

Rapportage van onderzoek aan eigenschappen van de Klei van Boom die relevant zijn bij de beschouwing van dit laagpakket voor opslag van kernafval.

Rapportnummer: 1010-OEM2274

22 december 2010

In opdracht van:

Stichting Greenpeace Nederland
Mevr. Drs. Ike Teuling
Jollemanhof 15-17
Postbus 3946
1001 AS Amsterdam
Tel. 020-524 95 38
GSM 06-520 629 73
E-mail:

Adviseur:

T&A Survey BV
Postbus 20670
1001 NR AMSTERDAM
Tel: 020 6651368
Fax: 020 6685486
Internet: www.ta-survey.nl
E-mail: info@ta-survey.nl

Auteurs :

Drs. J.V.M. Brugge, B.J. Vrouwe MSc.

Projectleider:

Ir. G.A. de Bruin

Datum	Status
22 december 2010	Conceptversie
17 januari 2011	Eindrapport

Inhoud

Management samenvatting	4
1 Inleiding	7
1.1 Doelstelling van het onderzoek	7
1.2 Uitvoering van het onderzoek	7
1.3 Onderzoeksmethode	7
1.3 Onderzoeksresultaten en structuur van dit rapport.....	8
1.4 Conventies in dit rapport	8
2 Inventarisatie van gegevens	9
3 Eigenschappen en condities van de Klei van Boom	11
3.1 Geologisch overzicht Tertiair	12
3.2 Ruimtelijke eigenschappen van het Klei van Boom Laagpakket.....	14
3.2.1 Verspreiding van de Klei van Boom	14
3.2.2 Diepte van de Klei van Boom	14
3.2.3 Dikte van de Klei van Boom	15
3.2.4 Combinatie van gestelde randvoorwaarden voor diepte en dikte	15
3.3 Homogeniteit van de Klei van Boom	16
3.4 Waterdoorlaatbaarheid van de Klei van Boom	18
3.5 Aanpalende watervoerende laagpakketten	18
3.7 Aardbevingsrisico en breuken	22
3.8 Mijnbouwactiviteiten	23
3.9 Zoutstructuren	24
3.10 Aanvullende, niet-geologische condities.....	25
4 Conclusies en aanbevelingen	26
6 Literatuur.....	29
7 Verklarende woordenlijst.....	30

Figuren

- 1 Schematische weergave van de onderscheiden laagpakketten in de Onder- en Midden Noordzee groepen van het Tertiair, en hun variatie in de verschillende bereiken van het afzettingsgebied.
- 2 Globale verspreiding van afzettingmilieus tijdens de vorming van het Klei van Boom laagpakket (Oligoceen tijdvak).
- 3a. Bereik waarin de Klei van Boom op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld is gelegen.
- 3b. Bereik waarin de Klei van Boom diktes heeft van tenminste 100 meter.
- 4 Gebieden waarbinnen de Klei van Boom zowel op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld ligt en diktes heeft van minstens 100 meter.
- 5 Zuid-noord gericht geologisch profiel door zuidoost Nederland.
- 6 Illustratie van een zoutdiapier in de Nederlandse ondergrond.

Tabellen

- 1 Kleipercentage Klei van Boom voor twee locaties.
- 2 Doorlaatbaarheid Klei van Boom, gemeten op twee onderzoekslocaties.
- 3 Onder en boven de Klei van Boom gelegen watervoerende laagpakketten in deelgebieden I t/m IV, zoals die door een selectie van boringen hier zijn aangetroffen.
- 4 Tabel met voorkomen van breuken in Noordzee Groep en de sinds 1906 geregistreerde aardbevingen.
- 5 Tabel met mijnbouwactiviteiten per gebied.

Bijlagen

- 1 Geologische tijdschaal.
- 2-a Structurele elementenkaarten ten tijde van Laat-Jura tot Krijt.
- 2-b Structurele elementenkaarten ten tijde van het Tertiair.
- 3-a Geologische kaart van het erosieoppervlak dat de basis vormt van het Tertiair.
- 3-b Verspreiding van afzettingmilieus in het Noordzee Bekken tijdens het Oligoceen.
- 4-a Dieptekaart van de Klei van Boom in ondergrond van het Nederlandse vasteland.
- 4-b Diktekaart van de Klei van Boom in ondergrond van het Nederlandse vasteland.
- 5 Deelgebieden waarbinnen de Klei van Boom op dieptes ligt van tenminste 500 meter onder maaiveld en diktes heeft van tenminste 100 meter.
- 6 Profielen met positie en dikte van de Klei van Boom: een profiel voor elk van de vier deelgebieden.
- 7 Overzicht van breuken door Basis Tertiair, geregistreerde aardbevingen, mijnbouw, zoutstructuren.
- 7-a Idem 7, met gemeentegrenzen als extra referentie.
- 8 Bijzondere natuurgebieden in Nederland.
- 8-a Idem 8, met gemeentegrenzen als extra referentie.
- 9 Variatie van de bevolkingsdichtheid op het niveau van wijken binnen gemeentes.
- 10 Gemeentegrenzen en –namen in het bereik van deelgebieden I, II, III en IV (anno 2009).

Management samenvatting

Stichting Greenpeace Nederland heeft T&A Survey B.V. op 16 november 2010 opdracht verstrekt voor een geologische studie van de verspreiding en verticale ontwikkeling van de Klei van Boom in de ondergrond van Nederland. De studie dient aan te geven waar deze aardlaag op dieptes ligt en diktes heeft die beide voldoen aan gestelde randvoorwaarden voor de opslag van kernafval. Tevens dienen, zo mogelijk, uitspraken te worden gedaan aangaande de kwaliteit van de Klei van Boom en verdere condities die relevant zijn bij overwegingen om dit laagpakket in delen van de Nederlandse ondergrond voor de opslag van radioactief afval te kwalificeren of diskwalificeren.

Uitvoering van het onderzoek

Een inventarisatie is uitgevoerd van beschikbare gegevens over de Klei van Boom in de ondergrond van Nederland. Naast gegevens betreffende de ruimtelijke eigenschappen van dit laagpakket (primaire doelstelling), zijn tevens gegevens verzameld die de kwaliteit en geologische condities van deze aardlaag in het verspreidingsgebied betreffen en relevant zijn bij de beschouwing van deze laag voor de opslag van kernafval. Met het oog op dit laatste zijn tevens gegevens over enkele niet-geologische condities verzameld.

Verwerking van de gegevens is primair uitgevoerd om vast te stellen waar de Klei van Boom aanwezig is en waar het hier tevens voldoet aan navolgende randvoorwaarden:

- Diepte van de top van het laagpakket ligt op minstens 500 meter onder maaiveld;
- Dikte van het laagpakket bedraagt tenminste 100 meter.

Op basis van beschikbare gegevens is tevens aangegeven op welke wijze de homogeniteit en waterdoorlatendheid van de kleilaag binnen het verspreidingsgebied varieert.

Verder zijn enkele geologische condities onderzocht en in kaart gebracht: direct contact van de Klei van Boom met watervoerende aardlagen, verstoring van het pakket door breukstructuren, risico van aardbevingen, effect van winning van delfstoffen en de aanwezigheid van grote zoutstructuren.

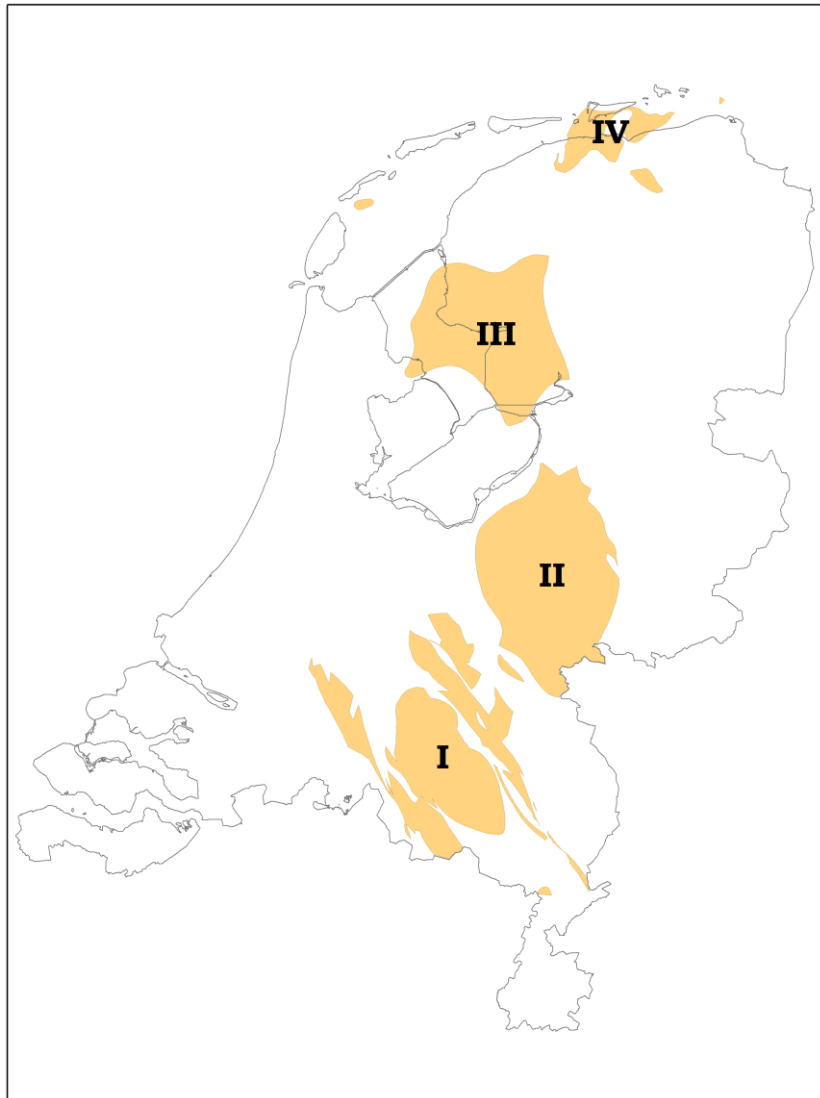
Gegevens over enkele niet-geologische condities zijn in kaartvorm, als bijlagen aan de resultaten van deze studie toegevoegd. Deze betreffen de verdeling van de bevolkingsdichtheid in Nederland en de gebieden die als bijzonder natuurgebied gelden.

Conclusies van het onderzoek

Uit de evaluatie komt naar voren dat de Klei van Boom in vier gebieden binnen het onderzoeksgebied aan de gestelde randvoorwaarden voor dikte en diepte voldoet.

- I Gebied met NW-ZO oriëntatie over Noord-Brabant en westelijk Gelderland;
- II N-Z gerekt gebied over centraal Gelderland;
- III Gebied dat het zuidwesten van Friesland, delen van de Noordoostpolder en het IJsselmeer en de regio Enkhuzen in Noord-Holland beslaat;
- IV Gebied in het noorden van Friesland en Groningen en aangrenzende delen van de Waddenzee.

Deze gebieden zijn afgebeeld in de figuur hieronder (en in bijlage 5).



Vier gebieden waarbinnen de Klei van Boom zowel op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld ligt en diktes heeft van minstens 100 meter.

Op basis van gegevens over de eigenschappen van de Klei van Boom, gemeten in de twee onderzoekslocaties in het bereik van zuidelijk Nederland (Zeeland en noordelijk België), wordt afgeleid dat de Klei van Boom in zuidelijk Nederland bestaat uit siltige klei (klei met een iets grover-korrelige component) en dat het laagpakket hier is onder te verdelen in meerdere lagen waarvan de waterdoorlatendheden verschillen. In noordelijke richting (dus: van deelgebied I naar IV) is sprake van een geleidelijk meer homogene samenstelling van het laagpakket en een hoger kleigehalte. In deze richting neemt daardoor de waterdoorlatendheid af.

In het zuiden van Nederland worden de laagpakketten die direct onder en boven de Klei van Boom liggen gekwalificeerd als watervoerende lagen. Deze begrenzend laagpakketten worden in noordelijke richting (dus: van deelgebied I naar IV) geleidelijk kleiiger, waardoor hun watervoerende capaciteit sterk afneemt.

In de regio Noord-Brabant (deelgebied I) is de Roerdal Slenk de locatie van een intensief en nog altijd actief breukensysteem. Door verticale bewegingen langs breuken is de horizontale

continuïteit van de Klei van Boom verstoord en bestaat tevens de mogelijkheid dat het laagpakket plaatselijk via een breuk ook zijdelings in contact staat met een watervoerende aardlaag. Breuken op het niveau van de Klei van Boom zijn in de overige drie deelgebieden niet/nauwelijks aanwezig.

In verband met het genoemde breukensysteem in de regio van deelgebied I, bestaat hier een risico van (natuurlijke) aardbevingen. In de omgeving van deelgebied IV bestaat eveneens het risico van aardbevingen; deze zijn hier echter gevolg zijn van de winning van aardgas.

Onderhavige studie presenteert resultaten van onderzoek aan de Klei van Boom. Gepresenteerde resultaten betreffen eigenschappen en condities van dit laagpakket die mede bepalen of dit pakket kan worden beschouwd voor de opslag van kernafval. Naast het feit dat hier niet wordt beoogd om op basis van de gerapporteerde eigenschappen en condities uitspraken te doen over ruimtelijk geduide (on)geschiktheid van de Klei van Boom voor een dergelijk doel, is dit op basis van de beschikbare (/bestaande) gegevens momenteel zelfs niet eens mogelijk. Elk initiatief van de daartoe bevoegde instantie om een gebied aan te wijzen voor de gestelde toepassing dient daarom begeleid te gaan van de aankondiging en specificatie van een uitgebreid onderzoek aan de Klei van Boom ter plaatse.

1 Inleiding

Stichting Greenpeace Nederland heeft T&A Survey B.V. op 16 november 2010 opdracht verstrekt voor een geologische studie van de Klei van Boom in de ondergrond van Nederland. Deze studie dient primair informatie te geven betreffende de verspreiding en de verticale ontwikkeling (dikte en diepteligging) van de Klei van Boom in de Nederlandse ondergrond. Gebieden waar deze aardlaag op dieptes ligt en diktes heeft die beide voldoen aan gestelde randvoorwaarden voor de opslag van kernafval, dienen te worden aangegeven.

Voor de op basis van toereikende diepte en dikte afgeleide deelgebieden dienen tevens, zo mogelijk, uitspraken te worden gedaan aangaande de kwaliteit van de Klei van Boom en aangaande verdere condities die relevant zijn bij overwegingen om dit laagpakket ter plaatse voor de opslag van radioactief afval te kwalificeren of diskwalificeren.

1.1 Doelstelling van het onderzoek

Het doel van onderhavige studie is, vast te stellen waar in Nederland de Klei van Boom aanwezig is op een diepte van minstens 500 meter onder de oppervlakte en met een dikte van tenminste 100 meter.

Tevens dient, zo mogelijk, te worden aangegeven in hoeverre de Klei van Boom voldoet aan een aantal van de door de Europese Commissie gehanteerde criteria met betrekking tot de geschiktheid van een aardlaag voor de opslag van kernafval.

1.2 Uitvoering van het onderzoek

Het onderzoek is opgesplitst in twee fases.

Fase 1 behelst het vaststellen van de dikte en de diepteligging van de Klei van Boom in de Nederlandse ondergrond en het op grond hiervan afbakenen van gebieden waarbinnen beide parameters aan de gestelde criteria voldoen, te weten: dikte tenminste 100 meter en diepte tenminste 500 meter onder maaiveld.

Tevens is in deze fase onderzocht of er in toereikende mate informatie beschikbaar is om voor de afgebakende gebieden uitspraken te doen over de kwaliteit van de Klei van Boom en condities die binnen deze gebieden mede de geschiktheid bepalen voor de opslag van radioactief afval. De beschikbare gegevens bleken uitbreiding van de studie met fase 2 zinvol te maken.

Fase 2 betreft nader onderzoek aan de kwaliteit van de Klei van Boom als afsluitende aardlaag en aan verdere geologische en praktische condities die relevant zijn bij de beschouwing van dit laagpakket voor de opslag van kernafval binnen de in fase 1 afgeleide deelgebieden.

1.3 Onderzoeksmethode

In onderhavige studie is in eerste instantie informatie over de regionale geologie in beschikbare publicaties bestudeerd. Vervolgens zijn archieven geraadpleegd die gegevens bevatten over de ruimtelijke en kwalitatieve eigenschappen van de Klei van Boom, over het voorkomen van breuksystemen in de Klei van Boom en over locaties waar in het nabije verleden in de Nederlandse ondergrond aardbevingen zijn geregistreerd.

Op basis van beschikbare geologische kaarten zijn deelgebieden afgeleid waarbinnen de Klei van Boom voldoet aan de hieronder gespecificeerde randvoorwaarden:

- Diepte van de top van het laagpakket ligt op minstens 500 meter onder maaiveld;
- Dikte van het laagpakket bedraagt tenminste 100 meter.

Gegevens uit metingen van eigenschappen van de Klei van Boom, uitgevoerd op twee onderzoekslocaties in het bereik van zuidelijk Nederland, zijn samengevat. Op basis van het beschikbare model van de ontwikkeling van de Klei van Boom in het verspreidingsgebied, zijn uit deze beschikbare gegevens indicaties van kwaliteiten afgeleid in de gebieden verder noordelijk in Nederland.

Gegevens over verdere geologische condities en enkele praktische condities die relevant zijn bij de beschouwing van de Klei van Boom voor de opslag van kernafval, zijn uitgewerkt en in kaarten afgebeeld.

1.3 Onderzoeksresultaten en structuur van dit rapport

Informatie over de voorbereidende studie voor het onderzoek zijn opgenomen in hoofdstuk 2 (*Inventarisatie van gegevens*).

Resultaten van het onderzoek van de verspreiding, dikte en diepteligging van de Klei van Boom zijn vastgelegd in hoofdstuk 3 (*Eigenschappen en condities van de Klei van Boom*). In dit hoofdstuk zijn tevens bevindingen opgenomen van de verwerking van gegevens omtrent eigenschappen van de Klei van Boom en condities die relevant zijn bij de beschouwing van dit laagpakket voor de opslag van kernafval.

Conclusies van het onderhavige onderzoek en aanbevelingen voor verdere activiteiten in het onderzoek naar de Klei van Boom in de ondergrond van Nederland zijn opgenomen in hoofdstuk 4 (*Conclusies en aanbevelingen*).

Onderhavige studie presenteert resultaten van onderzoek aan de Klei van Boom. Gepresenteerde resultaten betreffen eigenschappen en condities van dit laagpakket die mede bepalen of dit pakket kan worden beschouwd voor de opslag van kernafval. Naast het feit dat hier niet wordt beoogd om op basis van de gerapporteerde eigenschappen en condities uitspraken te doen over ruimtelijk geduide (on)geschiktheid van de Klei van Boom voor een dergelijk doel, is dit op basis van de beschikbare (/bestaande) gegevens momenteel zelfs niet eens mogelijk. Elk initiatief van de daartoe bevoegde instantie om een gebied aan te wijzen voor de gestelde toepassing dient daarom begeleid te gaan van de aankondiging en specificatie van een uitgebreid onderzoek aan de Klei van Boom ter plaatse.

1.4 Conventies in dit rapport

Het gebruik van vaktermen wordt in voorliggend rapport zo veel mogelijk vermeden. Waar gebruik van een begripomschrijvende tekst de leesbaarheid echter verstoort, wordt gekozen voor de betreffende vakterm. Een verklaring van dergelijke termen wordt gegeven achterin dit rapport (hoofdstuk 7, *Verklarende woordenlijst*). Bij eerste gebruik van deze termen in de voorliggende tekst worden deze cursief weergegeven en van een *-achtervoegsel voorzien.

2 Inventarisatie van gegevens

Het Klei van Boom Laagpakket maakt deel uit van de meestal vele honderden tot meer dan 2.000 meter dikke serie zanden en kleien van Tertiair ouderdom (geologische periode van circa 65 tot 2,5 miljoen jaar geleden; zie bijlage 1). Deze aardlagen zijn nagenoeg overal in het bovenste deel van de Nederlandse ondergrond aanwezig. In het uiterste oosten, zuiden en zuidwesten van Nederland bevinden de bovenste aardlagen uit deze periode zich aan of nabij de oppervlakte; gegevens over de complete serie aardlagen zijn echter alleen uit diepe boringen en *seismiek** beschikbaar.

Het Tertiair in de ondergrond van het Nederlandse vasteland heeft niet de commerciële belangstelling van de olie- en gasindustrie. Hoewel alle boringen naar olie of gas de aardlagen uit deze periode geheel hebben doorboord, zijn de hiermee verzamelde gegevens over het Tertiair in de regel beperkt tot geofysische boorgatmetingen (*logs**).

Gegevens uit detailonderzoek van de kwaliteit van de Klei van Boom zijn beschikbaar voor slechts twee onderzoekslocaties: locatie Westerschelde in zuidwest Nederland en Mol in noordelijk België.

In het begin van de jaren 1980 werd door de voormalige Rijks Geologische Dienst (RGD) in opdracht van het ministerie van Economische Zaken een regionale kartering van het Tertiair uitgevoerd. Dit onderzoek had tot doel alle kennis van de verschillende aardlagen uit deze geologische periode te inventariseren om vragen vanuit de samenleving over aardkundige aspecten van op dat moment gewenst en mogelijk toekomstig gewenst gebruik van de ondergrond te kunnen beantwoorden. Een van deze vragen betrof de mogelijkheid van tijdelijke of permanente opslag van materialen (grondstoffen en afval) in de Nederlandse ondergrond.

In het rapport 'Inventarisatie van slecht-doorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vasteland' (RGD, 1984) is de op dat moment beschikbare informatie over zeven kleilaagpakketten samengebracht. Tevens zijn in deze studie van elk van deze laagpakketten op basis van seismiek en boorgegevens de ruimtelijke eigenschappen in kaart gebracht. Deze grootschalige (1:250.000) diepte-structuurkaarten en diktekaarten, (analoge) bijlagen bij het rapport uit 1984, zijn tot op heden de enige regionale kaarten die van de ruimtelijke eigenschappen van de zeven onderscheiden kleilaagpakketten bestaan.

Resultaten van het interne rapport (voor de opdrachtgever) van de RGD uit 1984 vormen de basis van diverse klein-schaliger studies die in latere jaren zowel door de RGD zelf, als ook door derden zijn uitgevoerd.

In de jaren 1990 werd door de RGD, in het kader van het project CAR (Clay As potential host Rock), in opdracht van het ministerie van Economische Zaken, de informatie uit de op dat moment beschikbare gegevens en de bekende studies bijeengebracht.

In fase 1 van dit project werd een compilatie van de bestaande informatie uitgevoerd en werden beschikbare kaarten in digitale vorm gebracht. In 1997 werd hierover gerapporteerd in het rapport 'Kartering slecht-doorlatende laagpakketten van Tertiaire Formaties (CAR I)'. Dit rapport vormt in essentie een *update* van het rapport van de RGD uit 1984, toegespitst op de zeven onderscheiden kleilaagpakketten in het Tertiair.

In fase 2 van het project CAR werden op basis van beschikbare gegevens de eigenschappen van de kleipakketten van het Tertiair en ruimtelijke variatie hiervan nader beschreven. In 1998 werd hierover in het rapport 'Inventarisatie van geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten (CAR II)' gerapporteerd.

In de publicaties van De Mulder et al (2003) en Wong et al (2007), worden compilaties gegeven van studies aan de ontstaansgeschiedenis van het Tertiair en de ontwikkeling van de diverse laagpakketten hierin, waaronder de Klei van Boom.

Op de site van het NL Olie- en Gasportaal (DINOloket) van TNO Bouw en Ondergrond zijn gegevens van diepe boringen op te vragen. Binnen de vier deelgebieden die in onderhavige studie op basis van de voor de Klei van Boom gestelde ruimtelijke criteria zijn afgebakend, zijn gegevens van gezamenlijk 37 boringen opgevraagd. Hieruit zijn gegevens betreffende aanpalende watervoerende aardlagen overgenomen.

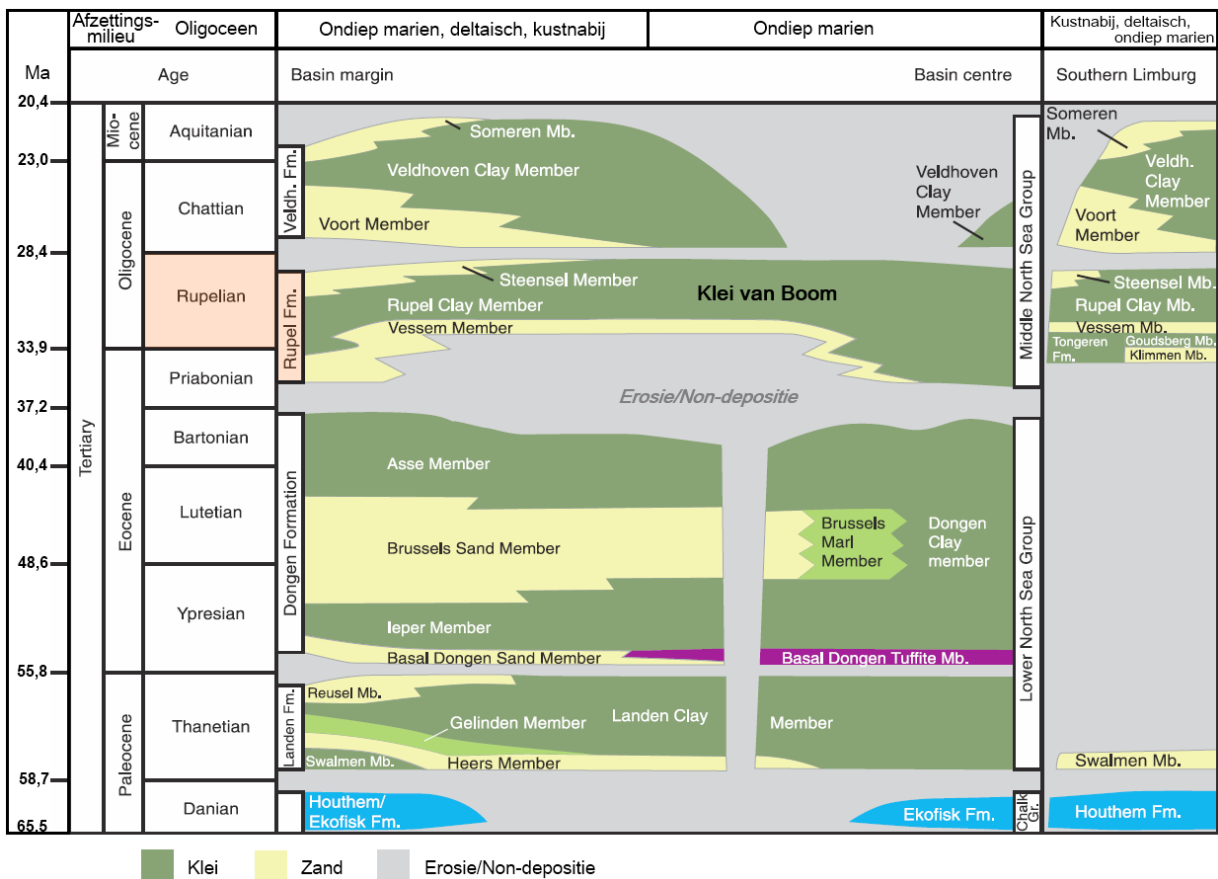
Tevens zijn ten behoeve van onderhavige studie de op deze site beschikbare gegevens betreffende mijnbouwactiviteiten en geologische structuren opgehaald.

Ook gegevens die beschikbaar zijn op de sites van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, het Centraal Bureau voor de Statistiek en het ministerie van LNV, zijn verwerkt in onderhavige studie.

3 Eigenschappen en condities van de Klei van Boom

De in onderhavige studie gebruikte naam Klei van Boom (Boomse klei) is synoniem met de in Nederland gebruikte nomenclatuur Klei van Rupel (Van Adrichem Bogaert, 1993-1997).

De Klei van Boom maakt deel uit van de aardlagenseries van het Tertiair, de geologische periode van circa 65 tot 2,5 miljoen jaar geleden (zie bijlage 1, Geologische tijdschaal). De kleiige en minder fijnkorrelige materialen van het Klei van Boom Laagpakket werden tijdens het Vroeg-Oligoceen (Rupelien, van circa 34 tot 28 miljoen jaar geleden; zie figuur 1) in het grootste deel van het bereik van het huidige Nederlandse vasteland en Noordzeegebied afgezet. Over dit verspreidingsgebied variëren de huidige diepte, de dikte en de samenstelling van de Klei van Boom sterk. Deze variaties hangen samen met ligging binnen het Noordzee Bekken waarin het materiaal werd afgezet en met verschillen in verticale bewegingen in de ondergrond binnen dit gebied tijdens en na afzetting van het laagpakket.



Figuur 1 Schematische weergave van de onderscheiden laagpakketten in de Onder- en Midden Noordzee groepen van het Tertiair, en hun variatie in de verschillende bereiken van het afzettingsgebied.

Navolgend wordt eerst een overzicht gegeven van de geologische ontwikkelingen in de regio van het afzettingsgebied die tot de huidige eigenschappen van de Klei van Boom hebben geleid. Namen van geologische tijdvakken en structurele elementen worden in respectievelijk bijlage 1 en bijlage 2 toegelicht.

3.1 Geologisch overzicht Tertiair

Aan het begin van het Tertiair kwam een eind aan de wereldwijd hoge zeespiegel tijdens het Laat-Krijt en daarmee aan de afzetting van de kalken van de in Nederland en omstreken wijdverspreide Chalk Groep. Tijdens de bijna 65 miljoen jaar van het Tertiair werden hier de diverse series zanden en kleien van de Noordzee Supergroep afgezet.

Door gebergtevormende activiteit tijdens het vroegste Tertiair (Laramische *tektonische** fase), werd de aardkorst in de regio van het huidige Nederland opgeheven en lange tijd aan *erosie** blootgesteld. In het centrale deel van Nederland werden de oude West-Nederland en Centraal-Nederland bekkens relatief sterk omhoog gedrukt. Het na miljoenen jaren resulterende erosievlak snijdt in dit deel van Nederland gesteenten aan die ouder, plaatselijk veel ouder zijn dan de gesteenten van de Chalk Groep (zie bijlage 3-a).

Na deze erosiefase ontstond tijdens het vroege Tertiair het Noordzee Bekken. Nederland was gelegen in het zuidelijk deel van dit bekken, waarvan het centrum zich ter hoogte van Schotland en Scandinavië bevond. Het erosievlak vormt de basis waarop in dit bekken de aardlagen van de Onder-Noordzee Groep zijn afgezet.

Het Noordzee Bekken bleef gedurende het gehele verdere Tertiair geleidelijk dalen en vormde afzettingsgebied voor erosiemateriaal van de omringende gebergten. De brongebieden van de diverse series zanden en kleien die in Nederland zijn afgezet waren voornamelijk de zuidelijk en zuidoostelijk gelegen structurele hogen.

Daling van het bekken ging gepaard met een, weliswaar fluctuerende maar geleidelijk steeds verder stijgende zeespiegel. Dit had, vanuit het centrale deel van het bekken gezien (verder noordelijk van Nederland), een geleidelijke uitbreiding tot gevolg van het bereik waarin kleien werden afgezet. In de randzones van het bekken, zoals in zuidelijk Nederland, werd het bereik waarin nog zandig en *siltig** materiaal werd afgezet, fluctuerend, maar geleidelijk verder naar het zuiden verlegd. In dit zuidelijk bereik wisselden tijden van dominante afzetting van zanden en kleien elkaar af.

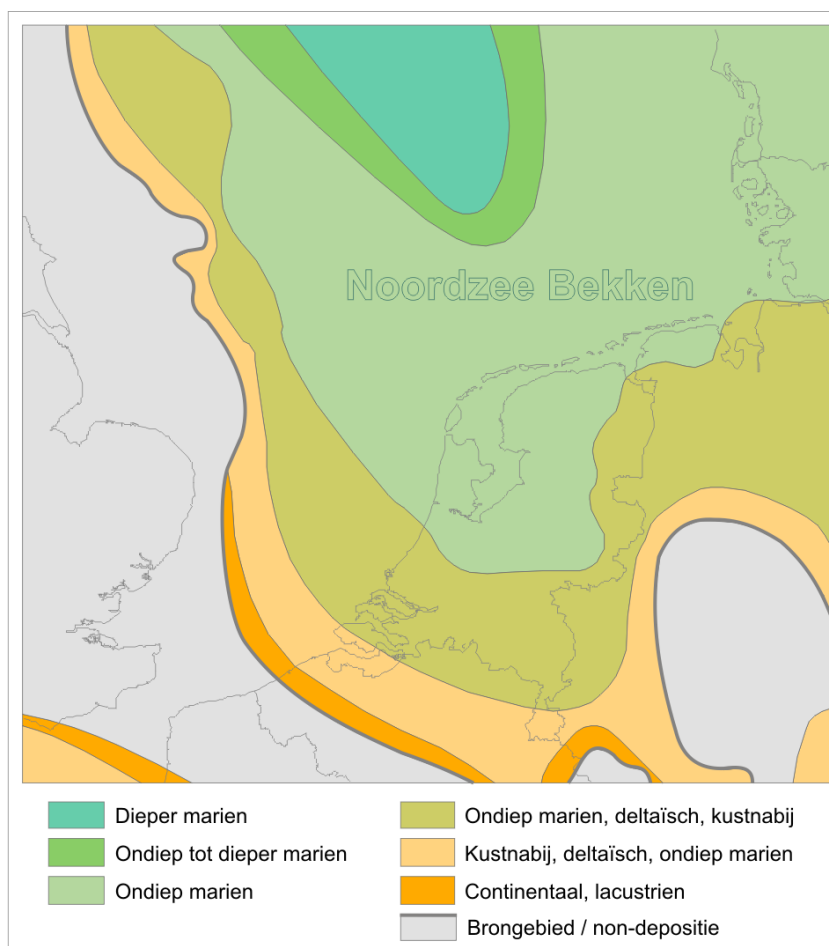
Aan het eind van het Eoceen veroorzaakte hernieuwde tektonische activiteit (Pyreneïsche fase) voor opheffing van delen van het bekken. Opnieuw vond hier gedurende lange tijd erosie van het resulterende landoppervlak plaats, waardoor afzettingen van de Onder-Noordzee Groep plaatselijk geheel zijn verwijderd. Het erosievlak vormt de basis van de tijdens het Oligoceen gevormde afzettingen (*sedimenten**) van de Midden-Noordzee Groep.

In het uiterste Zuid-Limburg wordt de basis van de Midden-Noordzee Groep gevormd door de zandrijke Tongeren Formatie. De meeste afzettingen van de groep behoren echter tot de Rupel Formatie, waarin de Klei van Boom het meest prominente laagpakket is. Zowel aan de basis als in de top van deze *formatie** zijn in het zuidelijk bereik van het bekken zanden afgezet. Deze vormen respectievelijk het Vessem Laagpakket en het Steensel Laagpakket. In de Roerdal Slenk, iets noordwaarts uitlopend tot in het Zuiderzee Diep, wordt de Rupel Formatie bedekt door afzettingen van de Veldhoven Formatie.

Tektonische activiteit aan het eind van het Oligoceen (Savische fase) veroorzaakte opnieuw voor opheffing en erosie van de sedimentenstapel in delen van het Noordzee Bekken. Het resulterende erosievlak vormt de basis van de tijdens het verdere Tertiair (en Kwartair) gevormde sedimenten van de Boven-Noordzee Groep. In deze tijd bleef de daling van het bekken achter bij de mate waarin hierin *sedimentatie** plaatsvond, zodat het Noordzee Bekken geleidelijk verder opgevuld raakte.

Gedurende het gehele Tertiair had de combinatie van daling van het bekken en fluctuatie van de zeespiegel tot gevolg, dat het bereik van de diverse afzettingmilieus in het Noordzee Bekken varieerde. Het afzettingmilieu bepaalt in hoge mate welk type afzettingen (*sedimenten**) hierin worden gevormd. Bijvoorbeeld: de zandige fractie (korrels groter dan 32 µm) van het met een riviersysteem aangevoerde erosiemateriaal, bezinkt dicht bij de rand van een bekken dan de fijnere fractie. De kleifractie (kleiner dan 2 µm) wordt het verst bekkeninwaarts meegevoerd. In een kustnabij milieu worden daarom zandige sedimenten gevormd; in ondiep *marien** bereik wordt de siltige (korrels tussen 32 en 2 µm) en kleiige fractie afgezet.

De verdeling van afzettingmilieus ten tijde van de vorming van de Klei van Boom (Vroeg-Oligoceen) is weergegeven in figuur 2 (zie ook bijlage 3-b).



Figuur 2 Globale verspreiding van afzettingmilieus tijdens de vorming van het Klei van Boom laagpakket (Oligoceen tijdvak). (Naar Ziegler, 1990; Wong, 2007.)

3.2 Ruimtelijke eigenschappen van het Klei van Boom Laagpakket

Het Klei van Boom Laagpakket is onderdeel van de Rupel Formatie. Deze formatie is tijdens het Vroeg-Oligoceen (Rupelien) in het Noordzee Bekken afgezet (zie figuren 1 en 2). In de zuidelijke randzone van het Noordzee Bekken werd in deze tijd aanvankelijk zandig materiaal afgezet; afzetting van de Klei van Boom vond gelijktijdig verder noordelijk plaats, in ondiep en dieper mariene milieus. Bij geleidelijk hogere zeespiegel vond afzetting van de Klei van Boom geleidelijk ook verder zuidwaarts plaats. Hier rust deze klei op het hier eerder gevormde zandige Laagpakket van Vessem. Evenzo is in vergelijkbaar bereik het bovenste deel van de Rupel Formatie opnieuw zandig ontwikkeld. Hier wordt de Klei van Boom afgedekt door het zandige Laagpakket van Steensel, terwijl verder noordelijk de afzetting van kleien ongestoord doorging. Genoemde zandige laagpakketten zijn in noordelijke richting, bekkeninwaarts, geleidelijk met fijnere korrelgrootte ontwikkeld en zijn hier uiteindelijk niet meer te onderscheiden van het tussenliggende Klei van Boom Laagpakket.

In navolgende paragrafen worden de horizontale verspreiding, diepteligging en dikte van de Klei van Boom beschouwd. Door combinatie van deze gegevens met de aangegeven criteria voor diepte en dikte (paragraaf 1.1) zijn deelgebieden afgebakend waarbinnen het laagpakket dieper ligt dan 500 meter en minstens 100 meter dik is.

3.2.1 Verspreiding van de Klei van Boom

De Klei van Boom is aanwezig in de ondergrond van het grootste deel van Nederland. Waar het laagpakket ontbreekt, in delen van Drenthe, Overijssel, Zuid-Holland en Groningen, is dit voornamelijk het gevolg van erosie tijdens het begin van het Mioceen (zie paragraaf 3.1). Ook heeft de geleidelijke opwaartse beweging van zoutkussens en zoutpilaren in het noorden en noordoosten van Nederland er tijdens het Tertiair voor gezorgd dat het laagpakket plaatselijk afwezig is of slechts geringe dikte heeft.

In bijlage 4-a, dieptekaart Klei van Boom, is de verspreiding van dit laagpakket in de Nederlandse ondergrond af te lezen.

3.2.2 Diepte van de Klei van Boom

De Klei van Boom bevindt zich in Nederland op dieptes die variëren van maaiveldniveau tot 1.700 meter eronder. In Zeeland en het oosten van Overijssel ligt het laagpakket aan of nabij de oppervlakte; de grootste dieptes worden bereikt in het oosten van Noord-Brabant en midden van Limburg en in de ondergrond van Flevoland. Deze gebieden liggen in het bereik van de structurele elementen van de Roerdal Slenk en het Zuiderzee Diep (zie bijlage 2-b), die ook tijdens het latere Tertiair actieve dalingsgebieden waren.

In bijna de helft van het verspreidingsgebied van de Klei van Boom bevindt dit laagpakket zich op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld. In figuur 3-a is dit gebied in groene kleur aangegeven.

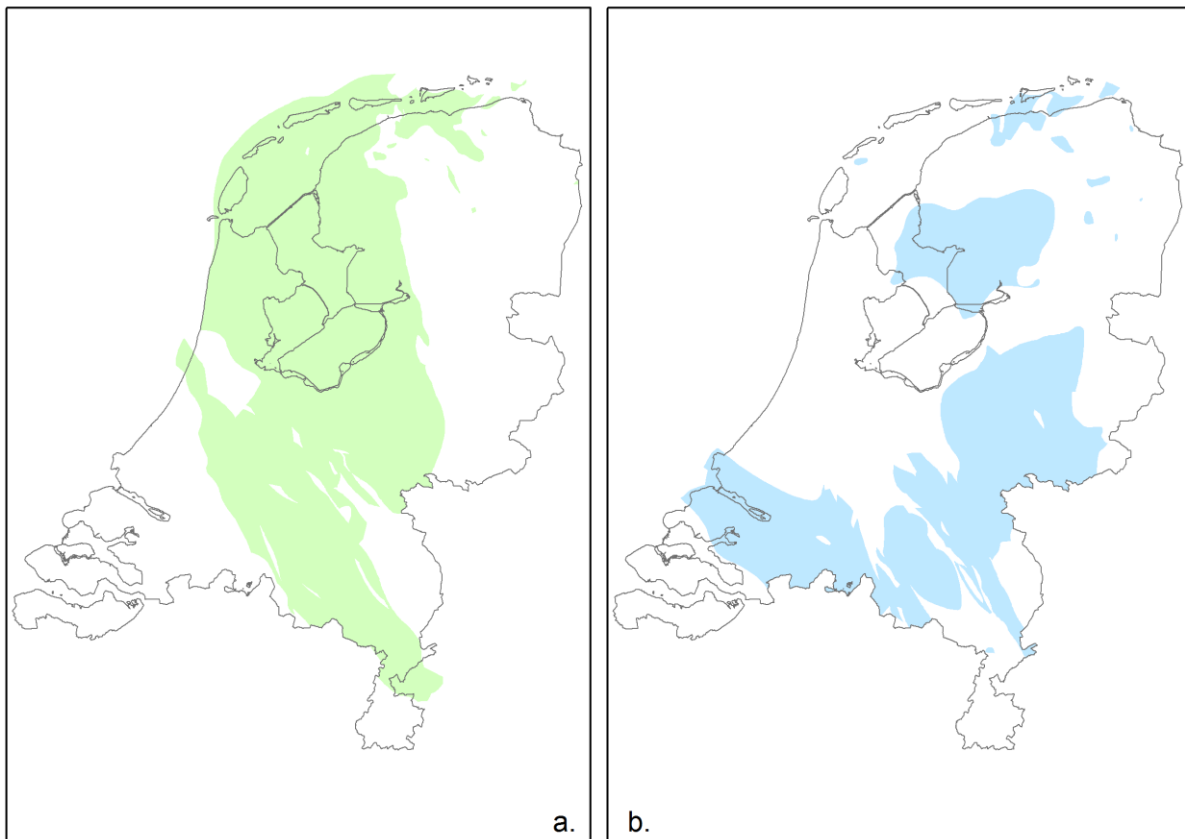
Bijlage 4-a toont de globale dieptekaart van het gehele Boom Klei Laagpakket in de ondergrond van Nederland.

3.2.3 Dikte van de Klei van Boom

De uit de beschikbare gegevens afgeleide dikte van de Klei van Boom varieert binnen Nederland van minder dan 25 tot meer dan 275 meter. Grootste diktes worden bereikt in het noorden van Groningen en Friesland, het zuidoosten van Gelderland en in delen van Noord-Brabant.

In figuur 3-b is in blauwe kleur het bereik aangegeven waar de Klei van Boom minstens 100 meter dik is.

Bijlage 4-b toont de globale diktekaart van het gehele Boom Klei Laagpakket in de ondergrond van Nederland.



Figuur 3 a. Bereik waarin de Klei van Boom op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld is gelegen.
b. Bereik waarin de Klei van Boom diktes heeft van tenminste 100 meter.

3.2.4 Combinatie van gestelde randvoorwaarden voor diepte en dikte

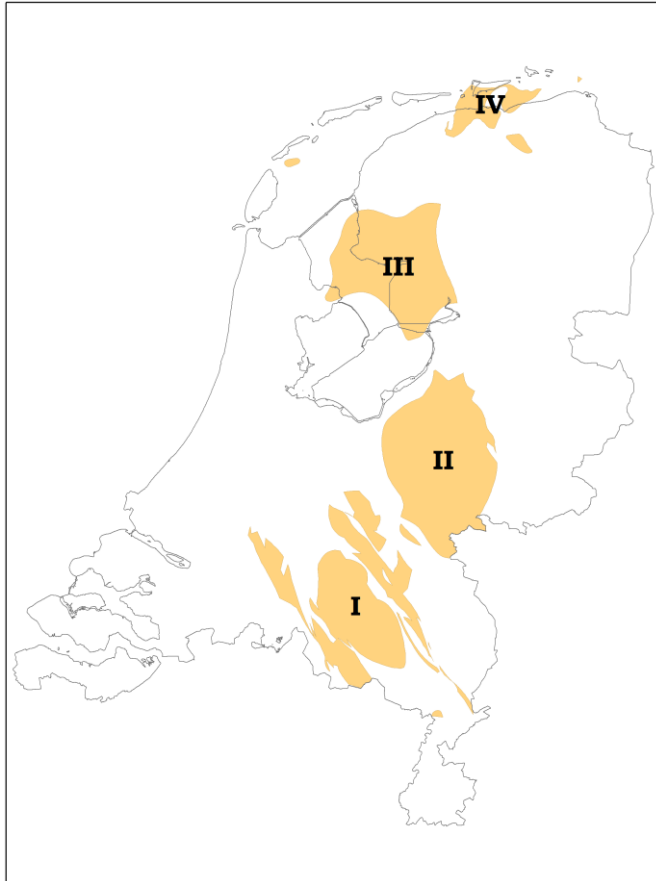
Afbakening van het ruimtelijk bereik waarbinnen de Klei van Boom voldoet aan de twee gestelde criteria (dieper dan 500 meter en dikte minstens 100 meter), resulteert in bereiken die grofweg in vier gebieden vallen (zie figuur 4):

- I Gebied met NW-ZO oriëntatie over Noord-Brabant en westelijk Gelderland; oppervlakte circa 2.200 km²;
- II N-Z gerekt gebied over centraal Gelderland; oppervlakte circa 2.400 km²;

- III Gebied dat het zuidwesten van Friesland, delen van de Noordoostpolder en het IJsselmeer en de regio Enkhuizen in Noord-Holland beslaat; oppervlakte circa 1.800 km²;
- IV Gebied in het noorden van Friesland en Groningen en aangrenzende delen van de Waddenzee; oppervlakte circa 450 km².

In bijlage 5 zijn de bereiken van deze gebieden in meer detail aanschouwelijk gemaakt.

In bijlage 6 is in een dwarsdoorsnede door elk van deze gebieden het verloop van de diepte en de dikte van de Klei van Boom aanschouwelijk gemaakt.



Figuur 4 Gebieden waarbinnen de Klei van Boom zowel op dieptes beneden 500 meter onder maaiveld ligt en diktes heeft van minstens 100 meter.

3.3 Homogeniteit van de Klei van Boom

De homogeniteit van een aardlaag wordt in sterke mate bepaald door de mate waarin binnen het afzettingsgebied condities uniform zijn of juist variëren. In het algemeen geldt dat de fijnste fractie van het erosiemateriaal dat met een riviersysteem wordt aangevoerd het verst het bekken in wordt getransporteerd en daar bezinkt (zie ook paragraaf 3.1).

Als condities binnen het afzettingsgebied (bijvoorbeeld stroomsterkte in het water, interactie van verschillende transportmedia) variëren, kunnen binnen eenzelfde bereik sedimenten van verschillende korrelgrootte naast elkaar voorkomen. Dergelijke condities variëren in een bekken in het kustnabije bereik sterker en veelvuldiger dan verder bekkeninwaarts. Ook als condities in de tijd variëren (bijvoorbeeld door fluctuaties van de zeespiegel), kan de

samenstelling van een laagpakket in laterale zin geleidelijk veranderen. In verticale richting uiten wisselende condities zich in een gelaagde opbouw van het pakket.

Samenvattend: de horizontale en verticale samenstelling en opbouw van een in een bekken afgezette aardlaag varieert in de regel sterker waar wisseling van condities meer effect hebben, oftewel: de homogeniteit van een sedimentaire aardlaag is in het bereik van kustnabije afzettingmilieus geringer dan waar deze in diepere, mariene milieus is gevormd.

In de geraadpleegde literatuur wordt gemeld dat de homogeniteit van de Klei van Boom in de Nederlandse ondergrond varieert. Meetgegevens over de laterale variatie zijn beperkt. Gemeld wordt dat de Klei van Boom in het zuidelijk bereik van het verspreidingsgebied, van west naar oost een goed vergelijkbare ontwikkeling heeft. De verticale ontwikkeling van het laagpakket vertoont in het zuidelijk verspreidingsgebied een variatie van siltige klei aan de basis naar klei in het midden en opnieuw toename van het siltgehalte naar de top van de laag. Op enkele locaties (in België, zuidelijk Nederland en de Achterhoek), waar het laagpakket in wanden kon worden bestudeerd, is op meter-schaal een afwisseling van dunne zand-, silt- en kleilaagjes waargenomen. Verder wordt gemeld dat de, in het algemeen licht *siltige** klei, verder naar het noorden in de Nederlandse ondergrond mergelig (kalkig) is ontwikkeld. Tevens wordt hier het voorkomen van lensvormige kalkconcentraties (septariën) beschreven.

Gedetailleerde gegevens over het kleigehalte van de Klei van Boom zijn alleen beschikbaar voor de onderzoekslocatie Westerschelde in zuidwest Nederland en Mol in noordelijk België. Het op deze locaties beschouwde laagpakket is gesitueerd in het zuidelijk bereik van het voormalig Noordzee Bekken. Het gemeten kleipercantage¹ van de Klei van Boom varieert van 20% tot 70%, met gemiddelden van 46% (Westerschelde) en 45% (Mol) (zie tabel 1).

Van de vier gebieden die voldoen aan de gestelde diepte- en diktecriteria is te verwachten dat het kleipercantage binnen het zuidelijk in Nederland gelegen deelgebied I vergelijkbaar is met die van de onderzoekslocaties Mol en Westerschelde. Op basis van het model van de verspreiding van de verschillende afzettingmilieus tijdens het Oligoceen (zie paragraaf 3.1 en figuur 2/bijlage 3-b), is te verwachten dat de Klei van Boom in noordelijke richting een geleidelijk hoger percentage klei bevat. In deelgebieden II, III en IV (en in deze volgorde) is daarom de Klei van Boom waarschijnlijk in toenemende mate kleilig ontwikkeld. In deze richting is tevens aannemelijk dat het laagpakket een geleidelijk meer homogene ontwikkeling zal hebben.

Locatie	Kleipercantage gemiddeld (%)	Kleipercantage bereik (%)
Westerschelde (Nederland)	46	20 – 70
Mol (België)	45	---

Tabel 1 Kleipercantage Klei van Boom, gemeten op twee onderzoekslocaties.

¹ Kleipercantage wordt bepaald uit de korrelfractie van de klei met diameter kleiner dan 0,002 mm

3.4 Waterdoorlaatbaarheid van de Klei van Boom

De waterdoorlaatbaarheid (k) van een aardlaag wordt uitgedrukt in meter per seconde (m/s). De waterdoorlaatbaarheid van een sedimentaire aardlaag is in de regel in de richting parallel met het laagvlak groter dan dwars hierop.

Gegevens van de waterdoorlaatbaarheid van de Klei van Boom in horizontale en verticale richtingen zijn alleen beschikbaar uit metingen op de onderzoekslocaties Westerschelde (Zeeland) en Mol (België). Metingen aan het kleipakket zijn gedaan op dieptes tussen 186 tot 259 meter onder maaiveld (Mol) en op 43 meter onder maaiveld (Westerschelde).

De op beide locaties gemeten waarden zijn opgenomen in tabel 2.

Locatie	Test methode	Eenheid	Horizontale doorlaatbaarheid k_h (m/s)	Verticale doorlaatbaarheid k_v (m/s)
Westerschelde (Nederland)		BK1	groter dan k_v	$6,1 \times 10^{-9}$ tot $1,0 \times 10^{-11}$
		BK2		
		BK3-I	circa $1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-8}$ tot $4,0 \times 10^{-8}$
Mol (België)	Laboratorium		$3,5 \times 10^{-12}$ tot $7,9 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-12}$ tot $3,4 \times 10^{-12}$
	In situ		$4,5 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-12}$

Tabel 2. Doorlaatbaarheid Klei van Boom, gemeten op twee onderzoekslocaties.

Door compactie van klei onder invloed van het gewicht van hierop later afgezette aardlagen, neemt de waterdoorlaatbaarheid van een kleipakket in de regel met grotere diepte af. Aangezien de Klei van Boom in de op basis van gestelde diepte- en diktecriteria afgeleide deelgebieden I t/m IV (zie paragraaf 3.2.4) op grotere dieptes ligt dan in beide onderzoekslocaties, is het aannemelijk dat het laagpakket in deze deelgebieden sterker is gecompacteerd dan op genoemde onderzoekslocaties. Gesteld kan tevens worden dat de Klei van Boom in noordelijke richting een geleidelijk hoger kleigehalte heeft (zie paragraaf 3.3), waardoor in deze richting de waterdoorlaatbaarheid ervan tevens geleidelijk verder afneemt. Aannemelijk is daarom dat de waterdoorlaatbaarheid van de Klei van Boom binnen elk van afgeleide deelgebieden kleiner zal zijn dan die van de bemonsterde kleien van onderzoekslocaties Westerschelde en Mol.

3.5 Aanpalende watervoerende laagpakketten

Een aardlaag kan op verschillende manieren in contact staan met de omgevende lagen.

In een ongestoorde *sedimentaire** opeenvolging ligt een laag met een geleidelijke overgang op de laag die hier eerder is afgezet. Een geleidelijke overgang van een onderliggende zandlaag naar een bedekkende kleilaag kan verlopen via een geleidelijk toename van de zeer fijnkorrelige fractie (silt, klei) naar boven toe, totdat uiteindelijk sprake is van klei.

In een verstoorde opeenvolging kan een laag bijvoorbeeld via een erosievlak op (veel) eerder gevormde aardlagen of gesteenten liggen (zie paragraaf 3.1). In dat geval kan bijvoorbeeld een kleilaag direct liggen op een zandlaag die 10 miljoen jaar ouder is (zie bijlage 3-a).

Verstoring van het natuurlijke contact tussen lagen kan ook in zijdelingse richting optreden. Een aardlaag kan door verticale verplaatsing langs een *breuk** (zie paragraaf 3.6), zijdelings komen te liggen tegen een laag van geheel andere samenstelling; bijvoorbeeld: een kleipakket kan via een breuk zijdelings met een zandpakket in contact staan.

De Klei van Boom is het centrale en meest wijdverspreide laagpakket van de Rupel Formatie (zie figuur 1). In het zuidelijk bereik van het Noordzee Bekken (vanuit het zuiden tot ongeveer halverwege Nederland) ligt het laagpakket op ‘ongestoorde’ wijze (*concordant*^{*}) op het hier afgezette zandige Laagpakket van Vessem. In dit bereik gaat de Klei van Boom naar boven toe ook geleidelijk over in het zandige Laagpakket van Steensel. Het laagpakket van Vessem wordt in nagenoeg de gehele Nederlandse ondergrond als eenheid onderscheiden. Voor het Laagpakket van Steensel geldt dit alleen voor het zuidelijk en oostelijk deel van Nederland. Dit laagpakket kan verder noordelijk in Nederland mogelijk ook zijn verwijderd door erosie tijdens de Savische tektonische fase aan het begin van het Mioceen.

De Rupel Formatie ligt in Zuid-Limburg concordant op de zandige Formatie van Tongeren. In de rest van de Nederlandse ondergrond ligt de formatie via een erosievlak op de Formatie van Dongen. In de regio van de Roerdal Slenk en het voormalige Zuiderzee Diep (zie bijlage 2-b) wordt de Rupel Formatie ongestoord bedekt door de Veldhoven Formatie. In de rest van Nederland ligt de formatie via het erosievlak van de Savische tektonische fase (zie paragraaf 3.1) onder de afzettingen van de Boven-Noordzee Groep.

In tabel 3 zijn de namen opgenomen van watervoerende (zandige) laagpakketten (*aquifers*^{*}) die binnen de vier afgeleide deelgebieden onder en op de Klei van Boom zijn gelegen. Deze gegevens zijn afkomstig uit 37 boringen die hiertoe voor onderhavige studie zijn bestudeerd.

Gebied	Onderliggende aquifers	Bovenliggende aquifers
I	Laagpakket van Vessem Zand van Brussel	Laagpakket van Steensel Laagpakket van Voort
II	Laagpakket van Vessem	Laagpakket van Steensel Laagpakket van Voort
III	Laagpakket van Vessem	Breda Formatie
IV	Laagpakket van Vessem **	Breda Formatie Oosterhout Formatie

Tabel 3 De onder en boven de Klei van Boom gelegen zandige laagpakketten in deelgebieden I t/m IV, zoals die door een selectie van boringen hier zijn aangetroffen.

** In deelgebied IV wordt het Laagpakket van Vessem in slechts één van de zes beschouwde boringen nog als aparte eenheid onderscheiden van de Klei van Boom.

Kenmerken van de in tabel 3 vermelde laagpakketten worden hierna kort beschreven.

Onderliggende gesteentepakketten

Het Laagpakket van Vessem bestaat uit zeer fijnkorrelige tot matig fijnkorrelige zanden. In noordelijke richting krijgt dit laagpakket een geleidelijk meer kleiige samenstelling. Het laagpakket wordt nagenoeg overal in de ondergrond van het Nederlandse vasteland aangetroffen. De in boringen vastgestelde diktes variëren van enkele meters tot maximaal 30 meter. Gezien de zandige samenstelling van dit laagpakket is het aannemelijk dat de doorlaatbaarheid van dit laagpakket aanmerkelijk groter is dan die van de Klei van Boom.

Op locaties waar het Laagpakket van Vessem niet aanwezig is (of niet meer als eenheid van de Klei van Boom is te onderscheiden), ligt de Klei van Boom op afzettingen van de Onder-Noordzee Groep. In de bestudeerde boringen is dit meestal het kleiige Laagpakket van Asse ('Dongen Klei'); in het noorden van Nederland is dit lokaal de iets oudere Mergel van Brussel

(zie figuur 1). Beide onderliggende laagpakketten worden, gezien hun kleiige samenstelling, niet gezien als watervoerende lagen.

Boven het voormalig Midden-Nederland Hoog, in het bereik van de Midden-Nederland breukzone (zie bijlage 2-b), veroorzaakte de Pyreneïsche tektonische fase aanzienlijke erosie van de voorgaand tijdens het Tertiair gevormde sedimentenstapel (zie paragraaf 3.1). Deze in dikte gereduceerde sedimentenstapel ligt hier direct op gesteenten van oudere geologische eenheden (zie bijlage 3-a). (De samenstelling van aangesneden lagen van deze oudere eenheden is in onderhavige studie niet onderzocht.)

Samenvattend: onder de Klei van Boom wordt in deelgebieden I en II het watervoerende Laagpakket van Vessem aangetroffen. Dit laagpakket is in deelgebieden III en IV slechts lokaal aanwezig/onderscheiden; verder ligt de Klei van Boom hier op het kleiige Laagpakket van Asse. Alleen in het noorden en oosten van deelgebied II wordt de Klei van Boom niet bedekt door een zandige (watervoerende) aardlaag.

Bovenliggende gesteentepakketten

Het Laagpakket van Steensel bestaat uit een afwisseling van zwak tot sterk siltige kleien met inschakelingen van dunne zandlagen. De samenstelling wordt naar boven toe geleidelijk zandiger en bestaat geheel bovenin uit fijnkorrelig zand. Dit laagpakket komt voor in de regio van de Roerdal Slenk en het zuidoosten van het Zuiderzee Diep (zie bijlage 2-b). (Binnen dit bereik valt deelgebieden I en het zuiden van gebied II.) De maximale dikte van het laagpakket bedraagt in de hiertoe voor onderhavige studie beschouwde boringen circa 20 meter. Gezien de zandige samenstelling is het aannemelijk dat de doorlaatbaarheid van het pakket groter is dan die van de Klei van Boom.

Waar het Laagpakket van Steensel ontbreekt (of mogelijk niet als afzonderlijk laagpakket is te onderscheiden), wordt de Klei van Boom bedekt door laagpakketten van de Formatie van Veldhoven. In de regio van de Roerdal Slenk en in Zuid-Limburg wordt de basis van deze formatie gevormd door het Laagpakket van Voort. Dit uit fijn zand bestaande pakket wordt als watervoerende laag aangemerkt. Het verspreidingsgebied ervan overlapt echter het bereik waarin het Laagpakket van Vessem zandig is ontwikkeld.

Verder noordwestelijk in de Roerdal Slenk en naar het noorden overlopend in het Zuiderzee Diep wordt de Rupel Formatie bedekt door de Klei van Veldhoven. De samenstelling van dit laagpakket is vergelijkbaar met die van de Klei van Boom.

Nog verder noordelijk in Nederland wordt de Klei van Boom bedekt door de Formatie van Breda. Deze formatie bestaat overwegend uit zeer fijne tot matig grof zand en lokaal ook uit zandige tot matig siltige klei. Doorlaatbaarheid van deze formatie is beduidend hoger dan die van de Klei van Boom.

Samenvattend: alleen in het noorden van deelgebied II wordt de Klei van Boom niet bedekt door een watervoerend pakket; in de overige (delen van de) afgeleide deelgebieden wordt de Klei van Boom door een of andere watervoerende aardlaag bedekt.

Naastgelegen gesteentepakketten

Onder invloed van horizontaal gerichte spanningen in de aardkorst (ten gevolge van tektonische activiteit), kunnen op kilometerschaal gesteentepakketten langs verticale vlakken breken. Indien deze spanningen rekspanningen zijn, ontstaat er in de korst extra ruimte, waarin door verticale breukvlakken begrensde gesteenteblokken geleidelijk wegzakken. De

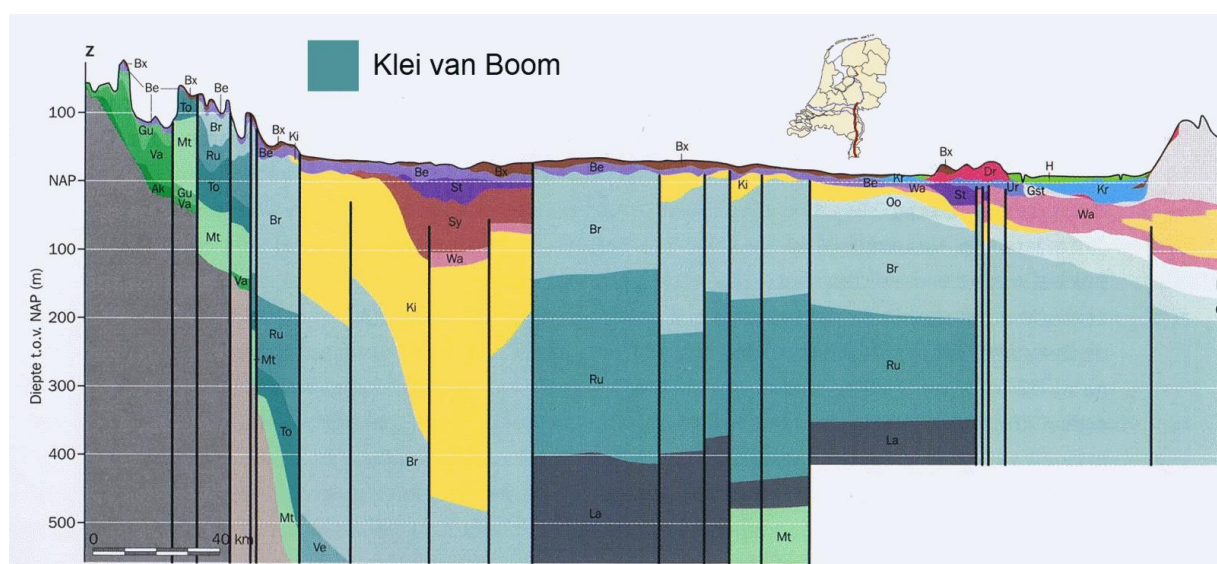
Roerdal Slenk is zo'n dalingsgebied; de breuken in dit gebied maken deel uit van een systeem dat zich over honderden kilometers tot in de Rijndal Slenk voortzet.

Beweging langs een breukvlak vindt stapsgewijs plaats (veelal slechts enige centimeters per keer); echter, over geologisch gezien langere tijd kan de totale verplaatsing aanzienlijk zijn. Blokken aan weerszijde van elke breuk kunnen hierbij in onderling verschillende mate zijn verplaatst, waardoor de horizontale *continuïteit** van laagpakketten uiteindelijk sterk kan zijn verstoord (zie figuur 5). In de Nederlandse ondergrond zijn relatieve verplaatsingen tussen aangrenzende blokken van meer dan 1000 meter vastgesteld.

In deelgebied I, in het gebied van de Roerdal Slenk, grenst de Klei van Boom via breuken zijdelings direct aan gesteentetypen waarmee dit kleipakket normaliter geen contact heeft. Deze zijdelings aanpalende gesteentepakketten kunnen (veel) ouder zijn, maar kunnen ook later zijn gevormd. In deelgebieden II, III en IV is deze situatie niet aan de orde.

Figuur 5 toont deze situatie voor de aardlagen van Tertiair ouderdom in een dwarsdoorsnede van de Roerdal Slenk in zuidoost Nederland.

Bijlage 6-a geeft een indruk van de mate waarin de continuïteit van de Klei van Boom in deelgebied I door verschuivingen langs breukvlakken is verstoord.



Figuur 5 Zuid-noord gericht geologisch profiel door zuidoost Nederland. (uit: De Mulder, 2003)

Samenvattend per deelgebied:

Deelgebied I : de Klei van Boom wordt zowel onder als boven begrensd door watervoerende pakketten (respectievelijk het Vessem en het Steensel laagpakket).

Door verticale verplaatsingen langs breuken binnen de Roerdal Slenk staat de in blokken opgedeelde Klei van Boom hier zijdelings in contact met diverse andere aardlagen.

Deelgebied II: onder de Klei van Boom wordt het Vessem Laagpakket aangetroffen. Het Steensel Laagpakket en/of het zandige Laagpakket van Voort ligt in het zuiden en zuidwesten

van dit gebied op de Klei van Boom. Verder noordelijk en oostelijk bedekt de Klei van Veldhoven het laagpakket.

Deelgebied III: onder de Klei van Boom wordt lokaal nog het Vessem Laagpakket onderscheiden. Of deze laag hier nog als watervoerend pakket fungeert is niet zeker. Waar het laagpakket niet wordt onderscheiden ligt de Klei van Boom op het kleiige Laagpakket van Asse. Op de Klei van Boom ligt hier de zandig ontwikkelde Breda Formatie.

Deelgebied IV: onder de Klei van Boom wordt lokaal nog het Vessem Laagpakket onderscheiden. Of deze laag hier nog als watervoerend pakket fungeert is niet zeker. Waar het laagpakket niet wordt onderscheiden ligt de Klei van Boom op het kleiige Laagpakket van Asse. Op de Klei van Boom ligt hier de zandig ontwikkelde Breda Formatie en lokaal de nog jongere zandige Oosterhout Formatie.

3.7 Aardbevingsrisico en breuken

Een aardbeving vindt plaats als in een verbroken deel van de aardkorst een gesteenteblok schoksgewijs wegzakt of wordt opgedrukt en daardoor langs een aanliggend gesteenteblok schuurt (zie eerder, paragraaf 3.6).

Tektonische activiteit in meerdere fasen van de geologische geschiedenis hebben in de Nederlandse ondergrond de aanwezigheid van verschillende breuksystemen veroorzaakt. Natuurlijke activiteit die aardbevingen veroorzaakt vindt momenteel alleen nog plaats langs breuken in de Roerdal Slenk (in zuidoostelijk Nederland).

Verplaatsingen van gesteentepakketten langs breuken hebben in het geologisch verleden voor structuren gezorgd waarin later gas en/of olie kan zijn ingesloten. Hoewel aan de natuurlijke activiteit langs de meeste van deze breuken inmiddels een eind is gekomen, kan winning van olie- of gasvoorkomens hier opnieuw tot bewegingen langs breuken leiden.

Bijlage 7 geeft een overzicht van breuksystemen op het niveau van de basis van het Tertiair, en gebieden waarin delfstoffen worden gewonnen.

Het aardbevingsrisico binnen de vier afgeleide deelgebieden is geïnventariseerd op basis van aardbevingen die sinds 1906 geregistreerde, in combinatie met de aanwezige breukstructuren in het gesteentepakket van de Noordzee Groep (waarvan de Klei van Boom deel uitmaakt).

Sinds 1986 wordt onderscheid gemaakt tussen aardbevingen die een natuurlijk oorzaak hebben en aardbevingen die gevolg zijn van menselijk handelen. De laatste categorie is gevolg van mijnbouw; voornamelijk van gaswinning. Over gevolgen van mijnbouw wordt nader ingegaan in paragraaf 3.8.

De meeste geregistreerde aardbevingen bevinden zich in het zuiden en midden van Limburg en in Groningen. Verder zijn bevingen geregistreerd in delen van Drenthe, Noord-Brabant en Noord-Holland.

De aardbevingen in Limburg en Noord-Brabant zijn van natuurlijke origine en houden verband met het nog altijd actieve dalingsgebied van de Roerdal Slenk.

Het middenwesten en zuiden van Nederland wordt gekenmerkt door ondiepe noordwest-zuidoost georiënteerde breuksystemen. In het noorden van Nederland zijn enkele noord-zuid georiënteerde breuksystemen aanwezig.

Uit bijlage 7 zijn gebieden af te leiden waarin het risico van aardbevingen bestaat. Locaties van geregistreerde aardbevingen zijn afgebeeld; onderscheid is hierbij gemaakt tussen natuurlijke aardbevingen en aardbevingen die door menselijk handelen zijn veroorzaakt

(geïnduceerde aardbevingen). De relatie van deze laatste met winning van delfstoffen (voornamelijk winning van olie en gas), is in deze bijlage eveneens af te lezen.

In bijlage 7 zijn verder ook de relatief ondiepe, grotere breuken aangegeven die op het niveau van de basis van het Tertiair in kaart zijn gebracht. In het gebied van de Roerdal Slenk bevinden zich in de tussende breuken in gelegen, NW-ZO georiënteerde blokken mogelijk tevens kleinere breuken. Waar aanwezig zullen deze de laterale continuïteit van de aardlagen verminderen en de stabiliteit binnen deze blokken kunnen verstoren.

In tabel 4 is voor de vier deelgebieden samengevat of er (ondiepe) breuken in voorkomen en of er sinds 1906 aardbevingen hebben plaatsgevonden, en van welk type deze waren.

Gebied	Breuken aanwezig in Noordzee Groep	Aardbevingen / oorzaak	
I	Randbreuken (van de slenk) met een groot aantal tussenliggende breuken	Tientallen	Natuurlijk
II	Enkele breuken	Enkele	Natuurlijk
III	Weinig tot geen breuken	Geen	n.v.t.
IV	Enkele breuken	Enkele	Menselijk handelen

Tabel 4 Tabel met voorkomen van breuken in Noordzee Groep en aardbevingen sinds 1906.

3.8 Mijnbouwactiviteiten

Nederland is rijk aan verschillende soorten delfstoffen in de diepe ondergrond. Tijdens de 20^e eeuw werd steenkool gewonnen in Limburg en werd (en wordt nog steeds) zout gewonnen in Overijssel. Inmiddels zijn de voor steenkoolwinning aangelegde mijnen gesloten. Vanaf halverwege de 20^e eeuw zijn veel olie- en gashoudende *reservoirs** in grote delen van Nederland in kaart gebracht en geëxploiteerd (zie bijlage 7). De bekendste vondsten zijn het Groningen gasveld en het Schoonebeek olieveld. Vastgesteld is dat exploitatie van bepaalde soorten delfstoffen in de diepe ondergrond onder bepaalde omstandigheden bodemdaling tot gevolg kan hebben. Dit kan samengaan met aardschokken (geregistreerd als aardbeving) Op bijlage 7 zijn de bereiken van gebieden weergegeven waarin mijnbouw in het verleden (steenkool) en ook nu (olie, gas, zout) plaatsvond/plaatsvindt.

In tabel 5 is per gebied aangegeven welke mijnbouwactiviteiten er hebben plaatsgevonden en/of momenteel plaatsvinden.

Gebied	Mijnbouwactiviteiten
I	Winning van olie of gas; steenkoolwinning
II	---
III	Winning van olie of gas
IV	Winning van olie of gas; zoutwinning(proefboring)

Tabel 5 Historische en actuele mijnbouwactiviteiten in de afgeleide deelgebieden.

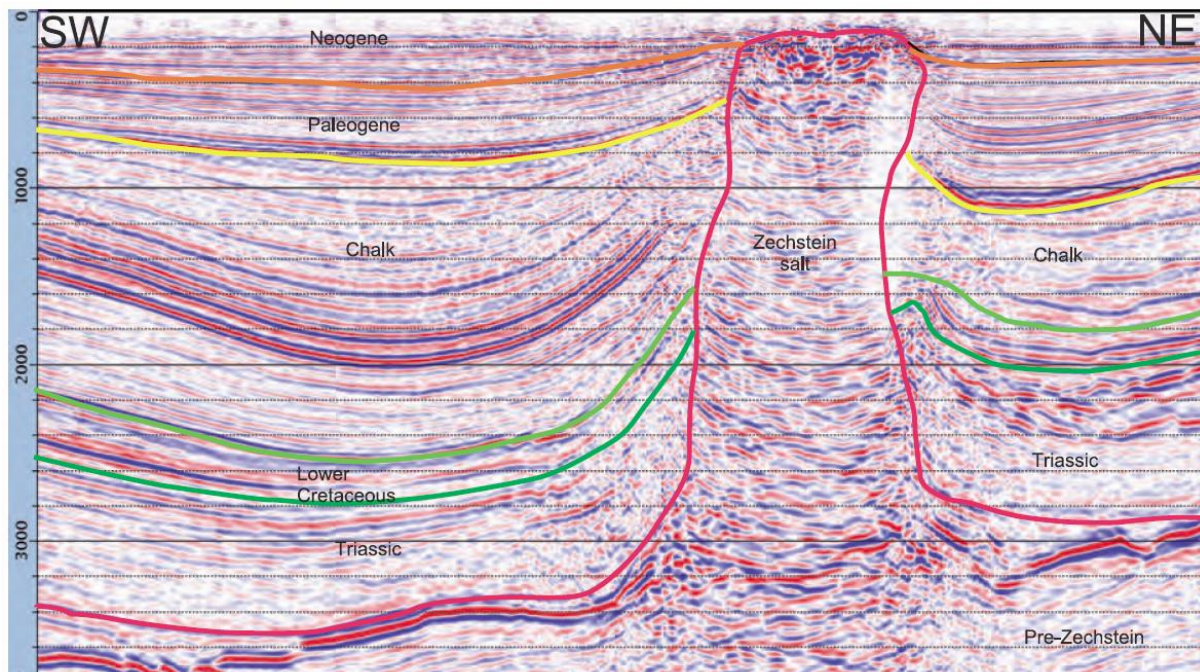
3.9 Zoutstructuren

Tijdens het Zechstein (circa 250 miljoen jaar geleden) werden in het noorden van Nederland (en verder noordelijk, in het Perm Bekken) zeer dikke lagen zout afgezet. Door diepe begraving hiervan en onder de hoge druk van het hierop in latere tijden afgezette gesteentepakket, ontstaan situaties waarin het zout als een relatief lichte, stroperige vloeistof kan vloeien (op de lange geologische tijdschaal). Waar het zout zich een weg naar de oppervlakte kan banen, wordt hier geleidelijk een zoutkussen of zoutpilaar (diapier) gevormd. Bovenliggende gesteente wordt hierbij opgeduwd. Dit kan tot gevolg hebben dat het bovenste deel van het pakket aan de oppervlakte aan erosie wordt blootgesteld. Ook kan het opwaarts bewegende zout in een bekken (zoals het Noordzee Bekken) een relatief hoog veroorzaken, waardoor ter plaatse minder of geen afzetting van materialen kan plaatsvinden. Dit effect verklaart mogelijk het dikteverloop van de Klei van Boom in deelgebied IV (zie profiel D-D' in bijlage 6).

In figuur 6 is de zoutdiapier van Zuidwending in de Nassau concessie in een *seismisch** profiel goed zichtbaar.

In bijlage 7 zijn de grotere zoutstructuren in het noorden van Nederland afgebeeld.

Vanwege de (weliswaar op grote tijdschaal plaatsvindende) opwaartse beweging van zout in zoutstructuren, wordt de directe omgeving van deze structuren als niet gunstig voor de opslag van kernafval beschouwd.



Figuur 6 Geïnterpreteerde *seismiek** met de zoutdiapier bij Zuidwending in het noorden van Nederland. Door opwaartse beweging heeft het zout zich van 3 kilometer diepte een weg gevonden tot circa 100 meter onder de oppervlakte. (Uit: Wong et al, 2007)

3.10 Aanvullende, niet-geologische condities

Op basis van de geïnventariseerde ruimtelijke eigenschappen van de Klei van Boom zijn in onderhavige studie vier deelgebieden afgebakend die voldoen aan de gestelde criteria van diepteligging en dikte. Aanvullend is de kwaliteit van de Klei van Boom nader onderzocht en zijn enkele aardkundige condities van de diepe ondergrond beschouwd die relevant zijn in verband met eventuele opslag van kernafval in deze aardlaag in deze deelgebieden.

Gezien de maatschappelijke weerstand die opslag van rest-stoffen met zich meebrengt (zoals recentelijk bleek voor geplande opslag van CO₂), is dit redelijkerwijs ook te verwachten bij de opslag van kernafval. Aanvullend op bovenvermelde informatie zijn gegevens verzameld omtrent enkele condities die in dit opzicht relevant kunnen zijn. Deze gegevens zijn in grafische vorm als bijlagen aan voorliggend rapport toegevoegd.

Bijlage 8 geeft de verspreiding van natuurgebieden weer, zoals deze in gegevens van de Rijks overheid beschikbaar zijn. Samengebracht zijn de gegevens betreffende Natura 2000, Nationale Landschappen en Beschermd Natuurgebieden. Uit deze kaart kan worden afgeleid welke bijzondere natuurgebieden binnen de vier voor de Klei van Boom afgeleide deelgebieden aanwezig zijn.

Bijlage 9 geeft een beeld van de variatie van de bevolkingsdichtheid op het niveau van wijken binnen gemeentes, op basis van gegevens zoals die door het Centraal Bureau voor de Statistiek beschikbaar zijn gesteld.

4 Conclusies en aanbevelingen

In onderhavige studie zijn de ruimtelijke gegevens over het Klei van Boom Laagpakket geïnventariseerd. Op basis van deze gegevens zijn vier deelgebieden afgebakend waarbinnen wordt voldaan aan de criteria die zijn gesteld voor de diepteligging en de dikte van dit laagpakket (zie figuur 4 en bijlage 5).

Aanvullend is een inventarisatie gedaan van beschikbare gegevens over de kwaliteit van de Klei van Boom en over diverse geologische en maatschappelijke condities die binnen de afgeleide deelgebieden relevant zijn bij de beschouwing van dit laagpakket voor de opslag van kernafval.

- Gegevens over de kwaliteit van de Klei van Boom zijn beperkt tot twee onderzoekslocaties: in Zeeland (Westerschelde) en nabij Mol (België). Op basis van het geologisch model van de verschillende afzettingmilieus waarin het laagpakket tijdens het Tertiair is gevormd (zie figuur 2 en bijlage 3-b), zijn uitspraken te doen over de variatie van de kwaliteit van het laagpakket in de Nederlandse ondergrond. Van de in het zuiden waargenomen siltige tot zelfs zandige inschakelingen binnen de kleilaag, is aannemelijk dat deze naar het noorden toe verdwijnen. Het kleigehalte neemt, naar is te verwachten, van circa 45% in het zuiden van Nederland, noordwaarts geleidelijk toe. De gemeten waterdoorlatendheid van de kleilaag varieert in verticale richting van $1,3 \times 10^{-12}$ tot $4,0 \times 10^{-8}$ meter per seconde. In horizontale richting varieert deze in de verschillende binnen het laagpakket onderscheiden zones van circa $3,5 \times 10^{-12}$ tot $1,0 \times 10^{-5}$ meter per seconde. Metingen zijn verricht aan de kleilaag die hier op relatief geringe dieptes ligt (43 meter tot 260 meter).

Op grond van de combinatie van toenemende homogeniteit en hoger kleigehalte in noordelijke richting en sterkere compactie vanwege diepere begraving, is te verwachten dat de waterdoorlaatbaarheid van het laagpakket in elk van de vier afgeleide deelgebieden kleiner is dan de in het zuiden gemeten waardes.

- Gegevens over aanpalende watervoerende aardlagen betreffen zowel onder- en bovenliggende lagen als aardlagen waarmee zijdelings contact bestaat. De Klei van Boom grenst in elk van de vier afgeleide deelgebieden, zowel aan de basis als aan de bovenzijde aan laagpakketten die in het zuiden van Nederland als watervoerende lagen worden geclassificeerd. Ook voor deze aardlagen geldt dat zowel het waterdoorlatend vermogen als de ontwikkelde dikte in noordelijke richting afnemen. In deelgebied I, in de regio van de Roerdal Slenk, wordt de ondergrond door breuken in een reeks compartiment opgedeeld. De zijdelingse continuïteit van de Klei van Boom wordt hierdoor sterk verstoord. Bovendien kan de kleilaag via de breuk zijdelings in contact staan met aardlagen met verschillende eigenschappen.
- De verder in deze studie beschouwde geologische condities die relevant zijn bij de beschouwing van de Klei van Boom voor de berging van kernafval, betreffen risico van aardbevingen, zoutstructuren en mijnbouwactiviteiten. Deze condities zijn aan de orde in het zuiden en in het noorden van Nederland, en zijn daarom vooral van toepassing op deelgebieden I en IV.

- Naast gegevens van geologische condities zijn er tevens gegevens van twee typen 'maatschappelijke condities' verzameld. Deze betreffen verspreiding van natuurgebieden en de variatie van de bevolkingsdichtheid in Nederland. Deze gegevens zijn in grafische vorm als bijlagen (8 en 9) toegevoegd. Door projectie van de begrenzingen van de vier deelgebieden, is voor elk deelgebied eenvoudig af te lezen welk(e) van deze condities hier aan de orde is.

Aanbevelingen

De bevindingen van onderhavige studie berusten in hoge mate op gegevens en informatie uit rapporten van grootschalige overzichtsstudies van de gesteenten van Tertiair ouderdom en van het Klei van Boom Laagpakket in het bijzonder. Gedetailleerde studies zijn vooralsnog slechts op twee locaties uitgevoerd in het zuidelijk bereik van het verspreidingsgebied van het laagpakket.

Als op enig moment in het kader van opslag van kernafval in de Klei van Boom (of een vergelijkbaar Tertiair kleipakket) hiervoor een gebied wordt aangewezen, is het van belang vast te stellen dat hierbij een uitgebreid onderzoeksprogramma voor het betreffende gebied wordt aangekondigd. Tevens dient te worden onderzocht of het onderzoeksprogramma alle relevante aspecten bevat om de geschiktheid vast te stellen van de betreffende aardlaag en van de geologische condities van de omgeving waarin deze laag zich bevindt. Hierbij is ondersteuning door een externe adviseur (zoals T&A Survey) aanbevelenswaardig.

5 Aansprakelijkheid

Het onderzoek waarover hier wordt gerapporteerd is op zorgvuldige wijze uitgevoerd volgens algemeen gebruikelijke inzichten en methoden.

Middels een ISO-9001:2000 en VCA** gecertificeerd kwaliteitssysteem waarborgt T&A de kwaliteit van haar diensten.

De bevindingen van de uitgevoerde studie berusten in hoge mate op gegevens en interpretaties uit rapporten van grootschalige overzichtsstudies van de gesteenten van Tertiair ouderdom en van het Klei van Boom Laagpakket in het bijzonder. Gegevens uit gedetailleerde studies zijn slechts in beperkte mate voorhanden.

Openbaarmaking van de resultaten van de studie is uitsluitend toegestaan na voorafgaande schriftelijke toestemming van T&A. T&A behoudt het auteursrecht op de resultaten van de studie en de rapportage. T&A acht zich niet aansprakelijk voor de schade die mogelijk voortvloeit uit het gebruik van haar onderzoeksresultaten.

6 Literatuur

- Huisman, D.J., De Lange, G., Weijers, J.P., Witmans-Parker, N., 1998. Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten – CAR Fase II. NITG-TNO. 167 pp.
- Mulder, E.F.J. de, Geluk, M.C., Ritsema, I.L., Westerhoff, W.E. & Wong, Th.E., 2003. De ondergrond van Nederland. Wolters-Noordhoff (Groningen): 379 pp.
- NITG, 2004. Geological atlas of the subsurface of the Netherlands – onshore. Netherlands Institute of Applied Geoscience – TNO (Utrecht): 104 pp.
- RGD intern rapport nr. OP 6009, 1984: Inventarisatie van slecht-doorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vasteland (met 25 bijlagen). 147 pp.
- Simmelink, H.J., Heidema, A.H., Hoogendoorn, A., Pagnier, H.J.M., 1996. Kartering van de slecht-doorlatende laagpakketten van Tertiaire formaties – CAR Fase I. Rijks Geologische Dienst. 24 pp.
- Van Adrichem Boogaert, H.A. and W.F.P. Kouwe (eds), 1993-1997. Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa, Mededelingen Rijks Geologische Dienst 50: p. 1-40.
- Weyns, W., 2010. Definitieve berging van hoogradioactief en/of langlevend kernafval in een kleiformatie in de Belgisch-Nederlandse grensstreek. In opdracht van Greenpeace. 21 pp.
- Wong, Th.E., Lugt, I.R., Kuhlmann, G, and Overeem, I., 2007. Tertiary. In: Geology of the Netherlands. Edited by Th.E. Wong, D.A.J. Batjes & J. de Jager. Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007: p. 151–171.
- Ziegler, P.A., 1990. Geological Atlas of Western and Central Europe (2nd. ed.). Shell Internationale Petroleum Mij, Geological Society Publishing House (Bath): 239 pp. 56 encl.

Websites

- <http://www.cbs.nl> : Centraal Bureau voor de Statistiek
- <http://www.knmi.nl/seismologie> : Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
- <http://www.minlnv.nl/natura2000> : Ministerie van LNV
- <http://www.nlog.nl> : DINOloket (van TNO Bouw en Ondergrond)

7 Verklarende woordenlijst

Aquifer	Watervoerende aardlaag.
Bekken	Gebied dat wordt gekenmerkt door sedimentatie en dat in het algemeen lager gelegen ligt ten opzichte van de omgeving.
Boorgatmetingen	Zie wireline logs.
Breuk	Een door spanning in de aardkorst gevormde vlakvormige discontinuïteit in een gesteentepakket. De gesteenten aan weerszijden van het breukvlak zijn langs dit vlak in onderling tegengestelde richtingen verplaatst.
Concordant	(betreffende het contact van een aardlaag met de erboven liggende aardlaag): natuurlijke opeenvolging, veelal met een geleidelijke mineralogische overgang van de onderste laag naar de erop liggende laag.
Continuïteit (van een reservoir)	Ruimtelijke vervolgbaarheid en aaneengeslotenheid van een reservoir in de diepe ondergrond. Discontinuïteit van het reservoir kan gevolg zijn van breuken, maar ook van beperkte verspreiding van het milieu waarin het reservoirgesteente is afgezet, of door gedeeltelijke erosie van het gesteente in een latere geologische periode.
Erosie	Natuurlijk proces van afbraak van vast gesteente aan en nabij het aardoppervlak.
Formatie	Een gesteenteserie die als eenheid wordt gedefinieerd op grond van een unieke reeks kenmerken.
Lacustrien	Het milieu van een meer betreffend.
Logs	zie <i>Wireline logs</i> .
Marien	Het milieu van een open zee betreffend.
Reservoir	Watervoerend gesteentepakket.
Sedimentatie	Afzetting van losse deeltjes gesteentemateriaal in een omgeving waarin dit langdurig aanwezig blijft en geleidelijk deel gaat uitmaken van een in dikte aangroeiende aardlaag (sediment).

Seismiek	Methode om een beeld van de structuur van de ondergrond te verkrijgen door registratie van trillingen die een traject door een gesteentepakket hebben afgelegd. Bij reflectieseismiek passeren de in een schotpunt met explosieven opgewekte trillingen de onderliggende gesteentelagen met verschillende, voor elke gesteentesoort kenmerkende snelheden. Van trillingen die terugkaatsen op reflectoren wordt de reistijd geregistreerd door een reeks aan de oppervlakte opgestelde ontvangers. Een reeks schotpunten is nodig om een beeld in een vertikaal vlak te kunnen construeren. Schotpunten worden daartoe aan de oppervlakte volgens een rechte lijn op regelmatige afstand van elkaar geplaatst.
Silt	Sediment bestaande uit korrels met grootte tussen 32 en 2 μm .
Stratigrafie	Aardkundig vakgebied dat is gericht op de beschrijving van gesteentelagen. Ook: de volgorde van gesteentelagen, zoals die door beoefenaars van het vakgebied is gedefinieerd.
Tektoniek	Krachten die de aardkorst of delen daarvan opheffen, bewegen of vervormen.