



Senkungsprognosen
für den Erdgasspeicher
Zuidwending
(Datenbasis 2005)

Abschlussbericht
- Textband -

Auftrags-Nr.:
45136325
vom 06.06.2007

Hannover, Februar 2008

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE
HANNOVER**



**Senkungsprognosen
für den Erdgasspeicher Zuidwending
(Datenbasis 2005)**

**Abschlussbericht
- Textband -**

- | | |
|------------------|---|
| 1. Autoren: | Eickemeier, Ralf, Dipl.-Ing.
Heusermann, Stefan, Prof. Dr.-Ing. |
| 2. Auftrags-Nr.: | 45136325 vom 06.06.2007 |
| 3. Auftraggeber: | Gasunie Zuidwending BV and Nuon Zuidwending BV
P.O. Box 8045
9702 KA Groningen
The Netherlands |
| 4. Datum: | 29.02.2008 |
| 5. Tagebuch-Nr.: | 10015/08 |

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Auftrag und Arbeitsumfang	3
3	Das verwendete Prognosemodell	4
3.1	Theorie	4
3.2	Verwendete Software	11
4	Modellparameter	12
5	Senkungsprognose Gasspeicher Zuidwending	12
5.1	Grundlagen	12
5.2	Ergebnisse (Phase 1)	14
5.3	Ergebnisse (Phase 1-2-3)	14
5.4	Vergleich von ausgewählten Ergebnissen	15
6	Zusammenfassung	17
	Literaturverzeichnis	18
	Tabellenverzeichnis	19
	Abbildungsverzeichnis	20
	Anlagenverzeichnis	21
	36 Anlagen im gesonderten Anlagenband	

1 Einführung

Im Kavernenfeld Zuidwending wurde ab 1968 Salz produziert. Zurzeit werden ca. 1.2 Mio. t Salz pro Jahr soltechnisch gewonnen. Insgesamt existieren neun Solekavernen. Die größte dieser Kavernen erreichte Ende 2004 ein Volumen von ca. 3.4 Mio. m³. Bei vollständiger Kavernenentwicklung sind Produktionsvolumina von bis zu 7.8 Mio. m³ je Kaverne vorgesehen.

Anfang 2007 begannen außerdem die Bohrarbeiten zur Erstellung von zunächst vier Kavernen für den Erdgasspeicherbetrieb. Diese Kavernen werden jeweils Endvolumina von ca. 0.55 Mio. bzw. 1.0 Mio. m³ aufweisen.

Durch die soltechnische Auffahrung der Kavernen werden untertägige Hohlräume geschaffen, die infolge des Kriechvermögens des Steinsalzes kontinuierlich konvergieren. Das Konvergenzvolumen wird zu einem großen Teil bis zur Geländeoberfläche übertragen, so dass dort entsprechende Senkungen auftreten.

Zur Überwachung der Bodensenkungen werden Nivellements der Geländeoberfläche in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt. Auf Grundlage des Geländeoberflächennivellements aus dem Jahre 1998 wurde von der BGR eine erste Senkungsprognose infolge Soleproduktion und Gasspeicherung erstellt (EICKEMEIER & HEUSERMANN 2006). Im Jahr 2007 wurde ein Update der Erstprognose auf Grundlage des Geländeoberflächennivellements aus dem Jahre 2005 erstellt (EICKEMEIER & HEUSERMANN 2007). Die Positionen, die Volumina sowie die Teufenlagen der Gasspeicherkavernen wurden entsprechend der damaligen Planungen in das Senkungsmodell eingeführt. Aufgrund von Planungsänderungen für den Gasspeicher Zuidwending wurden teilweise Lagepositionen von Gasspeicherkavernen geändert und weitere Ausbauphasen hinzugefügt. Die zuvor genannten Senkungsprognosen für den Gasspeicher sind daher auf der Grundlage der neuen Planungsdaten für den Gasspeicher Zuidwending zu aktualisieren.

2 Auftrag und Arbeitsumfang

Nach der von DEEP am 13.03.2007 versendeten Aufforderung zur Abgabe eines Angebotes (PN 5212 „Peer-review of rock-mechanical investigations for gas storage caverns of the Salt Dome Zuidwending“) hat die BGR mit Schreiben vom 02.04.2007 (BZ.4-21 – 05/0100 UT 10) u. a. die Durchführung einer Senkungsprognose für den Gasspeicher Zuidwending angeboten. Die Beauftragung der Arbeiten durch Gasunie und Nuon erfolgte mit Schreiben vom 06.06.2007 (Auftrags-Nr. 45136325).

Auf der Grundlage von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2007) wurden folgende Arbeiten ausgeführt:

- Vorbereitende Arbeiten (Abstimmung der Kavernenpositionen mit DEEP, Gasunie und Akzo Nobel, Erstellung der Eingabedateien für das Senkungsprognoseprogramm ProSub_v0.1)
- Durchführung verschiedener Senkungsprognosen unter Berücksichtigung einer unterschiedlichen Anzahl von Gaskavernen sowie unterschiedlicher mittlerer Speicherdrücke,
- Darstellung der Ergebnisse mit Tecplot Version 10.0-6-012 (Erstellung von Karten für prognostizierte Senkungen und Senkungsraten),
- Bereitstellung sämtlicher Karten des Anlagenbandes im wmf-Format auf DVD,
- Bereitstellung der Isolinien im dxf-Format für sämtliche Karten des Anlagenbandes auf DVD,
- Berichterstellung.

3 Das verwendete Prognosemodell

3.1 Theorie

Zur Erstellung der Senkungsprognosen wird das in EICKEMEIER & HEUSERMANN (2006) vorgestellte Modell verwendet.

Die orts- und zeitabhängige Entwicklung der Geländesenkung s infolge einer einzelnen Kaverne wird durch folgenden Ansatz beschrieben:

$$s(x, y, t) = a \cdot f(x, y) \cdot V_K(t) \quad (1)$$

Dabei ist a der Volumenübertragungsfaktor ($0 \leq a \leq 1$), der angibt, welcher Anteil des Konvergenzvolumens der Kaverne in die Senkungsmulde an der Geländeoberfläche umgewandelt wird. Die Funktion $f(x, y)$ ist die Einheitsformfunktion für die Senkungsmulde und gibt die auftretende Senkung pro m^3 Konvergenzvolumen an. $V_K(t)$ ist das sich über die Zeit ändernde Konvergenzvolumen, das als Funktion der Konvergenzrate ermittelt wird. Die Einheitsformfunktion $f(x, y)$ hat folgende Gestalt:

$$f(x, y) = \frac{\xi \cdot \delta}{2 \cdot \pi^{\left(1 - \frac{2}{\delta}\right)} \cdot R^{\frac{4}{\delta}} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{\delta}\right)} \cdot \exp\left(-\pi \cdot \xi^{\frac{\delta}{2}} \cdot \frac{\left((x - x_K)^2 + (y - y_K)^2\right)^{\frac{\delta}{2}}}{R^2}\right) \quad (2)$$

mit:

$$R^2 = z^u \cdot z^o \cdot \cot^2 \beta \quad (3)$$

x und y sind die Lagekoordinaten eines beliebigen Punktes P an der Geländeoberfläche (s. a. Abbildung 1). x_K und y_K sind die Lagekoordinaten des Kavernenzentrums (Kavernengrundrisspunkt K). Der horizontale Abstand eines beliebigen Punktes P von einem Kavernenpunkt K wird mit r bezeichnet. Damit kann die Formfunktion auch als Funktion von r wie folgt angegeben werden:

$$f(r) = \frac{\xi \cdot \delta}{2 \cdot \pi^{\left(1 - \frac{2}{\delta}\right)} \cdot R^{\frac{4}{\delta}} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{\delta}\right)} \exp\left(-\pi \cdot \xi^{\frac{\delta}{2}} \cdot \frac{r^{\delta}}{R^2}\right) \quad (4)$$

Die verwendeten Symbole haben folgende Bedeutung:

a : Volumenübertragungsfaktor ($0 \leq a \leq 1$)

$f(r)$: Senkung je m^3 Konvergenzvolumen [m/m^3]

$V_K(t)$: Zeitabhängiges Konvergenzvolumen [m^3]

ξ : Parameter für die Berücksichtigung von Zeiteffekten [-]
 (Das Senkungsmuldenvolumen bleibt bei Variation von ξ unverändert.)

δ : Formanpassungsparameter [-]

$\Gamma(x)$: Gamma-Funktion (vgl. Abbildung 2): Sie stellt die Verallgemeinerung der Fakultät dar. Für natürliche Zahlen $n \in \mathbb{N}$ gilt: $\Gamma(n+1) = n!$ (s. a. BRONSTEIN et al. 1997: 416-419).

x_K, y_K : Koordinaten des Kavernenzentrums [m]

x, y : Koordinaten eines beliebigen Punktes der Geländeoberfläche [m]

r : horizontaler Abstand der Punkte P und K [m]

z^u : Teufe der Kavernensohle [m]

z^o : Teufe der Kavernenfirste [m]

β : Grenzwinkel [°]

Die Formfunktion $f(r)$ hat folgende Eigenschaften:

1. Das Volumen des durch Rotation um die z-Achse gebildeten Körpers zwischen $z = 0$ und der Rotationsfläche ergibt sich zu:

$$2 \cdot \pi \cdot \int_0^{+\infty} f(r) \cdot r \, dr = 2\pi \int_0^{+\infty} \frac{\xi \cdot \delta}{2 \cdot \pi^{\left(1-\frac{2}{\delta}\right)} \cdot R^{\frac{4}{\delta}} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{\delta}\right)} \cdot \exp\left(-\pi \cdot \xi^{\frac{\delta}{2}} \cdot \frac{r^\delta}{R^2}\right) \cdot r \, dr = 1 [-]. \quad (5)$$

2. Die maximale Senkung pro Einheitskonvergenzvolumen tritt direkt über der Kavernenachse auf und beträgt

$$\frac{\xi \cdot \delta}{2 \cdot \pi^{\left(1-\frac{2}{\delta}\right)} \cdot R^{\frac{4}{\delta}} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{\delta}\right)} \left[\frac{m}{m^3}\right].$$

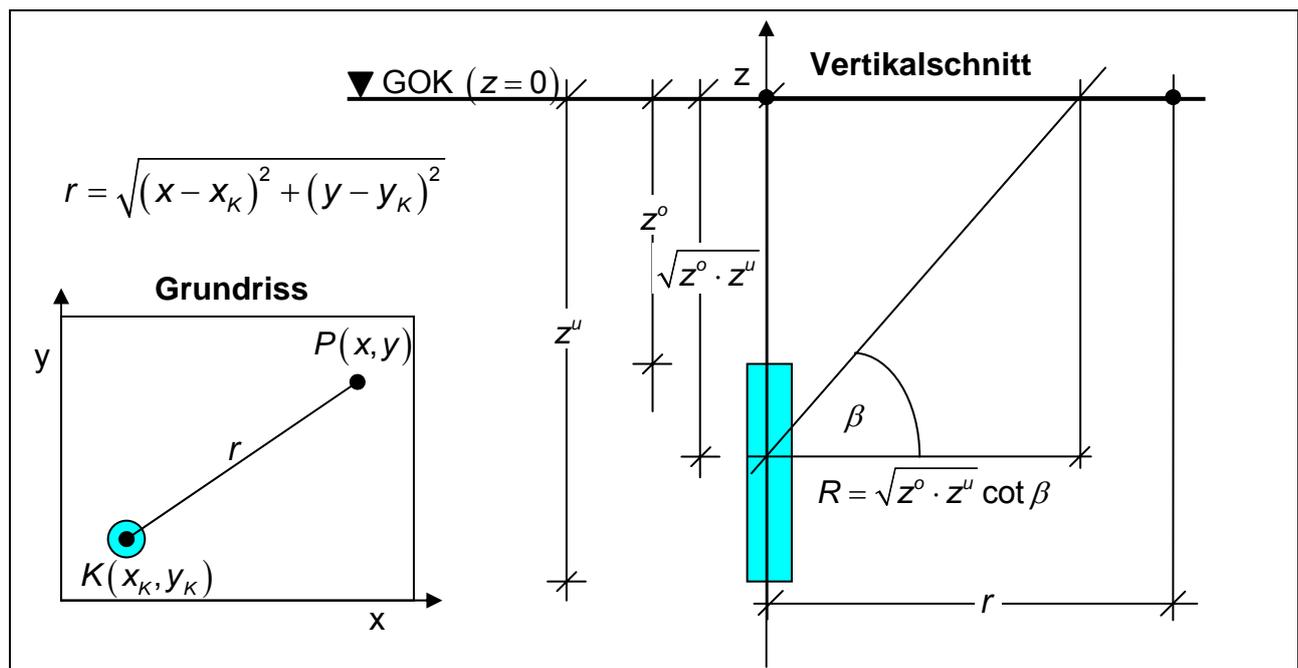


Abbildung 1: Modellparameter zur Beschreibung der Kavernengeometrie

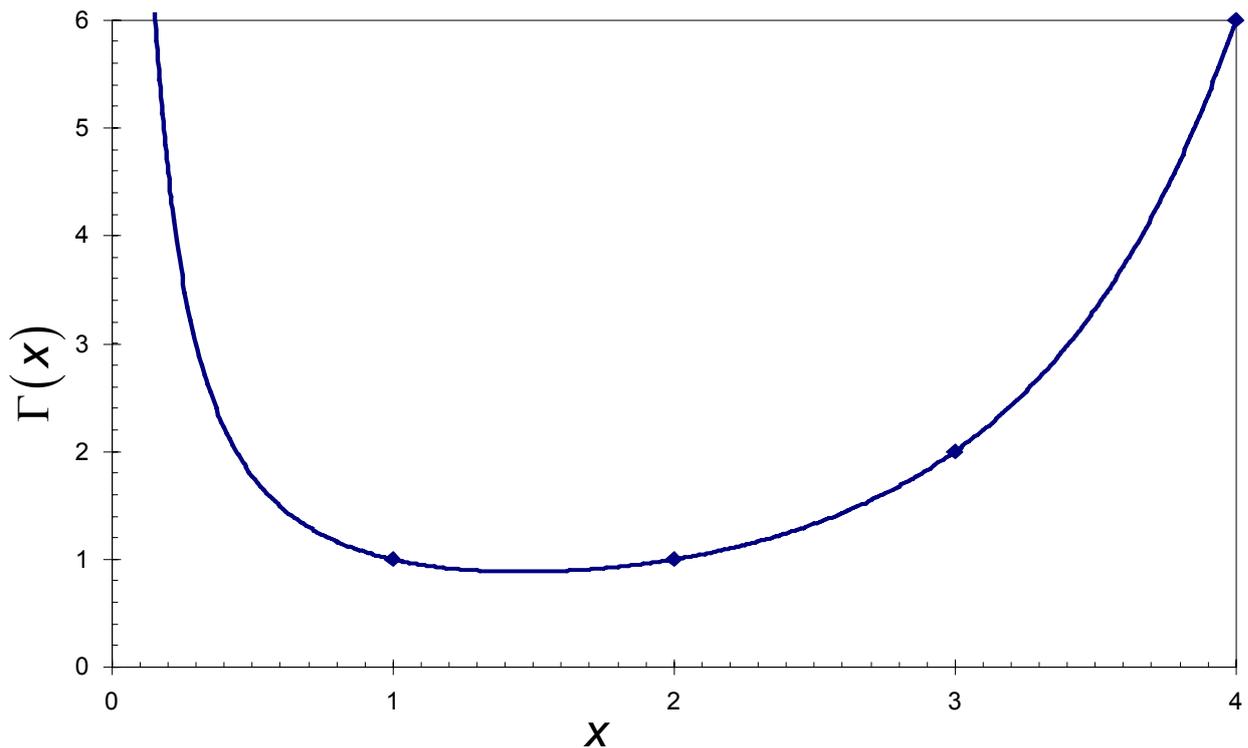


Abbildung 2: Die Gamma-Funktion $\Gamma(x)$

Im Modell wird zwischen Sol- und Speicherphase unterschieden. Dazu wird in der Kaverne jeweils ein anderer Fluiddruck (z. B. Gas, Sole, Erdöl) berücksichtigt, der insbesondere die Konvergenzrate in den verschiedenen Phasen (k_{Sol} bzw. $k_{Speicher}$) bestimmt. Während der Solphase wird eine **konstante Produktionsrate** (\dot{V}_p) angenommen, so dass das **Kavernenvolumen** ($V = V(t)$) zwischen Solbeginn und Solende auf das **Gesamtproduktionsvolumen** ($V_p = \text{const.}$) abzüglich des zwischenzeitlich **akkumulierten Konvergenzvolumens** ($V_K = V_K(t)$) ansteigt. Sind mehrere Kavernen vorhanden, werden die Senkungen zunächst für jede einzelne Kaverne getrennt berechnet. Anschließend wird die Gesamtsenkung durch Summation der durch den Betrieb der einzelnen Kavernen entstehenden Senkungswerte bestimmt. Die Gültigkeit des Superpositionsgesetzes wird dabei vorausgesetzt.

Die Berechnung des Konvergenzvolumens ist physikalisch begründet und erfolgt mathematisch durch Lösung von Differentialgleichungen. In der Sol- und Speicherphase werden jeweils konstante Konvergenzraten angesetzt (k_{Sol} bzw. $k_{Speicher}$). Wird der Zeitpunkt des Solbeginns mit t_0 bezeichnet und das Solende mit t_s , ergibt sich das Gesamtproduktionsvolumen V_p durch Multiplikation der Soldauer $t_s - t_0$ mit der als konstant vorausgesetzten Produktionsrate \dot{V}_p :

$$V_p = \dot{V}_p \cdot (t_s - t_0) \quad (6)$$

Eine zeitliche Verzögerung zwischen Bildung und Umwandlung des Konvergenzvolumens in die Senkungsmulde kann über eine Zeitdifferenz Δt berücksichtigt werden. Die in diesem Zusammenhang auch gebräuchliche Übertragungsgeschwindigkeit c ergibt sich über den Kehrwert von Δt :

$$c = \frac{1}{\Delta t} \quad (7)$$

Bis zum Zeitpunkt $t = t_0 + \Delta t$ gilt:

$$V = 0 \quad (8)$$

und

$$V_K = 0. \quad (9)$$

Für die um Δt zeitlich versetzte Solphase ergibt sich die charakteristische Zeit t_1 zu:

$$t_1 = t - t_0 - \Delta t \quad (10)$$

Die für die Solphase geltende Differentialgleichung

$$\dot{V} = \dot{V}_P - \dot{V}_K = \dot{V}_P - k_{Sol} \cdot V \quad (11)$$

besitzt nach Einarbeitung der Randbedingungen $V(t_1 = 0) = 0$ und $V_K(t_1 = 0) = 0$ folgende Lösungen für die Entwicklung des Kavernenvolumens V und des Konvergenzvolumens V_K :

$$V(t_1) = \frac{\dot{V}_P}{k_{Sol}} \cdot (1 - \exp(-k_{Sol} \cdot t_1)) \quad (12)$$

$$V_K(t_1) = \dot{V}_P \cdot \left(t_1 - \frac{1}{k_{Sol}} \cdot (1 - \exp(-k_{Sol} \cdot t_1)) \right) \quad (13)$$

Die Gleichungen (12) und (13) gelten für folgendes Zeitfenster:

$$t_0 + \Delta t \leq t \leq t_S + \Delta t \text{ bzw.} \quad (14)$$

$$0 \leq t_1 \leq t_S - t_0 \quad (15)$$

Für den Zeitpunkt $t = t_S + \Delta t$ ergeben sich folgende Volumina:

$$V(t = t_S + \Delta t) = V(t_1 = t_S - t_0) = \frac{\dot{V}_P}{k_{Sol}} \cdot (1 - \exp(-k_{Sol} \cdot (t_S - t_0))) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_K(t = t_S + \Delta t) &= V_K(t_1 = t_S - t_0) = \dot{V}_P \cdot \left((t_S - t_0) - \frac{1}{k_{Sol}} \cdot (1 - \exp(-k_{Sol} \cdot (t_S - t_0))) \right) \\ &= V_P - \frac{\dot{V}_P}{k_{Sol}} \cdot (1 - \exp(-k_{Sol} \cdot (t_S - t_0))) \end{aligned} \quad (17)$$

Für die um Δt zeitlich versetzte Speicherphase ergibt sich die charakteristische Zeit t_2 zu:

$$t_2 = t - t_S - \Delta t \quad (18)$$

Die für die Speicherphase geltende Differentialgleichung

$$\dot{V} = -\dot{V}_K = -k_{\text{Speicher}} \cdot V \quad (19)$$

besitzt nach Einarbeitung der Anfangsbedingungen aus den Gleichungen (16) und (17) folgende Lösungen für die Entwicklung des Kavernenvolumens V und des Konvergenzvolumens V_K :

$$\begin{aligned} V &= V(t = t_S + \Delta t) \cdot \exp(-k_{\text{Speicher}} \cdot t_2) \\ &= \frac{\dot{V}_P}{k_{\text{Sol}}} \cdot (1 - \exp(-k_{\text{Sol}} \cdot (t_S - t_0))) \cdot \exp(-k_{\text{Speicher}} \cdot t_2) \end{aligned} \quad (20)$$

und

$$\begin{aligned} V_K &= V_P - V(t = t_S + \Delta t) \cdot \exp(-k_{\text{Speicher}} \cdot t_2) \\ &= V_P - \frac{\dot{V}_P}{k_{\text{Sol}}} \cdot (1 - \exp(-k_{\text{Sol}} \cdot (t_S - t_0))) \cdot \exp(-k_{\text{Speicher}} \cdot t_2) \end{aligned} \quad (21)$$

Die Gleichungen (20) und (21) gelten für das Zeitfenster

$$t \geq t_S + \Delta t \quad (22)$$

bzw.

$$t_2 \geq 0 \quad (23)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass das aktuelle Produktionsvolumen $V_{Pr}(t)$ für jeden Zeitpunkt die Summe von Kavernenvolumen $V(t)$ und Konvergenzvolumen $V_K(t)$ ist:

$$V_{Pr}(t) = V(t) + V_K(t), \quad (24)$$

was auch durch Summation der Gleichungen (12) und (13) bzw. (20) und (21) ersichtlich ist. Es gilt:

$$\begin{aligned} V_{Pr}(t) &= \dot{V}_P \cdot (t - t_0) \quad \text{für } t_0 + \Delta t < t \leq t_S + \Delta t \text{ und} \\ V_{Pr}(t) &= \dot{V}_P \cdot (t_S - t_0) = V_P \quad \text{für } t > t_S + \Delta t \end{aligned} \quad (25)$$

In Abbildung 3 ist exemplarisch die zeitliche Entwicklung des Extraktions-, Kavernen- und Konvergenzvolumens bei Vorgabe der im Diagramm angegebenen Parameter dargestellt. Das Gesamtproduktionsvolumen V_P entwickelt sich während der Solphase entsprechend der vorausgesetzten konstanten Produktionsrate \dot{V}_P linear über die Zeit. Nach Solende bleibt das Produktionsvolumen konstant. Da die Kaverne auch während der Solphase konvergiert, erreicht sie zum Ende der Solphase ein kleineres Volumen als das Produktionsvolumen. In der Speicherphase nimmt das Kavernenvolumen aufgrund des nicht mehr zunehmenden Produktionsvolumens und aufgrund fortschreitender Konvergenz ab. Zusätzlich ist das Konvergenzvolumen in rot (Solphase) bzw. orange (Speicherphase) als eigene Kurve dargestellt.

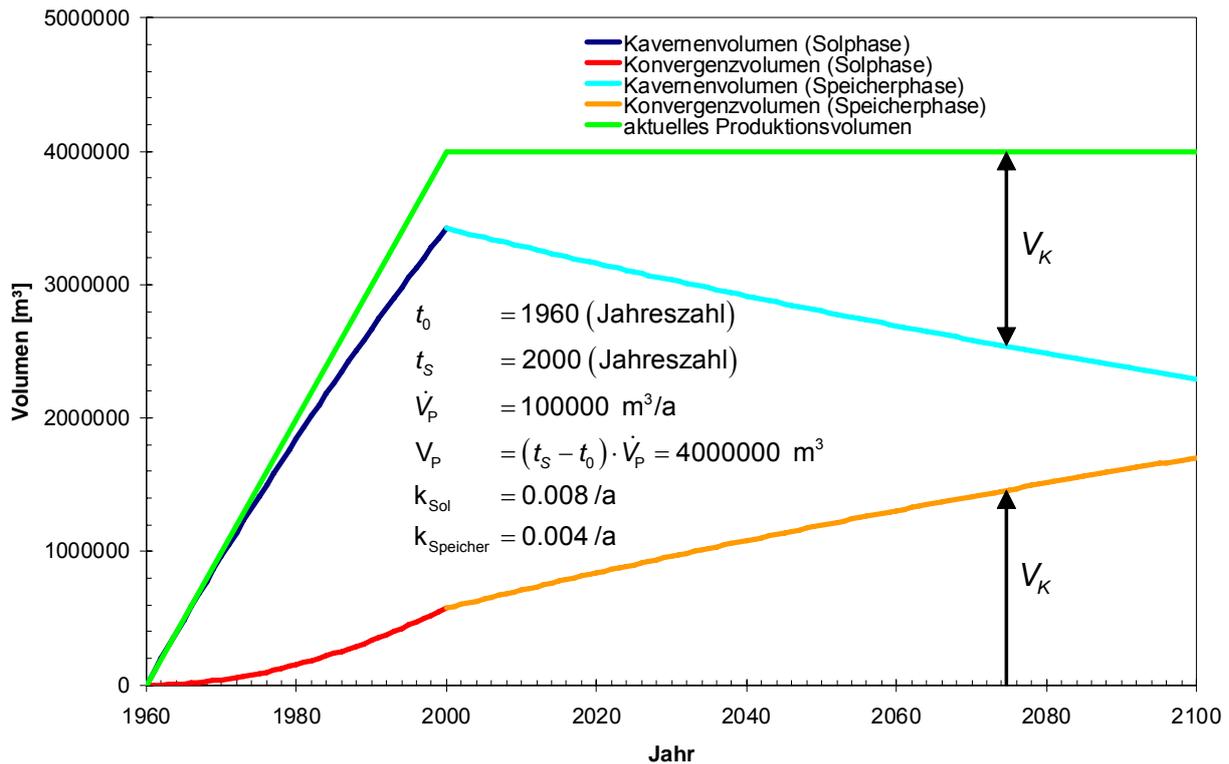


Abbildung 3: Exemplarische Entwicklung des Kavernen- und Konvergenzvolumens

Die Konvergenzraten werden nicht vorgegeben, sondern in Abhängigkeit von der Differenz des lithostatischen Gebirgsdruckes und des Kaverneninnendruckes unter Berücksichtigung des stationären Kriechverhaltens des Steinsalzes teufenabhängig berechnet. Grundlage für die Berechnung der Konvergenzraten ist der stationäre Norton-Hoff-Kriechansatz, in den auch die Gebirgstemperatur T eingeht und der in der Vergangenheit in vielen Standsicherheitsuntersuchungen der BGR als Kriechgesetz BGRa mit standortabhängigen Parametern für die Kavernenfelder Winschoten / Heiligerlee und Zuidwending verwendet wurde (z.B.: EICKEMEIER & WALLNER 2000, EICKEMEIER & WALLNER 2002, EICKEMEIER & HEUSERMANN 2003):

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}} = A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R_m \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*}\right)^n \quad (\text{Norton-Hoff, BGRa}) \quad (26)$$

BÉREST et al. (2001) geben unter Zugrundelegung dieses Kriechansatzes folgende Gleichungen zur Berechnung der stationären Konvergenzrate an:

1. für zylindrische Kavernen:

$$k = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot (p_{\text{lith}} - p_i)}{n \cdot \sigma^*}\right)^n \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R_m \cdot T}\right) \quad (27)$$

2. für kugelförmige Kavernen:

$$k = 1.5 \cdot \left(\frac{1.5 \cdot (p_{\text{lith}} - p_i)}{n \cdot \sigma^*}\right)^n \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R_m \cdot T}\right) \quad (28)$$

mit:

A : Strukturfaktor [1/Zeiteinheit]

σ_{eff} : Effektivspannung nach v. Mises [MPa]

σ^* : Normierungsspannung [MPa] ($\sigma^* = 1.0 \text{ MPa}$)

n : Spannungsexponent [-] ($n = 5$)

Q : Aktivierungsenergie [kJ/mol] ($Q = 54.0 \text{ kJ/mol}$)

R_m : Universelle Gaskonstante [kJ/mol/K] ($R_m = 8.3143 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/mol/K}$)

T : Temperatur [K]

k : Konvergenzrate [1/Zeiteinheit]

p_{lith} : lithostatischer Teufendruck [MPa]

p_i : Kaverneninnendruck [MPa]

Der lithostatische Gebirgsdruck p_{lith} wird als Funktion der Teufe z berechnet:

$$p_{lith} = p_{lith,0} + p'_{lith} \cdot z \quad (29)$$

Der Kaverneninnendruck p_i wird analog bestimmt:

$$p_i = p_{i,0} + p'_i \cdot z \quad (30)$$

Der Kaverneninnendruck nach Abschluss der Kavernen wird als Sonderfall wie folgt berechnet:

$$p_i = p_{lith}(z_{Top}) + p'_{i,Lauge} \cdot (z - z_{Top}) \quad (31)$$

Für abgeschlossene Kavernen entspricht also der Kaverneninnendruck in der Firste genau dem lithostatischen Teufendruck nach Gleichung (29). Unterhalb der Kavernenfirste herrscht entsprechend der Laugendichte und des Abstandes zur Firste ein höherer Druck. Diese Annahme entspricht der Vorstellung, dass bei Anstieg des Kaverneninnendruckes auf den lithostatischen Teufendruck das Salzgebirge permeabel wird und kein weiterer Druckanstieg stattfinden kann. Da nach Abschluss der Kavernen eine gewisse Zeit vergeht, bis dieser Druck tatsächlich erreicht wird, sollten die Kavernen fiktiv noch eine gewisse Zeit offen stehend simuliert werden.

Die Gebirgstemperatur T wird ebenfalls linear veränderlich über die Teufe angenommen:

$$T = T_0 + T' \cdot z \quad (32)$$

Die in den Gleichungen (29) bis (32) verwendeten Symbole haben folgende Bedeutung:

$p_{lith,0}$: theoretisch vorhandener lithostatischer Teufendruck an der Geländeoberkante (dieser Wert ist nicht zwingend 0, wenn z. B. unterschiedliche Dichten im überlagernden Gebirge angesetzt werden) [MPa]

p'_{lith} : lithostatischer Druckgradient (entsprechend der Dichte des Steinsalzes, in dessen Teufenbereich die Kavernen angeordnet sind) [MPa/m]

- $p_{i,0}$: theoretisch vorhandener Kaverneninnendruck an der Geländeoberkante
($\neq 0$ bei Ansatz eines Überdruckes) [MPa]
- p'_i : hydrostatischer Druckgradient des Füllmediums [MPa/m]
- z : Teufe [m]
- z_{Top} : Teufe des Kavernendaches [m]
- $p'_{i,Lauge}$: hydrostatischer Druckgradient der Lauge [MPa/m]
- T_0 : theoretisch vorhandene Temperatur an der Geländeoberkante [K]
- T' : geothermischer Gradient im Salz [K/m]

Bei hohen zylindrischen Kavernen ist es ratsam, das Kavernenvolumen in eine bestimmte Anzahl von Teilvolumina aufzuteilen, um so teufenabhängige Konvergenzraten über die Kavernenhöhe erfassen zu können. Dazu werden für die einzelnen Kavernenabschnitte die Konvergenz erzeugenden Drücke (lithostatischer Teufendruck und Kaverneninnendruck) für eine Referenzteufe \bar{z} bestimmt, die wie folgt definiert ist:

$$\bar{z} = (1 - \alpha) \cdot z^u + \alpha \cdot z^o \quad (33)$$

Der Faktor α kann im Bereich $0 \leq \alpha \leq 1$ vorgegeben werden. In den Berechnungen für diesen Bericht wurde $\alpha = \frac{1}{3}$ angesetzt.

Auf Anregung der Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) wurde statt

$$R = \sqrt{z^u \cdot z^o} \cdot \cot \beta \quad (34)$$

nach Gleichung (3) alternativ für die Berechnung des charakteristischen Muldenradius R die Gleichung

$$R = \bar{z} \cdot \cot \beta \quad (35)$$

eingeführt. Bei den Senkungsprognosen für den vorliegenden Bericht wurde Gleichung (35) statt Gleichung (34) verwendet. Anzumerken ist, dass der unterschiedliche Berechnungsansatz für den charakteristischen Muldenradius R nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Senkungsprognose hat. Für zukünftige Berechnungen wird empfohlen, Gleichung (34) zu verwenden, da sie sich bei Annahme einer konstanten Konvergenzrate über die Höhe des betrachteten Kavernenabschnittes theoretisch herleiten lässt (z. B. SCHOBER 1982: 28-42). Für das vorliegende Update der Senkungsprognosen wurde weiterhin Gleichung (35) verwendet, um einen unmittelbaren Vergleich mit den für Akzo Nobel erstellten Prognosen (EICKEMEIER & HEUSERMANN 2006, 2007) zu gewährleisten.

3.2 Verwendete Software

Zur Erstellung der Senkungsprognosen wurde das Programm ProSub_v0.1 (**P**rofessional **S**ubsidence Calculation, Version 0.1) verwendet, mit dem Senkungsmulden auf der Grundlage des in Kap. 3.1 beschriebenen Modells berechnet werden können.

Die Bestimmung der Modellparameter erfolgte bereits in EICKEMEIER & HEUSERMANN (2007) mit dem Pogramm FitPar (**Fit Parameters**).

Zur Visualisierung der Ergebnisse wird das Programm Tecplot 10 (Tecplot User's Manual - Version 10 - 2003) benutzt.

Mit dem Programm TP2DXF werden aus Tecplot 10 erstellte Dateien (*.dat), die einen Satz von Isolinien enthalten, in das von AutoCAD lesbare dxf-Format umgewandelt.

4 Modellparameter

Die Parameter n , Q , a , ξ und β werden nicht variiert, sondern mit nachfolgenden Werten in die Senkungsprognose eingeführt:

$$\begin{aligned} Q &= 54.0 [kJ/mol] & a &= 0.95 [-] \\ n &= 5 [-] & \xi &= 1.0 [-] \\ & & \beta &= 45 [^\circ] \end{aligned}$$

Die Ermittlung der Modellparameter A und δ erfolgte durch eine „least square analysis“ für die gemessenen und berechneten Senkungsraten des Jahres 2005 an ausgewählten Messpunkten durch Variation der beiden Parameter. Die Modellparameter A und δ ergeben sich für das Kavernenfeld Zuidwending zu (s. a. EICKEMEIER & HEUSERMANN 2007):

$$\begin{aligned} A &= 0.3618 [1/d] \quad (2.01 \cdot BGRa) \\ \delta &= 1.833 [-] \end{aligned} \tag{36}$$

5 Senkungsprognose Gasspeicher Zuidwending

5.1 Grundlagen

Grundlage für die Erstellung der Senkungsprognose ist die aktuelle Planung des Gasspeicherausbau, wie sie mit Gasunie, DEEP und Akzo Nobel im November 2007 per e-Mail abgestimmt wurde. Für die Prognose von Geländesenkungen bis zum Jahr 2050 werden sechs Varianten gem. Tabelle 1 berechnet. Die Varianten unterscheiden sich durch unterschiedliche Kavernenanzahl (Kavernen der Phase 1 bzw. der Phasen 1 bis 3) und durch die angesetzten unterschiedlichen mittleren Speicherdrücke (125, 145 bzw. 165 bar).

Die Kavernendaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Sämtliche Kavernen werden in einer Teufe von 1030 bis 1350 m angeordnet und mit einem Volumen von jeweils 1.0 Mio. m³ berücksichtigt. Der Solbeginn der einzelnen Kavernen ist ebenso angegeben wie das geplante Solende und der Beginn der Gasspeicherung. Bis zum Beginn der Gasspeicherung wird hydrostatischer Soledruck in den Kavernen angenommen. Jede Kaverne wird für die Modellierung in 20 gleich große Teilvolumina aufgeteilt. Bis zum Jahr 2050 wird ein kontinuierlicher Gasspeicherbetrieb unterstellt.

Tabelle 3 enthält die Gebirgs- und Fluidkennwerte, die für die Berechnung der Drücke und Temperaturen anhand der Gleichungen (29) bis (32) benötigt werden. Die sich aus der Regressionsanalyse ergebenden Modellparameter wurden bereits in Gleichung (36) angegeben.

Tabelle 1: Definition der Berechnungsfälle

	Mittlerer Speicherdruck [bar]		
	125	145	165
Phase 1	ZW-AGB-125-Phase-1	ZW-AGB-145-Phase-1	ZW-AGB-165-Phase-1
Phase 1-2-3	ZW-AGB-125-Phase-1-2-3	ZW-AGB-145-Phase-1-2-3	ZW-AGB-165-Phase-1-2-3
Definition der Betriebsphasen:			
Phase 1:	Berücksichtigung der Kavernen A2, A3, A4 und A6 gem. Tabelle 2		
Phase 1-2-3:	Berücksichtigung der Kavernen A2, A3, A4, A6, A5A, A7A, A8A, A9A, A1A und A10A gem. Tabelle 2		

Tabelle 2: Charakteristische Daten der Gasspeicherkavernen

Kaverne	Koordinaten der Kavernenachse im Grundriss		Kavernen- fiste	Kavernen- boden	Solbeginn	Solende	Beginn des Gasspeicher- betriebes	Extraktions- volumen	
	x [m]	y [m]	Teufe [m]	Teufe [m]	[Datum]	[Datum]	[Datum]	[Mio. m³]	
Phase 1	A2	258113.546	567807.594	1030	1350	01.06.2007	01.10.2010	01.06.2011	1.0
	A3	258002.055	567527.241						
	A4	257849.591	567270.455						
	A2	257750.96	567727.15						
Phase 2	A5A	257902.791	568021.095	1030	1350	01.06.2011	01.10.2014	01.06.2015	1.0
	A7A	257616.301	567459.07						
	A8A	257604.515	567988.978						
	A9A	257450.988	567731.239						
Phase 3	A1A	258304.663	568038.839	1030	1350	01.06.2015	01.10.2018	01.06.2019	1.0
	A10A	257316.329	567463.159						

Tabelle 3: Kavernenfeld Zuidwending: Gebirgs- und Fluidkennwerte

	Absolutwert	Gradient
Lith. Teufendruck ($p_{lith,0}/p'_{lith}$)	-0.6 MPa	0.022 MPa/m
Gebirgstemperatur (T_0/T')	288.85 K	0.022 K/m
Lauge ($p_{i,0}/p'_i$)	0.0 MPa	0.012 MPa/m
Gas ($p_{i,0}/p'_i$)	12.5 / 14.5 / 16.5 MPa	0.0 MPa/m

5.2 Ergebnisse (Phase 1)

Die allein aus Solung und Betrieb der Gasspeicherkavernen hervorgerufenen maximalen Senkungsraten betragen unter Berücksichtigung der vier in Phase 1 gesolten Kavernen im Jahr 2018 je nach Höhe des Speicherdruckes zwischen 0.089 und 0.45 mm/a (s. a. Tabelle 4). Die Senkungsraten ändern sich bis zum Jahr 2050 nur wenig, da quasi-stationäre Bedingungen in den einzelnen Kavernen herrschen.

Die bis zum Jahr 2018 akkumulierten Senkungen liegen in Abhängigkeit vom Speicherdruck im Muldenzentrum zwischen 1.02 und 3.41 mm. Für das Jahr 2050 ergeben sich Werte zwischen 3.9 und 17.6 mm.

Karten mit Isolinien der berechneten Senkungen bzw. Senkungsraten der Varianten ZW-AGB-125-Phase-1, ZW-AGB-145-Phase-1, ZW-AGB-165-Phase-1 sind als Anlagen 5.2-1 bis 5.2-18 beigelegt.

Tabelle 4: Berechnete maximale Senkungsraten und Senkungszuwächse

	t =	2018	2030	2050
	Mittlerer Speicherdruck [bar]	Maximale Senkungsrate [mm/a] zu Beginn von t		
Phase 1	125	0.45	0.45	0.44
	145	0.21	0.21	0.21
	165	0.089	0.089	0.089
Phase 1-2-3	125	0.94	1.05	1.03
	145	0.475	0.501	0.496
	165	0.234	0.211	0.210
	Mittlerer Speicherdruck [bar]	Maximaler Senkungszuwachs [mm] zwischen 2007 und t		
Phase 1	125	3.41	8.8	17.6
	145	1.84	4.4	8.6
	165	1.02	2.1	3.9
Phase 1-2-3	125	4.89	17.5	38.4
	145	2.84	8.85	18.8
	165	1.73	4.31	8.52

5.3 Ergebnisse (Phase 1-2-3)

Die allein aus Solung und Betrieb der Gasspeicherkavernen hervorgerufenen maximalen Senkungsraten betragen unter Berücksichtigung der zehn in Phase 1 bis 3 gesolten Kavernen im Jahr 2018 je nach Höhe des Speicherdruckes zwischen 0.234 und 0.94 mm/a (s. a. Tabelle 4). Die Senkungsraten betragen im Jahr 2050 je nach Höhe des Speicherdruckes zwischen 0.21 und 1.03 mm/a.

Die bis zum Jahr 2018 akkumulierten Senkungen liegen in Abhängigkeit vom Speicherdruck im Muldenzentrum zwischen 1.73 und 4.89 mm. Für das Jahr 2050 ergeben sich Werte zwischen 8.52 und 38.4 mm.

Karten mit Isolinien der berechneten Senkungen bzw. Senkungsraten der Varianten ZW-AGB-125-Phase-1-2-3, ZW-AGB-145-Phase-1-2-3, ZW-AGB-165-Phase-1-2-3 sind als Anlagen 5.3-1 bis 5.3-18 beigelegt.

5.4 Vergleich von ausgewählten Ergebnissen

In Abbildung 4 ist die zeitliche Entwicklung der Senkungen zwischen 2007 und 2050 veranschaulicht. Grundlage sind die entsprechenden mit Rautensymbolen gekennzeichneten Werte aus Tabelle 4. Durch den Vollausbau des Kavernenspeichers (Phase 1 bis 3) ergeben sich für das Jahr 2050 etwa doppelt so große Senkungen wie für den Grundausbau der Phase 1.

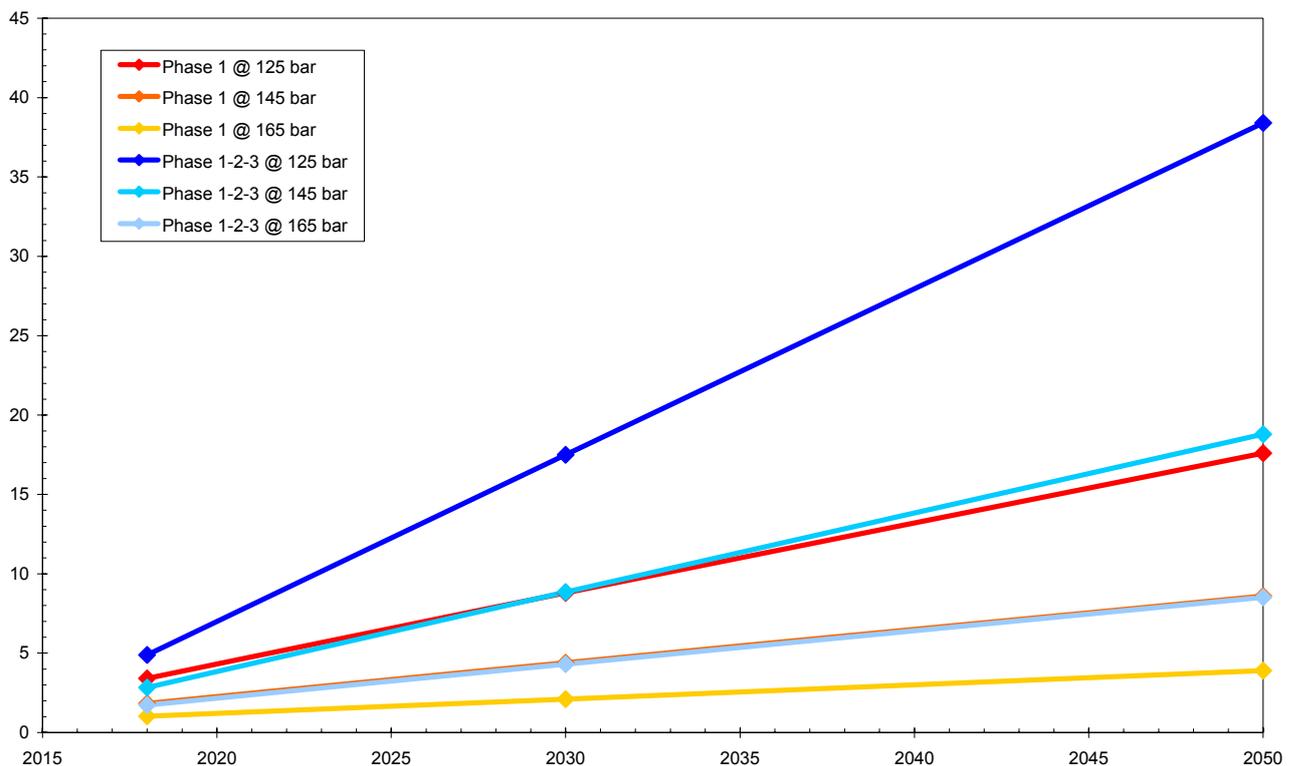


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Senkungen in Abhängigkeit vom mittleren Speicherdruck (Phase 1 vs. Phase 1-2-3)

In Tabelle 5 sind die mittleren Volumenkonvergenzraten für die Gasspeicherlavernen in Abhängigkeit vom Speicherdruck und von der Teufenlage zusammengestellt.

Die Konvergenzraten sind stark vom mittleren Speicherdruck und von der Teufenlage der Kavernen abhängig: Bei einer Teufenlage zwischen 1030 und 1350 m, wie sie im vorliegenden Bericht unterstellt wurde, ergibt sich für einen mittleren Speicherdruck von 165 bar eine Konvergenzrate von 0.14 ‰/a, für einen mittleren Speicherdruck von 125 bar eine Konvergenzrate von 0.68 ‰/a.

Bei einer Teufenlage zwischen 1050 und 1400 m, wie sie in EICKEMEIER & HEUSERMANN (2007) angenommen wurde, ergibt sich für einen mittleren Speicherdruck von 165 bar eine Konvergenzrate von 0.22 ‰/a, bei einem mittleren Speicherdruck von 125 bar eine Konvergenzrate von 0.98 ‰/a.

Eine größere Teufenlage des Kavernentiefsten (hier: $\Delta = 50$ m) führt also zu erheblich höheren Kavernenkonvergenzen (ca. 50%) und damit auch zu höheren Senkungen an der Geländeoberfläche (ebenfalls ca. 50%).

Tabelle 5: Abgeschätzte mittlere stationäre Konvergenzraten bei unterschiedlichen Speicherdrücken und Teufenlagen

Quelle	Teufenlage [m TVD]		Mittlerer Speicherdruck [bar]		
			125	145	165
	Kavernendach	Kavernentiefstes	Konvergenzrate [%/a]		
Vorliegender Bericht	1030	1350	0.68	0.33	0.14
EICKEMEIER & HEUSERMANN (2007)	1050	1400	0.98	0.49	0.22

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wurden Senkungen und Senkungsraten mit dem Programm ProSub_v0.1 für den Gasspeicher Zuidwending prognostiziert und in entsprechenden Karten veranschaulicht. Die für die Erstellung der Prognose erforderlichen Modellparameter wurden EICKEMEIER & HEUSERMANN (2007) entnommen.

Die von der BGR erstellten Senkungskarten stellen eine Prognose mit Mittelwertcharakter dar, so dass die in situ auftretenden Senkungen und Senkungsraten in der Regel nicht exakt prognostiziert werden. Zur Erstellung der verschiedenen Karten wurde die Software Tecplot 10 verwendet. Sämtliche Isolinien wurden als dxf-Dateien zwecks Integration in Geoinformationssysteme zur Verfügung gestellt und sind auf der beigefügten DVD ebenso enthalten wie sämtliche Karten im wmf-Format.

Die Senkungsraten betragen bei Vollausbau des Gasspeichers (Phase 1 bis 3) und einem mittleren Speicherdruck von 125 bar im gesamten Prognosezeitraum von 2007 bis 2050 nur wenig mehr als 1.0 mm/Jahr. Bei den zuvor genannten Bedingungen stellen sich infolge Gasspeicherbetrieb bis zum Jahr 2050 Gesamtsenkungen von etwa 38.4 mm ein.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Im Auftrag:



(Dr. Volkmar Bräuer)
– Geologiedirektor–
Abteilungsleiter B2



(Dipl.-Ing. Ralf Eickemeier)
– Wissenschaftlicher Oberrat –



(Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann)
– Wissenschaftlicher Direktor –

Literaturverzeichnis

BÉREST, P., BERGUES, J., BROUARD, B., DURUP, J. G. & GUERBER, B. (2001): A salt cavern abandonment test -- International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, **38**, 357-368; Oxford (Pergamon Pr.)-- ISSN 1365-1609.

BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A., MUSIOL, G. & MÜHLIG, H. (1997): Taschenbuch der Mathematik.-- 3., überarb. und erw. Auflage der Neubearbeitung: Frankfurt am Main, Thun (Harri Deutsch). - ISBN 3-8171-2003-6.

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2003): Kavernenfeld Zuidwending: Geomechanische Berechnungen zur Pfeilerbeanspruchung zwischen den Kavernen 3 und 5.-- Hannover (BGR).

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2006): Senkungsvorausberechnungen für die Kavernenfelder Winschoten / Heiligerlee und Zuidwending. 1 Text- und 1 Anlagenband.- Hannover (BGR).

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2007): Senkungsprognosen für die Kavernenfelder Winschoten / Heiligerlee und Zuidwending (Datenbasis 2005). 1 Text- und 1 Anlagenband.-- Hannover (BGR).

EICKEMEIER, R. & WALLNER, M. (2000): Diameter Enlargement of Brine Wells in the Heiligerlee Brine Field for a Field Expansion.-- Hannover (BGR).

EICKEMEIER, R. & WALLNER, M. (2002): Future Development and Optimization of the Zuidwending Brine Field.-- Hannover (BGR).

SCHÖBER, F. (1982): Die Berechnung von Bodenbewegungen über kavernenartigen Hohlräumen unter Beachtung der globalen Volumenkonvergenz.-- Clausthal-Zellerfeld.

Tecplot User's Manual - Version 10 - (2003).-- Amtec Engineering Inc., Bellevue.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definition der Berechnungsfälle.....	13
Tabelle 2:	Charakteristische Daten der Gasspeicherkavernen	13
Tabelle 3:	Kavernenfeld Zuidwending: Gebirgs- und Fluidkennwerte	13
Tabelle 4:	Berechnete maximale Senkungsraten und Senkungszuwächse	14
Tabelle 5:	Abgeschätzte mittlere stationäre Konvergenzraten bei unterschiedlichen Speicherdrücken und Teufenlagen.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellparameter zur Beschreibung der Kavernengeometrie	5
Abbildung 2: Die Gamma-Funktion $\Gamma(x)$	6
Abbildung 3: Exemplarische Entwicklung des Kavernen- und Konvergenzvolumens	9
Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Senkungen in Abhängigkeit vom mittleren Speicherdruck (Phase 1 vs. Phase 1-2-3).....	15

Anlagenverzeichnis

- Anlage 5.2-1: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-2: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2030
M 1:20000
- Anlage 5.2-3: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.2-4: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-5: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000
- Anlage 5.2-6: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000
- Anlage 5.2-7: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-8: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2030
M 1:20000
- Anlage 5.2-9: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.2-10: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-11: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000
- Anlage 5.2-12: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000
- Anlage 5.2-13: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-14: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2030
M 1:20000

- Anlage 5.2-15: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungsdaten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.2-16: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.2-17: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000
- Anlage 5.2-18: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-1: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-2: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2030
M 1:20000
- Anlage 5.3-3: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-4: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-5: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000
- Anlage 5.3-6: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-125-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-7: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-8: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2030
M 1:20000
- Anlage 5.3-9: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungsdaten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-10: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-11: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000

-
- Anlage 5.3-12: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-145-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-13: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungsraten im Jahr 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-14: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungsraten im Jahr 2030
M 1:20000
- Anlage 5.3-15: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungsraten im Jahr 2050
M 1:20000
- Anlage 5.3-16: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2018
M 1:20000
- Anlage 5.3-17: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2030
M 1:20000
- Anlage 5.3-18: Kavernenfeld Zuidwending – Gasspeicher (ZW-AGB-165-Phase-1-2-3)
Senkungszuwachs von 2007 bis 2050
M 1:20000