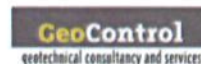


BLADWIJZER MER 'CEMENT VOOR DE TOEKOMST'

- MER**
- Samenvatting
 - Deel A
 - Deel B

- BIJLAGEN**
- Grondwaterkwel en Stabiliteit van de Groeevloer bij een Diepe Winning bij de ENCI-Maastricht Fase 1: Inventarisatie en veldverkenning, *TNO-Rapport NITG 02-098-B*
 - Hoge Resolutie Seismiek ENCI groeve, Opsporing van breuken in Carboon en Krijt *TNO-Rapport NITG 03-037-B*
 - Stabiliteit groeve Diepe Winning in de ENCI-groeve, Resultaten van geomechanische en geohydrologische modellering, *Eindrapport TNO-NITG 03-045-B*
 - Stabiliteit groeve Diepe Winning in de ENCI-groeve, *Bijlagen rapport TNO-NITG 03-045-B*
 - Ecologische gevolgen MER "Cement voor de Toekomst", *Alterra-rapport 961, ISSN 1566-7197*
 - Beschrijving geluidsaspecten van ENCI Maastricht als onderdeel van het MER diepwinning, *Cauberg-Huygen, nr. 2004.0191-1*
 - Onderzoek grondwatereffecten MER Diepe Mergelwinning ENCI, *Royal Haskoning, 9M8808*

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen

Geo-Data Acquisitie
Schoemakerstraat 97
Postbus 6012
2600 JA Delft

www.tno.nl

T 015 2696900
F 015 2564800
info@nitg.tno.nl

TNO-rapport**NITG 02-098-B****Grondwaterkwel en Stabiliteit van de Groeievloer
bij een Diepe Winning bij de ENCI-Maastricht****Fase 1: Inventarisatie en veldverkenning**

Datum	15 juli 2002
Auteur(s)	R.H.B. Rijkers, R. Bekendam, J. Buma, M. de Kleine & J. Urai
Oplage	10
Aantal pagina's	49
Aantal bijlagen	24
Opdrachtgever	ENCI Maastricht
Projectnaam	ENCI Diepe Winning Fase 1
Projectnummer	005.42036

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2002 TNO

Managementuittreksel

Titel : Grondwaterkwel en Stabiliteit van de Groevvloer bij een Diepe
Winning bij de ENCI-Maastricht
Fase 1: Inventarisatie en veldverkenning

Auteur(s) : R.H.B. Rijkers, R. Bekendam, J. Burna, M. de Kleine & J. Urai

Datum : Juli 2002

Opdrachtnr. : 005.42036

Rapportnr. : NITG 02-098-B

Samenvatting

Dit rapport is het resultaat van een inventarisatie van geologische, geohydrologische en geomechanische gegevens van grondlagen in de ENCI-groevevloer. De gegevens zijn noodzakelijk om de stabiliteit van de groeievloer te analyseren wanneer de groeievloer in de Diepe Winning wordt afgegraven naar grotere diepte.

- Op basis van de inventarisatie van gegevens over de grondlagen en de situatie van de ondergrond in de ENCI-groeve bestaat er een concrete kans op opbarsten van de groeievloer als gevolg van een verdiepte afgraving.
- De kans op opbarsten van de groeievloer gedurende afgraving naar grotere diepten kan niet worden gekwantificeerd zonder aanvullende gegevens.
- Op de berekeningen van stabiliteit en de kansbepaling op openbarsten uit te kunnen voeren zijn verkennende boringen noodzakelijk om grondmonsters te verzamelen en speciale metingen te kunnen doen.
- Verkenning van breukstructuren in de huidige groeievloer heeft de hoogste prioriteit binnen het lopende onderzoek naar de stabiliteit van de groeievloer.

In de groeievloer worden drie geologische formaties aangetroffen:

- (1) Formatie van Vaals (Krijt) bestaat uit witte, kalkhoudende en siltige KLEI
- (2) Formatie van Gulpen (Krijt) bestaat uit witte en lichtgrijze KALKSTEEN met zandige/siltige glauconiethoudende lagen met vuursteenknollen (silex) in de top.
- (3) Formatie van Zeeland (Onder-Carboon) bestaat uit licht grijze KLEISTEEN met gebankte carbonaten en gelaagde vuursteen.

Na interpretatie van bestaand seismische en geologische boringen wordt geconcludeerd dat de top Carboon in de ENCI-groeve zich tussen NAP -50 en -70 m, een onregelmatig vlak is en licht naar het noordwesten helt.

De dikte van de Formatie van Vaals in de ENCI-groeve bedraagt ca. 28 m. De top van de Formatie van Vaals is bekend uit de boringen en verloopt binnen de huidige concessie van de ENCI tussen ca. NAP -37 m en -50 m. Deze variatie in diepteligging kan het gevolg zijn van breukwerking.

De informatie over de lithologische ontwikkeling van de Krijt-formaties in de Diepe Winning is voldoende. De lithologische informatie van het Onder-Carboon is daarentegen onvoldoende, maar zal worden aangevuld met de geplande boringen en projectfase 2.

Geomechanische rekenparameters van alle lagen (sterkte, elasticiteit, grondspanningen) zijn onvoldoende bekend om betrouwbare berekeningen van de stabiliteit van de groeievloer uit te voeren.

Beschikbare grondwatergegevens wijzen op brak grondwater in de Formatie van Zeeland (Carboon). De grondwaterkwaliteit in de Formatie van Vaals in de ENCI-groeve is onvoldoende bekend. Monsternamen en onderzoek van grondwater uit het Carboon en de Formatie van Vaals is gepland in de volgende projectfase.

De huidige kennis van doorlatendheid van de gesteentemassa van alle formaties is onvoldoende voor het de berekeningen van grondwaterkwel. Hiervoor is speciale aandacht vereist binnen de uitvoering en planning van veldwerk.

De beschikbare informatie is aangevuld met een veldonderzoek en analyse van breuken. In de ENCI-groeve is een structureel-geologische opname gemaakt van de belangrijkste breuken. De gegevens zijn volgens de moderne inzichten van de structurele geologie verwerkt en geïnterpreteerd. Dit heeft geresulteerd in een aantal mogelijke scenario's wat betreft de geometrie en voortzetting van de aan het oppervlak waargenomen breukpatronen in de ondergrond:

- (1) Ondiepe Breuk- breuken in de groeievloer bereiken de top van de Formatie van Vaals, maar continueren zich nauwelijks dieper,
- (2) Diepe Breuk – breuken in de groeievloer zijn aanwezig in de Formatie van Vaals en continueren zich in het Carboon,
- (3) Ontkoppelde Diepe Breuk – breuken zijn aanwezig in de Formatie van Gulpen en de het Carboon en worden verzet door het plastische gedrag van de Formatie van Vaals.

De waargenomen breuken in de huidige diepe winning zijn alle afschuivingen en worden met horizontale rek geassocieerd. De verspringingen van de vrijwel horizontale lagen laten duidelijk het verticaal verzet langs de breuken zien. Dit verzet varieert van minder dan 5 tot meer dan 3 m. De beschrijving van drie scenario's over het mogelijke verloop van breuken onder de groeievloer zijn opgenomen in dit rapport. De kennis over het voorkomen en diepteligging van breuken in de groeievloer is onvoldoende. Hierdoor is aanvullend seismisch onderzoek in de ENCI-groeve noodzakelijk.

Inhoudsopgave

Samenvatting — ii

Lijst van tabellen en figuren — vi

1	Inleiding — 1
1.1	Diepe Winning ENCI — 1
1.2	M.E.R.-procedure — 1
1.3	Grondwaterkwel en stabiliteit van groevevloer ENCI-groeve — 1
1.4	Voorstudie "Fase 1: Inventarisatie en veldverkenning" — 2
1.5	Doelstelling Fase 1 — 4
1.6	Activiteiten Fase 1 — 4
1.7	Rapportage — 5
2	Inventarisatie geologische informatie — 7
2.1	Regionale geologie — 7
2.2	Beschikbare boringen — 7
2.3	Beschrijving lithostratigrafie — 8
2.3.1	Formatie van Zeeland (Dinantien; Onder-Carboon) — 8
2.3.2	Formatie van Vaals (Boven-Krijt) — 10
2.3.3	Formatie van Gulpen (Boven-Krijt) — 10
2.3.4	Formatie van Maastricht (Boven-Krijt) — 11
3	Inventarisatie geohydrologische informatie — 13
3.1	Inleiding geohydrologie — 13
3.2	Lokale geohydrologische eenheden — 16
3.3	Beschikbare peilingen — 18
3.3.1	Stijghoogten — 18
3.3.2	Grondwaterkwaliteit — 20
3.3.3	Bemalingswater ENCI-groeve — 22
3.3.4	Totaalbeeld grondwaterkwaliteit — 23
3.4	Doorlatendheden — 24
3.4.1	Formatie van Zeeland (Dinantien; Onder-Carboon) — 24
3.4.2	Formatie van Vaals (Boven-Krijt) — 24
3.4.3	Formatie van Gulpen (Boven-Krijt) — 24
3.4.4	Geohydrologische veldproeven — 24
4	Breuken in en onder de groevevloer van de ENCI-groeve — 27
4.1	Werkmethode — 27
4.2	Structureel-geologische eenheden in Zuid-Limburg — 27
4.2.1	Tektonische geschiedenis van de regio — 27
4.3	Resultaten van interpretatie van beschikbare seismische lijnen — 30
4.4	Structureel-geologische veldopname in de ENCI-groeve — 30
4.4.1	Waarnemingen in de groeve — 31
4.4.2	Vergelijking met bestaande informatie over breuken in de ENCI-groeve. — 32
4.4.3	Verplaatsingsgradiënten — 32
4.4.4	Gemetten verplaatsingen en verplaatsingsgradiënten — 33
4.4.5	Mogelijk verloop van breuken in de groevevloer — 36
4.5	Aardbevingen in de regio — 36

5	Inventarisatie geomechanische informatie — 39
5.1	Inleiding — 39
5.2	Geomechanische eigenschappen — 39
5.3	Spreiding en anisotropie — 41
6	Beschikbare gegevens en inschatting stabiliteit groeievloer — 43
6.1	Diepteligging Onder-Carboon en F. van Vaals — 43
6.2	Grondwaterkwaliteit en doorlatendheid — 43
6.3	Stijghoogte — 43
6.4	Grondwaterkwel — 43
6.5	Breuken in de groeievloer — 44
6.6	Beschikbaarheid informatie en inschatting stabiliteit groeievloer — 44
7	Eindconclusies — 47
8	Aanbevelingen vervolgonderzoek — 49
9	Literatuur — 51

Bijlage(n)

A A.1 Top F. van Zeeland (Carboon) en peilbuizen in Carboon (1:25.000)

B B.1 Geohydrologisch dwarsprofiel B-B'

C C.1 Plattegrond ENCI-groeve met locaties van C-bijlagen

Bijlage A.1 Top F. van Zeeland (Carboon) en peilbuizen in Carboon (1:25.000)

Bijlage A.2 Top F. van Vaals (Krijt) en peilbuizen in Krijt (1:25.000)

Bijlage A.3 Detailkaart breuken en top F. van Vaals (1:10.000)

Bijlage A.4 Aardbevingen in de regio ENCI (1:250.000)

Bijlage B.1 Geohydrologisch dwarsprofiel BB'

Bijlage B.2 Geohydrologisch dwarsprofiel Profiel CC'

Bijlage B.3 Technische gegevens en tijdreeksen van de geraadpleegde peilbuizen

Bijlage C.1 Plattegrond ENCI-groeve met locaties van figuren en profiellijnen

Bijlage C.2 Profiel oostwand diepe ontgraving- noord

Bijlage C.3 Profiel oostwand diepe ontgraving-midden

Bijlage C.4 Profiel oostwand diepe ontgraving-zuid

Bijlage C.5 Profiel westwand diepe ontgraving-zuid

Bijlage C.6 Profiel westwand diepe ontgraving-zuid/centraal

Bijlage C.7 Profiel westwand diepe ontgraving-noord/centraal

Bijlage C.8 Profiel westwand diepe ontgraving-noord

Bijlage C.9 Afstand-verplaatsingsdiagram van breuken in de oostwand (1)

Bijlage C.10 Afstand-verplaatsingsdiagram van breuken in de oostwand (2)

Bijlage C.11 Afstand-verplaatsingsdiagram van breuken in de westwand (1)

Bijlage C.12 Afstand-verplaatsingsdiagram van breuken in de westwand (2)

Bijlage C.13 Overzichtsdiagram afstand-verplaatsing

Bijlage C.14 NNO-ZZW overzichtsdiagram

Bijlage C.15 Scenario 1

Bijlage C.16 Scenario 2

Bijlage C.17 Scenario 3

Lijst van tabellen en figuren

Tabellen

- Tabel 2.1** *Boringen met gegevens over diepteligging van de top van F. Van Zeeland (Carboon) en van de F. van Vaals in de directe omgeving van de ENCI — 6*
- Tabel 3.1** *Stijghoogten in Carboon in (de directe omgeving) van de ENCI-groeve — 17*
- Tabel 3.2** *Afstand van meetpunt tot de ENCI-groeve en type meetgegevens — 17*
- Tabel 3.3** *Stijghoogte in Formatie van Gulpen en Maastricht in (de directe omgeving) van de ENCI-groeve — 18*
- Tabel 3.4** *Kwaliteit van grondwater in het Onder-Carboon — 20*
- Tabel 3.5** *Mediane concentraties van de ionen en elektrisch geleidingsvermogen — 20*
- Tabel 3.6** *Kwaliteit van grondwater in F. van Gulpen en Maastricht — 21*
- Tabel 3.7** *Kwaliteit van pompwater in de ENCI-groeve — 22*
- Tabel 3.8** *Overzicht grondwaterkwaliteit omgeving ENCI — 22*
- Tabel 5.1** *Resultaten van geomechanische testen van monsters van de F. van Maastricht en Gulpen (TU-Delft, 1983) — 37*
- Tabel 5.2** *Resultaten van geomechanische testen van monsters van de F. van Maastricht (Lap et al. 1987) — 38*
- Tabel 5.3** *Resultaten van geomechanische testen van monsters uit de Sibber-groeve (Bekendam, 1998) — 39*
- Tabel 5.4** *Resultaten van treksterkte, uni-axiale en triaxiale sterkte (Bekendam, 1998) — 40*
- Tabel 6.1** *Overzicht beschikbare gegevenstypen — 44*

Figuren

- Figuur 1.1** *Schematische weergave van de groeve voor en na diepe winning naar NAP -35 m — 3*
- Figuur 2.1** *Geologische kaart van de ENCI-groeve en directe omgeving (RGD, 1988) — 8*
- Figuur 3.1** *Locaties van geohydrologische profielen B-B' en C-C' (Bijlage B1 en B2) — 13*
- Figuur 4.1** *Kaart van de regionale structureel-geologische eenheden in Zuid-Limburg en de locatie van de ENCI-groeve (TNO-NITG, 1999) — 27*
- Figuur 4.2** *Afgedekte geologische kaart van de bovenkant van het pre-Perm (TNO-NITG, 1999). In het gebied van de ENCI-groeve zijn direct onder de Krijtlagen de Zeeland Formatie (Dinantien) aanwezig. Op deze kaarten staan tevens breuken aangegeven die aanwezig zijn in de Carboon-lagen van Zuid-Limburg — 28*
- Figuur 4.3** *Breuksystemen zoals zichtbaar in de diepe ontgraving in de ENCI-groeve — 33*
- Figuur 4.4** *Verkleuringen langs breuken in de ENCI-groeve — 33*
- Figuur 4.5** *Oostwand diepe ontgraving gezien vanaf het noorden — 34*
- Figuur 4.6** *Bodem en westwand huidige diepe ontgraving — 34*
- Figuur 5.1** *Relatie ongesteunde druksterkte (UCS) en Young's modulus E — 38*

1 Inleiding

1.1 Diepe Winning ENCI

De huidige ontgrondingsvergunning van de ENCI is toereikend om tot ca. 2030 kalksteen te winnen binnen het vergunde concessiegebied. Voor de langere termijn is de huidige ontgrondingsvergunning niet toereikend. Om deze reden wil de ENCI de kalksteen die binnen het concessiegebied in de diepte nog aanwezig is ontgraven tot beneden de in de huidige vergunning toegestane diepte.

Dit is mogelijk door uitbreiding van de winning tot beneden de huidige dieptelimiet van NAP +5 m. Hiermee kan de winning binnen het concessiegebied gecontinueerd worden tot ca. het jaar 2050. De voorgenomen verdieping binnen het vergunde concessiegebied behelst een omvang van circa 20 miljoen m³.

1.2 M.E.R.-procedure

De schaal van de voorgenomen diepe winning ter plaatse van de ENCI-groeve maakt dat de ENCI hiervoor MER-plichtig is. Op 27 februari 2001 heeft de "Werkgroep M.E.R". Diepe Winning Kalksteen ENCI-Maastricht" van de Commissie voor de Milieu-effectrapportage op verzoek van het College van Gedeputeerde Staten van Limburg een advies voor richtlijnen voor een milieu-effectrapport ten behoeve van de besluitvorming over de diepe winning door ENCI-Maastricht B.V. doen verschijnen. Dit advies ligt ten grondslag aan het Besluit van Gedeputeerde Staten van Limburg betreffende "Richtlijnen ENCI-Maastricht B.V. Diepe Winning" van 3 april 2001.

Eén van de aandachtspunten die in het advies van de Commissie M.E.R. wordt genoemd betreft de mogelijke kwel van zout, zwavelrijk water vanuit het dieper gelegen Carboon bij een voorgenomen diepe winning. Door de hoge spanning waaronder dit water staat kan bij een diepe winning sprake zijn van een mogelijk 'opbarsten' van de groeievloer. Dit zou tot gevolg kunnen hebben dat er langs zwaktezones in het gesteente, zoals breuken, een verhoogde kwel van mogelijk warm water met een zoute, zwavelrijke samenstelling uit het Carboon optreedt.

1.3 Grondwaterkwel en stabiliteit van groeievloer ENCI-groeve

In dit rapport wordt uitgegaan van een 'Diepe Winning' bij de ENCI die conform de volgende scenario's plaats zal vinden (*Fig. 1.1*):

- exploitatie van de kalksteen tot een niveau van NAP –10 m,
- exploitatie tot aan ongeveer NAP –20 m,
- exploitatie tot aan ongeveer NAP –35 m.

Bij aanvang van dit project was bekend dat de ondergrond ter plaatse van de groeve en vanaf de huidige vergunningsdiepte van NAP +5 m, globaal de volgende geologische opbouw kent (*Fig. 1.1*):

- vanaf NAP +5 m tot ongeveer NAP –40 m bevindt zich de Formatie van Gulpen, bestaande uit kalksteen en stratigrafisch behorend tot het Boven-Krijt
- vanaf ongeveer NAP –40 m tot ongeveer NAP –65 m bevindt zich de Formatie van Vaals, bestaande uit glauconiethoudend zand
- vanaf ongeveer NAP –65 m bevindt zich de Formatie van Zeeland, bestaand uit kalksteen en behorend tot het Onder-Carboon.

Het grondwater in de Formatie van Zeeland (hierna te noemen 'Carboon') heeft ter plaatse van de groeve een stijghoogte van ongeveer NAP +50 m. Hierdoor wordt een druk uitgeoefend aan de onderkant van de Formatie van Vaals die naar boven gericht is en kan resulteren in een kwelstroom. De Formatie van Vaals wordt als slecht-waterdoorlatend beschouwd. Bij het verwijderen van de bovenliggende kalksteen bestaat de mogelijkheid dat de kwelstroom naar de groeve toeneemt.

Door het ontgraven van de kalk kan tevens een dusdanige verlaging van gronddruk optreden dat er gevaar bestaat voor 'opbarsten' van de groeievloer en bestaande of nieuwe breuken in het gesteentemassief meer waterdoorlatend worden. Hierdoor bestaat het risico dat er een significante kwelstroom van het grondwater vanuit het 'Carboon' naar de groeve plaats vindt. Gegeven de kwaliteit van dit kwelwater, dat mogelijk een significant hogere temperatuur, zoutconcentratie en zwavelconcentratie heeft, bestaat er een risico dat bij verlating van de groeve, op de lange termijn zich een meer in de groeve vormt dat niet voldoet aan de vereisten voor een verantwoord watermilieu. Daarnaast kan tijdens uitvoering van de 'Diepe Winning' door een toename in kwelwater vanuit het 'Carboon' een situatie ontstaan waarbij er een significant grotere hoeveelheid water geloosd moet worden teneinde de groeievloer droog te houden (*Fig. 1.1*).

Bovenstaande houdt in dat de centrale vraag van dit project gelegen is in het voorspellen van de hoeveelheid kwelwater die vanuit het 'Carboon' de groeievloer bereikt alsmede van de kwaliteit van het kwelwater, gegeven de drie scenario's voor 'Diepe Winning'. Een afgeleide van deze vraag is gelegen in het vaststellen van de kans van 'opbarsten' van de groeievloer en de stabiliteit van de groevellingen gegeven de drie scenario's voor 'Diepe Winning'. Indien de groeievloer opbarst zal immers bekend moeten zijn wat voor consequenties dit heeft voor de hoeveelheid kwelwater vanuit het 'Carboon' die onder die omstandigheid de groeve bereikt. In het verlengde van deze vragen ligt de vraag naar mogelijke maatregelen die getroffen zouden kunnen worden om 'openbarsten' van de groeievloer te voorkomen en de toestroom van kwelwater vanuit het 'Carboon' te minimaliseren (*Fig. 1.1*).

1.4 Voorstudie "Fase 1: Inventarisatie en veldverkenning"

Door ENCI is aan TNO-NITG, bij brief van 13 februari 2002, en aan GeoControl gevraagd offerte op te stellen voor het uitvoeren van een risico-analyse samenhangend met de in de Richtlijnen van de Provincie voor de op te stellen MER voor de Diepe Winning genoemde problemen betreffende de mogelijke kwel van grondwater uit het Carboon en de mogelijkheid van instabiliteit van de groeievloer en –helling na exploitatie tot een dieper niveau.

In projectplan NITG 02-10.142 is een werkmethode voorgesteld om de grondwatertoestroming en stabiliteit van groeievloer en –wand te bestuderen. Dit projectplan bestaat uit vijf projectfasen:

Fase 1: Geologische inventarisatie en veldverkenning

Fase 2: Proefboring, monsternamen, laboratoriumanalyses, grondlagenmodel met rekenparameters

Fase 3: Geomechanische modellering stabiliteit groeievloer en groevewand

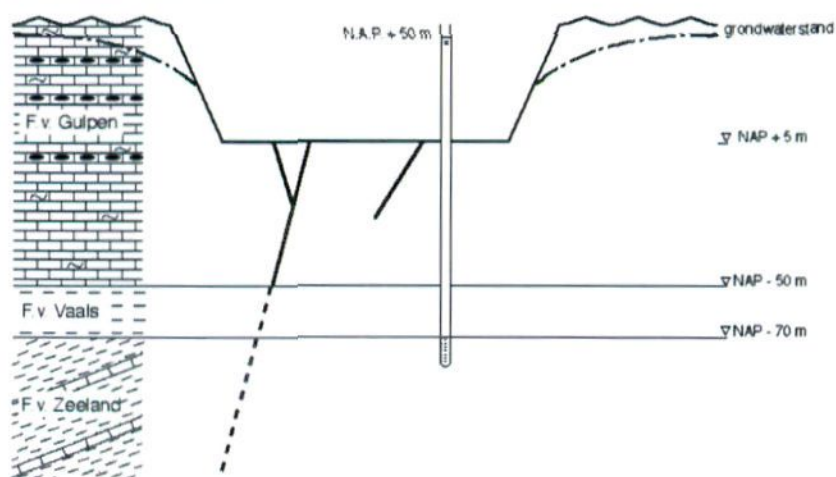
Fase 4: Hydrogeologische modellering kwantiteit en kwaliteit kwelwater

Fase 5: Eindrapportage van projectactiviteiten

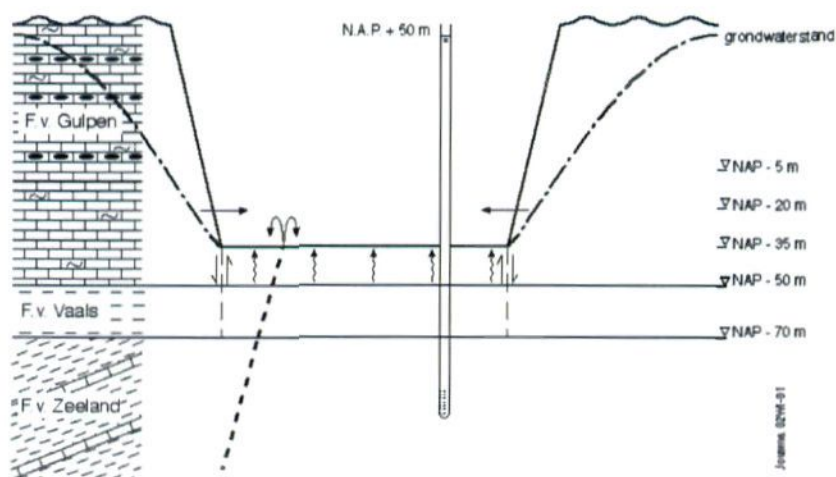
Fase 6: Mitigerende maatregelen

In mei 2002 is door ENCI de opdracht gegeven aan TNO om Fase 1 uit te voeren. Deze rapportage is daar het resultaat van.

Beginsituatie (+ 5 m NAP)



Eindsituatie (afgraving - 35 m NAP)



Figuur 1.1 Schematische weergave van de groeve voor en na diepe winning naar NAP -35 m

1.5 Doelstelling Fase 1

Voor deze projectfase zijn twee doelstellingen gedefinieerd:

- het onderzoeken, interpreteren en rapporteren van beschikbare geologische, hydrogeologische en geomechanische gegevens die relevant zijn voor de problematiek. De expliciete aandacht ligt dan op de Formatie van Gulpen, de Formatie van Vaals en de Onder-Carboon kalken die aanwezig zijn direct onder de Formatie van Vaals (onder de ENCI-groeve).
- het uitvoeren van veldwerk om noodzakelijke en aanvullende gegevens te verkrijgen over de breuken die aanwezig zijn in de ENCI groeve, lithologische ontwikkeling, geomechanische en hydrogeologische eigenschappen van het gesteente.

1.6 Activiteiten Fase 1

Activiteit 1.1 Inventarisatie bestaande geologische, geohydrologische en geomechanische informatie

In deze activiteit worden de voor dit onderzoek bestaande geologische, hydrogeologische en geomechanische gegevens verzameld en gecompileerd. Er zal daarvoor o.a. gebruik worden gemaakt van de volgende typen gegevens en archieven:

- Beschikbare boringen uit de TNO-NITG database (DINO) geologische kartering van ondiepe kalkstenen van de Krijtkalk (kaartbladen, publicaties en boringen via TNO-NITG, ing. W. Felder en ENCI) bestaande breukenkaarten en kennis van structurele ontwikkeling van breuken en spanningspaden geologische kartering van diepe geologische lagen van het Carboon.
- Bestaande diepe en ondiepe seismische profielen in de directe omgeving van de ENCI-groeve.
- Gegevens over het geomechanische gedrag en karakteristieken van de Formatie van Vaals (en Formatie van Gulpen en Zeeland Formatie via ENCI en GeoControl).
- Gegevens over de kwaliteit van het grondwater, waterdoorlatendheid van de aquifers/aquicludes¹ en stijghoogtes (waterdruk) worden verzameld en gecompileerd aan de hand van de TNO-NITG database (DINO-REGIS), beschikbare TNO-NITG-studies en karteringen en bestaande geohydrologische informatie van de ENCI-groeve.

Het resultaat van deze activiteit is een overzicht van bestaande en beschikbare relevante geologische, hydrogeologische en geomechanische informatie aan de hand waarvan een eerste conceptueel hydrogeologisch en geomechanisch model van de groeve opgesteld is. Tevens is vastgesteld welke informatie ontbreekt en hoe de veldverkenning en een boring uitgevoerd moeten worden om aan deze informatievraag te voldoen.

Activiteit 1.2 Geologische, hydrogeologische en geomechanische verkenning

Op grond van de uitkomsten van Activiteit 1.1 is de veldopname gepland. Door middel van een moderne structureel- geologische analyse is onderzocht in welke mate het de breuksystemen die in de kalksteen gekarteerd zijn ook aanwezig zijn in het "Carboon"

¹ Aquifer = goed-waterdoorlatende laag; Aquiclude = slecht waterdoorlatende laag

en of deze in de Formatie van Vaals doorlopen. Daarnaast is in combinatie met de beschikbare gegevens worden verkend hoe de geomechanische eigenschappen variëren.

1.7 Rapportage

In Hoofdstuk 2, 3 en 5 worden de resultaten van de inventarisatie van beschikbare geologische, geohydrologische en geomechanische gegevens van de Boven-Krijt en Onder-Carboon sedimenten gerapporteerd. In deze hoofdstukken worden de gesteenten beschreven zoals deze specifiek in de ENCI-groeve en in de regio zijn aangetroffen.

In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van de analyse van breuken in en onder de groeievloer gerapporteerd.

In hoofdstuk 6 wordt de betekenis van de bevindingen uit voorgaande hoofdstukken voor de verwachte stabiliteit van de groeievloer, grondwater en stabiliteit gedaan. In dit hoofdstuk wordt aangegeven over welke onderwerpen er voldoende en over welke onderwerpen onvoldoende informatie beschikbaar is.

In Hoofdstuk 7 wordt advies gegeven over specificaties van de plaats en uitvoering van de proefboringen, alsmede over de waarde van seismische methoden om breukzones te lokaliseren.

2 Inventarisatie geologische informatie

2.1 Regionale geologie

De geologische kaart van de ENCI en directe omgeving staat in *Fig. 2.1* aangegeven. Het kaartbeeld van de omgeving van de ENCI-groef wordt overheerst door recente afzettingen van de Maas en Pleistocene löss-afzettingen ten westen oosten van de groef. In de ENCI-groef zelf dagzoomt de F. van Gulpen en de F. van Maastricht (*Fig. 2.1*).

De Formatie van Vaals die zich tussen het Onder-Carboon (Formatie van Zeeland) en de Formatie van Gulpen bevindt, is in het studiegebied niet ontsloten. De geomechanische en geohydrologische eigenschappen worden als essentieel beschouwd voor de stabiliteit van de toekomstige groeievloer.

De Onder-Carboon afzettingen die zich onder de Formatie van Vaals in de ENCI-groef bevinden zijn ook niet in de directe omgeving van de ENCI-groef ontsloten, maar slechts bekend uit geologische boringen en ontsluitingen in België.

2.2 Beschikbare boringen

Voor deze studie zijn geologische boringen gebruikt om de diepte van de top van de F. Van Zeeland en van de F. van Vaals te karteren (*Tabel 2.1*).

De boringen die informatie bevatten over het Carboon staan weergegeven in *Bijlage A.1*. De boringen die informatie bevatten over het Krijt staan weergegeven in *Bijlage A.2*.

Tabel 2.1 Boringen met gegevens over diepteligging van de top van F. Van Zeeland (Carboon) en van de F. van Vaals in de directe omgeving van de ENCI

boring	diepteligging Top F. van Zeeland [m NAP]	diepteligging Top F. van Vaals [m NAP]
61F0294 (Heugem-1a)	-66,95	-34,45
61F0080	-70,15	-36,60
61F0296 (Kastanjelaan-02)	-153,20	-101,70
61F0322	-49,60	-20,45
61F0323	> -46,75	-44,15
61F0324	-65,65	-37,95
61F0325	niet aangeboord	-61,95
61F0419	niet aangeboord	-54,05
61F1389 (MA 01-00)	> -44,60 (niet aangeboord)	-43,30
61F1390 (MA 02-00)	> -54,90 (niet aangeboord)	-45,90
61F0309	> -16,85	-8
61H0056	-17,40	-14
61H0018	niet aangeboord	13,7
61H0036	-14,70	-12,7

2.3 Beschrijving lithostratigrafie

Het gesteente in de ENCI behoort tot een viertal formaties welke behoren tot de Kolenkalk Groep (Carboon) en de Krijtkalk Groep:

- Formatie van Zeeland (Onder-Carboon)
- Formatie van Vaals (Boven-Krijt)
- Formatie van Gulpen (Boven-Krijt)
- Formatie van Maastricht (Boven-Krijt)

De gesteenten van de Formatie van Zeeland zoals deze wordt aangetroffen onder de ENCI-groeve worden besproken in par. 2.3.1.

De formaties van het Krijt zijn onderverdeeld in laagpakketten. In paragraaf 2.3.2 worden per formatie de aanwezige laagpakketten beschreven.

2.3.1 *Formatie van Zeeland (Dinantien; Onder-Carboon)*

De Onder-Carboon (F. van Zeeland) afzettingen wordt in de regio beschreven als grijze, bruine en zwarte carbonaatgesteenten, waarin een wisselende hoeveelheid kleisteen kan zijn ingeschakeld. Lokaal komen verkiezelde lagen voor. In België, direct ten zuiden van het studiegebied, is deze eenheid in het Geuldal en bij Visé ontsloten (Rijks Geologische Dienst, 1984; Felder, P.J. & Bless, 1986). In het zuidwesten, waar de Kolenkalk Groep het Paleozoïsche oppervlak raakt, wordt hij discordant bedekt door de Krijtkalk Groep. De ouderdom van het Onder-Carboon is Dinantien (Tournaisien en Viséen).

Lithologische beschrijving ENCI-groeve: licht grijze KLEISTEEN met gebankte carbonaten (wit-grijs) en gelaagde vuursteen (zwart en bruin).

De formele lithostratigrafische naam van de lagen van het Dinantien behoren tot de Formatie van Zeeland. Het lagen van het Dinantien die direct onder de ENCI-groeve worden aangetroffen worden beschreven kalkige en/of gesilicificeerde kleistenen en zwarte gelaagde vuurstenen. Een Laat-Viséen ouderdom wordt aan dit pakket toegekend. In diepere delen van het Dinantien zoals in de boring Heugem-1 worden grijze, donkergrijze en zwarte kalkstenen aangetroffen. De ouderdom van de sedimenten is Midden- tot Laat-Viséen (Bless et al., 1981).

In een verweringszone, waar de formatie in contact is met de Krijtkalk Groep, treedt silicificatie² (verkiezelings) van de carbonaten op. Langs breuken worden kunnen de kalkstenen gedolomitiseerd zijn (TNO-NITG, 1999).

² silicificatie = over het proces van verkiezelings (silicificatie) zijn verschillende verhalen in omloop. De silicificatie is afkomstig van silica-houdende algenmatten, diatomeeën en zee-egelnaalden die tijdens diagenese zijn opgelost en neergeslagen. Vaak zijn specifieke niveaus met veel bioturbatie geheel verkiezeld. Het is over het algemeen geen kwarts maar chalcedoon (amorphe silica). Het proces erachter is dat silica eerst oplost onder normale zeewater omstandigheden en neerslaat onder iets zuurdere condities. Silica wordt vaak geassocieerd met verhoogde productiviteit van organische stof in de waterkolom. In zones met opwellend zeewater worden dan diatomeeën als bron gezien voor de latere siliceus vorming. Bij een lagere pH slaat de silica weer neer.



Legenda:

- licht blauw: Maas afzettingen (Holoceen)
- paars: Maas afzettingen (Pleistoceen)
- licht bruin: Löss afzettingen (Pleistoceen)
- licht groen: Formatie van Maastricht (Boven-Krijt)
- groen: Formatie van Gulpen (Boven-Krijt)

Figuur 2.1 Geologische kaart van de ENCI-groeve en directe omgeving (RGD, 1988)

2.3.2 *Formatie van Vaals (Boven-Krijt)*

Deze formatie is onderverdeeld in verschillende laagpakketten deze zijn echter buiten de type lokaliteit (in Vaals) niet goed onderling te onderscheiden. De dominante lithologie van deze Formatie in westelijk deel van Limburg (ENCI-groeve) geel-groengrijze glauconiethoudende kleien afgewisseld met siltige en kleiige zanden. De basis van een laagpakket kan worden gevormd door horizonten welke meer of minder glauconiethoudend zijn of het voorkomen van zandsteenbanken.

Deze kleien zijn kalkhoudend. In dit deel van het verbreidingsgebied van de Formatie van Vaals, is het pakket vrij homogeen te noemen. De afzettingen van de Formatie van Vaals kunnen zijn verkit. De hoeveelheid zand wisselt, met name de basis kan vrij zandig zijn.

Lithologische beschrijving ENCI-groeve: witte, kalkhoudende siltige KLEI

De overgang van de Formatie van Vaals naar de Formatie van Gulpen wordt gevormd door het Horizont van Zeven-Wegen. Dit is een glauconietrijke kalksteen welke wordt gekenmerkt door bioturbatie.

De top van de Formatie van Vaals staat aangegeven op *Bijlage A.2*. De dikte van de F. van Vaals varieert van 30 tot 35 m in de ENCI-groeve (*Bijlagen A.1 en A.2*). Naar het zuiden neemt de dikte van de F. van Vaals snel af tot 3 m in de boring 61H0056. Naar het noorden neemt de dikte toe tot 53 m in de boring 61F0296 (Kastanjelaan-02).

2.3.3 *Formatie van Gulpen (Boven-Krijt)*

De Formatie van Gulpen bestaat overwegend uit harde tot zachte fijnkorrelige kalksteen met wisselende hoeveelheden vuursteen. Het bovenste deel van deze formatie heeft een CaCO_3 gehalte van 80-95% en wordt gekenmerkt door opvallende vuursteenknollen. Het onderste deel van de formatie bestaat uit minder kalkrijke kalksteen (50-90% CaCO_3) met minder prominente vuursteen voorkomens.

Lithologische beschrijving ENCI-groeve: witte en lichtgrijze KALKSTEEN met zandige/siltige glauconiethoudende lagen en lagen met vuursteenknollen (silex in de top van de formatie).

De formatie van Gulpen is onderverdeeld in een aantal laagpakketten. De grenzen tussen de afzonderlijke laagpakketten (horizonten) worden niet beschreven. Indien CaCO_3 percentages genoemd worden dan gelden deze voor de hoofdgrondsoort en niet voor de bijmengingen (zoals bijvoorbeeld vuursteen).

Kalksteen van Zeven-Wegen

Zeer fijnkorrelige witte kalksteen, met mogelijk kleine hoeveelheden glauconiet (75-92% CaCO_3). Aan de basis van dit pakket kan een glauconiet rijke laag (maximaal 1,5 m dik) voorkomen. Het percentage vuursteen in dit pakket bedraagt minder dan 1%. De dikte van dit pakket varieert van 10-18 m.

Kalksteen van Beutenaken

Fijnkorrelige, lichtgrijze, glauconiethoudende kalksteen. De maximale dikte van deze laag is ca. 10 m. Het CaCO_3 gehalte van de Kalksteen van Beutenaken varieert tussen de 65 en 80%. Het gehalte vuursteen in dit pakket is zeer laag.

Kalksteen van Vijlen

Zeer tot matig fijnkorrelige licht- tot donker groengrijze kalksteen met mogelijk wat vuursteen. Dit pakket bestaat uit twee delen. Het onderste deel (25-28 m dik) bestaat uit een glauconiet rijke kalksteen met weinig vuursteen, met een CaCO_3 gehalte van 50-80% (gemiddeld 59%). Het bovenste deel, ca. 6-8 m dik, bestaat uit een groengrijze glauconiethoudende klaksteen met ca. 10% vuursteen. Dit laatste pakket heeft een CaCO_3 gehalte 73 tot 88%. De totale dikte van de kalksteen van Vijlen kan oplopen tot 40 m met een gemiddelde CaCO_3 gehalte van 68%. In deze formatie kan een 1-4 m dikke laag glauconietzand voorkomen, deze zandlaag is een kalkrijk.

Kalksteen van Lixhe

Dit pakket bestaat ter plaatse van de ENCI-concessie uit drie eenheden:

Kalksteen van Lixhe 1

Kalksteen van Lixhe 2

Kalksteen van Lixhe 3

Kalksteen van Lixhe 1

Zeer fijnkorrelige, lichtgrijze kalksteen met veel verspreide vuursteen (klein formaat) voorkomens, in totaal ca. 15%. De dikte van deze laag is ca. 5 m, CaCO_3 gehalte 93%.

Kalksteen van Lixhe 2

Zeer fijnkorrelige, lichtgrijze kalksteen met veel verspreide vuursteen (klein tot matig groot formaat) voorkomens, ten dele voorkomend in horizonten, in totaal ca. 15%. De dikte van deze laag is ca. 11-12 m, CaCO_3 -gehalte is ca. 95%.

Kalksteen van Lixhe 3

Zeer fijnkorrelige, lichtgrijze kalksteen met in horizonten gelegen vuursteen (klein tot matig grof formaat) voorkomens, in totaal circa 20 procent. De dikte van deze laag is ca. 10-11 m, CaCO_3 -gehalte is ca. 95%.

Kalksteen van Lanaye

Fijnkorrelige, lichtgrijze tot witte kalksteen met veel grote tot zeer grote in horizonten gelegen vuurstenen. In totaal komen in dit pakket ca. 18-20 vuursteen horizonten voor. In totaal bestaat dit pakket voor ca. 18% uit vuursteen. Het CaCO_3 percentage van dit laagpakket is ca. 97% en de gemiddelde dikte varieert van 14-16 m.

2.3.4 *Formatie van Maastricht (Boven-Krijt)*

Deze afzettingen bestaan overwegend uit fijn- tot zeer grofkorrelige, geelwitte kalkstenen al dan niet met vuursteen.

Het onderste deel van de Formatie van Maastricht bestaat vooral uit fijnkorrelige kalksteen met 5-12% vuursteen. Het bovenste deel bestaat uit fijn- tot grofkorrelige kalksteen met weinig tot geen vuursteen. De Formatie van Maastricht is onderverdeeld in een aantal laagpakketten:

Kalksteen van Valkenburg

Fijnkorrelige, geelgrijze kalksteen met weinig vuursteen (2-5%). Dit pakket is ca. 3 m dik en heeft een CaCO_3 -gehalte van 95-98%.

Kalksteen van Gronsveld

Fijnkorrelige, geelwitte kalksteen met circa 5-10 % vuursteen. Dit pakket is gemiddeld 7 m dik en heeft een CaCO_3 -gehalte van 92-97%.

Kalksteen van Schiepersberg

Fijnkorrelige, geelwitte kalksteen met ca. 5-10 % vuursteen. Dit pakket is gemiddeld 3-5 m dik en heeft een CaCO_3 -gehalte van 96-98%.

Kalksteen van Emaël

De Kalksteen van Emaël is in twee delen onder te verdelen. Het onderste deel bestaat uit een fijn- tot matigfijn korrelige, geelwitte kalksteen met kleine tot zeer grote vuurstenen. Het bovenste deel bestaat uit een fijnkorrelige, geelwitte tot witgrijze kalksteen met harde kalksteen banken en tauwlagen (lagen met harde kalksteen knollen).

Het totale pakket bevat circa 5-10% vuursteen en heeft een gemiddeld CaCO_3 -gehalte van 97-99%. De gemiddelde dikte is ca. 7 m.

Kalksteen van Nekum

Matigfijn tot grofkorrelige, geelwitte kalksteen met aan de basis enkele vuurstenen. Aan de top en basis van dit pakket komen enkele harde kalksteenbanken voor. De gemiddelde dikte van dit pakket is ca. 11-12 m en het CaCO_3 -gehalte is gemiddeld 98%.

Kalksteen van Meersen

Grof tot zeer grofkorrelige, geelwitte kalksteen met harde kalksteenbanken. In dit pakket komen geen vuurstenen voor. De gemiddelde dikte van dit pakket ligt tussen de 5 en 12 m en het CaCO_3 -gehalte is gemiddeld 98%.

3 Inventarisatie geohydrologische informatie

3.1 Inleiding geohydrologie

Geohydrologische profielen

De informatie in deze paragraaf is mede ontleend aan het eindrapport van het EUREGIO-project "Kwaliteit van het grondwater in de watervoerende lagen in de provincies Luik, Belgisch en Nederlands Limburg", dat medegefinancierd is vanuit het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling (EUREGIO, 2000) en IWACO (1997).

In *Bijlage B.1* en *B.2* zijn twee geohydrologische dwarsprofielen van de regio opgenomen. Profiel BB' loopt van het Land van Herve (België) noordwaarts door oostelijk Zuid-Limburg. Profiel CC' loopt van de Belgische Kempen oostwaarts, iets ten noorden langs de ENCI-groeve tot Kerkrade (EUREGIO, 2000). In *Fig. 3.1* is een kaart opgenomen met deze profieltrajecten in Zuid-Limburg.

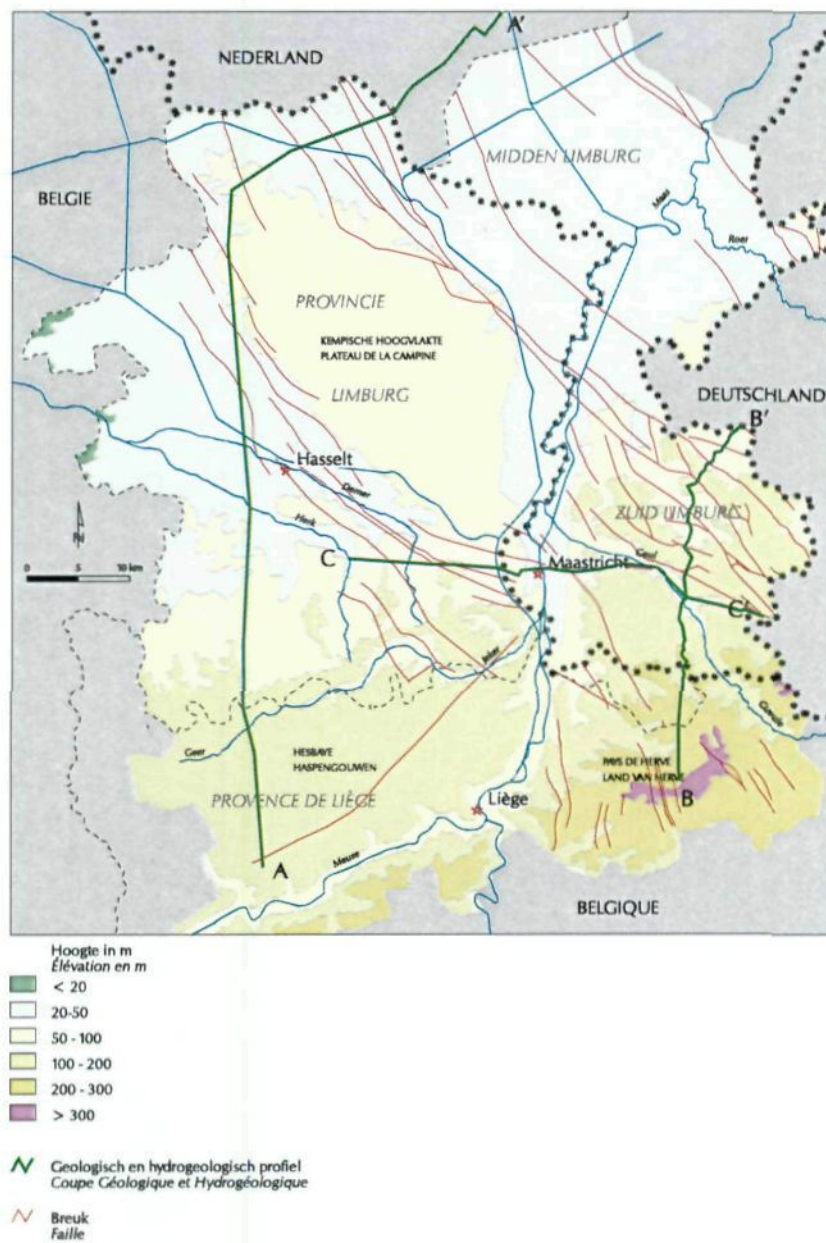
De top van de Formatie van Zeeland (Onder-Carboon) wordt over het algemeen beschouwd als basis van het geohydrologisch systeem. De bovenliggende Formaties van Aken en Vaals zijn matig tot slecht doorlatend en worden in het algemeen niet als watervoerend pakket beschouwd, met uitzondering van lokale exploitaties van de Formatie van Vaals in Zuid-Limburg. De boven de Formatie van Vaals voorkomende Formaties van Gulpen, Maastricht en Houthem vormen het belangrijkste watervoerend pakket. Hierbij stroomt het water vooral door spleten die ontstaan zijn als gevolg van drukontlasting door erosie van bovenliggende gesteenten. De spleten zijn onregelmatig in het gesteente verspreid, maar nemen over het algemeen af met de diepte. De doorlatendheid van deze formaties is gering.

Onder invloed van de diepere, mariene afzettingen, neemt het zoutgehalte van grondwater toe met de diepte. In Noord-Limburg en de rest van Nederland ligt het zoet-zout grensvlak meestal relatief ondiep, tussen 100 en 200 m beneden maaiveld. In Zuid-Limburg is het zoutgehalte al vanaf enkele honderden meters brak.

Water uit Mesozoïsche afzettingen (o.m. Krijtkalk)

De belangrijkste winningen van grondwater ten behoeve van de drinkwatervoorziening vinden plaats uit de zachte kalksteen van de Krijtkalk Groep die in Zuid-Limburg dicht aan het maaiveld ligt. De opbrengsten van de oudere lagen uit de Krijtkalk Groep zijn hierbij aanzienlijk beter dan van de jongere afzettingen.

Een aantal grote winningen is gesitueerd langs grote breuken (Kunrade Breuk en Benzenrade Breuk). Hier staat de kalksteen in horizontale richting in contact met Tertiaire, slechtdoorlatende afzettingen. Het grondwater dat vanuit de zuidelijk gelegen plateaus toestroomt door de kalksteen, wordt hierdoor opgestuwd. De breuken zijn waarschijnlijk afgesloten door versmering van Tertiaire klei, terwijl de kalksteen door de breukvorming juist een grotere permeabiliteit heeft gekregen (Kimpe, 1980). Deze geohydrologische situatie geeft goede mogelijkheden om water te winnen. Op een enkele plaats vindt winning van grondwater plaats uit de zandsteenbanken in de Formatie van Vaals door middel van 'captingen' (horizontaal-gegraven gangen waarin het water zich verzamelt).



Figuur 3.1 Locaties van geohydrologische profielen B-B' en C-C' (Bijlage B1 en B2)

Stroming van grondwater door de zachte kalksteen vindt voornamelijk plaats door het uitgebreide systeem van spleten en breuken in de kalksteen. Vanwege de ruimtelijke variatie in gespletenheid van de aquifers is het moeilijk op voorhand prognoses te doen over de opbrengstmogelijkheden van de kalksteenaquifers op een bepaalde plaats. Wel is uit onderzoek gebleken dat de permeabiliteit door de stroming door breuken en spleetvlakken anisotroop is (De Wit, 1988) en dat de opbrengst van een put afneemt met toenemende diepte, vanwege de afname van de hoeveelheid spleten in de aquifer (Van Rooijen, 1989).

De chemische samenstelling van het natuurlijke grondwater in de aquifers van de kalkstenen van de Krijtkalkgroep is weinig gedifferentieerd (Kimpe, 1980). Dit komt tot uitdrukking in een hoge secundaire permeabiliteit, waarbij de primaire permeabiliteit relatief laag is³. Het oorspronkelijke zoutwater in de mariene afzettingen is vervangen door geïnfiltreerd zoetwater. Door het oplossen van de kalk komt bijna uitsluitend $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -water voor. Plaatselijk op grotere diepte heeft door de invloed van de glauconiethoudende Formatie van Vaals uitwisseling van Ca tegen Na plaatsgevonden en is het water van het type Na-HCO_3 .

Geohydrologie van het Paleozoïcum (Carboon)

De verbreiding en de wijze van voorkomen van water in de geplooiden gesteenten van de Limburg Groep is bepaald door lithologie en tektoniek. De geohydrologische karakteristieken worden beheerst door voorkomende zandsteen- en kwartsietlagen en breuken. Deze vormen in tegenstelling tot de kleistenen en schalies goede watervoerende pakketten waarbij de secundaire permeabiliteit, gerelateerd aan de mate van gespletenheid, net als in de Krijt afzettingen, bepalend is voor de stromingssnelheid. Over het algemeen fungeren de noordwest-zuidoost gerichte breuken die deze pakketten doorsnijden als watergeleiders, terwijl de zuidwest-noordoost gerichte breuken slecht doorlatend zijn en dus een opstuwende functie hebben.

Ten tijde van de ontginning van steenkool in het Carboon in Zuid-Limburg hebben deze karakteristieken grote invloed gehad op de ontwatering van de afzettingen van de Limburg Groep. Zo zijn er bij het doorsnijden van de zandsteenpakketten grote watertoevloeden in de mijngangen ontstaan (tot 300/400 m³ per uur), deels met een eindig, deels met een permanent debiet, afhankelijk van het gesloten of open karakter van het geohydrologisch systeem. Gedurende de tijd dat er steenkool is ontgonnen is er gemiddeld zo'n 25 miljoen m³/jaar mijnwater opgepompt (Van Rooijen, 1989). Het opmerkelijke hierbij is dat de Paleozoïsche afzettingen werden gedraineerd, terwijl de bovenliggende, Mesozoïsche afzettingen watervoerend bleven. Dit is het gevolg van de goede afsluitende werking van de oudste afzettingen uit het Krijt (Formaties van Vaals en Aken).

De tektonische structuur en lithologie van de relatief ondiep liggende Paleozoïsche gesteenten zijn de oorzaak van vaak sterk afwijkende chemische samenstelling en geothermische karakteristieken van het aanwezige water in vergelijking met het 'ondiepe' grondwater in de rest van Nederland. Regelmatig chemisch onderzoek van het mijnwater tijdens de mijntijd, heeft tot een hydrochemisch evolutiebeeld van het

³ Primaire doorlatendheid is het vermogen van een gesteente om water door ruimten tussen korrels te laten stromen die bij geologische afzetting ontstaan zijn. Secundaire doorlatendheid is ontstaan door een op een later tijdstip ontstane verandering van deze doorlatendheid als gevolg van chemische processen en water in de ondergrond die bij uitstek kan plaatsvinden langs breuken, en diaklazen.

water in de Caumer Subgroep (Westfalen) geleid. Met grotere diepte neemt de mineralisatie toe, wat tot uiting komt in een verhoging van Na^+ en Cl^- concentraties. Onder elkaar zijn $\text{Ca}-(\text{HCO}_3)_2$ -watertypes uit het Krijt en $\text{Na}-\text{HCO}_3$ water als overgangstypes te zien, beneden –NAP 500 m is het water van een Na-Cl type.

Op een aantal plaatsen in Limburg is thermaal (mineraal)water aangetroffen. Bij thermaal water stijgt de temperatuur van het grondwater duidelijk uit boven het niveau dat op grond van de normale geothermische gradiënt (ong. 3°C per 100 m) verwacht mag worden. Grondwater mag mineraal water genoemd worden als het NaCl-gehalte hoger is dan 1000 mg/l of wanneer een bepaalde norm voor ijzer, jodium, zwavelwaterstof, fluor of andere mineralen wordt overschreden.

Het mineraalrijk water dat voor Thermae 2000 in Valkenburg wordt gewonnen, is afkomstig uit de Zeeland Formatie (Dinantien kalksteen) op iets minder dan 400 m beneden maaiveld en heeft een temperatuur van $24,5^\circ \text{C}$ (Krings & Languth, 1987).

De boringen Heugem-1a en Kastanjelaan-2 in Maastricht hebben het voorkomen van mineraalwater en thermaal mineraalwater in het Dinantien en Boven-Devoon aangetoond (Bless, 1981). Ten noordwesten van de breukzone die tussen deze boringen loopt, kan thermaal mineraalwater van 23°C verwacht worden op diepten tussen de 450 en 600 m. Verschillende watervoerende pakketten, gescheiden door schalies, leveren daarbij weer water van verschillende samenstelling. Ten zuidoosten van de breukzone komt op geringe diepte (ong. 250 m) mineraalwater voor met ongeveer 450 mg/l Cl^- , terwijl op een diepte tussen 750 en 1000 m thermaal mineraalwater verwacht mag worden, dat qua samenstelling te vergelijken zou zijn met het thermaal mineraalwater uit de boring Kastanjelaan-2 (Bless, 1981b).

De herkomst van het zoute, thermale water in Carboon sedimenten dient te worden gezocht in de diepere ondergrond. Door het breuk- en spleetsysteem kan het water vanuit grote diepte als ascendant water omhoog stromen. Er bestaan vermoeden dat hierbij zoute afzettingen uit het Devoon een rol spelen (Kimpe et al., 1978).

3.2 Lokale geohydrologische eenheden

Voor de beschrijving van de lokale geohydrologie zijn de volgende bronnen geraadpleegd: RGD boringen 61F080, 61F419, 61F323, 61F324, 61F325, 61F294 en 61F296; ENCI-boringen MA 01/00 (61F1389) en MA 02/00 (61F01390); IWACO-rapport 331.8940 (1991).

De ligging van deze boringen is weergegeven in *Bijlage A.1 en A.2*. Op deze kaart zijn de stijghoogten aangegeven die zijn gemeten in het Carboon in het Krijt.

Voor dit onderzoek zijn vooral de geohydrologische eigenschappen van de Formaties van Vaals en Zeeland van belang omdat de kleistenen van deze formatie de weerstand vormt tussen het spanningswater in het Carboon en de toekomstige groeievloer.

Formatie van Zeeland

De top van de Formatie van Zeeland is in de boringen 61F080, 61F419, 61F324 en 61F325 aangetroffen op een diepte van NAP –62 tot –88 m. Deze formatie bestaat kleistenen met uitverkiezelde en sterk verbroken kalksteen. In de drie laatstgenoemde boorbeschrijvingen wordt melding gemaakt van het optreden van spanningswater. In

boringen 61F324 en 61F325 gebeurt dit *'bij het bereiken van het Carboon'*. Wanneer dit letterlijk wordt genomen wijst dit op een aanzienlijke hydraulische weerstand in het onderste deel van de Formatie van Vaals. In boring 61F419 treedt het spanningswater echter pas op wanneer men tot 9 m in het Carboon is gevorderd. Dit wijst eerder op een aanzienlijke hydraulische weerstand in de top van het Carboon. Volgens Glasbergen (1985) zijn in de boringen 61F296 (Maastricht-Kastanjelaan-2) en 61F294 (Heugem-1) aanwijzingen gevonden voor een slecht doorlatende plastische kleilaag op de overgang van de Formatie van Vaals en het Dinantien. In boring 61F080 vindt weinig toestroming van grondwater plaats.

Op basis van de boorbeschrijvingen en literatuur is er dus sprake van een aanzienlijke hydraulische weerstand geconcentreerd over een geringe dikte rond de overgang van de Formatie van Vaals naar de Formatie van Zeeland. Uit de peilgegevens blijkt dat zowel in de Formatie van Vaals als in de Formatie van Zeeland hydraulische weerstanden voorkomen (zie paragraaf 3.3).

Formatie van Vaals

De Formatie van Vaals komt voor tussen NAP -34 m en -62 m in het zuiden van het gebied (boring 61F325) en tussen NAP -54 m en -88 m in het noorden (boring 61F419). De formatie bestaat hier overwegend uit zand- en kalkhoudende klei (in boring 61F419 siltsteen), zodat de primaire doorlatendheid waarschijnlijk laag is. Plaatselijk komen graafgangen voor die met glauconiethoudende kalk zijn opgevuld, naar verwachting verhoogt dit de doorlatendheid in deze zones niet significant.

Het breukenonderzoek dat in de ENCI in het kader van dit project is uitgevoerd (zie Hoofdstuk 4) wijst uit dat breuken die aan de oppervlakte van de groeve zijn waargenomen, kunnen doorlopen tot in de Formatie van Zeeland. Daarnaast is aan de hand van een seismisch profiel langs het Albertkanaal aangetroffen die mogelijk op een afstand van enkele km noordwestelijk langs de ENCI loopt. Beide factoren kunnen, indien aanwezig, een sterk reducerende invloed hebben op de hydraulische weerstand van de Formaties van Vaals en Zeeland onder de groeievloer.

Formatie van Gulpen

De bovenliggende Formatie van Gulpen wordt in alle genoemde boringen aangetroffen en dagzoomt in de lager gelegen gebiedsdelen. De boorbeschrijvingen (fijnkorrelige kalksteen) geven geen directe aanwijzingen over de doorlatendheid maar aangenomen mag worden dat ook lokaal het grondwater voornamelijk door spleten stroomt (zie verder paragraaf 3.4). In boring 61F324 werd op een diepte van NAP -22 m spanningswater aangetroffen dat uit het boorgat stroomde.

Overige eenheden

De Formatie van Maastricht komt alleen in de hoger gelegen gebiedsdelen voor en heeft waarschijnlijk soortgelijke geohydrologische eigenschappen als de Formatie van Gulpen.

Bovenop de kalkformaties komen plaatselijk de fijnzandige Tertiaire Formatie van Tongeren, Pleistocene leem-, löss- en grindlagen en terrasafzettingen voor.

3.3 Beschikbare peilingen

3.3.1 Stijghoogten

Informatie over stijghoogten ter plaatse is afkomstig van een aantal peilbuizen uit het databestand DINO van TNO-NITG, van door de ENCI geplaatste peilbuizen en van de eerder genoemde boorbeschrijvingen. In *Bijlage A.1 en A.2* is de ligging van de geraadpleegde peilbuizen weergegeven. In *Bijlage B.3* zijn de technische gegevens en tijdreeksen van enige geraadpleegde peilbuizen opgenomen.

Formatie van Zeeland

De gegevens over de stijghoogte in het Onder-Carboon (Formatie van Zeeland) zijn in onderstaande *Tabel 3.1 en 3.2* samengevat (de boringen zijn hierbij gerangschikt van van zuid naar noord). De locaties van de peilputten staan op de kaart van *Bijlage A.1* gegeven.

Tabel 3.1 Stijghoogten in Carboon in (de directe omgeving) van de ENCI-groeve

locatie	stijghoogte (m tov NAP)
Bron: TNO-NITG	
61HP0036 (peilbuis), tussen Oost-Maarland en Eijsden	NAP +45 à 48 m
Boorbeschrijving 61F325	NAP +52.6 m
Boorbeschrijving 61F324	> NAP +36 m
Boorbeschrijving 61F419	NAP +49.1 m
Boorbeschrijving 61F294 (Heugem-1)	NAP +58.5 m
Peilbuis 61FP0296 Maastricht, Kastanjelaan-2	NAP +57 à 58 m

Tabel 3.2 Afstand van meetpunt tot de ENCI-groeve en type meetgegevens

locatie	afstand tot ENCI	type gegevens
Bron: TNO-NITG		
61HP0036	ca 3 km	tijdreeksen, 1991-1998, filters 3 (NAP – 17 tot –19 m) en 4 (NAP –26 tot –28 m)
61F325	300 m ten Z van de groeve	momentopname 21 juni 1983
61F324	zuidpunt groeve	momentopname mei 1983
61F419	noordrand groeve	momentopname 29-10-1990
61F294	ca. 2 km ten ONO van de groeve	momentopname 1981
61FP0296	ca. 4 km ten N van de groeve	tijdreeks 1983-1987, filter 1 (NAP –179 tot –189 m)

De stijghoogte in de Formatie van Zeeland in Maastricht is hoger dan de gemiddelde Maaswaterstand zodat de Maas als enige drijvende kracht achter deze diepe stijghoogte kan worden uitgesloten. Volgens Zuurdeeg (1981) is het water afkomstig van infiltratie in het Land van Herve. De hoge stijghoogte in de Formatie van Zeeland te Maastricht kan alleen hierdoor worden verklaard wanneer een slecht doorlatende laag boven deze Formatie aanwezig is. In de literatuur zijn wat dit betreft alleen verwijzingen gevonden naar goed tot matig doorlatende zanden uit het Boven-Krijt (Glasbergen, 1985; EURREGIO, 2000). Mogelijk echter is ook in dit gebied de slecht doorlatende zone op

de overgang van de Formatie van Vaals naar de Formatie van Zeeland aanwezig waarvoor in de boringen in Maastricht, Heugem en de ENCI aanwijzingen zijn gevonden. In de tijdreeksen van peilbuis 61HP0036 (*Bijlage B.3*) vallen de volgende zaken op:

1. de voor de regio relatief lage stijghoogte in peilbuis 61HP0036 (NAP +45 tot +48 m),
2. een geleidelijk stijghoogteverval van onder naar boven (opwaartse stroming), maar geen stijghoogtesprong geconcentreerd over een kort interval,
3. de gelijktijdige reacties van de stijghoogten in de vier filters.

Filters 1 en 2 van peilbuis 61HP0036 staan in de Formatie van Vaals, filters 3 en 4 in de Formatie van Zeeland.

Ad.1. Mogelijk ontbreekt hier een hydraulische weerstand boven de Formatie van Zeeland waardoor ontlasting van het spanningswater optreedt.

Ad.2. Het stijghoogteverval tussen alle filters wijst op de aanwezigheid van een hydraulische weerstand zowel in de top van de Formatie van Zeeland, de overgang tussen de Formaties van Zeeland en Vaals en in de Formatie van Vaals.

Ad.3. Het reactiepatroon in de filters wijst op beïnvloeding van het grondwatersysteem door een externe impuls; misschien fluctuaties van het (stroomopwaartse) Maaspeil die neerwaartse drukvoortplantingen veroorzaken. Mogelijk is ook de stijghoogte onder de ENCI hier gevoelig voor.

Formaties van Vaals / Aken

Over de stijghoogten in de Formaties van Vaals en Aken is helaas geen informatie gevonden.

Formaties van Gulpen / Maastricht

De gegevens over de stijghoogte in de Formatie van Gulpen en Maastricht zijn in onderstaande *Tabel 3.3* samengevat (de boringen zijn gerangschikt van zuid naar noord). De gegevens van de ENCI-peilbuizen zijn afkomstig van IWACO (1997). Alle peilbuizen hebben hun filters enkele meters onder het maaiveld. De locaties van de peilbuizen in de Formatie van Gulpen en Maastricht staan weergegeven in *Bijlage A.2*.

Tabel 3.3 *Stijghoogte in Formatie van Gulpen en Maastricht in (de directe omgeving) van de ENCI-groeve*

locatie	type gegevens	stijghoogte (m tov NAP)
Bron: TNO-NITG		
61FP9006 (= peilbuis A Prov. Limburg)	Tijdreeks 1997-2000	ca. NAP +51 m
61FP9007 (= peilbuis B Prov. Limburg)	Tijdreeks 1997-2000	ca. NAP +49 m
61FP9009 (=peilbuis C Prov. Limburg)	Tijdreeks 1997-2000	ca. NAP +44 m
Peilbuis D Prov. Limburg	Tijdreeks 1997-2000	ca. NAP +54 m
Peilbuis E Prov. Limburg	Tijdreeks 1997-2000	NAP + 55 à 56 m
Peilbuis F Prov. Limburg	Tijdreeks 1997-2000	ca. NAP +44 m
61FP0045	Tijdreeks 1979-1991	NAP + 44 à 45 m
Peilbuizen 1,2 en 3 ENCI	Tijdreeks 1994-1996	NAP + 48 à 49 m
Peilbuis 4 ENCI	Tijdreeks 1994-1996	ca. NAP + 45 m
Peilbuis 6 ENCI	Tijdreeks 1994-1996	ca. NAP + 47 m
Peilbuis 7 ENCI	Tijdreeks 1994-1996	NAP + 41 à 42 m

De stijghoogte in de bovenliggende Formaties van Gulpen en Maastricht wordt regionaal sterk bepaald door de drainerende werking van de Maas (Glasbergen 1985). De Maas wordt gestuwd bij Borgharen met een stuwpeil van NAP +44 m (IWACO, 1991). De stijghoogten nemen af van ca. NAP +55 m in het Jekerdal naar ca. NAP +44 m langs de linker Maasoever (zie *Tabel 3.2* en *Bijlage A.1*). In de groeve zelf wordt (in ENCI-buis 7) een lagere stijghoogte gemeten (NAP +41 à +42 m) dan langs de Maas, waarschijnlijk als gevolg van de bemaling in de groeve.

Stijghoogteverschil

De hier gepresenteerde stijghoogten van de Formatie van Gulpen dienen als achtergrondinformatie. Voor het onderhavige probleem (kwel vanuit de Formatie van Zeeland naar de groeve) is vooral de stijghoogte op het diepste punt van de groeve van belang; deze wordt bepaald door de diepte van de groevevloer, die door middel van bemaling droog moet worden gehouden. In de huidige situatie met de groevevloer op NAP +5 m en de stijghoogte in de Formatie van Zeeland op NAP +49 à +52 m is er sprake van een drukverschil van ca. 45 m waterkolom. Bij verdere ontgraving en bijbehorende bemaling om de groevevloer droog te houden zal dit drukverschil toenemen.

Invloed van de Maas

Uit modelresultaten van IWACO (1991) blijkt dat bij een grondwateronttrekking van 1 miljoen m³ per jaar, ca. 65% van de opgepompte hoeveelheid afkomstig is uit de Maas. Dit betekent een aanzienlijke invloed van de Maas op het lokale grondwatersysteem. Bij de inschatting van de effecten van een diepere ontginning op met name de wandstabiliteit moet dit een punt van aandacht zijn. Mogelijke invloeden van Maaspeilfluctuaties op de stijghoogte in de Formatie van Zeeland zijn eerder in deze paragraaf vermeld.

3.3.2 *Grondwaterkwaliteit*

De informatie omtrent grondwaterkwaliteit is gebaseerd op EURREGIO (2000) de DINO-database van TNO NITG, Bless et al (1981) en Glasbergen (1985).

Formatie van Zeeland

Van de peilbuizen 61FP0296 (Maastricht-Kastanjelaan-2), 61HP0036 en Heugem-1 zijn betrouwbare grondwateranalyses beschikbaar. 61FP0296 heeft een filter (no. 1) in de Formatie van Zeeland tussen NAP -179 en -189 m. De filters 3 en 4 van 61HP0036 staan in de Formatie van Zeeland (resp. NAP -17 tot -19 m en NAP -26 tot -28 m). De analyses uit Heugem-1 hebben betrekking op het interval NAP -70 tot -317 m. In onderstaande *Tabel 3.4* zijn de analyseresultaten voor de relevante ionen en elektrisch geleidingsvermogen (EGV) weergegeven.

De Na⁺ en Cl⁻ gehalten in de *Tabel 3.4* wijzen op de aanwezigheid van licht brak water in het bovenste deel van de Formatie van Zeeland. Glasbergen (1985) suggereert dat het grondwater in 61FP0296-1 afkomstig is van grotere diepten (< NAP -200 m) als gevolg van een mogelijke breukzone tussen Maastricht en Heugem. Omdat Heugem-1 aan dezelfde kant van de breuk ligt als de ENCI, zou het grondwater in het bovenste deel van de Formatie van Zeeland meer op de analyse van Heugem-1 moeten lijken dan op de analyse van 61FP0296-1. Opgemerkt wordt wel dat de analyse van Heugem betrekking heeft over een interval van 250 m zodat de nauwkeurigheid laag is. Over de werkelijke samenstelling ter plaatse van de ENCI kan pas na analyses ter plekke een uitspraak worden gedaan met een grotere betrouwbaarheid.

Tabel 3.4 *Kwaliteit van grondwater in het Onder-Carboon*

	61FP0296-1 (5 nov. 1981)	61HP0036-3 (1991-1993)	61HP0036-4 (1991-1993)	Heugem-1 (19 juni 1981)
bron:	Glasbergen (1985)	TNO-NITG	TNO-NITG	Bless et al. (1981)
Cl ⁻	984 mg/l	270-300 mg/l	260-335 mg/l	445 mg/l
SO ₄ ²⁻	118 mg/l	32-34 mg/l	18-34 mg/l	61 mg/l
HCO ₃ ⁻	595 mg/l	360-380 mg/l	380 mg/l	445 mg/l
Ca ²⁺	61 mg/l	89-98 mg/l	86-97 mg/l	89 mg/l
Mg ²⁺	29 mg/l	21-24 mg/l	21-26 mg/l	25 mg/l
Na ⁺	750 mg/l	180-190 mg/l	190-205 mg/l	325 mg/l
EGV	3600 S/cm	1250-1310 S/cm	1280-1430 S/cm	1670 S/cm

Het brakke karakter van het grondwater in de Formatie van Zeeland wordt waarschijnlijk veroorzaakt door diffusie van zouten uit stagnant, fossiel zeewater in de richting van spleten waar doorheen het actieve grondwater stroomt (Glasbergen, 1985).

Formaties van Vaals / Aken

In EURREGIO (2000) zijn de resultaten opgenomen van 76 bemonsteringspunten in de Formaties van Vaals / Aken. Het betreft hier vooral de gebieden waar de Formatie het karakter van een aquifer heeft (zuidoost-Limburg). Zowel vanwege de grote afstand tot de ENCI als vanwege het verschil in lithologie met de formaties ter plaatse van de ENCI moeten de analyseresultaten als niet meer dan achtergrondinformatie worden beschouwd.

In de onderstaande Tabel 3.5 zijn de mediane concentraties van de relevante ionen en elektrisch geleidingsvermogen weergegeven.

Tabel 3.5 *Mediane concentraties van de ionen en elektrisch geleidingsvermogen*

parameter	mediaan concentratie F. v. Vaals / Aken
Bron: EURREGIO MAAS/RIJN, LGIH-ULH, LISEC & TNO-NITG (2000)	
Cl ⁻	17 mg/l
SO ₄ ²⁻	46 mg/l
HCO ₃ ⁻	289 mg/l
F ⁻	0,0 mg/l
Ca ²⁺	114 mg/l
Mg ²⁺	3,8 mg/l
Na ⁺	6,2 mg/l
EGV	575 S/cm

In vergelijking met de Formatie van Zeeland zijn de gehalten Na⁺ en Cl⁻ beduidend lager als gevolg van uitspoeling van fossiel formatiewater (EURREGIO, 2000). De gehalten Ca²⁺ en HCO₃⁻ zijn vergelijkbaar hoog als gevolg van oplossing van in de mariene afzettingen aanwezige kalksedimenten en -fragmenten (EURREGIO, 2000). De sulfaatgehalten zijn iets hoger, wat verschillende oorzaken als pyriet-oxydatie of antropogene beïnvloeding kan hebben.

Formaties van Gulpen / Maastricht

Omdat de kwaliteit van het ondiepe grondwater (Formaties van Gulpen / Maastricht) veel sterker ruimtelijk varieert dan van het diepe grondwater, blijft de beschrijving van de kwaliteit van het ondiepe grondwater beperkt tot de directe omgeving van de ENCI groeve. In het algemeen is in deze Formaties een Ca-HCO_3 -type grondwater aanwezig, waar de invloed van het oorspronkelijk aanwezige zeewater geheel is verdwenen. Hogere chloride- en sulfaatconcentraties hebben vooral een antropogene oorsprong (EURREGIO, 2000).

Lokaal zijn maar weinig analyses van de Formaties van Gulpen / Maastricht beschikbaar. De beschikbare analyses staan weergegeven in onderstaande Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Kwaliteit van grondwater in F. van Gulpen en Maastricht

	61FA3137 (1932)	61FP9006 (2000)	904a/b (4 feb. 1995)
<i>Bron: TNO-NITG</i>			
Cl^-	10 mg/l	25-29 mg/l	24-47 mg/l
SO_4^{2-}	15 mg/l	51-52 mg/l	43-122 mg/l
HCO_3^-	262 mg/l	376-380 mg/l	317-343 mg/l
Ca^{2+}	--	124-131 mg/l	90-137 mg/l
Mg^{2+}	--	13-14 mg/l	8-13 mg/l
Na^+	--	11 mg/l	21-43 mg/l
EGV	390 S/cm	720-769 S/cm	597-920 S/cm

De samenstelling is vergelijkbaar met de gerapporteerde mediaan-concentraties van de Formaties van Vaals / Aken.

Interactie tussen formaties

Omdat het water omhoog stroomt is er geen of weinig beïnvloeding of menging van het grondwater in de Formatie van Zeeland vanuit de bovenliggende Formaties zijn, maar andersom is aannemelijker. De beschikbare gegevens wijzen op een behoorlijk verschil in Na^+ en Cl^- gehalten en EGV tussen de Formatie van Zeeland en de bovenliggende formaties. De Ca^{2+} , HCO_3^- en SO_4^{2-} lijken minder onderscheidend.

3.3.3 Bemalingswater ENCI-groeve

Over de herkomst van het opgepompte water kan aan de hand van grondwaterkwaliteitsgegevens ook informatie worden verkregen. Hieruit zou bijvoorbeeld kunnen blijken wat het aandeel is van Maaswater en van geïnfiltrerd regenwater.

In onderstaande Tabel 3.7 zijn enkele analyseresultaten van het opgepompte water in de groeve weergegeven. Een vergelijking met de hiervoor getoonde tabellen laat zien dat het bemalingswater qua samenstelling meer lijkt op het grondwater uit de Formaties van Gulpen/Maastricht en Vaals/Aken dan op dat van de Formatie van Zeeland. Vooral Na^+ , Cl^- en EGV zijn hierin onderscheidend. De hogere sulfaatconcentratie wordt toegeschreven aan antropogene invloeden (IWACO, 1991). Op basis van de beschikbare gegevens lijkt het aandeel van kwelwater uit de Formatie van Zeeland in het opgepompte water in de huidige situatie zeer gering. Dit lijkt in overeenstemming met de conclusie van IWACO (1991) dat 65% van het opgepompte water van de Maas

afkomstig is. Gezien de betrouwbaarheid van de getoonde analyseresultaten op lokaal niveau wordt echter aanbevolen om ter plaatse van de groeve watermonsters te nemen uit de Formaties van Zeeland, Vaals, Gulpen en uit de Maas.

Tabel 3.7 *Kwaliteit van pompwater in de ENCI-groeve*

Zuidelijke pompvijver ENCI (1991)		Bronwater / Groevewater (7 apr. 1999)
<i>Bron:</i>	<i>IWACO (1991)</i>	<i>ENCI</i>
Cl ⁻	50 mg/l	27 mg/l
SO ₄ ²⁻	84 mg/l	--
HCO ₃ ³⁻	240 mg/l	--
Ca ²⁺	104 mg/l	--
Mg ²⁺	13 mg/l	--
Na ⁺	24 mg/l	--
EGV	665 µS/cm	--

Via waterland internetpagina (www.aqualarm.nl) zijn chloride- en fluoridengehalten en EGV van het Maaswater te Eijsden gemeten direct raadpleegbaar. Voor de periode februari t/m mei 2002 waren deze gehalten respectievelijk ca. 15 à 60 mg/l, 0.1 à 1.0 mg/l en 200 à 520 S/cm. TNO-GG (1991) maakt melding van Na⁺ en Cl⁻ gehalten van het Maaswater van 25 mg/l en 50 mg/l, maar dit heeft betrekking op een verder stroomafwaarts gelegen traject (Noord- en Midden-Limburg).

3.3.4 Totaalbeeld grondwaterkwaliteit

De hierboven gepresenteerde informatie is in vereenvoudigde vorm samengebracht in de onderstaande Tabel 3.8. Hieruit blijkt dat het water in de Formatie van Zeeland zich onderscheidt op basis van de Na⁺ en Cl⁻ gehalten en het geleidingsvermogen. Tussen de grondwaters uit de overige geohydrologische systemen zijn met de beschikbare gegevens geen verschillen van betekenis gevonden.

Tabel 3.8 *Overzicht grondwaterkwaliteit omgeving ENCI*

	F. v Zeeland	F. v Vaals	F. v Gulpen / F. v. Maastricht	ENCI bemaling	Maas
(mg/l)	<i>eenm. analyses</i>	<i>mediaan regio</i>	<i>eenm. analyses</i>	<i>eenm analyses</i>	<i>eenm. analyses</i>
Cl ⁻	270-445	17	10-47	27-50	15-60
SO ₄ ²⁻	18-61	46	15-122	84	
HCO ₃ ³⁻	360-445	289	260-380	240	
Ca ²⁺	86-98	114	90-137	104	
Mg ²⁺	21-26	4	8-13	13	
Na ⁺	180-325	6	11-43	24	25
EGV (µS/cm)	1250-1670	575	390-920	665	200-520

3.4 Doorlatendheden

3.4.1 *Formatie van Zeeland (Dinantien; Onder-Carboon)*

In Bless et al. (1981) worden de resultaten van laboratoriumproeven op monsters van de boringen Heugem-1/1a en Kastanjelaan-2 gepresenteerd (Fig. 3.1 en 3.2). De gemeten doorlatendheden variëren tussen $< 0,0003$ m/dag en 0,05 m/dag in Heugem-1/1a (primaire doorlatendheid). Er is 1 meting van de secundaire doorlatendheid: 0,016 m/dag. De gemeten porositeit is hoog in het bovenste deel van de boring (NAP –129 tot –250 m): tussen 12 en 49%. Dit wordt toegeschreven aan het voorkomen van lege fossielkassen. Voor Kastanjelaan-2 zijn doorlatendheden van 0,0007 m/dag tot 0,0212 m/dag vastgesteld (primaire en secundaire). Een putproef in het Dinantien leverde een doorlatendheid van 0,03 m/dag op.

Vanwege de zeer beperkte ruimtelijke schaal waarvoor laboratoriumproeven geldig zijn, wordt aan het putproefresultaat meer waarde gehecht. Anderzijds heeft dit resultaat betrekking op afzettingen die ter plaatse van de ENCI veel dieper liggen dan de top van de Formatie van Zeeland. Vooralsnog wordt uitgegaan van een doorlatendheid van de Formatie van Zeeland in de orde van grootte van 0,1 tot 1 m/dag.

Op basis van de beschikbare gegevens kan geen relatie worden gelegd tussen de doorlatendheid en de porositeit van het Carboon.

3.4.2 *Formatie van Vaals (Boven-Krijt)*

Over de doorlatendheden in de Formaties van Vaals is geen informatie gevonden.

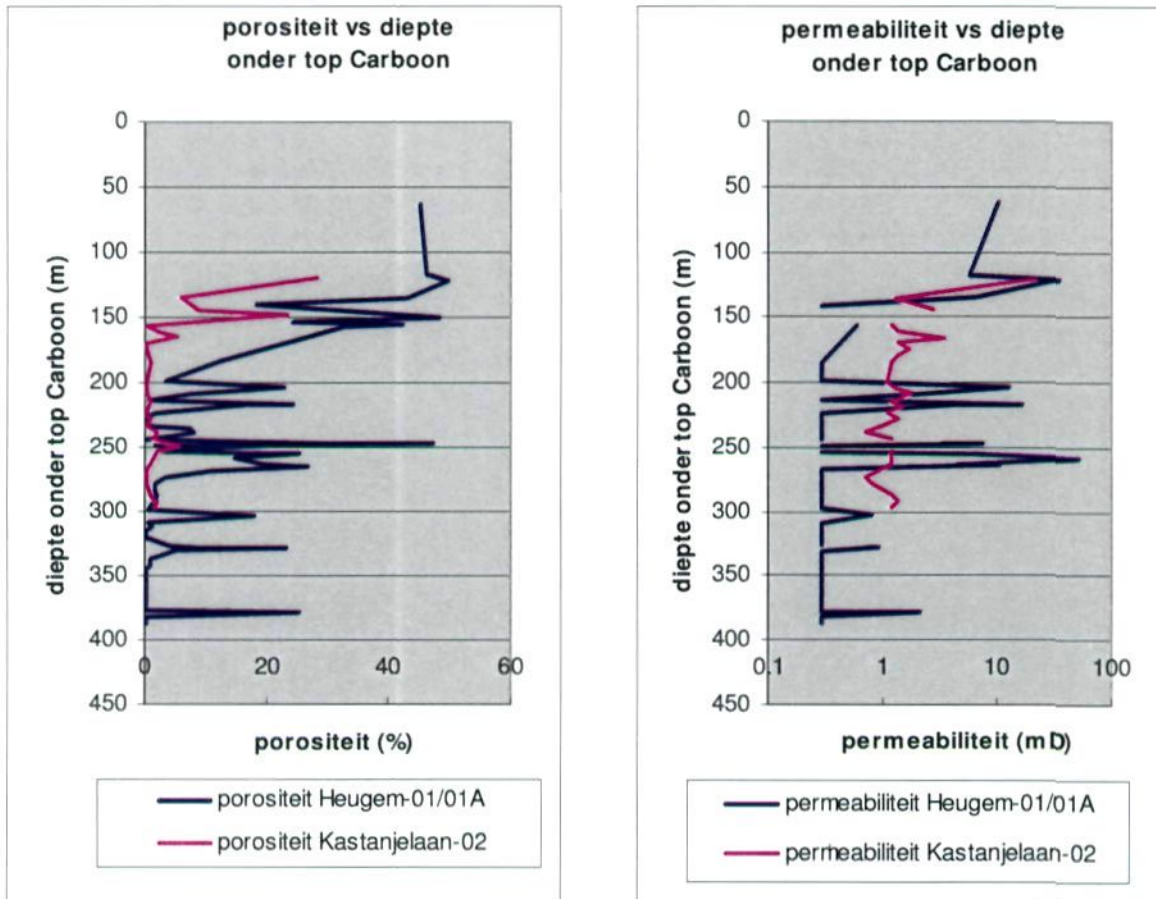
3.4.3 *Formatie van Gulpen (Boven-Krijt)*

De doorlatendheid van de Formaties van Gulpen / Maastricht wordt sterk bepaald door spleten en breuken. De primaire doorlatendheid op een diepte van ca. NAP is in het laboratorium bepaald op ca. 0,0001 m/dag (IWACO, 1997). Pompproeven in de ENCI-groef leverden doorlatendheden van 0,01 m/dag tot meer dan 1 m/dag op (IWACO, 1991).

RGD (1991) gaat uit van een primaire doorlatendheid van 0,75 m/dag op NAP +45 m, afnemend tot minder dan 0,05 m/dag op NAP, tengevolge van een afname van de spleetdichtheid. De zones met hoge doorlatendheden (meer dan 1 m/dag) leveren waarschijnlijk het meeste water maar niet duidelijk is wat de bijbehorende porositeit en bergingscapaciteit zijn, hetgeen een realistische modellering sterk bemoeilijkt.

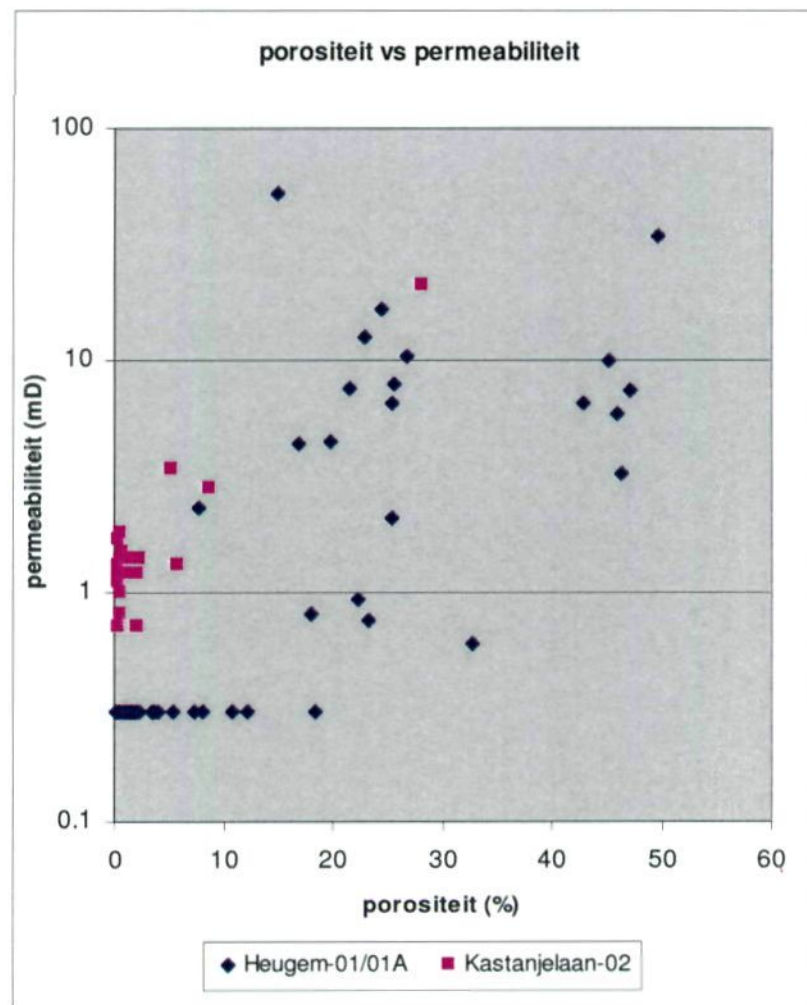
3.4.4 *Geohydrologische veldproeven*

Voor de situatie van de Diepe Winning wordt meer waarde wordt gehecht aan de pompproeven dan aan Packer-testen. Pompproeven worden uitgevoerd om de doorlatendheid van de formatie en het breuksysteem te meten. Met packertesten worden de doorlatendheid gemeten van het gesteente dat direct rondom het testinterval in de testput aanwezig is. Voor de analyse van stabiliteit van de groeievloer is het niet strikt noodzakelijk om een pomptest of een packertest uit te voeren.



Figuur 3.1 Gemeten porositeit (%) van Carboon in de boringen Kastanjelaan-2 en Heugem-01/01A (figuur links)

Figuur 3.2 Gemeten permeabiliteit (mDarcy) van Carboon in de boringen Kastanjelaan-2 en Heugem-01/01A (figuur rechts)



Figuur 3.3 De relatie porositeit (%) versus permeabiliteit (mDarcy) van de metingen in de boringen Kastanjelaan-2 en Heugem-01/01A

4 Breuken in en onder de groeevloer van de ENCI-groee

4.1 Werkmethode

In en rond de ENCI-groee zijn breukensystemen bestudeerd met:

- bestaande gegevens (RGD, 1988; Waverijn, 1990, TNO-NITG, 1999; archieven TNO); zie par. 4.2;
- interpretatie van seismische profielen (archieven TNO-NITG); zie par. 4.3;
- structureel-geologische analyse van breuken in de ENCI-groee (veldopname); zie par. 4.4.

4.2 Structureel-geologische eenheden in Zuid-Limburg

4.2.1 Tektonische geschiedenis van de regio

Varistische fase

In Fig. 4.1 zijn de structurele hoofdeenheden in Limburg aangeduid (TNO-NITG, 1999). De vorming van structurele eenheden worden gedefinieerd door tektonische bewegingen in de aardkorst. Tektoniek veroorzaakt verticale bewegingen en breukvorming.

De ENCI-groee ligt op het Zuid-Limburg Blok en wordt aan de westelijke grens met België begrensd door een diep gelegen breukzone (Bordière Breuk). Het Zuid-Limburg Blok is in feite het oostelijk deel van het Kempen Blok in België. Na het Carboon was dit gebied een hoog, met uitzondering van het Laat-Krijt en het vroege Tertiair.

Richting het zuidoosten zijn overschuivingen bij de Anticlinaal van Aken aanwezig (Fig. 4.1). Deze dominante zone loopt direct ten zuidoosten van de Belgisch-Nederlandse grens en wordt gekenmerkt door ZW-NO strekkende breuken. Deze zone wordt ook wel het Varistisch front genoemd en representeert de noordelijke begrenzing van de overschuivingstektoniek van de Varistische orogenese (gebergtevorming) tijdens het Laat-Carboon tot Vroeg-Perm. Het front vormt de scheiding tussen de sterk geplooid verbroken gesteenten in het zuiden en de minder geplooid en verbroken gesteenten ten noorden van het front. De Varistische breuken (Fig. 4.2) zijn ontstaan in de sedimenten van het Carboon voordat de Krijtkalk is afgezet.

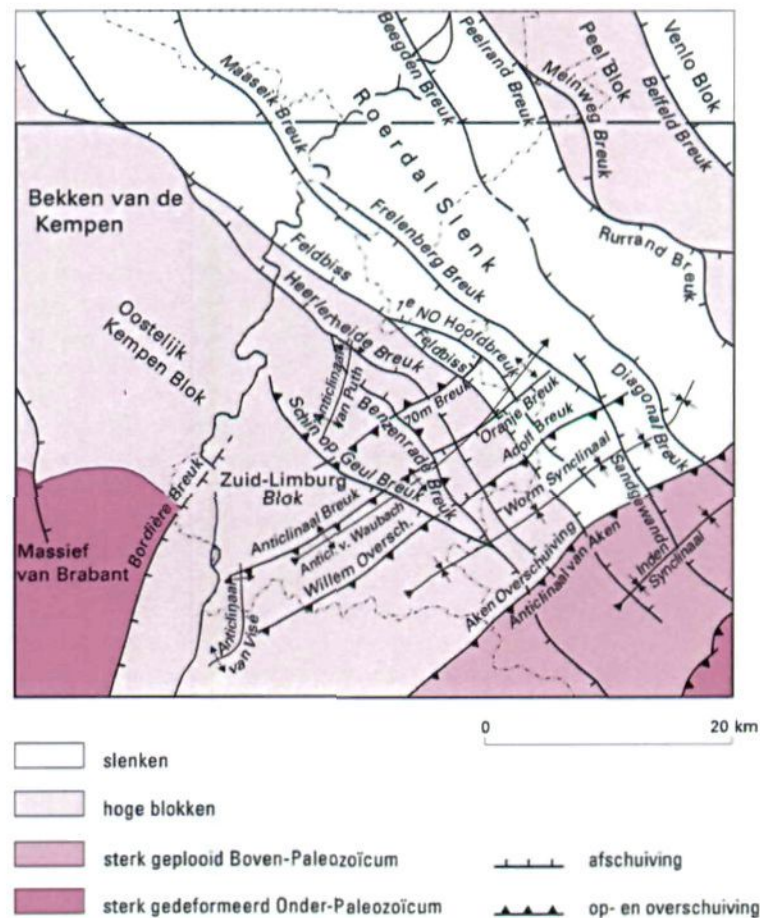
Na een lange periode van erosie en non-depositie gedurende het Perm, Trias en Jura werden de sedimenten van het Krijt in het gebied van de ENCI-groee afgezet. Het Zuid-Limburg Blok waren nu relatief lage eenheden waar mariene sedimenten konden accumuleren. Deze bestonden in het gebied van de ENCI-groee uit siltige kleien (Formatie van Vaals).

Alpiene Fase

De Alpiene (Laramische) tektonische fase maakten een eind aan de sedimentatie en activeerde de breukstructuren die in het Dinantien aanwezig waren. In de groee zijn twee breukzones bekend met een WNW-OZO strekking en een maximaal verzet van 3 m (Waverijn, 1990).

Er zijn aanwijzingen die duiden op een Midden-Tertiaire breukactivatie. Deze kunnen worden afgeleid aan breukverzet aan de basis van het Oligoceen die in de ENCI-groeve de sedimenten van de Krijtkalk bedekken.

In het Kwartair ving een periode aan waarin opheffing van het Zuid-Limburg Blok naar het noorden werd gekanteld (TNO-NITG, 1999).



Figuur 4.1 Kaart van de regionale structureel-geologische eenheden in Zuid-Limburg en de locatie van de ENCI-groeve (TNO-NITG, 1999)

4.3 Resultaten van interpretatie van beschikbare seismische lijnen

De seismische lijnen en de boringen zijn gecombineerd om de diepte van de top van het Carboon onder de ENCI-groef te maken. De volgende seismische lijnen zijn geïnterpreteerd: 8505 en 8509 (NEOM-lijnen) en LSC89-08 (Belgische Geologische Dienst). De seismische lijn LSC89-08D is van goede kwaliteit en loopt langs de Belgisch-Nederlandse grens ten westen van de groef.

Op deze lijn zijn breuken geïnterpreteerd die de top van het Carboon en diepere horizons verzetten. Aan de top van het Carboon zijn afschuivingsbreuken aanwezig. De richting van deze breuken is op grond van slechts één seismische lijn moeilijk te bepalen. Deze breukzone heeft een WNW-ESE richting op de Devoon-Carboon kaart van het Bekken van Kempen (2000, The Campine Basin, Vital Langenaeker), behalve de Bordière Breuk die een NNE-SSW richting heeft en die de oostelijke rand van het Massief van Brabant vormt. Deze Bordière Breuk komt op dieptes (ca. 2 km) ten westen van de ENCI-groef Nederland binnen. Het noordelijke verloop van deze breuk is in Nederland niet duidelijk vast te stellen. Deze breuken bij de Belgische grens ten zuidwesten van de ENCI-groef vertonen een verzet in de basis van het Krijt van 10 tot 25 m. Deze breuken in de basis van het krijt worden geïnterpreteerd als ondiepe randbreuken van de Bordière Breuk.

4.4 Structureel-geologische veldopname in de ENCI-groef

In de ENCI-groef zijn breuken en diaklazen aanwezig. Breuken zijn discontinuïteiten in het gesteente waarlangs verzet van de lagen heeft plaats gevonden. Diaklazen zijn natuurlijke spijtvlakken in het gesteente die ontstaan als gevolg van ontlasting van de spanning aan het oppervlak. Breuken en diaklazen zijn doorgaans in verschillende richtingen ontwikkeld. Breuken kunnen tot een zekere diepte continueren, terwijl de ontwikkeling van diaklazen met toenemende diepte vaak snel afneemt.

In de ENCI-groef is een structureel-geologische opname gemaakt van de belangrijkste breuken. De gegevens zijn volgens de moderne inzichten van de structurele geologie verwerkt en geïnterpreteerd. Dit heeft geresulteerd in een aantal mogelijke scenario's wat betreft de geometrie en voortzetting van de aan het oppervlak waargenomen breukpatronen in de ondergrond. Deze analyse is gebaseerd op veldwerk in de ENCI-groef, en op gegevens uit eerdere opnames in de groef die ons ten tijde van dit onderzoek ter beschikking stonden.

De breuken in de Krijtkalk van de ENCI-groef zijn niet continue ontwikkeld met eindige persistentie ⁴. Dit betekent dat er verschillende breukvlakken in een zone ontwikkeld zijn die niet continue door de groef lopen. Breuken vertonen in de krijtkalk zowel in horizontale als in verticale richting verspringen. Deze verspringen zijn in de groef duidelijk waarneembaar in de groefvloer van de ontgraving van NAP +10 m.

In Bijlage C.14 is een overzichtprofiel bijgevoegd door de groefvloer (die noord-zuid verloopt) en welke een indruk geeft van de waargenomen breuken in de ENCI-groef.

⁴ Persistentie = verbreiding van enkelvoudige breukvlakken

De volgende paragrafen geven een toelichting op de opname en de resultaten van de structureel-geologisch analyse.

4.4.1 Waarnemingen in de groeve

Op 11 en 14 juni 2002 is een opname gemaakt van de zichtbare breuken in de ENCI-groeve (Fig. 4.3). Breuken komen met name voor in het diepste deel (ca. +10 m NAP) en in de meest noordelijke uitloper van de groeve. De dichtheid en het verzet van de breuken is verreweg het grootst in het diepste deel (*Bijlage C.1*). Hieronder wordt de resultaten van de structureel-geologische opname gerapporteerd.

Bijlagen C.2 t/m C.4 laten de wand zien die de diepste ontgraving van de groeve aan de oostzijde begrenst (foto's gerangschikt van noord naar zuid). *Bijlagen C.5 t/m C.8* beslaan de westzijde (foto's gerangschikt van zuid naar noord). De onderste in de groeve ontsloten lithostratigrafische eenheid is de Kalksteen van Vijlen, die aan de bovenkant door de Horizont van Wahlwiller is begrensd. Daarboven zijn de Kalkstenen van Lixhe 1, Lixhe 2 en Lixhe 3 en het onderste gedeelte van de Kalksteen van Lanaye te zien. De overgangen tussen deze eenheden worden gemarkeerd door respectievelijk de Horizonten van Halembye 1, Boirs en Nivelles (Felder & Bosch, 2000). Waar aanwezig, zijn deze horizonten met blauwe lijnen op de *Bijlagen C.2 t/m C.8* aangegeven. Andere markante lagen zijn met zwarte lijnen gemarkeerd en genummerd.

De volgende belangrijke observaties aan breuken zijn relevant voor de analyse van de diepe winning en als volgt waargenomen:

1. Alle waarneembare breuken zijn genummerd en met rode lijnen aangegeven. Het gaat in alle gevallen om afschuivingen, welke met een horizontale rek worden geassocieerd. De verspringingen van de vrijwel horizontale lagen laten duidelijk het verticaal verzet langs de breuken zien. Dit verzet varieert van minder dan 5 cm (niet waarneembaar) voor breuken West 3-6, 8-9, 11 en 15 en Oost 4-6 en 9, tot meer dan 3 m voor breuk Oost 3. De meeste breuken doorsnijden de gehele groevewand, terwijl enkele binnen het profiel eindigen. Breuken West 10 en 11 eindigen in de groevewand, maar worden door een andere "en échelon" voortgezet. Ook vertakkingen van breuken komen dikwijls voor. Verder is de slenk, gevormd door breuken West 1 en 2 opvallend.
2. Van bovenaf zijn enkele breuken in de vloer van de groeve te zien. De foto in Fig. 4.6 is naar het westen genomen. Op de achtergrond is de westwand van de diepe ontgraving te zien. De strekking van de breuken staat ongeveer loodrecht op de hierboven genoemde profielen en is dus ongeveer WNW-OZO. Ook is zichtbaar dat de breuken in horizontale richting vaak eindig zijn. Dat blijkt ook uit het feit dat het breukenpatroon van de westwand niet is te verbinden met die van de oostwand.
3. In de oostwand van de diepe ontgraving is in de te zien dat de lagen enigszins gebogen zijn: aan de noordkant van het profiel helt de aansnijding van de lagen ca. 1,5° naar het noorden, terwijl deze aan de zuidkant vrijwel horizontaal zijn. Deze buiging van de lagen kan een gevolg van horizontale rek zijn geweest. Door middel van een opname van opzij van de oostwand is gepoogd deze buiging zichtbaar te maken (Fig. 4.5).
4. Uit de verkleuring van het gesteente rond de breuken is op te maken dat de permeabiliteit van de kalksteen, behalve door vuursteenlagen, voor een belangrijk deel

door breuken wordt bepaald. De breuken zijn doorgaans niet vlak, maar vertonen kleine krommingen en ondulaties⁵. Bij breukbeweging leiden deze onregelmatigheden tot openingen. Op verscheidene plaatsen is ter plekke van deze zogenaamde “releasing bends” een sterke uittredende waterstroming waargenomen (Fig. 4.4).

5. Na een inspectie van breukvlakken was duidelijk dat de cohesie van de breuken deels is hersteld, en dat de wrijvingshoek van het breukvlak ongeveer gelijk is aan die van de aangrenzende kalksteen.

6. In alle gevallen gaat het om brosse breuken. Dit betekent dat de kalksteen al verhard was vóór het ontstaan van de breuken.

7. De breuken zijn in horizontale richting geen lange rechte structuren, maar vormen een anastomoserende bundel van breuken die maar ten dele over een afstand van 200 m (van de ene zijde van de diepe afgraving naar de andere) met elkaar te correleren zijn. Dit is goed te zien op de groeievloer (Fig. 4.6).

4.4.2 *Vergelijking met bestaande informatie over breuken in de ENCI-groef.*

Gerapporteerde breuken in het Krijt in de buurt van de ENCI-groef komen voor in de volgende bronnen:

1. Geologische kaart van Zuid-Limburg en Omgeving (RGD, 1988). Hier zijn geen breuken in de ENCI-groef aangegeven. Van de breuken op ongeveer 1 km ten westen van de groef is het verzet niet in de kaart aangegeven.

2. Felder (1983). Op deze kaart is één noordhellende, ongeveer WNW-OZO strekkende breuk in het huidige diepste deel van de ENCI-groef aangegeven. Het verzet is maximaal 3 m en moet afnemen naar het WNW, omdat in die richting het einde van de breuk binnen de groef is ingetekend. Deze breuk zou overeen kunnen komen met de hier beschreven breuk Oost 3.

3. Waverijn (1990). Op deze kaart is een groot aantal breuken ingetekend, geconcentreerd in de twee zones die in onze analyse zijn gevonden. De breuken zijn over afstanden van honderd meter als recht ingetekend, en er is geen informatie in de kaart over verzet.

Geen van de informatie in deze drie bronnen is in strijd met onze gegevens. Het is echter wel duidelijk dat deze interpretaties onvolledig zijn en gezien moeten worden in de context van de tijd waarin ze zijn opgenomen, voordat de moderne methodes van structurele analyse van breuksystemen beschikbaar waren.

4.4.3 *Verplaatsingsgradiënten*

Wanneer men een breukvlak volgt, is de verplaatsing langs een breuk niet constant (zowel naar de diepte als horizontaal). Bij breuken in de aardkorst is de algemene trend dat de verplaatsing langs het breukvlak in alle richtingen afneemt van een maximale waarde (nabij het centrum) naar nul bij de uiteinden van de breukvlak.

De gradiënt waarmee de verplaatsing langs het breukvlak verandert hangt onder meer af van de shear-modulus van het gesteente en de spanningsverlaging die is geassocieerd met de breukbeweging (Muraoka & Kamata, 1983; Wibberley e.a., 1999). Volgens een overzicht van breuken van verschillende grootte en ontwikkeld in verschillende gesteentes (Wibberley e.a., 1999) kan de verplaatsingsgradiënt waardes aannemen

⁵ ondulatie = golving van breukvlakken

tussen 0,1 en 5 cm/m. Binnen een breukvlak kan de gradiënt variaties vertonen wanneer gesteentes van sterk contrasterende competentie/stijfheid worden doorsneden (Nicol et al., 1999). Zo zal binnen een breukvlak de verplaatsingsgradiënt in een relatief competente laag (bijvoorbeeld een harde kalksteen) gering, of zelfs gelijk aan nul, zijn, en wordt deze beduidend groter in de aangrenzende, relatief incompetente lagen (bijvoorbeeld een nauwelijks verharde klei).

Door van de waargenomen breuken in de ENCI-groeve de verplaatsingsgradiënten te meten, kan, indien de verplaatsing naar beneden toe kleiner wordt, een goede schatting worden gemaakt van de diepte van de breuk bereikt en van het verzet van dieper gelegen lagen. De verplaatsing van de breuken is gerelateerd aan de stratigrafische horizonten zoals bekend van Felder & Bosch (2000). Indien de verplaatsing naar beneden toe gelijk blijft of groter wordt, kan het minimale en maximale verzet op grotere dieptes worden vastgesteld.

4.4.4 *Gemeten verplaatsingen en verplaatsingsgradiënten*

In *Bijlage C.9* en *C.10*, resp. *C.11* en *C.12* zijn de gemeten verplaatsingen langs de breukvlakken, op verschillende dieptes ten opzichte van de Horizont van Wahlwiller, voor de breuken in de oostwand en in de westwand aangegeven. Er bestaat duidelijk een lineair verband tussen verplaatsing en diepte. De verplaatsingsgradiënten, zijn bepaald met behulp van lineaire regressie. De correlatiecoëfficiënten bedragen, met uitzondering van breuk Oost 2, meer dan 0,95. Voor een aantal breuken is de gradiënt negatief (verplaatsing neemt toe met de diepte), voor een aantal is deze positief (verplaatsing neemt af met de diepte), en voor enkele verandert de verplaatsing niet met de diepte. Afgezien van de breuken met een in het profiel constante verplaatsing, is in absolute zin de minimale gradiënt ongeveer 0,8 cm/m en de maximale gradiënt ongeveer 2,7 cm/m. *Bijlage C.13* geeft een totaaloverzicht van de verplaatsingsgradiënten.

Een gradiënt van nul betekent dat men met het centrum van de breuk te maken heeft, en dat de verplaatsing dus naar boven en naar beneden toe kleiner wordt. Daarnaast kan niet worden uitgesloten dat het de Formatie van Gulpen een relatief competente laag voorstelt, en dat de verplaatsing in een dieper gelegen, minder competente laag (bijvoorbeeld indien de Formatie van Vaals niet of nauwelijks verhard is) naar beneden toe groter wordt.



Figuur 4.3 Breuksystemen zoals zichtbaar in de diepe ontgraving in de ENCI-groeve



Figuur 4.4 Verkleuringen langs breuken in de ENCI-groeve



Figuur 4.5 Oostwand diepe ontgraving gezien vanaf het noorden



Figuur 4.6 Bodem en westwand huidige diepe ontgraving

4.4.5 Mogelijk verloop van breuken in de groeievloer

De oostwand van de diepe ontgraving met breuken en lithostratigrafische eenheden is opgenomen in een NNO-ZZW overzichtsprofiel (*Bijlage C.14*). De ligging van het profiel, dat het Dinantien tot en met het Kwartair bevat, is aangegeven in *Bijlage C.1*. De diepte van de lithostratigrafische eenheden is mede bepaald met behulp van de gegevens uit boringen 61F0323 en 61F0324. Op basis van de hierboven beschreven waarnemingen kunnen drie scenario's worden opgesteld wat betreft breukbewegingen in de ondergrond.

Onderstaande scenario's beschrijven drie structureel-geologische configuraties die waarschijnlijk worden geacht op basis van de waarnemingen aan breukverzetten (par. 4.4.4). Welke scenario werkelijkheid is, kan worden vastgesteld met een seismische opname in de ENCI-groeve.

Scenario 1: "Ondiepe breuk" Dit is het meest gunstige scenario (*Bijlage C.15*). Voor breuken met een in de groeve gemeten verplaatsingsgradiënt van nul neemt in de ondergrond de verplaatsing naar beneden toe af met de grootst mogelijke gradiënt van 2,7 cm/m. Breuk 1 eindigt dan op -6,7 m NAP binnen de Formatie van Gulpen, en breuk 3 verzet de top van de Formatie van Vaals met slechts 0,9 m. Binnen deze mogelijk relatief incompetente eenheid dooft de breuk uit. Breuk 2 is een vertakking van breuk 3. Breuken 7 en 8 vertonen in de groeve positieve verplaatsingsgradiënten van respectievelijk 0,79 en 1,24 cm/m, welke zich in alle drie scenario's tot op grotere diepte zullen voortzetten. Breuk 7 eindigt dan op een diepte van -22 m NAP en breuk 8 op -27 m NAP, in beide gevallen binnen de Formatie van Gulpen. De breukstructuur kan worden geïnterpreteerd als een zogenaamde "collapse crest", die het gevolg is van horizontale rek bovenin een naar boven toe convexe kromming van het lagenpakket.

Scenario 2: "Diepe breuk" Hierbij gaat het ook om een "collapse crest" structuur, maar nu zijn de verplaatsingsgradiënten in de ondergrond zo ongunstig mogelijk (*Bijlage C.16*). We hebben nu te maken met een kromming van het lagenpakket waarbij de horizontale rek zich tot op grotere diepte voortzet. Breuk 1 verzet op zijn minst de top van de Formatie van Vaals. Voor breuk 3 wordt de verplaatsing naar beneden toe groter met 2,7 cm/m, waardoor de top en de basis van de Formatie van Vaals met respectievelijk 3,3 en 4,0 m worden verzet. Ook ten zuiden van deze breuk hebben zich verschillende breuken ontwikkeld, die aan het oppervlak niet zichtbaar zijn en deels de Formatie van Vaals verzetten. In dit ongunstige scenario wordt dus de Formatie van Vaals verzet, maar maximaal enkele meters.

Scenario 3: "Ontkoppelde diepe breuk" In dit eveneens ongunstige scenario gaat het om secundaire breuken in de Formatie van Gulpen, die door horizontale rek zijn ontstaan boven een afschuiving in het Carboon (*Bijlage C.17*). Hierbij is uitgegaan van een relatief incompetente en ductiele Formatie van Vaals, hetgeen een "ontkoppeling" van de breuken aan de onder- en bovenkant van deze formatie kan veroorzaken. Dergelijke breukpatronen zijn in de literatuur uitgebreid beschreven (Withjack et al., 1995; Withjack & Callaway, 2000).

4.5 Aardbevingen in de regio

In en direct rond het gebied van de ENCI-groeve in Zuid-Limburg zijn aardbevingen bekend die een maximale magnitude hebben tot 5,0. De locaties en intensiteiten van

deze aardbevingen (periode 1970-2000) staan weergegeven in *Bijlage A.4* van de Relevante vragen voor de beoogde diepe winning zijn:

- 1- Zijn de breuken in de ENCI-groeve actief en doorsnijden deze breuken de Formatie van Vaals?
- 2- Welke effecten - en op welke wijze zijn aardbevingen in de regio van invloed op mijnbouwactiviteiten van de diepe winning in de ENCI-groeve?

Voor een analyse en optimale voorspellingen van de breukenstructuur in de ondergrond van de ENCI-groeve is een kritische analyse van deze gegevens over aardbevingen noodzakelijk, op basis waarvan de scenario's die in dit rapport gepresenteerd zijn met alle beschikbare gegevens in overeenstemming worden gebracht. Deze activiteiten worden in Fase 2, na uitvoering en interpretatie van seismische veldopname, uitgevoerd.

5 Inventarisatie geomechanische informatie

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschikbare informatie over geomechanische eigenschappen van de volgende eenheden beschreven van de Formatie van Zeeland, Formatie van Vaals, Formatie van Gulpen en de Formatie van Maastricht. Het betreft vooral kenmerken van sterkte, elasticiteit en gewichten die noodzakelijk zijn voor de berekeningen van stabiliteit van de verdieping van de groeevloer.

5.2 Geomechanische eigenschappen

ENCI-groeve

In 1982 zijn geomechanische testen uitgevoerd op monsters van de Formatie van Maastricht en de Formatie van Gulpen (Lanaye) uit de ENCI-groeve. De resultaten van de bepaling van dichtheden, watergehalte, UCS (ongesteunde druksterkte) en Young's modulus E zijn weergegeven in *Tabel 5.1*. De E-modulus lijkt een goede lineaire relatie te vertonen met de ongesteunde druksterkte (*Fig. 5.1*). Dit betekent dat bij hogere druk (en grotere diepten) de sterkte van het gesteente groter wordt. Bij ontgraving neemt de verticale druk af

Tabel 5.1 Resultaten van geomechanische testen van monsters van de F. van Maastricht en Gulpen (TU-Delft, 1983)

laagpakket	bulk dichtheid	droge dichtheid	watergehalte - verzadigd	porositeit - verzadigd	UCS - verzadigd	tangent Young's modulus E - verzadigd
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(%)	(kN/m ²)	(MN/m ²)
Meersen	1744,5	1370,1	26,9	47,5	1703,0	664,7
Meersen	1720,6	1331,0	30,2	49,4	1898,0	655,0
Meersen	1676,7	1320,3	26,7	47,4	1756,6	586,5
Meersen	1707,2	1291,7	32,0	49,7	1321,0	453,7
Meersen	1626,2	1343,0	24,4	47,3	1306,7	418,4
touwlaag	1690,2	1370,0	23,7	45,7	2447,9	739,9
Nekum	1526,0	1261,4	25,6	47,9	1075,4	294,6
Nekum	1609,6	1273,2	30,9	50,1	1554,5	926,7
Nekum	1638,6	1320,0	26,5	48,4	1618,4	588,1
Nekum	1834,6	1391,5	31,9	45,6	965,3	316,4
Emael	1612,9	1269,4	28,7	51,8	494,3	300,2
Emael	1663,2	1338,3	23,5	49,0	867,6	213,5
Emael	1632,0	1310,2	25,0	48,7	2053,7	915,0
Schieper	1676,1	1377,9	17,5	49,5	1990,1	1687,2
Schieper	1688,5	1340,4	25,7	46,9	1576,3	461,0
Gronsveld	1662,8	1259,8	33,3	49,3	1191,9	520,3
Valkenburg	1895,6	1581,3	17,2	40,4	1986,5	637,9
Valkenburg	1855,1	1592,7	15,8	30,9	2072,9	750,3
Lanaye	1809,4	1419,9	27,1	46,2	2753,2	935,7

Sibber-groeve

In Tabel 5.3 staan resultaten van laboratoriummetingen op monsters van de Emael kalksteen uit de Sibber-groeve. De monsters zijn genomen in de richting loodrecht op de bedding (Bekendam, 1998). De E-moduli zijn met verschillende methodieken geïnterpreteerd. Uit de resultaten blijkt duidelijk het verschil in watergehalte tussen verzadigde en onverzadigde monsters. Uit de resultaten van de analyse zijn conclusies getrokken over de invloed van waterverzadiging op de E-moduli (Bekendam, 1998).

Tabel 5.3 Resultaten van geomechanische testen van monsters uit de Sibber-groeve (Bekendam, 1998)

watergehalte	diepte	UCS	Unloading constants		Tangent constant		Secant constant	
(%)	NAP (m)	(MPa)	E (GPa)	v	E (GPa)	v	E (GPa)	v
verzadigd 1	24,2	2,76	-	-	1,43	0,35	1,33	0,10
" ... 2	24,48	2,70	3,25	0,21	1,54	0,37	1,40	0,10
" ... 3	24,67	2,59	3,29	0,19	1,45	0,31	1,38	0,18
" ... 4	24,22	2,68	3,53	0,27	1,50	0,33	1,22	0,19
natuurlijk 1	6,42	2,73	3,21	0,26	1,43	0,34	1,28	0,18
" ... 2	5,68	2,79	3,19	0,29	1,39	0,31	1,2	0,11
" ... 3	6,43	2,53	3,28	0,23	1,38	0,35	1,28	0,15
" ... 4	6,45	2,50	3,26	0,33	1,34	0,35	1,06	0,14

In Tabel 5.4 staan resultaten van treksterkte, uni-axiale en triaxiale sterktes van de gesteenten uit de Sibbergroeve. De sterkte neemt toe met de steundruk. Dit betekent dat ook de sterkte in de ENCI-groeve van de kalksteen en de kleistee zal toenemen met grotere diepteligging.

Met triaxiaaltesten is het brosse en ductiele gedrag van de Krijtkalk onderzocht van de kalksteen uit de Sibber-groeve (Bekendam, 1998). De overgang van bros naar ductiel gedrag trad op bij een steundruk tussen de 22 en 27 % van de axiale piek sterkte (pieksterkte bedraagt dan 1,1 tot 1,4 MPa).

5.3 Spreiding en anisotropie

De spreiding van geomechanische en sterkte-parameters van de Formatie van Gulpen en Maastricht is significant in Zuid-Limburg. Deze spreiding heeft vier oorzaken: (a) verschillende mineralogische samenstelling, (b) verschillende kalkgehalte, (c) verschillende watergehaltes/verzadiging en (d) natuurlijke porositeit.

Onderzoek naar verschillen in geomechanische sterkte in relatie tot de richting van de stratigrafische gelaagdheid (bedding) leidde Bekendam (1998) tot de conclusies dat de sterkte loodrecht op de gelaagdheid groter is dan de richting evenwijdig aan de gelaagdheid in de kalksteen. Bekendam (1998) concludeerde ook op basis van onderzoeksresultaten dat de anisotropie aanzienlijk varieert per stratigrafisch niveau.

De geomechanische parameters van de Formatie van Gulpen zoals die in de Diepe Winning aanwezig is, zal sterke overeenkomsten vertonen met de in dit hoofdstuk besproken parameters van de Formatie van Maastricht.

Omdat de lithologische ontwikkeling van de Formatie van Vaals geheel anders is dan de gesteenten van de Formatie van Gulpen en Maastricht, wordt verwacht dat deze sterktewaarden niet representatief zijn voor de sterkte van de Formatie van Vaals.

In het volgende hoofdstuk wordt aangegeven welke gegevens noodzakelijk zijn voor berekening van de stabiliteit van de groeievloer bij afgraving naar NAP -35 m.

Tabel 5.4 Resultaten van treksterkte, uni-axiale en triaxiale sterkte (Bekendam, 1998)

steundruk (MPa)		axiale piek sterkte (MPa)	axiale residuele sterkte (MPa)
treksterkte			
Brazilian	"True"		
-0,458	-0,366	0	0
-0,473	-0,378	0	0
-0,481	-0,384	0	0
-0,463	-0,368	0	0
-0,489	-0,392	0	0
-0,472	-0,376	0	0
UCS			
0		2,32	0,22
0		2,15	0,15
0		2,28	0,15
0		2,21	0,2
0		2,36	0,21
0		2,26	0,19
triaxiale sterkte			
0,1		2,4	0,61
0,1		2,65	0,86
0,2		3,48	1,76
0,2		3,03	1,47
0,3		3,46	1,72
0,4		3,70	2,30
0,5		3,87	2,87
0,6		4,14	3,03
0,8		4,16	3,8
0,8		4,83	3,77
0,8		4,46	3,89
1,1		5,25	4,59
1,1		4,98	4,18
1,4		5,12	5,12
1,4		5,36	5,36
1,4		5,20	5,20
1,4		4,57	4,57
1,8		5,01	5,01
1,8		4,82	4,82
2,4		4,91	4,91
2,4		5,10	5,10
2,4		5,18	5,18

6 Beschikbare gegevens en inschatting stabiliteit groevevloer

6.1 Diepteligging Onder-Carboon en F. van Vaals

Met behulp van de seismische interpretatie en geologische boringen wordt geconcludeerd dat de top Carboon in de ENCI groeve onregelmatig verloopt, zich tussen NAP -50 en -70 m bevindt en naar het noordwesten helt.

De dikte van de Formatie van Vaals varieert in de ENCI-groeve en bedraagt ca. 28 m. De top van de Formatie van Vaals is bekend uit de boringen en verloopt binnen de huidige concessie van de ENCI tussen ca. NAP -37 m en -50 m. Deze variatie in diepteligging kan het gevolg zijn van breukwerking.

6.2 Grondwaterkwaliteit en doorlatendheid

De beschikbare grondwatergegevens wijzen op brak grondwater in de Formatie van Zeeland (Carboon). In geval van opbarsting zal hierdoor waarschijnlijk sprake zijn van brak kwelwater in de groeve.

De tot nu beschikbare geohydrologische informatie is ontleend aan eenmalige waarnemingen, waarnemingen op afstand, op een grotere diepte, of op een (laboratorium-)schaal die niet direct aansluit op het probleem van de Diepe Winning.

Voor de analyse van stabiliteit van de groevevloer is het niet strikt noodzakelijk pompproeven uit te voeren. Om de doorlatendheid van de Formatie van Vaals te bestuderen kan in deze fase van de studie volstaan worden met laboratoriumproeven of met een packertest in een boring.

6.3 Stijghoogte

De stijghoogte in de Formatie van Zeeland ligt, uitgaande van de beschikbare gegevens, tussen NAP +48 en NAP +55 m. De stijghoogte in de Formatie van Gulpen ligt ter plaatse van de ENCI tussen NAP +44 m (dichtbij de Maas) en NAP +50 m (westrand van de groeve). Maatgevend voor het opbarstingsrisico van de groevevloer, is echter het bemalingsniveau om de groevevloer droog te houden. Uitgaande van een bemalingsniveau van NAP +5 m (het huidige niveau van de groevevloer) is het stijghoogteverschil 45 m. Afhankelijk van de gehanteerde einddiepte kan dit toenemen tot meer dan 80 m bij een einddiepte van NAP -35 m.

6.4 Grondwaterkwel

Er is sprake van een hydraulische weerstand in het onderste deel van de Formatie van Vaals en/of in het bovenste deel van de formatie van Zeeland. Soms lijkt deze weerstand vooral in de ene, dan weer in de andere formatie voor te komen, mogelijk speelt ruimtelijke variatie een belangrijke rol. Dit veroorzaakt een onzekerheid over de exacte diepte en grootte van deze weerstand op lokaal niveau (ENCI), welke met behulp van metingen zou moeten worden verkleind.

In de huidige diepte van de ENCI-groeve (2002) lijken geen aanwijzingen te bestaan voor lekkage van zout formatiewater dat opwelt vanuit grotere diepten. Ook is in de regio geen informatie gevonden die zou wijzen op (natuurlijk) zoutkwelwater.

6.5 Breuken in de groeievloer

Uit literatuur en de seismische interpretatie van een Belgische seismische lijn blijkt de aanwezigheid van breuken in het Krijt en het Carboon. Waarschijnlijk hebben deze breuken een WNW-ESE en/of een NNE-SSW richting (parallel aan de dieper gelegen Bordière Breuk).

Er bestaan geen seismische lijnen die voldoende informatie kunnen verschaffen over het voorkomen in de diepere delen van de groeievloer van de ENCI. Bepalend voor de probleemstelling zijn niet de primaire doorlatendheden van de gesteenten, maar de secundaire doorlatendheden onder invloed van breuken, spleten en diaklazen.

De waargenomen breuken in de huidige afgraving zijn alle afschuivingen die met horizontale rek geassocieerd worden. De verspringingen van de vrijwel horizontale lagen laten duidelijk het verticaal verzet langs de breuken zien. Dit verzet varieert van minder dan 5 cm. tot meer dan 3 m.

De structureel geologische analyse in de ENCI-groeve heeft geresulteerd in een aantal mogelijke scenario's over mogelijke geometrie en voortzetting van de aan het oppervlak waargenomen breukpatronen in de groeievloer:

- (1) *Ondiepe Breuk* - breuken in de groeievloer bereiken de top van de Formatie van Vaals, maar continueren zich nauwelijks dieper,
- (2) *Diepe Breuk* - breuken in de groeievloer zijn aanwezig in de Formatie van Vaals en continueren zich in het Carboon,
- (3) *Ontkoppelde Diepe Breuk* - breuken zijn aanwezig in de Formatie van Gulpen en de het Carboon, en worden verzet als gevolg van het plastische gedrag van de Formatie van Vaals.

De kennis over het voorkomen en diepteligging van breuken in de groeievloer is onvoldoende. Hiervoor is aanvullend seismisch onderzoek in de ENCI-groeve noodzakelijk.

De combinatie van een stijghoogteverschil van enkele tientallen meters, de mogelijke aanwezigheid van breuken die doorlopen tot in de Formaties van Vaals en Zeeland en mogelijk een verhard en daardoor broos karakter van de Formatie van Vaals resulteren in de inschatting dat er een niet verwaarloosbaar kans op opbarsten van de groeievloer en daaropvolgende aanzienlijke toename van brakke kwel ontstaat bij verdere ontgraving naar NAP -35 m.

6.6 Beschikbaarheid informatie en inschatting stabiliteit groeievloer

In Tabel 6.1 staat per geologische formatie samengevat welke gegevenstypen voldoende en welke onvoldoende aanwezig zijn voor deze studie.

De informatie van lithologische ontwikkeling van de formaties is voldoende. De informatie over het Carboon is onvoldoende, maar zal worden aangevuld worden met de geplande boringen in de ENCI-groeve.

Geomechanische parameters zijn onvoldoende bekend – van de formaties van Gulpen, Vaals en Zeeland – ten einde adequate en betrouwbare berekeningen over de stabiliteit van de groeievloer uit te voeren. Monsters voor laboratoriumtesten zijn gepland binnen het projectplan.

Grondwaterkwaliteit is onvoldoende bekend in de Formatie van Vaals en het Carboon. Monsternamen zijn eveneens gepland binnen het projectplan.

De kennis van doorlatendheid van alle formaties is onvoldoende voor de berekeningen van zoutwaterkwel. Hiervoor is speciale aandacht vereist binnen de uitvoering en planning van veldwerk.

De kennis van de aanwezigheid van breuken in de groeievloer van de toekomstige Diepe Winning van de ENCI is onvoldoende. Hierdoor is aanvullend seismisch onderzoek noodzakelijk.

Tabel 6.1 Overzicht beschikbare gegevenstypen

geologische formatie	lithologie	vol., gewicht en grondspanningen	geomechanische gedrag van gesteente-materiaal	grondwater-kwaliteit	doorlatendheid	aanwezigheid breuken
F. van Maastricht	kalksteen (met vuursteen)	voldoende	voldoende	voldoende	n.v.t.	n.v.t.
F. van Gulpen	kalksteen (gedeeltelijk met vuursteen)	onvoldoende (niet noodzakelijk)	onvoldoende	voldoende	onvoldoende	verkend aan maaiveld
F. van Vaals	kleisteen	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende
F. van Zeeland	kleisteen (onvoldoende info)	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende	onvoldoende

Gepland in fase 2 (boringen)	Gepland in Fase 2	Gepland in Fase 2	Gepland in Fase 2	Gepland in Fase 2	Laboratorium gepland in fase 2 (veldproeven nog niet gepland)	Geofysische verkenning groeiveer
------------------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	---	----------------------------------

7 Eindconclusies

Op basis van de inventarisatie van gegevens over de grondlagen en de situatie van de ondergrond in de ENCI-groeve bestaat er een concrete kans op opbarsten van de groeievloer als gevolg van een verdiepte afgraving.

De kans op opbarsten van de groeievloer gedurende afgraving naar grotere diepten kan niet worden gekwantificeerd zonder aanvullende gegevens.

Op de berekeningen van stabiliteit en de kansbepaling op openbarsten uit te kunnen voeren zijn verkennende boringen noodzakelijk om grondmonsters te verzamelen en speciale metingen te kunnen doen.

Verkenning van breukstructuren in de huidige groeievloer heeft de hoogste prioriteit binnen het lopende onderzoek naar de stabiliteit van de groeievloer.

8 Aanbevelingen vervolgonderzoek

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan die van belang zijn om de stabiliteit van de groeievloer van de Diepe Winning te kunnen analyseren. De activiteiten die niet zijn opgenomen in het projectplan van TNO (NITG 10.142) staan cursief weergegeven.

Het volgende geofysisch onderzoek wordt aanbevolen om het voorkomen en het verloop van breuken in de groeievloer van de Diepe Winning op te kunnen sporen (ten einde vast te stellen welke breukenscenario in het geomechanisch model gebruikt zal worden):

- *Uitvoering en opname van de mogelijke breukstructuren in de groeievloer met hoge resolutie seismiek (HRS). Met deze methode kunnen breuken worden opgespoord met een dieptebereik van 50 tot 150 m diepte.*

Het volgende geomechanisch onderzoek en meetprogramma wordt aanbevolen:

- Uitvoering van geomechanisch laboratoriumonderzoek om volumieke gewichten, sterkte en trektesten met het monstermateriaal uit de geplande boringen (en eventueel breukvlakken die aanwezig zijn in grondmonsters van de Formatie van Vaals).
- Uitvoering van in-situ grondspanningen in de Formatie van Vaals en zo mogelijk in de Formatie van Zeeland en Gulpen.
- Een boring waarmee gesteentemonsters van de Formatie van Vaals genomen worden, dient geplaatst te worden in een breukzone van de ENCI-groeve.

Het volgende geohydrologisch meetprogramma wordt aanbevolen om de grondwaterstroming en -kwaliteit voldoende te kunnen onderzoeken:

- Plaatsing van filters, respectievelijk boven- en onderin de Formatie van Vaals en ca. 10 m onder de top van de Formatie van Zeeland te einde de huidige verschillen in stijghoogte te kunnen meten.
- Filters worden bij voorkeur op dezelfde locatie aangebracht om horizontale variaties uit te sluiten. De locatie moet een 'worst case' representeren, vanuit geohydrologisch oogpunt betekent dit een (met behulp van seismiek aan te tonen) breuk of doorlatende zone in de Formaties van Vaals en/of Zeeland.
- Meting van doorlatendheid van minimaal de Formatie van Vaals. De waarde van uitgebreide pompproeven in de ENCI-groeve zal niet groot zijn ten behoeve van de studie naar de stabiliteit van zoutkwelwater in de groeievloer.
- Isotopenanalyse van het water in de filters, om leeftijdsverschillen en eventueel migratietijden en herkomst van grondwater vast te stellen (uit de Maas, Krijt en/of Carboon).

- Chemische bemonstering en analyses op macro-ionen en geleidingsvermogen van alle in het gebied aanwezige en nieuw geplaatste peilbuizen, de pompvijvers en het Maaswater. Door deze monsters te nemen en te analyseren wordt informatie verkregen over de tussenliggende geohydrologische weerstanden van de grondlagen.
- *Wanneer een geringe weerstand wordt vermoed, kunnen tracerproeven worden uitgevoerd om de migratietijd tussen de filters vast te stellen. In combinatie met de stijghoogteverschillen kan de weerstand dan worden berekend.*

9 Literatuur

Bless, M.J.M. et al. (1981) Preliminary report on Lower Tertiary, Upper Cretaceous and Dinantian-Famennian rocks in the boreholes Heugem-1/1a and Kastanjelaan-2 (Maastricht, The Netherlands). Mededelingen Rijks Geologische Dienst 35-15: 333-415.

De Wit (1988) De invloed van discontinuïten op de grondwaterstroming in de kalksteenformaties van Zuid-Limburg. TU-Delft 1988

Felder, W.M. (1983) Overzichtskaart gebied St.Pietersberg, Rapport OP5730-3.

Felder, P.J. & P.W. Bosch (2000) Krijt van Zuid-Limburg. Geologie van Nederland, deel 5, pp. 192

Glasbergen, P. (1985) The origin of groundwater in Carboniferous and Devonian aquifers at Maastricht. Geologie en Mijnbouw 64:123-129.

IWACO (1991) Geohydrologisch onderzoek grondwateronttrekkingen ENCI Nederland BV en KNP Maastricht BV. Eindrapport 331.8940.

IWACO (1997) Hydrologisch onderzoek ten behoeve van de proefontgraving tot een diepte van NAP -35 m. Eindrapport 335.70730.

Kimpe, W.F.M. et al. (1978) Paleozoic deposits east of the Brabant Massif in Belgium and in the Netherlands. Meded. Rijks Geol. Dienst, 30, p. 37-103

Kimpe, W.F.M. (1980) Hydrogeologie. In: Kuyl, O.S. Toelichting bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Heerlen (62W+62O), Rijks Geol. Dienst, p. 132-142

Krings, S. & H.R. Langguth (1987) Hydrology of Thermae boreholes (South-Limburg), Ann. Soc. Belgique, 110, p.85-95

EUREGIO (2000) MAAS/RIJN, LGIH-ULH, LISEC & TNO-NITG. De kwaliteit van het grondwater in de watervoerende lagen in de provincies Nederlands Limburg, Belgisch Limburg en Luik. Rapport LGIH IRG/2000-01, LISEC CV-2000-7510-R-MJ-Interreg, NITG 00-224-A.

Muraoka, H. & Kamata, H. (1983) Displacement distribution along minor fault traces, J. Struct. Geol. 5(5), 483-495.

Nicol, A., Watterson, J., Walsh, J. J. & Childs, C. (1996) The shapes, major axis orientations and displacement patterns of fault surfaces, Journal of Structural Geology 18, 235-248.

Provincie Limburg (1989) Grondwaterbeschermingsplan, Maastricht, 136, pp.

Rijks Geologische Dienst (1988) Geologische kaart van Zuid-Limburg en Omgeving (1:50.000)

TNO-NITG (1999) Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland - Toelichting bij Kaartblad XV: Sittard-Maastricht), 103 pp.

TNO-GG (1990) Hydrologische Systeemanalyse Noord- en Midden-Limburg. Rapport OS 91-13-A.

TU-Delft (1983) Engineering geological properties of Maastrichtien chalk, ENCI-quarry, Maastricht

Van Rooijen, P. (1989) Grondwater in Limburg, Grondboor en Hamer, nr. 43, p.607-616

Waverijn, C.G. (1990) De geohydrologische evaluatie van het watervoerende kalksteenpakket in de ENCI-groeve, MSc-thesis TU Delft.

Wibberley, C.A.J., Petit, J-P & Rives, T. (1999) Mechanics of high displacement gradient faulting prior to lithification, J. Struct. Geol. 21, 251-257.

Withjack, M.O. & Callaway, S. (2000) Active normal faulting beneath a salt layer: an experimental study of deformation patterns in the cover sequence, AAPG Bulletin 84 (5), 627-651.

Withjack, M.O., Islam, Q.T. & La Pointe, P.R. (1995) Normal faults and their hanging-wall deformation; an experimental study, AAPG Bulletin 79(1), 1-18.

Zuurdeeg, B.W. (1981) Het mineraalwater van Maastricht. Vening Meinesz Laboratorium voor Geochemie, Rijksuniversiteit Utrecht, 63 pp.