

Kriechverhalten von Salzgestein  
in der Umgebung von Kavernenfeldern

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dirk Zander-Schiebenhöfer,  
geboren am 01.05.1957, in Emden

2007

Hauptberichter : Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard B. Rokahr

Koreferenten : Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann

Vorsitzender der Promotionskommission :

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Tag der Promotion : 14.03.2007

## **Kurzzusammenfassung**

In der gegenwärtigen Praxis bei der Auslegung und Dimensionierung von Speicherkavernen im Salzgestein wird für die Beschreibung des Materialverhaltens des Salzgesteins auf die Ergebnisse von Laborversuchen an lokationsspezifischem Material zurückgegriffen. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob bei nicht vorhandenen Labordaten das Festigkeits- und das Verformungsverhalten des die Kavernen umgebenden Salzgesteins indirekt aus In-situ-Mess- und Betriebsdaten in zuverlässiger Weise bestimmt werden kann.

Es werden unterschiedliche integrale Methoden zur indirekten Ermittlung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens des Salzgesteins in der Umgebung von Kavernenanlagen vorgestellt. Diese sind sowohl in der Lage, das Verformungsverhalten in der Umgebung einer einzelnen Kaverne lokal zu bewerten als auch global für den gesamten Umgebungsbereich aller Kavernen einer Anlage. Demgegenüber ist die vorgestellte Untersuchungsmethode der In-situ-Festigkeit des eine Kaverne umgebenden Salzgesteins eine lokale Testmethode unter spezifischen Beanspruchungsbedingungen.

Anhand von Beispielen für Kavernenanlagen, die sich über mehrere Jahrzehnte im Betrieb befinden und unterschiedliche Arten der Nutzung aufweisen, wird die Anwendbarkeit der Untersuchungsmethoden demonstriert und die Qualität der Ergebnisse bewertet. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die gegenseitige Ergänzung und Kopplungsmöglichkeit der Untersuchungsmethoden gelegt. Anhand eines Beispiels wird aufgezeigt, inwieweit die grundlegenden Annahmen der verwendeten Untersuchungsmethoden die Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins beeinflussen.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist, dass auf der Grundlage von In-situ-Mess- und Betriebsdaten anhand von indirekten Untersuchungsmethoden auf das zeitabhängige Verformungsverhalten von Salzgestein in der Umgebung von Kavernen in geeigneter Weise geschlossen werden kann, ohne auf die Ergebnisse von Laborversuchen angewiesen zu sein. Die Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens bezieht sich dabei integral auf den gesamten die Kavernen umgebenden Gebirgsraum.

Durch die indirekten Untersuchungsmethoden können keine Rückschlüsse auf das globale Festigkeitsverhalten gezogen werden, da der Zustand des Versagens nicht aus den In-situ-Messungen und den Betriebsdaten abgeleitet werden kann. Sofern zur Beurteilung der Festigkeit keine Ergebnisse von Laborversuchen herangezogen werden können, kann diese nur über einen In-situ-Versuch erfolgen, in dem für die spezifischen Beanspruchungsbedingungen die lokale Stabilität des umgebenden Salzgesteins am Hohlraumrand nachgewiesen wird.

Schlagworte: Kavernenfelder, Salzgestein, Kriechverhalten, In-situ-Beobachtungen

## **Abstract**

The present design and layout concepts for storage caverns in rock salt are based on the results of laboratory tests with site specific core material. It is the aim of this thesis to answer the question whether or not the material behaviour of the rock salt mass surrounding the caverns can be determined in a reliable way using indirect procedures that are exclusively based on data from in-situ observations and from operations. In this context the time dependent deformation behaviour and the strength of rock salt is investigated.

Different indirect methods for the integral evaluation of the time dependent deformation behaviour of the rock salt mass in the vicinity of caverns are presented. On the one hand these methods are focused locally on the direct vicinity of a single cavern and on the other hand globally on the volume of the salt rock mass surrounding all caverns of a storage facility. Compared with this the represented method for the evaluation of in-situ strength is a locally restricted test method dependent on specific conditions of loading and stressing.

Using the site specific data of selected cavern storages that have been operated for several decades and for different purposes the applicability of the presented investigation procedures is shown and the assessment results are evaluated. Specifically the possibility of coupling the methods of investigation is studied. A case study is carried out to show the influences of the various input parameters on the evaluation of the time dependent deformation behaviour of the rock salt surrounding the caverns.

The result of this thesis is that the time dependent deformation behaviour of the rock salt mass surrounding a cavern storage can be determined in a reliable way by indirect methods using data from in-situ measurements and from operations if no laboratory tests can be carried out and/or are available. By these procedures the material behaviour is characterized integrally for the whole rock mass in the vicinity of the cavern storage underground.

No conclusions can be drawn for the global strength of the surrounding salt rock from the indirect methods of investigation, because it is not possible to derive the state of failure from the in-situ measurements and/or operation data. If no laboratory data are available an assessment of the in-situ strength of the rock salt can only be made by an in-situ test, proving the local stability of the rock salt at cavern wall under the specific conditions of stressing.

Keywords: cavern fields, rock salt, creep behaviour, in-situ-observations

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	6
2	Stand des Wissens .....	8
3	Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Verhaltens von Salzgestein .....	14
3.1	Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens von Salzgestein .....	14
3.1.1	Testmethoden des lokal begrenzten Verformungsverhaltens .....	15
3.1.2	Untersuchung des lokal begrenzten Verformungsverhaltens (Untertagevergleiche) .....	19
3.1.3	Untersuchung des globalen Verformungsverhaltens (Vergleich unter Tage / über Tage) .....	26
3.2	Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Festigkeitsverhaltens von Salzgestein .....	33
4	Untersuchungsbeispiele .....	35
4.1	Explorationsbohrung für eine spätere Speicherkaverne .....	36
4.2	Kavernenanlage zur Solegewinnung .....	42
4.3	Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und verwandter Produkte .....	48
4.4	Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas .....	66
4.5	Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und Erdgas .....	84
5	Bewertung der Untersuchungsmethoden und ihrer Ergebnisse .....	99
5.1	Diskussion wesentlicher Einflussfaktoren des theoretischen Konvergenzmodells .....	99
5.2	Diskussion der Art der Auswertung der Ergebnisse des theoretischen Konvergenzmodells .....	116
5.3	Qualität der Untersuchungsergebnisse .....	125
6	Zusammenfassung .....	127
7	Quellennachweise .....	130

## 1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland, in weiteren Ländern Europas und in Nordamerika werden seit mehr als 30 Jahren Kavernen betrieben, die in Salzformationen ausgesolt worden sind. Dabei handelt es sich um Kavernen zur Speicherung von Öl oder Gas oder um Kavernen zur Solegewinnung.

Vor dem Hintergrund dieser über mehrere Jahrzehnte zurückreichenden Erfahrung werden seitens der Betreiber die unterschiedlichsten Überlegungen über den zukünftigen Betrieb der bestehenden Kavernen angestellt. Dadurch wird in der Regel eine Überprüfung der ursprünglichen gebirgsmechanischen Auslegung und Dimensionierung erforderlich. Zu diesen Bestrebungen der Betreiber gehören unter anderem

- die Optimierung eines Kavernenfeldes zur Gasspeicherung im Hinblick auf die ausgelegten minimalen und maximalen Kaverneninnendrucke oder ihrer zugrunde gelegten Speichercharakteristik (saisonaler Betrieb oder Deckung des Spitzenbedarfs),
- die Optimierung des maximal aussolbaren untertägigen Hohlraumvolumens von Kavernen zur Ölspeicherung oder Solegewinnung,
- die Umnutzung einer Kaverne zur Ölspeicherung auf Gasspeicherung,
- die Prognose der zu erwartenden Bodensenkungen an der Geländeoberfläche über der Kavernenanlage infolge des zukünftigen Betriebs.

Da im Allgemeinen mehrere Kavernen als Kavernenfelder in derselben Salzformation angelegt sind, wird deutlich, dass bei der Untersuchung dieser Aufgabenstellungen keine isolierte Betrachtung einzelner Kavernen erfolgen kann, sondern die Kavernenanlage als Ganzes berücksichtigt werden muss.

Das die Kavernen umgebende Salzgestein stellt den Baustoff dar, der die Stabilität und die Gebrauchsfähigkeit der Kavernen garantieren muss. Die Kenntnis der Materialeigenschaften des Salzgesteins spielt daher eine entscheidende Rolle. Neben der Beschreibung der Festigkeitseigenschaften ist diese auch für das Verformungsverhalten erforderlich. Dabei ist zu beachten, dass das Salzgestein ein ausgeprägtes zeitabhängiges Verformungsverhalten (Kriechverhalten) aufweist.

Während nach dem gegenwärtigen Stand der Technik im Vorfeld des Neubaus einer Kaverne umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt werden, zu denen auch Laboruntersuchungen anhand von lokationspezifischem Material zählen, um die gesteinsmechanischen Eigenschaften des Salzgesteins zu bestimmen, sind diese Daten für bereits bestehende Kavernenanlagen oft nicht in vollem Umfang vorhanden. Dieses hat damit zu tun, dass sich im Laufe der Zeit die Qualitätsanforderungen an eine Dimensionierung geändert haben beziehungsweise weiterreichende Anforderungen an den Standsicherheitsnachweis gestellt werden, wie dies zum Beispiel bei einer Nutzungsänderung der Fall ist.

Nach dem Abteufen einer Kavernenbohrung und der späteren Inbetriebnahme einer Kaverne gibt es im Allgemeinen keine Möglichkeit mehr, das lokationsspezifische Materialverhalten des die Kaverne umgebenden Salzgesteins im Labor zu bestimmen. Bohrkerne sind meist nicht mehr oder nicht in ausreichender Anzahl vorhanden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob sich durch die Art und die Zeit der Lagerung dieser Bohrkerne die Materialeigenschaften verändert haben.

Ein Ausweg aus diesem Konflikt – keine genauen Materialdaten vorzufinden, aber für eine Neubegutachtung auf diese angewiesen zu sein – bietet die Auswertung von In-situ-Messdaten. Diese können gezielt anhand eines In-situ-Tests für eine bestimmte Kaverne gewonnen werden oder im Laufe des Betriebs einer Kavernenanlage aufgezeichnet worden sein. Entscheidend ist, dass es Methoden gibt, anhand derer diese Daten im Hinblick auf die Bewertung des Festigkeits- beziehungsweise des Verformungsverhaltens des die Kaverne(n) umgebenden Salzgesteins ausgewertet werden können.

In der Vergangenheit sind derartige Tests beziehungsweise Verfahren zur Bewertung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins unter Einbeziehung von In-situ-Beobachtungen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Zielsetzungen vorgestellt worden. Die Frage jedoch, ob die Ergebnisse dieser indirekten, auf In-situ-Beobachtungen beruhenden Untersuchungsmethoden zu einer Bewertung des Materialverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins führen, die vor dem Hintergrund einer robusten Dimensionierung einer Kaverne als ausreichend bezeichnet werden kann und damit einer Bestimmung der Materialkennwerte im Labor vergleichbar ist, bleibt bisher unbeantwortet.

## 2 Stand des Wissens

Zu den im Verlauf des Betriebs einer Kavernenanlage erfassten Daten, die im Hinblick auf die Bewertung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des die Kavernen umgebenden Salzgesteins von Interesse sind, gehören neben den Ergebnissen der Vermessungen der untertägigen Hohlraumvolumina die gemessenen Setzungen an der Geländeoberfläche oberhalb der Kavernenanlage. Darüber hinaus werden betriebsseitig der Kavernenkopfdruck und besondere Betriebsereignisse wie zum Beispiel Ein-, Aus- und Umlagerungen von Speichergut protokolliert.

Schon relativ bald nach der Inbetriebnahme der ersten Kavernenanlagen ist der Versuch unternommen worden, auf der Grundlage dieser in situ beziehungsweise betrieblich gemessenen Daten eine Nachbetrachtung des Verhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins vorzunehmen, um einerseits die Planungsvoraussetzungen zu überprüfen und andererseits eine verbesserte Prognose des zukünftigen Verhaltens einer Kavernenanlage vornehmen zu können.

Für das Kavernenfeld Tersanne in Frankreich, das zur Speicherung von Gas betrieben wird, untersuchten NGUYEN-MINH, MAITOURNAM, BRAHAM und DURUP (1993) das Setzungsverhalten der Geländeoberfläche anhand von gebirgsmechanischen Berechnungsmodellen, die das Deckgebirge und die Salzformation berücksichtigen. Sie stellten dabei fest, dass entscheidend für die Modellierung des Volumens der obertägigen Setzungsmulde die Kenntnis der Eigenschaften des Salzgesteins ist. Der Vergleich des am theoretischen Modell ermittelten Verlaufs des Setzungsmuldenvolumens mit dem untertägig erzeugten Konvergenzvolumen der Kavernen zeigte, dass nur 60 % des Konvergenzvolumens an der Geländeoberfläche gemessen wurden DURUP (1991). NGUYEN-MINH, MAITOURNAM, BRAHAM und DURUP (1993) führten dies auf verschiedene Ursachen innerhalb der Modellberechnung wie zum Beispiel der elastischen Kompression des Wirtsgesteins, die Annahme des Anfangsspannungszustandes und die Anordnung der Kavernen im Feld zurück. In einer zeitabhängigen Analyse eines unendlich ausgedehnten Kavernenfeldes beobachteten sie das Ansteigen des Verhältnisses von beobachtetem Setzungsmuldenvolumen zu aufgetretenem Konvergenzvolumen gegen einen Wert von 100 Prozent. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass der verwendete Verlauf des untertägigen Konvergenzvolumens ebenfalls auf der Anwendung eines theoretischen Modells beruhte, das nach HUGOUT (1988)



und BOUCLY (1984) die Ergebnisse von In-situ-Kavernentests dazu benutzte, um die im Labor gemessene Kriechfähigkeit des Salzes auf die Lokation zu kalibrieren. Der Verlauf des Konvergenzvolumens einer Kaverne wurde dann unter Einbeziehung der Betriebsdaten zunächst für eine kugelförmige Kaverne ermittelt und nachfolgend mit einem Faktor, der die aktuelle Kavernenform berücksichtigt, multipliziert. Nach DURUP (1991) wurden die anhand dieses Modells ermittelten Kavernenvolumina mit den Ergebnissen der Volumenbestimmungen infolge der Hohlraumvermessungen, der Gaszustandsgleichung und einer chemischen Analyse regelmäßig verglichen. QUINTANILHA DE MENEZES und NGUYEN-MINH (1996) führten auf der Grundlage eines erweiterten gebirgsmechanischen Modells vergleichende Untersuchungen der Setzungsprognose für die Gaskavernenspeicher Tersanne und Etrez durch. Ziel aller dieser Untersuchungen war die möglichst genaue Prognose des zukünftigen Verlaufes des Konvergenz- beziehungsweise Setzungsmuldenvolumens.

Mit dem Ziel, das globale Verformungsverhalten des Salzgesteins in der Umgebung der Kavernen der strategischen Rohölreserve der USA zu beschreiben, führten EHGARTNER und BAUER (2004) einen Vergleich des an einem theoretischen Modell berechneten Konvergenzvolumens der Kavernen mit dem Volumen der obertägigen Setzungsmulde durch. Das dabei verwendete theoretische Modell, das primär zur Überwachung von möglichen Leckagen gedacht war (EHGARTNER, BALLARD, TAVARES, YEH, HINKEBEIN und OSTENSEN (1995)), simuliert die Entwicklung des Kaverneninnendruckes jeder einzelnen Kaverne unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung im Speichergut, möglicher Nachsoleffekte und des Kriechens des umgebenden Salzgesteins. Durch Optimierung der freien Modellparameter wurde eine Anpassung an den bisher beobachteten Verlauf des Kaverneninnendruckes erreicht, wodurch auch eine fortlaufende Neubewertung des Kriechverhaltens des umgebenden Salzgesteins vorgenommen werden konnte. Auf der Basis dieser fortlaufend angepassten Modellparameter wurde ein globaler Vergleich des berechneten Verlaufes des Konvergenzvolumens mit dem gemessenen Verlauf des Volumens der Setzungsmulde vorgenommen. Für drei der vier untersuchten Kavernenanlagen ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung, bei einer Kavernenanlage wurden geologische Besonderheiten für ein vom theoretischen Konvergenzverhalten abweichendes beobachtetes Setzungsverhalten verantwortlich gemacht.

Für eine Prognose der Bodensenkungen oberhalb einer Kavernenanlage zur Produktion von Sole im Konzessionsgebiet Barradeel, Niederlande, verglichen BREUNESE, VAN EIJS, DE MEER und KROON (2003) die gemessenen Oberflächensenkungen mit denen, die durch Anwendung eines Massenbilanzmodells prognostiziert worden waren. Daraus leiteten sie einen anhaltenden Setzungsprozess aufgrund des viskosen Materialverhaltens des Salzgesteins ab, der in dem anschließenden gebirgsmechanischen Modell zur Prognose des Setzungsverlaufes, die über den Betrieb der Kavernen hinausgeht, durch einen zusätzlichen Kriechmechanismus berücksichtigt wird. Diese Annahme wird auch bereits in einer vorausgehenden Veröffentlichung von VAN EIJS, PÖTTGENS, BREUNESE und DUQUESNOY (2000) zur Untersuchung des Konvergenzverhaltens der gleichen Kavernenanlage unterstützt.

Ebenfalls für eine Kavernenanlage zur Produktion von Sole in Mariager, Dänemark, untersuchten OLDENZIEL und ZANDER-SCHIEBENHÖFER (2000) den Verlauf des Konvergenzvolumens beziehungsweise des Setzungsmuldenvolumens über die Zeit anhand dreier unterschiedlicher Methoden. Diese Methoden basieren entweder auf der Bilanzierung der Salzmassen während des Lösungs- und Förderprozesses oder auf der Auswertung der Daten der Vermessung der Geländeoberfläche oder auf Berechnungen des Konvergenzvolumens an einem theoretischen Konvergenzmodell. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass das verwendete theoretische Konvergenzmodell für eine Prognose des zukünftigen Verhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins geeignet sei.

Mit zwei unterschiedlichen Möglichkeiten der Simulation eines Druckaufbautests beziehungsweise eines Ausflussmengentests an einem Bohrloch beschäftigte sich VAN SAMBEEK (1990, 1993). Durch die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen wurde die Eignung der beiden Verfahren – das erste beruht auf einem analytischen Verformungsmodell, das zweite auf einem Finite-Elemente-Modell – für zwei Bohrungen nachgewiesen. Bei beiden Modellen besteht die Möglichkeit der Anpassung der Materialparameter des Steinsalzes, um auf die In-situ-Verformungseigenschaften des Salzes zu schließen.

Die grundsätzliche Eignung verschiedener Stoffgesetze für Steinsalz und ihrer Parameterbestimmung untersuchte HEUSERMANN (1982) anhand von Konvergenzmessdaten eines Bohrloches innerhalb des Bergwerkes Asse II in Remlingen, Deutschland. Eine Schluss-

folgerung dieser Arbeit war, dass es für alle untersuchten Stoffgesetze gelang, eine auf In-situ-Daten basierende Parameterbestimmung durchzuführen, diese jedoch bei mehr als zwei vorzuweisenden Freiwerten nicht eindeutig war.

Durch den Vergleich der gemessenen mit der berechneten Konvergenz hat LUX (1984) auf der Grundlage der damals zur Verfügung stehenden Daten die Güte des von ihm gewählten Berechnungskonzeptes überprüft und konnte zeigen, dass dieses auf Kavernen unterschiedlicher Betriebsarten und Teufenlagen anwendbar ist.

Mit dem Ziel der Bestimmung der In-situ-Materialeigenschaften des Salzes berichtete HUGOUT (1988) von In-situ-Tests an Kavernen in Tersanne und Etrez, Frankreich. Durch diese Tests konnte die unterschiedliche Kriechfähigkeit des Salzes der beiden Lagerstätten, die bereits im Labor bestimmt worden war, bestätigt werden.

Ein weiteres Beispiel der In-situ-Überprüfung der im Labor gemessenen Verformungseigenschaften des Salzgesteins wurde von STAUDTMEISTER und ROKAHR (1994) beschrieben. Für einen Druckentlastungstest an einer Kaverne in Torup, Dänemark, wurde die sich während einer Beobachtungsphase von vier Wochen beobachtete Konvergenzrate mit der am theoretischen Modell berechneten verglichen. Es konnte eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, wodurch die Vorgehensweise der Übertragung der Laborwerte auf In-situ-Bedingungen bestätigt werden konnte.

In jüngster Zeit werden mit dem Ziel der Planung eines Kavernenabschlusses verstärkt In-situ-Bohrloch- oder -Kavernentests als Druckaufbaustests durchgeführt. Da sich hierbei relativ geringe wirksame Beanspruchungen im umgebenden Salzgestein einstellen, die bisher im Labor nur sehr selten untersucht worden sind (CHARPENTIER, BÉREST und BLUM (1999)), muss in der Interpretation dieser Tests auch eine Bewertung des Kriechverhaltens des umgebenden Salzgesteins enthalten sein (BROUARD, BÉREST, KARIMI-JAFARI, ROKAHR, STAUDTMEISTER, ZANDER-SCHIEBENHÖFER, FOURMAINTRAUX, DE LAGUÉRIE und YOU (2006)).

Über die Ermittlung der In-situ-Festigkeit des Salzgesteins gibt es Angaben in der Literatur eher in der Form von indirekten Beobachtungen als von direkten Testergebnissen. So berichteten DENZAU, SCHARF und VON TRYLLER (1993) über eine lokal begrenzte Vergrößerung einer Kaverne, die im Zuge zweier aufeinander folgender Kavernenvermessungen

beobachtet worden war. Rückschlüsse auf die Materialfestigkeit zogen sie nur insofern, dass die Stabilität der Kavernenwand nachgewiesen sei, wenn in einer Folgemessung keine Formerweiterung festgestellt werden kann.

Die Beschreibung und Bewertung eines kombinierten Konvergenz- und Festigkeitstests an der Kaverne Kiel K101 findet sich in RÖHR (1973). Durch ein gezieltes Absenken des Solespiegels in der Zugangsbohrung wurde der Innendruck in der Kaverne so weit abgesenkt, dass sich ein Verbruch des Gebirges im Dachbereich der Kaverne einstellte, der durch eine nachfolgende Hohlraumvermessung nachgewiesen werden konnte. Aus der analytischen Ermittlung der kurzzeitig im unmittelbaren Kavernenrandbereich während des Versuchs erzielten Beanspruchung folgte RÖHR (1973) auf die maximale Gesteinsfestigkeit des Salzes, die gut mit der im Labor bestimmten Festigkeit übereinstimmt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit den bisherigen Untersuchungen des In-situ-Verhaltens von Kavernen im Salzgestein die folgenden Ziele verfolgt wurden:

- die qualitative Überprüfung der bei der Dimensionierung angewendeten Verfahren und Modelle
- die qualitative und quantitative Überprüfung des Verformungs- beziehungsweise Festigkeitsverhaltens bezogen auf den Einzelfall einer Kaverne oder bezogen auf einen aktuellen Zeitpunkt innerhalb der Betriebsgeschichte mit dem Ziel einer verbesserten Prognose des zukünftigen Verhaltens

Aus den bisherigen Untersuchungen geht nicht hervor, unter welchen Voraussetzungen eine Bestimmung des Materialverhaltens des Salzgesteins gestützt auf In-situ- und Betriebsdaten durch die verwendeten Untersuchungsmethoden im Hinblick auf die Dimensionierung einer Kaverne im Salzgestein möglich ist. Auch die Frage, ob unter bestimmten Umständen (Erweiterung oder Optimierung einer Kavernenanlage) auf die Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Salzgesteins im Labor verzichtet werden kann, wird nicht beantwortet.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Frage zu beantworten, inwieweit In-situ-Beobachtungen und -Tests dazu beitragen können, um im Sinne einer robusten Dimensionierung von Speicherkavernen zu einer verlässlichen Beschreibung der Festigkeits- und der Verformungseigenschaften des die Kavernen umgebenden Salzgesteins zu gelangen.

Zur Beantwortung dieser Frage werden In-situ-Testmöglichkeiten und indirekte Bewertungsmethoden verwendet, die bisher bekannte Vorgehensweisen aufgreifen und erweitern, um das individuelle Verhalten jeder einzelnen Kaverne eines Kavernenfeldes berücksichtigen zu können.

Im Detail wird der Frage nachgegangen, ob es erkennbare Unterschiede bei der Bewertung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Betriebsart einer Kavernenanlage gibt. Das umgebende Gebirge, der Baustoff Salzgestein, bleibt zwar das gleiche, mit der Art der Speicherung ändert sich jedoch auch die Art der Beanspruchung beziehungsweise der Grad der Beanspruchung.

Generell soll die Frage beantwortet werden, ob die indirekten Methoden der Bestimmung der Materialeigenschaften für das Salzgestein die Laboruntersuchungen ersetzen können.

### **3 Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Verhaltens von Salzgestein**

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Untersuchung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens vorgestellt.

#### **3.1 Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens von Salzgestein**

Grundsätzlich ist bei den Untersuchungsmethoden zu unterscheiden, ob die Ergebnisse dieser Tests beziehungsweise Untersuchungsmethoden eine lokale oder eine globale Aussage über das In-situ-Verformungsverhalten zulassen. Unter *lokal* wird hier ein begrenzter unmittelbar die betreffende Kaverne umgebender Gebirgsraum verstanden. Eine *globale* Aussage bezieht sich demgegenüber auf den gesamten Gebirgsbereich um ein Kavernenfeld als Ganzes.

Die *direkten Testmethoden* können anhand der bestehenden Kavernenzugangsbohrungen vorgenommen werden, unabhängig davon, ob die Kaverne bereits ausgesolt worden ist. Im Hinblick auf das zu untersuchende zeitabhängige Verformungsverhalten des umgebenden Salzgesteins werden zwei unterschiedliche Testmethoden in Bezug auf die Druckrandbedingungen für das Testsystem Bohrloch/Kaverne innerhalb des Testzeitraumes unterschieden:

- der Ausflussmengentest unter möglichst gleich bleibenden Druckbedingungen und
- der Druckaufbautest bei abgesperrtem verschlossenem Bohrloch-/Kavernenzugang.

Das In-situ-Verformungsverhalten des Gebirges wird quantitativ durch Nachberechnung des Versuchs mit Hilfe eines theoretischen Berechnungsmodells bestimmt. Die Bohrlochtests lassen lediglich eine lokal begrenzte Aussage über das Verformungsverhalten des Gebirges zu, sofern sie nicht flächendeckend für ein ganzes Kavernenfeld durchgeführt werden.

Die *indirekten Untersuchungsmethoden* basieren auf der Auswertung vorhandener Daten infolge

- der Betriebsdatenerfassung,
- der untertägigen Hohlraumvermessungen beziehungsweise

- des Nivellements der Geländeoberfläche.

Ausgehend von diesen Messdaten kann auf die zeitliche Entwicklung des untertägigen Hohlraumvolumens und damit das Konvergenzvolumen geschlossen werden. Die Quantifizierung des Verformungsverhaltens erfolgt durch eine vergleichende Berechnung der zeitlichen Entwicklung des untertägigen Hohlraumvolumens an einem theoretischen Konvergenzmodell. Durch den Vergleich der beobachteten und der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Hohlraumentwicklung werden zunächst Aussagen über das lokale Verformungsverhalten des umgebenden Salzgesteins ermöglicht. Die globale Untersuchungsmöglichkeit ergibt sich dabei durch das Zusammenfügen der Auswertungsergebnisse jeder einzelnen Kaverne eines Feldes zu einem Gesamtsystem. Bei den indirekten Untersuchungsmethoden für das In-situ-Verformungsverhalten des Salzgesteins wird unterschieden zwischen

- dem *lokalen untertägigen Vergleich* der gemessenen beziehungsweise berechneten Hohlraumentwicklung einzelner Kavernen,
- dem *integralen obertägigen Vergleich* der beobachteten Entwicklung des Setzungsmuldenvolumens für ein gesamtes Kavernenfeld sowie
- dem *differenzierten obertägigen Vergleich* der beobachteten zeitlichen Entwicklung der Setzungsmulde im Hinblick auf ihre Form und ihre Ausbreitung.

Dieser Vergleich wird jeweils mit den Ergebnissen der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten zeitlichen Entwicklung des Konvergenz- beziehungsweise Setzungsmuldenvolumens durchgeführt.

### **3.1.1 Testmethoden des lokal begrenzten Verformungsverhaltens**

Die direkten Testmethoden des In-situ-Verformungsverhaltens für das Steinsalz erfolgen über die abgeteufte Bohrung. Da die Komplettierung einer Kavernenbohrung üblicherweise aus einem verrohrten Bohrloch mit mindestens einer eingehängten Rohrtour besteht, kann ein solches Doppelrohrsystem, wie von BÉREST, BERGUES, BROUARD, DURUP und GUERBER (1999) vorgeschlagen und in Bild 3.1 dargestellt, als wirksames Kontrollsystem für Leckagen während eines Tests benutzt werden, indem gleichzeitig die Kopfdrücke des Ringraums und der eingehängten Rohrtour überwacht und gemessen werden und der Verlauf des Druckunterschieds zwischen innerer Rohrtour und dem Ringraum bewertet wird.

Dadurch wird sichergestellt, dass lediglich die zu untersuchende Salzformation getestet wird und Leckagen geortet und quantifiziert werden können.

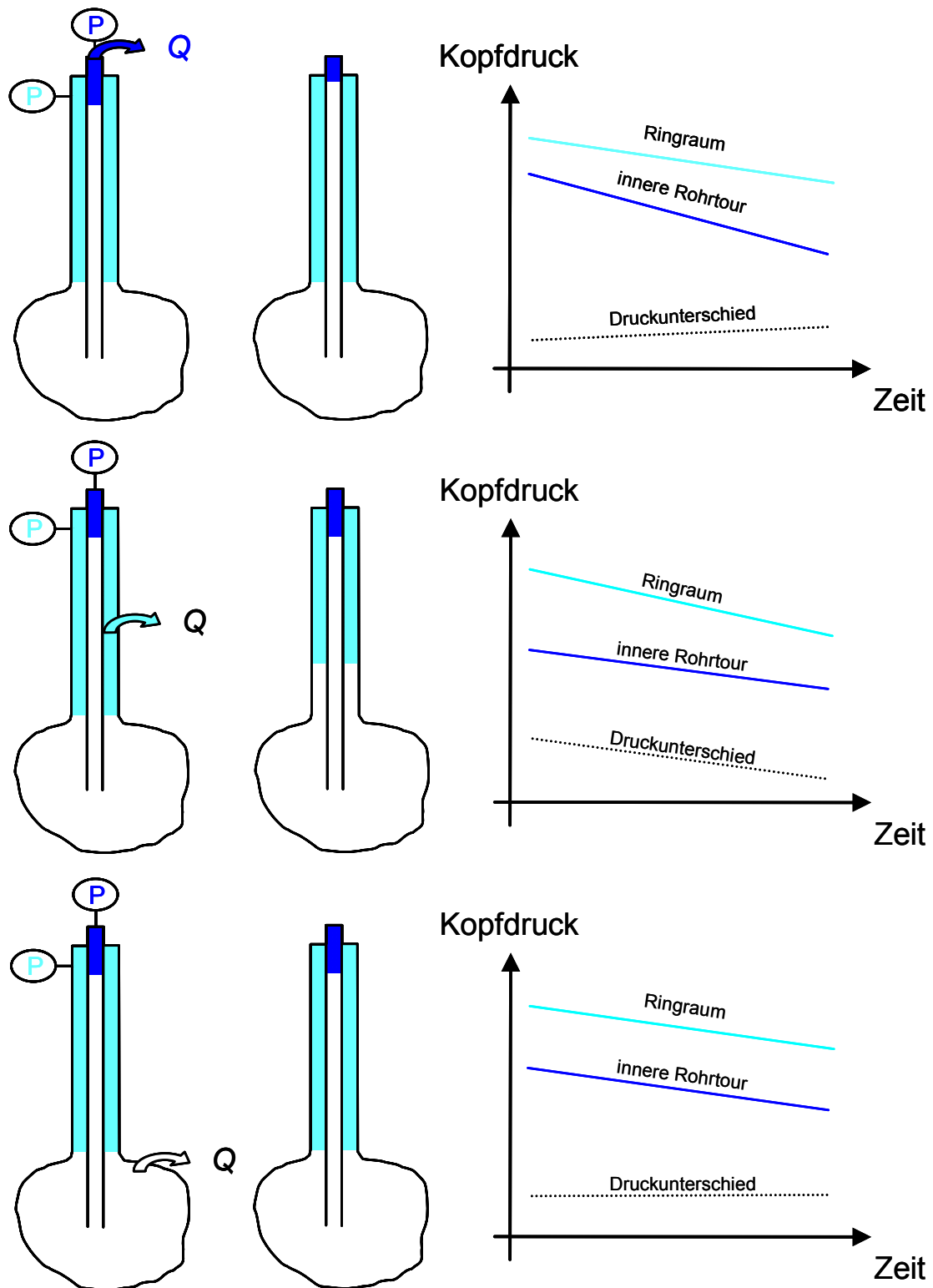


Bild 3.1: Drei unterschiedliche Arten von Flüssigkeitsverlusten in einem abgeschlossenen Kavernensystem und deren Überwachung nach BÉREST, BERGUES, BROUARD, DURUP und GUERBER (1999)



Bei einem Bohrlochtest sind möglichst stationäre Untersuchungsverhältnisse anzustreben, wenn das langzeitige Verformungsverhalten beobachtet werden soll. Da das Kriechverhalten von Salzgesteinen bei Veränderungen der Umgebungsbedingungen wie der wirksamen Beanspruchung und der Temperatur zunächst ein Übergangskriechverhalten zeigt, das kurzfristig gegenüber dem langfristig messbaren sekundären Kriechverhalten wesentlich größere Verformungsgeschwindigkeiten zur Folge hat, muss der ausgewählte Testzeitraum ausreichend lang sein. Änderungen des Bohrlochdruckes oder der Temperaturrandbedingungen vor oder während des Versuches verlängern daher den Untersuchungszeitraum.

### **3.1.1.1 Ausflussmengenmessungen an Kavernenbohrungen**

Die grundsätzliche Idee, die hinter einem Bohrlochausflussmengentest steht, ist die der Zuordnung der am geöffneten Bohrlochkopf- beziehungsweise Kavernenkopfventil über die Beobachtungszeit gemessenen Ausflussmenge je Zeitintervall zu der Konvergenz des untertägigen Hohlraumes. Die Quantifizierung der zu bestimmenden Verformungseigenschaften erfolgt durch die Nachberechnung des Tests am theoretischen Modell.

Zu den wesentlichen Testanforderungen gehört, dass der Testdruck, für den die Ausflussmengen gemessen werden, möglichst konstant gehalten werden sollte, um eine gleichbleibende Beanspruchung der zu untersuchenden Gesteinsformation zu gewährleisten. Da die Ausflussmenge neben dem wirksamen auf die jeweilige Teufe bezogenen Druck gleichfalls von den Temperaturverhältnissen sowohl in der Bohrung als auch im Gebirge und dem zur Hohlraumkonvergenz beitragenden Hohlraumvolumen selbst abhängig ist, unterscheidet sich die Auslegung eines Bohrlochtests von dem eines Kavernentests.

Die Anforderung an eine Aufrechterhaltung des Testdruckes in gleich bleibender Höhe ist für einen Ausflussmengentest an einer Kaverne schwieriger zu erfüllen als bei einem Bohrloch. Auf Grund des wesentlich größeren Hohlraumvolumens sind auch wesentlich größere Ausflussvolumina zu handhaben. In der Praxis können daher die Ausflussvolumina einer Kaverne nur schwer kontinuierlich gemessen werden, daher wird eine abschnittsweise Entlastung des Druckes vorgenommen. Gleichzeitig kommen dadurch Druckschwankungen infolge von Temperatureffekten des aus Teufen mit höheren Temperaturen des umgebenden Gebirges schnell aufsteigenden Speichergutes hinzu. Weiter muss das für die Konvergenz des Hohlraums zugrunde zu legende Ausgangshohlraumvolumen einer Kaverne den

Anteil des mit unlöslichen Bestandteilen gefüllten Kavernensumpfes beinhalten, da davon ausgegangen werden muss, dass sich die während des Solens in den Sumpf abgesunkenen unlöslichen Bestandteile nicht zu einem festen Materialblock verbunden haben, der die Hohlraumkonvergenz im Bereich des Sumpfes behindert. Dieser Anteil kann lediglich auf der Grundlage von Erfahrungen abgeschätzt werden. Das hydraulisch wirksame Volumen einer Kaverne (einschließlich Sumpf) kann jedoch durch einen Kompressibilitätstest der Kaverne vor Ort, wie von BÉREST, BROUARD, BERGUES, FRELAT und DURUP (1997) beschrieben, gemessen werden. Dabei wird, wie in Gleichung 3.1 dargestellt, die Beziehung zwischen der Druckerhöhung  $\Delta p$  und dem dazu benötigten eingepressten Volumen  $\Delta V$  gemessen und das zugehörige Kavernenvolumens  $V$ , nach Ermittlung der Kompressibilität des Gesamtsystems  $\beta$ , die sich aus den Anteilen der Kavernenkompressibilität  $\beta_c$  und der Kompressibilität des Speichergutes (hier Sole)  $\beta_b$  zusammensetzt, berechnet. Der Wert der Kavernenkompressibilität hängt dabei von der geometrischen Form der Kaverne ab. Da die Versuchszeit kurz gehalten wird und während dieser Zeit ein Druckaufbau stattfindet, kann das zeitabhängige Verformungsverhalten des Steinsalzes bei der Auswertung der Versuchsergebnisse vernachlässigt werden.

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{(\beta_c + \beta_b) \cdot V} \quad (3.1)$$

### 3.1.1.2 Druckaufbaumessungen an Kavernenbohrungen

Messungen des Druckaufbaus in einer verschlossenen Kavernenbohrung im Salz sind gegenüber den Ausflussmengenmessungen einfacher durchzuführen. Das Bohrloch beziehungsweise die Kavernenbohrung wird kopfseitig verschlossen. Infolge des Kriechverhaltens des Salzgesteins konvergiert der untertägige Hohlraum. Wegen des geschlossenen Systems führt diese Volumenverringerng in der Kaverne beziehungsweise in dem Bohrloch zum Aufbau des Druckes. Der beobachtete zeitliche Verlauf des Druckaufbaus wird mittels einer Berechnung am theoretischen Modell nachvollzogen, sodass eine quantitative Aussage über die Materialqualität des umgebenden Salzgesteins in Bezug auf das Kriechverhalten getroffen werden kann.

Die Auswertung des Druckaufbauversuches ist jedoch wegen der sich überlagernden primären und sekundären Effekte komplex. Durch den kontinuierlichen Druckaufbau verrin-

gert sich die auf die untersuchte Salzformation wirkende Beanspruchung, die gleichfalls zu einer kontinuierlichen Verminderung der Kriechverformungsrate des umgebenden Salzgesteins führt. Erschwerend für die Auswertung des Versuches kommt der Effekt des Erholungskriechens hinzu, das heißt bei einer Entlastung des Salzgesteins werden zunächst Kriechverformungen infolge des Übergangskriechens aus früheren höheren wirksamen Beanspruchungszuständen rückgängig gemacht, sodass eine unter Vernachlässigung dieses Effektes direkt aus dem beobachteten Druckaufbau rückgerechnete Hohlraumkonvergenz auf ein zu geringes Kriechvermögen des Salzes schließen lässt. Das Erholungskriechen des Salzes ist auf der Grundlage des heutigen Wissensstandes noch unzureichend erforscht. Als weiteres Phänomen muss eine allmähliche Infiltration von Testflüssigkeit (meist Sole) in den untersuchten Gebirgsbereich in Betracht gezogen werden. Dabei ist für das Salzgestein von einer spannungsabhängigen Permeabilität auszugehen, die ausgehend von einer primären Grundpermeabilität, die bei Steinsalz im Bereich der „technischen“ Dichtigkeit von  $10^{-24}$  bis  $10^{-21} \text{ m}^2$  anzusiedeln ist, um mehrere Größenordnungen ansteigen kann, je mehr sich der Testdruck dem lokalen Gebirgsdruck nähert (BÉREST, BROUARD und DE GREEF (2000), PEACH (1991), ROKAHR, HAUCK, STAUDTMEISTER, ZANDER-SCHIEBENHÖFER, CROTOGINO und ROLFS (2002), HAUCK, STAUDTMEISTER, ZANDER-SCHIEBENHÖFER (2001)).

### **3.1.2 Untersuchung des lokal begrenzten Verformungsverhaltens (Untertagevergleiche)**

Die indirekten Untersuchungsmöglichkeiten für die Bewertung des Verformungsverhaltens von Salzgestein in der Umgebung von Kavernen erfordern eine möglichst genaue Kenntnis der Entwicklung des untertägigen Hohlraumvolumens in Abhängigkeit der Betriebsgeschichte. Es werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet, die zum einen auf der Basis direkter Vermessungen und zum anderen auf einer indirekten Ermittlung des Hohlraumvolumens über die Produktionsdatenauswertung aufbauen. Beide Verfahren unterscheiden sich lediglich in der Art der Bereitstellung der Daten für die Beschreibung der Entwicklung des Hohlraumvolumens über die Zeit. Die Verformungseigenschaften der zu untersuchenden Salzformation werden in beiden Fällen, wie in Bild 3.2 schematisch gezeigt, durch den Vergleich der direkt beziehungsweise indirekt beobachteten Hohlraumentwicklung mit der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten quantitativ ermittelt.

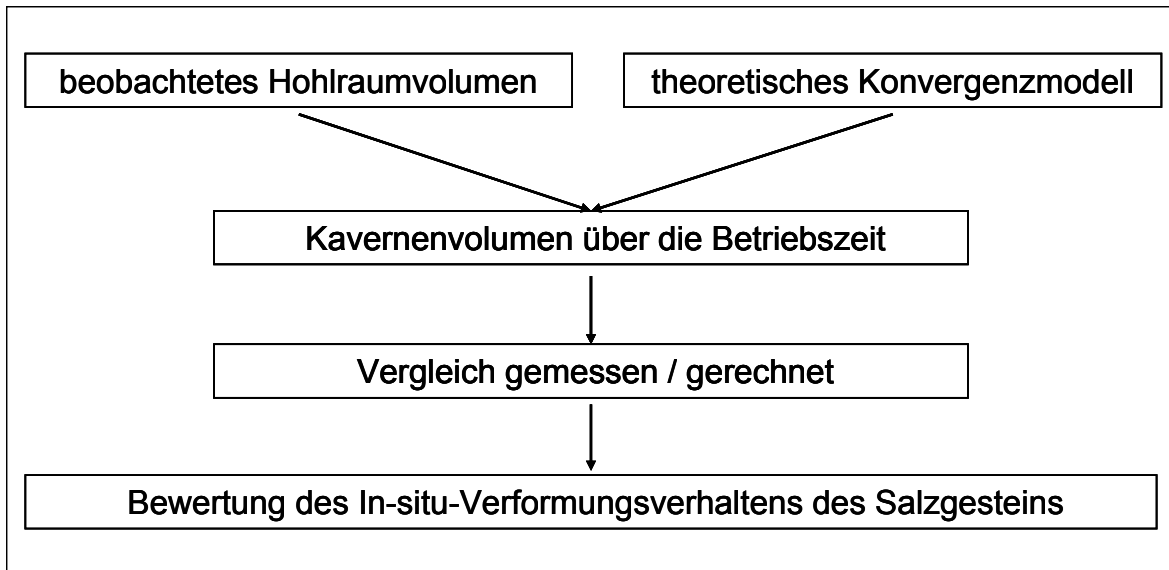


Bild 3.2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei den indirekten Methoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins in der Umgebung von Kavernen

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete theoretische Konvergenzmodell setzt sich wie in ROKAHR und STAUDTMEISTER (2003) beschrieben aus dem theoretischen Gebirgsmodell und dem theoretischen Berechnungsmodell zusammen.

Das theoretische Gebirgsmodell beschreibt alle Annahmen zur Modellbildung hinsichtlich des physikalischen Verhaltens beziehungsweise des geologischen Aufbaus der zu berücksichtigenden Gesteinsformationen und ihrer Ausgangszustände. Es werden Annahmen über den primären Spannungs- und Temperaturzustand des untersuchten Gebirgsbereiches getroffen und die grundsätzlichen mechanischen Eigenschaften festgelegt, das heißt es werden die verwendeten Stoffgesetze mit den dazu gehörenden Materialparametern angegeben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für das Steinsalz das am Institut für Unterirdisches Bauen der Leibniz Universität Hannover entwickelte zeitabhängige viskose Stoffgesetz LUBBY2 verwendet (HEUSERMANN, LUX und ROKAHR (1983) STAUDTMEISTER und STRUCK (1990)).

Im theoretischen Berechnungsmodell sind alle Annahmen hinsichtlich der geometrischen Randbedingungen des untersuchten Gebirgsausschnittes und der Kaverne (Teufenlage, Lage im Feld und Kavernenform) zusammengefasst und in Abhängigkeit des gewählten Berechnungsverfahrens in ein diskretes Berechnungsmodell umgesetzt. Außerdem werden die betriebsbedingten Einwirkungen beschrieben (Kaverneninnendruck über die Zeit, Kaverneninnentemperatur).

Durch die Wahl eines geeigneten *Berechnungsverfahrens*, im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode der finiten Elemente (FEM) (beschrieben zum Beispiel von ZIENKIEWICZ und TAYLOR (1991)) gekoppelt mit einer dem Betrieb der Kaverne angepassten tabellarischen Berechnung angewendet, kann durch numerische Berechnungen der zeitliche Verlauf der Hohlraumkonvergenz simuliert werden, der für die vergleichenden Untersuchungsmethoden benötigt wird. Analytische Berechnungsverfahren, wie zum Beispiel bei HARTMANN (1984) beschrieben, kommen hier nicht zur Anwendung, da sie die komplexen Modellrandbedingungen nicht genügend genau wiedergeben. Neben der Methode der finiten Elemente ist die Methode der finiten Differenzen (FDM) (beschrieben zum Beispiel von AXELSSON (2004)) in gleicher Weise zur Berechnung der Zustandsbedingungen des Gebirges in der Umgebung von Kavernen im Salzgestein geeignet.

Innerhalb eines iterativen Prozesses gelangt man durch die schrittweise Anpassung der Materialeigenschaften für das Salzgestein im theoretischen Konvergenzmodell zur Quantifizierung des In-situ-Verformungsverhaltens der zu untersuchenden Salzformation, in dem der Unterschied des am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Verlustes des Hohlraumvolumens zu dem in situ beobachteten minimiert wird. Befindet sich mehr als eine Kaverne in der zu untersuchenden Salzformation und soll eine globale Aussage des Verformungsverhaltens gemacht werden, so sind entweder alle Kavernen in einem Gesamtmodell zu erfassen oder, wie im Rahmen dieser Arbeit bevorzugt, jede Kaverne des Feldes in einem gesonderten Berechnungsmodell, damit ihrer individuellen Randbedingungen und Einwirkungen (Geologie, Geometrie, Lage, Betriebsgeschichte) Rechnung getragen werden kann.

### **3.1.2.1 Vergleich berechneter und gemessener Volumenkonvergenzen über eine beobachtete Betriebsgeschichte (Untertagevergleich – Vermessung)**

Aufgrund gesetzlicher Auflagen müssen untertägige Hohlräume wie Kavernen im Salzgestein in regelmäßigen Abständen vermessen werden. Dadurch ergeben sich im Verlauf der Betriebsgeschichte einer Kaverne Eckdaten der Hohlraumentwicklung. In der Regel kommen für derartige Vermessungen Sonarvermessungen, in Ausnahmefällen (luftgefüllte Kaverne) auch Laservermessungen zur Anwendung. Das durch diese Verfahren vermessene Hohlraumvolumen erfasst den für die Messsonde zugänglichen Teil des Hohlraum unter

Tage. Der während des Solens mit unlöslichen Bestandteilen angefüllte Kavernensumpf bleibt unberücksichtigt.

Für die am theoretischen Konvergenzmodell zu ermittelnde Entwicklung des Hohlraumvolumens zwischen zwei Vermessungszeitpunkten müssen Betriebsdaten in Form von Kopfdrücken der Kaverne vorliegen, aus denen sich die auf die jeweilige Teufe bezogenen Innendruckdaten der Kaverne über die Betriebszeit ableiten lassen. Die Charakteristik der Betriebsgeschichte einer Kaverne kann einen erheblichen Einfluss auf die am Modell ermittelte Konvergenz haben. Wird die Kaverne wie zum Beispiel bei Ölspeichern über lange Zeiträume bei annähernd gleichbleibendem Innendruck gefahren, so haben die Verformungsanteile aus dem Übergangskriechen nur einen vernachlässigbaren Anteil an der Gesamtverformung. Bei Gasspeicherkavernen mit unregelmäßigen und schnellen Innendruckwechseln ist der Einfluss infolge des Übergangskriechens kurzfristig stärker. Im Rahmen dieser Arbeit werden jedoch lediglich Speicherkavernen mit in Bezug auf den Beobachtungszeitraum langfristig ausgeglichenen Speicherzyklen untersucht, sodass Einflüsse des primären Kriechens vernachlässigt werden können. Demgegenüber kann der Anteil an der Gebirgsverformung infolge des Übergangskriechens, der durch die Solung der Kaverne hervorgerufen wird, nicht vernachlässigt werden. Dieser Einfluss wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen mit dem theoretischen Konvergenzmodell einmalig am Ende der Solphase einer Kaverne abgeschätzt.

Da das hier verwendete theoretische Konvergenzmodell nicht aus einem vollständigen räumlichen Modell für die gesamte Kavernenanlage beruht, sondern die einzelnen Kavernen eines Feldes durch jeweils separate rotationssymmetrische Berechnungsmodelle berücksichtigt werden, müssen die ermittelten Konvergenzwerte im Hinblick auf ihre Anordnung beziehungsweise Lage der betrachteten Kaverne innerhalb des Kavernenfeldes bewertet werden. Des Weiteren können sich innerhalb der zeitlichen Entwicklung einer Kavernenanlage die Umgebungsbedingungen einer Kaverne von denen einer Einzelkaverne zu denen einer Feldkaverne mit mehreren Nachbarn ändern. Daher ist die Entwicklungsgeschichte des gesamten Feldes innerhalb des theoretischen Konvergenzmodells mit einzubeziehen.

Die Genauigkeit der Hohlraumvermessungen spielt bei der quantitativen Ermittlung der Verformungseigenschaften eine wichtige Rolle. Die Firma Socon Sonar Control Kaver-

nenvermessung GmbH, Giesen, REITZE (2004), gibt für ihre Kavernenvermessungen ein Genauigkeitsband von  $\pm 2\%$  bezogen auf das vermessene Gesamtvolumen an. Bei in Norddeutschland realisierten Kavernenvolumina von bis zu 1,1 Millionen  $\text{m}^3$  ergibt sich daraus eine Fehlerbandbreite von bis zu 44.000  $\text{m}^3$ .

Die indirekte Untersuchungsmethode mittels des untertägigen Vergleichs der Entwicklung des Hohlraumvolumens muss sich nicht auf die Ergebnisse von Vollvermessungen im Rahmen der gesetzlichen vorgeschriebenen Zeitpunkte beschränken. Durch gezielte Zusatzvermessungen, bei denen gleichzeitig der Messaufwand erhöht wird, lassen sich für definierte Kavernenabschnitte auch feiner aufgelöste Vermessungen durchführen, sodass für eine Innendruckabsenkung über einen befristeten Zeitraum mit einer vorausgehenden und einer abschließenden hochauflösenden Bereichsvermessung eine Bewertung der In-situ-Verformungseigenschaften des Salzgesteins in der näheren Umgebung der Kaverne vorgenommen werden kann. Innerhalb des dafür angewendeten theoretischen Konvergenzmodells muss auf jeden Fall das Übergangskriechverhalten des Steinsalzes berücksichtigt werden.

### **3.1.2.2 Produktionsdatenauswertung (Untertagevergleich – Produktion)**

Bei Kavernen, die für die Solegewinnung betrieben werden, ergibt sich eine von den Hohlraumvermessungen unabhängige Methode, um die zeitliche Entwicklung des Hohlraumvolumens und des Konvergenzvolumens zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verfahren nach OLDENZIEL und ZANDER-SCHIEBENHÖFER (2000) beziehungsweise STAUDTMEISTER und ZANDER-SCHIEBENHÖFER (1998) verwendet, das im Gegensatz zu der von VAN EIJS, PÖTTGENS, BREUNESE und DUQUESNOY (2000) beschriebenen Vorgehensweise den Vorteil hat, dass die Konvergenz des Hohlraums allein auf der Grundlage der Produktionsdaten ermittelt wird und somit ein in sich geschlossenes Verfahren darstellt. Nachfolgend wird das angewandte Verfahren beschrieben:

Sofern die Betriebsdatenerfassung eines Solegewinnungsbetriebes Angaben über

- das Volumen des injizierten Frischwassers,
- die über Tage geförderte Masse des Salz,
- den Masseanteil des gelösten Salzes in der geförderten Sole und
- die Dichte der geförderten Sole

beinhaltet und darüber hinaus verlässliche Annahmen über die

- die Dichte des Salzes in situ,
- die Dichte des eingepressten Wassers und
- den Masseanteil des Wassers in der geförderten Sole

vorliegen, kann die zeitliche Entwicklung des gesolten untertägigen Hohlraumes auf der Grundlage einer Massenbilanz aus den Anteilen

- der Masse des theoretisch unter Tage gewinnbaren Salzes,
- der Masse des infolge Konvergenz des Hohlraumes herausgedrückten Salzes und
- der Masse des über Tage geförderten Salzes

ermittelt werden (siehe Gleichung 3.2).

$$m_{\text{Salz}}^{\text{gefördert}} = m_{\text{Salz}}^{\text{theoretisch gewinnbar}} + m_{\text{Salz}}^{\text{gefördert durch Konvergenz}} \quad (3.2)$$

mit

$m_{\text{Salz}}^{\text{gefördert}}$  Masse des Salzes, das über Tage aus der Kavernenbohrung gewonnen wird

$m_{\text{Salz}}^{\text{theoretisch gewinnbar}}$  Masse des Salzes, das theoretisch durch das eingepresste Frischwasser unter Tage gelöst werden kann

$m_{\text{Salz}}^{\text{gefördert durch Konvergenz}}$  Masse des Salzes, das infolge der Konvergenz des Hohlraumes als Folge des Kriechvermögens des Salzgesteins ausgepresst wird

Das infolge der Konvergenz ausgepresste Solevolumen kann nach Gleichung 3.3 aus dem Verhältnis der Masse des Salzes in der gewonnenen Sole zur Soledichte multipliziert mit einem Vorfaktor, der den Sättigungsgrad der geförderten Sole in Bezug auf die enthaltende Masse des Wassers und des Salzes beschreibt, berechnet werden.

$$\Delta V^C = \left( \frac{c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{Sole}}}{c_{\text{Salz}}^{\text{Sole}}} + 1 \right) \cdot \frac{m_{\text{Salz}}^{\text{gefördert durch Konvergenz}}}{\rho_{\text{Sole}}} \quad (3.3)$$

mit



$\Delta V^C$	Hohlraumkonvergenz der Kaverne infolge der Kriechfähigkeit des umgebenden Salzgesteins
$c_{H_2O}^{Sole}$	Masseanteil des Wassers in der gewonnenen Sole
$c_{Salz}^{Sole}$	Masseanteil des Salzes in der gewonnenen Sole
$\rho_{Sole}$	Dichte der Sole

Durch Einsetzen der Massenbilanzgleichung 3.2 in die Beschreibung des infolge Konvergenz ausgepressten Volumens nach Gleichung 3.3 kann das Konvergenzvolumen direkt aus den Betriebsdaten berechnet werden.

$$\Delta V^C = \left( \frac{c_{H_2O}^{Sole}}{c_{Salz}^{Sole}} + 1 \right) \cdot \frac{m_{Salz}^{gefördert} - m_{Salz}^{theoretisch\ gewinnbar}}{\rho_{Sole}} \quad (3.4)$$

Die Masse des gewonnenen Salzes ist dabei ein direkter Messwert, der aus den Betriebsdaten hervorgeht. Die Masse des theoretisch gewinnbaren Salzes  $m_{Salz}^{theoretisch\ gewinnbar}$  kann nach Gleichung 3.5 berechnet werden.

$$m_{Salz}^{theoretisch\ gewinnbar} = \rho_{H_2O} \cdot \frac{c_{H_2O}^{Sole}}{c_{Salz}^{Sole}} \cdot V_{H_2O}^{injiziert} \cdot \left( 1 - \frac{c_{Salz}^{Sole}}{\rho_{Salz}} \right) \quad (3.5)$$

mit

$V_{H_2O}^{injiziert}$	Volumen des eingepressten Frischwassers
$c_{H_2O}^{Sole}$	Masseanteil des Wassers in der gewonnenen Sole
$c_{Salz}^{Sole}$	Masseanteil des Salzes in der gewonnenen Sole
$\rho_{H_2O}$	Dichte des Wassers
$\rho_{Salz}$	Dichte des Salzes

Das In-situ-Verformungsverhalten des Salzgesteins wird durch vergleichende Berechnungen am theoretischen Konvergenzmodell quantifiziert, wobei die auf der Basis der Produktionsdaten nach Gleichung 3.4 ermittelte Hohlraumkonvergenz des gesamten Feldes mit dem am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten Wert verglichen wird.

### 3.1.3 Untersuchung des globalen Verformungsverhaltens

#### (Vergleich unter Tage / über Tage)

Innerhalb einer Salzlagerstätte können die Materialeigenschaften trotz der verglichen mit anderen Gesteinen relativ großen Homogenität der Salzgesteine stark streuen. Daher kann es für die Beurteilung des Tragverhaltens des Salzgesteins in der Umgebung einer Kavernenanlage von Bedeutung sein, das globale Verformungsverhalten der gesamten Salzformation und die Veränderung der Verformungseigenschaften des Salzgesteins innerhalb des Konzessionsgebietes zu beschreiben.

Eine nahe liegende Möglichkeit der integralen und der spezifischen Beschreibung innerhalb des Einflussgebietes einer Kavernenanlage ergibt sich durch eine Vervielfachung der bereits beschriebenen lokalen direkten Test- beziehungsweise indirekten lokalen Untersuchungsmethoden, bis letztlich alle Kavernenbohrungen einbezogen sind. Im Folgenden soll eine davon abweichende Möglichkeit vorgestellt werden, die durch den Vergleich des über Tage beobachteten Volumens des Setzungstrogens mit dem unter Tage erzeugten Konvergenzvolumen der Kavernen erhalten wird. Unter Verwendung der Messdaten des Oberflächennivellements über einer Kavernenanlage kann dann sowohl auf das globale integrale Verformungsverhalten der gesamten Salzformation im Bereich der Kavernen geschlossen werden als auch auf eine mögliche relative Veränderung dieser Verformungseigenschaften verteilt über den Grundriss der zu untersuchenden Salzformation.

Für die Übertragung des untertägigen Konvergenzvolumens bis hin zur Tagesoberfläche muss eine Hypothese aufgestellt werden, die beschreibt, wie die untertägigen Verformungen, die zur Hohlraumkonvergenz führen, durch die Salzformation und über die darüberliegenden Deckgebirgsschichten an die Tagesoberfläche weitergeleitet werden.

Im Hinblick auf Kavernenanlagen, die in weiträumigen sich über mehrere Kilometer erstreckenden Salzstöcken angelegt sind, herrscht auf der Grundlage der Messungen an der Tagesoberfläche zum gegenwärtigen Zeitpunkt relative Einigkeit darüber, dass die untertägig erzeugten Hohlraumkonvergenzen nahezu unvermindert bis zur Tagesoberfläche weitergeleitet werden. Die Beobachtungen sprechen dafür, dass es keine wesentlichen Auflockerungen in den über einer Kaverne liegenden Gebirgsschichten gibt. Dabei beträgt die zeitliche Verzögerung zwischen Konvergenzentstehung unter Tage und dem Auftreten der

Setzung an der Tagesoberfläche nur wenige Monate. Eine genauere Eingrenzung des zeitlichen Verzuges ist auf Grund der meist jährlichen Messkampagnen gegenwärtig nicht möglich (REITZE (2004)).

Für Kavernen im Schichtensalz ist die Annahme der Übertragung der untertägigen Verformungen infolge Konvergenz zu den Bodensenkungen der Tagesoberfläche in erster Linie von dem Zustand der Kavernen abhängig. Sofern das Deckgebirge angesolt wird, kann es neben der erhöhten mechanischen Beanspruchung zur Destabilisierung dieser Gebirgsschichten durch den Kontakt mit Sole kommen. Mögliche physikalisch-chemische Effekte, die bei Kontakt mit Sole zu einer Schwächung des Deckgebirges führen können, haben BEKENDAM, OLDENZIEL und PAAR (2000) für das Kavernenfeld Hengelo in den Niederlanden für den Fall der Übersolung einer Kaverne untersucht. Dazu zählen sie das Schwellen der Formation infolge Wasseraufnahme, den Zerfall des Aggregatzustandes („Slaking“) infolge eines hohen Druckes der in den Poren eingeschlossenen Luft, zum Beispiel bei Tonstein, die allgemeine Reduzierung der Festigkeit infolge des Kontakts mit Sole und die chemische Lösung in Wasser, zum Beispiel im Falle des Anhydrits. Das sukzessive Versagen der Deckgebirgsschichten führt zu schlotartig ausgeprägten Verbrüchen, die sich dann als Tagbrüche an der Geländeoberfläche zeigen, wenn sich die Teufenlage der Kaverne gegenüber dem Auflockerungsgrad des Deckgebirges während des Verbruchvorgangs als zu gering erweist.

Sofern eine Destabilisierung des Deckgebirges verhindert wird, kann bei Kavernen im Schichtensalz von einer gleichförmigen Übertragung des untertägigen Hohlraumvolumenverlustes zur Geländeoberfläche ausgegangen werden, das heißt, es wird sich kein Verbruch ausbilden (OLDENZIEL, PAAR und BEKENDAM (2000)).

### **3.1.3.1 Globaler Vergleich des obertägig gemessenen Setzungsmuldenvolumens mit dem untertägig berechneten Konvergenzvolumen**

Die integrale Methode der Beschreibung des globalen Verformungsverhaltens des Salzgesteins erfordert die Berechnung des Gesamtvolumens des Senkungstrogens, wenn möglich fortschreitend mit der Zeit des Betriebes der Kavernenanlage. Dieses ermittelte Gesamtvolumen auf der Grundlage der gemessenen Oberflächensenkungen wird dem am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten akkumulierten Konvergenzvolumen aller Kavernen

des Feldes gegenübergestellt. Durch Anpassung der Materialeigenschaften im theoretischen Konvergenzmodell können die Verformungseigenschaften des Salzgesteins bestimmt werden.

Bei der Ermittlung des Setzungsmuldenvolumens kommt der Bestimmung der Lage der Nulllinie der Setzungen, außerhalb derer keine Bodensetzungen infolge des Kavernenbetriebes mehr beobachtet werden, eine entscheidende Bedeutung zu (BREUNESE, VAN EIJS, DE MEER und KROON (2003), REITZE (2004)). Diese Lage der „Setzungsnulllinie“ kann oft nur unter Hinzuziehung der langjährigen Erfahrungen des Markscheiders gekoppelt mit einer sorgfältigen Analyse der Qualität der Messpunkte des zugrunde liegenden Vermessungsnetzes festgelegt werden. Im Folgenden werden die besonderen Umstände bei der Bestimmung der Setzungsnulllinie kurz beschrieben.

- Die Messpunktdichte ist in den Randbereichen der Setzungsmulde im Allgemeinen geringer als über dem Zentrum der Kavernenanlage. Es wird jedoch beobachtet, dass sich die Nulllinie der Setzungen mit den Jahren des Kavernenbetriebes weiter nach außen verlagert (REITZE (2004)). Daher muss sichergestellt sein, dass das Vermessungsnetz entsprechend weiträumig angelegt ist.
- An den Rändern laufen die über Kavernenanlagen beobachteten Setzungsmulden sehr flach aus. Daher ist es trotz der erzielbaren Messgenauigkeiten schwierig, den genauen Rand allein aus den Messwerten festzulegen. Weiter kommt hinzu, dass die Kavernen in der Regel in großen Teufen angelegt sind (der Kavernensumpf liegt oft in einer Teufe von mehr als 1 km) und bei der Ausbreitung der untertägigen Hohlraumdeformationen bis zur Geländeoberfläche von einem Grenzwinkel zwischen  $25^\circ$  und  $45^\circ$  gegenüber der Horizontalen ausgegangen werden muss. Daraus resultieren Setzungsmulden an der Geländeoberfläche von oft mehreren Quadratkilometern Grundfläche, was eine entsprechende Dichte von Messpunkten in den Außenbereichen des zu erwartenden Setzungstroges erfordert, um die genaue Lage der Setzungsnulllinie bestimmen zu können. Eine Fehleinschätzung der Lage der Setzungsnulllinie kann den Wert des zu ermittelnden Gesamtvolumens des Setzungstroges stark beeinflussen, da das anteilige Setzungsvolumen des Außenbereiches des Setzungstroges zwar auf der Grundlage kleiner Setzungsbeträge, jedoch durch Integration dieser kleinen Werte über eine relativ große Fläche berechnet wird.

Sofern die Lage der Setzungsnulllinie bestimmt worden ist und die Messdaten von nicht kavernenbedingten Setzungsbeträgen bereinigt worden ist, lässt sich für den Zeitpunkt der Messkampagne das Volumen des Setzungstrogens im Vergleich zur Referenzmessung (Nullmessung) ermitteln.

Das Setzungsmuldenvolumen wird rechnerisch aus der Addition der Teilvolumina zwischen zwei Isokatabasen ermittelt. Da diese Teilvolumina durch Multiplikation der Grundfläche einer Isokatabase mit ihrer relativen Höhe zu den benachbarten Isokatabasen berechnet werden, ist die Genauigkeit der Ermittlung des gesamten Setzungsmuldenvolumens projektspezifisch und hängt von der gewählten Inkrementierung der Isokatabasen ab. Die Firma Socon Sonar Control Kavernenvermessung, Giesen, schätzt den Fehler auf  $\pm 5\%$  des Gesamtvolumens (REITZE (2004)).

Das auf der Grundlage von Vermessungsdaten ermittelte Volumen der Setzungsmulde wird mit dem am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Konvergenzvolumen der Kavernen verglichen, das bei einer direkten Übertragung bis zur Geländeoberfläche ohne Auflockerung der überlagernden Gebirgsschichten dem theoretischen Setzungsmuldenvolumen gleichgesetzt wird. Liegen mehrere aufeinander folgende Messkampagnen des Oberflächennivellements vor, kann der zeitliche Verlauf der Setzungsmulde mit in die Bewertung einbezogen werden. Durch schrittweise Anpassung der angenommenen Materialparameter für das Verformungsverhalten des Salzgesteins im theoretischen Konvergenzmodell bis zu dem Punkt, in dem die berechnete untertägige Hohlraumkonvergenz dem gemessenen Setzungsvolumen an der Geländeoberfläche entspricht, kann die Quantifizierung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins vorgenommen werden.

### **3.1.3.2 Differenzierter globaler Vergleich des obertägig gemessenen Setzungsmuldenvolumens mit dem untertägig berechneten Konvergenzvolumen**

Für die nach der Methode des globalen und integralen Vergleichs der untertägig eingetretenen Hohlraumvolumenverluste mit dem an der Geländeoberfläche ermittelten Volumen des Setzungstrogens spielt allein das Volumen und nicht die Form des von jeder einzelnen Kaverne hervorgerufenen Setzungstrogens eine Rolle, da lediglich der zeitliche Verlauf des Gesamtvolumens untersucht wird. Soll dagegen eine Bewertung des Verformungsverhal-

tens des Salzgesteins über den Grundriss der Salzformation vorgenommen werden, so muss eine Annahme über die Form des Setzungstrogens, der durch jede einzelne Kaverne hervorgerufen wird, sowie die Überlagerungsvorschrift aller dieser Setzungsmulden eines Kavernenfeldes vorgenommen werden.

Grundsätzliche Verfahren der Berechnung und Prognose von Bodensenkungen infolge bergbaulicher Nutzung, den zugrunde liegenden Mechanismen und die Form der sich daraufhin an der Geländeoberfläche einstellenden Senkungsmulden sind bei KRATSCH (1983) beschrieben. Spezielle Ansätze für die Ermittlung von Setzungen über Kavernenanlagen im Salzgestein finden sich bei HAUPT, SROKA und SCHOBER (1983), SROKA und SCHOBER (1982), SCHOBER und SROKA (1983) sowie SCHOBER (1982). Nach SROKA und SCHOBER (1982) können Oberflächensetzungen über einer Kavernenanlage durch Gleichung 3.6 ermittelt werden. Darin wird das Übertragungsverhalten einer Volumenverringerung  $dV$  eines untertägigen Hohlraums bis zur Geländeoberfläche in Form einer Setzung  $dS$  über eine Verteilungs- oder Gewichtsfunktion  $f(x,y,z)$  unter Einbeziehung eines Auflockerungsfaktors  $a$  beschrieben. Eine grundlegende Darstellung des Zusammenhanges der Bewegung des Hohlraumes mit den Bewegungen des Bodens an der Geländeoberfläche über Kavernenanlagen wird von WALTHER und WEBER (1978) gegeben.

$$dS = a \cdot f(x, y, z) dV \quad (3.6)$$

Bei Annahme eines rotationssymmetrischen Setzungstrogens kann Gleichung 3.6 nach EICKEMEIER (2005) in Gleichung 3.7 überführt werden, wobei nun die diskrete Setzung zum Zeitpunkt  $t$  in der Entfernung  $r$  von der Kavernenachse in Abhängigkeit des untertägig erzeugten Konvergenzvolumens  $V_C(t)$  formuliert ist. Durch die Wahl einer Einheitsformfunktion für  $f(r)$  wird das Konvergenzvolumen direkt in Form eines Multiplikators der Werte der Einheitsformfunktion an die Geländeoberfläche übertragen. Der Auflockerungsfaktor  $a$  beschreibt weiterhin den Grad der Übertragung des Konvergenzvolumens an die Geländeoberfläche. Ein Wert von  $a < 1$  entspricht dabei einer Auflockerung des Gebirges während des Setzungsvorganges.

$$s(r, t) = a \cdot f(r, t) \cdot V_C(t) \quad (3.7)$$

Für die Wahl der Einheitsformfunktion der Bodensenkungen wird in der Literatur meist die rotationssymmetrische Form der Normalverteilung nach GAUSS vorgeschlagen (SROKA und SCHÖBER (1982), REITZE (2000)). Projektspezifisch werden auch andere Funktionen benutzt (FOKKER, STEENEKEN und KRUSE (2000)). EICKEMEIER (2005) hat, wie in Gleichung 3.8 beschrieben, durch eine Erweiterung des Ansatzes nach SROKA und SCHÖBER (1982) unterschiedliche Profile dieser GAUSS'schen Einheitsformfunktion in einer Funktion vereint.

$$f(r) = \frac{\psi \cdot \delta}{2\pi^{(1-\frac{2}{\delta})} R^2 \Gamma(\frac{2}{\delta})} \cdot e^{\left(-\pi\psi^2 \left(\frac{r}{R}\right)^\delta\right)} \quad (3.8)$$

Während der Parameter  $\psi$  zeitliche Verzögerungseffekte bei der Weiterleitung des Konvergenzvolumens zur Geländeoberfläche angibt, kann über  $\delta$  das Profil der Einheitsformfunktion verändert werden. Die Gammafunktion  $\Gamma$  (siehe zum Beispiel BRONSTEIN und SEMENDJAJEW (1976)) wird benötigt, um die Bedingung aufrechtzuerhalten, dass das Volumen unter der Formfunktion insgesamt auf den Wert von 1 normiert bleibt. Der Parameter  $r$  transformiert den Ort der Setzung in das rotationssymmetrische Koordinatensystem als Entfernung vom Projektionspunkt der Kavernenachse an der Geländeoberfläche nach Gleichung 3.9, während der Parameter  $R$  nach Gleichung 3.10 die maximale Ausdehnung des Setzungstrog an der Geländeoberfläche in Abhängigkeit der Kavernenhöhe und Lage sowie des Grenzwinkels  $\beta$  der Ausbreitung der Kavernenkonvergenz gegenüber der Horizontalen beschreibt.

$$r = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (3.9)$$

mit

$x_k, y_k$  auf die Geländeoberfläche projizierte Koordinaten der Kavernenachse

$$R = \frac{\sqrt{z_u \cdot z_o}}{\tan \beta} \quad (3.10)$$

mit

- $z_u$       Tiefe des Kavernentiefsten
- $z_o$       Tiefe des Kavernendaches
- $\beta$         Grenzwinkel der Ausbreitung der Kavernenkonvergenz

Im Rahmen dieser Arbeit wird der von SROKA und SCHOBER (1982) vorgeschlagene Ansatz der GAUSS'schen Normalverteilung nach Gleichung 3.11 verwendet, der erhalten wird, wenn in Gleichung 3.8 der Formparameter  $\delta=2$  und der Zeitparameter  $\psi=1$  gesetzt wird.

$$f(r) = \frac{1}{R^2} \cdot e^{\left(-\pi\left(\frac{r}{R}\right)^2\right)} \quad (3.11)$$

Die Überlagerung der Setzungsbeträge infolge der Konvergenz mehrerer Kavernen wird durch Superposition der Einzelbeträge vorgenommen. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde bisher nicht bewiesen, sie wird jedoch sowohl von KRATSCH (1983) als auch von SROKA und SCHOBER (1982) als vernünftig bezeichnet.

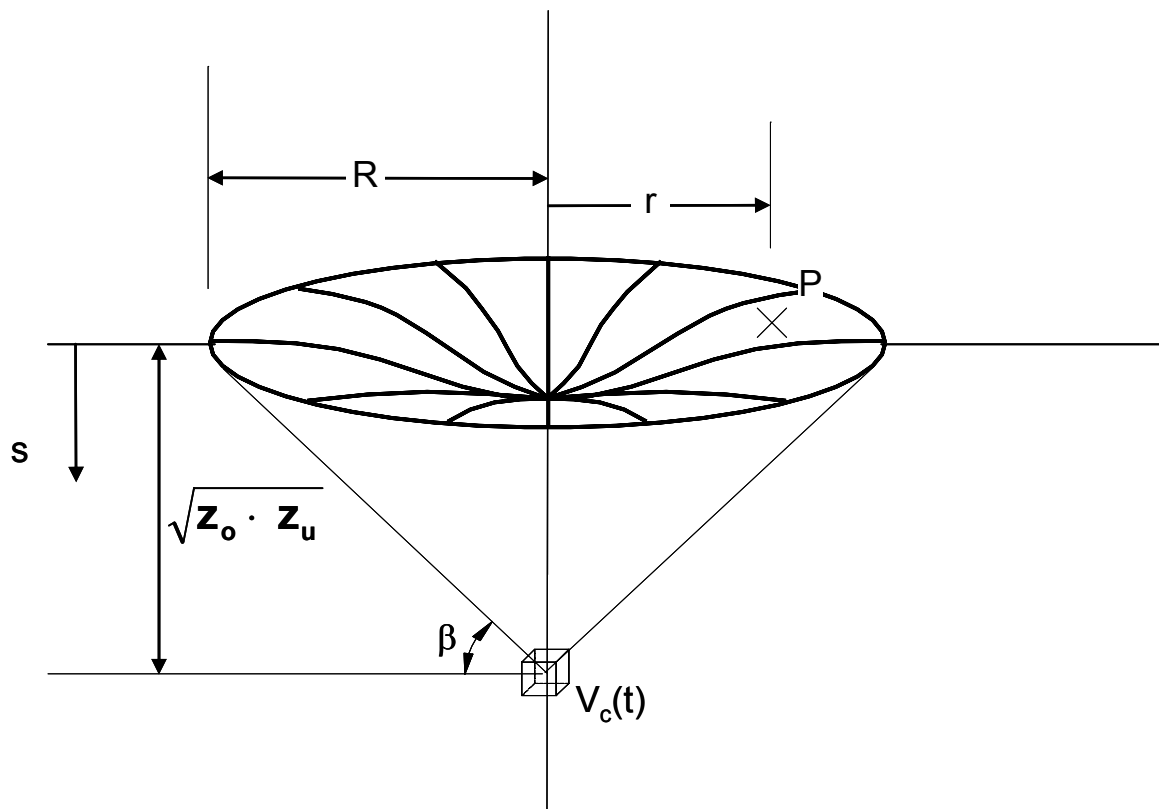


Bild 3.3: Einheitssetzungstrog verursacht durch eine Volumenänderung  $V_c(t)$  aus NEUHAUS (1976)



Zusammenfassend hebt REITZE (2000) vier grundlegende Annahmen der oben beschriebenen Methoden zur Beschreibung der Bodensenkungen über Kavernenanlagen hervor:

- die Annahme eines Grenzwinkels der Ausbreitung der Hohlraumkonvergenz,
- die Annahme der Rotationssymmetrie der Gebirgsbewegungen,
- die Annahme der Superposition der Setzungen,
- die Annahme der Volumenkonstanz während des Setzungsvorganges.

Eine Darstellung der Freiwerte zur Beschreibung der Setzungsmulde über Kavernen unter Verwendung von Einflussfunktionen ist in Anlehnung an BALS zitiert bei NEUHAUS (1976) in Bild 3.3 dargestellt.

Mit den beschriebenen Ansätzen der Weiterleitung der untertägigen Hohlraumkonvergenz bis zur Geländeoberfläche mit Ausprägung einer Setzungsmulde und durch Anwendung des Superpositionsprinzips der Einzelsetzungsmulden kann die Auswirkung der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Konvergenzvolumina der Kavernen als diskrete Bodensenkung der Geländeoberfläche in Abhängigkeit des Ortes in ihrer zeitlichen Entwicklung umgerechnet werden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einer erweiterten differenzierten Bewertung des Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins. Durch den Vergleich der real gemessenen Bodensenkungswerte in den Messpunkten des Nivellements mit den auf diese Punkte umgerechneten Werten der Bodensenkungen infolge des theoretischen Konvergenzmodells kann auch auf eine im Grundriss über den Salzstock unterschiedliche Verteilung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins geschlossen werden. Des Weiteren können eventuelle zeitliche Effekte, wie das Ausbreiten der Setzungsmulde, bei der Bestimmung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins mit berücksichtigt werden.

### **3.2 Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Festigkeitsverhaltens von Salzgestein**

Die In-situ-Festigkeitsversuche lassen sich nur als lokale Tests durchführen. Sie werden im Allgemeinen zum Nachweis der Stabilität der Bohrloch- beziehungsweise Kavernenkontur durchgeführt. Es wird dabei untersucht, ob das Salzgestein im unmittelbaren Randbereich zum Hohlraum einer angestrebten Beanspruchungssituation zum Beispiel unter Minimaldruckbedingungen über eine begrenzte festgelegte Beobachtungsdauer ohne Schaden

standhält. Bei einem derartigen Versuch kann nicht direkt auf die Festigkeit des Salzgesteins geschlossen werden, da erst im Nachhinein zum Beispiel durch eine Hohlraumvermessung ein Versagensbereich nachgewiesen werden kann. Die genaue zeitliche Zuordnung des Versagens und damit die Korrelation mit der zu jenem Zeitpunkt aufgetretenen Beanspruchung ist allenfalls über ein gleichzeitig durchgeführtes seismisches Messprogramm mit Geophonen möglich.

Zur Durchführung eines derartigen Versuches gehören mindestens zwei Vermessungen des Hohlraums, jeweils eine vor und eine nach dem Versuch. Um die Genauigkeit zu erhöhen, können Präzisionsvermessungen durchgeführt werden, die vor dem Hintergrund des erhöhten Aufwandes auf einen Teil des Teufenbereiches des Hohlraums konzentriert werden. Während des Versuches müssen die Kopfdrücke protokolliert werden. Sofern während des Versuches Speichervorgänge ablaufen, sollten auch die Temperaturwerte des Speichergutes erfasst werden. Aus diesen Daten lässt sich dann in einer theoretischen Nachanalyse auf die aufgetretene Materialbeanspruchung des Salzgesteins und somit auf die In-situ-Festigkeit schließen.

#### 4 Untersuchungsbeispiele

Anhand von fünf Beispielen, einer Kavernenbohrung und vier Kavernenanlagen, wird untersucht, wie auf der Grundlage von In-situ-Daten mit den vorgestellten Methoden auf das Materialverhalten des umgebenden Salzgesteins geschlossen werden kann.

Die unterschiedlichen Beispiele wurden ausgewählt, da aufgrund der jeweilig vorliegenden Datenlage einer ausgewählten Lokation nicht immer alle oben genannten Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des In-situ-Materialverhaltens angewendet werden können. Die ausgewählten Untersuchungsbeispiele dokumentieren daher mögliche Kombinationen von Untersuchungsmethoden, für die die Frage beantwortet werden muss, ob sie ausreichend für eine verlässliche Bestimmung des In-situ-Materialverhaltens sind. Durch die Auswahl von Kavernenanlagen mit unterschiedlicher Nutzungsart wird gleichzeitig untersucht, ob ein Einfluss der Art des Betriebes auf die Bewertungsmethoden vorliegt. Folgende Beispiele werden herangezogen:

- eine Bohrung für eine noch auszulotende Kaverne,
- eine Kavernenanlage, die ausschließlich zur Produktion von Sole betrieben wird,
- eine Kavernenanlage, die ausschließlich zur Bevorratung von Rohöl und ähnlichen Produkten betrieben wird,
- eine Kavernenanlage ausschließlich zur Speicherung von Erdgas und
- eine Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und Erdgas.

Nach einer kurzen Beschreibung der Charakteristika der jeweiligen Speicheranlage wird auf die Untersuchungsmethoden eingegangen, die aufgrund der vorliegenden Daten angewendet werden können, um auf das In-situ-Verformungsverhalten des Salzgesteins zu schließen. Die Untersuchungsergebnisse werden im Hinblick der Eignung der eingesetzten Methoden bewertet.

#### 4.1 Explorationsbohrung für eine spätere Speicherkaverne

Die untersuchte Bohrung wurde im Vorfeld der späteren Aussolung einer Kaverne in die Salzformation abgeteuft. Sie diente zunächst dem genaueren geologischen Aufschluss und der Gewinnung von Kernmaterial zur Bestimmung der gesteinsmechanischen Eigenschaften im Labor. Als Ergebnis dieser gesteinsmechanischen Untersuchungen im Labor wurde eine starke Teufenabhängigkeit der Kriecheigenschaften des Salzgesteins festgestellt. Wie in Bild 4.1 dargestellt, ist die gemessene Kriechfähigkeit des Salzgesteins im unteren Teufenbereich etwa um den Faktor 3 höher als im oberen Teufenbereich. Nach dem Abteufen der Bohrung ergab sich die Möglichkeit, die im Labor gemessenen Kriecheigenschaften durch ein In-situ-Versuchsprogramm im Bohrlochversuch zu überprüfen. In zwei aufeinander folgenden Zeitintervallen wurden zwei unterschiedliche Tests durchgeführt:

- ein Druckaufbautest bei verschlossenem Bohrloch und
- eine Ausflussmengenmessung bei geöffnetem Bohrloch.

Beide Testabschnitte wurden jeweils anhand von theoretischen Berechnungen mit dem Ziel nachvollzogen, das langfristige stationäre Kriechverhalten des Steinsalzes in situ zu bewerten und die anhand von Laborversuchen bestimmten Materialparameter zu überprüfen.

##### Auswertung der Druckaufbauphase

Die Entwicklung des Druckaufbaus am Bohrlochkopf über die Zeit ist in Bild 4.2 dargestellt. Da diese Phase des Versuchs nicht von vornherein als In-situ-Test geplant worden war, ergaben sich die Randbedingungen des Tests eher zufällig als geplant. Aus betrieblichen Gründen wurde etwa 100 Tagen nach Beginn der Druckaufbauphase der Bohrlochkopfdruck entlastet. Für die Auswertung des Versuches wurde lediglich die zweite Phase des Druckaufbaus herangezogen, während derer sich ein Druckaufbau von 2,23 MPa ergab.

Besondere Schwierigkeiten für die Nachberechnung des Versuches folgen aus den Randbedingungen dieses Versuchsabschnittes. Durch den allmählichen Aufbau des Bohrlochdruckes verringert sich kontinuierlich die Beanspruchung des umgebenden Salzgesteins, die infolge des Unterschiedes zwischen dem Gebirgsdruckgradienten und dem Soledruckgradienten hervorgerufen wird. Die Sekundärkriecheigenschaften von Salz unter Entlas-

tungsbedingungen zu messen ist kompliziert, da sie durch Erholungskriechvorgänge überlagert sind. Auch bei einem Testintervall über 120 Tage kann daher nur eine überschlägige Abschätzung vorgenommen werden. Gleichzeitig muss in der theoretischen Nachbetrachtung des Versuches die Infiltration von Sole in das Gebirge berücksichtigt werden, die die Annahme einer primären Permeabilität des umgebenden Salzgesteins voraussetzt, da diese nicht gemessen worden ist. Das Infiltrationsvolumen wird durch eine analytische Formel nach MUSKAT (1937) abgeschätzt.

Eine Bestätigung der im Labor gemessenen Kriecheigenschaften gelingt, wenn auf der Grundlage von Erfahrungswerten die Permeabilität des ungestörten Salzgesteins mit  $k = 1,2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  angenommen wird und eine mittlere Konvergenzrate im Bohrloch von  $0,005 \text{ m}^3/\text{Tag}$ , die auf der Basis der Laborkennwerte am theoretischen Bohrlochmodell berechnet wurde, verwendet wird. Über einen Beobachtungszeitraum von 120 Tagen des Druckaufbaus steht dann einem Volumenverlust des Bohrloches infolge Konvergenz in Höhe von  $\Delta V_K = 0,36 \text{ m}^3$  ein Volumenverlust der Sole infolge Infiltration von  $\Delta V_I = 0,22 \text{ m}^3$  gegenüber. Bei Annahme einer Kompressibilität des Gesamtsystems, gebildet aus der Kompressibilität des Bohrloches  $\beta_B$  und der von Sole  $\beta_S$ , mit einem Wert von  $\beta = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/MPa}$  wird nach Gleichung 4.1 ein Druckaufbau über 120 Tage von  $\Delta p = 2,29 \text{ MPa}$  errechnet, gemessen wurden  $2,23 \text{ MPa}$ . Die Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert kann als ausreichend bezeichnet werden (ROKAHR, HAUCK, STAUDTMEISTER und ZANDER-SCHIEBENHÖFER (2000)).

$$\Delta p = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{(\beta_B + \beta_S)} \cdot \frac{(\Delta V_K - \Delta V_I)}{V} \quad (4.1)$$

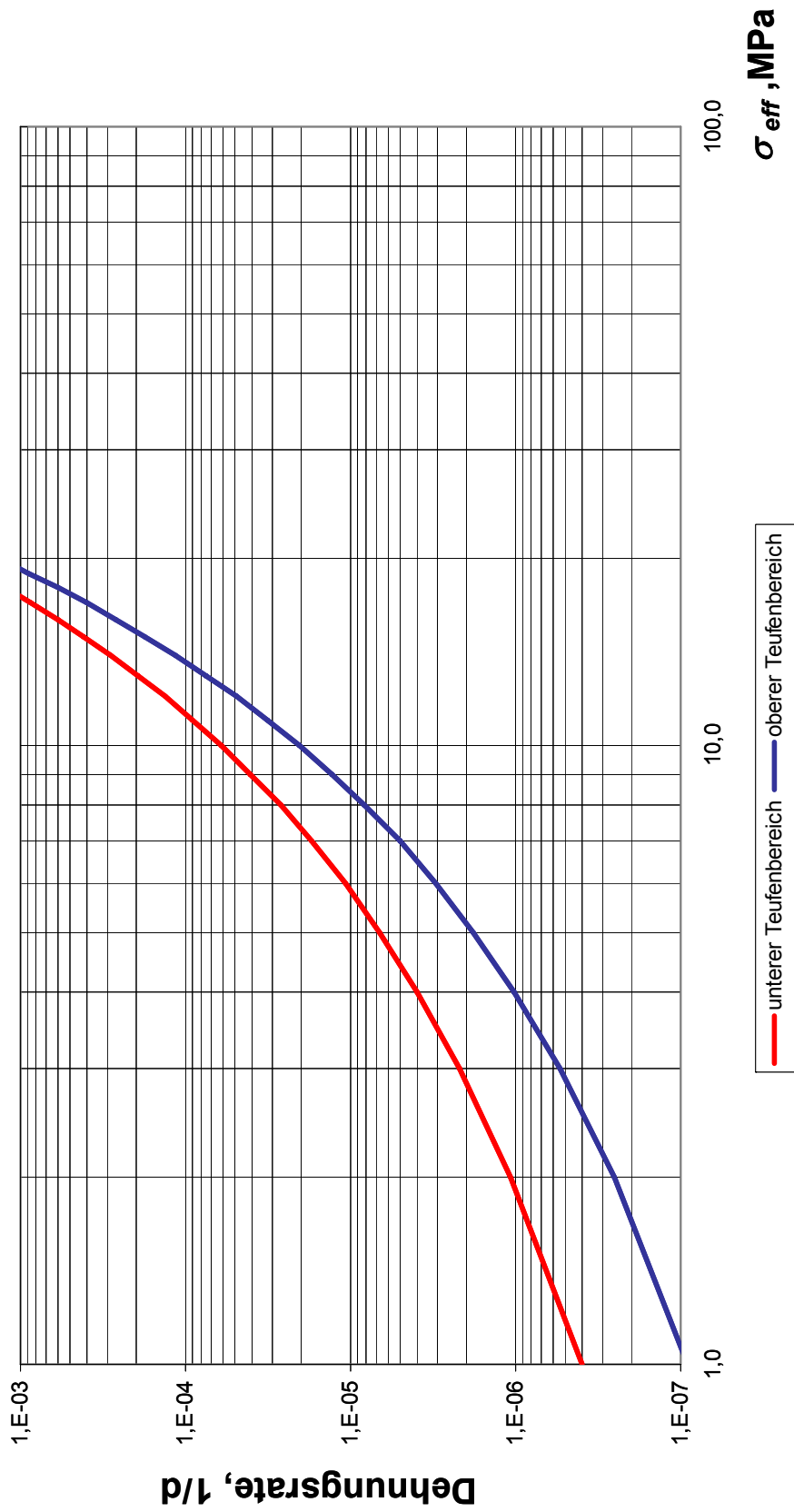


Bild 4.1: Laboregebnisse in Form der Darstellung der Kriechrate über die effektive Spannung für zwei unterschiedliche Teufenbereiche der untersuchten Bohrung

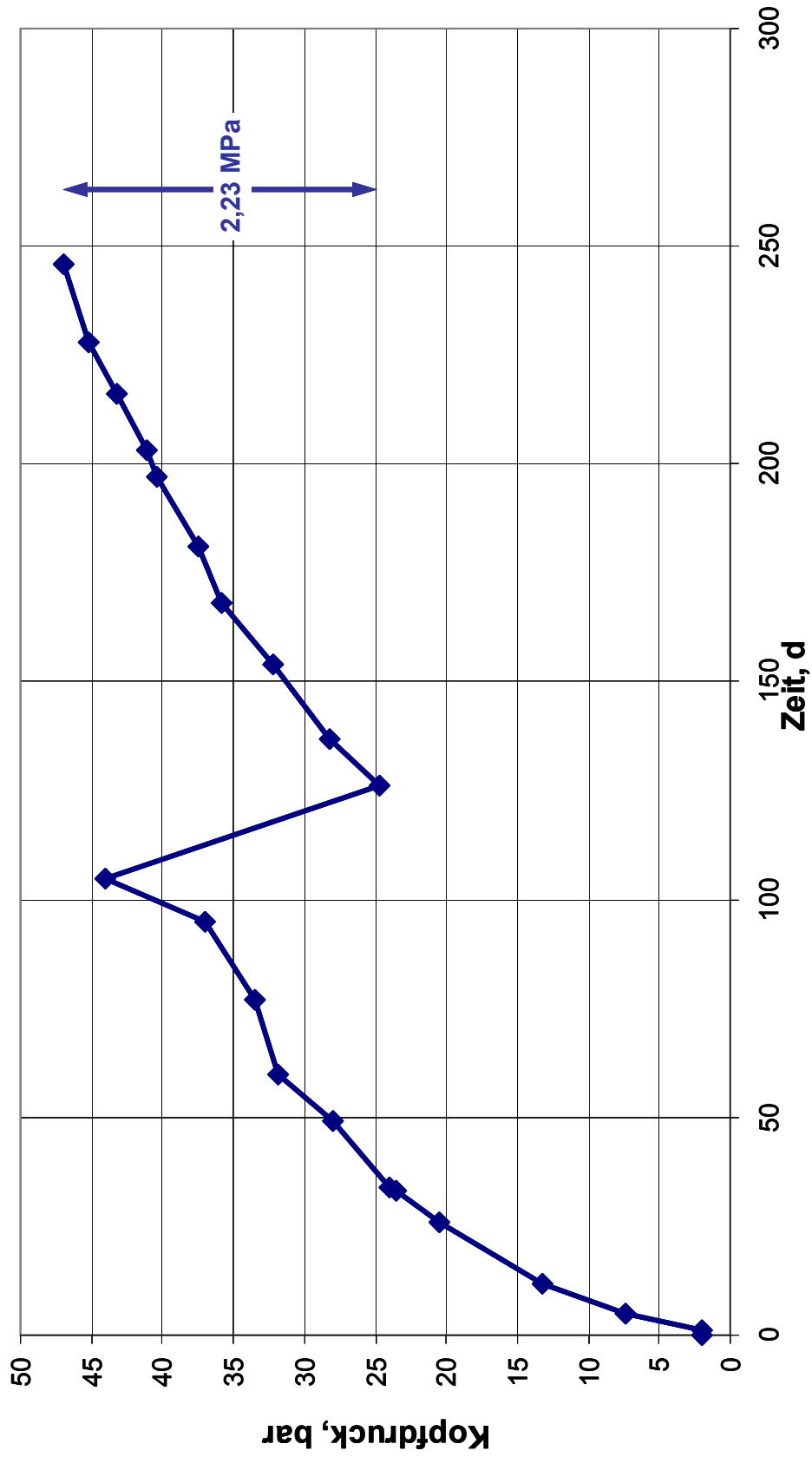


Bild 4.2: Beobachteter Kopfdruckaufbau im Bohrloch (Rokahr, Hauck, Staudmeister und Zander-Schiebenhöfer (2000) )

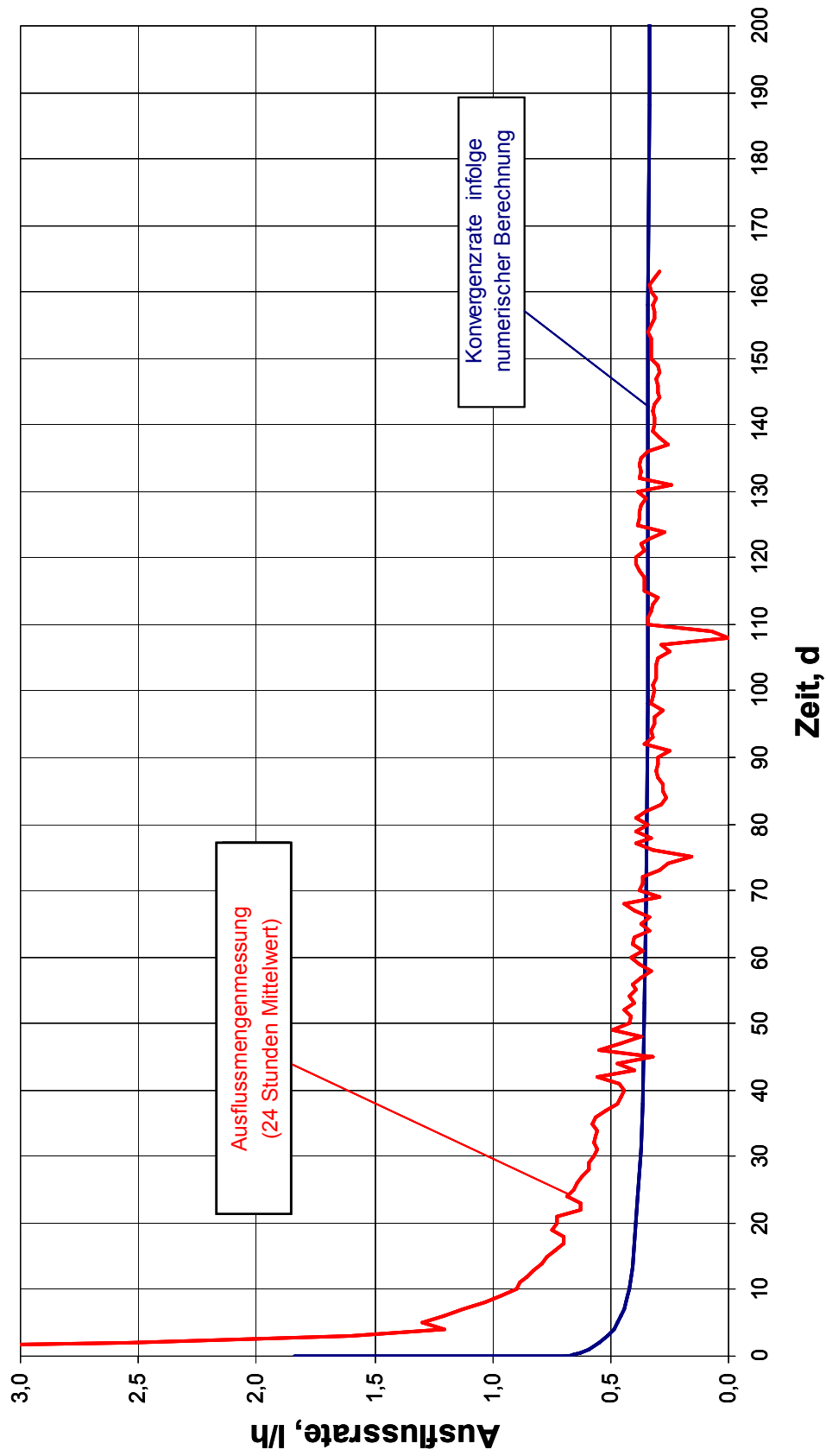


Bild 4.3: Gegenüberstellung von beobachteter und am theoretischen Modell berechneter Ausflussrate beim Ausflussmengenfest (Rokahr, Hauck, Staudtmeister und Zander-Schiebenhöfer (2000))



### Auswertung des Ausflussmengentests

Die Ergebnisse des anschließenden Ausflussmengentests über nahezu sechs Monate sind in Bild 4.3 zusammengefasst. Die am Bohrlochkopf gemessenen Werte der Rate des Soleausflussvolumens sind darin den Werten, die infolge der am theoretischen Modell berechneten Bohrlochkonvergenzraten ermittelt worden sind, in ihrem zeitlichen Verlauf gegenübergestellt. Langfristig ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der beobachteten und der berechneten Werte. Die Abweichungen zu Beginn des Versuches sind auf transiente Effekte zurückzuführen, wie zum Beispiel infolge des Kriechens des Salzgesteins und des Rückflusses von Sole, die im vorausgehenden Zeitintervall des Druckaufbaus in der Bohrung in das Salzgestein infiltriert ist.

### Bewertung der Ergebnisse

Bei einem Druckaufbautest ist für die theoretische Nachbetrachtung die Auswirkung zweier Mechanismen abzuschätzen, sofern nicht ein detailliertes zusätzliches Versuchsprogramm in Bezug auf das In-situ-Permeabilitätsverhalten der zu testenden Salzformation durchgeführt wird und keine Kenntnisse über das lokationsspezifische Kriechverhalten des Salzes bei Entlastungsvorgängen innerhalb kurzer Zeiträume vorliegen. Dagegen sind die Ergebnisse von Ausflussmengenmessungen in Bezug auf das Ziel, der Bewertung der langzeitigen Verformungseigenschaften des Salzgesteins, verlässlicher, da sich bei einem ausreichend langen Beobachtungszeitraum (im Bereich von wenigen Monaten) stabile (stationäre) Verhältnisse einstellen.

Trotz der Notwendigkeit von Annahmen in den theoretischen Modellen zur Nachbetrachtung der beiden Beobachtungsphasen (Druckaufbaumessung/Ausflussmengenmessung) gelingt es, die im Labor gemessenen Kriecheigenschaften des Salzgesteins durch In-situ-Beobachtungen durch zwei unterschiedliche Testverfahren zu bestätigen. Aufgrund der integralen Beobachtung über ein Bohrloch mit einer offenen (unverrohrten) Länge von 364 m kann die im Labor beobachtete teufenabhängige Kriechfähigkeit nicht genauer überprüft werden. Eine anhand der vorhandenen Laborergebnisse über die Teufe der Bohrung gemittelte Kriechfähigkeit des Salzgesteins wird bestätigt (ROKAHR, HAUCK, STAUDTMEISTER und ZANDER-SCHIEBENHÖFER (2000)).

## 4.2 Kavernenanlage zur Solegewinnung

Die untersuchte Kavernenanlage besteht aus mehreren Kavernen, die ausschließlich zur Produktion von Sole betrieben werden. Der Beginn der Produktion liegt zum Zeitpunkt der Untersuchung etwa 30 Jahre zurück, für die letzten 20 Jahre davon liegen umfangreiche Betriebsdaten vor. Mit der Solung der Kavernen wurde zu unterschiedlichen Zeiten begonnen, sodass sich eine allmähliche Entwicklung des Kavernenfeldes ergibt. Der Salzstock wird ausschließlich durch diesen einen Kavernenbetreiber genutzt, sodass Gebirgsbeanspruchungen und Oberflächensetzungen infolge weiterer nachbarlicher Bergbauaktivitäten nicht vorhanden sind.

Aufgrund der Ausdehnung der Salzformation kann davon ausgegangen werden, dass in der lateralen Umgebung der Kavernen ausreichend Salzgestein zur Verfügung steht, sodass das Tragverhalten des Nebengebirges nur eine vernachlässigbare Rolle spielt. Die Salzformation kann als quasi-homogen bezeichnet werden. Anhand von Bohrkernen aus zwei Kavernenbohrungen jüngerer Datums wurde ein umfangreiches Testprogramm zur Bestimmung des Festigkeits- und des Verformungsverhaltens des angetroffenen Salzgesteins im Labor durchgeführt.

Die zur Verfügung stehenden Daten ermöglichen eine Berechnung des untertägigen erzeugten Konvergenzvolumens zum einen durch die Anwendung der Methode der in Abschnitt 3.1.2.2 vorgestellten Bilanzierung der Salzmassen und zum anderen am theoretischen Konvergenzmodell unter Berücksichtigung der im Labor bestimmten Materialkennwerte. Eine zusätzliche Bewertungsmöglichkeit ergibt sich aus dem Vergleich der berechneten Konvergenzvolumina zum über Tage ermittelten Volumen der Setzungsmulde.

### Berechnung des Volumens der Setzungsmulde infolge der Bodensenkungsmessungen

Auf der Grundlage der Messdaten des Oberflächennivellements konnte das Volumen des Setzungstrogens durch den vom Betreiber der Kavernenanlage bestellten Markscheider ermittelt werden. Aufgrund der Unterschiede in der Qualität der Messpunkte und einer überlagernden Bodensenkung der Geländeoberfläche infolge einer oberflächennahen Wasserentnahme im Einflussbereich des Senkungstrichters über der Kavernenanlage werden seitens des Markscheiders teils erhebliche Schwankungsbreiten für das ermittelte Setzungsmuldenvolumen angegeben ( $\pm 5.500$  bis  $\pm 7.500 \text{ m}^3$ ) (REITZE (1998)).

Berechnung des Volumens des untertägigen Konvergenzvolumens auf der Grundlage der Produktionsdaten

Bei Anwendung der Gleichungen 3.2 bis 3.5 des Massenbilanzmodells unter Verwendung der gemessenen monatlichen Produktionswerte jeder einzelnen Kaverne kann zunächst separat für jede einzelne Kaverne der zeitliche Verlauf des unter Tage erzeugten Konvergenzvolumens berechnet werden. Durch Addition der zeitlich zueinander passenden Einzelwerte aller Kavernen können dann sowohl Jahressummenwerte als auch der zeitliche Verlauf des akkumulierten Konvergenzvolumens für die gesamte Kavernenanlage ermittelt werden.

Eine Aussage über die Güte der Datenbasis enthält die Auswertung der jährlichen Änderung des Konvergenzvolumens. Bis zum Jahre 1983 schwanken die berechneten jährlichen Zuwächse des Konvergenzvolumens relativ stark und zeigen sogar eine Zunahme des Kavernenvolumens. Es wird ein negatives Konvergenzvolumen in den Jahren 1982 und 1983 ermittelt. Danach pendeln sich die Werte auf ein jährliches Maß um etwa 5.000 m<sup>3</sup> ein. Die Werte bis einschließlich 1983 werden als nicht plausibel angesehen, daher wird zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins nur der Betriebszeitraum zwischen 1984 und 1997 herangezogen.

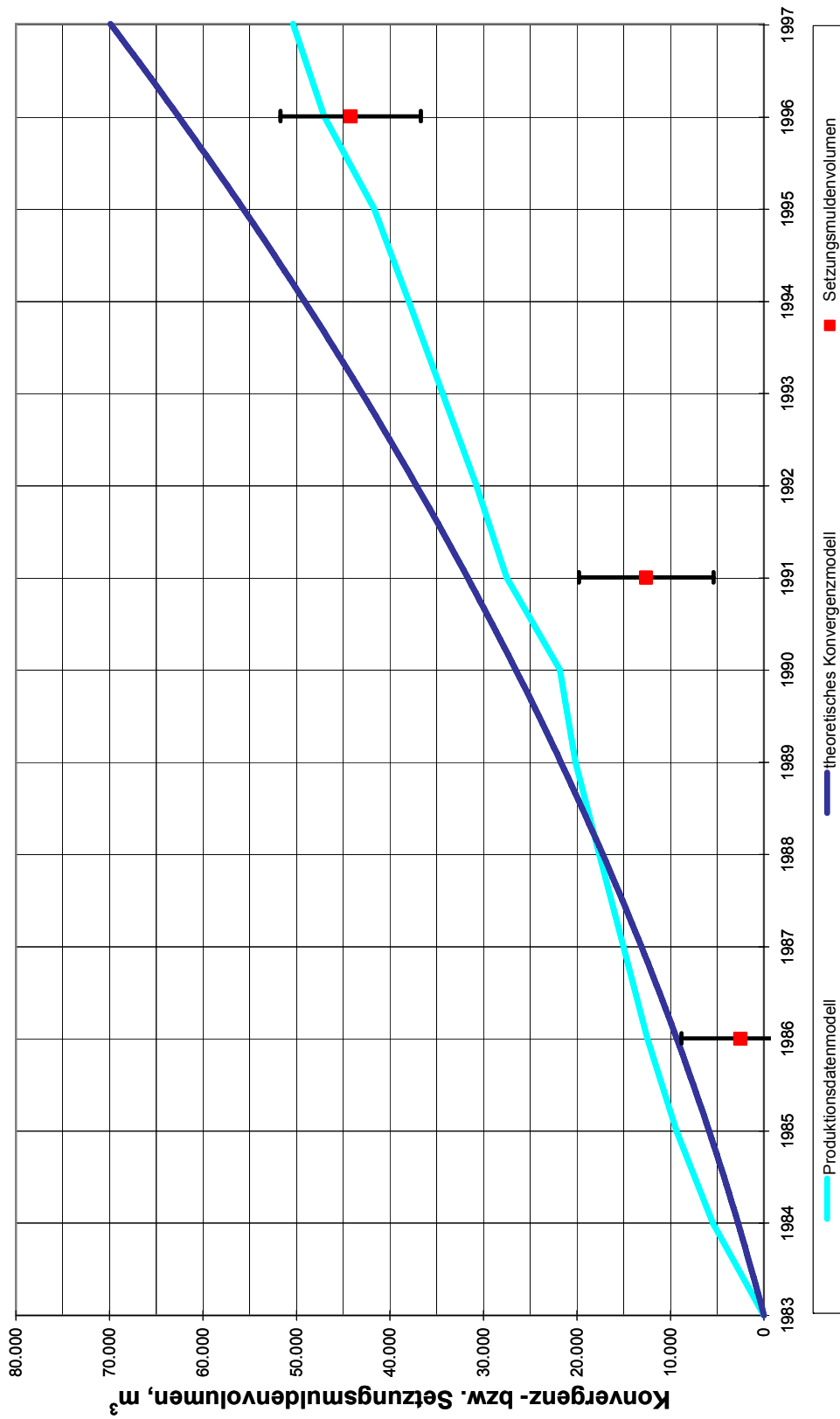


Bild 4.4: Berechneter Verlauf des Konvergenzvolumens beziehungsweise des Setzungsmuldenvolumens im ausgewerteten Zeitraum von 1984 bis 1997 für das Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Produktion von Sole

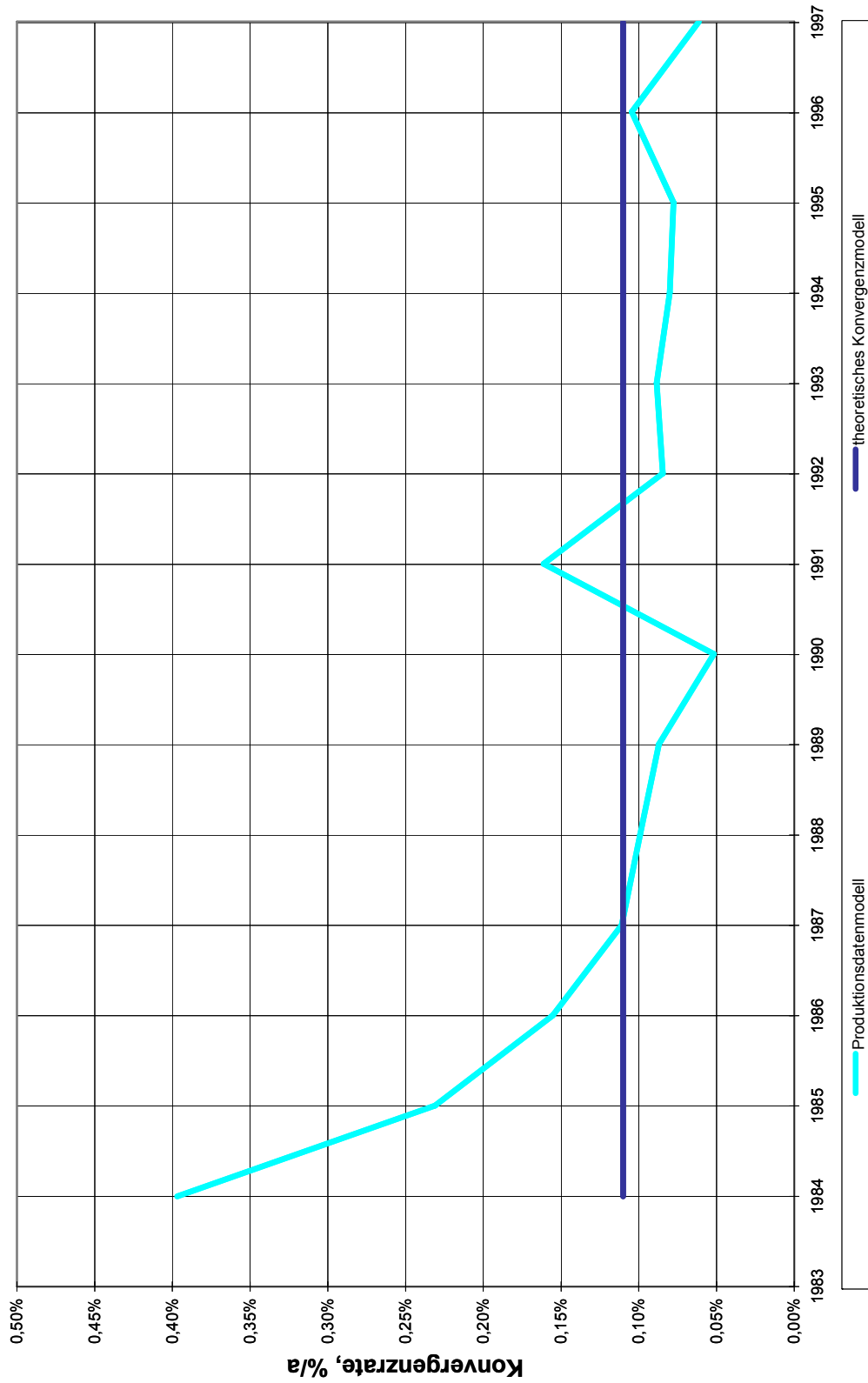


Bild 4.5: Berechnete Konvergenzraten in Abhängigkeit der gewählten Auswertmethode im Zeitraum von 1984 bis 1997 für das Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Produktion von Sole

### Berechnungen am theoretischen Konvergenzmodell

Die Berechnung des globalen Konvergenzvolumens am theoretischen Konvergenzmodell beruht auf folgenden Annahmen

- Die durchschnittliche Konvergenzrate aller Kavernen des Feldes wird beschrieben durch die anhand einer Finite-Elemente-Berechnung ermittelte langzeitige Konvergenzrate von 0,11 % pro Jahr. Dabei werden die für das Feld typischen geologischen und geometrischen Rand- beziehungsweise Beanspruchungsbedingungen berücksichtigt. Als Materialparameter werden die im Labor anhand des lokationsspezifischen Materials für das Stoffgesetz LUBBY2 bestimmten Werte angenommen.
- Das aktuell unter Tage vorhandene Hohlraumvolumen, das als Voraussetzung für die Ermittlung des erzeugten Konvergenzvolumens notwendig ist, wird zunächst für jede Kaverne einzeln auf der Grundlage der untertägigen Hohlraumvermessungen und der Produktionsdaten ermittelt und später zu einem gesamten vorhandenen Hohlraumvolumen akkumuliert. Auf dieses Hohlraumvolumen wird dann die zuvor am theoretischen Modell berechnete und als repräsentativ bewertete Konvergenzrate angewendet, sodass der Verlauf des für das gesamte Kavernenfeld ermittelten Konvergenzvolumens über die Betriebszeit erhalten wird.

### Bewertung der Ergebnisse

Die Abhängigkeit von der Qualität der zugrunde gelegten Datenbasis zeigt sich bei allen drei verwendeten Methoden zur Ermittlung der Setzungsmulden- beziehungsweise Konvergenzvolumina:

- Bei der Ermittlung des Volumens der Setzungsmulde gibt der Markscheider eine relative Genauigkeiten von bis zu 40 % im untersuchten Betriebsintervall an.
- Die Produktionsdaten zeigen über einen Zeitraum von zwei Jahren eine Vergrößerung des erzeugten Hohlraums an, was aufgrund der Theorie nicht möglich ist und auf eine Dateninkonsistenz hinweist. Dieses könnte zum Beispiel eine Leckage in der Frischwasserleitung sein.

- Die dem theoretischen Konvergenzmodell zugrunde liegende Hohlraumvolumenentwicklung basiert auf einem Kompromiss aus den Daten der Hohlraumvermessung und den Produktionsdaten, um eine größere Datendichte zu erhalten.

Trotz dieser Einschränkungen infolge der Datengrundlage gelingt es, einen genügend langen Beobachtungszeitraum herauszufiltern, um eine Bewertung des Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins vornehmen zu können. Der Vergleich der drei ermittelten Verlaufskurven für das Konvergenz- bzw. Setzungsmuldenvolumen zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Setzungsmuldenvolumina und den auf der Grundlage des Produktionsdatenmodells ermittelten Konvergenzvolumina. Am Ende des ausgewerteten Betriebszeitraumes wird jeweils ein Volumenzuwachs von  $50.000 \text{ m}^3$  berechnet. Der Unterschied zum am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten Wert beträgt etwa  $19.000 \text{ m}^3$ .

Da die Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins durch den Vergleich mit dem am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten Verlauf des Konvergenzvolumens erfolgt, wird auf die Ermittlung dieses Wertes genauer eingegangen. Das Konvergenzvolumen geht aus dem Produkt einer großen (Hohlraumvolumen) mit einer kleinen Zahl (Konvergenzrate) hervor. Die innerhalb des theoretischen Konvergenzmodells angenommene mittlere Konvergenzrate aller Kavernen stimmt zwar, wie aus Bild 4.5 hervorgeht, gut mit den infolge des Produktionsdatenmodells berechneten Werten überein, es wird aber deutlich, dass schon eine geringe Schwankung das berechnete Konvergenzvolumen stark beeinflussen kann, da das gesamte Hohlraumvolumen unter Tage etwa 6 Millionen Kubikmeter beträgt. Hieraus ist zu erkennen, dass für ein genaueres Nachvollziehen der Felddaten die Ermittlung einer für jede Kaverne des Feldes spezifischen Konvergenzrate erforderlich ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das In-situ-Verformungsverhalten des die Kavernen umgebenden Salzgesteins im untersuchten Fall einer Kavernenanlage zur Produktion von Sole durch die angewendeten Methoden bestimmt werden kann.

### 4.3 Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und verwandter Produkte

Die Kavernenanlage besteht aus mehreren Kavernen zur Speicherung von Rohöl und verwandten Produkten. Auf Grund der unterschiedlichen Lage des Salzspiegels zwischen 1.000 und 1.500 Metern sind auch die Kavernen über einen breiten Teufenbereich angelegt, das heißt, aus gebirgsmechanischer Sicht erstreckt sich die wirksame mechanische Beanspruchung des umgebenden Salzgesteins bezogen auf die Art der Speicherung über einen relativ großen Bereich.

Der Beginn der Entwicklung des Kavernenfeldes liegt zum gegenwärtigen Zeitpunkt etwa 35 Jahre zurück. Für die nach dem damaligen Stand der Technik angewendeten Dimensionierungskriterien für eine Ölspeicherkaverne waren keine Laborversuche zur Ermittlung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens des Salzgesteins erforderlich. Bohrkern sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht mehr in ausreichender Anzahl vorhanden, sodass nachträglich kein angemessenes Labortestprogramm durchgeführt werden kann.

Auf der Grundlage der vorhandenen Betriebs- und In-situ-Daten kann eine Bestimmung beziehungsweise Bewertung der in situ vorhandenen Materialqualität vorgenommen werden. Die dazu herangezogenen beim Kavernenbetreiber vorhandenen Daten beziehen sich auf die langjährigen Aufzeichnungen der Kavernenkopfdrücke und besonderen Betriebsergebnisse. Außerdem liegen die Daten eines Ausflussratentests an einer Ölspeicherkaverne des Feldes vor. Aufgrund der vorhandenen Daten können für die Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins drei indirekte Methoden angewendet werden. Dabei handelt es sich um

- den lokalen für jede Kaverne einzeln vorgenommenen Vergleich der untertäglich beobachteten Entwicklung des Hohlraumvolumens zwischen jeweils zwei Werten der Sonarvermessungen und denen, die am theoretischen Konvergenzmodell ermittelt werden,
- den globalen Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Gesamtvolumens der erzeugten Setzungsmulde infolge der Auswertung der Daten des Oberflächennivelements und der am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten Werte für das untertäglich erzeugte Konvergenzvolumen sowie



- den Vergleich der zeitlichen Entwicklung der gemessenen Senkungswerte einzelner Vermessungspunkte mit den infolge der Berechnungen am theoretischen Konvergenzmodell prognostizierten Verläufen der Bodensenkungen für diese Vermessungspunkte.

Die Auswertung der In-situ-Ausflussmengenmessung bietet dabei die Möglichkeit eines lokalen punktuellen Vergleichs der Ergebnisse.

#### Ausflussmengenmessung für eine Kaverne

Der Ausflussmengentest wurde an einer Kaverne vorgenommen, die im mittleren Feldesteil liegt und daher als Feldkaverne beschrieben werden kann. Da eine kontinuierliche Messung technisch schwierig zu handhaben war, wurden abschnittsweise ölseitige Druckentlastungen mit einer maximalen Schwankungsbreite von 0,1 MPa vorgenommen, sodass von einem im Mittel konstanten Druck in der Kaverne gesprochen werden kann. Um die Abhängigkeit der Ausflussmengen von der im umgebenden Salzgestein wirksamen Beanspruchung beobachten zu können, wurden zwei unterschiedliche Druckstufen untersucht. Die erste Druckstufe begann auf dem Niveau des zu jenem Zeitpunkt gerade herrschenden Druckes innerhalb der Kaverne. Einerseits konnte dadurch die Phase der transienten Effekte verkürzt werden, da diese nur durch geringfügige Änderungen der Systemrandbedingungen hervorgerufen wurden, andererseits befand man sich bei dem vorhandenen Druck bereits bei einer für die Einschätzung des Deformationsverhaltens des Salzgesteins signifikanten Beanspruchung im Hinblick auf die langjährigen Betriebsbedingungen. Die erste Beobachtungsphase dauerte 94 Tage, danach wurde der ölseitige Kopfdruck um 1,5 MPa für eine Beobachtungsphase von 105 Tagen abgesenkt.

Die Versuchsergebnisse sind in Bild 4.6 in Form der gemessenen gemittelten Ausflussmengen über die Zeit dargestellt. Die ebenfalls aufgetragene Ausgleichskurve auf der Basis eines gleitenden Durchschnitts über fünf benachbarte Messwerte zeigt deutlich die zu Beginn jedes Testdruckintervalls vorhandenen Übergangseffekte an. Aufgrund der Druckbedingungen werden „quasi“ stationäre Verhältnisse im zweiten Testabschnitt später erreicht. In beiden Fällen kann jedoch die Beobachtungszeit als ausreichend lang bezeichnet werden.

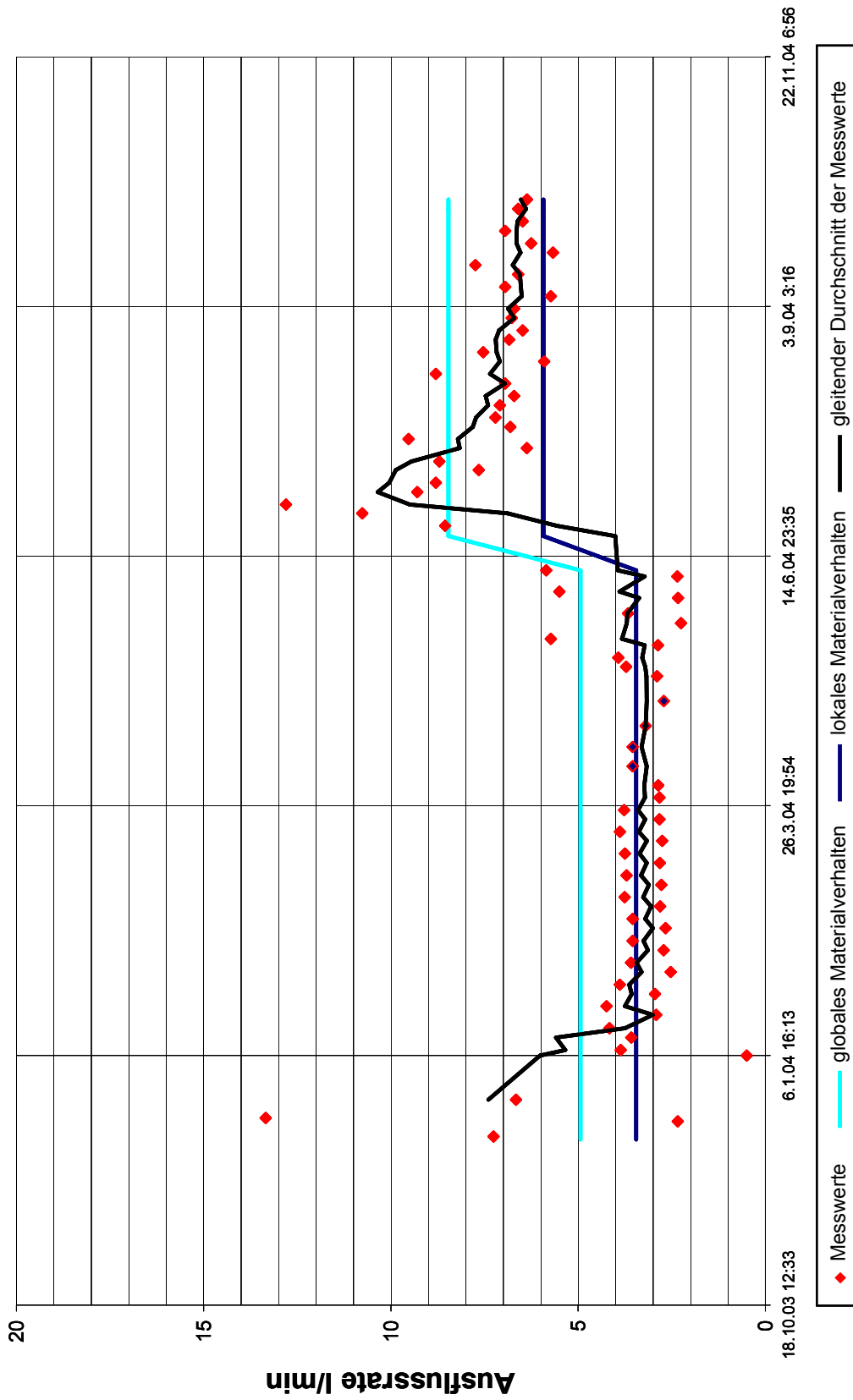


Bild 4.6: Ergebnisse der Messungen und der Nachberechnung des Kavernentests

Um das In-situ-Verformungsverhalten des die Kaverne umgebenden Salzgesteins bewerten zu können, wird das langfristige Verformungsverhalten für die beiden untersuchten Druckbedingungen am theoretischen Modell untersucht. Die in Bild 4.6 aufgetragene dunkelblaue Kurve repräsentiert die daraus resultierenden theoretischen Ausflussraten der gefundenen besten Materialqualität. Dass über einen Salzstock verteilt durchaus mit unterschiedlichen Salzqualitäten zu rechnen ist, zeigt die eingetragene hellblaue Kurve, die später ermittelten durchschnittlichen Verformungseigenschaften des Salzgesteins in der Umgebung des gesamten Kavernenfeldes repräsentiert.

#### Untertägiger Vergleich der Hohlraumkonvergenz bezogen auf die einzelnen Kavernen

Für alle Kavernen des Kavernenfeldes wird der Vergleich der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten zeitlichen Entwicklung des Hohlraumvolumens mit dem anhand von Sonarvermessungen beobachteten Verlauf vorgenommen.

Die Berechnung des zeitlichen Verlaufes des untertägigen Hohlraumvolumens am theoretischen Konvergenzmodell erfolgt durch eine tabellarische Auswertung, die die vorhandenen Betriebsdaten zur Grundlage hat und die zu erwartende Hohlraumkonvergenz in Abhängigkeit des Betriebsdruckes aus einer im Voraus aufgestellten Matrix von Konvergenzraten ermittelt. Diese Matrix der Konvergenzraten ist das Ergebnis von spezifischen Finite-Elemente-Berechnungen für die jeweils untersuchte Kaverne über den gesamten beobachteten Innendruckbereich. Die Berechnungen berücksichtigen die spezielle geologische Situation, die spezifischen geometrischen Randbedingungen sowie die primären Bedingungen im Hinblick auf die Gebirgsspannungen und die Gebirgstemperatur in der Umgebung der jeweilig untersuchten Kaverne; sie gelten für eine festgelegte spezifische Lage innerhalb des Kavernenfeldes (Feld-/Einzelkaverne) und eine angenommene Referenzqualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins. Da für die untersuchte Lokation keine im Labor bestimmten Kennwerte für das Kriechverhalten des Salzgesteins vorlagen, wird die anfängliche Referenzqualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins auf der Grundlage eines Erfahrungsbereiches angesetzt, der auf den am Institut für Unterirdisches Bauen durchgeführten Laborversuchen mit Salzgesteinen basiert. Durch iterative Anpassung der angenommenen Qualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins kann das individuelle Verformungsverhalten des Salzgesteins in der Umgebung jeder einzelnen Kaverne be-

wertet werden. Die Aufstellung der Matrix der Konvergenzraten für das gesamte Kavernenfeld basiert pro untersuchter Materialqualität auf 646 Modellberechnungen.

Durch die stufenweise Erweiterung des Kavernenfeldes ergibt sich für jede einzelne Kaverne über ihre Betriebszeit eine Änderung der Lage innerhalb des Kavernenfeldes. Dabei muss grundsätzlich zwischen dem Tragverhalten einer Einzelkaverne und einer Feldkaverne unterschieden werden. Typische Feldkavernen weisen aufgrund eines meist gewählten hexagonalen Rasters sechs Nachbarn auf. Die Konvergenzrate  $\dot{K}$  einer Kaverne erhöht sich bei unverändertem Kaverneninnendruck mit steigender Anzahl vorhandener Nachbarkavernen, abnehmender vorhandener Pfeilerstärke  $B$  zwischen den Kavernen sowie zunehmendem mittleren Kavernendurchmesser  $D$  zweier benachbarter Kavernen. Um diesem Zusammenhang Rechnung zu tragen, wird die empirische Beziehung nach Gleichung 4.2 verwendet, die aus den Berechnungsergebnissen einer numerischen Untersuchung der Veränderung der Konvergenzrate bei Variation des Pfeiler-/Durchmesser-Verhältnisses  $B/D$  zweier benachbarter Kavernen entwickelt worden ist. Der daraus zu ermittelnde Einflussfaktor für die Konvergenzrate  $\dot{K}$  gibt eine Bewertungszahl der unter spezifischen Pfeiler-/Durchmesser-Verhältnissen ermittelten Konvergenzrate an. Aus dem Verhältnis des für die In-situ-Bedingungen einer Kaverne ermittelten Wertes zu dem für das theoretische Konvergenzmodell angenommenen Wert, wird der Einfluss der aktuellen Feldsituation auf die Konvergenzrate der Kaverne berücksichtigt.

$$\text{Faktor } \dot{K} = 2,6 \cdot \text{vorh} \frac{B}{D}^{(-1/0,6)} + 1,28 \quad (4.2)$$

Als Eingabedaten für das theoretische Konvergenzmodell liegen Betriebsdaten vor, sodass die wesentlichen Einwirkungen auf das Salzgestein individuell für jede Kaverne festgelegt werden können. So sind die ölseitigen Kopfdücke seit Beginn des Speicherbetriebes erfasst. Aufgrund der Hohlraumkonvergenz ergibt sich bei verschlossenem Kavernenkopfventil mit der Zeit ein Druckaufbau in jeder Kaverne, der von Zeit zu Zeit (drei- bis viermal pro Jahr) abgelassen werden muss, um den zulässigen Maximaldruck der Kavernen einzuhalten. Für das theoretische Konvergenzmodell werden über die jeweiligen Druckaufbauintervalle gemittelte Werte angenommen. Darüber hinaus sind die betrieblichen Vorgänge, wie zum Beispiel Um- und Auslagerungen und Kopfdruckänderungen infolge von Hohlraumvermessungen dokumentiert, die im Modell als Ereignisse getrennt erfasst

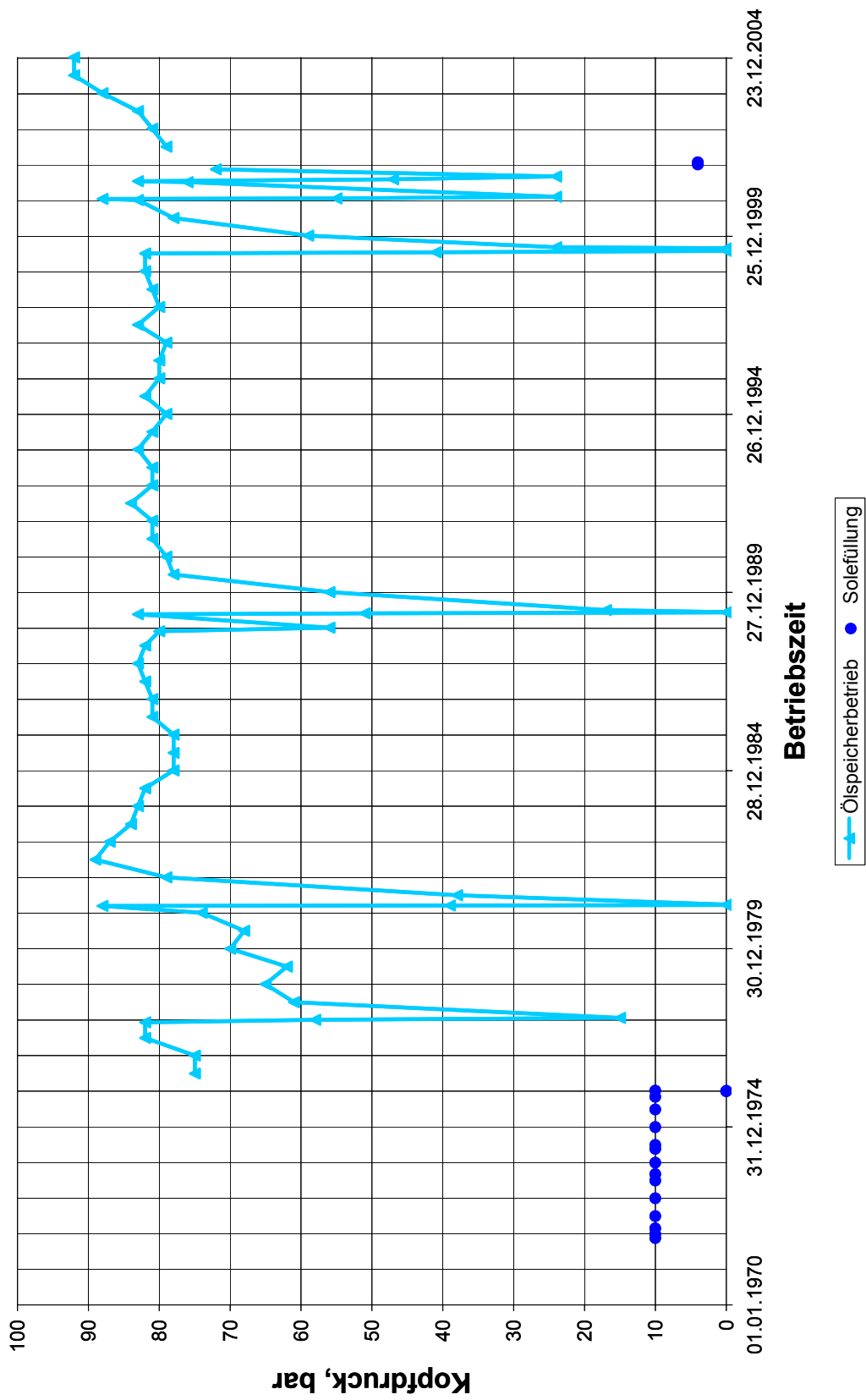


Bild 4.7: Kopfdruckverlauf einer für das Feld typischen Ölspeicherkaverne des untersuchten Beispiels eines Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl

werden. Die Weitersolung einzelner Kavernen in jüngster Zeit ist in Bezug auf die Druckbedingungen und die Hohlraumentwicklung genau dokumentiert.

Aus diesen Daten lassen sich je Kaverne Diagramme für die Betriebsbedingungen mit Bezug auf die Kopfdücke und die vorhandene Speichersituation (zum Beispiel Ölspeicherung, Solefüllung nach Auslagerung, Weitersolung) erstellen. Diese unterschiedlichen Betriebsrandbedingungen werden anhand des Kopfdruckverlaufs über die Betriebszeit einer typische Ölspeicherkaverne des Feldes in Bild 4.7 gezeigt. Über weite Zeiträume liegen relativ gleichmäßige Innendruckbedingungen in der Kaverne vor, was wiederum zu einer relativ gleichmäßigen Beanspruchung des die Kavernen umgebenden Salzgesteins führt.

Da Steinsalz bei Veränderungen der wirksamen Beanspruchung ein ausgeprägtes transientes Kriechverhalten zeigt und sich bei den untersuchten Kavernen die Innendücke über die Betriebszeit ständig verändern, was damit gleichzeitig auch auf die Beanspruchungsbedingungen des umgebenden Gebirges zutrifft, muss eine Annahme über die Berücksichtigung des primären Kriechanteils an der Volumenabnahme des Hohlraums im Verlaufe einer Kavernenbetriebsgeschichte getroffen werden.

In der Regel setzt sich die Betriebsgeschichte des Kavernenfeldes aus einer ständig sich wiederholenden Anzahl von Druckaufbauphasen mit relativ kurzzeitigen Entlastungen des Kaverneninnendruckes zusammen. Diese schnellen Entlastungen, die eine Belastung des die Kaverne umgebenden Gebirgsbereiches zur Folge haben, bewirken auch ein immer wieder einsetzendes transientes Kriechen des Salzgesteins, das aber mit wieder ansteigendem Kaverneninnendruck immer langsamer wird, da die wirksame Beanspruchung in der Druckaufbauphase kontinuierlich sinkt. Außerdem spielt bei einer als zyklisch zu charakterisierenden Betriebsweise das Erholungskriechen eine Rolle, das die vorlaufende Beanspruchungsgeschichte einbezieht und somit zu kaum messbaren transienten Kriechanteilen innerhalb eines Speicherintervalls führen dürfte. Anteile des primären Kriechens während der Speicherphase werden daher bei den Berechnungen am theoretischen Konvergenzmodell nicht berücksichtigt. Dagegen muss der Anteil des transienten Kriechens des umgebenden Salzgesteins an der Konvergenz des Hohlraumes mit einbezogen werden, wenn der Hohlraum neu ausgesolt beziehungsweise erweitert wird. Im Rahmen des vorgestellten theoretischen Konvergenzmodells erfolgt dies durch Annahme eines festen relativen Wertes von 1 % des vorhandenen Hohlraumvolumens am Ende der Solphase.

Bei einer Ölspeicherkaverne wird durch besondere Betriebsereignisse wie Umschläge und Teilauslagerungen des Speichergutes der Hohlraum vergrößert, da in der Regel mit nicht vollständig gesättigter Sole, Seewasser oder Frischwasser umgeschlagen wird. Hierzu liegen auf der Grundlage von Kavernenvermessungen Erfahrungswerte des Betreibers vor, die das Maß der Hohlraumvergrößerung in Abhängigkeit der Art des Umschlagsmediums angeben.

Abgesehen von den Zeitpunkten der speziellen Betriebsereignisse (zum Beispiel Umschlag oder Vermessung) einer Kaverne wird für die tabellarische Berechnung des vorhandenen Hohlraumvolumens jeder einzelnen Kaverne auf der Basis halbjähriger Zeitintervalle durchgeführt. Zu diesen Zeitpunkten wird das jeweils aktuelle Hohlraumvolumen ermittelt. Um einen Vergleich mit den tatsächlichen vermessenen Hohlraumvolumina zu ermöglichen, werden der theoretische und der beobachtete Verlauf in einem Diagramm gegenübergestellt. Dabei werden als Anfangswerte des theoretischen Verlaufes des Hohlraumvolumens jeweils die zu Beginn eines untersuchten Zeitintervalls zwischen zwei Hohlraumvermessungen beobachteten Werte angesetzt. Auf diese Weise ergibt sich eine abschnittsweise Bewertungsmöglichkeit des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins. Mögliche Lücken in der Datenbasis sind auf diese Art schnell auffindig zu machen, wenn bei mehreren vorhandenen Untersuchungsintervallen einer Kaverne nur ein Zeitintervall wenig plausible Ergebnisse liefert.

Anhand von zwei Beispielen soll exemplarisch der Vergleich des untertägigen Hohlraumvolumenverlaufs über die Zeit gezeigt werden, der grundsätzlich für jede Kaverne des Feldes einzeln vorgenommen worden ist. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die am Ende des Anpassungsprozesses gefundene Materialqualität für das Verformungsverhalten des Salzgesteins in der unmittelbaren Umgebung der jeweils betrachteten Kaverne.

Das erste Beispiel zeigt in Bild 4.8 eine typische Speicherkaverne in der Mitte des Feldes mit vier auswertbaren Intervallen zwischen jeweils zwei Hohlraumvermessungen. Im ersten Zeitintervall wird die auf der Grundlage der angenommenen Qualität des Verformungsverhaltens berechnete Konvergenz der Kaverne überschätzt. Am Ende dieses Intervalls ist das gemessene Hohlraumvolumen größer als das berechnete. Da innerhalb des Zeitraumes eine teilweise Umlagerung von Speichergut stattgefunden hat, deutet dies darauf hin, dass hier der angenommene empirische Wert für die damit verbundene Vergröße-

rung des Speichervolumens nicht exakt genug ist oder eventuell mit einem Medium umgeschlagen wurde, das einen geringeren Sättigungsgrad hatte. Die drei nachfolgenden Vermessungsintervalle hingegen werden durch das theoretische Konvergenzmodell gut abgebildet, sodass für das Verformungsverhalten des Salzgesteins in der Umgebung dieser Kaverne von der in den theoretischen Berechnungen angenommenen Referenzqualität für das Verformungsverhalten des Salzgesteins ausgegangen werden kann.

Das zweite Beispiel (Bild 4.9) zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen dem theoretisch ermittelten und dem vermessenen Verlauf des untertägigen Hohlraumvolumens. Eine geringfügige Unterbewertung des Verformungsvermögens könnte aus den ersten drei auswertbaren Zeitintervallen abgeleitet werden. Die Geschichte dieser Kaverne zeigt eine zweite Solphase im späteren Verlauf der Betriebsgeschichte. Deutlich sichtbar wird im Vergleich zur ersten Solphase, wie gut auf der Grundlage einer umfassenden Dokumentation auch diese Betriebsphase im theoretischen Modell nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ nachvollzogen werden kann.

*Vergleich des Volumens der Setzungsmulde in seiner zeitlichen Entwicklung mit dem berechneten globalen Konvergenzvolumen*

Auf der Grundlage betrieblicher Aufzeichnungen in der Anfangsperiode der Speicherung und den über 20 Jahre zurückreichenden Vermessungsdaten des Nivellements der Geländeoberfläche oberhalb der Kavernenanlage können die durch den Speicherbetrieb erzeugten Volumina des Setzungstrogos ermittelt werden. Die zeitliche Entwicklung dieses beobachteten Setzungsmuldenvolumens ist in Bild 4.10 anhand von Symbolen aufgetragen. Da ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Ermittlung des Gesamtvolumens die Annahme der Nulllinie der durch den Kavernenbetrieb verursachten Setzungen darstellt, sind für die letzten 19 Messkampagnen seitens des verantwortlichen Markscheiders zwei alternative Grenzwinkel ausgewertet worden. Bei einem angenommenen kleineren Wert für den Grenzwinkel wird eine größere Grundfläche des Setzungstrogos ermittelt, dadurch kommen größere Setzungsmuldenvolumina zustande.



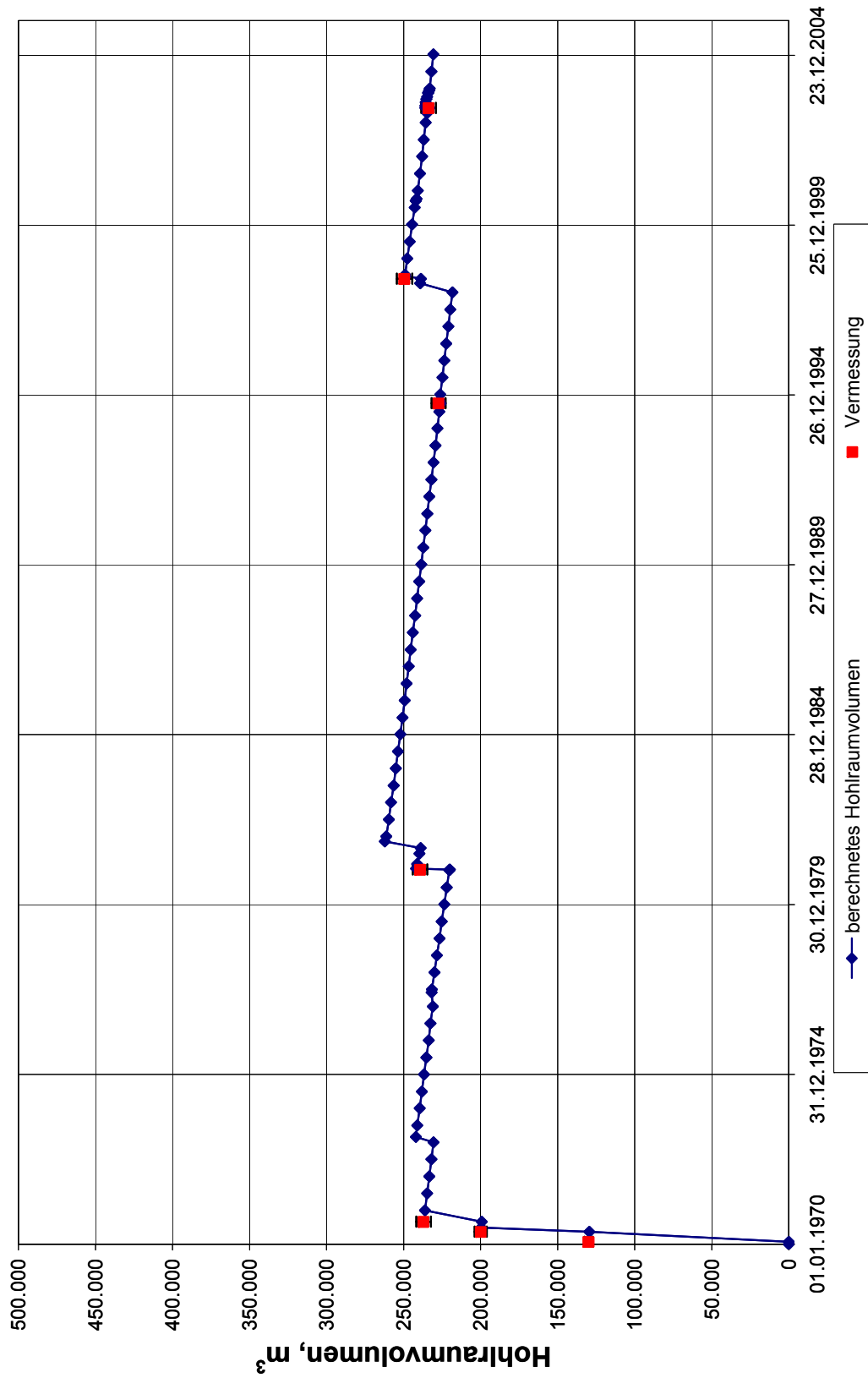


Bild 4.8: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung einer Ölkaverne im Zentrum des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Rohöl-speicherung

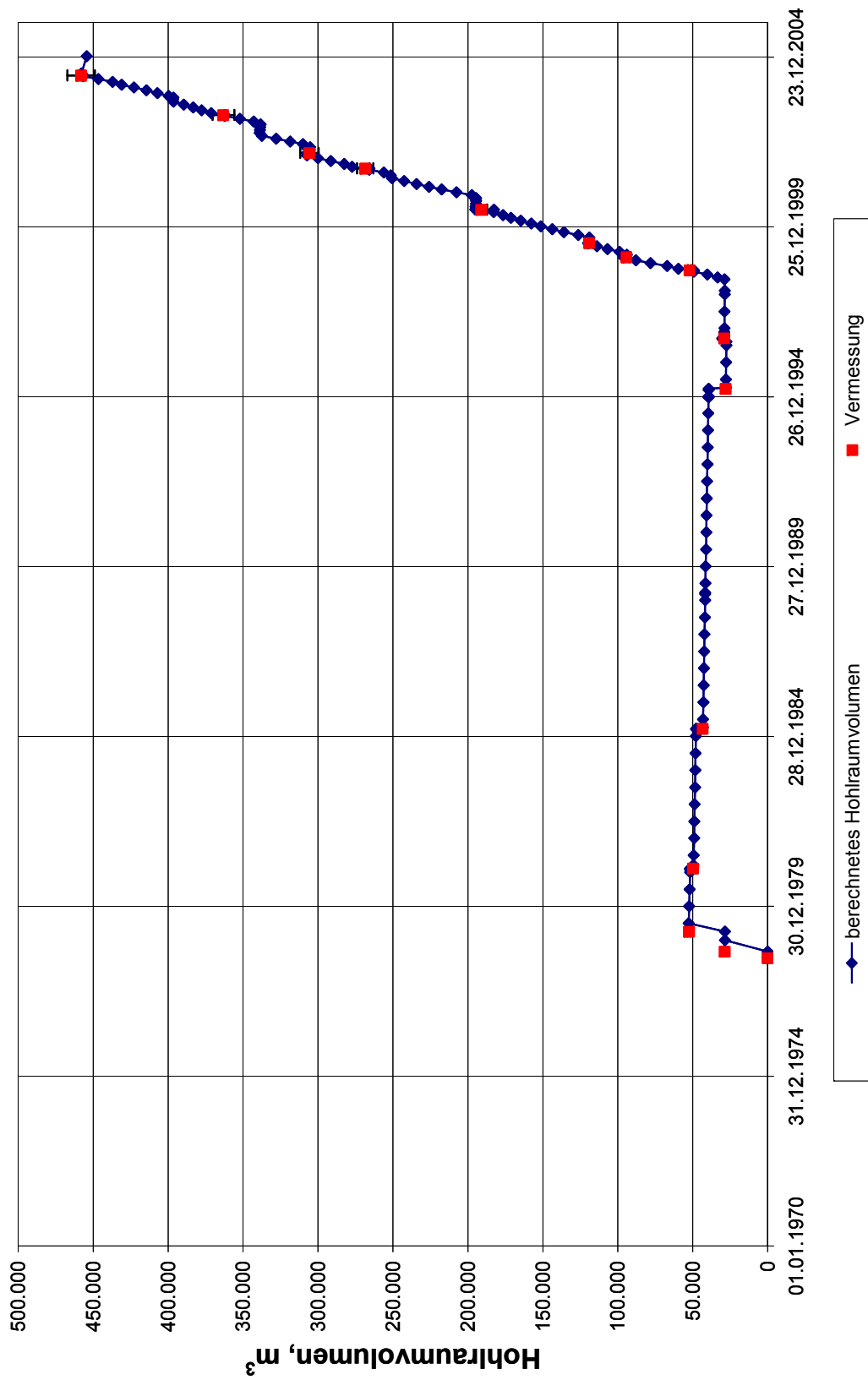


Bild 4.9: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohraumentwicklung einer Ölkaverne, die nachgesolt worden ist, für das untersuchte Beispiel einer Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

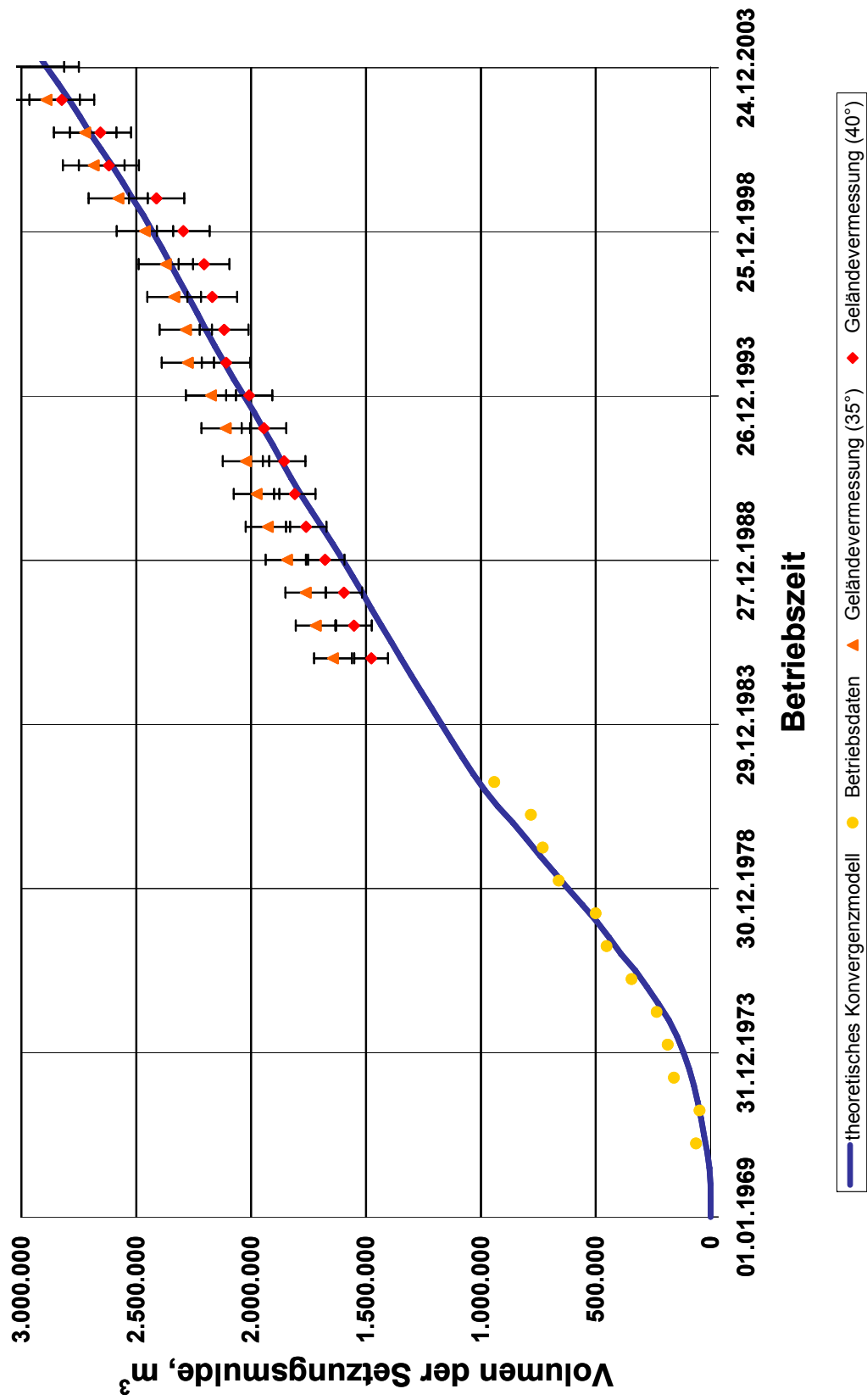


Bild 4.10: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs des Volumens der Setzungsmulde über der untersuchten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl

Werden die auf der Grundlage der spezifischen Betriebsgeschichte und Randbedingungen anhand des theoretischen Konvergenzmodells für jede einzelne Kaverne ermittelten untertägigen Konvergenzvolumina über die Zeit akkumuliert, so ergibt sich für das untersuchte Kavernenfeld der in Bild 4.10 in Blau dargestellte theoretische Verlauf des gesamten Konvergenzvolumens. Dieser Verlauf des Konvergenzvolumens wird mit dem Verlauf des Volumens der Setzungsmulde verglichen.

Unter Beachtung eines vom Markscheider angegebenen Vertrauensbereiches von  $\pm 5\%$  des ermittelten Gesamtsetzungsvolumens ergibt sich für die im theoretischen Konvergenzmodell angenommene Qualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins unter Tage eine gute Übereinstimmung zwischen dem aus Beobachtungen beziehungsweise der Theorie ermittelten Verlauf des Setzungsmulden- beziehungsweise Konvergenzvolumens.

*Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Bodensenkungen einzelner Messpunkte des Vermessungsnetzes an der Geländeoberfläche*

Da seitens des Betreibers eine große Anzahl von verlässlichen Datenreihen des Oberflächennivellements vorliegt, kann der Versuch unternommen werden, die Unterschiedlichkeit des Deformationsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins über die horizontale Ausdehnung des Salzstockes zu untersuchen.

Bei Annahme eines anerkannten Mechanismus für die Ausbreitung der untertägigen Hohlraumkonvergenzen bis an die Geländeoberfläche (siehe Abschnitt 3.1.3.2 Gleichung 3.6 bis 3.11) und Verwendung des am theoretischen Konvergenzmodell für jede Kaverne einzeln berechneten zeitlichen Verlaufes des Volumens der Hohlraumkonvergenz werden unter Beachtung der räumlichen Anordnung der Kavernen die theoretisch ermittelten Konvergenzvolumina in theoretisch ermittelte zeitliche Senkungsverläufe der Messpunkte des Nivellementnetzes umgerechnet.

Neben dem Auflockerungsfaktor des überlagernden Gebirges bei der Weiterleitung der Hohlraumverformungen, für den angenommen wird, dass keine Änderung des Volumens des überlagernden Gebirges während des Setzungsvorganges stattfindet (Wert des Auflockerungsfaktors  $a = 1$ ), spielt der in diesem Falle vorzugebende Wert des Grenzwinkels  $\beta$  der Ausbreitung der Konvergenz des Hohlraumvolumens eine wesentliche Rolle.

Die Bilder 4.11 und 4.12 zeigen für denselben Messpunkt den Vergleich zwischen dem theoretischen und dem beobachteten Verlauf der Bodensenkungen für einen Grenzwinkel von  $40^\circ$  beziehungsweise  $35^\circ$ . Während bei Annahme des steileren Grenzwinkels der Anfangsbereich des Senkungsverlaufes relativ gut wiedergegeben wird, trifft dies für den flacheren Winkel mehr für den zweiten Bereich der Senkungskurve zu.

Wenn angenommen wird, dass der Grenzwinkel mit der Zeit des Betriebes abnimmt, kann eine weitere Annäherung der berechneten an die gemessenen Verläufe der Bodensenkungen erzielt werden. In Bild 4.13 ist der berechnete Verlauf der Bodensenkungen des untersuchten Messpunktes dargestellt, wobei der Grenzwinkel ab Beginn der Solung der Kaverne über einen Zeitraum von 20 Jahren von  $40^\circ$  auf  $35^\circ$  kontinuierlich abnimmt, das heißt, der durch den Kavernenbetrieb erzeugte Setzungstrog vergrößert sich über die Zeit des Betriebes. Auf die Wahrscheinlichkeit dieser Annahme wird in Abschnitt 5.2 näher eingegangen. Weitere Vergleiche des Setzungsverhaltens an den Orten anderer Punkte des Nivellementnetzes weisen in die gleiche Richtung einer Zeitabhängigkeit des Grenzwinkels.

Aus der Gesamtheit der untersuchten Senkungskurven lassen sich im Hinblick auf das Verformungsverhalten des Salzgesteins über den Grundriss der untersuchten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl keine wesentlichen Unterschiede des Verformungsverhaltens ableiten.

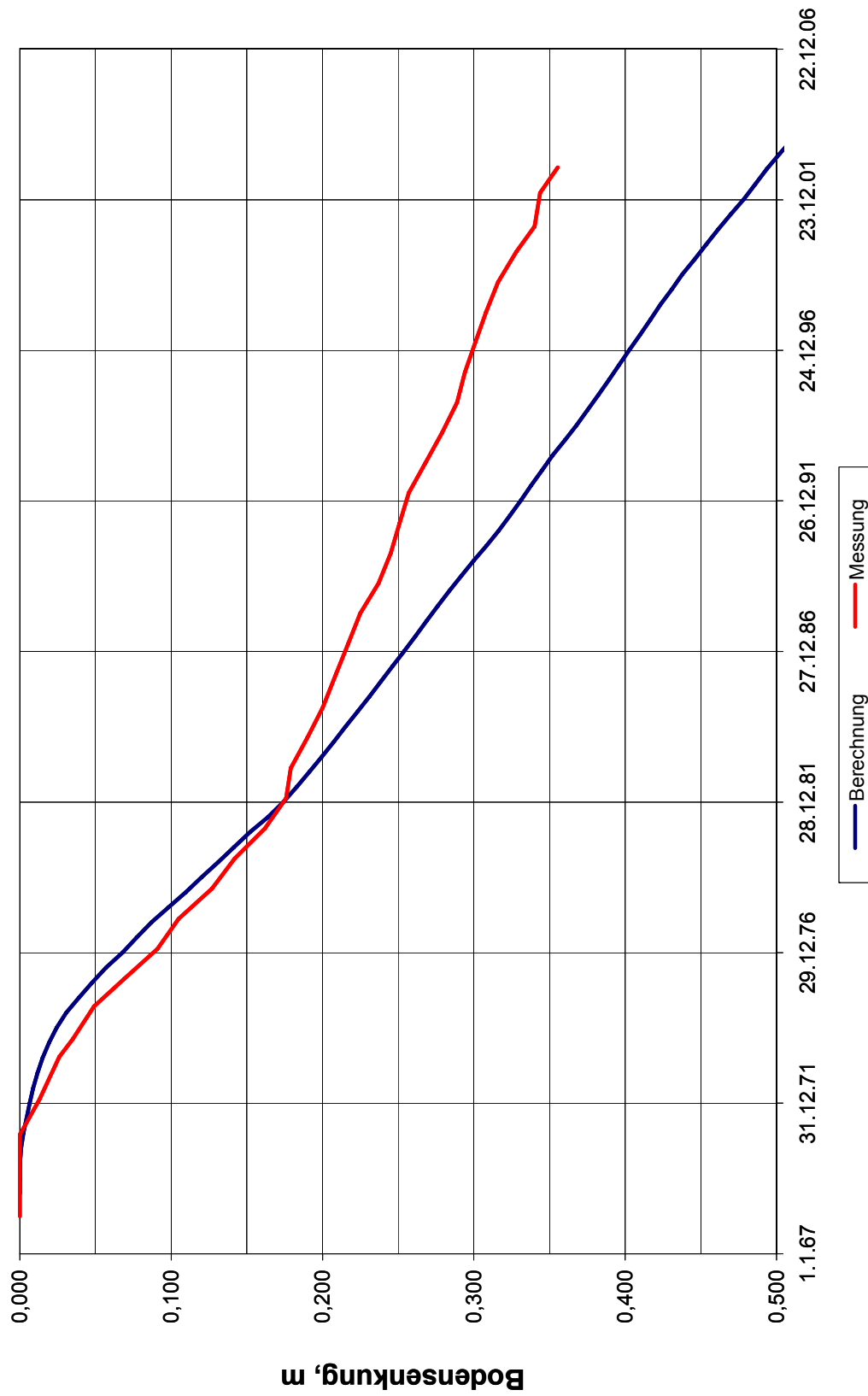


Bild 4.11: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen eines Messpunktes oberhalb der untersuchten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl bei Annahme eines Grenzwinkels von 40°

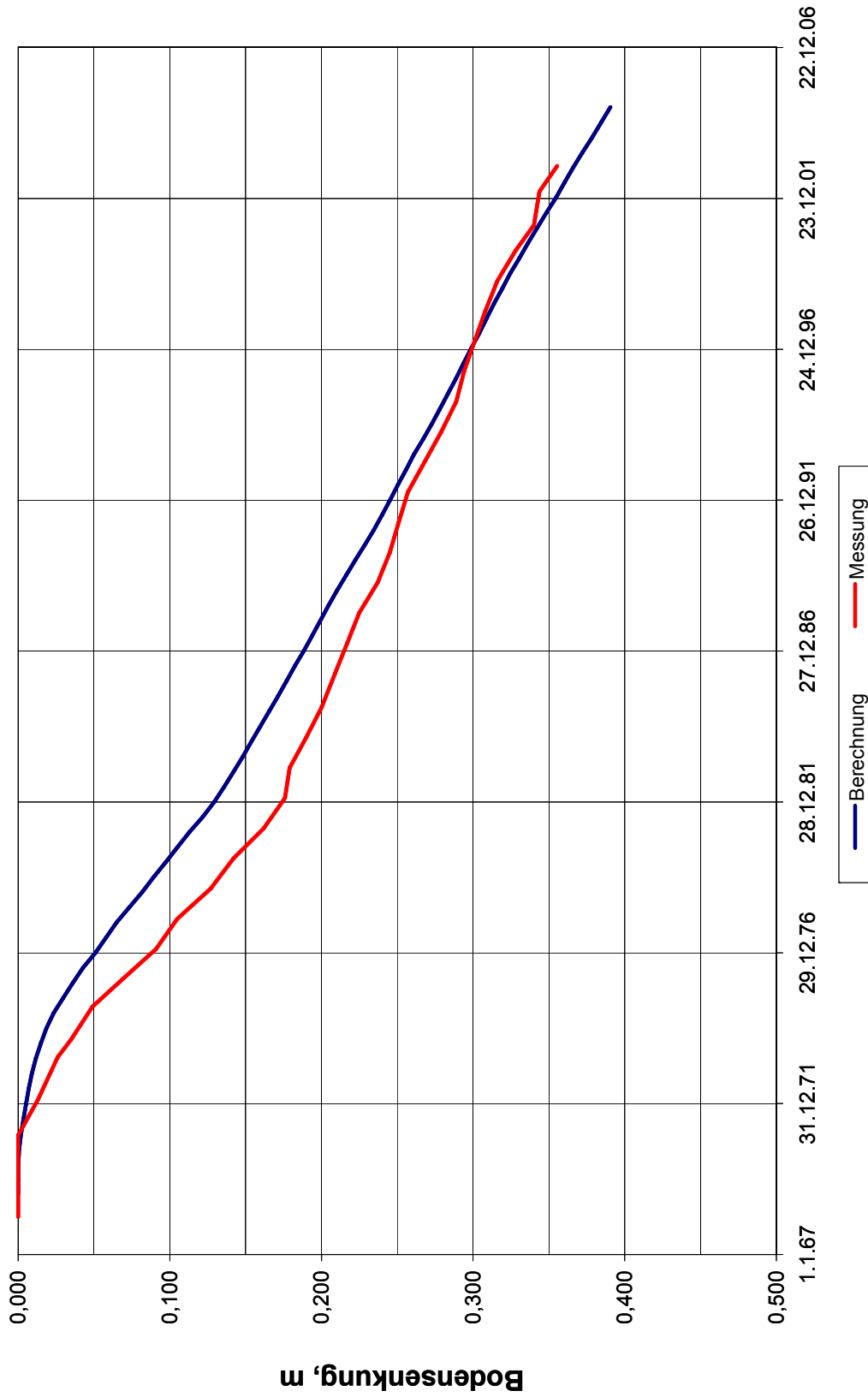
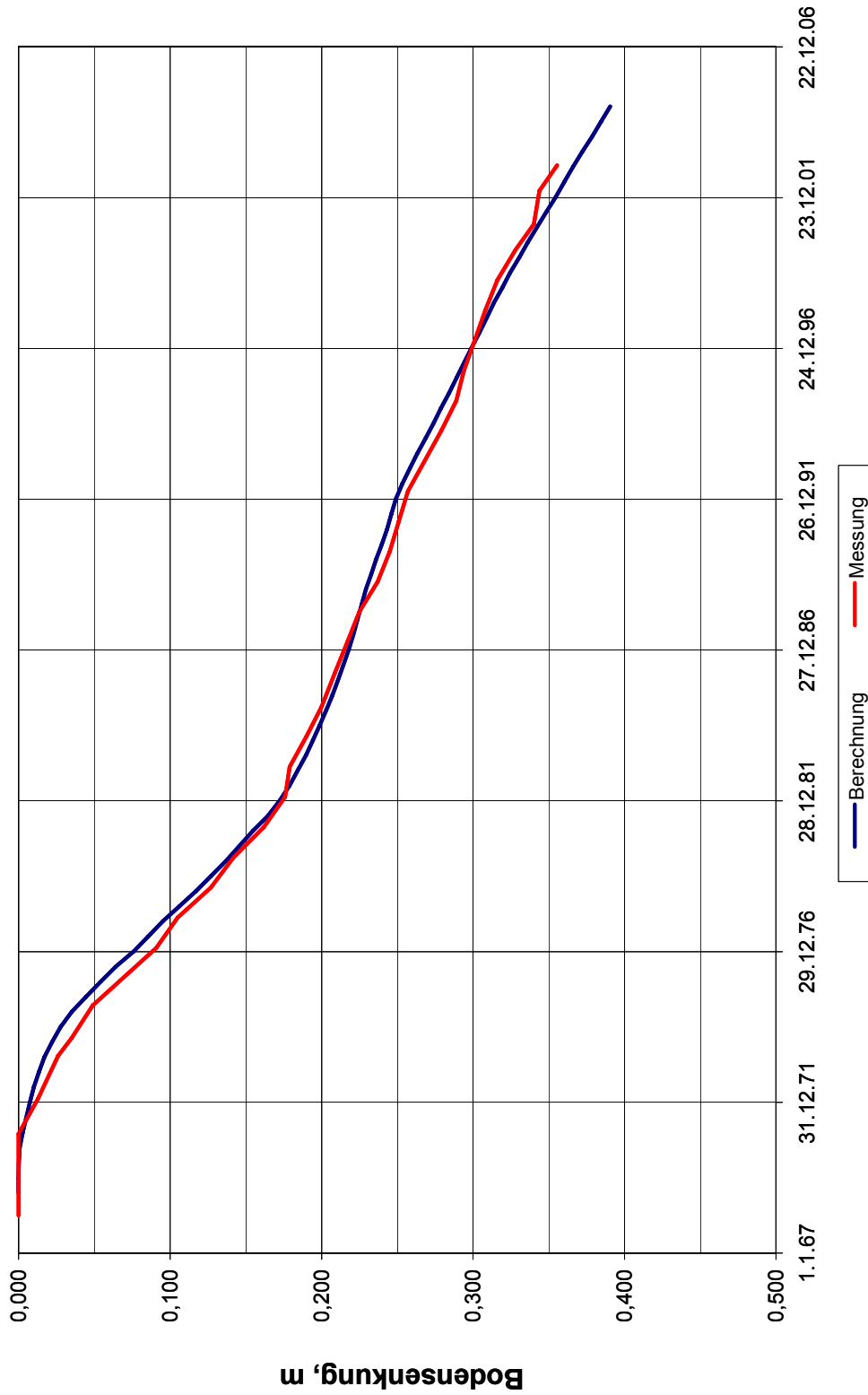


Bild 4.12: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen eines Messpunktes oberhalb der untersuchten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl bei Annahme eines Grenzwinkels von 35°



**Bild 4.13:** Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen eines Messpunktes oberhalb der untersuchten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl bei Annahme eines veränderlichen Grenzwinkels von 45° auf 35° innerhalb der ersten 20 Jahre der Betriebszeit



### Bewertung der Ergebnisse

Die vorliegende Datenbasis für das untersuchte Kavernenfeld ermöglicht vier unterschiedliche Methoden, um das In-situ-Verformungsverhalten des die Kavernen umgebenden Salzgesteins zu untersuchen und zu bewerten.

Durch die Methode des lokalen untertägigen Vergleichs des am theoretischen Konvergenzmodell berechneten zeitlichen Verlaufs des Hohlraumvolumens mit den Werten der Hohlraumvermessung kann für jede Kaverne des Feldes eine Basis für die Bewertung des Verformungsverhaltens des sie umgebenden Salzgesteins gefunden werden. Der ebenfalls durchgeführte globale Vergleich des berechneten und über alle Kavernen akkumulierten Konvergenzvolumens mit dem Volumen des Setzungstrog an der Geländeoberfläche führt zu einer verbesserten quantitativen Bestimmung des Verformungsverhaltens.

Anhand der Untersuchungsmethoden, die einen Aufschluss über die Unterschiedlichkeit des Verformungsverhaltens des Salzstockes bezogen auf den Grundriss über dem Kavernengebiet geben können, kann keine signifikante Änderung der Verformungseigenschaften in dieser Hinsicht abgeleitet werden.

Die Auswertung des lokal an einer Kaverne ausgeführten In-situ-Ausflussmengentests deutet auf ein um 20 % geringeres Kriechvermögen des örtlichen umgebenden Salzgesteins hin. Der Vergleich der gemessenen Bodensenkungen für einen Messpunkt im Haupteinflussbereich dieser Kaverne zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den realen Messwerten und den prognostizierten Messwerten infolge der Berechnungsergebnisse des theoretischen Konvergenzmodells auf der Basis der globalen Parameter zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins. Vor dem Hintergrund der im Labor beobachteten Streubreite der gemessenen Kriecheigenschaften kann dieser Unterschied als gering bezeichnet werden (STAUDTMEISTER (2006)).

Obwohl lokationsspezifische Laborversuche zur Bestimmung des zeitabhängigen Materialverhaltens fehlen, kann durch die Anwendung der indirekten Methoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins eine verlässliche Bestimmung dieses Materialverhaltens durchgeführt werden.

#### 4.4 Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

Zum Zeitpunkt der Untersuchung befinden sich Teile der Kavernenanlage seit etwa 18 Jahren im Gasspeicherbetrieb. Die Solung der Kavernen erfolgte in Gruppen über einen Zeitraum von 12 Jahren bis zur Ausbaustufe von sieben Kavernen. Die begleitenden geologischen Untersuchungen weisen im Zentrum des Salzstockes zwei unterschiedliche Arten des Zechsteins aus, das Werra- (z1) und das Staßfurt-Steinsalz (z2) (JACOBSEN und NIELSEN (1983)).

Für die gebirgsmechanische Auslegung der Kavernen wurde ein gesteinsmechanisches Laborprogramm durchgeführt, sodass für die Untersuchung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins eine lokationsspezifische Referenz des Materialverhaltens vorhanden ist. Vor Inbetriebnahme der ersten Kavernen wurde ein In-situ-Test anhand einer Kaverne vorgenommen, um das im Labor gemessene Materialverhalten zu bestätigen.

Zur Bestimmung des primären Spannungszustandes liegen Daten auf der Grundlage von gravimetrischen Messungen im Bohrloch und der Ermittlung der Dichten des erbohrten Gesteins vor, sodass von einer hohen Genauigkeit bei der Erfassung des primären Spannungszustandes ausgegangen werden kann. Der Verlauf der ungestörten Temperatur des Gebirges mit zunehmender Teufe konnte durch eine Temperaturmessung, die in einer über mehr als 10 Jahre verschlossenen ungestörten ehemaligen Aufschlussbohrung durchgeführt worden ist, ermittelt werden. Aus den Messergebnissen lässt sich deutlich ein unterschiedlicher Teufengradient der Temperatur im Deckgebirge und im Steinsalz erkennen. Während das Deckgebirge einen geothermischen Teufengradienten von 0,04 K/m aufweist, liegt der entsprechende Wert für die Salzformation bei 0,01835 K/m.

Für den Gasspeicherbetrieb liegen die Kopfdrücke der Kavernen in Form von Tageswerten vor. Für jede Kaverne existieren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen drei und vier Hohlraumvermessungen.

Auf der Grundlage der Daten kann die Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins anhand der Methode des Vergleichs der Hohlraumentwicklung infolge der Hohlraumvermessung und der Berechnung am theoretischen Konvergenzmodell vorgenommen werden.

Ein weiterer In-situ-Test an einer Kaverne wurde in jüngster Zeit in Form eines Druckabsenkungstests über einen begrenzten Zeitraum durchgeführt. Ziel dieses Tests war sowohl die Prüfung des Verformungsverhaltens in der Umgebung der Kaverne als auch der Festigkeit des Salzgesteins im unmittelbar die Kaverne umgebenden Randbereich des Gebirges.

#### Untertägiger Vergleich der Hohlraumkonvergenz bezogen auf die einzelnen Kavernen

Als Referenzqualität für das Verformungsverhalten des Salzgesteins werden zu Beginn der Untersuchungen am theoretischen Konvergenzmodell die Eigenschaften des im Labor untersuchten Kernmaterials angenommen, das aus der Bohrung der zuletzt gesolten Kaverne stammt, da die Laboruntersuchungen für diese Bohrung am umfangreichsten waren.

Die Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des umgebenden Salzgesteins erfolgt für jede einzelne Kaverne anhand der Bilder 4.14 bis 4.20, in denen die am theoretischen Konvergenzmodell berechnete zeitliche Entwicklung des Hohlraumvolumens den vermessenen Hohlraumvolumina gegenübergestellt wird. Unter Beachtung eines Vertrauensbereiches der Sonarvermessungen von  $\pm 2\%$  bezogen auf das vermessene Gesamtvolumen kann eine gute Übereinstimmung des berechneten mit dem beobachteten Verlauf des Hohlraumvolumens festgestellt werden. Bemerkenswert ist die nahezu exakte Wiedergabe des Verlaufes des Hohlraumvolumens der Kaverne 7 in Bild 4.20 durch das theoretische Konvergenzmodell, da anhand der Bohrkerne aus dieser Bohrung die Verformungseigenschaften des angenommenen Referenzmaterials bestimmt worden sind.

Zwei Ausnahmen bilden die jeweils ersten Betriebsintervalle zwischen zwei Hohlraumvermessungen der Kavernen 1 und 2. In beiden Fällen ergibt sich ein am theoretischen Konvergenzmodell berechnetes zu geringes Konvergenzvolumen. Seitens der vorhandenen Betriebsdaten sind keine außergewöhnlichen Ereignisse festgehalten worden. Durch eine veränderte Art der Auftragung der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Wertes des Hohlraumvolumens soll gezeigt werden, dass die Verlaufskurven trotzdem im Toleranzbereich der Hohlraumvermessungen liegen.



Bild 4.14: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohraumentwicklung der Kaverne 1 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

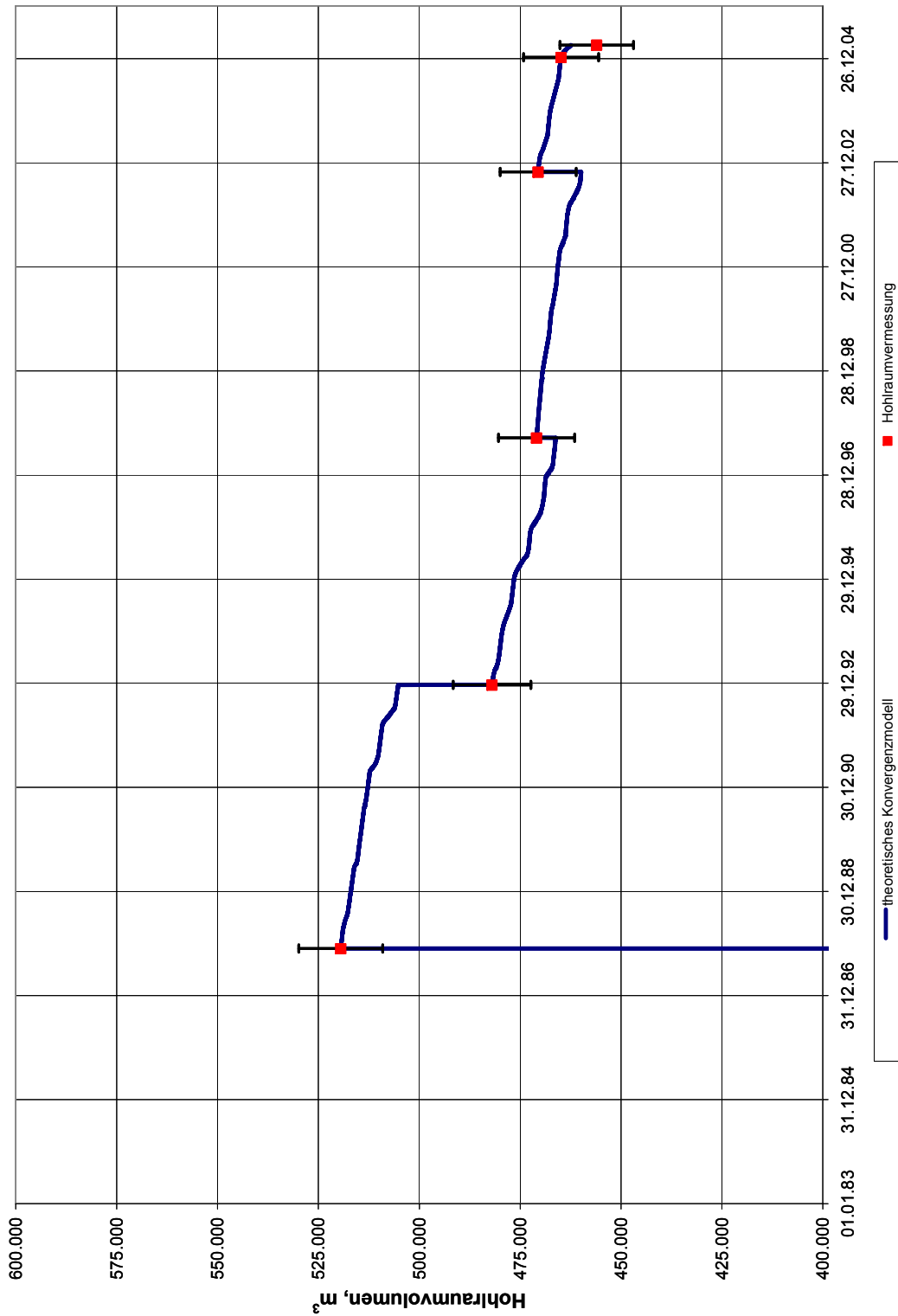


Bild 4.15: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung der Kaverne 2 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

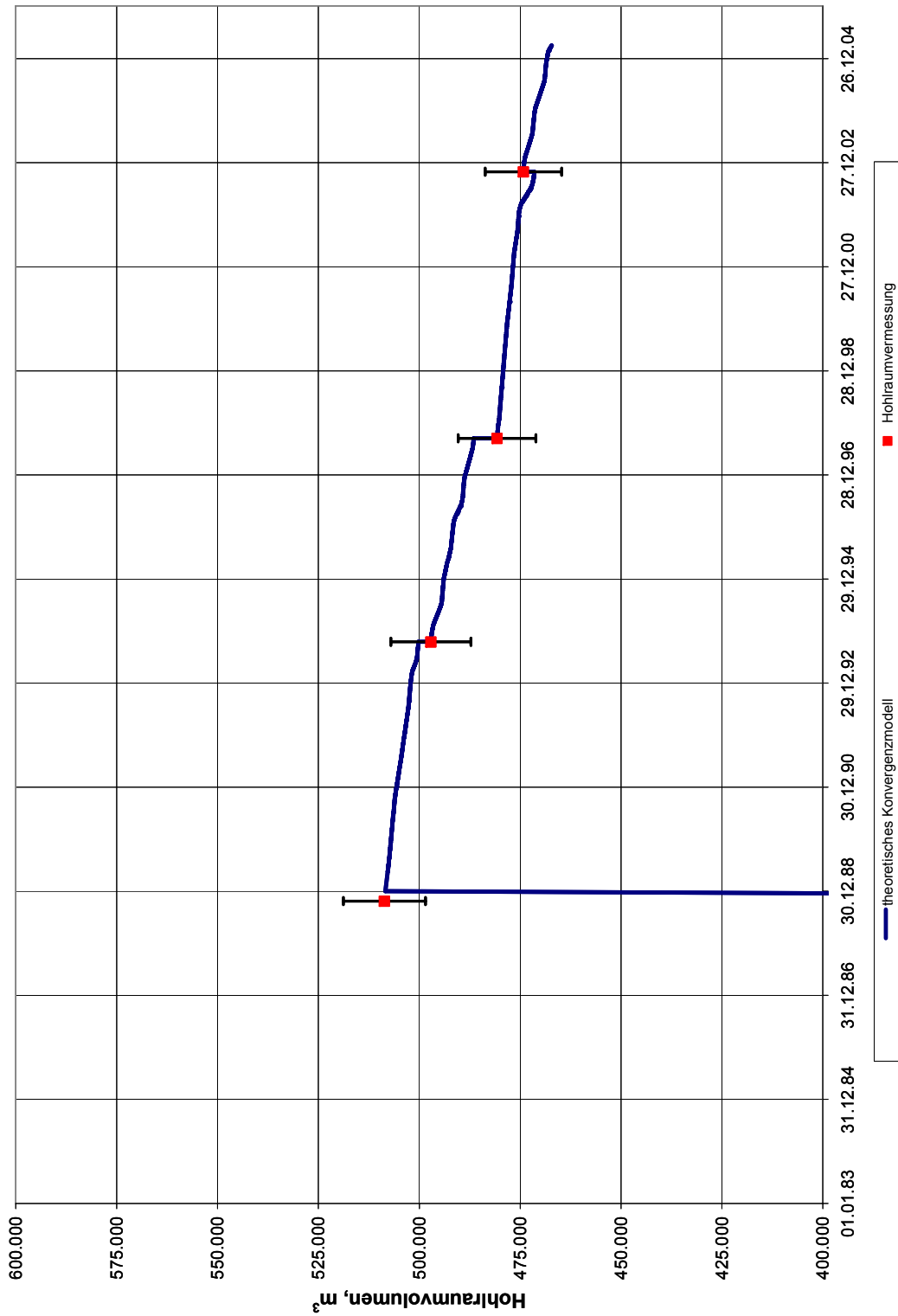
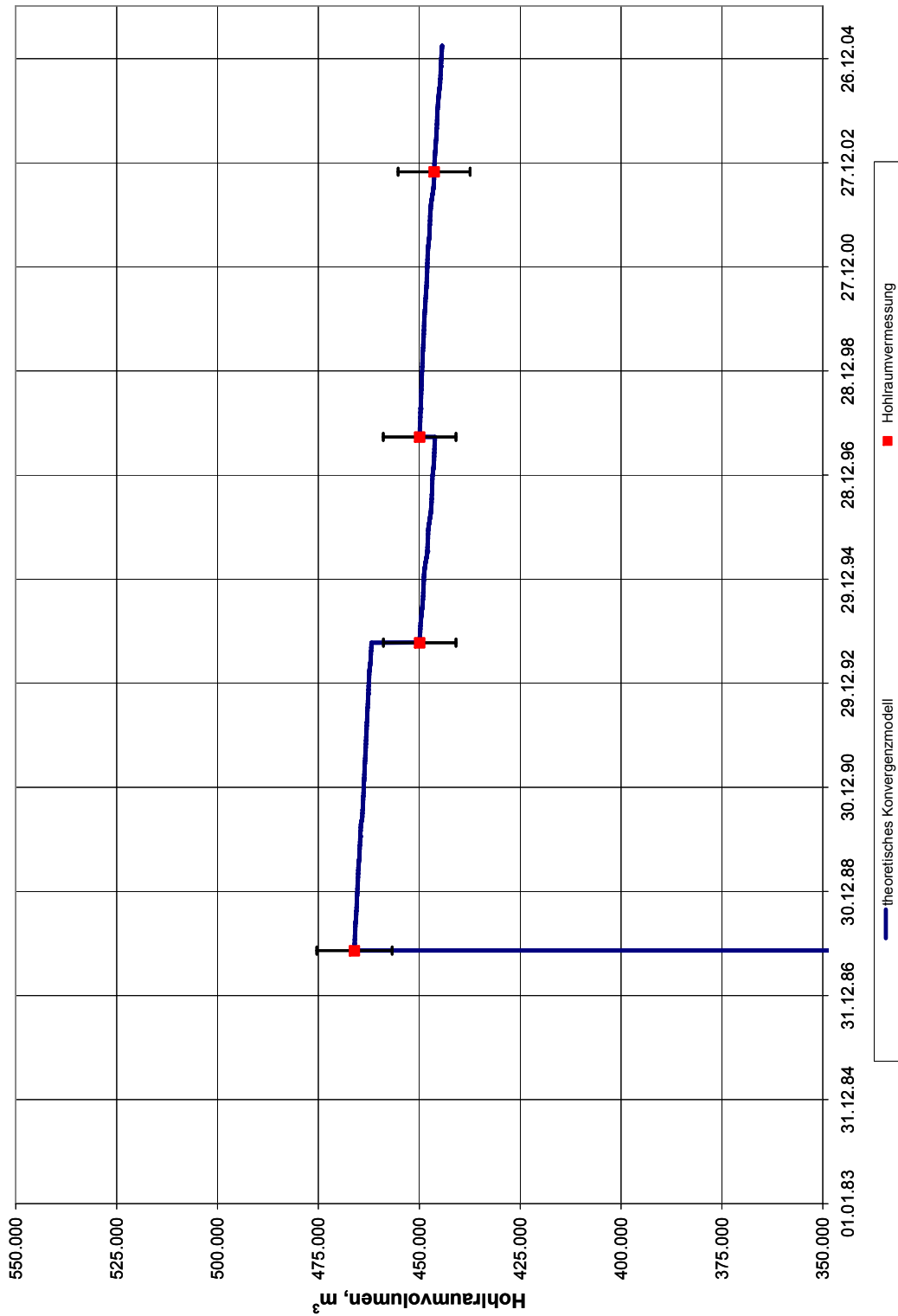


Bild 4.16: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung der Kaverne 3 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas



**Bild 4.17:** Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung der Kaverne 4 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

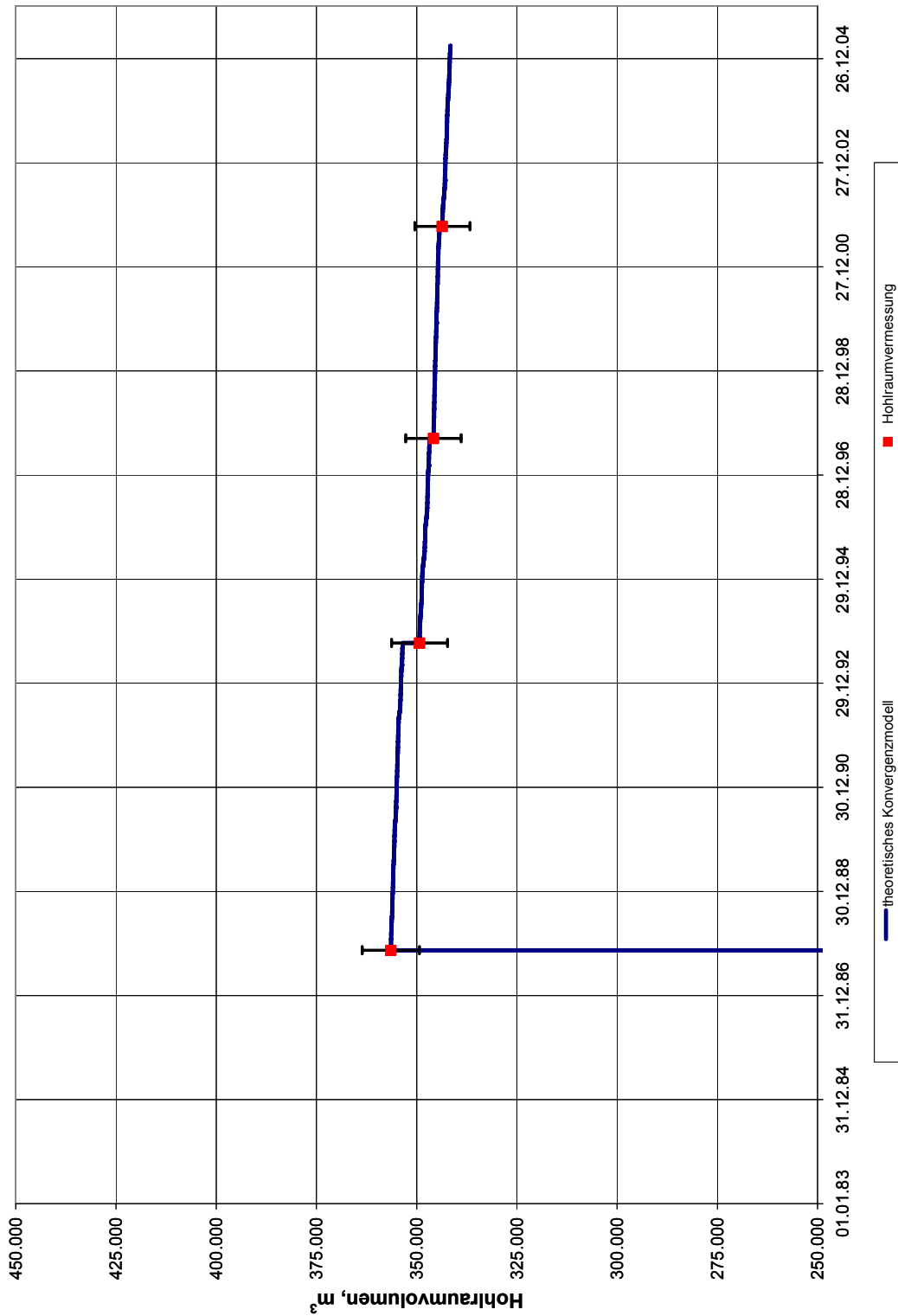
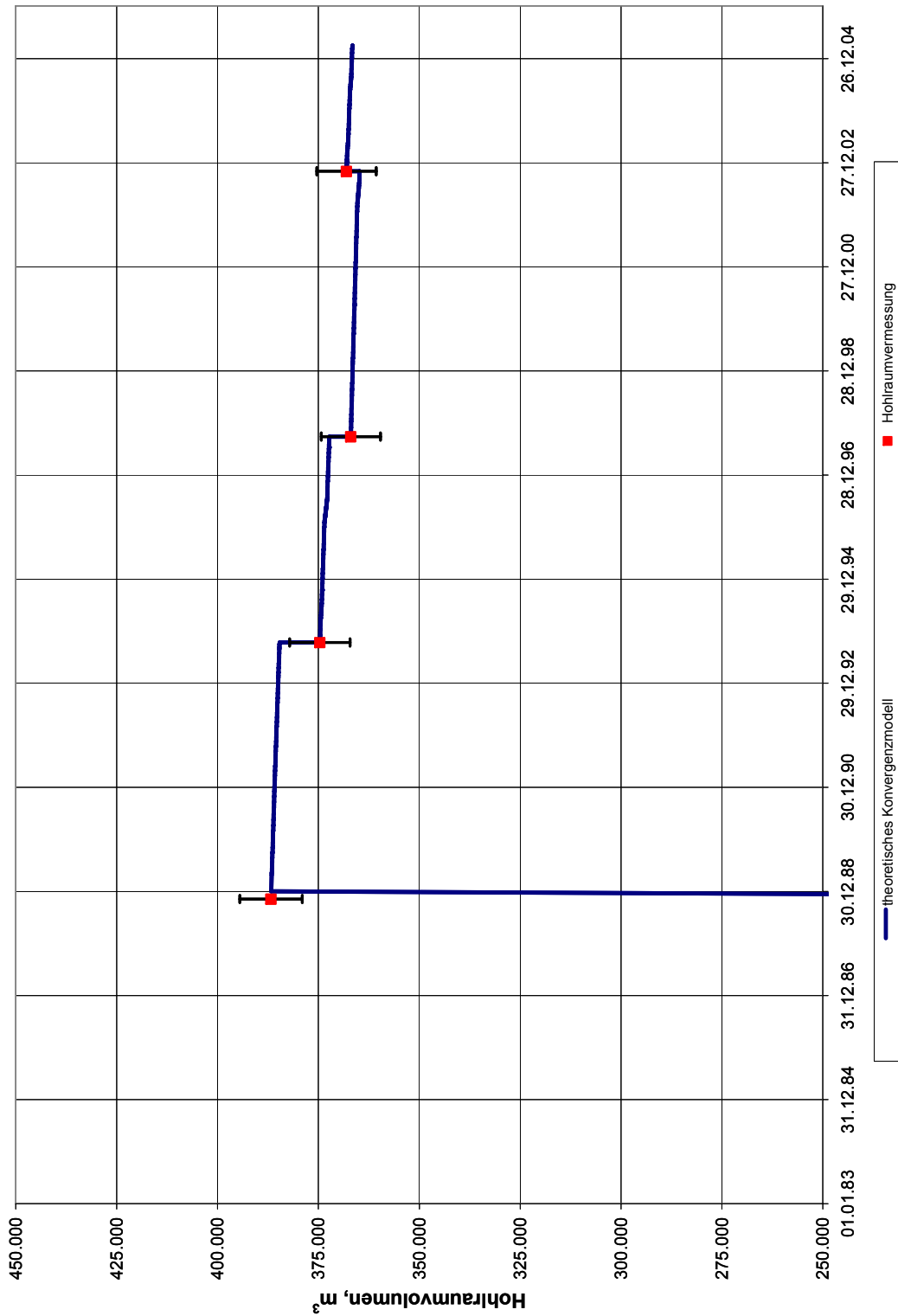


Bild 4.18: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung der Kaverne 5 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas





**Bild 4.19:** Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlraumentwicklung der Kaverne 6 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

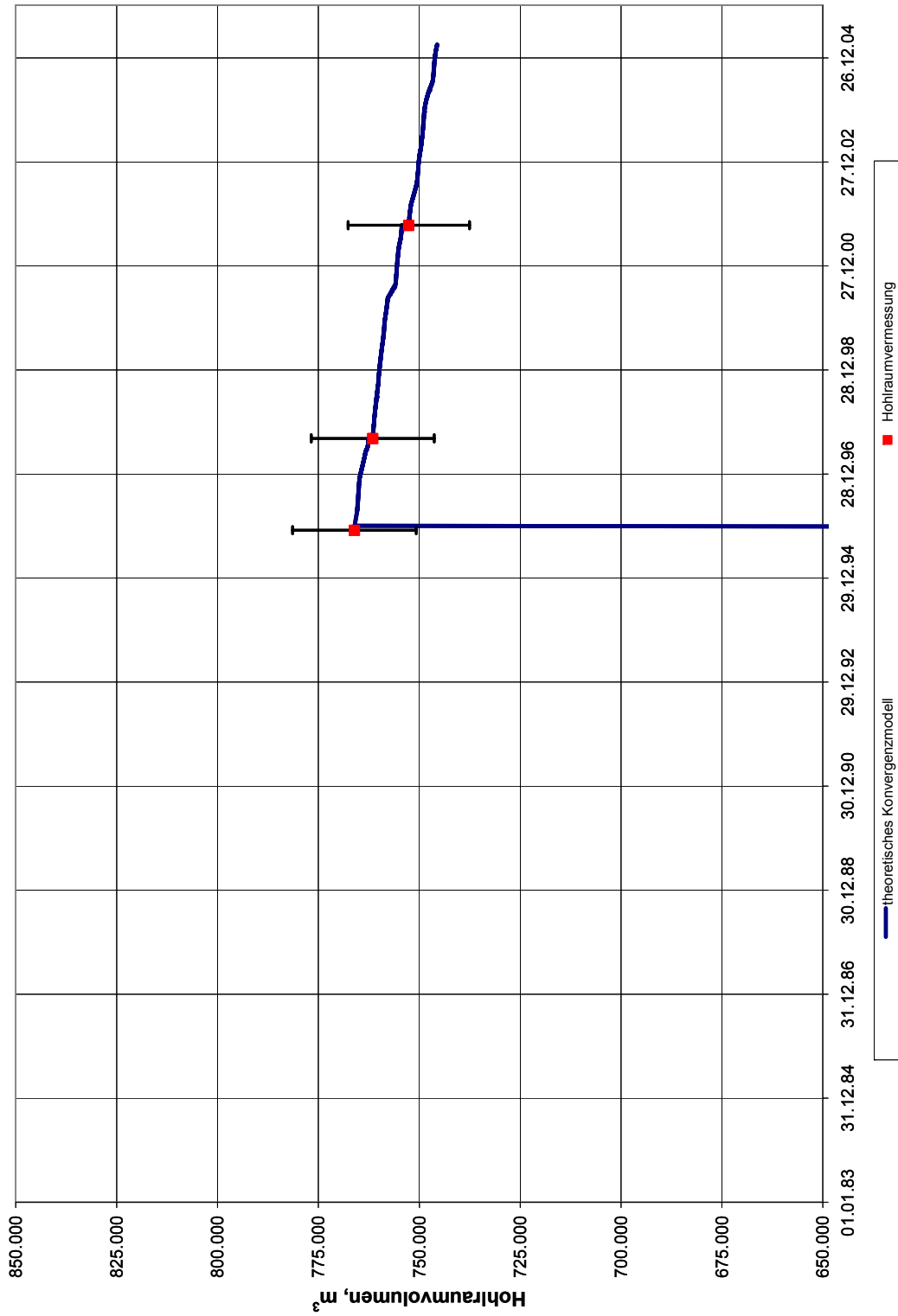
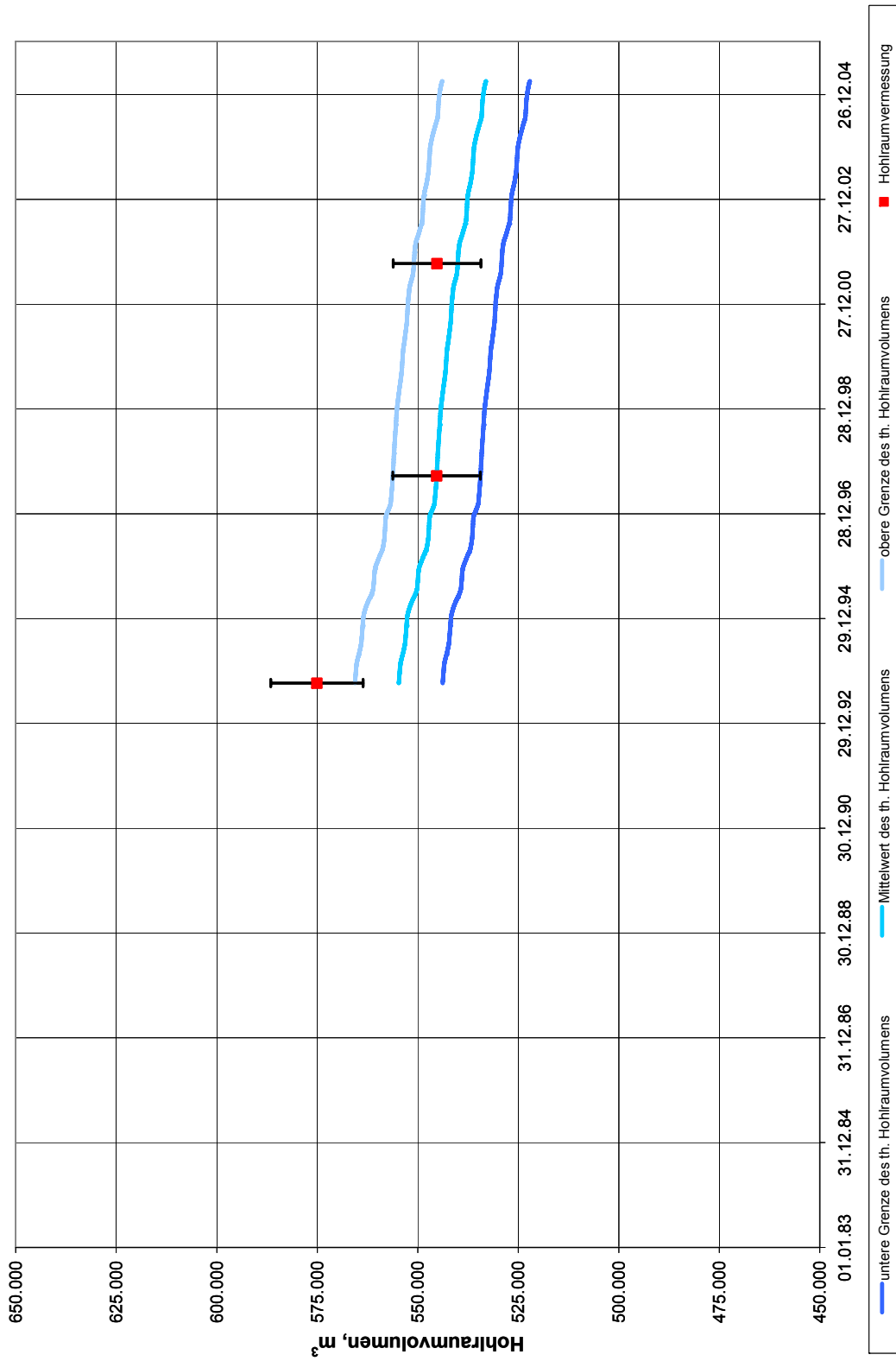


Bild 4.20: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohlräumentwicklung der Kaverne 7 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas

Wird bei Auftragung des am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten Verlaufes des Hohlraumvolumens die Anpassung des Ausgangswertes nicht für jedes einzelne Intervall vorgenommen, sondern, wie in Bild 4.21 für die Kaverne 1 gezeigt, die zweite Hohlraumvermessung als fester Referenzpunkt gesetzt, so ergibt sich ein über den gesamten untersuchten Betriebszeitraum durchgehender Kurvenverlauf des Hohlraumvolumens. Ergänzt um die Toleranzbreite der Messgenauigkeit wird das Band des möglichen Verlaufes des Hohlraumvolumens sichtbar. Sofern nun die obere oder die untere Grenze dieser Bandbreite in ihrem Verlauf die Werte der Hohlraumvermessungen abbildet, kann davon ausgegangen werden, dass das In-situ-Verformungsverhalten des die Kaverne umgebenden Salzgesteins durch die im theoretischen Konvergenzmodell angenommene Materialqualität gut wiedergegeben wird.

Wird diese Art der vergleichenden Darstellung des am theoretischen Konvergenzmodell berechneten zeitlichen Verlaufs des Hohlraumvolumens für die Bewertung mit hinzugezogen, kann das Verformungsverhalten des Salzgesteins in der Umgebung für 6 der 7 Kavernen des Feldes durch die als Referenz angenommene Materialqualität beschrieben werden. Für die Kaverne 2 des untersuchten Kavernenfeldes gelangt man durch schrittweise Anpassung der Materialqualität zu dem Ergebnis, dass die Verformungsfähigkeit des Salzgesteins in der Umgebung dieser Kaverne um einen Faktor 1,75 größer als bei der Referenzqualität bewertet werden muss. Diese Erkenntnis kann auch durch die geologische Beschreibung des Salzstockes in der Umgebung der Kavernen gestützt werden. Die Kaverne 2 ist als einzige Kaverne des Feldes in der Formation des Werrasteinsalzes angelegt.



**Bild 4.21:** Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufs der Hohraumentwicklung der Kaverne 1 des untersuchten Beispiels einer Kavernenanlage zur Speicherung von Erdgas - Fokussierung des theoretischen Hohraumverlaufes auf die 2. Vermessung

### In-situ-Test an einer Kaverne

Das Ziel des Tests war die Überprüfung des Verformungsverhaltens und der Festigkeit des Salzgesteins bei einem bisher im Betrieb nicht gefahrenen Beanspruchungsniveau. Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen im Labor, die im Rahmen der damaligen Dimensionierung und Auslegung der Kaverne durchgeführt worden waren, zeigten verglichen mit den Festigkeitswerten anderer Lokationen einen stärkeren Abfall bei geringen Manteldrücken auf, sodass eine In-situ-Überprüfung notwendig war. Während die Überprüfung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins sich auf den unmittelbar die Kaverne umgebenden Gebirgsraum bezieht, der insgesamt in Bewegung gerät (integrale Überprüfung), kann die Überprüfung der Festigkeit des Salzgesteins nur für den unmittelbar an den Hohlraum angrenzenden Randbereich des Salzgesteins erfolgen (lokale Überprüfung). Als Testkaverne wurde die Kaverne 2 des Feldes ausgewählt.

Ausgehend von dem aktuellen Druckniveau des Betriebes wurde in zwei Stufen der Innendruck der Kaverne auf ein Niveau unterhalb des bis dahin zulässigen Minimaldruckes abgesenkt und dieser Druck über die Dauer von 30 Tagen konstant gehalten. Hochauflösende Sonarvermessungen wurden zu Beginn der Druckabsenkung und am Ende der Minimaldruckphase in einem Teufenbereich über 2,8 m im Bereich der Referenzteufe der Kaverne vorgenommen. Die Referenzteufe wird bei hohen zylindrischen Kavernenformen im unteren Drittel der Kavernenhöhe angenommen und zeigt in der Regel den Ort der maximalen Beanspruchung der Kavernenwand an.

Die Auswertung des Tests ergab, dass ein integraler Vergleich der Sonarvermessungen nicht sinnvoll ist. Die Darstellung der Veränderung der Radien über den Zeitraum des Versuches ist in Bild 4.22 für jede vermessene Teufe der Kaverne dargestellt. Im Mittel ergibt sich eine Verkleinerung der Radien, die aufgrund der Verformungseigenschaften des Salzgesteins zu erwarten war, aber es zeigen sich in jeder Messteufe auch Vergrößerungen der Radien. Die auf die Messrichtung bezogene Auswertung der Veränderung der Radien, die in Bild 4.23 enthalten ist, zeigt deutlich zusammenhängende Bereiche dieser Vergrößerung der Radien über den untersuchten Zeitraum. Darüber hinaus lassen sich bezüglich der Messrichtung Bereiche identifizieren, in denen die Radiusveränderungen eine größere Streuung aufweisen, was auf eine größere Rauigkeit der Kavernenwand schließen lässt.

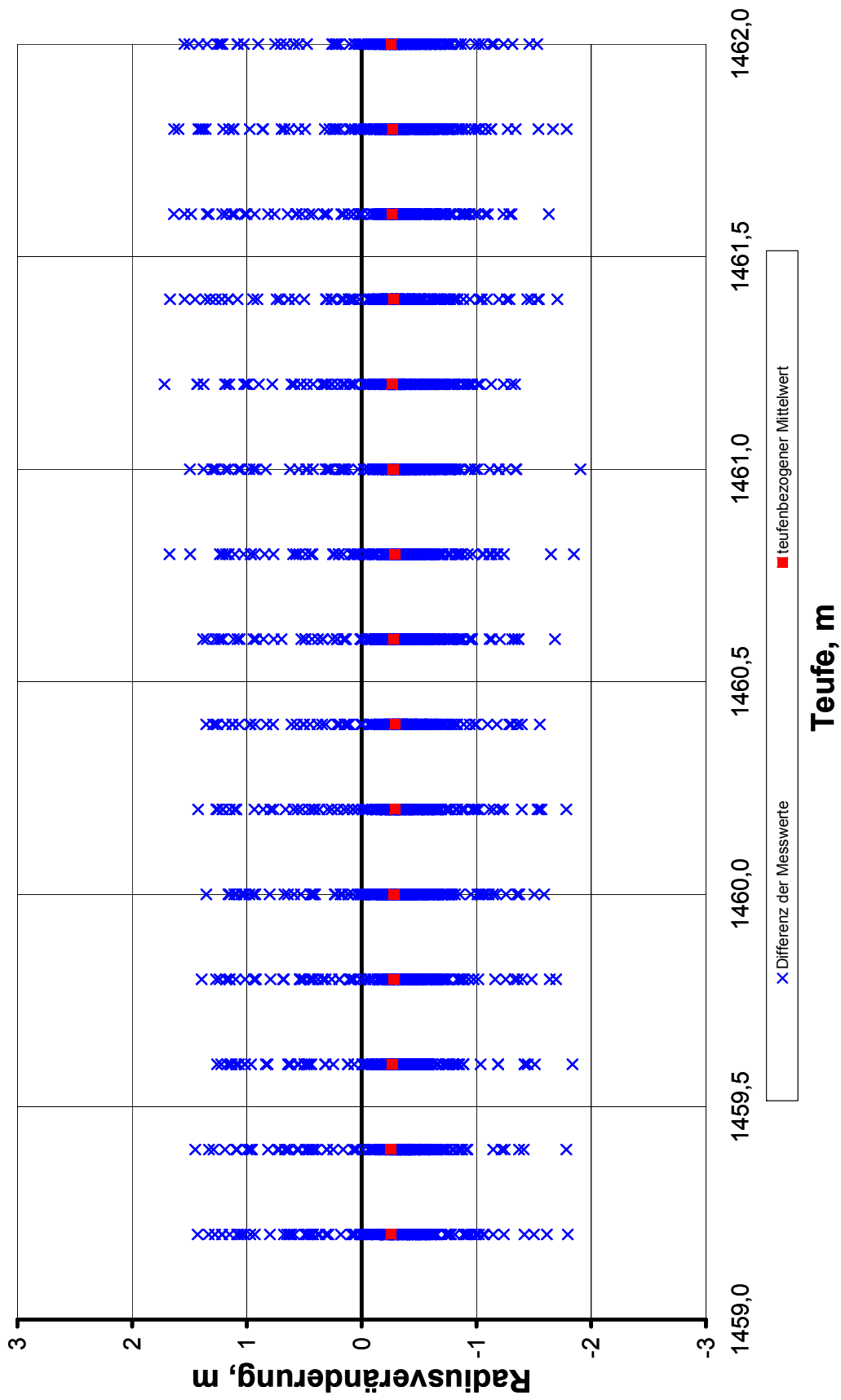


Bild 4.22: Veränderungen der Radien über den Testzeitraum des In-situ-Tests aufgetragen über die Messtiefen

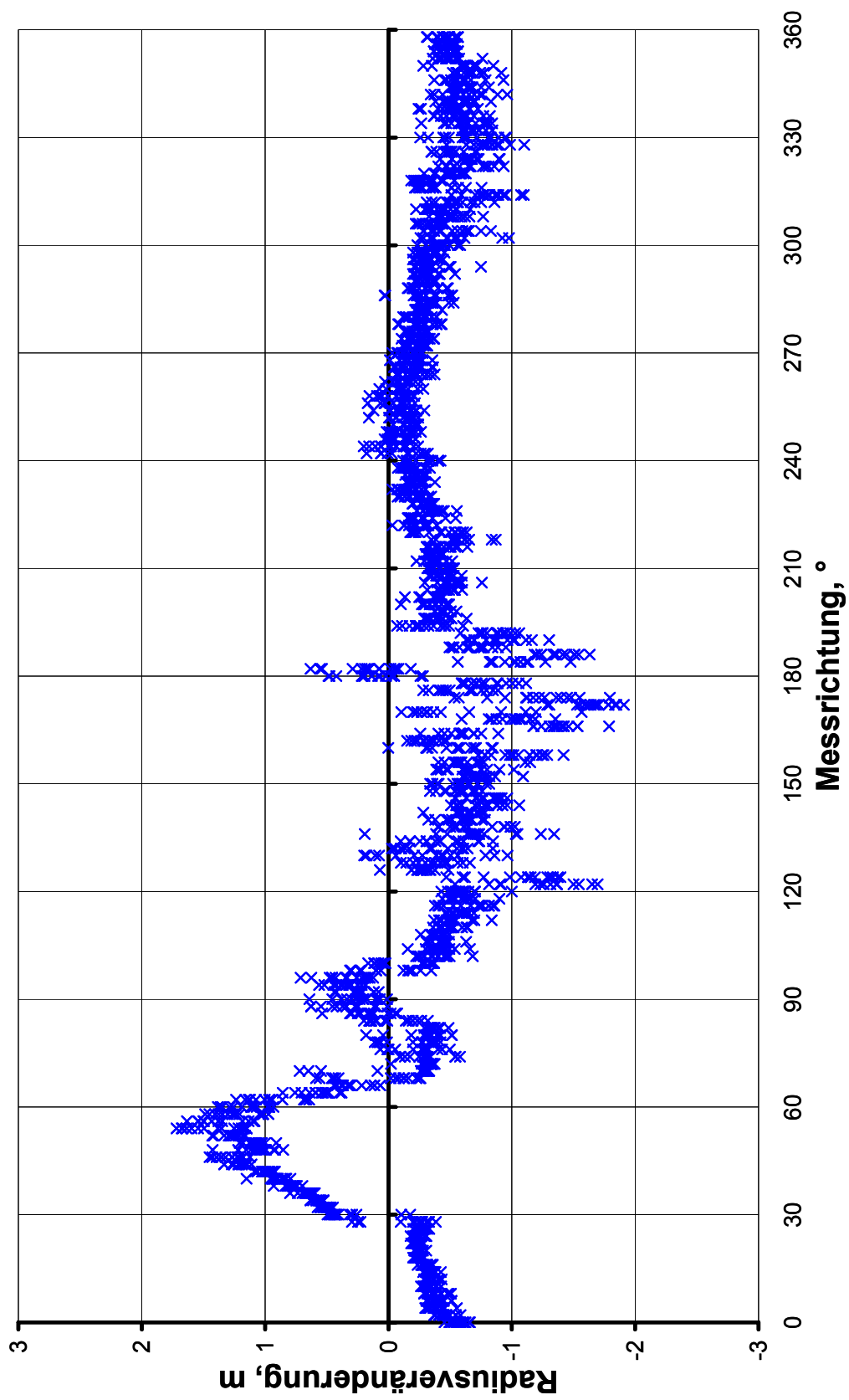


Bild 4.23: Veränderungen der Radien über den Testzeitraum des In-situ-Tests aufgetragen über die Messrichtung

Die daraufhin gewählte sektorielle Aufteilung des Kavernenquerschnitts lässt eine detaillierte Auswertung des Versuchs zu, deren Ergebnisse durch eine weitere Vermessung des Kavernensegmentes bestätigt werden. Wie in Bild 4.24 dargestellt, werden vier Sektoren mit unterschiedlichen Randbedingungen und Beobachtungen betrachtet:

- zwei Sektoren, in denen die Rauigkeit der Kavernenwandung zu größeren Ungenauigkeiten der Messergebnisse führen,
- ein Sektor, in dem eine Dilatanz des vermessenen Kavernenvolumens beobachtet worden ist,
- ein Sektor, in dem eine relative glatte Kavernenwandung angetroffen wurde

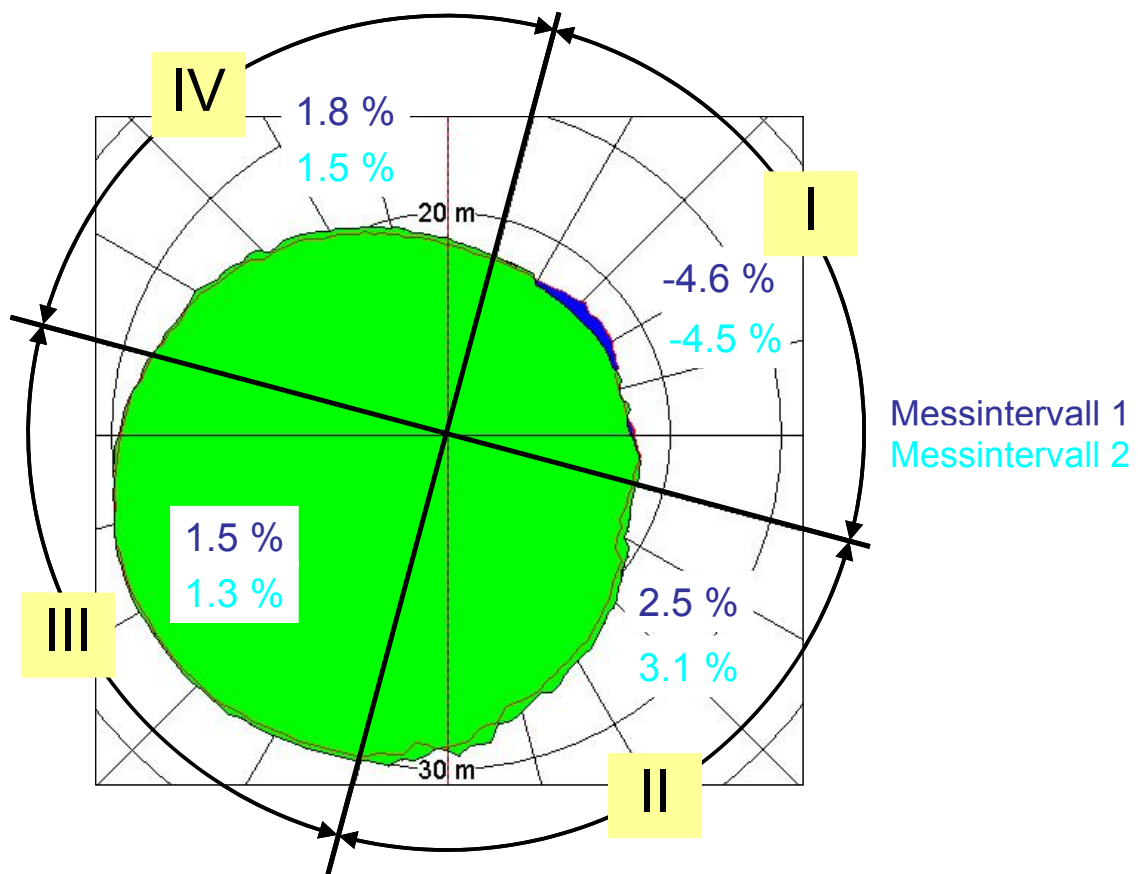


Bild 4.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Hohlraumvermessung und der sektoriellen Hohlraumkonvergenzen im Tiefenbereich der Präzisionsvermessungen

Für jedes dieser gewählten Segmente sind die aus den Messwerten der Hohlraumvermessungen ermittelten sektoriellen Konvergenzen ebenfalls in Bild 4.24 angegeben. Danach ergeben sich Hohlraumkonvergenzen in den beiden Sektoren mit relativ großer Wandrauigkeit von 1,5 bis 3,1 % und eine Hohlraumerweiterung von etwa 4,5 % in einem kleinen



Sektor. In diesem Sektor ist augenscheinlich ein Überschreiten der Festigkeit im unmittelbaren die Kaverne umgebenden Randbereich des Gebirges während des Versuches eingetreten. Der Sektor mit relativ geringer Rauigkeit der Kavernenwand ergibt eine Volumenkonvergenz von 1,3 bis 1,5 %.

Die Nachberechnung des In-situ-Versuchs hatte zum Ziel, einerseits das Verformungsverhalten des umgebenden Salzgesteins in der Umgebung der Kaverne zu bewerten und andererseits das Niveau der Beanspruchung des Salzgesteins direkt an der Kavernenwand zu berechnen, um daraus Rückschlüsse auf die lokale in situ vorhandene Festigkeit ziehen zu können. Die dabei angenommenen Innendruckverhältnisse sind für den Kavernenkopfdruck und den in der Berechnung angenommenen Kaverneninnendruck in Bild 4.25 wiedergegeben. Infolge von Ein- und Auslagerungen von Gas verändert sich die Temperatur in der Kaverne. Der angenommene Verlauf dieser mittleren Gastemperatur wurde in der Nachberechnung als Randbedingung der Temperatur des Gebirges an der Kavernenwand berücksichtigt. Dieser Temperaturverlauf ist ebenfalls in Bild 4.25 angegeben.

Der Vergleich der am theoretischen Modell ermittelten Konvergenz des Hohlraums zwischen den beiden Zeitpunkten der hochauflösenden Vermessung ergibt, dass der am theoretischen Modell berechnete Wert dem aus den Messungen ermittelten Wert für den Sektor mit relativ geringer Wandrauigkeit entspricht, wenn für das die Kaverne umgebende Salzgestein ein Verformungsverhalten angesetzt wird, wie es in vorausgehenden Untersuchungen des untertägigen Vergleichs des zeitlichen Verlaufs des Hohlraumvolumens für diese Kaverne ermittelt worden ist. Gegenüber der Referenzmaterialqualität, wie sie anhand von Laborversuchen für die Kaverne 7 des Feldes bestimmt worden ist, bedeutet dies eine um den Faktor 1,75 erhöhte Kriechfähigkeit. In Bild 4.26 wird die auf die jeweilige Teufe bezogene Konvergenz der Kaverne angegeben, die am Ende des Zeitintervalls des In-situ-Tests am theoretischen Modell ermittelt wird. Für den Teufenbereich, in dem die Präzisionsmessung durchgeführt worden ist, wird ein Wert von 1,2 % für die Volumenkonvergenz berechnet. Die sektorielle Auswertung der Hohlraumvermessungen ergibt für den relativ glatten Kavernenbereich einen Wert von 1,3 und 1,5 %.

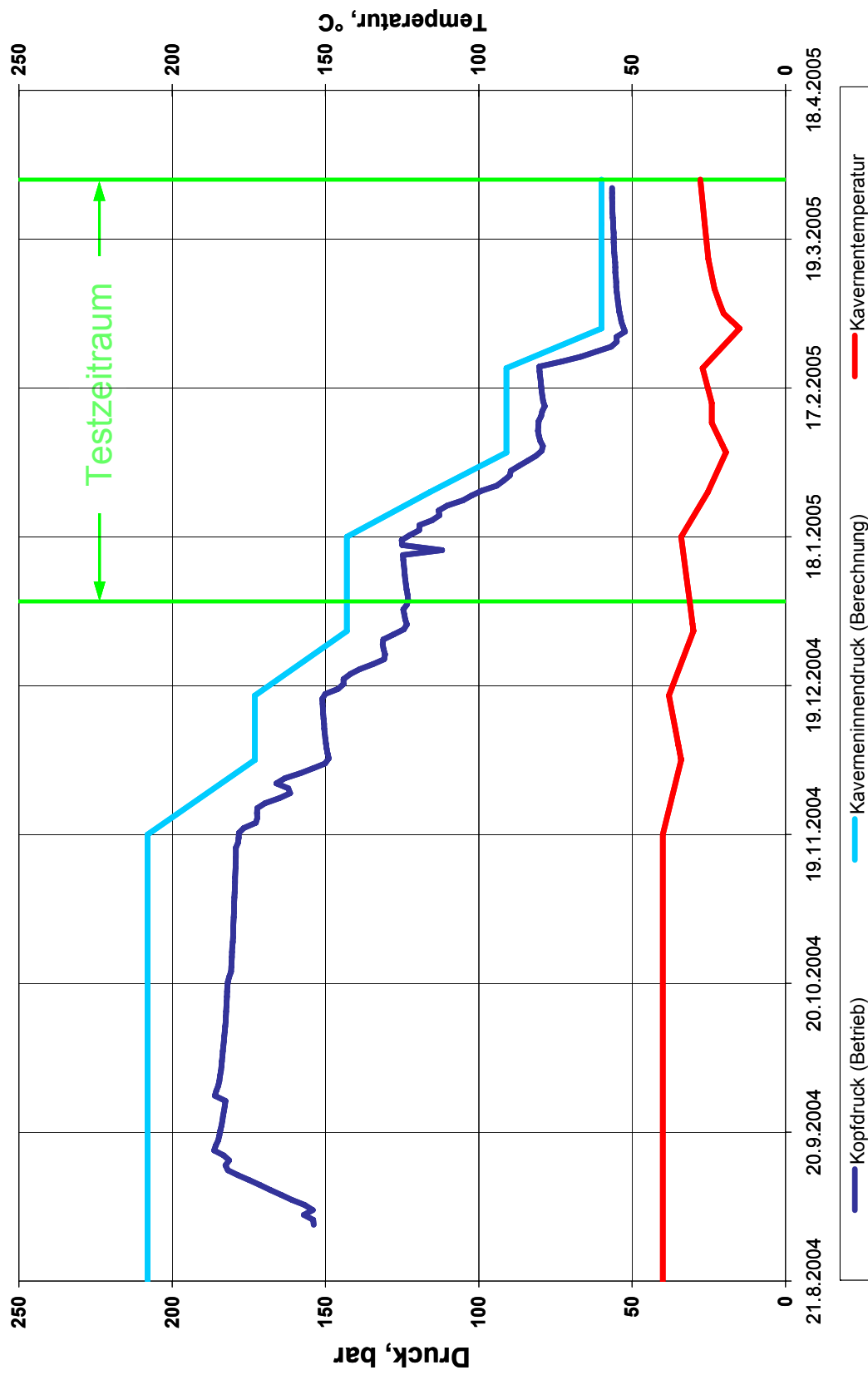


Bild 4.25: Gemessener Kopfdruckverlauf im Vergleich zum angenommenen Innendruck- beziehungsweise Temperaturverlauf in der Kaverne für die Nachrechnung des In-situ-Versuchs

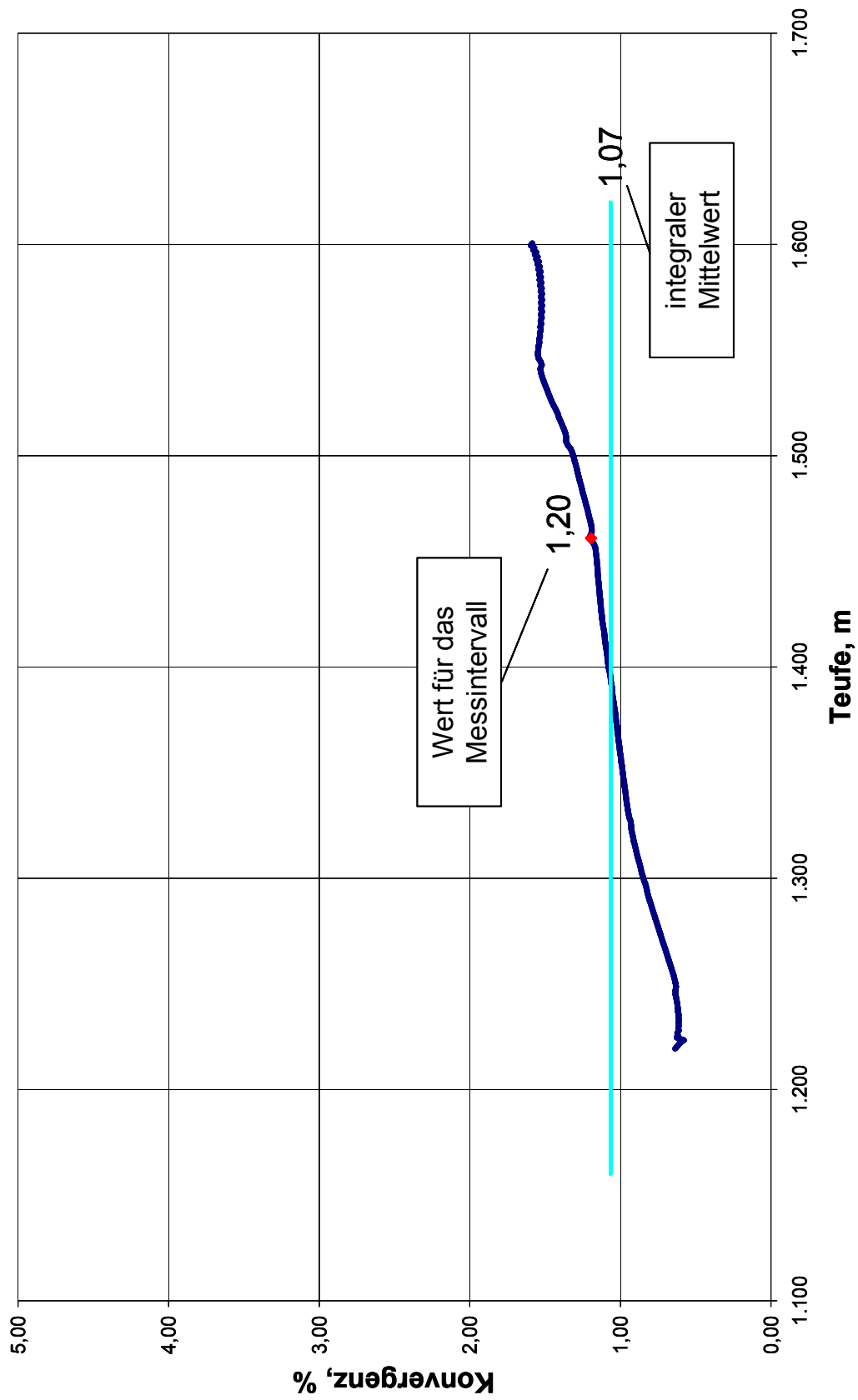


Bild 4.26: Berechnete tiefenbezogene Konvergenz über den Zeitraum des In-situ-Versuchs

Werden die über die Versuchzeit berechneten Werte der maximalen Beanspruchung des Salzgesteins im getesteten Teufenbereich zu der im Labor gemessenen Kurzzeitfestigkeit ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich aus der Nachrechnung des Versuches, dass das Niveau, bei dem das lokal begrenzte Versagen der Kavernenwand stattgefunden hat, bei einem Wert von etwa 41 % gelegen hat.

#### Bewertung der Ergebnisse

Durch die Anwendung der Untersuchungsmethode des untertägigen Vergleichs der zeitlichen Entwicklung des Hohlraumvolumens konnte gezeigt werden, dass das In-situ-Verformungsverhalten des Steinsalzes in der Umgebung der Kavernen des Feldes durch die auf der Grundlage von Laborversuchen ermittelte Referenzqualität beschrieben werden kann. Für das Salzgestein in der unmittelbaren Umgebung einer Kaverne weisen die Untersuchungsergebnisse auf ein erhöhtes Kriechvermögen hin. Dieses konnte auch anhand der Auswertungen des in dieser Kaverne durchgeführten In-situ-Tests bestätigt werden. Darüber hinaus ergeben sich aus der geologischen Beschreibung des Salzstockes Hinweise auf strukturelle Unterschiede in diesem Bereich im Verhältnis zu den anderen Kavernen des Feldes.

Die Auswertung des In-situ-Versuchs im Hinblick auf die unter Tage vorhandene Festigkeit des Salzgesteins führt zu einem Wert, der ein lokal begrenztes Versagen anzeigt, sich jedoch keinesfalls auf die gesamte Kontur des Testintervalls bezieht.

#### **4.5 Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und Erdgas**

Das untersuchte Kavernenfeld besteht aus mehreren Kavernen, die anfänglich zur Speicherung von Rohöl gesolt worden sind. Im Verlauf des Betriebes der Anlage wurden einige Kavernen zur Speicherung von Gas umgerüstet. In einer Erweiterung des Kavernenspeichers kamen in einem angrenzenden Teil des Feldes weitere Kavernen zur Rohölspeicherung dazu. Für diesen Bereich liegen Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zur Festigkeit und zum zeitabhängigen Verformungsverhalten vor.

Seitens des Betriebes liegen die Aufzeichnungen der Kopfdrucke der Kavernen über mehrere Jahrzehnte vor, ebenso wie eine entsprechend große Anzahl von Hohlraumvermessungen der Kavernen im Betrieb, sodass für jede Kaverne mehrere Betriebsintervalle nach der

Methode des lokalen untertägigen Vergleichs der Verlaufs des Hohlraumvolumens durchgeführt werden kann.

Aus den Auswertungen der Daten der Vermessung der Geländeoberfläche über den Kavernen liegen lediglich aus der jüngeren Zeit des Betriebes zwei Werte des daraus ermittelten Setzungsvolumens vor.

Ausgehend von der bestehenden Datenlage kann für die Kavernenanlage die Methode des Vergleichs des Verlaufs des Hohlraumvolumens zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins angewendet werden. Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Untersuchungen anderer Kavernenanlagen soll bei diesem Beispiel speziell der Frage nachgegangen werden, ob es gelingt, das In-situ-Verformungsverhalten des die Kavernen umgebenden Salzgesteins verlässlich zu bestimmen, auch wenn eine unabhängige Methode des Vergleichs nur eingeschränkt vorhanden ist.

Darüber hinaus besteht die Frage, ob ein grundsätzlicher Unterschied zwischen der Bewertung einer Ölspeicherkaverne und einer Gasspeicherkaverne besteht. Dazu eignet sich dieses gewählte Beispiel einer Kavernenanlage besonders, da sowohl Öl- und Gasspeicherkavernen im Feld nebeneinander angelegt sind, als auch die Gasspeicherkavernen eine vorlaufende Ölspeicherphase aufweisen. Grundsätzlich ist bei einem Wechsel der Betriebsart zu bemerken, dass das Salzgestein um die Kaverne zwar dasselbe bleibt, die Beanspruchung des Salzgesteins im Rahmen des Ölspeicherbetriebs jedoch relativ gering und gleichmäßig ist.

#### Untertägiger Vergleich der Hohlraumkonvergenz bezogen auf die einzelnen Kavernen

Für die Referenzqualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins werden die im Labor ermittelten Werte anhand des Kernmaterials aus dem angrenzenden erweiterten Feldesteil verwendet.

Für zwei Ölspeicherkavernen, die nicht in dem erweiterten Teil des Kavernenfeldes liegen, kann anhand der Bilder 4.27 und 4.28 für die Auswertung der Speicherphase gezeigt werden, dass die Referenzqualität für das Verformungsverhalten des Salzgesteins auf die Umgebung dieser Kavernen übertragen werden kann. Am Ende des letzten gezeigten Vermes-

sungsintervalls fand in beiden Fällen ein Vollumschlag der Kaverne statt, der ebenfalls gut durch das theoretische Konvergenzmodell wiedergegeben wird.

Die folgenden Beispiele des Vergleichs der zeitlichen Entwicklung des untertägigen Hohlraumvolumens, dargestellt in den Bildern 4.29 bis 4.32, zeigen, dass es gelingt, die unterschiedlichen aufeinander folgenden Betriebsphasen der Ölspeicherung, Umrüstung und Gasspeicherung durch das theoretische Konvergenzmodell mit einer einzigen zugrunde gelegten Materialqualität durchgehend abzubilden. Die berechneten Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Hohlraumvolumina. Dabei führt die Bewertung der lokalen Qualität des Verformungsverhaltens des Salzgesteins sowohl dazu, dass die als Referenz angenommene Materialqualität auf die Umgebung dieser Kavernen übertragen werden kann (Bilder 4.29 und 4.30), als auch dazu, dass in der Umgebung der Kavernen mit einer höheren Kriechfähigkeit des Salzes zu rechnen ist. Im zuletzt genannten Fall ist den Berechnungen ein um den Faktor 1,7 (Beispiel 5 in Bild 4.31) und 1,8 (Beispiel 6 in Bild 4.32) größeres Kriechvermögen zugrunde gelegt.

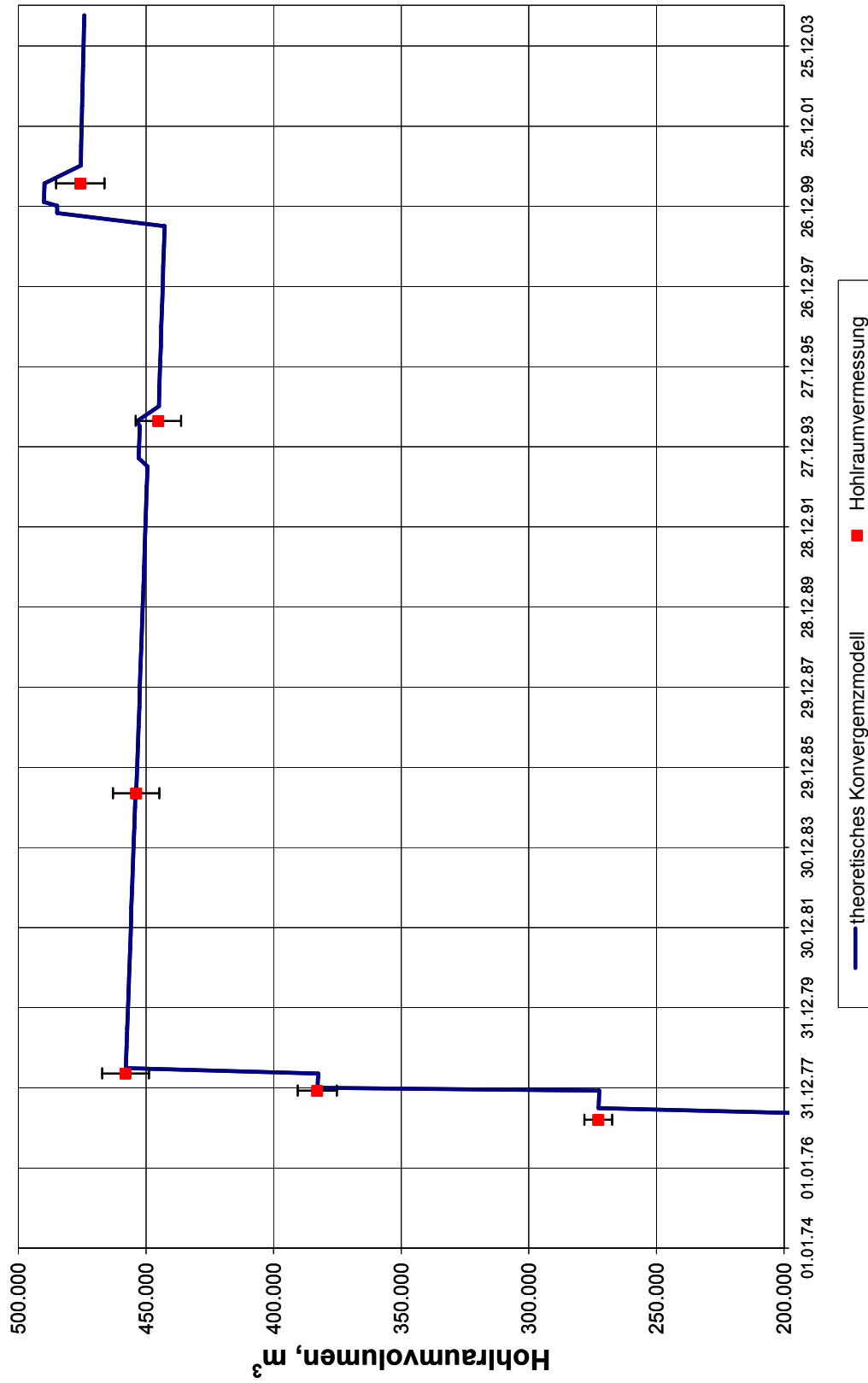


Bild 4.27: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer Ölspeicherkaverne für das untersuchte Beispiel einer Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und von Gas – Beispiel I

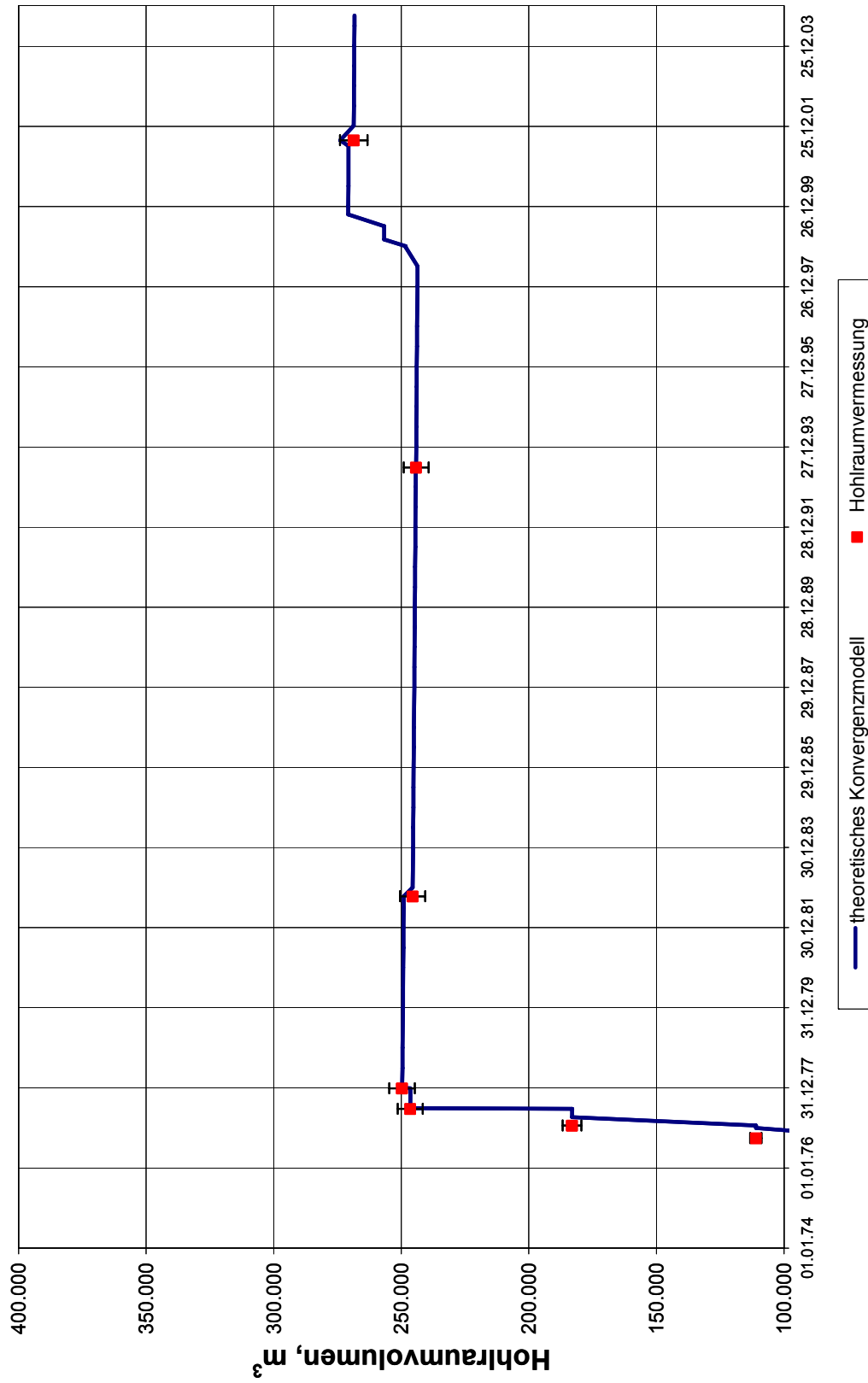


Bild 4.28: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer Ölspeicherkaverne für das untersuchte Beispiel einer Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl und von Gas – Beispiel 2



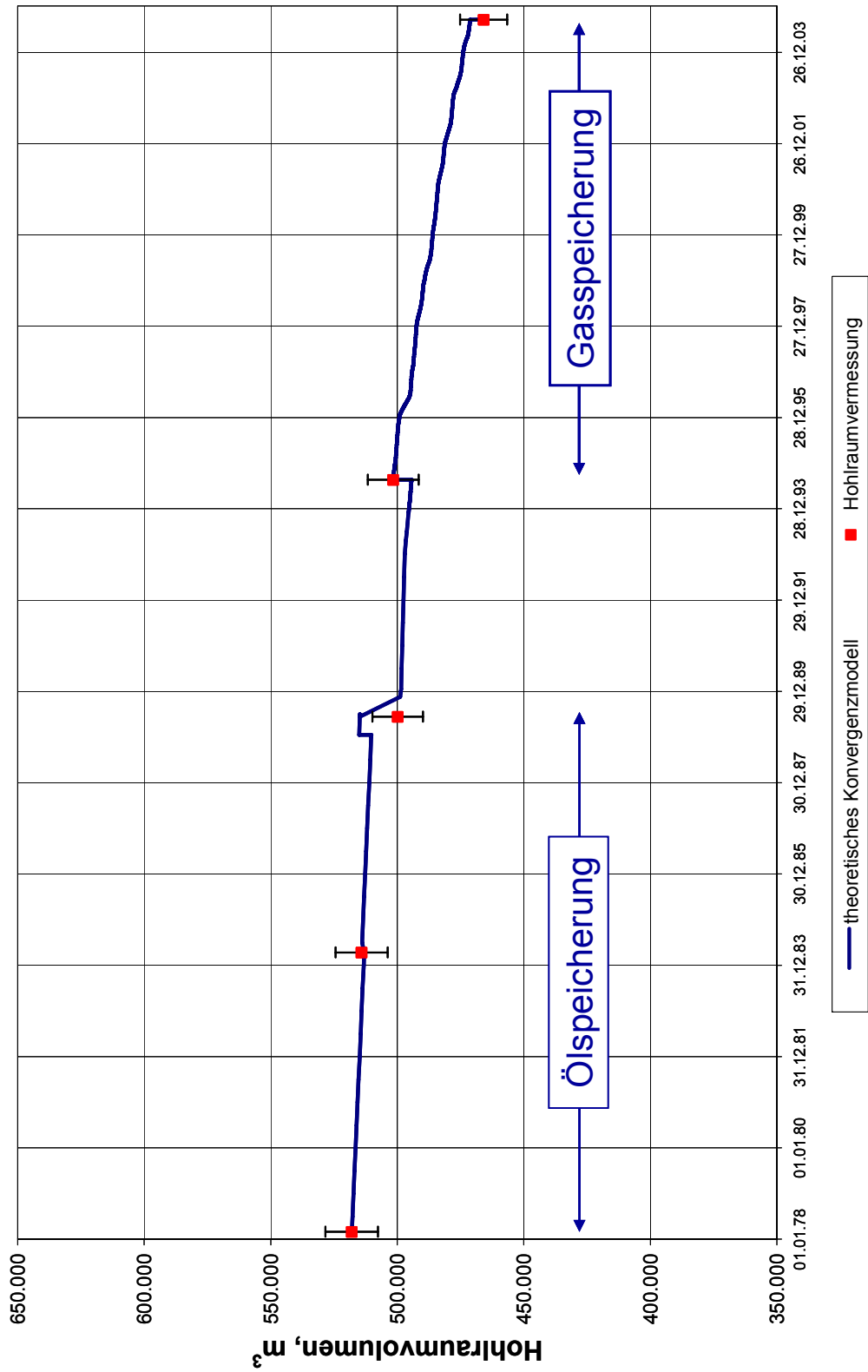


Bild 4.29: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer auf Gasspeicherung umgerüsteten Kaverne des untersuchten Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl und Gas – Beispiel 3

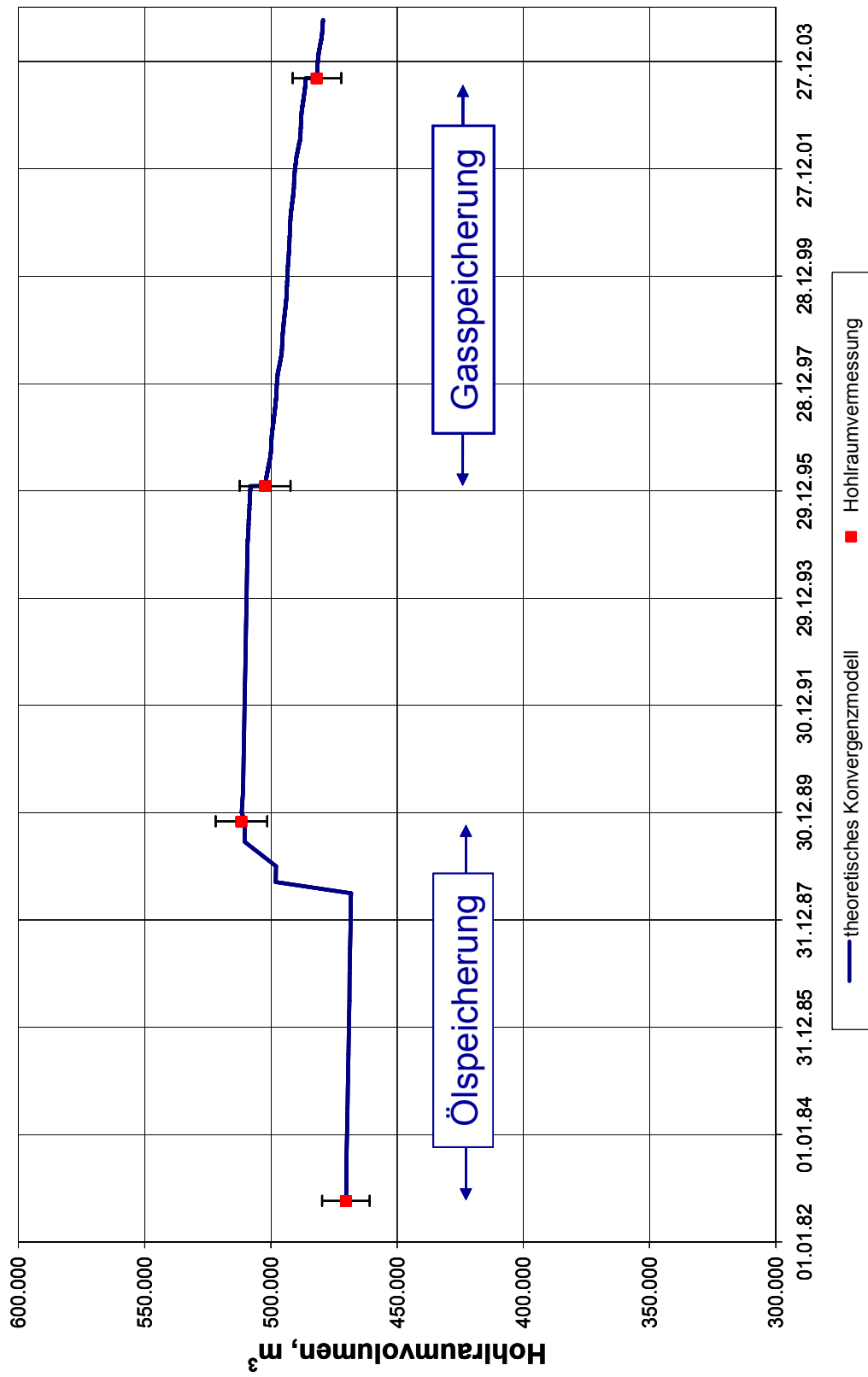


Bild 4.30: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer auf Gasspeicherung umgerüsteten Kaverne des untersuchten Kavernefeldes zur Speicherung von Rohöl und Gas – Beispiel 4

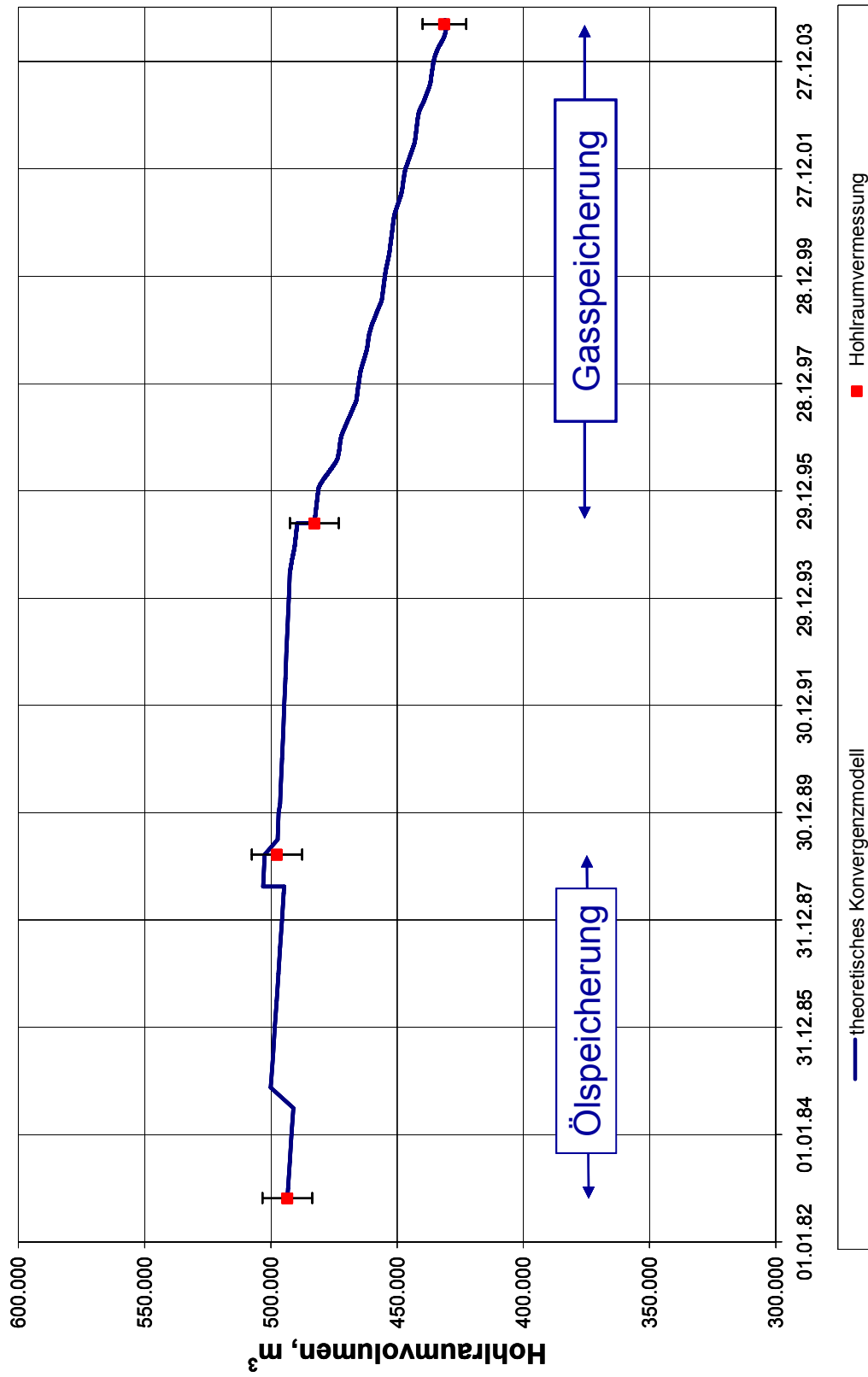


Bild 4.31: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer auf Gasspeicherung umgerüsteten Kaverne des untersuchten Kavernefeldes zur Speicherung von Rohöl und Gas – Beispiel 5

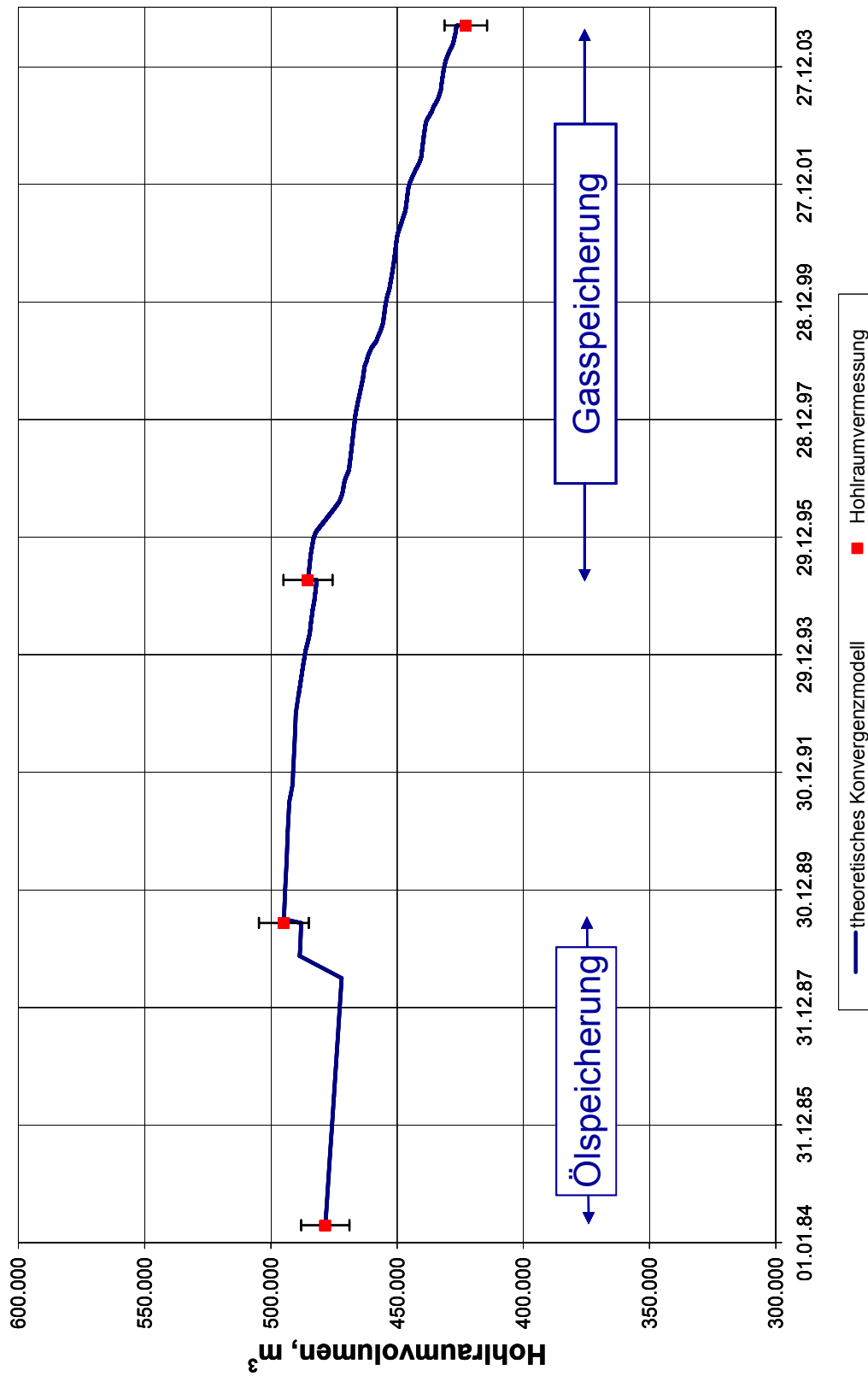


Bild 4.32: Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Verlauf des Hohlraumvolumens einer auf Gasspeicherung umgerüsteten Kaverne des untersuchten Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl und Gas – Beispiel 6

Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Bodensenkungen einzelner Messpunkte des Vermessungsnetzes an der Geländeoberfläche

Eine Möglichkeit der Überprüfung der Bewertung des Verformungsverhaltens auf der Grundlage der Methode des untertägigen Vergleichs der Hohlraumvolumina ergibt sich durch den Vergleich der anhand dieses Modells berechneten zeitlichen Verläufe der Bodensenkungen mit den gemessenen Werten.

Bei der Berechnung der Bodensenkungen eines Messpunktes wird hier davon ausgegangen, dass der Grenzwinkel der Bodensenkungen sich über einen Zeitraum von 25 Jahren nach Beginn der Solung von einem anfänglichen Wert von  $45^\circ$  auf  $35^\circ$  verringert. Diese Annahme berücksichtigt die Feldbeobachtungen, dass sich die Setzungsmulde mit den Jahren des Kavernenbetriebes ausdehnt.

Für die Umgebung der Kavernen, deren Verlauf des Hohlraumvolumens in den Bildern 4.31 und 4.32 wiedergegeben ist, wird dieser Vergleich der Bodensenkungen durchgeführt. Die beiden Kavernen liegen innerhalb des Feldes in direkter Nachbarschaft, sodass sich die Setzungsmulden beider Kavernen stark überschneiden. In den Bildern 4.33 und 4.34 werden die Verlaufskurven der Bodensenkungen für die Messpunkte direkt oberhalb der jeweiligen Kaverne dargestellt. Den Messwerten sind dabei zwei Kurven berechneter Werte gegenübergestellt. Eine Kurve basiert auf der Annahme der Referenzqualität des Salzgesteins, die andere auf der Annahme der bewerteten Qualität des Materials. Für beide betrachteten Messpunkte ergibt sich durch die Bewertung des Verformungsverhaltens eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten der Bodensenkung.

Auch für einen anderen Messpunkt, der zwischen zwei Kavernen liegt, die ebenfalls nach der Bewertung ihres Verlaufes des Hohlraumvolumens eine erhöhte Kriechfähigkeit des Salzgesteins in ihrer Umgebung aufweisen, kann gezeigt werden, dass das Ergebnis der Bewertung zu einer qualitativ besseren Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten der Bodensenkungen führt (Bild 4.35).

Dass dies nicht für alle untersuchten Bereiche des Kavernenfeldes gilt, zeigt sich in Bild 4.36, da hier die Variation der Materialqualität in der Bewertung der Senkungsverläufe zu keiner klaren Bewertung führt.

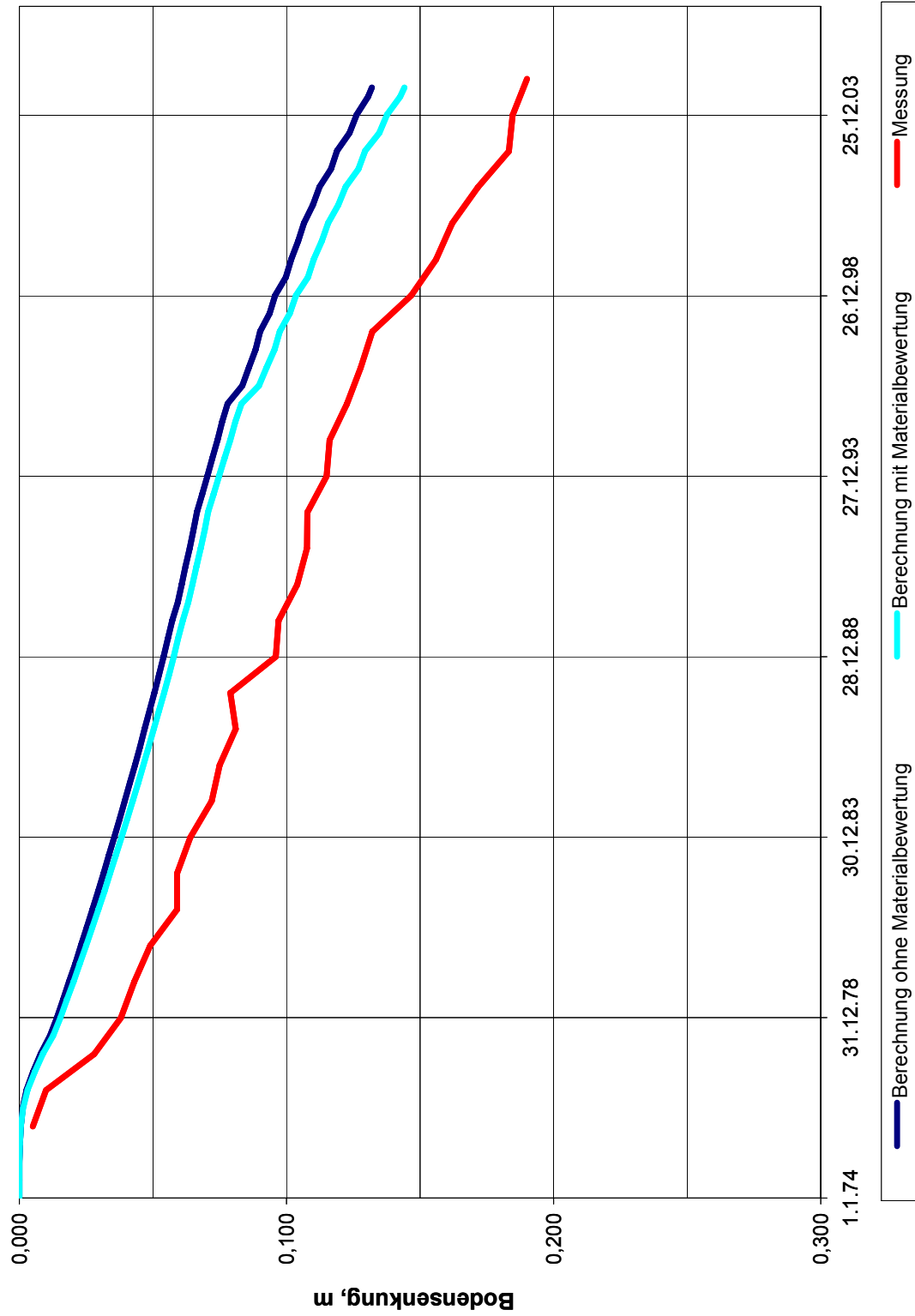


Bild 4.33: Senkungsverläufe eines Messpunktes oberhalb der Beispieltkaverne 5

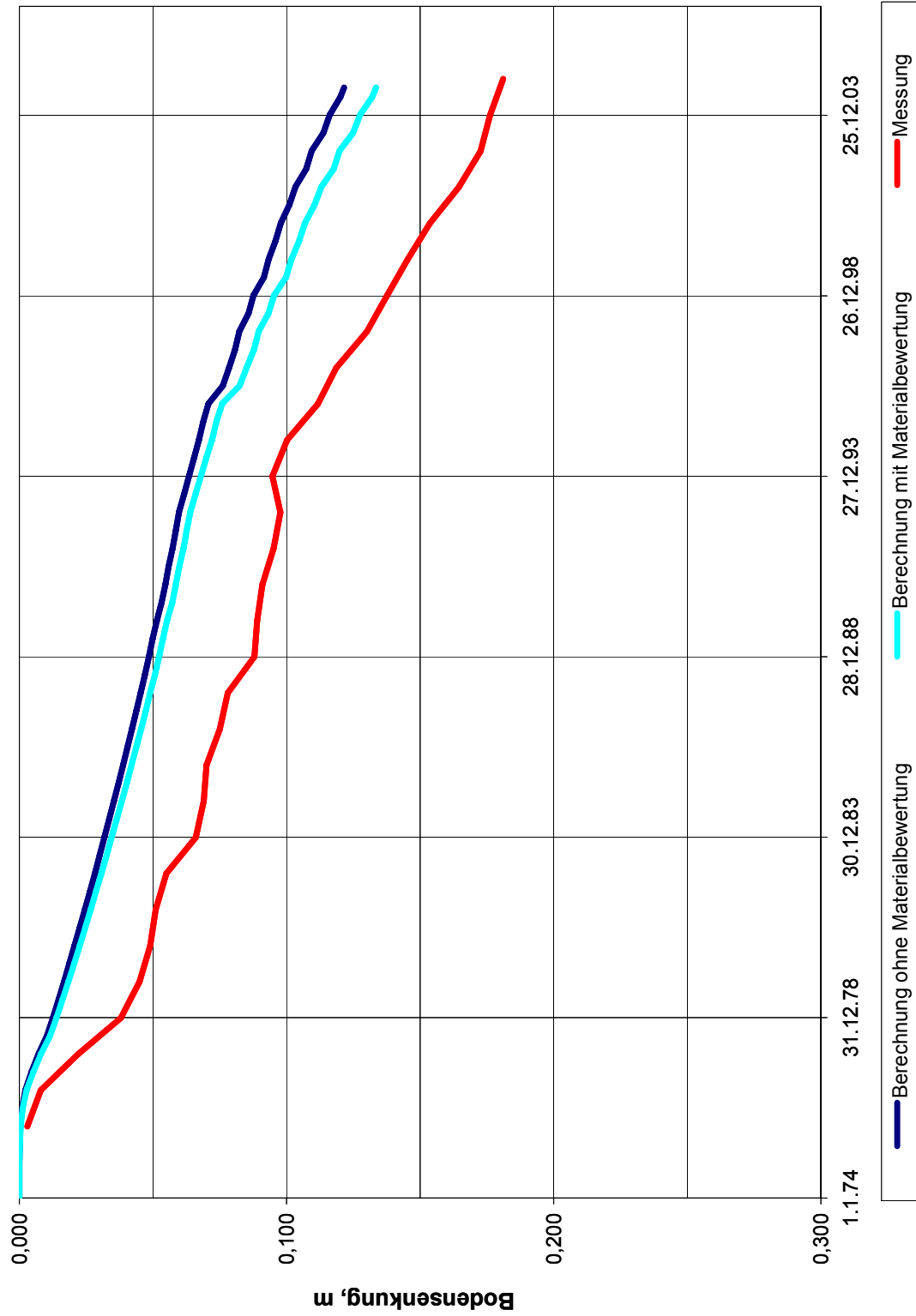


Bild 4.34: Senkungsverlauf eines Messpunktes oberhalb der Beispielkaverne 6

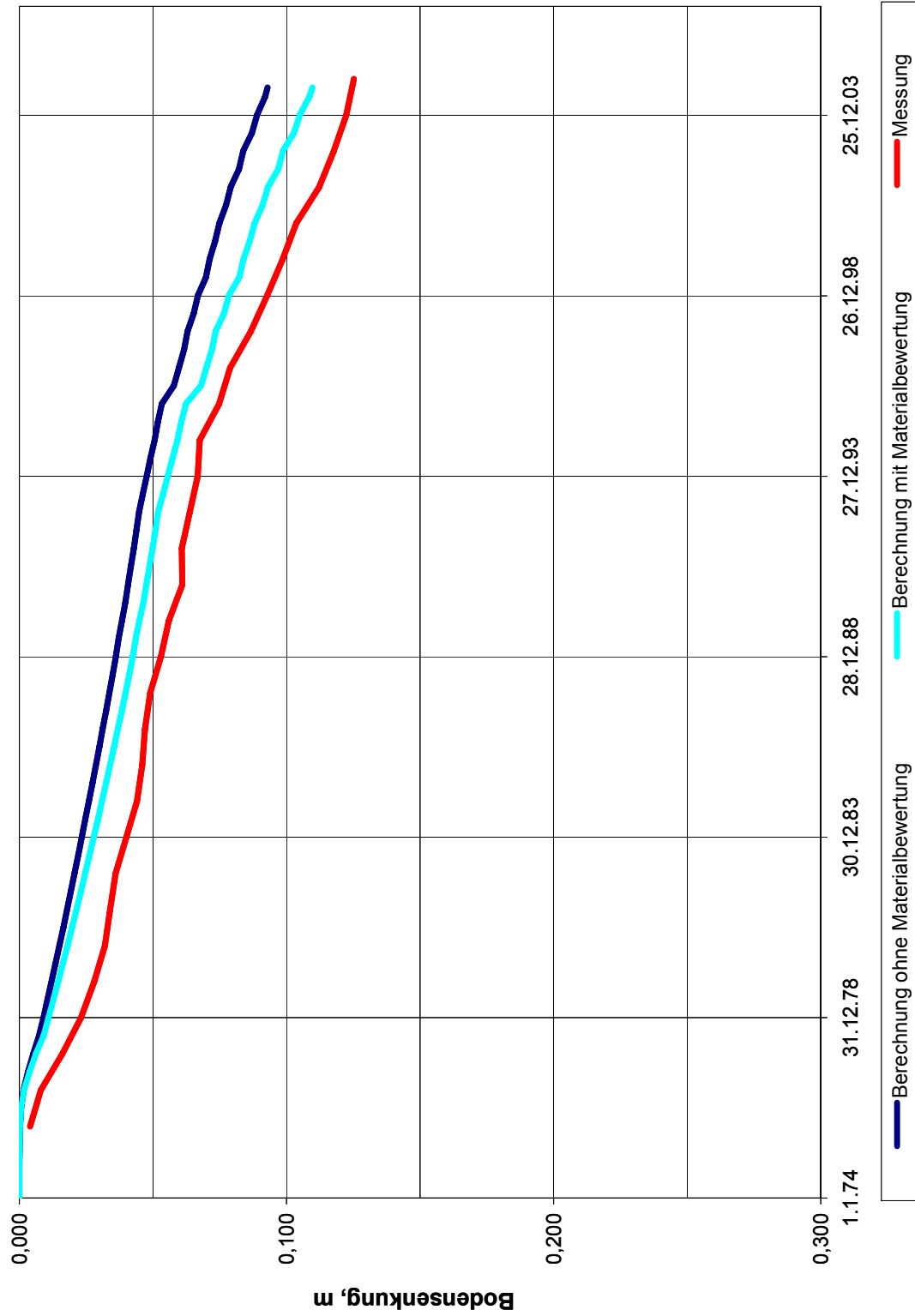


Bild 4.35: Senkungsverlauf eines Messpunktes zwischen zwei Kavernen mit und ohne Bewertung des Materialverhaltens



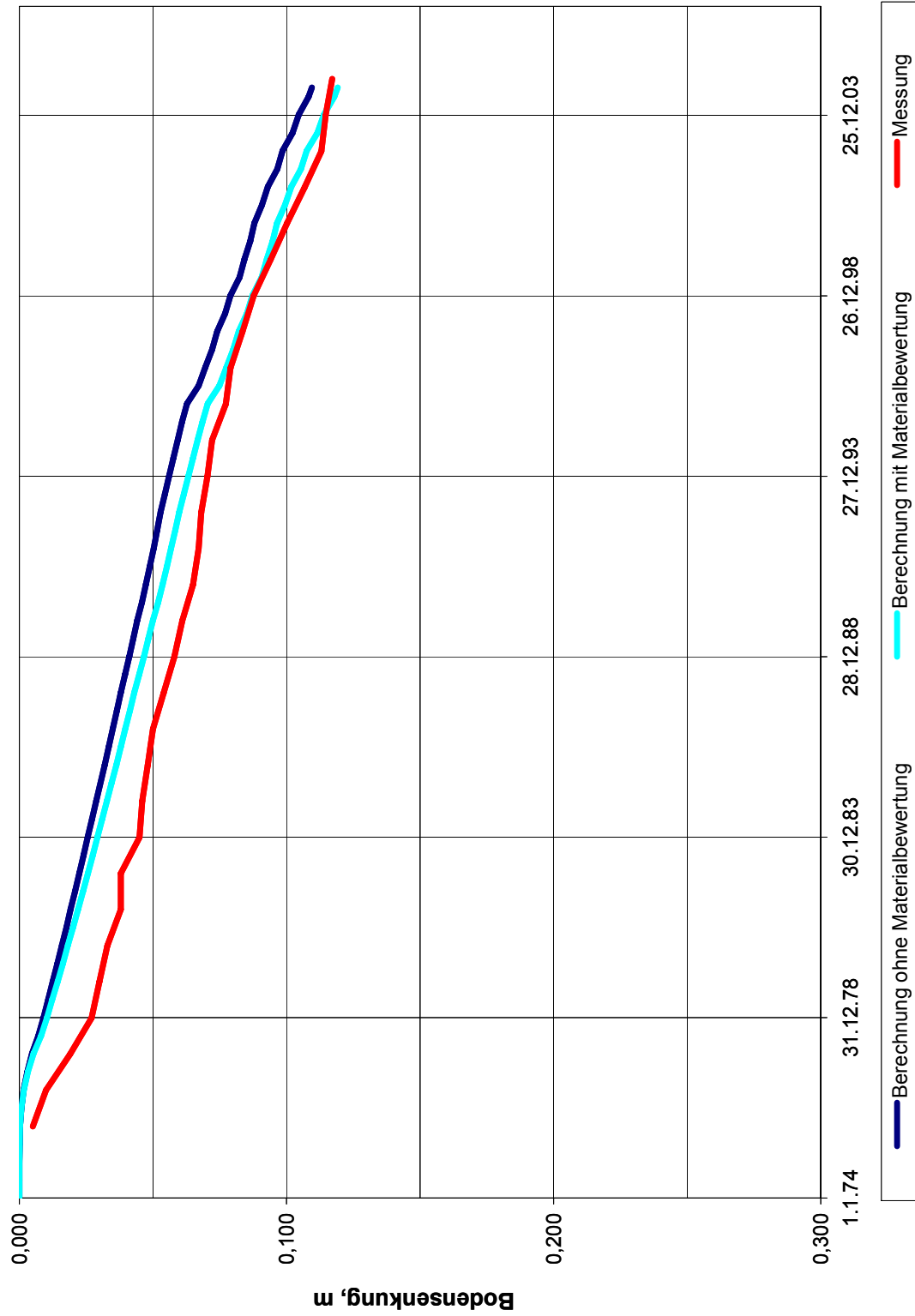


Bild 4.36: Senkungsverlauf eines Messpunktes oberhalb einer Kaverne mit und ohne Bewertung des Materialverhaltens – Beispiel 2

### Bewertung der Ergebnisse

Durch die Anwendung der Methode des lokalen untertägigen Vergleichs der Hohlraumentwicklung kann für die überwiegende Zahl der Kavernen gezeigt werden, dass in ihrem unmittelbar umgebenden Gebirgsbereich die anhand von Bohrkernmaterial aus einer Bohrung des Erweiterungsgebietes des Feldes gewonnenen Materialdaten zur Beschreibung des Kriechverhaltens des Salzgesteins übertragen werden können. In der Umgebung einzelner Kavernen zeigt sich aufgrund der theoretischen Untersuchungen eine höhere Verformungsfähigkeit des Salzgesteins. Unter Verwendung der jeweils ermittelten Materialqualität können alle Phasen des Speicherbetriebes (Ölspeicherung – Umrüstung – Gasspeicherung) gut abgebildet werden.

Durch Vergleich des gemessenen Verlaufs der Bodensenkungen einzelner Messpunkte im Einflussbereich der Kavernen kann für einige Gebiete des Kavernenfeldes, die aufgrund der Methode des untertägigen Vergleichs eine erhöhte Verformungsfähigkeit aufweisen, eine qualitative Bestätigung gefunden werden. Auf der Grundlage der Bewertung der Bodensenkungsverläufe lassen sich jedoch keine verlässlichen quantitativen Angaben über das Verformungsverhalten des Salzgesteins unter Tage machen, da wegen der weiträumigen Überlagerung des Einflussbereiches der Senkungsbewegungen infolge der Konvergenz aller Kavernen des Feldes, die im Verhältnis der großen Teufenlage der Kavernen zu ihrem relativ geringen Abstand untereinander begründet liegen (siehe HARTMANN (1984)), eine Glättung der Spitzenwerte der Setzungen, verursacht durch den Betrieb einzelner Kavernen, vorgenommen wird.

## **5 Bewertung der Untersuchungsmethoden und ihrer Ergebnisse**

Die vorgestellten Untersuchungen hatten das Ziel, das Materialverhalten des Salzgesteins in der Umgebung von Kavernen anhand von In-situ-Daten im Hinblick auf das Verformungsverhalten und auf die Festigkeit zu bewerten. Bei der Untersuchung der Festigkeit im In-situ-Versuch handelt es sich um eine lokale Überprüfung, die sich direkt auf den hohlraumnahen Randbereich des Gebirges bezieht. Die Untersuchung des In-situ-Verformungsverhaltens erfasst dagegen integral den gesamten Gebirgsraum um die Kaverne, der infolge der Beanspruchung des Gebirges in Bewegung gerät.

Da die Bewertung eines In-situ-Tests zur Überprüfung der Festigkeit des Salzgesteins im Allgemeinen auf einer Nachberechnung der im Versuch vorhandenen Beanspruchung beruht, hängt sie auch von der Annahme des Verformungsverhaltens des Salzgesteins ab. Im Folgenden werden daher die Einflussparameter der Methoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins in der Umgebung von Kavernen genauer untersucht.

Die Ergebnisse der untersuchten Kavernenprojekte zeigen, dass es gelingt, das Verformungsverhalten des die Kavernen umgebenden Salzgesteins auf der Grundlage der Anwendung von indirekten Untersuchungsmethoden, die auf In-situ- und Betriebsdaten aufbauen, großräumig zu beschreiben und zu bewerten. Im Mittelpunkt dieser Methode zur Bewertung steht ein theoretisches Konvergenzmodell, für das unterschiedliche Eingabeparameter angegeben werden müssen, um die darin berücksichtigten Phänomene, Randbedingungen und Anfangszustände beschreiben zu können. In den folgenden Abschnitten wird daher untersucht, wie sich eine gewählte Bandbreite der Annahmen des theoretischen Konvergenzmodells auf das berechnete Ergebnis auswirkt und wie die Art der Auswertung der Ergebnisse die Bewertung des Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins beeinflusst.

### **5.1 Diskussion wesentlicher Einflussfaktoren des theoretischen Konvergenzmodells**

Die Vielzahl der Parameter, die das Verformungsverhalten des Salzgesteins in der Umgebung einer Kaverne beeinflussen und die im theoretischen Konvergenzmodell berücksichtigt werden können, lässt erkennen, dass es schwierig ist, eine Genauigkeitsabschätzung der auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse vorgenommenen Bewertung abzugeben.

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Datengrundlage beziehungsweise die im Modell erfassten Mechanismen weiter zu verfeinern, wie zum Beispiel im Hinblick auf die Beschreibung des zu bewertenden Gebirgsraumes (zum Beispiel durch die Aufteilung in unterschiedliche Salztypen oder durch die Berücksichtigung von Inhomogenitäten) oder die genauere Erfassung der Betriebsdaten (zum Beispiel tageweise Erfassung der Kopfdrücke bei Ölspeicherkavernen). Dies muss jedoch nicht zwingend zu einer verbesserten Handhabung des theoretischen Konvergenzmodells beziehungsweise der erzielbaren Genauigkeit führen, da eine größere Komplexität auch eine umfangreichere und qualitativ bessere Datenbasis voraussetzt. Dadurch wächst auch die Wahrscheinlichkeit von Lücken in der Datenbasis, was wiederum weitere Annahmen erfordert.

Für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete theoretische Konvergenzmodell wird die Auswirkung der im Rahmen einer ingenieurmäßigen Betrachtungsweise gewählten Annahmen für

- das Volumen und das Verformungsverhalten des Kavernensumpfes,
- die unterschiedliche Konvergenzrate der Kavernen innerhalb eines Feldes,
- die Charakteristik des Referenzmaterials für das Kriechen des Salzgesteins,
- den primären Spannungszustand des Gebirges und
- den primären Temperaturzustand des Gebirges

auf die zu bewertenden Ergebnisse exemplarisch untersucht. Die genannten Einflussgrößen werden weitgehend am Beispiel der bereits vorgestellten Kavernenanlage zur Speicherung von Rohöl analysiert, damit eine Vergleichsmöglichkeit vorhanden ist. Als vergleichende Darstellung wird der ermittelte zeitliche Verlauf des akkumulierten Konvergenzvolumens aller Kavernen des Feldes gewählt.

#### *Annahme für das Volumen beziehungsweise das mechanische Verhalten des Kavernensumpfes*

Das am theoretischen Konvergenzmodell berechnete Konvergenzvolumen steht im linearen Zusammenhang mit dem darin angenommenen Hohlraumvolumen. Sofern die echo-metrischen Vermessungen die Grundlage für die Bestimmung des Hohlraumvolumens bilden, wird in diesen Vermessungen der Kavernensumpf nicht erfasst, da dieser mit unlöslichen Bestandteilen, die während der Solung der Kaverne herab gefallen sind, angefüllt ist.

Aus gebirgsmechanischer Sicht kann dieses im Sumpf angesammelte Material als nicht mittragend angesehen werden, das heißt, der Sumpfbereich einer Kaverne konvergiert und trägt damit zum untertägig erzeugten Konvergenzvolumen bei.

Die Größe des vorhandenen Sumpfvolumens kann über den Volumenanteil der unlösbaren Bestandteile multipliziert mit einem Auflockerungsfaktor ermittelt werden. Beide Daten können auf der Grundlage von Beobachtungen, Messungen und Erfahrungen des Solbetriebes abgeschätzt werden. Einen weiteren Aufschluss über die Größe des Volumens des Sumpfes einer Kaverne kann ein In-situ-Test der Kompressibilität der Kaverne erbringen (BÉREST, BROUARD, BERGUES, FRELAT und DURUP (1997)).

Unter Umständen erfahren die abgelagerten Unlösbarkeiten mit der Verformung des Hohlraums eine Verfestigung, die ab einem bestimmten Verfestigungsgrad stützend auf die Kavernenwand wirken könnten (Versatz). Das mechanische Verhalten des Materials im Sumpf der Kaverne ist unter In-situ-Bedingungen bisher nicht ausreichend erforscht worden. Nachfolgend werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Annahmen des theoretischen Konvergenzmodells hinsichtlich der Berücksichtigung des im Kavernensumpf angesammelten Materials als Versatzmaterial oder als loses Haufwerk untersucht.

In beiden Fällen basiert die Abschätzung des Volumens des Kavernensumpfes auf teilweise empirischen Daten für den mittleren Volumenanteil der unlösbaren Bestandteile innerhalb des Salzes der Lagerstätte und dem Auflockerungsfaktor für das nach dem Herabsinken eingenommene Volumen im Kavernensumpf. Der abgeschätzte Wert des Volumens des Kavernensumpfes wird als anteiliger Wert des Gesamtvolumens ermittelt. Da dieser Wert sich aus der Multiplikation des Anteils der unlöslichen Bestandteile mit dem Auflockerungsfaktor ergibt, wird in Bild 5.1 nur die Bandbreite des ermittelten Konvergenzvolumens für Anteile der Unlösbarkeiten von 2, 5 und 10 % bei einem festen Auflockerungsfaktor von 2 dargestellt. Innerhalb der untersuchten Bandbreite werden bezogen auf den Wert des beobachteten Setzungsmuldenvolumens um bis zu 400.000 m<sup>3</sup> beziehungsweise 14 % vom Gesamtvolumen abweichende Volumina berechnet. Da der Anteil der unlöslichen Bestandteile im Verlauf des Solprozesses erfasst wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Aussage des theoretischen Konvergenzmodells nur geringfügig durch diesen Parameter beeinflusst wird.

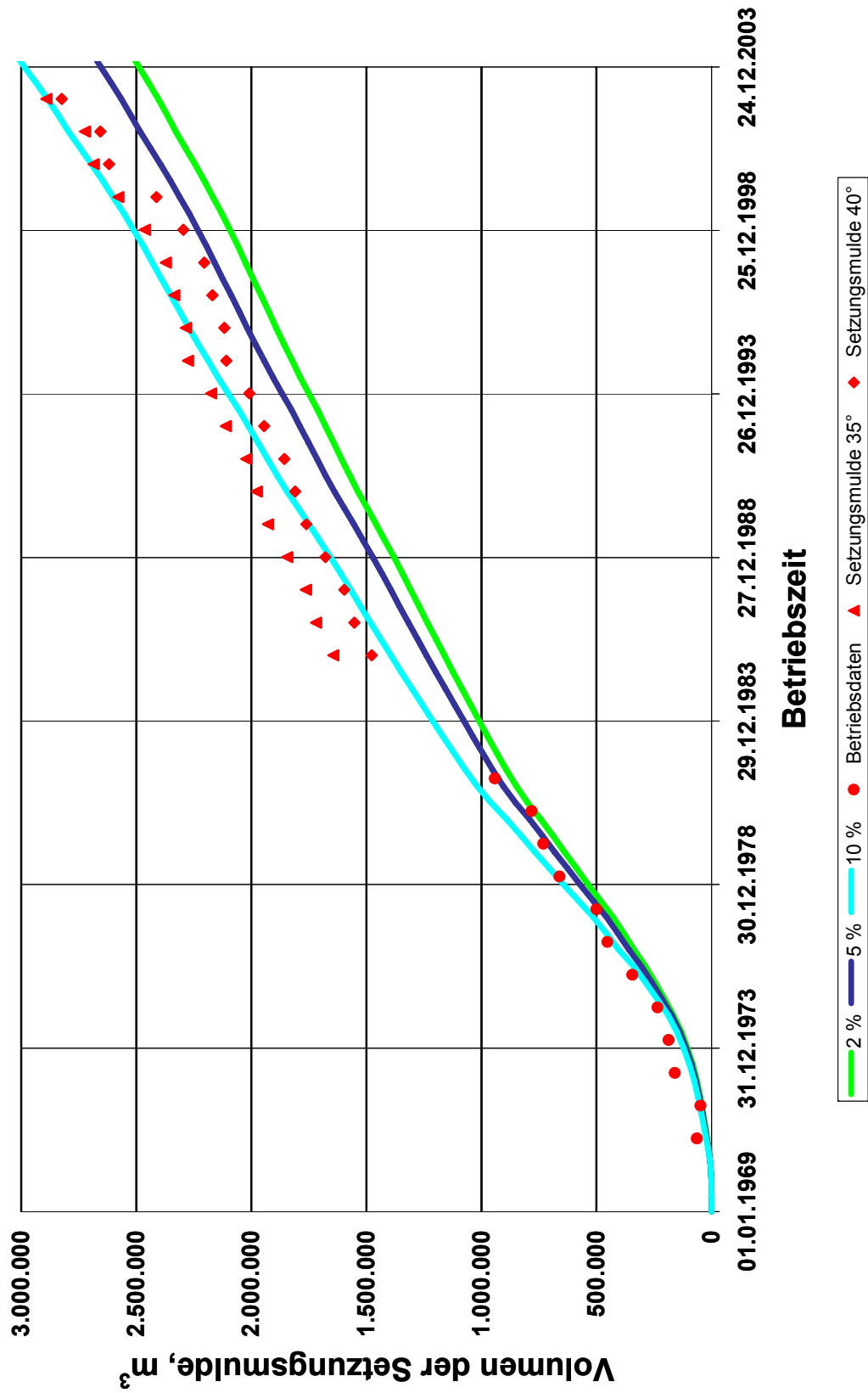


Bild 5.1: Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Setzungsmulde für unterschiedliche Annahmen des Bestands der Unlöslichkeiten am Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

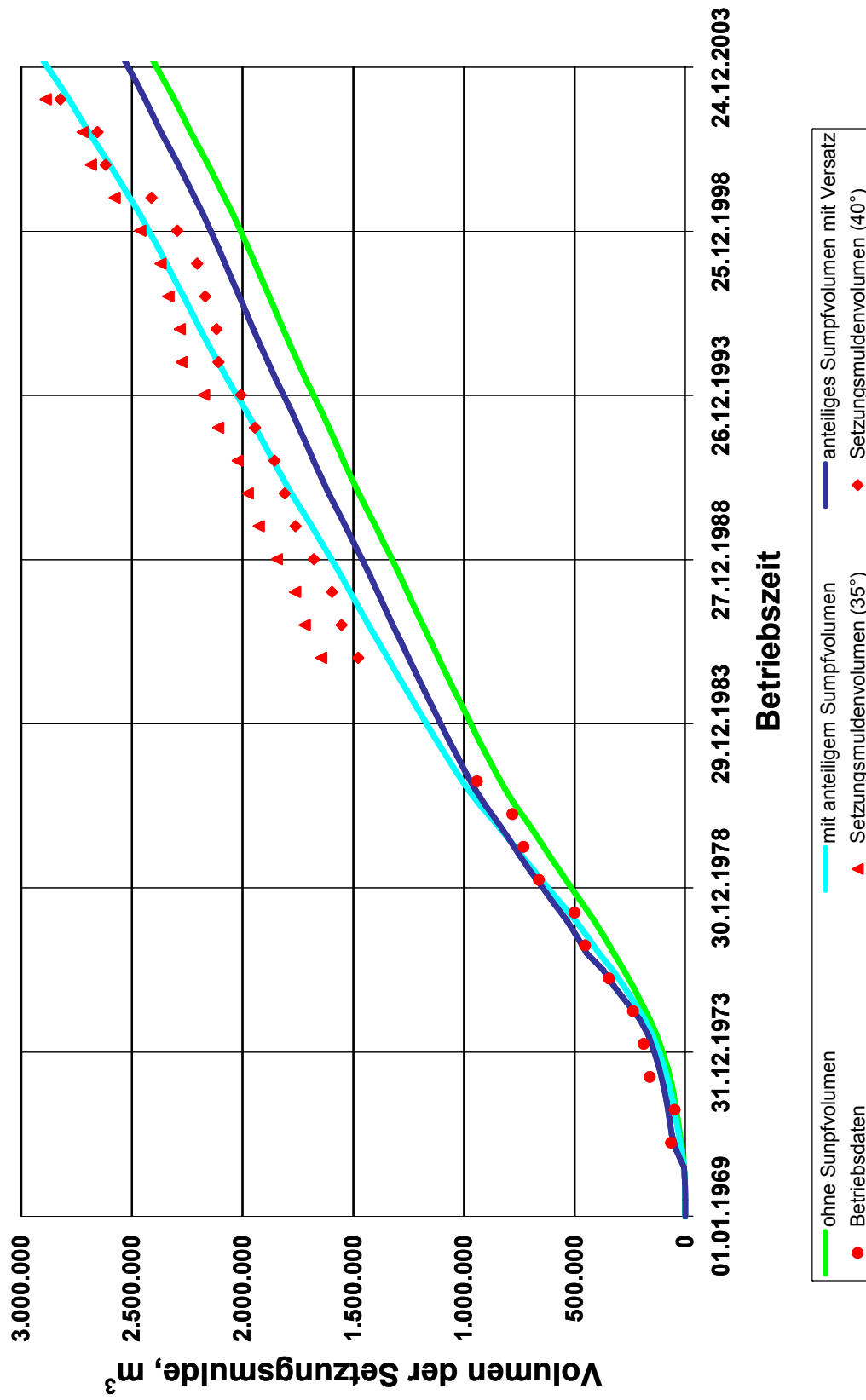


Bild 5.2: Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Setzungsmulde für unterschiedliche Annahmen für das Volumen und das Tragverhalten des Sumpfes am Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

Die Auswirkung auf das ermittelte Gesamtvolumen der untertägig verursachten Konvergenz infolge der Annahme eines sich verfestigenden Versatzmaterials im Kavernensumpf gegenüber der eines „widerstandslosen“ Haufwerkes ist in Bild 5.2 dargestellt. In beiden Fällen ist das Volumen des Kavernensumpfes für die Annahme eines 9 %-igen Volumenanteils der unlöslichen Feststoffanteile mit einem Auflockerungsfaktor von 1,9 ermittelt worden. Für den Fall des sich verfestigenden Versatzes ist ein über die gesamte Betriebszeit durchschnittlicher Elastizitätsmodul von 50 MPa angenommen worden, was einem Kompressionsmodul von 166,7 MPa entspricht. Es ergibt sich am Ende der untersuchten Betriebszeit ein Unterschied von 440.000 m<sup>3</sup>, wobei festgehalten werden muss, dass realitätsnahe Materialparameter des Versatzes schwer zu ermitteln sind. Dennoch wird deutlich, dass schon eine geringe Stützwirkung des Versatzes das Konvergenzvolumen um mehrere 100.000 m<sup>3</sup> beeinflussen kann. Relativ zum Gesamtvolumen des beobachteten Setzungsmuldenvolumens sind dies für das untersuchte Beispiel etwa 20 % für den Zeitpunkt am Ende des Betriebszeitraums.

#### Annahme einer spezifischen Konvergenzrate für jede Kaverne des Feldes

Der Wert des am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Konvergenzvolumens hängt linear von der Konvergenzrate und von dem zur Konvergenz beitragenden Hohlraumvolumen ab. Dabei ist die Konvergenzrate jeder einzelnen Kaverne eines Feldes als spezifisch auf Grund ihrer jeweiligen Randbedingungen anzusehen.

In dem untersuchten Fall der Soleproduktionsanlage ist von einer mittleren Konvergenzrate aller Kavernen ausgegangen worden, die aufgrund der relativ ähnlichen Beanspruchungsbedingungen des die Kavernen umgebenden Gebirges gerechtfertigt erscheint. Zum einen sind die Rahmenbedingungen der Kavernen (Geologie und Lage) und zum anderen auch die Betriebsweise der langjährig zur Soleproduktion genutzten Kavernen vergleichbar.

Dennoch sollte eine Einzelfallberechnung der Konvergenzrate jeder Kaverne über den gesamten beobachteten Innendruckbereich vorgenommen werden, um eine genügend genaue Datenbasis der Konvergenzraten zu erhalten. Wie stark die Konvergenzraten der einzelnen Kavernen innerhalb eines Feldes sich unterscheiden können, verdeutlichen die in den Bildern 5.3 und 5.4 dargestellten Konvergenzraten der Kavernen des untersuchten Feldes zur Rohölspeicherung, die jeweils an einem für jede Kaverne spezifischen Modell für einen



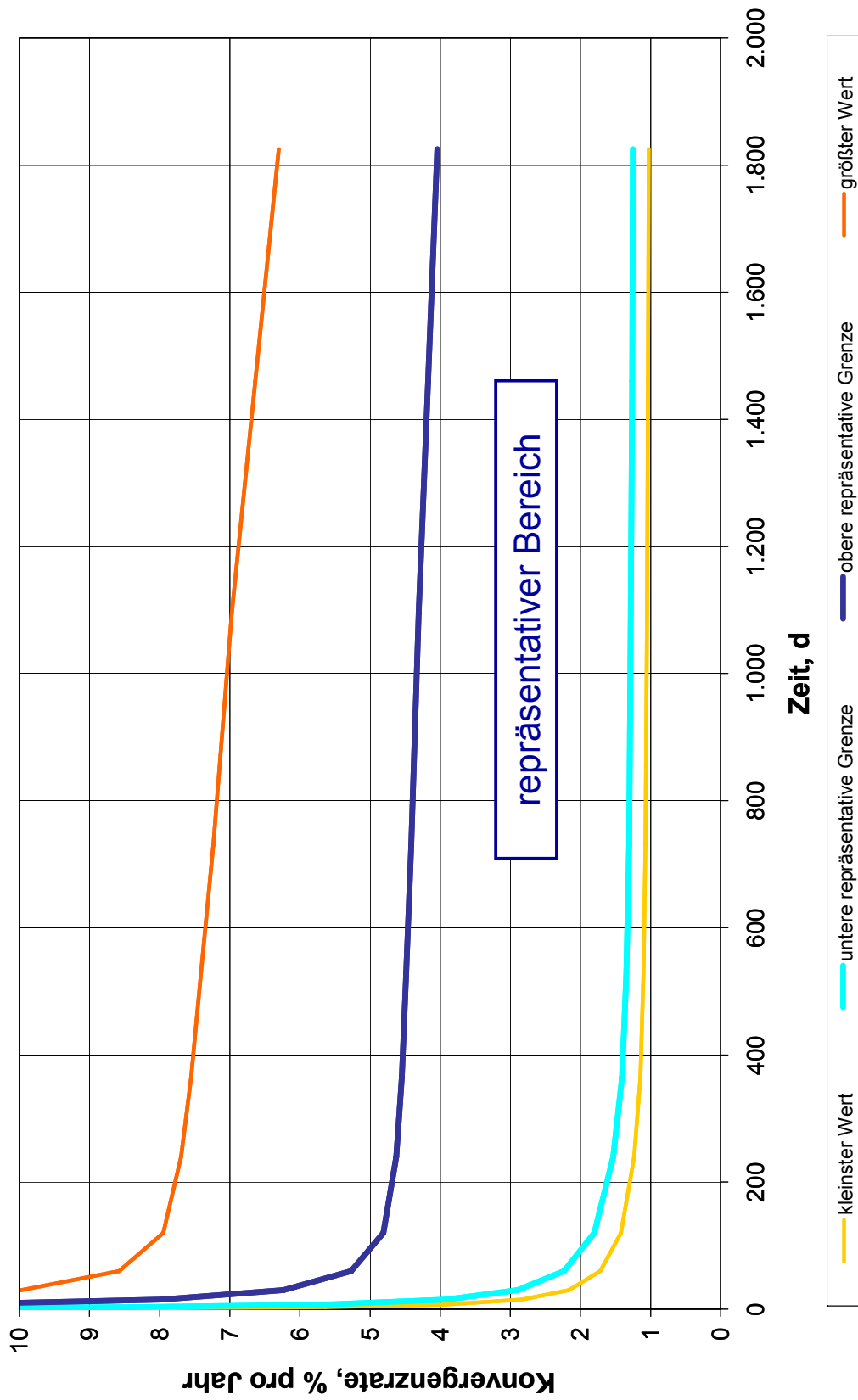


Bild 5.3: Bandbreite der berechneten Konvergenzraten bei Ölspeicherung ohne Kopfdruck am Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

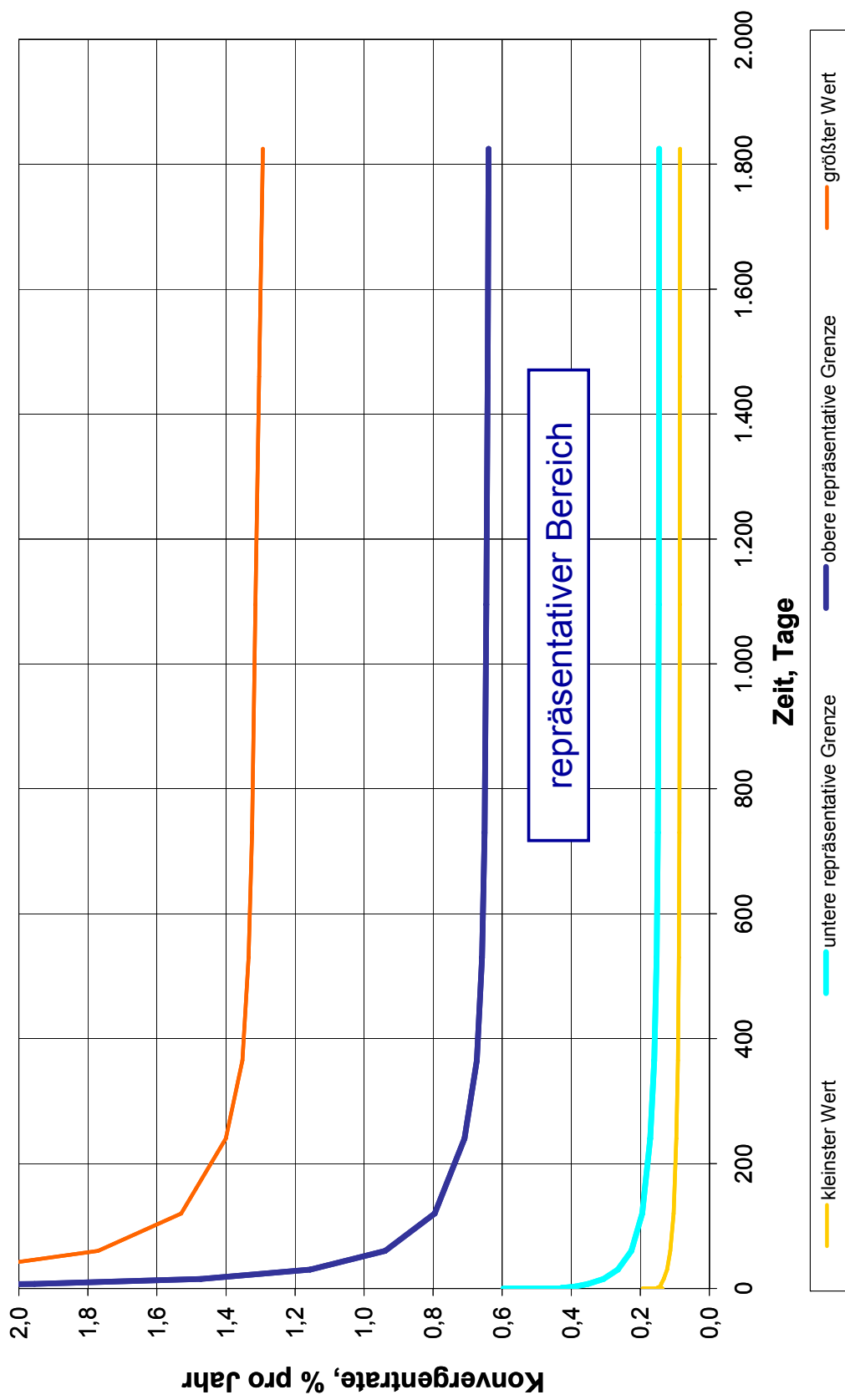


Bild 5.4: Bandbreite der berechneten Konvergenzraten bei Ölspeicherung mit Kopfdruck von 10 MPa am Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

konstanten Kopfdruck über die Zeit berechnet worden sind. Um die große Abhängigkeit der Konvergenzrate von der auftretenden wirksamen Beanspruchung zu veranschaulichen, wird die Bandbreite der Ergebnisse jeweils für einen Kopfdruck von 0 MPa und von 10 MPa gezeigt. Während die Bereiche der berechneten Werte für die Konvergenzrate im Fall der geringeren Beanspruchung des Gebirges (Kopfdruck 10 MPa) zwischen 0,1 und 1,3 % pro Jahr liegt, wächst dieser auf 1 bis 6,3 % pro Jahr (Kopfdruck 0 MPa) an. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Konvergenzraten im oberen berechneten Bereich für Kavernen gelten, die in einer bezogen auf das übrige Feld extremen Teufenlage angelegt sind, verringern sich diese Bandbreiten auf 0,1 bis 0,6 % pro Jahr (10 MPa Kopfdruck) beziehungsweise 1 bis 4 % pro Jahr (0 MPa Kopfdruck). Um eine höhere Genauigkeit des theoretischen Konvergenzmodells anzustreben, ist erforderlich, nicht eine repräsentative Konvergenzrate für das gesamte Feld, sondern eine für jede einzelne Kaverne des Feldes spezifische Rate zu ermitteln.

*Annahme der Charakteristik des verwendeten Stoffgesetzes zur Beschreibung des Kriechverhaltens des Salzes*

Innerhalb des theoretischen Konvergenzmodells wird für das zeitabhängige Verformungsverhalten des Salzgesteins das am Institut für Unterirdisches Bauen der Leibniz Universität Hannover entwickelte Stoffgesetz LUBBY2 (HEUSERMANN, LUX und ROKAHR (1983) STAUDTMEISTER und STRUCK (1990)) verwendet. Dieses Stoffgesetz zeichnet sich durch eine spannungsabhängig formulierte Viskosität des Materialverhaltens aus, das heißt, in einer gewählten doppelt logarithmischen Auftragung der Kriechrate über die effektive Beanspruchung erhält man einen gekrümmten Verlauf der Materialkurve. Im Rahmen der untersuchten Beispiele wird lediglich der Anteil des stationären Kriechens des Stoffgesetzes verwendet, dessen Ermittlung über die Kriechrate nach Gleichung 5.1 erfolgt.

$$\dot{\varepsilon}^v(t) = \frac{1}{\bar{\eta}_M(\sigma_{eff})} * \sigma_{eff} \quad (5.1)$$

mit

der effektiven Spannung  $\sigma_{eff}$  nach Gleichung 5.2

der Viskositätsfunktion  $\bar{\eta}_M$  zur Beschreibung des Maxwell-Körpers nach Gleichung 5.4

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3 \cdot J_2^D} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (5.2)$$

mit

der 2. Invarianten des Deviators des Spannungstensors nach Gleichung 5.3

$$J_2^D = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (5.3)$$

und  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  als den drei Komponenten des Hauptspannungsvektors.

$$\bar{\eta}_M(\sigma) = \bar{\eta}_M^* \cdot e^{m \cdot \sigma_{eff}} \cdot e^{l \cdot T} \quad (5.4)$$

mit

dem Maxwell-Viskositätsmodul  $\bar{\eta}_M^*$ , einem Strukturparameter, bestimmt für  $\sigma_{eff} = 0$ , und

den Stoffgesetzparametern  $m$  und  $l$ , die den Grad der Nichtlinearität der Kriechgeschwindigkeit von der effektiven Spannung beziehungsweise der Temperatur  $T$  angeben.

Da aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen der Kavernen eines Feldes und des Beanspruchungsbereiches infolge der gefahrenen betrieblichen Innendrucke ein Bereich der wirksamen Beanspruchung zu berücksichtigen ist, können die Stoffgesetzparameter  $\bar{\eta}_M^*$ ,  $m$  und  $l$  den Wert des am theoretischen Konvergenzmodells berechneten Konvergenzvolumens stark beeinflussen.

Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen für die Stoffgesetzparameter  $\bar{\eta}_M^*$  und  $m$  untersucht. Der Parameter  $\bar{\eta}_M^*$  legt dabei das Niveau der Materialkurve innerhalb der Auftragung der Kriechraten über die effektive Spannung fest, während der Parameter  $m$  die Steigung der Kurve definiert. Die verwendeten Materialkurven zeigt das Diagramm in Bild 5.5. Das Ergebnis der Variation der Stoffgesetzparameter wird anhand

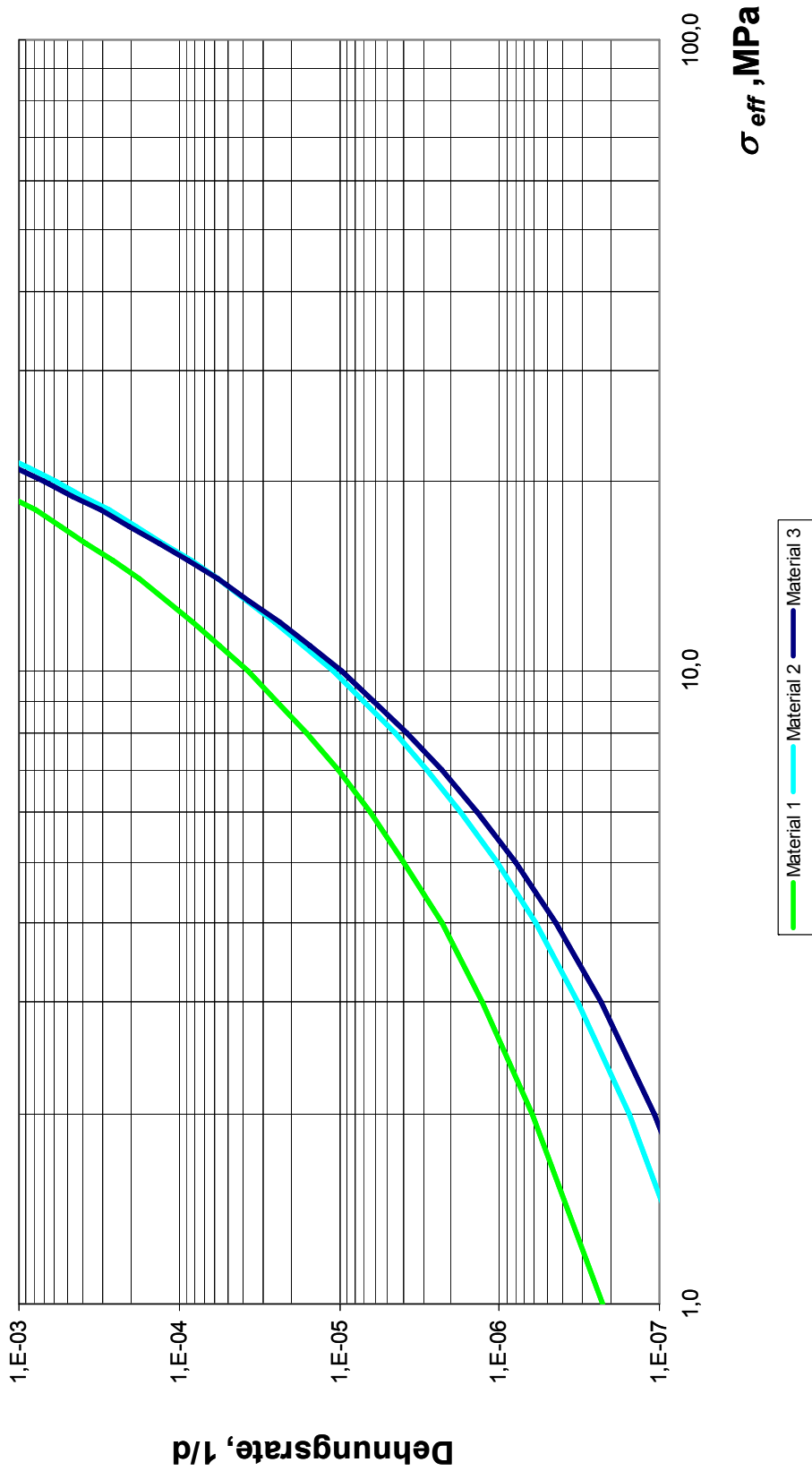


Bild 5.5: *Verwendete Materialqualitäten für die Untersuchung des Einflusses der Kriechfähigkeit des Salzgesteins auf das berechnete Volumen der Setzungsmulde für das Stoffgesetz LUBBY2*

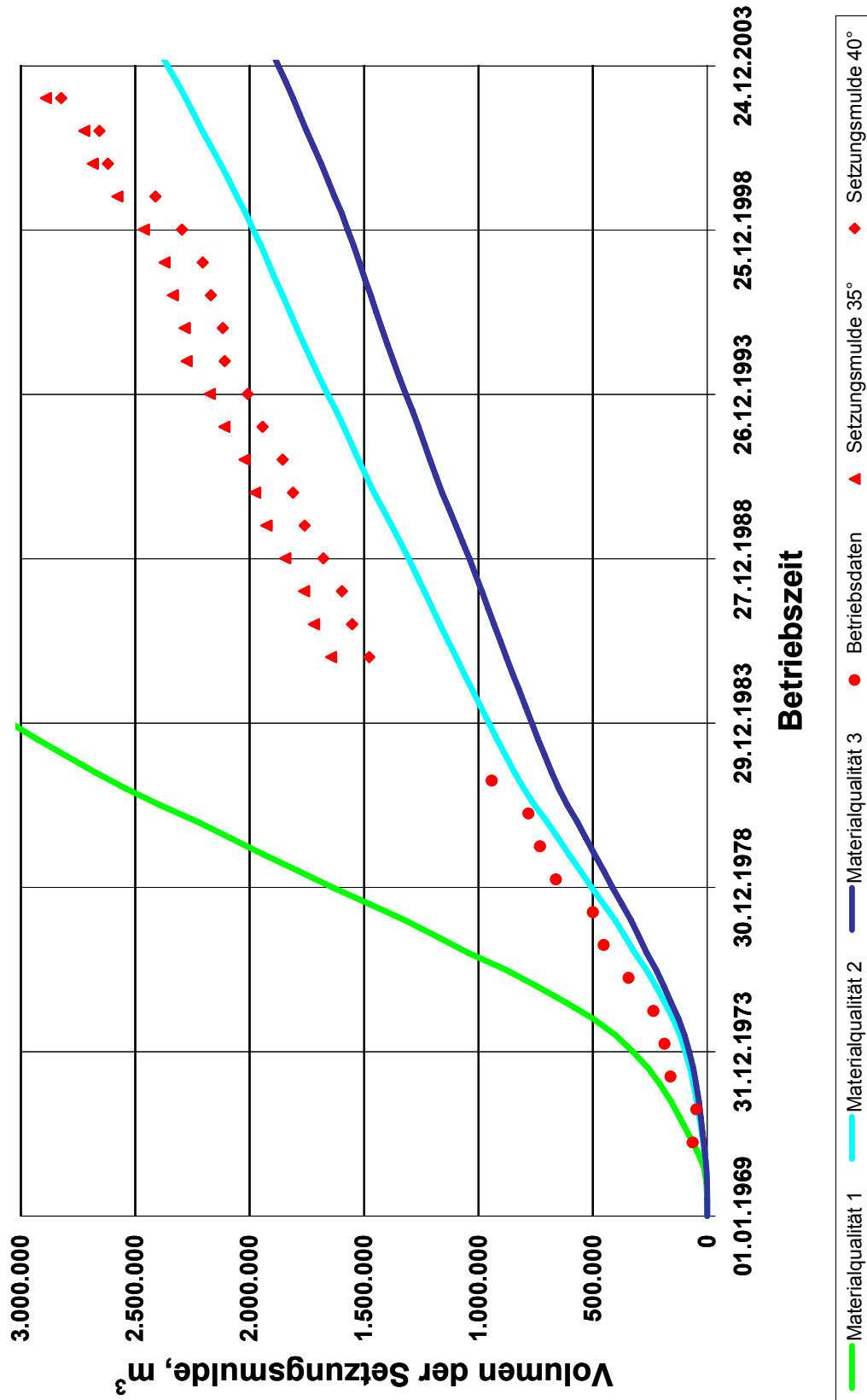


Bild 5.6: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Volumens der Setzungsmulde bei unterschiedlichen Annahmen für die Kriechfähigkeit des umgebenden Salzgesteins am Beispiel der untersuchten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung

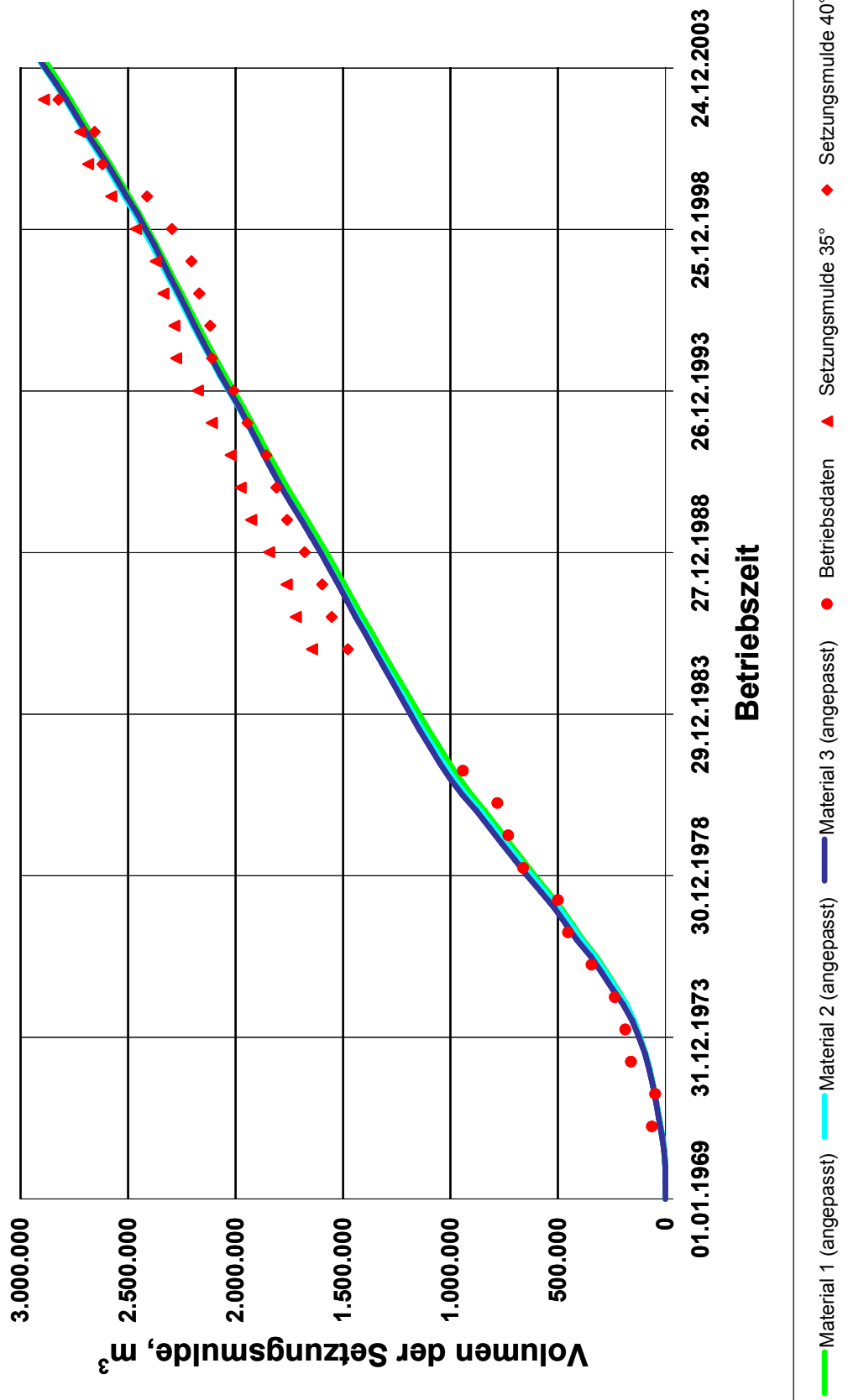


Bild 5.7: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Volumens der Setzungsmulde bei unterschiedlichen Annahmen für die Kriechfähigkeit des umgebenden Salzgesteins nach individueller Anpassung des Viskositätsparameters

der am theoretischen Konvergenzmodell berechneten zeitlichen Entwicklung des akkumulierten Konvergenzvolumens in Bild 5.6 aufgezeigt. Für die zunächst vor dem Hintergrund der Ergebnisse von Laborversuchen an Kernen unterschiedlicher Lokationen als realistisch anzusehende Bandbreite der Materialqualität, ausgedrückt durch die Variation der Stoffgesetzparameter  $\bar{\eta}_M$  und  $m$ , wird ein relativer großer Unterschied der ermittelten Konvergenzvolumina ermittelt. So unterscheiden sich die berechneten Konvergenzvolumina am Ende des untersuchten Zeitraums für die untersuchte Materialqualität 1 um +4,5 Mio. m<sup>3</sup> oder 150 %, um -600.000 m<sup>3</sup> oder 20 % für die Materialqualität 2 sowie um -1,1 Mio. m<sup>3</sup> oder 35 % für die Materialqualität 3 in Bezug zu dem beobachteten Wert des Volumens der Setzungsmulde.

Die Frage, ob der charakteristische Verlauf der berechneten Konvergenzvolumina über die Betriebszeit durch die Veränderung des Steigungsmaßes der Kriechgeschwindigkeitskurve für das Salzgestein substantiell verändert wird, kann verneint werden. Zwar weist der in Bild 5.6 dargestellte Verlauf des jeweils ermittelten Konvergenzvolumens über die Betriebszeit für die drei untersuchten Werte des Parameters  $m$  einen qualitativ unterschiedlichen Verlauf auf, wird jedoch die jeweilige Grundviskosität angepasst, ergibt sich der in Bild 5.7 wiedergegebene Verlauf der Kurven, aus denen keine wesentlichen Unterschiede auszumachen sind.

#### Annahme der primären Gebirgsspannungen

Der primäre Gebirgszustand, der als Anfangsbedingung in das theoretische Konvergenzmodell eingeht, kann für das eine Kaverne umgebende Salzgestein in der Regel auf der Grundlage unterschiedlicher Verfahren abgeschätzt werden. Dabei kommen zum Beispiel Dichtebestimmungen auf der Grundlage von Bohrlochmessungen, hydraulische oder pneumatische Aufreißversuche sowie Gravimetriemessungen im Bohrloch zum Einsatz. Im günstigsten Fall liegen Ergebnisse unterschiedlicher Untersuchungsmethoden vor. STAUDTMEISTER und SCHMIDT (2000) vergleichen vier dieser Methoden zur Bestimmung der minimalen primären Hauptspannung, die für dieselbe Lokation angewendet worden sind. Dabei ermitteln sie Unterschiede zwischen den Verfahren im Bereich von mehreren MPa. Da sich im Allgemeinen die Dichte des Salzes anhand des Grades der Fremdbestandteile relativ genau bestimmen lässt, wird meist lediglich eine Schwankungsbreite für die Dichten des Deckgebirges angenommen.



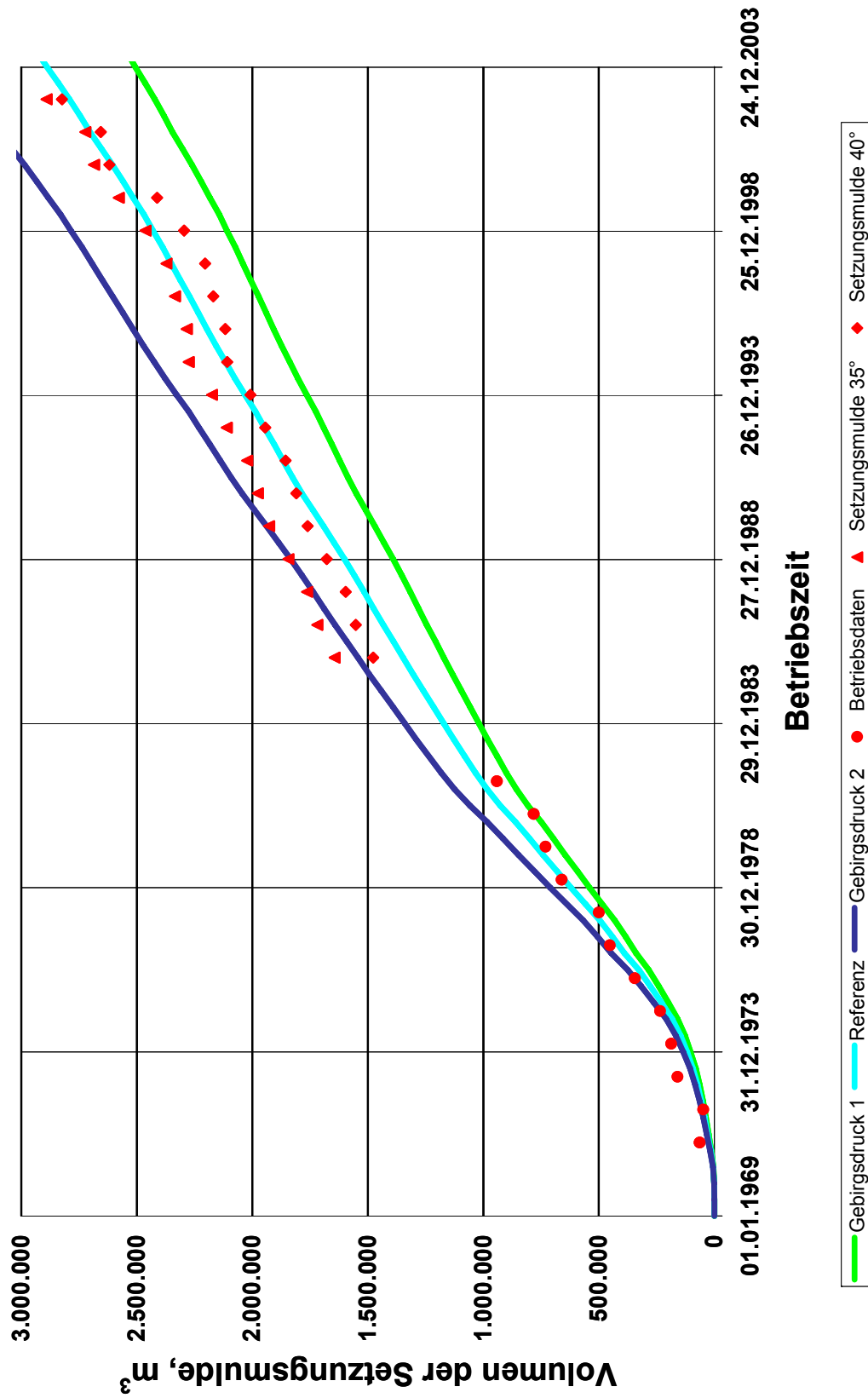


Bild 5.8: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Volumens der Setzungsmulde bei unterschiedlichen Annahmen für den primären Spannungszustand des Gebirges am Beispiel des untersuchten Kavernenfeldes zur Rohölspeicherung

Für das untersuchte Kavernenfeld zur Rohölspeicherung wird exemplarisch eine Bandbreite von  $\pm 3$  % für den Ansatz der Deckgebirgsdichten untersucht. Dies führt, wie in Bild 5.8 anhand der zeitlichen Entwicklung des akkumulierten Konvergenzvolumens dargestellt ist, über die gesamte untersuchte Betriebszeit zu einem Unterschied von  $+350.000 \text{ m}^3$  für den erhöhten beziehungsweise von  $-450.000 \text{ m}^3$  für den abgeminderten Gebirgsdruckansatz jeweils bezogen auf am Ende des untersuchten Betriebszeitraumes durch die Geländevermessung ermittelten Wert des Setzungsmuldenvolumens. Dies bedeutet einen relativen Anteil von  $+12$  % beziehungsweise  $-15$  %. Die berechnete Bandbreite zeigt, dass eine zuverlässige Bestimmung des primären Spannungszustandes erforderlich ist.

#### Annahme des primären Temperaturzustandes

Der primäre Temperaturzustand des Gebirges wird innerhalb des theoretischen Konvergenzmodells als linear mit der Teufe zunehmend angenommen. Dabei ist es grundsätzlich möglich, eine abschnittsweise Anpassung zum Beispiel an die unterschiedlichen Gebirgsformationen vorzunehmen. Der Wert dieser auf die Teufe bezogenen Temperatur geht direkt in das Stoffgesetz ein und bestimmt damit die Kriechverformung des Salzgesteins.

Während des Abteufens der Bohrung und bei den späteren Kavernenvermessungen werden im Allgemeinen Temperaturverteilungen im Bohrloch gemessen. Dennoch kann nur indirekt unter Verwendung von Annahmen auf die primäre Gebirgstemperatur geschlossen werden, da durch den Betrieb einer Bohrung beziehungsweise einer Kaverne der Temperaturzustand des Gebirges gestört wird und nur diese gestörte Temperatur gemessen werden kann.

Bei der vorgestellten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung wurde eine Zunahme der primären Gebirgstemperatur mit der Teufe von  $0,035 \text{ K/m}$  angenommen. Die Abhängigkeit des ermittelten Konvergenzvolumens von der primären Gebirgstemperatur wird für zwei abgeminderte Werte des geothermischen Temperaturgradienten von  $0,03 \text{ K/m}$  beziehungsweise  $0,025 \text{ K/m}$  untersucht. Dabei wird nicht zwischen dem Deckgebirge und dem Salzgestein unterschieden.

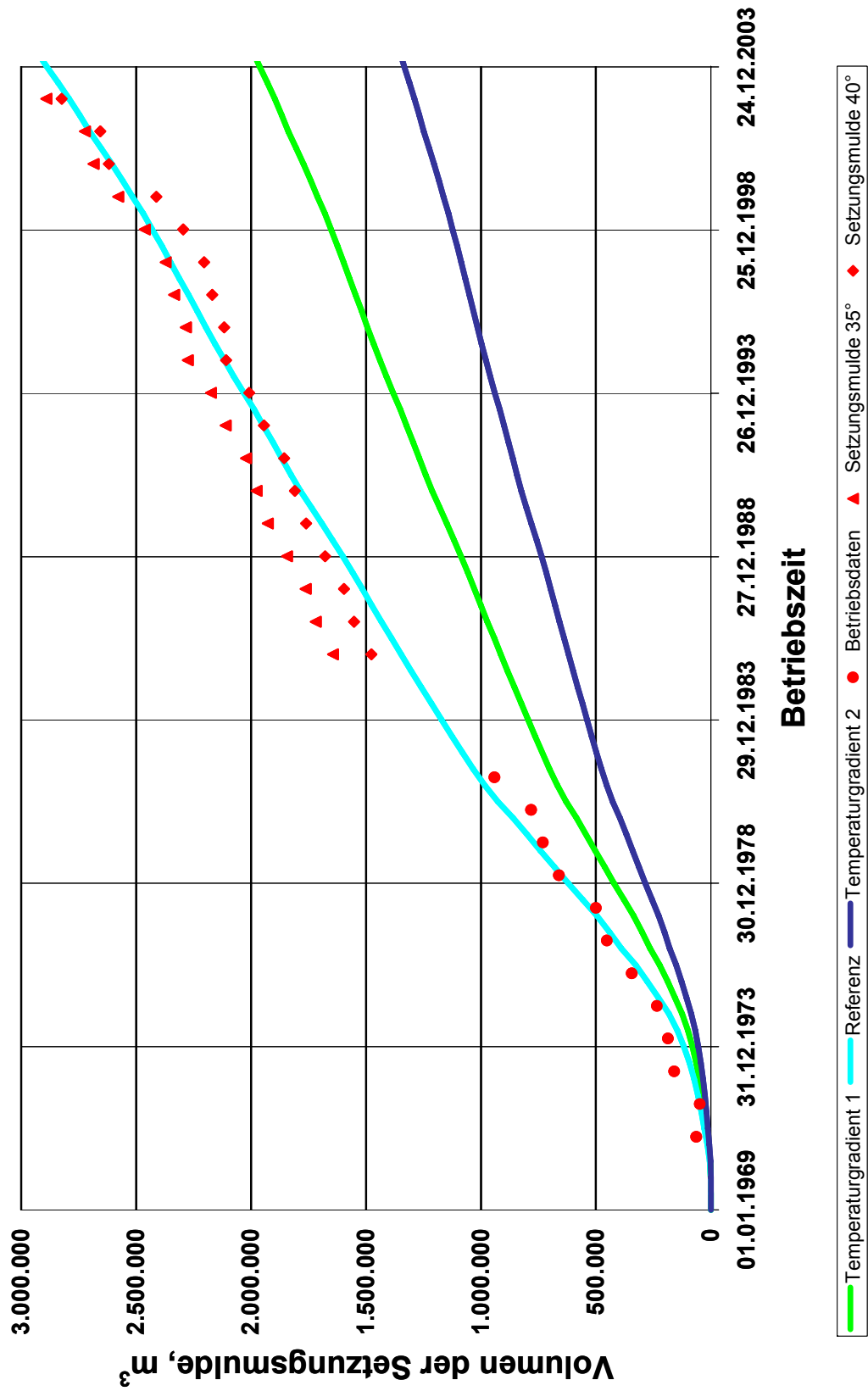


Bild 5.9: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Volumens der Setzungsmulde bei unterschiedlichen Annahmen für den primären Temperaturzustand des Gebirges am Beispiel des untersuchten Kavernenfeldes zur Rohölspeicherung

Die ermittelten Verläufe des berechneten Konvergenzvolumens, die in Bild 5.9 dargestellt sind, zeigen qualitativ die erwartete Tendenz eines abnehmenden berechneten Konvergenzvolumens bei einem geringeren angenommenen Wert des Temperaturgradienten. Am Ende des Untersuchungszeitraumes unterscheiden sich die Werte des berechneten Konvergenzvolumens um  $-1,0$  Mio. beziehungsweise  $-1,6$  Mio.  $\text{m}^3$  bezogen auf die Ausgangssituation. In Relation zum Wert des Senkungsmuldenvolumens, das von der Markscheiderei bestimmt wurde, bedeutet dies eine Verminderung von 34 % beziehungsweise 55 %. Hieraus ist ersichtlich, dass eine möglichst genaue Bestimmung des primären Temperaturzustandes notwendig ist.

## **5.2 Diskussion der Art der Auswertung der Ergebnisse des theoretischen Konvergenzmodells**

Sofern die Möglichkeit besteht, die Vermessungsdaten der Geländeoberfläche zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins in der Umgebung von Kavernen heranzuziehen, beeinflusst die Annahme, wie die untertägig durch den Kavernenbetrieb verursachten Hohlraumvolumenverluste bis an die Geländeoberfläche übertragen werden, das Bewertungsergebnis.

Werden nur die akkumulierten *Gesamtvolumina* des Kavernenfeldes infolge der Konvergenz der Hohlräume und das Volumen des Setzungstrogens an der Geländeoberfläche verglichen, so sind zwei wesentliche Einflussparameter zu nennen:

- der Grenzwinkel des Einflusses dieser Hohlraumkonvergenzen und
- der Grad der Auflockerung des überlagernden Gebirges bei der Übertragung der Hohlraumvolumenverluste bis an die Geländeoberfläche.

Während der angenommene Wert der Auflockerung des Gebirges  $1/a$  nach Gleichung 3.6 linear in das zu vergleichende Gesamtvolumen der Konvergenz eingeht und damit bei einer Unterschätzung der aufgetretenen Auflockerung auch das zu bewertende Verformungsverhalten des Salzgesteins als weniger kriechfreudig ermittelt wird, hängt die Bestimmung des Grenzwinkels von der Erfahrung des Markscheiders bei der Bestimmung der Begrenzungslinie („Setzungsnulllinie“) ab, ab der infolge des Kavernenbetriebs keine Bodensenkungen mehr beobachtet werden.

Eine Veranschaulichung dieses Unterschiedes gibt Bild 4.10. Darin sind die vom Markscheider ermittelten Werte des Senkungsmuldenvolumens auf der Basis der jährlichen Messkampagnen des Oberflächennivellements für unterschiedliche Grenzwinkel von  $40^\circ$  und  $35^\circ$  dargestellt. Für den späteren Abschnitt der Betriebsgeschichte ergeben sich Unterschiede des Senkungsmuldenvolumens von etwa  $70.000 \text{ m}^3$ . Einen Hinweis auf den Einfluss der vorhandenen Datengrundlage vermittelt die Gegenüberstellung der Werte für die davor liegenden Jahre, als das Vermessungsnetz noch nicht nach außen hin erweitert worden war. Hier wird ein Unterschied von etwa  $160.000 \text{ m}^3$  zwischen den beiden Werten für den Grenzwinkel ermittelt.

Der angenommene Grenzwinkel der Übertragung der Hohlraumkonvergenzen spielt ebenfalls eine Rolle, wenn die *Verteilung der Verformungseigenschaften* im Grundriss über der Salzformation bewertet werden soll. Bei der Transformation der berechneten untertägigen Hohlraumkonvergenzen in theoretische Setzungslinien der Punkte der Geländevermessung fallen die berechneten Senkungswerte umso geringer aus, je kleiner der angenommene Wert des Grenzwinkels ist, wie aus Gleichung 3.8 und 3.10 hervorgeht.

In den Bildern 5.10 bis 5.12 ist zur Veranschaulichung dieses Einflusses eine Variation des Grenzwinkels von  $25^\circ$  bis  $45^\circ$  in Schritten von  $5^\circ$  vorgenommen worden und für drei Messpunkte gezeigt, die annähernd auf einem Nord-Süd-Schnitt des untersuchten Kavernenfeldes liegen.

Die dargestellten Messreihen zeigen jeweils zu Beginn des Messzeitraumes ein schnelleres Anwachsen der Bodensenkungen, das gegen Ende etwas langsamer wird. Durch Annahme eines konstanten Wertes für den Grenzwinkel kann in keinem der gezeigten Fälle eine gleichmäßig gute Wiedergabe der beiden Zeitabschnitte durch die am theoretischen Konvergenzmodell ermittelten berechneten Senkungswerte erzielt werden.

Eine bisher unbestätigte Annahme, dass der Grenzwinkel für Kavernenanlagen im Salzgestein mit der abgelaufenen Betriebszeit einer Veränderung unterworfen ist, kann aus den Untersuchungen der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Kavernenanlage zur Rohölspeicherung und der zur gemischten Speicherung von Rohöl und Erdgas abgeleitet werden.

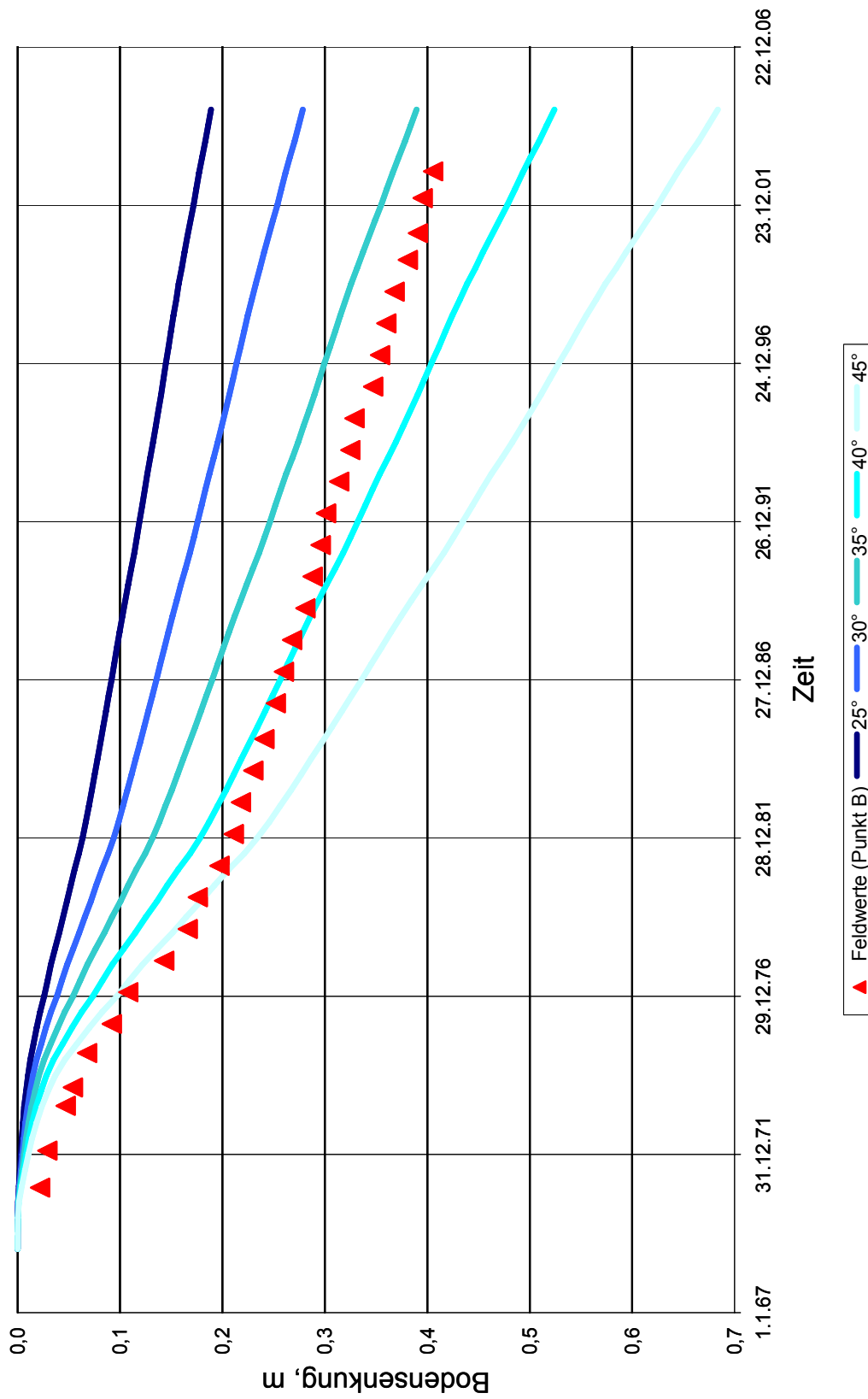


Bild 5.10: Vergleich des Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes A des untersuchten Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl mit den am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Werten bei Annahme unterschiedlicher Grenzwinke

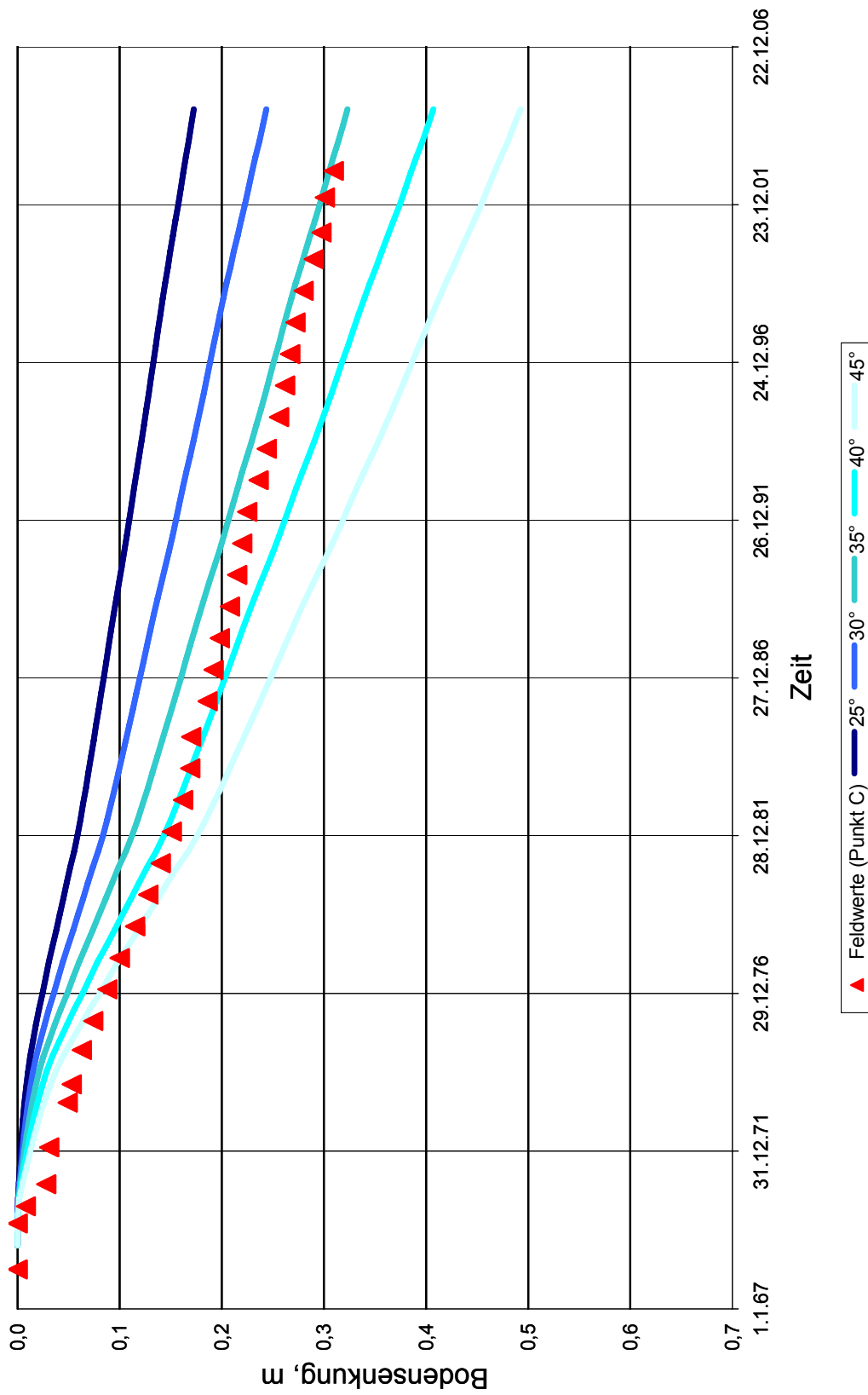


Bild 5.11: Vergleich des Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes B des untersuchten Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl mit den am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Werten bei Annahme unterschiedlicher Grenzwinkel

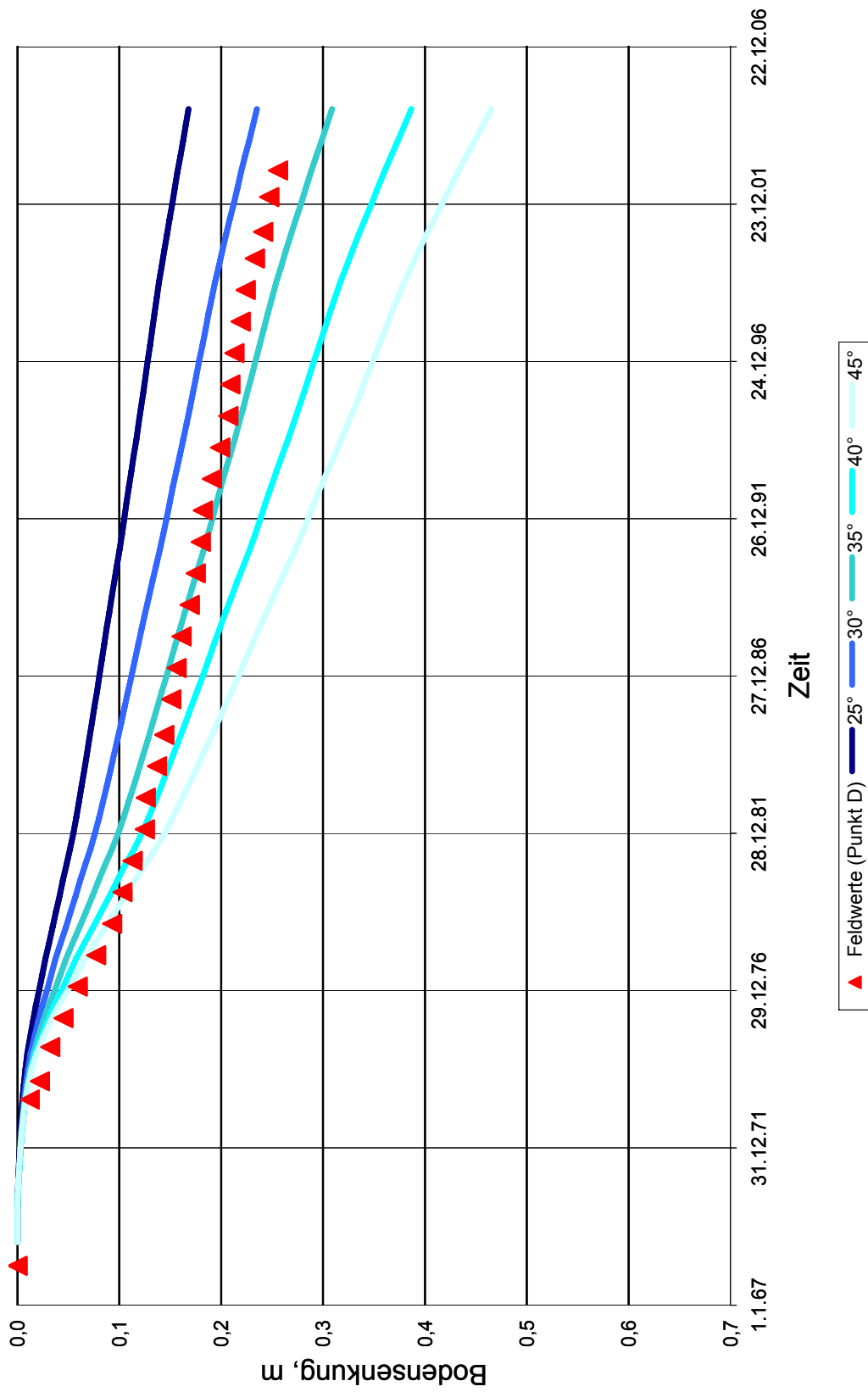


Bild 5.12: Vergleich des Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes C des untersuchten Kavernenfeldes zur Speicherung von Rohöl mit den am theoretischen Konvergenzmodell berechneten Werten bei Annahme unterschiedlicher Grenzwinkel



Wie die Bilder 5.13 bis 5.16 zeigen, wird der infolge des theoretischen Konvergenzmodells ermittelte Verlauf der Setzungen eines Messpunktes besser mit den gemessenen Daten in Übereinstimmung gebracht, wenn der Wert des Grenzwinkels über einen Zeitraum von 20 Jahren ab Betriebsbeginn von einem anfänglichen Wert von  $45^\circ$  auf  $35^\circ$  abgemindert wird. Die unterschiedlichen Zuwachsraten der Senkungen zu Beginn des Kavernenbetriebes und gegen Ende des Untersuchungszeitraumes lassen sich dadurch wesentlich besser wiedergeben. Die Annahme eines konstanten Wertes für den Grenzwinkel hätte bei einer Fokussierung der Bewertung auf den Anfangsbereich der Messkurve zu einer Überschätzung des Verformungsvermögens geführt, die Fokussierung auf den späteren Teil der Betriebsgeschichte zu einer Unterschätzung.

Dies würde auch die Beobachtung bei langjährig sich in Betrieb befindenden Kavernenanlagen erklären, dass sich die Grenzlinie, außerhalb derer sich keine durch den Kavernenbetrieb bedingten Setzungen mehr erkennen lassen, immer weiter nach außen verlagert (REITZE (2004) WEIDENBACH (2006)). Aus gebirgsmechanischer Sicht könnte dieses Verhalten durch lang anhaltende und großräumige Spannungsumlagerungen innerhalb der Salzformation infolge des Kriechens des Salzgesteins erklärt werden.

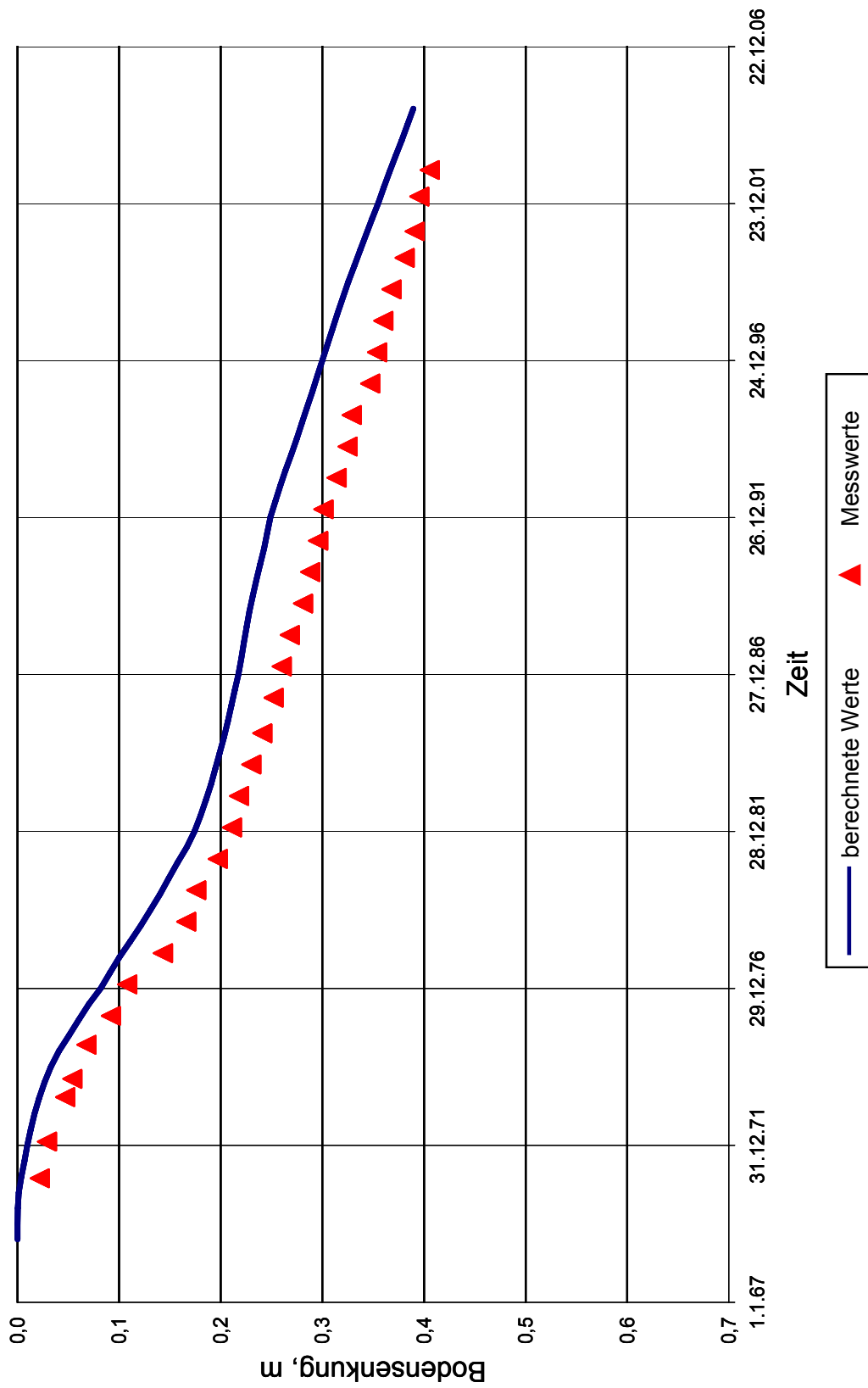


Bild 5.13: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes A oberhalb des untersuchten Kavernenfeldes zur Rohlspeicherung für einen veränderlichen Grenzwinkel von 45° auf 35° innerhalb der ersten 20 Betriebsjahre

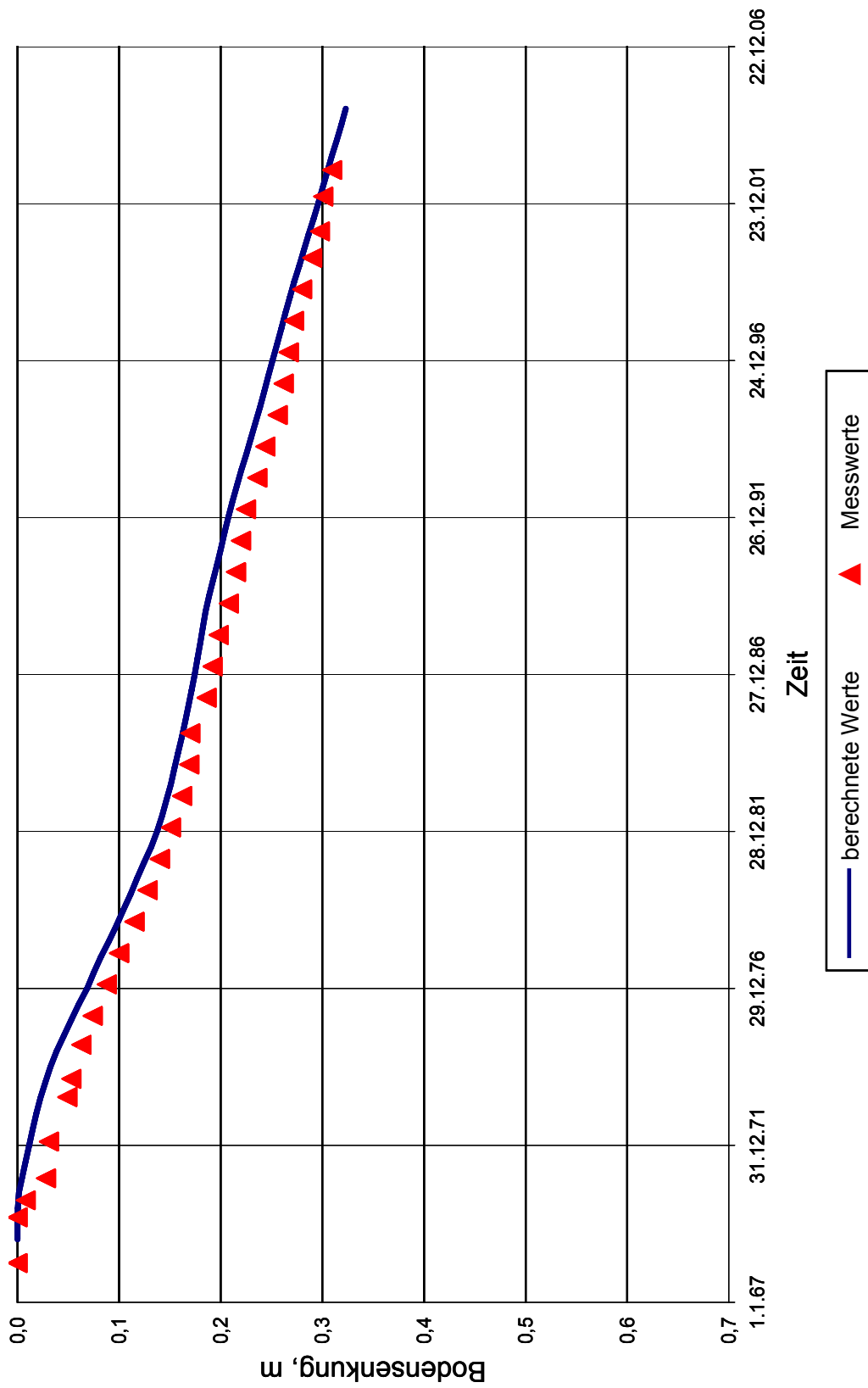


Bild 5.14: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes B oberhalb des untersuchten Kavernenfeldes zur Rohlspeicherung für einen veränderlichen Grenzwinkel von 45° auf 35° innerhalb der ersten 20 Betriebsjahre

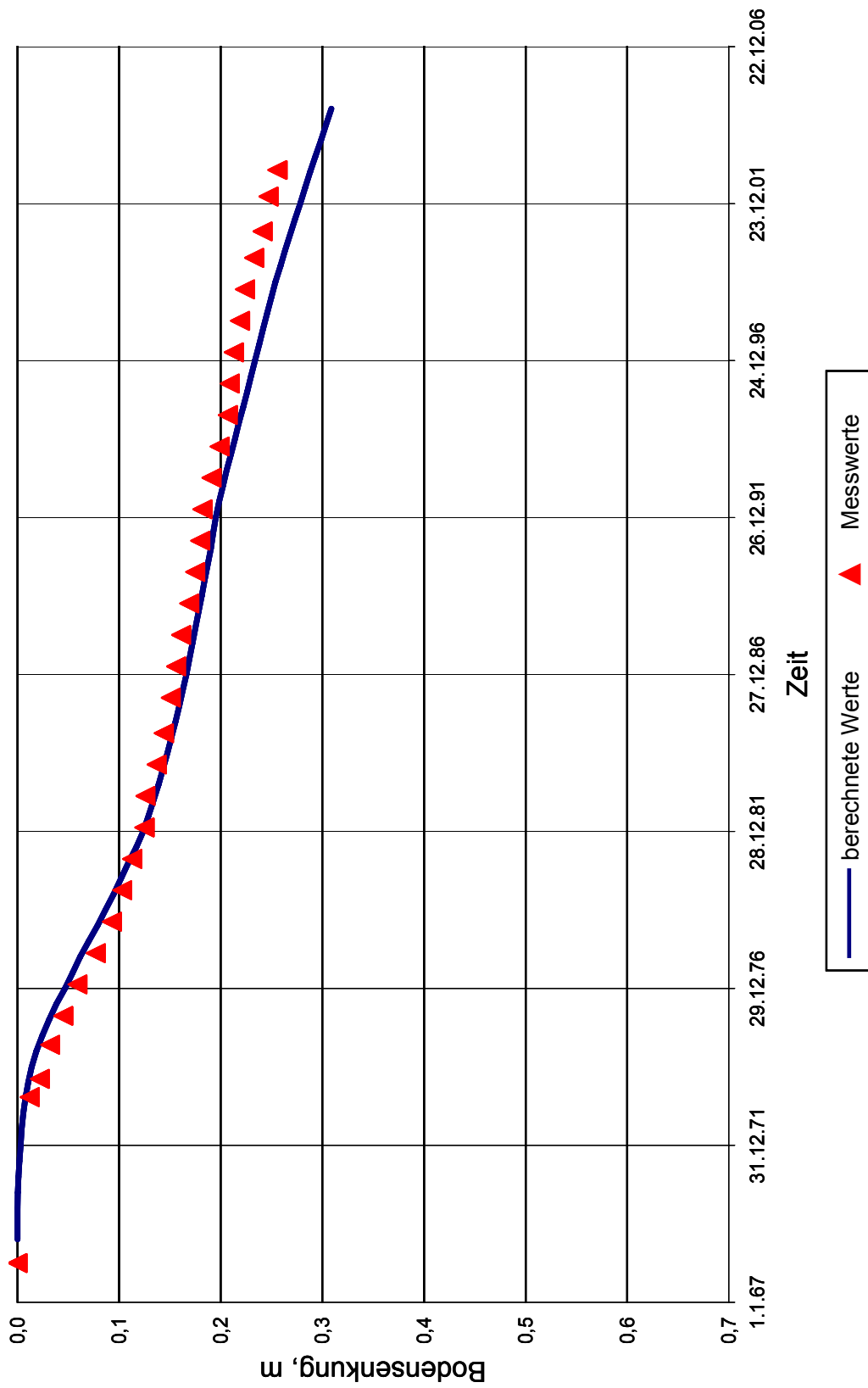


Bild 5.15: Vergleich des berechneten und des gemessenen Verlaufes der Bodensenkungen des Messpunktes C oberhalb des untersuchten Kavernenfeldes zur Rohlspeicherung für einen veränderlichen Grenzwinkel von 45° auf 35° innerhalb der ersten 20 Betriebsjahre

### 5.3 Qualität der Untersuchungsergebnisse

Da die Bewertung der Qualität eines In-situ-Tests zur Überprüfung der Festigkeit von Salzgestein auch von der Kenntnis des Verformungsverhaltens des umgebenden Gebirgsraums abhängt, steht im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Bewertung der Einflussgrößen der verwendeten Untersuchungsmethoden zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens des Salzgesteins im Vordergrund. Anhand des globalen Vergleichs des am theoretischen Konvergenzmodell berechneten untertägigen Konvergenzvolumens mit dem Setzungsmuldenvolumen wurde aufgezeigt, inwieweit wesentliche Eingangsparameter des theoretischen Konvergenzmodells das Ergebnis beeinflussen.

Das einzuschätzende in situ vorhandene Volumen des durch die Vermessung nicht zugänglichen Kavernensumpfes spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Mit der Größe des lokationsspezifischen Werts des Anteils der unlöslichen Bestandteile innerhalb des Salzgesteins wächst der Einfluss des Kavernensumpfvolumens schnell auf einen relativen Volumenanteil von 10 % an, da ein Wert um die 5 % unlöslicher Bestandteile realistisch erscheint und gleichzeitig ein Volumenvergrößerungsfaktor des durch loses Haufwerk angefüllten Kavernensumpfes berücksichtigt werden muss. Bei einer Unterschätzung des Kavernensumpfvolumens wird die Verformungsfähigkeit des Salzgesteins als zu hoch bewertet. Eine genauere Erforschung sowohl des mechanischen Verhaltens des im Kavernensumpf angesammelten Materials sowie seines Volumens wäre wünschenswert.

In Bezug auf das zu bewertende Materialverhalten spielt die anfängliche Einschätzung der als Referenzqualität angenommenen Materialqualität keine entscheidende Rolle, da diese über Linearfaktoren relativ einfach an die Beobachtungen angepasst werden kann. Bei der untersuchten Variation der Materialcharakteristik hat sich gezeigt, dass diese angewendet auf die vorgefundenen Beanspruchungsbedingungen keinen wesentlichen Einfluss hat.

Ungeklärt bleibt der Anteil des primären Kriechens an der Hohlraumverformung bei sich zyklisch wiederholenden Belastungsvorgängen, wie sie über einen Betriebszeitraum von 30 bis 40 Jahren bei Ölspeicher- und Gasspeicherkavernen vorliegen. Im angewandten theoretischen Konvergenzmodell wird dieser Anteil als Prozentsatz des gesolten Hohlraumvolumens abgeschätzt.

Das Vorhandensein von Daten zur Bestimmung des primären Gebirgszustandes – Spannungen und Temperatur – erhöht die Genauigkeit der Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens in erheblichem Maße, da hierdurch die Grundbedingungen der Beanspruchung und der im theoretischen Konvergenzmodell berechneten Verformungsfähigkeit des Gebirges festgelegt werden.

Bei der Verwendung der Daten aus der Geländevermessung zur Bewertung des In-situ-Verformungsverhaltens spielt der Wert für den Grenzwinkel eine entscheidende Rolle.

Die Erfahrung zeigt, dass im Allgemeinen bei Kavernenanlagen im Salzgestein, bei denen eine ausreichende Schwebenmächtigkeit im Hangenden vorhanden ist, keine Auflockerung während des Setzungsvorganges stattfindet. Für den Grenzwinkel sollte untersucht werden, ob er einen über die Betriebszeit sich verändernden Wert annimmt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine zeitliche Veränderung von einem anfänglichen größeren Wert des Grenzwinkels zu kleineren Werten plausibel erscheint. Die Erfahrungen aus der Praxis mit sich über die Zeit ausweitenden Setzungsmulden unterstützen dieses Ergebnis.

## 6 Zusammenfassung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht eine über mehrere Jahrzehnte reichende Erfahrung des Betriebs von Speicher- beziehungsweise Solegewinnungskavernen im Salzgestein. Die während dieser Zeit gemachten Beobachtungen und gesammelten Betriebsdaten lassen die Möglichkeit einer Bewertung des mechanischen Verhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins auf der Grundlage dieser Daten zu. Daraus erwächst zum einen die Frage, ob die bisher gängige Bestimmung der Materialkennwerte des Salzgesteins im Labor als Grundlage für eine Auslegung und Dimensionierung einer Kaverne durch die Auswertung von In-situ-Beobachtungen und Betriebsdaten bestätigt werden kann, und zum anderen, ob unter gegebenen Umständen, wenn keine Laborversuche durchgeführt werden können, aufgrund indirekter Methoden zur Bewertung des In-situ-Materialverhaltens eine verlässliche Grundlage für die Bestimmung des Materialverhaltens des Salzgesteins geschaffen werden kann. Gerade im Zuge der Optimierung oder Erweiterung bestehender Kavernenanlagen erhält diese zweite Frage zunehmendes Gewicht.

Für die Bestimmung des In-situ-Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins werden unterschiedliche Verfahren angewendet, die die lokale Bewertung des jede einzelne Kaverne umgebenden Gebirgsbereichs zulassen oder global den gesamten Gebirgsraum des Salzgesteins um alle Kavernen eines Feldes einbeziehen. Grundlage der Bewertung des Materialverhaltens für die verwendeten Untersuchungsmethoden ist der Vergleich des am theoretischen Modell berechneten Verlaufs des Konvergenz- beziehungsweise Hohlraumvolumens mit den ermittelten Werten des Volumens der Setzungsmulde infolge des Kavernenbetriebs oder den gemessenen Hohlraumvolumina.

Es werden vier Kavernenanlagen untersucht, die sich durch ihre Art der Nutzung und den Umfang der zur Verfügung stehenden Datengrundlage und damit der Anwendbarkeit unterschiedlicher Untersuchungsmethoden unterscheiden. In allen vier Fällen gelingt eine verlässliche Bestimmung des Verformungsverhaltens des die Kavernen umgebenden Salzgesteins, sodass die auf diese Weise ermittelten Materialparameter für das Verformungsverhalten im Rahmen eines ingenieurmäßigen Konzeptes zur Dimensionierung und Auslegung von Kavernen im Salzgestein oder für eine Prognose des zukünftigen Setzungsverhaltens der Geländeoberfläche verwendet werden können.

Sofern bei den untersuchten Kavernenanlagen lokationsspezifische Materialkennwerte für das Kriechen des Salzgesteins auf der Grundlage von Laborversuchen vorliegen, können diese durch die vorgestellten Untersuchungen bestätigt werden. Dieses Ergebnis bestätigt die bisher in der Praxis angewandte Vorgehensweise, bei der anhand von Laboruntersuchungen an lokationsspezifischem Probenmaterial, das ein Volumen von weniger als einen halben Kubikmeter umfasst, auf das Verformungsverhalten des Gebirges in der Umgebung der späteren Kaverne geschlossen wird, das ein Volumen von mehreren Millionen Kubikmetern einnimmt.

Wenn die Ergebnisse der indirekten Untersuchungsmethoden zum Verformungsverhalten des Salzgesteins angewendet werden sollen, ohne dass eine Vergleichsbasis auf der Grundlage von Laborversuchen vorliegt, ist anzustreben, dass auf der Grundlage der vorhandenen Datenlage Möglichkeiten der Anwendung vergleichender oder unterstützender Methoden bestehen. So ergänzen sich zum Beispiel die Methoden des untertägigen Vergleichs des Konvergenzvolumens mit dem Vergleich der zeitlichen Veränderung der obertägigen Setzungsmulde. Der Vergleich berechneter und gemessener Verläufe der Bodensenkungen einzelner Vermessungspunkte im Einflussbereich der Kavernen kann dagegen bei der Bewertung des Materialverhaltens nur unterstützend hinzugezogen werden, da aufgrund der Teufenlage der Kavernen und ihres Abstandes untereinander die Setzungsmulden sich infolge des Betriebes einer einzelnen Kaverne mehrfach mit denen der Nachbarkavernen überschneiden. Es ist darauf zu achten, dass die vorhandene Datengrundlage es ermöglicht, den für die Dimensionierungsaufgabe erwarteten Bereich der Beanspruchung des umgebenden Salzgesteins zu untersuchen. Darüber hinaus stehen In-situ-Testmethoden zur Verfügung, um diesen speziellen Anforderungen gerecht zu werden. Im Rahmen der untersuchten Beispiele haben die Ergebnisse der In-situ-Tests gezeigt, dass sie gut mit den Ergebnissen der indirekten Methoden korrelieren.

Die verwendeten Methoden zur Bewertung des Verformungsverhaltens des Salzgesteins beziehen sich integral auf den gesamten Gebirgsraum, der durch die Beanspruchung des Salzgesteins in der Umgebung der Kavernen in Bewegung gerät. Lokale Inhomogenitäten des Salzgesteins haben keinen entscheidenden Einfluss auf das globale Deformationsverhalten.



Im Gegensatz zur Bewertung des Verformungsverhaltens des umgebenden Salzgesteins kann eine Bewertung des Festigkeitsverhaltens nicht durch die beschriebenen indirekten Methoden auf der Grundlage der Hohlraumvermessungen in Verbindung mit den Betriebsdaten und den Setzungsmessungen erfolgen. Anders als bei der Bewertung der Verformungseigenschaften des Salzgesteins ist nicht der integrale, sondern der lokale Wert der Festigkeit eines begrenzten Bereiches direkt an der Kavernenwand relevant, da Inhomogenitäten bezogen auf die Festigkeit hier zu lokal begrenzten Abschalungen führen können. Aus dem gleichen Grund ist auch eine Extrapolation des Festigkeitsverhaltens auf der Grundlage von In-situ-Daten auf Beanspruchungszustände, die außerhalb des bisherigen Erfahrungsbereiches liegen, nicht möglich. Wenn keine ausreichenden Laboruntersuchungsergebnisse anhand von Kernmaterial aus dem Bereich der Kaverne vorliegen, kann die Lücke im Wissen um die Festigkeit nur durch zusätzliche In-situ-Versuche geschlossen werden.

## 7 Quellennachweise

- /1/ Axelsson, O.:  
“Finite Difference Methods”, Chapter 2, Encyclopedia of Computational Mechanics, Volume 1, Editors: Stein, E., de Borst, R. Hughes, T.J.R., 2004.
- /2/ Bekendam, R. F., Oldenziel, C. E., Paar, W. A.:  
“Subsidence Potential of the Hengelo Brine Field (Part I) - Physico-Chemical Deterioration and Mechanical Failure of Salt Cavern Roof Layers”, Fall 2000 Conference, San Antonio, Technical Class Paper, Solution Mining Research Institute, 2000.
- /3/ Bérest, P., Brouard, B., Bergues, B., Frelat, J., Durup, J. G.:  
„Salt Caverns and the Compressibility Factor“, Fall 1997 Conference, El Paso, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, 1997.
- /4/ Bérest, P., Bergues, B., Brouard, B., Durup, J. G., Guerber, B.:  
„A Salt-Cavern Abandonment Test“, Spring 1999 Conference, Las Vegas, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, 1999.
- /5/ Bérest, P., Brouard, B., De Greef, V.:  
„Salt Permeability Testing - The Influence of Permeability and Stress on Spherical Hollow Salt Samples“, Research Project Report No.2000-1-SMRI, Solution Mining Research Institute, 2000.
- /6/ Breunese, J. N., van Eijs, R. M. H. E., de Meer, S., Kroon, I. C.:  
„Observation and prediction of the relation between salt creep and land subsidence in solution mining. The Barradeel Case“, Solution Mining Research Institute, Technical Meeting Paper, Fall Conference, Chester, 2003.
- /7/ Boucly, P.:  
„In situ Experience and mathematical representation of the behavior of rock salt used in storage of gas“, Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the First Conference held at The Pennsylvania State University 1981, Hardy, H.R., Langer, M. (Ed.), 1984.
- /8/ Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.:  
„Taschenbuch der Mathematik“, 16. Auflage, Verlag Harri Deutsch, 1976.

- /9/ Brouard, B., Bérest, P., Karimi-Jafari, M., Rokahr, R. B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Fourmaintraux, D., de Laguérie, P., You, T.:  
„Salt Cavern Abandonment Field Test in Carresse“, Solution Mining Research Institute, Research Project Report, 2006-1, 2006.
- /10/ Charpentier, J. P., Bérest, P., Blum, P. A.:  
„Creep of Rock Salt under Small Loading“, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, Washington, 1999.
- /11/ Denzau, H., Scharf, U., von Tryller, H.:  
„Accuracy and Convergence Considerations Regarding Ultrasonic Cavity Surveys Using ECHO-LOG Technique“, 7<sup>th</sup> Symposium on Salt, Vol. I, 385-393, 1993.
- /12/ Durup, J. G.:  
„Relationship between subsidence and cavern convergence at Tersanne (France)“, Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, Spring Meeting, Atlanta, 1991.
- /13/ Ehgartner, B. L., Ballard, S., Tavares, M., Yeh, S., Hinkebein, T. und Ostensen, R.:  
„A Predictive Model for Pressurization of SPR Caverns“, Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, Fall Meeting, San Antonio, 1995.
- /14/ Ehgartner, B. L., Bauer, S.:  
„Large scale salt deformation: Comments on subsidence using thermal, creep and dissolution modeling to assess volumetric strain“, Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, Spring Meeting, Wichita, 2004.
- /15/ Eickemeier, R.:  
„Senkungsprognosen über Kavernenfeldern - Ein neues Modell“, Tagungsbeitrag zum 34. Geomechanik-Kolloquium, Leipzig, 2005.
- /16/ van Eijs, R. M. H. E., Pöttgens, J. J. E., Breunese, J. N. und Duquesnoy, A. J. H. M.:  
„High convergence rates during deep salt mining in the northern part of The Netherlands“, 8<sup>th</sup> World Salt Symposium, The Hague, 2000.
- /17/ Fokker, P. A., Steeneken, P. V., Kruse, G. A. M.:  
„Predictable and Manageable Subsidence Above Deep Salt Caverns“, Fall 2000 Conference, San Antonio, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, 2000.

- /18/ Hartmann, A.:  
„Ein Beitrag zur Überwachung von Kavernenanlagen“, Dissertation, TU Clausthal, 1984.
- /19/ Hauck, R. Staudtmeister, K. und Zander-Schiebenhöfer, D.:  
„The Results of the Numerical Simulation of the Etzel Test“, Technical Meeting Paper, Spring Meeting Solution Mining Research Institute, Orlando, 2001.
- /20/ Haupt, W., Sroka, A., Schober, F.:  
„Die Wirkung verschiedener Konvergenzmodelle für zylindrische Kavernen auf die übertägige Senkungsbewegung“, Das Markscheidewesen, Jahrgang 90 (1983), Nr.1.
- /21/ Heusermann, S.:  
„Kritische Gegenüberstellung und Bewertung von Stoffgesetzen zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Steinsalz auf der Grundlage von Laboruntersuchungen und In-Situ-Messungen“, Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau, Universität Hannover, Heft 6, 1982.
- /22/ Heusermann, S., Lux, K. H., Rokahr, R. B.:  
„Entwicklung mathematisch-mechanischer Modelle zur Beschreibung des Stoffverhaltens von Salzgestein in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur auf der Grundlage von Laborversuchen mit begleitenden kontinuumsmechanischen Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente“, Forschungsbericht T 83-218 Technologische Forschung und Entwicklung - Nichtnukleare Energietechnik., Bundesministerium for Forschung und Technologie, 1983.
- /23/ Hugout, B.:  
„Mechanical behavior of salt cavities - in situ tests - model for calculating the cavity volume evolution“, Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Second Conference Hannover 1984, Hardy, H.R., Langer, M. (Ed.), 1988.
- /24/ Jacobsen, F. L., Nielsen, B. L.:  
„Structural Studies of a Danish Salt Dome Optimize Construction of Six Gas Storage Caverns“, Seventh Symposium on Salt, Vol. I, 151-158, 1983.
- /25/ Kratsch, H.:  
„Mining Subsidence Engineering“, Springer-Verlag, 1983.

- /26/ Lux, K. H.:  
„Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau“, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1984.
- /27/ Muskat, M.:  
„The flow of homogeneous fluids through porous media“, Nachdruck der Originalausgabe von 1937 durch die International Human Resources Development Corporation, Boston, 1982.
- /28/ Neuhaus, W.:  
„Die Berechnungsgrundlagen der bergschadenkundlichen Einwirkungsnetze und ihre Möglichkeiten und Grenzen“, Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, 83, Heft 2, Deutscher Markscheider-Verein e.V., Essen, 1976.
- /29/ Nguyen-Minh, D., Maitournam, H., Braham, S., Durup, J. G.:  
„A Tentative Interpretation of Long-Term Surface Subsidence Measurements over Solution a Mined Cavern Field“, 7<sup>th</sup> Symposium on Salt, Vol.1, 441-449, 1993.
- /30/ Oldenziel, C. E., Zander-Schiebenhöfer, D.:  
„Confidence Building in Relation to the Optimisation and Extension of the Hvornum Brine Field in Mariager, Denmark“, 8<sup>th</sup> World Salt Symposium, The Hague, 5/2000, Volume 1, p. 349-354.
- /31/ Oldenziel, C. E., Paar, W. A., Bekendam, R. F.,:  
“Subsidence Potential of the Hengelo Brine Field (Part II) - An Analytical Model to Predict Future Surface Subsidence“, Fall 2000 Conference, San Antonio, Technical Class Paper, Solution Mining Research Institute, 2000. /2
- /32/ Peach, C. J.:  
„Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks“, Geologica ultraiectina : Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht ; Dissertation, 1991
- /33/ Quintanilha de Menezes, J. E., Nguyen-Minh, D.:  
„Long Term Subsidence Prediction Above Storage Cavity Fields in Salt Layers“, Solution Mining Research Institute, Technical Meeting Paper, Cleveland, 1996.

- /34/ Reitze, A.:  
„Bericht über die Ermittlung der Senkungsvolumina aus den Höhenbeobachtungen im Bereich der Solegewinnungskavernen Hvornum der Akzo Nobel, Denmark”,  
Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH, Giesen, 1998.
- /35/ Reitze, A.:  
“Prediction of Ground Movements Above Salt Caverns Using Influence Functions”, Fall 2000 Conference, San Antonio, Technical Class Paper, Solution Mining Research Institute, 2000.
- /36/ Röhr, H. U.:  
“Gebirgsmechanisches Verhalten einer Kaverne im Salzgestein”, Kali- und Steinsalz, Band 6, Seiten 178-183, November, 1973.
- /37/ Rokahr, R. B., Staudtmeister, K.:  
„Einfluss des Kriechens auf das Tragverhalten von Salzkavernen“, Felsbau, 21 (2003), Nr.5, Oktober, 2003.
- /38/ Rokahr, R. B., Staudtmeister, K., Hauck, R. und Zander-Schiebenhöfer, D.:  
interne Aufzeichnungen zur Nachberechnung und Bewertung der Ergebnisse eines Bohrlochtests im Salzgestein, 2000.
- /39/ Rokahr, R. B., Hauck, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Crologino, F., Rolfs, O.:  
„High Pressure Cavern Analysis“, Research Project Report, No.2002-2-SMRI, Solution Mining Research Institute, 2002.
- /40/ Van Sambeek, L. L.:  
“A Simple Method for Modeling the Pressure Buildup or Flow of an Abandoned Solution Well”, Technical Meeting Paper, Fall Meeting Solution Mining Research Institute, Austin, 1990.
- /41/ Van Sambeek, L. L.:  
“Evaluating Cavern Tests and Surface Subsidence Using Simple Numerical Models”, 7<sup>th</sup> Symposium on Salt, Kyoto, 1993.

- /42/ Schober, F.:  
„Die Berechnung von Bodenbewegungen über kavernenartigen Hohlräumen unter Beachtung der globalen Volumenkonvergenz“, Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, 1982.
- /43/ Schober, F., Sroka, A.:  
„Die Berechnung von Bodenbewegungen über Kavernen unter der Berücksichtigung des zeitlichen Konvergenz- und Gebirgsverhaltens“, Kali und Steinsalz, Bd. 8(1983), Heft 10.
- /44/ Sroka, A., Schober, F.:  
„Die Berechnung der maximalen Bodenbewegung über kavernenartigen Hohlräumen unter Berücksichtigung der Hohlraumgeometrie“, Kali und Steinsalz, August 1982.
- /45/ Staudtmeister K., Rokahr, R. B.:  
„Laboratory Test within the Scope of Rock Mechanical Investigations for the Design of Solution Mined Caverns in Rock Salt Mass“, Fall 1994 Meeting, Hannover, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, 1994.
- /46/ Staudtmeister K., Schmidt, T.:  
„Comparison of Different Methods for the Estimation of Primary Stresses in Rock Salt Mass with Respect to Cavern Design“, 8<sup>th</sup> World Salt Symposium, The Hague, 5/2000, Volume 1, p. 331-335.
- /47/ Staudtmeister K., Struck, D.:  
„Design Criteria for the Prevention of Creep Rupture for Gas Caverns in Rock Salt Mass“, Fall 1990 Conference, Paris, Technical Meeting Paper, Solution Mining Research Institute, 1990.
- /48/ Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D.:  
interne Aufzeichnungen Berechnung des Konvergenzvolumens aus den Produktionsdaten einer Solegewinnungsanlage (1998)
- /49/ Walther, C., Weber, V.:  
„Berechnung von Bodenabsenkungen über Kavernen im Salzgestein“, Schriftenreihe Lagerstättenenerfassung und -darstellung, Bodenbewegung und Bergschäden, Ingenieurvermessung, Heft 8, 1978.

/50/ Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.:

„The Finite Element Method“, Volume 1, 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, London, 1991.

### Mündliche Mitteilungen

/1/ Andreas Reitze, Socon Sonar Control Kavernenvermessung GmbH, Giesen, 2004

/2/ Kurt Staudtmeister, Institut für Unterirdisches Bauen, Leibniz Universität Hannover, 2006.

/3/ Jörg Weidenbach, Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE), Peine, 2006

### Allgemeine Referenzen

Sofern sie nicht in der Literatur veröffentlicht sind, wird an dieser Stelle den betreffenden Kavernenbetreibern für die Genehmigung zur Verwendung ihrer im Rahmen dieser Arbeit benutzten Daten gedankt.

### Bildernachweis

Folgende Bilder konnten mit freundlicher Genehmigung der betreffenden Kavernenbetreiber verwendet werden:

Bild 4.2 , Bild 4.3 , Bild 4.6 , Bild 4.10, Bild 4.11,  
Bild 4.12, Bild 4.13, Bild 4.14, Bild 4.15, Bild 4.16,  
Bild 4.17, Bild 4.18, Bild 4.19, Bild 4.20, Bild 4.21,  
Bild 4.24, Bild 4.25

Folgende Bilder basieren auf Daten, die am Institut für Unterirdisches Bauen der Leibniz Universität Hannover vorhanden sind:

Bild 4.1 , Bild 4.22, Bild 4.23, Bild 5.5



## Lebenslauf

Zander-Schiebenhöfer, Dirk

geboren:	01.05.1957	in Emden Mutter: Elisabeth Zander, geb. Dubbe Vater: Jürgen Zander
Schule:	1964 - 1967 1967 - 1976 Mai 1976	Grundschule in Bremen Gymnasium in Bremen Abitur
Studium:	1976 - 1984 März 1984	Technische Universität Braunschweig Diplom im Fach Bauingenieurwesen
Beruf:	1984 -1995  ab 1995 ab 1998	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Unterirdisches Bauen der Universität Hannover Fachgebiete: Tunnel- und Kavernenbau selbstständig Mitarbeiter am Institut für Unterirdisches Bauen der Universität Hannover
Familienstand:		geschieden, 2 Kinder: Ann-Kristin Schiebenhöfer, geboren 11.08.1986 Marie-Claire Schiebenhöfer, geboren 03.04.1990