



**Vlaanderen**  
is omgeving



## **D6 Mogelijk gebruik van de diepe ondergrond in Vlaanderen**

 **Deelrapport 6**

**DEPARTEMENT  
OMGEVING**

[omgevingvlaanderen.be](http://omgevingvlaanderen.be)

## D6. Mogelijk gebruik van de diepe ondergrond in Vlaanderen

Deze studie geeft een overzicht van het potentieel van verschillende mogelijke activiteiten in de diepe ondergrond in Vlaanderen op middellange (voor 2050) en lange termijn (na 2050).

---

Dit rapport bevat de mening van de auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse Overheid.

---

## COLOFON

### Verantwoordelijke uitgever

Toon Denys  
Departement Omgeving  
Vlaams Planbureau voor Omgeving  
Koning Albert II-laan 15 bus 553, 1210, 1000 Brussel  
vpo.omgeving@vlaanderen.be  
www.omgevingvlaanderen.be

### Auteurs

Kris Piessens – Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst  
Kris Welkenhuysen – Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst  
David Lagrou – Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Belgische Geologische Dienst

### Publicatiedatum

2 juni 2025

### Depotnummer

D/2025/3241/122

### ISBN nummer

9789040304781

### Wijze van citeren

Piessens, K., Welkenhuysen, K., Lagrou, D. (2025). D6. Mogelijk gebruik van de diepe ondergrond in Vlaanderen. In, *Maatschappelijke impact van het gebruik en beheer van de Vlaamse diepe ondergrond*. Departement Omgeving. Vlaams Planbureau voor Omgeving.

## PARTNERS



Universiteit  
Antwerpen

## MANAGEMENTSAMENVATTING

Het potentieel van de diepe ondergrond (dieper dan -500m TAW) van Vlaanderen hangt nauw samen met de geologische eenheden die daar aanwezig zijn. De individuele eigenschappen van deze eenheden worden bepaald door hun ontstaan en geologische geschiedenis. Eenheden die op deze manier onderscheiden worden, worden lithotektonische eenheden genoemd. Het oudste van deze eenheden in Vlaanderen is het Massief van Brabant, dat grotendeels samenvalt met het Brabants Orogeen. Deze eenheid vormt voor een groot deel (ongeveer een driehoek tussen de kust, Antwerpen en de taalgrens) de diepe ondergrond van Vlaanderen. Ten noordoosten hiervan ligt het Massief van Brabant dieper, en maken ook jongere eenheden deel uit van de diepe ondergrond. Het Kempens Post-Brabantisch Bekken is gekend omdat de kalkstenen ervan minstens lokaal goede reservoir eigenschappen bezitten, het nog jongere Kempens Subvoorlandbekken is gekend omwille van de steenkoolafzettingen die in de 20<sup>ste</sup> eeuw ontgonnen werden, maar heeft nog steeds potentieel voor koolwaterstofwinning. In en rond de Roerdalslenk, die het uiterste noordoosten van Vlaanderen doorsnijdt, lijken de siliciklastische afzettingen in het Trias-Jura Riftbekken interessante reservoirmogelijkheden te bieden. De jongste afzettingen in de diepe ondergrond behoren tot het Kempens Krijtbekken en het Zuidelijk Noordzeebekken.

Deze studie geeft een overzicht van het potentieel van verschillende mogelijke activiteiten in de diepe ondergrond in Vlaanderen op middellange (voor 2050) en lange termijn (na 2050). In deelrapport D7 wordt bepaald wat de geologische, economische, milieu en sociale impact is van mogelijke activiteiten in de diepe ondergrond op middellange termijn. De lange termijn impact wordt kwalitatief besproken in deelrapport D7.

Geothermie of aardwarmte is de energie die in de vorm van warmte in de ondergrond zit opgeslagen. De term geothermie verwijst naar alle toepassingen die op een of andere manier gebruik maken van deze ondergrondse warmte. De Kempen werd historisch verkend voor geothermie, en in het voorbije decennium werden deze inspanningen hervat. Twee doubletsystemen zijn momenteel in proeffase (Balmatt te Mol en Janssen Pharmaceutica te Beerse). Beide werden uitgevoerd in kalksteenlagen van het Kempens Post-Brabantisch Bekken, maar met het verschil dat Beerse binnen de driehoek Heibaart-Turnhout-Poederlee ligt, waar goede reservoir eigenschappen meer frequent voorkomen. Ook op andere locaties in de Kempen zijn projecten in voorbereiding die zich zowel op dezelfde geologische eenheid als jongere eenheden richten.

Een ander type geothermieprojecten, de zogenaamde éénputsgeothermieprojecten, zijn weinig afhankelijk van reservoir eigenschappen en richten zich op het Massief van Brabant, maar kunnen ook in eenheden met andere eigenschappen worden toegepast, zoals in het Kempens Krijtbekken. De hoeveelheid warmte aanwezig in reservoirs geschikt voor doubletsystemen wordt in literatuur geschat op  $19 \times 10^9$  GJ. Deze schattingen zijn nog aanzienlijk hoger voor éénputs systemen. De kadering van deze schattingen is echter belangrijk: dit is aanwezige warmte, en slechts een fractie ervan is winbare warmte. Deze fractie is momenteel onbekend, maar het is aannemelijk dat deze voldoende groot is om van diepe geothermie een interessante optie te maken.

Warmteopslag is een techniek waarbij overschotten aan warmte ondergronds worden opgeslagen om later gebruikt te worden. De techniek sluit aan bij geothermie, maar heeft vaak een specifieke uitwerking of toepassing. Warmteopslag in de diepe ondergrond wordt momenteel niet toegepast in Vlaanderen. Een specifiek voorbeeld dat wordt uitgewerkt in context van deze studie is de voormalige mijn van Beringen, waar naar schatting 135 GWh aan warmte opgeslagen kan worden.

Een belangrijke huidige activiteit in de diepe ondergrond van Vlaanderen is de seizoenale opslag van aardgas. De opslaglocatie te Loenhout is de enige in Vlaanderen, maar ook in België. Om aardgas ondergronds op te slaan is een geschikte koepelstructuur nodig die op natuurlijke wijze het ontsnappen van aardgas verhindert. Te Loenhout is dit de koepel van Heibaart, waarvan de reservoirgesteenten gevormd worden door dezelfde kalkstenen van het Kempens Post-Brabantisch Bekken die aangewend wordt voor geothermieprojecten. In totaal kan hier maximaal tussen 7.6 en 9.2 TWh aan aardgas opgeslagen worden. Er zijn aanwijzingen dat er in de ondergrond van de Kempen andere geschikte koepelstructuren bestaan, maar deze zijn onvoldoende verkend.

Ondergrondse opslag van waterstof is een belangrijke optie voor de toekomst, en de koepel van Heibaart wordt momenteel onderzocht of deze hiervoor geschikt is. Omwille van de lagere dichtheid van waterstof zou de hoeveelheid opgeslagen energie te Loenhout lager zijn dan voor aardgas (3.2 TWh i.p.v. 7.6 TWh). Indien opslag van waterstof (cf. waterstofeconomie) in de toekomst realiteit wordt, verhoogt dit mogelijk de druk op het vinden van bijkomende geschikte koepelstructuren.

Geologische opslag van CO<sub>2</sub> is een andere activiteit die gebruik maakt van de opslagcapaciteit van de diepe ondergrond. Het doel is hier echter permanente opslag, en van aanzienlijk grotere volumes dan voor de opslag van aardgas of waterstof. De ondergrond van Vlaanderen biedt verschillende mogelijkheden die ook in internationale databanken gepubliceerd werden. De geschatte hoeveelheden kunnen een nuttige bijdrage leveren, maar de verschillende opslagopties zijn tevens onvoldoende verkend om definitieve uitspraken te doen zonder verdere gerichte verkenning van de ondergrond.

Voor de berging van langlevend en hoogradioactief afval wordt momenteel door NIRAS een dieptebereik van 200 tot 600 m vooropgesteld, dus mogelijk zeer kort bij of net onder de grens van de diepe ondergrond. De galerijen hiervoor zouden geconstrueerd worden in afzettingen of gesteenten met zeer lage doorlatendheid, zoals plastische kleien van het Zuidelijke Noordzeebekken of weinig doorlatende gesteenten van het Massief van Brabant. Op basis van gepubliceerde schattingen moet ongeveer 15000 m<sup>3</sup> volume geborgen worden, waarvoor 62500 m aan galerijen nodig zou zijn.

Een weinig verkende, maar geopperde optie voor de ondergrond van Vlaanderen is de opslag van potentiële energie. Hiervoor zouden artificiële tunnels worden geconstrueerd, bijvoorbeeld in het Massief van Brabant, waarin energie opgeslagen kan worden door samendrukken van gas (bv. lucht) of het verpompen van water in combinatie met een reservoir aan de oppervlakte. Illustratief wordt berekend dat om het dagelijks energieverbruik van alle Vlaamse gezinnen (25000 MWh) te bufferen door dergelijke opslag, een ondergronds reservoir van 20 Mm<sup>3</sup> op een diepte van 500 m nodig zou zijn. Dit voorbeeld toont voornamelijk aan dat het ondergronds ruimtebeslag niet de beperkende factor vormt, maar dat de bovengrondse factoren de schaal van een dergelijk project zouden bepalen.

Vlaanderen heeft geen of nauwelijks netto drinkwatertekorten op jaarbasis, maar kent wel seizoensgebonden lokale tekorten, met name in de kuststreek en meer algemeen de provincie West-Vlaanderen. Tijdelijke ondergrondse opslag van drinkwater in een aquifer (*ASR, Aquifer Storage and Recovery*) is een mogelijkheid die interessanter is dan het aanleggen van bijkomende transportcapaciteit. De eerste verkenningen en proefprojecten vinden plaats in het Massief van Brabant (meest recent nabij Aalst). Deze initiatieven zijn relatief ondiep, maar zouden, indien succesvol, ook toegepast kunnen worden in de diepe ondergrond.

Tussen 2011 en 2013 piekte internationaal de interesse naar schaliegas, met mogelijkheden die zich in Vlaanderen in het Kempens Subvoorlandbekken situeren. De beperkte analyses van de organisch-rijke basislagen van dit bekken (Formatie van Chokier) lijken eerder ongunstig. Schalies komen ook voor in de steenkoolsequenties, waar ze technisch samen met koolbedmethaan gewonnen zouden kunnen worden.

Op basis van dit overzicht zijn de meest waarschijnlijke activiteiten die ontwikkeld kunnen worden in de diepe ondergrond van Vlaanderen op middellange termijn (voor 2050): diverse geothermieprojecten, opslagprojecten voor waterstof of bijkomende opslagprojecten voor aardgas, warmteopslagprojecten, koude-warmteopslagprojecten, opslagprojecten voor CO<sub>2</sub>, opslag van drinkwater, berging van hoogwaardig radioactief afval in de Kempen, geothermische coproductie van lithium, en eventueel opslag van potentiële energie. Opslag van drinkwater, berging van radioactief afval en opslag van potentiële energie worden wel besproken maar maken geen deel uit van de modellering.

pagina 5 van 62



## INHOUDSTAFEL

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Geologisch raamwerk van Vlaanderen in een toegepast kader.....                     | 8  |
| 1.1   | Geologische limieten                                                               | 8  |
| 1.2   | Sedimentaire bekken                                                                | 9  |
| 1.2.1 | Brabants Bekken Systeem                                                            | 10 |
| 1.2.2 | Kempens Post-Brabantisch Bekken                                                    | 10 |
| 1.2.3 | Kempens Subvoorlandbekken                                                          | 11 |
| 1.2.4 | Zuidelijk Perm Bekken                                                              | 11 |
| 1.2.5 | Trias-Jura Riftbekken (voorloper Roerdal Rift Bekken)                              | 11 |
| 1.2.6 | Kempens Krijtbekken en het Bekken van Parijs                                       | 11 |
| 1.2.7 | Zuidelijk Noordzeebekken                                                           | 11 |
| 1.3   | Massief van Brabant                                                                | 12 |
| 1.4   | Brabants Orogeen                                                                   | 12 |
| 1.5   | Brabantse granietbatholieten                                                       | 13 |
| 1.6   | Roerdalslenk                                                                       | 13 |
| 2     | Geothermie.....                                                                    | 15 |
| 2.1   | Geothermische productiesystemen                                                    | 15 |
| 2.2   | Geothermie in het Kempens Post-Brabantisch Bekken                                  | 16 |
| 2.2.1 | Historische initiatieven                                                           | 16 |
| 2.2.2 | Huidige projecten                                                                  | 17 |
| 2.2.3 | Aangekondigde projecten                                                            | 18 |
| 2.3   | Geothermie in andere geologische eenheden                                          | 18 |
| 2.3.1 | Massief van Brabant                                                                | 18 |
| 2.3.2 | Kempens Subvoorlandbekken en het Trias-Jura Riftbekken                             | 19 |
| 2.3.3 | Krijtbekken                                                                        | 19 |
| 2.4   | Volumetrische schatting                                                            | 20 |
| 3     | Potentieel voor Warmteopslag .....                                                 | 23 |
| 3.1   | Buitenlands project                                                                | 23 |
| 3.2   | Volumetrische schatting                                                            | 23 |
| 3.2.1 | Koude-warmteopslag in steenkoolmijnen                                              | 24 |
| 3.2.2 | Warmteopslag in éénputsboringen                                                    | 25 |
| 4     | Opslag van aardgas.....                                                            | 26 |
| 4.1   | Kempens Post-Brabantisch Bekken                                                    | 26 |
| 4.1.1 | Project                                                                            | 27 |
| 4.1.2 | Potentiële projecten                                                               | 27 |
| 4.2   | Kempens subvoorlandbekken                                                          | 27 |
| 4.3   | Potentieel project in de Roerdalslenk                                              | 28 |
| 4.4   | Potentieel project in het Vlaams Krijtbekken                                       | 28 |
| 4.5   | Volumetrische schatting                                                            | 28 |
| 5     | Opslag van waterstofgas .....                                                      | 30 |
| 5.1   | Geologische opslag van waterstofgas                                                | 30 |
| 5.1.1 | Huidige stand van kennis                                                           | 30 |
| 5.1.2 | Algemene situering van de literatuur                                               | 31 |
| 5.1.3 | Gedrag van de primair afsluitende lagen                                            | 31 |
| 5.1.4 | Overige aandachtspunten                                                            | 32 |
| 5.2   | Kempens Post-Brabantisch Bekken                                                    | 33 |
| 5.2.1 | Proefproject                                                                       | 33 |
| 5.2.2 | Potentieel project                                                                 | 33 |
| 5.3   | Potentiële projecten in Andere geologische eenheden                                | 33 |
| 5.4   | Volumetrische schatting                                                            | 33 |
| 6     | Opslag van koolstofdioxide .....                                                   | 35 |
| 6.1   | Potentiële projecten in het Kempens Post-Brabantisch Bekken                        | 35 |
| 6.2   | Potentieel project in het Perm-Trias Riftbekken                                    | 36 |
| 6.3   | Potentiële projecten in Kempens subvoorlandbekken binnen en buiten de Roerdalslenk | 36 |
| 6.4   | Potentiële projecten in het Vlaamse krijtbekken                                    | 36 |

|      |                                                                             |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.5  | Volumetrische schatting                                                     | 37 |
| 7    | Berging van langlevend en hoogradioactief afval .....                       | 38 |
| 7.1  | Potentiële projecten in het Zuidelijke Noordzeebekken                       | 38 |
| 7.2  | Potentiële projecten in het Massief van Brabant                             | 38 |
| 7.3  | Andere mogelijkheden voor de Berging van radioactief afval                  | 39 |
| 7.4  | Volumetrische schatting                                                     | 39 |
| 8    | Opslag van Potentiële Energie in het Massief van Brabant .....              | 41 |
| 8.1  | Interesse in Vlaanderen                                                     | 41 |
| 8.2  | Volumetrische schatting                                                     | 41 |
| 9    | Ondergrondse Opslag van drinkwater .....                                    | 43 |
| 9.1  | Concept van ASR                                                             | 43 |
| 9.2  | Potentiële activiteiten in het Massief van Brabant                          | 43 |
| 9.3  | Volumetrische schatting                                                     | 43 |
| 10   | Steenkoolontginning in het Kempens Subvoorlandbekken .....                  | 45 |
| 10.1 | Historische activiteit                                                      | 45 |
| 10.2 | Volumetrische schatting                                                     | 45 |
| 11   | Potentiële projecten voor Mijmethaan in het Kempens Subvoorlandbekken ..... | 47 |
| 12   | Koolbedmethaan in het Kempens Subvoorlandbekken .....                       | 48 |
| 12.1 | Historisch proefproject                                                     | 48 |
| 12.2 | Potentiële projecten                                                        | 48 |
| 12.3 | Volumetrische schatting                                                     | 49 |
| 13   | Schaliegas in het Kempens Voorlandbekken.....                               | 50 |
| 14   | Mineralisaties .....                                                        | 51 |
| 14.1 | Potentiële projecten in het Kempens Post-Brabantisch Bekken                 | 51 |
| 14.2 | Potentiële projecten in het Massief van Brabant                             | 51 |
| 14.3 | Volumetrische schatting                                                     | 52 |
| 15   | Ontwikkeling van de diepe ondergrond doorheen de tijd .....                 | 54 |
| 15.1 | Historische projecten                                                       | 54 |
| 15.2 | Huidige projecten                                                           | 54 |
| 15.3 | Huidige proefprojecten                                                      | 54 |
| 15.4 | Potentiële projecten in voorbereiding                                       | 54 |
| 15.5 | Potentiële activiteiten tussen nu en 2050                                   | 54 |
| 15.6 | Potentiële activiteiten na 2050                                             | 55 |
| 16   | Referenties .....                                                           | 56 |
| 17   | Bijlage: Literatuurlijst waterstofopslag .....                              | 60 |

# 1 GEOLOGISCH RAAMWERK VAN VLAANDEREN IN EEN TOEGEPAST KADER

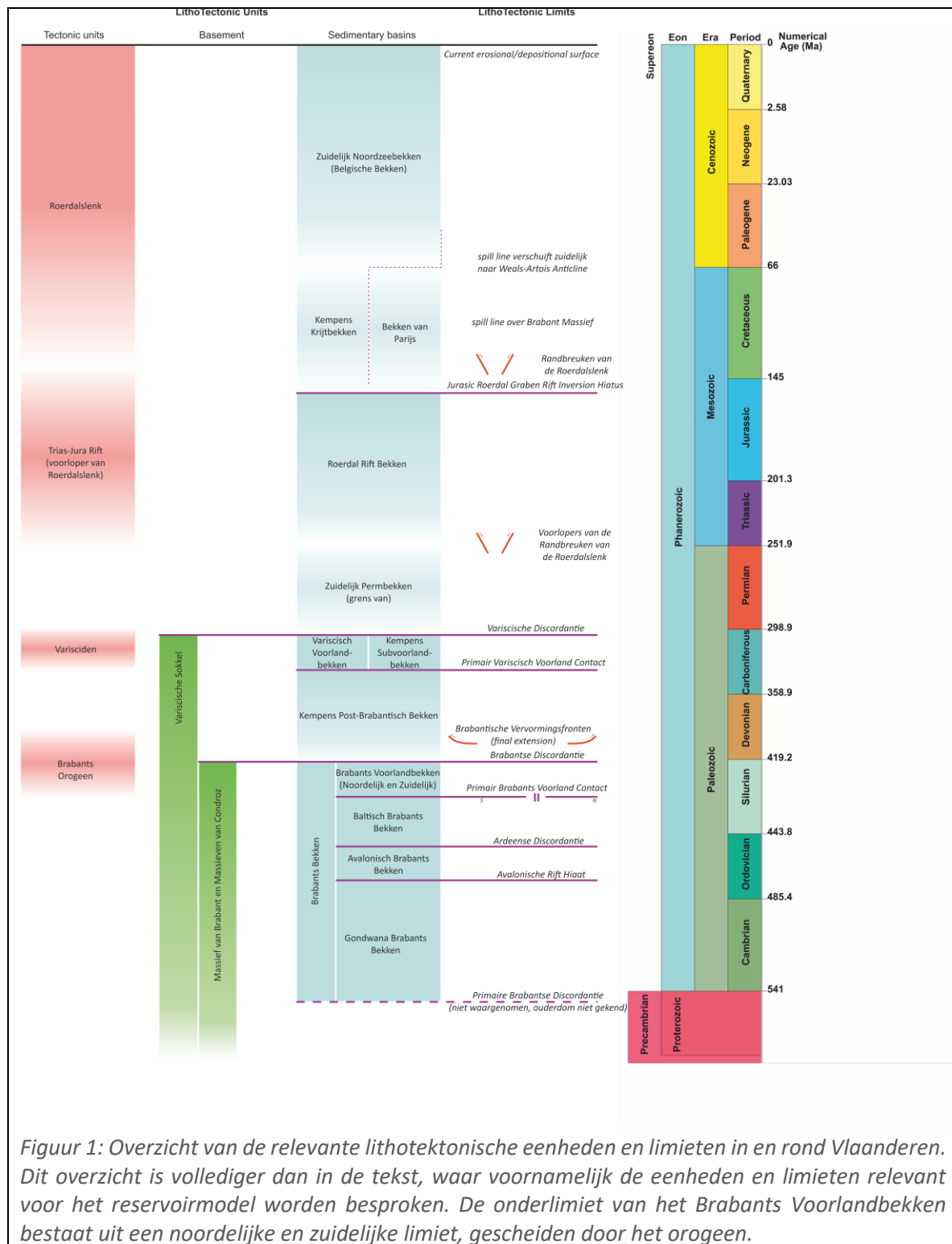
De geologie van de diepe ondergrond van Vlaanderen (dieper dan -500 mTAW) vormt het kader waarin verschillende ondergrondse activiteiten ontwikkeld kunnen worden. Wat mogelijk is en welke impact exploitatie heeft, is afhankelijk van de geologische eigenschappen van de verschillende geologische eenheden. Daarom wordt de geologie hier uiteengezet volgens de structurele raamwerk methode waarbij geologische eenheden worden gedefinieerd in functie van geologische limieten (Piessens et al., 2024). Het geologisch 3D model van Vlaanderen (G3Dv3) en de kaart van het Massief van Brabant vormen steeds een belangrijk deel van de onderliggende kennisbasis.

## 1.1 GEOLOGISCHE LIMIETEN

Betekenisvolle geologische limieten vatten de regionale geologische geschiedenis samen in een aantal geologische gebeurtenissen, en vormen zo een geologisch raamwerk dat de basis vormt voor de definitie van geologische eenheden (fig. 1). De volgende limieten zijn van belang om de Vlaamse diepe ondergrond te schetsen (waarbij Ma staat voor “miljoen jaar geleden”):

- Avalonische Rift Hiaat: riftfase die resulteerde in de afsplitsing van Avalonië van Gondwana (Tremadoc-Arenig (Ordovicium) hiaat, ~470 Ma).
- Ardeense Discordantie: hiaat in het onder Paleozoïcum in Vlaanderen die samenvalt met de botsing van Avalonië met Baltica (Caradoc (Ordovicium), ~450 Ma).
- Primair Brabants Voorland Contact: bij benadering de sedimentaire grens die verdieping van het Brabants Voorlandbekken inluidde (basis van de Formatie van Corroy (Siluur), ~430 Ma).
- Brabantse Discordantie: laat Siluur tot Midden Devoon discordantie (420 – 390 Ma), bedekt door conglomeraten (Formatie van Bois de Bordeaux, Lid van Mautiennes in het zuiden en Formatie van Booischot in het noorden).
- Brabantse Deformatiefronten: Op basis van de aanwezigheid en afwezigheid van tektonische splijting en plooien kunnen de deformatiefronten van het Brabants Orogeen afgebakend worden. Het onder Paleozoïcum van het zuidelijk deel van West-Vlaanderen valt buiten het orogeen, en in het noorden toont de boring van Kortgene (NL) wel synsedimentaire plooien, maar geen tektonische. In het oosten wordt het Brabants Orogeen waarschijnlijk afgesneden door de latere Midi Overschuiving.
- Primair Variscisch Voorland Contact: hiaat aan de basis van het Namuriaan, die de overgang van kalksteen naar overwegend siliciclastische sedimenten markeert (~325 Ma).
- Variscische Discordantie: hiaat die overeenkomt met de afvlakking na de Variscische orogenese in onze contreien (~300 Ma).
- Randbreuken van de Roerdalslenk: De Roerdalslenk wordt begrensd door randbreuken, waarvan de zuidelijke gedeeltelijk in Vlaanderen liggen, en een samenspel vormen van het Feldbiss Breuksysteem, het Veldhoven Breuksysteem en de Gilze-Rijen Breuk.





## 1.2 SEDIMENTAIRE BEKKENS

De sedimentaire sequentie van Vlaanderen is relatief compleet vanaf de oudst voorkomende sedimenten (vroeg Cambrium). Dit komt omdat dit gebied gedurende het grootste deel van de geologische geschiedenis sedimenten verzamelde en begroef. Deze sedimentatiegeschiedenis is gelinkt aan een opeenvolgende reeks van bekkens (fig. 1, 2).

### 1.2.1 Brabants Bekken Systeem

Het Brabants Bekken bestaat uit vier opeenvolgende bekkens waarvan de opeenvolgende sedimenten het onder Paleozoïcum van Vlaanderen vormen. Deze bekkens zijn het Gondwana Brabants Bekken, het Avalonisch Brabants Bekken, het Baltisch Brabants Bekken en het Brabants Voorlandbekken.

#### 1.2.1.1 Gondwana Brabants Bekken

Het Gondwana Brabants Bekken verzamelde tijdens het Cambrium en Onder Ordovicium mariene sedimenten langs de rand van Gondwana, die sedimentair overeenkomen met megasequentie 1 zoals bepaald door Verniers et al. (2002). De ondergrens is niet gekend. De bovengrens is een goed gedocumenteerd hiaat, het Avalonische Rift Hiaat, die een fundamentele onderbreking vormt in sedimentatie rond de grens Tremadoc-Arenig (Ordovicium). Deze onderbreking valt samen met de riftfase die Avalonië afscheidde van het supercontinent Gondwana.

#### 1.2.1.2 Avalonisch Brabants Bekken

Wanneer de sedimentatie hervat, blijft deze marien en siliciklastisch. Het Avalonisch Brabants Bekken bevindt zich langs de zuidrand van Avalonië. Uit subsidentiecurves lijkt de sedimentatie relatief constant te zijn. Tijdens het Caradoc komt een kort hiaat voor (1 My = miljoen jaar), die traditioneel gezien wordt als de grens tussen megasequentie 2 en 3 (Verniers et al., 2002), vervolgd kan worden tot in het Bekken van Wales, en verband houdt met het sluiten van de Iapetus Sutura. Voor het Avalonisch Brabants Bekken is dit een relatief korte verstoring, maar belangrijk omdat de sedimentatie grondig verandert en Avalonië ophoudt te bestaan als afzonderlijke tektonische plaat.

### 1.2.1.3 Baltisch Brabants Bekken

Het Baltisch Brabants Bekken wordt gekenmerkt door een cumulatie van sedimenten die grotendeels gelijke tred houdt met de lineaire begravingsgeschiedenis. De bovengrens van dit bekken is eerder vaag, want deze komt overeen met een fundamenteel belangrijke, maar eerder geleidelijke overgang naar de versnelde subsidentie van een voorlandbekken. Deze bovengrens is het Primaire Brabants Voorland Contact.

#### 1.2.1.4 Brabants Voorlandbekken

Op het einde van het Llandovery (Siluur) versnelt de sedimentatie merkbaar door verdieping van het bekken tot een voorlandbekken, gelinkt met de verkorting en opheffing van het Brabants Orogeen. Er worden twee voorlandbekkens gevormd, een vrij goed gekend en gedeeltelijk ontsloten zuidelijk bekken en een sporadisch aangeboord noordelijk bekken (zie discussie in Verniers et al., 2002). De bovengrens voor beiden wordt gevormd door de Brabantse Discordantie.

### 1.2.2 Kempens Post-Brabantisch Bekken

Het is nauwkeuriger om tijdens het boven Paleozoïcum in Vlaanderen twee opeenvolgende bekkens te onderscheiden, waarvan het Kempens Post-Brabantisch Bekken het vroegste is. De sedimenten in dit bekken zijn initieel siliciklastisch en worden bovenop de Brabantse discordantie afgezet, maar al snel vervangen door dominant carbonaathoudende sedimenten. Alhoewel de huidige rug van het Massief van Brabant overspoeld werd, fungeerde deze toch als een scheiding waardoor de Kempense stratigrafie verschilt van deze van de carbonaatbekkens aan de zuidzijde (in Wallonië). Het einde van het Dinantiaan komt overeen met het einde van dit carbonaatbekken door een hiaat (Namuriaan Hiaat) die samenhangt met de naderende Variscische orogenese in het zuiden. Lokaal leidt dit tot verkarsting van de carbonaten.



De overgang van het Kempens Krijtbekken naar het Zuidelijk Noordzeebekken is een geleidelijke overgang, zowel stratigrafisch als qua bekkensedimentatie. Vrijwel zeker valt de overgang niet samen met het einde van het Krijttijdperk.

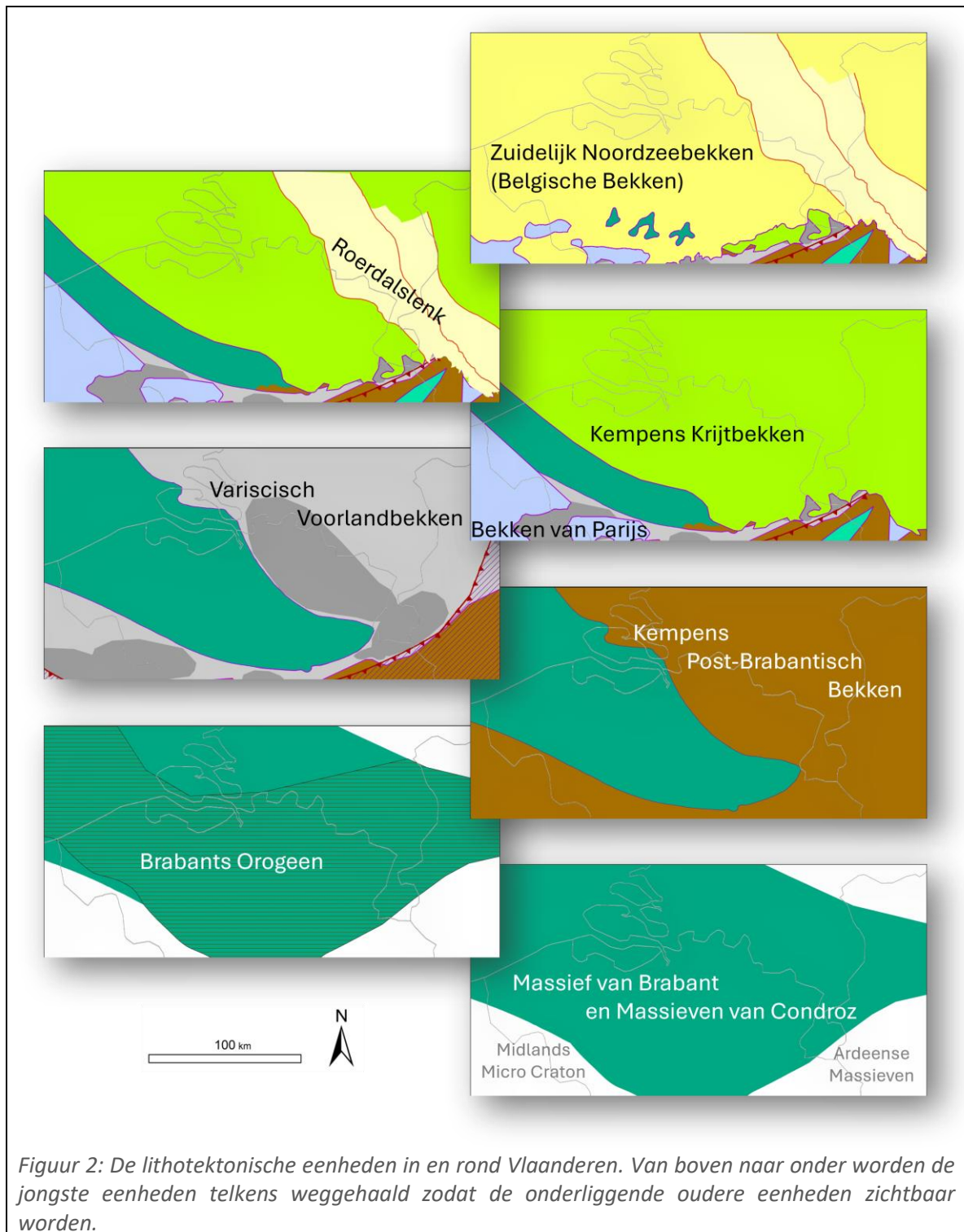
De vervorming binnen het Brabants Orogeen is niet homogeen. Langsheen de centrale as komen uitsluitend bijna verticale lagen voor, en dit wordt daarom het interne deel genoemd, dat ook de oudste gesteenten bevat en het vroegst en ook het sterkst werd opgeheven.

## 1.5 BRABANTSE GRANIETBATHOLIETEN

Met uitzondering van dunne bentoniethorizonten beperken vulkanische afzettingen en intrusieven zich tot het onder Paleozoïcum van het Massief van Brabant. Uit gravimetrische en structurele gegevens blijkt dat er zich grote lichamen bevinden langs de zuidrand van Vlaanderen, waarvan de dichtheid en vorm overeenkomen met granietbatholieten. De ondiepste hiervan reiken tot ongeveer 1 km onder de oppervlakte. Een alternatieve hypothese is dat dit breukblokken zijn van Proterozoïsche gesteenten, dus ouder dan de oudste gekende gesteenten in Vlaanderen.

## 1.6 ROERDALSLENK

De Roerdalslenk is een actieve grabenstructuur met een vrij complexe geschiedenis die minstens teruggaat tot de Atlantische riftfase, en deel uitmaakt van een rift en graben complex dat rijkt van de Noordzee tot de Middellandse Zee. Een graben wordt begrensd door een min of meer symmetrisch breukcomplex. De noordoostzijde van de Roerdalslenk is relatief duidelijk begrensd door het Peel Randbreuk Systeem, maar de zuidwestzijde die Vlaanderen doorsnijdt is een complexer systeem van overstappende breuksystemen (Borremans, 2015). De Roerdalslenk wordt aan deze zijde begrensd door het Feldebiss Breuksysteem, het Veldhoven Breuksysteem en de Gilze-Rijen Breuk (fig. 1, 2).





## 2 GEOTHERMIE

Geothermie of aardwarmte is de energie die in de vorm van warmte in de ondergrond zit opgeslagen. De term geothermie verwijst naar alle toepassingen die op een of andere manier gebruik maken van deze ondergrondse warmte. Er worden verschillende classificatiesystemen gebruikt, onder andere met een dieptecriterium. Hier spreken we over diepe geothermie wanneer de warmte uit lagen dieper dan 500 m onder de Tweede Algemene Waterpassing (-500 m TAW) onttrokken wordt, dus vanaf een diepte waarop de activiteit in Vlaanderen volgens het Decreet Diepe Ondergrond vergunningsplichtig is. In vulkanisch actieve gebieden wordt al sinds 1904 (Larderello, Italië) gebruik gemaakt van geothermie voor verwarming en de productie van elektriciteit. Maar ook in Vlaanderen is geothermie beschikbaar. Van ongeveer 10°C aan de oppervlakte neemt de temperatuur in de diepte toe met ongeveer 30°C per km. Deze stijging is het gevolg van de resthitte in de kern van de aarde en de natuurlijke nucleaire vervalprocessen in de aardkorst. De hete aardkern zorgt voor een voortdurende flux van warmte naar het aardoppervlak.

## 2.1 GEOTHERMISCHE PRODUCTIESYSTEMEN

In het klassieke doubletsysteem wordt warmte onttrokken aan watervoerende lagen door middel van twee putten, één onttrekkings- en één injectieput. Dit is daarom een open systeem waarbij (1) water onttrokken wordt aan de aquifer, (2) warmte onttrokken wordt via een warmtewisselaar, waarna (3) het afgekoelde formatiewater in een tweede put wordt geïnjecteerd in dezelfde aquifer. Op deze manier blijft de druk in de aquifer constant. Rond de injectieput wordt een volume afgekoeld water opgebouwd dat geleidelijk migreert naar de productieput en gedeeltelijk terug opwarmt. De koudwaterdoorbraak aan de productieput is bepalend voor de operationele duur van een doubletsysteem. Meestal wordt conservatief op enkele decennia productie gemikt. Diepe doubletsystemen worden meestal via gedeveierde boorgaten verwezenlijkt (één of beide), eerder dan via verticale boringen. Doubletten kunnen uitgebreid worden tot meer dan twee putten. Het succes van een doubletsysteem wordt in belangrijke mate bepaald door het debiet dat verwezenlijkt kan worden en de temperatuur van het formatiewater. Het debiet hangt direct samen met de transmissiviteit (product van de doorlatendheid en dikte van de aquifer), die, afhankelijk van de verkenning van de ondergrond en het type aquifer, moeilijk voorspelbaar kan zijn.

Een éénputssysteem (*single well*) is minder tot zelfs niet afhankelijk van de eigenschappen van een aquifer. De eerste vorm is een open of semi-open systeem waarbij, in tegenstelling tot het klassieke geothermische doublet, slechts één boring geplaatst wordt waar het water (meestal) langs de buitenzijde van het boorgat wordt geïnjecteerd en het opgewarmde water in een centrale buis wordt opgepompt. Bij deze systemen wordt de warmte uit een kleiner volume onttrokken dan in een klassiek doublet, en is door de beperktere diepte de temperatuur van het opgepompte water meestal lager. Niet-klassieke boortechnieken zijn vaak noodzakelijk, zoals '*laser jetting*' en '*electro-pulse*', waarmee op grotere dieptes putten met een grotere boordiameter aan een realistische prijs kunnen worden uitgevoerd. Om het contact met het gesteentemassief te vergroten kunnen radiale (sub)horizontale boringen worden geplaatst. Deze zogenaamde *laterals* vertrekken vanuit de diepe boring en kunnen tot 150 m ver geboord worden met een diameter tot 10 cm. Zo wordt het contactvlak tussen het gesteentemassief en het circulerende fluïdum significant vergroot.

Voor éénputssystemen bestaat er een waaier aan technische varianten, zeker indien de conceptuele technieken worden meegenomen, met onder meer volledig gesloten systemen (analoog aan degene die in de ondiepe ondergrond gebruikt worden), of systemen waarbij niet water maar  $\text{NH}_3$  of  $\text{CO}_2$  wordt gecirculeerd om efficiënter warmte te onttrekken via faseovergangen en spontane circulatie.

Ook qua stimulatie van het reservoir, om de doorlatendheid te verbeteren, bestaan er verschillende meer en minder ingrijpende technieken, zoals zuurinjectie of het creëren van artificiële fracturatienetwerken.

Algemeen gesteld dienen voor de klassieke open systemen watervoerende lagen (aquifers) aanwezig te zijn met voldoende doorlatendheid (permeabiliteit) en met een voldoende hoge temperatuur voor de gewenste (beoogde) toepassing. De aquifers zijn in de meeste gevallen sedimentaire gesteenten zoals kalksteen of zandsteen. Permeabiliteit neemt algemeen af met diepte, zodat ultra-diepe projecten geen gebruik kunnen maken van natuurlijke doorlatendheid. Voor de éénputssystemen is de permeabiliteit van ondergeschikt belang omdat er geen of zeer beperkt rechtstreekse uitwisseling van formatiewater plaatsvindt.

## 2.2 GEOTHERMIE IN HET KEMPENS POST-BRABANTISCH BEKKEN

Het best gekende en waarschijnlijk belangrijkste reservoirgesteente in het Kempens Post-Brabantisch Bekken is het Dinantiaan reservoir dat de kalkstenen van het onder Carboon omvat. Deze worden gekenmerkt door een algemeen lage matrix-porositeit, maar door de aanwezigheid van zones met hoge doorlatendheid of permeabiliteit door spleten, barsten en oplossingsverschijnselen heeft het kalksteenpakket lokaal wel gunstige reservoir eigenschappen. Deze gunstige eigenschappen lijken preferentieel voor te komen in de driehoek Heibaart-Turnhout-Poederlee, mogelijk door een andere begravingsgeschiedenis, gekenmerkt door meer uitgesproken fasen van opheffing.

### 2.2.1 Historische initiatieven

De eerste indicaties van gunstige geothermische eigenschappen van carbonaatgesteenten in het Bekken van de Kempen dateren van 1950 (archieven van de Belgische Geologische Dienst; Broothaers et al., 2021). In een boring in het centrum van de stad Turnhout (017E0225, 1953-1955, totale diepte 2700 m) werd op 2100 m diepte een permeabel kalksteenpakket uit het onder Carboon (het zogenaamd Dinantiaan) aangetroffen met anomaal hoge temperaturen tot boven de 100°C (102°C op 2200 m, Grosjean, 1954). Enkel de bovenste 50 m van de carbonaten bleek watervoerend. Dit wijst erop dat de top van deze carbonaten gekarstificeerd is, met oplossingsholten in het gesteente die voor een sterk verhoogde doorlatendheid zorgen. De boring werd gedicht op een diepte van 800 m en het water uit de Krijtaquifer werd tot 1973 rechtstreeks gebruikt als zwembad (zwembad Kursaal). De boring was tot 1982 in bedrijf als geothermische bron.

Ook de verkenningsboring Heibaart 1 bis in 1962 van een exploratiecampagne naar het voorkomen van koolwaterstoffen in het Bekken van de Kempen (door Petrobelge) trof een verhoogde permeabiliteit aan in de top van het Dinantiaan (Bless et al., 1981).

In de periode 1977-1980 werden verschillende verkenningsboringen in Heibaart (Loenhout) door het toenmalige Distrigaz (nu Fluxys) uitgevoerd in het kader van ondergrondse gasopslag in de Carboon-carbonaten. Ook deze boringen wezen op het regionaal voorkomen van karstzones aan de top van het Dinantiaan.

Naar aanleiding van de oliecrisis stak de interesse in diepe geothermie weer de kop op in de late jaren 1970 en begin 1980. Omdat er in die periode voornamelijk vraag was naar temperaturen boven 60°C werd het Dinantiaan ook toen de belangrijkste te onderzoeken aquifer. Een nieuw geothermisch exploratieproject in Meer-Hoogstraten had als doel warmte te leveren aan de glastuinbouw. De boring Meer (007E0205) bereikte met een einddiepte van 2515 m de kalkstenen niet, door een onverwacht dik schieferpakket van het boven Carboon. Het water had een

Een tweede boring te Beerse-Merksplas (017E0265, 1983), meer zuidelijk van Meer, bereikte het Dinantiaan wel. Het doel was de penitentiaire instellingen en de glastuinbouw te voorzien van warmte. Door een lagere productiviteit dan verwacht en ongunstige economische evolutie (dalende olieprijs) werd het project stopgezet. Het project zou bestaan uit de productieput in het Dinantiaan, en een ondiepere injectieput in het Krijt op 800 m diepte (geboord in 1987). De putten werden nooit als dusdanig in gebruik genomen, maar zijn nog toegankelijk als monitoringsputten van het netwerk dat door Fluxys wordt onderhouden. Put 017E0265 leverde water van 72°C aan 75 m³/u op een diepte van 1761 m (Vandenberghie et al., 2000).

In 2012 werden nieuwe geothermische projecten ontwikkeld in het Dinantiaan in het Nederlandse Venlo, met als warmte-afnemers de glastuinbouw. Deze projecten maakten gebruik van de data die de voorbije decennia in de Belgische Kempen werden vergaard. Hier werd naast het voorkomen van karstholtes ook gerekend op de aanwezigheid van verhoogde doorlatendheid langs een (actieve) breuk. De eerst boring was succesvol, vanop een diepte van ongeveer 1500 m tot 1700 m werd water van 80°C geproduceerd met een debiet van 240 m<sup>3</sup>/u. Er werden de volgende jaren injectie- en productie-boringen bijgeplaatst, en er werd een tweede geothermisch project gerealiseerd. Echter, door geïnduceerde seismiciteit werden beide projecten in 2018 stopgezet.

### 2.2.2 Huidige projecten

pagina 17 van 62

### 2.2.3 Aangekondigde projecten

Daarnaast worden ook op supra-regionale schaal actief de mogelijkheden van geothermie in het Dinantiaan onderzocht, zie bijvoorbeeld de geharmoniseerde kaarten voor diepte, dikte en potentieel voor België, Nederland, Duitsland en Frankrijk<sup>3</sup>.

## 2.3 GEOTHERMIE IN ANDERE GEOLOGISCHE EENHEDEN

### 2.3.1 Massief van Brabant

### 2.3.1.1 Aangekondigde projecten

In de omgeving van Wielsbeke (gravimetrische anomalie van Oostrozebeke) werd een opsporingsvergunning aangevraagd en verkregen in 2024 voor een boring tot in het vermoedelijke

<sup>3</sup> <https://www.europe-geology.eu/scientific-themes/geoenergy/dge-rollout/>

Ook in andere locaties in het Massief van Brabant, buiten de hypothetische granietbatholieten, bestaat interesse voor diepe geothermische éénputprojecten. Voor een project in Bredene werd een vergunning verkregen (Vlaamse Overheid, 2024).

Omwille van de onzekere of lage doorlatendheid en het dieptebereik van het Massief van Brabant (dat ook onder de Kempen voorkomt) is het een typische eenheid die in aanmerking komt voor EGS projecten (Enhanced Geothermal System). Bij de meest typische van deze systemen wordt een gesteente aangeboord dat ofwel door de diepte, ofwel door zijn intrinsieke eigenschappen, onvoldoende natuurlijke doorlatendheid heeft, en artificieel wordt gefractureerd. Daarna kan op een gelijkaardige manier als bij een doubletsysteem warmte worden onttrokken. EGS wordt meestal geassocieerd met grootschaligere en diepere projecten waarbij elektriciteitsgeneratie het hoofddoel is. Er zijn geen concrete plannen om EGS toe te passen in Vlaanderen.

### 2.3.2 Kempens Subvoorlandbekken en het Trias-Jura Riftbekken

Het aangekondigde project Lommel van HITA beoogt naast het Dinantiaan ook de minder diep gelegen Formatie van Neeroeteren (poreuze zandstenen, soms conglomeratisch, die de jongste lagen vormen van het Kempens Subvoorlandbekken), en de Buntsandstein Formatie (voornaamste reservoirgesteente van het Trias-Jura Riftbekken) bestaande uit de leden van Bullen, Bree en Gruitrode<sup>2</sup>.

De steenkoolmijnen in het Kempens Subvoorlandbekken vormen een belangrijke historische infrastructuur en kunnen fungeren als een artificieel reservoir. Het mijnwater aanwezig in de mijngangen kan als warmtebron gebruikt worden.

In het Krijtbekken zijn de kalkarenieten van de formaties van Maastricht (boven Krijt) en Houthem (onder Paleoceen) aanwezig.

Zoals reeds aangehaald, werd de boring van Turnhout (017E0225, 1953-1955, totale diepte 2700 m) oorspronkelijk uitgevoerd tot het Dinantiaan op 2100 m diepte, maar daarna gedicht op een diepte van 800 m om het water uit de Krijtaquifer rechtstreeks te gebruiken als zwembadwater (zwembad Kursaal) tot 1973, en daarna als geothermische bron tot 1982. In 1969 werd in Herentals rechtstreeks naar het Krijt geboord, ook voor gebruik als zwembadwater. Deze put bereikte een diepte van 612 m en leverde water van 27 tot 28°C. Het water werd tot het jaar 2000 gebruikt toen het niet bleek te voldoen aan de VLAREM normen (voor zover bekend omwille van bacteriële overschrijdingen). In 1987 werd in Dessel een put geboord tot 700 m waaruit water met een temperatuur rond 30°C werd geproduceerd aan een debiet tot 15 m<sup>3</sup>/u voor gebruik in viskweek. De put raakte buiten gebruik na faillissement.







pagina 22 van 62

### 3 POTENTIEEL VOOR WARMTEOPSLAG

Warmteopslag in de diepe ondergrond wordt momenteel niet toegepast in Vlaanderen (Lagrou et al., 2020). Dit hoofdstuk richt zich dan ook op potentiële projecten voor Vlaanderen, aan de hand van een voorbeeld uit het buitenland.

Tijdelijke opslag van thermische energie in de diepe ondergrond met het oog op later hergebruik gebeurt om onevenwichten tussen vraag en aanbod te drukken en zo flexibeler en met grotere zekerheid energie te kunnen leveren. Dit hoofdstuk bespreekt enkel thermische energieopslag op een diepte groter dan -500 mTAW. Het betreft in eerste instantie seizoensopslag voor warmtelevering. Het temperatuurbereik van de opslag wordt voornamelijk bepaald door het temperatuurprofiel van de warmte-afnemers, de gewenste energie-inhoud van de opslag en de eigenschappen van de geologische formatie waarin de opslag plaatsvindt.

De meeste thermische energieopslagsystemen op grotere diepte maken gebruik van aquifers, meer dan voor ondiepe systemen. Dit heeft te maken met de grote warmtecapaciteit van water en het beperkt aantal boringen dat nodig is om de opslag te bedienen. Hoge temperatuuropslag in gesteenten met een lage porositeit en doorlatendheid is technisch ook mogelijk, maar dan via de technologie van diepe aardwarmtesondes.

Geothermische éénputsprojecten kunnen na economische uitputting potentieel een nieuwe bestemming krijgen als warmteopslagprojecten, wat een verduurzaamd gebruik van de diepe ondergrond zou zijn (Westaway, 2018).

### 3.1 BUITENLANDS PROJECT

Naast natuurlijke aquifers bezitten de verlaten steenkoolmijnen potentieel voor energieopslag. Een voorbeeld van dergelijk mijnwaterproject bevindt zich in de Nederlandse gemeente Heerlen. Het project gebruikt de ondergrondse mijninfrastructuur van de voormalige steenkoolmijnen voor de tijdelijke opslag van overtollige warmte en koude die beschikbaar is binnen het lokale stadsverwarming- en koelingsnetwerk. De voormalige mijnactiviteiten hebben een uitgebreid ondergronds netwerk van achtergelaten open gangen met daartussen poreuze zones van ingestorte en opgevulde gemijnde panelen. De ontgonnen steenkoollagen (panelen) zijn steeds met één of meerdere gangen (steengangen, op- en neerbraken, galerijen...) verbonden. Zo ontstaat er een stelsel van kanalen met bijhorende, grotendeels restporositeit. In vergelijking tot de intrinsieke porositeit van het gesteente, waarin dit netwerk aan holle ruimten is gecreëerd, is de restporositeit van de verschillende elementen die dit stelsel opbouwen groot. Daarenboven gaat het om een effectieve (verbonden) restporositeit. De ontginning van steenkool heeft, met andere woorden, een zeer permeabel ondergronds (mijnwater)reservoir gecreëerd binnen een oorspronkelijk nagenoeg niet-doorlatend gesteente. In tegenstelling tot de mijn in Heerlen bevinden de verlaten steenkoolmijnen in Vlaanderen zich grotendeels dieper dan -500 mTAW, dus maakt deze infrastructuur deel uit van de diepe ondergrond.

### 3.2 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Er zijn geen voorgaande studies waar het potentieel aan warmteopslag werd geschat voor de diepe ondergrond in Vlaanderen. In deze studie wordt warmteopslag behandeld als koude-warmteopslag in steenkoolmijnen, waarvoor we een initiële inschatting kunnen maken, en wordt er op langere termijn ook rekening gehouden met hoge-temperatuuropslag in boorgaten.

### 3.2.1 Koude-warmteopslag in steenkoolmijnen

Voor koude-warmteopslag in gesloten steenkoolmijnen kan, voor het maken van een theoretische potentieelschatting, ervan uitgegaan worden dat er twee afgescheiden volumes beschikbaar zijn, elk met hoge permeabiliteit. Voor deze berekening wordt verondersteld dat de watertemperatuur aan de start van het verwarmingsseizoen in evenwicht is met de omgeving. Met andere woorden, de watertemperatuur wordt berekend met de geothermische gradiënt en de gemiddelde diepte. De minimumtemperatuur van het koude watervolume is afhankelijk van de toepassing voor verwarming, en wordt bepaald door de injectietemperatuur. In deze studie wordt uitgegaan van een injectietemperatuur van 20°C. Verder wordt een efficiëntiefactor toegepast op het totaal theoretisch bereikbare volume; een conservatieve schatting van 20% wordt hier gebruikt, maar is afhankelijk van de geologische setting, de configuratie van de mijngangen- en schachten, en veranderingen na sluiting van de mijnen (afsluiten van schachten, instorting van gangen etc.). De soortelijke warmtecapaciteit van water is nodig om met het temperatuurverschil de warmteopbrengst te berekenen. Verder dient er rekening mee gehouden te worden dat het seizoensopslag betreft, en wordt verondersteld dat de helft van het jaar warmte wordt geproduceerd, en de andere helft koude, met dezelfde nuttige energie-inhoud. Voor de concrete case meegenomen in de impactanalyse veronderstellen we een totaal beschikbaar volume van 5 890 000 m<sup>3</sup> van Beringen Mijn met een gemiddelde diepte van 800 meter, geothermische gradiënt van 35 °C/km en een gemiddelde oppervlaktetemperatuur van 10°C. De thermische capaciteit van de helft (er zal een koud en warm deelreservoir zijn) van het volume water op 38°C, rekening houdend met een efficiëntiefactor van 20% bedraagt:  $(0.2 * 5890000 \text{ m}^3 / 2) * (38^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) * 0,001163 \text{ MWh}/(\text{m}^3.\text{K}) = 12\,330 \text{ MWh}$ . Uitgaande van een gebalanceerd systeem (evenveel vraag naar koude als warmte) bedraagt voor een volledig jaar de energie beschikbaar voor verwarming en koeling (de thermische capaciteit) dus 24 660 MWh. Deze thermische capaciteit blijft even groot indien dit reservoir enkel voor geothermie gebruik zou worden, behalve dat net zoals bij klassieke geothermiesystemen de warmte op termijn uitgeput kan raken (systeem niet in evenwicht).

Een inschatting van het totale residuele volume van de steenkoolmijnen in Vlaanderen door Piessens & Dusar (2004) bedraagt 32,3 miljoen m<sup>3</sup>, vergelijkbaar met minimaal 35 miljoen m<sup>3</sup> door van Tongeren & Dreesen (2004). Een recentere herberekening (Lagrou et al., 2020) komt op een hogere schatting uit van c. 44 miljoen m<sup>3</sup>. Het verschil met de eerdere schattingen lijkt vrijwel volledig terug te brengen op een andere aanname van de effectieve porositeit in ingestorte delen van de mijn. De schatting van het ingestorte volume (buffervolume in Lagrou et al., 2020) wordt berekend uitgaande van 8% restporositeit (Lagrou et al., 2020) op basis van een vergelijkende studie, terwijl de eerdere referenties uitgaan van 5.5% op basis van experimentele gegevens. Terugrekenen van 8% naar 5.5% voor het buffervolume, vermindert het totaal van  $44.0 \times 10^6 \text{ m}^3$  tot  $33.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Voor de extrapolatie gaan we uit van de meer conservatieve schattingen. Zonder rekening te houden met verschillen in diepte of configuratie, kan het resultaat van het rekenvoorbeeld voor Beringen Mijn geëxtrapoleerd worden naar 135 GWh aan thermische capaciteit voor gecombineerd verwarmen en koelen voor Vlaanderen (indien Beringen Mijn ontwikkeld zou worden als zuiver geothermisch project zou de jaarlijkse thermische capaciteit gelijkaardig zijn).

Deze capaciteit lijkt relatief klein in vergelijking met het Vlaamse geothermische potentieel. Het is echter een relatief lokaal potentieel dat dan ook in lokale context bekeken moet worden. Bovendien neigen deze schattingen naar deze van concreet realiseerbare projecten (in tegenstelling tot regionale schattingen), en zijn ze daardoor realistischer. Een belangrijk bijkomend element is dat, voor zover koude-warmte projecten gebalanceerd kunnen opereren, ze de ondergrond niet uitputten.

### 3.2.2 Warmteopslag in éénputsboringen

Zoals in §2.4 werd aangetoond is het theoretische warmtepotentieel van de diepe ondergrond met éénputssystemen in Vlaanderen zeer groot, en dat geldt analoog ook voor hoge temperatuursopslag in éénputsboringen, eventueel nadat deze eerst voor geothermische doeleinden werden uitgebaat. Het realiseerbare potentieel ligt vrijwel zeker verschillende grootteordes lager dan het theoretisch potentieel. Op dit moment zijn meer gedetailleerde berekeningen van het potentieel niet zinvol zonder gericht onderzoek naar de praktisch realiseerbaarheid van dit type geothermie (dieptebereik, efficiëntie, projectduur, ruimtelijke inplanting...).

## 4 OPSLAG VAN AARDGAS

De opslag van aardgas is wereldwijd een courante praktijk die zorgt voor continuïteit van bevoorrading in een dynamische keten van vraag en aanbod. Geologische opslag staat meestal in voor midden- en lange-termijn buffering, ruwweg van dag-nacht cycli in aanvraag tot het aanleggen van strategische reserves op de termijn van seizoenen. Voor gasopslag wordt een veelheid aan reservoirs gebruikt, zoals uitgeputte olie- en gasvelden en zoutcavernes. Relevant voor Vlaanderen is opslag in aquifers en eventueel in verlaten steenkoolmijnen.

Opslag in aquifers is mogelijk indien een geologische configuratie bestaat die gelijkaardig is aan een klassiek gas- of olieveld: een voldoende permeabele laag die naar boven toe wordt afgesloten door een weinig of niet-doorlatende laag, met een koepelvormige of gelijkaardige geometrie zodat geïnjecteerd gas door het dichtheidsverschil met het zwaardere formatiewater binnen deze structuur gevangen blijft. Slechts een deel van het geïnjecteerd gas is voldoende mobiel om als werkgas gebruikt te worden; initieel wordt een belangrijke hoeveelheid aardgas geïnjecteerd (soms meer dan de hoeveelheid werkgas) dat als kussengas fungeert. Dat kussengas kan enkel bij het definitief verlaten van een opslagsite gedeeltelijk teruggewonnen worden, door langdurige onttrekking.

Steenkoolmijnen werden slechts uitzonderlijk als reservoir voor aardgas gebruikt. Historisch werden enkel de steenkoolmijnen van Anderlues en Peronnes in België en deze van Leiden in de Verenigde Staten gebruikt voor de opslag van aardgas (Piessens & Dusar, 2004) . Op dit moment wordt dit nergens meer toegepast omwille van kostprijs of veiligheidsrisico's. De verlaten mijnen in Vlaanderen zijn ondertussen onder water gelopen en komen daardoor niet meer in aanmerking voor gasopslag.

#### 4.1 KEMPENS POST-BRABANTISCH BEKKEN

In het Kempens Post-Brabantisch Bekken vormen de afzettingen van Dinantiaanouderdom de jongste lagen. Lokaal hebben deze lagen goede reservoir eigenschappen, meer bepaald waar ze verkarst zijn. De processen die deze oplossingen veroorzaken, zijn gelokaliseerd en kunnen gebonden zijn aan reeds aanwezige discontinuïteiten in het gesteente, zoals breuken of fracturaties. Ook kunnen deze holtes volgens de verticale richting voorkomen. Dit is een vorm van spleetporositeit met soms hoge doorlatendheid, maar niet noodzakelijk een even hoge porositeit van het gesteente zelf.

De lagen van het Kempens Post-Brabantisch Bekken worden regionaal afgedekt door de dominant siliciklastische afzettingen van het Kempens Subvoorlandbekken. Deze beginnen met zwarte schalies van de vrij dunne maar karakteristieke Formatie van Chokier, en worden gevolgd door de nog steeds dominant fijnkorrelige Formatie van Andenne.

Slechts twee koepelstructuren in het Dinantiaan zijn bekend, in de regio van Heibaart (Loenhout) en van Poederlee, waarvan de koepel van Heibaart in uitbating is voor de opslag van aardgas. Beide koepelstructuren komen voor in de regio Heibaart-Turnhout-Poederlee die gekenmerkt wordt door relatief minder subsidie tijdens het Paleozoïcum dan de omliggende gebieden. Een recente hypothese is dat één of meerdere laag-densiteitslichamen (granietintrusies) onder dit gebied voorkomen (mondelinge presentaties VITO op 06/10/2023, Dinantiaan workshop). Deze zouden ook de breukbegrensdde opheffing kunnen verklaren die de koepelstructuur van Loenhout heeft gevormd.

Deze geringere subsidentie verklaart de hogere graad van verkarsting die voor goede  
reservoireigenschappen zorgt, alsook de lokale afwezigheid van de Formatie van Chokier



(waarschijnlijk afwezig centraal op de koepel, waarschijnlijk wel aanwezig op de flanken) en de verminderde dikte van de Formatie van Andenne, die dan de noodzakelijke afsluitende laag vormt.

### 4.1.1 Project

De koepel van Heibaart werd door Fluxys ontwikkeld als de ondergrondse opslagsite van Loenhout voor aardgas. De verminderde afsluiting op de koepel van Heibaart werd beschadigd door de eerste boring die centraal in deze koepel werd uitgevoerd. Deze boring ging verloren, en afdichtingsoperaties door cementinjectie via een tweede boring waren een onvolledig succes. Dit wordt door aangepast reservoirbeheer gecompenseerd.

Specifiek aan de opslag in Loenhout is dat deze als dynamisch systeem in stand wordt gehouden. Meer bepaald in de zuidwestelijke zone mag aardgas tot op een diepte van -1340 mTAW worden opgeslagen<sup>5</sup> (tov -1295 mTAW elders<sup>6</sup>), een situatie die enkel door actieve injectie en onttrekking in stand gehouden kan worden. De huidige opslagcapaciteit van de Heibaart structuur bedraagt 7,6 TWh voor aardgas<sup>7</sup> (zie §4.5 voor details).

### 4.1.2 Potentiële projecten

In het Kempens Post-Brabantsch Bekken is ook de koepel van Poederlee een verkende maar niet-geëxploiteerde structuur. Deze koepel is gelijkaardig, maar aanzienlijk kleiner dan de in gebruik zijnde opslagsite van Loenhout. Een exploratie-exploitatieverzoek van het consortium BUGS NV om Poederlee te ontwikkelen voor opslag van aardgas, werd op 24 januari 2006 onontvankelijk verklaard op verschillende gronden, ondermeer omdat Poederlee binnen een gebied viel waarop Fluxys aanspraak kon maken (KB van 10/10/1983). Daarna voerde Fluxys in 2007 een seismische campagne uit over Poederlee. De gegevens hiervan zijn niet publiek. Momenteel heeft Fluxys slechts één concessie die Poederlee niet omvat.

Poederlee is een potentiële opslagsite, meer bepaald als kleinere opslaglocatie voor aardgas, zij het eerder door een derde partij dan door de huidige operator van de grotere en goed gekende opslaglocatie te Loenhout, Fluxys.

Het Kempens Post-Brabantisch Bekken blijft onvolledig verkend, en een doorgedreven seismische campagne kan nog bijkomende, tot nu toe, onbekende koepelstructuren aan het licht brengen. Waar deze eventueel worden aangetroffen, moeten ook de (karst-gerelateerde) reservoir eigenschappen bevestigd worden, net als de afsluitende eigenschappen van de bovenliggende formatie.

## 4.2 KEMPENS SUBVOORLANDBEKKEN

De Formatie van Neeroeteren is een goed reservoirsteente, maar het bestaan van goed afgesloten invangstructuren zijn om meerdere redenen onzeker. In een recente studie (Rombaut & Deckers, 2020) worden een aantal lineamenten of opwellingen geherinterpreteerd als asymmetrische anticlines (anticlines van Gruitrode en Donderslag) die tijdens het laatste Carboon of vroegste Perm gevormd zouden zijn in een post-Variscische regionale strike-slip vervorming. Dezelfde studie is ook belangrijk omwille van de herziene verbreiding van de Formatie van Neeroeteren. Zie §6.3 voor een algemene geologische bespreking over deze formatie (in het kader van CO<sub>2</sub>-opslag), maar we kunnen hier al opmerken dat de anticlines van Gruitrode en Donderslag geen afgesloten koepelstructuren vormen, omdat hun vorming plaats vond vóór de sedimentatie van mogelijke afsluitende lagen, waardoor deze jongere lagen geen deel uitmaken van de anticline.

5 eli/besluit/2008/04/29/2008011182/staatsblad

<sup>6</sup> eli/besluit/2006/09/28/2006011452/staatsblad

<sup>7</sup> <https://www.fluxys.com/nl/about-us/fluxys-belgium/infrastructure>

### 4.3 POTENTIEEL PROJECT IN DE ROERDALSLENK

#### 4.4 POTENTIEEL PROJECT IN HET VLAAMS KRIJTBEEKEN

## 4.5 VOLUMETRISCHE SCHATTING

van 610 kg/m<sup>3</sup> en van aardgas van 74 kg/m<sup>3</sup> (bij 40°C en 10 MPa; tabel 3)<sup>8</sup>. Deze berekening resulteert in een geschatte opslagcapaciteit voor Poederlee van 175x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> aardgas, of 1.9 TWh, en voor Verloren Kamp van 4.0x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> of 43 TWh.

|                     | Working volume   |            | Cushion gas      |            | Total            |           |                                  |
|---------------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|-----------|----------------------------------|
| Structure           | (m³ natural gas) | E (TWh)    | (m³ natural gas) | E (TWh)    | (m³ natural gas) | E (TWh)   | Reference                        |
| Loenhout (Heibaart) | 8.60E+08         | 7.6 + 1.6  | 6.40E+08         | 6.8        | 1.50E+09         | 16        | Oral communication               |
| Poederlee           | NA               | NA         | NA               | NA         | 1.75E+08         | 1.9       | Calculated from Piessens et al., |
| Verloren Kamp       | NA               | NA         | NA               | NA         | 4.00E+09         | 43        | Calculated from Piessens et al., |
| <b>Total</b>        | <b>8.6E+08</b>   | <b>9.2</b> | <b>6.4E+08</b>   | <b>6.8</b> | <b>5.7E+09</b>   | <b>61</b> |                                  |

Tabel 3: Het opslagpotentieel voor aardgas in drie (potentiële) koepelstructuren in de Vlaamse ondergrond (zie ook digitale bijlage).

<sup>8</sup> 1 normaal m<sup>3</sup> aardgas is equivalent aan 0.833 kg aardgas (normaal m<sup>3</sup> in België gedefinieerd bij 273.15 K en 1.01325 bar)

## 5 OPSLAG VAN WATERSTOFGAS

Waterstofgas kan op een grotendeels gelijkaardige manier ondergronds opgeslagen worden als aardgas, maar is zowel chemisch als biochemisch reactiever, en migreert makkelijker. Historisch zijn er een beperkt aantal relevante opslagprojecten in aquifers gekend voor de ondergrondse opslag van lichtgas of stadsgas (een mengeling van gassen met meestal het grootste aandeel  $H_2$ ). Momenteel zijn wereldwijd de enige opslagsites van zuiver waterstof ontwikkeld in zoutlagen (bv. Verenigde Staten, Verenigd Koninkrijk), maar door de stijgende interesse lopen op dit moment ook de eerste proefprojecten voor opslag van waterstofgas in aquifers, zij het steeds als een bijmenging van aardgas. Het eerste proefproject in België werd officieel ingewijd op 26 oktober 2023.

## 5.1 GEOLOGISCHE OPSLAG VAN WATERSTOFGAS

### 5.1.1 Huidige stand van kennis

De beschikbare literatuur is zeer recent. Alhoewel de eerste studie teruggaat tot 1979, wordt er pas sinds 10 jaar systematisch over dit onderwerp gepubliceerd, en neemt het aantal publicaties explosief toe vanaf 2021 (figuur 3). Dit betekent dat de onderzoeksprojecten rond opslag van waterstofgas even recent zijn, en het een toepassing in volle ontwikkeling is.

Desondanks zijn er verschillende historische projecten waar waterstofgas werd opgeslagen. Dit komt door het zogenaamde stadsgas dat een menging is van waterstofgas en koolstofmonoxide. Voornamelijk in steden werd stadsgas algemeen gebruikt voor straatverlichting, verwarming en koken totdat het in de jaren 1950 en 1960 vervangen werd door aardgas. In een aantal landen (Duitsland, Frankrijk en Tsjechië) werd het stadsgas ondergronds opgeslagen in aquifers. Deze projecten eindigden samen met het gebruik van stadsgas, of werden in een aantal gevallen geconverteerd voor de opslag van aardgas.

De opslagsites in artificiële zoutholtes buiten beschouwing gelaten (wegens niet relevant voor Vlaanderen) zijn er zeer weinig recente proefprojecten waarbij waterstofgas ondergronds wordt opgeslagen. Deze hebben allen gemeen dat waterstofgas steeds gemengd met aardgas (dominant methaan) wordt opgeslagen.

Dit staat in contrast met de focus van de overgrote meerderheid van de studies die in de literatuur worden besproken. Het is goed bekend dat opslag van zuiver waterstofgas veel makkelijker kan leiden tot ongewenste reacties of gedrag, maar op dit moment richten de studies, die vrij theoretisch van aard zijn, zich voornamelijk tot het bespreken van het gedrag tot zuiver waterstofgas en lijkt er zeer weinig fundamentele kennis te bestaan over gedrag van waterstofgas in mengvorm.



In de literatuur ligt een belangrijke focus op chemische reacties met pyriet ( $\text{FeS}_2$ ) en in mindere mate met calciet ( $\text{CaCO}_3$ ), twee mineralen die van nature veel voorkomen in gesteenten. Beiden kunnen verwacht worden in de Formatie van Chokier, en pyriet ook in de Formatie van Andenne. In een reactie met waterstofgas kan pyriet worden opgelost en waterstofsulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) gevormd worden. Aangezien dit de oplossing van mineralen inhoudt, kan dit de doorlatendheid van het afsluitend gesteente verhogen.  $\text{H}_2\text{S}$  is bovendien een toxisch gas. Verder zullen reductiereacties door waterstofgas waterstofprotonen vrijzetten wat voor een verlaging van de pH zorgt waardoor carbonaatmineralen zoals calciet in het formatiewater worden opgelost. Ook dit zal de permeabiliteit van het aangetaste gesteente verhogen. Er zijn verschillende andere reacties tussen waterstofgas en mineralen gekend, maar deze zouden niet opgaan bij de reservoircondities (Heinemann et al., 2021).

De literatuur rond opslag van waterstof neemt zeer snel in omvang toe. Een aantal goede startreferenties zijn Wallace et al. (2021), Zivar et al. (2021), Raza et al. (2022), Safari et al. (2022), Thiyagarajan et al. (2022) en Perera (2023). Zie bijlage voor ruimer literatuuroverzicht.

De huidige internationale proefprojecten beogen geen opslag van zuiver waterstofgas in aquifers. Initieel was dit ook zo voor Fluxys, maar zij hebben in aanloop van het proefproject te Loenhout hun ambitie bijgesteld naar de opslag van zuiver waterstofgas. De redenen hiervoor zijn migratie en chemische bezorgdheden, niet enkel vanuit veiligheidsoogpunt, maar ook economische onzekerheden spelen hier mee. Afhankelijk van de omstandigheden wordt er bijvoorbeeld uitgegaan van de gedeeltelijke omzetting van waterstofgas naar methaan, en dus een ongewenste degradatie van het opgeslagen gas.

pagina 32 van 62

migratie, die overeenkomt met de opslagtijd, ondieper terug onttrokken (om ofwel gebruikt, ofwel geherinjecteerd te worden). Verschillende praktische bedenkingen, zoals de algemeen sterk anisotrope doorlatendheid die horizontale migratie bevordert, maken ook deze optie onvoldoende concreet om momenteel meegenomen te worden.

## 5.2 KEMPENS POST-BRABANTISCH BEKKEN

### 5.2.1 Proefproject

De koepel van Loenhout is een actieve opslagsite voor aardgas, en recent eveneens de testlocatie voor de opslag van waterstofgas. Het proefproject voorziet in een injectie van een kleine hoeveelheid waterstofgas ( $3000 \text{ (n)m}^3$ ) in een randzone van de koepel nabij het gas-watercontact. Het waterstofgas zal mengen met het aanwezige methaan. De lange-termijndoelstelling om Loenhout te ontwikkelen tot een site voor gemengde opslag was initieel in de grootteorde van 90%  $\text{CH}_4$  en 10%  $\text{H}_2$ , maar deze doelstelling werd bijgesteld en bij gunstig vooronderzoek wordt op termijn de opslag van zuiver waterstofgas beoogd. Het onderzoekstraject waar het huidige proefproject deel van uitmaakt, heeft tot doel om de haalbaarheid van opgeschaalde opslag van waterstofgas te Loenhout te bevestigen. Op basis van mondelinge communicatie met Fluxys wordt de opslagcapaciteit voor puur waterstofgas in de Loenhout koepel geschat op 3,2 TWh.

### 5.2.2 Potentieel project

Hoewel Poederlee momenteel niet wordt onderzocht, is het een potentieel interessante opslaglocatie. De Poederlee-structuur lijkt geometrisch gelijkaardig aan de opslagstructuur van Loenhout, maar met waarschijnlijk lagere transmissiviteit. De afsluitende lagen zijn dus waarschijnlijk beter wat betreft afsluitende eigenschappen, en een kleinere structuur kan economische voordelen bieden voor een waterstofgas opslagproject. Omwille van de prijs is de hoeveelheid kussengas een bezorgdheid bij het ontwikkelen van dergelijke projecten, en een kleinere en beter gedefinieerde opslagstructuur kan hier duidelijke voordelen bieden.

### 5.3 POTENTIËLE PROJECTEN IN ANDERE GEOLOGISCHE EENHEDEN

Opslag van waterstofgas moet, net zoals opslag van aardgas, gebeuren in invangstructuren die de laterale migratie van het gas tegengaan zodat het efficiënt teruggewonnen kan worden. De enige andere vermoede, maar nog te bevestigen structuur is Verloren Kamp in het Trias-Jura Riftbekken. Het potentieel voor opslag van waterstofgas in andere geologische eenheden komt overeen met dat voor de opslag van aardgas. Deze verkennen zou een doorgedreven exploratie vragen naar bijkomende invangstructuren in Vlaanderen.

## 5.4 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Bij conversie van Loenhout naar waterstofgas onder bestaande restricties kan de capaciteit vrij nauwkeurig berekend worden op basis van de gekende opslagcapaciteit voor aardgas, alhoewel er verschuivingen kunnen zijn in de hoeveelheid kussengas of de efficiëntie waarmee poriënruimte kan worden gebruikt. In geval van conversie van de aardgasopslag in Loenhout naar waterstofgasopslag zal het kussengas, dat nu bestaat uit methaan, gedeeltelijk vervangen worden door waterstofgas. In praktijk wordt uitgegaan dat ook bij zuivere injectie van waterstofgas er op langere termijn methaan zal worden gecoproduceerd (zodat scheiding van beide gassen permanent noodzakelijk blijft).

Indien al deze factoren en onzekerheden genegeerd worden, wordt door Fluxys uitgegaan van een werkvolume aan waterstofgas van 3.2 TWh. Dit is aanzienlijk lager dan de 7.6 TWh voor aardgas,



Voor de opslaglocaties Poederlee en Verloren Kamp zijn geen gepubliceerde cijfers bekend. Deze structuren werden wel geïnventariseerd als potentiële opslagstructuren in het project HyStories (Smith & Vincent, 2022), met inbegrip van de belangrijkste reservoir eigenschappen maar zonder tot volumeschattingen over te gaan. Op basis van Piessens et al. (2009) kan een eerste schatting worden gemaakt door conversie van het opslagpotentieel voor CO<sub>2</sub> naar H<sub>2</sub>. Dit levert 0.46 TWh voor Poederlee en 10.5 TWh voor Verloren Kamp. Bij de conversie wordt een dichtheid voor opgeslagen waterstofgas verondersteld van 7 kg/m<sup>3</sup> (bij 40°C en 10 MPa). De schattingen zijn totaal cijfers waarin geen onderscheid wordt gemaakt tussen kussengas en werkbaar volume.

*Tabel 4: Schatting van het opslagpotentieel voor waterstof in drie (potentiële) koepelstructuren in de Vlaamse ondergrond (zie ook digitale bijlage).*

## 6 OPSLAG VAN KOOLSTOFDIOXIDE

Opslag van CO<sub>2</sub> gebeurt typisch als permanente oplossing om moeilijk te vermijden industriële uitstoot van dit broeikasgas te neutraliseren, of om in combinatie met bijvoorbeeld biobrandstoffen tot negatieve CO<sub>2</sub>-emissies te komen. De belangrijkste verschillen met opslag van bijvoorbeeld aardgas, is dat de mogelijkheid om CO<sub>2</sub> terug te winnen niet geldt, of zelfs niet wenselijk is, en dat het typische volume nodig voor opslag veel groter is dan wat wenselijk is voor aardgasprojecten. Dit betekent dat in praktijk er weinig rechtstreekse competitie is naar dezelfde structuren. Voor opslag van CO<sub>2</sub> kunnen deze bijvoorbeeld vlakker of onregelmatiger zijn, of zo dat ze wel gevuld, maar niet geledigd kunnen worden. In MAS opslagschema's (*Migration Assisted Storage*) wordt zonder invangstructuur gewerkt. Hier wordt CO<sub>2</sub> in een licht hellend reservoir geïnjecteerd, en wordt immobilisatie in eerste instantie gerealiseerd door *residual trapping*, waarbij de migrerende CO<sub>2</sub> pluim verkleint doordat CO<sub>2</sub> als immobiele fase achterblijft in poriën, en op langere termijn oplost of in mineralisatiereacties wordt betrokken.

CO<sub>2</sub> kan in verschillende types reservoir worden opgeslagen, maar voor Vlaanderen is enkel opslag in aquifers relevant. Deze zijn allen gesitueerd in de diepe ondergrond, omdat, uniek voor CO<sub>2</sub>, een belangrijke densiteitsverandering plaatsvindt bij drukken zoals bereikt tussen 700 en 800 m diepte. Op die manier kan opslag op grotere diepte efficiënter gebeuren en wordt verticale migratie minder waarschijnlijk.

## 6.1 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET KEMPENS POST-BRABANTISCH BEKKEN

In het Kempens Post-Brabantisch Bekken is het Dinantiaan de enige stratigrafische eenheid met voldoende aangetoonde permeabiliteit, die tevens wordt afgedekt door afsluitende lagen. De koepelstructuren van Loenhout en Poederlee worden niet beschouwd als potentiële opslaglocaties voor CO<sub>2</sub> omwille van de huidige activiteit in Loenhout en de beperkte omvang van Poederlee. In een verkennende studie (Piessens et al., 2007) werden, uitgaande van een jaarlijkse injectie van 1.5 Mt CO<sub>2</sub>, twee potentiële locaties onderzocht die zich bevinden in een gebied waar het Dinantiaan naar verwachting verkarst is. Het eerste is een gebied in de omgeving van Kasterlee, waar op basis van analyse van isohypsenkaarten geopperd werd dat de top voldoende onregelmatig was om zeer brede invangstructuren te vormen. Deze optie werd niet gedetailleerd uitgewerkt.

De tweede optie was injectie van CO<sub>2</sub> in de omgeving van Essen volgens het MAS-systeem, waarbij de CO<sub>2</sub> pluim verwacht wordt te migreren in zuidelijke richting volgens de gradiënt van de top van het Dinantiaan. Geschatte migratieduur tot aan de kritische diepte voor CO<sub>2</sub> opslag varieert van ongeveer 500 tot 1000 jaar, i.e. met aanzienlijke onzekerheid. Er werd niet gemodelleerd hoeveel CO<sub>2</sub> in deze tijd en over dit traject geïmmobiliseerd zou worden.

Naast het Dinantiaan vormen ook de Frasniaanafzettingen een mogelijke reservoir-afdekkende sequentie. Dit zijn meer bepaald de dolostenen van de Aisemont Formatie bedekt door de schalies van de Falisolle Formatie. Deze formaties werden op drie locaties in Vlaanderen aangeboord, waarvan twee zich op geschikte diepte bevinden, maar geschikte reservoir-eigenschappen werden voorlopig niet aangetroffen.

## 6.2 POTENTIEEL PROJECT IN HET PERM-TRIAS RIFTBEKKEN

De Verloren Kamp structuur in de Roerdalslenk is een potentiële optie voor de opslag van CO<sub>2</sub>, maar gezien het vermoedelijk beperkte totale volume minder geschikt voor permanente opslag. Deze structuur zou eerder kunnen fungeren als proefproject of als buffer in een CCUS (*Carbon Capture Utilization and Storage*) valorisatieketen tussen productie en afname van CO<sub>2</sub>. Verloren Kamp is momenteel nog zeer onvolledig verkend, en het is daarom mogelijk dat na verkenning blijkt dat dit geen ideale invangstructuur zou zijn voor aardgas omdat bijvoorbeeld geïnjecteerde hoeveelheden onvoldoende efficiënt of snel onttrokken kunnen worden. In een CCUS-keten vormt dit veel minder een probleem omdat opslag van CO<sub>2</sub> juist permanente opslag als uiteindelijk doel voor ogen heeft en CO<sub>2</sub> een product met een veel lagere intrinsieke marktwaarde is.

### 6.3 POTENTIËLE PROJECTEN IN KEMPENS SUBVOORLANDBEKKEN BINNEN EN BUITEN DE ROERDALSLENK

In het Kempens Subvoorlandbekken werd de Formatie van Neeroeteren onderzocht voor zijn opslagcapaciteit (Welkenhuysen et al., 2013). Dit is een goed reservoirgesteente, maar slechts gedeeltelijk afgedekt door de Formatie van Helchteren waarin mogelijk voldoende afdichtende kleistenen voorkomen. Deze laatste formatie is laat Perm in ouderdom, en behoort daarom tot de sedimenten van het Zuidelijke Perm bekken die de oudere lagen discordant afdekken. Qua afdekking en begravingsgeschiedenis is er een belangrijk verschil tussen de configuratie die buiten en binnen de Roerdalslenk voorkomt. De beschreven configuratie werd geobserveerd buiten de Roerdalslenk, maar de geschiktheid voor gasopslag is niet bewezen. Binnen de Roerdalslenk wordt de aanwezigheid van de Neeroeteren Formatie verondersteld, maar is deze nog nooit aangetoond. Deze formatie heeft waarschijnlijk een beperkte laterale verbreiding, en komt bijvoorbeeld in Nederland niet of nauwelijks voor, maar gaat mogelijk over in een (gedeeltelijk) lateraal facies. Bovendien komt de Formatie van Helchteren niet of onvoldoende voor binnen de Roerdalslenk om als primaire afsluitende laag te fungeren. Zonder bijkomende exploratie is het onduidelijk of en welke eenheid een afsluitende laag vormt.

Steenkool wordt ook gezien als een mogelijk reservoirsteente, en kan een zeer belangrijke opslagcapaciteit vertegenwoordigen. Technisch is dit echter nog steeds een onzekere optie, en bij afwezigheid van gunstige internationale proefprojecten beschouwen we dit op dit moment niet als een haalbare optie. De schattingen voor opslag in steenkoolmijnen (Piessens & Duser, 2004) zijn niet langer relevant, omdat deze van een minstens gedeeltelijk niet-ondergelopen aanvangssituatie vertrekken (een situatie die momenteel niet meer geldt).

## 6.4 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET VLAAMSE KRIJTBEEKEN

Afzettingen gevormd door krijt komen in een beperkt gebied voldoende diep voor om geschikt te zijn voor de opslag van CO<sub>2</sub>. De volledige sequentie is een complex van meer en weinig doorlatende gesteenten, met potentieel meerdere niveaus waarin CO<sub>2</sub> kan worden opgeslagen. Het dieptebereik is echter marginaal interessant, de opslagcapaciteit vrij beperkt, en de afsluiting eerder atypisch en onzeker. Daarom wordt dit niet als haalbare optie gezien in het verdere verloop van deze studie.

## 6.5 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Eind jaren 1990 werden de eerste schattingen gemaakt over opslagcapaciteit voor CO<sub>2</sub> in de Belgische ondergrond. Deze werden voor het eerst in peer review gepubliceerd door Laenen et al. (2004). In de PSS-CCS projecten werd de schattingsmethode uitgewerkt voor de Belgische context (Piessens et al., 2009; Piessens, 2011). De uiteenlopende schattingen van de verschillende auteurs werden opnieuw verenigd in Welkenhuysen et al. (2011, 2013). Het zijn de resultaten van Welkenhuysen et al. (2013) die als basis dienen voor de rapportering van België op Europees niveau, zoals in het CO<sub>2</sub>StoP project (Poulsen et al., 2014) via het portaal [https://setis.ec.europa.eu/european-co2-storage-database\\_en](https://setis.ec.europa.eu/european-co2-storage-database_en) en waarop de herwerking die in het kader van het project GSEU<sup>9</sup> wordt gemaakt zich baseert (richtdatum publieke voorstelling 2025).

Welkenhuysen et al. (2013) maken verschillende schattingen die overeenkomen met de niveaus van de *techno-economic resource pyramid* (Bachu et al., 2007). Het basisniveau is de theoretische capaciteit, gebaseerd op beperkte regionale informatie en typisch gekenmerkt door de hoogste schattingen. De capaciteit van de verschillende reservoirformaties wordt geschat door hun verbreiding met dikte, porositeit, dichtheid van CO<sub>2</sub> en watersaturatie te vermenigvuldigen. Het overzicht wordt gegeven in tabel 5, waar de reservoirs die hoger minder relevant werden bevonden zijn weggelaten.

De effectieve capaciteit is de capaciteit die overblijft van de theoretische capaciteit nadat technische, wettelijke, regelgevende, infrastructurele en algemeen economische beperkingen worden meegerekend. Dit zijn zeer aanzienlijke beperkingen, en in Europese context wordt een conversiefactor van 2% aangeraden (Vangkilde-Pedersen, 2009), wat voor een aantal reservoirs in Vlaanderen te conservatief schattingen oplevert in vergelijking met de praktische capaciteit die onafhankelijk geschat wordt (zie tabel 5).

De praktische capaciteit is project- of site-specifiek. Welkenhuysen et al. (2013) omzeilt het gebrek aan gedetailleerde gegevens via stochastische berekeningen die resulteren in een waarschijnlijke waarde en een onzekerheidsverdeling, waarvan het 90% onzekerheidsinterval in tabel 5 wordt weergegeven.

Voor Vlaanderen bedraagt de totale theoretische opslagcapaciteit ongeveer 2.6 Gt CO<sub>2</sub>. Het is realistisch om ongeveer 2% daarvan, of 52 Mt, als effectief beschikbaar te beschouwen. De praktische capaciteit is een projectgebaseerde benadering, en ligt in de lijn van de effectieve capaciteit.

| Reservoir           | Theoretical capacity (Mt) | Effective capacity (Mt) | Practical capacity (X (P05; P95) Mt) |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Bundsandstein Fm    | 569                       | 11                      | 31 (12; 189)                         |
| Neeroeteren Fm      | 679                       | 14                      | 33 (88; 189)                         |
| Dinantian reservoir | 1350                      | 27                      |                                      |
| Karstified          |                           |                         | 37 (2;324)                           |
| Non-karstified      |                           |                         | 17 (13;165)                          |
| <b>Total</b>        | <b>2598</b>               | <b>52</b>               |                                      |

Tabel 5: Schatting van het opslagpotentieel voor koolstofdioxide, voor praktische capaciteit staat X voor gemiddelde, en wordt het P90 tussen haakjes uitgedrukt als van-tot interval (naar Welkenhuysen et al., 2013) (zie ook digitale bijlage).

<sup>9</sup> GSEU: Geological Service for Europe, Horizon Europe project, projectnummer 101075609

## 7 BERGING VAN LANGLEVEND EN HOOGRADIOACTIEF AFVAL

Het meest traditionele concept van ondergrondse berging van langlevend en hoogradioactief afval houdt de constructie in van ondergrondse galerijen waarin, na een periode van bovengrondse afkoeling (in het geval van hoogradioactief afval), het afval in specifieke verpakkingen of containers (de kunstmatige barrières) wordt geplaatst, met het oog op een zo lang mogelijke insluiting. Omdat geen enkel verpakkingsmateriaal die insluiting na verloop van duizenden jaren nog kan garanderen, dient de aardlaag waarin de bergingsinstallatie wordt ingebed als bijkomende natuurlijke barrière om de verspreiding van radioactieve stoffen vanuit de installatie dermate te vertragen dat deze geen gevaar meer vormen eens ze terug de biosfeer zouden bereiken<sup>10</sup>. Het type gastgesteente, de dikte van de formatie en de diepte waarop deze zich bevindt, zijn daarom belangrijke parameters bij het bepalen van een geschikte locatie. Het internationaal voorgestelde dieptebereik (*'Disposal in deep, stable geological formations usually several hundred metres or more below the surface...'*; IAEA, 2011) overlapt met het toepassingsgebied van het Decreet Diepe Ondergrond (>500 m onder TAW). NIRAS gaat voor opslag in België uit van een diepte tussen 200 en 600 m (communicatie op 18/09/2023).

## 7.1 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET ZUIDELIJKE NOORDZEEBEKKEN

De momenteel best onderzochte piste in België is opslag in plastische kleien, meer bepaald deze van de Formatie van Boom waarin een ondergrondse galerij (Mol) werd uitgegraven om deze formatie in-situ te bestuderen. Deze galerij bevindt zich niet in de diepe ondergrond, maar is ook niet (noodzakelijk) de locatie van de effectieve ondergrondse opslag. De toekomstige geografische opslaglocaties en geologische eenheden zijn nog niet gekend, maar de op exploratie gebaseerde keuze ervan wordt waarschijnlijk gemaakt vóór 2050.

In het Zuidelijke Noordzeebekken zijn er twee kleiformaties die potentieel in aanmerking komen als gastformatie voor de bergingsite, de Formatie van Kortrijk en de Formatie van Boom. Indien de Formatie van Boom gekozen wordt, dan kunnen, afhankelijk van de gekozen locatie, de galerijen mogelijk tot net in de diepe ondergrond reiken.

Aangezien waarschijnlijk tegen 2050 de beslissing tot inplanting genomen zal zijn en de uitvoering gestart zal zijn, maar nog niet de berging zelf, wordt deze activiteit passief meegenomen tijdens de impactanalyse. Dit betekent dat de impact van andere activiteiten op een potentiële (generisch gekozen) locatie kwalitatief wordt geëvalueerd, maar dat de operationele berging zelf niet wordt gesimuleerd.

## 7.2 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET MASSIEF VAN BRABANT

In Vlaanderen worden ook niet-plastische kleien onderzocht als potentiële gastgesteentes, meer bepaald de Siluur en Ordovicium formaties die behoren tot het Massief van Brabant (Van Noten et al., 2019). Van de locaties die gescreend werden zijn de Siluurafzettingen in de noordrand van het Massief van Brabant relevant, maar enkel op lange termijn (na 2050). In de boring van Kallo (nabij Doel) werden deze gesteenten gekernd tussen ongeveer 590 en 625 m. Ze werden gekarteerd als Formatie van Ronquières en zijn daarmee tijdsequivalent, maar verschillen waarschijnlijk lithostratigrafisch van de typeontsluiting, alhoewel ze ook fijnkorrelig en turbiditisch zijn. Minstens

<sup>10</sup> NIRAS. Geologische berging. <https://www.niras.be/geologische-berging>

lokaal hellen deze gesteenten 80° (mogelijk overhellend) en ontwikkelde zich een duidelijke gesteentespleijting, wat ongunstig is voor een bergingssite en niet goed past in het beeld van een symmetrisch Brabants Orogeen. Volgens dit geologisch model is de vervorming en scheefstelling het sterkst centraal in het subcropgebied, wordt deze minder expliciet naar de noordelijke en zuidelijke vervormingsfronten toe, terwijl in de boring van Kallo wel degelijk sterk vervormde gesteenten werden aangetroffen. Dit zijn echter algemene trends en anomale zones kunnen voorkomen. Informatie uit één boring is onvoldoende om verdere besluiten te trekken gezien de mogelijke variabiliteit op relatief korte afstand (bv. 10 km).

### 7.3 ANDERE MOGELIJKHEDEN VOOR DE BERGING VAN RADIOACTIEF AFVAL

Naast het klassieke concept van galerijen bestaan er nog andere, uiteenlopende concepten voor de opslag van radioactief afval, zoals rechtstreekse injectie, opslag in verlaten mijnen, of verticale boorgaten. Los van het eventueel controversieel karakter staan deze technieken qua onderzoek en internationale aanvaarding veel minder ver dan opslag in galerijen, en worden ze hier buiten beschouwing gelaten.

## 7.4 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Voor de ondergrondse berging van radioactief afval worden zeer specifieke geologische voorwaarden gesteld, maar anders dan bij andere activiteiten worden er geen schattingen opgemaakt van de totale opslagcapaciteit. In plaats daarvan wordt geschat hoeveel afval er geborgen moet worden, en hoeveel volume ondergrond dat in beslag zou nemen. De schatting die hier gemaakt wordt is strikt indicatief, en onderhevig aan verschillende parameters (inclusief locatie) die op dit moment nog niet definitief zijn.

Radioactief afval wordt op verschillende manieren onderverdeeld. Voor berging gebruiken we hier de klassering in categorieën A, B en C omdat deze gebaseerd is op de hoeveelheid warmte die geproduceerd wordt, wat een belangrijke factor is bij ondergrondse berging en gekoppeld is aan de graad van radioactiviteit (NIRAS, 2008). Categorieën B en C zullen ondergronds worden opgeslagen, en waarschijnlijk ook een deel van categorie A (NIRAS, 2008). Op termijn is de verwachte hoeveelheid aan radioactief materiaal afhankelijk van de opwerkingsopties en gebruik van kernenergie. Voor de schatting hier vertrekken we van de hoogste projecties tegen 2070 in NIRAS (2008) die afgerond uitkomen op 15000 m<sup>3</sup> afval van categorieën B en C (met ruimte voor een beperkte hoeveelheid categorie A).

De infrastructuur van een ondergrondse berging kan verschillende ontwerpprincipes volgen. Illustratief geeft figuur 4 een mogelijk ontwerp voor België, met parallelle galerijen voor opslag die vertrekken van een centrale ruggengraat. De afstand tussen de galerijen is afhankelijk van de categorie en zou 60 m kunnen zijn voor categorie B en 120 m voor categorie C. Het afval zal niet rechtstreeks in de galerijen ingebracht worden, maar extra verpakt worden. Voor de verdere berekening gaan we uit van een bergingscomplex met één type supercontainer voor de berging van radioactief afval, alhoewel in praktijk verschillende systemen gebruikt zullen worden (EIG Euridice, 2017). Een supercontainer van 6.25 m lengte biedt ruimte aan ongeveer 1.5 m<sup>3</sup> afval (op basis van ontwerpgegevens in Areias et al. (2010)). Uitgaande van een 15000 m<sup>3</sup> te bergen volume zou de totale galerijlengte 62500 m moeten bedragen (indien geen extra bufferruimte tussen de containers wordt voorzien). Uitgaande van een gemiddelde afstand tussen de galerijen van 100 m geeft dit een

*Figuur 4: Impressie van installatie voor ondergrondse berging in Vlaanderen (International Atomic Energy Agency, 2020).*

pagina 40 van 62



## 8 OPSLAG VAN POTENTIËLE ENERGIE IN HET MASSIEF VAN BRABANT

Een efficiënte manier om elektriciteit op te slaan, is ze om te zetten in potentiële energie door water over een hoogteverschil te verpompen. Dit gebeurt bijna steeds in projecten die gebruik maken van reliëf, zoals in de spaarbekkencentrale van Coö. Conceptueel kan dit ook ondergronds uitgevoerd worden, bijvoorbeeld in verlaten mijnen of in artificiële tunnels.

Een alternatieve methode is om lucht samengedrukt op te slaan in dergelijke reservoirs, en dit heeft geleid tot effectief uitgevoerde projecten (bijvoorbeeld in Duitsland luchtopslag in zoutreservoirs die potentieel de turbo van een elektriciteitsinstallatie kan voeden). Deze methode is waarschijnlijk complexer en minder relevant voor Vlaanderen en wordt niet verder besproken.

## 8.1 INTERESSE IN VLAANDEREN

In 2022 was er interesse om in het noorden van het Massief van Brabant tunnels te boren voor de opslag van potentiële energie. Deze zouden worden aangelegd in relatief weinig doorlatende gesteenten van het Ordovicium of Siluur, en aanvullend bekleed worden om ze verder ondoorlatend te maken. De ondergrondse reservoirs zouden gekoppeld worden aan bovengrondse reservoirs met dezelfde capaciteit. Bij energieoverschotten worden de ondergrondse reservoirs leeggepompt, zodat ze op momenten van grotere elektriciteitsvraag gevuld kunnen worden vanuit de bovengrondse, met omzetting van de potentiële energie in elektriciteit. Deze ondergrondse reservoirs kunnen zich ook in de diepe ondergrond situeren. Het vooronderzoek voor dit project werd door overlijden van de initiatiefnemer gestaakt.

## 8.2 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Opslag van potentiële energie, uitgevoerd aan de hand van galerijen zoals besproken in hoofdstuk 7.4, vereist de aanleg van bovengrondse bekkens met even grote capaciteit als de ondergrondse reservoirs. Die voorwaarde zorgt er in praktijk voor dat bovengronds ruimtebeslag de beperkende factor wordt voor de totale potentiële capaciteit die ontwikkeld kan worden. Ook hier kan, naar analogie met de berekening voor berging van radioactief afval (§7.4), de vraag echter worden omgedraaid, en vertrokken worden van hoeveel volume (vermogen) potentieel nodig zou zijn.

Dergelijke schattingen bestaan niet voor Vlaanderen, maar om een eerste idee te verkrijgen kan een werkwijze gevolgd worden analoog aan verkennende berekeningen die voor steenkoolmijnen in het Waalse bekken werden uitgevoerd waarbij de potentiële buffercapaciteit van de centrale van Co-Trois-Pont (~6000 MWh) werd vergeleken met een geconverteerde steenkoolmijn (mijn van Anderlues) (Piessens, 2012). De mijnen in Vlaanderen zijn niet op dezelfde manier gecompartmenteerd, maar een extrapolatie kan wel gemaakt worden naar een systeem met geconstrueerde galerijen. Voor een niveauverschil van ongeveer 500 m (niveauverschil tussen oppervlaktebekkens en ondergrondse galerijen) zou een gangensysteem aangelegd moeten worden met een totaal ontgonnen volume in de grootteorde van de kleinste steenkoolmijn in Vlaanderen (Houthalen, gemijnd volume  $\sim 19.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), om het totale elektriciteitsverbruik van alle Vlaamse gezinnen gedurende één dag op te slaan (~25000 MWh). Zie tabel 6 voor de berekening.

Dit voorbeeld toont aan dat de ondergrond van Vlaanderen waarschijnlijk groot genoeg is om dit te realiseren, maar dat eerder andere beperkingen meespelen, zoals het bovengronds ruimtebeslag

(aanleggen van een oppervlaktebekken) en het vinden van een bestemming voor het volume ontgonnen gesteente.

| Symbol | Value    | Unit              | Description                                                    |
|--------|----------|-------------------|----------------------------------------------------------------|
| e      | 0.9      | -                 | Efficiency energy conversion                                   |
| E      | 25000    | MWh               | Energy stored/available                                        |
| E      | 9E+13    | J                 |                                                                |
| dH     | 500      | m                 | Height difference two reservoirs (depth underground reservoir) |
| Rho    | 1000     | kg/m <sup>3</sup> | Density water                                                  |
| g      | 9.81     | m/s <sup>2</sup>  | Gravimetric acceleration                                       |
| V      | 20387360 | m <sup>3</sup>    | Volume reservoir                                               |
| V      | 20       | Mm <sup>3</sup>   |                                                                |

Tabel 6: Parameters en berekende uitkomst van het nodige nuttige volume ondergronds reservoir om 25000 MWh aan energie te kunnen reproduceren. Berekening op basis van potentiële energie, rekening houdend met efficiëntieverlies.

## 9 ONDERGRONDSE OPSLAG VAN DRINKWATER

Vlaanderen heeft geen of nauwelijks netto drinkwatertekorten op jaarschaal, maar kent wel seizoensgebonden lokale tekorten, met name in de kuststreek en meer algemeen de provincie West-Vlaanderen. Tijdelijke ondergrondse opslag van drinkwater in een aquifer (ASR, *Aquifer Storage and Recovery*) is een mogelijkheid die interessanter is dan het aanleggen van bijkomende transportcapaciteit. ASR wordt onderzocht als alternatief voor het gebruik van licht verzilt oppervlaktewater, dat via omgekeerde osmose gezuiverd zou moeten worden.

## 9.1 CONCEPT VAN ASR

Bij ASR wordt zoet water van drinkwaterkwaliteit tijdens periodes van overschot of lage watervraag geïnjecteerd in een geschikte formatie via één of meerdere injectieputten die relatief kort bij elkaar liggen. Dit water verdringt het aanwezige water, waardoor een reserve wordt opgebouwd. Tijdens periodes met hoge watervraag wordt dit proces omgedraaid en het water opnieuw geproduceerd om in het leidingnetwerk te injecteren en aan te wenden als drinkwater.

Omdat er geen netto water wordt geproduceerd, kunnen voor ASR aquifers gebruikt worden die onvoldoende gekoppeld zijn aan een voedingsgebied, en daardoor bij gewone productie overbemaald zouden worden. Ook aquifers waarvan de kwaliteit van het water laag is kunnen gebruikt worden, omdat (bij ideale projecten) bij productie in hoofdzaak het geïnjecteerde water opnieuw gewonnen wordt. In Nederland wordt bijvoorbeeld ASR overwogen voor aquifers onder gewonnen land die van nature verzilt zijn.

## 9.2 POTENTIËLE ACTIVITEITEN IN HET MASSIEF VAN BRABANT

De watermaatschappijen Watergroep en Farys onderzoeken reeds enkele jaren actief deze optie, en de boring in Aalst (Aalst-Hofstade, 071E0360) is de meest recente proefboring die hiervoor werd uitgevoerd. Deze boring bereikt de Formatie van Tubize op een diepte van ongeveer 144 m (lithologisch, het massief gesteente start waarschijnlijk dieper) en werd voortgezet tot een diepte van 220 m. De eerste testresultaten zijn, voor zover gecommuniceerd, eerder bemoedigend.

Dit proefproject bevindt zich niet in de diepe ondergrond van Vlaanderen, maar indien dit soort projecten verder ontwikkeld worden, zouden ze in de toekomst dieper uitgevoerd kunnen worden omdat de geologie relatief gelijkaardig blijft met toenemende diepte. Hierdoor zouden deze activiteiten potentieel binnen het toepassingsgebied van het Decreet Diepe Ondergrond (dieper dan -500 mTAW) worden uitgevoerd.

### 9.3 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Seizoensgebonden ondergrondse opslag van drinkwater is in principe mogelijk in diepere, verzilte waterlagen. Door gebrek aan gegevens en testresultaten wordt hier gekozen om geografisch en geologisch het potentieel te bespreken, eerder dan een volumeberekening uit te voeren.

Het huidige proefproject wordt uitgevoerd in de ondiepe ondergrond in de omgeving van Aalst, waar de top van het Massief van Brabant wordt geviseerd. Deze top wordt algemeen als meer doorlatend gezien ('gespleten top van het Massief') en daarom soms als afzonderlijke aquifer beschouwd, alhoewel ze hydrologisch vaak een eenheid vormt met één van de afdekkende lagen (bv. Krijt of Formatie van Landen), het Sokkelsysteem volgens de VMM classificatie. Historisch werd uit deze

Andere aquifers, zoals deze in het Krijt of Paleogeen-Neogeen, kunnen eveneens gebruikt worden als deel van de diepe ondergrond, zoals in het noorden of oosten van de Kempen. Momenteel bestaat deze noodzaak nog niet, maar bij toenemende afbouw van netto grondwaterproductie is het niet onmogelijk dat productiecentra voor grondwater in de toekomst gebruikt zullen worden als opslagprojecten met verminderde of net-zero winning, waarbij de aquifer aangevuld wordt tijdens natte seizoenen en aangesproken wordt tijdens droge.



# 10 STEENKOOLONTGINNING IN HET KEMPENS SUBVOORLANDBEKKEN

De ontginning van steenkool in Vlaanderen start met de verkenning van de diepe ondergrond in Vlaanderen omstreeks het einde van de 19<sup>de</sup> eeuw. Vanaf 1876 bestond het vermoeden dat steenkoolbekkens zoals aangetroffen in Duitsland en het Verenigd Koninkrijk zich uitstrekten tot in Vlaanderen.

## 10.1 HISTORISCHE ACTIVITEIT

In 1901 werd voor het eerst steenkool aangeboord in Vlaanderen, in 1906 de eerste steenkoolconcessie verleend, gevolgd door de aanleg van steenkoolmijnen vanaf 1910 en de eerste ontginning in 1914 (Winterslag). In totaal werden 7 mijnzetels geopend, waarvan de laatste gesloten werd in 1992 (Zolder). Er zijn nog steeds belangrijke steenkoolreserves aanwezig die gedeeltelijk bestaan uit cokeskolen, één van de Europese kritieke grondstoffen.

De toestand van de mijnen kan niet rechtstreeks gemonitord worden door de volledige afsluiting van de mijnschachten. Satellietmetingen van de bodembeweging met PS-InSAR tonen aan dat er voor het volledige mijngebied een inversie is van de subsidentie. Dit betekent dat de hydrostatische druk in de mijnen voldoende hersteld is om een decompactie van de initieel ontwaterde zones te veroorzaken (waar subsidentie tijdens ontginning in meters werd uitgedrukt en vaak differentieel en relatief snel was, is subsidentie door decompactie geleidelijk, uniform en van de orde van centimeters of decimeters).

## 10.2 VOLUMETRISCHE SCHATTING

De reserves van steenkool in Vlaanderen werden meest recent (sinds 1990) geschat uitgaande van twee verschillende benaderingen. Een overzicht van eerdere schattingen (4 tot 7 miljard ton steenkool) wordt gegeven in Dusar et al. (1991).

Uitgaande van klassieke mijnbouw wordt bij het schatten van reserves rekening gehouden met de internationale richtlijnen van de *United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)*, namelijk minimale laagdikte (90 cm), maximaal asgehalte (50%) en een maximale diepte van 1200 m. Verder wordt gesteld dat slechts 25% van de reserve effectief winbaar is door exploitatie- en andere verliezen. Verschillende auteurs herhalen deze richtlijnen in hun publicaties, maar geven geen referentie naar de versie van het UNECE document. Op basis van deze veronderstellingen wordt de totale hoeveelheid steenkool ten noorden van de historische concessies, beperkt tot het gebied dat met boringen werd verkend, geschat op 3340 miljoen ton aan steenkool in-situ. Op basis van de 25% regel komt dit overeen met 835 miljoen ton technisch ontginbare steenkool (Dusar et al., 1991).

Inclusief de onontgonnen reserves in de uitgebate concessies en het gebied dat enkel seismisch geëxploreerd werd (zonder verkenningsboringen) is er minsten 4.5 miljard ton aan in-situ steenkool aanwezig: 4.1 miljard ton in het enkel seismisch verkende deel<sup>11</sup> en 400 miljoen ton aan onontgonnen reserves in de ontgonnen concessies (Dusar et al., 1990, 1991). Inclusief dunnere lagen zou de effectief aanwezige hoeveelheid steenkool 2 tot 4 maal hoger kunnen liggen Wenselaers et al. (1996). Deze schattingen werden overgenomen in Goovaerts & Burlet (2024).

<sup>11</sup> Aanwezigheid van belangrijke hoeveelheden steenkool werd in 1993 aangetoond met de boring van Peer, zie §12.1.

De Kempense steenkoolmijnen waren gericht op de ontginning van steenkool voor aanwending van vetkool (cokeskolen), één van de Europese kritieke grondstoffen, maar er bestaan geen gegevens over de relatieve hoeveelheid ervan ten opzichte van de totale hoeveelheid steenkool waardoor de reserves zonder aanvullende gegevens niet kunnen worden opgesplitst. Wel is het zo dat ontginning weinig selectief is, en dat steenkool als lagen in bulk ontgonnen wordt om pas daarna verder gesorteerd te worden naar kwaliteit en toepassing.

## 11 POTENTIËLE PROJECTEN VOOR MIJNMETHAAN IN HET KEMPENS SUBVOORLANDBEKKEN

De maatschappij Fluxys, die aan de basis ligt van het Belgische aardgasnetwerk, vindt haar oorsprong in de verzameling van mijnmethaan van verschillende Waalse mijnzetels. De mijnen in Vlaanderen werden hier niet op aangesloten, maar werden wel ontgast via ventilatie en boringen uitgevoerd vanuit de exploitatiefronten. In de mijnen Waterschei, Eisden en Zolder was er een gascaptiesysteem, dat in Waterschei ongeveer  $18 \times 10^6 \text{ m}^3$  gas afving per jaar naast de naar schatting 20 tot  $60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$  die in de atmosfeer geloosd werd (volgens Duser, 1996; in Wenselaers et al., 1996 wordt  $6250 \text{ m}^3/\text{u}$  vermeld wat overeenkomt met  $55 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ ). Enkel in Waterschei werd het afgevangen methaan gebruikt om twee gasturbines te voeden (elektriciteit en verwarming).

Na de sluiting van de mijnen bleven enkel in Winterslag twee ontluuchtingspijpen open die gedurende een tweetal jaar metingen toelieten. De diepste van deze pijpen raakte vrij snel geblokkeerd, waarschijnlijk door stijgend mijnwater na het stopzetten van de bemaling, maar de andere toonde een snelle evolutie naar vrijwel zuiver methaan dat aan een debiet van 800 m<sup>3</sup>/u ventileerde, en over een periode van 2 jaar kwam er naar schatting 5.5x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> methaan vrij (Dusar, 1996). Na een persbericht met verontrustende titel werden beide pijpen met beton volgestort.

Deze waarnemingen tonen dat de verlaten steenkoolmijnen waarschijnlijk initieel geschikt waren voor de ontginning van mijnmethaan, ook omdat het verschillende decennia duurde voordat ze volledig onderliepen. De inversie van subsidentie toont dat deze optie niet langer bestaat. Wel is het mogelijk dat bij het vollopen van de mijnen methaan geconcentreerd werd in bepaalde delen van de mijn en er gasbellen aanwezig zijn die slechts langzaam verkleinen door oplossing in het formatiewater.

Alhoewel rechtstreekse winning van mijnmethaan niet mogelijk is, zou het als bijproduct gewonnen kunnen worden bij een koude-warmteproject dat de verlaten mijn als reservoir gebruikt. De haalbaarheid hiervan hangt af van de gasconcentratie en de circulatieschema's, en kan op basis van huidige gegevens niet worden ingeschat.



# 12 KOOLBEDMETHAAN IN HET KEMPENS SUBVOORLANDBEKKEN

Organische koolstofketens worden bij begraving geleidelijk omgezet, waarbij onder meer methaan vrijkomt. Aangezien methaan bij verhoogde druk vrij goed adsorbeert op organisch materiaal, blijft het gedeeltelijk gevangen in de steenkoollagen. Door deze lagen aan te boren en door, via wateronttrekking, de druk te verlagen, komt dit methaan vrij en kan het ontgonnen worden als koolbedmethaan.

## 12.1 HISTORISCH PROEFPROJECT

De haalbaarheid van de ontginning van koolbedmethaan werd uitgetest met de proefboring van Peer (062E0276) (Wenselaers et al., 1996), een test die grotendeels door Vlaanderen werd gefinancierd. Deze boring werd in 1992 uitgevoerd tot een diepte van 1346 m met afwerking van de put in 1993. Er werden effectief gasrijke steenkoollagen aangeboord tussen 802 m en 1348 m met een cumulatieve kolendikte van 28,8 m. Een selectie van 4 koollagen werd gestimuleerd. De boring werd uitgevoerd in de nabijheid van de Donderslagbreuk in de hoop op een sterkere natuurlijke fracturatiegraad.

De initiële resultaten leken gunstig, maar het proefproject slaagde er uiteindelijk niet in om stabiel te produceren bij voldoende ontwatering. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de onderschatting van de watervoerendheid van de nabijgelegen Donderslagbreuk en de fracturatiezone daarrond (Wenselaers et al., 1996). Tijdens de testperiode van ruim één jaar werd ongeveer 17000 m<sup>3</sup> gas geproduceerd, waarvan ongeveer 10000 m<sup>3</sup> methaan. Het lijkt erg waarschijnlijk dat het mislukken van de winning van koolbedmethaan te Peer komt doordat ze nabij de Donderslagbreuk werd ingepland in de hoop dat een verhoogde fracturatiegraad gunstig zou zijn. Maar dit had eveneens tot gevolg dat de watervoerende breuk zelf werd aangetapt, met ongunstige resultaten voor ontwatering en gassamenstelling tot gevolg. Omwille van deze reden is de uitkomst van de test te Peer niet representatief voor andere potentiële projecten.

## 12.2 POTENTIĒLE PROJECTEN

Op verschillende momenten werd interesse getoond voor de ontginning van koolbedmethaan in het Kempens Subvoorlandbekken. Deze initiatieven varieerden van informatieaanvragen tot vergunningsaanvragen, maar bereikten tot nu toe niet het stadium van een effectieve herstart van exploratie.

Informatief wordt hier geïllustreerd hoe een potentieel project sterk kan afwijken van het uitgevoerde proefproject in Vlaanderen dat gebaseerd was op een verticale boring en stimulatie (*fracking*). Bij een alternatieve aanpak, die in Schotland werd ontwikkeld en uitgetest (Composite Energy, testproductie minstens vanaf 2008 nabij Firth of Forth), worden bijna horizontale boringen uitgevoerd doorheen individuele steenkoollagen over een lengte van meer dan één kilometer. Deze boringen worden nauwkeurig uitgevoerd zodat ze een verticale boring doorsnijden, en ze worden als open boorgat uitgevoerd in de steenkool, zonder verdere stimulatie. Voor de stabiliteit van het boorgat is een juiste oriëntatie ten opzichte van het natuurlijk spletenstelsel in steenkool belangrijk. Ook moeten breuken, en de daarbij horende stratigrafische sprongen, vermeden worden door deze boringen centraal in te plannen in breukblokken. Eens de horizontale boringen zijn

uitgevoerd, worden ze door wateronttrekking via het verticale boorgat in onderdruk gebracht, zodat ontgassing plaatsvindt. Het gas wordt via het verticale boorgat onttrokken.

Methaanproductie uit steenkool kan gestimuleerd worden door injectie van bijvoorbeeld stikstof of koolstofdioxide, gassen die elk op een andere manier interageren met steenkool. Vooral het gebruik van CO<sub>2</sub> werd initieel voorgesteld omdat er netto meer CO<sub>2</sub> opgeslagen zou kunnen worden dan er bij de verbranding van het onttrokken CH<sub>4</sub> zou worden vrijgezet. Experimenteel werk en proefprojecten stelden echter vragen bij de technische haalbaarheid van dit concept, vooral in relatief weinig doorlatende steenkool zoals ook in Vlaanderen, omdat zwelling van steenkool door adsorptie van CO<sub>2</sub> de doorlatendheid zou doen dalen (Wang et al., 2020). De in dit hoofdstuk gemaakte schattingen houden dan ook geen rekening met dit soort technieken.

## 12.3 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Er werden twee studies uitgevoerd naar het totale gasgehalte van de steenkool in de Kempen. Een eerste studie (van Tongeren et al., 2000) vertrekt van een inventarisatie van de steenkoolgegevens, voornamelijk uit boringen, om via een isopachenkaart en aannames over steenkoolgehalten en gasconcentraties te komen tot het totale potentieel winbare gasgehalte. Op dit systeem werd verder gebouwd en in Ferket & Laenen (2008) wordt de verder ontwikkelde methodologie uiteengezet die gebruik maakt van een meer gedetailleerde begravings- en gasgeneratie-evaluatie, en de locatie-specifieke schattingen vergelijkt met de gasconcentraties gemeten te Peer. Binnen VITO is deze methode ingebed in een niet-publieke applicatie die een geografisch gegevenssysteem bevraagt. Hieronder worden de schattingen in van Tongeren et al. (2000) besproken.

Voor de berekening van de reserves wordt de hoeveelheid steenkool per oppervlakte vermenigvuldigd met het verwachte gasgehalte. Deze laatste parameter wordt geschat op basis van de 'Stuffken'-curve (Stuffken, 1957), een empirische functie die op basis van een aantal parameters, waarvan de inkolingsgraad van de steenkool de belangrijkste is, het gasgehalte schat. Deze curve werd voor de Nederlandse steenkoolterreinen opgesteld, maar bleek ook voor de Kempense steenkool aannemelijke schattingen op te leveren. Door van Tongeren et al. (2000) werden op deze manier contourkaarten opgesteld waarvan de gebieden binnen de contour van (dus met hogere waarden dan)  $250 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$  aan gas in-situ hier als representatieve reserves worden voorgesteld. Binnen deze gebieden is de totale voorraad aan koolbedmethaan  $130 \times 10^9 \text{ m}^3$ . In van Tongeren et al. (2000) wordt een derde hiervan uitgesloten, omdat het verondersteld wordt in te dunne of geïsoleerde koollagen voor te komen, waarna nog een winbaarheidsfactor van 60% wordt toegepast. De technisch haalbare reserve wordt daarmee  $53 \times 10^9 \text{ m}^3$  aan methaan.

## 13 SCHALIEGAS IN HET KEMPENS VOORLANDBEKKEN

Bij de internationaal piekende interesse tussen 2011 en 2013 naar schaliegas werd ook in Vlaanderen het potentieel voor zover gekend in kaart gebracht, maar bleef het bij initiële interesse van potentiële investeerders. Er zijn twee mogelijkheden om schaliegas in Vlaanderen te winnen, beiden in het Kempens Voorlandbekken.

De organisch rijke schalies van de Formatie van Chokier vormen het meest voor de hand liggende exploratiedoel. Uit het ontsluitingsgebied in Wallonië is gekend dat deze lokaal geschikte eigenschappen kunnen hebben voor schaliegas-onttrekking, maar ook dat ze qua oorspronkelijke samenstelling en diagenese vrij sterk variëren. Deze formatie is relatief schaars bemonsterd in Vlaanderen, wat het moeilijk maakt om regionale conclusies te trekken. Ze is zeker niet overal even dik aanwezig, maar vertoont lokaal waarschijnlijk wel vrij gunstige eigenschappen. Bij verkennende gesprekken met Wintershall Holding (een groep die verkennend onderzoek uitvoerde in 2012) werd geopperd dat, omdat schaliegasprojecten vrij kortlopend zijn, de productieputten zo uitgevoerd konden worden dat een verdere verdieping voor bijvoorbeeld geothermieprojecten mogelijk zou blijven.

Een andere optie in Vlaanderen is gelinkt aan koolbedmethaan. In een niet vervolledigd doctoraatsonderzoek werden de organisch rijke schalies aan de basis van steenkoollagen uit het Westfaliaan onderzocht. De analyses leken aan te geven dat deze lagen niet enkel geschikt zouden kunnen zijn voor schaliegas, maar dat op basis van het organisch materiaal, en in tegenstelling tot wat verwacht zou worden uit de nabijheid van steenkool, deze schalies potentieel condensaten zouden kunnen produceren (Vandewijngaerde et al., 2016). Omdat deze schalies in continuïteit voorkomen met de steenkoollagen, zouden ze samen geëxploiteerd kunnen worden. Productie van condensaten zou de waarde van dergelijke projecten verhogen, naast het feit dat de reserves aan koolbedmethaan aanzienlijk groter zouden zijn dan geschat op basis van enkel de steenkoolreserves (zie §12.3) omdat gas geadsorbeerd op schalies hierbij werd verwaarloosd. Ook niveaus en gebieden met minder ontwikkelde steenkoollagen zouden interessant kunnen zijn indien de schaliepakketten geotechnisch en lithologisch geschikt en voldoende dik zijn.

Voor geen van beide settings werden ooit volumeschattingen opgemaakt. Recent werd het schaliegaspotentieel van het Namuriaan (Formatie van Chokier) geëvalueerd (voornamelijk op basis van de boring van Turnhout, 017E0225) met de ongunstige conclusie dat ze eerder overmatuur zijn en te gering in dikte (Wei et al., 2023). Daarom kon schaliegas niet meegenomen worden in de uitgevoerde simulatie. Wel werd de gelijkaardige ontginning van steenkoolmethaan gesimuleerd in één scenario (SELF) zodat een algemeen inzicht bekomen wordt. Steenkoolmethaan wordt niet alleen op een gelijkaardige manier gewonnen, er wordt eveneens gas geadsorbeerd aan schalie geproduceerd.

## 14 MINERALISATIES

Mineralisaties in de diepe ondergrond van Vlaanderen zijn terug te brengen tot twee metallische provincies: deze in het uiterste oosten van het Kempens Post-Brabantisch Bekken (Voeren), en in het Massief van Brabant.

## 14.1 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET KEMPENS POST-BRABANTISCH BEKKEN

Mineralisaties zijn gekend, en werden ontgonnen, ten oosten van de Voerstreek vanaf het midden van de 19<sup>de</sup> eeuw tot 1936, met uitzondering van sporadische ontginning tijdens de Tweede Wereldoorlog. Het is in hoofdzaak een lood-zink afzetting met lokaal zeer hoge ertsconcentraties. In de huidige context is de associatie met kritieke grondstoffen belangrijk. Er zijn aanwijzingen voor aanrijking in antimoon en germanium, en daarnaast ook zilver. De gekende mineralisaties reiken niet tot in Vlaanderen, maar wel wordt er aangenomen dat de mineralisatie zich voornamelijk in noordwestelijke richting uitstrekt, dus korter bij het Vlaams grondgebied. De geologische setting verandert echter dicht bij de grens met Vlaanderen, wat het bestaan van niet ontdekte ertsafzettingen van dit type in Vlaanderen minder waarschijnlijk maakt.

Lithium komt, waarschijnlijk naast andere elementen, ook voor opgelost in zoutwatervoerende aquifers. Met name werd het gehalte aan lithium in het formatiewater van het Dinantiaan geanalyseerd, maar momenteel zijn er geen concrete initiatieven om dit te winnen.

## 14.2 POTENTIËLE PROJECTEN IN HET MASSIEF VAN BRABANT

Langs de zuidrand van het Massief van Brabant werd met een bundeling van publieke (voornamelijk Vlaamse) en private financiering een reeks boringen uitgevoerd als exploratie naar ertsafzettingen. Voordien waren inderdaad aanwijzingen gevonden voor de aanwezigheid van erts op basis van geofysische metingen en regionale grondwaterchemie. De diepste gekerde boring (114E0100) heeft een diepte van 430 m en bereikt dus niet de diepe ondergrond.

Er werd een polysulfidenmineralisatie aangetroffen in een brede schuifzone die gelinkt kon worden aan migratie van een metamorf fluïdum tijdens de Brabantse Orogenese. De mineralisaties zijn op zich niet economisch, maar mogelijk wel indicatief voor andere, beter ontwikkelde ertslichamen in het Massief van Brabant. De mineralisatie komt immers voor in een zwakhellende schuifzone, wat past in het regionale vervormingspatroon dat zich concentreert tegen en langs de weinig vervormbare, veronderstelde granietlichamen in de diepte. Zwak noord hellende schuifzones tappen niet rechtstreeks de metamorfe fluïda aan, maar zijn waarschijnlijk verbonden, en vormen mogelijk een structureel geheel, met meer verticaal en diep reikende schuifzones in een meer centraal deel van het Brabants Orogeen, ten noorden van het onderzochte gebied. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat hier wel economische ertsafzettingen afgezet werden, die in dat geval een gelijkaardige samenstelling kunnen hebben als de ondiepere: met onder meer koper, antimoon, bismut, zilver en arseen.

De veronderstelde granietlichamen die reeds besproken werden bij geothermische prospectie (paragraaf 2.3.1) zijn ook potentiële gastgesteenten voor ertsen, evenals de schuif- en breukzones die preferentieel nabij het granietcontact ontwikkeld kunnen zijn. Afhankelijk van het type granietlichaam kunnen elementen zoals lithium, tantaal, gallium of germanium verwacht worden, naast andere al dan niet kritieke of strategische grondstoffen. De verwachte geothermische

proefboring in Wielsbeke (zie §2.3.1.1) zou voor het eerst hierover meer informatie kunnen brengen. De financiering van het wetenschappelijke luik van deze boring, dat naast de geothermische aspecten met name ook onderzoek naar mineralisaties zou garanderen, is niet toegekend, en de uitvoering van dit onderzoek is daarom onzeker.

Algemeen is het Massief van Brabant, doordat het een zeer grote maar nauwelijks ontsloten of verkende lithotektonische eenheid is, de belangrijkste onbekende voor het inschatten van mineralisaties in Vlaanderen.

### 14.3 VOLUMETRISCHE SCHATTING

Aangezien er geen mineralisaties dieper dan 500 m gekend zijn in Vlaanderen kunnen er geen volumeschattingen gemaakt worden. Dit wil niet zeggen dat ze potentieel niet aanwezig kunnen zijn.

In het formatiewater van het Dinantiaan werd wel de concentratie aan opgelost lithium bepaald. Deze wordt geciteerd op 100 mg/l (De Tijd, 2023; Michielsens & Vanverdegem, 2023), het aantal analyses of de variatie tussen individuele resultaten is niet gekend. Deze concentratie is potentieel interessant indien lithium zeer efficiënt en tegen een lage kostprijs gewonnen kan worden. Het winnen van lithium kan gekoppeld worden aan geothermische productie via doubletten. De technoeconomische aspecten van de extractie van lithium worden getest en verder ontwikkeld in een aantal buitenlandse proefprojecten (bv. in de Elzas). Belangrijk is dat in deze projecten geothermie niet voorop staat, maar wel de extractie van lithium, waarbij de energie voor de extractie geleverd wordt door geothermie (om CO<sub>2</sub> neutraliteit te verwezenlijken).

In de pers worden voor Vlaanderen cijfers tot 500 tLi<sub>2</sub>O/jaar per geothermieproject aangehaald en geëxtrapoleerd naar 15000 t/jaar voor in totaal 30 projecten (Munster, 2024). Deze schatting lijkt erg optimistisch want zelfs met een 100% efficiënte extractie en een ononderbroken productie zou een debiet van 285 m<sup>3</sup>/u per doublet nodig zijn. Uitgaande dat een gemiddeld geothermieproject eerder een debiet van 100 tot 200 m<sup>3</sup>/u haalt en gedurende 6 maanden produceert (afhankelijk van de toepassing zullen geothermieprojecten op jaarbasis 50% tot 90% operationeel zijn), is een opbrengst van 50 tot 200 tLi<sub>2</sub>O/jaar realistischer. Deze schatting overlapt met de input voor de impactstudie met PSS-simulaties, die in de range liggen van 40 tot 180 tLi<sub>2</sub>O/jaar).

Een schatting van de totale hoeveelheid lithium die potentieel winbaar is uit het formatiewater van het Dinantiaanreservoir kan gemaakt worden door terug te rekenen vanuit het geothermisch potentieel geschat door Berckmans & Vandenberghe (1998). Dit kan echter niet rechtstreeks omdat volumetrische gegevens onvolledig gepubliceerd werden. Gebruik makend van de formules uit Hurter & Haenel (2002) en aanvullende gegevens uit Veldkamp & HotLime Team (2021) kan geschat worden dat Berckmans & Vandenberghe (1998) impliciet uitgaan van een volume aan formatiewater van  $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ , waaruit een totale massa opgelost lithium van 200000 ton in Vlaanderen kan worden berekend (ter vergelijking: de wereld jaarproductie van lithium in 2023 bedroeg 180000 ton (U.S. Geological Survey, 2024)). Deze schatting houdt rekening met alle veronderstellingen die werden gemaakt bij de berekening van het geothermische potentieel, zoals een windbaarheidsfactor van 33%. Zoals in sectie 2.4 wordt besproken, werd de schatting voor het geothermische potentieel van het Dinantiaan reservoir van Berckmans & Vandenberghe (1998) door Bos & Laenen (2017) naar boven bijgesteld, onder andere omwille van een groter dieptebereik. In dezelfde lijn zou de potentiële massa aan opgelost lithium ook verhoogd kunnen worden (de onderliggende berekening is echter minder eenvoudig omkeerbaar).



## 15.1 HISTORISCHE PROJECTEN

## 15.2 HUIDIGE PROJECTEN

### 15.3 HUIDIGE PROEFPROJECTEN

## 15.4 POTENTIËLE PROJECTEN IN VOORBEREIDING

## 15.5 POTENTIËLE ACTIVITEITEN TUSSEN NU EN 2050

pagina 54 van 62



In de modellering die loopt tot 2050 wordt de meerderheid van deze activiteiten meegenomen (tabel 7). Opslag van drinkwater, warmteopslag in aquifers en opslag van potentiële energie worden niet specifiek gemodelleerd. Hiervoor is hun impact te lokaal of de technologische uitwerking te onzeker.

|                                        | Voor 2050 – gemodelleerd              | Voor 2050 – niet gemodelleerd, wel kwalitatief beschreven | Na 2050                    |
|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| Geothermie                             | Doubletten in Kempen, éénputssystemen |                                                           | Voor elektriciteitswinning |
| Warmteopslag                           |                                       | X                                                         |                            |
| Koude-warmteopslag                     | In steenkoolmijn                      | In aquifers                                               |                            |
| Opslag aardgas                         | X                                     |                                                           |                            |
| Opslag waterstof                       | X                                     |                                                           |                            |
| Opslag CO <sub>2</sub>                 | X                                     |                                                           |                            |
| Ondergrondse berging radioactief afval |                                       | X                                                         | Massief van Brabant        |
| Ondergrondse opslag potentiële energie |                                       | X                                                         |                            |
| Ondergrondse opslag van drinkwater     |                                       | X                                                         |                            |
| Steenkoolontginning                    |                                       |                                                           | X                          |
| Koolbedmethaan                         | Enkel in SELF scenario                |                                                           | X                          |
| Schaliegas                             |                                       |                                                           | X                          |
| Mineralisaties                         | Li in combinatie met geothermie       |                                                           | X                          |

Tabel 7: Overzicht van verschillende activiteiten in functie van hoe ze onderwerp vormen in deze studie.

## 15.6 POTENTIËLE ACTIVITEITEN NA 2050

Alhoewel het potentieel bestaat, zijn andere activiteiten onvoldoende matuur om vóór 2050 verwacht gerealiseerd te worden in Vlaanderen, of zou dit een radicale wijziging vragen in de socio-economische context. Hierbij horen zeer diepe geothermische projecten voor elektriciteitswinning, berging van radioactief afval in het Massief van Brabant, ontginning van steenkool, ontginning van schaliegas, ontginning van koolbedmethaan, en diepe ontginning van mineralisaties (anders dan de winning van elementen, vb. Li, opgelost in formatiewater). In één scenario wordt een socio-economische context gesimuleerd die sterk op zelfvoorziening is gericht (SELF scenario, zie deelrapport D4 (beleidsscenario's)) en waar in tegenstelling met andere scenario's de ontginning van koolbedmethaan mogelijk is.

## 16 REFERENTIES

- Areias, L., Craeye, B., De Schutter, G., Van Humbeeck, H., Wacquier, W., Villers, L., Van Cotthem, A., 2010. Half-Scale Test: An Important Step to Demonstrate the Feasibility of the Belgian Supercontainer Concept for Disposal of HLW. ASME 2010 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Volume 2. Presented at the ASME 2010 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ASMEDC, Tsukuba, Japan, 287–296. <https://doi.org/10.1115/ICEM2010-40119>
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., Mathiassen, O.M., 2007. CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1, 430–443. [https://doi.org/doi: 10.1016/S1750-5836\(07\)00086-2](https://doi.org/doi: 10.1016/S1750-5836(07)00086-2)
- Berckmans, A., Vandenberghe, N., 1998. Use and potential of geothermal energy in Belgium. *Geothermics* 27, 235–242. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(97\)10010-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(97)10010-4)
- Bertier, P., Swennen, R., Kemps, R., Laenen, B., Dreesen, R., 2022. Reservoir characteristics and diagenesis of the Buntsandstein sandstones in the Campine Basin (NE Belgium). *Geologica Belgica* 25, 145–184. <https://doi.org/10.20341/gb.2022.004>
- Bless, M.J.M., Boonen, P., DUSAR, M., Soille, P., 1981. Microfossils and depositional environment of Late Dinantian carbonates at Heibaart (Northern Belgium). *Annales de La Société Géologique de Belgique* 104, 135–165.
- Borremans, M. (Ed.), 2015. *Geologie van Vlaanderen*.
- Bos, S., Laenen, B., 2017. Development of the first deep geothermal doublet in the Campine Basin of Belgium. *European Geologist Journal* 43, 16–20.
- Broothaers, M., Lagrou, D., Laenen, B., Harcouët-Menou, V., Vos, D., 2021. Deep geothermal energy in the Lower Carboniferous carbonates of the Campine Basin, northern Belgium: An overview from the 1950's to 2020. *Zeitschrift Der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften* 172, 211–225. <https://doi.org/10.1127/zdgg/2021/0285>
- De Koninck, R., Hernandez Acevedo, E., Broothaers, M., 2022. . Reservoir simulation data for Flemish geothermal resources (Temperature & Depth data). No. Deliverable D2.1, DESIGNATE project.
- De Meyer, F., 1984. TWO STRUCTURAL MODELS FOR THE WESTERN FLANK OF THE BRABANT MASSIF\*. *Geophysical Prospecting* 32, 37–50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1984.tb00715.x>
- De Tijd, 2023. Geothermiebedrijf Hita ontdekt lithium in de diepe Kempen., *De Tijd*.
- Dusar, M., 1996. Steenkool. In: Gullentops, F., Wouters, L. (Eds.), *Delfstoffen in Vlaanderen*. 107–115.
- Dusar, M., Bouckaert, J., Verkaeren, P., 1991. The hard coal reserves of the campine mining basin. *Brussels*, 13-09-1991, 7.
- Dusar, M., Bouckaert, J., Verkaeren, P., 1990. The hard coal reserves of the Campine mining basin. *Annales de La Société Géologique de Belgique* 113, 127–128.
- EIG Euridice, 2017. How does one build a supercontainer?
- Ferket, H., Laenen, B., 2008. Een methode voor het berekenen van het methaangehalte van steenkoollagen. No. 2008/MAT/R/102.
- Goovaerts, T., Burlet, C., 2024. Coking coal. In: Decrée, S. (Ed.), *The Critical Raw Materials Atlas of Belgium*, *Memoirs of the Geological Survey of Belgium*. 114–117.
- Gringarten, A., 1978. Reservoir Lifetime and Heat Recovery Factor in Geothermal Aquifers used for Urban Heating. *Pageoph* 117, 297–308.
- Grosjean, A., 1954. Mesures de températures aux profondeurs de 2.185 et 2.225 m dans le sondage de Turnhout (Campine Belge). *Bulletin de La Société Géologique de La Belgique* 63, 193–201.
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J.M., Hangx, S.J.T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E.M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann,

- K., Wilkinson, M., Bentham, M., Stuart Haszeldine, R., Carbonell, R., Rudloff, A., 2021. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. *Energy & Environmental Science* 14, 853–864. <https://doi.org/10.1039/D0EE03536J>
- Hurter, S., Haenel, R., 2002. Atlas of Geothermal Resources in Europe. No. EUR 17811. European Commission.
- IAEA, 2011. Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements. No. SSR-5, Specific Safety Requirements.
- International Atomic Energy Agency, 2020. Design Principles and Approaches for Radioactive Waste Repositories. No. STI/PUB/1908.
- Khodayar, M., Björnsson, S., 2024. Conventional Geothermal Systems and Unconventional Geothermal Developments: An Overview. *Open Journal of Geology* 14, 196–246. <https://doi.org/10.4236/ojg.2024.142012>
- Laenen, B., Van Tongeren, P., Dreesen, R., Duser, M., 2004. Carbon dioxide sequestration in the Campine Basin and the adjacent Roer Valley Graben (North Belgium): an inventory. Geological Society, London, Special Publications 233, 193–210. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.233.01.13>
- Lagrou, D., Matthijs, J., Van Haren, T., Dirix, K., Laenen, B., 2020. Kansen voor energieopslag in de diepe ondergrond van Vlaanderen. No. 2020/RMA/R/2074. Vlaamse Overheid. Department Omgeving.
- Michielsens, T., Vanverdegem, M., 2023. L'entreprise de géothermie Hita découvre du lithium en Campine., *l'Echo*.
- Muhammed, N.S., Haq, M.B., Al Shehri, D.A., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E., Iglauer, S., 2023. Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review. *Fuel* 337, 127032. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032>
- Munster, J.-F., 2024. Les promesses d'un lithium vert made in Europe., *Le Soir*.
- Nelskamp, S., Foeken, J.P.T., Veldkamp, J.G., 2022. Dinantian geothermal potential. Interreg report - DGE-ROLLOUT.
- NIRAS, 2008. De huidige toestand van het beheer van radioactief afval in België. No. NIROND 2008-02 N.
- Perera, M.S.A., 2023. A review of underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: Insights into various rock-fluid interaction mechanisms and their impact on the process integrity. *Fuel* 334, 126677. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126677>
- Piessens, K., 2012. Converting abandoned coal mines into pumped-storage hydroelectric power stations. Moving Plates and Melting Icecaps - Processes and Forcing Factors in Geology. Presented at the 4th International Geologica Belgica Meeting, Brussels, Belgium, 234–234.
- Piessens, K., 2011. Quantifying the CO<sub>2</sub> storage potential in Belgium: Working with theoretical capacities. *Energy Procedia*. 4905–4912.
- Piessens, K., Duser, M., 2004. Feasibility of CO<sub>2</sub> sequestration in abandoned coal mines in Belgium. *Geologica Belgica* 4, 165–180.
- Piessens, K., Laenen, B., Nijs, W., Mathieu, P., Baele, J.-M., Hendriks, C., Bertrand, E., Bierkens, J., Brandsma, R., Broothaers, M., De Visser, E., Dreesen, R., Hildenbrand, S., Lagrou, D., Vandeginste, V., Welkenhuysen, K., 2009. Policy Support System for Carbon Capture and Storage - Phase 1 (PSS-CCS). No. SD/CP/04A, Research Programme Science for a Sustainable Development. Belgian Science Policy Office.
- Piessens, K., Vancampenhout, P., De Vos, W., 2005. Geologische subcropkaart van het Massief van Brabant in Vlaanderen.
- Piessens, K., Vandeginste, V., Vancampenhout, P., Duser, M., 2007. Location-specific evaluation for geological storage of CO<sub>2</sub> (LocC). Report of the Geological Survey of Belgium.
- Piessens, K., Walstra, J., Willems, A., Barros, R., 2024. Old concepts in a new semantic perspective: introducing a geotemporal approach to conceptual definitions in geology. preprint. *Life Sciences*. <https://doi.org/10.31223/X5RT28>

- pagina 58 van 62



## 17 BIJLAGE: LITERATUURLIJST WATERSTOFOPSLAG

| Reference                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Remark                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Alessa, S., Sakhaee-Pour, A., Alipour, M., 2022. Safe pressure for hydrogen storage in subsurface. <i>Energy Reports</i> 8, 15702–15711. <a href="https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.141">https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.141</a>                                                                                                                                                                                                                                                      | Interfacial tension H2-brine and CH4-brine   |
| Aslannezhad, M., Ali, M., Kalantariasl, A., Sayyafzadeh, M., You, Z., Iglauer, S., Keshavarz, A., 2023. A review of hydrogen/rock/brine interaction: Implications for Hydrogen Geo-storage. <i>Progress in Energy and Combustion Science</i> 95, 101066. <a href="https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101066">https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101066</a>                                                                                                                                    | Review                                       |
| Ebrahimiyeika, A., 2017. Characterization of geochemical interactions and migration of hydrogen in sandstone sedimentary formations: application to geological storage. Université d'Orléans.                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Geochemical reactions sandstones, up to 100y |
| Haddad, P.G., Ranchou-Peyruse, M., Guignard, M., Mura, J., Casteran, F., Ronjon-Magand, L., Senechal, P., Isaure, M.-P., Moonen, P., Hoareau, G., Dequidt, D., Chiquet, P., Caumette, G., Cezac, P., Ranchou-Peyruse, A., 2022. Geological storage of hydrogen in deep aquifers – an experimental multidisciplinary study. <i>Energy Environ. Sci.</i> 15, 3400–3415. <a href="https://doi.org/10.1039/D2EE00765G">https://doi.org/10.1039/D2EE00765G</a>                                       | Sulphate consumption                         |
| Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J.M., Hangx, S.J.T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E.M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Stuart Haszeldine, R., Carbonell, R., Rudloff, A., 2021. Enabling large-scale hydrogen storage in porous media – the scientific challenges. <i>Energy Environ. Sci.</i> 14, 853–864. <a href="https://doi.org/10.1039/D0EE03536J">https://doi.org/10.1039/D0EE03536J</a> | Overview, limits for microorganisms...       |
| Iglauer, S., 2022. Optimum geological storage depths for structural H2 geo-storage. <i>Journal of Petroleum Science and Engineering</i> 212, 109498. <a href="https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109498">https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109498</a>                                                                                                                                                                                                                                    | Storage depth only                           |
| Muhammed, N.S., Haq, B., Al Shehri, D., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E., 2022. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. <i>Energy Reports</i> 8, 461–499. <a href="https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.002">https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.002</a>                                                                                                                                                       | Review, reactions                            |
| Muhammed, N.S., Haq, M.B., Al Shehri, D.A., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E., Iglauer, S., 2023. Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review. <i>Fuel</i> 337, 127032. <a href="https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032">https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127032</a>                                                                                                                                                                                         | Review, modelling                            |
| Pichler, M., 2013. Assesment of hydrogen - rock interactions during geoloigcal storage of CH4-H2 mixtures. Department Mineral Resources & Petroleum Engineering.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Thesis, reactions                            |
| Yekta, A.E., Pichavant, M., Audigane, P., 2018. Evaluation of geochemical reactivity of hydrogen in sandstone: Application to geological storage. <i>Applied Geochemistry</i> 95, 182–194. <a href="https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.021">https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.021</a>                                                                                                                                                                                        | Reactions, sandstone                         |
| Abid, H.R., Yekeen, N., Al-Yaseri, A., Keshavarz, A., and Iglauer, S., 2022, The impact of humic acid on hydrogen adsorptive capacity of eagle ford shale: Implications for underground hydrogen storage: <i>Journal of Energy Storage</i> , v. 55, p. 105615, doi:10.1016/j.est.2022.105615.                                                                                                                                                                                                   | Shale adsorption                             |
| Alessa, S., Sakhaee-Pour, A., and Alipour, M., 2022, Safe pressure for hydrogen storage in subsurface: <i>Energy Reports</i> , v. 8, p. 15702–15711, doi:10.1016/j.egy.2022.11.141.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Pressure safety                              |
| Ali, M., Jha, N.K., Al-Yaseri, A., Zhang, Y., Iglauer, S., and Sarmadivaleh, M., 2021a, Hydrogen wettability of quartz substrates exposed to organic acids; Implications for hydrogen geo-storage in sandstone reservoirs: <i>Journal of Petroleum Science and Engineering</i> , v. 207, p. 109081, doi:10.1016/j.petrol.2021.109081.                                                                                                                                                           | Quartz wettability                           |
| Ali, M., Pan, B., Yekeen, N., Al-Anssari, S., Al-Anazi, A., Keshavarz, A., Iglauer, S., and Hoteit, H., 2022a, Assessment of wettability and rock-fluid interfacial tension of caprock: Implications for hydrogen and carbon dioxide geo-storage: <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , v. 47, p. 14104–14120, doi:10.1016/j.ijhydene.2022.02.149.                                                                                                                                  | Seal wettability                             |
| Ali, M., Yekeen, N., Pal, N., Keshavarz, A., Iglauer, S., and Hoteit, H., 2022b, Influence of organic molecules on wetting characteristics of mica/H2/brine systems: Implications for hydrogen structural trapping capacities: <i>Journal of Colloid and Interface Science</i> , v. 608, p. 1739–1749, doi:10.1016/j.jcis.2021.10.080.                                                                                                                                                          | Wettability                                  |
| Ali, M., Yekeen, N., Pal, N., Keshavarz, A., Iglauer, S., and Hoteit, H., 2021b, Influence of pressure, temperature and organic surface concentration on hydrogen wettability of caprock; implications for hydrogen geo-storage: <i>Energy Reports</i> , v. 7, p. 5988–5996, doi:10.1016/j.egy.2021.09.016.                                                                                                                                                                                     | Seal wettability                             |
| Al-Mukainah, H., Al-Yaseri, A., Yekeen, N., Hamad, J.A., and Mahmoud, M., 2022, Wettability of shale–brine–H2 system and H2-brine interfacial tension for assessment of the sealing capacities of shale formations during underground hydrogen storage: <i>Energy Reports</i> , v. 8, p. 8830–8843, doi:10.1016/j.egy.2022.07.004.                                                                                                                                                              | Shale sealing, wettability                   |
| Al-Yaseri, A., Esteban, L., Yekeen, N., Giwelli, A., Sarout, J., and Sarmadivaleh, M., 2023b, The effect of clay on initial and residual saturation of hydrogen in clay-rich sandstone formation: Implications for underground hydrogen storage: <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , v. 48, p. 5175–5185, doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.059.                                                                                                                                     | Clay wettability                             |
| Al-Yaseri, A., and Jha, N.K., 2021, On hydrogen wettability of basaltic rock: <i>Journal of Petroleum Science and Engineering</i> , v. 200, p. 108387, doi:10.1016/j.petrol.2021.108387.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Hydrogen wettability                         |







