

TOEGEPASTE GEOLOGIE EN HYDROGEOLOGIE

INVENTARISATIE VAN DE KENNIS
VAN DE IEPERIAANKLEI IN FUNCTIE VAN ONDERZOEK
NAAR DIEPE BERGING VAN HOOGRADIOACTIEF AFVAL
FAZE 3

84/30

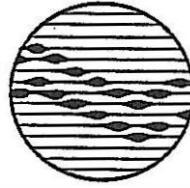


UNIVERSITEIT GENT

Laboratorium
voor
Toegepaste Geologie
en
Hydrogeologie

INVENTARISATIE VAN DE KENNIS
VAN DE IEPERIAANKLEI IN FUNCTIE
VAN ONDERZOEK NAAR DIEPE BERGING
VAN HOOGRADIOACTIEF AFVAL

FAZE 3



Geologisch Instituut
Krijgslaan 281, S8
B-9000 Gent

tel. 09/264 46 47
fax 09/264 49 88

Opdrachtgever

NIRAS

Leiding : Prof. Dr. W. DE BREUCK
Studie en verslag : Lic. D. DE SMET
Lic. L. OLIVIER

Projectnummer : TGO 94/30

Datum : februari 1996

INHOUD

Lijst van figuren	1
Lijst van tabellen	1
1. Inleiding	2
2. Formatie van Kortrijk	3
2.1. Algemene kenmerken	3
2.2. Vergelijking met de Formatie van Boom	5
3. Mogelijke bergingsgebieden	6
3.1. Bergingsgebieden in de Formatie van Kortrijk	6
3.1.1. Ruimtelijke ordening	6
3.1.2. Geologie	7
3.1.3. Sedimentologie van de Formatie van Kortrijk	9
3.1.4. Hydrogeologie	9
3.2. Bergingsgebied in de Formatie van Boom	11
3.2.1. Algemene kenmerken	11
3.2.2. Geologie	11
3.2.3. Sedimentologie van de Formatie van Boom	13
3.2.4. Hydrogeologie	14
4. Seismologische activiteit in België	19
5. Evaluatie	23
6. Voorstel tot toekomstig onderzoek	28
6.1. Doelstellingen	28
6.2. Verkenningsboringen	29
6.2.1. Uitvoering	29
6.2.2. Plaats	29
6.2.3. Te verwachten geologische opbouw	34
6.3. Geofysische boorgatmetingen	39
6.4. Afwerking van de putten	40
6.5. Laboratoriumanalysen	41
7. Samenvatting en algemeen besluit	42
Referenties	45

LIJST VAN FIGUREN

- Fig. 3.1 Lithologische doorsneden ter hoogte van Knokke, Assenede en Kallo (in Assenede is de informatie onder het Lid van Kortemark geïnterpoleerd)
- Fig. 3.2 Geologische opbouw ter hoogte van Mol (boring nr. SCK 15, BGD 31W 137)
- Fig. 3.3 Gemodelleerde piëzometrische kaart van de sedimenten van de Formaties van Brasschaat, Merksplas, Mol en Poederlee (WEMAERE & MARIVOET, 1995)
- Fig. 3.4 Gemodelleerde piëzometrische kaart van de sedimenten van het Mioceen (WEMAERE & MARIVOET, 1995)
- Fig. 3.5 Gemodelleerde piëzometrische kaart van de zanden van het Lid van Ruisbroek (WEMAERE & MARIVOET, 1995)
- Fig. 3.6 Snelheid van de verticale grondwaterstroming in mm per jaar doorheen de klei van de Formatie van Boom (WEMAERE & MARIVOET, 1995)
- Fig. 4.1 Overzichtskaart van de geregistreerde aardbevingen in België (uit WOUTERS & VANDENBERGHE, 1994 naar CAMELBEECK, 1989)
- Fig. 4.2 Geologie van de paleozoïsche sokkel in België - het Massief van Brabant (naar DE VOS et al., 1994)
- Fig. 5.1 Korrelgrootteverdeling van de Formatie van Kortrijk in Knokke en Kallo versus de korrelgrootteverdeling van de Formatie van Boom in Mol
- Fig. 6.1 Ruimtelijke Ordening van de omgeving Sint-Margriete - Waterland-Oudeman (Gewestplan Eeklo-Aalter, 1978)
- Fig. 6.2 Ruimtelijke Ordening van de omgeving De Klinge - Meerdonk (Gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren, 1978)
- Fig. 6.3 Ruimtelijke Ordening in de omgeving van Doel (Gewestplan Sint-Nikaas - Lokeren, 1978)
- Fig. 6.4 Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Sint-Margriete
- Fig. 6.5 Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Waterland - Oudeman
- Fig. 6.6 Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van De Klinge - Meerdonk
- Fig. 6.7 Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Doel

LIJST VAN TABELLEN

- Tabel 5.1 De Formatie van Kortrijk versus de Formatie van Boom

1. INLEIDING

In november 1994 verzocht het NIRAS het Laboratorium voor Toegepaste Geologie en Hydrogeologie van de Universiteit Gent (LTGH) om de beschikbare gegevens over de Ieperiaanklei in België te inventariseren en te verwerken. Deze studie kadert in de problematiek van de diepe berging van hoogradioactief afval (categorie C) in België. Sedert meer dan 20 jaar wordt in dit verband onderzoek op de Formatie van Boom te Mol - Dessel uitgevoerd. Aan de Formatie van Kortrijk (Ieperiaanklei) werd echter nog geen aandacht geschonken.

Bij diepe berging van hoogradioactief afval dient de gastlaag op lange termijn de meest doeltreffende barrière tegen de migratie van radionucliden te vormen. Het spreekt vanzelf dat daarom een goede geologische kennis van een potentieel bergingsgebied onontbeerlijk is. Tijdens de fazen 1 en 2 van dit project werden de beschikbare gegevens over de Formatie van Kortrijk in België verzameld en verwerkt. De gebieden die op basis van de lithologische en geometrische kenmerken in aanmerking komen voor de berging van hoogradioactief afval in de Formatie van Kortrijk (faze 1) werden meer in detail onderzocht tijdens faze 2. De nadruk lag hierbij op de geologische en de hydrogeologische kenmerken. Ook aan de aspecten geografie en ruimtelijke ordening werd de nodige aandacht besteed.

Het verslag van faze 3 vat niet enkel de kenmerken van de mogelijke bergingsgebieden in de Formatie van Kortrijk samen. Ook worden de geologische kenmerken van de mogelijke bergingsgebieden in de Formatie van Kortrijk vergeleken met deze van de streek van Mol - Dessel, waar de Formatie van Boom de mogelijke gastlaag vormt. Wegens het gebrek aan gegevens diende men in het bestek van dit project veel interpolaties uit te voeren. Om deze te toetsen aan de werkelijkheid zijn proefboringen noodzakelijk. Aan de hand van de verzamelde informatie worden plaatsen voor toekomstige verkenningsboringen voorgesteld.

Het verslag van faze 3 is als volgt opgebouwd :

2. Formatie van Kortrijk;
3. Mogelijke bergingsgebieden;
4. Seismologische activiteit in België;
5. Evaluatie;
6. Toekomstige analysetechnieken;
7. Samenvatting en algemeen besluit.

2. FORMATIE VAN KORTRIJK

2.1. Algemene kenmerken

In de nieuwe lithostratigrafische indeling (MARECHAL & LAGA, 1988) wordt de Formatie van Kortrijk (Ieperiaanklei) opgedeeld in vier leden. Van onderen naar boven zijn dit :

- de zandige klei van het Lid van Mont-Héribu;
- de klei van het Lid van Saint-Maur;
- de klei van het Lid van Moen;
- de klei van het Lid van Aalbeke.

In de klei van de Formatie van Kortrijk komen enkele meer siltige intercalaties voor, die belangrijker worden naar het oosten toe. De lithologie en de opeenvolging van de verschillende leden van de Formatie van Kortrijk zijn plaatsafhankelijk. Op basis hiervan kan men vijf belangrijke gebieden beschouwen. Bij deze indeling werd het Lid van Mont-Héribu wegens zijn geringe dikte en zandige samenstelling buiten beschouwing gelaten.

In *Gebied I*, ten westen van de lijn Nieuwkerke-Diksmuide-Brugge, zijn de sedimenten van de Formatie van Kortrijk lithologisch voor berging geschikt. De formatie vormt in zijn geheel een zeer homogene kleilaag, waarin het onderscheid tussen de leden niet duidelijk te bepalen is. Rekening houdende met het vereiste diktecriterium zou berging in gebied I ten noorden en ten oosten van Brugge mogelijk zijn. Het onderste meest kleiige gedeelte (Lid van Saint-Maur) is te Knokke, nabij de Nederlandse grens, meer dan 100 m dik; de top van dit kleiige gedeelte bevindt zich te Knokke op een diepte van ongeveer 180 m.

In *Gebied II*, ten noordwesten van de lijn Avelgem-Aalst-Turnhout, neemt de lithologische geschiktheid van de Formatie van Kortrijk in functie van de berging van hoogradioactief afval af van west naar oost. Dit wordt bepaald door het middenste Lid van Moen waarvan de korrelgrootte toeneemt naar het oosten. Waar de lithologische grens tussen geschikt en ongeschikt voor het gestelde probleem ligt, is moeilijk te bepalen. Ten noorden van de lijn Torhout-Deinze-Zottegem-Dendermonde-Mechelen voldoet de formatie aan de voorwaarde van minimale dikte. Enkel in een smalle W-E-gerichte strook tussen Lillo en 's-Gravenwezel kan de dikte iets minder dan 100 m bedragen. De onderste homogene kleilaag van het Lid van Saint-Maur wordt ten noorden van de lijn Sint-Laureins - Assenede waarschijnlijk 100 m dik; de top van deze kleilaag ligt er minstens 200 m onder het maaiveld.

In *Gebieden III, IV en V*, ten zuidoosten van de lijn Avelgem-Aalst-Turnhout, kan berging in de Formatie van Kortrijk uitgesloten worden. De lithologie van het middenste gedeelte (Lid van Moen) is hier uitgesproken zandig. Daar waar het middenste lid niet voorkomt, voldoet de dikte van de Formatie van Kortrijk niet aan de gestelde eisen.

De klei van de Formatie van Kortrijk kan in zijn geheel als zeer slecht-doorlatend beschouwd worden. Deze laag is echter niet ondoorlatend. Door de verandering in lithologie verschillen de hydraulische parameters sterk van plaats tot plaats. Precieze gegevens zijn er niet daar de absolute doorlatendheid van de Formatie van Kortrijk nog op geen enkele plaats werd bepaald.

De Formatie van Kortrijk wordt gekenmerkt door belangrijke kleitektonische vervormingen. Zowel breuken, golvingen als diaklazen komen voor. Er bestaan geen aanwijzingen betreffende de invloed van deze vervormingen op de doorlatendheid van de Formatie van Kortrijk. De vervormingen werden in het Noordzeegebied en in West-Vlaanderen opgemerkt. Meer naar het oosten toe werden dergelijke vervormingen nog niet waargenomen.

De belangrijkste kleimineralen in de Formatie van Kortrijk zijn (in volgorde van belangrijkheid) : smectiet, illiet en chloriet. Smectiet, veruit het belangrijkste kleimineraal (45 - 80 %), heeft een hoge kationuitwisselingscapaciteit. De Formatie van Kortrijk bevat in hoofdzaak mineralen met een zekere natuurlijke radioactiviteit (kleimineralen, glimmers, veldspaten, zirkoon). Over het gehalte aan organisch materiaal is weinig bekend maar de beschikbare gegevens wijzen op een relatief laag percentage.

2.2. Vergelijking met de Formatie van Boom

Ook de Formatie van Boom vormt een mogelijke gastlaag voor de diepe berging van hoogradioactief afval. Deze laag wordt uitgebreid bestudeerd te Mol-Dessel. Ongeveer 20 jaar geleden werd er een belangrijk onderzoeksprogramma opgestart. Hierbij speelt het ondergronds laboratorium van het Studiecetrum voor Kernenergie (SCK/CEN), gegraven in de Formatie van Boom (220 m diep), een grote rol. Hier worden verschillende aspecten met betrekking op de ondergrondse berging van radioactief materiaal in klei onderzocht.

De Formatie van Boom bestaat uit een grijze siltige klei of kleiige silt die door ritmische veranderingen in siltgehalte, plantaardig organisch materiaal en carbonaten zeer typisch geband is. Lithologisch is de Formatie van Boom te Mol - Dessel een zeer compacte, plastische en licht schilferige klei met fijnzandige en micahoudende niveaus. De Formatie van Boom is niet homogeen over de gehele dikte : aan de basis en aan de top ervan komen uitgesproken zandige intercalaties voor die verscheidene meters dik kunnen zijn. Eén van de lithologische kenmerken van de klei van de Formatie van Boom is de aanwezigheid van gecompartmenteerde mergelkalkachtige concreties, septaria.

Seismisch onderzoek bracht kleitektonische vervormingen in de klei van de Formatie van Boom aan het licht. HELDENS (1983) merkt op dat de doorgaans vrij monotone successie van parallelle reflectie in de klei van de Formatie van Boom plaatselijk sterk verstoord wordt door kleidiapyren. Tijdens de uitgravingswerken voor de Kennedytunnel werd een diapyrische structuur beschreven op de Rechteroever (LAGA, 1966). In de onmiddellijke omgeving van de Kennedy-tunnel werd eveneens een diapyr waargenomen.

De klei van de Formatie van Boom is zeer slecht-doorlatend maar niet ondoorlatend. Laboratoriumtesten op monsters bepaalden een hydraulische doorlatendheid van $3 \cdot 10^{-12}$ m/s. In het mathematisch model van WEMAERE & MARIVOET (1995) gaf een doorlatendheid van $3 \cdot 10^{-10}$ m/s betere simulatieresultaten.

De meest voorkomende bestanddelen in de Formatie van Boom zijn kleimineralen (60 % waarvan 20-30 % illiet, 10-20 % smectiet, 5-20 % chloriet, 3-20 % kaoliniet, 5-10 % geïnterstratificeerde kleien bestaande uit illiet en smectiet en 5-10 % geïnterstratificeerde mineralen bestaande uit chloriet en smectiet.), kwarts (20 %), veldspaten (5 -10 %), carbonaten (1 - 5 %), pyriet (1 - 5 %) en organische koolstof (1 - 5 %). De grove korrelfractie bestaat voor ongeveer 25 % uit veldspaten en 75 % uit kwarts. Pyriet komt niet alleen voor in de septaria maar ook in de klei zelf. Verder treft men glauconiet, gips, muscoviet, calciet, sideriet en een aantal zware mineralen aan.

3. MOGELIJKE BERGINGSGEBIEDEN

3.1. Bergingsgebieden in de Formatie van Kortrijk

Op basis van de lithologische en geometrische eigenschappen van de Formatie van Kortrijk werden gebieden vastgelegd die weerhouden kunnen worden voor het gestelde probleem (faze 1). De toename van het zandaandeel naar het oosten en het zuiden van het land toe, maakt dat de Formatie van Kortrijk in die delen niet voor berging van hoogradioactief afval geschikt is. De oostelijke grens van het gebied dat wel voor berging geschikt is, kon niet precies bepaald worden. Het mogelijk bergingsgebied in de Formatie van Kortrijk kan worden opgesplitst in drie delen :

- het gebied Knokke;
- het gebied Sint-Laureins - Assenede;
- het gebied Sint-Niklaas - Beveren.

Deze gebieden werden meer in detail bestudeerd (faze 2).

3.1.1. Ruimtelijke ordening

Het gebied *Knokke* wordt gekenmerkt door een dichte bebouwing en door de aanwezigheid van een belangrijk natuurgebied. Toerisme speelt in het gebied een belangrijke rol.

Het gebied *Sint-Laureins - Assenede* is relatief dun bewoond en heeft voornamelijk een agrarisch karakter. Op het gewestplan staat deze zone als landschappelijk waardevol omschreven. Woon- en woonuitbreidingsgebieden bevinden zich rond Boekhoute en Assenede. In de omgeving van Sint-Jan-in-Eremo, ten zuiden van Watervliet en ten noorden van Assenede bevinden zich natuurgebieden.

Het *westen van het gebied Sint-Niklaas - Beveren* heeft een agrarisch karakter. Het is iets dichter bewoond dan het gebied Sint-Laureins - Assenede. De belangrijkste woongebieden zijn Beveren - Melsele, Stekene, Kemzeke, De Klinge, Sint-Gillis-Waas, Vrasene, Nieuwkerken-Waas en Kieldrecht. In het noorden treft men enkele bos- en groengebieden aan.

Het *oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren* bevat overwegend industriegebied. Drie woongebieden komen in deze zone voor : Kallo, Doel en Lillo-Fort. Langs de oevers van de Schelde vindt men natuurgebieden. Het zuidoosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren is dicht bebouwd.

3.1.2. Geologie

De algemene opbouw van de ondergrond in de mogelijke bergingsgebieden kan worden afgeleid uit diepe referentieboringen. Extrapolatie van gegevens was noodzakelijk. In de mogelijke bergingsgebieden bereiken enkel de boringen te Knokke en Kallo de basis van de Formatie van Kortrijk.

De geologische opbouw van de drie gebieden is vrij gelijkaardig (Fig. 3.1).

Boven de Paleozoïsche Sokkel, het Krijt en de enkel in het gebied Sint-Niklaas - Beveren voorkomende Formatie van Heers vindt men een opeenvolging van zandige en kleiige lagen. Uit de vergelijking van de geologische opbouw van de verschillende gebieden kan men het volgende afleiden.

- De onder de Formatie van Kortrijk gelegen Landen Groep in het gebied Knokke is vrij heterogeen; ze is opgebouwd uit een complex van ligniethoudende zanden en kleien. Een vrij gelijkaardige opbouw kan worden verondersteld in het gebied Sint-Laureins - Assenede. In het gebied Sint-Niklaas - Beveren komt onder dit complex nog een vrij dikke (44 m in Kallo) silt- en kleilaag voor.
- De dikte van de Formatie van Kortrijk neemt af naar het oosten toe.
- De heterogeniteit van vooral het middenste gedeelte van de Formatie van Kortrijk neemt naar het oosten toe.
- Zowel de silt van het boven de Formatie van Kortrijk gelegen Lid van Kortemark als het zand van het daarboven gelegen Lid van Egem zijn het dikst in het gebied Sint-Niklaas - Beveren.
- De uit klei, silt en zand opgebouwde Formatie van Gent komt in de drie gebieden voor.
- Het zand van de Zenne Groep heeft in de drie gebieden een vrij gelijkaardige opbouw.
- De hoofdzakelijk kleiige Formatie van Maldegem vormt in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede de bovenste kleilaag; in het gebied Sint-Niklaas - Beveren komt de erboven liggende klei van de Formatie van Boom ook voor; tussen beide kleilagen bevindt zich het zand van de Formatie van Zelzate en van de Formatie van Niel.
- Neogene zandafzettingen komen enkel voor in het gebied Sint-Niklaas - Beveren.
- Het kwartaire zand is het dikst in het gebied Knokke.

KNOKKE

ASSENEDE

KALLO

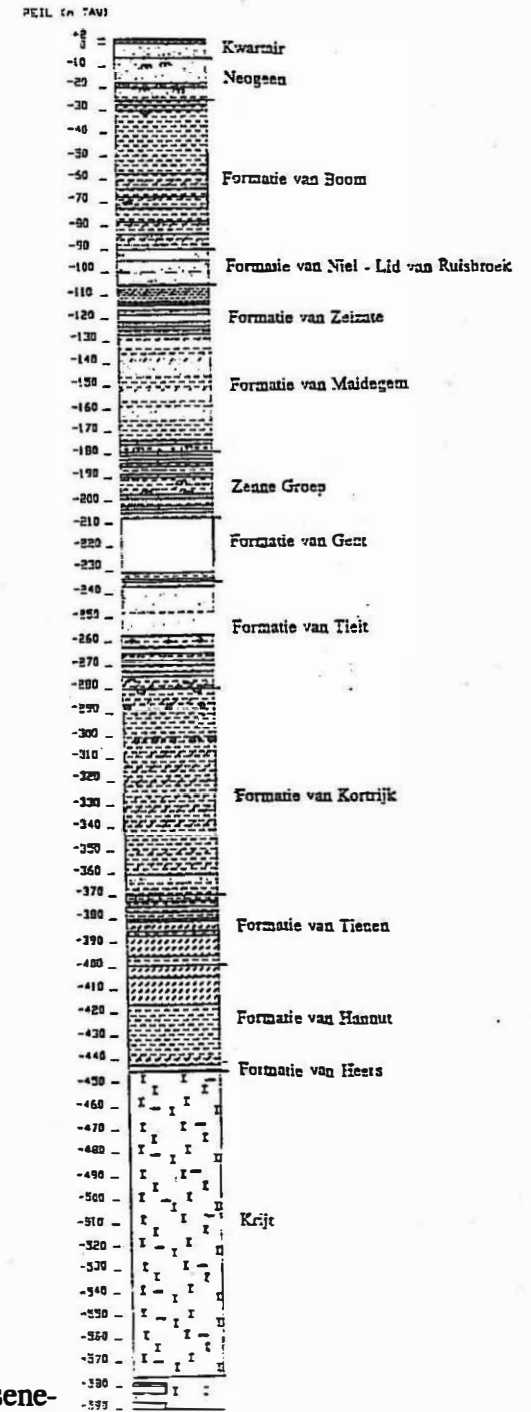
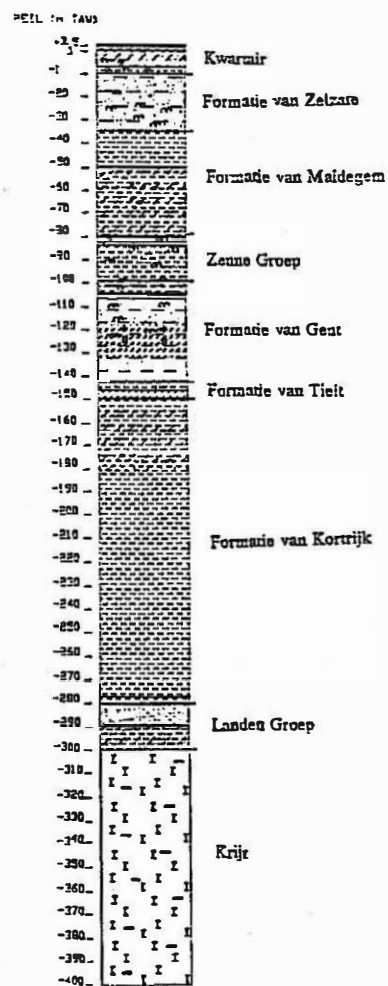
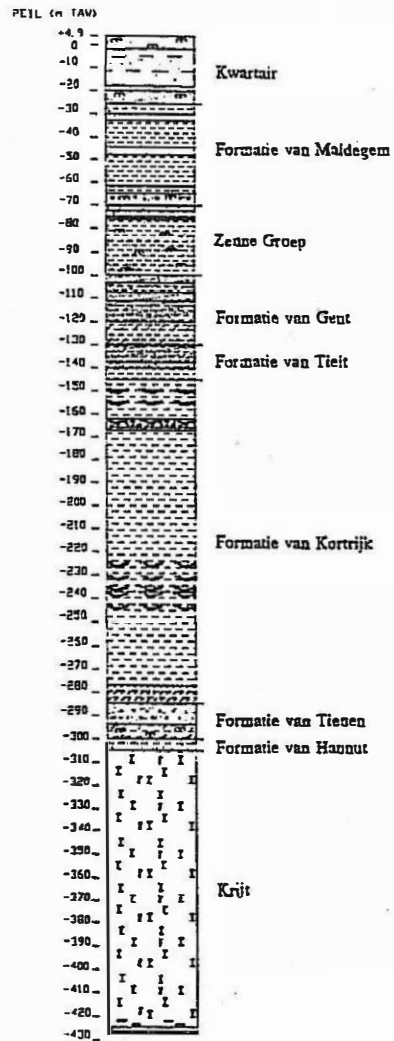
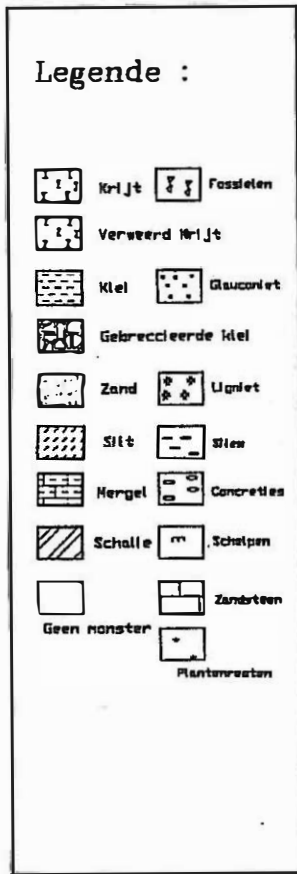


Fig. 3.1 - Lithologische doorsneden ter hoogte van Knokke, Assenede en Kallo (in Assenede is de informatie onder het Lid van Kortemark geïnterpoleerd)

3.1.3. Sedimentologie van de Formatie van Kortrijk

In het gebied *Knokke* vormt het onderste meer dan 100 m dikke meest kleiige en homogene gedeelte van de Formatie van Kortrijk (Lid van Saint-Maur) de potentiële gastlaag. Het bevat 45 tot 75 % klei. Hierboven bevindt zich een 14 m dik pakket meer heterogene klei van het Lid van Moen met een kleigehalte van 20 tot 50 %. De bovenste 15 m dikke homogene klei van het Lid van Aalbeke bevat 42 tot 57 % klei.

In het gebied *Sint-Laureins - Assenede* kan men door extrapolatie van de beschikbare gegevens in het gebied *Knokke* afleiden dat de onderste homogene laag zeer fijnsiltige klei (Lid van Saint-Maur) meer dan 100 m dik is. Het bovenliggende meer heterogene Lid van Moen is er 20 tot 30 m dik. De homogene kleilaag van het Lid van Aalbeke is er ongeveer 10 m dik.

In het *westen van het gebied Sint-Niklaas - Beveren* is het onderste homogene fijnsiltige Lid van Saint-Maur waarschijnlijk ongeveer 55 m dik. De bovenliggende meer heterogene kleiige silt met grovere lagen van het Lid van Moen is er ongeveer 50 m dik. Bovenaan komt nog ongeveer 15 m zeer fijnsiltige klei van het Lid van Aalbeke voor.

In het *oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren (Kallo)* bevat het ongeveer 44 m dikke onderste Lid van Saint-Maur 40 tot 70 % klei. De zandfractie is meestal afwezig en bedraagt steeds minder dan 5 %. In *Kallo* bedraagt het kleigehalte van het ongeveer even dikke middenste Lid van Moen 23 tot 65 %. Meestal is er geen zandfractie; indien wel bedraagt ze minder dan 5 %, uitzonderlijk tot 12 %. Bovenaan in dit gedeelte komen laagjes met zeer fijn zand voor. Het kleigehalte van de bovenste 6 m (Lid van Aalbeke) bedraagt 50 tot 64 %. De zandfractie is afwezig.

3.1.4. Hydrogeologie

Anno 1996 is de grondwaterstroming in het potentieel bergingsgebied voornamelijk neerwaarts gericht. In dit verband is de aanwezigheid van het zand van de Landen Groep onmiddellijk onder de Formatie van Kortrijk nadelig. In de gebieden *Knokke* en *Sint-Laureins - Assenede* kan de volledige Landen Groep als watervoerend beschouwd worden. In het gebied *Sint-Niklaas - Beveren* bestaat de Landen Groep uit een bovenste watervoerend gedeelte en een onderste slecht- tot zeer slecht-doorlatend gedeelte.

In West- en Oost-Vlaanderen wordt het onderliggende Krijt als slecht-doorlatend beschouwd (LEBBE et al., 1987). Naar het oosten toe vormt het bovenste gedeelte van het Krijt samen met de Formatie van Heers een watervoerende laag.

De top van de onderliggende Paleozoïsche Sokkel is gespleten en vormt een watervoerende laag.

De watervoerende lagen in de Sokkel en in de Landen Groep worden gevoed met water dat doorheen de Formatie van Kortrijk migreert. De huidige horizontale grondwaterstroming voert het grondwater uit Sokkel en Landen Groep in de richting van het zuidwesten. In het zuiden van België zijn beide lagen belangrijk voor de drinkwatervoorziening.

In tegenstelling tot het huidige grondwaterstromingspatroon, was de natuurlijke grondwaterstroming (zonder winningen) in de potentiële bergingsgebieden voornamelijk opwaarts gericht. In deze toestand komt het grondwater dat zeer traag doorheen de Formatie van Kortrijk migreert in de bovenliggende watervoerende lagen terecht. De tussenliggende kleilagen vertragen weliswaar dit proces. De natuurlijke grondwaterstroming in de bovenliggende watervoerende lagen is naar het noordwesten gericht.

De eerste boven de Formatie van Kortrijk voorkomende watervoerende laag is het Lid van Egem. Uit het Lid van Egem wordt vooral water gewonnen als er geen andere mogelijkheden beschikbaar zijn. Dit is vooral het geval in gebieden ten zuiden van de potentiële bergingsgebieden. Het Lid van Egem wordt van de bovenliggende watervoerende laag gescheiden door de Leden van Pittem en van Merelbeke.

De watervoerende laag in het Lid van Vlierzele, de Zenne Groep en het Lid van Wommel is, vooral in het noorden van West- en Oost-Vlaanderen en in Zeeland (Nederland), belangrijk voor de grondwatervoorziening. De laag is, behalve in het uiterste zuidoosten, verzilt in het gebied Knokke. In het zuidwesten van het gebied Sint-Laureins - Assenede en in het uiterste zuidoosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren komt er zoet-brak tot zoet water in voor.

Hierboven komt de slecht-doorlatende Formatie van Maldegem voor, die de grondwaterstroming naar de watervoerende laag in de Formaties van Zelzate en Niel vertraagt. Deze watervoerende laag is afgesloten in het gebied Sint-Niklaas - Beveren, waar ze bovenaan wordt afgeschermd door de belangrijke zeer slecht-doorlatende kleilaag van de Formatie van Boom.

In het gebied Knokke is het ondiep freatisch grondwaterreservoir vooral opgebouwd uit kwartaire sedimenten. In het zuidwesten van het gebied Knokke, ter hoogte van het duingebied te Knokke is deze laag ontzilt. In het gebied Sint-Laureins - Assenede is het freatisch grondwaterreservoir opgebouwd uit Kwartair, Neogeen, Lid van Ruisbroek en Formatie van Zelzate. In dit gebied is deze laag bijna volledig verzilt, behalve in het noordwesten. In het gebied Sint-Niklaas - Beveren bestaat het freatisch grondwaterreservoir uit kwartaire en neogene sedimenten. Ten noorden van een lijn die loopt ten zuiden van Kallo en ten noorden van Meerdonk is de laag verzilt. De freatisch watervoerende laag is eveneens belangrijk voor de grondwaterwinning.

3.2. Bergingsgebied in de Formatie van Boom

Onderzoek naar mogelijke berging van hoogradioactief afval in de Formatie van Boom gebeurt te Mol - Dessel (SCK), gelegen in de Antwerpse Kempen. Onderzoeksresultaten werden ter beschikking gesteld door het NIRAS of zijn afkomstig uit het Safety Assessment and Feasibility Interim Report (NIRAS, 1989)

3.2.1. Algemene kenmerken

De Kempen worden in het noorden begrensd door de Nederlandse grens en in het oosten door het Kempisch Plateau. De topografie van de Kempen is monotoon. Het peil stijgt van de zeespiegel in Antwerpen tot + 100 op het Kempisch Plateau. In het centrale gedeelte komen duinen voor. De Kempen worden gekenmerkt door een verspreide plattelandsbevolking met een redelijke concentratie in kleine woonkernen en een grote concentratie in de stedelijke agglomeraties en de regionale centra. De bevolkingsdichtheid van de Antwerpse Kempen ligt duidelijk onder het landsgemiddelde.

3.2.2. Geologie

Uit diepe boringen te Mol (nr. SCK 15 (BGD 31W 237) en nr. Dessel-1 (BGD 31W 300)) is de geologie er goed gekend. Het bijna 300 m dikke Krijt en de onderliggende Sokkel werden verkend door de boring Frederic te Mol - Ginderbuiten (31E 197). Onder het Krijt treft men lagen van het Westfaliaan aan. Ze bestaan uit leistenen met af en toe een goed ontwikkelde zandbank en steenkoollagen.

Op het boorprofiel van de boring SCK 15 (Fig. 3.2) onderscheidt men van onderen naar boven :

- de Formatie van Houthem, bestaande uit kalkareniet met massieve kalksteenbanken;
- de Formatie van Heers, opgebouwd uit ongeveer 14 m mergel en kleiig zand;
- de Landen Groep, ter plaatse enkel bestaande uit de Formatie van Hannut; onderaan vindt men 28 m licht silthoudende klei (Lid van Waterschei); daarop 24 m kleiige silt met versteningen (Lid van Halen), gevolgd door 28 m siltig zand met versteningen (overgangszone) en 30 m fijn zand (Lid van Grandglise);
- de Formatie van Kortrijk, heterogeen en soms zeer zandig; het onderste Lid van Saint-Maur is 36 m dik en omvat grotendeels kleiige grove silt; het sediment dat behoort tot het Lid van Moen is in Mol beter bekend onder de naam Zand van Mons-en-Pévèle; het is een 38 m dikke laag van zeer fijn- of grofsiltig zeer fijn zand; het Lid van Aalbeke is een 10 m dik pakket kleiige grove silt;

- de Formatie van Tielt met onderaan het ongeveer 9 m dikke Lid van Kortemark, bestaande uit grofsiltig fijn zand; erboven ligt 10 m zeer fijn, gelaagd zand, behorend tot het Lid van Egem;
- de Formaties van Brussel en van Lede, met 26 m zeer fijn zand met kalkzandstenen;
- de Formatie van Maldegem, bestaande uit een 9 m dik pakket fijn zand (Lid van Wemmel), een 15 m dikke kleilaag (Lid van Asse, a1), een 15 m dikke zandlaag (Lid van Onderdale, s1) en een 2 m dikke kleilaag (Lid van Zomergem, a2);
- de Formatie van Zelzate, een 3 m dikke zandlaag gevolgd door een 1 m dikke kleiige laag; het kan zijn dat deze sedimenten behoren tot de Formatie van Niel;
- de Formatie van Niel, opgebouwd uit een 10 m dikke zandlaag (Lid van Ruisbroek);
- de Formatie van Boom, die zich ter hoogte van de boring SCK 15 tussen 160 en 270 m diepte bevindt; de onderste 14 m van de formatie behoren tot de siltige klei van het Lid van Belsele-Waas; een centraal gedeelte met een dikte van 62 m bestaat uit overwegend homogene klei van het Lid van Putte en het Lid van Terhagen; de bovenste 34 m vormen een lithologische overgangszone die bestaat uit een afwisseling van kleiige en siltige horizonten die vooral bovenaan soms sterk silthoudend zijn.

Boven de klei van de Formatie van Boom bevinden zich van onderen naar boven :

- de oligocene zeer fijn, kleiig zand en zandige tot siltige klei van de Formatie van Eigenbilzen;
- het miocene zand van de Formatie van Berchem;
- het miocene zand van de Formatie van Diest;
- het pliocene fijn en siltig zand van de Formatie van Kasterlee;
- het plio-pleistocene fijn zand van de Formatie van Mol.

3.2.3. Sedimentologie van de Formatie van Boom

Het onderste Lid van Belsele - Waas is opgebouwd uit kleiig zand met talrijke kleilagen. Het bevat tussen 20 % en 54 % klei. Een centraal gedeelte bestaat uit overwegend homogene klei. Het omvat de Leden van Terhagen en van Putte. Te Mol bevat het Lid van Terhagen 43 % tot 56,50 % klei, het Lid van Putte 38 % tot 67,50 %. De bovenste heterogene overgangszone bestaat uit een afwisseling van 0,5 m dikke kleiige en siltige zones met 24 tot 60,50 % klei.

3.2.4. Hydrogeologie

Uit voorgaande blijkt dat de Kempense ondergrond bestaat uit een afwisseling van zandige of doorlatende lagen en kleirijke of slecht-doorlatende lagen. In het noordoosten van België kan men boven de zeer slecht-doorlatende Ieper Groep volgende watervoerende lagen onderscheiden (WEMAERE & MARIVOET, 1995) :

- 1) de watervoerende laag in de Formaties van Brussel en van Lede en het Lid van Wemmel;
- 2) de watervoerende laag in de Leden van Berg en van Ruisbroek;
- 3) de neogene watervoerende laag die door de aanwezigheid van minder belangrijke kleilagen kan worden opgedeeld in drie subeenheden (WEMAERE & MARIVOET, 1995).

Als gevolg van laterale lithologische variaties of erosie van de tussenliggende lagen, staan sommige watervoerende lagen in bepaalde streken met elkaar in verbinding.

De watervoerende laag gevormd door het Lid van Ruisbroek en de watervoerende laag gevormd door het Lid van Wemmel en de Formaties van Lede en van Brussel zijn afgesloten. Het ontsluitingsgebied van beide lagen bevindt zich ongeveer 50 km ten zuiden van Mol - Dessel. Het Neogeen en het Kwartair kan men in zijn geheel als één freatische watervoerende laag beschouwen. Ze is van zeer groot belang voor de drinkwatervoorziening.

Het stijghoogtepatroon van de neogene watervoerende laag wordt sterk beïnvloed door het hydrografische net. De horizontale grondwaterstroming verloopt noordwaarts in het Maasbekken en westwaarts in het Scheldebekken. Het grondwaterstromingspatroon in de Formaties van Brasschaat, Merksplas, Mol en Poederlee en in de miocene sedimenten worden voorgesteld in figuur 3.3 en 3.4 respectievelijk. Het grondwaterstromingspatroon in het Lid van Ruisbroek is ongeveer hetzelfde als dat in de bovenliggende watervoerende laag (Fig. 3.5).

De huidige verticale grondwaterstroming door de klei van de Formatie van Boom (Fig. 3.6) is in het noorden en het oosten van de provincie Antwerpen voornamelijk neerwaarts. In het centrale gedeelte van de provincie is de stroming opwaarts gericht.

Ten oosten van Herentals is de verticale stroming doorheen de klei van de Formatie van Maldegem opwaarts gericht, in de streek rond Herentals is ze neerwaarts gericht.

De toestand zonder grondwaterwinningen werd voor de Kempen tot op heden niet gesimuleerd.

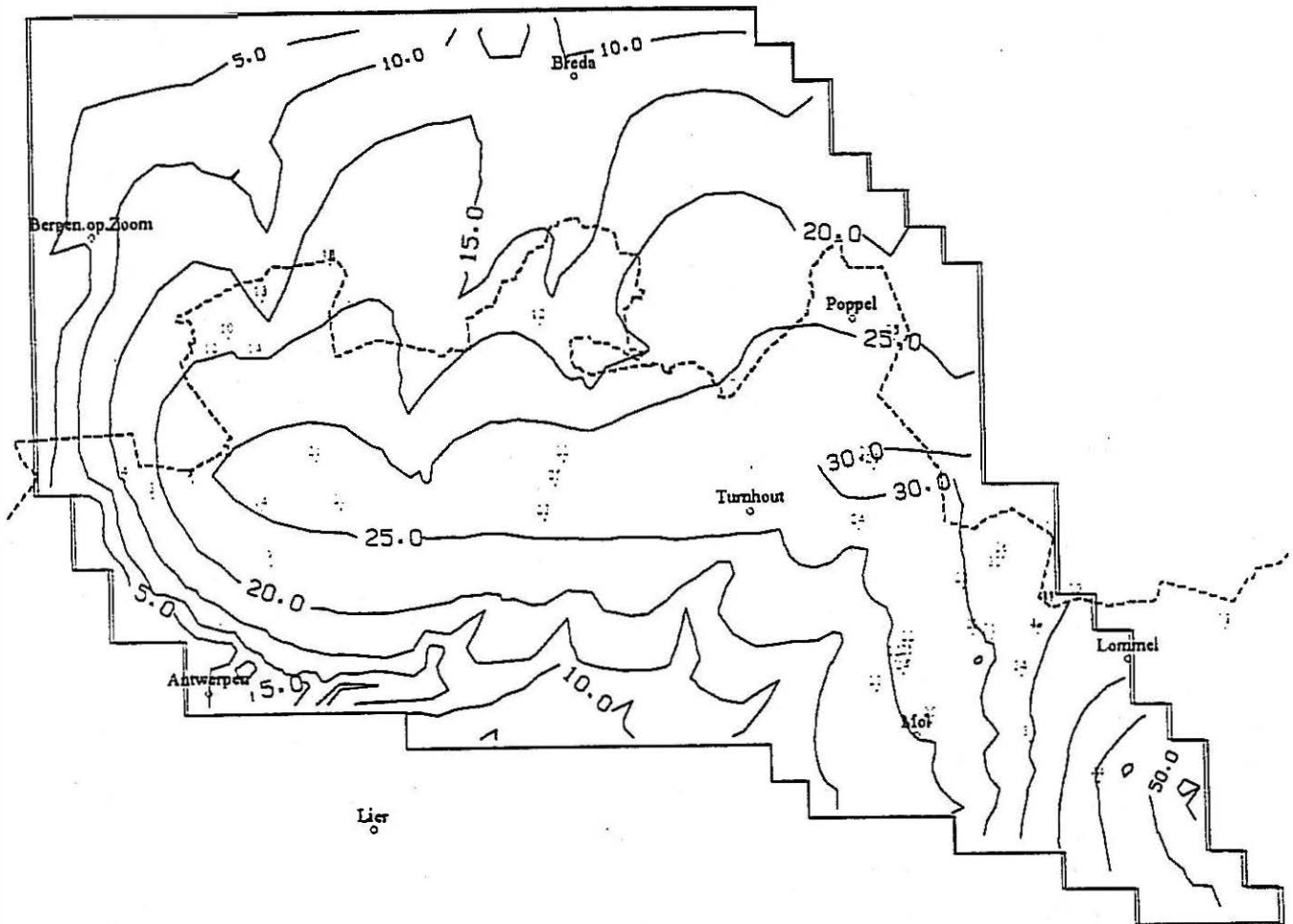


Fig. 3.3 - Gemodelleerde piëzometrische kaart van de sedimenten van de Formaties van Brasschaat, Merksplas, Mol en Poederlee (WEMAERE & MARIVOET, 1995 - ref. : NEB07L5)

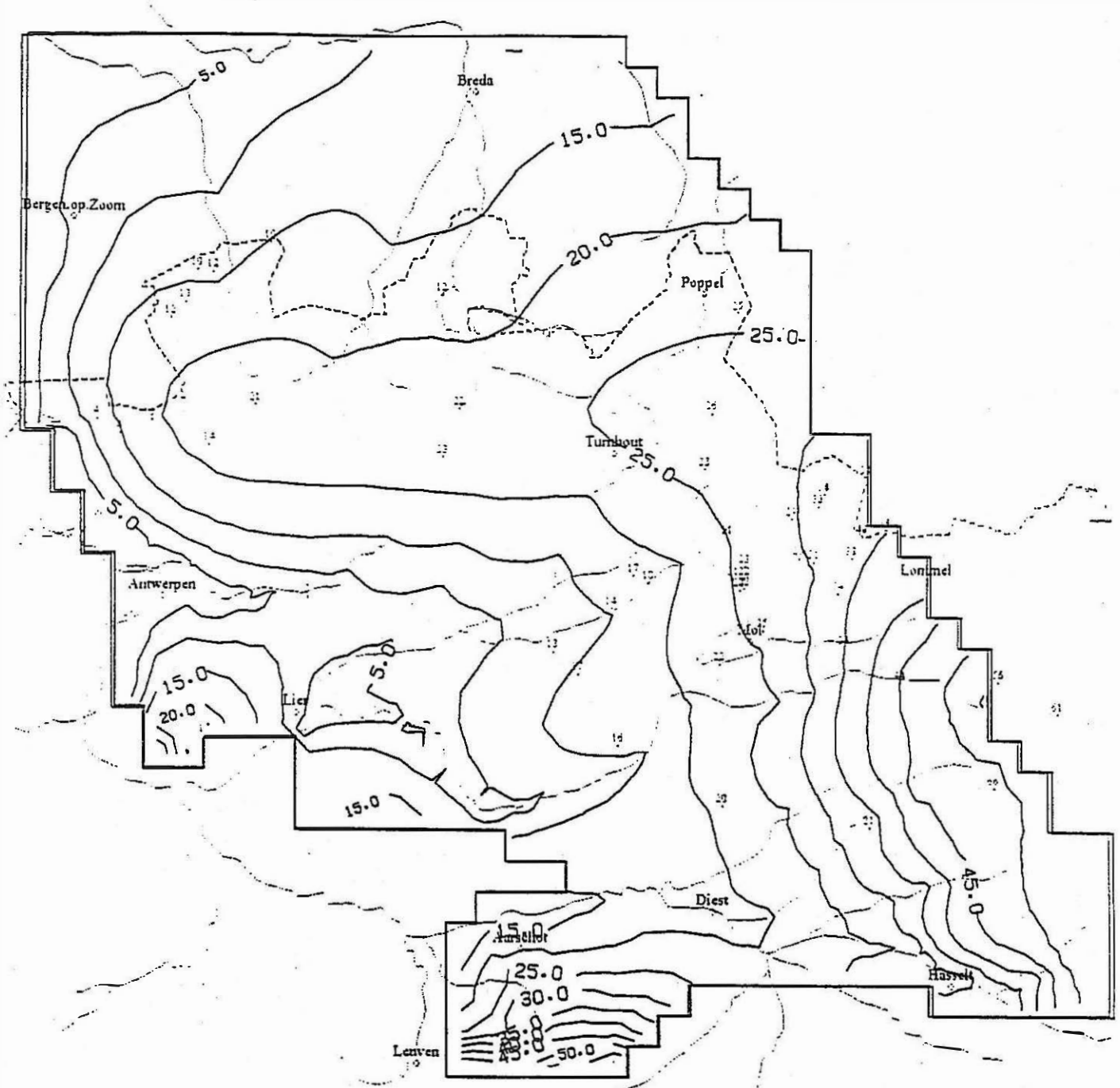


Fig. 3.4 - Gemodelleerde piëzometrische kaart van de sedimenten van het Mioceen (WEMAERE & MARIVOET, 1995 - ref. : NEB06F3 = NEB07N)

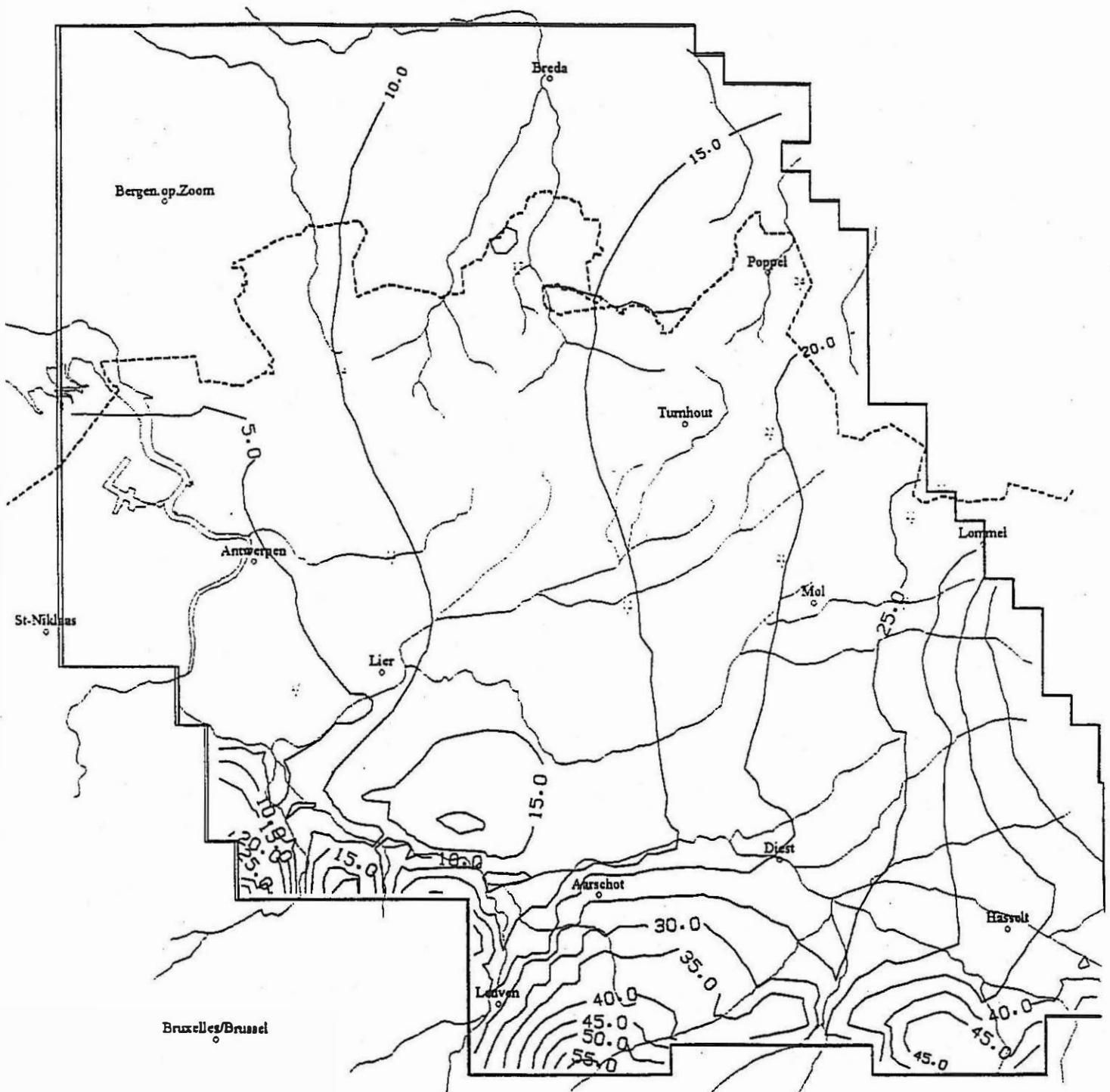


Fig. 3.5 - Gemodelleerde piëzometrische kaart van de zanden van het Lid van Ruisbroek
(WEMAERE & MARIVOET, 1995 - ref. : NEB06S4)

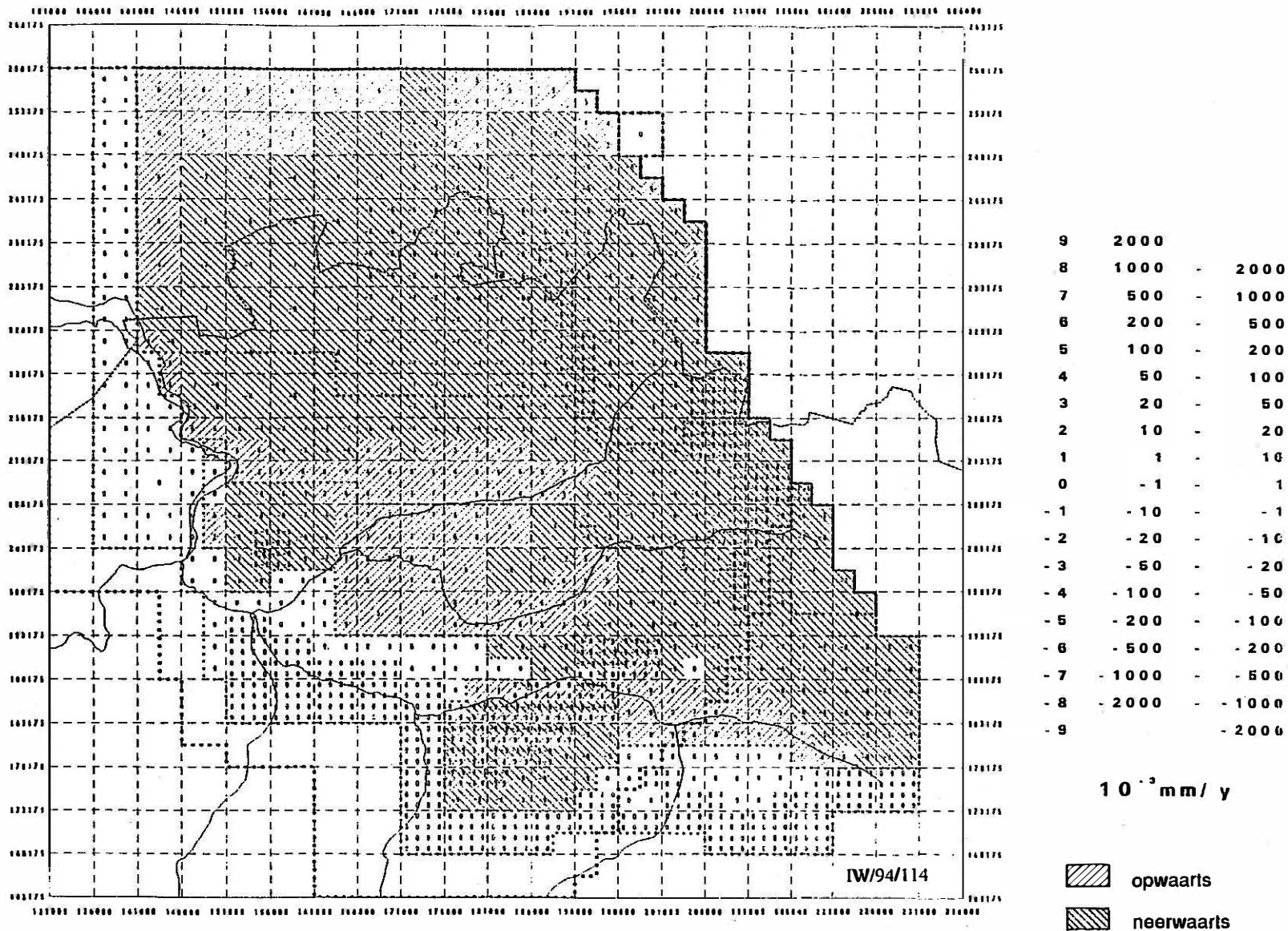


Fig. 3.6 - Snelheid van de verticale grondwaterstroming in mm per jaar doorheen de klei van de Formatie van Boom
(WEMAERE & MARIVOET, 1995 - ref. : NEB06F3 = NEB07N)

4. SEISMOLOGISCHE ACTIVITEIT IN BELGIE

Berging van hoogradioactief afval moet gebeuren in een tektonisch stabiele zone. Kennis over vroegere seismologische activiteit en de aanwezigheid van breuken in de ondergrond van mogelijke bergingsgebieden is daarom noodzakelijk.

De epicentra van de aardbevingen die in ons land werden waargenomen, bevinden zich in vier grote zones (Fig. 4.1) : in het Massief van Brabant en het noorden van Frankrijk, in de omgeving van de Maasvallei, in het oosten van België en in Henegouwen. Uit de gegevens blijkt dat de in het oosten van het land gesitueerde Rijngraben met de Graben van Roermond seismologisch het meest actieve gebied van België is (CAMELBEECK, 1989).

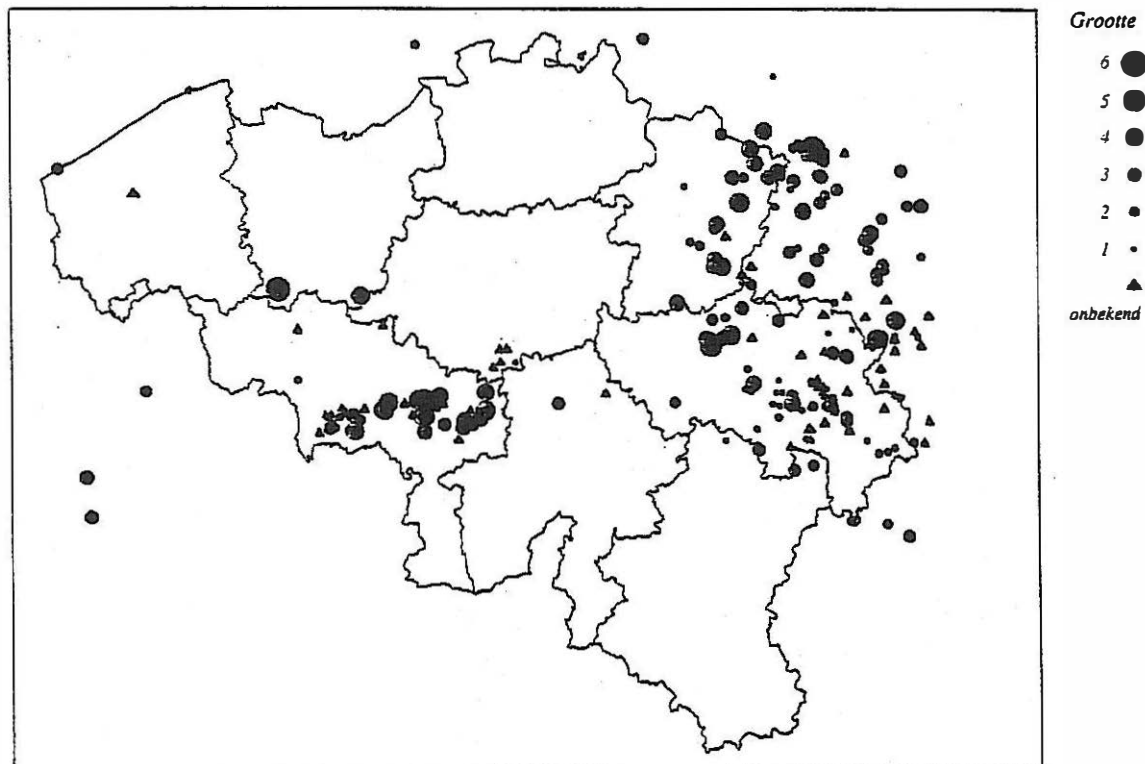


Fig. 4.1 - Overzichtskaart van de geregistreerde aardbevingen in België (uit WOUTERS & VANDENBERGHE, 1994 naar CAMELBEECK, 1989)

Het Massief van Brabant en het noorden van Frankrijk worden gekenmerkt door een belangrijke historische seismologische activiteit. Sedert de Middeleeuwen hebben vier aardbevingen schade in deze regio veroorzaakt. Deze grepen plaats in 1382, 1449, 1580 en 1938 (CAMELBEECK, 1989). De herleving van het breukenpatroon in het Massief van Brabant geeft aanleiding tot aardschokken die een intensiteit tot VII op de MSK-schaal kunnen bereiken (TRACTIONEL, 1984). De MSK-schaal is de seismologische intensiteitsschaal van MEDVEDEV, SPONHEUER en KARNIK (1964).

De aardschokken in de omgeving van de Maasvallei zijn nauw verbonden met de bewegingen van de Rijnslenk en haar verlengingen. In de Boven-Rijngraben zijn aardbevingen waargenomen met een intensiteit tot VIII op de MSK-schaal. In de Graben van Roermond is de maximale intensiteit VII (TRACTIONEL, 1984). Sedert de Middeleeuwen lag geen enkel epicentrum in de zone van Mol - Dessel. In de laatste twee eeuwen werden slechts schokken met een intensiteit van minder dan of gelijk aan IV (MSK-schaal) in de beschouwde zone waargenomen (SAFIR, 1989).

In het Bekken van Bergen hebben zich reeds talrijke bevingen voorgedaan. Ook in het verlengde van het Bekken van Bergen in Frankrijk werden bevingen vastgesteld.

In de streek van Luik is de seismologische activiteit te wijten aan reactivatie van breuken (TRACTIONEL, 1984).

Het Bekken van de Noordzee wordt over het algemeen als stabiel beschouwd. In het Nauw van Calais herleven de breuken van Boulogne en Gravelines (TRACTIONEL, 1984).

De geologische en seismotektonische studie van TRACTIONEL (1984) legt een duidelijk verband tussen de historisch waargenomen aardbevingen en de breuklijnenpatronen en/of geologische discontinuïteiten. In en rond België vindt men de volgende breuklijnenpatronen terug :

- 1) de breuken van het Massief van Brabant (Fig. 4.2);
- 2) de breuken in het Ardennen-Rijnland Massief met het Synclitorium van Namen (dat o.a. het Bekken van Bergen omvat), dat in het noorden wordt begrensd door de randbreuk en leunt op het Massief van Brabant en in het zuiden door de naar het noorden overhellende Eifelbreuk;
- 3) de NW-ZO gerichte hoofdbreuken en NO-ZW gerichte toegevoegde breuken in het Bekken van Parijs en de ermee evenwijdig lopende breuken in het Bekken van de Noordzee - Nederland - Noord-Duitsland;
- 4) het breuklijnenpatroon geassocieerd met de Rijngraben; de noordwestelijke arm van de Rijngraben, de Graben van Roermond kan als de meest uitgesproken Cenozoïsche tektonische structuur worden beschouwd; ze is tot 2000 m diepte gevuld met voornamelijk bovenoligocene tot kwartaire sedimenten (GELUK et al., 1994).

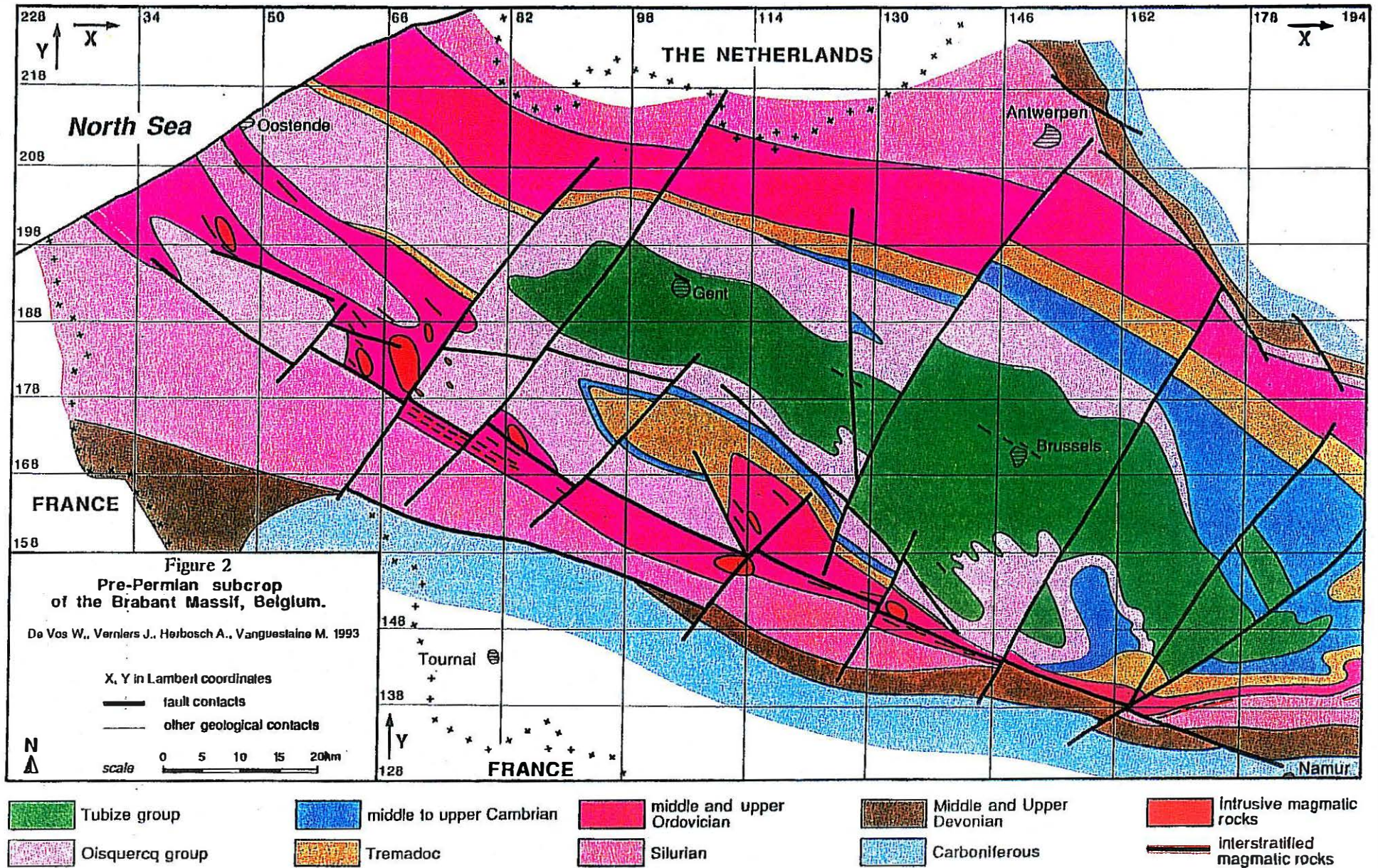


Fig. 4.2 - Geologie van de paleozoïsche sokkel in België - het Massief van Brabant
 (naar DE VOS et al., 1994)

In de streek is geen enkele recente vulkanische activiteit gekend. De meest nabijgelegen streek met duidelijk vulkanisme is het Eifelgebergte in West-Duitsland.

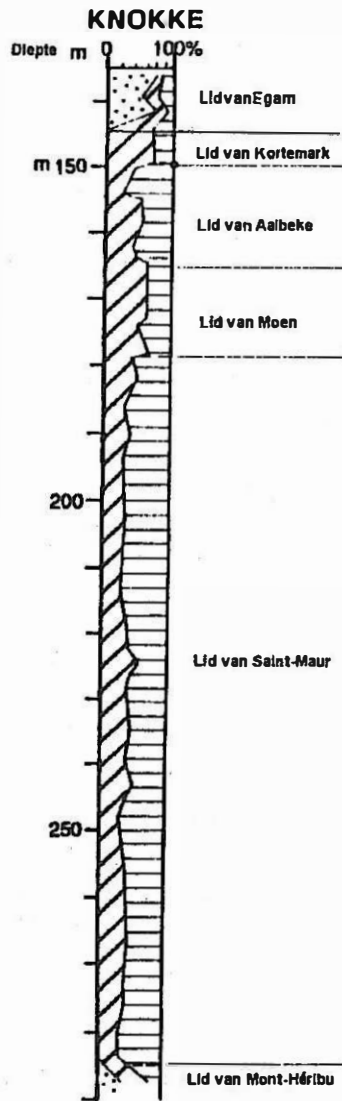
5. EVALUATIE

Door jarenlang onderzoek is veel informatie over de Formatie van Boom in de Kempense ondergrond beschikbaar. Dit contrasteert sterk met de kennis van de Formatie van Kortrijk in de mogelijke bergingsgebieden, wat ook gebleken is tijdens deze studie. Verder onderzoek hieromtrent is daarom van essentieel belang. Niettemin is het interessant om in dit stadium de verzamelde gegevens betreffende de Formatie van Kortrijk te vergelijken met de resultaten van het onderzoek over de Formatie van Boom ter hoogte van de nucleaire site te Mol-Dessel.

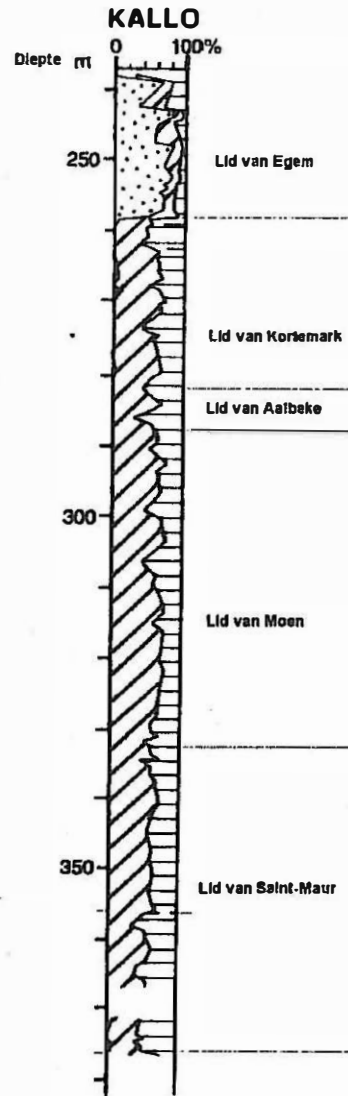
Daar de homogeniteit en het kleigehalte van de Formatie van Kortrijk afnemen naar het oosten van het land toe, worden de kenmerken van de Formatie van Boom te Mol - Dessel vergeleken met de kenmerken van de Formatie van Kortrijk in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede (Tabel 5.1) enerzijds en met deze in het gebied Sint-Niklaas - Beveren anderzijds (Fig. 5.1). Men kan de volgende besluiten trekken.

- De Formatie van Kortrijk is in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede minstens 140 m dik; het onderste zeer homogene gedeelte bereikt meer dan 100 m dikte; de top van deze laag bevindt zich in het noorden van het gebied Sint-Laureins - Assenede waarschijnlijk dieper dan 200 m en in Knokke op ongeveer 180 m. In het gebied Sint-Niklaas - Beveren is de Formatie van Kortrijk dikker dan 100 m, behalve in de strook Lillo - 's Gravenwezel; de top van de Formatie van Kortrijk bevindt zich in het gebied op een peil dat daalt van -170 in het zuidwesten naar -420 in het noordoosten. Het geheel van de Formatie van Boom en de bovenliggende overgangszone is ter hoogte van Mol - Dessel 110 m dik; het centrale homogene gedeelte is er 62 m dik; de top van de overgangszone bevindt zich op een diepte van 160 m.
- De Formatie van Boom bevat in Mol veel silt in het top- en basisgedeelte; de Formatie van Kortrijk is homogeen in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede, de homogeniteit neemt af naar het oosten toe; ter hoogte van Kallo bestaat de middenste eenheid uit overwegend kleiige silt.
- De onderste meer dan 100 m dikke homogene kleilaag in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede bevat enigszins meer kleifractie dan het centrale 62 m dikke homogene gedeelte van de Formatie van Boom te Mol. Het middenste 44 m dikke heterogene gedeelte van de Formatie van Kortrijk te Kallo bevat minder klei dan de homogene kleilaag in Mol; de onderste 25 m van de Formatie van Kortrijk is er wel kleiiger dan de Formatie van Boom.
- De Formatie van Boom bevat steeds een kleine zandfractie in tegenstelling tot de Formatie van Kortrijk waarin deze meestal ontbreekt; wel treft men op bepaalde niveaus in de Formatie van Kortrijk te Kallo een zandfractie (meestal minder dan 5 %) aan.

FORMATIE VAN KORTRIJK



FORMATIE VAN KORTRIJK



FORMATIE VAN BOOM

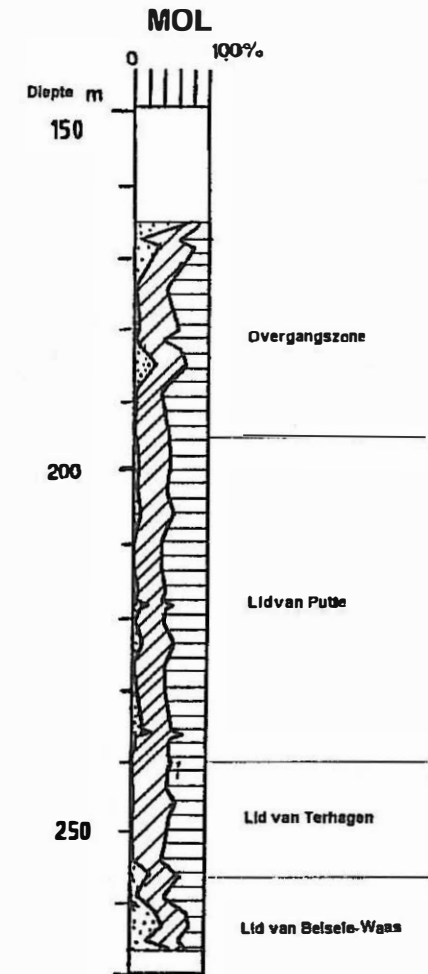


Fig. 5.1 - Korrelgrootteverdeling van de Formatie van Kortrijk in Knokke en Kallo versus de korrelgrootteverdeling van de Formatie van Boom in Mol

	Formatie van Kortrijk Gebied Sint-Laureins - Assenede	Formatie van Boom te Mol - Dessel
informatie	door extrapolatie	door onderzoek ter plaatse
dikte	> 140 m	110 m
dikte meest kleilig gedeelte	> 100 m	62 m
diepte top	> 140 m	160 m
diepte top homogeen gedeelte	> 200 m	195 m
percentage klei		20 - 54
percentage klei in meest kleilig gedeelte	45 - 75	38 - 67,50
percentage zand	geen	gemiddeld 3 tot 5,50
homogeniteit	- dunne siltige basis - heterogeen in de topzone - homogeen in meest kleilig gedeelte	- siltige top en basis - aanwezigheid van siltige lagen, ook in het meest kleilig gedeelte
doorlatendheid	- uiterst slecht-doorlatend - niet absoluut bepaald	- uiterst slecht-doorlatend - $3 \cdot 10^{-12}$ m/s uit laboratoriumtesten
belangrijkste kleimineralen	veruit smectiet	illiet, smectiet, chloriet
percentage organisch koolstof	relatief laag	1 - 5
kleitektoniek	- breuken, diaklazen, golvingen - waargenomen in noordzeegebied en in West-Vlaanderen	- kleidiapyren (vb. Kennedytunnel) - minder uitgesproken dan in Formatie van Kortrijk
percentage klei in tertiaire en kwartaire sedimenten	60	29
aangrenzende watervoerende lagen	- boven : Lid van Egem - onder : Formatie van Tienen	- boven : Neogeen - onder : Lid van Ruisbroek
seismologische activiteit in de omgeving	geen waargenomen	geen epicentrum sedert de middeleeuwen waargenomen
breuken in de omgeving	in het oosten van het gebied (Massief van Brabant)	8,5 km ten oosten van Mol : Breuk van Rauw (Formatie van Mol)

Tabel 5.1 - Formatie van Kortrijk in het gebied Sint-Laureins - Assenede versus de Formatie van Boom te Mol - Dessel

- De kleiige siltlagen in het heterogene middengedeelte van de Formatie van Kortrijk te Kallo zijn dikker dan deze in de Formatie van Boom te Mol; de homogene gedeelten van de Formatie van Kortrijk daarentegen, bevatten in de drie gebieden veel minder siltlagen dan de Formatie van Boom.
- De zandige siltige basis van de Formatie van Kortrijk is dunner dan deze van de Formatie van Boom.
- Kleitektonische vervormingen komen niet alleen voor in de Formatie van Kortrijk maar ook in de klei van de Formatie van Boom; door zijn grotere dikte en homogeniteit zijn de vervormingen in de Formatie van Kortrijk echter meer uitgesproken (HENRIET et al., 1991).
- De Formatie van Kortrijk heeft een hoger smectietgehalte dan de Formatie van Boom; smectiet bezit een hoge kationuitwisselingscapaciteit.
- De Formatie van Boom bevat meer organisch materiaal; organisch koolstof kan gemobiliseerd uranium binden (DE PUTTER & CHARLET, 1994).

De geschiktheid voor berging hangt niet alleen af van de lithologische en geometrische kenmerken van de kleilaag op zich maar ook van de doorlatendheid van de boven- en onderliggende lagen. De Formatie van Kortrijk en de Formatie van Boom zijn uiterst slecht-doorlatend. Op lange termijn zal water uit de mogelijke gastlaag zeer traag in de aangrenzende watervoerende lagen terechtkomen. Eventuele verspreiding van radionucliden zal sneller verlopen naarmate de doorlatendheid van het aangrenzende sediment toeneemt. De hoeveelheid zand speelt hierbij een belangrijke rol.

Boven en onder de Formatie van Kortrijk zijn in de mogelijke bergingsgebieden watervoerende en slecht-doorlatende lagen aanwezig. In de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede vindt men onder de Formatie van Kortrijk zand van de Landen Groep. Ongeveer 60 % van de tertiaire en kwartaire sedimenten zijn er hoofdzakelijk kleiig (Fig. 6.4 en 6.5). In het gebied Sint-Niklaas - Beveren komt er onder de Formatie van Kortrijk eveneens zand van de Landen Groep voor. Dit wordt echter van de onderliggende Krijtsedimenten gescheiden door silt en klei van de Landen Groep. 50 tot 60 % van de tertiaire en kwartaire sedimenten zijn hier hoofdzakelijk kleiig (Fig. 6.6 en 6.7).

Deze hydrogeologische opbouw verschilt van deze ter hoogte van de nucleaire zone te Mol - Dessel, waar er boven de potentiële bergingslaag van de Formatie van Boom geen slecht-doorlatende lagen aanwezig zijn. Onmiddellijk onder de klei van de Formatie van Boom liggen watervoerende lagen in de zanden van de Formaties van Niel (Lid van Ruisbroek) en Zelzate (Lid van Bassevelde, s3). Hieronder komt de slecht-doorlatende Formatie van Maldegem voor. Onder de Formatie van Maldegem vindt men een afwisseling van kleiige en zandige lagen. Daarop volgen Krijtsedimenten. Van de tertiaire en kwartaire sedimenten zijn 29 % hoofdzakelijk kleiig (Fig. 3.2).

Boven en onder de uiterst slecht-doorlatende klei van zowel de Formatie van Kortrijk als de Formatie van Boom komen watervoerende lagen voor. Onder de Formatie van Kortrijk komen watervoerende lagen in de Landen Groep en de Sokkel voor. Beiden zijn in het zuiden van West- en Oost-Vlaanderen belangrijk voor de grondwaterwinning. Boven de Formatie van Kortrijk komt de watervoerende laag in het Lid van Egem, dat vooral van regionaal belang is voor de grondwatervoorziening, voor. De klei van het Lid van Merelbeke en de silt van het Lid van Pittem scheiden deze laag van de watervoerende laag gevormd door het Lid van Wemmel, de Zenne Groep en het Lid van Vlierzele die in het noorden van West- en Oost-Vlaanderen een belangrijke rol speelt in de grondwatervoorziening. Boven de Formatie van Boom komt de neogene watervoerende laag, één van de belangrijkste watervoerende lagen van het land, voor.

In het mogelijk bergingsgebied van de Formatie van Kortrijk bevinden zich breuken in het Massief van Brabant, dat gekenmerkt wordt door een belangrijke historische seismologische activiteit (Fig. 4.2) : in het oosten van het gebied Sint-Laureins - Assenede en in het uiterste oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren (DE VOS et al., 1993). In het mogelijk bergingsgebied in de Formatie van Kortrijk werd geen seismologische activiteit waargenomen.

Ten oosten van de lijn Genk-Tilburg werden talrijke discontinuïteiten in de Paleozoïsche Sokkel en de bovenliggende sedimenten vastgesteld. Ze zijn ZZO-NNW gericht en passen in het breukensysteem waarvan de Peelhorst en de Roermondslenk deel uitmaken. De breuk van Rauw, 8,5 km ten oosten van Mol, heeft een spronghoogte van 25 m in een lignietbank van de Formatie van Mol (SAFIR, 1989). Het oosten van België, waar zich vooral in het drielandpunt belangrijke aardbevingen voordeden, is seismologisch het meest actief. Sedert de Middeleeuwen lag geen enkel epicentrum in de zone van Mol-Dessel.

6. VOORSTEL TOT TOEKOMSTIG ONDERZOEK

6.1. Doelstellingen

De veiligheid van de berging van hoogradioactief afval in een geologische laag op korte, middellange en lange termijn moet worden getoetst. Dit vereist in de eerste plaats een grondige kennis van de stratigrafie, de lithologie en de lithologische variatie, de continuïteit, de sedimentologie, de geometrie, de fysico-chemische en de geotechnische eigenschappen. Ook de stabiliteit van het gastgesteente tijdens en na een uitgraving moet worden geëvalueerd. Het onderzoek moet zich vooral concentreren op de Formatie van Kortrijk, maar de kennis van de samenstelling van de boven- en onderliggende formaties mag zeker niet worden verwaarloosd. Speciale aandacht moet worden geschonken aan eventuele tektonische vervormingen in de klei.

Een belangrijke veiligheidsfactor voor de berging van hoogradioactief afval is de diepte. Voor België wordt gesteld dat een bergingsplaats minstens 200 m diep moet liggen. Men beschikt over slechts weinig gegevens over de Formatie van Kortrijk op die diepte. Daarom zijn verkenningsboringen noodzakelijk. Deze laten toe om de geologische bouw in detail waar te nemen en om de verschillende lagen te bemonsteren. De granulometrische, de chemische en de mineralogische samenstelling en het gehalte aan glauconiet en aan organisch materiaal van de monsters moeten in het laboratorium worden onderzocht. Ook de thermische, fysische en grondmechanische eigenschappen van de klei moeten worden bestudeerd. Om een beter beeld te krijgen van de doorboorde lagen voert men bij voorkeur in het onverbuisde boorgat geofysische boorgatmetingen uit. Door analyse van verschillende boringen kan men de lithologische variatie in de Formatie van Kortrijk bestuderen.

Om de geschiktheid van een formatie als bergingslaag na te gaan, dient tevens de lokale en regionale hydrogeologie te worden onderzocht. Kennis omtrent het stromingspatroon in de watervoerende lagen boven en onder de Formatie van Kortrijk en omtrent de chemische eigenschappen van het grondwater is eveneens vereist. Het meten van stijghoogten in de verschillende watervoerende lagen geeft een aanwijzing omtrent het stromingspatroon. Grondwaterstalen en analyses geven informatie omtrent de waterkwaliteit. Isotopenonderzoek zal toelaten het water te dateren en zijn oorsprong en evolutie te bepalen.

6.2. Verkenningsboringen

6.2.1. Uitvoering

Verkenningsboringen hebben als eerste doel de ondergrond zo gedetailleerd mogelijk te leren kennen. Spoelboringen hebben het voordeel snel en goedkoop te zijn, maar als nadeel dat de informatie weinig precies is. De bekomen monsters zijn geroerd en weinig representatief. Daarom worden ze meestal aangevuld met geofysische boorgatmetingen die objectieve informatie over de lithologie en de grondwaterkwaliteit van de aangeboorde lagen verschaffen. Gekernde boringen (gestoken boring of kernboring) verschaffen een gedetailleerd stratigrafisch profiel, met de preciese ligging van de grenzen tussen de formaties. De bekomen monsters zijn nagenoeg ongeroerd. Daardoor kan men de lithologie van de verschillende formaties in detail te bestuderen.

De Formatie van Kortrijk moet zeker worden gekernd. Om voldoende informatie te bekomen over de boven- en onderliggende lagen wordt voorgesteld om gekernde monsters te nemen vanaf het Lid van Pittem. Omdat de informatie over de lagen onder de Formatie van Kortrijk in de omgeving van de voorgestelde boorplaatsen eerder schaars is, zijn ook hier gestoken monsters aan te raden. Deze gekernde monsters kunnen dan op alle aspecten van detail, met inbegrip van het interstitieel water, worden onderzocht. Een proefboring dient in de Paleozoïsche Sokkel te worden gegraven, ten einde informatie te verkrijgen over de samenstelling en tektonische vervorming.

6.2.3. Plaats

a. Gebied Knokke

In het gebied Knokke wordt de Formatie van Kortrijk gekenmerkt door homogeniteit en hoog kleigehalte. Het gebied heeft een relatief dichte bebouwing (vooral van het duingebied). De aanwezigheid van een natuurgebied ("Het Zwin") en de toeristische activiteit maken dit gebied minder aangewezen voor berging. Een vroegere boring maakt voor dit gebied een verkenningsboring overbodig.

b. Gebied Sint-Laureins - Assenede

Het gebied Sint-Laureins - Assenede wordt gekenmerkt door een hoofdzakelijk agrarisch karakter. De streek is relatief dun bebouwd. In dit gebied wordt de Formatie van Kortrijk en meer bepaald het Lid van Saint-Maur gekenmerkt door homogeniteit en een hoog kleigehalte. Ook de geometrische kenmerken van het Lid van Saint-Maur voldoen aan de vereiste criteria.

Uit de beschikbare gegevens blijkt dat de homogeniteit en het kleigehalte van de Formatie van Kortrijk stijgen naar het westen van het gebied toe. De dikte van en de diepte tot het homogene Lid van Saint-Maur nemen toe naar het noorden van het gebied toe. Daarom

lijkt het aangewezen een proefboring in het noordwesten van het gebied uit te voeren.

In het noordwesten van het gebied bevinden zich enkele kleinere woongebieden (Sint-Jan-in-Eremo, Sint-Margriete en Waterland-Oudeman). In de omgeving van Sint-Jan-in-Eremo en minder in de omgeving van Sint-Margriete treft men op het gewestplan natuurgebieden aan.

Op basis van voorgaande gegevens lijkt het aangewezen een verkenningsboring rond Waterland-Oudeman (of eventueel meer naar Sint-Margriete toe) uit te voeren. Dit gebied ligt op het kaartblad 5/8 (Sint-Margriete) van het gewestplan Eeklo-Aalter (Fig. 6.1). Het dichtsbij gelegen woongebied in Nederland is het dorp IJzendijke. Dit dorp ligt op een afstand van ongeveer 7 km van Sint-Margriete en op ongeveer 4 km van Waterland-Oudeman. Een kleiner in de buurt gelegen dorp is Waterlandkerkje, op ongeveer 4 km van Sint-Margriete en Waterland - Oudeman.

c. Gebied Sint-Niklaas - Beveren

Uit voorgaande studie is gebleken dat de lithologische kenmerken van het gebied Sint-Niklaas - Beveren met het oog op de berging van hoogradioactief afval in de Formatie van Kortrijk gunstiger zijn in het westen. De top van de Formatie van Kortrijk daalt naar het noordoosten toe (van een peil van ongeveer -170 tot -420).

In het westen van het gebied Sint-Niklaas - Beveren bevinden zich de wooncentra Sint-Gillis-Waas, De Klinge en Meerdonk. Iets ten zuiden ervan liggen Stekene en Kemzeke. Ten noorden van Kemzeke en Stekene komen talrijke gebieden voor verblijfrecreatie, groen- en bosgebieden voor en bevinden er zich woongebieden. Ten zuidoosten van het woongebied De Klinge bevindt zich een groot agrarisch gebied. Ten zuiden ligt het woongebied "Het Kalf" en groengebied, omringd door valleigebied.

Op grond van voorgaande gegevens lijkt het aangewezen om een verkenningsboring in de agrarische zone tussen De Klinge, Meerdonk en het zuidelijk gelegen valleigebied uit te voeren. Deze zone ligt op het kaartblad 15/1 (Sint-Gillis-Waas) van het gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren (Fig. 6.2). Het dichtst bijgelegen woongebied in Nederland is het dorp Clinge, gelegen op ongeveer 1,2 km van De Klinge.

In het oosten van het gebied zijn de geologische eigenschappen van de Formatie van Kortrijk minder gunstig. De beschikbare gegevens (o.a. de boring van Kallo) in het oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren wijzen op een duidelijke heterogeniteit van het Lid van Moen. Een verkenningsboring zou hierover meer informatie verschaffen.

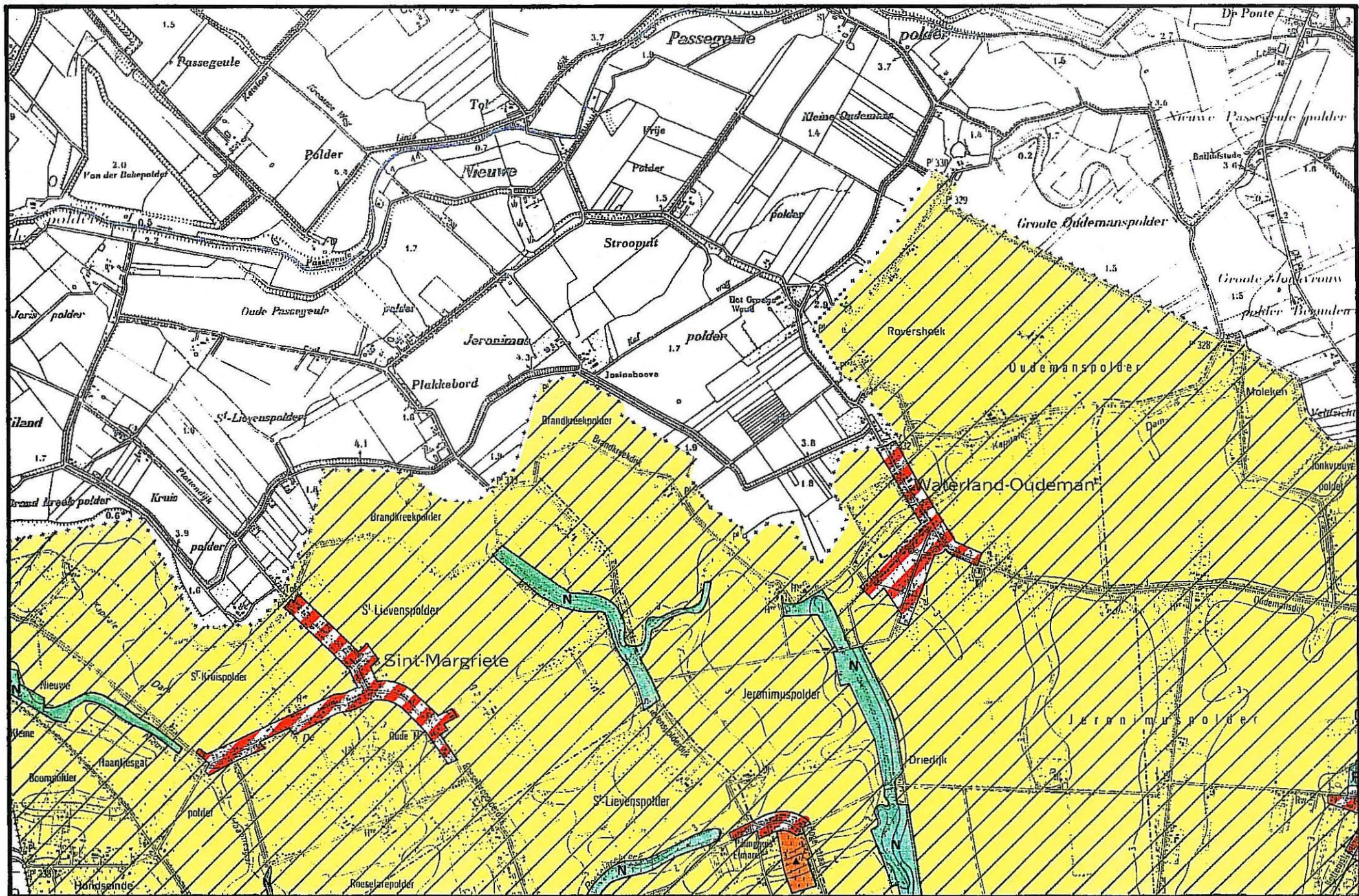


Fig. 6.1 - Ruimtelijke Ordening van de omgeving Sint-Margriete - Waterland-Oudeman (Gewestplan Eeklo-Aalter, 1978).

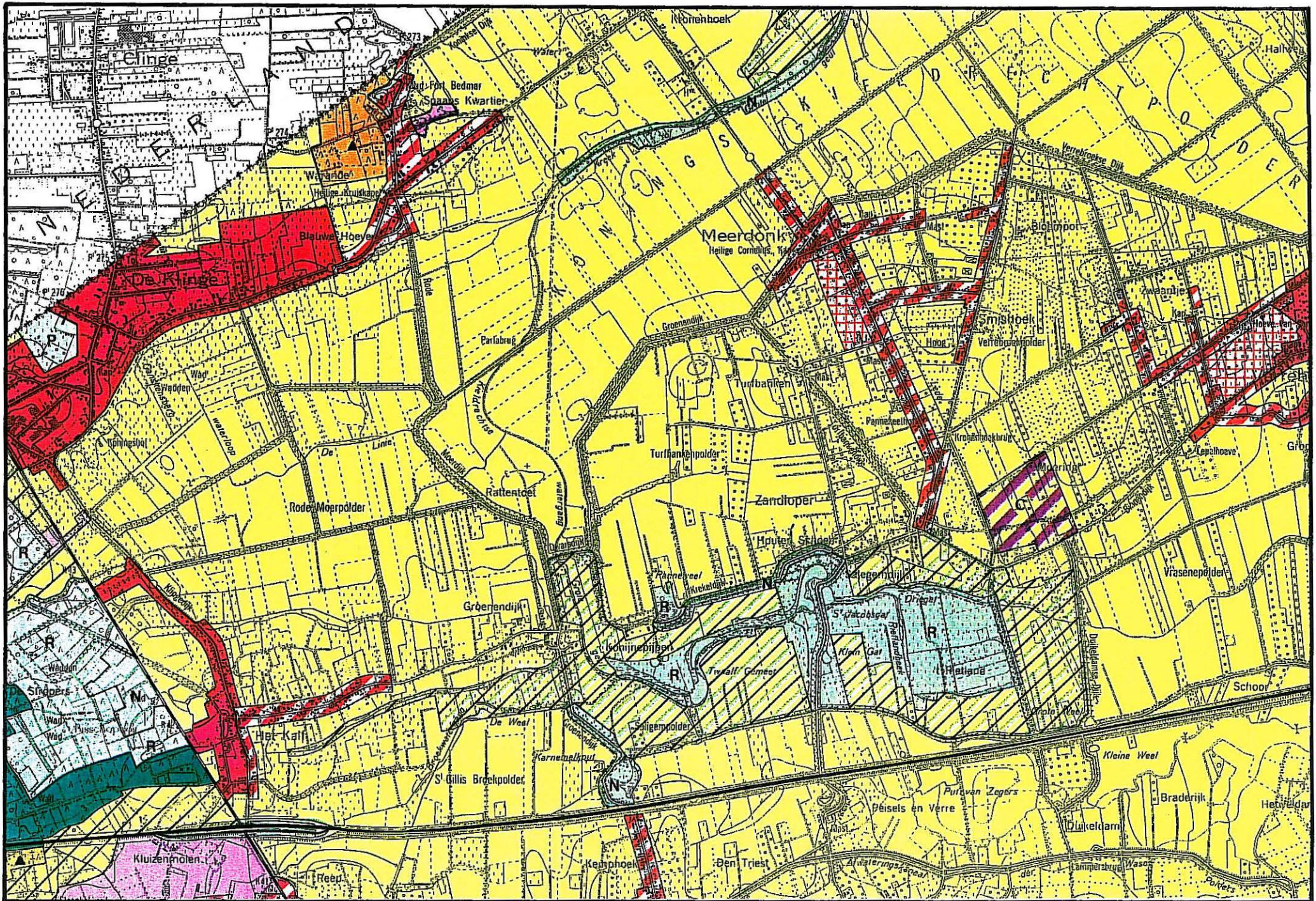


Fig. 6.2 - Ruimtelijke Ordening van de omgeving De Klinge-Meerdonk (Gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren, 1978).

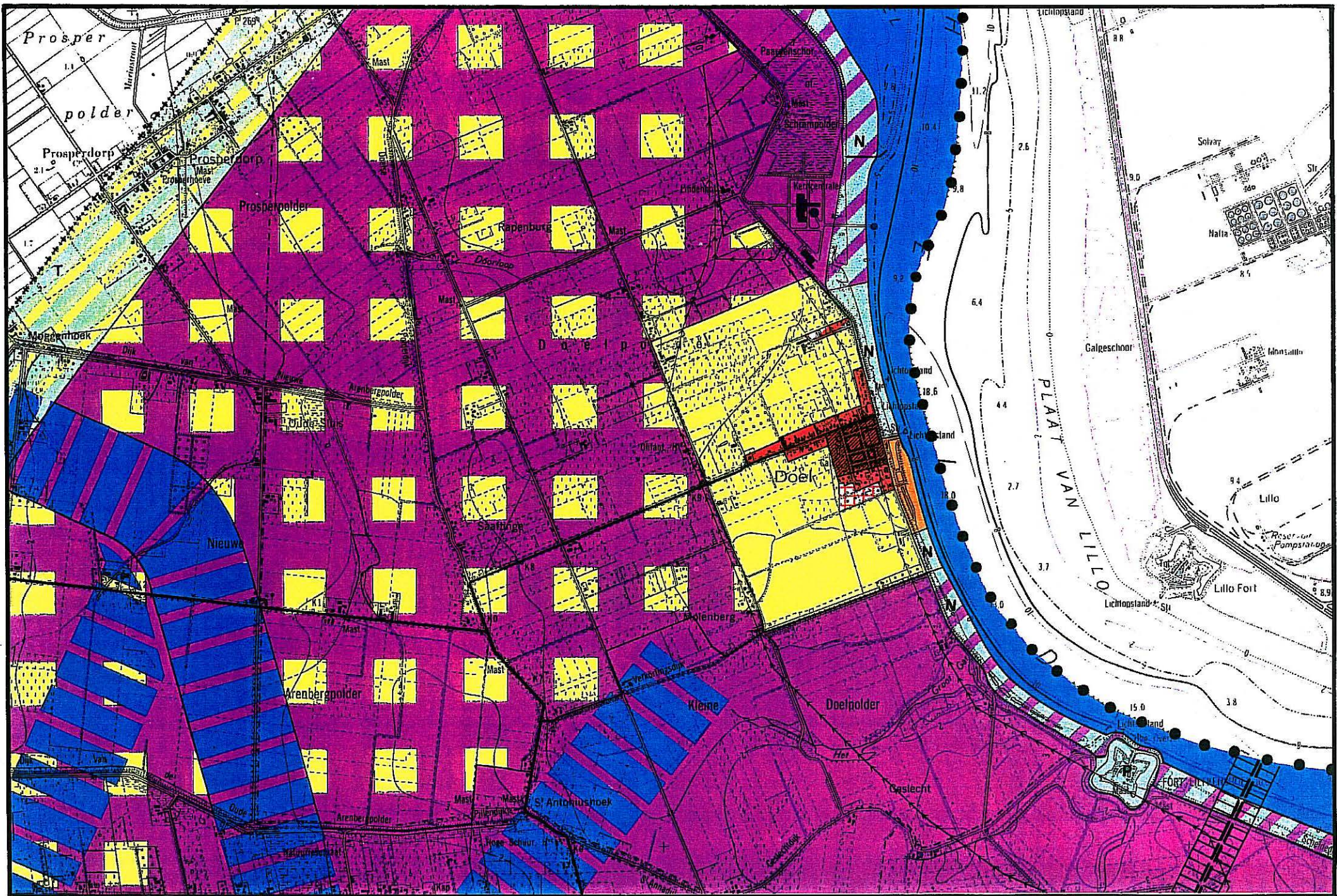


Fig. 6.3 - Ruimtelijke Ordening in de omgeving van Doel (Gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren, 1978).

Het kan nuttig zijn eveneens te Doel een verkenningsboring te verrichten. Doel is volledig door industriegebied en havenuitbreidingsgebied omringd en wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van nucleaire centrales. De enige in de omgeving gelegen woonzones zijn Doel en, op de rechter Scheldeoever, Lillo. Langs de Scheldeoevers zijn natuurgebieden gelegen. Doel situeert zich op het Kaartblad 7/6 (Lillo) van het gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren (Fig. 6.3).

In het bestek van de berging van laagradioactief afval, zouden gestoken monsters van de hier aanwezige kleilaag van de Formatie van Boom interessante gegevens kunnen opleveren.

6.2.3. Te verwachten geologische opbouw

Aan de hand van boorbeschrijvingen in de archieven van de BGD en het LTGH van de RUG en de isohypsenkaarten, gemaakt in het kader van fase 1 en 2 van deze studie, werden boorprofielen afgeleid. Deze geven enkel een aanwijzing omtrent de te verwachten opeenvolging, diepte en dikte van de verschillende geologische lagen.

a. Omgeving Sint-Margriete - Waterland-Oudeman

Naargelang van de boorplaats zal de diepte van de verschillende leden verschillen. Daarom werden twee boorprofielen, één ter hoogte van Sint-Margriete (Fig. 6.4) en één ter hoogte van de Oudemanspolder (Waterland - Oudeman) opgesteld (Fig. 6.5). In de directe omgeving van deze zone zijn geen diepe boringen beschikbaar. Enkel gedetailleerde boringen voor de studie van kwartaire sedimenten werden hier uitgevoerd.

b. Omgeving De Klinge - Meerdonk

Het te verwachten boorprofiel in de omgeving van De Klinge - Meerdonk wordt voorgesteld in figuur 6.6. In de omgeving is geen enkele diepe boring beschikbaar. De diepste boring bereikt de Formatie van Maldegem en is 62 m diep.

c. Omgeving Kerncentrale Doel

In de omgeving van de kerncentrale van Doel werden reeds verscheidene boringen uitgevoerd. De meeste boringen reiken echter slechts tot aan de Formatie van Boom; in één boring werd de Formatie van Lede bereikt. Het gaat hier echter meestal om niet gekernde boringen. De nabijgelegen boring van Kallo is een belangrijk aanknopingspunt. Het te verwachten boorprofiel in de omgeving van Doel wordt voorgesteld op figuur 6.7.

SINT-MARGRIETE

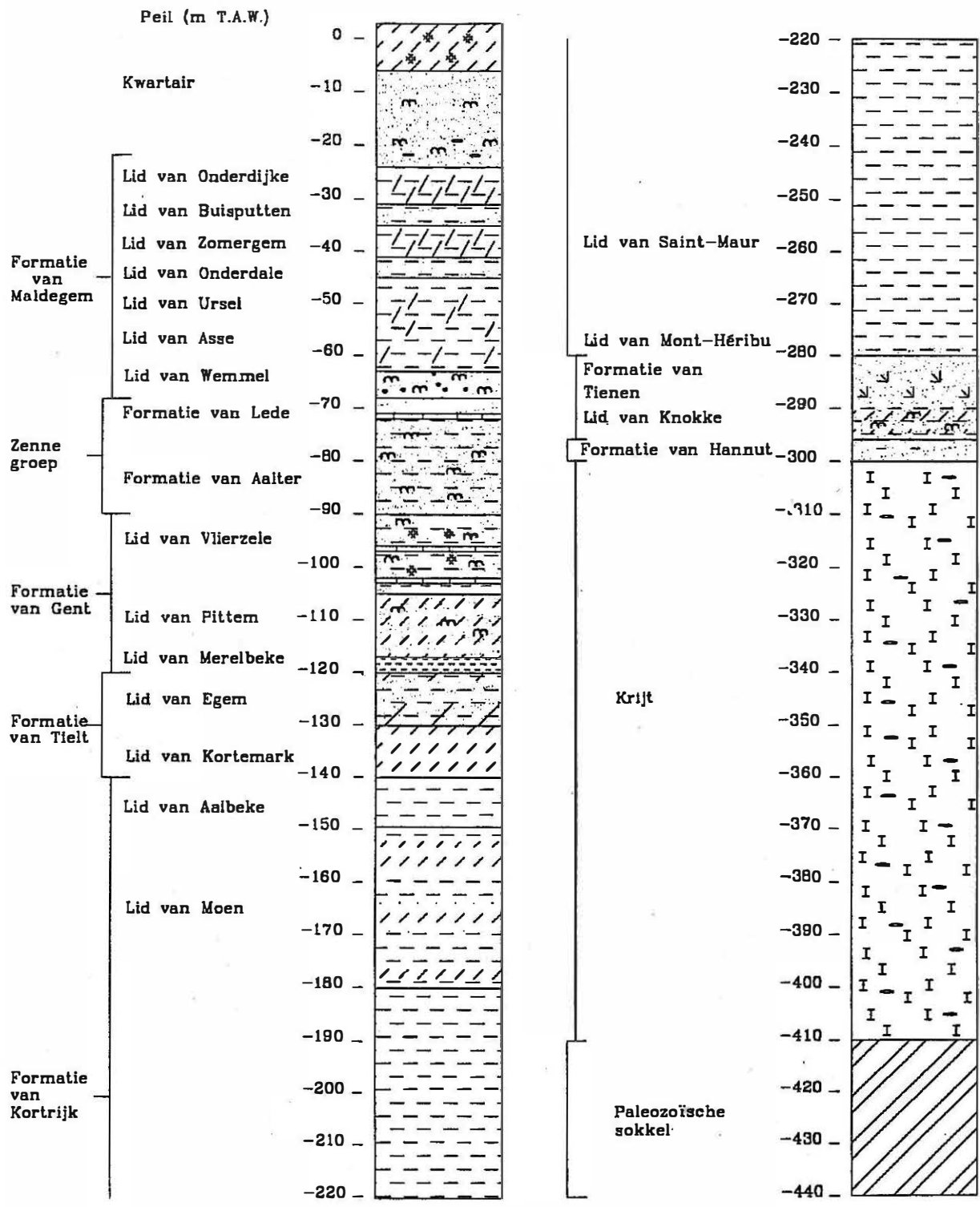


Fig. 6.4 - Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Sint-Margriete

WATERLAND-OUDEMAN

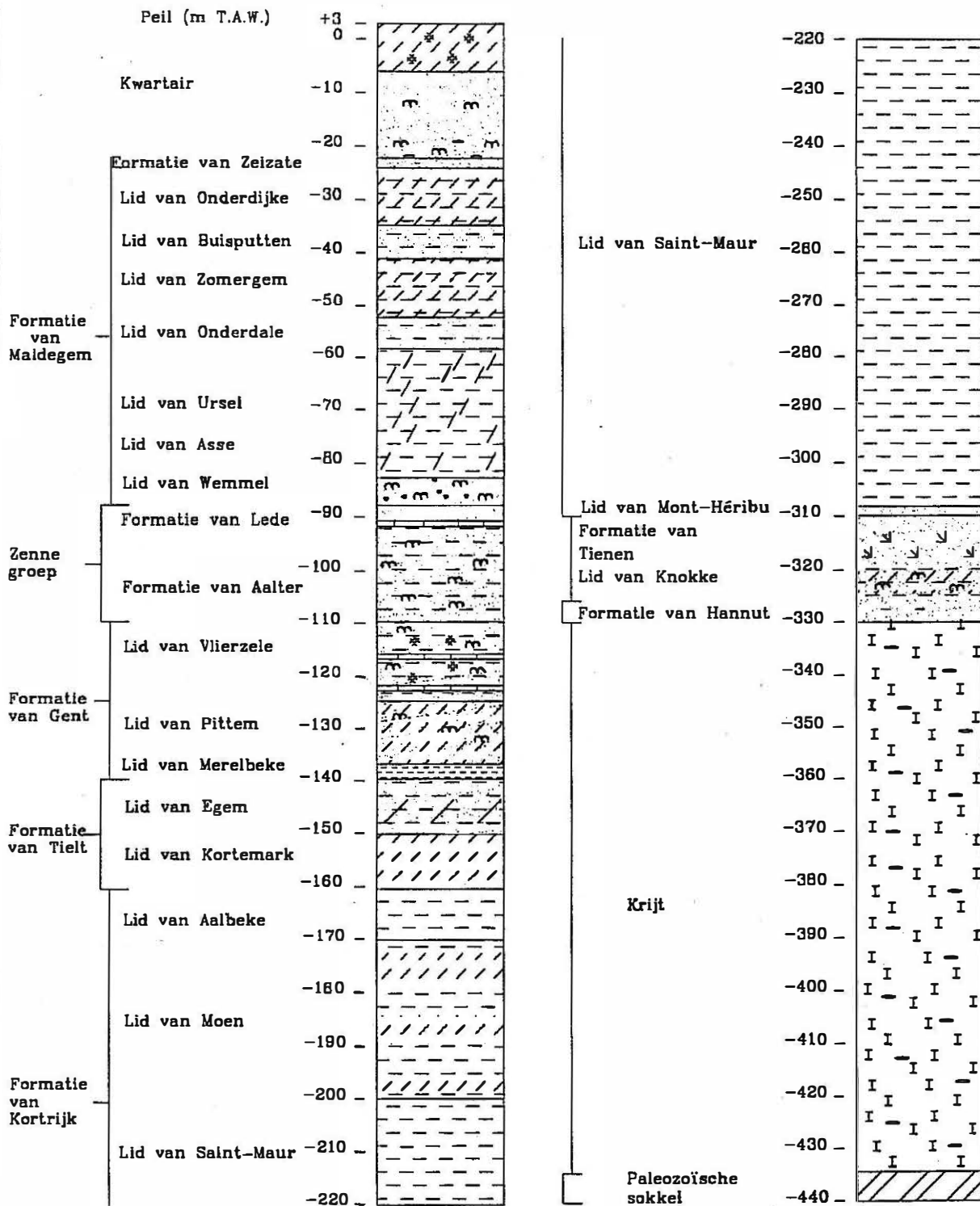


Fig. 6.5 - Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Waterland - Oudeman

DE KLINGE

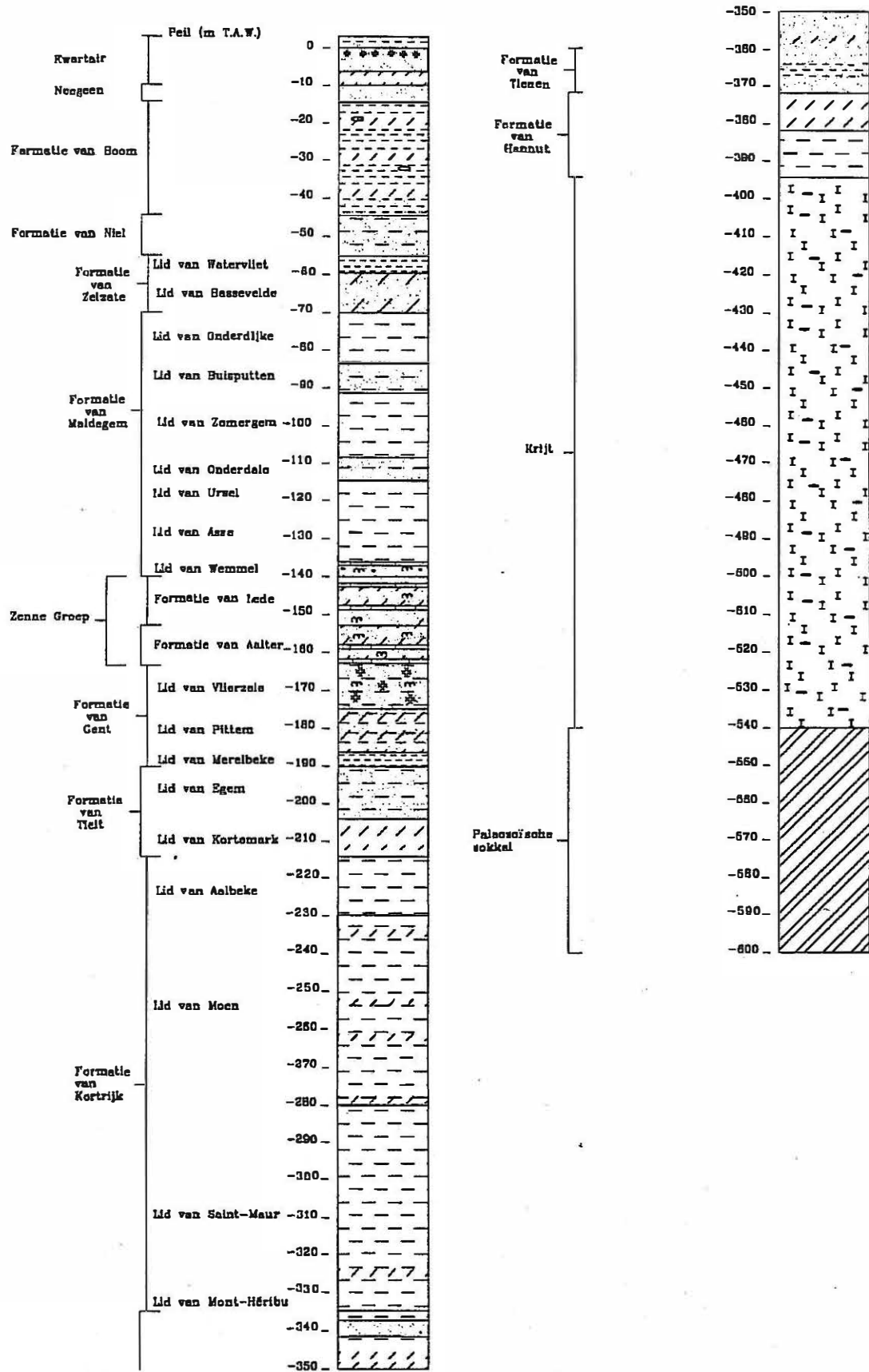


Fig. 6.6 - Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van De Klinge - Meerdonk

DOEL

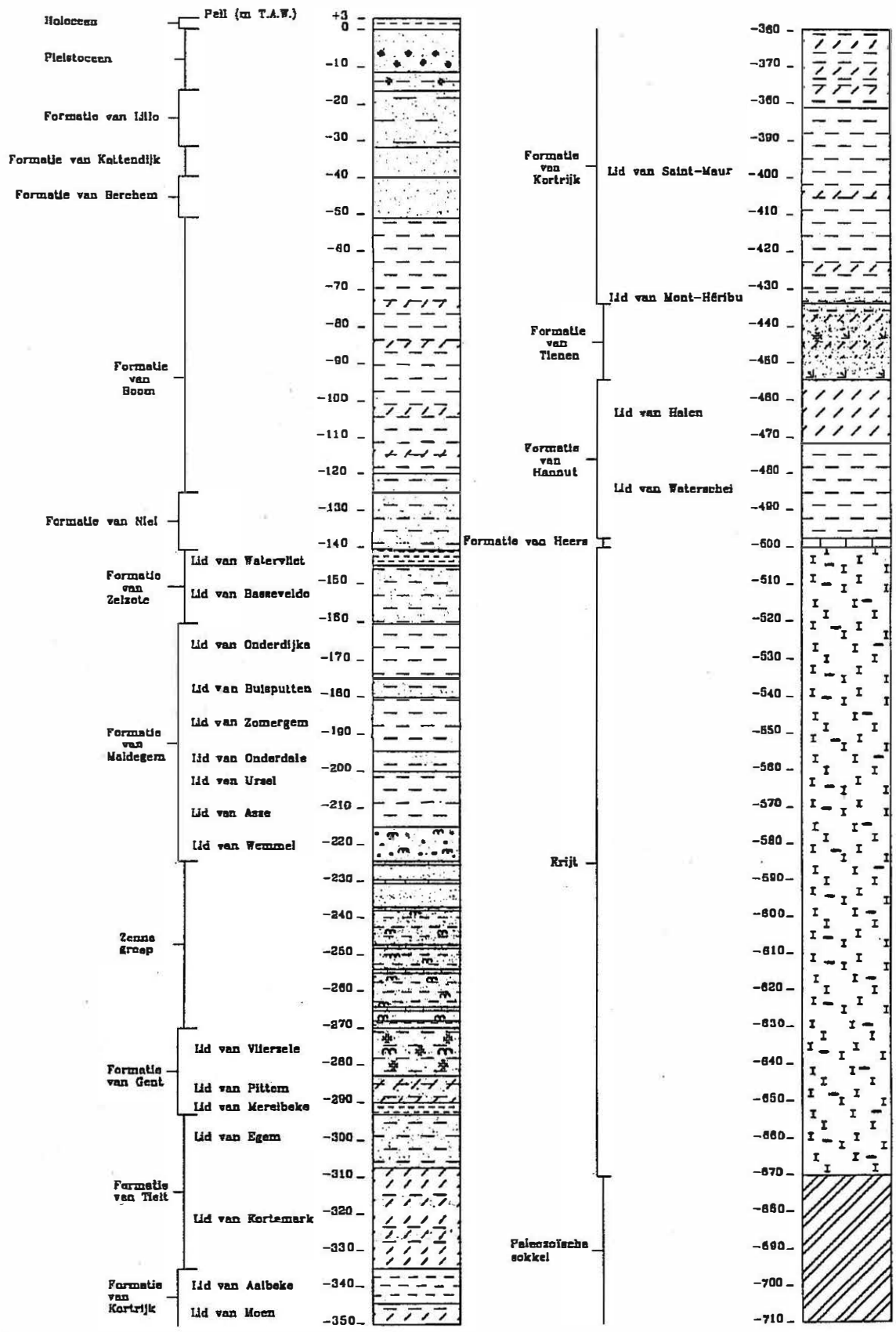


Fig. 6.7 - Afgeleide geologische opbouw ter hoogte van Doel

6.3. Geofysische boorgatmetingen

Het is nuttig de proefboring te laten volgen door een uitgebreide reeks boorgatmetingen. Aan de hand van de moderne technieken (boorgatmetingen met een hoge resolutie) kan men ook kleine alternaties in de lithologische kolom waarnemen. De geofysische boorgatmetingen en de boorkernen vullen elkaar aan.

Een boorgatmeting registreert een fysische, een geometrische of een andere eigenschap van de aangeboorde grondlagen in functie van de diepte. De meeste boorgatmetingen worden uitgevoerd in het voltooide boorgat, dat niet voorzien is van buizen maar gevuld is met boorspoeling.

De registratie van de spontane potentiaal, de natuurlijke gammastraling, de resistiviteit (lange normaal, korte normaal en puntweerstand) en de boorgatdiameter zijn de meest aangewende boorgatmetingen. Ook de gamma-gamma meting (densiteitsmeting) en de temperatuur zijn courante metingen. Samen met een resistiviteitsmeting is de natuurlijke gammastraling zeer geschikt voor een lithologische identificatie. Met de gamma-gammadichtheidsmeting kan de dichtheid en de porositeit van de aangeboorde sedimenten geschat worden. Uit de registratie van de snelheid van het geluid (sonic log) en de neutron meting kan men de porositeit berekenen.

6.4. Afwerking van de putten

De geologische verkenningsboringen dienen te worden uitgebouwd als hydrogeologische waarnemingspunten. Hiertoe moeten ze worden uitgerust met filters en stijgbuizen. Het wordt aangeraden om op basis van de boorbeschrijvingen en geofysische boorgatmetingen peilputten te plaatsen in elke watervoerende laag (zie boorprofielen). Hierin kan men peilen meten en watermonsters nemen. Hierdoor verkrijgt men informatie over de stijghoogte en over de grondwaterkwaliteit van de watervoerende lagen. Deze peilputten zouden later, na eventuele berging van hoogradioactief afval, als controleputten worden gebruikt.

6.5. Laboratoriumanalysen

Systematische monsternamen van de aangeboorde formaties geeft de mogelijkheid tot het analyseren van de verschillende lagen. Door granulometrisch onderzoek kan men de textuur en textuurvariaties in het lithologisch profiel achterhalen. Deze variaties kunnen worden gekoppeld aan de stratigrafische opeenvolging van de verschillende leden. Uit de granulometrische samenstelling kan de doorlatendheid van een laag worden geschat. Het klei- en siltgehalte moeten worden gedoseerd omdat deze in grote mate de doorlatendheid van een afzetting bepalen.

De onderzochte monsters moeten representatief zijn voor de aangeboorde eenheden. Na afzondering van de grintfractie, wordt het zand afgescheiden door natte zeping. De zandfractie wordt dan geschud op een stel genormaliseerde TYLER-zeven, gerangschikt in dalende volgorde. De klasse-intervallen hebben meestal een breedte van 0,25 of 0,5 op de schaal van KRUMBEIN (1934). Bij een voldoende groot gehalte klei en silt wordt deze fractie verder geanalyseerd met de sedimentatiebalans of met de sedigraaf.

Men kan de glauconietmineralen uit de zandmonsters afscheiden met een magnetische separator. Het vermogen van het zand om radio-elementen te adsorberen houdt verband met het glauconietgehalte. Dit kan worden vergeleken met de door boorgatmetingen bepaalde natuurlijke gammastraling.

Men kan de chemische samenstelling van de Formatie van Kortrijk over de gehele dikte bepalen. Verschillende technieken voor het bepalen van hoofd-, neven- en sporebestanddelen kunnen worden toegepast (X-stralenfluorescentie, atomaire adsorptie en emissiespectroscopie). Het gehalte aan organisch materiaal is eveneens interessant daar het de eigenschap heeft mobiel uranium te binden (DE PUTTER & CHARLET, 1994).

Mineralogisch onderzoek heeft als doel de juiste samenstelling van de Formatie van Kortrijk en elke eventuele heterogeniteit te bepalen. Verschillende granulometrische klassen kunnen worden onderzocht. Door middel van X-stralendiffractie kan een volledige karakterisering van de kleibestanddelen gebeuren.

Indien de lithologische en geometrische eigenschappen van de kleilaag gunstig zijn, kunnen de thermische eigenschappen (om de thermische weerslag van het bergen van bepaalde afvaltypes te beoordelen) en de fysische en geotechnische eigenschappen van de klei worden onderzocht.

De kwaliteit van het grondwater in de watervoerende lagen en van het interstitieel water kan worden onderzocht. Door isotopenonderzoek kan men het water dateren en zijn oorsprong en evolutie achterhalen.

7. SAMENVATTING EN ALGEMEEN BESLUIT

Deze studie beoogt de inventarisatie van de beschikbare gegevens over de klei van de Formatie van Kortrijk in functie van de geschiktheid voor de berging van hoogradioactief afval. Op basis van de lithologische, de sedimentologische en de geometrische eigenschappen van de Formatie van Kortrijk werden mogelijke bergingsgebieden afgebakend. Een mogelijke bergingslaag is bij voorkeur minstens 100 m dik en ligt op een diepte van te minstens 200 m.

De zones die werden weerhouden als mogelijk bergingsgebied zijn de gebieden Knokke, Sint-Laureins - Assenede en Sint-Niklaas - Beveren. Deze gebieden werden meer in detail bestudeerd. Het gebied Knokke wordt gekenmerkt door een dichte bebouwing (kuststreek), de aanwezigheid van het natuurgebied "Het Zwin" en een belangrijke toeristische aantrekkingskracht. Het gebied Sint-Laureins - Assenede en het westen en het uiterste noordoosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren zijn grotendeels agrarisch. Het noordoosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren is grotendeels industriegebied, terwijl het zuidoosten zeer dicht bebouwd en verstedelijkt is.

De geologische kenmerken van deze gebieden werden getoetst aan de criteria die de geschiktheid van een geologische laag voor de berging van hoogradioactief afval bepalen.

Op basis van de sedimentologische criteria kan men stellen dat de geschiktheid van de Formatie van Kortrijk voor de berging van hoogradioactief afval afneemt van west naar oost. Vooral in het oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren vindt men meerdere siltlagen in het middenste gedeelte van de klei. Bovendien neemt ook de dikte van de Formatie van Kortrijk en vooral van het onderste meeste homogene en kleiige gedeelte van het Lid van Saint-Maur af naar het oosten toe. In het noorden van het gebied Knokke en het gebied Sint-Laureins - Assenede is het homogene Lid van Saint-Maur waarschijnlijk 100 m dik. De top ervan bevindt zich op een diepte van ongeveer 180 m in Knokke en waarschijnlijk dieper dan 200 m in het noorden van het gebied Sint-Laureins - Assenede. De totale Formatie van Kortrijk is in de mogelijke bergingsgebieden overal minstens 100 m dik (140 m in het noorden van de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede), behalve in een strook gesitueerd rond de lijn Lillo - 's-Gravenwezel. In het gebied Sint-Niklaas - Beveren varieert de top van de Formatie van Kortrijk van -170 in het zuidwesten tot -420 in het noordoosten.

De Formatie van Kortrijk wordt gekenmerkt door belangrijke kleitektonische vervormingen. Zowel intraformationele breuken, golvingen als diaklazen komen erin voor. Er bestaan geen gegevens betreffende de invloed van deze vervormingen op de doorlatendheid. Ze werden tot nog toe enkel waargenomen in West-Vlaanderen en in het Noordzeegebied.

De lagen die boven en onder een voor berging van hoogradioactief afval geschikte geologische formatie voorkomen, dienen bij voorkeur te bestaan uit plastische gesteenten die ondoorlatend zijn voor de circulatie van grondwater. In dit kader dient vermeld dat onmiddellijk boven en onder de Formatie van Kortrijk watervoerende lagen voorkomen,

waarvan het belang voor de grondwaterwinning een regionale betekenis heeft.

Juist onder de klei van de Formatie van Kortrijk komt de watervoerende laag in het zand van de Landen Groep voor. De onderliggende slecht-doorlatende klei van de Landen Groep is afwezig in de gebieden Knokke en Sint-Laureins - Assenede, waardoor enkel Krijtgesteenten tussen het zand van de Landen Groep en de watervoerende laag in de Sokkel zijn gelegen. In de huidige toestand stroomt het grondwater neerwaarts naar de watervoerende lagen in de Landen Groep en de Sokkel, waarin de huidige horizontale grondwaterstroming naar het zuidwesten is gericht. In het zuiden van België zijn deze lagen belangrijk voor de drinkwatervoorziening.

In natuurlijke omstandigheden (zonder waterwinningen) stroomt het grondwater in de potentiële bergingsgebieden voornamelijk opwaarts, waardoor het grondwater uit de Formatie van Kortrijk in de bovenliggende watervoerende lagen terechtkomt. De tussenliggende kleilagen vertragen dit proces. Boven de Formatie van Kortrijk komt de Formatie van Tielt voor. Het bovenste Lid van Egem ervan is van lokaal belang voor de watervoorziening. De Leden van Pittem en van Merelbeke scheiden het Lid van Egem van de bovenliggende watervoerende laag in het Lid van Vlierzele, de Zenne Groep en het Lid van Wemmel. De natuurlijke horizontale grondwaterstroming in beide watervoerende lagen is naar het noordwesten gericht. De watervoerende laag in het Lid van Vlierzele, de Zenne Groep en het Lid van Wemmel is vooral in het noorden van West- en Oost-Vlaanderen belangrijk voor de watervoorziening.

In het noorden van België is het grondwaterreservoir reeds op geringe diepte verzilt.

Voor het noordwesten van België zijn de dichtsbijgelegen seismologisch actieve gebieden het Massief van Brabant, de Graben van Roermond, de streek van Luik, het Bekken van Bergen, de streek van de Boven-Jeker en het Nauw van Calais. Hiervan is de Rijngraben met de Graben van Roermond het meest actief. Het Variscisch front is een kenmerkende zwaktezone van de aardkorst in België. De ermee geassocieerde seismologische zones zijn deze in Noord-Frankrijk, in Henegouwen en in het gebied rond Luik. Noordwest-België kan beschouwd worden als een tektonisch relatief stabiel gebied.

Bij vergelijking van de beschikbare lithologische kenmerken van de Formatie van Kortrijk met deze van de Formatie van Boom te Mol - Dessel, een andere potentiële bergingslaag, blijkt dat de lithologische kenmerken van de Formatie van Kortrijk in het gebied Knokke en Sint-Laureins - Assenede waarschijnlijk gunstiger zijn voor berging dan deze van de Formatie van Boom te Mol. Siltlagen in het middenste Lid van Moen (vb. Te Kallo) doen de geschiktheid van de Formatie van Kortrijk echter afnemen naar het oosten toe. Kleitektonische vervormingen zijn veel minder uitgesproken in de Formatie van Boom. De geologische ondergrond van het mogelijk bergingsgebied in de Formatie van Boom bevat veel meer zandige lagen dan deze van het mogelijk bergingsgebied in de Formatie van Kortrijk. Boven de Formatie van Boom komen uitsluitend zandige lagen voor. Geen van beide gebieden wordt gekenmerkt door seismologische activiteit. Op 8,5 km afstand van Mol - Dessel bevindt zich echter de breuk van Rauw. In het mogelijk bergingsgebied van

de Formatie van Kortrijk zijn er breuken in het Massief van Brabant in het oosten van het gebied Sint-Laureins - Assenede en het oosten van het gebied Sint-Niklaas - Beveren.

Rekening houdend met de lithologische en de geometrische kenmerken van de Formatie van Kortrijk en de aspecten geografie en ruimtelijke ordening van de mogelijke bergingsgebieden, is het wenselijk verkenningsboringen te verrichten te Sint-Margriete - Waterland-Oudeman, De Klinge - Meerdonk en Doel. Voorgesteld wordt om zeker de Formatie van Kortrijk, maar beter ook de boven- en onderliggende lagen te kernen. Deze monsters moeten verder in het laboratorium worden onderzocht. In het kader van de berging van laagradioactief afval kunnen gekernde monsters van de klei van de Formatie van Boom te Doel nuttige informatie verschaffen. Voorgesteld wordt om geofysische boorgatmetingen, liefst met de bestaande hoge-resolutietoestellen, uit te voeren. Men moet de boorgaten met peilbuizen uitrusten voor stijghoogtemetingen en het nemen van watermonsters (grondwaterkwaliteit). Ze worden eventueel later geschikt als controleputten.

Algemeen kan men besluiten dat de mogelijkheid van diepe berging in de Formatie van Kortrijk niet uit te sluiten is. Het biedt een waardevol alternatief voor de klei van de Formatie van Boom.

REFERENTIES

BELGISCH GEOLOGISCHE DIENST. Archieven

CAMELBEECK, T. (1989). L'activité sismique actuelle (1985-1988) en Belgique. Comparaison avec les données de sismicité historique et instrumentale. Analyse seismotectonique. *Annales de la Société de Belgique*, **112**, 347-365.

DE PUTTER, T. & CHARLET, J.-M. (1994). *Natuurlijke analogiën in klei - een bibliografische synthese*. NIRAS, 183 pp.

DE VOS, W., VERNIERS, J. HERBOSCH, A. & VANGUESTAINE, M. (1993). A new geological map of the Brabant Massif, Belgium. *Geological Magazine*, **130**, 605-611.

DUPUYDT, F. (1978). *Tweede atlas van België*. Nationaal Geografisch Instituut.

GEETS, S. (1988). The evolution of the grain-size distribution in the sediments of the Ieper Formation in Belgium. *Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie*, **97**, 451-456.

GELUK, M.C., DUIN, E.J.TH., DUSAR, M., RIJKERS, R.H.B., VAN DE BERG, M.W. (1994). Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijnbouw*, **73**, 129-141.

GULINCK, M. (1969). Coupe résumée des terrains traversés au sondage de Kallo et profil géologique NS passant par Woensdrecht-Kallo-Halle. In : Le sondage de Kallo (au Nord-Ouest d'Anvers. *Toelichtende Verhandelingen van de Geologische Kaart en Mijnkaart van België*, **11**, 3-7.

HENRIET, J.P.; DE BATIST, M. & VERSCHUREN, M. (1991). Early fracturing of Paleogene clays, southernmost North Sea : relevance to mechanisms of primary hydrocarbon migration. In : *Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons* (ed. A.M. Spencer). Special Publication of the European Association of Petroleum Geoscientists 1, 217-227. Oxford University Press, Oxford.

JACOBS, P., MARÉCHAL, M. DE CEUCKELAIRE, M., SEVENS, E., DE BREUCK, W. & DE MOOR, G. (1993). *Geologische kaart van België - Vlaams Gewest - Toelichtingen en databank - Kaartblad 13, Brugge*. Belgische Geologische Dienst en Bestuur Natuurlijke Rijkdommen en Energie.

JACOBS, P., DE CEUCKELAIRE, M., DE BREUCK, W. & DE MOOR, G. (1993). *Geologische kaart van België - Vlaams Gewest - Toelichtingen en databank - Kaartblad 14, Lokeren*. Belgische Geologische Dienst en Bestuur Natuurlijke Rijkdommen en Energie.

JACOBS, P.; DE CEUCKELAIRE, M.; DE BREUCK, W. & DE MOOR, G. (1995). *Geologische kaart van België - Vlaams Gewest - Toelichtingen en databank - Kaarblad 22, Gent*. Belgische Geologische Dienst en Bestuur Natuurlijke Rijkdommen en Energie.

KRUMBEIN, W.C. (1934). Size frequency distribution of sediments. *J. Sed. Petrol.* **4**, 65-77.

LAGA, P. (1966). Kleidiapir in de uitgraving voor de spoorwegtunnel van de E3-weg op de rechteroever te Antwerpen. *Ingenieursbl.*, **35**, 552-553.

LAGA, P. & VANDENBERGHE, N. (1990). The Knokke Well (11E 138) with a description of the De Haan (22W 276) and Oostduinkerke (35E -142) wells. *Toelichtende Verhandelingen bij de Geologische en Mijnkaarten van België*, **29**, 118 pp.

LEBBE, L.; VAN CAMP, M.; DE CEUCKELAIRE, M. VAN BURM, P. & DE BREUCK, W. (1987). *Hydrogeologisch matematick model van de grondwaterstroming in de gedeeltelijk afgesloten watervoerende lagen onder West-, Oost-, Zeeuws- en Frans-Vlaanderen*. Gent, Laboratorium voor Toegepaste Geologie en Hydrogeologie (RUG), TGO 86053.

NIRAS. *Interne documenten*.

NIRAS - DEPARTEMENT STUDIES EN PROJECTEN, EENHEID BERGING (1989). *Safety Assessment and Feasibility Interim Report*.

PATIJN, J. (1985). *Contribution à la recherche hydrogéologique liée à l' évacuation de déchets radioactifs dans une formation argileuse*. Thèse de Doctorat, Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris (1985). Overgenomen in SCK/CEN - Semestriël rapport nr. 20 (2de sem., 1985).

SCHLUMBERGER (1991). *Wireline Services Catalog*.

SCK (1993). *Boorgatmeting Mol-Dessel : Dessel-1 (SCHLUMBERGER)*

STAATSSECRETARIAAT VOOR STREEKECONOMIE - BESTUUR VAN DE STEDEBOUW EN DE RUIMTELIJKE ORDENING (1977). *Gewestplan Gentse en Kanaalzone*.

STAATSSECRETARIAAT VOOR STREEKECONOMIE, RUIMTELIJKE ORDENING EN HUISVESTING - BESTUUR VAN DE STEDEBOUW EN DE RUIMTELIJKE ORDENING (1977). *Gewestplan Brugge - Oostkust*.

STAATSSECRETARIAAT VOOR STREEKECONOMIE - BESTUUR VAN DE STEDEBOUW EN DE RUIMTELIJKE ORDENING (1978). *Gewestplan Eeklo - Aalter*.

STAATSSECRETARIAAT VOOR STREEKECONOMIE, RUIMTELIJKE ORDENING EN HUISVESTING - BESTUUR VAN DE STEDEBOUW EN DE RUIMTELIJKE ORDENING (1978). *Gewestplan Sint-Niklaas - Lokeren*.

STAATSSECRETARIAAT VOOR DE NEDERLANDSE GEMEENSCHAP EN HET VLAAMS GEWEST (STREEKECONOMIE EN RUIMTELIJKE ORDENING) - BESTUUR VAN DE STEDEBOUW EN DE RUIMTELIJKE ORDENING (1979). *Gewestplan Antwerpen*.

STEURBAUT, E. & NOLF, D. (1986). Revision of Ypresian stratigraphy of Belgium and northwestern France. *Meded. Werkgr. Tert. Geol.*, 23, 115-172.

TRACTIONEL (1984). *Studie van de geologie en de seismische parameters voor de bouwplaats Doel*. Kerncentrale Doel. Tienjaarlijkse revisie, Tractionel, 89 pp.

WALRAEVENS, K. (1987). *Hydrogeologie en hydrochemie van het Ledo-Paniseliaan in Oost- en West-Vlaanderen*. Doctoraatsthesis, RUG, 350 pp.

WOUTERS, L. & VANDENBERGHE, N. (1994). *Geologie van de Kempen - een synthese*. NIRAS, 208 pp.

WEMAERE, I. & MARIVOET, J. (1995). *Updated regional hydrogeological model for the Mol site (The north+eastern Belgium model)*. Geological disposal of conditioned high-level and long lived radioactive waste. NIRAS/ONDRAF (R-3060), 72 pp.