjes en kleimineralogisch onderzoek) van ongeroerde monsters waarin nog structuren herkenbaar zijn zouden wellicht meer duidelijkheid kunnen verschaffen over de oorzaak van de lokale diepe verwerking en vooral over het relatieve belang van chemische verwerking.

#### 4. KEUZE VAN DE UITVOERINGSWIJZE VAN DE TUNNEL.

Uit de resultaten van het verkennend geotechnisch onderzoek en uit de algemene geologische opbouw van de streek kon er worden afgeleid dat de gesteenten van de sokkel een subverticale gelaagdheid vertonen en een sterk verschillende verweringsgraad.

Verder volgt er uit het lengteprofiel van de tunnel dat er uitgravingen dienden te worden gerealiseerd tot omstreeks de bovenkant van de primaire sokkel en plaatselijk zelfs tot beperkte diepte in de primaire sokkel.

Wegens de specifiek ter plaatse aangetroffen grondgesteldheid werd er voor de uitvoering van de tunnelwanden geopteerd voor secanspalen. Deze uitvoeringswijze van de tunnelwanden biedt immers het grote voordeel dat lokale verschillen in de bovenkant van de sokkel goed kunnen gevolgd worden, dat het mogelijk is om steenhoudende lagen te doorboren en om een degelijke verankering in de primaire sokkel te realiseren.

Door de relatief hoge ligging van de primaire sokkel was het duidelijk dat de wanden langs de buitenkant van de tunnel slechts met een beperkte steek zouden kunnen worden uitgevoerd. Teneinde zich ervan te verzekeren dat de tunnel zou kunnen worden drooggemaakt, werden er in het bestek een aantal maatregelen voorzien, zoals het uitvoeren van boringen met lugeonproeven en diagrafieboringen tot 5 m onder de aanzet van de palen en het eventueel uitvoeren van injecties teneinde de doorlatendheid van de bovenste zone van de primaire sokkel te beperken.

De secanspalen, welke de buitenwanden van de tunnel vormen, hebben een diameter van 1,30 m. De as op as afstand bedraagt 1,10 m. Alle palen worden volledig uitgevoerd met verbuizing. Voor het uitvoeren van de controleboringen onder de palen worden de wapeningskooien van de secundaire palen voorzien van twee stalen buizen met een diameter van 120 mm welke reiken tot 0,50 m boven de onderkant van de wapeningskooien. Na de plaatsing van een aantal palen langs de kant van het kanaal, werden er doorheen deze buizen een 15-tal diagrafieboringen uitgevoerd, alsook twee injectieproeven.

Deze injectieproeven bestonden telkens uit het voorafgaandelijk uitvoeren van een kernboring met lugeonproef, het injecteren van drie boorpalen op onderlinge afstanden van 2,20 m en het nadien uitvoeren van een controleboring met lugeonproef.

Alle boringen werden uitgevoerd tot 5 m onder de aanzet van de palen.

De injecties werden uitgevoerd met een water- cementspecie met een W/C factor van 1,0.

De maximum injectiedruk bedroeg 5 bar.

Uit de resultaten van deze proeven kan worden afgeleid dat :

- Het niet mogelijk is om een verband te leggen tussen de resultaten van de diagrafieboringen en de geïnjecteerde hoeveelheden.
- De heterogeniteit van de bovenkant van de sokkel zeer groot is. Zo werd bij de lugeonproeven, uitgevoerd na injectie in de eerste zone, een duidelijk kleinere doorlatendheid aangetroffen en in de tweede zone een duidelijk grotere doorlatendheid.

Op basis van de aldus verkregen informatie werd beslist om doorheen alle buizen een injectie uit te voeren en om de daartoe nodige boringen gewoon destructief uit te voeren zonder registratie van de boorparameters.

Voor het nazicht van het draagvermogen van de secanswand en van de singuliere palen in de tussenwanden werd er vooral gesteund op de beschikbare resultaten van pressiometerproeven. Omdat er voor de verweerde zone van de sokkel enige onzekerheid bestond in verband met de aanwending van de vrij hoge pressiometerwaarden, werd er gepoogd om deze waarden te controleren door middel van diepsonderingen. Daartoe werden er voorafgaandelijk voerbuizen geplaatst tot resp. 19 en 21 m diepte. De doorheen deze voerbuizen uitgevoerde diepsonderingen zijn evenwel op een diepte van ca. 60 cm vastgelopen. De opgemeten conusweerstand bedroeg meer dan 50 MN/m<sup>2</sup>.

Wegens de grote heterogeniteit van de bovenkant van de primaire sokkel werd voor het nazicht van het horizontaal evenwicht van de secanspalenwand alleen een wrijvingshoek van 35° in rekening gebracht.

Dit heeft voor gevolg gehad dat alle palen met een aanzienlijke steek dienen te worden uitgevoerd. Mits het aanwenden van een aangepaste boortechniek worden er bij de realisatie van deze steek geen grote problemen ondervonden.

## 5. CONCLUSIE.

Ter plaatse van de te bouwen NMBS-tunnel te Halle is de lagenopbouw sterk heterogeen. De sokkelgesteenten worden op wisselende diepte onderkend en zijn plaatselijk tot grote diepte verbrokkeld of sterk verweerd.

Een omvangrijk geotechnisch en geologisch onderzoek werd uitgevoerd teneinde een zo duidelijk mogelijk beeld te krijgen van de ondergrond.

Aan de hand van de beschikbare gegevens was het mogelijk de bouwwijze van de tunnel oordeelkundig vast te leggen. Alhoewel de heterogeniteit van de ondergrond niet toelaat om alle specifieke geotechnische gegevens in ieder punt van de bouwsite vooraf vast te leggen, geeft het omvangrijk onderzoek een ruime informatie, welke toelaat eventuele tijdens de bouw optredende geotechnische problemen te evalueren en een afdoende oplossing uit te werken.

## REFERENTIES.

DE VOS, W., VERNIERS, J., HERBOSCH, A. & VANGUESTAINE, M. (1993).

A new geological map of the Brabant Massif, Belgium. *Geological Magazine*, 130, pp. 605-611. Cambridge University Press.

LEGRAND, R. (1968). Le Massif du Brabant. *Mémoires pour servir à l'explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*. Mémoire N° 9, 148 p. Service Géologique de Belgique, Bruxelles.

VANDER AUWERA, J. & ANDRE, L. (1985). Sur le milieu de dépôt, l'origine des matériaux et le facies métamorphique de l'Assise de Tubize (Massif du Brabant, Belgique). *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 94, pp. 171-184. Bruxelles.

VERNIERS, J. & VAN GROOTEL, G. (1991). Review of the Silurian in the Brabant Massif, Belgium. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 14, pp. 163-193. Liège.