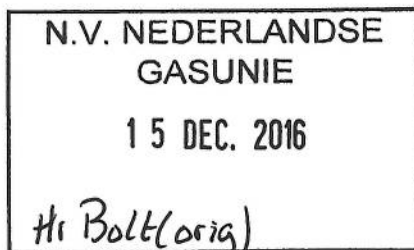




> Retouradres Postbus 24037 2490 AA Den Haag

N.V. Nederlandse Gasunie
t.a.v. de heer Bolt
Postbus 19
9700 MA GRONINGEN



Datum 14 december 2016
Betreft Abandonneringstudies n.a.v. instemmingsbesluit Opslagplan Zuidwending

Staatstoezicht op de Mijnen

Bezoekadres

Henri Faasdreef 312
2492 JP Den Haag

Postadres

Postbus 24037
2490 AA Den Haag

T 070 379 8400 (algemeen)
F 070 379 8455 (algemeen)

sodm@minez.nl
www.sodm.nl

Behandeld door

N.J. Hardebol Ph.D.

T 070 378 4904

Ons kenmerk

16192394

Uw kenmerk

Bijlage(n)

1

Geachte Heer Bolt,

Deze brief is onze reactie op uw abandonneringstudies die u heeft uitgevoerd naar aanleiding van het instemmingsbesluit¹ op gewijzigd opslagplan Zuidwending 2012.

In het bovengenoemde besluit is in artikel 4 de volgende voorwaarde opgenomen:

N.V. Nederlandse Gasunie voert voor 1 januari 2014 ten genoegen van de Inspecteur-Generaal de Mijnen nader onderzoek uit naar de bodemdaling ten gevolge van de beëindiging van de opslag in zoutcavernes.

Dezelfde voorwaarde is als artikel 2 opgenomen in het vigerend instemmingsbesluit² met een herziene datum van 30 juni 2014 voor het indienen van uw onderzoeksbevindingen.

In uw brief van 13 december 2013 licht u toe hieraan te willen voldoen middels een project waarvan fasen 1 en 2 ingaan op de bovenstaande voorwaarde. Met deze twee fasen wordt aandacht gegeven aan de methode van abandonnering en de geschatte bodemdaling. Op 4 maart 2014 heeft u aan de Minister van Economische Zaken twee rapporten aangeboden:

- (1) General concept for the abandonment of the gas storage caverns of Gasunie at Zuidwending, The Netherlands.
- (2) Estimates on Subsidence caused by Gas Storage Caverns A, A3, A4, A6 and A7 in the Post Operation Phase.

SodM heeft een review van het eerste rapport laten uitvoeren door prof. K.H. Lux van de Technische Universität Clausthal om na te gaan in hoeverre de belangrijkste aspecten van abandonnering op juiste wijze zijn belicht. Hij bevestigt dat het rapport de relevante aspecten m.b.t. de abandonnering voldoende adresseert. Ik voeg de review bij zodat u de aanbevelingen kunt meenemen in uw toekomstige uitwerking van abandonnering.

¹ kenmerk DGETM-EM / 12349985

² kenmerk DGETM-EM / 14055491

Naar mijn mening heeft Gasunie met deze rapportages voldaan aan de voorwaarde in artikel 2 van het vigerende instemmingsbesluit gewijzigd opslagplan Zuidwending.

SodM hoopt u hiermee voldoende te hebben geïnformeerd.

Met vriendelijke groet,



drs. H.A.J.M. van der Meijden, MBA
Inspecteur-generaal der Mijnen

Namens deze,

Bijlage: Reviewstudie abandonnering Zuidwending cavernes, door Prof. K.H. Lux van Technische Universität Clausthal.



**Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal**

Review

on behalf of State Supervision of Mines regarding

***General concept for the Abandonment of the Gas Storage
Caverns of Gasunie at Zuidwending, The Netherlands***

prepared by IfG, KBB UT, DEEP, 21. February 2014

Clausthal-Zellerfeld, Juni 2016

Review

General concept for the Abandonment of the Gas Storage Caverns of Gasunie at Zuidwending, the Netherlands

prepared by

IfG, KBB UT, DEEP, 21. February 2014

1. Vorgang und Aufgabenstellung

Die nachsorgefreie umweltverträgliche und sichere Stilllegung von Speicherkavernen nach Ende der Betriebsphase ist eine Aufgabe, mit der sich Kavernenbetreiber und Genehmigungsbehörden rechtzeitig befassen müssen. Stilllegungskonzepte werden daher nicht erst bei bevorstehender Betriebseinstellung, sondern weit im Voraus, mitunter auch schon im Rahmen der Betriebsaufnahme erarbeitet, um zumindest grundsätzlich aufzuzeigen, dass standortbezogen eine den heutigen Anforderungen entsprechende Stilllegung später, d.h. in einigen Jahrzehnten nach Betriebseinstellung, möglich sein wird.

Vor diesem Hintergrund haben die Ingenieurgesellschaften IfG, KBBUT und DEEP für die N.V. Netherlands Gasunie ein generelles Konzept zu einer späteren Stilllegung der Erdgasspeicherkavernen am Standort Zuidwending in den Niederlanden vorgelegt.

Das vorgelegte Dokument umfasst insgesamt 50 Seiten.

Der Unterzeichnende wurde von der State Supervision of Mines der Niederlande mit Auftrag vom 19.11.2015 gebeten, das vorgeschlagene Konzept zur Kavernenstilllegung zu begutachten. Dabei sollen insbesondere betrachtet werden, E-Mail Dr. A.G. Muntendam-Bos, 16. Juli 2015:

- (1) Sind alle möglichen Szenarios für die Stilllegung betrachtet worden?
- (2) Sind die Annahmen und Parameterzahlenwerte vernünftig und zuverlässig?
- (3) Sind die Berechnungen aus wissenschaftlicher Sicht korrekt bzw. geben sie eine vernünftige und plausible Abbildung dessen wieder, was in Zukunft geschehen mag?
- (4) Sind die wissenschaftlichen Grundlagen, die Diskussionen und die Schlussfolgerungen so, dass die Genehmigungsbehörde darauf vertrauen kann?
- (5) Könnten zusätzliche Arbeiten, Monitoring, etc. erforderlich sein, um einwandfreie Schlussfolgerungen für die Stilllegung der Kavernen und die möglichen Folgen in Form von Tragoberflächensenkungen etc. zu ziehen?

2. Vorgesehenes Stilllegungskonzept-Übersicht zu den Ausführungen

Das vom IfG, KBB UT und DEEP vorgelegte generelle Konzept zur Stilllegung der Erdgasspeicherkavernen am Standort Zuidwending umfasst nach Übersichten zu Inhalt, Tabellen und Abbildungen insgesamt 6 Abschnitte und ein Literaturverzeichnis. Nach einer kurzen Einführung in Abschnitt 1 mit insbesondere der Darlegung der Sachthemen, mit denen sich Kavernenstilllegungskonzepte befassen sollen, folgt im Abschnitt 2 eine Übersicht zu den bearbeiteten Themenfeldern. Danach folgen in Abschnitt 3 eine kurze Darstellung des grundsätzlichen Hintergrundes der planmäßigen Kavernenstilllegung und eine kurze Darlegung von grundsätzlichen Möglichkeiten.

In Abschnitt 4 erfolgt dann eine detaillierte Befassung mit bestehenden Konzepten zur Kavernenstilllegung, beginnend mit einer kurzen Darstellung der bestehenden gesetzlichen Anforderungen in den Niederlanden und gefolgt von einer Beschreibung der wissenschaftlichen Aspekte des Tragverhaltens von verschlossenen Salzkavernen, insbesondere bei Soleverfüllung, aber auch bei Feststoffverfüllung. Hier wird insbesondere der internationale Kenntnisstand referiert. Final wird festgestellt, dass ein Stilllegungskonzept mit soleverfüllter Kaverne und verschlossenem Bohrloch den Anforderungen nach Langzeitsicherheit genügt. Allerdings muss ein derartiges Konzept auch standortbezogen ausgearbeitet sein und für einen vernünftig erscheinenden Zeitraum belegt werden. Abschnitt 5 befasst sich dann mit der Vorstellung des ausgewählten Stilllegungskonzeptes. Dabei werden im Einzelnen nach einer generellen Konzeptbeschreibung mit den relevanten technischen Einzelfeldern *Kavernenvorbereitung für Stilllegung, Produktauslagerung, Feldmessungen, Feldtests, Temperatenausgleich sowie Bohrlochverschluss und Monitoring* vertieft behandelt:

- geomechanische Aspekte (fachliteraturbasiert), die mit dem Druckaufbau in der verschlossenen Kaverne und seinen langzeitigen Folgewirkungen für das umgebende Salinargebirge verbunden sind,
- Anforderungen, die vor Verschluss der Kaverne gestellt werden,
- technische Möglichkeiten zum Bohrlochverschluss sowie
- finanzielle und zeitliche Aspekte orientiert an den einzelnen Aktivitäten, die mit einer Umsetzung des Stilllegungskonzeptes verbunden sind.

In Abschnitt 6 folgt dann abschließend eine Zusammenfassung mit Schlussfolgerungen. Dabei wird hervorgehoben, dass die Stilllegung der Erdgasspeicherkavernen am Standort Zuidwending mit dem Konzept *Soleverfüllung und Bohrlochverschluss* durchführbar ist und daher empfohlen wird.

3. Stellungnahme aus gebirgsmechanischer Sicht

3.1 Vorbemerkung

Die von der Aufsichtsbehörde als Auftraggeber skizzierten und in Abschnitt 1 vorstehend zitierten Fragestellungen an das Review betreffen zwei unterschiedliche Dokumente zur Kavernenstilllegung. Mit Bezug auf das hier relevante Dokument bezüglich Erdgasspeicherkavernen am Standort Zuidwending können nur Ausführungen zu den Fragestellungen unter (1), (4) und vielleicht (5) erarbeitet werden. Grund hierfür ist, dass das vorgelegte Dokument seinem Titel entsprechend nur ein generelles, aber kein technisch detailliert ausgearbeitetes Konzept für die Kavernenstilllegung am Standort Zuidwending enthält. Daher kann sich das Review auch nur auf diese generellen Ausführungen zum Thema beziehen. Vor diesem Hintergrund ist anzumerken, dass entsprechend dem Thema des Dokumentes von den Autoren der grundsätzliche Sachverhalt, der mit der Stilllegung von Kavernen verbunden ist, aus insbesondere geotechnischer Sicht bearbeitet wird, aber eine spezialisierte Einbeziehung von Gegebenheiten, die mit dem Standort Zuidwending verbunden sind, nicht erfolgt. Hierzu wird ohne nähere Präzisierung auf weitere erforderliche Studien verwiesen.

Als Aufgabenfelder für ihre vorgelegte und hier für das Review relevante Studie benennen die Autoren im Abschnitt 2:

- Prinzipielle Darstellung des Konzeptes,
- Gebirgsmechanisches Konzept,
- Erforderliche technische Maßnahmen,
- Anforderung an Bohrlochverschluss und Stilllegung,
- Kosten und Zeit.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf die Fragestellungen der Genehmigungsbehörde werden nachstehend zunächst vorrangig die folgenden Aspekte betrachtet, um dann nachfolgend auf die vorstehend unter Abschnitt 1 zitierten Fragen (1), (4) und soweit möglich auch (5) einzugehen:

(3/1) Entsprechen die Ausführungen der Autoren zur Kavernenstilllegung dem Stand von Wissenschaft und Technik?

(3/2) Ist das generelle Konzept zur Kavernenstilllegung am Standort Zuidwending plausibel und hinreichend umfassend skizziert?

(3/3) Ist die Empfehlung der Autoren zum weiteren Vorgehen am Standort Zuidwending hinreichend begründet und sachgemäß?

3.2 Review zu den wissenschaftlich-technischen Grundlagen des Kavernenstilllegungskonzeptes

Die Autoren stellen in Abschnitt 4 einschlägige niederländische Anforderungen und dann weiter grundsätzliche Konzepte zur Stilllegung von Salzkavernen vor. In Abschnitt 5 beschreiben sie dann anschließend das ausgewählte Stilllegungskonzept im Detail.

3.2.1 Darstellung grundsätzlicher Konzepte/Abschnitt 4

Für das Review wird angenommen, dass ein Stilllegungskonzept für Kavernen, das dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, auch den Anforderungen des niederländischen Gesetz- und Verordnungsgebers entspricht. Dabei ist anzumerken, dass die Anforderungen des Gesetzgebers nicht speziell auf stillgelegte Salzkavernen spezialisiert sind. Die grundsätzlichen Anforderungen bestehen u.a. darin, die Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden nach Einstellung des Bergbaus, hier des Kavernenbaus, darzulegen.

In Abschnitt 4 der vorgelegten Studie werden als übergeordneter Rahmen zunächst die relevanten Anforderungen des niederländischen Gesetzgebers zitiert und danach dann grundsätzliche Konzepte zur Kavernenstilllegung vorgestellt.

Entsprechend werden in Abschnitt 4.1. Anforderungen aufgeführt, die sich einerseits auf die Stilllegung von bergbaulichen Aktivitäten beziehen, andererseits auf die Stilllegung von Bohrlöchern. Spezifische Anforderungen für Salzkavernen aus gesetzlichen Regelwerken werden nicht benannt.

Aus den Regelwerken auf die Stilllegung von Salzkavernen übertragen werden als zentrale Anforderungen u.a. genannt die Ausarbeitung eines Stilllegungsplans, die Darlegung der Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden sowie spezielle Anforderungen an den Verschluss von Bohrungen, allerdings nicht unter spezifischen Bezug auf Salzkavernenzugangsbohrungen. Ergänzend wird auch auf deutsche Vorschriften verwiesen, die allerdings auch nicht auf die Stilllegung von Salzkavernen spezifiziert sind.

Kommentar:

Vom Reviewer wird davon ausgegangen, dass ein zutreffender Überblick über die bestehenden gesetzlichen Anforderungen in den Niederlanden gegeben wird. Zentral ist dabei die Forderung an das Stilllegungskonzept, langfristige Schäden an der Tagesoberfläche mit Bezug auf Infrastruktur und Umwelt zu verhindern.

Die bestehenden Konzepte zur Kavernenstilllegung werden in Abschnitt 4.2 vorgestellt, wobei dabei darauf hingewiesen wird, dass umfangreiche praktische Erfahrungen bislang nicht vorliegen. Betrachtet werden insbesondere:

(a) Verfüllmaterial in der Kaverne

Bezüglich des Verfüllmaterials in der stillzulegenden Kaverne werden unterschieden die Fluide Luft und Sole jeweils ohne bzw. mit Feststoffen. Grundsätzlich ist es zur Reduzierung der Konvergenz erforderlich, das Bohrloch zu verschließen, so dass sich in der Kaverne ein Stützdruck aufbauen kann. Dieser Stützdruckaufbau hängt dann entscheidend von dem Verfüllmaterial in der Kaverne ab. Der Einsatz zusätzlicher Feststoffe in den Fluiden wird in der stillgelegten Kaverne hier nicht favorisiert (termingerechte Verfügbarkeit bei Rohstoffen, zusätzliche Anforderungen bei mineralischen Abfällen). Unter Verweis auf die solegefüllte Stilllegung von Salzbergwerken als dem dafür generell geeigneten und praktizierten Konzept wird angemerkt, dass dieses Konzept in den vergangenen Jahren ebenfalls für die Stilllegung von soleverfüllten Kavernen intensiv untersucht worden ist und dieses Konzept danach als sicher und geeignet angesehen werden kann.

(b) Druckaufbau in der Kaverne

Zwei geomechanisch relevante Aspekte werden thematisiert, die mit dem Druckaufbau bei Stilllegung solegefüllter verschlossener Kavernen verbunden sind:

(b1) Die Gebirgskonvergenz führt in der solegefüllten verschlossenen Kaverne zu einem Druckaufbau, der im oberen Kavernenbereich das lithostatische Gebirgsdruckniveau überschreitet. Daraus wird die Frage abgeleitet, welches Soledruckniveau erlaubt/toleriert werden kann – ohne einen Verlust der Dichtheit des maßgebenden Salzgebirges, d.h. unter Ausschluss von Macrorissen. In diesem Zusammenhang wird auf in situ-Tests der Kavernenindustrie verwiesen, die gezeigt haben, dass bei einem bestimmten Soledruckniveau Sole in das Gebirge infiltriert wird durch Ausbildung von Mikrofissuren.

(b2) Neben der Gebirgskonvergenz wird auf die Fluidtemperatur als weitere Ursache für einen Druckaufbau verwiesen und zwar für den Fall, dass Kavernenfluidtemperatur und Gebirgstemperatur zum Zeitpunkt des Kavernenverschlusses (noch) nicht ausgeglichen sind. Daraus resultiert dann eine Wartezeit bis zum Temperatúrausgleich.

In Verbindung mit einem Verweis auf das SMRI-Untersuchungsprogramm „Cavern Sealing and Abandonment“ werden die dort identifizierten Mechanismen zitiert, die den Druckaufbau in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne bestimmen. Auszuschließen durch technische Maßnahmen sind zusätzliche Aussolprozesse durch die Verwendung gesättigter Salzlösungen und Bohrloch-Leckagen durch Dichtheitstests. Eine langfristige Funktionalität des Bohrlochverschlusses muss durch ein entsprechendes Bohrlochverschlusssystem

erreicht werden. Hierzu wird auf in der Literatur vorgeschlagene Optionen verwiesen. Damit verbleiben als mechanisch relevante Prozesse für den Druckaufbau und die Folgewirkungen die induzierte Konvergenz, der thermisch induzierte Druckaufbau und die daraus resultierenden Fluidinfiltrationen in das Salinargebirge.

Zum Mechanismus der Fluidinfiltration für den Fall des hydraulischen Überdrucks im Kavernendachbereich mit Ausbildung einer Sekundärpermeabilität wird auf wissenschaftliche Untersuchungen verwiesen (IfG, TUC).

Vor dem Hintergrund dieser Prozessmechanismen wird ein Zeitraum von einigen 10.000 Jahren zitiert, der erforderlich sei, bis die Infiltrationsfront den Salzspiegel erreicht.

In Abschnitt 4.3 werden die Befunde aus der Literaturstudie zum Stand von Wissenschaft und Technik zusammengefasst. Zentrale Resultate sind danach mit Blick auf eine Soleverfüllung:

- (1) Der erforderliche Stützdruck in einer stillgelegten Kaverne kann bei Soleverfüllung schneller erreicht werden als bei einer Feststoffverfüllung, da Sole in ausreichender Menge und in begrenzter Zeit zur Verfügung steht.
- (2) Bei Soleverfüllung ist keine Wartezeit zur Kompaktion erforderlich.
- (3) Bei Soleverfüllung muss eine Wartezeit vor dem Verschluss bis zur Wiedererwärmung vorgesehen werden oder die Sole muss vorgewärmt werden, um den temperaturinduzierten Druckaufbau zu begrenzen.
- (4) Bei Soleverfüllung muss gezeigt werden, dass der Druckaufbau im oberen Kavernenbereich kompensiert wird durch einen Soleinfiltrationsprozess und dass diese Soleinfiltration in das Salzgebirge in Übereinstimmung steht mit dem Umweltschutz.
- (5) Der Infiltrationsprozess dauert bis zum Erreichen des Salzspiegels mehrere 10.000 Jahre; der damit verbundene Volumenstrom ist sehr klein.

Abschließend wird das Konzept der verschlossenen solegefüllten Kaverne als ein Konzept bewertet, dass die Anforderungen an langzeitige Standsicherheit und an die Sicherheit erfüllt. Dieses Konzept muss allerdings standortbezogen bestätigt werden für die Randbedingungen der relevanten Kaverne und für einen angemessenen Zeitraum.

Aus Sicht des Reviewers ist zu den Ausführungen in Abschnitt 4 anzumerken mit Blick auf Frage (3/1): Entspricht das vorgeschlagene generelle Konzept dem Stand von Wissenschaft und Technik?

- *Die Stilllegung von Salzkavernen nach dem Konzept der solegefüllten verschlossenen Kaverne kann als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden (SMRI-Konzept). Zurecht wird darauf verwiesen, dass die in das SMRI-Konzept implementierten Mechanismen zu dem Verhalten von Steinsalz bei Einwirken fluider Phasen nicht zutreffend*

sind (Steinsalz als grundsätzlich poröses Festgestein mit primär auch schon vorhandener Permeabilität / Ansatz des Darcy- Strömungsmodells) und zwischenzeitlich weiter entwickelt worden sind (Entwicklung eines druckgetriebenen Infiltrationsprozesses in einem primär impermeablen Steinsalzgebirge).

- Bei auch langfristig intaktem Bohrlochverschluss ist davon auszugehen, dass nach der anfänglichen Infiltration nach dem hydraulischen Durchbruch der Infiltrationsfront im Salzspiegelbereich eine hydraulische Verbindung zwischen Kaverne und wasserführenden Formationen außerhalb des Salinargebirges hergestellt ist. Die für diesen Prozess genannten Zeiten sind kavernentyp- und gebirgsabhängig und in erheblichem Maße von dem unterstellten Mechanismen abhängig. Hier sollte ohne nähere zahlenmäßige Befunde konservativ eingeschätzt werden, dass dieser Prozess eher einige Tausend Jahre als nur einige Hundert Jahre andauert.
- Dem Argument, dass eine Feststoffverfüllung nicht rechtzeitig möglich sein wird, kann nicht gefolgt werden, da Kavernen nicht ungeplant stillzulegen sind und somit hinreichend Zeit zur Planung der Maßnahmen zur Verfügung steht.

Allerdings scheint eine Feststoffverfüllung mit Rohstoffen (Sand, Kies) kostenaufwendig und nicht ressourcenfreundlich und eine Verfüllung mit mineralischen Abfällen vielleicht nicht an jedem Standort realisierbar (Versatz mit gefährlichen Abfällen). Hier ist auf das Projekt Staßfurt zu verweisen, www.mineralplus.de bzw. Wolters et al. (2015).

- Die Frage nach der Solefreisetzung nach Herstellung einer hydraulischen Verbindung zwischen Kaverne und nichtsalinarem Deckgebirge wird nicht thematisiert.
- Die Frage nach den mechanischen Eigenschaften des soleinfiltrierten Salinargebirges wird nicht angesprochen.
- Im Fall einer Feststoffverfüllung in Form einer sich schwach verfestigenden Suspension (Konsistenz plastischer bis halbfester Ton) erfolgt möglicherweise nur eine partielle Infiltration von Sole aus dem Porenraum der kompaktierten und sich verfestigenden Suspension in das Salzgebirge und damit keine Solefreisetzung in das nichtsalinare Deckgebirge, da der zusätzliche mechanische Stützdruckaufbau die Konvergenz zum Erliegen bringt. Auf diesen Vorteil wird nicht hingewiesen.

3.2.2 Detailbeschreibung des ausgewählten Konzeptes/Abschnitt 5

In Abschnitt 5 der vorgelegten Studie erfolgt eine detaillierte Darstellung des bevorzugten Stilllegungskonzeptes mit einer Untergliederung in nachstehende Hauptaspekte:

- generelle Beschreibung des Konzeptes/Abschnitt 5.1,
- felsmechanisches Konzept/Abschnitt 5.2,
- geforderte technische Maßnahmen für den Verschluss mit Maßnahmen vor Verschluss und bestehenden Optionen zur Ausführung des Verschlusses / Abschnitte 5.3 und 5.4,
- grundlegende Betrachtungen zu Kostenpositionen und Zeitbedarf / Abschnitt 5.5.

Im Einzelnen folgt an dargelegten Sachverhalten:

(a) Abschnitt 5.1 der Studie befasst sich mit detaillierten Ausführungen zu den einzelnen technologischen Schritten bei der Umsetzung des Konzeptes. Im Fokus stehen dabei

- vorbereitende Arbeiten für die Stilllegung (Stilllegungsplan mit gebirgsmechanischen Analysen, Auswirkungsanalysen, erforderliche Messungen, Kenndaten, Zeitplan, Risikobewertung),
- Produktauslagerung durch Sole- bzw. Frischwasserinjektion ohne/mit Vorwärmung (Vermessungen, Sole- bzw. Frischwasserbereitstellung, technische Maßnahmen bei Produktentwicklung, Untersuchungen zur Qualität des Bohrlochausbaus im Fall einer Integration in den Verschluss); im Fall einer Frischwasserverfüllung ist zusätzlich eine Nachsolanalyse erforderlich,
- begleitende Messungen und Felduntersuchungen während der Wartezeit bei Temperatenausgleich echometrische Vermessung, Temperaturmessungen zum Verlauf der Erwärmung der Sole, Druckaufbautest zum Beleg von Annahmen des Stilllegungskonzeptes,
- Wartezeit bis zum Temperatenausgleich (Vermeidung eines zu schnellen Druckanstieges- Faustregel: $\Delta T = 1K \leftrightarrow \Delta p = 1 MPa$ bei verschlossener Kaverne, Festlegung der zulässigen Soletemperatur bei Verschluss aus geotechnischer Studie, Kopfdruckmonitoring und Kopfdruckbegrenzung auf $zul\ max\ p_i$, Verkürzung der Wartezeit durch Einsatz vorgewärmter Sole, Injektion eines Gaspolsters zur Vergrößerung der relativ geringen Solekompressibilität und damit Reduzierung der Druckaufbaurate),
- Bohrlochverschluss und (Entfernung von Einbauten. Setzen des Bohrlochverschlusses/gebirgsverbunden → Trennung Kaverne Bohrloch, weiterer sektionsweiser Bohrlochverschluss, Rekultivierung Tagesoberfläche) und
- nachlaufende Überwachung (grundsätzlich: nachsorgefreie Stilllegung; ev. Nivellement).

Kommentar:

Die Ausführungen zum Stilllegungskonzept sind umfassend und plausibel und entsprechen dem internationalen Kenntnisstand, sind aber noch sehr grundsätzlich gehalten und weisen keinen Standortbezug auf.

(b) Abschnitt 5.2 befasst sich mit dem felsmechanischen Konzept. Folgende Aspekte werden betrachtet:

(b/1) Hintergrund

Darlegung von SMRI-Aktivitäten mit 2 Thesen: (a/ 1) Grundsätzlich ist es möglich, eine solegefüllte Kaverne permanent zu verschließen/Steinsalz bedingt Standsicherheit und Integrität; (a/2) Unter den Rahmenbedingungen nach (a/1) wird keine unkontrollierte Solefreisetzung in das Deckgebirge, in Trinkwasseraquifere oder an der Tagesoberfläche erwartet. Bei nicht zu großer Druckaufbaurrate wird davon ausgegangen, dass nicht notwendigerweise eine Wegsamkeit zur Biosphäre entsteht. Vielmehr wird erwartet, dass eine lokal *begrenzte* Zone sekundärer Permeabilität ausgebildet wird in der Nähe der Kavernenkontur. Weiter folgt eine Beschreibung der in der verschlossenen Kaverne ablaufenden Mechanismen mit Einfluss auf einen Druckaufbau.

(b/2) Druckaufbaumechanismen und -verlauf

Grundsätzlich angesprochen und dargelegt werden die komplexen hydromechanisch gekoppelten Prozesse, verbunden auch mit Auflösungs- und Auskristallisationsprozessen. Hingewiesen wird auf die Ausbildung der Infiltrationszone mit veränderten mechanischen Eigenschaften (Zunahme der Kriechfähigkeit, Abnahme der Festigkeit, Folgewirkung → Zunahme Sekundärporosität). Für Steinsalz wird auf der Basis von Laborversuchen eine primäre Permeabilität von unter $K = 10^{-20} \text{ m}^2$ genannt.

Darüber hinaus werden Befunde aus Felduntersuchungen wie Etzel und Bernburg mit Druckaufbauraten von $0,02 \text{ MPa/d}$ bzw $1,4 \text{ MPa/d}$ vorgestellt → Infiltration, kein Macro-Frac; Beginn des Infiltrationsprozesses deutlich unterhalb (Etrez EZ53, Bernburg) bzw. in Nähe (Etrez EZ58, Etzel K102, Staßfurt S102) des lithostatischen Druckniveaus; Infiltrationsraten in das Salzgebirge 100 Jahre nach Verschluss mit nur einigen wenigen Kubikmetern/Jahr (Ergebnisse ohne Beleg aus generischen Studien); Reduzierung der Konvergenzraten bei hohem Innendruck und damit auch der Tagesoberflächensenkung

(b/3) Kavernenkompressibilität

Der konvergenzbedingte Druckaufbau hängt ab von der Kompressibilität des Systems Kaverne mit umgebendem Gebirge und Sole, zahlenmäßig charakterisiert durch den

Kompressionsmodul K . Als Zahlenwert folgt $K = 2,7 \text{ GPa}$. Bei Existenz von Gaseinschlüssen reduziert sich der Kompressionsmodul. Felduntersuchungen an unterschiedlichen Lokationen führen auf Zahlenwerte im Bereich $K = 1,6 - 2,8 \text{ GPa}$ in Abhängigkeit von Sole-/Gebirgskompressibilität, aber auch Kavernengeometrie.

(b/4) Kriechen des Salzgesteins

Der konvergenzbedingte Druckaufbau in der verschlossenen solegefüllten Kaverne ist abhängig von dem Kriechvermögen des Salzgebirges, der deviatorischen Gebirgsbeanspruchung und der Gebirgstemperatur.

Zur Berechnung des Kriechverhaltens stehen unterschiedliche Stoffmodelle zur Verfügung. Einige Stoffmodelle werden vorgestellt. Zur Infiltration wird in einem Diagramm aus der Literatur für eine zylindrische Kaverne die Konvergenzrate in Abhängigkeit von Teufe, Innendruck und Temperatur angegeben. Standortbezogene Verhältnisse werden nicht thematisiert.

(b/5) Thermische Expansion der Sole

Bei der Verfüllung der Kaverne mit Frischwasser ist davon auszugehen, dass die Temperatur der entstehenden Sole geringer ist als die Gebirgstemperatur. Durch den Wärmefluss aus dem Gebirge in die Sole bis zum Temperatúrausgleich erfolgt auch eine thermisch induzierte Expansion der Sole, die bei verschlossener Kaverne in einem Druckaufbau resultiert. Wesentliche Parameter dieses Prozesses sind die Zeit bis zum Temperatúrausgleich und der zugehörige Druckanstieg.

Angegeben werden aus der Literatur für den Temperaturanstieg Zahlenwerte von $\Delta T \cong 1K/a$ für große Kavernen und $\Delta T = 10K/a$ für kleine Kavernen. Unter Berücksichtigung der thermischen Ausdehnung von Sole und der Kompressibilität des Systems Sole/Salzgebirge folgt in der Größenordnung eine Relation Druckanstieg/Temperaturanstieg von $\Delta p \cong 1 \text{ MPa}/1K$. Um unzulässig große thermisch induzierte Druckanstiege zu vermeiden, muss die Kaverne vor dem Verschluss für längere Zeit hydraulisch offen stehen gelassen werden. Für diesen Zeitraum werden 10 Jahre und mehr genannt (abhängig von der anfänglichen Temperaturdifferenz).

(b/6) Eindringen von Sole in das Salinargebirge

Im originären Zustand wird das kavernenumgebende Steinsalzgebirge als technisch dicht angesehen (Ann: das Adjektiv „technisch“ wird nicht erläutert). Bei bestimmten Bedingungen zwischen Soledruck und Gebirgsspannung können jedoch Fließwege entlang der Mineralkorngrenzen des Salzgesteins geöffnet werden: Dieser Prozess wird in der Studie als Perkolation bezeichnet. Zwei Mechanismen für das Eindringen von Sole in das geogen intakte Gebirge werden genannt:

- druckgetriebene Ausbildung von Wegsamkeiten auf Micro- und Macroebene (Mineralkorngrenzen, Schichtgrenzflächen) bei $P_s = > \min pg$,
- mechanische Schädigung des Gesteinsgefüges bei Überschreitung der Schädigungsgrenzfestigkeit.

Dazu wird angemerkt, dass die primäre Impermeabilität verlorenggeht bei Verletzung eines der Kriterien. Zur physikalischen Modellierung und rechnerischen Simulation des Perkulations-Prozesses (IfG) bzw. des Infiltrations-Prozesses (TUC) werden exemplarische Beispiele aus der Literatur präsentiert. Für ein signifikantes Eindringen von Sole in das Gebirge werden als Zeitraum für diese Beispiele tausende von Jahren genannt. Als Forderung wird genannt für die infiltrierte Bereiche zu belegen, dass sie in der Lage sind, Sole in genügendem Maße aufzunehmen und den Kontakt von Sole mit der Biosphäre über einen „reasonable“ Zeitraum zu verhindern.

(b/7) Thermisches Verständnis des Stilllegungsprozesses

Als Ziel der Kavernenstilllegung wird die Trennung von Kaverne und Biosphäre ohne Risiken für Umwelt, Tagesoberfläche und Lagerstätte genannt. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass der frühere Betreiber eine Befreiung von der Bergaufsicht anstrebt. Dazu muss belegt werden, dass die stillgelegte Kaverne die Kriterien für Langzeitstabilität und Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase erfüllt. Aus gebirgsmechanischer Sicht darf zur Gewährleistung des Umweltschutzes kein mechanisches Risiko eines Kavernenkollapses bestehen, trotz lang anhaltender konvergenzbedingter Sole-Infiltration in das Gebirge. Das in der Studie vorgeschlagene Stilllegungsverfahren wird als ein Verfahren angesehen, das sowohl einen sicheren Einschluss der die Kaverne stabilisierenden Sole wie auch eine Reduktion der Senkungen an der Tagesoberfläche auf ein gegenüber geogenen Prozessen vernachlässigbares Niveau gewährleistet.

(c) Abschnitt 5.3 befasst sich mit Anforderungen vor Kavernenverschluss. Dazu wird ausgeführt:

Aus dem generellen Verschlusskonzept wird abgeleitet, dass eine hydraulische Trennung zwischen Kaverne und Bohrloch erfolgt und die Kaverne solegefüllt stillgelegt wird und das Bohrloch nach den technischen Regeln für tiefe Bohrlöcher der Erdöl-/Erdgasindustrie verschlossen wird. Damit gelten nachstehende Anforderungen für das geomechanische Verschlusskonzept unter Bezug auf eine Literaturstelle - *Crotogino (2006)*:

- Untersuchung des aktuellen Kavernenzustandes,
- Nachweis des Langzeitverhaltens der solegefüllten verschlossenen Kaverne,
- Vorschlag für einen dichten Bohrlochverschluss und für die verwendeten Materialien.

Als Grundlage für die Erarbeitung der Belege zum Nachweis der Langzeitstandsicherheit und der geomechanischen Integrität werden als Instrumente physikalische Modellierung und numerische Simulation genannt. Gezeigt werden soll mit diesen Untersuchungen, dass das als Stilllegungsverfahren gewählte Konzept der verschlossenen solegefüllten Kaverne geeignet ist, den verschiedenen geomechanischen Prozessen zu widerstehen - Grundlage auch für die Ausarbeitung des geotechnischen Konzepts. Zur Erarbeitung eines Belegs für die Realitätsnähe der Modellierungsmaßnahmen werden mögliche Feldmessungen und Feldversuche aufgelistet. Für eine erste Kaverne an einem Standort wird ein zeitlich befristeter Stilllegungstest vorgeschlagen mit hinreichend langer Beobachtungszeit bezüglich Druck- und Temperaturaufbau.

(d) In Abschnitt 5.4 wird der Bohrlochverschluss betrachtet. Nachstehende Aussagen sind als wesentlich anzusehen:

Für den Kavernen- bzw. Bohrlochverschluss werden drei technische Optionen vorgestellt. Dabei werden zunächst die zentralen Anforderungen genannt:

- Dichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen,
- Anordnung eines Verschlusselements im Salzspiegelbereich (> 100 m im Steinsalz und 50 m im Deckgebirge),
- Anordnung eines Verschlusselementes von der Tagesoberfläche bis in mind. 100 m Tiefe, auch in Beziehung zu den zu schützenden Grundwasserhorizonten,
- komplette Zementation des restlichen Bohrlochs.

Die möglichen Optionen eines Bohrlochverschlusses werden anschließend entsprechend *Crotogino et al. (2006)* aufgeführt. *Crotogino et al. (2006)* wird als eine Art Leitlinie bezeichnet, die im Rahmen eines SMRI-Forschungsvorhabens erarbeitet wurde. Die drei vorgestellten Optionen beziehen sich insbesondere auf die Positionierung des Verschlusselementes mit (1) im Bereich des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour, (2) im Kavernenhalsbereich sowie (3) innerhalb eines herausgefrästen Bereichs oberhalb des Rohrschuhs des letzten zementierten Casings.

Die Entscheidung für die eine oder andere Option ist standortbezogen vorzunehmen. Präferiert wird in der Studie Option (3) mit Blick auf die Langzeitsicherheit (Gründe: direkter Verbund Zement-Salzgebirge, keine Stahlkorrosion, einfache Geometrie, hinreichende Länge möglich).

Nach Einbau und Testen des Verschlusselementes wird empfohlen, das restliche Bohrloch bis zur Tagesoberfläche rückzuzementieren.

(e) In Abschnitt 5.5 erfolgen die Darstellung von finanziellen Aspekten und eine Abschätzung der erforderlichen Zeit für die Ausführung der Stilllegungsmaßnahmen. Folgende Aspekte erscheinen wesentlich:

Aufgrund des generellen Charakters der Studie werden keine detaillierten und damit auch keine standortbezogenen Angaben erarbeitet. Aufgeführt werden lediglich grundsätzliche Kostenpositionen und zugehörige kostenwirksame Aktivitäten. Als grundsätzliche Kostenpositionen werden gesehen die technische Planung und das Genehmigungsverfahren, die Flutung der Kaverne, die Durchführung von Feldmessungen und Feldtests, die Wartezeit bis zum Temperatenausgleich, der Verschluss der Zugangsbohrung, die Rekultivierung der Tagesoberfläche und das Nachverschluss-Monitoring.

Als Zeiten für die Ausführung einer Stilllegungsmaßnahme werden abschließend noch grob eingeschätzt:

- Planung und Genehmigung, Solefüllung, Messungen → 5 Jahre
- Temperatenausgleich → 10 bis 15 Jahre
- Bohrlochverschluss und Rückbau → < 0,5 Jahre
- Nachverschluss-Monitoring → keine Angabe unter Verweis auf nationale Regelungen

In einer Zusammenfassung wird am Schluss der Studie hervorgehoben:

Die Stilllegung der Erdgasspeicherkavernen am Standort Zuidwending ist möglich nach dem Konzept der Rückverfüllung der Kavernen mit Sole und des Verschlusses der Zugangsbohrlöcher mit einem dauerhaft wirksamen Bohrlochverschluss.

Kommentar:

Aus Sicht des Reviewers ist zu den Ausführungen in Abschnitt 5 und zu den abschließenden Empfehlungen anzumerken mit Blick auf Frage (3/2): Ist das generelle Konzept zur Kavernenstilllegung am Standort Zuidwending plausibel und hinreichend umfassend skizziert? und mit Blick auf Frage (3/3): Ist die Empfehlung der Autoren zum weiteren Vorgehen am Standort Zuidwending hinreichend begründet und sachgemäß?

- *Die Ausführungen in Abschnitt 5 beruhen auf umfangreichen Untersuchungen von KBB UT zu technischen Aspekten und anderen Institutionen zu insbesondere geomechanischen Aspekten, die weitgehend auch in das SMRI-Konzept eingeflossen sind bzw. aus diesem Forschungsvorhaben resultieren.*
- *Die im Rahmen einer Kavernenstilllegung aus heutiger Sicht vorzunehmenden Tätigkeiten sind umfassend und klar strukturiert dargestellt. Der Detaillierungsgrad ist allerdings unterschiedlich. Während den geomechanischen Aspekten Tragverhalten des Systems Kaverne – Salzgebirge nach Verschluss auf der Grundlage internationaler Literatur*

entsprechend dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik in deskriptiver Form ein breiter Raum eingeräumt wird und auch auf generischer Basis ein angemessener Tiefgang in der Darstellung der Phänomene zu sehen ist, erfolgt die Darlegung konstruktiver und technischer Sachverhalte eher nur auf einem sehr grundlegenden bzw. wenig vertiefendem Niveau.

- Standortbezogene Sachverhalte werden nicht aufgeführt, geomechanische und technische Bezüge zu standortbezogenen Gegebenheiten werden nicht hergestellt.
- Titel der Studie ist die Vorstellung genereller Konzepte zur Stilllegung der Gasspeicherkaverne am Standort Zuidwending. Damit ergibt sich allerdings die Frage, ob mit dem Titel nicht doch intendiert ist, dass auch ein Standortbezug erforderlich sein könnte.
- Grundsätzlich ist im Gegensatz zu der Aussage in Abschnitt 5.2.1 nicht eine nur begrenzte Soleinfiltration zu erwarten. Vielmehr verläuft der Infiltrationsprozess zeitlich unbegrenzt und eher akzeleriert bis zur Ausbildung einer hydraulischen Verbindung zu einer permeablen Deckgebirgsformation. Nach hydraulischer Verbindung zu einer permeablen Deckgebirgsformation folgt ein langfristiger Solemigrationsprozess aus der Kaverne in die Deckgebirgsformation.
- Die möglichen Veränderungen der Eigenschaften des infiltrierten Steinsalzgebirges werden nicht spezifiziert (marginal, signifikant; Untersuchungsnotwendigkeit).
- Die Permeabilität von Steinsalz wird nicht eindeutig definiert (impermeabel bis permeabel mit $K < 10^{-20} \text{ m}^2$).
- Was bedeuten die Forderungen nach Aufnahme von Sole in der Infiltrationszone in „genügendem Maße“ und die Verhinderung eines Kontaktes von Sole mit der Biosphäre über einen „reasonablen“ Zeitraum?
- Die Ausführungen zum Bohrlochverschluss sind sehr grob. Explizite Angaben zu Materialien, Langzeitbeständigkeiten, Ausführungsvariationen, Qualitätssicherungsverfahren und Monitoringmethoden bzw. Funktionalitätstests fehlen. Auch fehlen Angaben zu fluiddynamisch relevanten Eigenschaften (Mindestanforderungen). Möglicherweise wird hier der Verweis auf die Verfahren der Erdöl-/Erdgasindustrie als hinreichend angesehen.
- Es wird kein materialbezogener Unterschied zwischen Bohrlochverschlusselement und Zementation des restlichen Bohrlochbereiches angegeben.
- Die Möglichkeiten zur Solebeschaffung am Standort werden nicht thematisiert.
- In den geomechanischen Analysen zum langfristigen Kavernenverhalten ist das Bohrloch mit seinem Verschluss nicht explizit enthalten. Damit fehlen bislang Aussagen über das Kontaktflächenverhalten und die Qualitätsanforderungen an den Verbund Zementation-Gebirge (z.B. Ausschluss von Solenestern).
- Beispiele zu nachweislich erfolgreich ausgeführten und langzeitfunktionstüchtigen Bohrlochverschlüssen fehlen.

Zusammenfassend ist damit festzustellen, dass

- *aufgrund der Ausführungen in der Studie das generelle Konzept der präferierten Methode zur Kavernenstilllegung grundsätzlich für viele Standorte und wohl auch für den Standort Zuidwending plausibel ist und auch in der Studie im Grundsatz hinreichend umfassend skizziert ist mit dem Schwerpunkt auf dem Verhalten des hydromechanisch gekoppelten Systems Kaverne – Salzgebirge,*
- *wesentliche, auch grundsätzliche Angaben zum Bohrlochverschluss fehlen (konstruktive Ausführung, Langzeitbeständigkeit, hydraulische Leistungsfähigkeit, Monitoring),*
- *eine Übertragbarkeit des Konzeptes auf den Standort Zuidwending zwar postuliert wird und auch wahrscheinlich ist, aber konkrete nachvollziehbare Belege für dieses Postulat nicht beigebracht werden (trotz Standortbezug im Titel der Studie).*

Weiterhin ist anzumerken:

Die Studie darf in Bezug auf die Darlegung eines generellen Konzeptes zur Kavernenstilllegung als im Grundsatz plausibel und hinreichend umfassend angesehen werden. Ausnahme ist der Bohrlochverschluss, der nicht auf gleichem literarischem bzw. technischem Niveau wie die Kaverne mit dem Salinargebirge diskutiert wird. Hier fehlen noch wesentliche, auch grundsätzliche Aussagen zu Bedeutung, Anforderungen, Realisierungsmöglichkeiten und Funktionalitätsbelegen insbesondere unter Langzeitaspekten. Möglicherweise können Prozeduren und Erfahrungen aus dem Bereich der Erdöl-/Erdgasindustrie direkt übertragen werden.

Grundsätzlich gilt allerdings, dass an den Bohrlochverschluss, der die Perforation des Salzgebirges heilen soll, gleiche materielle Anforderungen zu stellen sind wie an das umgebende Steinsalzgebirge (Beständigkeit, hydraulische Funktionalität). Zielvorgaben aus Sicht des Umweltschutzes (z.B. zulässige Solefreisetzung oder keine Solefreisetzung bis zu ? Jahren) oder aus Sicht des Schutzes der Tagesoberfläche insgesamt zulässige Senkungen ? bis zum Jahr ?) werden nicht formuliert. Aus derartigen Vorgaben könnten Anforderungen an die technische Ausgestaltung abgeleitet werden.

Die Empfehlung der Autoren der Studie, am Standort Zuidwending nach dem dargelegten Konzept weiter vorzugehen, ist plausibel und nachvollziehbar. Alternativenprüfungen insbesondere mit Blick auf die grundsätzlich auch mögliche Feststoffverfüllung mit mineralischen Abfällen werden nicht vorgenommen. Standortbezogene Konsequenzen aus der Rückverfüllung mit Frischwasser werden nicht diskutiert.

4. Stellungnahme zu den Fragen der Genehmigungsbehörde

In Abschnitt 1 dieses Reviews sind die diesem Review zugrundeliegenden Fragestellungen der niederländischen Genehmigungsbehörde aufgeführt. Auf der Grundlage der vorgelegten Studie und der Kommentare des Reviewers ergeben sich nachstehende Einschätzungen:

(1) Sind alle möglichen Szenarios für die Stilllegung betrachtet worden?

Falls mit dem Begriff Szenarios Optionen oder Konzepte gemeint sind, dann sind die zentralen Szenarios angesprochen und diskutiert worden. Allerdings fehlt eine nähere Beleuchtung der Möglichkeit, schadstoffhaltige mineralische Abfälle z.B. aus Verbrennungsanlagen in Salzkavernen zu entsorgen (Verwertung, Beseitigung) und dabei gleichzeitig das Salinargebiete hinsichtlich langzeitiger Deformationen endgültig zu stabilisieren. Weiterhin fehlt eine Diskussion der Möglichkeit, bei nicht verfügbarer Sole auch Frischwasser für die Rückverfüllung einzusetzen.

(2) Sind die Annahmen und Parameterzahlenwerte vernünftig und zuverlässig?

Standortbezogene Annahmen und Zahlenwerte werden nicht mitgeteilt. Die grundsätzlichen, aus der Literatur übernommenen und damit nicht standortbezogen fokussierten Angaben sind zutreffend.

(3) Sind die Berechnungen aus wissenschaftlicher Sicht korrekt bzw. geben sie eine vernünftige und plausible Abbildung dessen wieder, was in Zukunft geschehen mag?

Standortbezogene Berechnungen werden nicht durchgeführt und daraus abgeleitete Aussagen zum zukünftigen Verhalten der Kavernen am Standort sind damit nicht vorhanden. Die grundsätzlichen, aus der Literatur übernommenen Angaben zum Kavernentragverhalten sind zutreffend zitiert und entsprechen aus Sicht des Reviewers dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik. Der Stand von Wissenschaft und Technik ist allerdings international nicht einheitlich.

(4) Sind die wissenschaftlichen Grundlagen, die Diskussionen und die Schlussfolgerungen so, dass die Genehmigungsbehörde darauf vertrauen kann?

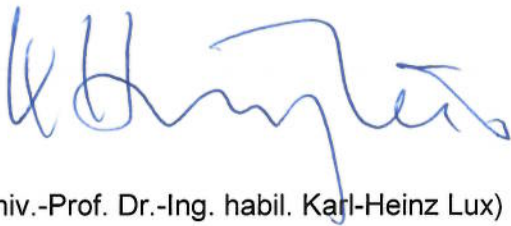
Die Genehmigungsbehörde kann auf die Angaben in der Studie, die weitgehend der Literatur entnommen sind, im Grundsatz vertrauen. Allerdings sind die wissenschaftlichen Grundlagen, Diskussionen und Schlussfolgerungen dem Tenor der Studie folgend nur grundsätzlicher Natur und vornehmlich bezogen auf das Tragverhalten von verschlossenen soleverfüllten Kavernen und dadurch induzierter Prozesse im Gebirge, während der Bohrlochverschluss eher doch nur rudimentär behandelt wird. Hier fehlt insbesondere die Vorgabe von Anforderungen an die Realisierung, aber auch von Realisierungsmöglichkeiten. Standortbezogene Übertragungen und Ableitungen liegen nicht vor.

Die Studie vermittelt auch trotz ihrer Grundsätzlichkeit den doch beachtlichen Umfang des mit der Stilllegung von Kavernen verbundenen planerischen und technologischen Aufwands- auch für den Standort Zuidwending.

(5) Könnten zusätzliche Arbeiten, Monitoring, etc. erforderlich sein, um einwandfreie Schlussfolgerungen für die Stilllegung der Kavernen und die möglichen Folgen in Form von Tragoberflächensenkungen etc. zu ziehen?

Eine verbindliche Antwort ist erst möglich, wenn standortbezogene Studien zur Kavernenstilllegung vorliegen (Tragverhalten, Bohrlochverschluss, Temperatenausgleich). Eine Senkungsprognose erfordert entsprechende rechnerische Analysen. Erste Einschätzungen könnten auf bestehender Datengrundlagen erfolgen. Hier wäre auf *Wolters et al. (2015)* und dort angegebene weiterführende Literatur zu verweisen.

Clausthal Zellerfeld, im Juni 2016



(Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux)

Literatur

Crotogino, F. und Kepplinger, J. (2006): Cavern Well Abandonment Techniques Guide Manual, Hannover.

Wolters, R., Lux, K.-H. und Düsterloh, U. (2015): HM-Coupled Processes to be Considered in the Context of the Safety Case Analysis for Sealed Caverns in Rock Salt Used for Waste Disposal. Conference on the Mechanical Behaviour of Salt VIII, Rapid City.