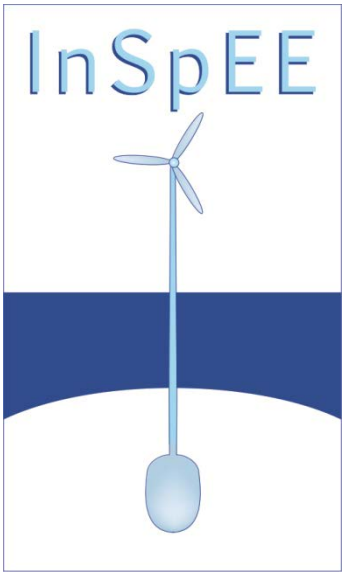
Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)



Sachbericht
03ESP323B
Eingereicht durch:
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Hannover, 21. März 2016

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Verbundpartner

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Nutzungspotenziale des tieferen Untergrundes, geologische CO2-Speicherung)

Wilhelmstraße 25-30
13593 Berlin

Ansprechpartnerin: Dr. Gabriela von Goerne

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Geologisch-geotechnische Erkundung)

Stilleweg 2
30655 Hannover

Ansprechpartnerin: Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik Hannover

Welfengarten 1A
30167 Hannover

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

KBB Underground Technologies GmbH

Baumschulenallee 16
30625 Hannover

Ansprechpartnerin: Dipl.-Ing. Sabine Donadei

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Disclaimer

Die Studie, das Informationssystem und die Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Die Autoren übernehmen dennoch keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der bereitgestellten Inhalte und Informationen, da ein deutlicher Anteil der Annahmen auf Basis öffentlich zugänglicher Quellen basiert, deren Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität nicht in der Verantwortung der Verbundpartner liegt.

Das ermittelte Speicherpotential stellt auf Grund der Struktureigenschaften und der internen und obertägigen Flächenbelegung ein theoretisches Potential dar. Da sowohl die Berücksichtigung der Standortgeologie auf Annahmen mit unterschiedlichen Genauigkeiten entsprechend des jeweiligen Kenntnisstandes zu den einzelnen Strukturen beruht als auch nur eine begrenzte Anzahl von generalisierten Modellkavernen entwickelt und einbezogen werden konnte, kann das Ergebnis vom tatsächlich umsetzbaren Speicherpotential abweichen. Diese Abweichung wird durch Faktoren, die je nach Umsetzungsbedarf und –zeitraum unterschiedlich ins Gewicht fallen können, verstärkt. Da ein Teil dieser Faktoren der Hoheit der genehmigenden Behörden, des aktuellen Stands der Technik und der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf das Speicherkonzept unterliegen, konnten diese nicht in der Potentialabschätzung aufgenommen werden.

Die Arbeiten und deren Ergebnisdarstellung der Verbundpartner stellen eigenständige, interagierende Arbeitspakete dar und liegen in der Eigenverantwortung des jeweiligen Verbundpartners.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns beim Bundesministerum für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung des Projektes InSpEE und beim Projektträger Jülich (PTJ) für die gute Betreuung bedanken.

Unser besonderer Dank gilt den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder, die das Projekt durch Bereitstellung von Daten, Abstimmung der Ergebnisse und wertvolle Anregungen während der Projektlaufzeit unterstützt haben.

Zusammenfassung

Das Energiekonzept der Bundesregierung vom 28. September 2010 setzt ehrgeizige Ziele für die Energieversorgung Deutschlands und den Klimaschutz im Jahre 2050. Um diese Ziele zu erreichen, wurde eine gemeinsame Initiative der Bundesministerien für Wirtschaft und Energie (BMWi), für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) sowie für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet von Energiespeichertechnologien im April des Jahres 2011 gestartet: die Förderinitiative Energiespeicher. Diese Förderinitiative ist eines von drei Themen, welche als ressortübergreifende Förderinitiativen von der Bundesregierung umgesetzt werden. Sie spielt damit eine wichtige Rolle im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“.

Mit dem forcierten Übergang auf fluktuierende erneuerbare Energieträger stellt sich die Frage der großtechnischen Speicherung elektrischer Energie. Energiespeicherkraftwerke, welche aus erneuerbarem Strom Druckluft bzw. Wasserstoff erzeugen und einspeichern können, um bei Energiebedarf diese den Energiemärkten wieder zur Verfügung zu stellen, können dabei eine wesentliche Rolle spielen. Eine großvolumige Speicherung dieser Medien kann dabei nur im geologischen Untergrund erfolgen. Auf Grund hoher Flexibilität in der Fahrweise, geringem Kissengasanteil sowie extrem geringer Reaktionsneigung mit dem Speichergut stellen Salzspeicherkavernen hierfür die bevorzugte Speicheroption dar.

Während sich bereits zahlreiche Forschungs- und Entwicklungs (FuE)-Arbeiten mit der Bereitstellung der Technologien beschäftigen, mangelte es bisher noch an geeigneten Grundlagen für eine Bewertung verschiedener Speicherstandorte sowie an einer fundierten Abschätzung, welche Energiemengen überhaupt im geologischen Untergrund in Deutschland speicherbar sind.

Ziel des Verbundvorhabens InSpEE – **In**formationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur **Sp**eicherung von **E**rneuerbaren **E**nergien (Wasserstoff und Druckluft) war deshalb zunächst die Erarbeitung und Bereitstellung von Auslegungsgrundlagen und geologisch-geotechnischen Grunddaten sowie von Kriterien zur Standortauswahl für die Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft. Darauf aufbauend erfolgte eine Abschätzung des Energiespeicherpotentials der norddeutschen Salzstrukturen für erneuerbare Energien in Form von Wasserstoff und Druckluft.

Verbundpartner im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens sind die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik / Abteilung Unterirdisches Bauen (IGtH) sowie die KBB Underground Technologies GmbH (KBB UT).

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist die zentrale geowissenschaftliche Beratungseinrichtung der Bundesregierung und gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Als geowissenschaftliches Kompetenzzentrum berät und informiert sie die Bundesregierung und die deutsche Wirtschaft in allen geowissenschaftlichen und rohstoffwirtschaftlichen Fragen. Ihre Arbeit dient einer ökonomisch und ökologisch vertretbaren und sinnvollen Nutzung und Sicherung natürlicher Ressourcen und somit der Daseinsvorsorge. Als nationaler geologischer Dienst von Deutschland ist die BGR mit zahlreichen internationalen Aufgaben betraut. Als Bundesoberbehörde ist die BGR Bestandteil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur Deutschlands und nimmt auch gesetzlich festgelegte Aufgaben wahr. Die BGR beteiligt sich auf nationaler und internationaler Ebene an der Erarbeitung geologischer Grundlagen. In Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer und Europas stellt sie geologische Fachinformationen, Kartenwerke, Standards und Methoden bereit. Im Rahmen nationaler, europäischer (EuroGeoSurveys) und internationaler Initiativen leistet die BGR Beiträge zum Aufbau der Geodaten-Infrastruktur (Geoinformationswirtschaft).

Das Institut für Geotechnik / Abteilung Unterirdisches Bauen gehört der Fakultät Bauingenieurwesen der Leibniz Universität Hannover an. Es ist verantwortlich für die studentische Lehre im Bereich Tunnelbau und Geomechanik. Das IGtH beschäftigt sich seit über 30 Jahren mit Forschungsaufgaben aus dem Gebiet des unterirdischen Bauens. Insbesondere im Bereich der Salzmechanik wurden in den letzten Jahren mehrere Verbundvorhaben im Rahmen eines Stoffgesetzvergleichs durchgeführt. Das IGtH betreibt ein gesteinsmechanisches Labor, in dem Salzgesteinsproben mit unterschiedlichen Belastungsarten und Temperaturbereichen untersucht werden können.

Die KBB Underground Technologies GmbH ist ein führendes Dienstleistungsunternehmen auf dem Gebiet der Speicherung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen im geologischen Untergrund. KBB UT beschäftigt sich darüber hinaus seit mehreren Jahren in zahlreichen FuE-Projekten mit der Speicherung fluktuierender Wind- und PV-Energie über Druckluft und Wasserstoff in Salzkavernen und Porenspeichern und führt dabei die Tätigkeiten der früheren Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH (KBB) in Hannover weiter. KBB UT kann damit auf insgesamt über 40 Jahre Erfahrung auf den Gebieten Planung, Bau und Betreuung von verschiedensten Untertagespeichern sowie Salz- bzw. Solegewinnung zurückgreifen und auf die Realisierung von mehr als 50 Speicherprojekten mit einer Anzahl von nahezu 400 Kavernen weltweit verweisen.

Das Verbundvorhaben InSpEE zeichnete sich durch eine starke Vernetzung der Arbeitspakete untereinander aus. Die Arbeitspakete “Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten“, „Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung“ und „Gebirgsmechanische An-

forderungen an die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff“ schufen dabei Grundlagenwissen, welches sowohl innerhalb dieser Arbeitspakete benötigt und ausgetauscht wurde als auch die Basis für die Durchführung der Arbeitspakete “Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung“ und „Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen“ bildet. Die arbeitspaketübergreifende Koordination des Verbundvorhabens bildete ein eigenständiges Arbeitspaket. Im Rahmen der Durchführung des Verbundvorhabens erfolgte ein regelmäßiger Austausch der Arbeitspakete einschließlich der Abstimmung von Randbedingungen für das weitere Vorgehen in regelmäßigen Arbeitstreffen. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Arbeitspaket 1: Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten - BGR

Für die Prognose von Speichermöglichkeiten erneuerbarer Energien in Salzstrukturen ist es notwendig, die Verbreitung von salzführenden Horizonten sowie die Ausdehnung von Salzstrukturen im tieferen Untergrund zu kennen. Die Lage der in Norddeutschland verbreiteten Salzstrukturen ist im Allgemeinen bekannt, ihre flächendeckende Ausdehnung im Untergrund jedoch nicht. Daher wurden im InSpEE-Verbundvorhaben geologische Niveauschnittkarten in vier verschiedenen Teufen (-500 m, -1.000 m, -1.500 m, -2.000 m u. NN (Meter unter Normalnull) erarbeitet. Bei den Niveauschnittkarten handelt es sich um gedachte horizontale Schnittebenen, die die in der entsprechenden Teufe anzutreffenden geologischen Schichten abbilden. So ist es möglich, die Verbreitung der Salinarstrukturen im Untergrund, auf denen der Fokus des Verbundvorhabens lag, übersichtlich zu erfassen. Ebenso lassen sich die umgebenden Gesteinsformationen und das regionale Umfeld flächenhaft darstellen. Die Beschreibung des regionalen Umfeldes sowie die Rekonstruktion der Entwicklungsgeschichte von Salinarstrukturen wurden beispielhaft an einer Regionalstudie in Brandenburg durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, wie sich im Laufe der Erdgeschichte aus flach lagerndem Zechsteinsalz zuerst ein Salzkissen bildete, aus dem im weiteren Verlauf drei Salzstöcke entstanden.

Die Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen werden den Nutzern in Form eines Online-Kartendienstes zugänglich gemacht. Das Informationssystem umfasst neben den bereits erwähnten Niveauschnittkarten auch für den Kavernenbau relevante Informationen über die Tiefenlage von Salzstrukturen, das Alter der sie aufbauenden Salinare, die Mächtigkeit der Salzstrukturen (Höhenunterschied von Strukturoberfläche und Salinarbasis) sowie weitere strukturbeschreibende Merkmale. Ferner werden den Nutzern zusätzliche Informationen und weiterführende Literaturverweise in Form von Datenblättern zur Verfügung gestellt. Das Informationssystem ist unter dem Link https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de zugänglich.

Arbeitspaket 2: Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung - BGR

Für eine Evaluierung verschiedener Salzstrukturen in Norddeutschland hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung für den Kavernenbau zur Speicherung von erneuerbaren Energien mangelt es bislang an einer systematischen Zusammenstellung der dafür erforderlichen geologischen Grundlagen. Um dieses Manko zu beseitigen, wurden im zweiten Arbeitspaket des InSpEE-Verbundvorhabens alle verfügbaren Informationen zu Salzstrukturen zusammengestellt, gesichtet und aufgearbeitet. Dabei wurde ein konsistenter Datensatz in einer Datenbank erarbeitet, in dem die für die potentielle Nutzung als Kavernenstandort relevanten Informationen zu jeder norddeutschen Salzstruktur enthalten sind. In Form eines kompakten Steckbriefs werden diese Strukturinformationen im öffentlichen Informationssystem verfügbar gemacht. Neben allgemeinen Angaben (z. B. Strukturname, geografische Lage) sind darin Informationen zur Geologie (z. B. Tiefe der Strukturoberfläche, strukturaufbauendes Salinar, prognostizierter Internbautyp), zum Erkundungsgrad und zu einer möglichen konkurrierenden Nutzung (z. B. Bergbau) enthalten.

Im Norddeutschen Becken, das neben dem norddeutschen Festland auch den deutschen Nord- und Ostseeraum umfasst, wurden insgesamt 697 Salzstrukturen identifiziert. In einem kriterienbasierten Auswahlprozess wurden untersuchungsrelevante bzw. für eine Speicherung von regenerativen Energien potentiell geeignete Salzstrukturen ermittelt. 269 Strukturen erfüllten die festgelegten strukturgeologischen und gebirgsmechanischen Voraussetzungen und gingen in eine detaillierte Speicherpotentialermittlung über.

Nur bestimmte Bereiche einer Salzstruktur kommen für die Anlage von Kavernen in Betracht. Um die ausgewählten Strukturen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Nutzbarkeit bewerten zu können, wurde eine Methodik entwickelt, um ihren inneren Aufbau qualitativ vorhersagen zu können. Als Wirtsgesteine eignen sich in den norddeutschen Salzstrukturen besonders die permischen Salzgesteine des Zechsteins und des Oberrotliegend. Ihre räumliche Verteilung innerhalb der Salzstrukturen ist eng an die jeweilige Strukturentwicklung gekoppelt. Das zeigen die dafür untersuchten Referenzstrukturen, die entweder durch Bergwerke oder durch Standorterkundungen für Kavernenspeicher erschlossen sind.

Für die Bestimmung des für die Anlage von Kavernen nutzbaren Bereiches jeder Struktur wurden der Internbaustil und der daraus resultierende Flächenanteil des Wirtsgesteins prognostiziert. Dafür wurden die Strukturen anhand vorliegender Erkundungsergebnisse und ihrer in der Datenbank erfassten Charakteristika in vier Klassen mit vergleichbaren Lagerungsverhältnissen der jüngeren und älteren Zechsteinformationen eingeteilt (Salzkissen, tektonische Strukturen, Diapire, kompressiv überprägte Diapire). Die Doppelsalinar-Strukturen, bestehend aus Zechstein- und Rotliegendsalzen, bilden eine eigene

Klasse. Für jede der fünf Klassen wurde der nutzbare Flächenanteil in den vier Tiefenlagen der Niveauschnittkarten abgeschätzt.

Arbeitspaket 3: Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff – IGtH

Das Betriebsszenario bei der Salzkavernenspeicherung von Druckluft oder Wasserstoff unterscheidet sich von dem der Erdgasspeicherung. Die anzunehmenden Lastfälle weichen von denen der Erdgasspeicherung ab und erfordern eine neue Bewertung der Spannungszustände in der Umgebung der Salzkaverne. Der Lastfall ist für jede Kaverne standortspezifisch - entsprechend der Teufe, Größe, Geometrie, des Verhältnisses Volumen zu thermisch wirksamer Oberfläche (V/O) sowie der Anforderungen der Kavernenbetreiber zu ermitteln. Der Spannungszustand in der Umgebung der Kaverne wird dabei wesentlich von der vorherigen Fahrweise beeinflusst, so dass ein Lastfall immer mehrere aufeinander folgende Innendruckniveaus in den gebirgsmechanischen Grenzen eines minimalen und maximalen Kaverneninnendruckes enthält. Von entscheidender Bedeutung sind hierbei die Stillstandsphasen, in denen weder eine Befüllung noch eine Entnahme des jeweiligen Speichermediums stattfindet.

Die hierzu im Arbeitspaket 3 durchgeführten Variationsberechnungen haben gezeigt, dass die Temperaturentwicklung in einer Druckluftkaverne signifikant vom Druckniveau beeinflusst wird. Ein höherer Innendruck während der Betriebsphase führt zu geringeren Temperaturdifferenzen und damit letztendlich zu Spannungsumlagerungsprozessen, die während des gesamten Operationszyklus im Druckspannungsbereich bleiben.

Der Vergleich von Kavernen in den Teufenlagen 750 m und 950 m zeigt, dass die Teufen die Temperaturentwicklung in der Kaverne und den damit verbundenen Spannungszustand in der Umgebung des Hohlraums nur geringfügig beeinflussen. Als Konsequenz ist eine Druckluftkaverne, auf Grund des erforderlichen raschen Entnahmeprozesses während eines Tageszyklus, im entsprechenden Druckintervall anzulegen.

Im Vergleich dazu wird die Temperaturentwicklung in einer Wasserstoffkaverne entscheidend von der Teufenlage und dem Volumen beeinflusst. Gemäß der Forderung, keine Spannungsumlagerungsprozesse im Zugspannungsbereich zuzulassen, sind größere Wasserstoffkavernen in entsprechender Teufe anzulegen oder die Entnahmeraten bzw. Entnahmezeiten zu reduzieren. Größere Teufen haben zur Folge, dass der erforderliche Minimaldruck aus gebirgsmechanischer Sicht erhöht werden muss und sich damit das Volumen des Kissengases erhöht. Allerdings kann der zulässige Maximaldruck angehoben werden, wodurch sich insgesamt eine größere zulässige Druckdifferenz ergibt. Des Weiteren erhöhen sich mit zunehmender Teufenlage die primären Gebirgsspannungskomponenten und die primäre Gebirgstemperatur und führen zusammen zu höheren Konvergenzen. Kleinere Raten oder ein kürzeres Betriebsintervall können je

nach Anwendungsziel der zukünftigen Kavernenspeicheranlage die Betriebsfreiheit reduzieren.

Insgesamt konnten über die differenzierten Bewertungsdurchläufe unter Berücksichtigung variierender Betriebsbedingungen und -abläufe die maßgebenden Auslegungsparameter für die Potentialabschätzung von Kavernen zur Druckluft- und zur Wasserstoffspeicherung zur Verfügung gestellt werden.

Arbeitspaket 4: Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung – KBB UT

Das Arbeitspaket 4 bildet die Brücke zwischen der Schaffung der notwendigen Grundlagen für eine belastbare Potentialabschätzung des Energiespeichervolumens norddeutscher Salzstrukturen (Arbeitspakete 1, 2 und 3) gegenüber existierenden Potentialabschätzungen und der Durchführung der Potentialabschätzung (Arbeitspaket 5). Es wurden Kriterien erarbeitet, welche eine generelle Aussage zu der potentiellen Eignung der Salzstrukturen für die Errichtung von Wasserstoff- und Druckluftspeicher-kavernen ermöglichen sowie eine Methodik entwickelt, die die Abschätzung des möglichen Speicherpotentials der Salzstrukturen als Ziel besitzt. Darüber hinaus begleitete das Arbeitspaket 4 eng die Arbeiten der Arbeitspakete 1 bis 3 hinsichtlich der Festlegung notwendiger Annahmen und Randbedingungen.

Im Rahmen gemeinsamer Diskussionen mit den Verbundpartnern wurden folgende Kriterien zur Potentialabschätzung möglicher Druckluft- bzw. Wasserstoffspeicher erarbeitet und berücksichtigt (siehe 5 AP 4 – Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung):

- Mindestmächtigkeit (Ausschlusskriterium),
- Maximale Teufenlage Top Caprock (Ausschlusskriterium),
- Minimale Teufenlage Top Caprock (im Rahmen des Betrachtungsraumes des InSpEE-Verbundvorhabens nicht relevant),
- Mindestfläche (Ausschlusskriterium),
- Salzqualität (Einfluss auf mögliches Potential),
- aktuelle Bebauung und konkurrierende Nutzung (Einfluss auf mögliches Potential).

Weitere mögliche Ausschlussfaktoren wie Soleverbringung und geschützte Flächen wurden nicht in den Kriterienkatalog aufgenommen, da diese infrastrukturellen, technischen und politischen Bedingungen untergeordnet sind, welche Änderungen unterliegen können. Diese Faktoren sind bei der individuellen Standortermittlung zu berücksichtigen.

Die Auswertung des Potentials basiert sowohl auf den geologischen Eingangswerten des Verbundpartners BGR als auch auf den gebirgsmechanischen Eingangswerten des Verbundpartners IGtH. Diese sind nicht direkt kompatibel und wurden daher für die Durchführung der Potentialabschätzung aufbereitet. Ziel der Aufbereitung war der Erhalt von dreidimensionalen, für den Kavernenbau potentiell geeigneten Salzbereichen, der Aufbau von Salzzylindern, welche den belegten Salzbereich der verschiedenen Modellkavernen für die Druckluftspeicherung wiedergeben sowie die Zuordnung von Energieinhalten für die entsprechenden Modellkavernen. Weiterhin wurde das Vorgehen für die Potentialermittlung erarbeitet.

Arbeitspaket 5: Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen – KBB UT

Nach der Datenverarbeitung und -verknüpfung der Eingangsdaten aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 in Arbeitspaket 4 war die Durchführung der Potentialabschätzung Inhalt des Arbeitspakets 5. In diesem wurde das Gesamtspeicherpotential für die aus Arbeitspaket 2 übergebenen 269 Strukturen jeweils für die Errichtung von Druckluftkavernen und von Wasserstoffkavernen ermittelt. Die Potentiale für die Speicherung von Druckluft und von Wasserstoff wurden unabhängig voneinander ermittelt, so dass diese nicht addiert werden können.

Die Potentialabschätzung weist bewusst einen stark konservativen Charakter auf. Dieser ist im Wesentlichen in der Einschränkung des Salztypes auf Zechstein2- (Staßfurt-Folge) und Rotliegendsalz, in der Beschränkung auf die Betrachtung von Salzstrukturbereichen, die sowohl im Teufenschnitt oberhalb als auch unterhalb den für die Anlegung von Kavernen ausgewählten Salztyp aufweisen, und im Ausschluss von Strukturen mit einem Strukturtop zwischen 1.000 m und 1.500 m begründet. Dieser Ausschluss resultiert aus der Eingangsdatenlage und schließt eine potentielle Eignung für die Errichtung von Kavernenspeichern nicht generell aus. Strukturen im Offshore-Bereich bilden zusätzliches, nicht berücksichtigtes Potential.

Der Umgang mit den ermittelten Flächen führt zu einer Scheingenauigkeit der Anordnung möglicher Kavernen in den Salzstrukturen. Die Reduzierung des nutzbaren Flächenanteils wurde im Rahmen der Potentialabschätzung durch eine gleichmäßige Verkleinerung der Gesamtfläche berücksichtigt, welche in der Realität so nicht auftreten wird. Im Rahmen der Erarbeitung des Auswertungsalgorithmus wurde für Strukturen, in denen Kavernenfelder bereits existieren, überprüft, inwiefern dieses Vorgehen im Rahmen einer großflächigen Potentialabschätzung als hinreichend genau betrachtet werden kann.

Die Gesamtergebnisse der Potentialabschätzung betragen in Norddeutschland 4,5 Terawattstunden (TWh) für die Speicherung elektrischer Energie über Druckluft und Wärme (CAES) und 1,6 Petawattstunden (PWh) für die Speicherung von Wasserstoff bei ein-

maligem Umschlag. Diese Werte stellen die mögliche Ausspeicherleistung der Speicherkraftwerke dar. Die Gesamtergebnisse enthalten einen Abschlag für Bebauung und Bergbau von 30 % für die Errichtung von Druckluftspeicherkavernen und von 24 % für die Errichtung von Wasserstoffkavernen. Den deutlich größten Anteil sowohl an potentiell geeigneten Strukturen als auch am Speicherpotential besitzen die Bundesländer Bremen / Niedersachsen.

Das ermittelte Speicherpotential stellt ein auf Grund der Struktureigenschaften und der internen und obertägigen Flächenbelegung ermitteltes theoretisches Potential dar. Dieses wird hinsichtlich Umsetzbarkeit durch weitere Faktoren wie

- Ausschluss oder Einschränkung durch schützenswerte Gebiete,
- Erfordernis einer umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Verbringung der Sole während des Kavernenbaus,
- mögliche Einschränkung der Feldesgröße zur Reduzierung möglicher Bodensenkungen oberhalb des Feldes (siehe auch Kratzsch 1997) oder
- zu großem Abstand zu notwendiger Infrastruktur wie Strom- und Gasleitungen, entsprechend dem Speicherziel

beschränkt. Da diese Faktoren der Hoheit der genehmigenden Behörden, des aktuellen Stands der Technik und der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf das Speicherkonzept unterliegen, können und wurden diese nicht generalisiert als Abschlagsfaktoren in die Potentialermittlung aufgenommen.

Arbeitspaket 6: Projektkoordination – KBB UT

Dieses Arbeitspaket dient der arbeitspaketübergreifenden Projektkoordination.

Auf der Basis der im InSpEE-Verbundvorhaben erarbeiteten geologischen und gebirgsmechanischen Grundlagen ist eine deutlich genauere und alle Salzstrukturen des Norddeutschen Beckens umfassende Abschätzung des theoretischen Speicherpotentials durchgeführt worden. Darüber hinaus wird auf Basis der zur Verfügung gestellten Datengrundlage und Teufenkriterien eine Ersteinschätzung einer potentiellen Eignung der Salzstrukturen für die Errichtung von Speicherkavernen und damit die Wahl möglicher Standorte in Abhängigkeit weiterer erforderlicher Infrastruktur erleichtert. Allerdings sind sowohl die zur Verfügung gestellten Daten als auch die Potentialabschätzung regional beschränkt und berücksichtigen nur einen Teilbereich der in Deutschland vorkommenden Salzformationen. Aber auch für den Süden Deutschlands ist die Kavernenspeicherung von hohem Interesse, um einen Ausgleich zwischen dem Energiedargebot und dem Energiebedarf auch bei nicht ausreichender Leistungskapazität zu ermöglichen. Eine

Übertragung der Vorgehensweise im InSpEE-Verbundvorhaben auf weitere Beckenbereiche mit Salzformationen ist nicht ohne weiteres möglich, da diese einen anderen Aufbau besitzen und deutlich geringere Mächtigkeiten aufweisen. Aus diesem Grund wurde von den Verbundpartnern ein Antrag mit Bezug auf die Bekanntmachung zur Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm "Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung" vom 8. Dezember 2014 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für das Nachfolgeprojekt „InSpEE-*DS* – **In**formationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur **Sp**eicherung von **E**rneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – **D**oppelsalinare und flach lagernde **S**alzschichten“ eingereicht. Ausgehend von den geologischen Gegebenheiten soll der regionale Bezug auf ganz Deutschland und der Umfang auf die bisher nicht betrachteten Salzformationen ausgeweitet werden, um dazu beizutragen, politisch formulierte Ziele zur Energiespeicherung deutschlandweit umzusetzen. Die Durchführung des Projektes wurde genehmigt, so dass InSpEE-*DS* am 01. Oktober 2015 gestartet ist. Die Ergebnisse werden nach dem Ende der Projektlaufzeit am 31. März 2019 der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung iv

Abbildungsverzeichnis 4

Tabellenverzeichnis 8

Abkürzungsverzeichnis 9

1 Projektübersicht 14

1.1 Aufgabenstellung 14
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Verbundvorhaben durchgeführt wurde 17
1.2.1 Arbeitspakete 1 und 2 17
1.2.2 Arbeitspaket 3 18
1.2.3 Arbeitspakete 4, 5 und 6 18
1.3 Planung und Ablauf des Verbundvorhabens 19
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundvorhabens 20
1.4.1 Arbeitspakete 1 und 2 20
1.4.2 Arbeitspaket 3 21
1.4.3 Arbeitspakete 4 und 5 22
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 23
1.5.1 Arbeitspakete 1 und 2 23
1.5.2 Arbeitspaket 3 24
1.5.3 Arbeitspakete 4, 5 und 6 24
1.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 24
1.7 Während der Durchführung des Verbundvorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Verbundvorhabens bei anderen Stellen 25

2 AP 1 – Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten 30

2.1 Regionale Geologie des Arbeitsgebietes 30
2.2 Niveauschnittkarten des Norddeutschen Untergrundes 33
2.2.1 Auswahl der Datengrundlagen für die Erstellung der Niveauschnittkarten 33
2.2.2 Arbeitsweisen / Arbeitsschritte 35
2.2.3 Problemstellen 38
2.2.4 Darstellungsunsicherheiten 41
2.3 Erfassung des regionalen Umfeldes 41
2.4 Informationssystem Salzstrukturen 47

3 AP 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung 53

3.1 Zusammenstellung und Sichtung von Salzstruktur-Beschreibungen 53
3.1.1 Datengrundlage 55
3.1.2 Datenverarbeitung 60

3.1.2.1 Metadaten 60
3.1.2.2 Geometriedaten 66
3.1.3 Datenmodell und Programmierung der Schnittstellen 71
3.1.3.1 Erstellung eines Datenmodells 72
3.1.3.2 Dateneingabe 73
3.1.3.3 Programmierung des Datenexports 74
3.2 Charakterisierung der Salzstrukturen anhand des Kriterienkataloges 75
3.2.1 Salinarstrukturen im Norddeutschen Becken 75
3.2.2 Erkundungsgrad norddeutscher Salzstrukturen 80
3.2.3 Konkurrierende Nutzungen innerhalb deutscher Salinarstrukturen 83
3.2.4 Kriterienbasierte Auswahl von potentiell geeigneten Salinarstrukturen 84
3.2.4.1 Kriterium maximale Tiefenlage der Salzstrukturoberfläche 85
3.2.4.2 Kriterium Strukturaufbauendes Salinar 89
3.2.4.3 Kriterium Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins 91
3.2.4.4 Kriterium Mindestfläche im Bereich der Vorzugsteufen für die Wasserstoff- und Druckluftspeicherung 92
3.2.4.5 Zusammenfassung und Auswahl potentiell geeigneter Salzstrukturen 96
3.3 3D-Modellierung und Prognose des Internbaus 98
3.3.1 Aufgabenstellung und Ziele 98
3.3.2 Bisheriger Stand von Wissenschaft und Technik 100
3.3.3 Entwicklung der Methodik zur Prognose des Internbautyps 102
3.3.3.1 Analyse erkundeter Strukturen 102
3.3.3.2 Klassifizierung nach Internbautyp 105
3.3.3.3 Entwicklung von Prognosemöglichkeiten 110
3.3.4 Ergebnisse 111
3.3.4.1 Räumliche Verteilung der Internbautypen 111
3.3.4.2 Nutzbarer Flächenanteil 113
3.3.5 Übergabe an AP 1, 4 und 5 117

4 AP 3 – Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherkavernen für Druckluft und Wasserstoff 118

4.1 Anlass 118
4.2 Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten am IGtH 118
4.3 Ziele und Erfolgsaussichten 121
4.4 Methodische Vorgehensweise 122
4.5 Speicherung von Druckluft 124
4.5.1 Thermodynamische Berechnungen 124
4.5.1.1 Betriebsszenario 127
4.5.1.2 Ergebnisse für das Referenzmodell D111 127
4.5.1.3 Variationsberechnungen 128
4.5.1.4 Schlussfolgerungen zum thermodynamischen Verhalten einer Druckluft-Kaverne 133
4.5.2 Thermomechanische Berechnungen 133
4.6 Speicherung von Wasserstoff 138
4.6.1 Thermodynamische Berechnungen 139
4.6.1.1 Betriebsszenario 140

4.6.1.2 Ergebnisse für das Referenzmodell H1111 141
4.6.1.3 Variationsberechnungen 142
4.6.1.4 Schlussfolgerungen zum thermodynamischen Verhalten einer Wasserstoff-Kaverne 143
4.6.2 Thermomechanische Berechnungen 144

5 AP 4 – Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung 152

5.1 Bewertungskriterien 152
5.1.1 Mindestmächtigkeit 152
5.1.2 Maximale Teufenlage Top Caprock 153
5.1.3 Minimale Teufenlage Top Caprock 154
5.1.4 Mindestfläche 154
5.1.5 Salzqualität 154
5.1.6 Bebauung und konkurrierende Nutzung 154
5.1.7 Soleverbringung und geschützte Flächen 155
5.2 Erarbeitung des Auswertealgorithmus 155
5.2.1 Dateneingang und -verarbeitung Geologie 155
5.2.2 Dateneingang und -verarbeitung Gebirgsmechanik 161
5.2.3 Datenverknüpfung Geologie und Gebirgsmechanik 164

6 AP 5 – Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen 173

6.1 Vorbemerkung zum ermittelten Potential 173
6.1.1 Geologische Annahmen 173
6.1.2 Gebirgsmechanische Annahmen 174
6.1.3 Annahmen Bergbau 175
6.1.4 Nicht berücksichtigte potentielle Abschlagsfaktoren 175
6.2 Ergebnis der Potentialabschätzung 176
6.2.1 Gesamtpotential 176

7 Ausblick 180

7.1 Arbeitspakete 1 und 2 180
7.2 Arbeitspaket 3 181
7.3 Arbeitspakete 4 und 5 182

8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit 183

Anhangsverzeichnis 188

Literaturverzeichnis 189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Beckenkonfiguration im Zentraleuropäischen Beckensystem (CEBS) 32
Abbildung 2-2: Zusammenstellung der abgrenzbaren stratigrafischen Einheiten in den Niveauschnittkarten mit den entsprechenden Symbolen 34
Abbildung 2-3: Darstellung der selektierten Isolinien aus dem GTA und dem GPK, am Beispiel des Niveauschnitts 500 m u. NN 36
Abbildung 2-4: Selektierte 500 m-Isolinien des Rupelium (linkes Bild) und der daraus konstruierte Ausschnitt der Niveauschnittkarte 500m u. NN (rechtes Bild) 36
Abbildung 2-5: Kartenausschnitt mit verschiedenen Flächen-begrenzenden Elementen 37
Abbildung 2-6: Beispiel von Inkonsistenzen 39
Abbildung 2-7: 3D-Visualisierung einer Inkonsistenz 40
Abbildung 2-8: Ausschnitt des M1-Reflektors (Oberfläche Muschelkalk) des Geophysikalischen Kartenwerkes (GPK) im digitalisierten Kartenblatt Berlin 40
Abbildung 2-9: Lage des Untersuchungsgebietes zur Erfassung des regionalen Umfeldes 42
Abbildung 2-10: Lage der Untersuchungsregion im Land Brandenburg 43
Abbildung 2-11: Berechnete Mächtigkeitskarte des Zechstein im Modellgebiet 44
Abbildung 2-12: Isoliniendarstellung des Reflektors Z3 (angenommene Zechsteinbasis) im Modellgebiet 45
Abbildung 2-13: Mächtigkeit zwischen den Reflektoren S1 (Oberfläche Anhydrit 3a im Oberen Buntsandstein) und M1 (Oberfläche Muschelkalk) im Modellgebiet 46
Abbildung 2-14: Mächtigkeitskarte zwischen den Reflektoren M1 (Oberfläche Muschelkalk) und K2 (Oberfläche Gipskeuper) 47
Abbildung 2-15: „Toolbar“ des Informationssystems mit den entsprechenden Werkzeugen 48
Abbildung 3-1: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Kockel 1995, verändert) 54
Abbildung 3-2: Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000 56
Abbildung 3-3: Maximalausdehnungen der Salzstrukturen in der Kartengrundlage von Reinhold et al. (2008) 57
Abbildung 3-4: Salzstrukturinformationen aus dem Geotektonischen Atlas 58
Abbildung 3-5: Zechsteinoberfläche als dreidimensionale Darstellung im „Entenschnabel“ des deutschen Nordseesektors 59
Abbildung 3-6: Datenverarbeitungsschema für Salzstrukturmerkmale 62
Abbildung 3-7: Genetische Unterscheidung der Salzstrukturtypen nach Salzstöcken und Salzkissen 63
Abbildung 3-8: Profilschnitt (rote Linie) durch zwei Zechsteinsalzkissen, die in Verbindung zu Salzintrusionen (so+z) stehen 65
Abbildung 3-9: Profilschnitt (rote Linie) durch zwei Salzstöcke mit stark aufgewölbten Strukturoberflächen bzw. -dächern 66
Abbildung 3-10: Korrektur der Punktkoordinaten (blaue Pfeile) dargestellt an den drei Salzkissen Eckhorst, Nusse und Gudow 67

Abbildung 3-11: Korrektur der Punktkoordinaten (blaue Pfeile) an diversen Salzstöcken 68
Abbildung 3-12: Validierung der Salzstrukturen 69
Abbildung 3-13: Isohypsen der Zechsteinoberfläche in SE-Brandenburg 70
Abbildung 3-14: Überarbeitete Salzstrukturgeometrien im Bereich des Entenschnabels im Vergleich zu den Ausgangsdaten von Reinhold et al. (2008) 71
Abbildung 3-15: Kerntabelle „Salzstruktur“ und in verschiedenen Beziehungen dazu stehende thematische Tabellengruppen 73
Abbildung 3-16: Eingabe der Salzstruktur-Metadaten über ein Frontend in die SQL-Datenbank 74
Abbildung 3-17: Stratigrafische Position der Salzgesteinsvorkommen im Norddeutschen Becken, die bei ausreichender Mächtigkeit salzstrukturbildend sein können 77
Abbildung 3-18: Übersicht der im Norddeutschen Becken identifizierten Salzstrukturen, eingeteilt nach ihrem genetischen Strukturtyp bzw. ihrem strukturaufbauenden Salinar 78
Abbildung 3-19: Profilschnitt (rote Linie) durch Salzdiapire aus permischen Salzgesteinen (Zechstein & Oberrotliegend) mit randlich angegliederten Salzkissen aus Keupersalinar 81
Abbildung 3-20: Auswertung zum Erkundungsgrad von norddeutschen Salzstrukturen 83
Abbildung 3-21: Mächtigkeitsverteilung von erbohrten Hutgesteinen 87
Abbildung 3-22: Ermittlung der maximalen Tiefenlage für Salzstrukturoberflächen anhand einer Wasserstoffkaverne mit 200.000 m³ geometrischem Hohlraumvolumen 88
Abbildung 3-23: Tiefenlage der Salzstruktur-Oberflächen 88
Abbildung 3-24: Mindestflächenanforderungen für eine Speicheranlage mit mindestens drei Kavernen in zwei unterschiedlichen Anordnungen 92
Abbildung 3-25: Anwendung des Flächenalgorithmus auf das Strukturbeispiel Töps 94
Abbildung 3-26: Anwendung des Flächenalgorithmus auf das Strukturbeispiel Netzeband 95
Abbildung 3-27: Gegenüberstellung der Ausschlusskriterien und Auswahl potentiell geeigneter Salzstrukturen 97
Abbildung 3-28: Erkundungsgrad der ausgewählten untersuchungswürdigen Salzstrukturen im Norddeutschen Becken 97
Abbildung 3-29: Geologische Sohlenrisse von Salzstrukturen mit Darstellung der z2-Verbreitung 101
Abbildung 3-30: Entwicklungsstadium und strukturaufbauendes Salinar: Verteilung des Wirtsgesteins (z2 bzw. ro) und der jüngeren Salinare 104
Abbildung 3-31: Tektonische Überprägung Salzkissen mit Bildung der charakteristischen Muldenstrukturen und potentieller Modifikation durch Erosion oder Kompression 104
Abbildung 3-32: Kompressive, tektonische Überprägung von Diapiren 105
Abbildung 3-33: Internbautypen der Salinarstrukturen 105

Abbildung 3-34: Quantitative Ermittlung des Flächenanteils des Wirtsgesteins (z2) und der jüngeren Salinare bei einem Salzkissen (Internbautyp 1) 113
Abbildung 3-35: Berechnung der prozentualen Flächenanteile der am Strukturaufbau beteiligten Salzformationen am Beispiel Sarstedt 114
Abbildung 3-36: Berechnung der z2-Anteile für verschiedene Strukturtypen 115

Abbildung 4-1: Lage der Modellkavernen zur Druckluftspeicherung 126
Abbildung 4-2: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kaverne D111 in Rohrschuhteufe 128
Abbildung 4-3: Innentemperaturverlauf der Kaverne D111 und maximale Temperaturdifferenz 129
Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Verläufe der Innentemperatur der Kavernen D111 und D121 130
Abbildung 4-5: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kavernen D111 und D112 in Rohrschuhteufe 130
Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Verläufe der Innentemperatur der Kavernen D111 und D112 131
Abbildung 4-7: Innentemperaturverlauf der Kaverne D111 Variation a 132
Abbildung 4-8: Verlauf der Spannungskomponente sigma zz im mittleren Hohlraumrandbereich der Kaverne D111 137
Abbildung 4-9: Verlauf der Spannungskomponente sigma zz im mittleren Hohlraumrandbereich der Kaverne D112 138
Abbildung 4-10: Lage der Modellkavernen zur Wasserstoffspeicherung 140
Abbildung 4-11: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kaverne H1111 in Rohrschuhteufe 141
Abbildung 4-12: Innentemperaturverlauf der Kavernen H1111 142
Abbildung 4-13: Verlauf der Spannungskomponenten oberen Hohlraumrandbereich der Kaverne H1111 145
Abbildung 4-14: Verlauf der Spannungskomponenten im oberen Hohlraumrandbereich der Kaverne H1323 147
Abbildung 5-1: Zusammensetzung der erforderlichen Mächtigkeit 153
Abbildung 5-2: GIS-Darstellung von Niveauschnittflächen 156
Abbildung 5-3: GIS-Darstellung von z2-Anteils-Flächen 157
Abbildung 5-4: GIS-Darstellung von Niveauschnittflächen und z2- bzw. Rotliegendanteils-Flächen 158
Abbildung 5-5: GIS-Darstellung des Abstands von 220 m zum Rand einer Salzstruktur 159
Abbildung 5-6: GIS-Darstellung von Verschneidungsflächen aus z2-Anteils-Flächen 160
Abbildung 5-7: 3D-Darstellung von lotrechten Begrenzungen der Verschneidungsflächen von der z2-Anteile 160
Abbildung 5-8: Erforderlicher Salzbereich je Kaverne 162
Abbildung 5-9: Teufengruppen der 16 Modellkavernen 162
Abbildung 5-10: Flächenbelegung einer Kaverne 164
Abbildung 5-11: 3D-Darstellung zur Auswahl geeigneter Druckluftkavernen 166
Abbildung 5-12: 3D-Darstellung zur Auswahl geeigneter Wasserstoffkavernen 166

Abbildung 5-13: 3D-Darstellung einer Salzstruktur ohne Potential 167
Abbildung 5-14: GIS-Darstellung von Kavernenfeldern unabhängig vom nutzbaren Bereich innerhalb der Salzstruktur 168
Abbildung 5-15: GIS-Darstellung Abfrageergebnis innerhalb der Salzstruktur 170
Abbildung 5-16: GIS-Darstellung Abfrageergebnis innerhalb der Salzstruktur nach Abzug von Bebauungs-, Wasser- und Bergbauflächen.....171
Abbildung 6-1: Zukünftiger Speicherbedarf im Rahmen der Umsetzung der Energiewende 177
Abbildung 6-2: Verteilung der ausgewerteten Strukturen über die Bundesländer.....178
Abbildung 6-3: Verteilung des Speicherpotentials für CAES über die Bundesländer.....179
Abbildung 6-4: Verteilung des Speicherpotentials von Wasserstoff über die Bundesländer 179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Im Modell verwendete seismische Reflektoren und die entsprechende stratigrafische Zuordnung 44
Tabelle 2-2: Inhalte des Informationssystem „Salzstrukturen“, mit den einzelnen Layern und der jeweils zugehörigen Legende 49
Tabelle 3-1: Erforderliche Informationen anhand einer Beispiel-Salzstruktur 54
Tabelle 3-2: Tiefen- und Mächtigkeitsbereiche der norddeutschen Salzstrukturen in Abhängigkeit von den altersverschiedenen strukturaufbauenden Salinaren 79
Tabelle 3-3: Bewertung des Erkundungsgrades von norddeutschen Salzstrukturen 82
Tabelle 3-4: Zusammenstellung der konkurrierenden Nutzungen innerhalb norddeutscher Salinarstrukturen, eingeteilt nach dem strukturaufbauenden Salinar 84
Tabelle 3-5: Reihenfolge der angewendeten Kriterien 85
Tabelle 3-6: Einflussfaktoren auf den Internbau von Salzstrukturen 103
Tabelle 3-7: Charakteristik Internbautyp 1 - Salzkissen und flache Sättel 106
Tabelle 3-8: Charakteristik Internbautyp 2 - Tektonische Strukturen 107
Tabelle 3-9: Charakteristik Internbautyp 3 - Diapire 108
Tabelle 3-10: Charakteristik Internbautyp 4 - Kompressiv überprägte Diapire 109
Tabelle 3-11: Charakteristik Internbautyp 5 - Doppelsalinare 110
Tabelle 3-12: Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe unter Strukturtop 116
Tabelle 3-13: Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe unter NN 116
Tabelle 4-1: Materialparameter 123
Tabelle 4-2: Druckluftzusammensetzung 125
Tabelle 4-3: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Druckluft-Kavernen 125
Tabelle 4-4: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Wasserstoff-Kavernen 139
Tabelle 4-5: Auslegung einer Minimalkaverne in Abhängigkeit des Speichermediums und der Dachteufe 148
Tabelle 4-6: Übergabedaten an das Arbeitspaket 4 – geometrische Vorgaben 148
Tabelle 4-7: Übergabedaten an das Arbeitspaket 4 – betriebliche Vorgaben 149
Tabelle 5-1: Mindestfläche eines potentiellen Kavernenspeichers in Abhängigkeit der Anordnung 154
Tabelle 6-1: Speicherpotentiale der Bundesländer 178

Abkürzungsverzeichnis

A

AP	Arbeitspaket
ARGE	Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen

B

BFB	Broad Fourteens Becken
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

C

CAES	Compressed Air Energy Storage
CAU	Christian Albrechts Universität zu Kiel
CEBS	Central European Basin System
CENEX	Centre of Excellence for Low Carbon and Fuel Cell Technologies
CG	Zentral-Graben
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Lorraine

D

D	Druckluftkaverne
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DEEP	DEEP. Underground Engineering GmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

E

EFZN	Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

F

FuE	Forschung und Entwicklung
FLAC3D	Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions

G

GIS	Geographisches Informationssystem
GFZ	Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam
GG	Glückstadt-Graben
GOK	Geländeoberkante
GPDN	Geopotential Deutsche Nordsee
GPK	Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR
GTA	Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor
GWh	Gigawattstunden

H

H	Wasserstoffkaverne
HG	Horn-Graben

I

IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
IFNE	Ingenieurbüro für neue Energien
IGtH	Institut für Geotechnik / Abteilung Unterirdisches Bauen
IGW	Institut für Geowissenschaften / Friedrich-Schiller-Universität Jena
IHS	Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen
InSpEE	Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft
InSpEE-*DS*	Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten

INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe; "Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft"
IWES	Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

J

jo	Oberjura

K

KBB	Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH
KBB UT	KBB Underground Technologies GmbH
km	Mittlerer Keuper

L

LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
LSB	Lower Saxony Basin / Niedersächsisches Becken

M

Ma	Millionen Jahre
m u. NN	Meter unter Normalnull
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante

N

NDB	Norwegisch-Dänisches Becken
NEGB	Northeast German Basin / Nordostdeutsches Becken
NGB	North German Basin
NN	Normalnull
NNE-SSW	Nord-Nord-Ost-Süd-Süd-West
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
N-S	Nord-Süd

NW	Nord-West
NWGB	Northwest German Basin / Nordwestdeutsches Becken
NW-SE	Nord-West-Süd-Ost

P

pCS	Kaverneninnendruck in Höhe des zuletzt zementierten Rohrschuhs
PB	Polnisches Becken
Plan-DelyKaD	Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck
PV	Photovoltaik

R

ro	Oberrotliegend / Rotliegendsalinar
RUB	Ruhr Universität Bochum

S

SB	Subherzynes Becken
SE	Süd-Ost
SGD	Staatliche Geologische Dienste
σ	Sigma
SPB	Southern Permian Basin
SPBA	Southern Permian Basin Area
SPIB	Sole Pit-Becken
SW	Süd-West

T

TCav	Temperatur in Höhe der Kavernenmitte
TVD	True vertical depth
TWh	Terrawattstunden

U

UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig
UGS	Untergrundspeicher und Geotechnologie-Systeme GmbH

V

V	Volumen
V/O	Verhältnis Volumen zu thermisch wirksamer Oberfläche

W

W-E	West-Ost
WNB	Westniederländisches Becken
WNW-ESE	West-Nord-West-Ost-Süd-Ost
WMS	WebMap-Service

Z

z	Zechstein
z1	Werra-Folge
z2	Staßfurt-Folge
z2SF	Kaliflöz Staßfurt innerhalb der Staßfurt-Formation
z3	Leiner-Folge
z4	Aller-Folge
ZNB	Zentralniederländisches Becken
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

1 Projektübersicht

1.1 Aufgabenstellung

Mit dem forcierten Übergang auf fluktuierende erneuerbare Energieträger stellt sich die Frage der großtechnischen Speicherung elektrischer Energie. Zwei Optionen stellen Energiespeicherkraftwerke dar, welche bei Bedarf aus erneuerbarem Strom Druckluft bzw. Wasserstoff erzeugen, speichern und den Energiemärkten wieder zuführen können. Eine großvolumige Speicherung dieser Medien, die Energie im Netzmaßstab bereitstellt, kann dabei nur im geologischen Untergrund erfolgen. Auf Grund hoher Flexibilität in der Fahrweise, geringem Kissengasanteil sowie extrem geringer Reaktionsneigung mit dem Speichergut stellen dabei Salzspeicherkavernen die bevorzugte Speicheroption dar.

Während sich bereits vor Beginn des Verbundvorhabens Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit der Bereitstellung der Technologien beschäftigen, mangelte es bis dahin noch an geeigneten Grundlagen für eine Bewertung verschiedener Speicherstandorte sowie an einer fundierten Abschätzung, welche Energiemengen überhaupt im geologischen Untergrund in Deutschland speicherbar sind.

Die Aufgaben des Verbundprojektes InSpEE waren deshalb zunächst die Erarbeitung und Bereitstellung von Auslegungsgrundlagen und geologisch-geotechnischen Grunddaten sowie von Kriterien zur Standortauswahl für die Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft und anschließend die darauf aufbauende Abschätzung des Speicherpotentials innerhalb der norddeutschen Salzstrukturen für erneuerbare Energien in Form von Wasserstoff und Druckluft.

Die Bearbeitung erfolgte in den teilweise aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen 1 bis 5 mit folgenden Teilaufgaben:

Arbeitspaket 1 - Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten

- Zusammenstellung, Sichtung und Aufarbeitung von Bohrungsdaten, Horizont- und Niveauschnittkarten einschließlich der Aktualisierung und Ergänzung der bereits bei der BGR vorhandenen Bohrungsdatenbank; Sichtung und Zusammenstellung bereits erarbeiteter Horizontkarten einschließlich relevanter Berichte sowie der Digitalisierung von bisher nicht digital vorliegenden Karten,
- Erarbeitung und Abstimmung der strukturgeologischen Grundlagen für Horizontkarten und Störungssystem,
- Strukturgeologische Erfassung des regionalen Umfeldes ausgewählter Salinarstrukturen und Entwicklung einer für diese Informationen geeigneten Datenbank,

- Erarbeitung von Niveauschnittkarten für vier Teufenschritte einschließlich der Auswahl von stratigrafischen Einheiten für die Niveauschnittkarten, Überarbeitung und Verifikation der Niveauschnittkarten -500 m und -1.000 m und Erstellung zwei neuer Niveauschnitte,
- Erstellung eines Informationssystems mit Prüfung und Auswahl einer geeigneten technischen Infrastruktur, Integration der Niveauschnittkarten und weiterer in diesem Verbundvorhaben neu erarbeiteten Informationen und Daten; Erfassung und Integration von früheren, bestehenden und geplanten Nutzungen sowie Nachweisdaten und Erstellung eines Steckbriefes für die Salzstrukturen.

Arbeitspaket 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung

- Zusammenstellung und Sichtung von Salzstruktur-Beschreibungen,
- Datenbankgestützte Erfassung strukturgeologischer und halokinetischer Merkmale einschließlich der Definition der für die Salzstrukturentwicklung und den Internbau relevanten Merkmale sowie die Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung aller in der Datenbank enthaltenen Informationen zu den einzelnen Salzstrukturen,
- Vorläufige Charakterisierung der Salzstrukturen Norddeutschlands anhand vorläufiger, zu Beginn des Verbundvorhabens zwischen den Verbundpartnern abgestimmter, für den Bau und Betrieb von Druckluft- und Wasserstoffkavernen relevanter Kriterien sowie Typisierung der Salzstrukturen auf der Grundlage der äußeren Form,
- Anwendung der im Verbundvorhaben entwickelten Auswahlkriterien und Analyse des Internbaus für einige gut untersuchte Standorte und Zuordnung des jeweiligen Internbaustils zu der äußeren Form der Salzstruktur,
- Entwicklung von Prognosemöglichkeiten zum Internbau von Salzstrukturen auf Grundlage der Beschreibung gut bekannter Salzstrukturen (Modellstandorte mit gut bekannter Standortgeologie) durch Zuordnung der ermittelten Internbaustile zu unverritzten Salzstrukturen oder noch nicht erschlossenen Struktur-Teilbereichen.

Arbeitspaket 3 – Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff

- Anpassung und Erweiterung thermischer und mechanischer Programmsysteme für die Berechnung von Temperaturänderungen und thermo-mechanischem Verhalten im Kavernenspeicherbetrieb unter Prüfung,
- Analyse und Erweiterung vorhandener Stoffmodelle,

- Durchführung thermo-mechanisch gekoppelter Berechnungen zum Nachweis der Dichtheit und Stabilität der Kaverne bei Speicherung unterschiedlicher Medien einschließlich der Bestimmung von Bemessungslastfällen für die Erstellung von Aussagen zu einer zu empfehlenden Geometrie der Speicherkavernen, einer notwendigen Pfeilermindestmächtigkeit zwischen benachbarten Kavernen bzw. dem Rand der Salzstruktur, den Innendruckgrenzen während des planmäßigen Speicherbetriebes, einer aus gebirgsmechanischer Sicht optimalen Teufenlage und dem zu empfehlenden Volumen der Kaverne zur Erstellung.

Arbeitspaket 4 – Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung

- Erstellung eines Kataloges vorläufiger Kriterien in Hinblick auf die Anforderungen an den Kavernenspeicher entsprechend der geplanten Nutzung (Druckluft bzw. Wasserstoff) zur Bewertung der potentiellen Eignung der Salzstrukturen unter Berücksichtigung und Zusammenführung der Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 3,
- Auswahl von Modellkavernen für die verschiedenen Nutzungen unter Berücksichtigung der gebirgsmechanisch erforderlichen Sicherheitsabstände, Ermittlung des realisierbaren Speichervolumens und der Betriebsdrücke auf Basis ausgewählter Salzeigenschaften sowie typischer Operationsmodi der Speicherkavernen,
- Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung des nutzbaren Bereichs von Salzstrukturen in Abhängigkeit von ihrer Geometrie. Diese Methodik soll ermöglichen, dass für die als geeignet eingestuften Salzstrukturen eine Abschätzung des möglichen Speichervolumens erfolgen kann.

Arbeitspaket 5 – Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen

- Abschätzung des möglichen Energiespeicherpotentials innerhalb der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken auf Basis der vorangegangenen Arbeitspakete.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Verbundvorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Arbeitspakete 1 und 2

Die Arbeitspakete (AP) 1 und 2 wurden durch die im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens angestellten Mitarbeiter durchgeführt. Unterstützt und koordiniert wurden die Arbeiten durch das Stammpersonal der BGR aus den Fachbereichen B3.3 („Nutzungspotentiale des tieferen Untergrundes, geologische CO_2-Speicherung“, Koordination AP1) und B3.1 („Geologisch-Geotechnische Erkundung“, Koordination AP2).

Die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 und 2 erfolgte in enger Absprache der jeweiligen Bearbeiter untereinander und mit den anderen Verbundpartnern. Im halbjährlichen Rhythmus fanden bei KBB UT Projektgespräche statt, die bei fachlicher Notwendigkeit durch Arbeits- bzw. Abstimmungsgespräche auf Mitarbeiterebene ergänzt wurden. Die Arbeiten wurden fachlich von Kollegen der Fachbereiche B3.1 und B3.3 der BGR unterstützt, die über eine breite Expertise sowohl hinsichtlich der Abschätzung und Visualisierung der Nutzungspotentiale des geologischen Untergrundes (B3.3) bzw. zur Entstehung, Verteilung und zum inneren Aufbau von Salzstrukturen (B3.1) verfügen.

Die Ausführung der Teil-Arbeitspakete 1.2 und 1.3 (Horizontkarten und Störungen sowie Niveauschnittkarten) wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektmitarbeitern von AP 2 sowie in Abstimmung mit den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer durchgeführt. Dabei mussten neue Arbeitsweisen getestet und validiert werden.

In den Teil-Arbeitspaketen 2.4 und 2.5 (Anwendung von Auswahlkriterien und Entwicklung von Prognosemöglichkeiten zum Internbau) wurde eng mit den geologischen 3D-Modellierern der BGR zusammengearbeitet. Dabei wurden das vorhandene Know-how und die in der BGR vorhandenen Modelldaten für Auswertungen innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens genutzt.

Für die Bearbeitung der Arbeitspakete wurde neben den Standard Microsoft Office-Anwendungen (2007) auf weitere Programme zugegriffen, deren Zweck im Folgenden erläutert wird. Für die georeferenzierte Visualisierung von Punkt- und Flächeninformationen und die Zusammenführung aller geologischen Basisdaten wurde ArcGIS 10.2.2 genutzt. Darüber hinaus erfolgte darin die Bearbeitung der Niveauschnittkarten, ggf. notwendige Koordinatentransformationen und die Bereitstellung der Daten für das öffentliche Informationssystem. Gocad 14.1 (Paradigm) wurde in beiden Arbeitspaketen für den Import, die Visualisierung, die 3D-Modellierung und den Export von strukturgeologischen Informationen aus den zur Verfügung gestellten 3D-Untergrundmodellen verwendet. Die 3D-Modellierung von Salinarstrukturen erfolgte im AP 2 mittels openGEO -

einem Autocad basierten Programm, das durch die Firma Bicad bereitgestellt und im Rahmen einer Beauftragung an die speziellen Erfordernisse des InSpEE-Verbundvorhabens angepasst wurde. Die Nutzung des SQL-Servers in den Versionen 2008 – 2014 ermöglichte die Speicherung räumlicher und salzstrukturspezifischer Informationen in einer Datenbank, um die im Verbundvorhaben definierten Vorgaben vereinfacht abfragbar zu machen.

Die genannten Programme sind in der BGR, sowohl im Dienstbereich Hannover als auch im Dienstbereich Berlin, hausweit lizenziert.

1.2.2 Arbeitspaket 3

Das Institut für Geotechnik, Abteilung Unterirdisches Bauen an der Leibniz Universität Hannover kann auf jahrzehntelange Erfahrungen auf dem Gebiet der Planung von Salzkavernen zurückgreifen. Somit können auch Annahmen zum erforderlichen Abstand der Kavernen untereinander und zum Salzstockrand ohne zusätzliche aufwendige Standsicherheitsbetrachtungen getroffen werden. Darüber hinaus basiert die Festlegung der maximal zulässigen Drücke und der erforderlichen Minimaldrücke zur Bestimmung des Arbeitsgasvolumens auf den Erfahrungen der Standsicherheitsuntersuchungen bestehender Erdgaskavernen.

Die Temperaturänderungen in den Kavernen während der Entnahme- und Befüllphase wurden mit dem Programm KavTec der Firma ESK in Freiberg berechnet, welches unter anderem für die Berechnungen des Realgasverhaltens von Wasserstoff entwickelt wurde.

Die thermomechanisch gekoppelten Berechnungen wurden sowohl für die Druckluft- als auch für die Wasserstoffkavernen mit dem Finite-Differenzen-Programm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions) der Firma Itasca Consultants GmbH durchgeführt.

1.2.3 Arbeitspakete 4, 5 und 6

Die Arbeitspakete 4, 5 und 6 wurden durch das Stammpersonal der KBB Underground Technologies GmbH durchgeführt. KBB Underground Technologies GmbH, Hannover, ist ein führendes Dienstleistungsunternehmen auf dem Gebiet der Speicherung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen im geologischen Untergrund. KBB UT beschäftigt sich darüber hinaus seit mehreren Jahren in zahlreichen FuE-Projekten mit der Speicherung fluktuierender Wind- und PV-Energie über Druckluft und Wasserstoff in Salzkavernen und Porenspeichern und führt dabei die Tätigkeiten der früheren Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH (KBB) in Hannover weiter. KBB UT kann damit auf insgesamt über 40 Jahre Erfahrung auf den Gebieten Planung, Bau und Betreuung von verschiedensten Untertagespeichern sowie Salz- bzw. Solegewinnung zurückgreifen.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete 4, 5 und 6 des InSpEE-Verbundvorhabens erfolgte durch ein durchgehend mit der Bearbeitung und Koordination betrautem Personalkreis, der im Verlauf der Bearbeitung entsprechend den aktuellen Bearbeitungsschwerpunkten durch weitere, teilweise wechselnde Mitarbeiter ergänzt wurde. Um den Arbeitsprozess zu optimieren und fundierte Arbeitsergebnisse zu erzeugen, fand darüber hinaus eine regelmäßige Vorstellung und Besprechung der Arbeitsstände und des weiteren Vorgehens im Haus statt. Die Projektmitarbeiter wurden dabei im Wesentlichen aus den im Haus vorhandenen Fachbereichen Geologie, Gebirgsmechanik und Speicherung Erneuerbarer Energien gestellt, um eine bestmögliche Begleitung und Unterstützung der Arbeitspakete 1 bis 3 zu gewährleisten.

Im Rahmen der Potentialermittlung wurde auf zwei externe Datenverarbeitungs- und Darstellungsprogramme zugegriffen: QGIS und ParaView. Während QGIS eine frei verfügbare GIS (Geographische Informationssystem)-Software ist, erfolgte die Verwendung von ParaView Plus über eine im Haus vorliegende Lizenz. Weitere, über den aktuellen Bürostandard hinausgehende Software oder zusätzliche Hardware war im Rahmen des Verbundvorhabens nicht notwendig.

1.3 Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Das Verbundprojekt InSpEE zeichnete sich durch eine starke Vernetzung der Arbeitspakete untereinander aus. Die Arbeitspakete 1 bis 3 schufen dabei Grundlagenwissen, welches innerhalb dieser Arbeitspakete benötigt und ausgetauscht wurde und auch die Basis für die Durchführung der Arbeitspakete 4 und 5 bildete. Das Arbeitspaket 6 beinhaltet die arbeitspaketübergreifende Projektkoordination. Für den erfolgreichen Abschluss des Verbundvorhabens war ein regelmäßiger Austausch der Arbeitspakete einschließlich der Abstimmung von Randbedingungen für das weitere Vorgehen von hoher Bedeutung. Diese Abstimmung erfolgte durch regelmäßigen Arbeitstreffen, in denen der aktuelle Stand vorgestellt, diskutiert und im Rahmen der Fortschreibung eines sich entwickelnden Kriterienkataloges eingearbeitet und die für das gesamte Konsortium geltenden Randbedingungen in Protokollen festgehalten und verteilt wurden. Eine genaue Übersicht des Ablaufplanes des Verbundvorhabens enthält Anhang 1-1. Die Arbeitspakete sind in Unterarbeitspakete gegliedert, die eine rechtzeitige Datenübergabe an andere Arbeitspakete ermöglichte.

Der Aufbau des Endberichtes folgt der Aufteilung der Arbeitsschwerpunkte in die Arbeitspakete 1 bis 5. Berichtsabschnitte, besonders in den Kapiteln 1, 7 und 8, die arbeitspaketübergreifend für den jeweiligen Verbundpartner gelten, werden entsprechend zusammengefasst. Jedes Arbeitspaket stellt seine Arbeitsergebnisse in einem eigenständigen Ka-

pitel vor, welches je nach Zielsetzung einen eigenständigen Charakter aufweist. Die Zusammenfassung und die Übersicht über erfolgte und geplante Veröffentlichungen sind ohne Untergliederung in die Arbeitspakete im Bericht aufgenommen worden. Alle Grafiken oder Tabellen, welche für die direkte Integration im Bericht zu groß sind bzw. das Lesen erschweren könnten, sind im Anhang zu finden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Verbundvorhabens

Die Erfassung des wissenschaftlichen Stands der Technik zu Beginn des Verbundvorhabens ist entsprechend der Schwerpunkte der Bearbeitung in den drei Häusern auf unterschiedliche Themen fokussiert. Neben der Verbesserung des jeweiligen Stands der Technik bildet die verlinkte Durchführung des Verbundvorhabens einen eigenen Mehrwert. Auf verwendete Fachliteratur und Informations- und Dokumentationsdienste wird in den Fachkapiteln an entsprechender Stelle hingewiesen. Ein Verzeichnis der berücksichtigten Literatur findet sich im Literaturverzeichnis. Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte wurden während der Durchführung des Verbundvorhabens nicht benutzt.

1.4.1 Arbeitspakete 1 und 2

Salzgesteine treten im Untergrund Deutschlands in unterschiedlichen stratigrafischen Einheiten auf, jedoch nicht gleichmäßig und gleichförmig über ganz Deutschland verbreitet. Neben der flachen, stratiformen Ablagerung treten insbesondere in Norddeutschland Salinarstrukturen in unterschiedlichsten Formen auf. Dazu gehören Salzkissen, Salzstöcke und Salzmauern, deren Lage im Norddeutschen Becken weitgehend bekannt ist (Reinhold et al. 2008). Auch die Ursachen und Auslöser der Entwicklung unterschiedlicher Formen von Salzstrukturen sind im Wesentlichen bekannt (Pollok et al. 2016). Kenntnisdefizite bestehen bei der Klärung der Abhängigkeiten zwischen der Strukturform der Salzlagerstätten, ihrer lithologischen Zusammensetzung und dem Vorkommen bestimmter Baustile im Innern der Salzstrukturen. Der vielfältige Aufbau dieser Salinarstrukturen hinsichtlich Lithologie, Geometrie und Tiefenlage beeinflusst maßgeblich deren potentielle Eignung zur Einrichtung von Salzkavernen. Die Verfügbarkeit dieser Detailinformationen ist jedoch auf wenige, bisher gut untersuchte Salzstrukturen beschränkt, z. B. auf solche, wo Salzkavernen bereits errichtet oder geplant sind.

Nützliche Informationen zur ersten Bewertung von Salzstrukturen bezüglich einer möglichen Eignung für die Einrichtung von Kavernenspeichern bieten sog. Niveauschnittkarten

– also Darstellungen der geologischen Verhältnisse in einer definierten Tiefe unter NN. Auf der Grundlage derartiger Niveauschnittkarten sind Aussagen zur räumlichen Lage, Außenform und geologischen Entwicklung bzw. Genese der Salzstrukturen und ihres Deck- und Nebengebirges möglich. Auf der Basis der Informationen zur Salzstrukturform und halokinetischen Entwicklung der Salzstrukturen können erste Schlussfolgerungen zu deren innerem Aufbau gezogen werden. Geologische Grundlagen zur Erstellung solcher Niveauschnittkarten sind z.B. mit dem Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 1996, Baldschuhn et al. 2001) bzw. dem Regionalen Geophysikalischen Kartenwerk der DDR (GPK) (Reinhardt 1960-1991) vorhanden. Erste Arbeiten zur Zusammenführung der Datengrundlagen aus Nordwest- und Nordostdeutschland wurden z.B. im Rahmen des SPBA (Southern Permian Basin Area)-Projektes (Doornenbal et al. 2010) durchgeführt. Zusätzlich wurden von Wirth & Krull (2010) im Rahmen der Erstellung eines geotektonischen Atlasses von Norddeutschland erste Arbeiten zur Erstellung von Niveauschnittkarten (-1.000 m u. NN und -500 m u. NN) realisiert.

Eine weiterführende Bewertung der potentiellen Eignung von Salzstrukturen für Kavernenprojekte erfolgte auf der Basis detaillierter Informationen zur räumlichen Verteilung und zur Zusammensetzung bzw. zu den Eigenschaften der verschiedenen, die Salzstruktur aufbauenden Gesteinsschichten. Diese stützten sich auf die bereits vorliegenden geologischen Erkundungsbohrungen und auf Erfahrungen aus der geologischen Erkundung des Internbaus von Salzstrukturen (Salzbergwerke, Kavernenstandorte, Standorte für Lagerung von chemisch-toxischen oder radioaktiven Abfällen).

1.4.2 Arbeitspaket 3

Die gebirgsmechanische Dimensionierung unterirdischer Speicherbauwerke ist auf Grund der großen Anzahl der in Deutschland errichteten Salzkavernenspeicher mit jahrzehntelanger Betriebspraxis für die Speicherung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen Stand der Technik. Lange Zeit wurden Kavernen in Salzgestein hauptsächlich dazu genutzt, Rohöl als Vorratsreserve und Erdgas zum Ausgleich jahreszeitlicher Verbrauchsschwankungen zu speichern (z. B. Rokahr et al. 1997). In den letzten Jahren haben sich mit der Liberalisierung des Gasmarktes die Anforderungen gewandelt: moderne Handelsspeicher erfordern bereits wesentlich flexiblere Speicher, welche insbesondere durch den Ausgleich kurzzeitiger Bedarfsschwankungen hohe Anforderungen an die Beanspruchungen des die Kavernen umgebenden Salzgesteins stellen. Dies findet Ausdruck in zahlreichen FuE-Arbeiten (siehe Literaturverzeichnis). Eine Übertragbarkeit auf abweichende Anforderungen an Salzkavernen für die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff ist hingegen noch offen.

Die Speicherung von Druckluft fordert selbst gegenüber bereits flexibel betriebenen Erdgasspeicherkavernen eine noch höhere Anforderung der Verfügbarkeit in Bezug auf die täglich angeforderten Ein- und Ausspeicherraten und somit höhere Druckänderungsraten im Speicherbetrieb. Diese höhere Entnahmegeschwindigkeit wiederum verursacht einen starken Temperaturabfall (Nieland 2004) und damit eine signifikante Verringerung der tangentialen Spannungen, insbesondere der Vertikalspannungskomponente, in der unmittelbaren Umgebung der Kavernenwand (Rokahr et al. 2008). Da Steinsalz eine geringe Zugfestigkeit besitzt, ist der Nachweis zu führen, dass die thermisch induzierten Spannungen stets im Druckbereich verbleiben. Kühlt sich das Speichermedium durch zu hohe Entnahmeraten zu stark ab, ist es nicht auszuschließen, dass es auf Grund von thermisch induzierten Zugbeanspruchungen zu fortschreitenden makroskopischen Rissen und damit zu einem Verlust der Dichtheit und Integrität der Kaverne kommen kann. Der Einfluss der Temperaturänderung infolge von Ein- oder Ausspeicherung ist sowohl für Erdgas als auch für Wasserstoff und Druckluft maßgeblich, jedoch unterscheidet sich das Temperaturverhalten der drei Medien wegen unterschiedlicher Dichten und Viskositäten, abweichender Kompressibilität und unterschiedlicher thermodynamischer Parameter deutlich und führt zu unterschiedlichen Ergebnissen in den Temperaturberechnungen. Die Abweichungen in den Ansätzen unterschiedlicher Gasarten in Verbindung mit der Anforderung an den Bemessungslastfall macht es notwendig, im Rahmen einer Forschungsarbeit die vorhandenen Stoffgesetze und Berechnungsmodelle weiter zu entwickeln.

Bisher existierende internationale Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik zur Speicherung von Druckluft in Salzkavernen wurden unter stark vereinfachten Annahmen durchgeführt. So wird in einer Veröffentlichung von Nieland (Nieland 2008) zwar der Unterschied in der Temperaturentwicklung bei hochfrequenter Speicherung unterschiedlicher Medien (Druckluft, Methan und Wasserstoff) aufgezeigt, jedoch die Spannungsberechnungen in dem die Kaverne umgebenden Salzgestein nicht dargestellt. Die von Lux und Düsterloh (Düsterloh/Lux 2009, Düsterloh/Lux 2010) vorgestellten Ergebnisse thermo-mechanisch gekoppelter Finite-Element-Berechnungen bei zyklischer Speicherung von Druckluft basieren auf teilweise vereinfachten Annahmen, wie z. B. einem adiabaten Ansatz für die Temperaturänderung in der Kaverne.

1.4.3 Arbeitspakete 4 und 5

Da die Potentialabschätzung für die Speicherung hoher Energiemengen im geologischen Untergrund sowohl für die Erstellung von Energieversorgungsszenarien und damit zusammenhängend für die Ermittlung des Handlungsbedarfs bzgl. verschiedener Optionen zur erfolgreichen Integration erneuerbarer Energien im Stromnetz als auch zur Ermittlung eines Business Cases für potentielle Investoren von hoher Bedeutung ist, wurden dazu bereits Studien erstellt (z. B. eine nicht öffentlich verfügbare Studie an der Technischen Universität München). Allen liegt jedoch ein sehr vereinfachter Ansatz sowohl in Bezug

auf die Festlegung geeigneter Salzstrukturen als auch auf die Abschätzung des Potentials in einer Salzstruktur zu Grunde, so dass die ermittelten Energiemengen innerhalb dieser Studien stark voneinander abweichen. Ursache ist zum einen die geringe Detailtiefe bisher verfügbarer Informationen zu den jeweiligen Salzstrukturen. Auf Basis des in diesem Verbundvorhaben zu erarbeitenden Informationssystems zu den Salzstrukturen im norddeutschen Untergrund wurden Ungewissheiten bei der Auswahl geeigneter Salzstrukturen verringert und das Vorgehen zur Potentialabschätzung innerhalb eines Salzstockes auf der Grundlage der Betrachtung mehrerer Fallstudien spezifiziert abgestimmt. Zum anderen fehlen bisher belastbare gebirgsmechanische und thermodynamische Verfahren zur pauschalen Abschätzung des resultierenden Speicherpotentials innerhalb einer vorgegebenen Salzstruktur, welche im Rahmen dieses Verbundvorhabens erarbeitet wurden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.5.1 Arbeitspakete 1 und 2

Für das Verbundvorhaben InSpEE wurden flächendeckend für den Festlandsbereich Norddeutschlands Niveauschnittkarten in vier verschiedenen Tiefenniveaus von -500, -1.000, -1.500, -2.000 m jeweils in Meter unter NN, im Maßstab 1:500.000 erarbeitet. Die erstellten Niveauschnittkarten wurden grundsätzlich mit den jeweils zuständigen Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer abgestimmt. Zusätzlich wurde in Abstimmung mit den SGD Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Brandenburg auf dort vorhandene 3D-Modelle zurückgegriffen.

Für die geologische 3D-Modellierung wurde die auf Autocad basierende openGEO-Software genutzt. Diese wird in der BGR in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro BiCad stetig weiterentwickelt. Für das Verbundvorhaben war es notwendig, Schnittstellen zu entwickeln, die in openGEO eine Anbindung der Geometrie- und Sachinformationen aus der InSpEE-Datenbank zur Interpretationsunterstützung der geologischen 3D-Modelle ermöglichen. Dieses wurde im Rahmen einer Auftragsvergabe an die Firma BiCad aus Projektmitteln realisiert. Über die neuen Schnittstellen können strukturierte Abfragen an die Datenbank abgesetzt und deren Ergebnisse im 3D-Strukturmodell von openGEO dargestellt werden. Darüber hinaus wurde über eine weitere GIS-Schnittstelle der bidirektionale Austausch zwischen openGEO- und GIS-spezifischen Datenformaten ermöglicht. So konnten beispielsweise aus den Niveauschnittkarten Tiefenlinienpläne und Horizontalprofile extrahiert und im 3D-Modell verwendet werden. Weiterhin gab es durch BiCad Unterstützung bei Verwendung der von der Untergrundspeicher und Geotechnologie-Systeme GmbH (UGS) als Ergebnis einer Beauftragung zur Verfügung gestellten Erkundungsdaten und 3D-Modelle. Um diese für die weitere Modellierung nutzen zu kön-

nen, war es u. a. nötig die Palette der unterstützten Vorgabedaten in openGEO zu erweitern.

Zur Erweiterung der Datenbasis bei der Prognose des Internbautyps wurden im Rahmen von Unterbeauftragungen Erkundungsdaten bzw. 3D-Modelle von den Firmen DEEP. Underground Engineering GmbH (DEEP., im Unterauftrag der KBB Underground Technologies GmbH) und UGS geliefert. Die Zuarbeit umfasst die Strukturen Werle und Kraak (UGS) bzw. Etzel, Rüstringen, Honigsee und Jemgum (DEEP.).

1.5.2 Arbeitspaket 3

Im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspakets 3 wurden mit der BGR und der KBB UT die Ergebnisse der Untersuchungen fortlaufend ausgetauscht.

1.5.3 Arbeitspakete 4, 5 und 6

Während der Erarbeitung des vorläufigen Kriterienkataloges und der Entwicklung des Algorithmus zur Durchführung der Potentialabschätzung erfolgte ein enger Austausch mit DEEP., welche sich während der Laufzeit des Verbundvorhabens ebenfalls im Rahmen des EU-Projektes „HyUnder – Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe" mit der Vorbereitung und Durchführung einer Potentialabschätzung für ausgewählte Länder Europas beschäftigte. Das Ziel des Austausches war eine regelmäßige Diskussion der Vorgehen, um eine fundierte Potentialabschätzung zu erhalten. Darüber hinaus fand ein regelmäßiger Austausch über Teilaspekte mit Partnern aus der Industrie durch den Besuch entsprechender Konferenzen sowie mit den Leuchtturmprojekten ANGUS+ und H2Store (siehe auch Kapitel 1.7) der Forschungsinitiative Energiespeicher der Bundesregierung statt.

1.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit Ende des Verbundvorhabens liegt für Anwender und genehmigende Stellen ein Informationssystem vor, das belastbare geologische und geotechnische Grunddaten enthält, die es ermöglichen, Projekte besser als bisher an den Erfordernissen der späteren Nutzung zu orientieren und zu planen. Insbesondere die realisierbare Speicherkapazität konnte mit deutlich verbesserter Aussagegenauigkeit quantifiziert werden. Eine explizite

wirtschaftliche Verwertung in Form von Verkauf des erarbeiteten Wissens existiert auf Grund des informierenden Charakters des Verbundvorhabens nicht.

Auf Basis der Ergebnisse können ein Vergleich des erforderlichen Speicherbedarfs mit dem abgeschätzten theoretischen Speicherpotential sowie eine räumliche Zuordnung potentiell geeigneter Speicherstandorte für die Errichtung von Kavernenspeicher in Salzstrukturen erfolgen. Die Anbindung detaillierterer wissenschaftlicher Hintergrundinformationen zu den Einzelstrukturen trägt dazu bei, Auswahlverfahren für eine Erstauswahl von Strukturen zu erleichtern. Die Ergebnisse werden in Form eines GIS-basierten Informationssystems dargestellt und sind auf diese Weise sowohl für die Öffentlichkeit als auch für politische Entscheidungsträger leicht zugänglich. Das Informationssystem ist unter dem Link https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de zugänglich.

Mit der Veröffentlichung des Sachberichtes und des Informationssystems ist der Verwertungspflicht des Verbundprojektes nachgekommen. Das Berichtsblatt ist in Anhang 1-2 enthalten.

1.7 Während der Durchführung des Verbundvorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Verbundvorhabens bei anderen Stellen

Das innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens erstellte „Informationssystem Salzstrukturen“ ist die erste und bislang einzige Kompilation aller verfügbaren Daten zu den Zechsteinsalzstrukturen Norddeutschlands. Die Klassifizierung der Salzstrukturen in Internbautypen und die darauf basierende Abschätzung des nutzbaren Bereiches für die Anlage von Kavernen ist eine im Rahmen des Verbundvorhabens neu entwickelte Methodik. Vergleichbare methodische Ansätze oder Untersuchungsergebnisse liegen von keiner anderen Forschungseinrichtung oder Geologischem Dienst vor. Auch wurden Rotliegend- und Keupersalinarstrukturen berücksichtigt.

Fortschritte auf dem Gebiet des Verbundvorhabens bei anderen Stellen in Bezug auf die gebirgsmechanischen Anforderungen an die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff sind nicht bekannt.

Während der Laufzeit des Verbundvorhabens wurden Ergebnisse von Studien publiziert, die sich teilweise ebenfalls mit der Ermittlung von Speicherpotentialen im Norddeutschen Raum beschäftigen. Allen gemeinsam ist der Verzicht auf eine detaillierte Vorbetrachtung der geologischen und gebirgsmechanischen Grundbedingungen. Desweiteren weicht der räumliche Schwerpunkt und / oder die Zielsetzung der zu errichtenden Speicher und damit die Anforderungen an diesen ab. Im Nachfolgenden werden die bekanntge-

wordenen Studien zusammengestellt und hinsichtlich der jeweiligen Unterschiede im Ansatz für die Potentialermittlung vorgestellt.

Stromspeicherpotentiale für Deutschland

Niklas Hartmann, Ludger Eltrop, Nikolaus Bauer, Johannes Salzer, Simon Schwarz, Maike Schmidt, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Universität Stuttgart, 2012

In dieser Studie erfolgte eine Potentialabschätzung für die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff in Salzstrukturen Deutschlands. Die Abschätzung erfolgte über die Ermittlung der Fläche der Salzstrukturen abzgl. der obertägig bedeckten Flächen und der Schutzgebiete. Geologische Einschränkungen der Nutzbarkeit einer Salzstruktur wurden nicht betrachtet. Ebenso erfolgte keine Betrachtung gebirgsmechanischer Randbedingungen (Hartmann et al. 2012).

Erstellung eines Entwicklungskonzepts Energiespeicher Niedersachsen

Fichtner GmbH & Co. KG – im Auftrag des Innovationszentrums Niedersachsen für die Niedersächsischen Ministerien für Umwelt, Energie und Klimaschutz sowie für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, 2014

Es wurde u. a. eine Potentialabschätzung für die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff in den niedersächsischen Salzstrukturen vorgenommen, wobei hier die Annahmen zur Berücksichtigung geologischer Einschränkungen stark vereinfacht wurden und keine 3D-Auswertung vorgenommen worden ist. Im Vergleich zum InSpEE-Verbundvorhaben wurden zusätzliche potentialmindernde, veränderliche Faktoren wie die Entfernung zu Soleeinleitstellen, Naturschutzgebiete und technisches Risiko berücksichtigt (Fichtner 2014).

Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem

Klaus Stolzenburg, Dr.-Ing. Roland Hamelmann, Prof. Dr. Martin Wietschel, Dr. Fabio Genoese, Julia Michaelis, Prof. Dr. Jochen Lehmann, Andreas Miege, Stephan Krause, Christian Sponholz, Sabine Donadei, Fritz Crotogino, Andreas Acht, Peter-Laszlo Horvath, PLANET Planungsgruppe Energie und Technik GbR, Fachhochschule Lübeck PROJEKT-GMBH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung Institut für Energie und Umwelt e.V. an der Fachhochschule Stralsund, KBB Underground Technologies GmbH, gefördert durch das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff-

und Brennstoffzellentechnologie, Beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), in Abstimmung mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH), 2014

Hier stand die Ermittlung des Speicherpotentials von Wasserstoff in der Nähe der Einspeisepunkte des Offshore-Wind-Stroms und die Integration in das vorhandene Stromnetz im Vordergrund. Es weist daher eine starke lokale Einschränkung auf (Stolzenburg et al. 2014).

HyUnder – Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe

Fundacion Para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologias Del Hidrogeno en Aragon, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Hinicio SA, KBB Underground Technologies GmbH, National Research and Development Institute for Cryogenics and Isotopic Technologies ICSI RM Valcea, DEEP. Underground Engineering GmbH, E.On Gas Storage GmbH, Stichting Energieonderzoek Centrum Nederland, Shell Global Solutions International B.V., CENEX – Centre of Excellence for Low Carbon and Fuel Cell Technologies, Solvay Chemicals GmbH, Commissariat a l Energie Atomique et aux Energies Alternatives, gefördert von der EU, 2014

Die Potentialabschätzung im HyUnder-Projekt war auf die geologische Speicherung von Wasserstoff in sechs europäischen Ländern fokussiert. Hier erfolgte eine Potentialabschätzung gemeinsam sowohl für Salzstrukturen (InSpEE-Bestandteil) als auch Schichtensalz. Es wurden auf Grund der starken Inhomogenität der betrachteten Salzformationen starke Vereinfachungen hinsichtlich der zu treffenden geologischen Anforderungen getroffen (CORDIS 2015).

Plan-DelyKaD – Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) – Institut für Technische Thermodynamik, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, KBB Underground Technologies GmbH, Christoph Noack, Dr. Fabian Burggraf, Seyed Schwan Hosseiny, Philipp Lettenmeier, Svenja Kolb, Dr. Stefan Belz, Dr. Josef Kallo, Prof. K. Andreas Friedrich, Dr. Thomas Pregger, Karl Kiên Cao, Dr. Dominik Heide, Dr. Tobias Naegler, Frieder Borggrefe, Dr. Ulrich Bünger, Jan Michalski, Tetyana Raksha, Christopher Voglstätter, Dr. Tom Smolinka, Fritz Crotogino,

Sabine Donadei, Peter-Laszlo Horvath, Dr. Gregor-Sönke Schneider, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015

Ziel des Plan-DelyKaD-Projektes war die Vorbereitung eines Wasserstoffelektrolyse-demonstrationsprojektes, so dass das Ziel der Potentialbetrachtung die Ermittlung von existierenden Speicherstandorten mit Ausbaupotential für einzelne Wasserstoffkavernen war. Das Potential nicht genutzter Strukturen blieb unberücksichtigt (DLR et al. 2015).

ANGUS+ – Auswirkungen der Nutzung des geologischen Untergrundes als thermischer, elektrischer oder stofflicher Speicher im Kontext der Energiewende – Dimensionierung, Risikoanalysen und Auswirkungsprognosen als Grundlagen einer zukünftigen Raumplanung des Untergrundes

Prof. Dr. Sebastian Bauer, Prof. Dr. Andreas Dahmke, Dr. Alina Kabuth, Christian Albrechts Universität zu Kiel (CAU), Deutsches GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ), Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig (UFZ), Ruhr Universität Bochum (RUB), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Förder-initiative „Energiespeicher“ der Bundesregierung, Projektlaufzeit 2012 - 2016

Der Forschungsansatz des ANGUS+ Projektes ist sehr breit und beruht auf der Bewertung von Speicheroptionen anhand von numerisch ausgeführten Speicherszenarien im geologischen Untergrund, die auf ihre Umweltauswirkungen und auf eventuelle Nutzungskonkurrenzen hin untersucht und bewertet werden sollen. Dazu werden zum einen die Grundlagen der Parametrisierung solcher Standorte erarbeitet, zum anderen die entsprechenden Simulationsmodelle entwickelt, um die stattfindenden Prozesse physikalisch und chemisch nachbilden zu können. Anhand der ausgeführten Szenarien können anschließend die einzelnen Speicheroptionen untersucht werden. Detaillierte Untersuchungen zur Verbesserung der geologischen und gebirgsmechanischen Grundlagen sowie eine umfangreiche Potentialanalyse werden im Rahmen der Projektbearbeitung nicht vorgenommen (FIZ Karlsruhe 2015a).

H2Store – hydrogen to store

Dr. Dieter Pudlo, Friedrich-Schiller-Universität Jena - Institut für Geowissenschaften (IGW), TU Clausthal – Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Helmholtz Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam -, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) - Université de Lorraine, LEMTA-UMR 7563 - Laboratoire d’Ener-gétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, gefördert von den Bundesministerien für Wirtschaft und Energie sowie Bildung und Forschung im Rahmen der Förderinitiative „Energiespeicher“ der Bundesregierung, Projektlaufzeit 2012 - 2015

H2STORE betreibt weitestgehend Grundlagenforschung mit dem Ziel, das Verhalten von Wasserstoff in natürlichen porösen Medien unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen zu untersuchen. Aus den Untersuchungsergebnissen können die Rahmenbedingungen für die geologische Wasserstoff-Porenspeicher abgeleitet werden. Da hier die Machbarkeit der Speicherung von Wasserstoff in Porenspeichern im Vordergrund steht, besteht keine Überschneidung mit dem Verbundvorhaben InSpEE (FIZ Karlsruhe 2015b).

2 AP 1 – Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten

Koordinatorin: Dr. Gabriela von Goerne

Bearbeiter: Dipl.-Geol. Sascha Gast, Cornelia Riesenberg M.A.

Für die Prognose von Speichermöglichkeiten erneuerbarer Energien in Salzstrukturen ist es notwendig, die Verbreitung von Salz-führenden Horizonten ebenso zu kennen, wie die Ausdehnung von Salzstrukturen im tieferen Untergrund. Die Lage der in Norddeutschland verbreiteten Salzstrukturen ist im Allgemeinen bekannt, ihre flächendeckende Ausdehnung im Untergrund jedoch nicht. Arbeitspaket 1 (AP 1) befasst sich daher mit der Erstellung von Niveauschnittkarten in verschiedenen Teufen, der Beschreibung des regionalen Umfeldes einschließlich der Rekonstruktion der Entwicklungsgeschichte von Salinarstrukturen sowie der Erstellung des Informationssystems Salzstrukturen in Form eines Online-Kartendienstes.

2.1 Regionale Geologie des Arbeitsgebietes

Salzstrukturen bieten hervorragende Bedingungen für die Anlage von Speicherkavernen zur Speicherung großer Mengen von Wasserstoff und Druckluft. Mehr als 300 Salzkavernen existieren bereits in norddeutschen Salzstrukturen (Sedlacek 2014). Sie dienen in erster Linie der saisonalen Speicherung von Erdgas oder zur Lagerung strategischer Ölreserven. Die Salzstrukturen sind aus ursprünglich flach lagernden Salzformationen durch Salzaufstiegsbewegungen in den letzten 250 Mio. Jahren entstanden und zeigen heutzutage eine große Formenvielfalt. Neben einfachen und relativ flachen Beulenstrukturen, den sog. Salzkissen, sind insbesondere Salzdiapire von Bedeutung. Sie haben ihr Deckgebirge durchbrochen, sind z. T. bis an die Erdoberfläche aufgestiegen und können mächtige Salzakkumulationen von bis zu 7.000 m Mächtigkeit bilden. Eine umfangreiche zusammenfassende Darstellung zur Salinartektonik in Norddeutschland legten unlängst Pollok et al. (2016) vor.

Das Untersuchungsgebiet wird neben den deutschen Anteilen der Nord- und Ostsee im Festlandbereich durch die Grenzen des Norddeutschen Beckens markiert (Abbildung 2-1). Dieses ist Teil des 300 km bis 600 km breiten südlichen Permbeckens („Southern Permian Basin“, SPB), das sich über 1.500 km in WNW-ESE-Richtung von Mittelengland über Norddeutschland bis nach Polen erstreckt. Das Norddeutsche Becken („North German Basin“, NGB) gehört dem intrakontinentalen Zentraleuropäischen Beckensystem („Central European Basin System“, CEBS) an (van Wees et al. 2000; Maystrenko et al.

2008). Das Norddeutsche Becken wird in der Literatur gelegentlich in das Nordostdeutsche („Northeast German Basin“, NEGB) und das Nordwestdeutsche Becken („Northwest German Basin“, NWGB) geteilt. Bei den im Süden gelegenen Niedersächsischen Becken („Lower Saxony Basin“, LSB) im SW und dem Subherzynen Becken (SB) im SE, handelt es sich um regional ausgebildete Subbecken, die sich zu einem späteren Zeitpunkt am Rand des NGB gebildet haben. Die tiefsten Beckenbereiche, mit einer aktuellen Versenkung der Zechsteinbasis von mehr als 10.000 m (Abbildung 2-1), sind an Grabensysteme der südlichen bzw. zentralen Nordsee und Schleswig-Holsteins gebunden (Maystrenko et al. 2005; Peryt et al. 2010). Das Verbundvorhaben konzentriert sich auf den Bereich des Norddeutschen Beckens.

Das NGB wurde seit seiner Anlage im Oberkarbon in einem Zeitraum von etwa 296 Millionen Jahren (Ma) (Perm bis rezent) mit bis zu 12 km mächtigen Sedimenten gefüllt. Während des Unterperm (Rotliegend) wurden zunächst klastische Sedimentserien und Vulkanite abgelagert. Anschließend erfolgte die Sedimentation des Ober-Rotliegendsalinars. Mit zunehmender Subsidenz erfolgte zu Beginn des Oberperm (Zechstein) eine rasche Transgression, bei der das Norddeutsche Becken von Norden her geflutet wurde. Charakteristisch für den Zechstein in Norddeutschland waren zyklische Meeresvorstöße unter ansonsten wüstenhaften Bedingungen, die zur wiederholten Eindampfung des Meerwassers und zur Ablagerung von salinaren Gesteinen führten. Ein vollständiger Salinarzyklus beginnt typischerweise mit tonigen Sedimenten, über denen karbonatische (Kalke), später sulfatische (Gips) und schließlich chloridische Ausscheidungen (Stein- und Kalisalze) entgegen ihrer jeweiligen Wasserlöslichkeit folgen. Diese Abfolge wiederholte sich während des Zechsteins im Norddeutschen Becken siebenmal. Diese sind vom Liegenden (unten) zum Hangenden (oben) die Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (Käding 2000, 2005; Anmerkung: Nach Beschluss Nr. 69 der Perm-Trias-Subkommission der Deutschen Stratigrafischen Kommission vom 23.04.2010 handelt es sich dabei um Formationen).

Überlagert werden die Ablagerungen des Zechsteins durch triassische Sedimente, die aus einem Wechsel von kontinentalen und marinen Sedimenten gebildet werden. Erste Salzbewegungen setzten in einigen Gebieten im Buntsandstein ein und führten zur Bildung von ersten Salzkissen (Kapitel 2.3). Starke Riftbewegungen an Sockelstörungen mit daraus resultierendem Zerreißen der Sedimenthüllen über den Salzakkumulationen führten zur Bildung zahlreicher Diapire im Keuper (z. B. Jaritz 1973; Kockel & Krull 1995; Baldschuhn et al. 2001, Pollok et al. 2016). Während des Jura kam es erneut zur Sedimentation von wechselnd marinen und kontinentalen Ablagerungen. In der Kreide wurde das bis dahin extensiv geprägte Becken kompressiv beeinflusst. Es kam zu einer Beckeninversion, bei der Gebiete angehoben und mesozoische Sedimente teilweise erodiert wurden. Bereits existierende Strukturen wurden überprägt, alte (kaledonische) Störungssysteme reaktiviert und die Strukturen der heute NW-SE orientierten Salzstöcke

angelegt (z. B. Kley & Voigt 2008; Scheck-Wenderoth et al. 2008). Nach der Oberkreide-Inversion unterlag das Norddeutsche Becken ab dem Tertiär erneut einer Beckenabsenkung, die bis heute anhält. Verstärkt wurde dies durch einsetzende Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese, die auch die Diapir-bildungsrate erhöhte. Es bildeten sich tiefe, sekundäre Randsenken, die mit Sedimenten verfüllt sind. Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie. Tiefe Rinnen entwässerten die Gletscher. Solche subglazialen Rinnen können bis zu 500 m (z. B. Stackebrandt 1999; Stackebrandt et al. 2010) tief eingeschnitten sein. Sie sind meist mit Moränenmaterial verfüllt.

Die starke Absenkung des Norddeutschen Beckens war Voraussetzung für die Ablagerung der verschiedenen Salzformationen. Insbesondere die Zechsteinsalinare und das Oberrotliegendsalinar waren mächtig genug, um später unter bestimmten geologischen Voraussetzungen mobilisiert zu werden und die knapp 700 Salzstrukturen zu bilden, die das Ziel der Untersuchungen innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens sind. Dagegen sind nicht mobilisierte Salzgesteine, die noch in ihrer ursprünglichen flachen Lagerung vorliegen und beispielsweise an den Rändern des Norddeutschen Beckens, zwischen Salzstrukturen oder in anderen Teilen Deutschlands vorkommen, nicht Bestandteil dieser Studie.

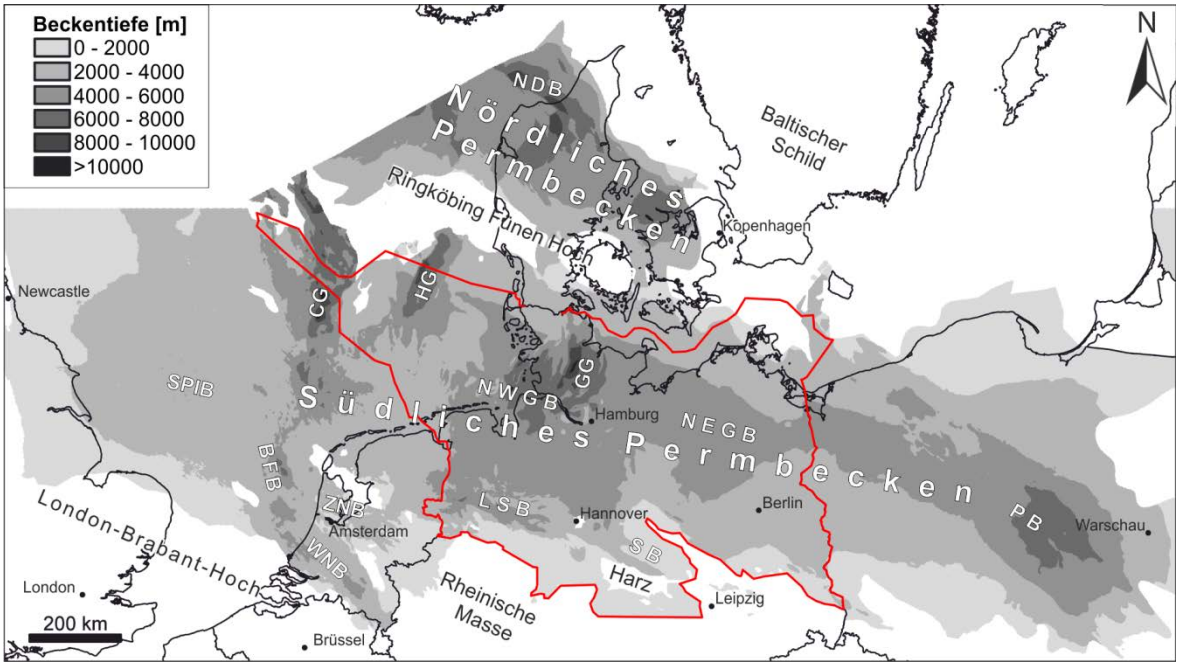


Abbildung 2-1: Beckenkonfiguration im Zentraleuropäischen Beckensystem (CEBS)
Die dargestellte Beckentiefe entspricht der Tiefenlage der Zechsteinbasis. Rot markiert ist die Lage des Untersuchungsgebiets. BFB: Broad Fourteens Becken, CG: Zentral-Graben, GG: Glückstadt-Graben, HG: Horn-Graben, LSB: Niedersächsisches Becken, NDB: Norwegisch-Dänisches Becken, NEGB: Nordostdeutsches Becken, NWGB: Nordwestdeutsches Becken, PB: Polnisches Becken, SB: Subherzynes Becken, SPIB: Sole Pit-Becken, WNB: Westniederländisches Becken, ZNB: Zentralniederländisches Becken (Peryt et al. 2010, verändert).

2.2 Niveauschnittkarten des Norddeutschen Untergrundes

Niveauschnittkarten bilden die geologischen Verhältnisse in einer bestimmten Tiefe ab. Durch die Interpretation mehrerer Karten unterschiedlicher Tiefe lassen sich Lagerungsverhältnisse im Raum annäherungsweise erfassen. Ferner lässt sich die Ausdehnung und Form von Salinarstrukturen erkennen, sowie deren Einordnung im regionalen Kontext erkennen.

Für das Verbundvorhaben InSpEE wurden flächendeckend für den Festlandsbereich Norddeutschlands im Maßstab 1:500.00 Niveauschnittkarten in vier verschiedenen Tiefenniveaus von -500, -1.000, -1.500, -2.000 m u. NN, erarbeitet. Die gewählten Tiefenniveaus basieren auf der gängigen Tiefenlage bestehender Kavernenstandorte in Norddeutschland, die im Wesentlichen zur Speicherung von Kohlenwasserstoffen dienen (Sedlacek 2014). Die vier Tiefen von 500 bis 2.000 m u. NN wurden in enger Abstimmung mit den Verbundpartnern ausgewählt. Die Errichtung von Offshore-Salzkavernen ist technisch und wirtschaftlich anspruchsvoll. Da im Onshore-Bereich ein ausreichendes Potential für die Errichtung von Salzspeicherkavernen auch im Küstenbereich und somit im Bereich der Anlandung des Offshore-Windstroms erwartetet wird, wurde in Abstimmung mit den Verbundpartnern auf die Bearbeitung dieser marinen Bereiche verzichtet. Alle Niveauschnittkarten wurden mit den jeweils zuständigen Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer abgestimmt.

Zum einen geben die in den Niveauschnittkarten enthaltenen Strukturumrisse einen Anhaltspunkt zur Geometrie der jeweiligen Salzstruktur und deren Veränderung mit zunehmender Tiefe, zum anderen bilden sie den Ausgangspunkt für die gebirgsmechanischen Berechnungen (Kapitel 4) und Potentialabschätzungen (Kapitel 6).

2.2.1 Auswahl der Datengrundlagen für die Erstellung der Niveauschnittkarten

Um eine einheitliche Bearbeitung für den gesamten norddeutschen Raum zu ermöglichen, wurden zu Beginn des Verbundvorhabens verschiedene Datensätze auf ihre Eignung als Arbeitsgrundlagen geprüft. Ein erster Ansatz zielte auf die Verwendung des Southern Permian Basin Area Atlas (Doornenbal & Stevenson 2010) ab, da dieser großflächig, vereinheitlichte Strukturkarten verschiedener relevanter Horizonte enthält. Dieser Ansatz wurde auf Grund des kleinen Maßstabes (1:3.000.000) sowie verschiedener anderer Unstimmigkeiten hinsichtlich der Lage und des Verlaufes von Störungen verworfen. Besser geeignet für die Bearbeitung der westlichen Bundesländer sind die Daten aus den Kartenwerken des „Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor“ (GTA) (Baldschuhn et al. 2001) und des „Regionalen geophysikalischen Kartenwerkes der DDR“ (GPK) (Reinhardt 1960-1991). Beide Kartenwerke beruhen auf ähnlichen Arbeitsweisen und Zielmaßstäben (1:300.000 & 1:200.000). Die Isolinien im

GPK basieren auf der flächenmäßigen Darstellung der geophysikalisch erfassten seismischen Reflektoren, während im GTA die Grenzflächen stratigrafischer Einheiten betrachtet wurden. Bei der Nutzung seismischer Reflektoren auf der einen und stratigrafischer Einheiten auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, dass stratigrafische Grenzen neu definiert werden können und auch nicht synchron über die Fläche verteilt sein müssen. Ein seismischer Reflektor (Indikator für einen Lithologiewechsel) wird dagegen zwar nicht neu definiert, muss jedoch nicht in allen Bereichen das gleiche stratigrafische Alter haben. Auf Grund der Anwendung von verschiedenen Geschwindigkeitsmodellen sowie der unterschiedlichen Ansprache der Reflektoren bzw. der stratigrafischen Einheiten in beiden Kartenwerken, kann es zu Höhensprüngen äquivalenter Horizonte von mehreren hundert Metern kommen (Diskussion siehe Kapitel 2.2.3).

Aus den Kartengrundlagen wurden all jene Horizonte selektiert, die im jeweils anderen Kartenwerk ein ähnliches Äquivalent haben und somit flächendeckend bearbeitet werden konnten. Auf Basis dessen wurden elf stratigrafisch abgrenzbare Einheiten zwischen „Rotliegend und älter“ und „Basis Rupelium bis rezent“ für die Niveauschnittkarten bearbeitet (Details siehe Abbildung 2-2).

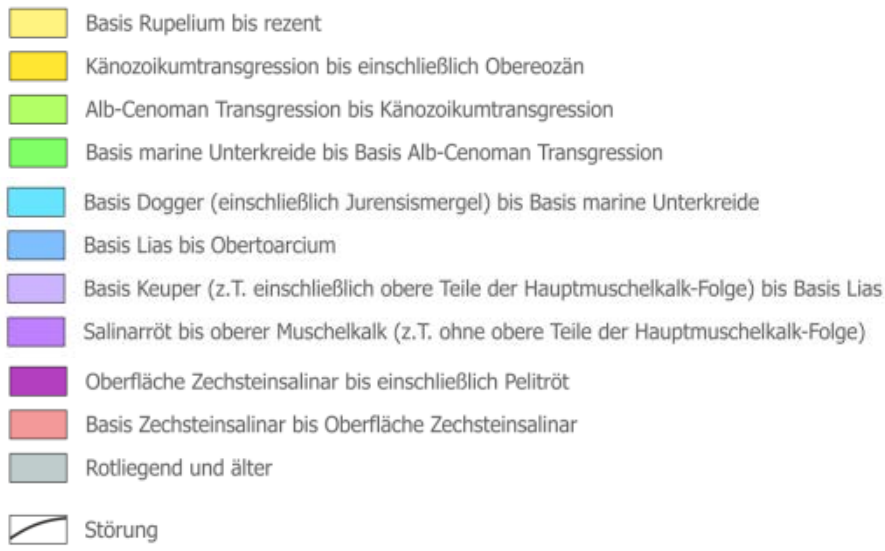


Abbildung 2-2: Zusammenstellung der abgrenzbaren stratigrafischen Einheiten in den Niveauschnittkarten mit den entsprechenden Symbolen

Zusätzlich wurde in Abstimmung mit den SGD der Bundesländer auf vorhandene 3D-Modelle der Bundesländer zurückgegriffen. So wurden für das Landesgebiet von Schleswig-Holstein nicht die Umrisse der Salinarstrukturen aus dem GTA verwendet, sondern die modellierten Flächen aus dem 3D-Modell (Rosenbaum et al. 2012, Hese 2012).

Ebenso wurde mit den Salzstockumrissen in Niedersachsen (Bombien et al. 2012) und Brandenburg (Geologisches 3D-Untergrundmodell Brandenburg 2014) verfahren.

2.2.2 Arbeitsweisen / Arbeitsschritte

Die Bearbeitung der Niveauschnittkarten erfolgte digital mit der Software ArcMap 10.2 (Esri). Verwendet wurden die bereits digital vorliegenden Karten des GPK und GTA, wie im Abschnitt „Auswahl der Datengrundlagen“ beschrieben. Aus den ausgewählten Horizonten wurden die zur jeweiligen Tiefe gehörenden Isolinien nach ihrer Tiefe selektiert, mit den entsprechenden Stratigrafiesymbolen versehen (Abbildung 2-2) und in einem Shape-File kombiniert (Abbildung 2-3).

Alle Störungen wurden ebenfalls mit einer, der Stratigrafie entsprechenden Codierung versehen und in den Datensatz übernommen. Im Anschluss wurden die Flächen-abgrenzungen anhand der selektierten Isolinien und Störungen erarbeitet. Für Flächen, die durch eine umlaufende Isolinie begrenzt sind, gestaltete sich die Abgrenzung recht einfach und eindeutig (Abbildung 2-4). Für die Abgrenzung von Salinarstrukturen zum umgebenden Deckgebirge wurde der Salzstockumriss der jeweils umgebenden Schicht gewählt.

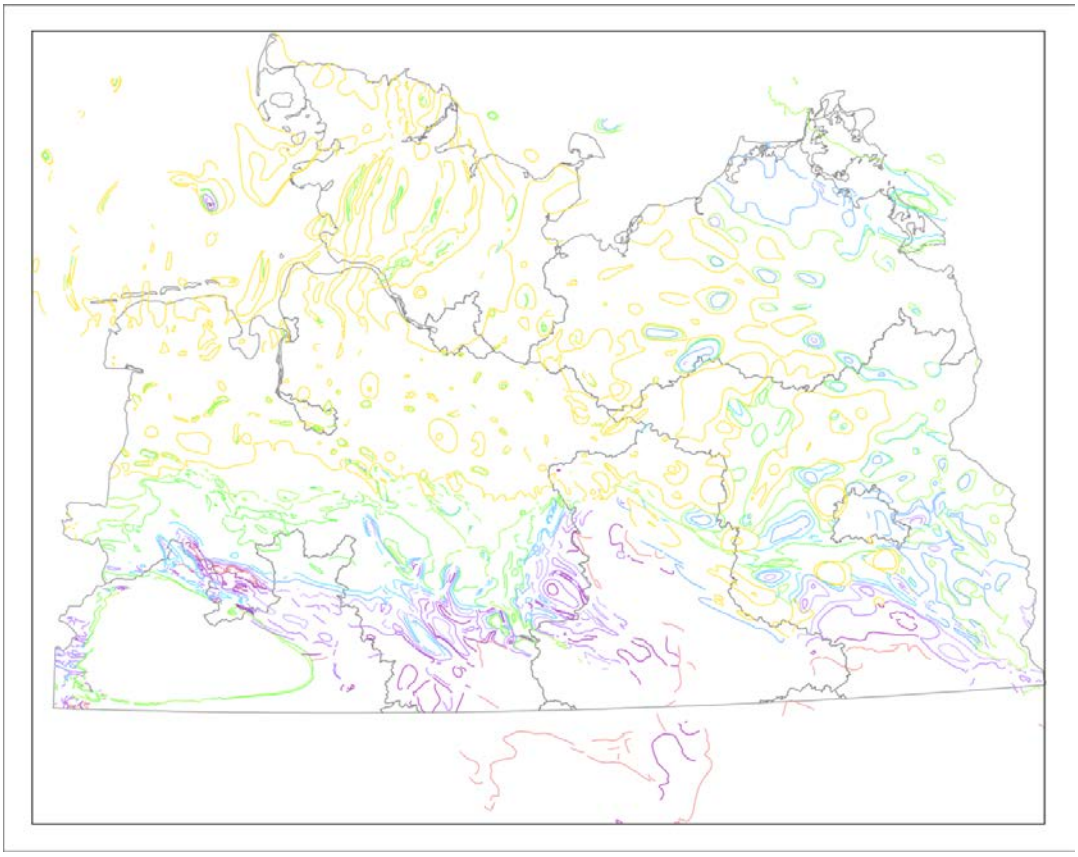


Abbildung 2-3: Darstellung der selektierten Isolinien aus dem GTA und dem GPK, am Beispiel des Niveauschnitts 500 m u. NN
Die Farben der Isolinien entsprechend den in Abbildung 2-2 abgebildeten stratigrafischen Einheiten.

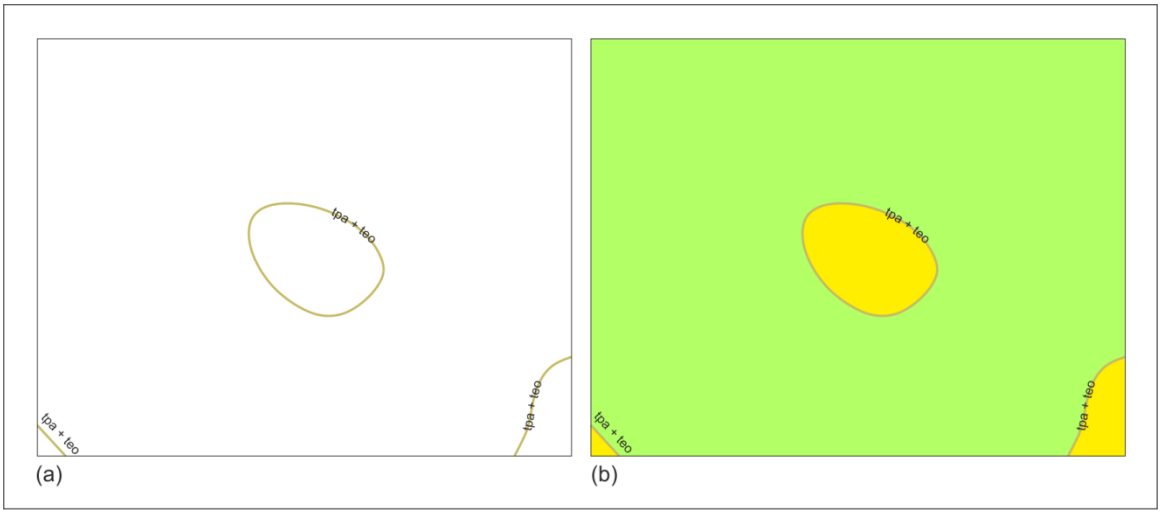


Abbildung 2-4: Selektierte 500 m-Isolinien des Rupelium (linkes Bild) und der daraus konstruierte Ausschnitt der Niveauschnittkarte 500m u. NN (rechtes Bild)

Weitere Flächenbegrenzungen sind durch die Kombination von selektierten Isolinien und dem Ausbiss der stratigrafischen Einheit sowie tektonischer Elemente, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, gegeben.

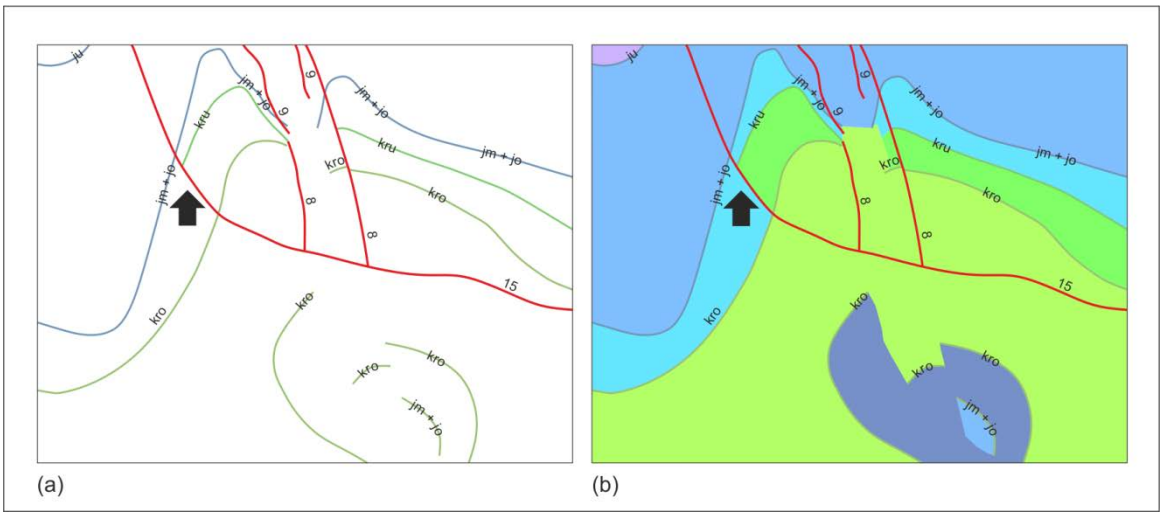


Abbildung 2-5: Kartenausschnitt mit verschiedenen Flächen-begrenzenden Elementen wie Störungen (rote Linien), Ausbiss der Unterkreide (schwarzer Pfeil) und selektierten 500 m-Isolinien (linkes Bild) und dem daraus erarbeiteten Kartenausschnitt der 500 m-Niveauschnittkarte (rechtes Bild).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass in den erarbeiteten Karten eine Fläche nur durch folgende Elemente begrenzt werden kann:

- Isolinien,
- Störungen,
- Salzstrukturumrisse,
- Ausbisse.

Auch eine Kombination verschiedener Elemente macht eine Abgrenzung möglich.

Die Auswahl der Störungen erfolgte nach stratigrafischen Gesichtspunkten. So wurde für die Abgrenzung der Störungszone in Abbildung 2-5 die Störungsgeometrie der Oberkreide (hellgrün) verwendet. In einigen Fällen wurde auch für Störungen eine Kombination verschiedener Horizonte gewählt. Diese wurden in dem digitalen Datensatz mit der Bezeichnung „eigen“ versehen. Probleme entstanden in Bereichen, in denen sich Isolinien verschiedener Horizonte mit gleicher Tiefenlage schneiden oder es zu Widersprüchen in der geologischen Lagerung kommt (vgl. Bombien et al. 2012). Der Umgang mit diesen Problemstellen wird in Kapitel 2.2.3 erläutert.

2.2.3 Problemstellen

Bei der Erarbeitung der Niveauschnittkarten zeigten sich Inkonsistenzen in den verwendeten Kartenwerken. So kommt es vor, dass sich Horizonte durchdringen oder geologisch nicht plausible Lagerungsbeziehungen existieren. Solche Inkonsistenzen existieren sowohl im GTA (vgl. Bombien et al. 2012) als auch im GPK (Reinhardt 1960-1991).

Besonders häufig treten diese Inkonsistenzen in Bereichen auf, in denen die einzelnen stratigrafischen Einheiten nur geringmächtig ausgebildet sind oder eine Zuordnung der Reflektoren unsicher ist. In Abbildung 2-6 sind es besonders die Schichten der Unterkreide und Oberkreide, die sich an den markierten Stellen mehrfach durchdringen. In Einzelfällen kommt es vor, dass sich stratigrafisch unterschiedlich alte Schichten schneiden. Dies ist im Nordosten der Abbildung 2-6 der Fall, da sich dort auf engstem Raum Schichten des Keuper, des Jura und der gesamten Kreide durchdringen. In diesen Bereichen wurden unter Zuhilfenahme von Literatur und geologischen Analogieschlüssen die Diskrepanzen behoben, indem vom Fachmann entschieden wurde, welcher der Isolinien der Vorrang zu geben ist. Diese erfolgte für alle Diskrepanzen jeweils in einer Einzelfallprüfung und Bewertung der geologischen Situation des Umfeldes. Um für den gesamten Datensatz die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, wurde im digitalen Datensatz für jede Linie die Datenquelle mitgeführt.

Zu größeren Inkonsistenzen kommt es an der ehemaligen innerdeutschen Grenze, da dort beide Kartenwerke (GTA und GPK) aneinanderstoßen. Auf Grund der Anwendung von verschiedenen Geschwindigkeitsmodellen sowie der unterschiedlichen Ansprache der Reflektoren bzw. der stratigrafischen Einheiten in beiden Kartenwerken, kann es hier zu Höhensprüngen äquivalenter Horizonte von mehreren hundert Metern kommen (Abbildung 2-7). Diese Inkonsistenzen wurden im Verbundvorhaben dahin gehend behoben, dass die Isolinien über die ehemalige innerdeutsche Grenze hinweg generalisiert wurden. D. h., es wurde versucht, die geologisch plausibelste Kombination beider Kartenwerke zu erreichen. Eine Überprüfung anhand seismischer Profile oder Bohrungen, sofern vorhanden, war im Rahmen dieses Verbundvorhabens nicht zu leisten.

Abbildung 2-6: Beispiel von Inkonsistenzen
Im exemplarischen Ausschnitt abgebildet sind die 1000 m-Isolinien verschiedener Horizonte. Die Isolinien-Überschneidungen (rot umrandete Problemstellen) werden als Horizontdurchdringungen interpretiert.

Störungen werden in den Kartenwerken im Allgemeinen linear dargestellt. Im GPK und im GTA wurden bei Unsicherheiten innerhalb von Störungssystemen stellenweise keine Isolinien dargestellt bzw. konstruiert (Abbildung 2-8). In diesen Bereichen wurde im Einzelfall entschieden, ob jeweils zwei begrenzende Störungen in die Karten übernommen wurden oder das Störungssystem mit nur einer Störung generalisiert dargestellt wurde.

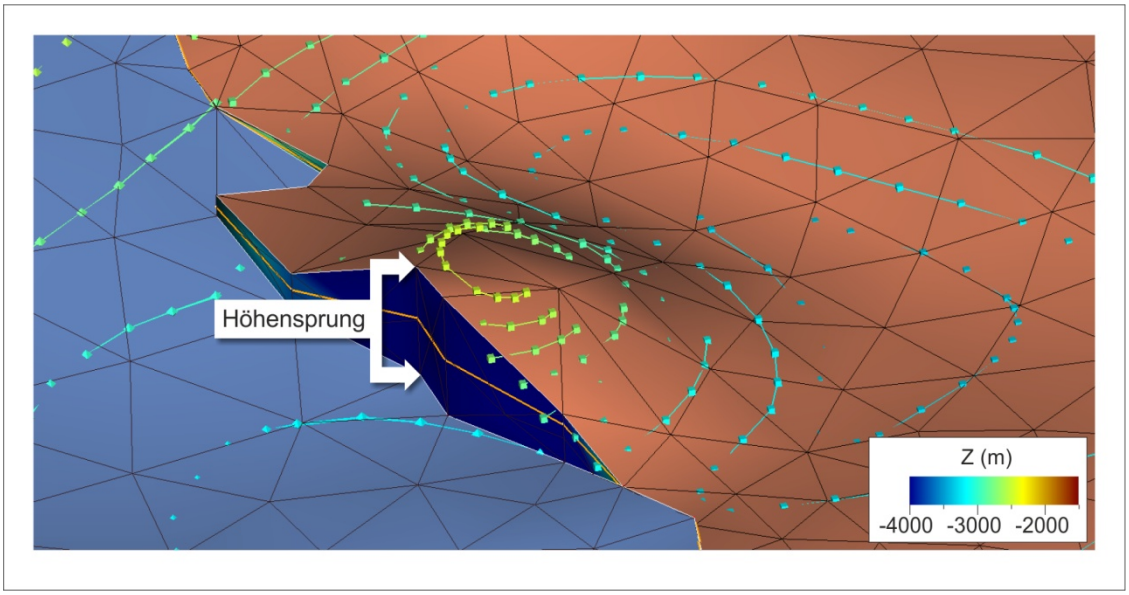


Abbildung 2-7: 3D-Visualisierung einer Inkonsistenz
(Höhensprung) zwischen dem GPK (orange) und dem GTA (blau) (Zehner et al. 2014)

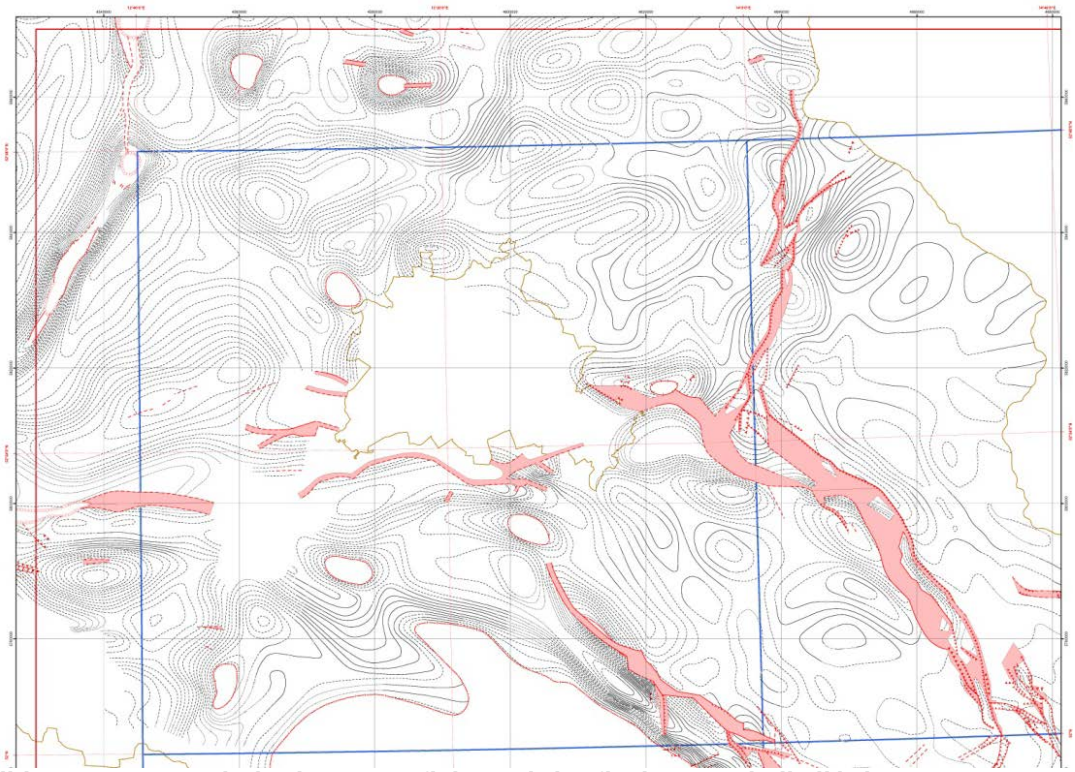


Abbildung 2-8: Ausschnitt des M1-Reflektors (Oberfläche Muschelkalk) des Geophysikalischen Kartenwerkes (GPK) im digitalisierten Kartenblatt Berlin

Die rosa Bereiche zeigen Störungssysteme, in denen eine Verfolgung des Reflektors nicht eindeutig möglich war und daher auf die Konstruktion von Isolinien verzichtet wurde.

2.2.4 Darstellungsunsicherheiten

Die vorgelegten Niveauschnittkarten vermitteln einen Überblick über die im Untergrund befindlichen Strukturen. Basierend auf den Eingangsdaten im Maßstab 1:200.000 (GPK) und 1:300.000 (GTA) wurde im Verhältnis des Maßstabs 1:500.000 der Niveauschnittkarten mit detaillierteren Daten gearbeitet, die kaum generalisiert wurden. Die Güte der Niveauschnittkarten ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, u. a. von der Qualität und Quantität der Primärdaten. Die Kartenwerke spiegeln den zum Zeitpunkt der Erstellung zur Verfügung stehenden Kenntnisstand wider. Im GTA sowie im GPK wurden Bohrungen und seismische Sektionen zur Konstruktion der Strukturkarten verwendet. Die Darstellung der Strukturen in den Karten ist damit qualitativ abhängig von der Anzahl und Verteilung von Bohrungen bezogen auf die Niveauschnitttiefen sowie von der räumlichen Abdeckung und Qualität der seismischen Profile. Im GPK kommt erschwerend hinzu, dass für einige Gebiete in Sachsen-Anhalt keine Strukturkarten existieren bzw. im Rahmen des Verbundvorhabens nicht zur Verfügung standen. Die Genauigkeit ist daher für den Maßstab 1:500.000 als gut, für detailierte Untersuchungen jedoch als ungenau einzustufen. Es ist mit Ungenauigkeiten zu rechnen, die lokal unterschiedlich bis in den einstelligen Kilometerbereich reichen können. Für genauere Informationen wären Einzelstrukturuntersuchungen notwendig. Diese liegen in der Zuständigkeit der Staatlichen Geologischen Dienste der Länder.

Die vier erarbeiteten Niveauschnittkarten sind dem Bericht als Anhang 2-1 bis 2-4 beigefügt.

2.3 Erfassung des regionalen Umfeldes

Exemplarisch soll die Entwicklungsgeschichte einer Salinarstruktur an einem Beispiel aus der Region Brandenburg rekonstruiert werden. Dazu wurde ein Modellgebiet, ca. 40 km südlich von Berlin, näher betrachtet. Das Arbeitsgebiet hat eine Größe von etwa 30 km in Nord-Süd-Ausdehnung und 40 km in Ost-West Ausdehnung (Abbildung 2-9).

Innerhalb des Untersuchungsgebietes liegt ein NW-SE streichender Salzstrukturzug, dem drei Salzstöcke (Blankensee, Sperenberg und Paplitz; von NW nach SE) aufsitzen (Abbildung 2-9). Ihre Entwicklung soll anhand von Randsenkenanalysen, in Anlehnung an die Vorgehensweise von Jaritz (1973), rekonstruiert werden. Die Entwicklung von flach lagernden Salzschichten zu Salzkissen und später zu Salzdiapiren verläuft in verschiedenen, meist über mehrere 10er-Millionen Jahre andauernden Phasen. Durch Salzfließprozesse („Halokinese“) kommt es zur Konzentration des Salzes in Salzkissen bzw. Diapiren. Zeitgleich („syngenetisch“) wird mit dem Salzverlust in den Salzabwanderungsgebieten, im Umfeld der Salzstrukturen ein Absinken der Deckgebirgsschichten hervorgerufen. Es entsteht ein Volumendefizit, das durch eine verstärkte

Sedimentation in den neu gebildeten Senkungsräumen ausgeglichen wird. Diese charakteristischen Kompensationsstrukturen werden als Randsenken bezeichnet (siehe Abbildung 3-1). Durch den Vergleich zwischen relativen Sedimentmächtigkeitszunahmen in den Randsenken mit den Normalmächtigkeiten außerhalb der Salzabwanderungsgebiete können Salzfließbewegungen rekonstruiert werden. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden die Entwicklungsgeschichte der drei Strukturen im Mesozoikum und Känozoikum rekonstruiert.

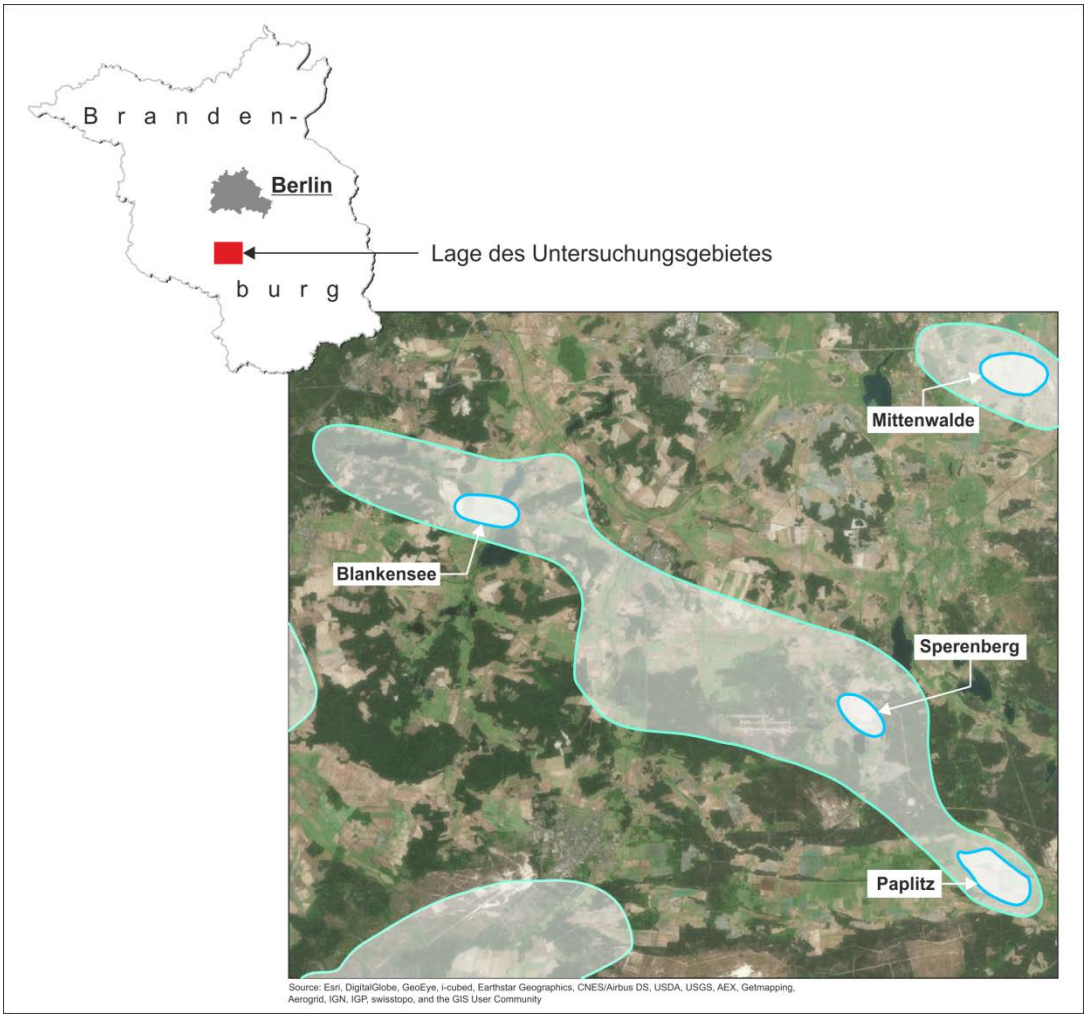


Abbildung 2-9: Lage des Untersuchungsgebietes zur Erfassung des regionalen Umfeldes
Die hellblau umrandeten Flächen markieren die maximale Ausdehnung der Salzstöcke und die grünblaue umfassende Linie markiert den gemeinsamen Kissenfuß aller drei Strukturen (Reinhold et al. 2008, verändert).

Basierend auf einem Ausschnitt des 3D-Landesmodells von Brandenburg und interpretierten seismischen Schnitten, wurde anhand von neun Horizonten ein verfeinertes

Strukturmodell der Region erstellt. Es wurde dabei bewusst um das Gebiet ein Puffer von 5 km gelegt, der es ermöglicht, das angepasste Modell in das Landesmodell zurück zu implementieren, ohne dass es zu größeren Verschiebungen kommt. Die stratigrafische Einstufung der geophysikalischen Horizonte ist in Tabelle 2-1 übersichtsmäßig dargestellt.

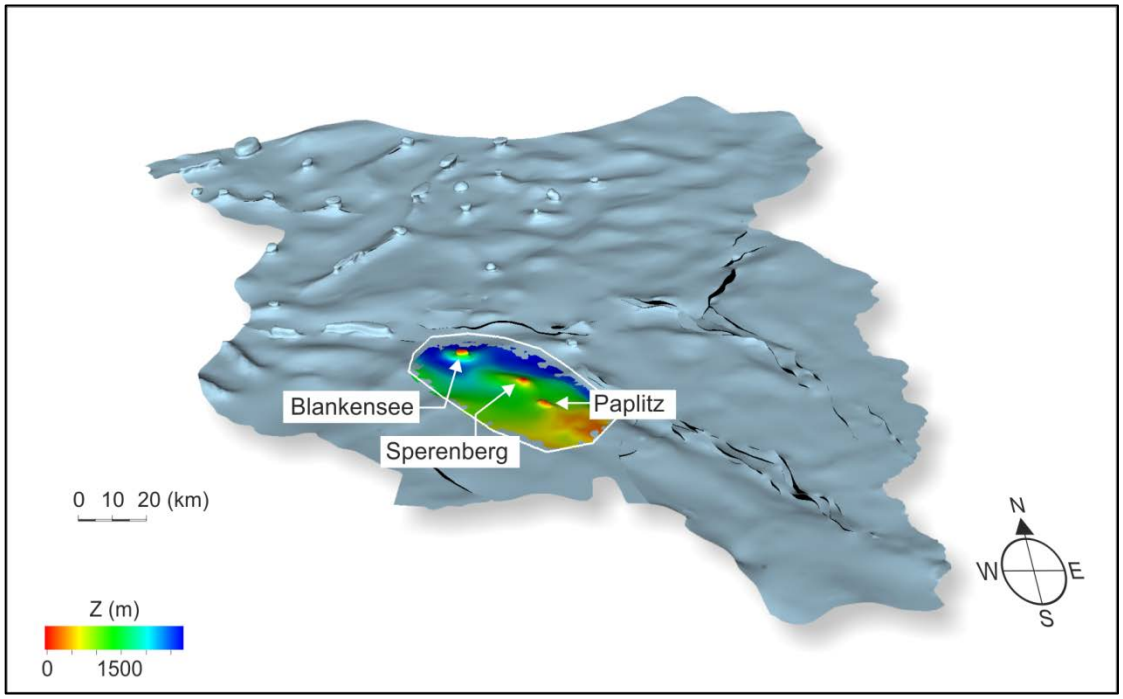


Abbildung 2-10: Lage der Untersuchungsregion im Land Brandenburg
Die hellblaue Fläche stellt die Oberfläche des Zechstein (X1-Reflektor) im 3D-Modell Brandenburg dar, die weiße Linie markiert die Grenze des Arbeitsgebietes (bunte Fläche).

Die modellierten Horizonte des 3D-Modells wurden mit ca. 100 Profilkilometer interpretierter seismischer Profile überarbeitet. Dies war auf Grund der Generalisierung des Kartenwerkes mit dem Zielmaßstab 1:100.000 notwendig. Darauf aufbauend wurden Mächtigkeitskarten der einzelnen stratigrafischen Abschnitte erstellt und hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit zur Strukturentwicklung ausgewertet. Das tiefste betrachtete stratigrafische Intervall umfasst den Bereich von der Basis des Unteren Werraanhydrits bis zur Oberfläche des Zechsteins. Diese Karte ermöglicht Aussagen zur Mächtigkeit des Zechsteins und damit zur Abgrenzung der Salzstrukturen sowie von Gebieten mit reduzierter Zechsteinmächtigkeit (Abbildung 2-11). Die Gebiete mit reduzierter Zechsteinmächtigkeit heben sich durch blaue Farbgebung ab. Der Atlas zur Geologie von Brandenburg (Stackebrandt et al. 2010) gibt für den untersuchten Bereich eine primäre Mächtigkeit des Zechstein (Z2-Z5) von knapp 1.000 m an. Das Salz aus den Gebieten mit reduzierter Zechsteinmächtigkeit (Abwanderungsgebiete) ist sekundär in die Salzstrukturen gewandert, deutlich erkennbar an der roten Färbung in Abbildung 2-11.

Tabelle 2-1: Im Modell verwendete seismische Reflektoren und die entsprechende stratigrafische Zuordnung

Reflektor	Stratigrafische Einstufung
T1	Basis Känozoikum/Top Oberkreide
T3/T4	Grenze Unteralb/Hauterive- Diskordanzfläche Wealden
E1/E2	Oberfläche Kimmeridgeanhydrit/Oberfläche Korallenoolith
K2	Oberfläche Mittlerer Keuper 3 (Oberer Gipskeuper)
M1	Oberfläche Muschelkalk
S1	Oberfläche Anhydrit 3a im Oberen Buntsandstein
X1	Oberfläche Zechstein
Z1	Oberfläche Basalanhydrit (Zechstein 2)
Z3	Basis Unterer Werraanhydrit

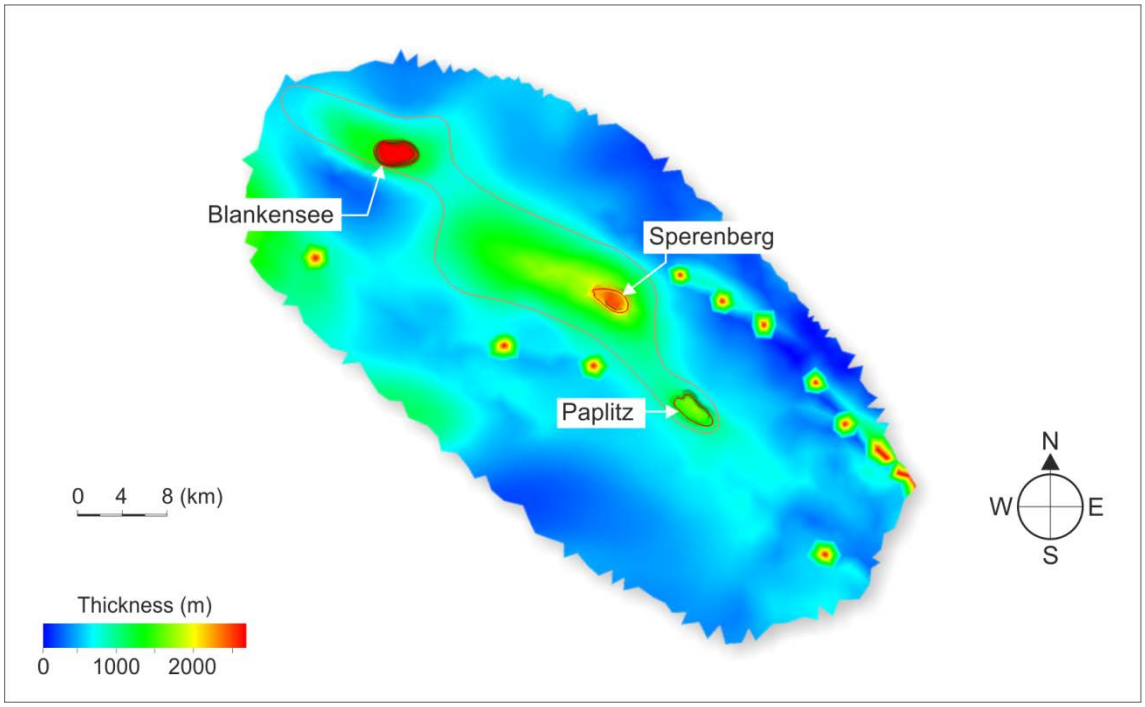


Abbildung 2-11: Berechnete Mächtigkeitskarte des Zechstein im Modellgebiet
Die perlschnurartig aufgereihten Bereiche erhöhter Mächtigkeit (rot) markieren gestörte Bereiche in der Zechsteinbasis.

Im östlichen und südöstlichen Bereich des Arbeitsgebietes zeigen sich bei der Erstellung der Mächtigkeitskarten perlschnurartig aufgereihte Bereiche mit scheinbar erhöhter Mächtigkeit. Dabei handelt es sich jedoch nicht um real erhöhte Mächtigkeiten, sondern um Berechnungsfehler auf Grund von Störungen in der Zechsteinbasis (vgl. Abbildung 2-12). Diese Fehlerstellen wurden für die Auswertung des Modells nicht weiter berücksichtigt.

Das Salz aus den Randsenken der Struktur Blankensee im Nordwesten des Gebietes ist zum größten Teil bereits in die Struktur abgewandert, deutlich erkennbar an der begrenzten dunkelblauen Färbung der Randsenke im südsüdwestlich und nordnordöstlich der Struktur. Sperenberg hingegen zeigt besonders im Nordwesten noch recht hohe Salzrestmächtigkeiten und damit weiteres Aufstiegspotential. Das Salzkissen um den Salzstock Paplitz im Südosten hebt sich in seiner Mächtigkeit kaum von dem ihn umgebenden Restsalz ab.

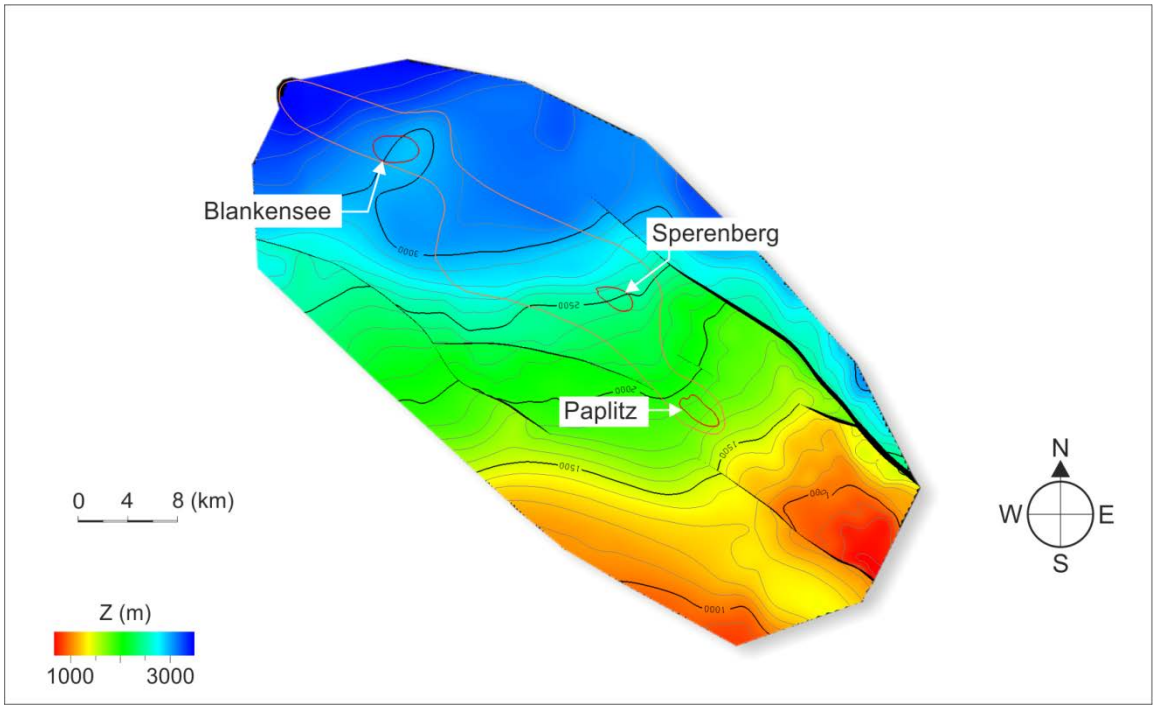


Abbildung 2-12: Isoliniendarstellung des Reflektors Z3 (angenommene Zechsteinbasis) im Modellgebiet
Durch Störungen (schwarze dicke Linien) beeinflusste Bereiche pausen sich punktuell in die Mächtigkeitskarte (Abbildung 2-11) durch.

Der Beginn der gemeinsamen Salzkissenbildung begann wahrscheinlich bereits im Buntsandstein (Untere Trias), mit Sicherheit jedoch im Muschelkalk (Mittlere Trias). Das zeigt sich an der Entwicklung der primären Randsenkenmächtigkeit der Struktur Blankensee

(NW) (Abbildung 2-13, gekennzeichnet durch rötliche Farben) v. a. im nördlichen Umkreis der Struktur. Für die Salinarstrukturen Sperenberg und Paplitz ist eine Aussage zu diesem Zeitraum auf Grund fehlender Sedimente in den Randsenken nicht möglich. Es ist jedoch anzunehmen, dass auf Grund des gemeinsamen Kissenfußes die initiale Salzkissenbildung für alle Strukturen einheitlich war. Eine Separierung in einzelne Strukturen lässt sich erst für die Zeit der Mittleren bis Oberen Trias vermuten, da sich zwischen den Strukturen Blankensee und Sperenberg die Mächtigkeit zwischen den Reflektoren M1 (Oberfläche Muschelkalk) und K2 (Oberfläche Gipskeuper) erhöht (Abbildung 2-13).

Durch das Fehlen von Jura und Kreidesedimenten in der Umgebung der drei Salzstöcke ist die strukturelle Genese für diesen Zeitabschnitt nicht rekonstruierbar. Es zeigt sich jedoch eine sekundäre Randsenkenbildung im Tertiär, sodass für den Zeitabschnitt Jura-Kreide eine längere Ruhephase im Salzkissenstadium angenommen werden muss. Für die Strukturen Blankensee und Paplitz kann der Übergang in das Salzstockstadium in das Tertiär datiert werden. Der Durchbruch des Salzstockes Sperenberg erfolgte erst verzögert im Pleistozän.

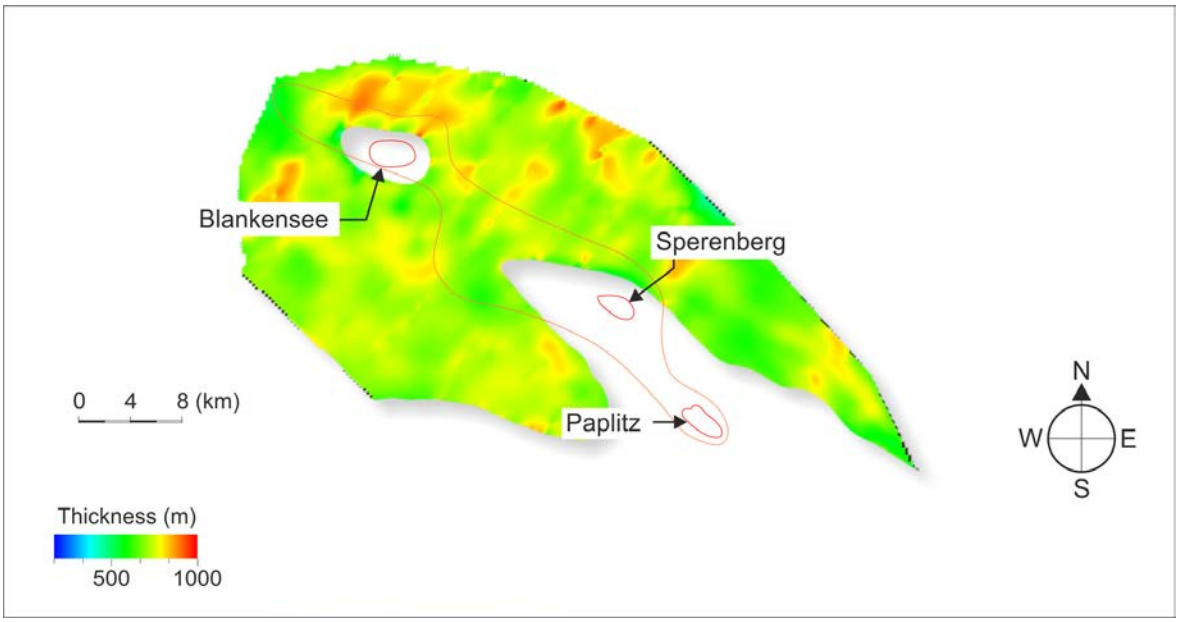


Abbildung 2-13: Mächtigkeit zwischen den Reflektoren S1 (Oberfläche Anhydrit 3a im Oberen Buntsandstein) und M1 (Oberfläche Muschelkalk) im Modellgebiet
Die rötlichen Bereiche kennzeichnen Gebiete erhöhter Mächtigkeit der Mittleren Trias und damit die beginnende Salzstrukturentwicklung der Salinarstruktur Blankensee im NW des Gebietes.

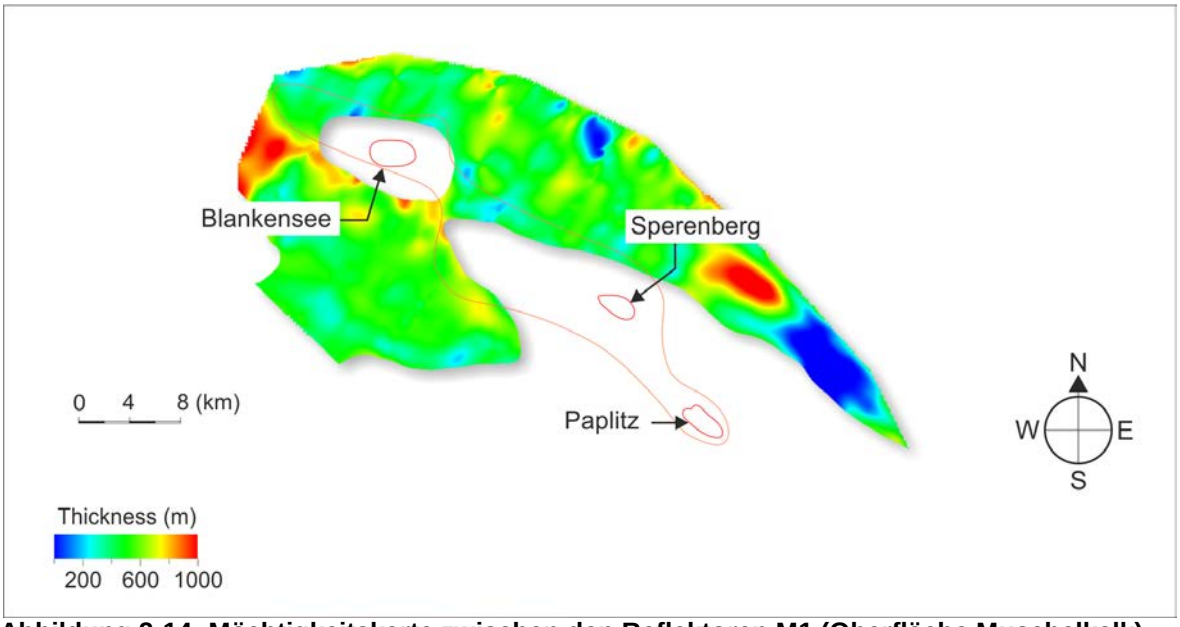


Abbildung 2-14: Mächtigkeitskarte zwischen den Reflektoren M1 (Oberfläche Muschelkalk) und K2 (Oberfläche Gipskeuper)
Die sich mit der Rotfärbung andeutende Mächtigkeitszunahme zwischen den Strukturen Blankensee und Sperenberg lässt vermuten, dass zu dieser Zeit die Separierung in einzelne Strukturen erfolgte.

Über die Ursachen für die ungleichmäßige Entwicklung von Salzstrukturen wird in der internationalen Fachwelt diskutiert (z. B. Jaritz 1973; Koyi & Petersen 1993; Jackson & Vendeville 1994; Kockel 1999; Hudec & Jackson 2007; Warsitzka et al. 2013). Die Bildung der meisten deutschen Salzstrukturen wurde durch tektonische Deformation des Sockelstockwerks im Bereich des Norddeutschen Beckens verursacht (z. B. Jaritz 1995; Kockel & Krull 1995; Frisch & Kockel 2004; Pollok et al. 2016). Dies betrifft insbesondere lang gezogene Salzstrukturzüge (z. B. Salzmauern), die sich oberhalb von Grundgebirgsstörungen ausbilden (z. B. Scheck-Wenderoth et al. 2008). Unterschiedliche Bewegungen an einer Sockelstörung unterhalb des Strukturzuges oder die beckenwärts gerichtete und damit tiefere Position der Struktur Blankensee können Einflussfaktoren sein, sollen aber an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden.

2.4 Informationssystem Salzstrukturen

Als Planungs- und Informationsgrundlage wurden die im Verbundvorhaben erarbeiteten Daten und Informationen in ein Informationssystem integriert, dass zum Abschluss über eine Internet-Kartenanwendung der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Darin sind strukturgeologische Beschreibungen zu den einzelnen Salzstrukturen ebenso enthalten wie Kavernenbau-relevante Eigenschaften. Das System kann zur Vorauswahl von Salzstrukturen verwendet werden. Das erstellte Informationssystem basiert auf der in AP 2

(Kapitel 3.1) aufgebauten Datenbank. Mittels der Schnittstellentechnologie ArcSDE (Esri), die es erlaubt zwischen ArcGis (Esri) und SQL gegenseitige Abfragen zu tätigen, wurden aus den bereitgestellten Datenbankfeldern und durch Verschneidung mit einer im Verlauf des Verbundvorhabens überarbeiteten Karte der „Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000“ (Reinhold et al. 2008), die einzelnen Eigenschaften der Salzstrukturen an die jeweiligen Flächen gekoppelt. Damit ist es möglich, flächendeckend für Norddeutschland bestimmte Eigenschaften von Salzstrukturen abzurufen. Dem Nutzer wird es ermöglicht, Eigenschaften in Form von vorgefertigten Klassifikationen im System darzustellen. Die im Informationssystem bereitgestellten Daten umfassen relevante strukturelle Informationen zu den Salzstrukturen Norddeutschlands und dem deutschen Nordseesektor.

In Tabelle 2-2 sind die integrierten Layer und ihre jeweiligen, in der Legende vorgefertigten Klassifikationen kurz dargestellt. Neben der vorgefertigten Darstellung als fertige Layer wird dem Nutzer zusätzlich über eine Fachdatensuche die Möglichkeit gegeben, nach individuellen, für ihn interessanten Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen zu filtern und sich die Ergebnisse grafisch aufbereitet, anzeigen zu lassen. Dem Nutzer stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, Strecken zu vermessen, Kartenausschnitte zu drucken oder räumliche Lesezeichen zu setzen (Abbildung 2-15).

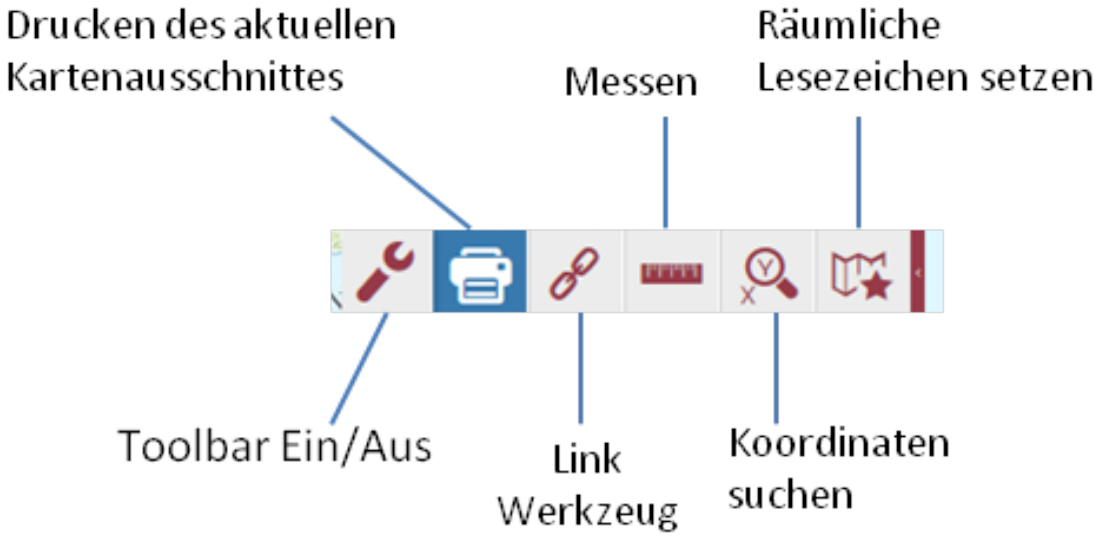
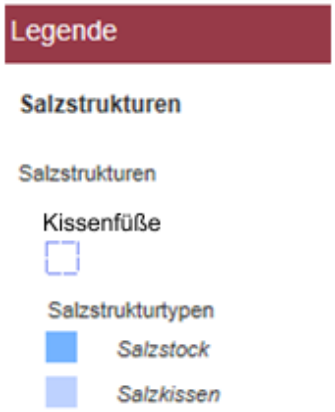
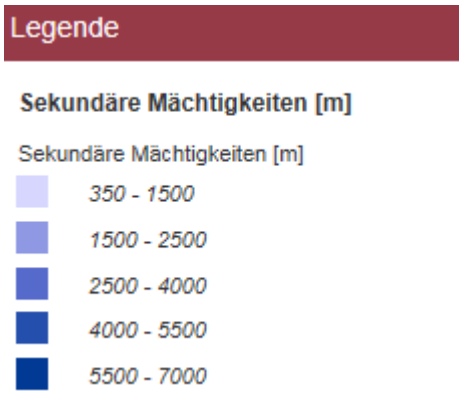
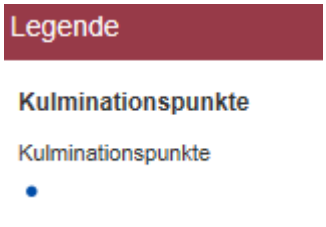


Abbildung 2-15: „Toolbar“ des Informationssystems mit den entsprechenden Werkzeugen

Tabelle 2-2: Inhalte des Informationssystem „Salzstrukturen“, mit den einzelnen Layern und der jeweils zugehörigen Legende

Layer	Klassifikation
Salzstrukturen	
Interne Nutzungsarten (Erläuterung siehe Kapitel 3.2.3)	
Erkundungsgrad (Erläuterung siehe Kapitel 3.2.2)	

Layer	Klassifikation
Internbautyp (Erläuterung siehe Kapitel 3.3)	
Strukturaufbauende/s Salinar/e	
Sekundäre Mächtigkeiten	
Kulminationspunkte (Lage)	

Layer	Klassifikation
Tiefenlagen auf unterschiedlichen Layern (bezogen auf NN oder auf Geländeoberkante (GOK), Teufe Top Caprock)	
Salzstrukturumrisse (aus den in Kapitel 2.2 näher beschriebenen Niveauschnittkarten)	

Die Legende des Informationssystems baut sich anhand der gewählten Themen (Layer) dynamisch auf. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die Eigenschaften, wie Teufen und Mächtigkeiten, auf die maximale Ausdehnung der Salzstruktur verallgemeinert, auch wenn es sich im eigentlichen Sinne um Punktinformationen handelt. Zu beachten bleibt, dass bei dieser Art der Darstellung mit größeren Abweichungen über die Fläche der Salzstrukturen zu rechnen ist, Teile somit tiefer liegen können als abgebildet. Zur Erstellung aller Flächenpolygone war es bei zusammenhängenden Strukturen notwendig, diese auseinanderzuschneiden, um die verschiedenen Eigenschaften darstellen zu können. Um zerschnittene Strukturen zu kennzeichnen, wurde bewusst mit geraden Schnittlinearen gearbeitet, d. h. nicht, dass die Eigenschaften über die gesamte Fläche als einheitlich angenommen werden können. Die einzelnen Layer können nach jeweiligem Interesse ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Die Darstellung der Salzstrukturumrisse wurde basierend auf der Salzstrukturkarte von Reinhold et al. (2008) erstellt, die durch Auswertung regionaler Berichte und Strukturbeschreibungen in Teilen überarbeitet wurde. So wurden sowohl Salzstrukturen hinzugefügt als auch entfernt (Kapitel 3.2.1; Anhang 3-7). Die im Rahmen des Verbundvorhabens erarbeiteten Niveauschnittkarten dienen als Datenquelle für die Strukturumrisse in den verschiedenen Teufen. Dabei ist im Nordwesten Deutschlands eine Unterscheidung zwischen Rotliegend- und Zechsteinsalinar nicht möglich, da die Verbreitung von Oberrotliegendsalinar innerhalb der Strukturen nicht flächendeckend bekannt ist.

Der Layer „Kulminationspunkte“ enthält die aus Berichten und Kartenwerken zusammengetragenen höchsten Punkte der einzelnen Salinarstrukturen und gibt damit die Lage der Hochpunkte wieder. Die entsprechende Tiefe wird bezogen auf Meter unter Normalnull (m u. NN) im Layer „Tiefenlage: Top Teufe [m u. NN]“ als Flächenfüllung der Polygone des Maximalumrisses dargestellt. Ebenso wird der Layer „Tiefenlage: Top Teufe [m u. GOK]“ zur Verfügung gestellt, der die Tiefenlage der Salzstruktur in Metern unter Geländeoberkante (m u. GOK), d. h. die Tiefe unter Einbeziehung der Topografie, abbildet. Beide Werte sind auch im Steckbrief (Datenblatt) jeder Salzstruktur vermerkt (Anhang 2-5). Im System sind für alle Salzstrukturen Norddeutschlands und des deutschen Nordseeraumes Datenblätter hinterlegt, die dem Nutzer weitere Beschreibungen sowie weiterführende Literatur zur Verfügung stellen. Diese erreicht man, indem man im Layer Salzstrukturen auf die einzelnen Flächen klickt. Insgesamt wurden 697 Datenblätter zusammengestellt.

Das Informationssystem wurde als WebMap-Service (WMS) umgesetzt und ermöglicht dem Nutzer, die für ihn interessanten Daten zusammenzustellen. Es wird dem Nutzer ermöglicht, bei Bedarf mit Transparenz zu arbeiten, um verschiedene Themen zu überlagern. Die Reihenfolge der einzelnen Layer folgt dabei rein darstellungstechnischen Fragestellungen. So liegen die Kulminationspunkte als Oberstes, da diese sonst permanent durch andere Themen überlagert werden würden. Der Darstellungsmaßstab ist begrenzt auf 1:300.000, da der Bearbeitungsmaßstab des Systems nicht für Einzelstrukturuntersuchungen geeignet ist.

Bei der Erstellung des Informationssystems wurde auf die Konformität der Datensätze mit der INSPIRE-Richtlinie („Infrastructure for Spatial Information in Europe“) geachtet, sodass die Daten auch in Zukunft kompatibel und austauschfähig bleiben. Das Informationssystem ist nach Abschluss der Arbeiten unter folgendem Link erreichbar: http://geoviewer.bgr.de.

3 AP 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung

Koordinatorin: Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Bearbeiter: Dipl.-Geow. Lukas Pollok, Markus Hölzner M.Eng, Dipl.-Geogr. Stephanie Fleig

Im zweiten Arbeitspaket der BGR lag der Fokus in der Schaffung notwendiger geologischer Grundlagen für eine Potentialabschätzung norddeutscher Salzstrukturen hinsichtlich der Speicherung von Druckluft und Wasserstoff in Salzkavernen. Daraus resultierten für das Arbeitspaket 2 (AP 2) fünf Teilarbeitspakete, die sich in folgende drei Arbeitsschwerpunkte zusammenfassen lassen:

1. Zusammenstellung, Sichtung, Aufarbeitung und Datenbank-gestützte Erfassung von Salzstrukturmerkmalen (AP 2.1 - 2.2),
2. Charakterisierung der Salzstrukturen anhand eines Kriterienkataloges (AP 2.3),
3. 3D-Modellierung und Prognosemöglichkeiten zum Internbau von Salzstrukturen (AP 2.4 - 2.5).

Diese Aufgaben wurden im Wesentlichen in chronologischer Reihenfolge abgearbeitet und werden in den nächsten Kapiteln im Einzelnen erläutert. Als Endergebnis dieses Arbeitspakets werden Steckbriefe zu jeder norddeutschen Salzstruktur bereitgestellt, die in das öffentliche Informationssystem (Kapitel 2.4) integriert sind und alle relevanten Informationen für eine potentielle Nutzung als Kavernenstandort enthalten.

3.1 Zusammenstellung und Sichtung von Salzstruktur-Beschreibungen

Für die Evaluierung norddeutscher Salzstrukturen bezüglich ihrer potentiellen Eignung für den Kavernenbau mangelte es bislang an flächendeckenden, einheitlich ausgewerteten strukturgeologischen Grundlagen. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Arbeitspakets bestand also darin, alle verfügbaren Informationen zu Salzstrukturen zusammenzutragen und zu sichten. Dabei galt es, systematisch einen konsistenten Datensatz zu erarbeiten, in dem die für die potentielle Nutzung als Kavernenstandort relevanten Informationen zu jeder Salinarstruktur enthalten sind. Für diesen Zweck wurde eine Datenerfassungsstruktur entwickelt, in der zunächst die zwingend notwendigen Strukturinformationen (Mindestanforderungen) definiert wurden. Sie umfassen neben allgemeinen Informationen, wie z. B. den Strukturnamen und die geografische Lage, auch geologische

Daten, beispielsweise den Strukturtyp, die akkumulierte Salzmächtigkeit und das strukturaufbauende Salinar. In Abbildung 3-1 sind am Beispiel eines Diapirs schematisch typische Merkmale einer Salzstruktur dargestellt, die in der Datenbank systematisch erfasst wurden.

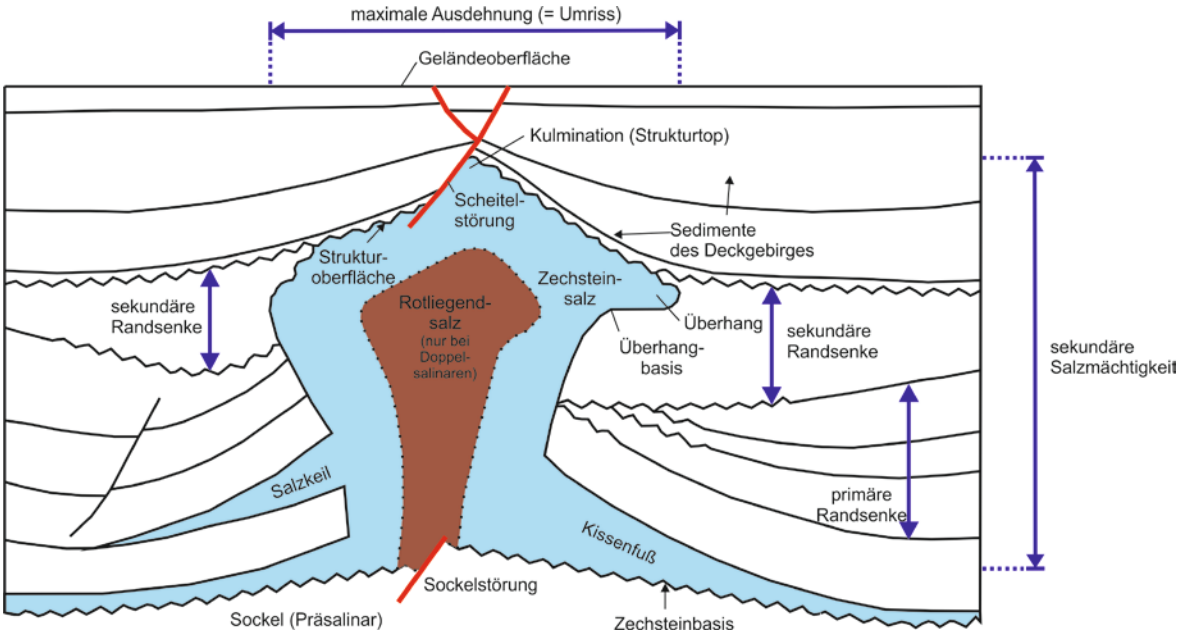


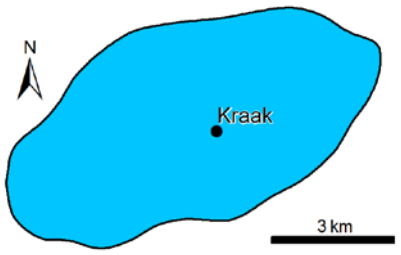
Abbildung 3-1: Typische Merkmale von Salzstrukturen (Kockel 1995, verändert)

Darüber hinaus wurden Informationen über konkurrierende Nutzungen und den Erkundungsgrad festgehalten, um die Salinarstrukturen im Hinblick auf die wirtschaftliche Nutzbarkeit bewerten zu können. Eine Auflistung der erforderlichen Daten ist der Tabelle 3-1 zu entnehmen.

Neben diesen notwendigen Informationen wurden, sofern vorhanden, weitere Strukturmerkmale zusammengestellt, die für die Charakterisierung (Kapitel 3.2) und 3D-Modellierung (Kapitel 3.3) unterschiedlicher Salzstrukturen von Bedeutung sind. Dazu zählten Angaben zur Genese, zur regionaltektonischen Beckenposition, zur äußeren Form und zum Internbau in jedweder Form.

Tabelle 3-1: Erforderliche Informationen anhand einer Beispiel-Salzstruktur

Allgemeine Informationen	
Strukturname	Kraak
Bundesland	Mecklenburg-Vorpommern
Festlandanteil [%]	100

Allgemeine Informationen	
Topografische Höhe über Kulmination [m u. NN]	32,5
Strukturbeschreibung	
Strukturtyp	Salzstock
Strukturtop [m u. NN]	249
Strukturaufbauendes Salinar	Zechstein
Sekundäre Mächtigkeit [m]	4.500
Maximalerstreckung [km] (Länge x Breite)	7 x 4,5
Konkurrierende Nutzung	
Bekannte Nutzung innerhalb der Struktur	Kavernenstandort (in Betrieb)
Erkundungsgrad	
Seismik	Mehrere 2D-Profile
Bohrungen	Bis in das Salinar
Bergbau	-
Geometrische Informationen	
Salzstruktur-Koordinaten (ESRI Punkt-Shape der Kulmination)	
Maximale Salzstrukturausdehnung (ESRI Flächen-Shape der Salzstruktur)	

3.1.1 Datengrundlage

Die Zusammenstellung der geologischen Daten erfolgte anhand der Kartengrundlage „Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000“ (Reinhold et al. 2008). Die Salzstrukturkarte liefert eine sehr gute übersichtsmäßige Darstellung der Verbreitung norddeutscher Salzstrukturen, differenziert nach der Stratigrafie ihrer strukturbildenden Salinare (Abbildung 3-2). Weiterhin lässt sich aus dieser Karte der jeweilige Strukturtyp bestimmen. Es wird zwischen Salzkissen, Salzstöcken und Salzintrusionen unterschieden.

Trotz dieser guten Grundlage mussten viele der für diese Studie wichtigen Strukturparameter (Tabelle 3-1) aus anderen Quellen erhoben werden, da sie nicht Bestandteil der Karte sind. Darüber hinaus lässt die Kartenansicht nur eine Darstellung der jeweilen Maximalumrisse einer Salzstruktur zu, die für eine Potentialanalyse unbrauchbar sind, da es sich um Strukturausdehnungen mit unterschiedlichen Tiefenpositionen handelt. Sie lassen sich somit nicht als Planungsgrundlage für Speicherkavernen nutzen, wodurch die

Notwendigkeit einer zusätzlichen Datenakquise für diese Studie unterstrichen wird. Des Weiteren sind genaue Angaben zur vertikalen und lateralen Ausdehnung jeder einzelnen Salzstruktur für die Erstellung der Niveauschnittkarten (Kapitel 2.2) wichtig, speziell für die Darstellung der Salzstrukturausbisse darin. Sie sind maßgebend für eine Abschätzung des nutzbaren Bereichs, wovon die Anzahl der zu ggf. errichtenden Kavernen und somit das gesamte Speicherpotential abhängig sind. Zur Veranschaulichung dieser Problematik soll eine Salzstruktur dienen, die in ihrer Ausdehnung mit zunehmender Tiefe stark variiert (Abbildung 3-3).

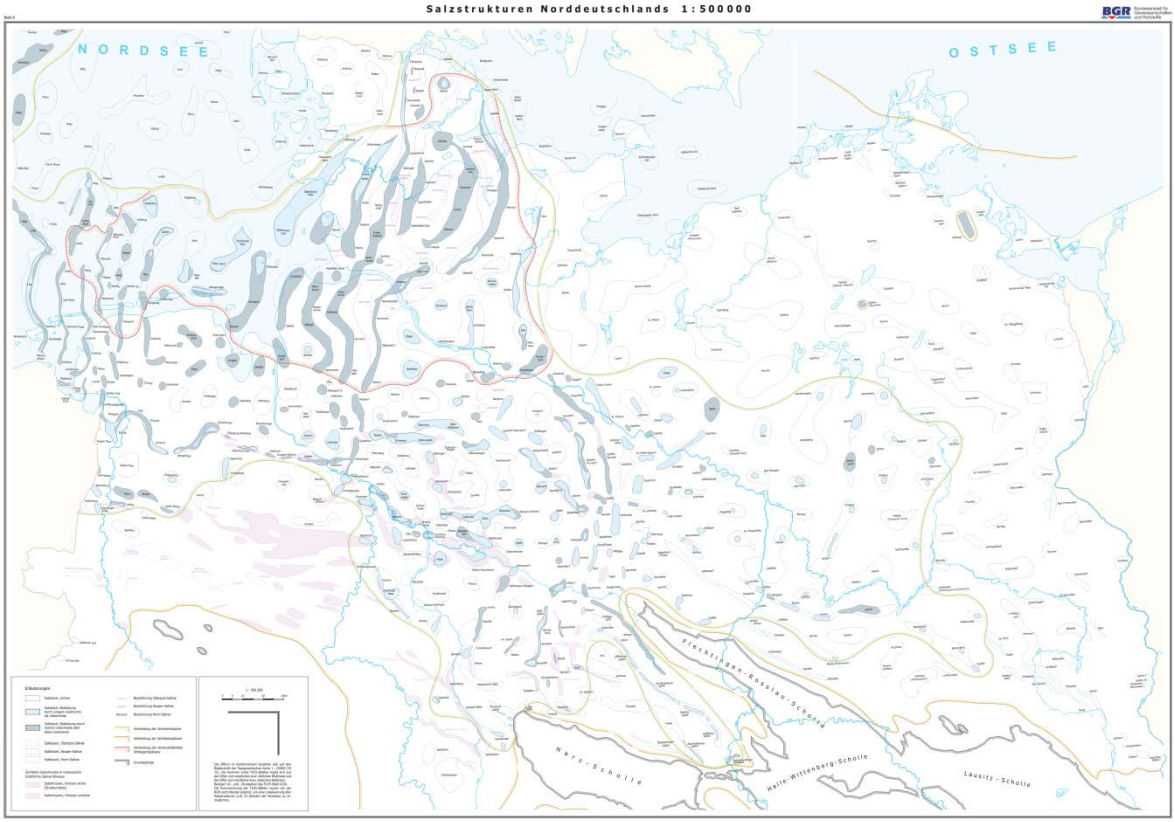


Abbildung 3-2: Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000
(Reinhold et al. 2008) als Datengrundlage

Die Datenakquise basierte primär auf überregionalen Salzstrukturstudien. Dazu zählen Arbeiten zur Bewertung von Salzstrukturen für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (Krull 1991; Kockel & Krull 1995) sowie für eine potentielle Anlage von Kavernen (Hessmann 1974, 1975; Baldschuhn et al. 1979a, b). Für den nordwest-deutschen Raum erwiesen sich zudem der Geotektonische Atlas (Baldschuhn et al. 2001) und darauf aufbauende Studien (Baldschuhn & Kockel 1998a; Kockel 1998, 1999; Frisch & Kockel 2004) als umfangreiche Datenquellen.

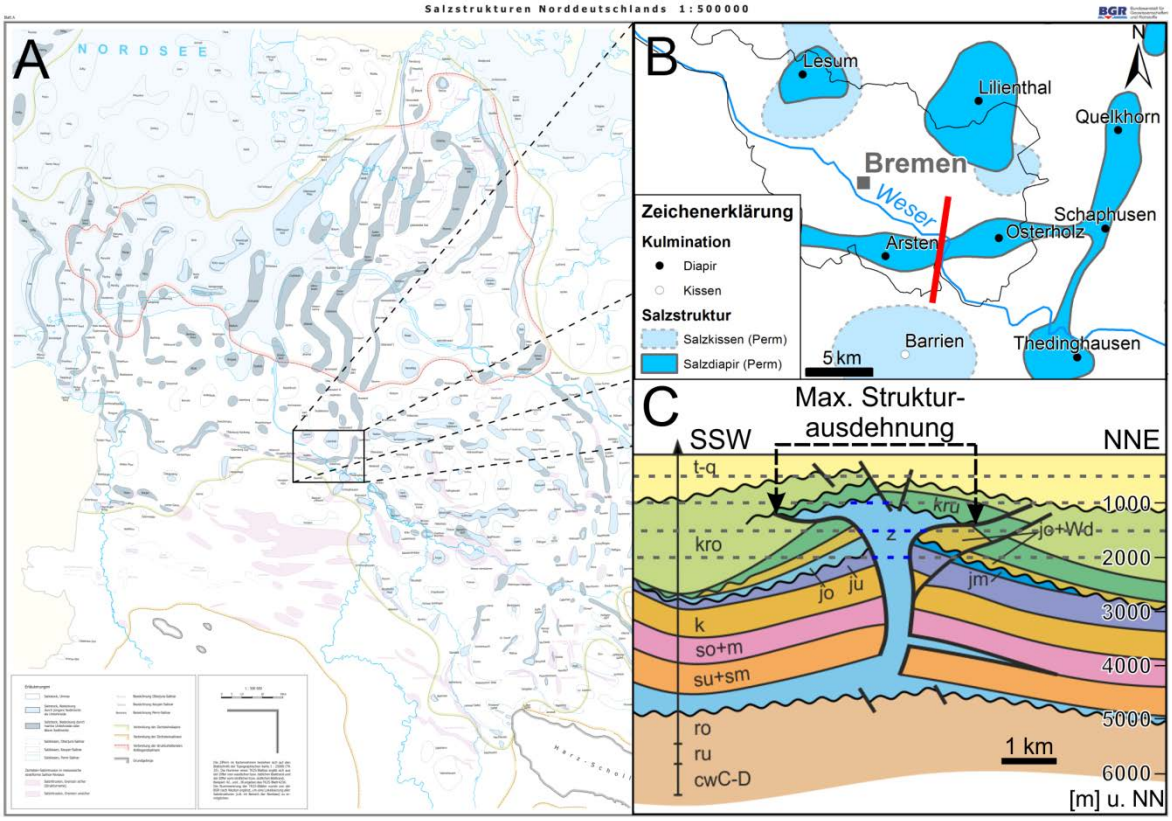


Abbildung 3-3: Maximalausdehnungen der Salzstrukturen in der Kartengrundlage von Reinhold et al. (2008)
A: Lage der untersuchten Salzstruktur. B: Lage des Profilschnitts (rot) durch die Salzstruktur. C: Der Profilschnitt zeigt, wie stark die Ausdehnung einer Salzstruktur in Abhängigkeit von der Tiefe variieren kann und wie ihre maximale Erstreckung in die Kartenansicht projiziert wird. Die gestrichelten Linien deuten die vier Niveauschnitte (grau) und die daraus hervorgehenden Salzstrukturausbisse (blau) an (Baldschuhn et al. 2001, verändert).

Dem Geotektonischen Atlas von Baldschuhn et al. (2001) liegen wiederum zahlreiche unveröffentlichte Einzelberichte im Maßstab 1:100.000 zugrunde (z. B. Frisch 1990), die im BGR-Archiv vollständig gesichtet werden konnten. Eine Auflistung der verwendeten Berichte ist im Literaturverzeichnis dokumentiert. Sowohl in den Einzelberichten als auch im Gesamtwerk sind eine Vielzahl von Strukturplänen, Strukturentwicklungskarten, paläogeografischen Karten, sowie Profilschnitten und Salzstrukturbeschreibungen für nahezu alle Salzstrukturen im nordwestdeutschen Raum und im deutschen Nordseesektor enthalten (Abbildung 3-4). Daneben liefert eine Übersicht des Sockelstörungsmusters wichtige Erkenntnisse zur Strukturierung des Norddeutschen Beckens. Kombiniert mit den Randsenkenanalysen von Jaritz (1973) ergeben sich wichtige Hinweise zu den Bewegungsmustern norddeutscher Salzstrukturen.

Die genannten Studien lieferten auch Informationen zu geplanten oder bestehenden Nutzungskonkurrenzen in den Salzstrukturen. Hierbei wurden ausschließlich Informa-

tionen zur untertätigen Nutzung des Salzkörpers erhoben, die der Anlage eines Kavernenspeichers entgegenstehen bzw. eine Interessenabwägung erforderlich machen. Dazu zählen bereits vorhandene oder geplante Kavernenfelder, stillgelegte oder fördernde Bergbau- und Solbetriebe, sowie Endlagerstandorte. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die entnommenen und z. T. über 30 Jahre alten Daten ggf. nicht mehr auf dem neuesten Stand sind. Damit sind v. a. Bergwerks- und Solbetriebe gemeint, deren Umfänge und Zustände nicht flächendeckend mit neueren Daten zu überprüfen waren. In Bundesländern, wo diese Daten über öffentlich zugängliche Geoinformationssysteme stetig aktuell gehalten werden, konnten die Nutzungskonkurrenzen aktualisiert werden.

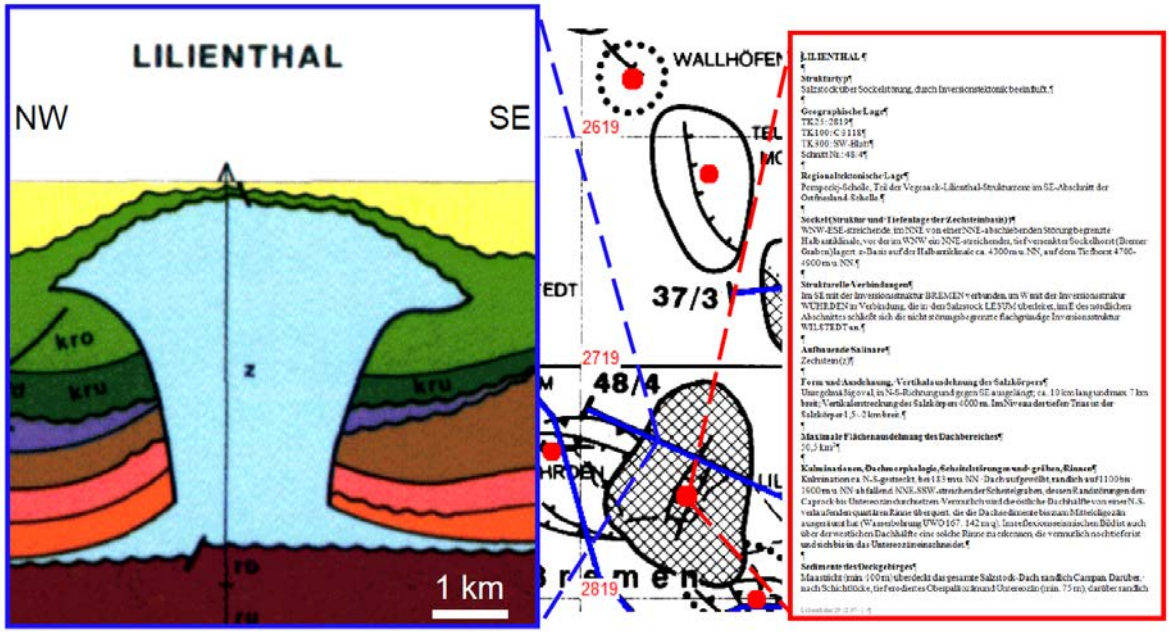


Abbildung 3-4: Salzstrukturinformationen aus dem Geotektonischen Atlas
Blau: Profilschnitte, rot: Strukturbeschreibungen (Baldschuhn et al. 2001, verändert).

Ein gutes Beispiel dafür ist der NIBIS-Kartenserver des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), in dem solche Daten der Bundesländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen als „Bergbau beeinflusste Standorte“ integriert sind, wenn auch ein Vergleich mit den aktuellen Ausbauständen einzelner Kavernenfelder (z. B. Sedlacek 2014) aufzeigt, dass auch hier die Datenlage nicht durchgehend aktuell ist. Schwieriger gestaltete sich die Recherche in den neuen Bundesländern. Dort konnte zumeist nur der gegenwärtige Status (in Betrieb, stillgelegt, Reserve) des jeweiligen Bergwerks eruiert werden. Welche Fläche dadurch innerhalb einer Salzstruktur belegt ist, war meistens nur aus veralteten Risswerken abschätzbar. Für die deutschen Untergrund-

speicher lagen hingegen aktuelle Daten von Sedlacek (2014) vor, die den jeweiligen norddeutschen Salzstrukturen zugeordnet worden sind. Daten zu etwaigen Nutzungen im Deck- und Nebengebirge (z. B. Erdgasfelder) oder an der Oberfläche (Natur- & Wasserschutz, militärische Sperrgebiete und Siedlungsflächen) wurden in diesem Arbeitspaket nicht erhoben oder ausgewertet. Gleichwohl sind aktuelle Konzessionsgebiete und ausgewiesene Schutzgebiete im Falle eines geplanten Speicherprojektes immer bei den zuständigen Staatlichen Geologischen Diensten der Länder einzuholen.

Weiterhin wurden für die Sammlung strukturgeologischer Informationen sowohl beckenweite (Peryt et al. 2010) als auch bundeslandspezifische Kartenwerke verwendet (Reinhardt 1960-1991; Hänig et al. 1997; Beer 2000; Stackebrandt et al. 2010). Mit ihnen wurden im Wesentlichen die lateralen und vertikalen Ausdehnungen der Salzstrukturen auf Plausibilität und Konsistenz überprüft. Aber auch neuere Daten in Form von konsistenten geologischen 3D-Untergrundmodellen der deutschen Nordsee (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013, Abbildung 3-5) und Brandenburgs (Geologisches 3D-Untergrundmodell Brandenburg 2014) konnten genutzt werden und lieferten z. T. erhebliche Erkenntnisgewinne bei der Erfassung von Salzstrukturmerkmalen.

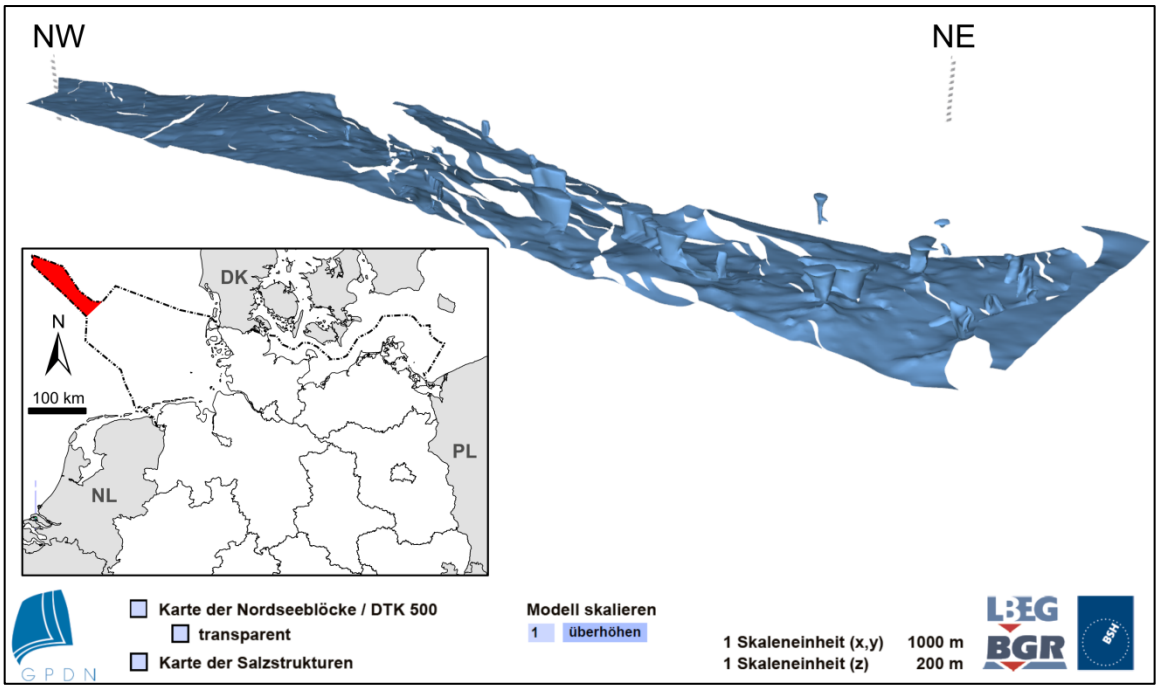


Abbildung 3-5: Zechsteinoberfläche als dreidimensionale Darstellung im „Entenschnabel“ des deutschen Nordseesektors
Deutlich erkennbar sind die mächtigen Salinarstrukturen im zentralen und südöstlichen Teil (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013, verändert).

Nur in Einzelfällen reichten die genannten Quellen nicht aus, um die Datenkonsistenz für die erforderlichen Strukturinformationen (Tabelle 3-1) zu gewährleisten, sodass noch weitere Publikationen herangezogen werden mussten (z. B. Best & Zirngast 2002; Franke 2014). Damit der Datenursprung nachvollziehbar bleibt, sind die vollständigen Quellenverweise zu jeder einzelnen Salzstruktur in den jeweiligen Strukturinformationsdatenblättern (Anhang 2-5) des Informationssystems hinterlegt.

Um potentiell geeignete Salzstrukturen hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Nutzbarkeit bewerten zu können (Kapitel 3.3.3), mussten neben der Erfassung allgemeiner und strukturgeologischer Merkmale, auch Unterlagen zum inneren Aufbau studiert werden. Für diesen Zweck wurden Strukturen untersucht, die bergmännisch oder durch Standorterkundungen für Kavernenspeicher bzw. Endlager erschlossen sind (z. B. Klarr et al. 1987; Günnewig et al. 2001; Köthe et al. 2007; Bornemann et al. 2008; Friedel et al. 2013). Hier sind insbesondere die Salzstrukturen aus den Kali- und Salzbergbauregionen um Hannover, im nördlichen Harzvorland und in Mitteldeutschland zu nennen, zu denen umfangreiche Kenntnisse zum inneren Aufbau vorliegen (z. B. Schmidt 1929; Ahlborn & Richter-Bernburg 1953; Roth 1953; Löffler 1962; Jordan 1969; De Boer 1971; Bauer et al. 1972; Seidl 1973; Richter-Bernburg 1980; Lepper et al. 1984; Richter-Bernburg 1987; Schachl 1987; Baldschuhn & Kockel 1998a; von Struensee 2000; Hoppe & Seebo 2003; Engelmann et al. 2004).

Zusammen mit den neu gewonnenen Erkenntnissen zur Salztektonik aus den letzten Jahrzehnten (z. B. Koyi & Petersen 1993; Jackson & Vendeville 1994; Jaritz 1995; Kockel 1999; Vendeville 2002; Frisch & Kockel 2004; Hudec & Jackson 2007; Scheck-Wenderoth et al. 2008, Pollok et al. 2016), die z. T. zu abweichenden Vorstellungen zur äußeren Form bei verschiedenen Salzstrukturen führten, ermöglicht dieses umfangreiche Datenmaterial eine Neubewertung norddeutscher Salzstrukturen hinsichtlich ihres Speicherpotentials.

3.1.2 Datenverarbeitung

3.1.2.1 Metadaten

Alle benötigten Salzstrukturmerkmale wurden zunächst in tabellarischer Form (Excel) in zuvor definierten Kategorien erfasst (Abbildung 3-6). Grundsätzlich wurden Strukturen in den Datenbestand aufgenommen, denen eindeutig „Salzkissen“- oder „Salzstock“-Geometrien auf der Salzkarte von Reinhold et al. (2008) zugewiesen werden konnten. Die Salzstrukturbenennung wurde nahezu vollständig aus dieser Kartengrundlage übernommen. Dies gilt auch für Salzstrukturen, denen während der Datenerfassung mehrere Namenssynonyme zugeordnet werden konnten. Nur in Bereichen, in denen neuere Erkundungsdaten vorliegen, wie z. B. im Entenschnabel der deutschen Nordsee, mussten

Anpassungen vorgenommen werden. Neu identifizierte Strukturen wurden in Absprache mit dem AP 1 in den Datenbestand aufgenommen (Anhang 3-7). Strukturnamen, Salzstrukturmerkmale und geometrische Daten (Kapitel 3.1.2.2) wurden aus der Literatur bzw. aus dem 3D-Modell (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013) übernommen.

Das verwendete Datenmaterial, auf das sich diese Studie stützt, ist von sehr unterschiedlicher Qualität und Dichte. Für einen konsistenten Datensatz und eine spätere Eingabe, Abfrage und Filterung in einer Datenbank (Kapitel 3.1.3), war es nötig die gesammelten heterogenen Metadaten zu harmonisieren und zu typisieren (Abbildung 3-6). Bedingt durch die unterschiedlichen Quellen (Berichte, Karten, geologische Profilschnitte, Bohrungen, Seismik), galt es neben unterschiedlichen Bezugsniveaus (m u. NN / m u. GOK), v. a. geologische Begrifflichkeiten zu vereinheitlichen. In der Kategorie Strukturbeschreibung wurden z. B., auf Grund der großen Formenvielfalt von Salzstrukturen, die in der Literatur z. T. willkürlich verwendeten Begriffe wie Salzdom, Salzpilz, Salztropfen, Spaltendiapir, Salzdurchbruch und Salzaufbruch alle unter dem Begriff Salzstock (Salzdiapir) zusammengefasst.

Bei der Einteilung von Salzstrukturtypen wurde sich also im Wesentlichen auf eine genetische Unterscheidung von Salzstöcken und Salzkissen beschränkt, je nachdem ob die mobilisierten Salze einer Salzstruktur das Deckgebirge diskordant durchbrochen haben oder nicht. Optional konnten diesen beiden Strukturtypen noch weitere morphologische Merkmale („Ausprägungen“) zugeordnet werden (Abbildung 3-7). Verfügt ein Salzstock z. B. über eine erhebliche Längserstreckung oder sind mehrere Salzstöcke entlang einer Störungszone zusammenhängend durchgebrochen, so spricht man sie auch als Salzmauer oder Teile dieser an. Als wesentlicher Bestandteil der Datenverarbeitung mussten diese zusammenhängenden Salzstrukturen, die in der Literatur häufig als gemeinsame Strukturzüge beschrieben worden sind, getrennt werden. Dabei mussten eigenständige Aufstiegsbereiche (Kulminationen), also Salzstöcke innerhalb dieser Salzmauern identifiziert und deren Attribute (z. B. laterale Ausdehnung) durch die Aufteilung in Einzelstrukturen angepasst und ergänzt werden.

Neben Salzkissen und Salzstöcken sind auf der Salzkarte von Reinhold et al. (2008) auch Zechsteinintrusionen („Salzkeile“) verzeichnet (z. B. Lehre, Salzbergen, Werla-Burgdorf). Dabei handelt es sich um hochkomplexe Strukturen, in denen das Zechsteinsalz vorzugsweise schichtparallel in triassische Salinarhorizonte eingepresst wird, die im Röt, Mittleren Muschelkalk und Mittleren Keuper vorkommen. Durch diese Intrusionen schwillt die Mächtigkeit des jeweiligen mesozoischen Salinarhorizontes an und der darüber lagernde Schichtenstapel wird aufgewölbt, wodurch es zur Entwicklung von Halbkissen-Strukturen (Halbantiklinalen, Monoklinalen) kommt. Vorrangig findet man diese Strukturen in den Falten- und Überschiebungsgürteln am südlichen und nördlichen Rand des Niedersächsischen Beckens, wo das Zechsteinsalz entweder passiv als Abscher- bzw.

Gleithorizont agiert oder in die Scherbahnen intrudiert ist (z. B. Frisch & Kockel 2004). Auf Grund ihrer strukturgeologischen Komplexität, den zumeist nur geringen Salzmächtigkeiten und unzureichenden Kenntnissen bezüglich ihres inneren Aufbaus, werden sie in dieser Studie nicht betrachtet.

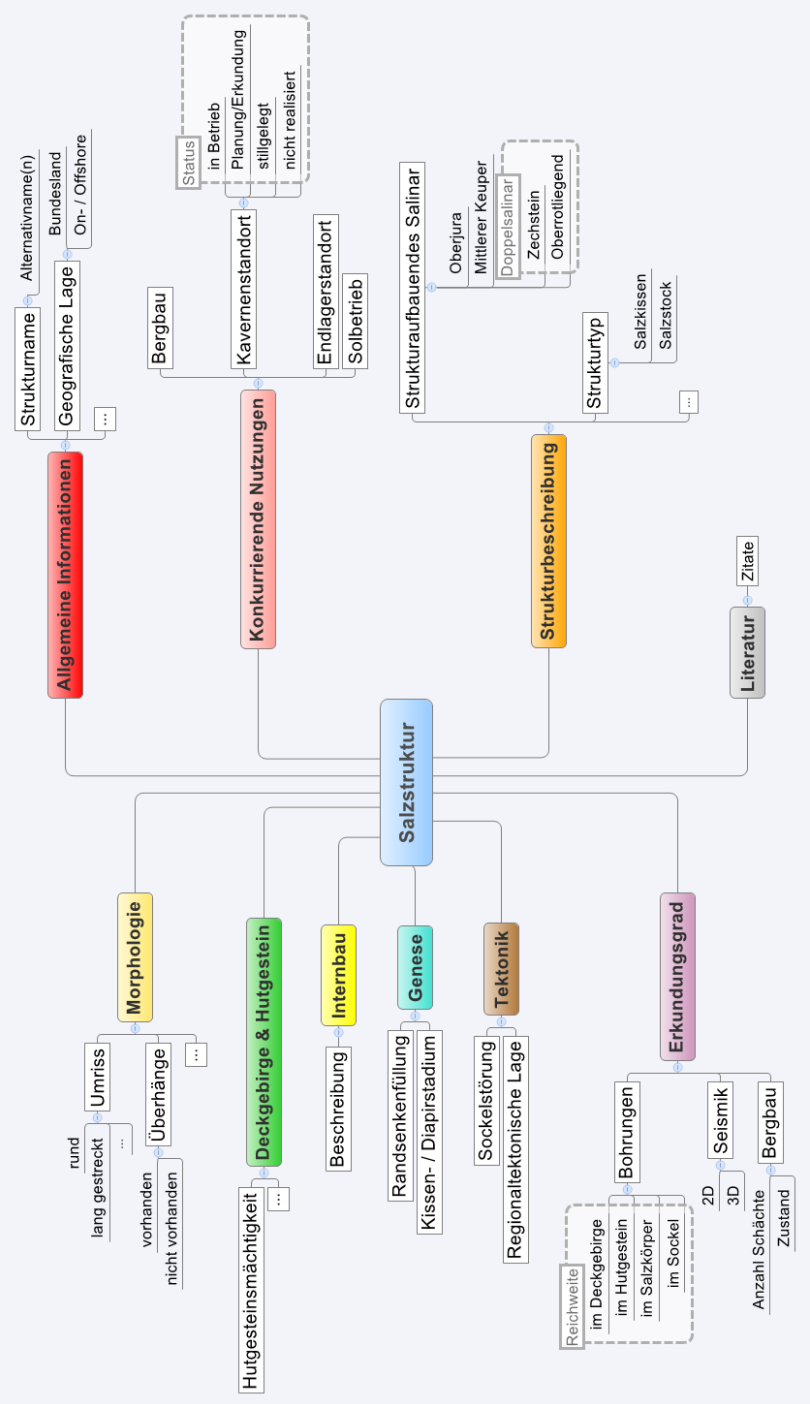


Abbildung 3-6: Datenverarbeitungsschema für Salzstrukturmerkmale

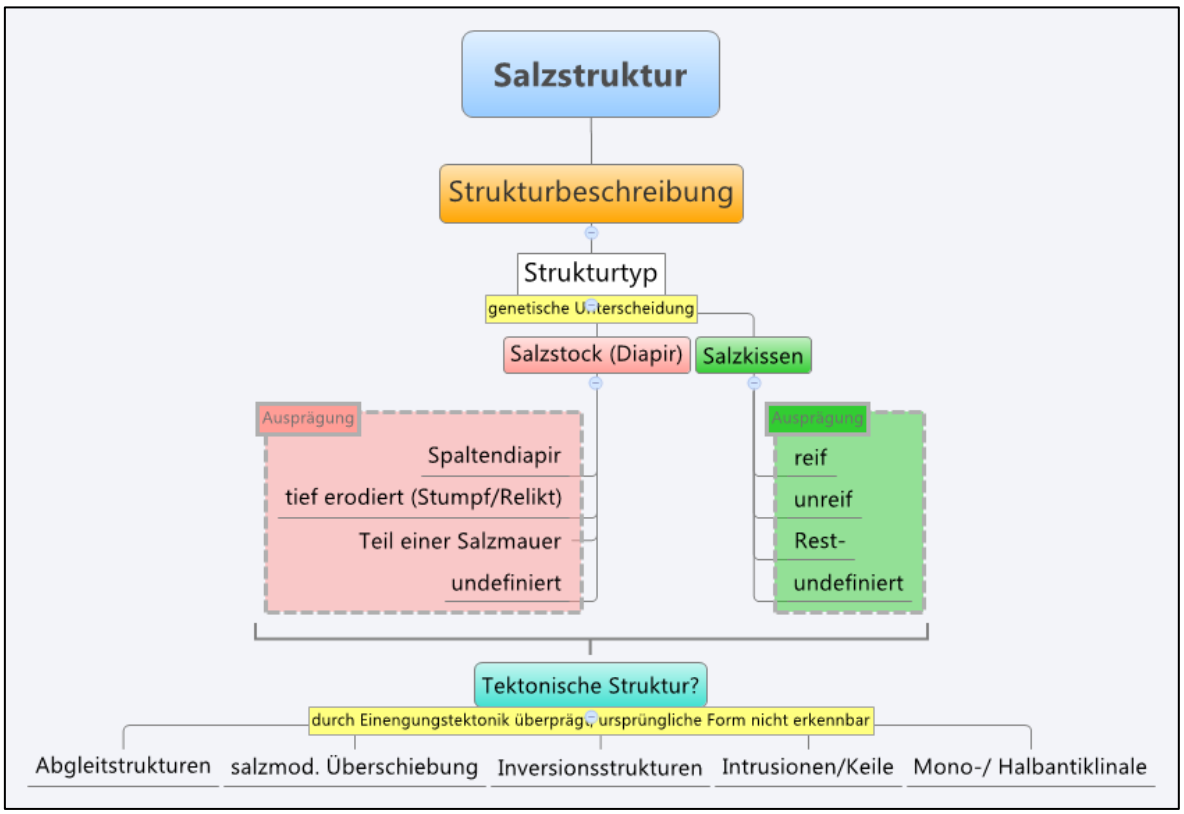


Abbildung 3-7: Genetische Unterscheidung der Salzstrukturtypen nach Salzstöcken und Salzkissen
mit der Möglichkeit zusätzliche morphologische Merkmale („Ausprägungen“) anzugeben.

Salzintrusionen können aber auch an den Flanken von Salzkissen (z. B. Oppershausen, Ahrensheide) oder Diapiren (z. B. Asse, Thiede, Leinetal) auftreten. In dieser Kombination werden sie sowohl auf der Salzkarte, als auch in ergänzender Literatur unter einem gemeinsamen Namen geführt. So wird beispielsweise die Struktur Ahrensheide als Inversionsstruktur mit unterlagerndem Salzkissen und die Struktur Scheeheide als tektonisch überprägtes Kissen angesprochen (Kockel 1981; Baldschuhn & Jürgens 1995; Baldschuhn et al. 2001). In beiden Beispielen wird der Strukturname also sowohl für ein Salzkissen als auch für eine Salzintrusion verwendet (Abbildung 3-8).

Um für diese besonderen Salzstrukturen nähere Informationen zur Morphologie und damit zu nutzbaren Bereichen zu erhalten, wurden daher grundsätzlich alle verfügbaren Strukturbeschreibungen geprüft. Eine eindeutige räumliche Trennung zwischen Salzstruktur und Salzintrusion war allerdings nicht immer möglich, da die Übergänge dieser beiden Strukturformen, durch die unterschiedliche Intensität von tektonischen Einflüssen während ihrer Genese, fließend sein können. Aus diesem Grund wurde für diese und weitere Strukturen (z. B. salzmodifizierte Überschiebungen, Abgleitstrukturen etc.) der Begriff „Tektonische Struktur“ eingeführt, unabhängig davon, ob sie als „Salzkissen“ oder

„Salzstock“ auf der Salzkarte gekennzeichnet ist (Abbildung 3-7). Dieses Merkmal zeichnet also Salinarstrukturen aus, deren Entwicklung im weitesten Sinne halotektonisch ablief oder tektonisch stark überprägt wurde, und weniger durch autonomen Salzaufstieg charakterisiert war. Dies betrifft v. a. Salinarstrukturen in Beckenbereichen, die im Einfluss oberkretazischer Einengungstektonik („Beckeninversion“) standen (z. B. Kockel 2002; Kossow & Krawczyk 2002; Otto 2003; Frisch & Kockel 2004; Kley et al. 2008). Im Kontrast dazu stehen die überwiegend halokinetisch, also durch Salzaufstiegsbewegungen gebildeten Salzkissen und Salzdiapire (Salzstöcke und Salzmauern) in nicht invertierten Beckenbereichen (Kapitel 2.1).

Salzstrukturmerkmale, die in Zahlenwerten angeben werden (Tabelle 3-1), mussten ebenfalls harmonisiert werden. Sowohl um Salzstrukturen zu einem späteren Zeitpunkt filtern und miteinander vergleichen zu können, als auch um Inkonsistenzen zu vermeiden, war es nicht möglich, numerische Werte in Intervallen (von/bis) anzugeben. Metadaten wie Ausdehnung (Länge x Breite) und sekundäre Salzmächtigkeit aus der Kategorie Strukturbeschreibung (Abbildung 3-6), wurden immer als Maximalwerte eingetragen und sind als solche auch in den Salzstruktur-Informationsblättern hinterlegt. Gleiches gilt für das Strukturtop, das nur den höchsten Punkt der Strukturoberfläche beschreibt. Dies gilt es im Besonderen bei Salzdiapiren mit stark gewölbten Oberflächen (Dächern) zu beachten, bei denen die Strukturoberfläche in Richtung der Flanken um mehrere Hundert Meter abfallen kann (Abbildung 3-9). Bei den numerischen Metadaten handelt es sich also um punktuelle Informationen, die nicht den Anspruch erheben, für die gesamte Strukturausdehnung repräsentativ zu sein. Da diese Werte die Basis für das Informationssystem bilden, gilt diese Regel auch für die in den Salzstruktur-Informationsblättern gehaltenen Informationen und noch viel mehr für die daraus generierten thematischen Übersichtskarten.

Im Verlauf des Verbundvorhabens wurde von den Verbundpartnern KBB UT und IGtH der Wunsch geäußert, die Strukturtops der Salzstrukturen neben Normalnull (m u. NN) auch auf die jeweilige Geländehöhe (m u. GOK) zu beziehen. Dieser Wert war sowohl für die gebirgsmechanischen Berechnungen (Kapitel 4) als auch für die Kalkulation von Modellkavernen und damit für die Potentialanalyse (Kapitel 6) zwingend erforderlich. Nachdem die Koordinaten der Salzstrukturen korrigiert wurden (Kapitel 3.1.2.2), konnten die Geländehöhen oberhalb einzelner Strukturkulminationen anhand von digitalen Höhenmodellen oder topografischen Karten ermittelt werden.

Alle weiteren erfassten Strukturmerkmale aus Abbildung 3-6 waren entweder eindeutig zu typisieren oder wurden als Klartext hinterlegt.

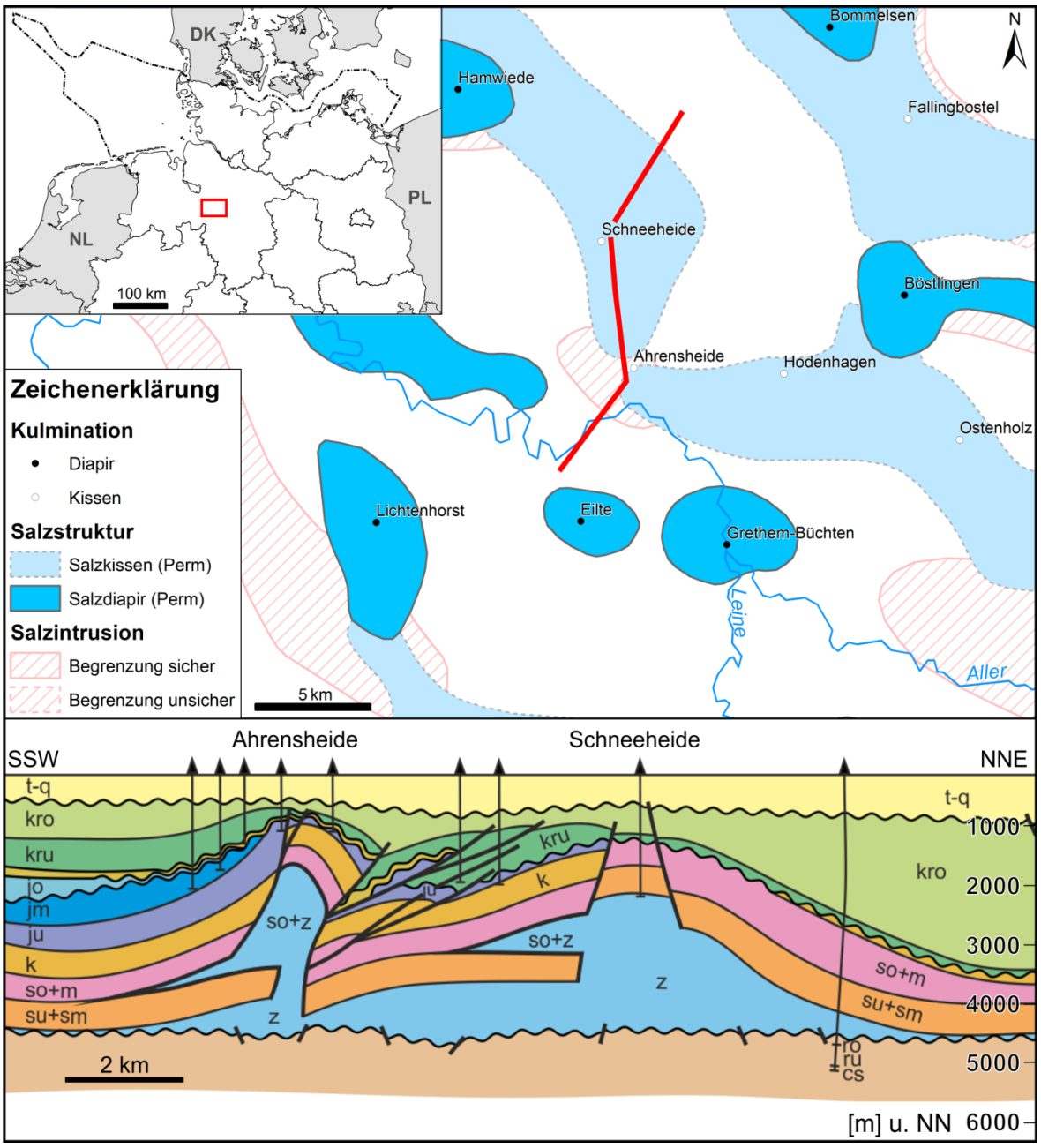


Abbildung 3-8: Profilschnitt (rote Linie) durch zwei Zechsteinsalzkissen, die in Verbindung zu Salzintrusionen (so+z) stehen
(Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2008, verändert)

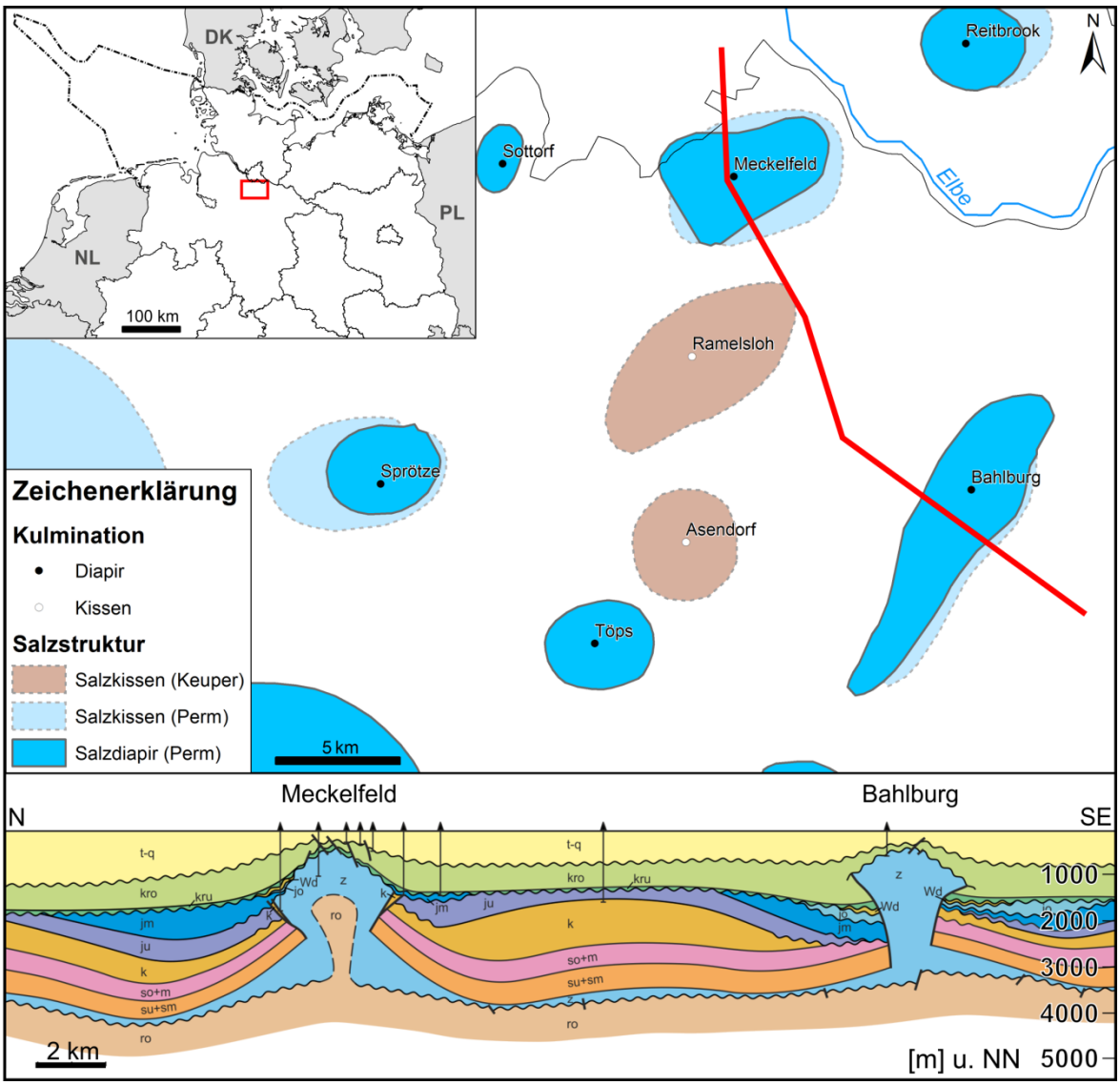


Abbildung 3-9: Profilschnitt (rote Linie) durch zwei Salzstöcke mit stark aufgewölbten Strukturoberflächen bzw. -dächern
Das Top der Struktur Meckelfeld liegt bei ca. 500 m u. NN, jedoch fällt das Dach in den flankennahen Randbereichen steil bis auf ca. 2.000 m u. NN ab (Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2008, verändert).

3.1.2.2 Geometriedaten

Die Bezeichnungen der Salzstrukturen (Punktkoordinaten) sind auf der Salzkarte von Reinhold et al. (2008) beliebig auf die jeweiligen Salzstock- bzw. Salzkissengeometrien gesetzt worden. Um jedoch Strukturnamen eindeutig Geometrien zuordnen und um die Strukturen lateral gegeneinander abgrenzen zu können, wurden die Strukturkoordinaten auf die jeweiligen Kulminationspunkte der Salzstrukturen gesetzt (Abbildung 3-10). Unter Kulmination versteht man dabei den obersten Teil einer Salzstrukturoberfläche inklusive

des Hutgesteins. Die Ortung dieser Kulminationen und zugleich die Korrektur der Strukturkoordinaten sowie eine Plausibilitätsprüfung der jeweiligen Salzstruktur-Metadaten (z. B. Tiefe des Strukturtops und sekundäre Mächtigkeit) erfolgte mit der Durchsicht von Strukturkarten (z. B. Reinhardt 1960-1991; Baldschuhn et al. 2001) und 3D-Modellen (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013; Geologisches 3D-Untergrundmodell Brandenburg 2014).

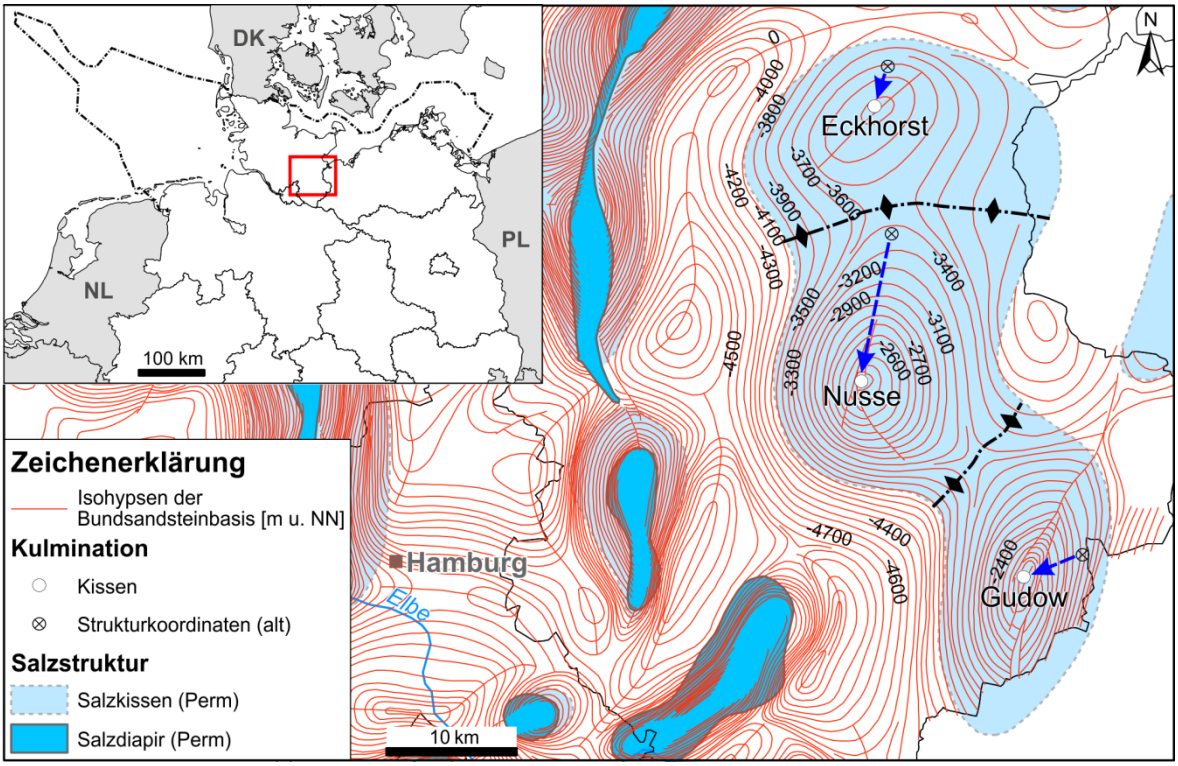


Abbildung 3-10: Korrektur der Punktkoordinaten (blaue Pfeile) dargestellt an den drei Salzkissen Eckhorst, Nusse und Gudow
Die Buntsandsteinbasis (rote Isohypsen) bildet oberhalb von Salzkissen die aufgewölbte Strukturoberfläche ab. Sie ermöglicht die Identifizierung einzelner Kulminationen und Depressionen (schwarze Muldenachsen) und damit eine laterale Abgrenzung der drei Salzkissen (Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2008, verändert).

Bei allen norddeutschen Salzkissen, die von Zechsteinsalzen aufgebaut werden, ist grundsätzlich die Basis des Buntsandsteins die Referenzfläche, da sie direkt im Hangenden der nicht durchbrochenen Salzstrukturen folgt und somit direkt ihre Aufwölbung anzeigt. Bei Salzdiapiren und Salzkissen, die aus anderen Salzen bestehen, musste für die Koordinatenkorrektur jeweils die Schicht(-basis) gewählt werden, die als erstes vollständig das Strukturdach bedeckt. Bei zahlreichen älteren Salzstöcken eignete sich dazu beispielsweise die Unterkreidebasis (Abbildung 3-11). Liegt der Diapir an oder nahe der Erdoberfläche und besitzt nur geringmächtige Decksedimente, so wurde seine Punkt-

koordinate ins Zentrum des jüngsten Schichtausbisses (meist die Quartärbasis) gelegt. Bei Salzdiapiren mit mehreren Kulminationen wurde der namensgebende Strukturpunkt auf die höchste von ihnen gesetzt.

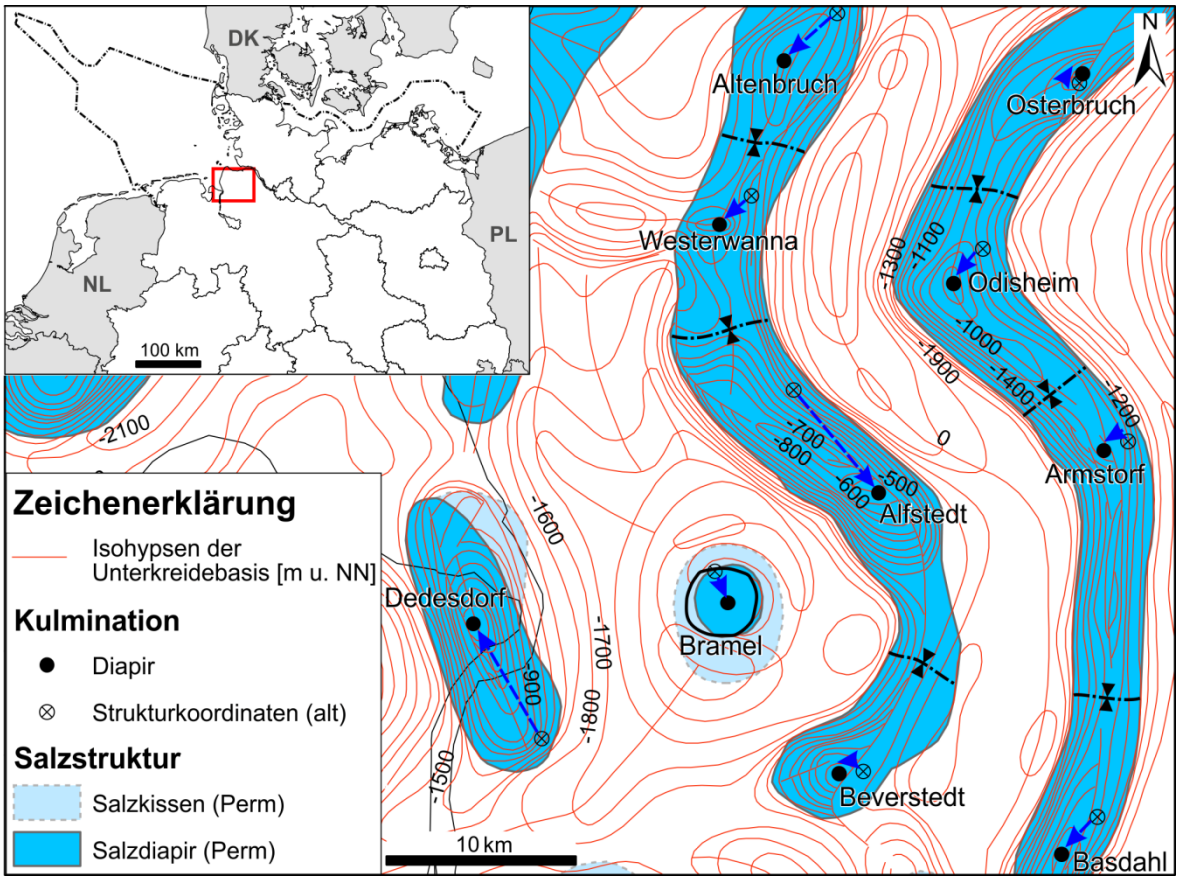


Abbildung 3-11: Korrektur der Punktkoordinaten (blaue Pfeile) an diversen Salzstöcken
Die Unterkreidebasis (rote Isohypsen) bildet bei den meisten gezeigten Salzstöcken die erste vollständige Deckschicht. Damit ermöglicht sie die Identifizierung einzelner Kulminationen und Depressionen (schwarze Muldenachsen) in lang gestreckten Salzmauern sowie eine laterale Abgrenzung von Salzstock-Einzelstrukturen. Der Salzstock Bramel hat die Unterkreide durchbrochen, wodurch jüngere Horizonte für die Koordinatenkorrektur herangezogen werden mussten (Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2008, verändert).

Aus der Plausibilitätsprüfung mittels Strukturkarten und 3D-Modellen ergab sich auch, dass für einige Strukturen keine Aufwölbung und damit Salzakkumulation festgestellt werden konnte (Abbildung 3-12). In diesen Fällen handelt es sich per Definition nicht um Salzstrukturen, sondern stratiform lagernde Salzschichten, die nicht Bestandteil dieser Studie sind.

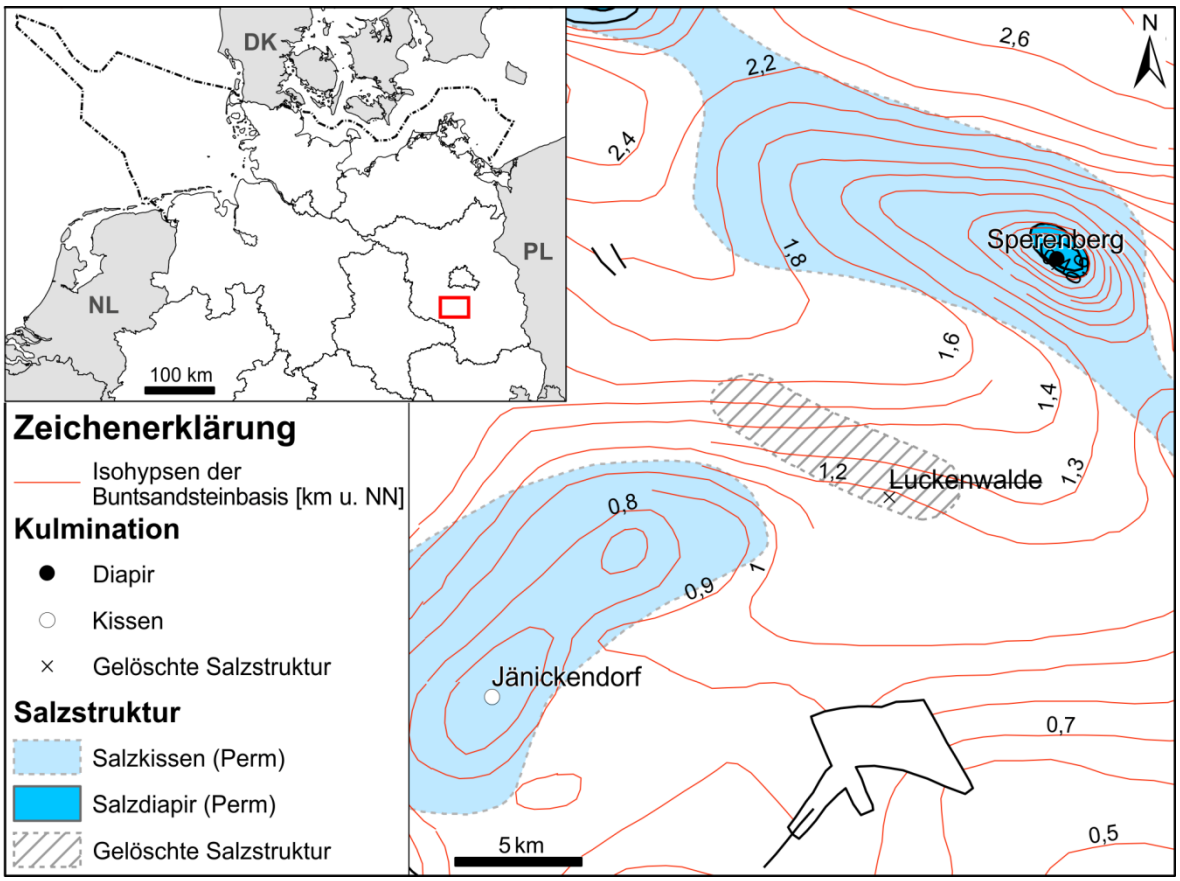


Abbildung 3-12: Validierung der Salzstrukturen
Die Isohypsen der Buntsandsteinbasis lassen keinerlei Aufwölbung des Salzes im Bereich der Salzstruktur Luckenwalde erkennen, wodurch diese nicht in den Datenbestand aufgenommen wurde (Reinhardt 1960-1991; Reinhold et al. 2008, verändert).

Daneben zeigen die Karten von Beer (2000) und Stackebrandt et al. (2010) in den beckenrandnahen Bereichen, wie z. B. im südöstlichen Brandenburg, bruchtektonisch bedingte Sockelhochlagen („nicht salinartektonische Hochlagen des Untergrundes“, wie z. B. Döbern, Guben, Jerischke-Rhaden). Es handelt sich also nicht wie bei Reinhold et al. (2008) um halokinetisch aufgestiegene Salzkissen, wodurch diese Strukturen, in Rücksprache mit dem AP 1 und den Staatlichen Geologischen Diensten, entfernt und nicht weiter betrachtet wurden (Abbildung 3-13). Gleichermaßen wurde mit Strukturen auf lang gestrecken Salzkissenzügen verfahren, denen keine eigenständigen Kulminationen zur Abgrenzung von anderen Salzstrukturen zugeordnet werden konnten. Dieser Fall trat vereinzelt und nur bei sehr schwach aufgewölbten Salzstrukturen, wie z. B. bei den aus Jurasalzen aufgebauten Salzkissen, auf. Auch die Arbeit von Baldschuhn et al. (2001) zeigt z. B. bei den Salzkissen Bippen und Ohrte sowie Bersenbrück und Alfhausen, dass eine Differenzierung zu Einzelstrukturen nicht möglich ist.

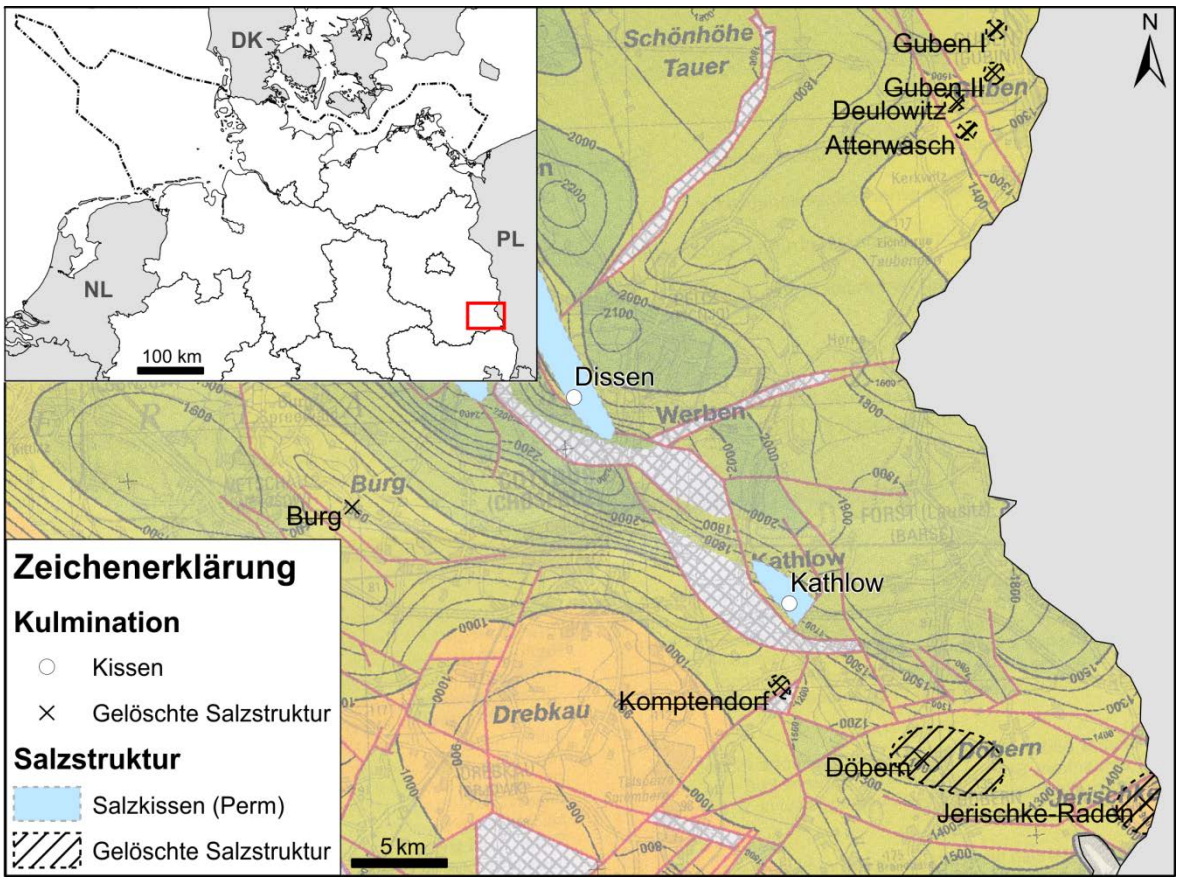


Abbildung 3-13: Isohypsen der Zechsteinoberfläche in SE-Brandenburg
Bei den Strukturen Burg, Drebkau, Döbern, Jerischke und Guben handelt es sich um Sockelhochlagen (Beer 2000) und nicht um halotektonisch aufgestiegene Salzkissen (Reinhold et al. 2008). Aus diesem Grund wurden sie nicht in den Datenbestand aufgenommen (Beer 2000, verändert).

Die Ausgangsdaten zu den Salzstock- und Salzkissengeometrien (Flächenpolygone) der norddeutschen Salinarstrukturen stammen ebenfalls aus der Kartengrundlage von Reinhold et al. (2008). Für das Festland und die zentrale deutsche Nordsee wurden diese weitgehend unverändert und in Abstimmung mit dem AP 1 in die Datenbank und somit in das Informationssystem überführt. In Gebieten mit stark verbesserter Datengrundlage, z. B. durch 3D-Seismik im Entenschnabel der deutschen Nordsee (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013), wurden analog zu den Metadaten auch die Strukturgeometrien vollständig überarbeitet (Abbildung 3-14).

Zusammenfassend lässt sich für die Verarbeitung der Strukturinformationen sagen, dass durch die Korrektur der Punktkoordinaten und die damit einhergehende Plausibilitätsprüfung bestimmter Salzstrukturmerkmale, die Datenkonsistenz, v. a. im Hinblick auf die genaue Anzahl und ortsgetreue Benennung der Salzstrukturen, deutlich verbessert wurde. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wurden sowohl die neu hinzugefügten, als auch

die gegenüber der Kartengrundlage von Reinhold et al. (2008) entfernten Salzstrukturen in Anhang 3-7 aufgelistet.

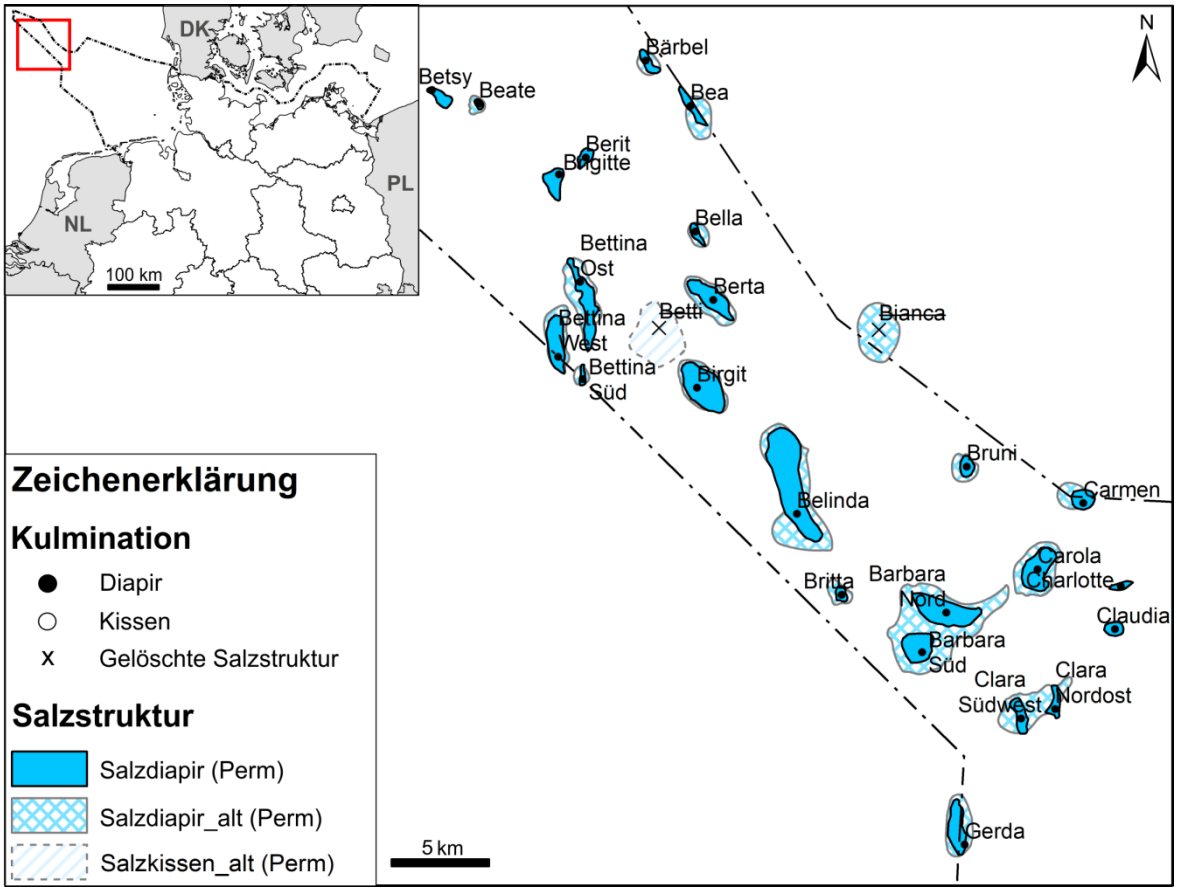


Abbildung 3-14: Überarbeitete Salzstrukturgeometrien im Bereich des Entenschnabels im Vergleich zu den Ausgangsdaten von Reinhold et al. (2008)
Das Salzkissen Betti und der Salzstock Bianca konnten durch neue Erkundungsdaten nicht nachgewiesen werden. Entgegen den Ausgangsdaten handelt es sich bei Belinda nur um einen Salzdiapir. Barbara und Clara wurden hingegen in zwei unterschiedliche Strukturen getrennt. Daneben wurden folgende neue Salzstöcke identifiziert: Betsy, Berit, Brigitte, Charlotte. Die weiteren Salzstrukturen wurden z. T. deutlich in ihrer lateralen Ausdehnung verändert (Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) 2013, verändert).

Nach der Verarbeitung folgte die systematische Überführung der Meta- und Geometriedaten der Salzstrukturen in eine Datenbank. Über ihre Konzeptionierung und ihre Funktionen soll in den folgenden Unterkapiteln berichtet werden.

3.1.3 Datenmodell und Programmierung der Schnittstellen

Ziel des Datenmodells war die Speicherung einer Datengrundlage zur strukturierten Filterung der Salzstrukturen des Norddeutschen Beckens, um Aussagen über die

potentielle Eignung dieser als mögliche Kavernenspeicher treffen zu können, eine Einteilung der Salzstrukturen in verschiedene Internbautypen zu ermöglichen und zum Abschluss des Verbundvorhabens als Informationsgrundlage für das öffentliche Informationssystem zu dienen. Weiterhin sollte durch programmier- und GIS-technische Umsetzungen der Austausch dieser Daten mit den anderen Arbeitspaketen gewährleistet werden.

3.1.3.1 Erstellung eines Datenmodells

Die Konzipierung des Datenmodells erfolgte auf Basis des in der BGR zur Verfügung stehenden SQL Server 2012, kann jedoch durch die Erstellung eines SQL-Skriptes mit Schemainformationen auch in anderen Datenbankmanagementsystemen genutzt werden. Ein Grund für die Wahl des SQL-Servers gegenüber Access war die zu erwartende Komplexität des Datenmodells und der entsprechenden Verschachtelung der SQL-Abfragen, deren Erstellung unter Access nur mit hohem Aufwand möglich ist. Des Weiteren bietet die SQL-Server-Lösung eine bessere Performance bei komplexen Abfragen und durch die In-House-Lösung eine automatisierte Datensicherung.

Nach der Akquise der Daten (Kapitel 3.1.1) und deren Harmonisierung (Kapitel 3.1.2) wurde ein Datenbankmodell zur redundanzfreien Haltung der Strukturinformationen entwickelt. Dieses Modell beinhaltet verschiedene Metadaten zu den einzelnen Strukturen, aufgeteilt in eine Kerntabelle und mehrere Tabellengruppen. Die thematische Gruppierung der Strukturinformationen dient einerseits zur Verminderung einer Vielzahl an Nullwerten in den einzelnen Tabellen, die durch das Nicht-Vorhandensein bestimmter Informationen entstehen würden. Andererseits führt diese Anordnung zum einfacheren Verständnis und zur besseren Lesbarkeit der Informationen direkt aus dem Datenmodell. Die verschiedenen thematischen Tabellengruppen und deren Verbindung zur Kerntabelle werden in Abbildung 3-15 gezeigt.

Die Salzstrukturtabelle stellt dabei die Kerntabelle des Modells dar, die den Strukturnamen sowie weitere allgemeine Informationen über die jeweiligen Salzstrukturen beinhaltet. Diese Tabelle steht mit den Tabellengruppen des Datenmodells über verschiedene Beziehungen in Verbindung. Die 1:1-Beziehung bedeutet, dass genau ein Datensatz der Kerntabelle mit genau einem Datensatz in einer der Tabellengruppen in Verbindung steht. Eine n:m-Beziehung wird benötigt, wenn eine Verbindung mehrerer Attribute einer Tabellengruppe mit einem oder mehreren Kerntabellendatensätzen möglich ist. Die Tabellengruppen unterteilen sich in ingesamt 36 Untertabellen. Diese komplexe Datenbankstruktur entstand durch das Prinzip der Normalisierung, also der Aufteilung unterschiedlicher Attribute in mehrere Relationen (z. B. Kelz 1998). Diese Methode wird verwendet, um eine redundanzfreie Haltung der Daten zu ermöglichen, Inkonsistenzen zu vermeiden und nach der Eingabe der Informationen, eine vereinfachte

Filterung der Strukturinformationen nach dem durch die Verbundpartner festgelegten Kriterienkatalog für den Bau und Betrieb von Druckluft- und Wasserstoffkavernen durchführen zu können. Eine erstellte Sicht („view“) ermöglicht eine zusammenfassende Ansicht aller zu einer Struktur gehörenden Informationen in einer einzelnen Darstellung. Des Weiteren wurde eine Funktionalität in das Datenmodell integriert, die es erlaubt nach bestimmten Begriffen im gesamten Datenmodell zu suchen und den entsprechenden Datensatz anschließend auszugeben.

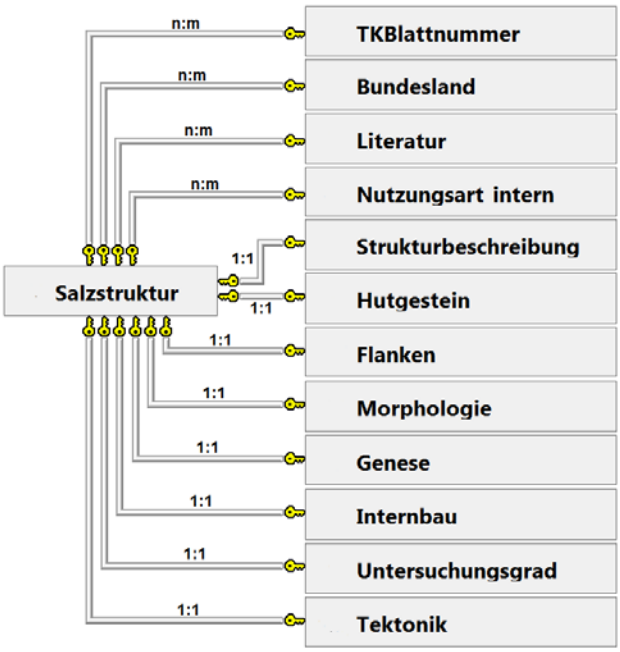


Abbildung 3-15: Kerntabelle „Salzstruktur“ und in verschiedenen Beziehungen dazu stehende thematische Tabellengruppen

3.1.3.2 Dateneingabe

Die Implementierung der Salzstruktur-Metadaten in die Datenbank erfolgte durch ein programmiertes Frontend (Abbildung 3-16). Dieses bietet eine vereinfachte Oberfläche zur Auswahl von Bezeichnungen und Wertebereichen und ermöglicht somit eine fehlerfreie und redundanzfreie Eingabe von Strukturinformationen. Außerdem wurde durch diese Form der Eingabe noch einmal die Homogenität der Datengrundlage gewährleistet. Die nachträgliche Änderung einzelner Strukturinformationen kann auch durch das Frontend realisiert werden.

Die Geometriedaten wurden im ESRI-Shapeformat in die Datenbank geschrieben. Dazu zählen neben den Salzkissen- bzw. Salzstockgeometrien auch die Strukturkoordinaten.

Darüber hinaus wurden für Salzstrukturen, die über 2.000 m u. NN aufgestiegen sind, die Strukturumrisse aus den vom AP 1 bearbeiteten Niveauschnittkarten im Format eines Flächenpolygons importiert. Für die spätere Potentialabschätzung ermöglicht dies, je nach Tiefenlage des Strukturtops, eine Darstellung der Salzstrukturgeometrie in bis zu vier Tiefen (-500, -1.000, -1.500 und -2.000 m u. NN).

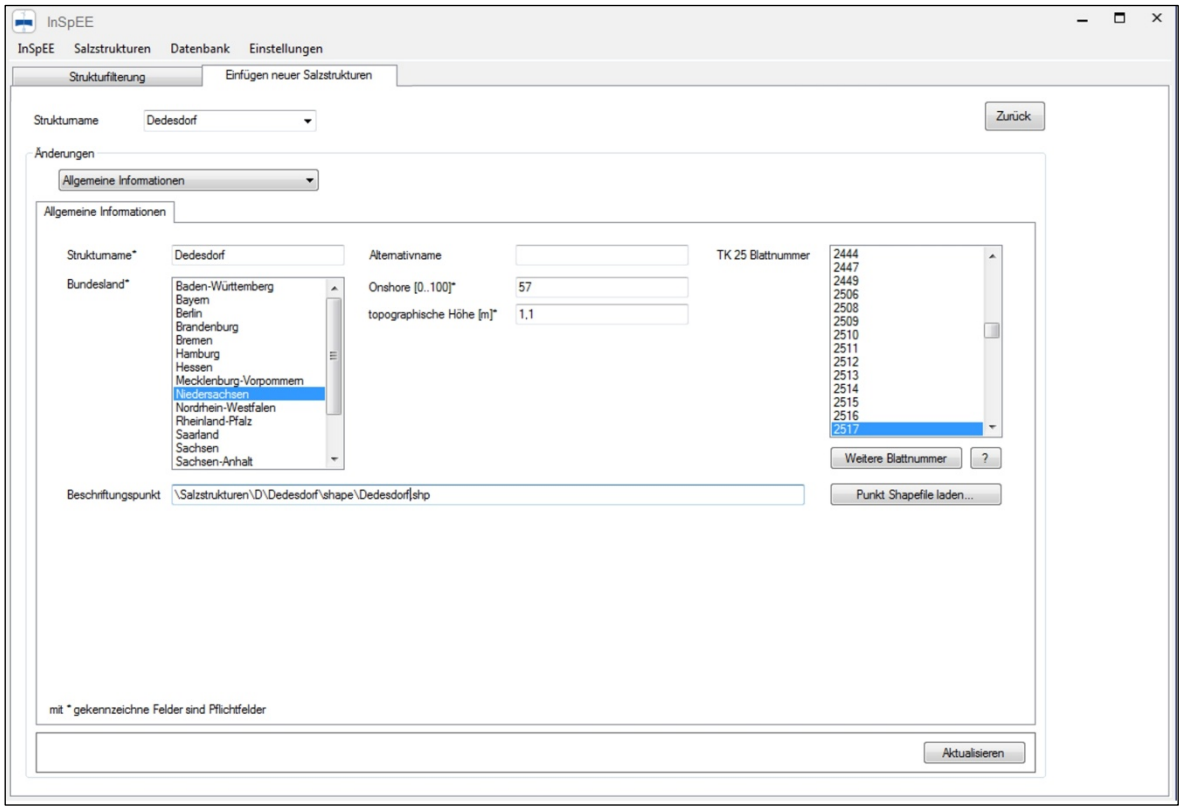


Abbildung 3-16: Eingabe der Salzstruktur-Metadaten über ein Frontend in die SQL-Datenbank

3.1.3.3 Programmierung des Datenexports

Alle eingetragenen Salzstruktur-Metadaten können in Form einer tabellenfähigen Textdatei im CSV-Format exportiert werden. Auf diese Weise wurden kavernenbaurelevante Strukturinformationen von untersuchungswürdigen Salzstrukturen (Kapitel 3.2.4) an KBB UT übermittelt. Wie bereits im Kapitel 3.1.2.1 beschrieben, war es für die Potentialbestimmung nötig, die Angaben für die Strukturtops sowohl im Höhenbezug auf Meter unter NN als auch auf Meter unter Gelände zu überliefern. Folgerichtig mussten auch die zu übergebenden Salzstrukturumrisse im jeweiligen Shape auf m u. GOK angepasst und entsprechende z-Werte umgerechnet werden. Dazu wurden die einzelnen Umrisse als

3D-Shape neu erstellt und die z-Werte aus der topografischen Geländehöhe über dem Kulminationspunkt und der Teufe des Niveauschnittes berechnet.

Für das öffentlich zugängliche Informationssystem (Kapitel 2.4) wurde ein Automatismus entwickelt, um aus den relevanten Daten der InSpEE-Datenbank für jede Struktur ein Datenblatt bzw. einen Steckbrief (Anhang 2-5) zu erstellen. Die entsprechenden Daten werden aus der Datenbank gelesen und strukturiert auf einer Seite hinterlegt. Diese Datenblätter werden im Informationssystem an die jeweiligen Salzstrukturgeometrien gekoppelt und sind darüber als PDF abrufbar.

Die Erstellung der thematischen Karten für das Informationssystem wurde durch die Generierung vorgefertigter SQL-Abfragen verschiedener Themengebiete unterstützt. Diese Abfragen konnten in einem GIS genutzt werden, um die Sachinformationen mit Geometriedaten zu verschneiden und die entsprechende Karte zu gestalten. Mithilfe dieser thematischen Karten ist es möglich, die laterale Verteilung verschiedener Strukturinformationen, wie z. B. Strukturtop oder Erkundungsgrad zu visualisieren.

3.2 Charakterisierung der Salzstrukturen anhand des Kriterienkataloges

Um sich einen Überblick darüber zu verschafften, welche der norddeutschen Salzstrukturen sich für die Speicherung regenerativer Energien in Kavernen eignen, mussten diese einer vorläufigen Charakterisierung unterzogen werden. Mit dem Ziel besonders untersuchungswürdige Salzstrukturen zu identifizieren, wurden die gesammelten strukturgeologischen Merkmale anhand festgelegter Bewertungskriterien ausgewertet. Zu einer Vorauswahl von potentiell geeigneten Standorten gehören auch eine Übersicht zu konkurrierenden unterirdischen Nutzungen, die einer Speicherrealisierung im Wege stünden, sowie eine Einschätzung zum Erkundungsgrad der Salzstrukturen. Zunächst folgt aber eine Bestandsaufnahme, die auf Basis der neuen geologischen Grunddaten zeigen soll, wie viele Salzstrukturen im Norddeutschen Becken auftreten und durch welche strukturgeologischen Eigenschaften diese gekennzeichnet sind.

3.2.1 Salinarstrukturen im Norddeutschen Becken

Salinargesteine aufgebaut aus Salztonen, Karbonaten (Kalzit, Dolomit), Sulfaten (Anhydrit, Gips), Steinsalz, Kali- sowie Magnesiumsalz treten in Norddeutschland in unterschiedlich alten Formationen auf (Abbildung 3-17). Die ältesten im NGB bekannten Salinare wurden im permischen Oberrotliegend und Zechstein abgelagert. Weitere Salzlager kommen in der Trias (Oberer Buntsandstein (Röt), Mittlerer Muschelkalk, Mittlerer Keuper) sowie im Oberjura vor (Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2014).

Sind ausreichend mächtige Steinsalzhorizonte vorhanden, so können die plastisch reagierenden und gegenüber dem Umfeld spezifisch leichteren Salzgesteine, unter bestimmten geologischen Bedingungen, zum Fließen („Kriechen“) angeregt werden. Dabei hängt das Kriechverhalten von den rheologischen Eigenschaften der unterschiedlichen Salzformationen ab, die sich v. a. im lithologischen Aufbau und im Anteil nicht-halitischer Minerale unterscheiden. Das mobilisierte Salz konzentriert sich dann in Form von sog. Salzkissen und Salzdiapiren (Abbildung 3-17), wodurch die ursprünglich flach lagernden Salinarschichten in ihrer Mächtigkeit anschwellen. Im Ergebnis von lang anhaltenden Kriechprozessen („Halokinese“) ist in den vergangenen 250 Mio. Jahren eine große Anzahl und Formenvielfalt von Salzstrukturen im NGB entstanden (z. B. Jaritz 1973; Krull 1991; Kockel & Krull 1995; Baldschuhn et al. 2001; Frisch & Kockel 2004).

Mit Beginn der Strukturgenese kommt es durch lateralen Salzzustrom zunächst zur Bildung relativ flach aufgebeulter, unreifer Salzkissen, deren sedimentäres Dach zwar aufgewölbt wird, aber noch als intaktes konkordantes Deckgebirge vorliegt. Bei fortschreitender Salzakkumulation entwickeln sich reife Salzkissen, die durch eine hohe Firste und steile Flanken gekennzeichnet sind. Die Deckgebirgssedimente in den Dachregionen dieser aufgewölbten Salzstrukturen zeigen deutliche Mächtigkeitsreduzierungen bis hin zu sedimentären Schichtlücken, zusammen mit Scheitelstörungen, die sich infolge des Salzaufstiegs gebildet haben. Bei sukzessivem Salzaufstieg kommt es im Verlauf der weiteren Strukturentwicklung zur Schwächung des Deckgebirges und schließlich zum diapirischen Durchbruch des Salzes durch die mesozoischen Decksedimente. Bei genügend mobilisierbaren Salzvorräten können diese Salzdiapire dann bis zur Oberfläche aufsteigen und werden je nach ihrer lateralen Ausdehnung als „Salzstöcke“ oder „Salzmauern“ bezeichnet. Da die Trennung dieser beiden Begriffe zahlenmäßig nicht eindeutig definiert ist, werden sie im Folgenden zusammenfassend und ausdehnungsunabhängig als Salzdiapire beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung dieser salztektonischen Prozesse ist in Pollok et al. (2016) enthalten.

Durch die Auswertung der zusammengetragenen Daten konnten 697 Salzstrukturen im Norddeutschen Becken identifiziert werden, das neben dem norddeutschen Festland auch die deutsche Nord- und Ostsee umfasst (Anhang 3-1, 3-2). Eine Strukturübersicht gemäß des altersverschiedenen strukturaufbauenden Salinars sowie des zuvor erläuterten genetischen Entwicklungsstadiums ist in Abbildung 3-18 dargestellt.

System	Serie / Gruppe	internat. Stufe / Subgruppe / Formation	Vorkommen von Steinsalzlagern	Strukturbildung	
				Salzkissen	Salzdiapir
Quartär					
	ca.1,8 Ma				
Neogen	Pliozän	Ober			
		Unter			
	Miozän	Ober			
		Mittel			
	ca. 24 Ma	Unter			
Paläogen	Oligozän	Chattium			
		Rupelium			
	Eozän	Priabonium			
		Bartonium			
		Lutetium			
		Ypresium			
	Paläozän	Thanetium			
		Seelandium			
	ca. 65 Ma	Danium			
Kreide	Oberkreide	Maastrichtium			
		Campanium			
		Santonium			
		Coniacium			
		Turonium			
		Cenomanium			
	Unterkreide	Albium			
		Aptium			
		Barremium			
		Hauterivium			
		Valanginium			
	ca. 142 Ma	Berriasium			
Jura	Oberjura	Tithonium	Oberjura-Salinar	x	
		Kimmeridgium			
		Oxfordium			
	Mitteljura	Callovium			
		Bathonium			
		Bajocium			
		Aalenium			
	Unterjura	Toarcium			
		Pliensbachium			
		Sinemurium			
	ca. 200 Ma	Hettangium			
Trias	Keuper	Exter-Formation			
		Arnstadt-Formation			
		Weser-Formation	Keuper-Salinar	x	(x*)
		Stuttgart-Formation			
		Grabfeld-Formation			
		Erfurt-Formation			
	Muschelkalk	Oberer Muschelkalk			
		Mittlerer Muschelkalk	Muschelkalk-S.		
		Unterer Muschelkalk			
	Buntsandstein	Röt-Formation	Röt-Salinar		
		Solling-Formation			
		Hardegsen-Formation			
		Detfurth-Formation			
		Volpriehausen-Formation			
		Quickborn-Formation			
		Bernburg-Formation			
		Calvörde-Formation			
	ca. 251 Ma				
Perm	Zechstein	Fulda-Formation	Zechstein-Salinar	x	x
		Friesland-Formation			
		Ohre-Formation			
		Aller-Formation			
		Leine-Formation			
		Staßfurt-Formation			
		Werra-Formation			
	ca. 258 Ma				
	Rotliegend	Elbe-Subgruppe	Oberrotliegend-Salinar	x**	x**
		Havel-Subgruppe			
		Müritz-Subgruppe			
		Altmark-Subgruppe			

* nur bei Angliederung an permische Salzdiapire möglich
** nur in Kombination mit Zechsteinsalinaren

Abbildung 3-17: Stratigrafische Position der Salzgesteinsvorkommen im Norddeutschen Becken, die bei ausreichender Mächtigkeit salzstrukturbildend sein können
(Reinhold et al. 2014, verändert; Zeitskala aus: Menning & Deutsche Stratigrafische Kommission 2012)

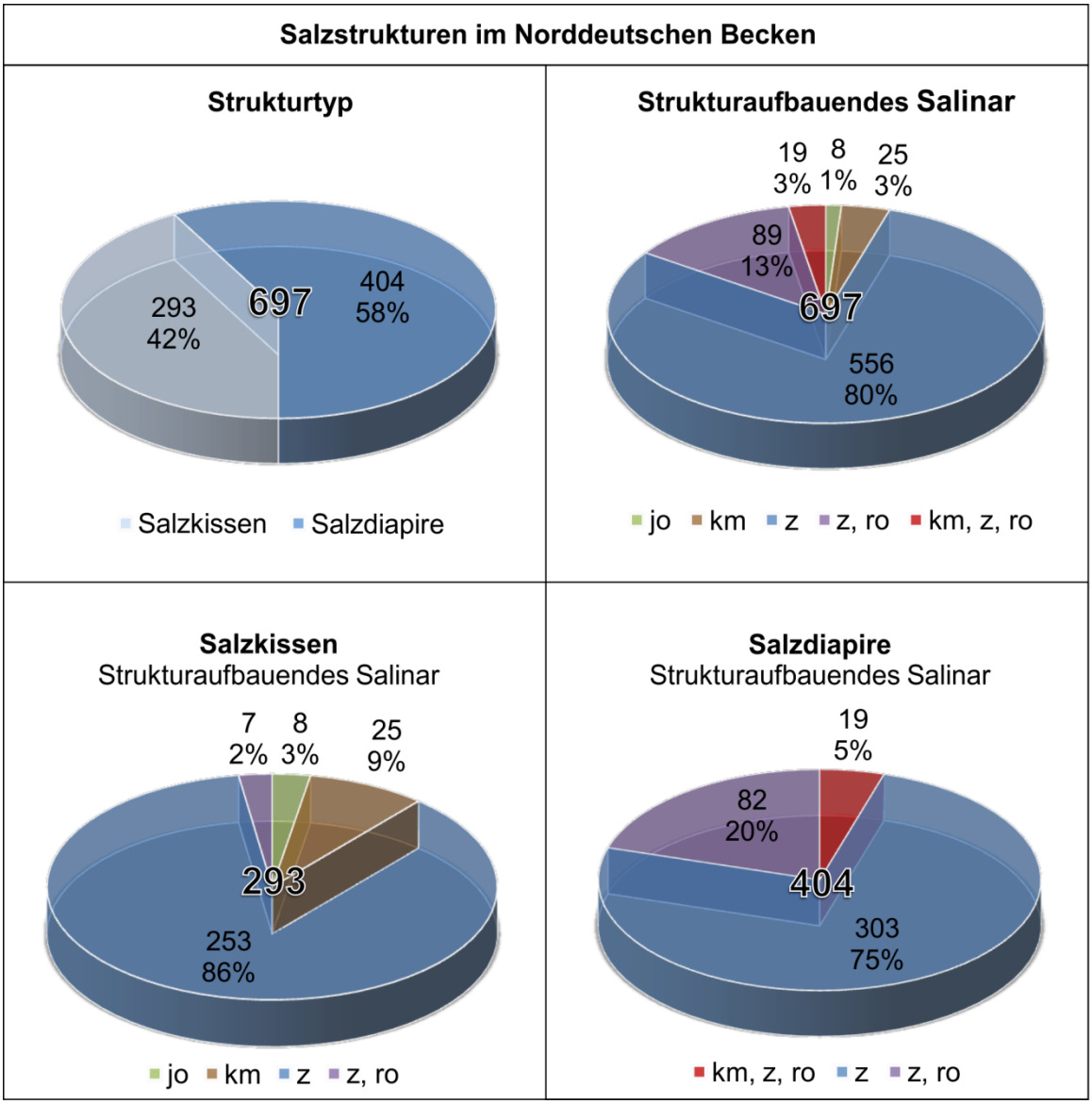


Abbildung 3-18: Übersicht der im Norddeutschen Becken identifizierten Salzstrukturen, eingeteilt nach ihrem genetischen Strukturtyp bzw. ihrem strukturaufbauenden Salinar
jo: Oberjura, km: Mittlerer Keuper, z: Zechstein, ro: Oberrotliegend

An über 95 % aller Salzstrukturen sind Salinare des Zechsteins gänzlich oder teilweise am Strukturaufbau beteiligt. Dies kann damit erklärt werden, dass zechsteinzeitlich die besten geologischen und klimatischen Voraussetzungen für eine großflächige Eindampfung zyklischer Evaporitfolgen im NGB vorherrschten (z. B. Ziegler 1990; Stollhofen et al. 2008). Im Ergebnis spiegelt das die hohen, primär abgelagerten Zechsteinmächtigkeiten wider, in denen sich v. a. die weitverbreitete Staßfurt-Formation (Abbildung 3-17) durch mächtige Steinsalzlager auszeichnet. Damit zählen Zechsteinsalinare zu den bedeutendsten strukturaufbauenden Salzgesteinen des Norddeutschen Beckens.

Salzdiapire bestehen im NGB überwiegend aus permischen Oberrotliegend- und Zechsteinsalzen (Abbildung 3-17, Abbildung 3-18). Von 404 Salzdiapiren werden 303 ausschließlich durch Salzgesteine aus dem Zechstein aufgebaut. In den Mächtigsten von ihnen sind bis zu 5.600 m Salz sekundär akkumuliert (Tabelle 3-2, Anhang 3-3). Sie sind flächendeckend in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, im westlichen Brandenburg, in der Nordsee und vereinzelt in Mecklenburg-Vorpommern anzutreffen (Anhang 3-2). Die verbleibenden 101 Diapire stellen Sonderfälle dar, da sie aus mehreren bzw. altersverschiedenen Salzformationen bestehen. In den sog. „Doppelsalinar-Strukturen“ wurden sowohl Oberrotliegend- als auch Zechsteinsalze nachgewiesen, die bis zu 7.000 m mächtig werden (Tabelle 3-2). Aus paläogeografischen Gründen beschränkt sich ihr Vorkommen auf Ostfriesland, Süd-Schleswig-Holstein, die deutsche Bucht sowie den Unterelberaum (Anhang 3-2). Dort bilden sie häufig NNE-SSW streichende Salzmauern von erheblicher Ausdehnung und einer maximalen Längserstreckung von bis zu 200 km.

Aus Zechsteinsalzen bestehende Kissen werden bis zu 3.400 m mächtig. Sie überwiegen in der Ostsee, in Mecklenburg-Vorpommern, im östlichen Brandenburg und in der nordöstlichen Nordsee. Im Entenschnabel fehlen sie gänzlich. In den Verbreitungsgebieten des mobilisierten Oberrotliegendsalinars können diese Kissen unter dessen Beteiligung sogar bis zu 3.800 m mächtig werden, sind aber selten. Im NGB sind keine Salzstrukturbildungen bekannt, an denen ausschließlich Salzgesteine des Oberrotliegend beteiligt sind.

Tabelle 3-2: Tiefen- und Mächtigkeitsbereiche der norddeutschen Salzstrukturen in Abhängigkeit von den altersverschiedenen strukturaufbauenden Salinaren

Struktur-aufbauendes Salinar	**Tiefenbereiche der Strukturtops** [m u. NN]				**Mächtigkeiten** [m]			
	Salzkissen		Salzdiapire		Salzkissen		Salzdiapire	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
jo	100	700	-	-	1.000	2.100	-	-
km	550	3.300	-	-	500	3.000	-	-
z	-165	5.150	-166	3.000	350	3.400	300	5.600
ro, z	500	2.950	-91	2.950	1.600	3.800	450	7.000
ro, z, km	-	-	50	1.400	-	-	3.000	6.400

Salzkissen können neben permischen Evaporiten aber auch Salinargesteine aus dem Mittleren Keuper oder dem Oberjura enthalten (Abbildung 3-17, Abbildung 3-18). Die Kombination aus Grabeneinsenkung und mächtiger Randsenkenbildung entlang der aus Permsalinaren aufgebauten Salzmauern ermöglichte eine Ablagerung mächtiger keuper-

zeitlicher Salzlager. Sie sind, ähnlich wie die Oberrotliegendsalze, im Zentrum bzw. in den tiefen Bereichen des Norddeutschen Beckens verbreitet und dort ausreichend mächtig, um strukturbildend zu sein (Anhang 3-2). Daraus hervorgehende Salzkissen werden bis zu 3.000 m mächtig. Zwar befinden sich die Topbereiche zwischen 550 und 3.300 m u. NN (Tabelle 3-2), die meisten der insgesamt 25 Salzkissen liegen jedoch unterhalb von 1.000 m u. NN. In Einzelfällen, wie z. B. im tief eingesenkten Glückstadt-Graben in Schleswig-Holstein und im Unterelberaum, wurden Keuper-Salzgesteine in den Außenbereichen von permischen Salzdiapiren erbohrt (z. B. Beutler et al. 1999; Baldschuhn et al. 2001). Sie waren jedoch nicht an der Diapirbildung selbst beteiligt. Vielmehr wurden sie im Verlauf der Salzkissengenese nachträglich an bereits bestehende Diapire aus permischen Salzgesteinen randlich angegliedert (Abbildung 3-19). Die Bohrungen zeigen, dass eine klare Trennung dieser zusammengeschweißten Strukturen nicht mehr möglich ist, da sich die Salinare im Zuge des Salzaufstieges vermengt haben. In der Folge wurden diese, aus drei unterschiedlich alten Salzformationen aufgebauten Strukturen unter einem Strukturnamen zusammengefasst. Allerdings ist die Existenz von diesen 19 besonderen „Tripelsalinar-Strukturen“ (Abbildung 3-18) im NGB nur selten durch Bohrungen belegt und stützt sich häufig auf geophysikalische Auswertungen.

Die Ablagerung oberjurassischer Salinarformationen ist auf die tieferen Bereiche des Niedersächsischen Beckens beschränkt und damit eng an dessen Entwicklung gekoppelt (Kapitel 2.1). Im Weser-Ems-Gebiet im südwestlichen Niedersachsen (Anhang 3-2) erreichen diese Salzgesteine durch halokinetische Kissenbildung Mächtigkeiten von bis zu 2.100 m und liegen dabei relativ nahe der Oberfläche (Tabelle 3-2). Im Vergleich zu den anderen Salzformationen sind diese Salzstrukturen aber relativ selten, da große Teile dieses Salinars noch stratiform lagern und nicht mobilisiert worden sind (Reinhold et al. 2014).

Die in Norddeutschland vorkommenden stratiformen Salzlager des Röt (Oberer Buntsandstein) und des Mittleren Muschelkalks sind für eine Strukturbildung nicht ausreichend mächtig (Abbildung 3-17) und werden daher in dieser Studie nicht betrachtet.

3.2.2 Erkundungsgrad norddeutscher Salzstrukturen

Als Teil des Kriterienkataloges, geführt unter „Faktor zur technischen Realisierbarkeit“, war es Aufgabe der BGR, den Stand der Erkundung für jede norddeutsche Salzstruktur zu erarbeiten und zu bewerten. Letzteres erfolgte über die in Tabelle 3-3 gezeigte dreistufige Einteilung. Liegen für eine Salzstruktur Informationen zum inneren Aufbau vor, beispielsweise zu Anteilen und Verteilungen von altersverschiedenen Salinargesteinen (Kapitel 3.3.3), so gilt diese als „gut“ erkundet. Dies ist im Wesentlichen bei allen Salzstrukturen der Fall, in denen bereits Kavernenspeicher oder Bergwerke betrieben werden oder wurden. Ein mäßig erkundeter Standort ist durch im Salzkörper stehende

Bohrungen gekennzeichnet. Sie belegen zum einen die Existenz der Salzstruktur mit „harten Daten“ und erbringen zum anderen Nachweise über die angetroffenen Salzformationen. Sie unterscheiden sich allerdings von Erkundungsbohrungen (z. B. Kavernenbohrungen) bei gut erkundeten Standorten, da sie keine näheren Informationen zum inneren Aufbau der Struktur liefern.

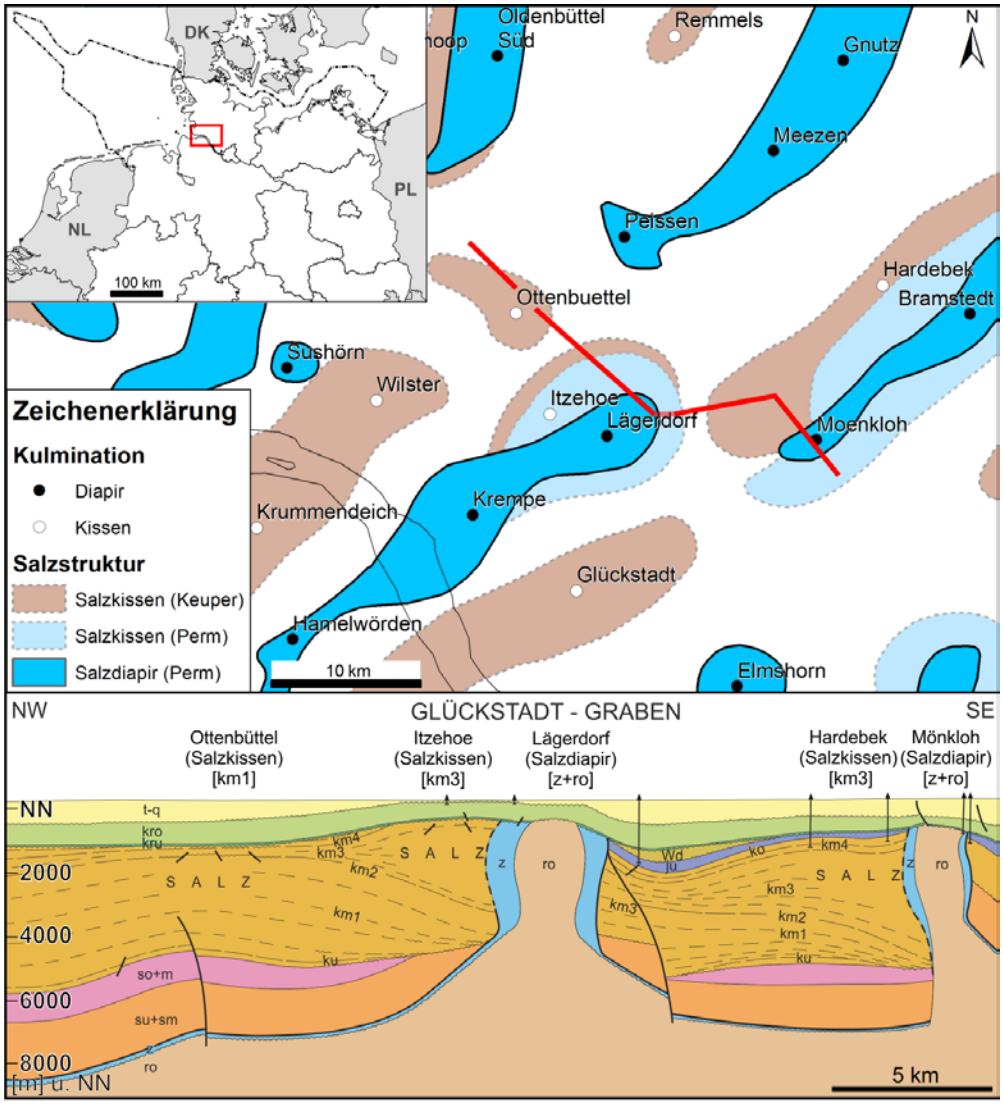


Abbildung 3-19: Profilschnitt (rote Linie) durch Salzdiapire aus permischen Salzgesteinen (Zechstein & Oberrotliegend) mit randlich angegliederten Salzkissen aus Keupersalinar
Letztere können durch Salzlager der Grabfeld-Formation (km1, Ottenbüttel) oder Weser-Formation (km3, Itzehoe, Hardebek) aufgebaut sein. Eine eindeutige räumliche Trennung zwischen Kissen- und Diapirstruktur ist durch die Vermengung der altersverschiedenen Salinare beim Salzaufstieg nicht möglich (gestrichelte Linie).

Einen schlechten Erkundungsgrad weisen Salzstrukturen auf, die „nur“ geophysikalisch, d. h. ohne das Vorhandensein von Bohrungen, erfasst worden sind. Dabei spielt es keine Rolle mit welcher geophysikalischen Methode sie untersucht worden sind, da in allen Fällen Daten zum jeweiligen strukturaufbauenden Salinar fehlen. Anhand dieser Vorgaben konnten die Salzstrukturen in der InSpEE-Datenbank mittels zuvor generierter SQL-Abfragen direkt abgefragt und analysiert werden.

Tabelle 3-3: Bewertung des Erkundungsgrades von norddeutschen Salzstrukturen

Internbau bekannt durch		**Reichweite der Bohrungen ohne Daten zum Internbau**					**Geophysik**	
Berg-bau	Erkundungs-bohrungen	Sockel	Salinar	Hutgestein	Deckgebirge	keine	3D- & 2D-Seismik	Gravi-metrie etc.
gut		mäßig		schlecht				

Bei zwei Drittel aller norddeutschen Salzstrukturen sind die Salzgesteine nicht durch Bohrungen erteuft worden. Demnach erfolgte der Nachweis dieser Strukturen überwiegend durch geophysikalische Untersuchungsmethoden und selten durch Bohrungen, die bis in das Hutgestein reichen. Gemäß des angewendeten Bewertungsschemas gelten sie demnach als schlecht erkundet (Abbildung 3-20). Ein Großteil von ihnen ist aber hinreichend durch digitale reflexionsseismische Sektionen überdeckt, sodass die Darstellung der äußeren Morphologie im vorgegebenen Maßstab als ausreichend bezeichnet werden kann. Dies gilt insbesondere für Beckenbereiche, die im Zuge der Kohlenwasserstoffexploration durch hochqualitative 3D-Seismik abgedeckt sind. In 169 (24 %) mäßig erkundeten Strukturen konnte der Nachweis von Salzgesteinen durch Bohrungen erbracht werden. Bei weniger als einem Zehntel (65) aller norddeutschen Salzstrukturen liegen Daten zum Internbau vor, wodurch ihnen ein guter Erkundungsstand zugesagt werden kann. Wie man allerdings in Abbildung 3-20 und in Anhang 3-4 erkennen kann, beschränken sich die guten Kenntnisse fast ausschließlich auf die Salzgesteine des Zechsteins.

Der geringe Erforschungsgrad von anderen strukturaufbauenden Salinaren ist einer der Gründe, warum einige Salzstrukturen in dieser Studie nicht weiter betrachtet werden können (Kapitel 3.2.4.2). Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass die Daten nicht zu allen 65 gut erkundeten Salzstrukturen frei zugänglich waren und deshalb auch nur Teile davon in die 3D-Modellierung (Kapitel 3.3) eingeflossen sind.

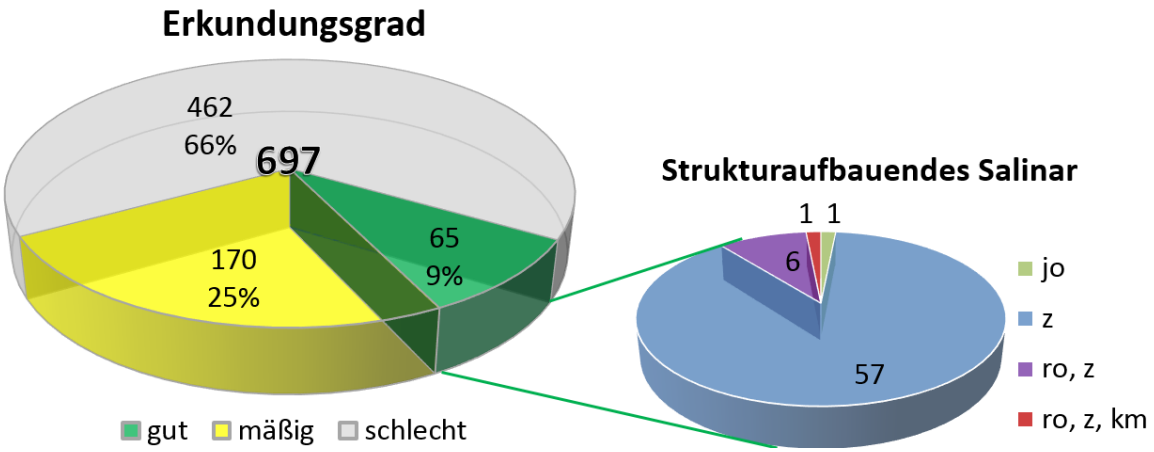


Abbildung 3-20: Auswertung zum Erkundungsgrad von norddeutschen Salzstrukturen

3.2.3 Konkurrierende Nutzungen innerhalb deutscher Salinarstrukturen

Während sich vorhandene Erschließungen einer Salzstruktur durch Bergbau positiv auf die Bewertung des Erkundungsgrades auswirken, mindern innerhalb der Salzstrukturen konkurrierende Nutzungen die verwertbaren Flächenanteile und gehen daher im Kriterienkatalog als Wichtungsfaktor für die Potentialanalyse ein. Die BGR stellte dazu eine Übersicht zusammen (Anhang 3-4), die davon betroffene Strukturen zeigt. Um eine Benachteiligung dieser Salzstrukturen feststellen zu können, wurde der bereits verwendete Flächenbedarf verschiedener Nutzungen ermittelt und an das AP 5 übergeben. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erläutert, reichte die dafür zugrunde gelegte Datenbasis nicht immer aus, wodurch konservativ geschätzt werden musste. Daher ist für zukünftige Speicherprojekte in allen Fällen eine Einzelbetrachtung mit aktuellen Daten der jeweiligen Landesplanungsbehörden erforderlich.

Dennoch soll die Tabelle 3-4 einen Überblick geben, wie viele der norddeutschen Salinarstrukturen bereits mit Nutzungen ganz oder zu Teilen belegt sind. Bei der aufgeführten Zusammenstellung gilt es zu beachten, dass einige Salzstrukturen durch Mehrfachbelegungen gekennzeichnet sind. Der Salzstock Benthe enthält beispielsweise sowohl einen in Betrieb befindlichen Kavernenspeicher als auch ein stillgelegtes Kali- und Salzbergwerk. Die Gesamtsumme von 91 konkurrierenden Nutzungen verteilt sich auf 78 Salzstrukturen, wovon ein Großteil (67) aus den Salzgesteinen des Zechsteins besteht. Dies untermauert auch den im letzten Kapitel ausgewerteten guten Erkundungsgrad dieser Strukturen. Nur neun durch konkurrierende Nutzungen gekennzeichnete Salzstrukturen sind durch Doppelsalinare (Oberrotliegend & Zechstein) und nur drei aus Salzgesteinen des Mittleren Keupers, Zechsteins und Oberrotliegend charakterisiert. Salzstrukturen, die durch Evaporite des Oberjura oder des Mittleren Keuper aufgebaut werden, sind frei von Nutzungskonkurrenz.

Tabelle 3-4: Zusammenstellung der konkurrierenden Nutzungen innerhalb norddeutscher Salinarstrukturen, eingeteilt nach dem strukturaufbauenden Salinar

Konkurrierende Nutzungen					
Bergbau		z	ro, z	ro, z, km	Summe
	in Betrieb	2	-	-	2
	nicht realisiert	1	-	-	1
	Reserve	5	-	-	5
	stillgelegt	37	1	-	38
	Summe				**46**
Kavernenstandort		z	ro, z	ro, z, km	Summe
	Planung / Erkundung	2	-	-	2
	in Betrieb	15	3	1	19
	nicht realisiert	2	4	1	7
	stillgelegt	2	-	-	2
	Summe				**30**
Endlagerstandort		z	ro, z	ro, z, km	Summe
	Planung / Erkundung	1	-	-	1
	in Betrieb	2	-	-	2
	Summe				**3**
Solegewinnung		z	ro, z	ro, z, km	Summe
	in Betrieb	8	1	1	10
	stillgelegt	1	1	-	2
	Summe				**12**
Gesamtsumme					**91**

3.2.4 Kriterienbasierte Auswahl von potentiell geeigneten Salinarstrukturen

Im Rahmen einer Voruntersuchung für geeignete Kavernenstandorte wurden unter Beteiligung aller Verbundpartner Kriterien festgelegt, um besonders geeignete bzw. untersuchungswürdige Salzstrukturen für den Bau und Betrieb von Wasserstoff- und Druckluftkavernen zu ermitteln. Diese Kriterien entstanden unter Berücksichtigung der geologischen und gebirgsmechanischen Vorgaben (AP 3) und wurden im Verlauf der Potentialermittlung (AP 5) hinsichtlich der Anwendbarkeit überprüft und teilweise angepasst. Aufgabe dieses Arbeitspaketes war es, die festgelegten Kriterien auf die Salzstrukturen anzuwenden. Dazu wurden neben strukturgeologischen Parametern, wie dem Strukturtop (Kapitel 3.2.4.1) und dem strukturaufbauenden Salinar (Kapitel 3.2.4.2), auch die von KBB UT und IGtH berechneten Mindestanforderungen für einen potentiellen

Kavernenspeicher ausgewertet (Kapitel 4). Zu diesen zählen Einflussgrößen wie Mindestmächtigkeit (Kapitel 3.2.4.3) und Mindestfläche des Wirtsgesteins (Kapitel 3.2.4.4), die auf der Basis einer Minimalkavernenauslegung in unterschiedlichen Kavernenanordnungen berechnet und festgelegt wurden.

Die Anwendung der Auswahlkriterien erfolgte durch die Erstellung von SQL-Abfragen direkt auf die Strukturinformationen der Datenbank. Die festgelegten Kriterien wurden systematisch nach der in Tabelle 3-5 aufgeführten Reihenfolge abgearbeitet, sodass bereits ausgeschlossene Strukturen bei nachfolgenden Kriterien nicht mehr berücksichtigt worden sind. Im Ergebnis dieser Abfragen minimierte sich die Anzahl der untersuchungswürdigen Strukturen, die zur detaillierten Potentialabschätzung an KBB UT übergeben wurden. Für die Nachvollziehbarkeit der Sensitivität einzelner Kriterien sind im Anhang eine Strukturliste (Anhang 3-1) und eine Karte (Anhang 3-5) der ausgeschlossenen und verbleibenden Strukturen bereitgestellt. Zusätzlich erfolgt im letzten Unterkapitel (3.2.4.5) eine zusammenfassende Gegenüberstellung der angewendeten Kriterien.

Tabelle 3-5: Reihenfolge der angewendeten Kriterien

Nr.	Kriterium
1.	Maximale Tiefenlage der Salzstrukturoberfläche
2.	Strukturaufbauendes Salinar („Salzqualität“)
3.	Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins
4.	Mindestfläche im Bereich der Vorzugsteufen für Wasserstoff und Druckluft

3.2.4.1 Kriterium maximale Tiefenlage der Salzstrukturoberfläche

Als erstes Kriterium und Salzstrukturmerkmal zur Vorauswahl untersuchungswürdiger Salzstrukturen wird die maximale Tiefenlage der Strukturoberflächen angewendet. Per Definition bezieht sich das Top einer Salzstruktur immer auf den höchsten Punkt der Hutgesteinsoberfläche. Das Hutgestein nimmt die obersten Teile der diskordant durchgebrochenen Salzstrukturen ein, die unter Einfluss von salzuntersättigten Grundwässern abgelaugt wurden und durch chemische Umwandlungsprozesse entstanden sind. Die Oberfläche kann in der Regel recht genau aus seismischen Profilen abgelesen werden. Wesentlich ungenauer kann der „Salzspiegel“ identifiziert werden, d. h. die Fläche an der Basis des Hutgesteins, die den intakten Salzkörper von dem abgelaugten Teil der Salzstruktur trennt. Dieser kann nur durch Bohrungen detektiert werden und ist im Gegensatz zur Hutgesteinsoberfläche durch geophysikalische Methoden nicht nachweisbar. Gleich-

wohl ist der Salzspiegel die wichtigste Referenzfläche, von der ab gegen die Tiefe wichtige gebirgsmechanische Parameter, wie z. B. die vertikale Hangendschwebe berechnet werden (Kapitel 4). Dennoch sind die Tiefenangaben in dieser Studie immer auf Hutgesteinsoberflächen bezogen, da sie für alle Strukturen relativ genau und flächendeckend bekannt sind oder ermittelt werden können. Für die Ermittlung des Salzspiegels müssen also zunächst die Hutgesteine näher betrachtet werden.

Die Mächtigkeiten dieser Residualgesteine variieren in Abhängigkeit von der Strukturgenese, den am Salzspiegel anstehenden Salzgesteinen und den lokalen hydrogeologischen Standortbedingungen und können mehrere Hundert Meter erreichen. Aus diesem Grund wurden durch die BGR alle erbohrten Hutgesteine, aus insgesamt 161 Salzstrukturen, in Teufenbereichen von 0 bis 1.600 m untersucht und nach ihren Mächtigkeiten ausgewertet (Abbildung 3-21). Sofern mehrere Bohrungen das Hutgestein einer Salzstruktur erteuft haben, wurde ein Mittelwert für die jeweilige Struktur gebildet.

Die Analyse der erbohrten Hutgesteinsmächtigkeiten lässt keine eindeutige Tiefenabhängigkeit erkennen. Die Mächtigkeiten schwanken sowohl in den oberflächennahen (2 - 374 m) als auch in den tiefer liegenden Salzstrukturen (bei ca. 1.000 m u. GOK Strukturtop: 2 - 145 m) erheblich. Diese Auswertung macht noch einmal deutlich, dass die Hutgesteinsmächtigkeiten von den oben aufgeführten Faktoren und nicht von der aktuellen Tiefe der Salzstruktur abhängig sind. Selbst oberhalb einer einzelnen Salzstruktur können die Hutgesteine sowohl in ihrer lithologischen Zusammensetzung als auch in ihrer Mächtigkeit beträchtlich schwanken. Das haben die Studien von Bornemann & Fischbeck (1986) und Bornemann et al. (2008) am Salzstock Gorleben eindeutig belegt. Daher macht es keinen Sinn eine tiefenabhängige Funktion zu benutzen, da die Fehler z. T. bei über 100 % liegen, wie es die Fehlerbereiche der Ausgleichsgerade in Abbildung 3-21 für unterschiedliche Tiefenabschnitte exemplarisch zeigen. Bezug nehmend auf den hohen Schwankungsbereich und den berechneten Gesamtmittelwert von 65 m, einigte man sich mit den Verbundpartnern auf eine sehr konservative Mächtigkeitsabschätzung von 100 m für alle Salzstrukturen, unabhängig von ihrer Tiefenlage. Diese geht in die gebirgsmechanischen Berechnungen (Kapitel 4), in den Kriterienkatalog (Kapitel 5) als auch in die Potentialermittlung (Kapitel 6) ein.

Nach Festlegung der Hutgesteinsmächtigkeit folgt nun die Ermittlung der maximal zulässigen Tiefenlage einer Salzstrukturoberfläche. Die Berechnung beruht darauf, wie hoch eine Salzstruktur im Untergrund aufgestiegen sein muss, um noch Druckluft- oder Wasserstoffkavernen in ihr realisieren zu können. Dazu wurde in den gebirgsmechanischen Berechnungen des IGtH der tiefstmögliche Punkt einer Kaverne hergeleitet. Ausgehend von diesem sog. Ansolpunkt und der Auslegung einer Minimalkaverne, ergab die Kalkulation der maximalen Tiefenlage einer Salzstruktur 1.468 m u. GOK mit einem Salztop bei 1.568 m u. GOK (Abbildung 3-22).

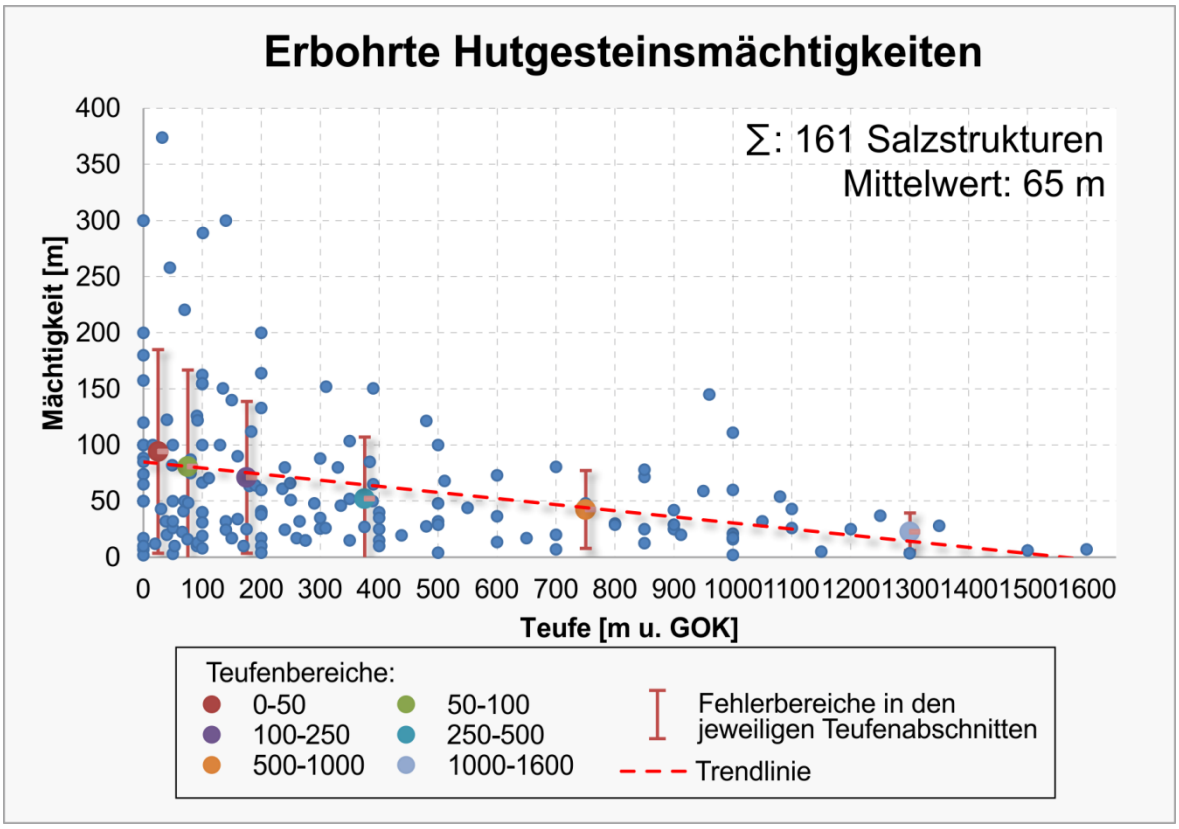


Abbildung 3-21: Mächtigkeitsverteilung von erbohrten Hutgesteinen
Sie zeigt keinen eindeutigen tiefenabhängigen Trend.

Im Verlauf des Verbundvorhabens stellte sich heraus, dass es auf Grund der vom IGtH vorgeschlagenen Vorzugsteufen für Kavernen und der Auflösung der Salzstrukturumrisse in 500 m-Schritten, keine Kavernenkonfiguration für das Tiefenintervall zwischen 1.500 m und 2.000 m u. NN gibt. Für die Anordnung von Druckluft- und Wasserstoffkavernen in einer Salzstruktur ist grundsätzlich ein Strukturtiefenschnitt in 1.000 m u. NN notwendig (Kapitel 6). Entsprechend wurde das Kriterium der maximalen Tiefenlage auf diesen Wert reduziert.

Die Auswertung dieses Kriteriums ergibt, dass von den insgesamt 697 Salzstrukturen im NGB, nur 329 bis oder über 1.000 m u. NN aufgestiegen sind (Abbildung 3-23). Damit entfallen über 50 % der Strukturen unter den von dem Konsortium getroffenen Auswahlkriterien aus der Potentialbetrachtung. In erster Linie sind davon die Salzkissen der permischen Salzgesteine betroffen, da sie zum einen durch ihre stratigrafische Position tief versenkt, und zum anderen durch ihr genetisches Frühstadium nicht hoch genug aufgestiegen sind. Dies erklärt, warum die meisten der ausgeschlossenen Strukturen in über 2.000 m Tiefe liegen (Abbildung 3-23).

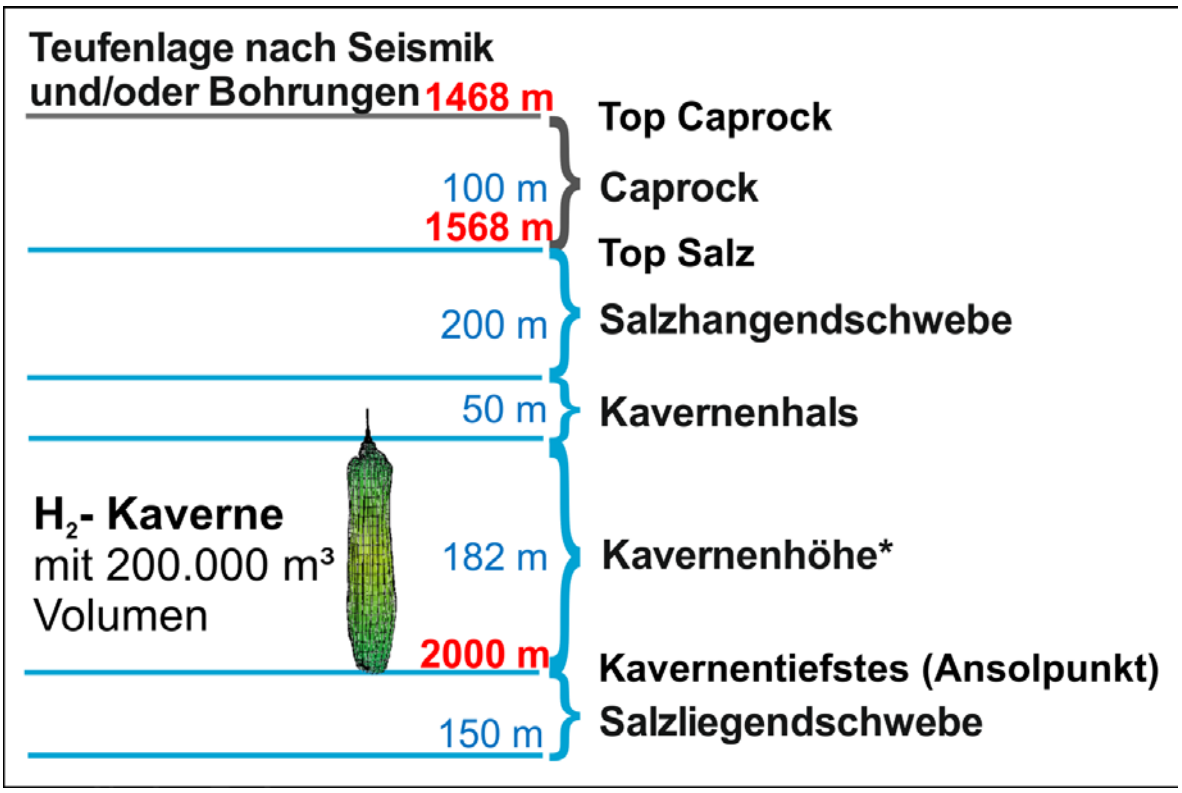


Abbildung 3-22: Ermittlung der maximalen Tiefenlage für Salzstrukturoberflächen anhand einer Wasserstoffkaverne mit 200.000 m³ geometrischem Hohlraumvolumen
Grundlage ist die Berechnung des IGtH für eine Minimalkavernenauslegung. Alle Angaben beziehen sich auf m u. GOK.

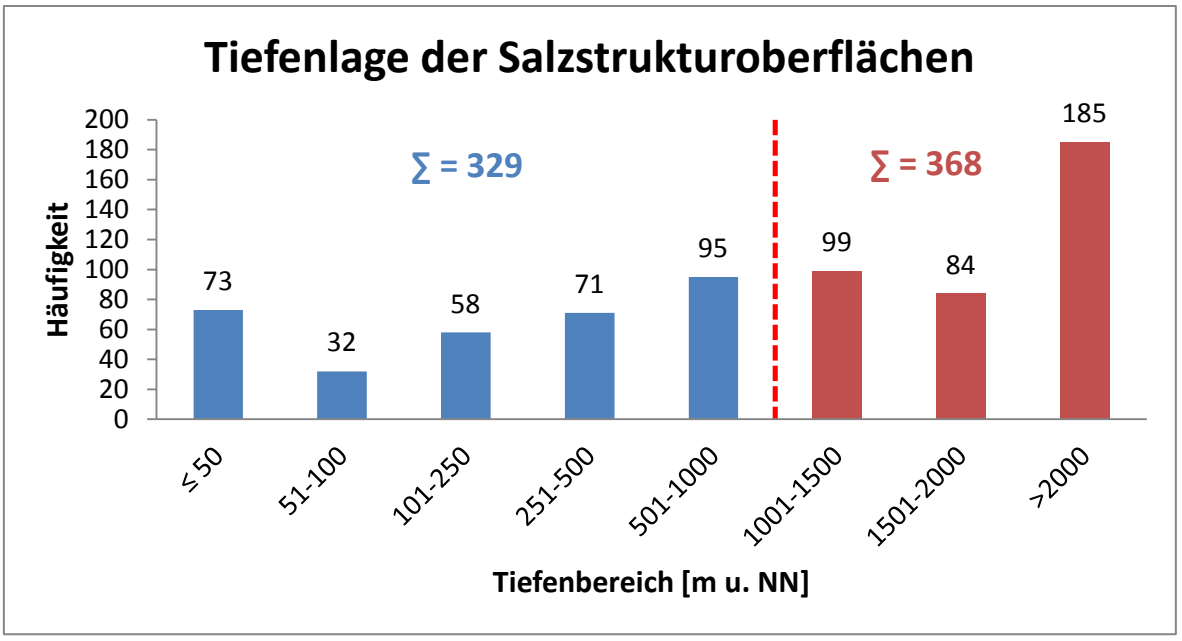


Abbildung 3-23: Tiefenlage der Salzstruktur-Oberflächen

Die roten Säulen repräsentieren zu tief im Untergrund liegende Salzstrukturen, die blauen hingegen erfüllen das Tiefenkriterium von maximal 1.000 m u. NN.

3.2.4.2 Kriterium Strukturaufbauendes Salinar

Als nächstes Kriterium soll hier das strukturaufbauende Salinar behandelt werden, da es direkten Einfluss auf das Speicherpotential einer Salzstruktur hat. Die verschiedenen Salzformationen (Abbildung 3-17) unterscheiden sich stark in ihrem lithologischen Aufbau sowie im Halit-Anteil damit in ihrer Salzqualität. Von dieser ist der Solprozess abhängig, der zur Herstellung von Hohlräumen und zum Bau von Kavernen dient. Einige Salzgesteine eignen sich dafür mehr, andere minder bis gar nicht, weshalb ihnen unterschiedlichen Solfaktoren zugeordnet wurden (Kapitel 6). Je besser der Solfaktor, desto geringer sind die Anteile unlöslicher Gesteine (z. B. Anhydrit oder Tonstein) und desto höher ist das aus der Solung resultierende Hohlraumvolumen. Genauso variieren die petrophysikalischen und thermischen Eigenschaften (Verformungs-, Bruchverhalten, Wärmeleitfähigkeit, Dichtigkeit, geochemisches Verhalten, etc.) bei unterschiedlich zusammengesetzten Salzgesteinen und hierdurch das gebirgsmechanische Verhalten einer entsprechenden Speicherkaverne.

In Kapitel 3.2.1 wurde gezeigt, dass besonders in NW-Deutschland Salzgesteine aus dem Mittleren Keuper von Interesse sind. Sie enthalten im Allgemeinen reines Steinsalz ohne Kalisalze und führen relativ wenig Anhydrit. Ihrer Nutzung als Wirtsgestein für Kavernenspeicher stehen jedoch Hindernisse entgegen. Bei den Salzgesteinen handelt es sich um acht, z. T. voneinander getrennte einzelne Salzlager, die im Norddeutschen Becken in stark variierenden Mächtigkeiten abgelagert worden sind. Fünf Salzlager (A bis E) sind der älteren Grabfeld-Formation (km1) zugeordnet und drei (F bis H) gehören zur jüngeren Weser-Formation (km3; Beutler et al. 1999; Reinhold et al. 2014). Beide Halitgruppen können unabhängig voneinander strukturbildend sein (Abbildung 3-19). Besonders mächtige und reine Steinsalzpartien sind dabei im Lager H zu finden (Baldschuhn et al. 2001). Leider sind diese Strukturen grundsätzlich schlecht und kaum durch Bohrungen erkundet (Kapitel 3.2.2). Hinzu kommt, dass die Salzgesteine in unterschiedlichen Lagern vorkommen und auf Grund dessen geophysikalisch schwer nachweisbar sind. Darüber hinaus befinden sich die akkumulierten Salzschichten zwischen zwei registrierbaren seismischen Reflektoren, wodurch sich ihre Mächtigkeiten und räumlichen Ausmaße nur sehr ungenau ermitteln lassen. Aus diesem Grund fehlen in den Niveauschnittkarten auch die Flächendarstellungen dieser Salzkörper. Diese sind wiederum für eine Potentialbestimmung zwingend erforderlich. Die genannten Gründe machen es daher nicht möglich, Keupersalzstrukturen in dieser Studie näher zu betrachten. Die einzige Ausnahme bilden die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen „Tripelsalinar-Strukturen“. In ihnen ist keine räumliche Trennung der vermengten Keupersalze und permischen Evaporite

möglich (Abbildung 3-19). Infolgedessen entfallen diese Strukturen nicht durch dieses Kriterium aus der näheren Potentialbetrachtung.

Salzkissen, die aus oberjurassischen Salzgesteinen (Obermalm 3-5, „Münder-Mergel“) halokinetisch gebildet wurden, sind mit zahlreichen tonigen und anhydritischen Zwischenmitteln durchsetzt, wodurch die einzelnen Steinsalzlager voneinander getrennt sind. Zusammenhängende Steinsalzbereiche von maximal 150 m konnten nur in den schwach aufgewölbten Salzstrukturkernen nachgewiesen werden (Frisch 1985; Baldschuhn et al. 2001; Reinhold et al. 2014) und sind für eine Speicheranlage zu geringmächtig. Aus den gleichen Gründen wie bei den Keupersalinaren, fehlen auch für diese Strukturen Daten zu den lateralen Erstreckungen der Salzkörper. Schlussfolgernd werden auch die Salzlagerstätten des Oberjura als Speicherstandorte ausgeschlossen.

Ein weiterer Grund der Nichtberücksichtigung der strukturaufbauenden Salinare des Oberjura und Mittleren Keuper in dieser Studie ist ein erhöhter, bislang noch kaum abschätzbarer Forschungsbedarf, der einen wirtschaftlichen Nachteil für die Errichtung von Speicherkavernen darstellt. Im Vergleich zu den permischen Salzgesteinen - hier sind v. a. jene aus dem oberpermischen Zechstein gemeint - liegen nur wenig Daten zu den petrophysikalischen Eigenschaften dieser Wirtsgesteine vor (Kockel & Krull 1995). Durch das Fehlen wichtiger Parameter können keine Berechnungen zum gebirgsmechanischen Langzeitverhalten durch das IGtH durchgeführt werden. Außerdem wurden in Norddeutschland bislang noch keine Speicherkavernen in diesen Gesteinen realisiert, wodurch wichtige Erfahrungen zur Solfähigkeit, auch im Vergleich zu den permischen Salzformationen, fehlen. Gerade die aus oberjurassischen Salinaren bestehenden Strukturen, die über eine enge Tonstein-Anhydrit-Steinsalz-Wechsellagerung verfügen, müssten dazu näher untersucht werden, was im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens nicht möglich war.

In den Strukturen aus Oberrotliegend- und Zechsteinsalzen wurden hingegen in den letzten 45 Jahren über 300 Speicherkavernen in Betrieb genommen. Insbesondere bei Zechsteinsalzstrukturen wurden genügend zusammenhängende, solfähige und reine Steinsalzpartien nachgewiesen (z. B. Ahlborn & Richter-Bernburg 1953; Middendorf & Kühn 1966; Jordan 1969; De Boer 1971; Richter-Bernburg 1980, 1987; Schachl 1987; Käding 2005). Hier sind vorzugsweise die homogenen, anhydritarmen und mächtigen Gesteine der Staßfurt-Formation (Abbildung 3-17) zu nennen. Sie sind durch ihre hohe Mobilität hauptverantwortlich für den Salzaufstieg und die Strukturbildung. Aber auch im Oberrotliegendsalinar, das durch sein ungeschichtetes Salz-Ton-Gemisch auch als „Haselgebirge“ bezeichnet wird, konnten trotz des zwischen 20 % und 50 % (Reinhold et al. 2014) wechselnden Tongehaltes Kavernen in schleswig-holsteinischen Salzstrukturen soltechnisch hergestellt werden (Sedlacek 2014). Demzufolge sind die petrophysikalischen Eigenschaften beider Gesteine bekannt. Im Gegensatz zu den zuvor

ausgeschlossenen Salzstrukturen gibt es zur Morphologie dieser Salzstrukturen, und damit zum Ausmaß ihrer Salzkörper, relativ genaue Angaben. Sie können in den Niveauschnittkarten als Strukturumrisse dargestellt und für die Potentialbewertung verwendet werden. Auch die Anteile und Verteilungen der potentiellen Wirtsgesteine sind bekannt. Doch darauf soll erst bei der Modellierung dieser Strukturen im Kapitel 3.3 eingegangen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass 15 der insgesamt 33 Strukturen, die ausschließlich durch Salzgesteine des Mittleren Keupers oder des Oberjuras aufgebaut werden, zwar hoch genug liegen, aber das Kriterium der Salzqualität nicht erfüllen. Zur weiteren Bearbeitung verbleiben demnach noch 314 Salzstrukturen.

3.2.4.3 Kriterium Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins

Dieses Kriterium beschreibt die Mindestmächtigkeit eines Wirtsgesteins, die innerhalb einer Salzstruktur existieren muss, um Kavernen der Minimalauslegung darin realisieren zu können. Sie ergibt sich aus der Kavernenhöhe selbst, sowie den sicherheitsrelevanten Schweben, die im Liegenden und Hangenden der Modellkaverne vorhanden sein müssen (Abbildung 3-22). Ähnlich wie bei der Ermittlung der maximalen Tiefenlage von Salzstrukturen, vereinfachte man den Umgang mit der zunächst rechnerisch festgelegten Mindestmächtigkeit. Die Vorgaben des IGtH sahen dabei, je nach Tiefenlage der Salzstruktur und nach Abzug der Hutgesteinsmächtigkeit (100 m), Wirtsgesteinsmächtigkeiten zwischen 452 m und 582 m vor. Allerdings müssen für die dreidimensionale Ausdehnungsdarstellung einer Salzstruktur mindestens zwei Strukturumrisse aus dem AP 1 existieren. Diese müssen, um auch entsprechende Modellkavernen im Salzkörper platzieren zu können, zusätzlich in zwei aufeinanderfolgenden Tiefen (z. B. 500 und 1.000 m u. NN) liegen. Dazwischen einsetzende oder ausstreichende Salzbereiche können nicht berücksichtigt werden, da der tatsächliche Verlauf nicht bekannt ist und somit zu einer hohen Unsicherheit der als vorhanden anzusetzenden Fläche führen würde.

Die Auswertung ergab, dass das Wirtsgestein bei nur zwei Salzstrukturen zu geringmächtig für eine Kavernenanlage ist. Für weitere sechs Strukturen griff dieses Kriterium, weil die Anzahl der Strukturumrisse nicht ausreichte oder diese in nicht benachbarten Tiefen lagen. Die geringe Wirtsgesteinsmächtigkeit dieser Strukturen kann verschiedene Ursachen haben. Die meisten von ihnen verfügten, durch ihre paläogeografische Position am Beckenrand, über bereits primär reduzierte Salzlager, die selbst nach sekundärer Akkumulation für eine Modellkaverne nicht ausreichend mächtig sind. Des Weiteren können so genannte Sockelaufwölbungen dazu führen, dass Salzstrukturen in das Erosions- und Subrosionsniveau gehoben werden, wodurch ihre Mächtigkeiten stark reduziert werden. Als Beispiel soll hier die ausgeschlossene Struktur „Beesenlaublinger

Gipsstock“ dienen, die nur noch 300 m mächtig ist und infolge intensiver Subrosion überwiegend aus residualem Hutgestein besteht. Unterm Strich gehen noch 306 Salzstrukturen in die Anwendung des nächsten und gleichzeitig letzten Kriteriums ein.

3.2.4.4 Kriterium Mindestfläche im Bereich der Vorzugsteufen für die Wasserstoff- und Druckluftspeicherung

Das letzte Prüfkriterium, welches durch die BGR auf die verbleibenden, potentiell geeigneten Salzstrukturen angewendet wurde, ist die Mindestfläche einer Salzstruktur, die im Niveau der geplanten Kavernen benötigt wird. Eigens dafür wurde ein Flächenwerkzeug entwickelt, das die jeweiligen Strukturumrisse in den Vorzugstiefen der Druckluft- und Wasserstoffspeicherung überprüft. Dabei wurde vom Konsortium als Mindestanforderung für die Errichtung einer Speicheranlage ein Flächenpotential von mindestens drei Kavernen angesehen. Je nach Anordnung dieser Kavernen (Abbildung 3-24) ergibt sich der dafür erforderliche Flächenbedarf, der sich auf die Berechnungen des IGtH stützt.

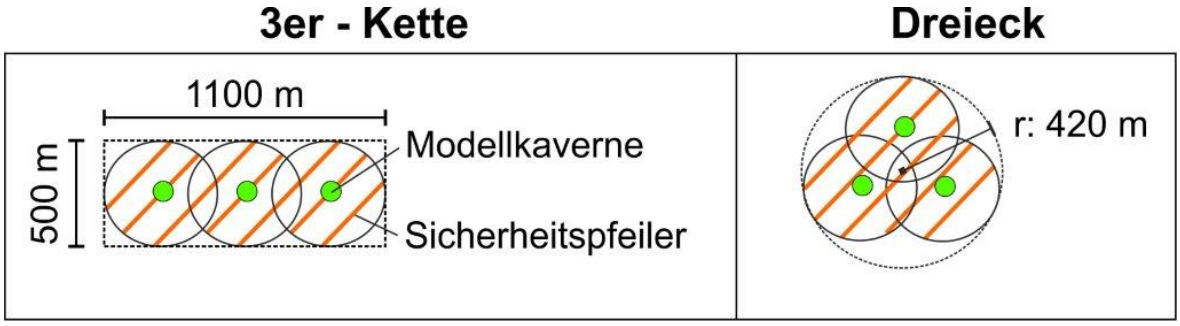


Abbildung 3-24: Mindestflächenanforderungen für eine Speicheranlage mit mindestens drei Kavernen in zwei unterschiedlichen Anordnungen

Die Anzahl der zu überprüfenden Umrisse innerhalb einer Salzstruktur hängt vom Speichermedium und der dafür benötigten Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins ab. Für die Druckluftkavernenauslegung wurden zwei aufeinanderfolgende Tiefenschnitte (Vorzugstiefe: 500 - 1.000 m) geometrisch miteinander verschnitten und anschließend geprüft, ob die Minimalfläche der Kavernenauslegungen in das resultierende Polygon passt. Entsprechend wurde diese Prüfung auf die Wasserstoffkavernenauslegung mit drei aufeinanderfolgen Niveauschnitten (Vorzugstiefe: 1.000 - 2.000 m) angewendet. Da der Strukturverlauf zwischen den einzelnen Umrissen unbekannt ist, wurden die Tiefenschnitte senkrecht, also zylinderförmig miteinander verschnitten. Zum besseren Verständnis wird dieses Verfahren exemplarisch anhand zweier Strukturbeispiele präsentiert. In den Salzdiapiren Töps (Abbildung 3-25) und Netzeband (Abbildung 3-26) wird jeweils eine Realisierung von Speicherkavernen in der Kettenanordnung begutachtet. Die

Struktur Töps verfügt in den für die Potentialabschätzung relevanten Tiefen über zu geringe Ausmaße und kann das Flächenkriterium nicht erfüllen. In diesem Fall wurde die Struktur nach separater Überprüfung durch das AP 5 aus der Potentialanalyse gestrichen. Durch diese Methode konnten insgesamt 38 Salzstrukturen identifiziert werden, die den Flächenbedarf nicht decken konnten. Dabei handelt es sich entweder um kleine oder sehr schmale Strukturen. Demgegenüber war eine Platzierung des Minimal-Rechtecks im Salzkörper der Struktur Netzeband (Abbildung 3-26) und bei insgesamt 269 Salzstrukturen möglich.

Es sollte darauf geachtet werden, dass dieses Flächenwerkzeug zur Reduzierung der Anzahl der untersuchungswürdigen Salzstrukturen verwendet wurde und es nicht dazu dient, Potentialvorhersagen zu treffen. Der angewendete Algorithmus prüft lediglich den gesamten Strukturbereich der verschnittenen Flächen und berücksichtigt dabei nicht die Verteilung und die jeweiligen Anteile der solfähigen Wirtsgesteine. Zwar wurden diese Faktoren für bestimmte Salzstrukturtypen in der 3D-Modellierung ermittelt (Kapitel 3.3.4), sie konnten aber in der Datenbank nicht automatisiert überprüft werden und fanden daher erst bei der Einzelstrukturbetrachtung des AP 5 Berücksichtigung. Dennoch können durch dieses Verfahren Strukturen ohne weiteres ausgeschlossen werden, bei denen bereits die unkorrigierte Gesamtfläche in den vorgegeben Tiefen nicht ausreicht. Gleichermaßen müssen Salzstrukturen, die diesen Algorithmus passiert haben, nicht zwangsläufig Potentiale zur Speicherung von regenerativen Energien besitzen. Ihre Tiefenschnitte müssen noch an die vom jeweiligen Strukturtyp abhängigen nutzbaren Anteile und an die gebirgsmechanischen Vorgaben angepasst werden. Dazu ist für jede der 269 potentiell geeigneten Salzstrukturen eine eigene Modellierung sowie Potentialanalyse notwendig und in der Form auch vom AP 5 durchgeführt worden.

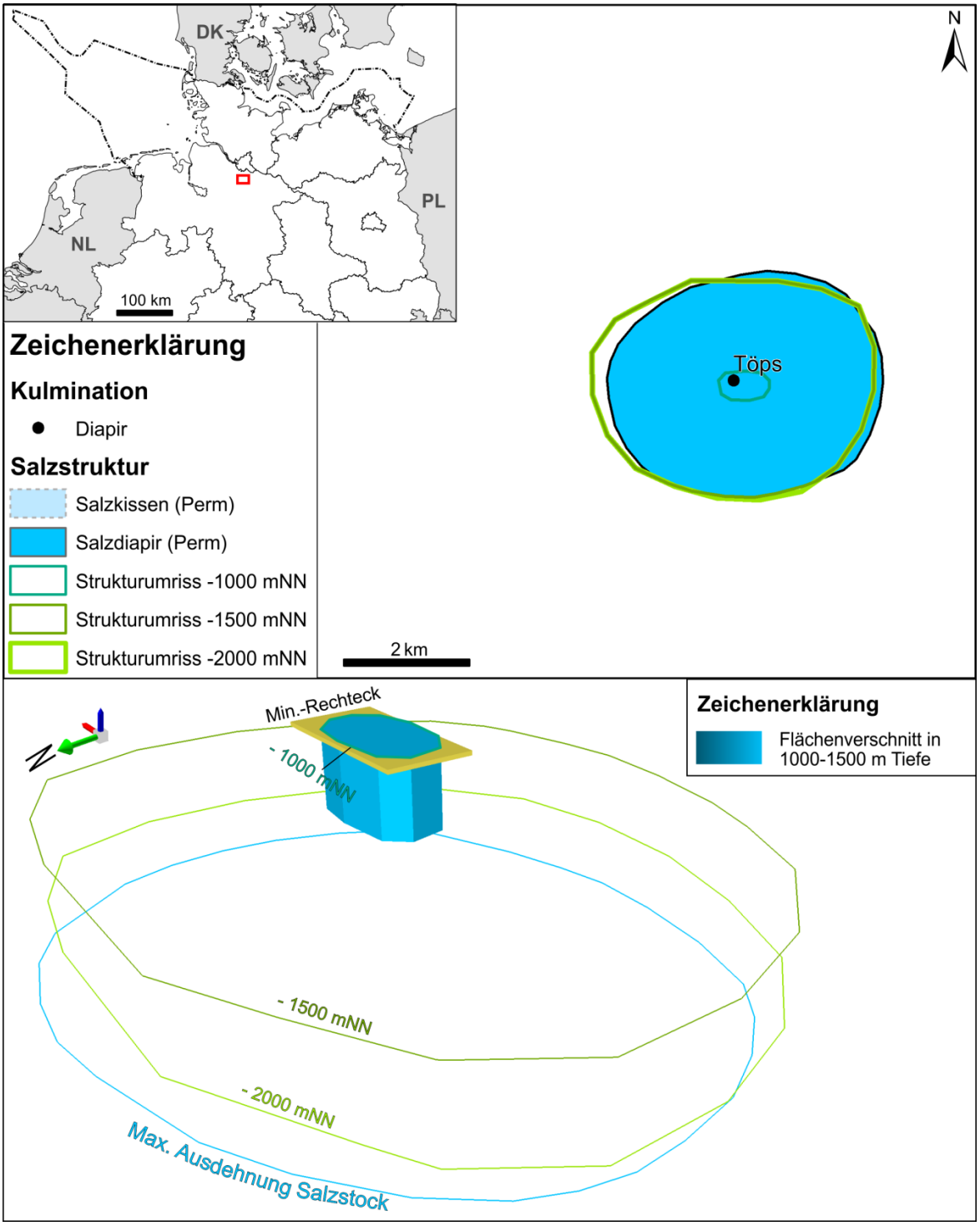


Abbildung 3-25: Anwendung des Flächenalgorithmus auf das Strukturbeispiel Töps
Die Salzstruktur ist bis ca. 1.000 m u. NN aufgestiegen und es resultieren drei Strukturumrisse in 1.000 m, 1.500 m und 2.000 m Tiefe. Durch die relative geringe Fläche in 1.000 m Tiefe ist eine Platzierung des Minimal-Rechtecks (500x1.100 m) im Verschnitt zwischen 1.000 m und 1.500 m nicht möglich. Das Flächenkriterium wurde nicht eingehalten und die Struktur Töps nicht weiter betrachtet. Weiterhin fällt auf, dass die Umrisse die vorgegebene Maximalausdehnung der Struktur überschreiten.

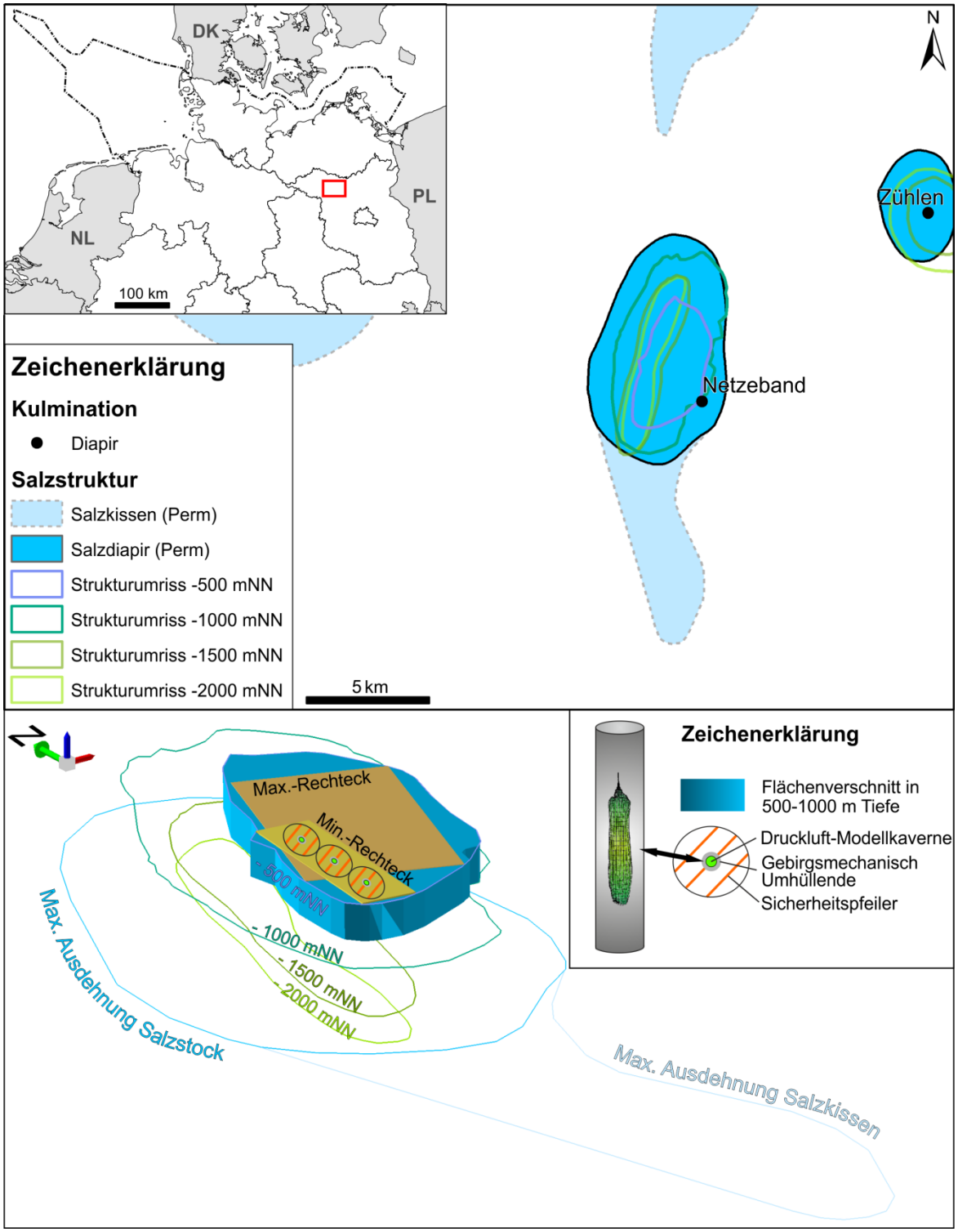


Abbildung 3-26: Anwendung des Flächenalgorithmus auf das Strukturbeispiel Netzeband
Die Verschneidung der Strukturumrisse in 500 m und 1.000 m Tiefe ergibt den blauen Volumenkörper. Darin ist die Platzierung des Minimal-Rechtecks (500 m x 1.100 m, mit drei Modellkavernen in Reihe) möglich, wodurch das Flächenkriterium für diesen Tiefenbereich erfüllt ist.

3.2.4.5 Zusammenfassung und Auswahl potentiell geeigneter Salzstrukturen

Die Anwendung der oben genannten Kriterien liefert eine erste Beurteilung zur Untersuchungswürdigkeit der norddeutschen Salzstrukturen. **269 (39 %) von insgesamt 697 Salinarstrukturen erfüllen die vom Konsortium gestellten Anforderungen und gehen in die Potentialanalyse über.** Die dazugehörigen kavernenbaurelevanten Informationen und Tiefenschnitte der zu bewertenden Salzstrukturen wurden exportiert und an den Verbundpartner KBB UT übergeben. Die Auflistung in Anhang 3-1 und eine Übersicht in Anhang 3-5 dokumentieren, dass sich über die Hälfte der untersuchungswürdigen Strukturen in Niedersachsen befindet.

Eine Gegenüberstellung der Kriterien macht deutlich, dass die meisten ausgeschlossenen Strukturen am Tiefenkriterium scheitern (368), weil sie für eine Speicheranlage zu tief im Untergrund liegen (Abbildung 3-27). Hier gilt jedoch zu beachten, dass in diesen 368 Strukturen 99 Strukturen enthalten sind, die auf Grund ihrer Teufe nicht generell auszuschließen sind sowie, dass dieses Kriterium das zuerst angewendete darstellt. Überdies sind einige kleine oder schmale Salzstrukturen durch zu geringe Ausdehnungen in den kavernenbaurelevanten Tiefen gekennzeichnet. Andere Strukturen entfallen aus der näheren Betrachtung, weil ihre Salzgesteine stark mit nicht solfähigen Komponenten durchsetzt sind und demzufolge die Salzqualität nicht ausreicht. Nur vereinzelt und in sehr flachen oder stark erodierten Beckenbereichen kann die Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins in einer Salzstruktur nicht sichergestellt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass Strukturen, die hier aus der weiteren Betrachtung herausfallen, nicht grundsätzlich für die Errichtung von Speicherkavernen für regenerative Energien ungeeignet sind. Gleichermaßen können sich potentiell geeignete Strukturen, nach genauerer Betrachtung der geologischen Situation und anderer Aspekte, wie z. B. oberirdischer Nutzungskonkurrenz, als ungeeignet erweisen (Kapitel 5). Sie haben lediglich eine strukturgeologische Vorprüfung bestanden. Im Rahmen einer expliziten Konzeptentwicklung für ein Speichersystem ist daher immer eine Einzelfallbetrachtung erforderlich. Dafür sind in jedem Fall, neben der Bereitstellung standortspezifischer Informationen durch die Landesämter, zusätzliche geophysikalische Strukturuntersuchungen und Erkundungsbohrungen notwendig. Weiterhin sollte beachtet werden, dass 28 von den untersuchungswürdigen Strukturen komplett oder zu großen Teilen im Offshorebereich liegen.

Auffällig ist, dass viele der schlecht erkundeten Salzstrukturen durch die Kriterienanwendung aus der näheren Potentialbetrachtung entfallen sind und sich dadurch die Verhältnisse im Erkundungsgrad deutlich verschoben haben (Abbildung 3-20, Abbildung 3-28). Nur noch ein gutes Drittel der untersuchungswürdigen Salinarstrukturen ist bislang noch nicht durch Bohrungen aufgeschlossen worden.

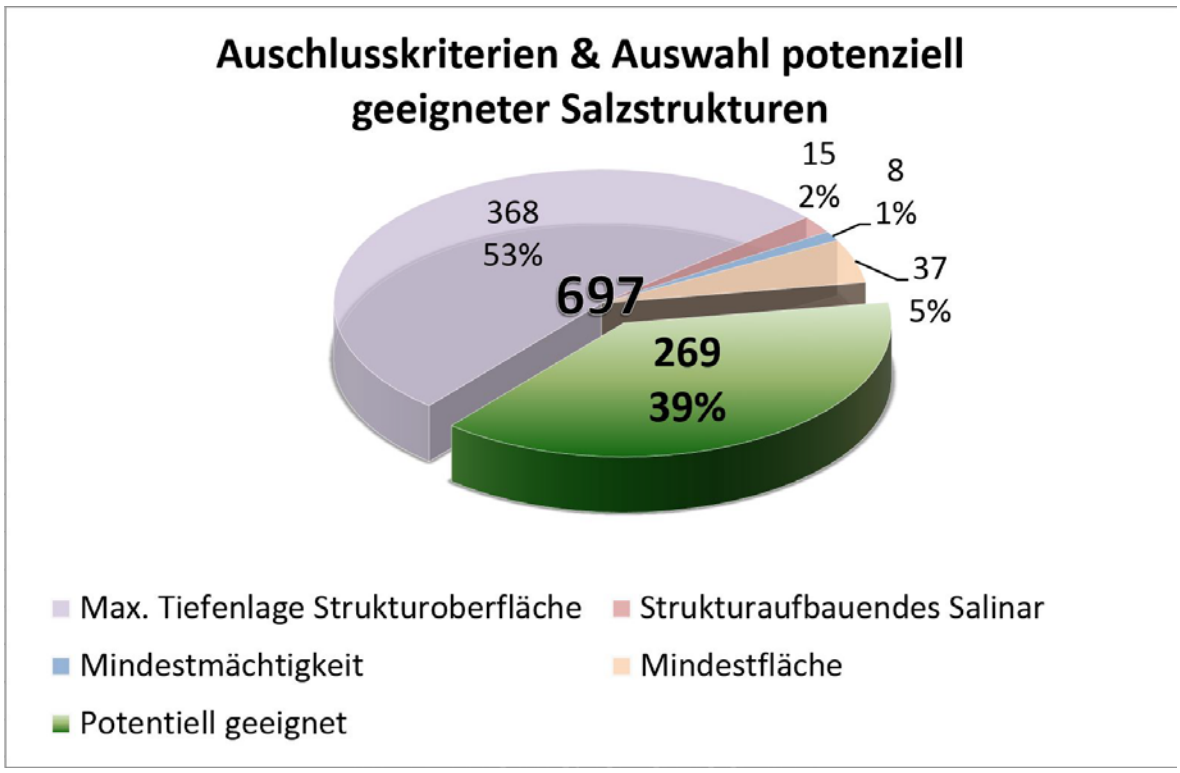


Abbildung 3-27: Gegenüberstellung der Ausschlusskriterien bei der Auswahl potentiell geeigneter Salzstrukturen

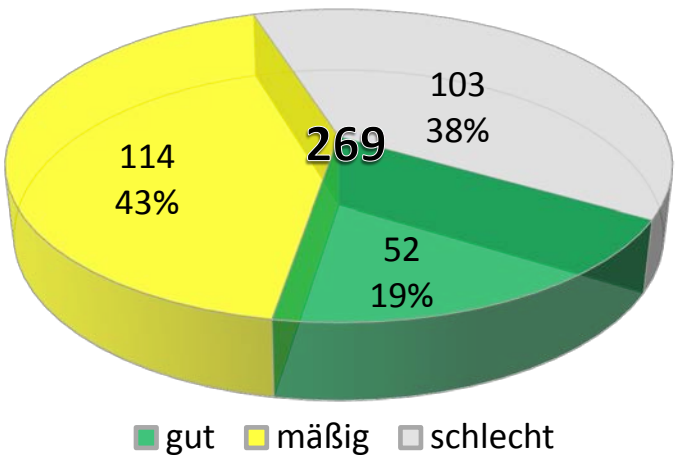


Abbildung 3-28: Erkundungsgrad der ausgewählten untersuchungswürdigen Salzstrukturen im Norddeutschen Becken
siehe Tabelle 3-3 für das Bewertungsschema.

3.3 3D-Modellierung und Prognose des Internbaus

3.3.1 Aufgabenstellung und Ziele

Für die quantitative Abschätzung des Speicherpotentials der Salzstrukturen ist es nötig, den zur Anlage von Kavernen zur Verfügung stehenden Bereich abzuschätzen. In den bisher vorliegenden Studien (z. B. Gillhaus et al. 2006; Fichtner 2014) wurde das Speicherpotential norddeutscher Salzstrukturen eher qualitativ beurteilt, indem Eingangsgrößen sowohl aus dem geologischen Bereich als auch aus dem gebirgsmechanischen Bereich miteinander kombiniert wurden. Anhand der Tiefenlage des Strukturtops unter der Geländeoberfläche wurden Strukturen vorausgewählt, in deren Maximalumriss dann ein Raster aus Modellkavernen projiziert wurde.

Innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens wurden innerhalb der AP 1 und 3 diese Eingangsgrößen präzisiert:

1. Geometrie der Struktur

Die Tiefenlage des Topbereichs unter Geländeoberfläche, die Maximalausdehnung der Struktur sowie die Flächengröße in vier definierten Tiefenlagen sind im Informationssystem Salzstrukturen abgelegt und in den Niveauschnittkarten dargestellt (Kapitel 2.2) und beschreiben die räumliche Ausdehnung aller Salzstrukturen.

2. Dimensionierung der Kavernen

In die Strukturen werden die im AP 3 definierten Modellkavernen projiziert, die in Abstimmung mit AP 4 festgelegte Werte für Tiefenlage, Höhe und Durchmesser sowie Sicherheitsabstände untereinander und zum Strukturrand haben.

Einschränkend auf die Realisierbarkeit der Kavernen wirken Inhomogenitäten innerhalb der Salzstrukturen. Diese sind aus Zechsteinsalz unterschiedlicher Folgen bzw. bei den Doppelsalinaren aus Zechsteinsalzen unterschiedlicher Folgen und Oberrotliegendsalinar aufgebaut. Die Salinare unterscheiden sich hinsichtlich ihres Anteils an unlöslichen Bestandteilen (Ton, Anhydrit) und damit auch hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung für den Kavernenbau. Innerhalb jeder Salzstruktur gibt es somit geeignete und nicht oder nur bedingt geeignete Salinargesteine für die Anlage von Kavernen. In den weniger gut geeigneten Salinaren können prinzipiell auch Kavernen gesolt werden, dabei verkleinert sich jedoch das realisierbare Volumen u. U. erheblich.

Entscheidend für den Übergang von einer qualitativen zu einer quantitativen Abschätzung des Speichervolumens ist daher die Prognose des Internbaus der Salzstrukturen, um so den tatsächlich für die Anlage von Kavernen gut geeigneten Bereich bestimmen zu können.

Innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens wurden daher nur diejenigen Salinare als Wirtsgestein für den Kavernenbau betrachtet, die die größten Homogenbereiche innerhalb der Salzstrukturen bilden und günstige Soleigenschaften besitzen. Für die Bildung von Klassen gleichen Internbaus ist der entscheidende Faktor, wo in den Salzstrukturen das gesuchte Wirtsgestein anzutreffen ist und wie groß dessen Anteil im Verhältnis zur Gesamtstruktur ist. Bei den nur aus Zechsteinsalz aufgebauten Strukturen ist das Wirtsgestein das Salz der Staßfurt-Folge (z2), das primär mit großer Mächtigkeit und geringen Anhydritanteilen abgelagert und durch den Salzaufstieg zusätzlich homogenisiert wurde. Bei den Doppelsalinaren wird das Oberrotliegendsalinar (ro) als Wirtsgestein betrachtet, da es den zentralen Bereich der Strukturen bildet und in sich weitgehend homogen sein soll.

Durch den Salzaufstieg bei der Bildung der Salzstrukturen liegen die Zechsteinsalinare heute nicht mehr in ihrer ursprünglichen flachen Lagerung, sondern sind mehr oder weniger intensiv miteinander verfaltet:

- Das älteste Salinar der Werra-Folge (z1) ist nicht am Salzaufstieg beteiligt und bildet die Basis der Struktur,
- Das Salinar der Staßfurt-Folge (z2) ist am mobilsten und hauptsächlich am Salzaufstieg beteiligt, es bildet daher innerhalb der Struktur den sog. „Haupt-aufstiegsbereich“,
- Die Schichten der jüngeren Salinare der Leine- und Aller-Folge (z3 und z4), wurden durch den Aufstieg des z2 mitgeschleppt und verfaltet.

Die Doppelsalinare unterscheiden sich von den Zechsteinsalzstrukturen darin, dass Oberrotliegendsalinar mit aufgestiegen ist und ihre zentralen Bereiche bildet. Die Zechsteinschichten liegen bei den Doppelsalinaren in den Randbereichen und sind miteinander verfaltet.

Für eine quantitative Abschätzung des realisierbaren Speichervolumens aller Salzstrukturen Norddeutschlands ist es entscheidend, nicht nur für bereits erkundete, sondern auch für noch nicht oder nur teilweise erkundete Strukturen Abschätzungen treffen zu können:

1. Wie groß ist der Flächenanteil des betrachteten Wirtsgesteins (z2 bzw. ro) in der Salzstruktur in den im Verbundvorhaben betrachteten Tiefenlagen bis 2000 m u. NN im Verhältnis zur Gesamtfläche? Wie viele Kavernen können somit potentiell in dieser Struktur realisiert werden?
2. Welche räumliche Verteilung des Wirtsgesteins (z2 bzw. ro) und der übrigen Salinare ist innerhalb der Struktur zu erwarten? Untersuchungsmethoden wie Bohrungen, Seismik oder Georadar können effektiver und damit kostengünstiger

für die detaillierte Internbau-Erkundung eingesetzt werden, wenn ein erstes plausibles Konzept für den Internbau bereits vor der Erkundung vorliegt.

Wichtiges Ziel innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens war daher die Neuentwicklung einer Methodik zur Prognose des Internbaus unverritzter oder nur teilweise erschlossener Strukturen.

3.3.2 Bisheriger Stand von Wissenschaft und Technik

Aussagen über den Internbau einer Struktur basieren auf den Ergebnissen ober- und untertägiger Erkundung. Erste Prognosen zum Internbau einer Struktur erfolgen i. d. R. anhand von Tiefbohrungen, die das Salinar aufgeschlossen haben. Diese Prognose kann präzisiert werden durch detaillierte Kartierung von Schichtgrenzen und Faltenachsen im Rahmen der untertägigen Erkundung, wenn die Struktur bereits bergbaulich erschlossen ist oder ein neues Grubengebäude aufgefahren wurde.

Daher sind detaillierte Darstellungen des Internbaus von Salzstrukturen weitestgehend auf diejenigen Strukturen beschränkt, die bereits wirtschaftlich genutzt werden oder als potentieller Kavernen- oder Endlagerstandort erkundet worden sind. Darüber hinaus gibt es für weitere Strukturen Erdöl-/Erdgas-Erkundungsbohrungen, die das Salinar durchteuft oder über eine größere Strecke erbohrt haben, so dass auch für diese Strukturen zumindest in Teilbereichen Aussagen zum Internbau möglich sind.

Inhaltlich beschränken sich bisherige Publikationen zum Internbau von Salzstrukturen meist auf die Lokalisierung des zentralen Aufstiegsbereichs und die Beschreibung der Richtung und Intensität der Verfaltung des älteren und jüngeren Zechsteinsalzes. Der Schwerpunkt liegt je nach Nutzungsart in der Ausweisung des Wirtsgesteins für Kavernenbau und Endlagerung oder der Darstellung der Kaliflöze und Steinsalzlager (Salzbergbau).

Die veröffentlichten Erkundungsergebnisse und deren Interpretationen sind größtenteils strukturbezogen (Kapitel 3.1). Vergleichende Aussagen zu unterschiedlichen Strukturen wurden dagegen bislang eher selten publiziert (z. B. De Boer 1971). Das ist darin begründet, dass ein Großteil der Erkundungsdaten Eigentum des jeweiligen Auftraggebers ist und nicht öffentlich zur Verfügung steht.

Ein Vergleich verschiedener Strukturen wurde beispielsweise im Bericht zur untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben vorgenommen (Bornemann 1991; Bornemann et al. 2008). Dabei wurden Sohlenrisse aus verschiedenen, durch bergbauliche Nutzung gut erkundeten Strukturen miteinander verglichen, um aus der räumlichen Verteilung der älteren und jüngeren Salinare einen generellen Internbaustil abzuleiten. Ziel war, aus den Ergebnissen der Tiefbohrungen in Gorleben auf den Interbaustil der Gesamtstruktur schließen zu können (Abbildung 3-29).

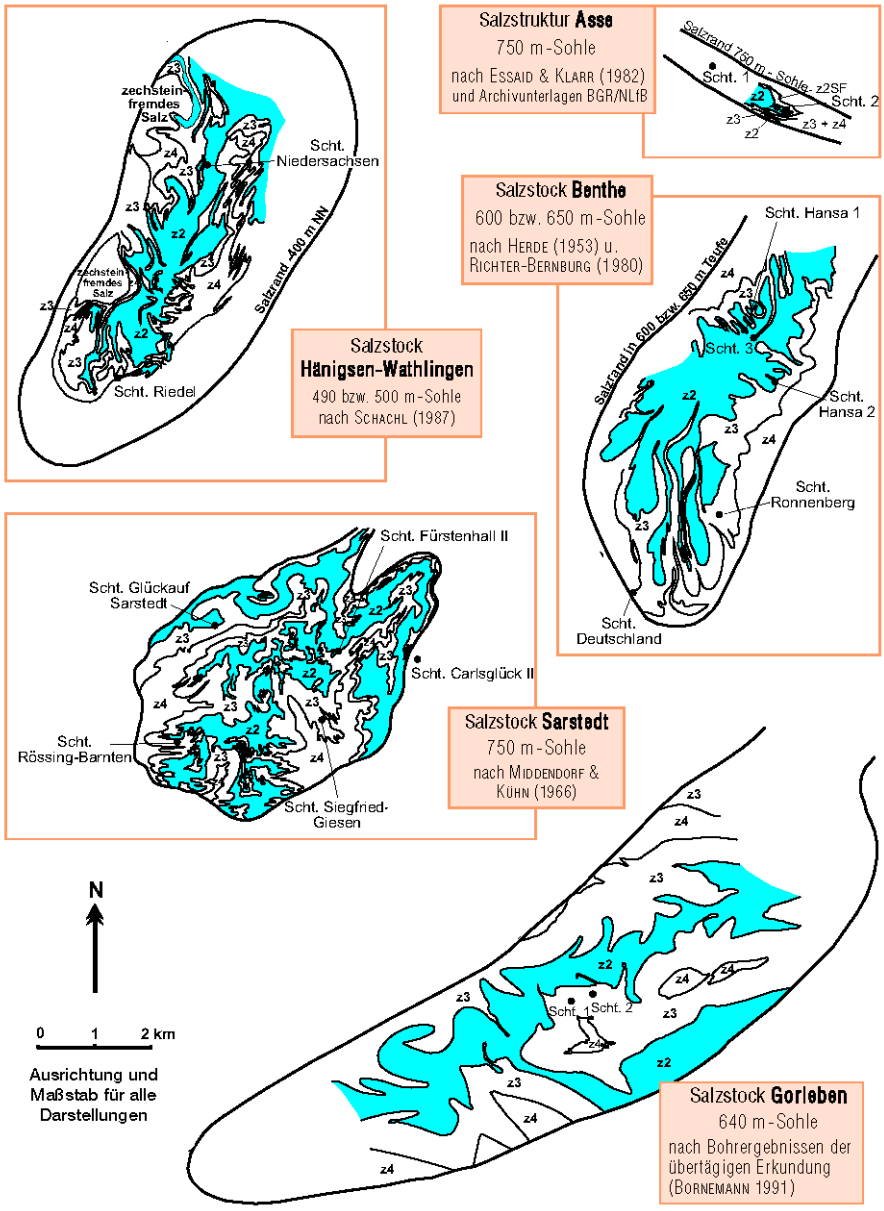


Abbildung 3-29: Geologische Sohlenrisse von Salzstrukturen mit Darstellung der z2-Verbreitung
(Bornemann et al. 2008)

Nach Bornemann et al. (2008) bestehen Abhängigkeiten zwischen der äußeren Form der Salzstruktur, der Art und Anordnung der Falten sowie der Intensität der Verfaltung (vgl. Abbildung 3-29). Danach weisen rundliche und kleine ovale Salzstöcke einen äußerst komplizierten Internbau auf (Struktur Sarstedt), während bei lang gestreckten, ovalen Diapiren die Verfaltung weniger komplex ist und einer Vorzugsrichtung folgt (Gorleben).

Die Untersuchungen von Bornemann geben damit einen Hinweis auf die Intensität der Verfaltung, lassen aber durch die fehlende dritte Dimension keine Aussagen zum verti-

kalen Verlauf der Falten zu. Horizontale Sohlenrisse können auch bei Strukturen mit unterschiedlichem Internbau ähnlich aussehen und sind daher als alleinige Datenquelle nicht ausreichend.

Eine zuverlässigere Vorhersage des Internbaustils ist auf der Basis vertikaler Schnitte oder im Idealfall eines kompletten 3D-Modells der Struktur möglich. Für die Planung und Durchführung der Standorterkundung wurden daher für eine Reihe von Kavernenstandorten (Fleig 2005) sowie für die Strukturen Gorleben und Morsleben innerhalb der letzten 15 Jahre in der BGR 3D-Modelle erstellt, die maßgeblich zum besseren Verständnis der Verfaltung des Zechsteinsalinars innerhalb der Strukturen beigetragen haben (Bornemann et al. 2008; Behlau 2013; Fleig & Kühnlenz 2013). So wurde beispielsweise ein 3D-Modell des unverritzten Teils der Struktur Etzel zur Prognose des Internbaus konstruiert (Wilke et al. 2004; Kleinefeld et al. 2008), welches zur Planung der Erweiterung des Kavernenfeldes diente und dessen Aussagegenauigkeit anhand neu abgeteufter Bohrungen validiert wurde.

3.3.3 Entwicklung der Methodik zur Prognose des Internbautyps

3.3.3.1 Analyse erkundeter Strukturen

Für die Analyse und Klassifizierung des Internbaustils wurden innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens alle Strukturen unabhängig von ihrer potentiellen Eignung betrachtet. Zur Analyse des Internbaustils wurden alle verfügbaren Daten zum Internbau zusammengestellt. Für einige Kavernenstandorte sowie für die Strukturen Gorleben und Morsleben wurden in der BGR bereits vor Beginn des Verbundvorhabens 3D-Modelle erstellt. Innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens wurde diese Datenbasis durch Auftragsvergaben an die Firmen UGS und DEEP. um weitere Standorte erweitert bzw. wurden 3D-Modelle bereits bearbeiteter Standorte überarbeitet und ggf. durch aktuelle Erkundungsdaten ergänzt.

Vervollständigt wurde die Datengrundlage durch Auswertung der unter AP 2.1 gesichteten Beschreibungen von Einzelstrukturen. Für die bergbaulich genutzten Strukturen wurden Sohlenrisse und Profilschnitte hinsichtlich der Flächenanteile und der räumlichen Verteilung des Wirtsgesteins ausgewertet. Insgesamt konnten Daten zu 20 Strukturen in die Untersuchungen einbezogen werden.

In einem ersten Schritt wurden potentielle Einflussfaktoren auf den Internbaustil identifiziert (Tabelle 3-6). Ausgehend von den in der Datenbank verfügbaren Informationen wurden anschließend alle Strukturen in Gruppen zusammengefasst. Dabei erwies sich der Ansatz mit den Hauptkriterien Außenform und Größe (siehe Kapitel 3.3.2) als nicht zielführend. Die Analyse der vorliegenden Erkundungsdaten zeigte, dass im Gegensatz zu den bisherigen Vorstellungen die Außenform und Größe der Strukturen nicht der

entscheidende Faktor bei der Entstehung des Internbaus ist. Während Bornemann (1991) einen Zusammenhang zwischen Internbau und äußerer Form herstellt, konnten aus für den Aufbau der InSpEE-Datenbank gesichteten Strukturbeschreibungen v. a. Hinweise auf Zusammenhänge zwischen dem Entwicklungsstadium der Struktur und ihrem inneren Aufbau abgleitet werden.

Tabelle 3-6: Einflussfaktoren auf den Internbau von Salzstrukturen

Strukturaufbauendes Salinar	Strukturtyp	Faktor	Ausprägung
Zechstein	Salzkissen	Reife	jung/reif
	Diapir	Größe	klein/groß
		Form	rund/oval/lang gestreckt/ Salzmauer
		Tektonische Überprägung	kompressiv überprägt/ nicht kompressiv überprägt
		Erosion	Wenig oder nicht erodiert/ tiefgründig erodiert
	Tektonische Struktur		
Zechstein und Rotliegend	Doppel-salinar		

Tabelle 3-6 zeigt die potentiellen Einflussfaktoren auf den Internbau und die sich aus der Datenanalyse ergebende Relevanz der Faktoren. Voneinander getrennt zu betrachten sind dabei:

- Der grundsätzliche Internbaustil (in blau),
- Die Komplexität der Verfaltung (in rosa).

Der grundsätzliche Internbaustil wird definiert durch die räumliche Verteilung des älteren und jüngeren Zechsteinsalinars innerhalb der Strukturen und ist eng mit ihrer Genese verbunden. Er hängt v. a. von drei Faktoren ab:

- Strukturaufbauendes Salinar,
- Entwicklungsstadium,
- Tektonischer Einfluss.

Größe und Form der Struktur korrelieren dagegen v. a. mit der Intensität der Verfaltung, die, wie von Bornemann postuliert, bei kleinen, rundlichen Strukturen weitaus intensiver

und kleinräumiger als bei großen, lang gestreckten Strukturen ist. Von besonderer Bedeutung ist die kompressive Überprägung von Diapiren, die durch Einengung und den damit verbundenen Salzaufstieg die Verfaltung modifiziert und auch bei großen lang gezogenen Diapiren ein sehr kleinräumiges Faltenmuster entstehen lässt.

Abbildung 3-30, Abbildung 3-31 und Abbildung 3-32 zeigen die identifizierten Einflussfaktoren mit den daraus resultierenden typischen Verteilungsmustern der Salinare. Auf Grund der geringen primären Mächtigkeit sind das älteste Zechsteinsalinar (z1) und die jüngsten Zechsteinsalinare (z5 und jünger) nicht dargestellt. Die sich daraus ergebenden Internbautypen werden in Kapitel 3.3.3.3 detailliert dargestellt.

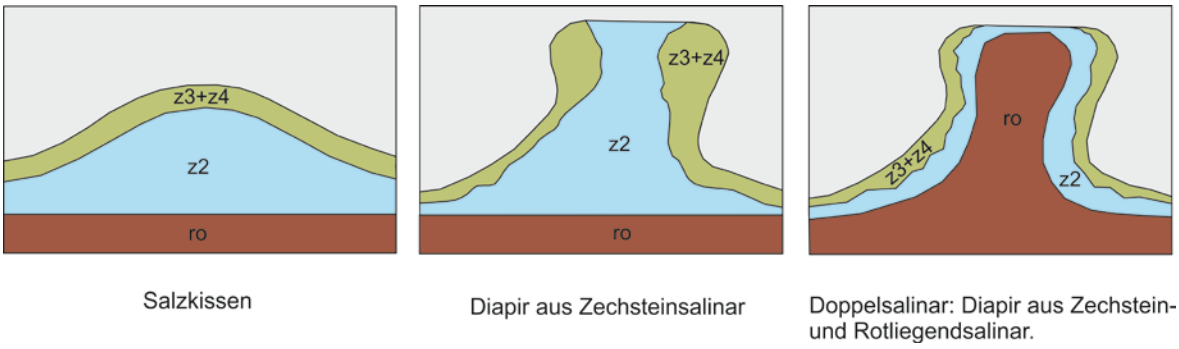


Abbildung 3-30: Entwicklungsstadium und strukturaufbauendes Salinar: Verteilung des Wirtsgesteins (z2 bzw. ro) und der jüngeren Salinare

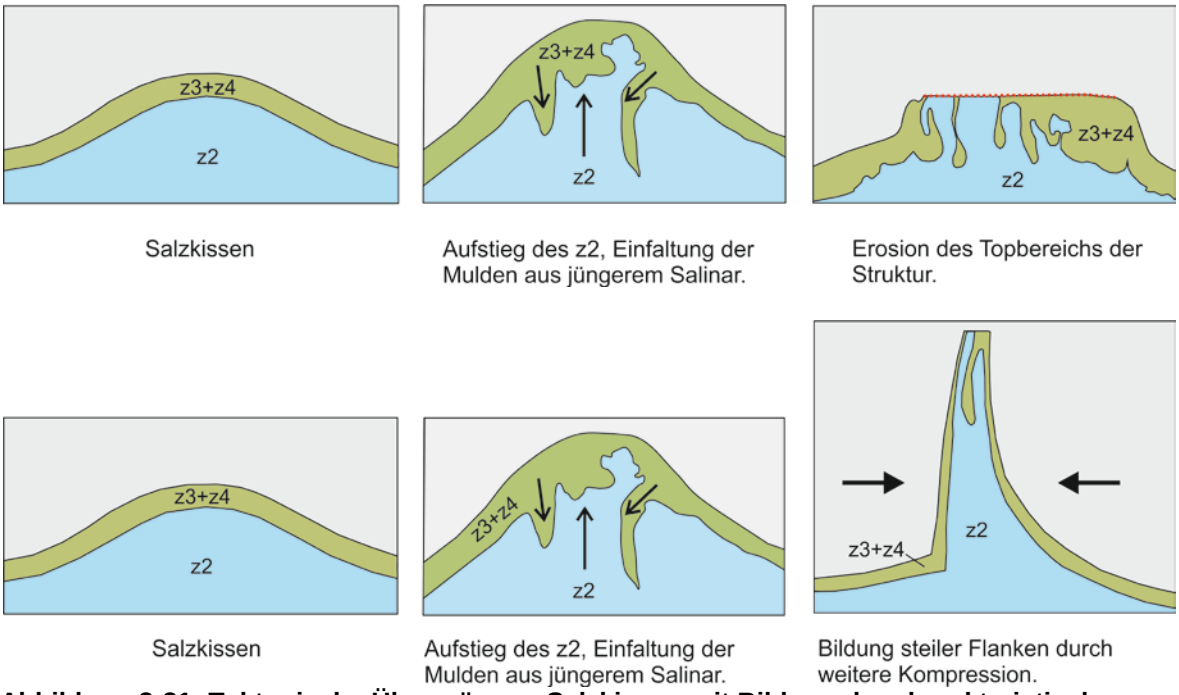


Abbildung 3-31: Tektonische Überprägung Salzkissen mit Bildung der charakteristischen Muldenstrukturen und potentieller Modifikation durch Erosion oder Kompression

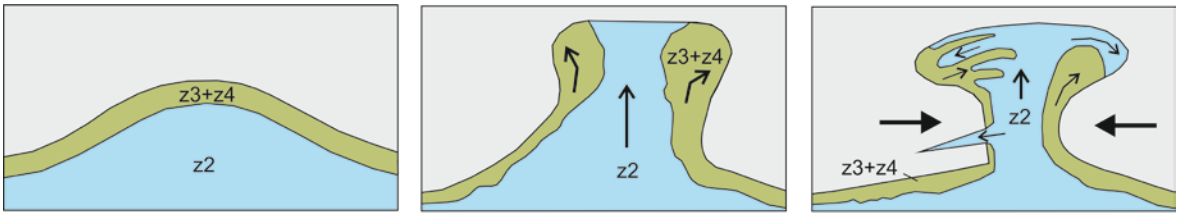


Abbildung 3-32: Kompressive, tektonische Überprägung von Diapiren

3.3.3.2 Klassifizierung nach Internbautyp

Aus den im vorherigen Kapitel dargestellten Einflussfaktoren ergeben sich fünf unterschiedliche Baustile, die in Abbildung 3-33 dargestellt sind. Dabei entfallen vier der fünf Baustile auf die aus Zechsteinsalinar aufgebauten Strukturen.

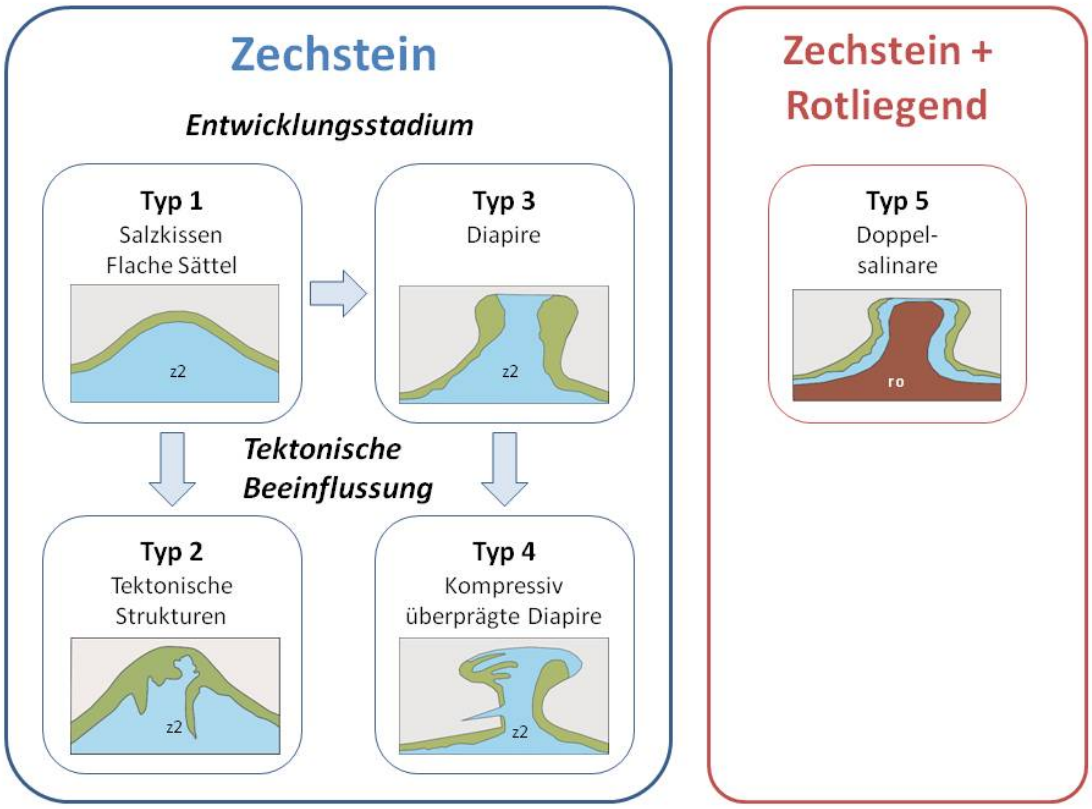
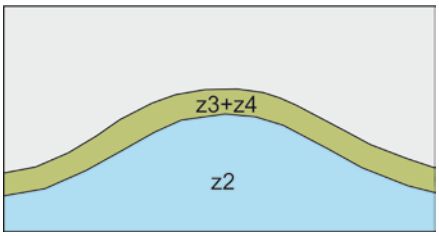


Abbildung 3-33: Internbautypen der Salinarstrukturen

Im Folgenden werden die Internbautypen hinsichtlich ihrer für den Kavernenbau relevanten Eigenschaften charakterisiert (siehe auch Tabelle 3-7 bis Tabelle 3-11). Diese Angaben sind als sog. Steckbriefe auch im Informationssystem enthalten (siehe Kapitel 2).

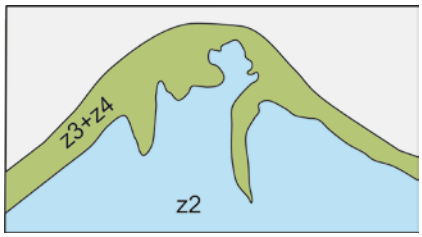
Tabelle 3-7: Charakteristik Internbautyp 1 - Salzkissen und flache Sättel

	**Internbautyp 1** **Salzkissen und flache Sättel**
Genese	Bildung halokinetisch durch Akkumulation des z2. Deckgebirge oberhalb der Struktur bei weiter entwickelten Salzkissen und Sätteln durch Aufwölbung gestört.
Lagerung	Die jüngeren Zechsteinsalinare (z3 und jünger) sind aufgewölbt, liegen aber noch in ihrer ursprünglichen Lagerung oberhalb des z2.
Faltenbau	Keine oder nur geringfügige interne Verfaltung.
Nutzbarer Flächenanteil	Nimmt innerhalb der Struktur mit der Tiefe zu, da die jüngeren Salinare dem z2 aufliegen.

Salzkissen und flache Sättel (s. Tab. 3-7)bilden sich im Wesentlichen durch Akkumulation der Salinare der Staßfurt-Folge (z2). Charakteristisch für diese Strukturen ist die fehlende Verfaltung des älteren und jüngeren Zechsteinsalinars. Die Strukturen bestehen im Kern aus dem Salinar der Staßfurt-Folge (z2), das im Bereich der Flanken und des Tops der Struktur von den jüngeren Salinaren (z3 und jünger) überlagert wird.

Die im Subherzyn-Becken vorkommenden sog. Schmalsättel (z. B. Staßfurter Sattel) bilden lang gestreckte Antiklinalstrukturen im Übergang vom Salzkissen zum Salzdiapir. Die obersten Bereiche dieser Strukturen sind bereits diskordant durch das Deckgebirge durchgebrochen und in deren Umfeld hat auch schon die sekundäre Randsenkenbildung begonnen. Jedoch sind in den Strukturen die kissenförmigen Salzakkumulation der Staßfurt-Formation noch weitgehend erhalten geblieben (z. B. Dresbach et al. 2010), was durch das juvenile Diapirstadium begründet werden kann. Demzufolge werden diese Schmalsättel dem Internbautyp eines Salzkissens zugeordnet, obwohl sie aus genetischer Sicht bei den Diapiren eingruppiert sind.

Tabelle 3-8: Charakteristik Internbautyp 2 - Tektonische Strukturen

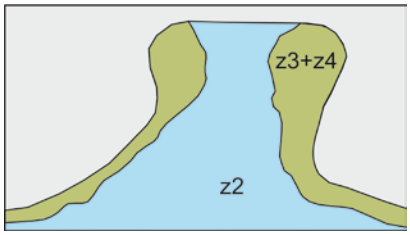
	**Internbautyp 2** **Tektonische Strukturen**
Genese	Entstehung durch massive tektonische Deformation eines ehemaligen Salzkissens. Durch Kompression des Deckgebirges, Einengung der Flanken sowie Bildung von komplexen Störungen und Überschiebungsbahnen im Deckgebirge.
Lagerung	Das jüngere Salinar (z3 und jünger) wird bei der tektonischen Deformation zu den charakteristischen Mulden eingefaltet, die vom Top der Struktur in die Struktur hinein verlaufen. In den Flankenbereichen liegt das jüngere Salinar dem z2 auf. Das mobilere z2 steigt durch die Deformation in Form schmaler Sättel auf.
Faltenbau	Komplexe Verfaltung des z2 und z3+jünger.
Nutzbarer Flächenanteil	Im oberen Teil der Struktur eingeschränkt durch komplexe Verfaltung. Nimmt innerhalb der Struktur mit der Tiefe zu, da die jüngeren Salinare dem z2 aufliegen und die Mulden vom Strukturtop ausgehend nach unten verlaufen. Unterhalb dieser z. T. weit in die Salzstruktur hinein verlaufenden z3-Mulden steigt der nutzbare Flächenanteil an.

Durch tektonische Bewegungen im Deckgebirge kann ein Salzkissen des Internbautyps 1 dermaßen überprägt werden, dass es von der Außenform einem Diapir mit steilen Flanken gleicht. Im Unterschied zu den Diapiren des Internbautyps 3 haben die Strukturen des Internbautyps 2 (siehe Tabelle 3-8) das Deckgebirge jedoch nicht durchbrochen. Durch den tektonischen Einfluss wird das jüngere Salinar zu Mulden komprimiert, die charakteristischerweise vom Top (z. T. von den Flanken) der Struktur in die Struktur hinein verlaufen, während das ältere z2 Sättel bildet.

Charakteristisch für Diapire (siehe Tabelle 3-9) ist, dass sie im Gegensatz zu den Salzkissen und Tektonischen Strukturen (Internbautyp 1 und 2) das Deckgebirge durchbrochen haben. Als Folge des Salzaufstiegs wird der Internbau durch steil stehende Falten dominiert. Das mobilere, schneller aufsteigende z2 befindet sich sowohl im Zentrum der Struktur im zentralen Aufstiegsbereich als auch in den Randbereichen und bildet dort Sättel. Das weniger mobile jüngere Zechsteinsalinar (z3 und jünger) wird beim

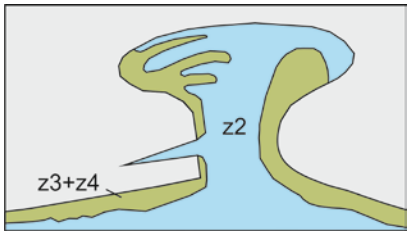
Salzaufstieg mitgeschleppt und bildet Mulden, die typischerweise vom Rand der Struktur in die Struktur hineinragen.

Tabelle 3-9: Charakteristik Internbautyp 3 - Diapire

	**Internbautyp 3** **Diapire**
Genese	Salzkissen können sich zu Diapiren weiterentwickeln, wenn bei anhaltendem Salzzustrom in die Struktur durch tektonische Impulse im subsalinaren Sockel oder Abtragung durch Erosion eine Schwächung des überlagernden Deckgebirges erfolgt und damit ein Durchbruch des Salinars durch das Deckgebirge erfolgen kann.
Lagerung	Das ältere z2 befindet sich überwiegend im Zentrum der Struktur im Hauptaufstiegsbereich. Das beim Salzaufstieg mitgeschleppte jüngere Salinar (z3 und jünger) bildet Mulden, die seitlich von den Flanken des Diapirs in die Struktur hineinragen.
Faltenbau	Durch die unterschiedlichen Salzaufstiegsraten des mobilen z2 und wenig mobilen z3 und jünger, kommt es zur Verfaltung des z2 und des jüngeren Salinars, es bilden sich steil stehende Falten. Bei länglich-ovalen Strukturen großräumige Verfaltung mit erkennbarer Vorzugsrichtung (strukturparallel), bei kleinen, runden Strukturen engräumigere Verfaltung ohne Vorzugsrichtung.
Nutzbarer Flächenanteil	Durch die steil stehenden Falten bleibt der nutzbare Flächenanteil über die gesamte Tiefe konstant.

Während der Oberkreide wurde ein Teil der Diapire im Zuge der Inversionstektonik (z. B. Baldschuhn et al. 1991; Kockel 1998; Baldschuhn et al. 2001; Frisch & Kockel 2004; Kley & Voigt 2008, Pollok et al. 2016) kompressiv überprägt (siehe Tabelle 3-10). Durch Einengung der Flanken als Folge der Kompression des Deckgebirges bildeten sich große Überhänge und z. T. auch Salzkeile (Einspießungen von Zechsteinsalz in Salinare des Nebengebirges). Der ursprüngliche Internbau der Diapire wurde dabei stark überprägt, so dass die ursprünglich steil stehenden, großräumigen Falten durch die Salzbewegungen innerhalb der Struktur nun zu kleinen, engräumigem Falten unterschiedlicher Richtung umgeformt wurden.

Tabelle 3-10: Charakteristik Internbautyp 4 - Kompressiv überprägte Diapire

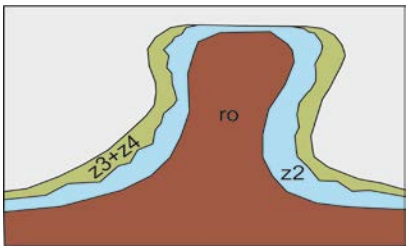
	**Internbautyp 4** **Kompressiv überprägte Diapire**
Genese	Bereits existierende Diapire wurden während der Oberkreide im Zuge der Inversionstektonik deformiert. Durch Kompression des Deckgebirges wurde das Salz unter Bildung großer Überhänge nach oben ausgepresst oder in Form von Salzkeilen in jüngere Salinare des Nebengebirges eingespießt.
Lagerung	Je nach Grad der Überprägung kann der zentrale Aufstiegsbereich des Diapirs noch erkennbar sein. Die Einengung der Flanken kann bei stark deformierten Diapiren so stark sein, dass der ursprüngliche Salzaufstiegsbereich nicht mehr erkennbar ist. Insbesondere im Bereich der Überhänge sind z2 und z3 intensiv verfaltet, wobei die Richtung der Falten stark variiert.
Faltenbau	Der ursprüngliche Faltenbau wurde durch die kompressive Überprägung und die daraus resultierenden Salzbewegungen innerhalb der Struktur massiv überprägt. Charakteristisch für den rezenten Zustand ist ein hochkomplexer Faltenbau mit lang ausgezogenen Falten unterschiedlicher Richtung.
Nutzbarer Flächenanteil	Bedingt durch die komplexe Verfaltung ist der Anteil der nutzbaren Fläche im Vergleich zu nicht kompressiv überprägten Diapiren deutlich geringer.

Im Unterschied zu den Strukturen des Internbautyps 1 - 4 bestehen die sog. Doppelsalinare (siehe Tabelle 3-11) nicht nur aus Zechsteinsalinar, sondern in ihrem Kern aus dem ebenfalls aufgestiegenen Oberrotliegendsalinar, das bei diesen Strukturen das Wirtsgestein für die Anlage von Kavernen im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabends bildet.

Im Gegensatz zu den aus Zechsteinsalinaren aufgebauten Salzstrukturen, die durch Bergbau erschlossen sind und deren Internbau meist über mehrere Sohlen korreliert werden kann (z. B. Klarr et al. 1987; Schachl 1987; von Struensee 2000), ist über den inneren Aufbau der Doppelsalinare nur wenig bekannt. Die einzigen Anhaltspunkte zu den Anteilen der altersverschiedenen Salzgesteine liefern die Strukturbeschreibungen und Profilschnitte von Baldschuhn et al. (2001). Während des Strukturbildungsprozesses wird

zunächst das sehr mobile Steinsalz der Staßfurt-Formation mobilisiert, im weiteren Verlauf der Diapirbildung das Oberrotliegendsalinar, das nun im Strukturzentrum aufsteigt und das Zechsteinsalz nach oben und gegen die Flanken verdrängt. Die weniger mobilen Leine- und Aller-Formationen (z3 und jünger) konzentrieren sich stark deformiert in den Flankenbereichen (Kockel & Krull 1995). Die detaillierte Untersuchung der Doppelsalinare wird im Rahmen eines Nachfolgeprojektes (InSpEE-*DS*) erfolgen (siehe Kapitel 7).

Tabelle 3-11: Charakteristik Internbautyp 5 - Doppelsalinare

	**Internbautyp 5** **Doppelsalinare**
Genese	Bei den Doppelsalinaren ist das ältere Oberrotliegendsalinar am Salzaufstieg mitbeteiligt.
Lagerung	Das Oberrotliegendsalinar bildet i. d. R. den Kern der Struktur. Im Flankenbereich und z. T. auch im Topbereich schließt sich das Zechsteinsalinar an. Das Zechsteinsalinar ist z. T. intern verfaltet.
Faltenbau	Keine oder nur geringfügige interne Verfaltung Zechsteinsalinar/Oberrotliegendsalinar.
Nutzbarer Flächenanteil	Der nutzbare Bereich ergibt sich aus dem Flächenanteil des Oberrotliegendsalinars und bleibt daher über die gesamte Tiefe annähernd gleich. Über evtl. nutzbare Zechsteinanteile lassen sich nach bisheriger Datenlage keine Aussagen treffen.

3.3.3.3 Entwicklung von Prognosemöglichkeiten

Für eine quantitative Aussage zum nutzbaren Flächenanteil in der Teufe der geplanten Kavernen wurden alle im InSpEE-Verbundvorhaben betrachteten Strukturen einem der fünf unter Kapitel 3.3.3.2 dargestellten Internbautypen zugeordnet.

Die Klassifizierung der Strukturen nach ihrem Internbautyp ermöglicht für alle Strukturen unabhängig vom bisherigen Erkundungsgrad Aussagen zum zu erwartenden Baustil. Prognostiziert werden kann die voraussichtliche Verteilung des Wirtsgesteins (z2 bzw. ro)

und die zu erwartende Lage der jüngeren Salinare. Damit ist eine deutlich bessere Planung der konkreten Standorterkundung möglich.

Die Klassifizierung nach Internbaustilen bildet darüber hinaus die Basis für die quantitative Abschätzung des tatsächlich für den Kavernenbau nutzbaren Bereichs der Salzstrukturen. Dafür wurden alle verfügbaren Erkundungsdaten (Horizontalschnitte aus den 3D-Modellen, Solenrisse und Profilschnitte) der jeweiligen Klasse zugeordnet und hinsichtlich der Flächenverteilung Wirtsgestein/jüngere Salinare analysiert. Auf der Basis dieser Auswertung konnten für jeden Internbautyp Angaben über den prozentual nutzbaren Flächenanteil in unterschiedlichen Tiefen ermittel werden.

Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.3.4.2 dargestellt. Insgesamt konnten Daten und 3D-Modelle von 20 Strukturen für die Bestimmung der nutzbaren Flächenanteile ausgewertet werden.

3.3.4 Ergebnisse

3.3.4.1 Räumliche Verteilung der Internbautypen

In Anhang 3-6 sind alle Strukturen mit ihrem jeweiligen Internbautyp dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Internbautypen nicht zufällig verteilen, sondern ein regionales Verteilungsmuster bilden, welches eng mit der strukturgeologischen Lage innerhalb des Norddeutschen Beckens (siehe Kapitel 2.1) zusammenhängt.

Internbautyp 1: Salzkissen, flache Sättel

Strukturen dieses Typs befinden sich innerhalb des Beckens in Bereichen, in denen der präsalinare Sockel wenig zerblockt ist, also Offshore im Bereich des Westschleswig-Blocks oder in Nordostdeutschland. Ohne Bewegungen an Sockelstörungen fehlen bei diesen Strukturen die Impulse für ihre Weiterentwicklung zu Diapiren. Weitere Salzkissen entstanden am Beckenrand, weil dort die primären Zechsteinmächtigkeiten zu gering für eine Diapirbildung waren.

Internbautyp 2: Tektonische Strukturen

Tektonische Strukturen sind genetisch durch Überprägung aus Salzkissen entstanden. Tektonische Bewegungen, die z. B. in der Oberkreide oder im Tertiär am südlichen Rand des Beckens zur Heraushebung des Harzes geführt haben, haben auch die am Rande des Beckens gelegenen Salzstrukturen beeinflusst (Hammer et al. 2012). Daher sind Strukturen dieses Typs überwiegend am Beckenrand im Übergangsbereich zu den Mittelgebirgen zu finden. Darüber hinaus findet man sie vergesellschaftet mit kompressiv

überprägten Diapiren des Typs 4 entlang großer Störungszonen (z. B. Allertal-Lineament) und im Nordosten im Bereich der Möckow-Dagibeller Störungszone.

Internbautyp 3: Diapire

Diapire i. e. S. sind im Beckeninneren entstanden, da hier die primäre Zechsteinmächtigkeit ausreichend groß war und es durch unterlagernde Sockelstörungen genügend tektonische Impulse für den diapirischen Aufstieg gab. Entsprechend zeichnen die Strukturen des Typs 3, 4 und 5 die großen Störungssysteme im präsalinaren Sockel nach. Darüber hinaus konnten Diapire auch in Bereich entstehen, in denen durch Hebung und daraus resultierende Erosion des Deckgebirges ebenfalls Schwächezonen im Deckgebirge entstanden sind (Fleig & Kühnlenz 2013).

Internbautyp 4: Kompressiv überprägte Diapire

Strukturen dieses Typs sind aus Diapiren des Typs 3 durch kompressive Überprägung im Zuge der Inversionstektonik während der Oberkreide entstanden. Diese Verbreitung der kompressiv überprägten Diapire umfasst eine Zone, die sich in W-E-Richtung von den Niederlanden bis in das südliche Niedersachsen erstreckt und in der die Störungszonen des Sockels durch Inversionstektonik reaktiviert oder neu gebildet wurden. In diesem Bereich entstanden im präsalinaren Sockel unter dem kompressiven Stressfeld während der Oberkreide (Coniac-Santon) Auf- und Überschiebungen, die auch eine Inversionsdeformation im Oberbau zur Folge hatten. Das Zechsteinsalz und die daraus aufgebauten Strukturen werden von diesen tektonischen Bewegungen mit beeinflusst (Baldschuhn et al. 1998a).

Internbautyp 5: Doppelsalinare

Das Vorkommen von Diapiren mit Beteiligung von Oberrotliegendsalinar ist auf den zentralen Bereich des Norddeutschen Beckens mit seinen großen N-S verlaufenden Störungszonen beschränkt, da nur in diesem Bereich das Oberrotliegendsalinar in einer Mächtigkeit vorkommt, die für die Strukturbildung ausreicht (siehe Kapitel 2.1). Das Gebiet umfasst den größten Teil Schleswig-Holsteins und Hamburgs sowie daran angrenzende Teile des nördlichen Niedersachsens und der Nordsee. Nördlich und östlich dieses Gebietes schließt sich der Bereich des Internbautyps 1 an (s. o.), da ohne Impulse unterlagernder Sockelstörungen keine Weiterentwicklung zu Diapiren erfolgte.

Im Offshore-Bereich der Nordsee schließt sich NW des Verbreitungsgebietes des Internbautyps 1 eine Zone an, in der unterschiedliche Typen miteinander vergesellschaftet lang gezogenen Sockelstörungen aufsitzen. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese Formenvielfalt auf eng begrenztem Raum liegt in der wiederkehrenden Aktivität der

unterlagernden Sockelstörungen. Da die Datenlage in diesem Bereich deutlich geringer ist als bei den Strukturen des Festlands (Anhang 3-4), ist die Einstufung dieser Strukturen hinsichtlich ihres Internbautyps jedoch deutlich unsicherer. Für die Potentialabschätzung (Kapitel 6) ist die geringe Datenlage unkritisch, da die Strukturen auf Grund ihrer Tiefenlage ohnehin nicht den Auswahlkriterien entsprechen (Anhang 3-1, Anhang 3-5).

3.3.4.2 Nutzbarer Flächenanteil

Für jeden Internbautyp wurde der nutzbare Flächenanteil abgeschätzt für den Tiefenbereich, der durch die Niveauschnittkarten (Kapitel 2.2) abgedeckt ist. Dazu wurden die Flächenanteile des z2 in der jeweiligen Tiefe direkt aus Horizontalschnitten der 3D-Modelle entnommen oder aus digitalisierten Karten von Strukturbeschreibungen ermittelt. Da der Anteil des nutzbaren Wirtsgesteins ohnehin sehr konservativ abgeschätzt wird, sind evtl. Flächenverluste durch enge Verfaltung bereits mit berücksichtigt und wurden nicht noch als zusätzliche Korrekturfaktoren in Form von Abschlägen für intensive Verfaltung ausgewiesen. Gleiches gilt für das leicht lösliche Kaliflöz Staßfurt innerhalb der Staßfurt-Formation (z2SF), dessen primäre Mächtigkeit so gering ist, dass es bei der Berechnung des nutzbaren Flächeninhalts vernachlässigt werden konnte.

Abbildung 3-34 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise, bei der die Strukturen in den relevanten Tiefenniveaus horizontal geschnitten werden und dann der Flächenanteil des Wirtsgesteins ermittelt wird. Dieser liegt im Unterschied zu vorhergehenden Studien (vgl. Kapitel 3.3.1) deutlich unterhalb der Fläche des Maximalumrisses der Struktur (gestrichelte Linie).

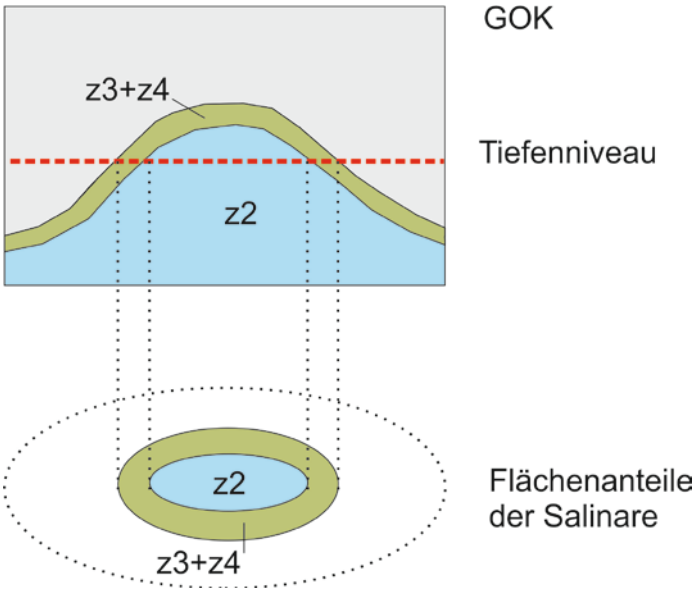


Abbildung 3-34: Quantitative Ermittlung des Flächenanteils des Wirtsgesteins (z2) und der jüngeren Salinare bei einem Salzkissen (Internbautyp 1)

Für die Ermittlung von nutzbaren Wirtsgesteinsanteilen in unterschiedlichen Salzstrukturen wurden neben den 3D-Modellen, auch alle frei zugänglichen Sohlenrisse aus der Literatur verwendet. Dazu mussten sie zunächst digitalisiert und georeferenziert werden. Anschließend wurden die Flächen der darin vorkommenden, unterschiedlichen Zechsteinformationen durch entsprechende Werkzeuge in ArcGIS berechnet (Abbildung 3-35).

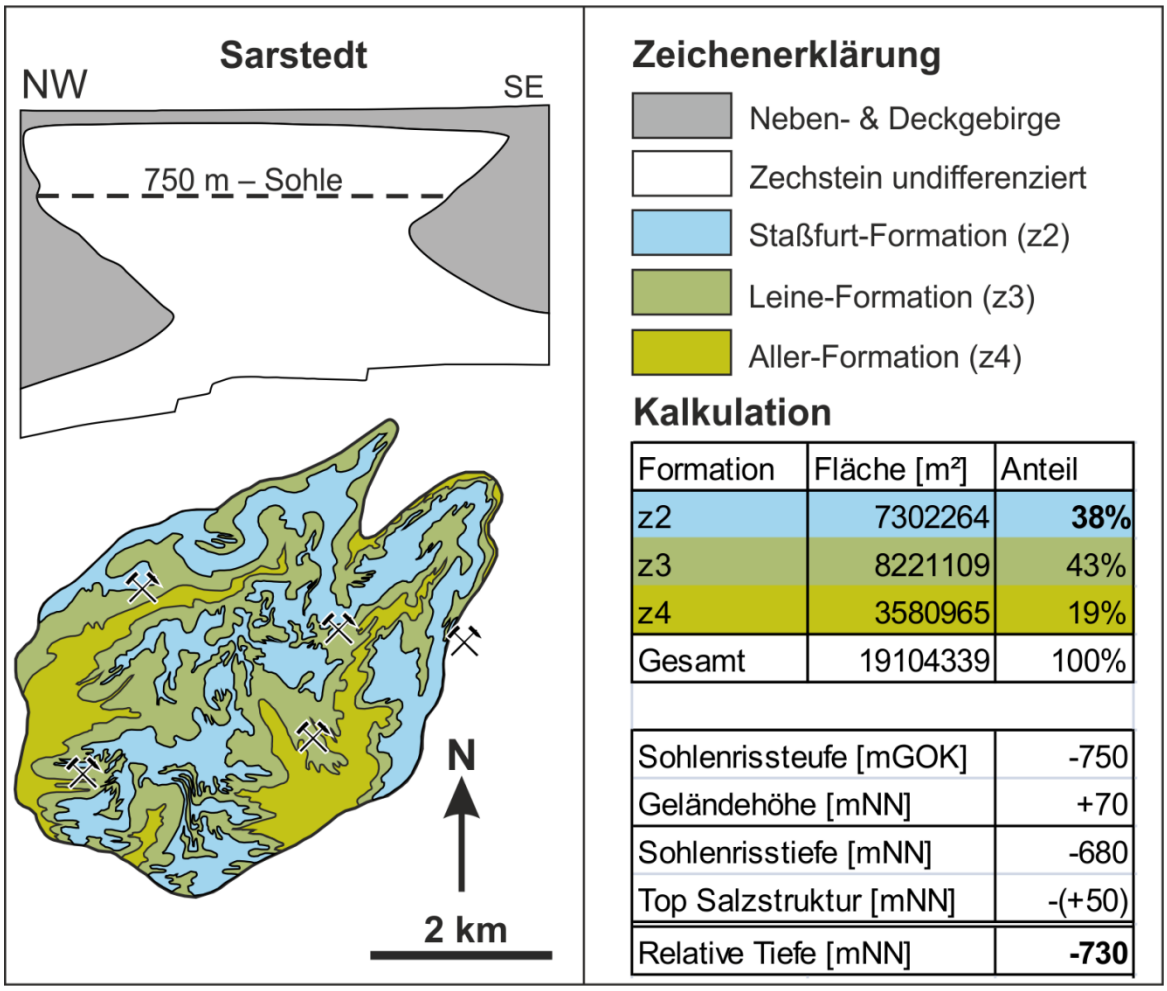


Abbildung 3-35: Berechnung der prozentualen Flächenanteile der am Strukturaufbau beteiligten Salzformationen am Beispiel Sarstedt
In der Strukturtiefe von 730 m u. NN ergibt sich als nutzbarer Wirtsgesteinsanteil 38 % für die Staßfurt-Formation.

Die resultierenden Flächen konnten dann ins Verhältnis gesetzt und wie in Abbildung 3-36 tiefenabhängig dargestellt werden. Das Diagramm zeigt die berechneten z2-Anteile in Abhängigkeit von der relativen Tiefe. Diese setzt sich aus der Differenz der Tiefe des

jeweiligen Salzstrukturtops und der Tiefe des analysierten Sohlenrisses zusammen. Liegt das Top beispielsweise bei 200 m u. NN und der Sohlenriss bei 500 m u. NN, so wurde der ermittelte z2-Anteil bei 300 m u. NN eingetragen. Die Umrechnung aus der absoluten Tiefe ist nötig, um den Bezug zum jeweiligen Anschnitt-Niveau (Eindringtiefe) einer Salzstruktur beizubehalten. Nur so ist ein direkter Vergleich von unterschiedlich hoch aufgestiegenen Strukturen möglich.

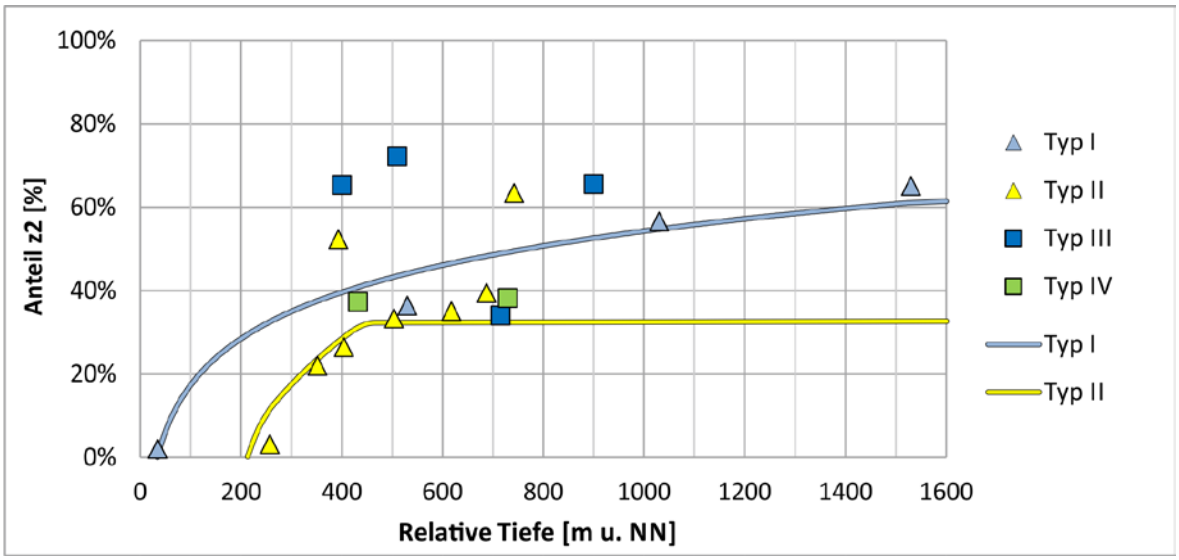


Abbildung 3-36: Berechnung der z2-Anteile für verschiedene Strukturtypen
Die relative Tiefe (Eindringtiefe) beschreibt die Differenz aus der Tiefe des Salzstrukturtops und des analysierten Sohlenrisses. Für die Internbautypen 1 und 2 (Typ I und II) sind Funktionen für die tiefenabhängigen z2-Anteile dargestellt.

Bei den Internbautypen 1 und 2 lässt sich erkennen, dass die z2-Anteile und damit die nutzbaren Bereiche mit zunehmender Tiefe in einer Salzstruktur ansteigen. Für den Internbautyp 2 wurde ein Kurvenverlauf extrapoliert, der die Teufenerstreckung der z3-Mulden in die Struktur hinein berücksichtigt. Die unterhalb der Mulden gelegenen Bereiche mit höherem z2-Anteil lagen bei allen untersuchten Strukturen außerhalb des in InSpEE betrachteten Tiefenbereichs von maximal 2.000 m u. NN. Die Ergebnisse der Flächenabschätzung sind in Tabelle 3-12 und Tabelle 3-13 dargestellt.

Bei der Anwendung ist zu beachten, dass der nutzbare Flächenanteil bei den Internbautypen 1 und 2 mit der Tiefe zunimmt, während er bei den Internbautypen 3-5 über die gesamte Tiefe nahezu konstant ist. Ursache dafür ist die Lagerung des jüngeren Zechsteinsalinars, das bei Internbautyp 1 im Topbereich der Struktur dem älteren z2 aufliegt (siehe Tabelle 3-7). Im oberen Bereich der Struktur ist daher der Anteil des für die

Anlage der Kavernen nicht berücksichtigten jüngeren Salinars am höchsten. Unterhalb dieses Bereiches steigt der Anteil des z2 dagegen deutlich an.

Tabelle 3-12: Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe unter Strukturtop

Nutzbare Wirtsgesteinsanteile (z2 bzw. ro) je Internbautyp & Tiefe [%]					
Tiefe [m u. Strukturtop]	Typ 1	Typ 2*	Typ 3	Typ 4	Typ 5
500	43	33	67	33	50
1.000	54	33	67	33	50
1.500	61	33	67	33	50
2.000	66	33	67	33	50

* bei 460 m unter Strukturtop wird der nutzbare Anteil von 33% z2 erreicht. Oberhalb ist der Anteil durch das aufliegende z3+jünger (ähnlich wie im Typ1 Kissen) geringer (siehe Abbildung 3-36). Unterhalb von 460 m unter Strukturtop beträgt er, wie in Typ 4, konstant 33%.

Tabelle 3-13: Nutzbare Flächenanteile in Abhängigkeit von der Tiefe unter NN

Nutzbare Wirtsgesteinsanteile (z2 bzw. ro) je Internbautyp & Tiefe [%]					
Tiefe [m u. NN]	Typ 1	Typ 2*	Typ 3	Typ 4	Typ 5
500	Je nach Tiefenlage des Struktur-tops bis max. 66	Je nach Tiefenlage des Struktur-tops bis max. 33	konstant bei 67	konstant bei 33	konstant bei 50
1.000					
1.500					
2.000					

Bei den Strukturen des Internbautyps 2 liegt das jüngere Salinar dem älteren nicht nur auf, sondern ragt zusätzlich in Form von Mulden in die Struktur hinein (siehe Tabelle 3-8). Innerhalb des im Rahmen von InSpEE betrachteten Tiefenbereichs wird dadurch ein maximal nutzbarer Flächenanteil von 33 % erreicht, obwohl der Flächenanteil des z2 in den tiefen Bereichen der Strukturen deutlich größer ist.

Bei den Internbautypen 3 und 4 hat sich durch den Salzaufstieg im Zentrum der Struktur ein zentraler Aufstiegsbereich gebildet, der sich durch die gesamte Struktur erstreckt. Daher bleibt auch der nutzbare Flächenanteil über die Tiefe annähernd konstant und wird nur durch die Intensität der Verfaltung modifiziert. Während der nutzbare Flächenanteil bei den klassischen Diapiren mit rund 67 % am höchsten ist, halbiert sich dieser Wert bei den kompressiv überprägten Diapiren des Typs 4 durch die intensive kleinräumige Verfaltung.

Eine Sonderstellung nehmen die Strukturen des Internbautyps 5 ein. Das Oberrotliegend-salinar konzentriert sich auf den zentralen Bereich der Struktur und weist einen über die

Tiefe nahezu konstanten Flächenanteil auf, der konservativ abgeschätzt bei 50 % liegt. In wie weit auch die Anteile des Zechstein in den Doppelsalinaren nutzbar sind oder ob ggf. ein Korrekturfaktor für Verfaltung zu berücksichtigen ist, konnte innerhalb von InSpEE auf Grund der im Vergleich zu den anderen Typen schlechteren Datenlage noch nicht beantwortet werden.

3.3.5 Übergabe an AP 1, 4 und 5

Die ermittelten nutzbaren Anteile wurden für die untersuchungswürdigen Salzstrukturen, abhängig von der jeweiligen Typenzuteilung, in die Datenbank eingetragen. An AP 4 und 5 wird die Zuordnung zu den Internbautypen zusammen mit der Angabe des nutzbaren Flächenanteils in den Tiefenstufen der vier Niveauschnittkarten (siehe Kapitel 3.3.4.2) übergeben. Die Abschätzungen des nutzbaren Flächenanteils sind Teil des Algorithmus, mit dem strukturbezogen das Speicherpotential ermittelt wird (Kapitel 6).

In das Informationssystem Salzstrukturen (Kapitel 2.4) werden für alle Strukturen die jeweiligen Angaben zum Internbautyp übernommen. Der zu erwartende Internbaustil kann so bereits bei der Standortauswahl und ggf. bei der Planung der Standorterkundung berücksichtigt werden. Für eine gezielte Vorauswahl von Standorten ist die Selektion des jeweiligen Internbautyps möglich, z. B. als Auswahl aller Strukturen des Typs „Diapir“.

4 AP 3 – Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherkavernen für Druckluft und Wasserstoff

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

Bearbeiter: Dr.-Ing. Dirk Zapf, Dr.-Ing. Rudolf Zachow

4.1 Anlass

Unerlässliche Voraussetzung für die effiziente Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist die bedarfsgerechte Speicherung der gewonnenen Energie. Die unmittelbar verfügbare Energiemenge entspricht zeitlich nicht immer dem aktuellen Bedarf. Eine Option ist die Erzeugung von Druckluft oder Wasserstoff, die nach unterirdischer Zwischenlagerung bei Bedarf mit Hilfe von Kraftwerken wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Bei Wasserstoff wäre auch eine additive Einspeisung in das bestehende Erdgas-verteilungsnetz möglich.

Druckluft und Wasserstoff können in Salzkavernen gespeichert werden, um die Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage vorübergehend aufzufangen. Salzgestein hat sich bei der Speicherung von Öl und Erdgas bereits als besonders geeignet erwiesen. Salzgestein ist für Flüssigkeiten und Gas impermeabel. Norddeutschland bietet umfang-reiche Vorkommen mächtiger Salinare des Zechsteins, in denen sich die zylindrischen Hohlräume in den erforderlichen Dimensionen aussolen lassen. Bisher fehlt es aber noch an gebirgsmechanischen Bewertungsgrundlagen, um die Kapazität der verschiedenen Salzstrukturen für die Druckluft- oder Wasserstoffspeicherung beurteilen zu können. Diese bilden einen wichtigen Baustein, die Unsicherheit einer Potentialabschätzung in diesen Salzstrukturen zu verringern.

4.2 Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten am IGtH

Die gebirgsmechanische Dimensionierung unterirdischer Speicherbauwerke ist in Deutschland Stand der Technik. Wesentlicher Einsatzzweck von Kavernen in Salzgestein war bisher die Speicherung von Rohöl als Krisenbevorratung und Erdgas als Vorrats-reserve, um jahreszeitliche Verbrauchsschwankungen auszugleichen z.B. (Rokahr 1979), (Lux 1984), (Lux, Quast, Rokahr 1987), (Staudtmeister, Struck 1990), (Rokahr, Staudtmeister, Zander-Schiebenhöfer 1997).

Für die große Anzahl der genutzten Salzkavernen liefert die jahrzehntelange Betriebs-praxis umfangreiche Erfahrungen, die die Speicherung von flüssigen und gasförmigen

Kohlenwasserstoffen betreffen (Rokahr, Staudtmeister, Zander-Schiebenhöfer 2004), (Rokahr et al. 2006), (Rokahr, Staudtmeister, Zapf 2008).

Die Liberalisierung des Gasmarktes konfrontiert die Speicher inzwischen mit erhöhten Anforderungen: Kurzzeitige Bedarfsschwankungen erfordern eine hohe Flexibilität. Die erhöhte Zahl der Umschläge bringt eine wesentlich stärkere Beanspruchung des die Kavernen umgebenden Salzgesteins mit sich. Dies findet Ausdruck in zahlreichen FuE-Arbeiten (Staudtmeister, Zapf 2010), (Staudtmeister, Leuger, Zapf. 2012), (Staudtmeister, Zapf 2012), (Zapf, Staudtmeister, Rokahr 2012).

Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die abweichenden Anforderungen an Salzkavernen für die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff ist nicht gegeben. Auch die veröffentlichten Betriebserfahrungen des europaweit einzigen Kavernenspeicher-kraftwerks im Salzstock Huntorf oder der zwei Wasserstoffkavernen in England und den USA reichen nicht aus, um die Interaktion zwischen Salzgestein und Druckluft oder Wasserstoff quantitativ zu bestimmen oder die Erkenntnisse auf andere Kavernen mit anderen Randbedingungen zu übertragen (Crotogino, Hübner 2009).

Bei der Speicherung von Druckluft ist selbst im Vergleich mit flexibel betriebenen Erdgasspeicherkavernen von noch kurzfristigeren Umschlagsintervallen auszugehen. Täglich angeforderte Ein- und Ausspeicherraten sind mit wesentlich höheren Druckände-rungsraten im Speicherbetrieb verbunden. Eine hohe Entnahmegeschwindigkeit verur-sacht außerdem einen starken Temperaturabfall (Nieland 2004) und damit eine signifikante Verringerung der maßgebenden Spannungen. Betroffen ist insbesondere die Vertikalspannungskomponente in der unmittelbaren Umgebung der Kavernenwand.

Auf Grund der geringen Zugfestigkeit von Salzgestein führt eine Überschreitung zu diskreten makroskopischen Rissen senkrecht zur Zugspannungsrichtung, die den Verlust der Dichtheit und Integrität der Kaverne zur Folge haben könnten. Von ausschlag-gebender Bedeutung für die Funktionsfähigkeit der Kaverne und den sicheren Speicher-betrieb ist daher der Nachweis, dass unter Berücksichtigung der thermisch induzierten Spannungen die Gebirgsspannungen insgesamt stets im Druckbereich verbleiben. Kühlt sich das Speichermedium durch zu hohe Entnahmeraten stark ab, sind Rissbildungen auf Grund von thermisch induzierten Zugbeanspruchungen nicht auszuschließen.

Der Einfluss der Temperaturänderung auf Grund von Ein- oder Ausspeicherprozessen ist sowohl für Erdgas als auch für Druckluft und Wasserstoff maßgeblich, jedoch unter-scheidet sich das Temperaturverhalten der drei Medien auf Grund unterschiedlicher Dichten und Viskositäten, abweichender Kompressibilität und unterschiedlicher themo-dynamischer Parameter deutlich. Nur separate Temperaturberechnungen können die stoffspezifischen Eigenschaften angemessen erfassen und belastbare Ergebnisse liefern.

Internationale Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik zur Speicherung von Druckluft und Wasserstoff in Salzkavernen wurden bisher unter stark vereinfachten Annahmen durchgeführt. So zeigt Nieland (2008) in seiner Veröffentlichung zwar den Unterschied in der Temperaturentwicklung bei hochfrequenter Speicherung unterschiedlicher Medien (Druckluft, Methan und Wasserstoff) auf, bewertet aber nicht den Spannungszustand, in dem die Kaverne umgebenden Salzgestein. Die von Lux und Düsterloh (2009) vorgestellten Ergebnisse thermomechanisch gekoppelter Berechnungen bei zyklischer Speicherung von Druckluft basieren auf teilweise stark vereinfachenden Annahmen, wie z. B. einem adiabaten Ansatz für die Temperaturänderung in der Kaverne.

Ein derartiger Ansatz vernachlässigt den Wärmeaustausch zwischen dem Salzgebirge und der Druckluft in der Kaverne und wird der Zielsetzung des Forschungsvorhabens nicht gerecht. Weiterhin kann die Aussage, dass schnelle Ein- und Ausspeicherraten in Bezug auf das Dimensionierungskriterium zur Vermeidung von Zugspannungen günstiger zu bewerten sind, nicht allgemein auf die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff übertragen werden. Eine genügend feine Diskretisierung des Kavernenrandbereichs und die Wahl eines geeigneten Bemessungslastfalls werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Staudtmeister, Zapf, Leuger (2011) konnten aufzeigen, dass Stillstandsphasen die Temperaturdifferenzen in den Kavernen erheblich beeinflussen. Da das System Kaverne-Gebirge ständig einen thermischen Gleichgewichtszustand anstrebt, bewirken die thermisch induzierten Spannungen in Verbindung mit Kriechprozessen auch in Stillstandszeiten signifikante Spannungsumlagerungen.

Das Betriebsszenario bei der Speicherung von Druckluft oder Wasserstoff unterscheidet sich von dem der Erdgasspeicherung. Die anzunehmenden Lastfälle weichen von denen der Erdgasspeicherung ab und erfordern eine neue Bewertung der Spannungszustände in der Umgebung der Salzkaverne. Der Lastfall ist für jede Kaverne standortspezifisch, entsprechend der Teufe, Größe, Geometrie, des Verhältnisses Volumen zu thermisch wirksamer Oberfläche (V/O) sowie der Anforderungen der Kavernenbetreiber zu ermitteln. Der Spannungszustand in der Umgebung der Kaverne wird dabei wesentlich von der vorherigen Fahrweise beeinflusst, so dass ein Lastfall immer mehrere aufeinander folgende Innendruckniveaus in den gebirgsmechanischen Grenzen eines minimalen und maximalen Kaverneninnendruckes enthält. Von entscheidender Bedeutung sind hierbei die Stillstandsphasen, in denen weder eine Befüllung noch eine Entnahme des jeweiligen Speichermediums stattfindet.

Eine Betrachtung realitätsnaher Lastfälle für Druckluft- und Wasserstoffkavernen zur Speicherung erneuerbarer Energien sowohl im Zusammenhang mit dem Ausgleich von Fluktuationen im Stromnetz als auch zur bedarfsgerechten Versorgung des Mobilitäts-

und Industriesektors mit Energieträgern bzw. Rohstoffen aus erneuerbaren Energien ist bisher noch nicht erfolgt.

4.3 Ziele und Erfolgsaussichten

Um eine fundierte Abschätzung der potentiell verfügbaren Speicherkapazitäten im Salzgestein vornehmen zu können, ist es erforderlich, die maßgeblichen Merkmale zu charakterisieren und Bewertungskriterien zu entwickeln, mit deren Hilfe das Speicherpotential für die Druckluft- oder Wasserstoffspeicherung ermittelt werden kann. Relevante Merkmale des komplexen Bewertungssystems sind:

- das Volumen einer Kaverne,
- die Tiefenlage,
- der Abstand der Kavernen untereinander,
- der zulässige Maximaldruck und der erforderliche Minimaldruck,
- das Druckspiel sowie
- die zulässigen Entnahme- und Befüllraten.

Darüber hinaus sind die erforderlichen Salzmächtigkeiten abzuschätzen, damit eine gebirgsmechanisch ausreichend große Gebirgsmasse des die Kavernen umgebenden Salzgebirges zur Verfügung steht.

Da die Dichtheit und die Standsicherheit von Druckluft- oder Wasserstoffkavernen nur gewährleistet werden können, wenn die relevanten Dimensionierungsparameter bekannt sind, ist das Ziel des gebirgsmechanischen Teils des Forschungsvorhabens die Erarbeitung von Auslegungsparametern für die Potentialabschätzung von Salzkavernen in Norddeutschland. Übergabeparameter an das AP 4 bilden dabei die Dimensionierung der Kaverne einschließlich der Kavernenhöhe, des Kavernendurchmessers und des realisierbaren Hohlraumvolumens, die erforderlichen Salzmächtigkeiten ober- und unterhalb sowie zwischen den Kavernen, der erforderliche Abstand der Kaverne zum Salzstockrand, Minimal- und Maximaldruck für den Kavernenbetrieb sowie die dazugehörigen Temperaturen (siehe Anhang 4-1 und 4-2).

Das Institut für Geotechnik, Abteilung Unterirdisches Bauen an der Leibniz Universität Hannover kann auf jahrzehntelange Erfahrungen auf dem Gebiet der Planung von Salzkavernen zurückgreifen. Somit können auch Annahmen zum erforderlichen Abstand der Kavernen untereinander und zum Salzstockrand ohne zusätzliche aufwendige Standsicherheitsbetrachtungen getroffen werden. Darüber hinaus basiert die Festlegung der maximal zulässigen Drücke und der erforderlichen Minimaldrücke zur Bestimmung

des Arbeitsgasvolumens auf den Erfahrungen der Standsicherheitsuntersuchungen bestehender Erdgaskavernen.

Die standörtlichen Randbedingungen, wie die Mächtigkeit und der strukturelle Aufbau des Salzstocks, der solfähigen Schichten und der geochemische Stoffbestand, sind für jeden Einzelfall durch Bohrungen zu ermitteln. Unabhängig von den standortspezifischen Eignungsmerkmalen dokumentiert das vorliegende AP 3 die für die Standsicherheit und Integrität der Kavernen erforderlichen Auslagungsparameter. Mit Hilfe dieser kann in Abhängigkeit der Wahl einer Kavernenkonfiguration die Anzahl möglicher Speicherkavernen in AP 5 abgeschätzt werden.

4.4 Methodische Vorgehensweise

Das Ziel der gebirgsmechanischen Simulationsberechnung war es, herauszufinden, welche Entwurfsparameter maßgeblichen Einfluss auf die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Druckluft- und Wasserstoffkavernen haben. Im ersten Teil der Untersuchung werden daher am Beispiel ausgewählter Modellkavernen die Unterschiede im thermodynamischen Verhalten berechnet und dokumentiert. Anschließend folgen die gebirgsmechanischen Berechnungen zum thermomechanischen Verhalten der jeweiligen Modellkavernen unter gesetzten Betriebsbedingungen. Die Eingangsgrößen der Simulationen beruhen auf Erfahrungswerten im Forschungsverbund und sind in enger Abstimmung unter den Verbundpartnern festgelegt worden.

Allen Berechnungen liegt nach Absprache mit den Verbundpartnern eine Salztopteufe von 550 m zugrunde. Dieser Ansatz für die Oberfläche der Salzformation stellt sicher, dass für alle Modellkavernen eine ausreichende Schwebendicke im Hangenden vorhanden ist, um auf der Grundlage der Erfahrungen mit der Dimensionierung von Erdgasspeichern den zulässigen Maximaldruck ansetzen zu können. Diese Vereinfachung war erforderlich, um die Anzahl der Simulationsläufe zu reduzieren. Für die Potentialabschätzung wurden die erforderlichen geometrischen Mindestabmessungen für die unterschiedlichen Modelle zur Verfügung gestellt.

Für alle untersuchten Modelle wurden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Materialparameter für das die Kavernen umgebende Salzgestein angenommen. Die Kennwerte sind entweder durch Messungen in situ oder durch entsprechende Laboruntersuchungen ermittelt worden. Die Parameter stellen Standardwerte dar. Mögliche Abweichungen beeinflussen die Aussagen der gebirgsmechanischen Untersuchungen nur untergeordnet.

Tabelle 4-1: Materialparameter

	λ, **W/(m*K)**	ρ, **kg/m³**	c_P, **J/(kg*K)**
Deckgebirge	2,2	2060	712
Salz	5,2	2192	875

Hierbei haben die Werte folgende Bedeutung:

λ, W/(m*K) Wärmeleitfähigkeit,

ρ, kg/m³ spezifische Dichte,

c_P, J/(kg*K) spezifische Wärmekapazität.

Der Temperaturgradient für das Deckgebirge wird mit 0,045 °C/m angenommen. Der für das Salzgestein beträgt 0,015 °C/m.

Die im Modell angenommene zylinderförmige Kavernenform stellt die Umhüllende dar, innerhalb der eine reale Kavernenform ausgesolt werden kann. In der Umhüllenden ist eine Erweiterung um 5 m als Toleranz bei der Solphase enthalten.

Die Dimensionen der zu betrachtenden Kavernen wurden nach intensiver Diskussion mit den Verbundpartnern festgelegt, wobei insbesondere die Erfahrungen der KBB Underground Technologies GmbH auf dem Sektor der Wirtschaftlichkeit von Speicherkavernen berücksichtigt wurden. Um eine ausreichende Bandbreite hinsichtlich der Lagerkapazitäten abzudecken, wurden für die Druckluftkavernen Volumina von 200.000 m³ und 500.000 m³ gewählt. Der Betrachtung modellhafter Wasserstoffkavernen liegen Volumina von 350.000 m³ und 700.000 m³ zugrunde, um auch zukünftige Bedarfsentwicklungen zu berücksichtigen.

Für die Potentialabschätzung war es wichtig, mehrere Teufenlagen der Speicherkavernen zu untersuchen. Die Betrachtung der Druckluftkavernen bezieht sich auf

- eine Dachteufe von 750 m bei einem Kavernentiefsten von 933 m,
- eine Dachteufe von 950 m bei einem Kavernentiefsten von 1.133 m.

Die Wahl der Teufenlage ist vom gewählten Kraftwerkskonzept und hier vor allem vom Druckspiel abhängig, so dass bei entsprechenden Betriebsparametern auch tiefere Dachteufen möglich sein können. Die gewählten Dachteufen berücksichtigen die Parameter der zu Beginn des InSpEE-Projektes bekanntesten Kraftwerkskonzepte.

Die Bewertung der Wasserstoffkavernen differenziert

- eine Dachteufe von 1.000 m bei einem Kavernentiefsten von 1.183 m,
- eine Dachteufe von 1.200 m bei einem Kavernentiefsten von 1.383 m,
- eine Dachteufe von 1.200 m bei einem Kavernentiefsten von 1.550 m,
- eine Dachteufe von 1.400 m bei einem Kavernentiefsten von 1.750 m.

Darüber hinaus wurde ein Druckspiel bei der Druckluftkaverne in Verbindung mit einer hohen Entnahmerate gewählt, das unter dem Gesichtspunkt einer zukünftigen Anwendung als wirtschaftlich eingeschätzt wurde. Die betrachteten Grundgrößen sind 50 bis 70 bar und 80 bis 100 bar, die Druckänderungsraten wurden zu 9,4 bar/h für die Auslagerung und zu 2,3 bar/h für die Einlagerung von Luft angenommen. Auch bei Wasserstoff stand eine hohe Entnahmerate im Vordergrund der Diskussion, hier wurde sich an der Höhe der maximalen Entnahmerate bei Wahl einer Standarddimensionierung der Zugangsbohrung orientiert. Die resultierenden Druckänderungsraten liegen dennoch mit max. 0,82 bar/h für die Auslagerung und zu 0,54 bar/h für die Einlagerung von Wasserstoff deutlich unter der für Druckluft.

4.5 Speicherung von Druckluft

Druckluftkavernen sollen in Zukunft möglichst den Spitzenbedarf während des Tages abdecken. Aus diesem Grunde ist es erforderlich, hohe Druckraten in kurzer Zeit zur Verfügung zu stellen. Diesem Anspruch folgen die thermodynamischen und thermomechanischen Berechnungen.

4.5.1 Thermodynamische Berechnungen

Ziel der thermodynamischen Berechnung ist die Erfassung der Temperatur in der Druckluftkaverne während der Entname- und Befüllungsphasen.

Für die Zusammensetzung der Druckluft sind die in Tabelle 4-2 aufegführten Standardparameter angesetzt worden:

Tabelle 4-2: Druckluftzusammensetzung

Stickstoff	**Kohlendioxid**	**Sauerstoff**	**Argon**
N_2	CO_2	O_2	Ar
78,08%	0,03%	20,95 %	0,94%

Mögliche Abweichungen beeinflussen die Aussagen der gebirgsmechanischen Untersuchungen nur untergeordnet. Eine Konvergenz der Kavernen kann auf Grund der kurzen Lastwechsel vernachlässigt werden.

In Tabelle 4-3 sind die Eingangsgrößen der Bewertungsdurchläufe zusammengestellt, die einvernehmlich mit den Verbundpartnern abgestimmt wurden, und die die Basis für die Potentialabschätzung bilden. Die Kavernenhöhe ist in allen Fällen auf 183 m festgelegt.

Tabelle 4-3: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Druckluft-Kavernen

Modell-kaverne	**Volumen (m³)**	**Dachteufe (m)**	**Kavernen-tiefstes (m)**	**Radius (m)**	**Druckspiel (bar)**
D111	200.000	750	933	19,35	50 - 70
D121		950	1.133	19,35	
D211	500.000	750	933	31,34	50 - 70
D221		950	1.133	31,34	
D112	200.000	750	933	19,35	80 - 100
D122		950	1.133	19,35	
D212	500.000	750	933	31,34	80 - 100
D222		950	1.133	31,34	

Der Buchstabe D bedeutet Druckluftkaverne. Die nächste Ziffer bezieht sich auf das Volumen. Die zweite Zahl beschreibt die Dachteufe und die dritte Ziffer kennzeichnet das Druckspiel.

Für die acht in der Tabelle 4-3 aufgeführten Berechnungsmodelle werden jeweils für dasselbe Betriebsszenario die Kaverneninnendrücke und die Kavernentemperaturen berechnet. Unter Berücksichtigung der Entnahme- und Befüllzyklen sowie der Variationsberechnungen ergeben sich 42 Diagramme. Um die Lesbarkeit des Berichts zu erleichtern, sind alle Abbildungen und Diagramme der Berechnungsdurchläufe im Anhang 4 zusammengefasst. Beispielhafte Diagramme sind zusätzlich auch im Berichtstext aufgeführt.

In Abbildung 4-1 sind die vier Kavernenmodelle dargestellt, die zwei Größenklassen repräsentieren. Aus dem vorgegebenen Volumen von 200.000 m³ resultiert bei einer Höhe von 183 m rechnerisch der Radius von 19,35 m. Bei einem Volumen von 500.000 m³ ergibt sich bei einer Höhe von 183 m ein Radius von 31,34 m. Für jede der dargestellten Kavernen werden die entsprechenden Betriebsszenarien untersucht. Als Referenzmodell wurde die Kaverne D111 mit einer Dachteufe von 750 m gewählt.

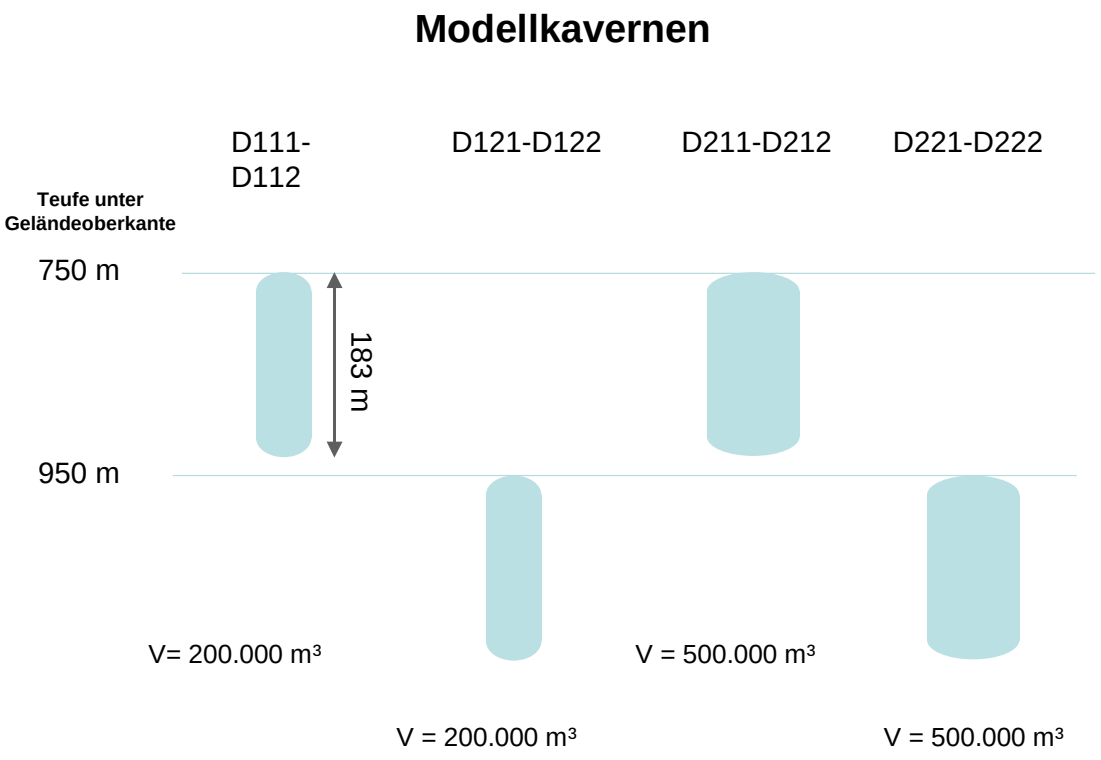


Abbildung 4-1: Lage der Modellkavernen zur Druckluftspeicherung

4.5.1.1 Betriebsszenario

Um ein repräsentatives Ergebnis der gebirgsmechanischen Untersuchungen zu erhalten, wurde folgendes Betriebsszenario zugrundegelegt. Ausgegangen wird von einer Intervall-länge des Druckspiels von 24 Stunden. Nach einer Absenkphase von vier Stunden mit einer konstanten Druckrate von 70 auf 50 bar, was der Entnahme von 1,1 Millionen m³ bei der Kaverne Huntorf entspricht, folgt eine sechsstündige Stillstandszeit. Anschließend wird die Kaverne innerhalb von acht Stunden wiederum mit einer konstanten Druckrate auf einen Innendruck bezogen auf die Rohrschuhteufe von 70 bar befüllt. Beendet wird eine Betriebsphase mit einer Stillstandszeit von sechs Stunden. Dieser 24-Stunden-Zyklus wird siebenmal wiederholt. Die Befülltemperatur des Speichermediums (hier Druckluft) beträgt 40 °C. Die Temperaturänderungen in den Kavernen während der Entnahme- und Befüllphase wurden mit dem Programm KavTec der Firma ESK in Freiberg berechnet.

4.5.1.2 Ergebnisse für das Referenzmodell D111

Die Ergebnisse der thermodynamischen Berechnungen für das Referenzmodell D111 sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 4-2 zeigt die Kaverneninnen-drücke in Rohrschuhteufe in Abhängigkeit von der Zeit für den angesetzten Betriebs-verlauf über eine Dauer von sieben Tagen auf.

pCS bedeutet hierin Kaverneninnendruck in Höhe des zuletzt zementierten Rohrschuhs.

Der berechnete Temperaturverlauf ist der Abbildung 4-3 zu entnehmen. Die für die gebirgsmechanische Berechnung relevante Temperaturdifferenz delta T in einer Still-standszeit mit anschließender Entnahmephase beträgt 31,7 °C.

TCav bedeutet hierin Temperatur in Höhe der Kavernenmitte.

Grün dargestellt ist die primäre Gebirgstemperatur in Höhe der Kavernenmitte. Wie deutlich zu erkennen ist, folgt die Kavernentemperatur dem Kavernendruck. Die Still-standsphase im oberen Druckbereich bewirkt einen leichten Temperaturabfall, während die vergleichbare Phase im unteren Druckbereich einen wesentlich höheren Anstieg der Temperatur hervorruft.

Infolge der schnellen Befüll- und Entnahmeraten stellen sich entsprechend hohe Temperaturanstiege bzw. -absenkungen ein. Diese hohen Raten haben zur Folge, dass der Tageszyklus auch nach dem siebten Tag unverändert bleibt.

Diese Untersuchungen werden im Folgenden unter Zugrundelegung verschiedener Modell-Situationen variiert.

Sie unterscheiden sich

- in der Teufenlage der Kavernen,
- in den Volumina und
- im Druckspiel.

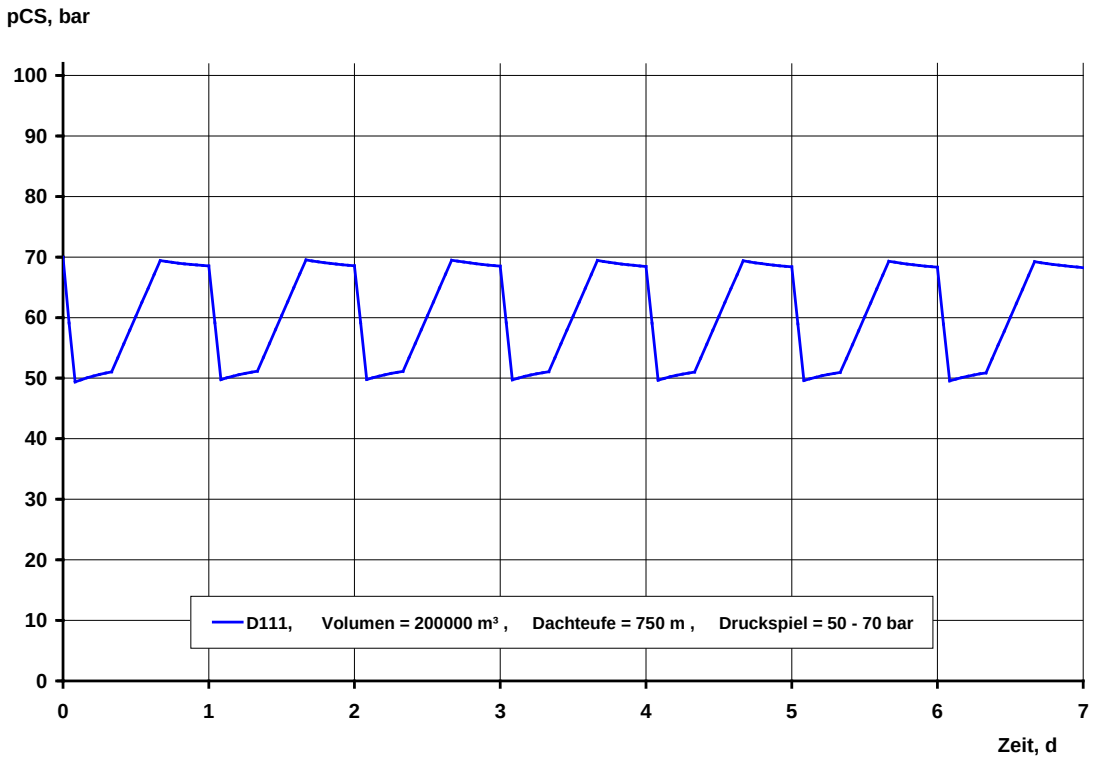


Abbildung 4-2: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kaverne D111 in Rohrschuhteufe

4.5.1.3 Variationsberechnungen

Eine Reihe von Variationsberechnungen erlaubt die Abschätzung der potentiellen Eignung von Kavernen mit unterschiedlichen Auslegungsparametern.

- Einfluss der Teufenlage

Im Vergleich zum Modell D111 befindet sich das Dach der Kaverne D121 in einer Teufe von 950 m und damit 200 m tiefer. Das Volumen entspricht dem der Kaverne D111. Bei gleichem Druckspiel zwischen 50 und 70 bar ergibt sich dieselbe Temperaturdifferenz von 31,7 °C. Der Vergleich der jeweils berechneten Verläufe der Kaverneninnentemperaturen ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

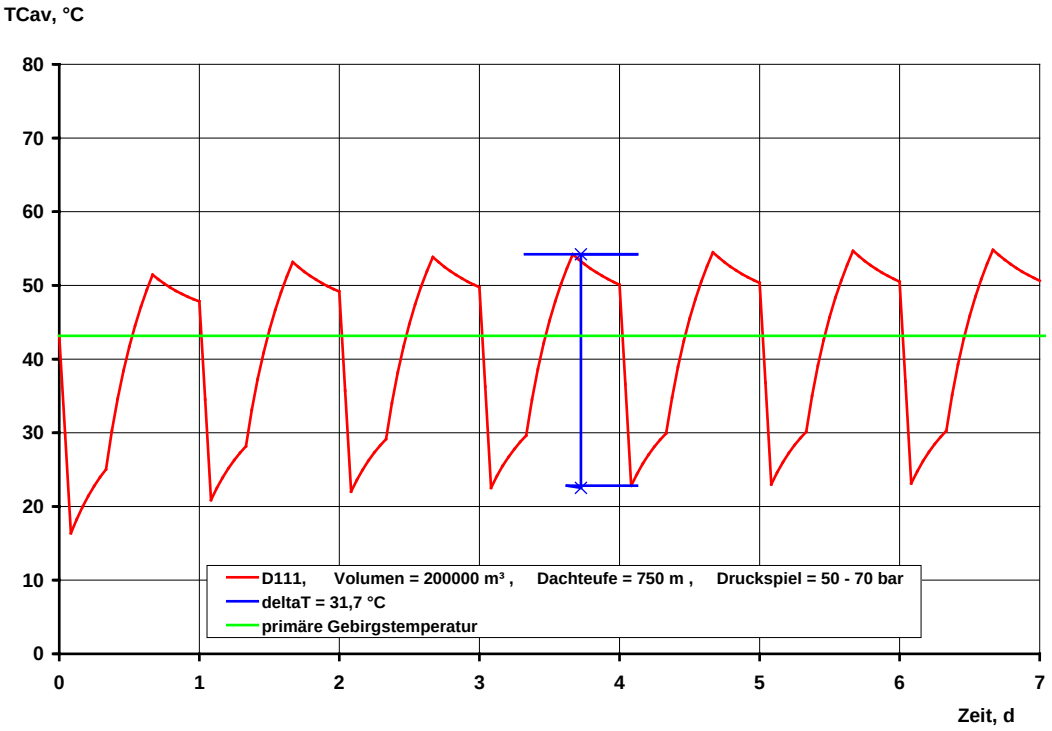


Abbildung 4-3: Innentemperaturverlauf der Kaverne D111 und maximale Temperatur-differenz

- Einfluss des Kavernenvolumens

Es folgt eine Variation des Kavernenvolumens gegenüber der Kaverne im Modell D111 von 200.000 m³ auf 500.000 m³ im Modell D211. Auf Grund des größeren Volumens ändert sich der Verlauf des Druckspiels für dieses Modell. Bei dieser Kaverne verlängert sich die angesetzte Entnahmezeit um zwei Stunden. Die anschließende Stillstandszeit verkürzt sich dadurch auf vier Stunden. Die Dachteufe sowie minimaler und maximaler Innendruck bleiben gegenüber dem Referenzmodell D111 unverändert.

Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Temperatur in der Druckabsenkphase sinkt geringfügig von 31,7 °C auf 31,5 °C.

- Einfluss des Druckniveaus beim Druckspiel

Im nächsten Berechnungsmodell werden die Dachteufe von 750 m und das Volumen von 200.000 m³ vom Ausgangsberechnungsmodell übernommen. Verändert wird lediglich das Druckniveau. Minimaler und maximaler Druck werden um 30 bar angehoben. Eine Gegenüberstellung der Druckverläufe ist in Abbildung 4-5 blau dargestellt.

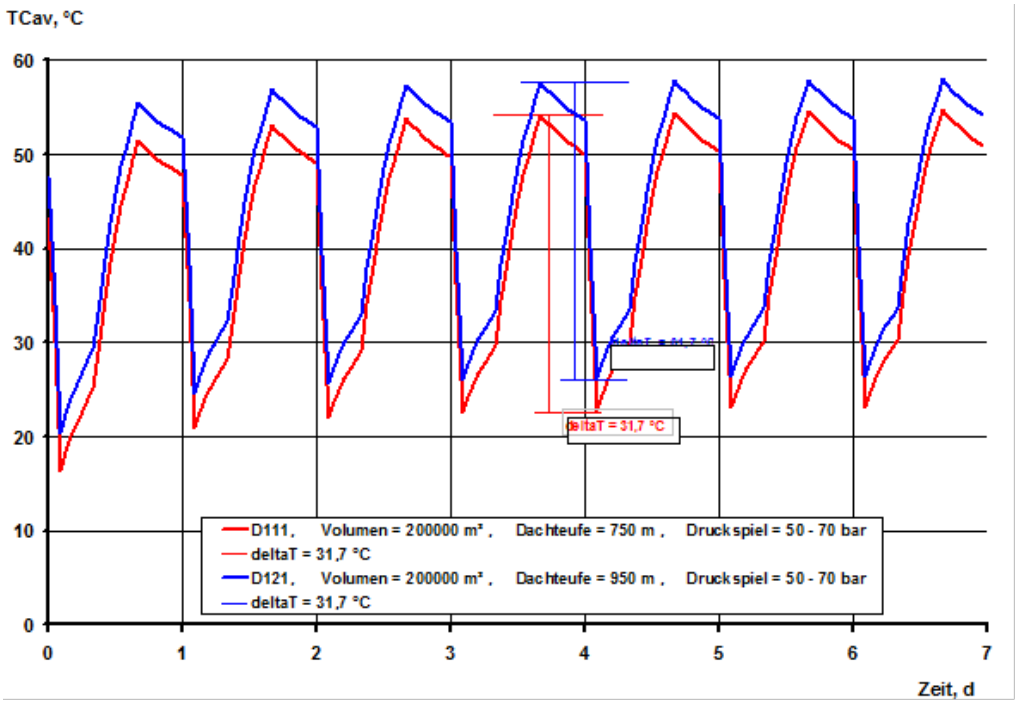


Abbildung 4-4: Gegenüberstellung der Verläufe der Innentemperatur der Kavernen D111 und D121

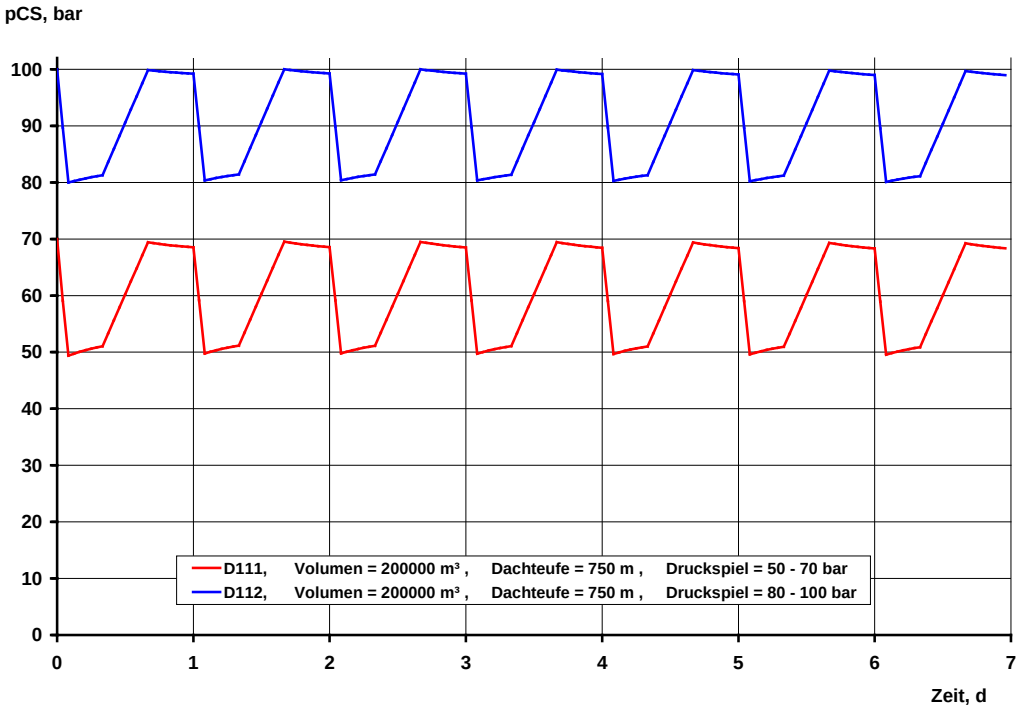


Abbildung 4-5: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kavernen D111 und D112 in Rohrschuhteufe

Die Abbildung 4-6 zeigt den resultierenden Temperaturverlauf. Auf Grund des um 30 bar angehobenen Kaverneninnendrucks ergibt sich eine deutliche Reduzierung der Temperaturdifferenz während einer Absenkphase. Diese Differenz sinkt von 31,7 °C auf 21 °C. Der Grund liegt darin, dass bei dem höheren Druckniveau eine geringere Druckluftmenge benötigt wird, um den Druck in der Kaverne um 20 bar zu verringern.

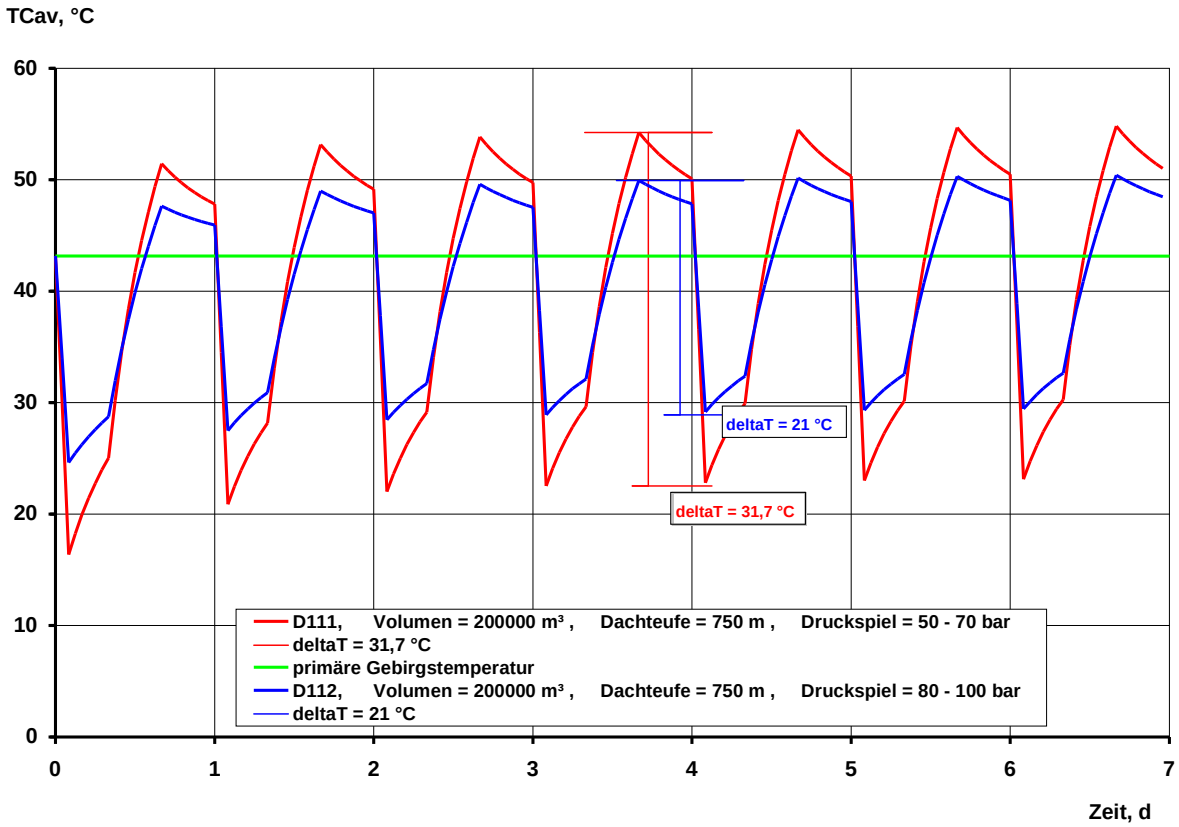


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Verläufe der Innentemperatur der Kavernen D111 und D112

- Einfluss von Änderungen im Betriebsverlauf

Neben den bereits betrachteten Variationen der Teufenlage, der Kavernenvolumina und des Druckspiels wurden weitere Einflussmöglichkeiten wie die Anordnung des Zyklenverlaufs und der Injektionstemperatur der Luft betrachtet.

Die folgenden Berechnungen werden am Beispiel der Referenzkaverne D111 durchgeführt. Wie in Abbildung 4-7 (Variation D111_a) zu erkennen ist, werden die sieben Zyklen bis auf 28 Zyklen verlängert. Dabei zeigt sich, dass sich beim Temperaturverlauf fast keine Änderungen ergeben.

Ein weiteres Szenario lieferte der Stopp des Befüll- und Entnahmevorgangs nach 28 Tagen Betriebszeit (siehe Anhang 4-1, Bilder 28 bis 30, Variation D111_b). Die Stillstandszeit beginnt, nachdem der Maximaldruck von 70 bar erreicht wird. Da die primäre Gebirgstemperatur zu diesem Zeitpunkt geringer ist als die Kaverneninnen-temperatur, sinkt der Druck etwas ab und die Temperatur in der Kaverne gleicht sich nach einigen Wochen der Gebirgstemperatur an.

In einer weiteren Variation des Betriebsverlaufs (siehe Anhang 4-1, Bilder 31 bis 33, Variation D111_c) wird der Entnahmevorgang nach Erreichen des Minimaldrucks von 50 bar nach dem 25. Tag gestoppt. In diesem Fall ist die Gebirgstemperatur höher als die Kaverneninnentemperatur und der Druck in der Kaverne steigt etwas an. Für den Temperaturverlauf bewirkt der Stillstand eine Angleichung nach einigen Wochen an die Gebirgstemperatur.

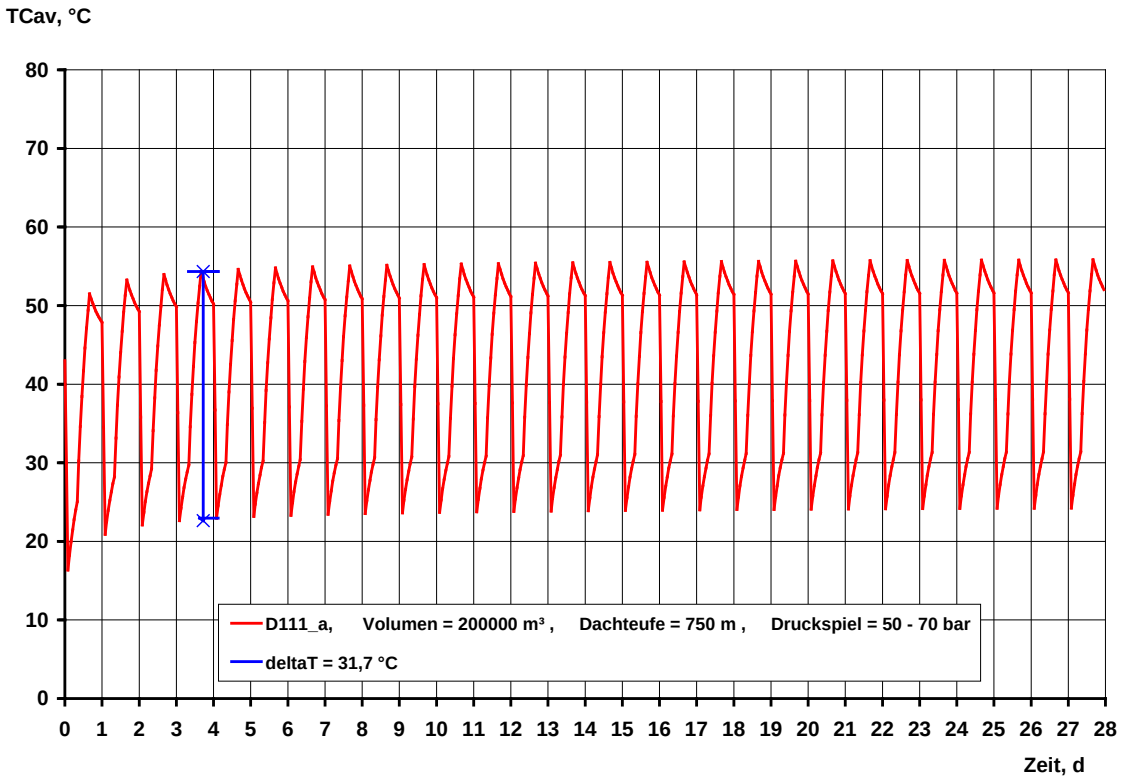


Abbildung 4-7: Innentemperaturverlauf der Kaverne D111 Variation a

Die Änderung der Befülltemperatur stellte ein weiteres Szenario dar, um die Auswirkungen auf die Temperaturverteilung in der Kaverne nachzuvollziehen. Bei den Randbedingungen der Referenzkaverne ergibt eine Befülltemperatur von 40 °C eine maximale Temperaturdifferenz von 31,5 °C. Wenn die Befülltemperatur sich auf 20 °C

halbiert, führt das zu einer Verringerung der Temperaturdifferenz um 2 °C. Selbst eine nur hypothetisch angenommene Befülltemperatur von 1 °C ergäbe noch eine Differenz von 28 °C. Die Druck- und Temperaturverläufe dieser Variationen D111_01, D111_20 und D111_40 sind im Anhang 4-1 Bilder 34 bis 42 dargestellt.

4.5.1.4 Schlussfolgerungen zum thermodynamischen Verhalten einer Druckluft-Kaverne

Unter Berücksichtigung der Annahmen und Voraussetzungen ergeben sich im Hinblick auf das thermodynamische Verhalten einer Druckluft-Kaverne aus den Variationsberechnungen die folgenden Schlüsse:

- Kavernen in größerer Teufe zeigen zwar ein höheres Temperaturniveau, die Auswirkungen auf das thermodynamische Verhalten sind auf Grund der nahezu konstanten Temperaturdifferenz in einem Druckspiel unbedeutend.
- Größere Kavernen haben bei gleichem Druckspiel zwar dieselben Temperaturdifferenzen wie kleinere, lassen jedoch auf Grund ihres Volumens größere Entnahme- und Befüllraten zu.
- Die Kavernen mit einem höheren Druckniveau haben eine deutlich kleinere Differenz zwischen maximaler und minimaler Temperatur eines Druckspiels und damit ein günstigeres thermodynamisches Verhalten.
- Ein längerer Stillstand bewirkt, dass sich die Temperatur nach einigen Wochen der Gebirgstemperatur angleicht.
- Die Befülltemperatur wirkt sich nur marginal auf die Temperaturdifferenz in der Kaverne aus.

4.5.2 Thermomechanische Berechnungen

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Untersuchungen wurden im Anschluss thermomechanische Berechnungen mit dem Ziel durchgeführt, die Spannungsumlagerungsprozesse in dem die Kaverne umgebenden Salzgesteins während der Abkühlung und der Erwärmung der Druckluft zu erfassen. Da es sich nicht um einen adiabatischen Prozess handelt, erfolgt ein ständiger Wärmeaustausch zwischen der Druckluft und dem Salzgestein. Zur Bewertung wurden die drei Hauptspannungen an der Kavernenwand herangezogen. Der maßgebende Bereich für die gebirgsmechanische Beurteilung hängt dabei von der Konfiguration der Kaverne ab.

Im Rahmen der Spannungsbewertung hat insbesondere das Auftreten von Zugspannungen im hohlraumnahen Bereich eine große Bedeutung. Die Zugfestigkeit von

Salzgestein ist gegenüber der Druckfestigkeit vergleichsweise gering und kann im Bereich von 0,5 MPa bis 1,5 MPa eingeschätzt werden.

Bei Überschreiten der Zugfestigkeit muss damit gerechnet werden, dass diskrete Risse senkrecht zur Zugspannungsrichtung auftreten.

Nach Auftreten derartiger Risse, ob vertikal oder horizontal, wird die Luft mit dem entsprechenden Druck in den Risshohlraum eindringen und die Risslänge vergrößern. Zurzeit gibt es keine theoretischen Ansätze, inwiefern sich die Sekundärspannungen ändern und inwieweit sich bei wiederholtem Druckspiel die Rissfortpflanzung in das ungestörte Salzgebirge erstreckt.

Um den Wandbereich nicht durch diskrete Rissbildung zu schädigen, ist es erforderlich, die entsprechenden Sekundärspannungen so zu begrenzen, dass die Zugfestigkeit des Salzgesteins nicht überschritten wird. Dieser Zusammenhang gilt selbstverständlich auch für die Wasserstoff-Kavernen.

Generell müssen für den Aufbau theoretischer Berechnungsmodelle zur Durchführung thermomechanischer Berechnungen im Kavernenbau einige Idealisierungen vorgenommen werden, die die projektspezifischen Randbedingungen so vereinfachen, dass die theoretische Analyse mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Diese Vereinfachungen dürfen jedoch die charakteristischen Phänomene nicht vernachlässigen. Die wesentlichen Vereinfachungen und Annahmen werden im Folgenden erläutert.

Prinzipiell ist das mechanische Verhalten von Steinsalz eingehend erforscht und ausreichend dokumentiert.

Für die Berechnungen der Spannungsumlagerungsprozesse im die Kavernen umgebenden Salzgestein wird das zeitabhängige Stoffgesetz Lubby2 verwendet, das am Institut für Geotechnik, Abteilung Unterirdisches Bauen an der Leibniz Universität Hannover, entwickelt wurde und die Brauchbarkeit in zahlreichen Kavernen- und Forschungsprojekten unter Beweis gestellt hat.

Bei Berücksichtigung des Übergangskriechens mit Zeitverfestigungsansatz gilt für die viskose Verzerrungsrate bei dreidimensionalen Spannungszuständen folgender Ansatz:

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^{v}(t) = \frac{3}{2}\left(\frac{1}{\overline{\eta}_k(\sigma)} \exp\left(-\frac{\overline{G}_k(\sigma)}{\overline{\eta}_k(\sigma)} \cdot t \right) + \frac{1}{\overline{\eta}_m(\sigma)} \right) \cdot \underline{M}_2 \cdot \underline{\sigma}$$

mit dem Verzerrungsgeschwindigkeitsvektor,

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^{v^T} = \left\{ \dot{\varepsilon}_x^v \quad \dot{\varepsilon}_y^v \quad \dot{\varepsilon}_z^v \quad \dot{\gamma}_{xy}^v \quad \dot{\gamma}_{yz}^v \quad \dot{\gamma}_{xz}^v \right\}$$

dem Spannungsvektor der Filtermatrix M2

$$\underline{M}_2 = \begin{vmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

dem Maxwell – Viskositätsmodul $\overline{\eta}_m$,

dem Kelvin – Viskositätsmodul $\overline{\eta}_k$ und

dem Kelvin – Schubmodul $\overline{G}_k$.

Für die verschiedenen Viskositätsfunktionen werden die Ansätze

$$\overline{\eta}_M(\sigma) = \overline{\eta}_M^* \cdot \exp(m \cdot \sigma_{eff}) \cdot \exp(l \cdot T)$$

$$\overline{\eta}_k(\sigma) = \overline{\eta}_K^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_{eff})$$

$$\overline{G}_k(\sigma) = \overline{G}_k^* \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_{eff})$$

gewählt, worin die effektive Spannung σeff definiert ist als

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

mit der 2. Invariante des Deviators des Spannungstensors

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

und σ1, σ2 und σ3 als den drei Komponenten des Hauptspannungstensors.

Folgende Parameter wurden den Berechnungen zugrunde gelegt:

$\overline{\eta}_M$ = 2.05e14 d*MPa

m = -0.35 1/MPa

l = -0.05 1/K

$\overline{G}_k$ = 5.359e4 MPa

k1 = -0.19220 1/MPa

$\overline{\eta}_k$ = 6.861e4 d*MPa

k2 = -0.18220 1/MPa

Werden die aus Laborversuchen ermittelten Parameterwerte für $\overline{\eta}_M$, $\overline{G}_k$ bzw. $\overline{\eta}_k$ in einfach logarithmischen Diagrammen über die effektive Spannung aufgetragen und durch Geraden approximiert, so können die Parameter m, k1und k2, die den Grad der Nichtlinearität zwischen der Spannung und der Kriechrate repräsentieren, aus den Steigungen der jeweiligen Geraden für eine konstante Versuchstemperatur bestimmt werden. Die Kennwerte $\overline{\eta}^*_M$, $\overline{G}^*_K$ und $\overline{\eta}^*_K$ stellen Strukturfaktoren dar, die sich für σeff = 0 als Ordinatenwerte ablesen lassen.

Den Untersuchungen liegt ein angenommenes Tragverhalten zugrunde, das dem einer Kaverne im Feld entspricht. Der jeweils für die rotationssymmetrischen Berechnungsmodelle gewählte Außenradius wird als ausreichend groß angesehen und berücksichtigt den Erfahrungsstand des Instituts für Geotechnik, Abteilung Unterirdisches Bauen.

Die thermisch induzierten Dehnungen werden aus dem Produkt des Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Temperaturänderung berechnet. Durch Superposition ergeben sich daraus die spannungs- und temperaturinduzierten zeitabhängigen Gesamtdehnungen, die die Basis bilden für die Spannungsumlagerungsprozesse im Salzgestein.

Generell wird der Spannungszustand in der Umgebung einer gasgefüllten Kaverne im Salzgestein durch die Analyse der drei Hauptspannungen im maßgebenden Bereich des Hohlraumrands bewertet. Für eine Druckluftkaverne mit hohen Druckraten im Tageszyklus reicht es aus, die vertikale Hauptspannung für die Bewertung heranzuziehen, da die anderen beiden Hauptspannungen nicht die Maximal- bzw. Minimalwerte der σ_z-Komponente erreichen.

Die thermomechanisch gekoppelten Berechnungen werden sowohl für die Druckluft- als auch für die Wasserstoffkavernen mit dem Finite-Differenzen-Programm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions) der Firma Itasca Consultants GmbH durchgeführt. Sämtliche für die Druckluftkavernen erzeugten Spannungsverläufe sind im Anhang 4-1 den Bildern 43 bis 50 zu entnehmen. Abbildung 4-8 zeigt für die Referenzkaverne D111 den Verlauf der Vertikalspannungskomponenten im mittleren Hohlraumrandbereich. Bedingt durch die gedrungene Kavernenform wird dieser Bereich der maßgebende.

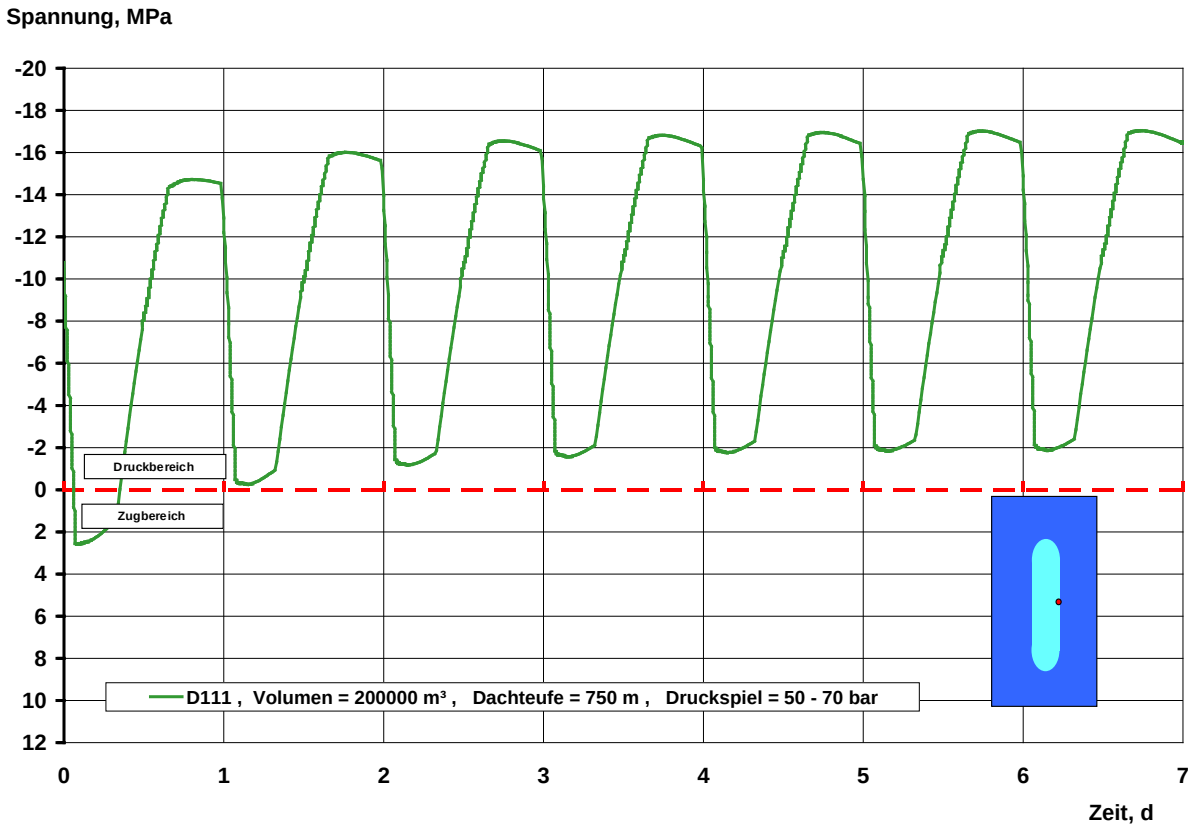


Abbildung 4-8: Verlauf der Spannungskomponente sigma zz im mittleren Hohlraumrandbereich der Kaverne D111

Nach etwa drei Tagen pendelt sich der Amplitudenverlauf auf einen konstanten Wert ein. Die maximalen Druckspannungen erreichen etwa 17 MPa, während bei der Entnahmephase der Wert auf ca. 2 MPa im Druckbereich absinkt. Während des ersten Zyklus treten Zugspannungen auf, dies ist jedoch nur eine Reaktion auf den vereinfachten Ausgangsspannungszustand und kann für die Bewertung vernachlässigt werden.

Ein ähnliches Ergebnis stellt sich ein, wenn die Dachteufe 200 m tiefer geplant ist. Selbst eine Vergrößerung des Volumens auf 500.000 m³ bewirkt nur einen Anstieg der Minimalwerte um etwa 1 MPa auf ca. 3 MPa.

Ein anderes Ergebnis wird erzielt, wenn das Druckniveau angehoben wird (siehe Abbildung 4-9). Wie bereits die Temperaturberechnungen gezeigt haben, wirkt sich diese Erhöhung günstig aus. Die kleinsten Spannungswerte liegen in diesen Fällen oberhalb von 6 MPa.

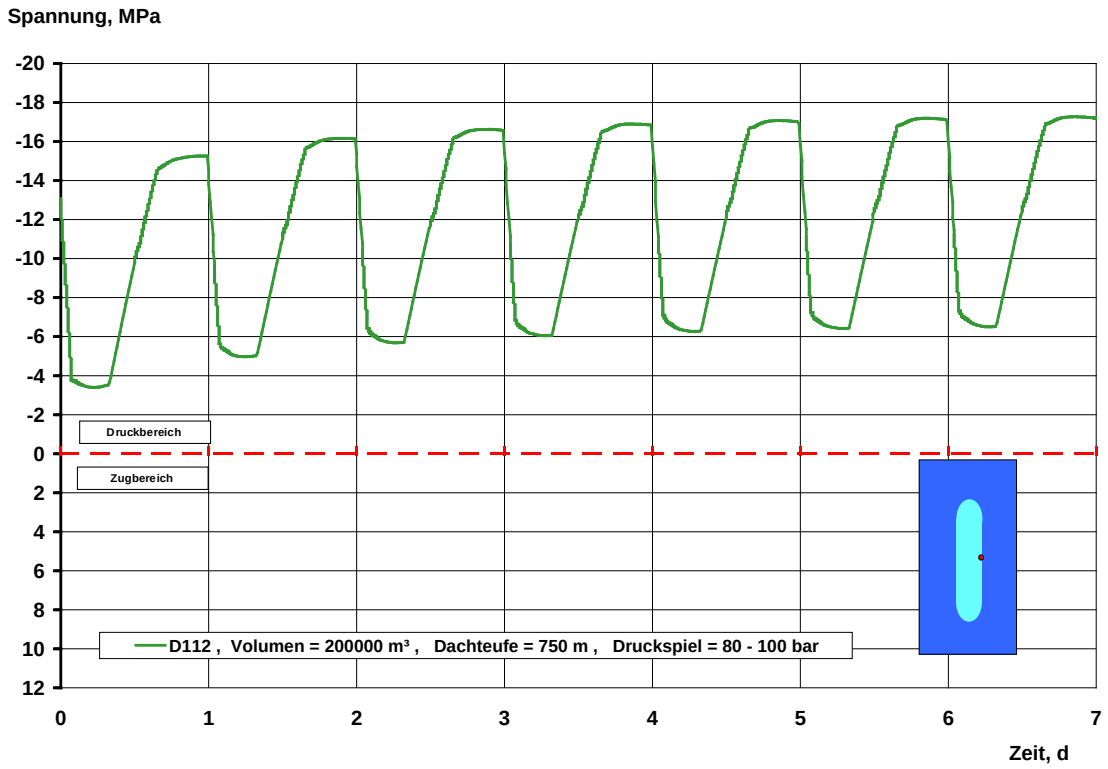


Abbildung 4-9: Verlauf der Spannungskomponente sigma zz im mittleren Hohlraumrandbereich der Kaverne D112

Schlussfolgerungen zum thermomechanischen Verhalten einer Druckluft-Kaverne

Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen hängt die Beanspruchung des Salzgesteins in der Umgebung einer Druckluftkaverne entscheidend vom Druckniveau ab. Im Rahmen dieser Variationsuntersuchung konnte kein signifikanter Einfluss auf die maßgebende Spannungsverteilung im Wandbereich der Kaverne durch eine Tieferlegung des Dachbereichs oder durch die Vergrößerung des Kavernenvolumens festgestellt werden.

4.6 Speicherung von Wasserstoff

Die Größe der zu untersuchenden Kavernen wurde wiederum einvernehmlich mit den Verbundpartnern festgelegt. Im Vergleich mit den Druckluftkavernen sind die gewählten Volumina mit 350.000 m³ und 700.000 m³ größer und entsprechen damit den Anforderungen an eine wirtschaftliche Nutzung. Es wurden drei Teufenlagen für ein mögliches Kavernendach gewählt, nämlich 1.000 m, 1.200 m und 1.400 m. Insgesamt sind acht Modellkavernen für Wasserstoff den Bewertungsdurchläufen unterzogen worden. In Tabelle 4-4 sind die Eingangsgrößen der Typenkavernen zusammengestellt.

Tabelle 4-4: Eingangsgrößen für die Untersuchung der Wasserstoff-Kavernen

Modell-kaverne	Volumen (m³)	Dachteufe (m)	Kavernen-tiefstes (m)	Radius (m)	Druckspiel (bar)
H1111	350.000	1.000	1.183	25,9	60 - 170
H1212		1.200	1.383	25,9	75 - 205
H1222		1.200	1.550	18,16	75 - 205
H1323		1.400	1.750	18,16	90 - 240
H2131	700.000	1.000	1.183	37,57	60 - 170
H2232		1.200	1.383	37,57	75 - 205
H2212		1.200	1.550	25,9	75 - 205
H2313		1.400	1.750	25,9	90 - 240

Der Buchstabe H bedeutet Wasserstoffkaverne, die nächste Ziffer bezieht sich auf das Volumen. Die zweite Zahl beschreibt die Dachteufe, während die dritte den Radius kennzeichnet. Die vierte Ziffer weist auf das Druckspiel hin.

Bei einem Volumen von 350.000 m³ ergibt sich bei einer Höhe von 183 m ein Radius von 25,93 m. Dieser gedrungenen Form stehen die Kavernen bei gleichbleibendem Volumen mit einer Höhe von 350 m entgegen, die einen Radius von 18,16 m aufweisen.

Die Gruppe der mit 700.000 m³ Volumen doppelt so großen Kavernen befindet sich in der gleichen Teufenlage und unterscheidet sich ebenfalls in den Radien. Eine Höhe von 183 m erfordert hier einen Radius von 37,57 m, während eine Höhe von 350 m mit einem Radius von 25,88 m verbunden ist. Die Lage der Modellkavernen ist in Abbildung 4-9 zu erkennen.

4.6.1 Thermodynamische Berechnungen

Für die folgenden Berechnungen werden wiederum die in Tabelle 4-1 angenommenen thermischen Materialparameter für das die Kavernen umgebende Salzgestein zugrundegelegt. Die thermodynamischen Untersuchungen wurden mit dem Programmsystem KavTec der Firma ESK in Freiberg durchgeführt, welches u. a. für die Berechnungen des Realgasverhaltens von Wasserstoff entwickelt wurde.

Bevor jedoch mit den Berechnungen begonnen werden konnte, musste ein für die Wasserstoffspeicherkavernen spezifischer Lastfall entwickelt werden, der sich von dem für die Druckluftspeicherung erheblich unterscheidet.

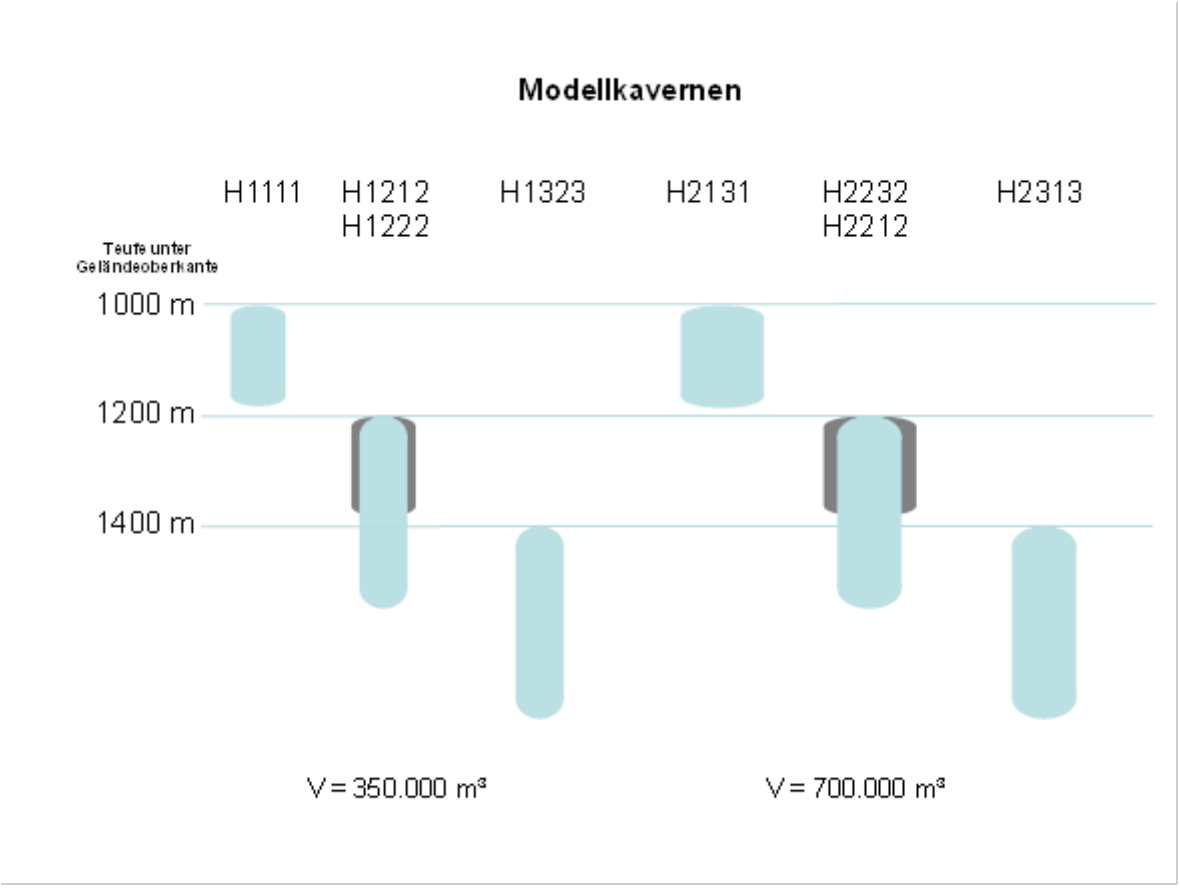


Abbildung 4-10: Lage der Modellkavernen zur Wasserstoffspeicherung

4.6.1.1 Betriebsszenario

Es wurde von einem saisonalgeprägten Speicherzyklus ausgegangen, der basierend auf den Erfahrungen mit Erdgaskavernen prinzipiell fluktuierende Ein- und Auslagerungsprozesse zulässt, aber relevante Stillstandsphasen sowohl im unteren Druckbereich als auch bei Maximaldruck beinhaltet. Es wurden eine Intervalllänge eines Druckzyklus von etwa 170 Tagen für die kleinen und ein Zyklus von 190 Tagen für die größeren Kavernen als ein repräsentatives Druckspiel gewählt. Ebenfalls wurden einvernehmlich Entnahmeraten von 150.000 m³ und Befüllraten von 115.000 m³ festgelegt, welche in etwa die auf den derzeitigen Stand der Technik beruhenden Massenströme in Abhängigkeit des Durchmessers der Zugangsbohrung darstellen. Die größere Zeitdauer

ergibt sich, weil die Entnahme- und Befüllphase für die größeren Kavernen doppelt so lange dauern.

4.6.1.2 Ergebnisse für das Referenzmodell H1111

Als Referenzmodell wurde die Kaverne H1111 mit einer Dachteufe von 1.000 m und einem Volumen von 350.000 m³ gewählt. Den Druckverlauf zeigt Abbildung 4-11.

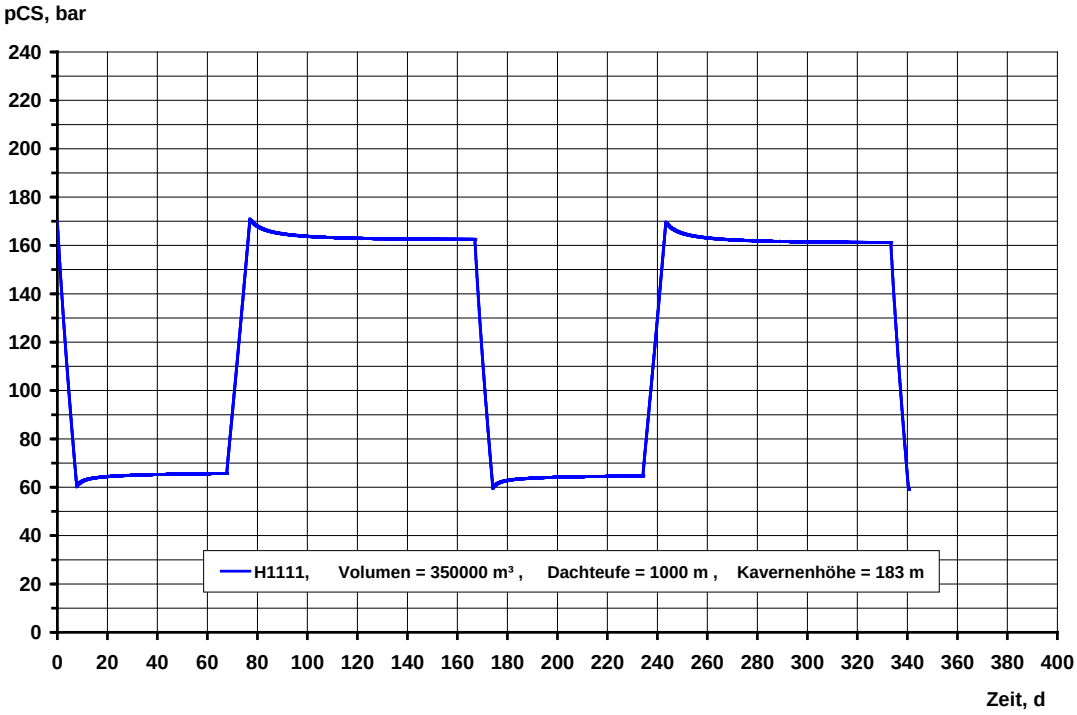


Abbildung 4-11: Entwicklung des Kaverneninnendrucks der Kaverne H1111 in Rohrschuhteufe

Ausgehend vom Maximaldruck von 170 bar sinkt der Kavernendruck infolge der konstanten Entnahmerate in etwa acht Tagen auf 60 bar. Während der nachfolgenden 60-tägigen Stillstandsphase erfolgt durch die Erwärmung des Wasserstoffs eine geringe Druckerhöhung um ca. 5,8 bar. Mit der anschließenden Befüllphase in etwa 9 Tagen steigt der Druck wieder auf 170 bar, um während der nächsten Stillstandsphase von 90 Tagen auf ca. 162,8 bar abzufallen. Nach 170 Tagen wird der Zyklus wiederholt. Die Befülltemperatur beträgt ebenfalls 40 °C wie bei den Untersuchungen der Druckluftkavernen.

Das Ergebnis der Temperaturberechnung zeigt Abbildung 4-12. Bei der ersten Entnahmephase sinkt die Temperatur auf ca. 18 °C, um sofort nach Beginn der Stillstandsphase

nicht-linear auf ca. 45 °C anzusteigen. Die folgende Befüllphase bewirkt einen weiteren Anstieg auf 68 °C, wobei die Gastemperatur damit über der primären Gebirgstemperatur liegt. Da das System ein ausgeglichenes Temperaturfeld anstrebt, sinkt während der folgenden Stillstandsphase die Innentemperatur in der Kaverne auf 50 °C. Der nächste Zyklus ist dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturabfall und der -anstieg etwas geringer ausfallen. Die maximale Temperaturdifferenz beträgt 47,3 °C.

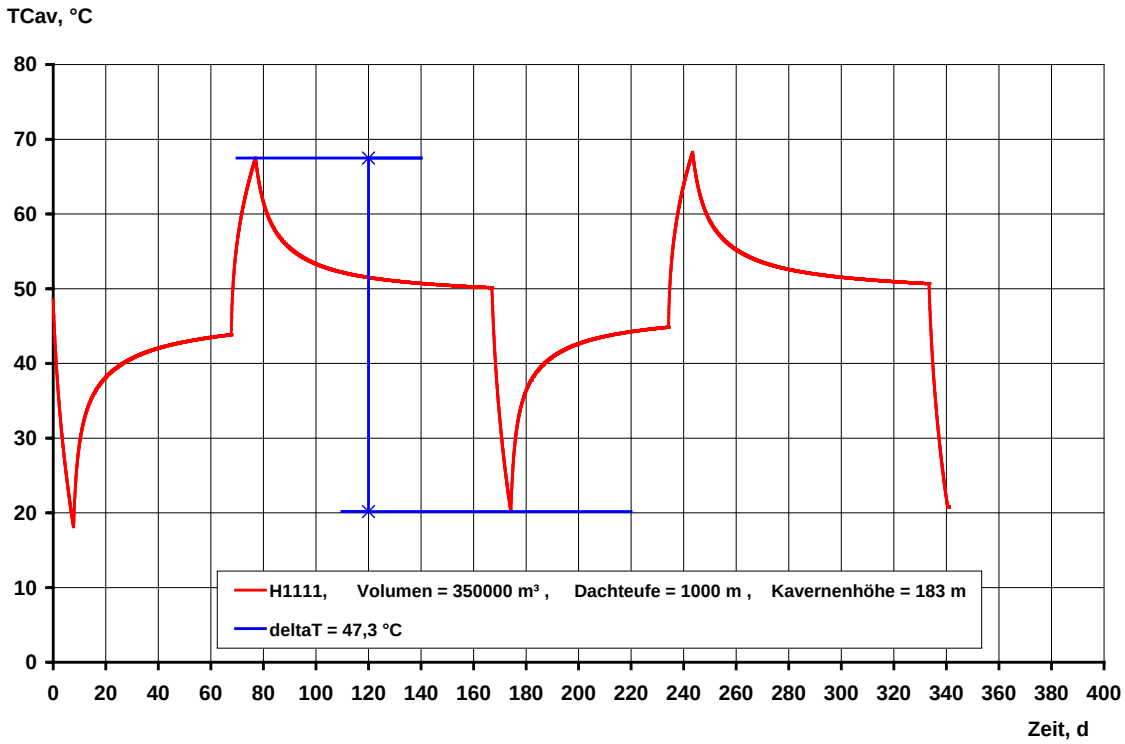


Abbildung 4-12: Innentemperaturverlauf der Kavernen H1111

Diese Untersuchungen werden im Folgenden unter Zugrundelegung unterschiedlicher Modelle wiederholt, wobei zwei Volumina berücksichtigt werden und die Form, die Teufenlage und das Druckspiel variieren. Die Darstellungen einschließlich der jeweiligen Befüll- und Entnahmezeiten werden im Anhang 4-2 zusammengefasst.

4.6.1.3 Variationsberechnungen

Die folgenden Variationsberechnungen sind Grundlage für die Abschätzung der potentiellen Eignung von Kavernen mit unterschiedlichen Auslegungsparametern.

Als Bewertungsmaßstab dient wiederum die berechnete Temperaturdifferenz während der Entnahmephase.

- Einfluss der Teufenlage

Bei konstantem Volumen und konstanter Form der Kavernen zeigen die Abbildungen 53 und 56 im Anhang 4-2 für die Modelle H1111 und H1212, dass die maximalen Temperaturdifferenzen mit 47,3 °C und 48,2 °C annähernd gleich sind, wenn die Teufenlagen sich beispielsweise um 200 m ändern. Ein ähnliches Ergebnis zeigt der Vergleich der Modelle H1222 und H1323. Die Temperaturverläufe sind in den Abbildungen 59 und 62 im Anhang 4-2 dargestellt. Mit 41,3 °C und 42,5 °C sind die Werte nur geringfügig unterschiedlich. Im Vergleich zu den Modellen H1111 und H1212 sind die Temperaturdifferenzen erheblich geringer. Der Grund liegt in der schlanken Form der Kaverne, wodurch sich ein kleineres Verhältnis vom Volumen zur Oberfläche der Kavernen ergibt.

Diese Tendenz ist ebenso zu erkennen, wenn die Ergebnisse der Berechnungen H2212 und H2313 für die größeren Kavernen herangezogen werden. Wie in den Abbildungen 71 und 74 im Anhang 4-2 zu erkennen ist, sind die Temperaturdifferenzen mit 30,9 °C und 31,8 °C nur unwesentlich unterschiedlich. Allerdings ist anzumerken, dass bei den Vergleichen die Druckspiele etwas unterschiedlich sind.

Obwohl die verfügbare Arbeitsgasmenge größer ist bei den Kavernen in größeren Teufenlagen, ergeben sich unter Berücksichtigung gleicher Entnahme- und Befüllraten fast gleiche Temperaturdifferenzen.

- Einfluss der Volumina

Wie die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen in den Bildern 63 bis 74 des Anhangs 4-2 zeigen, sind die Temperaturdifferenzen bei den größeren Kavernen etwa um 10 °C kleiner, wenn die Form der Kavernen gleich bleibt.

4.6.1.4 Schlussfolgerungen zum thermodynamischen Verhalten einer Wasserstoff-Kaverne

Unter Berücksichtigung der Annahmen und Voraussetzungen ergeben sich für das thermodynamische Verhalten einer Wasserstoffkaverne folgende Schlussfolgerungen:

- Bei gleichen Entnahme- und Befüllraten ist das thermodynamische Verhalten bei größeren Kavernen günstig, d. h. die für die Dimensionierung maßgebende Temperaturdifferenz ist erheblich kleiner.
- Bei konstantem Volumen wirken sich geringere Radien und damit schlankere Formen im Hinblick auf das thermodynamische Verhalten günstig aus, d. h. die maßgebende Temperaturdifferenz ist auch hier kleiner.
- Mit zunehmender Teufenlage kann der zulässige Maximaldruck angehoben werden. Der erforderliche Minimaldruck zur Gewährleistung der Standsicherheit muss aber

nicht um den gleichen Betrag erhöht werden, so dass sich insgesamt eine größere zulässige Druckdifferenz ergibt.

4.6.2 Thermomechanische Berechnungen

Für die Berechnungen der Spannungsumlagerungsprozesse im die Kavernen umgebenden Salzgestein zur Speicherung von Wasserstoff gelten dieselben Voraussetzungen und Annahmen wie für Druckluftkavernen. Allerdings ist der Lastfall in diesem Fall wesentlich komplexer und erstreckt sich über einen viel längeren Zeitraum als bei Kavernen zur Speicherung von Druckluft.

Zunächst wird der Sekundärspannungszustand durch einen ausreichend langen Verlauf bei konstanten Bedingungen berechnet. Dabei wird der Innendruck in der Kaverne auf den Maximaldruck und die Gastemperatur entsprechend der primären Gebirgstemperatur über einen ausreichend langen Zeitraum konstant gehalten. Durch diesen Verlauf wird ein stationärer Ausgangszustand erzeugt, der wiederum der Beginn des Bemessungslastfalls ist.

Zur Gewährleistung der Flexibilität in der Nutzung des Speichers müssen auch entsprechend lange Stillstandsphasen auf Maximal- und Minimaldruck berücksichtigt werden. Auf Grund der Temperaturänderungen wird der Spannungszustand bei längeren Standzeiten auf Maximaldruckniveau im Hinblick auf eine erneute schnelle Druckabsenkung dahingehend beeinflusst, dass der Druck asymptotisch auf einen projektspezifischen Wert sinkt. Das für den Betrieb zur Verfügung stehende Druckspiel reduziert sich dadurch erheblich bei Berücksichtigung von Stillstandszeiten.

Der Bemessungslastfall beinhaltet zwei Zyklen mit jeweils drei Entnahmephasen, ausreichend langen Standzeiten auf unterschiedlichen Druckniveaus sowie zwei Befüllphasen. Während der Standzeiten findet weder eine Gasentnahme noch eine Gasbefüllung der Kaverne statt. Am Beispiel der Referenzkaverne H1111 wird der Spannungsumlagerungsprozess während eines Zyklus erläutert.

Die blaue Druckkurve entspricht der radialen Spannungskomponente σ_{xx} im maßgebenden Randpunkt der Kaverne. Der grüne Kurvenverlauf gibt den Spannungsumlagerungsprozess der vertikalen Spannungskomponente σ_{zz} wieder, während die rote Linie den Verlauf der Tangentialspannungskomponente σ_{yy} darstellt. Maßgebend für die Bewertung ist wieder die Vertikalspannungskomponente

Wie in Abbildung 4-13 zu erkennen ist, wird in der ersten Absenkphase der Innendruck von 170 bar bis auf einen Innendruck von 60 bar abgesenkt, d. h. die Entnahmeperiode bewirkt diesen Druckabfall. Es schließt sich eine 60-tägige Standzeit an. Nachfolgend steigt der Kavernendruck während der Befüllphase wieder auf den Maximaldruck von 170 bar.

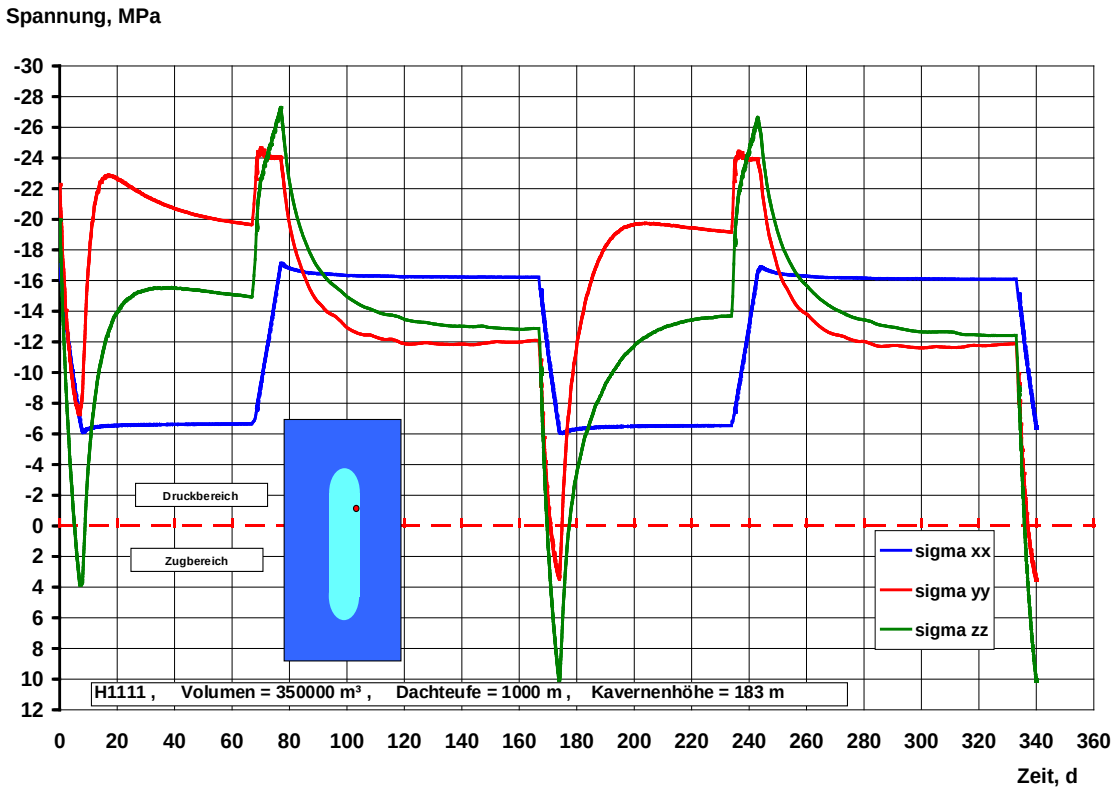


Abbildung 4-13: Verlauf der Spannungskomponenten oberen Hohlraumrandbereich der Kaverne H1111

Nach der zweiten 90-tägigen Stillstandsphase erfolgt noch einmal eine Entnahmephase, wobei der Druck wieder auf 60 bar abgesenkt wird.

Auf Grund des stationären Ausgangsspannungszustands sind die Spannungsumlagerungsprozesse nach der ersten Druckabsenkphase für eine Bewertung nicht maßgebend. Aus diesem Grund wird die zweite und dritte Absenkperiode für die Einschätzung des Spannungszustands herangezogen.

Wie deutlich zu erkennen ist, werden während der Stillstandsphase nach Erreichen des Maximaldrucks die beiden σ_z- und σ_y-Spannungen erheblich abgesenkt. Der Grund liegt darin, dass während der Befüllphase die Kavernentemperatur über die Gebirgstemperatur ansteigt. Wenn dieser Prozess gestoppt wird, versucht das kombinierte System Kaverne-Salzgebirge sofort wieder, einen ausgeglichenen Temperaturzustand zu erreichen, wodurch infolge des Wärmeaustauschs sich das Gas abkühlt und dieses wiederum zu den dargestellten Spannungsreduzierungen führt. Der Spitzenwert der σ_z-Spannung von 27,0 MPa verringert sich am Ende der Stillstandsphase auf etwa 13,0 MPa.

Die anschließende Entnahmephase führt dazu, dass sich die σ_z-Spannung bis in den Zugspannungsbereich reduziert. Theoretisch wird ein Wert von 10,0 MPa erreicht. Allerdings

ist anzumerken, dass es bei einer derartigen Beanspruchung des Salzgesteins sofort zu Rissbildungsprozessen kommt. Die Folge ist, dass durch die entstandenen Risse die Annahmen eines Kontinuums nicht mehr gelten und damit die Voraussetzungen für die Berechnungen nicht mehr zutreffen.

Die Konsequenz ist, dass derartig hohe Entnahmeraten über den gesamten Zeitraum vermieden werden sollten. um die Standsicherheit und Dichtheit einer Kaverne nicht zu gefährden. Derselbe Spannungsverlauf wiederholt sich während der dritten Entnahmephase, d. h. der Zustand wird durch Wiederholung nicht besser.

Bei der Bewertung des Spannungszustandes in der Umgebung einer Wasserstoffkaverne können dabei die σ_z-Spannungskomponenten herangezogen werden.

Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich, wenn die Dachteufe der Kaverne 200 m tiefer liegt. Selbst bei einer schlankeren Form wird der Zugspannungsbereich noch erreicht. Erst bei einer Dachteufe von 1.400 m sind die maßgebenden σ_z-Spannungen im Druckspannungsbereich (siehe Abbildung 4-14).

Die blaue Druckkurve entspricht der radialen Spannungskomponente σ_{xx} im maßgebenden Randpunkt der Kaverne. Der grüne Kurvenverlauf gibt den Spannungsumlagerungsprozess der vertikalen Spannungskomponente σ_{zz} wieder, während die rote Linie den Verlauf der Tangentialspannungskomponente σ_{yy} darstellt.

Eine größere Kaverne hat in diesem Fall ein günstigeres thermomechanisches Verhalten. Bei der untersuchten 700.000 m³-Kaverne reicht zwar eine Dachteufe von 1.000 m noch nicht aus, um nur im Druckspannungsbereich zu bleiben; eine Vergrößerung der Dachteufe auf 1.200 m zeigt aber schon den positiven Effekt, dass sich die maßgebenden σ_z-Spannungen mit etwa 1 MPa vom Zugspannungsbereich entfernen.

Unter Berücksichtigung der Annahmen und Voraussetzungen zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass bei den zugrundegelegten Entnahmeraten eine große und tief liegende Kaverne aus gebirgsmechanischer Sicht die günstigste Variante darstellt.

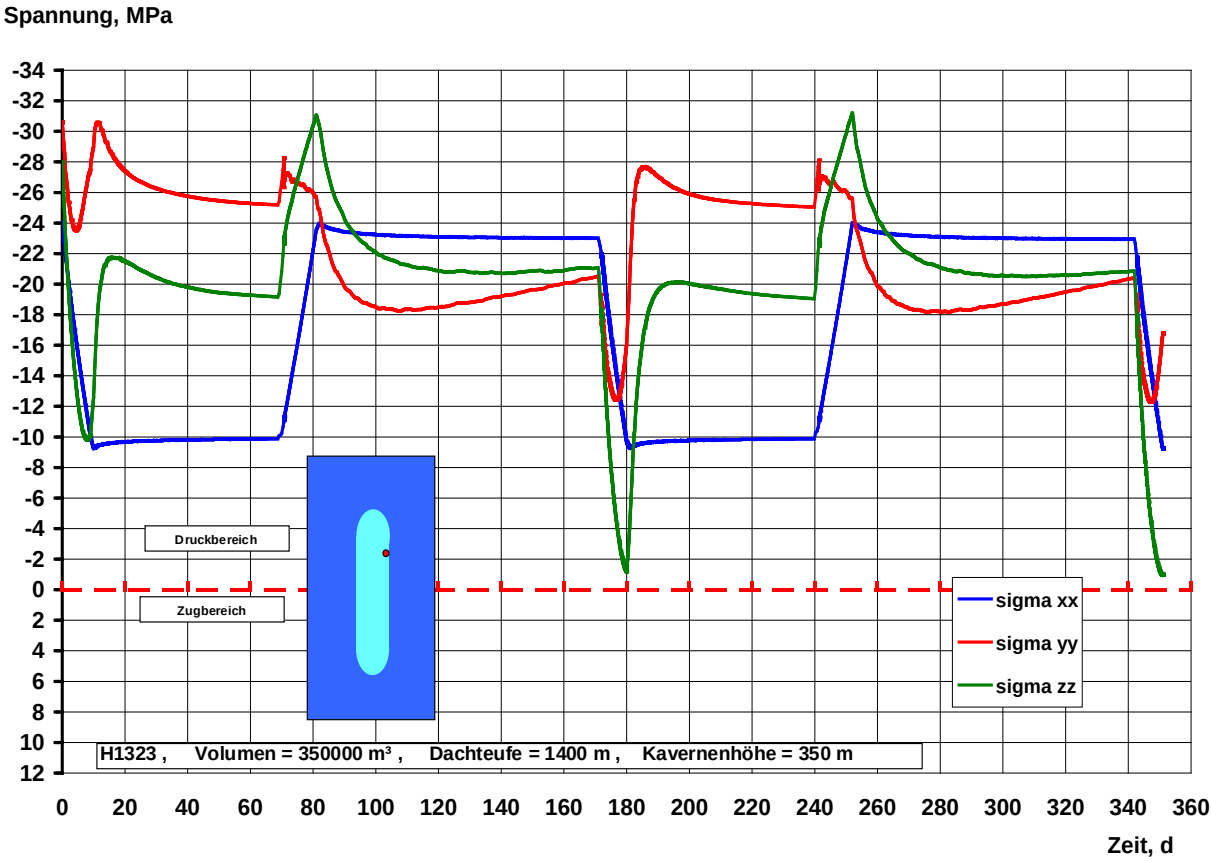


Abbildung 4-14: Verlauf der Spannungskomponenten im oberen Hohlraumrandbereich der Kaverne H1323

4.7 Übergabeparameter an die Arbeitspakete 1, 2 und 4

Im Folgenden sind die geometrischen Empfehlungen für das Speicherpotential enthalten, auf deren Grundlagen die Vorabschätzung bzw. die Vorauswahl der Salzstrukturen erfolgt ist. Tabelle 4-5 enthält die erforderlichen Mächtigkeiten und Abstände für die Errichtung einer Minimalkaverne mit 200.000 m³ Hohlraumvolumen (Nutzvolumen), Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 die Daten, welche für die Potentialermittlung in den Arbeitspaketen 4 und 5 übergeben wurden.

Tabelle 4-5: Auslegung einer Minimalkaverne in Abhängigkeit des Speichermediums und der Dachteufe

Teufe Kavernendach	**[m]**	750	950	1.000	1.200	1.400
Kavernenhöhe	**[m]**	182	182	182	182	182
Durchmesser geb. Umhüllende	**[m]**	64	64	64	64	64
Kavernenvolumen	**[m³]**	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
Benötigte Salzmächtigkeit	**[m]**	452	562	562	572	582
Absolutes Pfeilermaß	**[m]**	160	160	160	192	224
Abstand zum Salzstockrand	**[m]**	220	220	220	220	220

Tabelle 4-6: Übergabedaten an das Arbeitspaket 4 – geometrische Vorgaben

Fallnummer (verwendet in Kap. 4)	**Fallnummer Übergabe (verwendet in Kap. 5 + 6)**	**Kavernenvolumen**	**Kavernenhöhe**	**Durchmesser geb. Umhüllende**	**Dachteufe**	**Halslänge**	**Erforderliche Hangendschwebe**	**Erforderliche Liegendschwebe**	**Pfeilerstärke**	**Abstand zum Salzstockrand**
[-]	**[-]**	**[m³]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**	**[m]**
D-111	D-111	200.000	183	64	750	20	100	150	160	220
D-121	D-112	200.000	183	64	950	30	200	150	160	220
D-211	D-121	500.000	183	96	750	20	100	150	240	220
D-221	D-122	500.000	183	96	950	30	200	150	240	220
D-112	D-211	200.000	183	64	750	20	100	150	160	220
D-122	D-212	200.000	183	64	950	30	200	150	160	220
D-2	D-221	500.000	183	96	750	20	100	150	240	220
D-222	D-222	500.000	183	96	950	30	200	150	240	220

Fallnummer (verwendet in Kap. 4)	Fallnummer Übergabe (verwendet in Kap. 5 + 6)	Kavernenvolumen	Kavernenhöhe	Durchmesser geb. Umhüllende	Dachteufe	Halslänge	Erforderliche Hangendschwebe	Erforderliche Liegendschwebe	Pfeilerstärke	Abstand zum Salzstockrand
[-]	[-]	[m³]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
H-1111	H-111	350.000	183	80	1.000	30	200	150	200	220
H-1212	H-112	350.000	183	80	1.200	40	200	150	240	220
H-1222	H-113	350.000	350	68	1.200	40	200	150	204	220
H-1323	H-114	350.000	350	68	1.400	50	200	150	238	220
H-2131	H-121	700.000	183	110	1.000	30	200	150	275	220
H-2232	H-122	700.000	183	110	1.200	40	200	150	330	220
H-2212	H-123	700.000	350	80	1.200	40	200	150	240	220
H-2313	H-124	700.000	350	80	1.400	50	200	150	280	220

Tabelle 4-7: Übergabedaten an das Arbeitspaket 4 – betriebliche Vorgaben

Fallnummer Übergabe (verwendet in Kap. 5 + 6)	Medium	Kavernenvolumen	Dachteufe	Minimaler Rohrschuhdruck	Maximaler Rohrschuhdruck	Kavernentemperatur
[-]	[-]	[m³]	[m]	[bar]	[bar]	[°C]
D-111	Luft	200.000	750	50	70	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-112	Luft	200.000	950	50	70	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1

Fallnummer Übergabe (verwendet in Kap. 5 + 6)	Medium	Kavernenvolumen	Dachteufe	Minimaler Rohrschuhdruck	Maximaler Rohrschuhdruck	Kavernentemperatur
[-]	[-]	[m³]	[m]	[bar]	[bar]	[°C]
D-121	Luft	500.000	750	50	70	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-122	Luft	500.000	950	50	70	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-211	Luft	200.000	750	80	100	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-212	Luft	200.000	950	80	100	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-221	Luft	500.000	750	80	100	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
D-222	Luft	500.000	950	80	100	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-1
H-111	H2	350.000	1.000	60	170	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-112	H2	350.000	1.200	75	205	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-113	H2	350.000	1.200	75	205	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-114	H2	350.000	1.400	90	240	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-121	H2	700.000	1.000	60	170	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-122	H2	700.000	1.200	75	205	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-123	H2	700.000	1.200	75	205	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2
H-124	H2	700.000	1.400	90	240	Siehe Temperaturverlauf in Anhang 4-2

Die gewählten Injektionsraten finden über den resultierenden Temperaturverlauf Berücksichtigung in der Potentialabschätzung. Eine Änderung der Injektionsraten wirkt sich deutlich auf die mögliche Leistung einer Speicheranlage, jedoch nur geringfügig auf die speicherbare Energiemenge dieser aus, so dass auf eine Optimierung im Rahmen dieser Studie nicht weiter eingegangen wird.

4.8 Zusammenfassung

Die Variationsberechnungen haben gezeigt, dass die Temperaturentwicklung in einer Druckluftkaverne signifikant vom Druckniveau beeinflusst wird. Ein höherer Innendruck während der Betriebsphase führt zu geringeren Temperaturdifferenzen und damit letztendlich zu Spannungsumlagerungsprozessen, die während des gesamten Operationszyklus im Druckspannungsbereich bleiben.

Der Vergleich von Kavernen in den Teufenlagen 750 m und 950 m zeigt, dass die Teufen die Temperaturentwicklung in der Kaverne und den damit verbundenen Spannungszustand in der Umgebung des Hohlraums nur geringfügig beeinflussen. Als Konsequenz ist eine Druckluftkaverne, auf Grund des erforderlichen raschen Entnahmeprozesses während eines Tageszyklus, im entsprechenden Druckintervall anzulegen.

Im Vergleich dazu wird die Temperaturentwicklung in einer Wasserstoffkaverne entscheidend von der Teufenlage und dem Volumen beeinflusst. Gemäß der Forderung, keine Spannungsumlagerungsprozesse im Zugspannungsbereich zuzulassen, sind größere Wasserstoffkavernen in entsprechender Teufe anzulegen oder die Entnahmeraten bzw. Entnahmezeiten zu reduzieren. Größere Teufen haben zur Folge, dass der erforderliche Minimaldruck aus gebirgsmechanischer Sicht erhöht werden muss und sich damit das Volumen des Kissengases erhöht. Allerdings kann der zulässige Maximaldruck angehoben werden, wodurch sich insgesamt eine größere zulässige Druckdifferenz ergibt. Des Weiteren erhöhen sich mit zunehmender Teufenlage die primären Gebirgsspannungskomponenten und die primäre Gebirgstemperatur und führen zusammen zu höheren Konvergenzen. Kleinere Raten oder ein kürzeres Betriebsintervall können je nach Anwendungsziel der zukünftigen Kavernenspeicheranlage die Betriebsfreiheit reduzieren.

Insgesamt konnten über die differenzierten Bewertungsdurchläufe unter Berücksichtigung variierender Betriebsbedingungen und -abläufe die maßgebenden Auslegungsparameter für die Potentialabschätzung von Kavernen zur Druckluft- und zur Wasserstoffspeicherung zur Verfügung gestellt werden.

Nach Erschließung des lokalen Aufbaus der Salzstrukturen lassen sich die standortspezifischen Eigenschaften mit den gewonnenen Erkenntnissen zu den thermodynamischen und thermomechanischen Anforderungen verschneiden, um projektspezifisch die optimierte Dimensionierung einer Speicherkaverne für Druckluft oder Wasserstoff zu ermöglichen.

5 AP 4 – Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung

Koordinatoren: Dipl.-Ing. Sabine Donadei, Julia Kepplinger

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Fritz Crotogino, Dipl.-Ing. Sabine Donadei, Dipl.-Geol. Péter- László Horváth, Dipl.-Ing. Jürgen Kepplinger MBA, Dr.-Ing. Dirk Zander-Schiebenhöfer

Das Arbeitspaket 4 bildet die Brücke zwischen der Schaffung der notwendigen Grundlagen für eine belastbare Potentialabschätzung des Energiespeichervolumens norddeutscher Salzstrukturen (Arbeitspakete 1, 2 und 3) gegenüber existierenden Potentialabschätzungen und der Durchführung der Potentialabschätzung (Arbeitspaket 5). Es wurden Kriterien erarbeitet, welche eine generelle Aussage zu der potentiellen Eignung der Salzstrukturen für die Errichtung von Wasserstoff- und Druckluftspeicherkavernen ermöglichen sowie eine Methodik entwickelt, die die Abschätzung des möglichen Speicherpotentials der Salzstrukturen als Ziel besitzt. Darüber hinaus begleitete das Arbeitspaket 4 eng die Arbeiten der Arbeitspakete 1 bis 3 hinsichtlich der Festlegung notwendiger Annahmen und Randbedingungen.

5.1 Bewertungskriterien

Im Rahmen gemeinsamer Diskussionen mit den Verbundpartnern wurden die folgenden Kriterien zur Potentialabschätzung möglicher Druckluft- bzw. Wasserstoffspeicher erarbeitet.

5.1.1 Mindestmächtigkeit

Die erforderliche Mindestmächtigkeit des nutzbaren Bereiches der Salzstruktur ist von der Kavernenauslegung abhängig. Sie setzt sich aus den in Abbildung 5-1 gezeigten Bereichen zusammen.

Die Auslegung der Minimalkaverne erfolgt sowohl für Druckluft als auch für Wasserstoff für ein geometrisches Volumen von 200.000 m³. Da für die Potentialabschätzung nur die Ausdehnungen in 500 m Schritten vorliegen, können dazwischen anfangende oder endende Salzbereiche nicht berücksichtigt werden. Die Mindestmächtigkeit im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens bezieht sich damit auf die Vorgabe, mindestens zwei benachbarte Schnitte einzubeziehen.

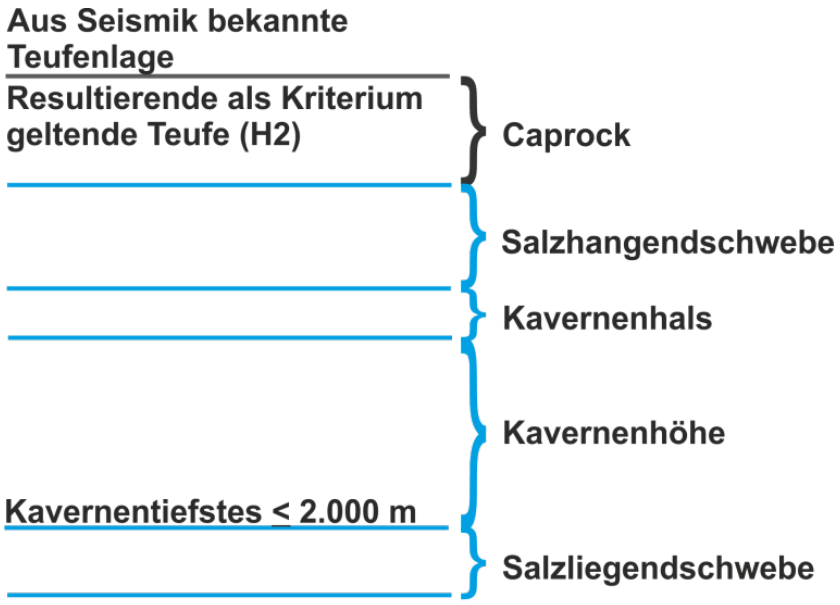


Abbildung 5-1: Zusammensetzung der erforderlichen Mächtigkeit

5.1.2 Maximale Teufenlage Top Caprock

Die Ermittlung der maximalen Teufenlage des Tops der Struktur als Kriterium erfolgt auf Basis der Auslegung einer Minimalkaverne (siehe Kapitel 4.7). Als Kavernentiefstes (Ansolpunkt) für Wasserstoff wird eine Teufe von 2.000 m TVD angesetzt. Rechnerisch ergibt sich damit eine maximale Teufenlage Top Caprock in Abhängigkeit der Caprockmächtigkeit von 1.500 m bis 1.400 m unter Geländeroberkante.

Auf Grund der Teufenlagen der von dem IGtH erstellten Kavernenkonfiguration und der Auflösung der Salzschnitte in 500 m-Schritten gibt es keine Kavernenkonfiguration, die nur im Teufenintervall zwischen 1.500 und 2.000 m angeordnet werden kann. Damit ist die maximale Teufenlage Top Caprock bis zum nächsten Teufenschnitt zu minimieren. Die resultierende maximale Teufenlage Top Caprock beträgt für die weitere Bearbeitung im Verbundvorhaben InSpEE daher 1.000 m.

Dies führt dazu, dass insgesamt 99 Strukturen mit einem Top Caprock zwischen 1.500 m und 1.000 m unter Geländeoberkante im Verbundvorhaben InSpEE nicht in der Potentialermittlung berücksichtigt werden, obwohl eine Errichtung von Kavernen in diesen grundsätzlich möglich sein kann bzw. in einigen auch erfolgt ist. Damit erhöht sich der konservative Charakter der endgültigen Potentialermittlung.

5.1.3 Minimale Teufenlage Top Caprock

Eine minimale Teufenlage der Basis stellt sich im Betrachtungsraum als nicht kriterienrelevant dar.

5.1.4 Mindestfläche

Es wurde eine Mindestfläche eines potentiellen Kavernenspeichers festgelegt (Tabelle 5-1). Dabei wurde zu Grunde gelegt, dass in einer Struktur die Errichtung von mindestens drei Kavernen möglich sein soll. Der horizontale Flächenbedarf orientiert sich an der Auslegung einer Minimalkaverne (siehe Kapitel 4.7). Zusätzlich wurde der erforderliche Abstand zur Salzstrukturgrenze aufaddiert.

Tabelle 5-1: Mindestfläche eines potentiellen Kavernenspeichers in Abhängigkeit der Anordnung

Anordnung	Form	Abmaße
Dreierkette	Rechteck	500 x 1.100 m
Dreieck	Kreis	840 m (Durchmesser)

5.1.5 Salzqualität

Die Erstellung von Kavernen darf innerhalb der durch die Gebirgsmechanik vorgegebenen Umhüllenden erfolgen, diese aber nicht überschreiten. Diese Umhüllende weist eine gleichmäßige zylindrische oder ellipsoide Form auf. Die endgültige Kaverne am Ende des Herstellungsprozesses weist in Abhängigkeit der Salzeigenschaften ein teilweise deutlich geringeres Volumen und ein unregelmäßige Form auf. Der Solfaktor stellt das Verhältnis zwischen dem Volumen der Umhüllenden und dem durch Vermessungen bekannten, realisierten Volumen dar und berücksichtigt damit die den Solprozess beeinflussenden Eigenschaften der Formationen. Je nach Salzqualität kann ein größeres oder kleineres Endvolumen bei gleichem Volumen der gebirgsmechanischen Umhüllenden erreicht werden. Für die unterschiedlichen Salinartypen werden daher während der Potentialermittlung unterschiedliche Solfaktoren verwendet. Die Salzqualität hat damit einen direkten Einfluss auf das Speicherpotential einer Struktur.

5.1.6 Bebauung und konkurrierende Nutzung

Flächen mit zusammenhängender Besiedelung oder unterhalb großer Wasserflächen werden von der Potentialabschätzung ausgenommen. Ebenso werden bereits in Nutzung

befindliche oder dafür angemeldete Flächen von der Potentialabschätzung ausgeschlossen.

5.1.7 Soleverbringung und geschützte Flächen

Die Bewertung von Soleverbringungsmöglichkeiten bzw. die Nähe einer Salzstruktur zu diesen, wird nicht in den Kriterienkatalog aufgenommen, da diese infrastrukturellen, technischen und politischen Bedingungen untergeordnet sind, welche regional voneinander abweichen oder Änderungen unterliegen können. Dies gilt ebenfalls für den Umgang mit geschützten Flächen oberhalb einer Struktur. Diese Faktoren sind bei der individuellen Standortermittlung zu berücksichtigen.

5.2 Erarbeitung des Auswertealgorithmus

Die Auswertung des Potentials basiert sowohl auf den geologischen Eingangswerten des Verbundpartners BGR als auch auf den gebirgsmechanischen Eingangswerten des Verbundpartners IGtH. Diese sind nicht direkt kompatibel und wurden daher zunächst für die Durchführung der Potentialabschätzung aufbereitet. Diese Aufarbeitung erfolgte zunächst getrennt für die geologischen und die gebirgsmechanischen Daten. Nach der Aufbereitung wurde ein Auswahlverfahren für die Wahl des Kavernentypes in Abhängigkeit der Eigenschaften der Salzstrukturen erarbeitet.

5.2.1 Dateneingang und -verarbeitung Geologie

Die von der BGR im Arbeitspaket 1 und 2 erarbeiteten Ergebnisse zu den Salzstrukturen wurden in Form einer Excel-Datentabelle sowie als ESRI-Shape-Dateien an KBB UT übergeben. Für die Potentialanalyse musste zunächst eine Methodik entwickelt werden, diese übermittelten Daten zu visualisieren. Zur Darstellung und weiteren Bearbeitung der Daten wurde ein Geographisches Informationssystem verwendet. Als GIS-Software kam das Open-Source-GIS QGIS zum Einsatz.

QGIS liefert zweidimensionale Darstellungen der Salzstrukturen. Zur dreidimensionalen Wiedergabe der Salzstrukturen wurde die Software ParaView Plus (PDF3D PV +) verwendet. Diese Software ist eine Erweiterung der Open-Source-Software ParaView mit der Möglichkeit Shape-Dateien u. a. zu lesen und zu verarbeiten.

Im ersten Schritt der Visualisierung der Salzstrukturen wurden die Shape-Dateien (Polygone) der einzelnen Niveauschnitte in die GIS-Software geladen (Abbildung 5-2). Das Ergebnis ist eine zweidimensionale Draufsicht auf die Salzstrukturen mit bis zu vier Niveauschnitten. Anschließend erfolgte für jeden Niveauschnitt die Ermittlung und Darstellung des für den Kavernenbau relevanten Flächenbereiches einer Salzstruktur

entsprechend ihrer Typisierung (siehe Kapitel 3.3 bzw. Tabelle 3-13). Als Beispiel ist in Abbildung 5-3 die Ermittlung von z2-Anteilen in einem Salzdiapir aufgezeigt.

Abbildung 5-2: GIS-Darstellung von Niveauschnittflächen

In Abbildung 5-4 sind die z2- bzw. Rotliegendanteile für alle Salzstruktur-Einordnungstypen ersichtlich. Die resultierenden Flächenbereiche in den jeweiligen Niveauschnitten zwischen den neuen z2- bzw. Rotliegendanteil-Flächen und den Flächen der Niveauschnitte stellen die Bereiche mit jüngeren z-Folgen (z3 und jünger) dar. Im Falle von Doppelsalinaren können auch Anteile der z2-Folge in den resultierenden Flächenanteilen vorkommen. Insbesondere die Darstellungen der tektonischen Strukturen und der tektonisch überprägten Salzdiapire spiegeln einen komplexen Aufbau wieder, was sich am Versatz und den häufigen Überschneidungen der Niveauschnittflächen sowie z2-Anteilen bzw. Rotliegendanteilen zeigt.

Im Anschluss wurde überprüft, inwiefern der vom IGtH (siehe Arbeitspaket 3) vorgegebene Abstand von 220 m zum Rand einer Salzstruktur von den Flächen der z2- und Rotliegendanteile eingehalten wird. In Abbildung 5-5 sind diese Abstände von jeweils 220 m als gestrichelte schwarze Linien für jeden Niveauschnitt abgebildet.

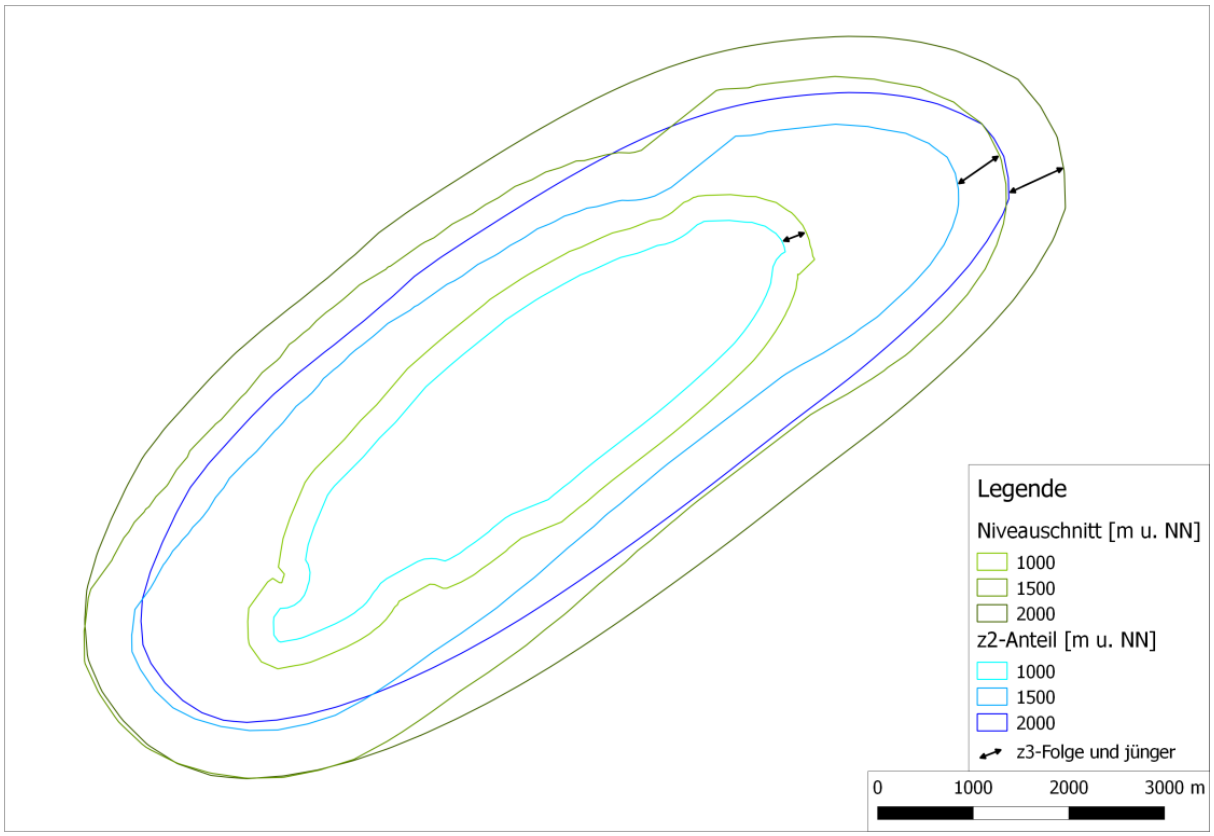


Abbildung 5-3: GIS-Darstellung von z2-Anteils-Flächen

Für die Bestimmung der Salzstruktur-Bereiche, die für die Anlage von Kavernen geeignet sind, und für die dreidimensionale Darstellung der Salzstrukturen wurden die neu erzeugten Flächen der z2- bzw. Rotliegendanteile in einem nächsten Schritt miteinander kombiniert, um mehrere niveau-verbindende Bereiche zu schaffen. Die Festlegung, über welche Niveauschnitte Bereiche verbunden wurden, erfolgte in Abhängigkeit der Charakteristik der Einzelstrukturen. In Abbildung 5-6 ist die Darstellung von maximal drei Verschneidungsflächen in einer Salzstruktur verdeutlicht.

Bei ca. 70 % der Salzstrukturen sind die Flächen der z2- bzw. der Rotliegendanteile kleiner als die Flächen, die die Darstellung der Abstände zum Salzstrukturrand aufzeigen. Bei den kleineren Salzstrukturen (Form der Strukturen klein und rundlich bzw. schmal) ist es häufig genau andersherum. In diesem Fall erfolgte die Erzeugung der Verschneidungsflächen mit den 220 m-Rand-Flächen. Die Verschneidungsflächen sind maßgebend für die anschließende Potentialabschätzung.

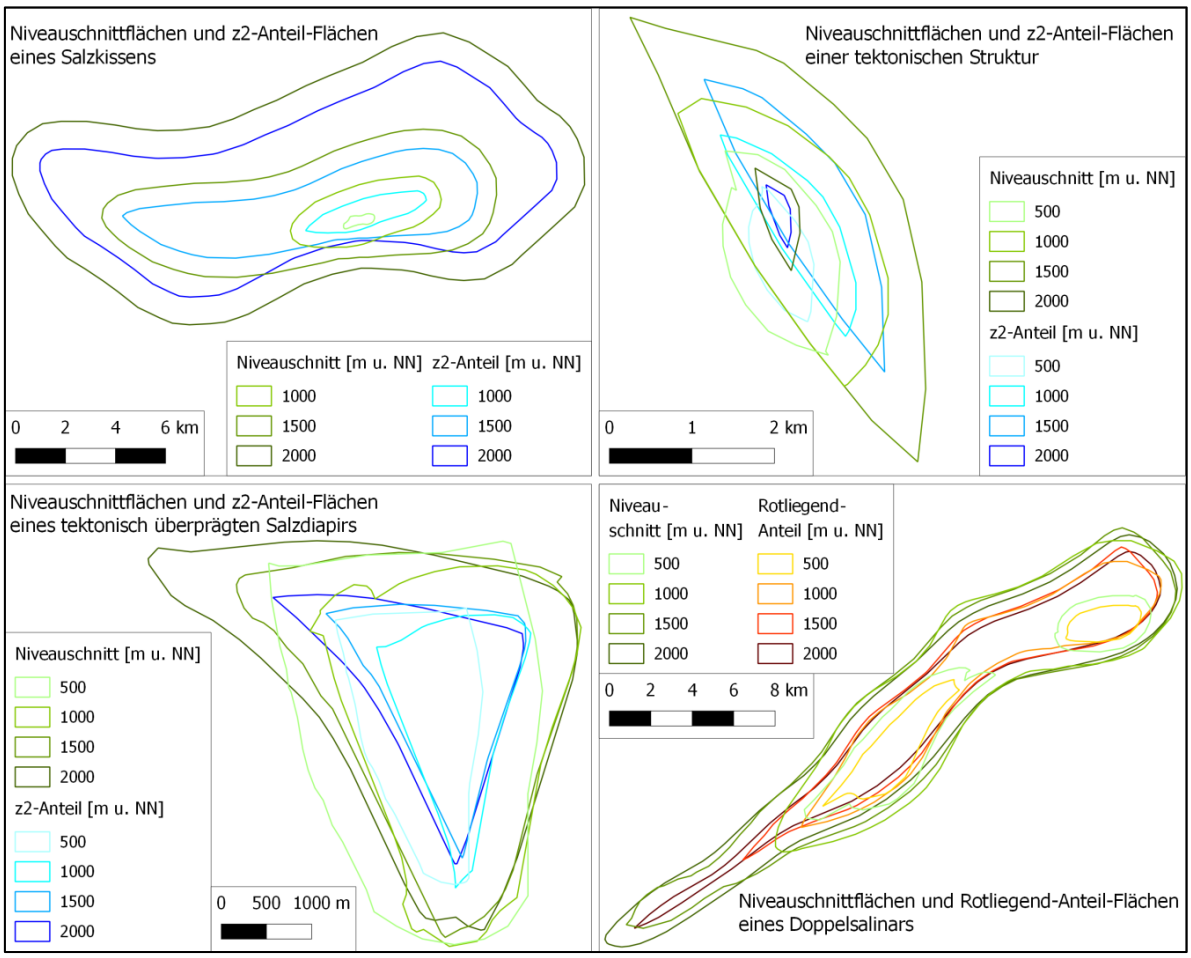


Abbildung 5-4: GIS-Darstellung von Niveauschnittflächen und z2- bzw. Rotliegendanteils-Flächen

Unmittelbar nach der GIS-Bearbeitung erfolgte die 3D-Bearbeitung mit ParaView Plus. Hierzu wurden die erzeugten Verschneidungsflächen in das Programm geladen. Die im GIS erzeugten Polygone bilden im 3D-Raum zweidimensionale Flächen in bis zu vier verschiedenen Niveaus (500 m, 1.000 m, 1.500 m und 2.000 m).

Ziel war es mit Hilfe der 3D-Darstellung die für die Potentialanalyse in Frage kommenden Anteile in den Salzstrukturen räumlich darzustellen. Dazu werden die Bereiche zwischen den einzelnen Niveaus ausgefüllt, also körperhaft dargestellt. Auf Grund der Tatsache, dass Salzstrukturen kompliziert aufgebaut sind, in dem die Niveauschnittflächen und somit die Flächen des z2- bzw. Rotliegendanteils horizontal gesehen häufig um mehrere Hunderte Meter zueinander versetzt sind, ist angesichts von 500 m Abständen zwischen den Niveauschnitten der Verlauf der Ränder der z2- bzw. Rotliegendanteilsflächen dazwischen nicht vorhersagbar. Folglich wurde eine konservative Lösung für die räumliche Darstellung des z2- bzw. Rotliegendanteils in den Salzstrukturen angestrebt. Dafür

erfolgte die räumliche Verbindung der Verschneidungsflächen über die Erzeugung von lotrechten Begrenzungen zwischen den Verschneidungen des z2- bzw. Rotliegendanteils. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

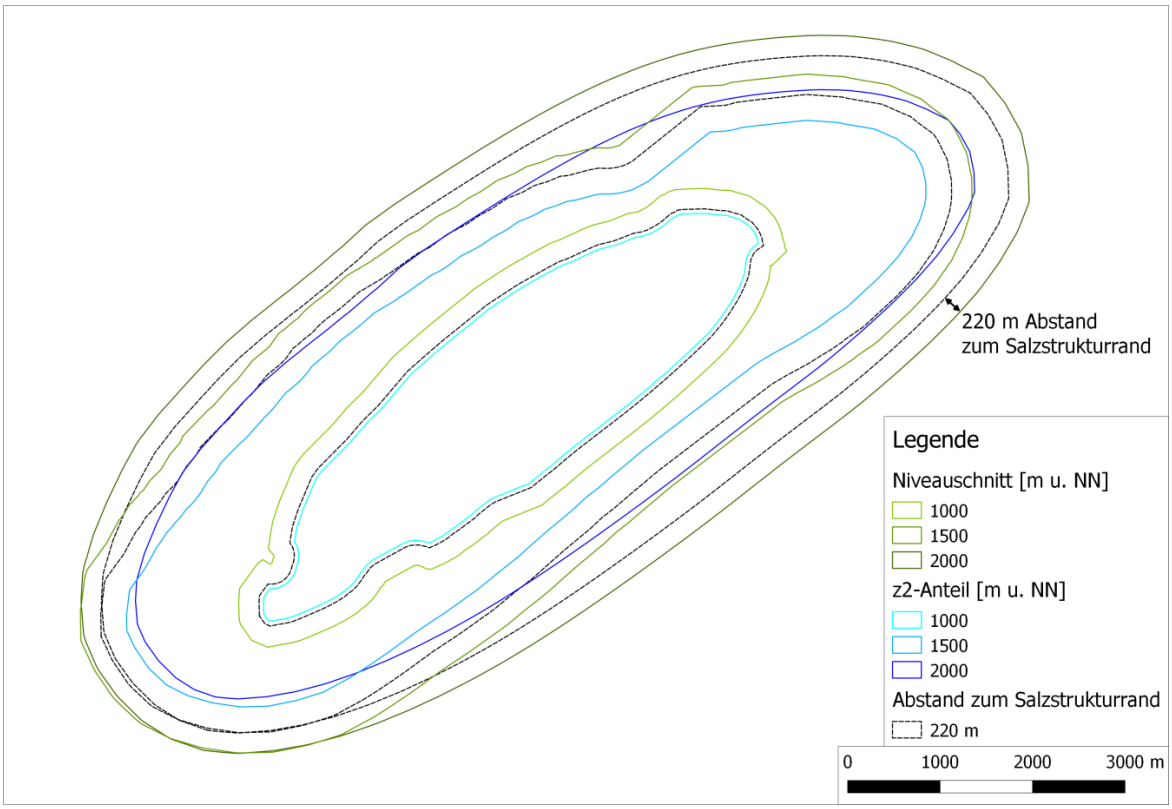


Abbildung 5-5: GIS-Darstellung des Abstands von 220 m zum Rand einer Salzstruktur

Diese Darstellung stellt eine vereinfachte Interpretation des Aufbaus einer Salzstruktur dar, die für die weitere Potentialabschätzung verwendet wird. Auf Grund der senkrecht angelegten Begrenzungen werden potentiell geeignete Bereichen von Salzstrukturen außerhalb dieser Begrenzungen nicht berücksichtigt. Da der Verlauf nicht gesichert vorherzusagen ist, wurden diese Bereiche von den Verbundpartnern im Sinne eines konservativen Vorgehens bewusst in der Potentialabschätzung außen vorgelassen.

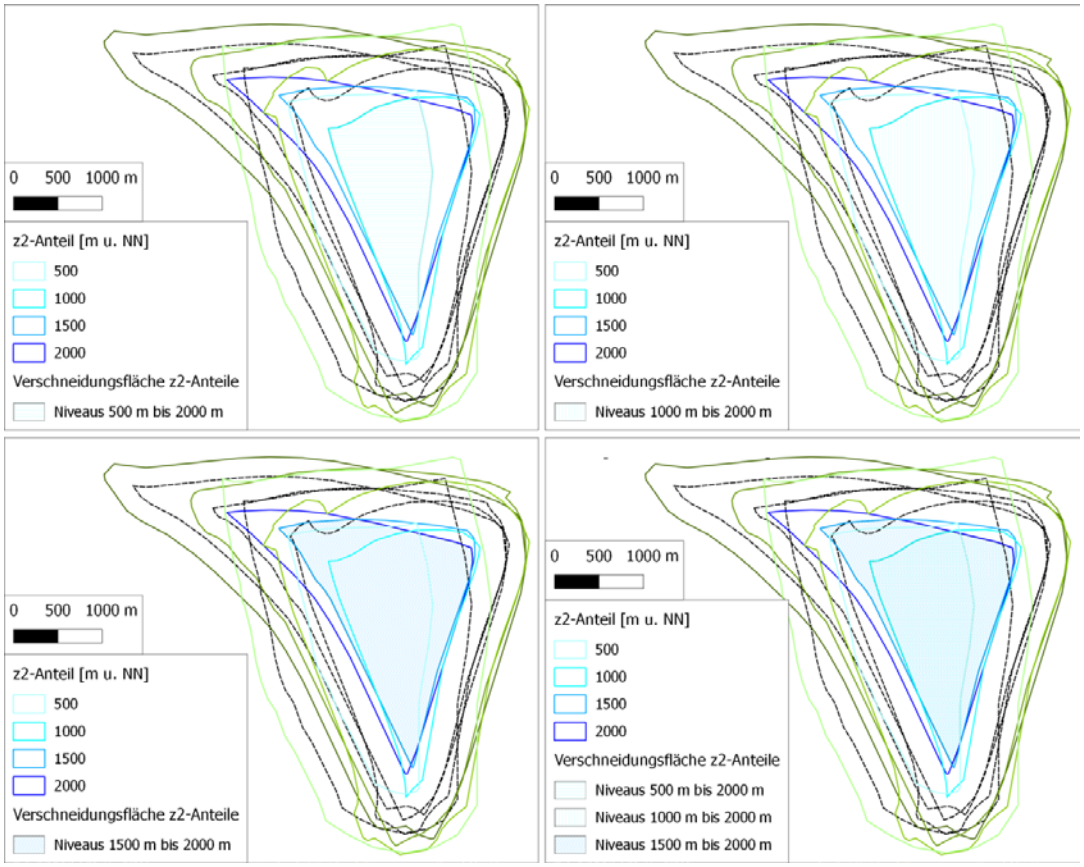


Abbildung 5-6: GIS-Darstellung von Verschneidungsflächen aus z2-Anteils-Flächen

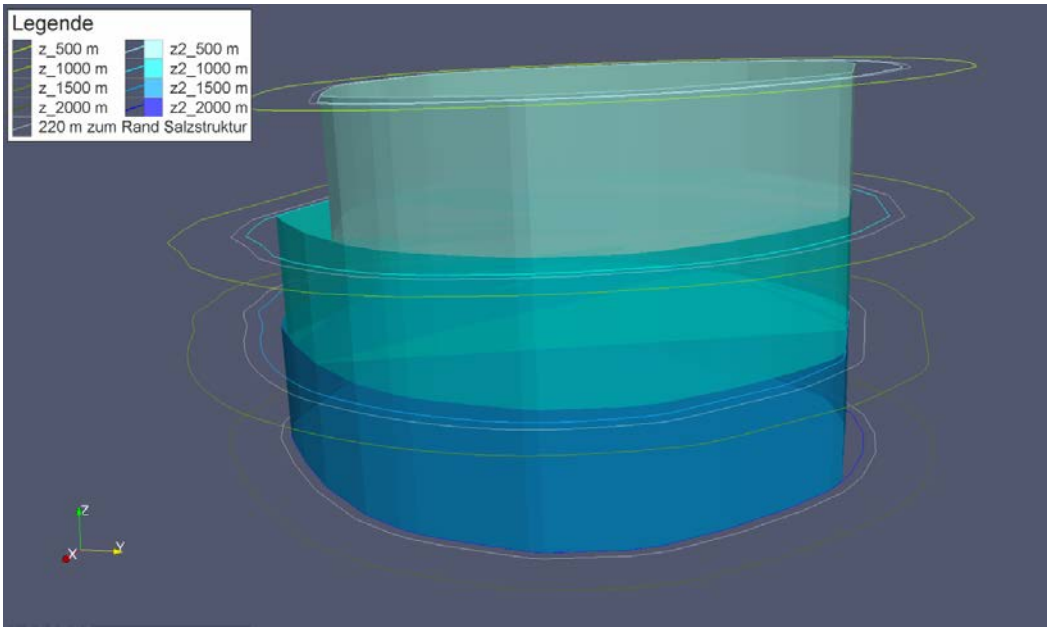


Abbildung 5-7: 3D-Darstellung von lotrechten Begrenzungen der Verschneidungsflächen von der z2-Anteile

5.2.2 Dateneingang und -verarbeitung Gebirgsmechanik

Für die Durchführung der Potentialabschätzung wurden vom Arbeitspaket 3 Datensätze für acht Modellkavernen für die Druckluftspeicherung und acht Modellkavernen für die Wasserstoffspeicherung übergeben. Diese Datensätze beinhalten

- Durchmesser der gebirgsmechanischen Umhüllenden,
- Pfeilerstärke (Abstand zwischen benachbarten Kavernen),
- Erforderlicher Abstand zum Salzstockrand,
- Hangendschwebe (benötigte Salzmächtigkeit oberhalb des Rohrschuhs der letzten zementierten Rohrtour),
- Halslänge (Abstand Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour – Kavernendach),
- Kavernenhöhe,
- Liegendschwebe (benötigte Salzmächtigkeit unterhalb der Kaverne),
- Dachteufe,
- Hohlraumvolumen der fertig gestellten Kaverne (für Kavernen in Zechsteinstrukturen),
- Minimaler und maximaler Kavernendruck am Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour,
- Kavernenbetrieb und zugehöriger Temperaturverlauf.

Aus den geometrischen Vorgaben zur gebirgsmechanischen Umhüllenden und der Pfeilerstärke wurde für jeden Modelltyp der für die Errichtung einer Kaverne benötigte Salzbereich ermittelt (siehe Abbildung 5-8).

Insgesamt ergeben sich für die 16 Modellkavernen die sechs in Abbildung 5-9 gezeigten Teufengruppen.

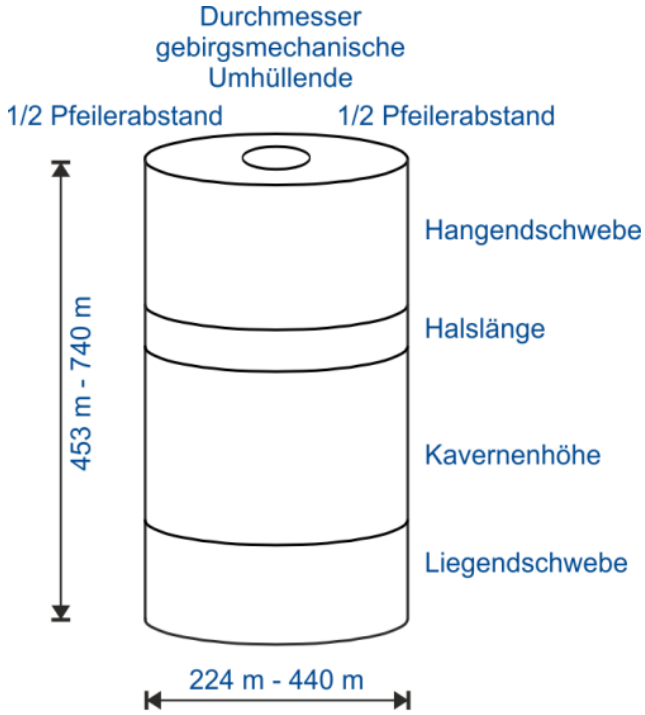


Abbildung 5-8: Erforderlicher Salzbereich je Kaverne

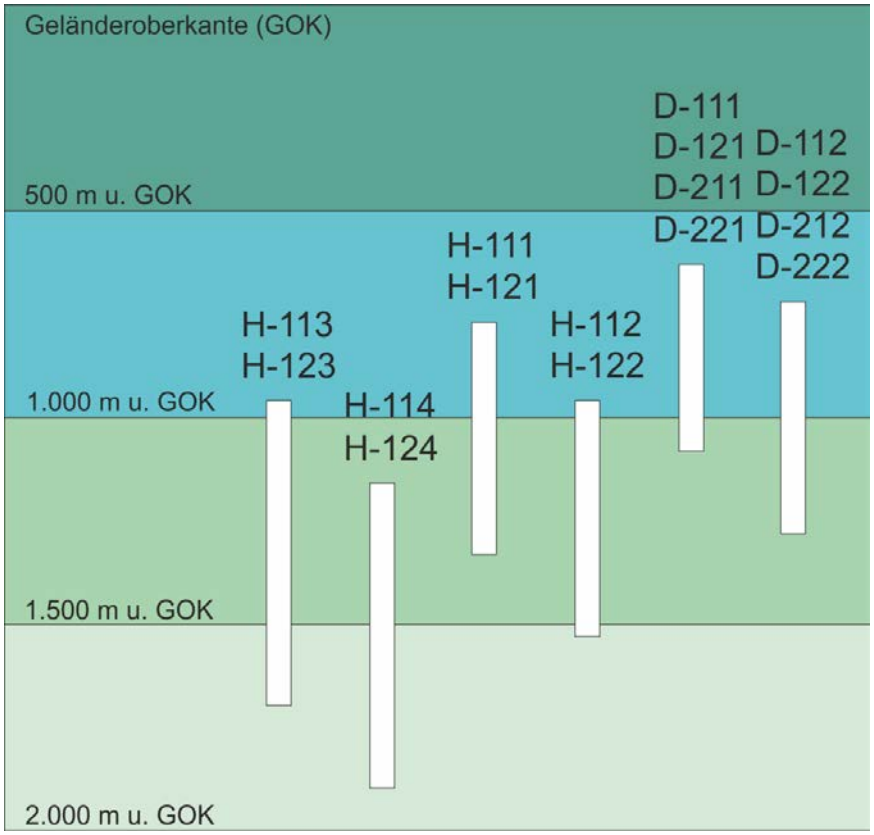


Abbildung 5-9: Teufengruppen der 16 Modellkavernen

Die Modellkavernen innerhalb einer Teufengruppe weisen unterschiedliche Durchmesser und Pfeilerabstände wie auch Operationsparameter auf. Dies führt dazu, dass je nach gewähltem Typ bei gleichem zur Verfügung stehendem Salzbereich innerhalb der Salzstrukturen eine unterschiedliche Anzahl an Kavernen in diesem errichtet werden könnten. Für die Einbindung in die Potentialabschätzung wurde daher ein Ranking innerhalb der Teufengruppen nach der höchsten Energiedichte pro belegte Salzfläche durchgeführt.

Die Energiemenge, die in einer Kaverne gespeichert werden kann, wurde für die Druckluft- und die Wasserstoffspeicherung unterschiedlich ermittelt. Die speicherbare Energiemenge einer Wasserstoffkaverne hängt von dem Hohlraumvolumen der Kaverne, den Minimal- und Maximaldrücken sowie den zugehörigen Temperaturen ab. Sind diese bekannt, kann mit Hilfe stoffabhängiger Kennwerte die gespeicherte Gasmenge bei maximalem und minimalem Kavernenfüllstand ermittelt werden. Die Differenz dieser Mengen bildet das Arbeitsgas, dem unter Berücksichtigung des Heizwertes für Wasserstoff ein Energieinhalt zugeordnet werden kann.

Für die Ermittlung der Energiemenge einer Druckluftkaverne wurde angenommen, dass die Wärme gespeichert wird und keine externe Zufuhr eines Brenngases erfolgen muss. Somit stellt das Druckluftspeicherkraftwerk einen tatsächlichen Speicher im Stromnetz dar. Die Ermittlung der Energiemenge kann nicht über den gleichen Weg wie bei der Wasserstoffspeicherung erfolgen, da die Speicherung der Energie in einem Druckluftspeicherkraftwerk im Wesentlichen in der Wärme und nicht in der Druckluft erfolgt und somit dem gespeicherten Arbeitsgas keine repräsentative Energiemenge zugeordnet werden kann. In Annäherung lässt sich diese jedoch durch das Verhältnis zwischen der abgegebenen Leistung und dem Luftmassenstrom während des Auslagerungsprozesses und der möglichen Auslagerungsdauer ermitteln. Ein Vergleich vorliegender Datenpaare zeigt einen Zusammenhang von etwa 0,5 - 0,6 MW je Kilogramm Luft pro Sekunde [Zunft et al. 2006; Alstom Power, Ecofys, E.ON Energie, KBB Underground Technologies, IAEW, REpower, Vattenfall Europe Transmission 2007]. In der Abschätzung des Energiespeicherpotentials wurde konservativ mit einem Wert von 0,5 MW je Kilogramm Luft pro Sekunde gearbeitet. In Zusammenhang mit der analog zur Wasserstoffspeicherung berechneten Arbeitsgasmenge der Modellkavernen kann die Energiemenge ermittelt werden, die je Kaverne in Abhängigkeit des Kavernentyps gespeichert werden kann.

Jede Kaverne belegt eine bestimmte Fläche des für den Kavernenbau nutzbaren Salzbereiches. Diese Fläche beinhaltet sowohl den Durchmesser der Kaverne selbst als auch die erforderlichen Abstände zu den Nachbarkavernen. Werden mehrere Kavernen in einem Feld errichtet, wird eine optimale Flächenausnutzung bei hexagonaler Anordnung erreicht. Wie in Abbildung 5-10 ersichtlich bilden sich zwischen den kreisförmigen Flächen

des erforderlichen Salzbereiches Zwickel, die ebenfalls nicht für eine weitere Kavernenerrichtung zur Verfügung steht. Daher entspricht die maßgebende Flächenbelegung einem Hexagon. Die Fläche dieser Hexagone gehen in die Ermittlung der Energiedichte pro Flächeninhalt ein.

Auf Basis der ermittelten Energiemenge und des Flächeninhaltes der Hexagone kann jeder Modellkaverne eine Energiedichte pro Flächeninhalt zugeordnet werden. Die Modellkavernen mit der höchsten Energiedichte in ihrer Teufengruppe sind

- D-111 und D-112 sowie
- H-123, H-124, H-121 und H-122,

geordnet von der höchsten zur niedrigsten Energiedichte je Flächeneinheit. Diese sechs Modellkavernen finden Eingang in die endgültige Potentialabschätzung.

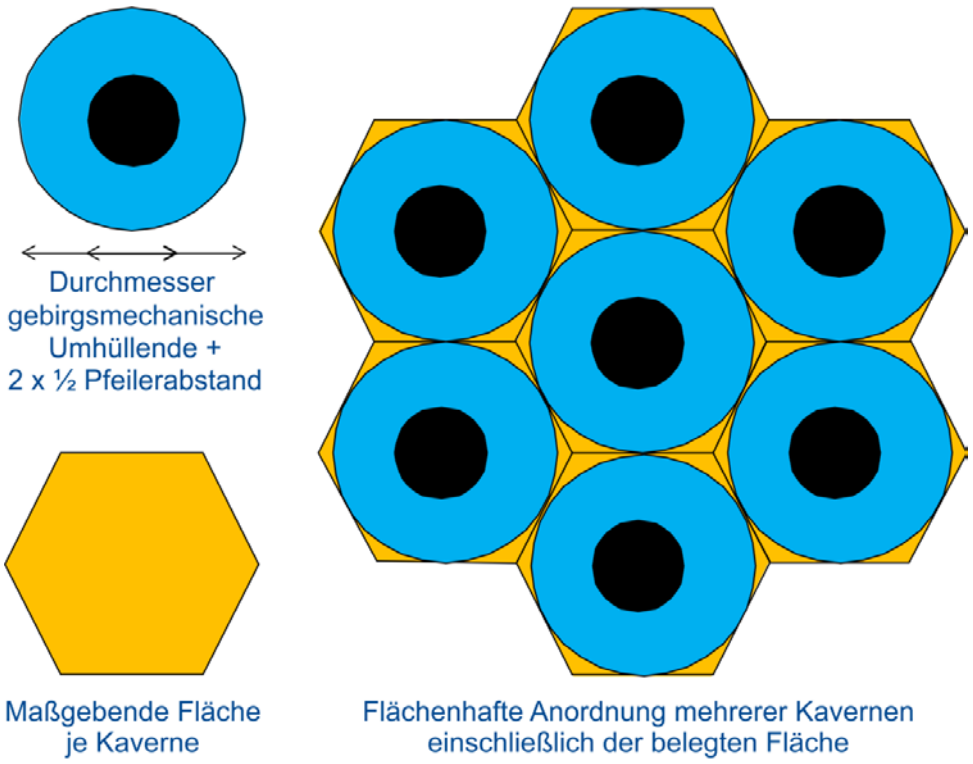


Abbildung 5-10: Flächenbelegung einer Kaverne

5.2.3 Datenverknüpfung Geologie und Gebirgsmechanik

Nach Verarbeitung der Eingangsdatensätze wurden die ausgewählten Modellkavernen in die für die Potentialabschätzung festgelegten Bereiche der Salzstrukturen eingefügt. Da-

für wurde zunächst überprüft, welche der zwei Modellkavernen für die Speicherung von Druckluft sowie der vier Modellkavernen für die Speicherung von Wasserstoff in die vorhandenen Salzbereiche hineinpasst. Konnten mehrere Modellkavernen in den Salzbereichen angeordnet werden, wurde der Modelltyp mit der höchsten Energiedichte pro Flächeneinheit gewählt (siehe Kapitel 5.2.2). Die Auswahl ist dabei abhängig von der Höhe des erforderlichen Salzbereiches, wie auch von der Lage des Dachs und der Basis dieser Zylinder, und erfolgte mittels räumlicher Projektion der Zylinder in ParaView Plus.

Einige Modellkavernen-Zylinder ragen insbesondere in der Dachlage aus den Strukturbereichen als „Zylinder-Überstand“ heraus. Obwohl die in ParaView Plus dargestellten Salzbereiche aus den im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens als für den Kavernenbau besonders geeignet eingestuften z2- bzw. Rotliegendsalzgebieten bestehen, existiert auch außerhalb dieser Salzbereiche Salz, wenn auch weder der Verlauf gesichert vorhergesagt werden noch eine Zuordnung zu diesen Salztypen erfolgen kann. Auf Basis der von den Verbundpartnern getroffenen Annahmen, dass Salzschweben auch in diesen Salztypen angeordnet sein dürfen und eine Abweichung im Dekameterbereich innerhalb der Unsicherheit der Vorhersage der Anordnung der Salzbereiche liegt, wurde mit den Verbundpartnern ein Zylinder-Überstand von bis zu 50 m als tolerierbar festgesetzt.

Die Überstände der einzelnen Modelltypen variieren für die verschiedenen Salzstrukturen auf Grund der unterschiedlichen Bezugsteufen der geologischen und gebirgsmechanischen Eingangsdaten. Während sich die geologischen Eingangsdaten auf Meter unter Normalnull beziehen, ist die Teufe der gebirgsmechanischen Modellkavernen in Bezug auf Meter unter Geländeoberkante angegeben.

Die Projektion der Modellkavernen D-111 bis D-222 für die Druckluftspeicherung in Abbildung 5-11 in eine Salzstruktur verdeutlicht, dass jede Modellkaverne in die z2-Bereiche zwischen den Niveauschnitten 500 m und 1.500 m räumlich angeordnet werden kann, ohne dass Zylinderbereiche aus den z2-Steinsalzgebieten herausragen. Die Wahl der Modellkavernen zur Potentialabschätzung erfolgte in diesem Fall nur anhand des möglichen Energieinhaltes.

In Abbildung 5-12 zeigt die Projektion der H-111- bis H-124-Zylinder für die Wasserstoffspeicherung, dass die Modellkaverne H-123, die den höchsten Energieinhalt der Modellkavernen für die Wasserstoffspeicherung aufweist, in den z2-Bereichen der Niveauschnitte zwischen 500 m und 2.000 m ohne Zylinder-Überstand eingeordnet werden kann. In den Bereichen, wo hingegen kein z2-Anteil zwischen den Niveauschnitten 500 m und 1.000 m vorhanden ist, ergibt sich ein Überstand in den Dachbereichen der Zylinder. Dieser Überstand beträgt 96 m und ist damit größer als der tolerierte Überstand. Da dieser Bereich eine deutlich größere Flächenausdehnung besitzt, scheidet die Modellkaverne H-123 für diese Salzstruktur für die weiteren Betrachtungen aus. Die Modellkaverne mit dem zweithöchsten Energiegehalt ist die H-124, welche ohne Über-

stand in den z2-Bereichen zwischen den Niveauschnitten 1.000 m und 1.500 m angeordnet werden kann. Damit wird diese Modellkaverne für die Potentialabschätzung dieser Salzstruktur verwendet.

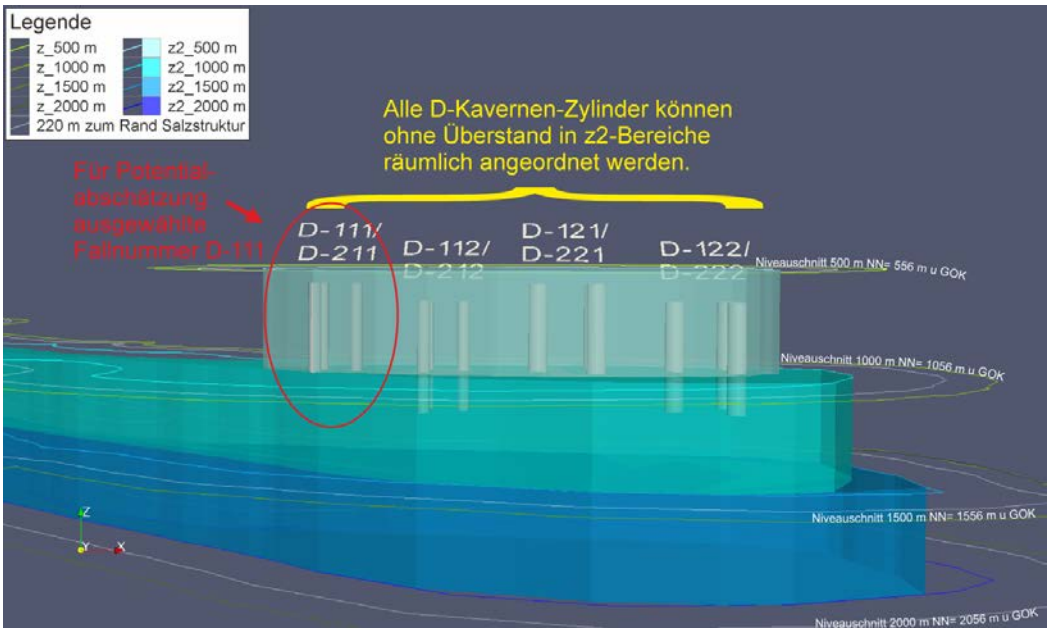


Abbildung 5-11: 3D-Darstellung zur Auswahl geeigneter Druckluftkavernen

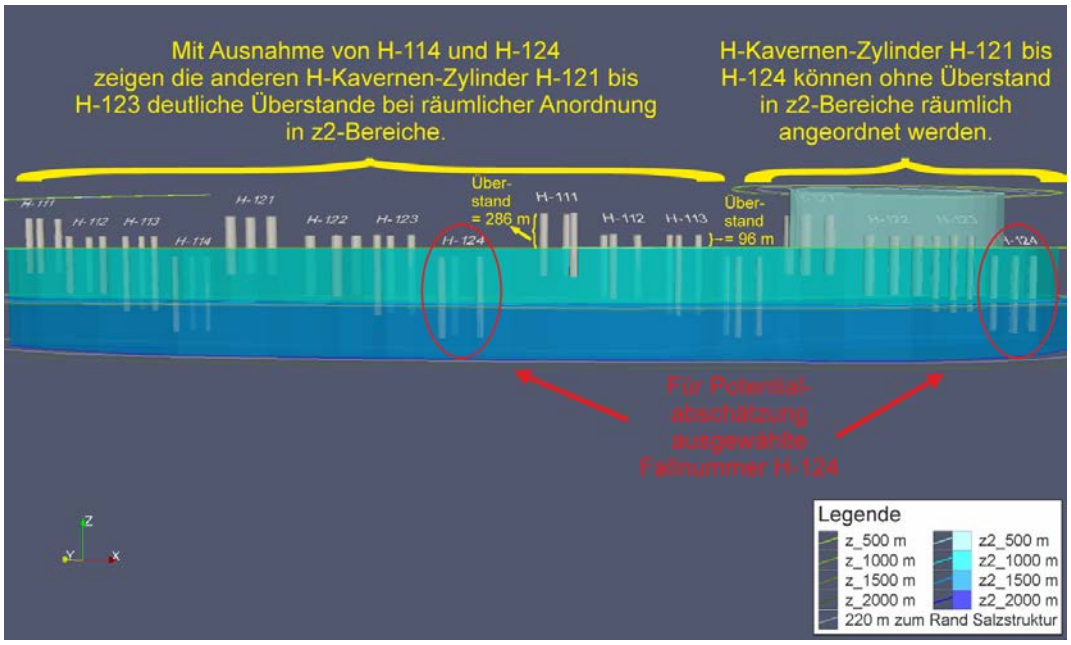


Abbildung 5-12: 3D-Darstellung zur Auswahl geeigneter Wasserstoffkavernen

In Abhängigkeit des Aufbaus einer Salzstruktur können die Kavernen für die Druckluft- und die Wasserstoffkavernen auch räumlich versetzt angeordnet oder durch den Versatz eine Anordnung generell ausgeschlossen sein (Abbildung 5-13).

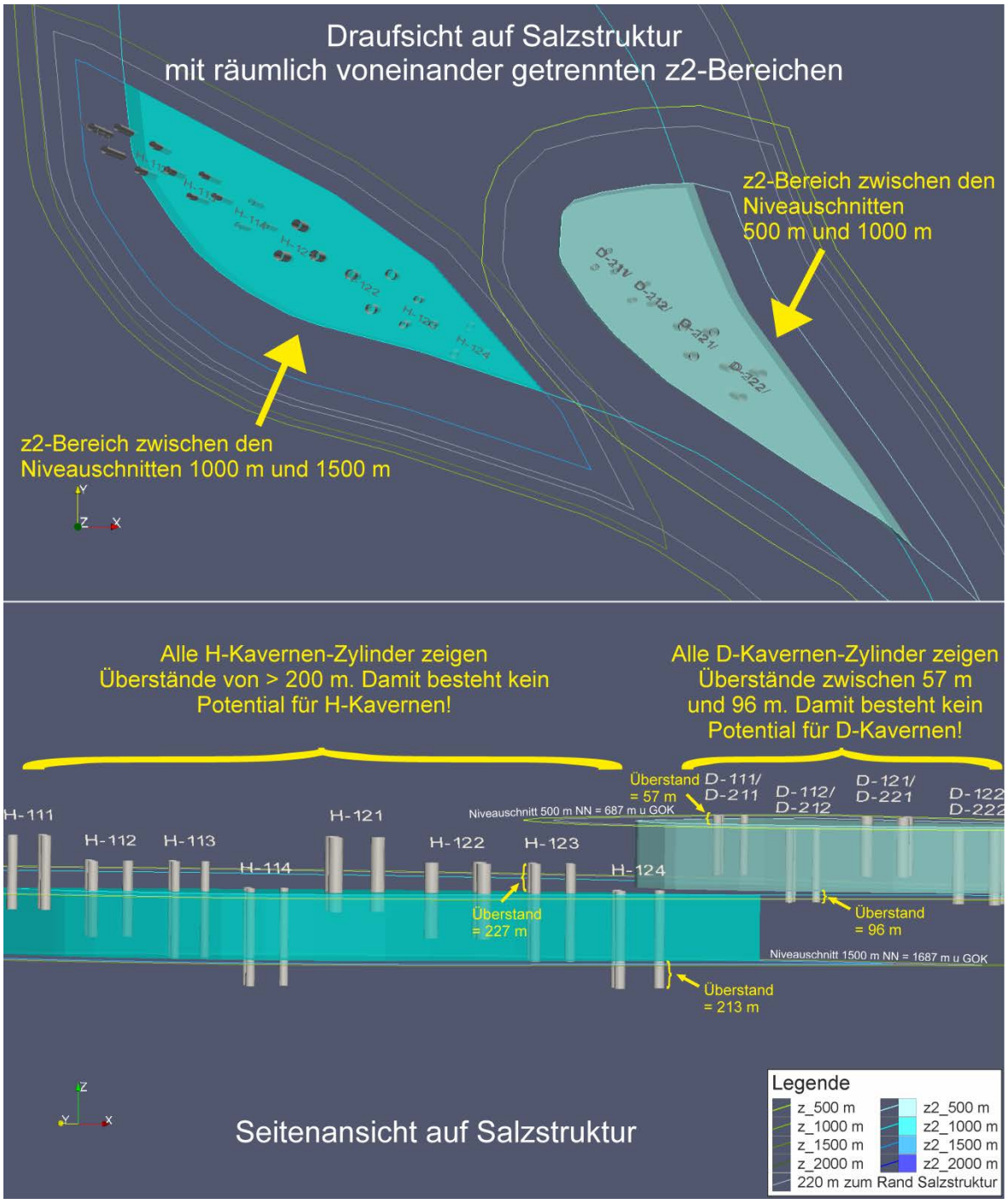


Abbildung 5-13: 3D-Darstellung einer Salzstruktur ohne Potential

Nach der Festlegung der geeigneten Modellkavernen für die Druckluft- und die Wasserstoffspeicherung erfolgten die weiteren Schritte der Potentialabschätzung mittels QGIS.

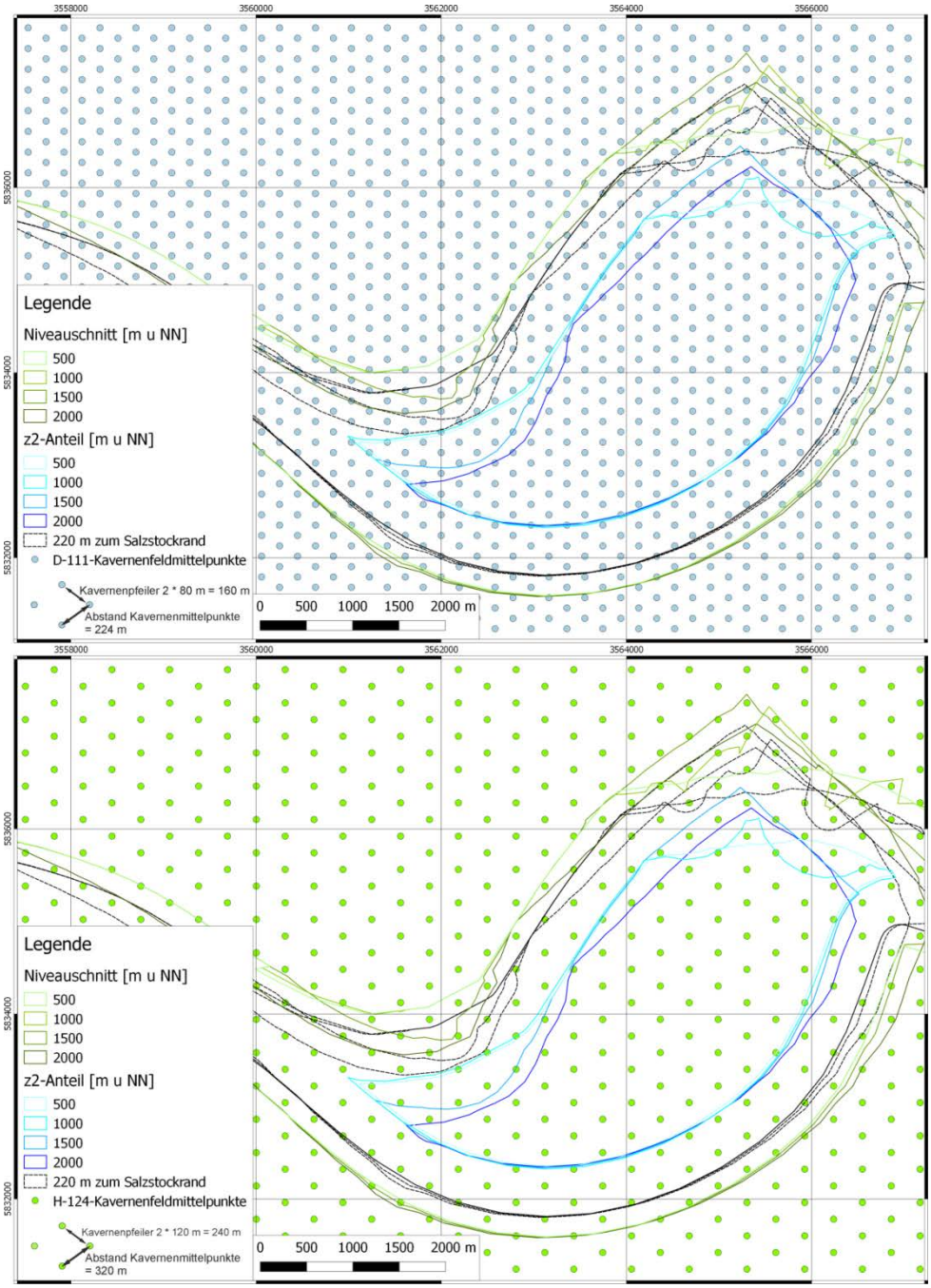


Abbildung 5-14: GIS-Darstellung von Kavernenfeldern unabhängig vom nutzbaren Bereich innerhalb der Salzstruktur

Im ersten Schritt wurden anhand der Werte für die gebirgsmechanischen Umhüllende sowie der Pfeilerstärke für die ausgewählten Modellkavernen hexagonale Kavernenfelder erzeugt. Die Abbildung 5-14 zeigt am Beispiel einer Salzstruktur die Projektionen eines Kavernenfeldes für die Druckluftspeicherung sowie eines Kavernenfeldes für die Wasserstofspeicherung über die Struktur. Auf Grund der kleineren Pfeilerstärke bei den Druckluftkavernen erscheint deren Kavernenfeld dichter gedrängt im Vergleich zu dem Kavernenfeld der Wasserstoffkavernen, die größere Pfeilerstärken benötigen. Die dargestellten Punkte stellen die dimensionslosen Kavernenmittelpunkte dar.

Die Ermittlung der maximal möglichen Kavernenanzahl je Struktur erfolgte mittels räumlicher Abfrage der Kavernenmittelpunkte aus den Kavernenfeldern, die sich innerhalb der Verschneidungsflächen der z2- bzw. Rotliegendanteils-Flächen (siehe Kapitel 5.2.3) befinden. Die Abfrageergebnisse entsprechen der möglichen Kavernenanzahl der gewählten Modellkaverne in diesem Bereich. Die Abbildung 5-15 zeigt die Abfrageergebnisse für die in Abbildung 5-14 dargestellten Kavernenfelder. Die gebirgsmechanischen Umhüllenden liegen dabei innerhalb der definierten Abfragefläche. Die Kavernenpfeiler können auch außerhalb dieser Fläche angeordent sein, sofern der vorgegebene Abstand zum Salzstrockrand eingehalten wird.

Die bisher durchgeführten Arbeiten ermitteln das rein geologische Potential für Kavernen ohne Berücksichtigung des Vorhandenseins möglicher Bebauung oder größerer Wasserflächen oberhalb der Salzstrukturen sowie Bergbaugebieten, z. B. in Form von Steinsalzbergwerken oder bestehenden Kavernenfeldern innerhalb der Salzstrukturen. Solche Gebiete minimieren jedoch die für die Potentialabschätzung zur Verfügung stehenden Bereiche der Salzstrukturen und wurden daher vom Ergebnis der maximal möglichen Kavernenzahl abgezogen. Die hierfür nötigen Daten wurden mit QGIS visualisiert und entstammen im Falle der Bebauung und Wasserflächen den freiverfügbaren Daten des Open Street Map Projects in Form von Shape-Dateien. Die Daten der Bergbaubeeinflussungsgebiete konnten zum Großteil dem WMS-Server des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen entnommen werden. Bergbau bezogene Daten außerhalb des Landes Niedersachsens wurden vorwiegend von der BGR zur Verfügung gestellt. Überschneidungsflächen von Bebauung, Wasserfläche und Bergbau mit den erzeugten Kavernenfelder reduzieren das Potential (siehe Abbildung 5-16).

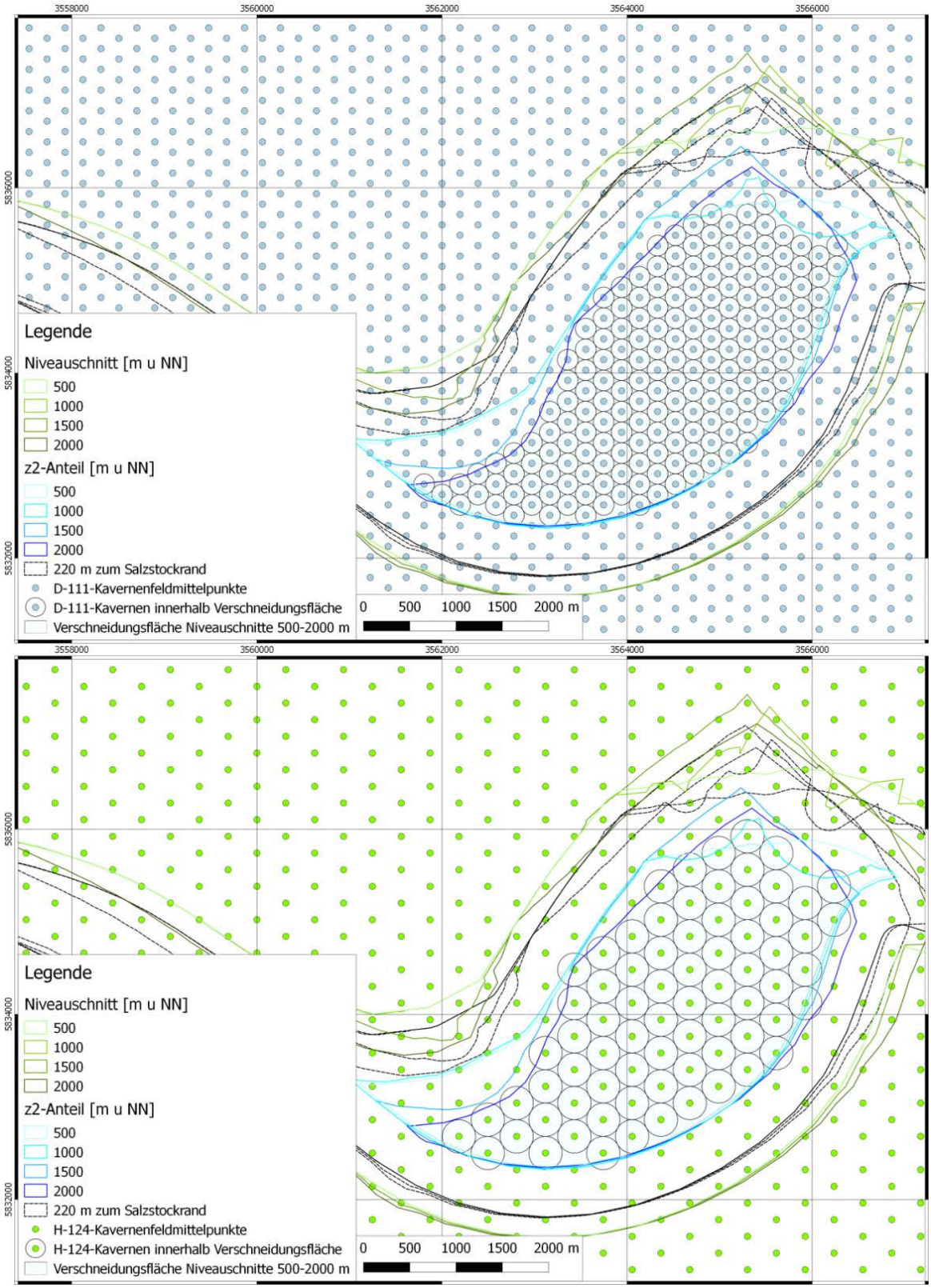


Abbildung 5-15: GIS-Darstellung Abfrageergebnis innerhalb der Salzstruktur

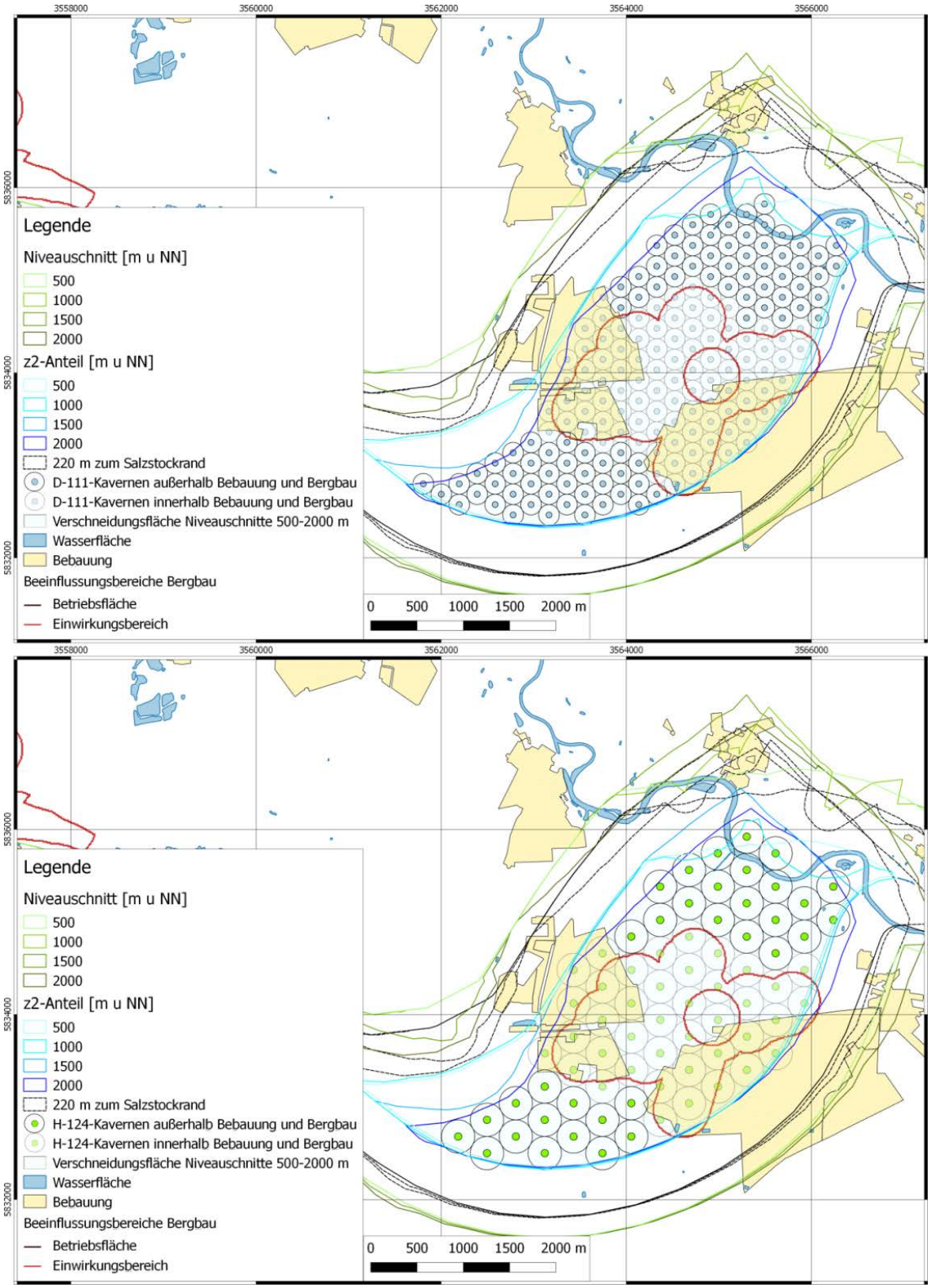


Abbildung 5-16: GIS-Darstellung Abfrageergebnis innerhalb der Salzstruktur nach Abzug von Bebauungs-, Wasser- und Bergbauflächen

Die meisten Wasserflächen im Bereich der ermittelten Kavernenfelder bilden Flüsse oder kleinere Seen und Teiche. Sie sind somit von der Fläche her deutlich kleiner als Bebauungsgebiete und stellen daher kein Hindernis für den Kavernenbau dar. Anders verhält es sich mit den großen breiten Flüssen wie z.B. Weser, Ems und Elbe sowie mit den Meeresflächen. Deren Flächen sind zu groß, um mittels abgelenkten Kavernenbohrungen umgangen zu werden. Salzstrukturen, die sich vollständig unter dem Meer befinden, bzw. deren Abschnitte, die ins Meer ragen, wurden aus wirtschaftlicher Sicht im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens von der Potentialabschätzung ausgeschlossen.

6 AP 5 – Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen

Koordinatoren: Dipl.-Ing. Sabine Donadei, Julia Kepplinger

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Sabine Donadei, Dipl.-Geol. Péter-László Horváth, Dr. Gregor-Sönke Schneider

Nach der Datenverarbeitung und -verknüpfung der Eingangsdaten aus den Arbeitspaketen 1 bis 3 in Arbeitspaket 4 war die Durchführung der Potentialabschätzung Inhalt des Arbeitspakets 5. In diesem wurde das Speicherpotential für die aus Arbeitspaket 2 übergebenen 269 Strukturen für die Errichtung von Druckluftkavernen und von Wasserstoffkavernen ermittelt. Eine strukturbezogene Untersuchung auf Basis zusätzlicher Untersuchungen kann dazu führen, dass einzelne Standorte, die im Rahmen dieser Bearbeitung ein theoretisches Potential aufweisen, tatsächlich kein der Nutzung entsprechendes Potential besitzen. Wiederum kann durch die näheren Untersuchungen das Potential einer Struktur deutlich größer ausfallen bzw. eine auf Grund der Kriterien hier ausgeschlossene Struktur sich dennoch als geeignet herausstellen. Gemittelt über alle Strukturen ist die ermittelte Größenordnung des Speicherpotentials dennoch als repräsentativ anzusehen. Das Potential für die Speicherung von Druckluft und von Wasserstoff wurde unabhängig voneinander ermittelt, so dass diese nicht addiert werden können. Die Angabe des Potentials erfolgt nur für das energetische Speicherpotential und nicht für die Kavernenanzahl, da diese von der Auslegung der gewählten Modellkaverne abhängig ist und bei geänderter Auslegung variieren kann.

6.1 Vorbemerkung zum ermittelten Potential

Die Potentialabschätzung weist bewusst einen stark konservativen Charakter auf. Dieser ist im Wesentlichen auf der Einschränkung des Salztypes auf z2- und Rotliegendsalz, in der Beschränkung auf die Betrachtung von Salzstrukturbereichen, die sowohl im Teufenschnitt oberhalb als auch unterhalb den für die Anlegung von Kavernen ausgewählten Salztyp aufweisen und im Ausschluss von Strukturen mit einem Strukturtop zwischen 1.000 m und 1.500 m, begründet. Weiterhin besteht zusätzliches, nicht berücksichtigtes Potential im Offshore-Bereich. In den nachfolgenden Abschnitten wird kurz der Einfluss einzelner Dateneingänge erläutert.

6.1.1 Geologische Annahmen

Die Berücksichtigung geologischer Eingangsdaten erfolgt für eine relativ grobe Schrittweite von 500 m, die einen direkten Einfluss auf die Einordnung einer Struktur in potentiell

geeignet oder nicht geeignet im Rahmen der Anwendung der Bewertungskriterien im InSpEE-Verbundvorhaben besitzt. Die Haupteinflüsse auf das Speicherpotential bilden hierbei der Ausschluss von Strukturen, die nicht mindestens zwei Schnitte aufweisen, aber generell eine ausreichende Mächtigkeit aufweisen als auch die Reduzierung des Speicherpotentials auf Grund zu großer Überstände.

Weiterhin führt der Umgang mit den ermittelten Flächen zu einer Scheingenauigkeit der Anordnung möglicher Kavernen in den Salzstrukturen. Die Reduzierung des nutzbaren Flächenanteils wurde im Rahmen der Potentialabschätzung durch eine gleichmäßige Verkleinerung der Gesamtfläche berücksichtigt, welche in der Realität so nicht auftreten wird. Generell ist mit einer Verfaltung der verschiedenen Salztypen zu rechnen, die je nach Strukturtyp variiert (siehe Arbeitspaket 2). Im Rahmen der Erarbeitung des Auswertungsalgorithmus wurde für Strukturen, in denen Kavernenfelder bereits existieren, überprüft, inwiefern diese grundsätzlich den Annahmen widersprechen oder dieses Vorgehen im Rahmen einer großflächigen Potentialabschätzung als ausreichend genau stützen. Ein Vergleich ergab, dass die Kavernenfelder entweder im Wesentlichen innerhalb der gleichmäßig verkleinerten Flächen lagen oder bei einer Anordnung außerhalb dieser Flächen die Kavernen eine stark unregelmäßige Form aufwiesen. Damit wurde das Vorgehen als hinreichend genau innerhalb der Möglichkeiten des Projektrahmens bewertet. Direkten Einfluss hat diese Annahme auf die Ermittlung des Abschlagsfaktors für die Bebauung und den Bergbau, da existierende Flächen mit einer angenommenen Salzverteilung verschnitten wurden. Da sich die Flächen für Bebauung und Bergbau aber auch über die Strukturbereiche außerhalb der als geeignet angenommenen Salzflächen verteilen, wurde angenommen und für Einzelstrukturen auch überprüft, dass sich der Faktor über die Anzahl der Strukturen auch bei anderweitiger Verteilung in der gleichen Größenordnung befindet.

6.1.2 Gebirgsmechanische Annahmen

Die Eingangsdaten der Gebirgsmechanik enthalten die teufenabhängigen Auslegungsparameter für insgesamt 16 Modellkavernen. Diese sind in die als potentiell geeignet bewerteten Salzbereiche einzuhängen. Auf Grund der groben Schrittweite der Salzbereiche ist dabei eine ungefähre Übereinstimmung der Teufenanordnung der Kavernen zu den Salzbereichen erforderlich. Für den Bereich der Druckluftspeicherung liegen Modellkavernen sowohl für den Teufenbereich von 500 m bis 1.000 m als auch für den Teufenbereich von 500 m bis 1.500 m vor, für den Bereich der Wasserstoffspeicherung für den Teufenbereich von 500 m bis 1.500 m und 1.000 m bis 1.500 m und 1.000 m bis 2.000 m vor. Da keine Modellkavernen für den Teufenbereich von 1.500 m bis 2.000 m vorliegen, fallen Strukturen, deren Top unterhalb von 1.000 m liegen aus der Potentialabschätzung heraus, obwohl diese potentiell geeignet sein können oder sogar Kavernenfelder in diesen bestehen. Dies betrifft insgesamt 99 Strukturen und führt somit zu einer

konservativen Reduzierung des möglichen Speicherpotentials. Diese Strukturen sind in der Karte in Anhang 3-5 dargestellt.

Für die Modellkavernen wurde das resultierende Hohlraumvolumen unter Annahmen der Anordnung in Strukturen im Zechsteinsalinar angegeben. Es ist davon auszugehen, dass auf Grund eines höheren Anteils an Feststoffen im Salinar das resultierende Hohlraumvolumen bei gleichbleibender Dimensionierung der gebirgsmechanischen Umhüllenden bei Anordnung im Oberrotliegendsalinar zusätzlich zu reduzieren ist. Dies wurde mit einem pauschalen Abschlagsfaktor auf den Solfaktor der Kavernen im Zechstein berücksichtigt und damit das Potential in den Doppel-Salinar-Strukturen reduziert. Eine genauere Betrachtung dieser Strukturen erfolgt im Nachfolgeprojekt InSpEE-*DS*.

6.1.3 Annahmen Bergbau

Die Berücksichtigung der Flächen des Bergbaus erfolgt entsprechend der zugänglichen Datenlage, wobei diese stellenhaft nicht aktuell oder nicht mit ausreichend genauer Datenlage vorhanden ist. Dies führt dazu, dass in einigen Strukturen, in denen bereits Bergbau betrieben wurde, der tatsächliche Potentialabschlag höher liegen würde als im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens berücksichtigt.

6.1.4 Nicht berücksichtigte potentielle Abschlagsfaktoren

Das ermittelte Speicherpotential stellt ein auf Grund der Struktureigenschaften und der internen und obertägigen Flächenbelegung ermitteltes theoretisches Potential dar. Dieses wird hinsichtlich Umsetzbarkeit durch weitere Faktoren wie

- Ausschluss / Einschränkung durch schützenswerte Gebiete,
- Erfordernis einer umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Verbringung der Sole während des Kavernenbaus,
- gegebenenfalls Einschränkung der Feldesgröße zur Reduzierung möglicher Bodensenkungen oberhalb des Feldes (siehe auch Kratzsch 1997),
- zu großer Abstand zu notwendiger Infrastruktur wie Strom- und Gasleitungen, entsprechend dem Speicherziel

beschränkt.

Nicht zuletzt bilden auch die Wirtschaftlichkeit in betriebs- oder volkswirtschaftlicher Hinsicht, der politische Wille zur Realisierung als auch die Akzeptanz der Bevölkerung standortabhängige zusätzliche Faktoren, die das Gesamtpotential weiter reduzieren.

Da diese Faktoren der Hoheit der genehmigenden Behörden, des aktuellen Stands der Technik und der Wirtschaftlichkeit in Bezug auf das Speicherkonzept unterliegen, können und wurden diese nicht generalisiert als Abschlagsfaktoren in die Potentialermittlung aufgenommen.

6.2 Ergebnis der Potentialabschätzung

6.2.1 Gesamtpotential

Die Gesamtergebnisse der Potentialabschätzung betragen nach Auswertung der von dem Arbeitspaket 2 269 übergebenen Strukturen

- 4,5 TWh für die Speicherung elektrischer Energie über Druckluft und Wärme (CAES) und
- 1,6 PWh für die Speicherung von Wasserstoff

bei einmaligen Umschlag. Diese Werte stellen die mögliche Ausspeicherleistung der Speicherkraftwerke dar, die Einspeicherleistung erhöht sich um den Wirkungsgrad des jeweiligen Pfades. Für die Speicherung von Druckluft und Wärme gelten Wirkungsgrade zwischen 0,6 und 0,7 als erreichbar [Moser 2014; Oldhafer et al. 2014; Sterner/Stadler 2014; Wolf/Budt 2014], für die Speicherung von Wasserstoff ist der Wirkungsgrad der Elektrolyse und des Speicherkraftwerks maßgebend. Das Potential der Wasserstoffspeicherung bezieht sich auf den Heizwert des Gases. Entsprechend der Nutzung (Wiederverstromung, Mobilität oder auch Industrie) ist der Wert mit Hilfe des Wirkungsgrades des Nutzungspfades zu reduzieren.

Die Gesamtergebnisse enthalten einen Abschlag für Bebauung und Bergbau von 30 % für die Errichtung von Druckluftspeicherkavernen und von 24 % für die Errichtung von Wasserstoffkavernen.

Abbildung 6-1 zeigt den in einigen Studien ermittelten erforderlichen Speicherbedarf [DLR/IWES/IFNE 2012; EFZN 2013; VDE 2012] für Deutschland im Rahmen der Umsetzung der Energiewende. Dieser liegt hier zwischen 4 und knapp 40 Terrawattstunden (TWh). Damit liegt das Speicherpotential für die Speicherung elektrischer Energie über Druckluft und Wärme im unteren Bereich der Bedarfsabschätzung, das Potential der Wasserstoffspeicherung deutlich darüber. Der genannte zukünftig erforderliche Speicherbedarf gibt keine Aussage darüber, mit welcher Häufigkeit und zeitlicher Einsatzlänge eine bestimmte Speicherleistung erforderlich ist und lässt somit keine Aussage zu, in welchem Umfang ein bestimmter Speichertyp für die sinnvolle Realisierung des erforderlichen Speicherbedarfs erforderlich ist. Generell wird eine vielseitige Speicherlandschaft mit unterschiedlichen Leistungen, Kapazitäten und Umschlagshäufigkeiten

erforderlich sein, so dass sich der Speicherbedarf je Speichertyp gegenüber dem Gesamtbedarf reduzieren wird.

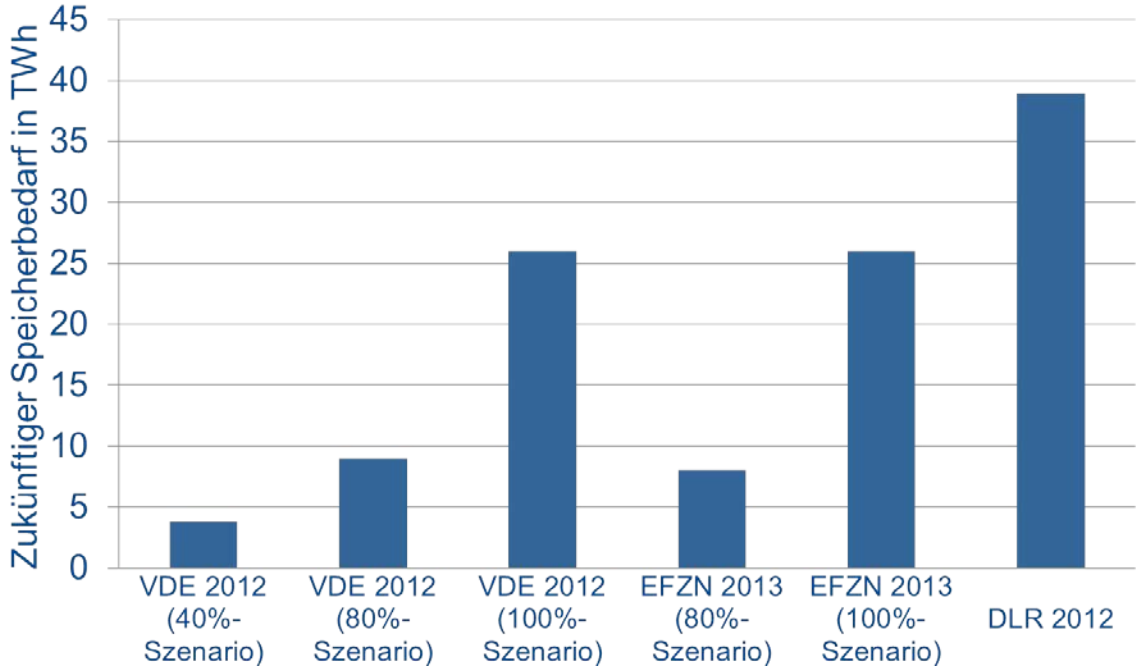


Abbildung 6-1: Zukünftiger Speicherbedarf im Rahmen der Umsetzung der Energiewende

6.2.2 Potential der Bundesländer

Tabelle 6-1 zeigt das ermittelte Speicherpotential aufgeteilt auf die Bundesländer, in denen die Salzstrukturen liegen. Dabei wurden einzelne Bundesländer teilweise zusammengefasst. Strukturen, die sich über mehrere Bundesländer erstrecken, wurden dem Bundesland zugeordnet, welches den größten Flächenanteil an dieser Struktur besitzt.

Den deutlich größten Anteil sowohl an potentiell geeigneten Strukturen als auch am Speicherpotential besitzen die Bundesländer Bremen / Niedersachsen. Die Anteile der jeweiligen Bundesländer an potentiell geeigneten Strukturen im Vergleich zum Speicherpotential variieren (siehe Abbildung 6-2, Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4).

Tabelle 6-1: Speicherpotentiale der Bundesländer

	Ausgewertete Strukturen	Speicherpotential		Abschlagsfaktor	
		CAES	Wasserstoff	CAES	Wasserstoff
	[-]	[TWh]	[TWh]	[-]	[-]
Gesamt	269	4,5	1.614	0,30	0,24
Berlin / Brandenburg	24	0,4	159	0,05	0,13
Bremen / Niedersachsen	160	2,0	702	0,33	0,30
Hamburg / Schleswig-Holstein	44	0,7	413	0,26	0,20
Mecklenburg-Vorpommern	9	0,6	193	0,15	0,12
Sachsen-Anhalt	32	0,8	147	0,44	0,21

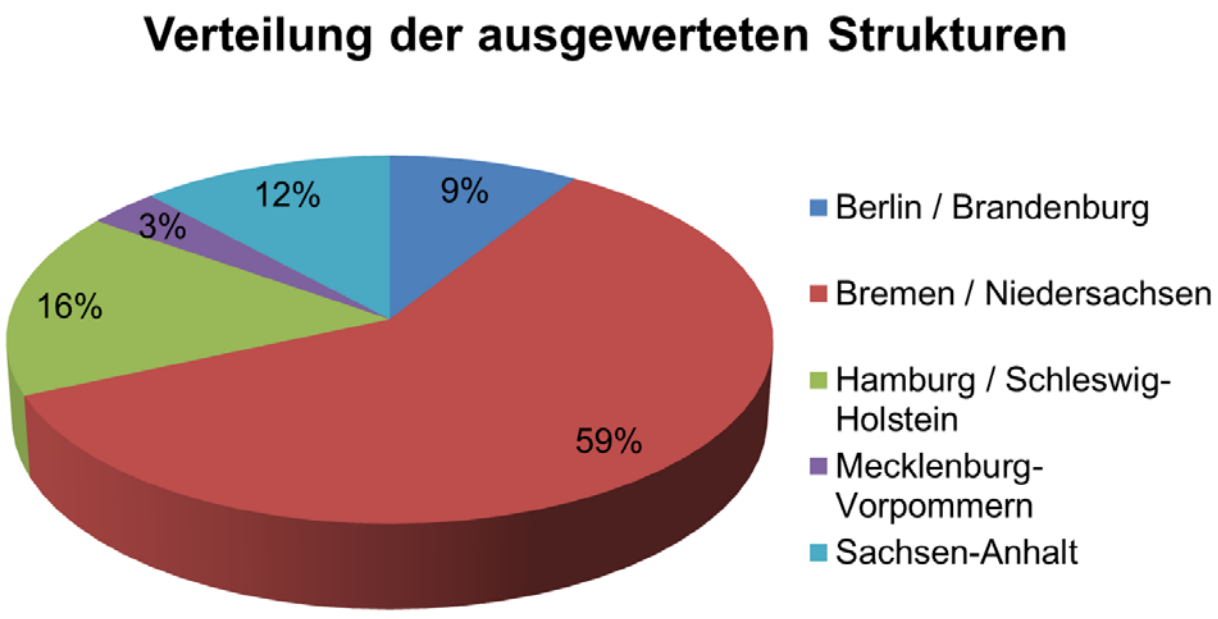


Abbildung 6-2: Verteilung der ausgewerteten Strukturen über die Bundesländer

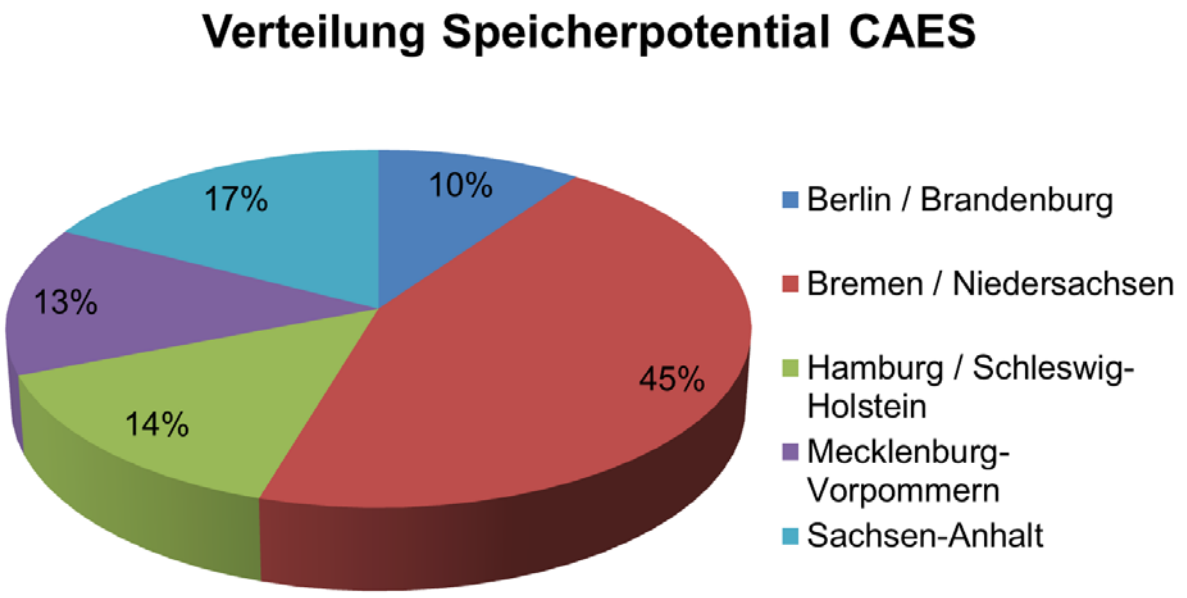


Abbildung 6-3: Verteilung des Speicherpotentials für CAES über die Bundesländer

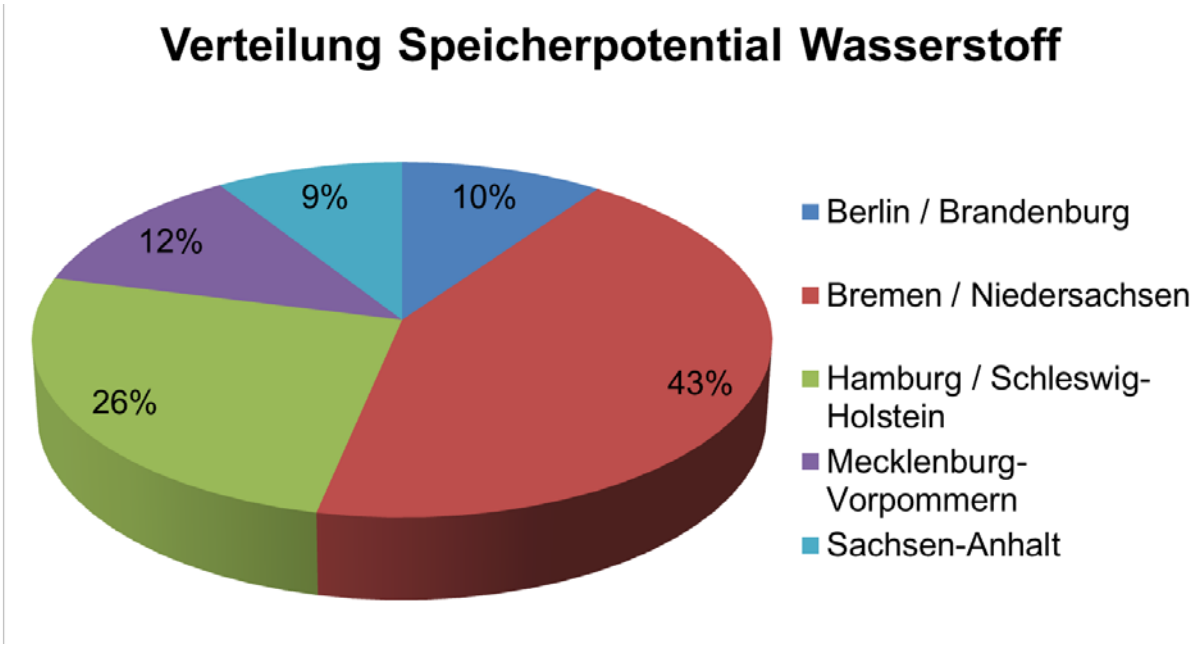


Abbildung 6-4: Verteilung des Speicherpotentials von Wasserstoff über die Bundesländer

7 Ausblick

Auf der Basis der in diesem Verbundvorhaben erarbeiteten geologischen und gebirgsmechanischen Grundlagen ist eine deutlich genauere und alle Salzstrukturen des Norddeutschen Beckens umfassende Abschätzung des theoretischen Speicherpotentials durchgeführt worden. Darüber hinaus wird auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten die Wahl möglicher Standorte in Abhängigkeit weiterer erforderlicher Infrastruktur erleichtert. Allerdings sind sowohl die zur Verfügung gestellten Daten als auch die Potentialabschätzung regional beschränkt und berücksichtigen nur einen Teilbereich der in Deutschland vorkommenden Salzformationen. Da diese einen anderen Aufbau besitzen und deutlich geringere Mächtigkeiten aufweisen, ist eine Übertragung der Vorgehensweise im InSpEE-Verbundvorhaben auf andere Salzformationen nicht ohne weiteres möglich. Aber auch für den Süden Deutschlands ist die Kavernenspeicherung von hohem Interesse, um einen Ausgleich zwischen dem Energiedargebot und dem Energiebedarf auch bei nicht ausreichender Leistungskapazität zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde von den Verbundpartnern ein Antrag für das Nachfolgeprojekt „InSpEE-*DS* – Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten“ eingereicht, welches ausgehend von den geologischen Gegebenheiten sowohl den regionalen Bezug auf ganz Deutschland als auch den Umfang auf die bisher nicht betrachteten Salzformationen ausweitet, um dazu beizutragen, politisch formulierte Ziele zur Energiespeicherung deutschlandweit umzusetzen. Die Durchführung des Projektes wurde genehmigt, so dass das Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme „6. Energieforschungsprogramm „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ 01. Oktober 2015 gestartet ist. Die Ergebnisse werden nach dem Ende der Projektlaufzeit am 31. März 2019 der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Im Nachfolgenden werden Grenzen, an die die jeweiligen Arbeitspakete gestoßen sind bzw. offen gebliebene Herausforderungen einzeln dargestellt und adressiert.

7.1 Arbeitspakete 1 und 2

Bei der Bearbeitung der norddeutschen Salzstrukturen stellte sich heraus, dass die zur Verfügung stehende Datenbasis nicht homogen ist. Während die Datenlage zu Strukturen aus Zechsteinsalinar überwiegend als gut zu bewerten ist, stehen für Doppelsalinare auf Grund der sehr viel geringen bergbaulichen oder speichertechnischen Nutzung erheblich weniger Daten zur Verfügung. Innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens wurde dem Rechnung getragen, indem alle Strukturen dieses Typs in einer Klasse zusammengefasst wurden und ihr nutzbarer Flächenanteil sehr konservativ abgeschätzt wurde. Da Struk-

turen dieses Typs durch ihre durchweg küstennahe Lage und große räumliche Ausdehnung ein großes Potential für die Speicherung v. a. von Windenergie bieten, ist eine weitere, detailliertere Betrachtung, die auch die Neuerhebung von geochemisch-geophysikalischen Daten einschließt, von großem wirtschaftlichem Wert.

Darüber hinaus besteht seitens der geologischen Dienste der Länder der Wunsch, auch diejenigen Strukturen in die Potentialbetrachtung einzubeziehen, die nicht Teil der Untersuchungen innerhalb des InSpEE-Verbundvorhabens waren (flach lagernde Zechsteinsalze bzw. Salinarstrukturen aus anderen Salinaren), da diese regional u. U. die einzige verfügbare Option zur Anlage von Kavernen darstellen. Ein großes Interesse besteht sowohl an geologisch-geotechnischen Grunddaten als auch an der Erarbeitung von Bewertungskriterien (analog zum InSpEE-Verbundvorhaben auf der Grundlage der geologischen Daten und der gebirgsmechanischen Auslegungsberechnungen) als Bestandteil zukünftiger Genehmigungsverfahren.

Zur sowohl räumlichen als auch inhaltlichen Erweiterung auf alle in Deutschland vorkommenden Salinarstruren wurde das Nachfolgeprojekt InSpEE-*DS* beantragt, das die Ergebnisse vom InSpEE-Verbundvorhaben um eine detaillierte Betrachtung von Doppelsalinaren und flachlagernden Salinaren ergänzt.

7.2 Arbeitspaket 3

In den vorgenommenen Salzgesteinsbewertungen und Speicherpotentialabschätzungen blieben die im Vergleich zu den Salzstrukturen weiter verbreiteten flach lagernden Salzschichten planmäßig unberücksichtigt.

Darüber hinaus bestehen etwa 100 von den ca. 700 Salzstrukturen Norddeutschlands nicht allein aus Salinaren der Zechsteinfolge. Diese als Doppel- bzw. Mehrfachsalinare bezeichneten Strukturen enthalten zusätzlich auch Salinarschichten aus dem Rotliegend und teilweise aus dem Keuper, die sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und der sich daraus ergebenden spezifischen geomechanischen Eigenschaften von den Zechsteinsalinaren unterscheiden.

Für die Abschätzung der Speichermöglichkeiten waren ergänzende Bestimmungen geotechnisch relevanter Gesteinsparameter und umfangreiche numerische Modellrechnungen zur Kavernenauslegung erforderlich.

Dafür ist eine Erweiterung der geologischen und geomechanischen Kenntnisse erforderlich, um notwendige sicherheitstechnische Aspekte der Speicherung erneuerbarer Energien in derartigen Kavernenstandorten bewerten und darauf aufbauend ökonomische Machbarkeitsstudien erstellen zu können.

7.3 Arbeitspakete 4 und 5

Im Rahmen der Zuordnung von Modellkavernen einschließlich ihrer erforderlichen Sicherheitsbereiche sind auf Grund der hohen Schrittweite der Teufenschnitte und der von den Verbundpartnern getroffenen Forderung, diese nur dort anzuordnen, wo gesichert Salz anzutreffen ist, Salzstrukturen bzw. Bereiche nicht betrachtet worden, die bei weiterer Untersuchung jedoch eine grundsätzliche Eignung für den Kavernenbau aufweisen können. Dies betrifft alle Strukturen, die keinen Salzschnitt unter- und / oder oberhalb der Modellkavernen aufweisen sowie die Bereiche zwischen den Schnitten, wo der Verlauf der Salzstruktur nicht eindeutig bekannt ist. Des Weiteren fallen alle Strukturen mit einem Top der Salzstruktur tiefer als 1.000 m aus der Potentialabschätzung heraus, da im Rahmen des InSpEE-Verbundvorhabens für den Teufenbereich zwischen 1.500 und 2.000 m keine Modellkaverne ausgelegt wurde. Dies umfasst 99 dennoch potentiell geeignete Strukturen mit einem Top zwischen 1.000 und 1.500 m, in denen teilweise auch Kavernenspeicher bereits realisiert wurden.

Die im Rahmen des Verbundvorhabens entwickelten hohen Mindestmächtigkeiten von meist 500 m und mehr in Abhängigkeit der Teufenanordnung und des Speicherbetriebes beruhen auf den bisherigen Standards des Speicherkavernenbaus. Da sich in Deutschland der Kavernenbau stark auf die Errichtung in Salzstrukturen mit hohen Mächtigkeiten in gut geeigneten Teufenlagen bezieht, haben sich sowohl für die Kavernenvolumina als auch für die aus Sicherheitsgründen ober- und unterhalb der Kavernen einzuhaltenden Salzbereiche hohe Ansprüche entwickelt, deren Betrachtung hinsichtlich einer Optimierung der erforderlichen Gesamtmächtigkeit bisher so nicht erforderlich war. Wird die Betrachtung auf andere Salzformationen mit flach lagernden Salzschichten ausgeweitet, würden unter Beibehaltung dieser Ansprüche große potentiell geeignete Bereiche auf Grund fehlender Salzmächtigkeit herausfallen. Da dennoch Kavernenbau in diesen Formationen sowohl in Deutschland als auch in Europa betrieben wird, ist eine Minimierung der Mindestmächtigkeit in Abhängigkeit von Teufenlage, Gesamtvolumen der Einzelkaverne und Speicherbetrieb im Rahmen des InSpEE-*DS*-Vorhabens vorgesehen.

8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit

Vorträge

Acht, Andreas (2012): Gasspeicher. Technologie und Herausforderungen, Leuphana Energieforum 2012, 17.09.2012, Lüneburg

Donadei, Sabine (2013): Das Verbundprojekt InSpEE. Aufbau eines Informationssystems der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken sowie Potentialabschätzung dieser zur Speicherung von Erneuerbaren Energien, Vernetzungstreffen der Leuchttürme der Förderinitiative Energiespeicher, 21.01.2013, Bonn

Donadei, Sabine; Zander-Schiebenhöfer, Dirk (2013): Das Verbundprojekt InSpEE. Aufbau eines Informationssystems der Salzstrukturen im Norddeutschen Becken sowie Potentialabschätzung dieser zur Speicherung von Erneuerbaren Energien, ANGUS+ Projektaustausch Gebirgsmechanische Aspekte, 15.05.2013, Hannover

Donadei, Sabine (2015): Energiespeicherpotenzial von Salzkavernen, EnergieAgentur NRW, Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff, 20.01.2015, Herten

Crotogino, Fritz; Donadei, Sabine (2015): UGS-Potential zur H2-Speicherung, DBI-Fachforum Geo-Energie, 24./25.03 2015, Berlin

Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B., Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg; Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Bestimmung des Speicherpotenzials Erneuerbarer Energien in den Salzstrukturen Norddeutschlands. Projekt InSpEE, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereiches Aufsuchung und Gewinnung, 22./23.04.2015, Celle

Donadei, Sabine (2015): Das Verbundprojekt InSpEE. Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft), Statusseminar der Förderinitiative Energiespeicher, 22./23.04.2015, Berlin

Donadei, Sabine (2015): Storage Technologies and Innovations in a Shifting Marketplace, Global Energy Village 2015, 05-07.05.2015, Brüssel

Donadei, Sabine; Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Horvath, Peter-Laszlo; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B., Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg; Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Project InSpEE . Rock Mechanical Design for CAES and H2 Storage Caverns & Evaluation of Storage Capacity in NW-Germany, The Third Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition. Use of the Sub-surface to Serve the Energy Transition, 13-15.10.2015, Celle

Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B, Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg; Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Basic Data, Information System & Potential Estimation for Site Selection of Salt Caverns for Energy Storage, SMRI Fall 2015 Technical Conference, 28./29.09.2015, Santander

Gast, Sascha; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Riesenberg, Cornelia; Fleig, Stephanie; von Goerne, Gabriela; Hammer, Jörg (2015): Salzstrukturen zur Speicherung Erneuerbarer Energien. Das Projekt „InSpEE“ als ein Beitrag der Geowissenschaften zur Energiewende, 79. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen, 26.-27.05.2015, Güstrow

Pollok, Lukas; Gast, Sascha; Hölzner, Markus; Fleig, Stephanie; Riesenberg, Cornelia; Hammer, Jörg; von Goerne, Gabriela; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B., (2015): Project InSpEE. Storage Potential for Renewable Energies - Insights into Northern Germany’s Salt Structure Inventory, The Third Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition. Use of the Sub-surface to Serve the Energy Transition, 13-15.10.2015, Celle

Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Fleig, Stephanie; Hammer, Jörg; Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B. (2015): Project InSpEE: Storage Potential for Renewable Energies (CAES & H2) in Northern Germany’s Salt Structures. GeoBerlin 2015, 04.-07.10.2015, Berlin

Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B.; Donadei, Sabine; Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Horvath, Peter-Laszlo; Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg (2015): Salt Structure System (InSpEE) as a Supporting Tool for Evaluation of Storage Capacity of Caverns for Renewable Energies – Rock mechanical Design for CAS and H2 Storage Caverns, American Rock Mechanics Association / Geomechanics Symposium 2015, San Francisco, CA, USA

Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B.; Donadei, Sabine; Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Horvath, Peter-Laszlo; Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg (2015): Salt Structure System (InSpEE) as a Supporting Tool for Evaluation of Storage Capacity of Caverns for Renewable Energies – Rock mechanical Design for CAS and H2 Storage Caverns, Mechanical Behaviour of Salt VIII 2015, 26.-28.05.2015, Rapid City, USA

Donadei, Sabine (2016): Kavernenpotential – Ergebnisse aus InSpEE, Rhein-Ruhr-Wasserstoff-Workshop 2016. „Think Big: Wasserstoff für die Energiewirtschaft“, 20.01.2016, Duisburg

Horvath, Peter-Laszlo (2016): Projekt InSpEE – GIS-basierte Potentialabschätzung zur Speicherung von Erneuerbaren Energien in Salzkavernen, DBI-Fachforum GEO-Energie, 15./16.03.2016, Berlin

Posterbeiträge

Gast, Sascha; Pollok, Lukas; Goerne von, Gabriela, Simon, Andreas (2014): Structural Evolution of the Salt Domes Blankensee, Sperenberg and Paplitz – Based on a Detailed Part of the 3D-Model of Brandenburg.- Abstracts, GeoFrankfurt 2014, 21-24.09.2014, Frankfurt/Main

Zehner, Björn; Wolf, Marco; Bense, Frithjof; Gast, Sascha (2014): A 3D model of the North German Basin – aims and challenges.- 34th Gocad Meeting, Nancy

Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; Pollok, Lukas; von Goerne, Gabriela; Hölzner, Markus; Fleig, Stephanie; Hammer, Jörg (2015): Die Niveauschnittkarten des Norddeutschen Untergrundes - Erstellung, Harmonisierung und Nutzen. 79. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen (ARGE), 26./27.05.2015, Güstrow

Pollok, Lukas; Gast, Sascha; Hölzner, Markus; Fleig, Stephanie; Hammer, Jörg; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Projekt „InSpEE“ – Speicherpotenzial für erneuerbare Energien (CAES & H2). Einblicke in das Inventar norddeutscher Salzstrukturen. 79. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen (ARGE), 26./27.05.2015, Güstrow

Horvath, Peter-Laszlo; Donadei, Sabine; Schneider, Gregor-Sönke (2016): GIS-basierte Potentialabschätzung für Salzkavernen und Aufbau des Informationssystems „Salz“ im Projekt InSpEE, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereiches Aufsuchung und Gewinnung, 21./22.04.2016, Celle

Schriftliche Publikationen

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Projekt InSpEE: Speicher im Untergrund für die Energiewende. In: BGR (Hrsg.): BGR-Report 2012, 52-53, Hannover

KBB Underground Technologies GmbH (2014): Bestimmung des Speicherpotenzials Erneuerbarer Energien in den Salzstrukturen Norddeutschlands. Das Projekt InSpEE, InnoWattion. Das Magazin der Landesinitiative Energiespeicher und -systeme Niedersachsen, Heft 2, 2014, S.11, o.O.

Zander-Schiebenhöfer, Dirk; Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Zapf, Dirk; Staudtmeister, Kurt; Rokahr, Reinhard B, Fleig, Stephanie; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Hammer, Jörg; Gast, Sascha; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Bestimmung des Speicherpotenzials Erneuerbarer Energien in den Salzstrukturen Norddeutschlands. Projekt InSpEE, Erdöl Erdgas Kohle 131, Jg. 2015, Heft 7/8, S.289-293, Hamburg

KBB Underground Technologies GmbH (2015): Energiespeicherung in Salzkavernen, InnoWATTion. Das Magazin der Landesinitiative Energiespeicher und -systeme Niedersachsen, Heft 2, 2015, S.12, o.O.

Gast, Sascha; Pollok, Lukas; Hölzner, Markus; Riesenberg, Cornelia; Fleig, Stephanie; von Goerne, Gabriela; Hammer, Jörg (2015): Salzstrukturen zur Speicherung Erneuerbarer Energien. Das Projekt „InSpEE“ als ein Beitrag der Geowissenschaften zur Energiewende, LUNG, Heft 1, 79. Tagung Norddeutscher Geologen, S.51-52, o.O.

Pollok, Lukas; Gast, Sascha; Hölzner, Markus; Fleig, Stephanie; Hammer, Jörg; Riesenberg, Cornelia; von Goerne, Gabriela (2015): Projekt „InSpEE“. Speicherpotenzial für erneuerbare Energien (CAES & H2). Einblicke in das Inventar norddeutscher Salzstrukturen, LUNG, Heft 1, 79. Tagung Norddeutscher Geologen, S.129-130, o.O.

Pollok, Lukas (2015): Speicherung regenerativer Energien. Verbundprojekt untersucht das Speicherpotenzial in norddeutschen Salzstrukturen, BGR Report, Juni 2015, S.42-43, Hannover

Donadei, Sabine; Horvath, Peter-Laszlo; Schneider, Gregor-Sönke (2016): GIS-based potential assessment of caverns in salt structures for the InSpEE project, Environmental Earth Sciences, Cham (im Erscheinen)

Donadei, Sabine; Pollok, Lukas; Schneider, Gregor-Sönke (2016): Basic Geological Data, Rock Mechanical Calculations and Methodology for the Evaluation of CAES and H2 Storage Capacity in NW-Germany, Petroleum Geoscience, London (im Erscheinen)

Anhangsverzeichnis

Anhang 1-1: Ablaufplan des Verbundvorhaben

Anhang 1-2: Berichtsblatt / Document Control Sheet

Anhang 2-1: Niveauschnittkarte 500 m u. NN

Anhang 2-2: Niveauschnittkarte 1.000 m u. NN

Anhang 2-3: Niveauschnittkarte 1.500 m u. NN

Anhang 2-4: Niveauschnittkarte 2.000 m u. NN

Anhang 2-5: Salzstrukturinformationsblatt

Anhang 3-1: Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken

Anhang 3-2: Salzstrukturen im Norddeutschen Becken (1:750.000)

Anhang 3-3: Sekundäre Mächtigkeiten der norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

Anhang 3-4: Erkundungsgrad und konkurrierende Nutzungen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

Anhang 3-5: Auswahl von untersuchungswürdigen Salzstrukturen in Norddeutschland (1:750.000)

Anhang 3-6: Verteilung der Internbautypen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

Anhang 3-7: Gegenüber der Datengrundlage von Reinhold et al. 2008 hinzugefügte und entfernte Salzstrukturen

Anhang 4-1: Speicherung von Druckluft – Berechnungsergebnisse

Anhang 4-3: Speicherung von Wasserstoff – Berechnungsergebnisse

Literaturverzeichnis

Kapitel 1

Baldschuhn, R. (1996): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Nordhorn, C 3506. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 188 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geol. Jb., Reihe A, 153: 1-88; Hannover.

CORDIS (2015): HYUNDER Report Summary – http://cordis.europa.eu/result/rcn/161212_en.html; Zugriff am 29.10.2015

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR, Institut für Technische Thermodynamik), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, KBB Underground Technologies GmbH, Noack, C., Burggraf, F., Hosseiny, S.S., Lettenmeier, P., Kolb, S., Belz, S., Kallo, J., Friedrich, K.A., Pregger, T., Kiên Cao, K., Heide, D., Naegler, T., Borggrefe, F., Bünger, U., Michalski, J., Raksha, T., Voglstätter, C., Smolinka, T., Crotogino, F., Donadei, S., Horvath, P.-L., Schneider, G.-S. (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Stuttgart.

Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: 342 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).

Düsterloh, U., Lux, K.-H. (2009): Druckluftspeicherung in Salzkavernen – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik/TU Clausthal; Goslar.

Düsterloh, U., Lux, K.-H. (2010): Some geomechanical aspects of compressed air energy storage (CAES) in salt caverns – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Fall 2010 Meeting, Leipzig, 4-5 October 2010, Techn. Meeting Papers: 13 S.; Pennsylvania.

Fichtner (2014): Erstellung eines Entwicklungskonzeptes Energiespeicher in Niedersachsen. – Bericht, Fichtner, 197 S.; Stuttgart.

FIZ Karlsruhe (2015a): Speicherpotenziale unterirdisch vermessen – http://forschung-energiespeicher.info/aktuelles/aktuelles-einzelansicht/aktuelles-detailansicht/203; Zugriff am 29.10.2015

FIZ Karlsruhe (2015b): Wasserstoff unter Tage speichern – http://forschung-energiespeicher.info/wind-zu-wasserstoff/projektliste/projekt-einzelansicht/74/Wasserstoff_unter_Tage_speichern/; Zugriff am 29.10.2015

Hartmann, N., Eltrop, L., Bauer, N., Salzer, J., Schwarz, S. & Schmidt, M. (2012): Stromspeicherpotentiale für Deutschland. – Universität Stuttgart, 110 S.; Stuttgart.

Nieland, J. (2004): Salt Cavern Thermal Simulator Version 2.0 User's Manual.

Nieland, J. (2008): Salt Cavern Thermodynamics. Comparison Between Hydrogen, Natural Gas and Air Storage – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Fall 2008 Meeting, Galveston/Texas, 13-14 October 2008, Techn. Meeting Papers: 20 S.; Pennsylvania.

Reinhardt, H.-G. (1960-1991): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR. VEB Geophysik Leipzig; Leipzig [unveröff.].

Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Berlin/Hannover.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D. (1997): Development of a New Criterion for the Determination of the Maximum Permissible Internal Pressure for Gas Storage Caverns in Rock Salt. Final Report of SMRI Research project No. 1-94, – IUB, Universität Hannover; Hannover.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zapf, D. (2008): Influence of Different Loading Histories on the Rock Mechanical Behavior of a Gas Cavern at Shallow Depth – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2008 Meeting, Porto/Portugal, 28-29 April 2008, Techn. Meeting Papers: 18 S.; Pennsylvania.

Stolzenburg, K., Hamelmann, R., Wietschel, M., Genoese, F., Michalis, J., Lehmann, J., Miege, A., Krause, S., Sponholz, C., Donadei, S., Crotogino, F., Acht, A. & Horvath, P.-L. (2014): Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. – PLANET Planungsgruppe Energie und Technik GbR 250 S.; Berlin.

Wirth, H., Krull, P. (2010): Niveauschnittkarten des norddeutschen Untergrundes im Maßstab 1:500.000. SDGG (68) – GeoDarmstadt 2010, Abstracts, S. 609.

Kapitel 2 (BGR)

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geol. Jb., Reihe A, 153: 1-88; Hannover.

Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., and Schmidt, K., 2012, Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell.: GMIT, v. 48, p. 8.

Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: 342 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).

Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremer Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. Stratigraphie, Paläographie, Strukturgeologie. – Ber. FB Geowiss. Univ. Bremen, 223: 1-379; Bremen.

Geologisches 3D Untergrundmodell Brandenburg (2014). – Gocad Modell; Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR). Verfügbar unter: http://www.lbgr.brandenburg.de/.

Hese, F. (2012): 3D Modellierungen und Visualisierung von Untergrundstrukturen für die Nutzung des unterirdischen Raumes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Hudec, M.R. & Jackson, M.P.A. (2007): Terra infirma: Understanding salt tectonics. – Earth Sci. Rev., 82: 1-28; Amsterdam.

Jackson, M.P.A. & Vendeville, B.C. (1994): Regional extension as a geological trigger for diapirism. – Geol. Soc. Am. Bull., 106: 57-73; Boulder/Colorado.

Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. – Geol. Jb., A 10: 1-77; Hannover.

Jaritz, W. (1995): Diskussion der Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. – Kali u. Steinsalz, 10: 316-318; Essen.

Käding, K.-C. (2000): Die Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Folge (vormals Bröckelschiefer-Folge) - Stratigraphie und Verbreitung des z4 bis z7 im Zechstein-Becken. – Kali u. Steinsalz, 13: 760-770; Essen.

Käding, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland. – News. Stratigr., 41: 123-127; Stuttgart.

Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. – Geology, 36: 839-842; Boulder.

Kockel, F. (1999): Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland - neue Einsichten, offene Fragen. – Mitt. dt. Geophys. Ges., 3: 38-47; Potsdam.

Kockel, F. & Krull, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Ber., Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 66 S.; Hannover.

Koyi, H. & Petersen, K. (1993): Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin. – Mar. Petrol. Geol., 10: 82-94; Oxford.

Maystrenko, Y., Bayer, U., Brink, H.-J. & Littke, R. (2008): The Central European Basin System - an Overview. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 18-34; Berlin/Heidelberg (Springer).

Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2005): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. – Int. J. Earth Sci., 94: 799-814; Stuttgart.

Peryt, T.M., Geluk, M., Mathiesen, A., Paul, J. & Smith, K. (2010): Zechstein. – In: Doornenbal, H. & Stevenson, A. (eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA). – EAGE Publ.: 123-147; Houten.

Pollok, L., Hammer J., Fleig, S., Musmann, P. (2016): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.); Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H.: Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein: in Druck (Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.).

Reinhardt, H.-G. (1960-1991): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR. VEB Geophysik Leipzig; Leipzig [unveröff.].

Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Berlin/Hannover.

Rosenbaum, S., Hese, F., Liebsch-Dörschner, T., Offermann, P., Rheinländer, J., Thomsen, C. (2012): Geologische Modelle der Deck- und Speichergesteine Schleswig-Holstein. Schlussbericht des Teilvorhabens M6 im Rahmen des Verbundprojektes CO2-MoPa Modellierung und Parametrisierung von CO2-Speicherung in tiefen, salinen Speichergesteinen für Dimensionierungs- und Risikoanalysen; Vorhaben: Dimensionierung und Risikoanalysen bei der CO2-Speicherung – Sonderprogramm GEOTECHNOLOGIEN; 107 S., LLUR SH, Flintbek.

Scheck-Wenderoth, M., Maystrenko, Y., Hübscher, C., Hansen, M. & Mazur, S. (2008): Dynamics of salt basins. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 307-322; Berlin/Heidelberg (Springer).

Sedlacek, R. (2014): Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. – Erdöl Erdgas Kohle, 130: 402-412; Hamburg.

Stackebrandt, W. (1999): Aktuogeologische Beobachtungen auf Spitzbergen - ein Beitrag zum Verständnis der norddeutschen glazigenen Landschaftsgestaltung. – In: Brause, H. (ed.): Tagungsband zur 8. Jahrestagung in Görlitz 1999 zum Hauptthema "Westsudeten". 8. Jahrestagung Gesellschaft für Geowissenschaften, Görlitz, 24.-28.09.1999: 45-46.

Stackebrandt, W., Andreae, A. & Strahl, J. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg: 159 S.; Cottbus (L.-Amt Bergbau, Geol. u. Rohstoffe Brandenburg).

van Wees, J.D., Stephenson, R.A., Ziegler, P.A., Bayer, U., McCann, T., Dadlez, R., Gaupp, R., Narkiewicz, M., Bitzer, F. & Scheck, M. (2000): On the origin of the Southern Permian Basin, Central Europe. – Mar. Petrol. Geol., 17: 43-59; Oxford.

Warsitzka, M., Kley, J. & Kukowski, N. (2013): Salt diapirism driven by differential loading – Some insights from analogue modelling. – Tectonophysics, 591: 83-97; Amsterdam.

Zehner, B., Wolf, M., Bense, F. & Gast, S. (2014): A 3D model of the North German Basin – aims and challenges. – Proceedings 34th Gocad Meeting, Nancy: Poster.

Kapitel 3 (BGR)

Ahlborn, O. & Richter-Bernburg, G. (1953): Exkursion zum Salzstock Benthe (Hannover), mit Befahrung der Kaliwerke Ronnenberg und Hansa am 13. Mai 1953. – Z. dt. Ges. Geowiss., 105: 855-865; Hannover.

Baldschuhn, R. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Celle, C 3526. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 72 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R. (1996): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Nordhorn, C 3506. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 188 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (1991): Inversion tectonics in the North-West German Basin. – In: Spencer, A.M. (ed.): Generation, Accumulation and Production of Europe‘s Hydrocarbons. – Spec. Publ. EAPG 1: 149-159; Oxford (University Press).

Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geol. Jb., Reihe A, 153: 1-88; Hannover.

Baldschuhn, R., Jaritz, W., Kockel, F. & Roth, W. (1979a): Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil I: Adolphsdorf - Krummendeich. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 217 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R., Jaritz, W., Kockel, F. & Roth, W. (1979b): Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil II: Landschaftspolder - Zwischenahn. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 221 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R. & Jürgens, U. (1995): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Soltau, C 3122. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 184 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R. & Kockel, F. (1997): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Diepholz, C 3514. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 183 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R. & Kockel, F. (1998a): Der Untergrund von Hannover und seiner Umgebung. – Ber. Nat. Ges. Hannover, 140: 5-98.

Baldschuhn, R. & Kockel, F. (1998b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Nienburg, C 3518. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 104 S.; Hannover [unveröff.].

Baldschuhn, R. & Stancu-Kristoff, G. (1993): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Uelzen, C 3126. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 144 S.; Hannover [unveröff.].

Bauer, G., Bornemann, O., Essaid, M., Herde, W., Mayrhofer, H. & Richter-Bernburg, G. (1972): Benther Salzstock. Exkursion A am 12. Oktober 1972. – 124. Hauptversammlung in Braunschweig vom 12. bis 15. Oktober 1972, Braunschweig: 30 S.; (Deutsche Geologische Gesellschaft).

Beer, H. (2000): Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg: Tiefenlinienkarte der Zechsteinoberfläche. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB), Landesvermessungamt Brandenburg; Kleinmachnow, Potsdam.

Behlau, J. (2013): Erstellung eines 3D-Lagerstättenmodells mit dem Grubengebäude des Erkundungsbergwerkes Gorleben –Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Hannover.

Best, G. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Wersterland N/Sylt, C 1114. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 40 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1982a): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Fehmarn, C 1530. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 53 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1982b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Laboe, C 1526. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 67 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1982c): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Süderlügum, C 1118 und Blatt Husum, C 1518. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 67 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1982d): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Westerland-S/Amrum, C 1514. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 48 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1983): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Helgoland, C 1914. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 25 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1985): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Heide, C 1918. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 81 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Glücksburg, C 1122 und Blatt Schleswig, C 1522. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 95 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. (1987): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Rendsburg, C 1922. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 66 S.; Hannover [unveröff.].

Best, G. & Zirngast, M. (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur „Oberes Allertal“: 114 S.; Hannover (Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe).

Beutler, G., Hauschke, N. & Nitsch, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – In: Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - Eine ganz andere Welt. Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter: 129-174; München (Pfeil).

Binot, F. (1988a): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt West-Schleswig-Block, Blatt C 1110. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 50 S.; Hannover [unveröff.].

Binot, F. (1988b): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt West-Schleswig-Block, C 1510. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 63 S.; Hannover [unveröff.].

Binot, F. (1990a): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1506. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 22 S.; Hannover [unveröff.].

Binot, F. (1990b): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1910. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 26 S.; Hannover [unveröff.].

Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J. & Schmidt, C. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. – Geowiss. Mit., 48: 6-13.

Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. – BfS-Schriften: 1-67; Salzgitter.

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3. Ergebnisse der über- und untertägigen geologischen Ekundung des Salinars. – Geol. Jb., C 73: 1-211; Hannover.

Bornemann, O. & Fischbeck, R. (1986): Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. – Z. dt. Ges. Geowiss., 137: 71-83; Hannover.

De Boer, H.v. (1971): Gefügeregelung in Salzstöcken und Hüllgesteinen. – Kali u. Steinsalz, 7: 403-425; Essen.

Deneke, E. (1982): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Lübeck NE, C 1930. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 42 S.; Hannover [unveröff.].

Deneke, E. (1983): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Kiel, C 1926. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 61 S.; Hannover [unveröff.].

Dresbach, C., Pusch, M., Mingerzahn, G., Fleig, S., Hammer, J. & Behlau, J. (2010): 3D-Modelle der Kali- und Steinsalzbergwerke des Staßfurter Sattels und geologisches 3D-Modell der Region Staßfurt. – In: Gerardi, J. (Hrsg.): Staßfurt 2010 - Erkennen, analysieren, bewerten und prognostizieren der zukünftigen Entwicklung der Bergbaufolgeschäden, Staßfurt. 244: 46-62; Hannover (Exkursionsf. u. Veröffent. Dt. Ges. Geowiss.).

Engelmann, D., Hartmann, O. & Schönberg, G. (2004): Salzbergbau in Mitteldeutschland. Teil 1: Folgen des Kali- und Steinsalzbergbaues am Staßfurter Sattel. – In: Friedel, C.-H. & Röhling, H.-G. (Hrsg.): GeoLeipzig 2004 - Geowissenschaften sichern Zukunft., Leipzig. Exkursionsführer: 109-124; (Schriftenreihe Deutsche Geologische Gesellschaft).

Fichtner (2014): Erstellung eines Entwicklungskonzeptes Energiespeicher in Niedersachsen. – Bericht, Fichtner, 197 S.; Stuttgart.

Fleig, S. (2005): Bohrlochdaten als Grundlage für die geologische 3D-Modellierung von Salzkavernenstandorten. – Erdöl Erdgas Kohle, 121: 148-150.

Fleig, S. & Kühnlenz, T. (2013): Projekt Gorleben: Bewertung der Genese des Salzstocks Gorleben (Salzaufstieg, Subrosion). – Ber., Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 135 S.; Hannover [unveröff.].

Franke, D. (2014): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Wörterbuch. –. Verfügbar unter: www.regionalgeologie-ost.de.

Friedel, C.-H., Leiss, B., Blanke, H. & Stottmeister, L. (2013): Geologie des Allertal-Salzdiapirs (Grubengebäude Bartensleben-Marie, Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben) (Exkursion E am 4. April 2013). – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, 95: 91-106; Stuttgart.

Frisch, U. (1982a): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Leer, C 2710. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 91 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1982b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Oldenburg, C 3114. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 76 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Papenburg, C 3108. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 187 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1985): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Quakenbrück, C 3510. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 133 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1989a): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt Borkum-Riffgrund, C 2302. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 75 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1989b): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt Norderney, C 2306. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 147 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1989c): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Emden, C 2706. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 173 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. (1990): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Elmshorn, C 2322. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 128 S.; Hannover [unveröff.].

Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremer Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. Stratigraphie, Paläographie, Strukturgeologie. – Ber. FB Geowiss. Univ. Bremen, 223: 1-379; Bremen.

Frisch, U. & Röhling, H.-G. (1990): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1902. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 108 S.; Hannover [unveröff.].

Geologisches 3D Untergrundmodell Brandenburg (2014). – Gocad Modell; Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR). Verfügbar unter: http://www.lbgr.brandenburg.de/.

Geopotential Deutsche Nordsee (GPDN) (2013). – Gocad Modell, Map Server; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Bundesamt für Schifffahrt und Hydrographie (BSH). Verfügbar unter: www.gpdn.de/.

Gillhaus, A., Crotogino, F., Hübner, S., Haubrich, H.-J. & , E.G. (2006): Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels CAES. – Endbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 150 S.

Groß, U. (1986): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 706 und Blatt C 1106. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 43 S.; Hannover [unveröff.].

Günnewig, R., Borgmeier, M. & Ziegler, K. (2001): Kavernenspeicher Kraak. – Erdöl Erdgas Kohle, 117: 10-18.

Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretzki, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A. & Vogel, P. (2012): Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Ber., Ges. Anlagen- u. Reaktorsicherheit mbH, 86 S.; Köln [unveröff.].

Hänig, D., Hesse, R., Küstermann, W. & Rühberg, N. (1997): Geologische Karte von Mecklenburg-Vorpommern. Synoptische Strukturkarte mit Zechsteinsalinar und Strukturlinien des Subsalinars. Landesamt für Umwelt, Natruschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommerm (LUNG); Schwerin.

Hessmann, W. (1974): Salinar-Atlas der DDR. – In: Hessmann, W., Lange, M., Putscher, S. & Rusbült, J. Zentrales Geologisches Institut: 52, Berlin

Hessmann, W. (1975): Salinar-Atlas der DDR. – In: Hessmann, W., Lange, M., Putscher, S. & Käbel, H. Zentrales Geologisches Institut: 87, Berlin

Hoppe, J. & Seebo, K.W. (2003): Spuren des Salzes in einer Landgemeinde : Beitrag zur Geschichte der Kali- und Salzbergwerke Fallersleben in Habighorst und Mariaglück in Höfer: 251 S. S.; Norderstedt (Books on Demand).

Hudec, M.R. & Jackson, M.P.A. (2007): Terra infirma: Understanding salt tectonics. – Earth Sci. Rev., 82: 1-28; Amsterdam.

Jackson, M.P.A. & Vendeville, B.C. (1994): Regional extension as a geological trigger for diapirism. – Geol. Soc. Am. Bull., 106: 57-73; Boulder/Colorado.

Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. – Geol. Jb., A 10: 1-77; Hannover.

Jaritz, W. (1995): Diskussion der Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. – Kali u. Steinsalz, 10: 316-318; Essen.

Jordan, R. (1969): Geologische Exkursion nach Sehnde 1969. – Archivstück, Nds. L.-Amt Bodenf.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Hamburg-West/NE, C 2722. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 64 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1982): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bremerförde, C 2718. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 68 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bremen, C 3118. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 136 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Cuxhaven, C 2318. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 90 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989a): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 11-02. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 87 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989b): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 11-06. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 85 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989c): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 15-02. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 97 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989d): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 15-06. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 87 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989e): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 19-02. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 90 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989f): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 702. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 84 S.; Hannover [unveröff.].

Jürgens, U. (1989g): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1102. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 93 S.; Hannover [unveröff.].

Käding, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland. – News. Stratigr., 41: 123-127; Stuttgart.

Kelz, A. (1998): Relationale Datenbanken. Eine Einführung. – Webpage. Verfügbar unter: https://www.hdm-stuttgart.de/~riekert/lehre/db-kelz/index.htm.

Klarr, K., Richter-Bernburg, G. & Rothfuchs, T. (1987): Der Zechstein der Asse südöstlich Braunschweig und geowissenschaftliche Versuche der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. – In: Kulick, J. & Paul, J. (eds.): Exkursionsführer I. Exkursionen A, B ,C, G, H, K. – Int. Symp. Zechstein: 101-122; Kassel, Hannover (Subkom. Perm/Trias der Strat. Kom. DUGW/IUGS).

Kleinefeld, B., Behlau, J. & Schweinsberg, H.-J. (2008): Safe and economic cavern construction in the Etzel Cavern Field based on geological 3D-Modelling. – Spring SMRI Conference, Porto, Portugal, 27 - 29 April 2008. Technical conference papers.: 229-237; (SMRI).

Kley, J., Franzke, H.-J., Jähne, F., Krawczyk, C., Lohr, T., Reicherter, K., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Tanner, D.C. & van Gent, H. (2008): Strain and Stress. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 97-124; Berlin/Heidelberg (Springer).

Kley, J. & Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. – Geology, 36: 839-842; Boulder.

Kockel, F. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Hannover NE/SE, C 3522. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 33 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1984a): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Braunschweig, C 3926. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 75 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1984b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Goslar, C 4326. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 57 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1984c): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Hannover, C 3922. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 79 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1984d): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Helmstedt, C 3930. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 53 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1986a): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Gronau, C 3906. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 52 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1986b): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Holzminden, C 4322. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 52 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. (1995): Structural and Palaeographical Development of the German North Sea Sector. – Beitr. regionale Geol. Erde, 26: 1-96; Berlin/Stuttgart.

Kockel, F. (1998): Salt Problems in Northwest Germany and the German North Sea Sector. – J. Seism. Expl., 7: 219-235; Bilthoven.

Kockel, F. (1999): Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland - neue Einsichten, offene Fragen. – Mitt. dt. Geophys. Ges., 3: 38-47; Potsdam.

Kockel, F. (2002): Rifting processes in NW-Germany and the German North Sea Sector. – Neth. J. Geosci., 81: 149-158; Cambridge.

Kockel, F. & Krull, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Ber., Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 66 S.; Hannover.

Kockel, F. & Röhling, H.-G. (1990a): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1502. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 95 S.; Hannover [unveröff.].

Kockel, F. & Röhling, H.-G. (1990b): Gaspotential Deutsche Nordsee: Geotektonischer Atlas der deutschen Nordsee 1:100000, Blatt C 1906. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 92 S.; Hannover [unveröff.].

Kossow, D. & Krawczyk, C.M. (2002): Structure and quantification of processes controlling the evolution of the inverted NE-German Basin. – Mar. Petrol. Geol., 19: 601-618; Oxford.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M. & Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. – Geol. Jb., C 72: 1-201; Hannover.

Koyi, H. & Petersen, K. (1993): Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin. – Mar. Petrol. Geol., 10: 82-94; Oxford.

Krull, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. – Ber., Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 133 S.; Berlin [unveröff.].

Lepper, J., Dörhöfer, G., Ernst, G., Fauth, H., Goldberg, G., Gramann, F., Heine, H.-W., Irrlitz, W., Jordan, R., Kemper, E., Kockel, F., Kosmahl, W., Look, E.-R., Roeschmann, G., Rohde, P., Schmid, F., von Struensee, G. & Büchner, K.-H. (1984): Geol. Karte von Niedersachsen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3725, Sarstedt. Nieders. Landesamt f. Bodenforsch.; Hannover.

Löffler, J. (1962): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik. – Freib. Forsch.-H., 3: 1-347; Berlin.

Menning, M. & Deutsche Stratigraphische Kommission (2012): Erläuterung zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland Kompakt 2012. – Z. dt. Ges. Geowiss., 163: 385-409; Stuttgart.

Middendorf, E. & Kühn, R. (1966): Befahrung des Kalibergweks Siegfried-Giesen, Groß-Giesen bei Hildesheim, 8. September 1965. – Fortschr. Miner., 43: 145-187; Stuttgart.

Otto, V. (2003): Inversion-related features along the southeastern margin of the North German Basin (Elbe Fault System). – Tectonophysics, 373: 107-123; Amsterdam.

Peryt, T.M., Geluk, M., Mathiesen, A., Paul, J. & Smith, K. (2010): Zechstein. – In: Doornenbal, H. & Stevenson, A. (eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA). – EAGE Publ.: 123-147; Houten.

Pollok, L., Hammer J., Fleig, S., Musmann, P. (2016): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.); Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H.: Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein: in Druck (Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.).

Reinhardt, H.-G. (1960-1991): Regionales geophysikalisches Kartenwerk der DDR. VEB Geophysik Leipzig; Leipzig [unveröff.].

Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschichten in Deutschland (BASAL). – Zwischenbericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 98 S.; Hannover.

Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Berlin/Hannover.

Richter-Bernburg, G. (1980): Salt tectonics, interior structures of salt bodies. – Bull. Cent. Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, 4: 373-393; Beautiran.

Richter-Bernburg, G. (1987): Deformation within salt bodies. – In: Lerche, I. & O'Brien, J.J. (eds.): Dynamical Geology of Salt and Related Structures: 39-75; Orlando (Academic Press).

Roth, H. (1953): Befahrung des Kaliwerkes "Bergmannssegen-Hugo" der Wintershall AG. Exkursion am 16. Mai 1953. – Z. dt. Ges. Geowiss., 105: 868-871; Hannover.

Sattler-Kosinowski, S. (1981): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bremerhaven, C 2714. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 64 S.; Hannover [unveröff.].

Sattler-Kosinowski, S. (1982): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Langen, C 2314. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 29 S.; Hannover [unveröff.].

Sattler-Kosinowski, S. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Esens, C 2310. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 54 S.; Hannover [unveröff.].

Schachl, E. (1987): Zechsteinstratigraphie und Innenbau des Salzstockes von Wathlingen-Hänigsen. – In: Kulick, J. & Paul, J. (Hrsg.): Exkursionsführer I. Exkursionen A, B ,C, G, H, K. – Int. Symp. Zechstein: 69-100; Wiesbaden.

Scheck-Wenderoth, M., Maystrenko, Y., Hübscher, C., Hansen, M. & Mazur, S. (2008): Dynamics of salt basins. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 307-322; Berlin/Heidelberg (Springer).

Schmidt, O. (1929): Kalisalzlagerstätte Habighorst-Höfer bei Celle. Ein Beitrag zur Metamorphose und Tektonik der Salzgesteine in den norddeutschen Salzstöcken. – 18 S. S. Dissertation Technische Hochschule zu Berlin, Halle (Saale).

Schmitz, J. (1984): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Bad Oldesloe, C 2326 und Blatt Lübeck, C 2330. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 74 S.; Hannover [unveröff.].

Sedlacek, R. (2014): Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. – Erdöl Erdgas Kohle, 130: 402-412; Hamburg.

Seidl, E. (1973): Das Bergwerksfeld des Kaliwerks Friedrichshall A.-G. bei Sehnde,1912-1973. – Archivstück, NLfB; Hannover.

Stackebrandt, W., Andreae, A. & Strahl, J. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg: 159 S.; Cottbus (L.-Amt Bergbau, Geol. u. Rohstoffe Brandenburg).

Stollhofen, H., Bachmann, G.H., Barnasch, J., Bayer, U., Beutler, G., Franz, M., Kästner, M., Legler, B., Mutterlose, J. & Radies, D. (2008): Upper Rotliegend to Early Cretaceous basin development. – In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins: The Central European Basin System: 181-210; Berlin/Heidelberg (Springer).

Vendeville, B.C. (2002): A New Interpretation of Trusheim's Classic Model of Salt-Diapior-Growth. – Gulf Coast Assoc. of Geol. Soc. Transactions, 52: 943-952; Houston.

von Struensee, G. (2000): 110 Jahre Kaliwerk Salzdetfurth - ein Beitrag zur lagerstättenkundlichen Übersicht des Hildesheimer Waldes. – Glückauf mit Kali und Steinsalz, 135: 25 S.; Essen.

Wilke, F., Behlau, J., Bornemann, O. & Schweinsberg, J. (2004): Geological 3D-Model for Predicting New Cavern Location. – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2004 Meeting, Wichita/Cansas, 19-20 April 2004, Techn. Meeting Papers: 10 S.; Richmond/Texas (SMRI).

Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europa. 2nd ed.: 329 S.; Maatschappij B.V. (Shell Internationale Petroleum).

Zirngast, M. (1986): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Salzwedel, C 3130. – Bericht, Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, 88 S.; Hannover [unveröff.].

Kapitel 4 (IGtH)

Crotogino, F., Hüber, S. (2009): Zukünftige Bedeutung der Energiespeicherung in Salzkavernen – Erdöl Erdgas Kohle, 125: 74-78; Hamburg.

Düsterloh, U., Lux, K.-H. (2009): Druckluftspeicherung in Salzkavernen – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik/TU Clausthal; Goslar.

Lux, K.-H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau. Ein Beitrag zur Entwicklung von Prognosemodellen für den Hohlraumbau im duktilen Salzgebirge – Stuttgart (Enke).

Lux, K.-H., Quast, P., Rokahr, R.B. (1987): 20 Jahre Erfahrungen mit Salzkavernen – Erdöl Erdgas Kohle, 103: 481-485; Hamburg.

Nieland, J. (2004): Salt Cavern Thermal Simulator Version 2.0 User's Manual.

Nieland, J. (2008): Salt Cavern Thermodynamics. Comparison Between Hydrogen, Natural Gas and Air Storage – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Fall 2008 Meeting, Galveston/Texas, 13-14 October 2008, Techn. Meeting Papers: 20 S.; Pennsylvania.

Rokahr, R.B. (1979): Theoretische Untersuchung des Tragverhaltens von Salzkavernen mit Hilfe einer kombinierten Standsicherheitsanalyse – Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau; Universität Hannover.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D. (1997): Development of a New Criterion for the Determination of the Maximum Permissible Internal Pressure for Gas Storage Caverns in Rock Salt. Final Report of SMRI Research project No. 1-94, – IUB, Universität Hannover; Hannover.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D. (2004): Application of a Continuum Damage Model for Cavern Design. Case Study: Atmospheric pressure – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2004 Meeting, Wichita/Cansas, 19-20 April 2004, Techn. Meeting Papers: 19 S.; Pennsylvania.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Brouard, B., Bérest, P., Karimi-Jafari, M., Foumaintraux, D., De Laguérie, P., You, T. (2006): Salt Cavern Abandonment Field Test in Carresse. Research Report 2006-1, – Solution Mining Research Institute; Pennsylvania.

Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zapf, D. (2008): Influence of Different Loading Histories on the Rock Mechanical Behavior of a Gas Cavern at Shallow Depth – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2008 Meeting, Porto/Portugal, 28-29 April 2008, Techn. Meeting Papers: 18 S.; Pennsylvania.

Staudtmeister, K., Struck, D. (1990): Design Criteria for Prevention of Creep Rupture for Gas Caverns in Salt Rock Mass – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Fall 1990 Meeting, Paris, 14-19 October 1990, Techn. Meeting Papers: 26 S.; Pennsylvania.

Staudtmeister, K., Zapf, D. (2010): Rock mechanical design of gas storage caverns for seasonal storage and cyclic operations – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2010 Meeting, Grand Junction/Colorado, 25-28 April 2010, Techn. Meeting Papers: 16 S.; Pennsylvania.

Staudtmeister, K., Leuger, B., Zapf, D. (2011): The Influence of Different Loading Scenarios on the Thermo. Mechanical Behavior of a Gas Storage Cavern – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2011 Meeting, Galveston/Texas, 18-19 April 2011, Techn. Meeting Papers: 15 S.; Pennsylvania.

Staudtmeister, K., Leuger, B., Zapf, D. (2012): Design load cases for gas storage caverns – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Fall 2012 Meeting, Bremen/Germany, 1-2 October 2012, Techn. Meeting Papers: 14 S.; Pennsylvania.

Staudtmeister, K., Zapf, D. (2012): Thermo-mechanical behavior of a gas storage cavern under high frequency operations – In: International Society for Rock Mechanics (ed.): Proceedings of EUROCK 2012, Stockholm/Sweden, 28-30 May 2012, 10 S.; Lisbon.

Zapf, D., Staudtmeister, K., Rokahr, R.B. (2012): Analysis of thermal induced fractures in rock salt – In: Solution Mining Research Institute (ed.): Spring 2012 Meeting, Regina, Saskatchewan/Canada, 23-24 April 2012, Techn. Meeting Papers: 15 S.; Pennsylvania.

Kapitel 5 (KBB UT)

Alstom Power, Ecofys, E.ON Energie, KBB Underground Technologies, IAEW, REpower, Vattenfall Europe Transmission (2007): Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels CAES – Wissenschaftliche Studie gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Endbericht, 143 S.; Hannover.

Zunft, S., Jakiel, C., Koller, M., Bullough, C. (2006): Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Grid Integration of Wind Power – 6th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Windfarms, 26-28 October 2006, Delft / The Netherlands.

Kapitel 6 (KBB UT)

DLR,IWES,IFNE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Stuttgart.

EFZN (2013): Studie „Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit“ – Studie. Abschlussbericht; Goslar.

Kratzsch, H. (1997): Bergschadenkunde. Teil 1: Bodenbewegungskunde. Teil 2: Bergschaden – Deutscher Markscheider-Verein e.V.; Bochum.

Moser, P. (2014): Status der Entwicklung des adiabaten Druckluftspeichers ADELE – Leopoldina-Symposium „Energiespeicher.Der fehlende Baustein der Energiewende?”, 6. Februar 2014, Halle.

Oldhafer, N., Düren, M., Stenger, S., Leithner, R. (2014): Druckluftspeicherkraftwerk als Kurzzeitspeicher-, Langzeitspeicher- und Schattenkraftwerk – http://www.uigmbh.de/images/downloads/KTK2014_Tagungsbeitrag_Druckluftspeicherkraftwerk%20als%20Kurzzeitspeicher-,%20Langzeitspeicher-%20und%20Schattenkraftwerk.pdf.; Zugriff am 29.04.2015

Sterner, M., Stadtler, I. (2014): Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration – Springer; Berlin, Heidelberg.

VDE (2012): Energiespeicher für die Energiewende. Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050 – Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG); Frankfurt am Main

Wolf, D., Budt, M. (2014): LTA-CAES – A low-temperature approach to Adiabatic Compressed Air – Applied Energy 125, 158–164; Amsterdam.

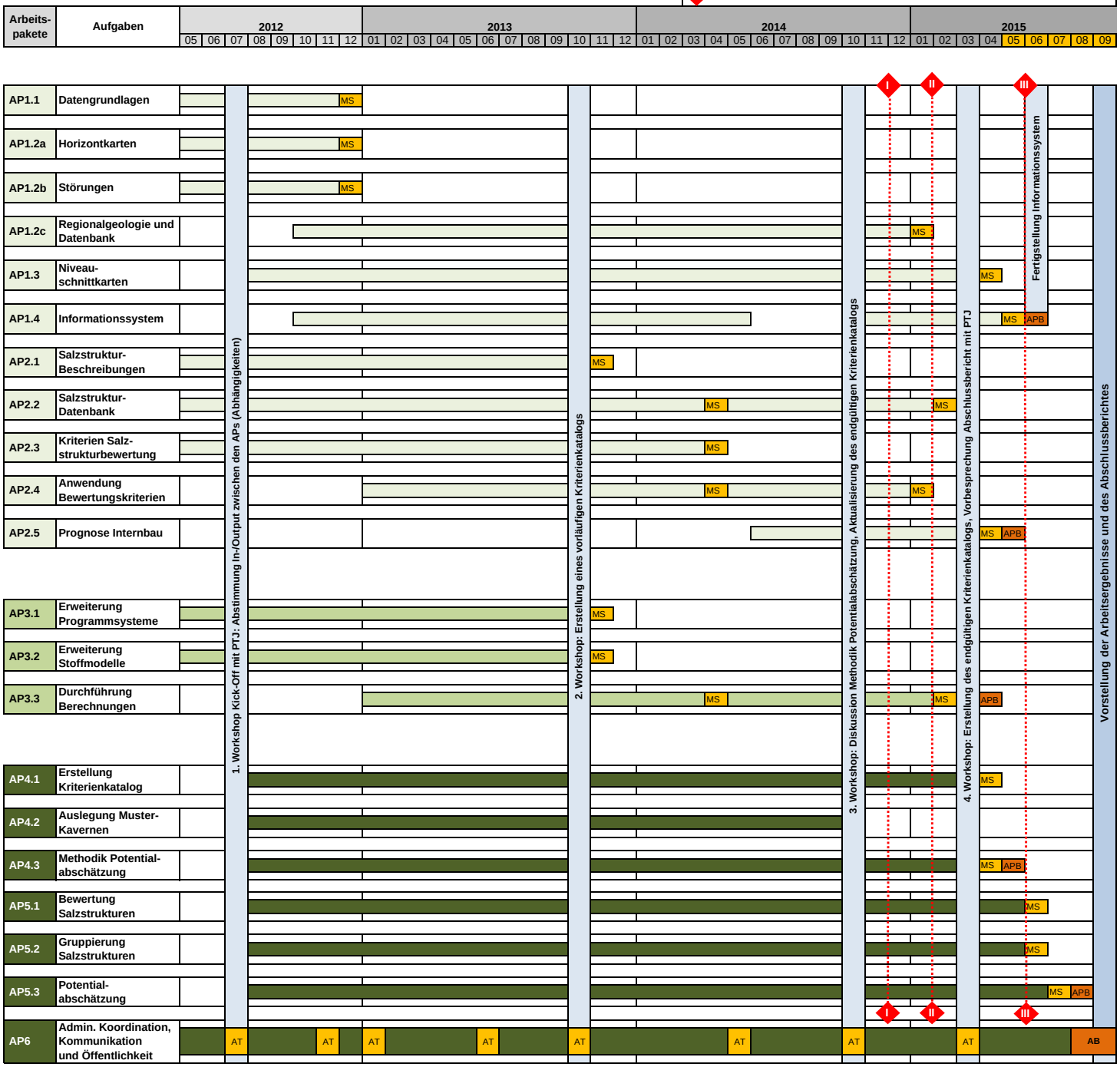
Anhang 1-1

Ablaufplan des Verbundvorhabens

Verbundprojekt InSpEE:
Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)

APB	Arbeitspaketabschlussbericht
AB	Gemeinsamer Abschlussbericht zur Einreichung beim Projektträger
MS	Meilenstein
I	Übergabe Input aus den AP 1, 2 und 3 an das AP 4
II	Übergabe Input aus den AP 1, 2 und 4 an das AP 5
III	Übergabe Input aus dem AP 5 an das AP2 "Informationssystem"

BGR LUH KBB UT



Anhang 1-2

Berichtsblatt / Document Control Sheet

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht

3. Titel
InSpEE - Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) - Sachbericht

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2015
Sabine Donadei, Stephanie Fleig, Sascha Gast, Gabriela von Goerne, Markus Hölzner, Péter-László Horváth, Lukas Pollok, Cornelia Riesenberg, Reinhard B. Rokahr, Gregor-Sönke Schneider, Rudolf Zachow, Dirk Zander-Schiebenhöfer, Dirk Zapf	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) KBB Underground Technologies GmbH - Baumschulenallee 16, 30625 Hannover Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Nutzungspotentiale des tieferen Untergrundes, geologische CO2-Speicherung) - Wilhelmstraße 25-30, 13593 Berlin Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abteilung Unterirdischer Speicher- und Wirtschaftsraum (Fachbereich Geologisch-geotechnische Erkundung) - Stilleweg 2, 30655 Hannover Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik Hannover - Welfengarten 1A, 30167 Hannover	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03ESP323
	11. Seitenzahl 203 + Anhang
	13. Literaturangaben 209
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Scharnhorststr. 34-37, D-10115 Berlin	14. Tabellen 24
	15. Abbildungen 85

16. Zusätzliche Angaben
Einheitlicher Schlussbericht der Verbundpartner des Förderprojektes mit den Förderkennzeichen 03ESP323A bis C

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)
Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover

18. Kurzfassung
Mit dem Übergang auf fluktuierende erneuerbare Energieträger stellt sich die Frage der Speicherung elektrischer Energie. Energiespeicherkraftwerke, welche aus erneuerbarem Strom Druckluft bzw. Wasserstoff erzeugen und einspeichern können, um bei Energiebedarf diese den Energiemärkten wieder zur Verfügung zu stellen, können dabei eine wesentliche Rolle spielen werden. Eine großvolumige Speicherung dieser Medien kann dabei im geologischen Untergrund erfolgen. Auf Grund hoher Flexibilität in der Fahrweise, geringem Kissengasanteil sowie extrem geringer Reaktionsneigung mit dem Speichergut stellen dabei Salzspeicherkavernen die bevorzugte Speicheroption dar.
Während sich bereits zahlreiche Forschungs- und Entwicklungs (FuE)-Arbeiten mit der Bereitstellung der Technologien beschäftigen, mangelt es bisher noch an geeigneten Grundlagen für eine Bewertung verschiedener Speicherstandorte sowie an einer fundierten Abschätzung, welche Energiemengen überhaupt im geologischen Untergrund in Deutschland speicherbar sind. Ziel des Verbundvorhabens InSpEE war deshalb die Erarbeitung und Bereitstellung von Auslegungsgrundlagen und geologisch-geotechnischen Grunddaten sowie von Kriterien zur Standortauswahl für die Errichtung von Salzkavernen für die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft und darauf aufbauend eine Abschätzung des Energiespeicherpotentials der norddeutschen Salzstrukturen für Erneuerbare Energien in Form von Wasserstoff und Druckluft.
Die Arbeitspakete lauten “Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten“, „Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung“, „Gebirgsmechanische Anforderungen an die Speicherung von Druckluft und Wasserstoff“, “Definition von Bewertungskriterien und Planungsgrundlagen für eine Potentialabschätzung“ und „Potentialabschätzung möglicher Speichervolumina und speicherbarer Energiemengen“.

The increasing production of energy from fluctuating renewable energy sources raises the question of large-scale electrical energy storage. Therefore, energy storage power plants, which withdraw and feed electricity on demand via the conversion into hydrogen or compressed air will play an essential role. The large-scale storage of these media in such a scenario can only take place in underground geological structures. Because of its high degree of flexibility, low proportion of cushion gas, and extremely low propensity to react with the storage medium, salt caverns are the preferred storage option.
Whilst a large amount of research and development work has looked at the provision of the technologies required, there has so far been no suitable basis for the nation-wide evaluation of suitable salt structures for the construction of cavern storages, and thus provision of the information required to make a competent, detailed assessment of how much energy could be stored in underground geological formations in Germany.
The aim of the project InSpEE was the elaboration and provision of basic design criteria, geological-geotechnical basic data, and location selection criteria, for the construction of hydrogen and compressed air storage caverns, This was used as the basis for estimating the storage potential of North German salt structures for renewables in the form of hydrogen and compressed air.
The work packages are “Prepare an information system on substructures and depth related geological cross-section maps”, “Review the internal structure of salt structures and geological 3D modelling”, ”Rock-mechanical requirements for the storage of compressed air and hydrogen, “Definition of evaluation and planning criteria to estimate the potential”, and “Estimate the potential of possible storage volumes and storable energy quantities”.

19. Schlagwörter
3D-Modellierung, Bewertungskriterien, Druckluft, Gebirgsmechanik, Geologie, Informationssystem, Internbau, Niveauschnittkarten, Potentialabschätzung, Salzstrukturen, Speicherkavernen, Wasserstoff

20. Verlag	21. Preis

Anhang 2-1

Niveauschnittkarte 500 m u. NN

Legende

Stratigraphie

- Basis Rupelium bis rezent
- Känozoikumtransgression bis einschließlich Obereozän
- Alb-Cenoman Transgression bis Känozoikumtransgression
- Basis marine Unterkreide bis Basis Alb-Cenoman Transgression
- Basis Dogger (einschließlich Jurensismergel) bis Basis marine Unterkreide
- Basis Lias bis Obertoarcium
- Basis Keuper (z.T. einschließlich obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge) bis Basis Lias
- Salinarröt bis oberer Muschelkalk (z.T. ohne obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge)
- Oberfläche Zechsteinsalinar bis einschließlich Peliträt
- Basis Zechsteinsalinar bis Oberfläche Zechsteinsalinar
- Rotliegend und älter

Störung

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ENERGIESPEICHER Forschungsinitiative der Bundesregierung

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES

Leibniz Universität Hannover

InSpEE

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Niveauschnittkarte Norddeutschland

Tiefenlinien 500m unter NN

1 : 500 000

0 5 10 20 30 km

Projekt: InSpEE

Sachbearbeiter: S. Gast, C. Riesenberg

BGR - FB 3 | **Stand:** 06 / 2015 | Anlage:

DÄNEMARK

OSTSEE

NORDSEE

NIEDERLANDE

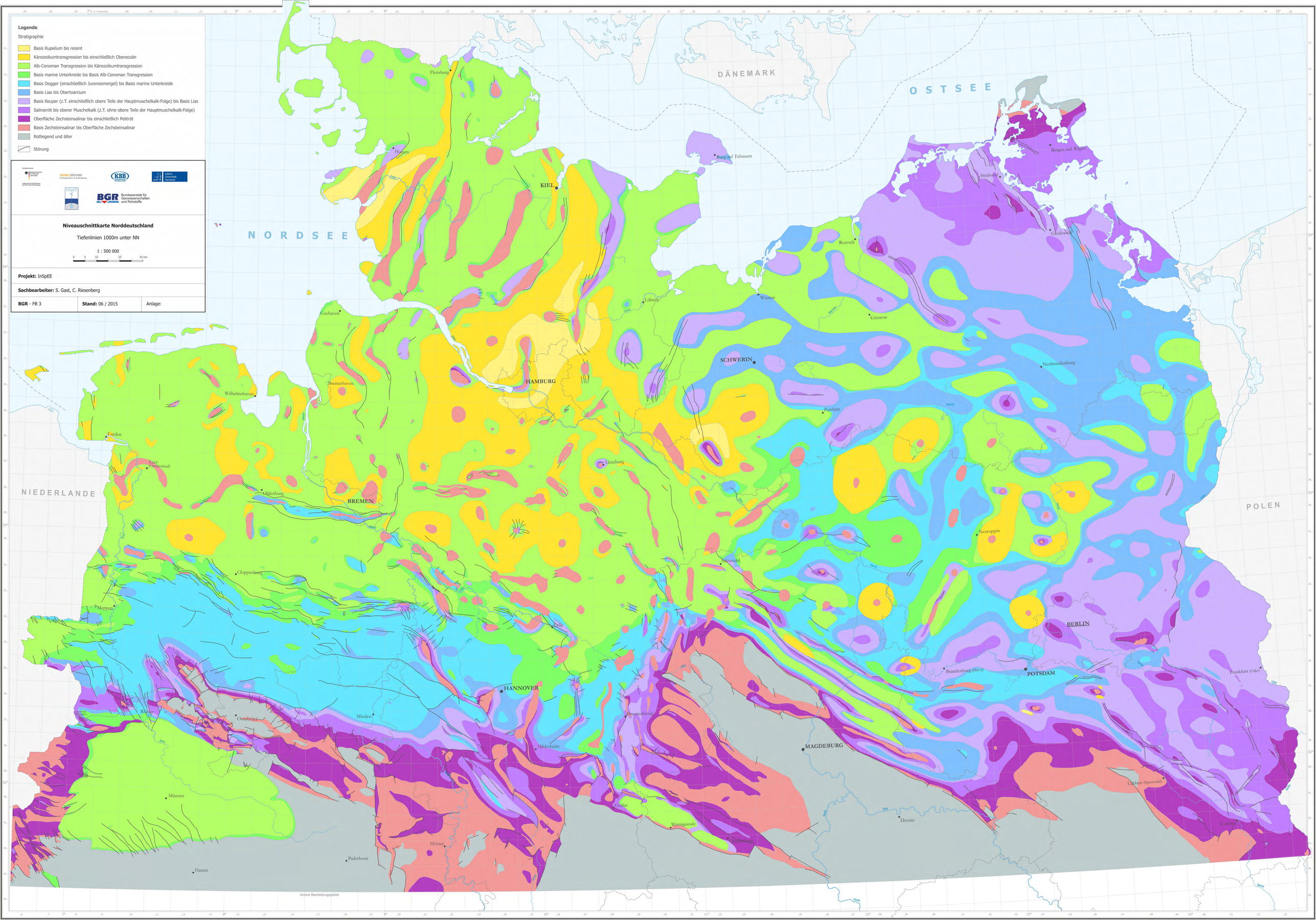
POLEN

Flensburg
Husum
KIEL
Burg auf Fehmarn
Stralsund
Bergen auf Rügen
Greifswald
Rostock
Wismar
Lübeck
Güstrow
Cuxhaven
SCHWERIN
Neubrandenburg
HAMBURG
Bremerhaven
Wilhelmshaven
Parchim
Müritz
Emden
Leer (Ostfriesland)
Lüneburg
Oldenburg
BREMEN
Neuruppin
Cloppenburg
Salzwedel
Meppen
Celle
BERLIN
Brandenburg (Havel)
POTSDAM
Frankfurt (Oder)
HANNOVER
Rhein
Osnabrück
Minden
Braunschweig
Hildesheim
MAGDEBURG
Lübben (Spreewald)
Münster
Goslar
Dessau
Cottbus
Wernigerode
Quedlinburg
Höxter
Paderborn
Hamm

Grenze Bearbeitungsgebiet

Anhang 2-2

Niveauschnittkarte 1.000 m u. NN


Legende
Stratigraphie
Basis Rupelium bis rezent
Känozoikumtransgression bis einschließlich Obereozän
Alb-Cenoman Transgression bis Känozoikumtransgression
Basis marine Unterkreide bis Basis Alb-Cenoman Transgression
Basis Dogger (einschließlich Jurensismergel) bis Basis marine Unterkreide
Basis Lias bis Obertoarcium
Basis Keuper (z.T. einschließlich obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge) bis Basis Lias
Salinarröt bis oberer Muschelkalk (z.T. ohne obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge)
Oberfläche Zechsteinsalinar bis einschließlich Pelitröt
Basis Zechsteinsalinar bis Oberfläche Zechsteinsalinar
Rotliegend und älter
Störung
Niveauschnittkarte Norddeutschland
Tiefenlinien 1000m unter NN
1 : 500 000
0 5 10 20 30 km
Projekt: InSpEE
Sachbearbeiter: S. Gast, C. Riesenberg
BGR - FB 3
Stand: 06 / 2015
Anlage:
NORDSEE
OSTSEE
DÄNEMARK
NIEDERLANDE
POLEN
Flensburg
Husum
KIEL
Burg auf Fehmarn
Bergen auf Rügen
Stralsund
Greifswald
Rostock
Wismar
Lübeck
Güstrow
SCHWERIN
Neubrandenburg
Parchim
Cuxhaven
Bremerhaven
HAMBURG
Wilhelmshaven
Emden
Leer (Ostfriesland)
Oldenburg
BREMEN
Lüneburg
Neuruppin
Salzwedel
Cloppenburg
Meppen
Celle
BERLIN
Brandenburg (Havel)
POTSDAM
Frankfurt (Oder)
HANNOVER
Rheine
Osnabrück
Minden
Braunschweig
Hildesheim
MAGDEBURG
Lübben (Spreewald)
Münster
Goslar
Wernigerode
Dessau
Cottbus
Höxter
Paderborn
Hamm
Grenze Bearbeitungsgebiet

Anhang 2-3

Niveauschnittkarte 1.500 m u. NN

Legende

Stratigraphie

- Basis Rupelium bis rezent
- Känozoikumtransgression bis einschließlich Obereozän
- Alb-Cenoman Transgression bis Känozoikumtransgression
- Basis marine Unterkreide bis Basis Alb-Cenoman Transgression
- Basis Dogger (einschließlich Jurensismergel) bis Basis marine Unterkreide
- Basis Lias bis Obertoarcium
- Basis Keuper (z.T. einschließlich obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge) bis Basis Lias
- Salinarröt bis oberer Muschelkalk (z.T. ohne obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge)
- Oberfläche Zechsteinsalinar bis einschließlich Peliträt
- Basis Zechsteinsalinar bis Oberfläche Zechsteinsalinar
- Rotliegend und älter

Störung

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

EWIG|SPEICHER Forschungsinitiative der Bundesregierung

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGY

Leibniz Universität Hannover

InSpEE

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Niveauschnittkarte Norddeutschland

Tiefenlinien 1500m unter NN

1 : 500 000

0 5 10 20 30 km

Projekt: InSpEE

Sachbearbeiter: S. Gast, C. Riesenberg

BGR - FB 3 | **Stand:** 06 / 2015 | Anlage:

DÄNEMARK

OSTSEE

NORDSEE

NIEDERLANDE

POLEN

Flensburg

Husum

KIEL

Burg auf Fehmarn

Bergen auf Rügen

Stralsund

Greifswald

Rostock

Wismar

Lübeck

Cuxhaven

Güstrow

SCHWERIN

HAMBURG

Neubrandenburg

Parchim

Bremerhaven

Wilhelmshaven

Emden

Leer (Ostfriesland)

Lüneburg

Oldenburg

BREMEN

Neuruppin

Salzwedel

Cloppenburg

Meppen

BERLIN

POTSDAM

Brandenburg (Havel)

Frankfurt (Oder)

HANNOVER

Rhein

Osnabrück

Minden

Braunschweig

Hildesheim

MAGDEBURG

Lübben (Spreewald)

Münster

Dessau

Cottbus

Wernigerode

Quedlinburg

Höxter

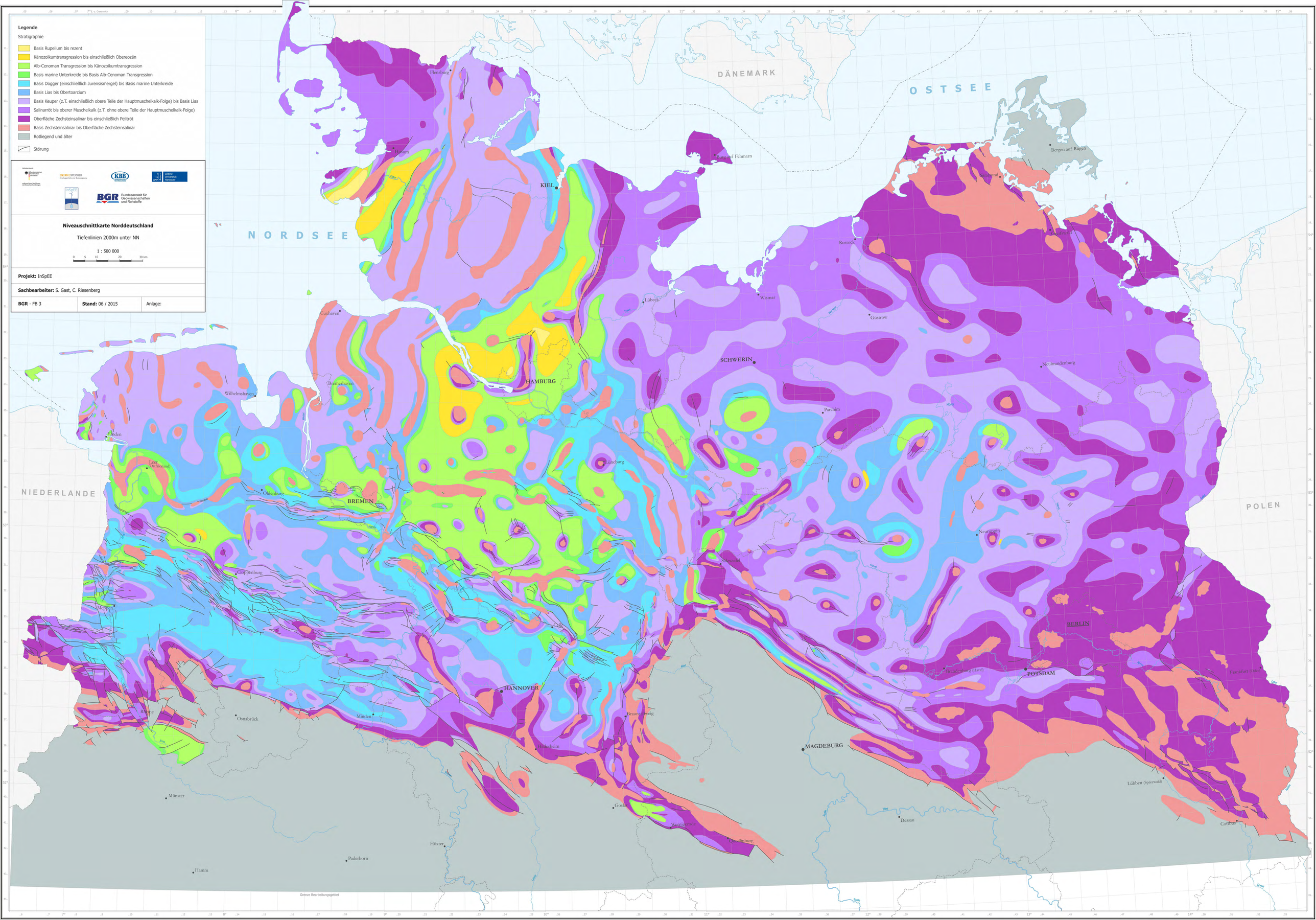
Paderborn

Hamm

Grenze Bearbeitungsgebiet

Anhang 2-4

Niveauschnittkarte 2.000 m u. NN


Legende
Stratigraphie
Basis Rupelium bis rezent
Känozoikumtransgression bis einschließlich Obereozän
Alb-Cenoman Transgression bis Känozoikumtransgression
Basis marine Unterkreide bis Basis Alb-Cenoman Transgression
Basis Dogger (einschließlich Jurensismergel) bis Basis marine Unterkreide
Basis Lias bis Obertoarcium
Basis Keuper (z.T. einschließlich obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge) bis Basis Lias
Salinarröt bis oberer Muschelkalk (z.T. ohne obere Teile der Hauptmuschelkalk-Folge)
Oberfläche Zechsteinsalinar bis einschließlich Pelitröt
Basis Zechsteinsalinar bis Oberfläche Zechsteinsalinar
Rotliegend und älter
Störung
Niveauschnittkarte Norddeutschland
Tiefenlinien 2000m unter NN
1 : 500 000
0 5 10 20 30 km
Projekt: InSpEE
Sachbearbeiter: S. Gast, C. Riesenberg
BGR - FB 3
Stand: 06 / 2015
Anlage:
NORDSEE
DÄNEMARK
OSTSEE
NIEDERLANDE
POLEN
KIEL
HAMBURG
BREMEN
HANNOVER
SCHWERIN
MAGDEBURG
POTSDAM
BERLIN
Flensburg
Husum
Bergen auf Rügen
Rostock
Wismar
Lübeck
Güstrow
Neubrandenburg
Parchim
Cuxhaven
Bremerhaven
Wilhelmshaven
Emden
Leer (Ostfriesland)
Oldenburg
Lüneburg
Neuruppin
Cloppenburg
Meppen
Celle
Osnabrück
Minden
Braunschweig
Hildesheim
Goslar
Wernigerode
Quedlinburg
Dessau
Lübben (Spreewald)
Cottbus
Münster
Höxter
Paderborn
Hamm
Grenze Bearbeitungsgebiet

Anhang 2-5

Salzstrukturinformationsblatt

Strukturinformation

Dedesdorf

Allgemeine Informationen

auf dem Festland zu [%]	57
Bundesland	Niedersachsen
TK25-Blattnummer	2316, 2317, 2416, 2417, 2517

Strukturbeschreibung

Strukturtyp	Salzstock
Strukturtop [m u. NN / m u. GOK]	400 / 401
Strukturaufbauende(s) Salinar(e)	Mittlerer Keuper, Oberrotliegend, Zechstein
Sekundärmächtigkeit [m]	4500
Maximalausdehnung [km]	15 x 5

Bekannte Nutzung innerhalb der Struktur

Nutzungsart	Kavernenstandort (in Betrieb)

Internbau

Typ Einordnung	5 Doppelsalinar

Untersuchungsgrad

Gesamtbewertung	Gut

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Literatur / Quellen

Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie.
(Pub.Datum: 2001 | Pub.Ort: Hannover | Publisher: Geol. Jb.)
Autor(en): Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F.

Katalog der niedersächsischen Salzlagerstätten. Teil I: Adolphsdorf - Krummendeich
(Pub.Datum: 1979 | Pub.Ort: Hannover | Publisher: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe (BGR))
Autor(en): Baldschuhn, R., Jaritz, W., Kockel, F., Roth, W.

NIBIS Kartenserver
(Pub.Datum: - | Pub.Ort: Hannover | Publisher: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG))
Autor(en): nibis.lbeg.de/cardomap3

Salzstrukturen Norddeutschlands 1: 500 000
(Pub.Datum: 2008 | Pub.Ort: Berlin, Hannover | Publisher: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe (BGR))
Autor(en): Reinhold, K., Krull, P., Kockel, F.

Untertage-Gasspeicherung in Deutschland
(Pub.Datum: 2014 | Pub.Ort: Hamburg | Publisher: Erdöl Erdgas Kohle)
Autor(en): Sedlacek, R.

Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands
(Pub.Datum: 1973 | Pub.Ort: Hannover | Publisher: Geol. Jb.)
Autor(en): Jaritz, W.

Anhang 3-1

Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken

Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
1	Aalhoop	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	km	1500			k. A.
2	Achtrup	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1000			1
3	Adolphsdorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	500	z	4200			3
4	Ahe	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	5150	z	500			1
5	Ahlshausen	Ni	100	Salzkissen	Gut	-	100	z	900			1
6	Ahrensheide	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	1500	z	2600			2
7	Alfstedt	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	500	z, ro	5500			5
8	Allertal	Ni, SA	100	Salzstock	Gut	Endlagerstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt]	0	z	490			2
9	Altenbruch	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1000	z, ro	5000			5
10	Altmersleben	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	23	z	3200		x	4
11	Amrum	SH	75	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1250			1
12	Angermünde	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1400			1
13	Apeldorn	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	2800	z	1300			1
14	Apenburg	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	160	z	3100			3
15	Arendsee	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	80	z	3100			3
16	Armstorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	z, ro	5300		x	5
17	Arngast	Ni	5	Salzstock	Schlecht	-	950	z	4000			3
18	Arsten	Br, Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z	4200			4
19	Aschersleben Sattel	SA	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-115	z	700			1
20	Aschwarden	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	z	4200			3
21	Asendorf	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	1800	km	1000			k. A.
22	Asse	Ni	100	Salzstock	Gut	Endlagerstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt]	-165	z	2000		x	2
23	Aulosen	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	816	z	3500			3
24	Ausacker	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	km	700			k. A.
25	Baccum	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	300	jo	1200			k. A.
26	Bad Doberan	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	1250			1
27	Bad Freienwalde	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	1200			2
28	Bad Wilsnack	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	92	z	4400			3
29	Bahlburg	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	300	z	3200			3
30	Bahnsen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	160	z	4000			4
31	Barbara Nord	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1590	z	4450			4
32	Barbara Süd	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1075	z	4200			3
33	Bärbel	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	2100	z	2700			3
34	Barenthin	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	45	z	3900			3
35	Barkholt	Ni	95	Salzstock	Mäßig	-	1100	z	4500			3
36	Barrien	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1900			2
37	Basdahl	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	900	z, ro	4800			5
38	Bassum	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	1300			2
39	Bea	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	3000	z	2500			3
40	Beate	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1300	z	2700			3
41	Bechtsbüttel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	-50	z	1900		x	4
42	Beckedorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1100	z	3200			4
43	Bedekapsel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1250	z	2750			3
44	Beesenlaublinger Gipsstock	SA	100	Salzstock	Schlecht	Bergbau [stillgelegt]	0	z	300			3
45	Behrenhoff	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	1000			1
46	Beienrode	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	100	z	1500		x	1
47	Belinda	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	1500	z	5000			4
48	Bella	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	2000	z	4300			4
49	Belmhusen	SH	50	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	600	z, ro	6000			5
50	Belzig	BB	100	Salzkissen	Schlecht	Betrieb]	2200	z	900			2
51	Benthe	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt]	-50	z	2500			2
52	Berdum-Jever	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	600	z	4350			3
53	Bergzow	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	2700			4
54	Berit	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2850	z	1600			3
55	Berkau	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	150	z	3400		x	4
56	Berkhöpen	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-50	z	3500			4
57	Bernau	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1200			1
58	Bersenbrück	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	200	jo	2100			k. A.
59	Berta	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	1600	z	4300			4
60	Betsy	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2850	z	600			3
61	Bettina Ost	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2750	z	2200			4
62	Bettina Süd	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2550	z	1400			4
63	Bettina West	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2500	z	1200			3
64	Bevern	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	961	z, ro	4100			5
65	Beverstedt	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	900	z, ro	5100			5

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
66	Bippen	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	400	jo	1000			k. A.
67	Birgit	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1350	z	4300			4
68	Birkholz	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	z	1000			1
69	Bistoft	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	2000	z	2300			3
70	Blankensee	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	32	z	2600			3
71	Blenhorst	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Solegewinnung [in Betrieb]	70	z	4000			2
72	Bockleben	Ni, SA	100	Salzstock	Schlecht	-	1200	z	2000			3
73	Bodenteich	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	300	z	3300			4
74	Boek	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	1400			1
75	Boertange	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	650	z	3300			4
76	Boitzen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4200	z	800			1
77	Bokel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	50	z	4200			4
78	Bokeloh	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [in Betrieb]	50	z	2900		x	2
79	Boltenhagen Nord	MV, DO	0	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	1500			1
80	Bommelsen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	40	z	4300			4
81	Bonese	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z	2900			4
82	Boostedt	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	900	km, z, ro	5000			5
83	Bordesholm	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1200	km	1500			k. A.
84	Börger	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	500	z	3500			4
85	Borkum	Ni	10	Salzstock	Mäßig	-	1000	z	2000			3
86	Böstlingen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	50	z	4000			4
87	Böxlund	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2250	z	1100			1
88	Braderup	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1100			1
89	Bramel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	100	z, ro	4700			5
90	Brammer	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	km	1700			k. A.
91	Bramstedt	SH	100	Salzstock	Mäßig	Solegewinnung [in Betrieb]	50	km, z, ro	5000			5
92	Breddorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1000	z	3900			3
93	Bredgrund	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1100			1
94	Bredstedt	SH	80	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1100			1
95	Brehm	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	z	2000			2
96	Breitenrode	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	600	x		3
97	Brigitte	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2550	z	900			3
98	Britta	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1200	z	4000			4
99	Brockzetel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	850	z	3850			3
100	Broistedt	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	0	z	2900			4
101	Brümmerhof	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	120	z	4600			3
102	Bruni	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	200	z	5600			4
103	Brunn	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1100			1
104	Brustorf	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	2500			1
105	Buchholz	BB	100	Salzkissen	Mäßig	-	1200	z	1600			1
106	Buckow	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1500	z	1600			2
107	Bunde	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	100	z	3700			4
108	Burg Stargard	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	1200			1
109	Büsum	SH, DN	20	Salzstock	Gut	-	0	z, ro	6800			5
110	Calberlah	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	53	z	1900			3
111	Camin	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1800			1
112	Carmen	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2000	z	1000			3
113	Carola	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	1700	z	4250			4
114	Charlotte	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	3000	z	2700			4
115	Cismar	SH	30	Salzkissen	Schlecht	-	2700	z	1700			1
116	Clara Nordost	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2170	z	2300			4
117	Clara Südwest	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2250	z	3300			4
118	Claudia	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2250	z	2700			4
119	Colbitz	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	122	z	750			3
120	Conow	MV	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	16	z	3500			3
121	Cuxhaven	Ni	75	Salzstock	Mäßig	-	1050	km, z, ro	5000			5
122	Dagmar	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	3100	z	1300			1
123	Damme	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	109	jo	1700			k. A.
124	Daniela	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	650	z	5200			3
125	Dannefeld	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	170	z	800			3
126	Dannenberg	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	50	z	3100			3
127	Dargibell	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1000			2
128	Dedesdorf	Ni	57	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	400	km, z, ro	4500			5
129	Delfzijl-Ems	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1500	z	1100			3
130	Delia	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1050	z	5500			3
131	Demker	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	500	z	3400		x	4
132	Demmin	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1250			1
133	Demsin	BB, SA	100	Salzstock	Mäßig	-	300	z	2600			3
134	Denise	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2700	z	1500			2
135	Dethlingen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Bergbau [Reserve] ; Solegewinnung [in Betrieb]	200	z	4050			3

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*[1]	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*[2] [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*[3]	Sek. Mächtig-keit*[4]	Anzahl Struktur-umrisse*[5]	Mindest-fläche*[6]	Typ
136	Dina	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1250	z	3200			3
137	Dissen	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	z	700			2
138	Dollgow	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	52	z	3750			3
139	Dömitz	MV	100	Salzstock	Mäßig	-	1050	z	2500			3
140	Dora	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1200			1
141	Dorle	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2270	z	1000			2
142	Dorm	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	100	z	1300			1
143	Dorothea	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1550	z	2500			3
144	Dorthe	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1700	z	3000			3
145	Drawehn	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2550	z	750			1
146	Dreilinden	B, BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	1400			1
147	Düderode-Oldenrode	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	600	x		2
148	Eberswalde	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1000			1
149	Ebstorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	350	z	3800			4
150	Eckhorst	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	z	1700			1
151	Egelner Sattel	SA	100	Salzstock	gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1200			1
152	Egestorf-Soderstorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	400	z	3900			4
153	Ehmen	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1800			3
154	Ehra	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	50	z	2300		x	4
155	Eilte	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	100	z	4100			4
156	Eisendorf	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	480	z, ro	6500			5
157	Eitzendorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	350	z	4200			2
158	Eitzgrund	SH, DO	30	Salzkissen	Schlecht	-	3150	z	1100			1
159	Elbe	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	km	1100			k. A.
160	Eldingen	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	3900	z	500			1
161	Elisa	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1300			1
162	Elm	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	325	z	1300			1
163	Elmshorn	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	0	z, ro	4000			5
164	Emden	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1750	z	2000			3
165	Emden Süd	Ni	25	Salzstock	Schlecht	-	1800	z	1500			3
166	Emma	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1150			1
167	Emshörn	Ni	0	Salzstock	Mäßig	-	1400	z	1300			3
168	Emtinghausen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	375	z	4000			4
169	Engelbostel	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	800			2
170	Erika	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1100	z	4000			3
171	Etzel	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	640	z	3900			3
172	Eversand	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	880	z, ro	4500			5
173	Fallingbostel	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1900			2
174	Fehmarn	SH	90	Salzkissen	Schlecht	-	2650	z	1150			1
175	Fehmarnsund Ost	SH	5	Salzkissen	Schlecht	-	2750	z	1000			1
176	Fehrmarnbelt	DO	0	Salzkissen	Schlecht	-	2100	z	1200			1
177	Feuerschiff Elbe	Ni, DN	0	Salzstock	Schlecht	-	100	z, ro	5500			5
178	Fiona	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1050			1
179	Flachstöckheim	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-20	z	2500			3
180	Flatow	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1600			1
181	Flensburg	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1100	z	2000			3
182	Flieth	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1500			1
183	Flüggesand	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2750	z	1200			1
184	Föhr	SH	25	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1150			1
185	Föhrden	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	800	km, z, ro	6000			5
186	Fresendorf	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1000	z	2750		x	1
187	Friedersdorf	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1000			1
188	Friedrichsgraben	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	km	1500			k. A.
189	Friesack	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	150	z	3750			3
190	Fürstenwalde	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	1100			2
191	Fürstenwerder	BB, MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1400			1
192	Gabelsflach	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1300			1
193	Gabi Nord	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1700	z	2000			3
194	Gabi Süd	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1700	z, ro	1700			5
195	Galina	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2900	z, ro	450			5
196	Garlstedt	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	4200	z	1150			1
197	Garrel	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	2550	z	1500			1
198	Gartz	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1500			1
199	Geesthacht	HH, Ni, SH	100	Salzstock	Mäßig	-	500	z, ro	3200			5
200	Gehlenberg	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	100	z	4300			4
201	Geli	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1450	z	1900			3
202	Genoveva	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2450	z, ro	900			5
203	Georgsdorf-Wietmarschen	Ni	100	Salzkissen	Gut	-	550	jo	1680			k. A.
204	Gerda	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1900	z	2300			4
205	Gerlinde	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z, ro	2000			5
206	Gertie	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2500	z	1200			4
207	Gesa	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1800	z	1900			3

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
208	Gesche	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2150	z	1400			1
209	Gesche Südost	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2150	z	1400			1
210	Gielow	MV	100	Salzstock	Schlecht	-	1100	z	3200			3
211	Giesen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	100	z	1600			2
212	Gifhorn	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	130	z	3000			3
213	Gilda	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2000	z, ro	1500			5
214	Gildehaus-Süd	Ni, NRW	100	Salzkissen	Schlecht	-	1450	z	500			1
215	Gina	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2300	z, ro	1500			5
216	Gischau	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1200			1
217	Gisela	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	1000			1
218	Gitta	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	1400			1
219	Gloria	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2400	z	1500			3
220	Glückstadt	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	km	1100			k. A.
221	Gnutz	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z, ro	6500			5
222	Golda	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2800	z, ro	900			5
223	Goldelund	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2750	z	900			1
224	Golzow	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	1600			1
225	Goritz	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	2000			1
226	Gorleben	Ni	100	Salzstock	Gut	Endlagerstandort [Erkundung]	100	z	2900			3
227	Görzke	BB, SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	1500	z	1500			2
228	Gr. Fallstein	Ni, SA	100	Salzkissen	Mäßig	-	600	z	1000		x	1
229	Gr. Gerstedt	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	766	z	1580			2
230	Gr. Heide-Siemen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	2900			3
231	Gr. Ilsede	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	3300			2
232	Gr. Kordshagen	MV	85	Salzkissen	Schlecht	-	1700	z	1000			1
233	Gr. Köris	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1200	z	1700			2
234	Gr. Krams	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	800			1
235	Gr. Schönebeck	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1400			1
236	Gr. Schwechten	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	93	z	3100			3
237	Gr. Spiegelberg	MV	100	Salzkissen	Mäßig	-	2400	z	1500			1
238	Gr. Welzin	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	z	1600			1
239	Grabstede	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3900	z	1100			1
240	Gracia	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2400	z, ro	1500			5
241	Gramzow	BB	100	Salzkissen	Mäßig	-	2100	z	1600			1
242	Gransee	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1600			1
243	Greetsiel	Ni	40	Salzstock	Mäßig	-	1600	z	1800			3
244	Greta	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z	2000			3
245	Grethem-Büchten	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	59	z	4300			4
246	Grevenhorst	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	950	km, z, ro	4000		x	5
247	Grieben	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	250	z	3450		x	4
248	Grimmen	MV	100	Salzkissen	Mäßig	-	1600	z	800			1
249	Gröditsch	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	z	1300			2
250	Gronau-Epe	NRW	100	Salzkissen	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	800	z	500	x		1
251	Groothusen	Ni	70	Salzstock	Gut	[in Betrieb]	1200	z	1900			3
252	Grüneberg	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	3600			3
253	Gruppen-Bühren	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	500	z	3200		x	4
254	Gudow	MV, SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	2000			1
255	Gudrun	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1900	z	1700			3
256	Gülden-Braudel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	900	z	2100		x	3
257	Gülze-Sumte	MV	100	Salzstock	Mäßig	-	111	z	3500			3
258	Gundi	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2100	z	1500			3
259	Gundula	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2100	z, ro	1250			5
260	Gwendolyn	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	2100	z, ro	900			5
261	Hahnöfersand	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2700	z, ro	2500			1
262	Haithabu	SH	90	Salzkissen	Schlecht	-	1500	km	1400			k. A.
263	Hakel	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	400	z	1300		x	1
264	Halla	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	2500			3
265	Hamdorf	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	350	km, z, ro	5500			5
266	Hamelwörden	Ni	90	Salzstock	Schlecht	-	1350	z, ro	3500			5
267	Hamwiede	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	80	z	4100			4
268	Hanna	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1450	z	3000			3
269	Hannelore	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1300	z	3500			3
270	Hardebek	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	600	km	2400			k. A.
271	Harle Riff	Ni, DN	0	Salzstock	Schlecht	-	560	z, ro	5200			5
272	Harliberg	Ni, SA	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	200	z	1600			2
273	Harriehausen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	1300			2
274	Harsefeld	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	240	z, ro	5200			5
275	Hasbruch	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1450	z	2700			4
276	Hasi	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1550	z	2300			3
277	Hedda	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	800	z	2300			3
278	Hedi	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	2200			3
279	Hedwig	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1600	z, ro	4000			5

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
280	Hedwiga	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2570	z	1300			1
281	Heide	SH	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	400	z, ro	6000			5
282	Heidi	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1750	z	2000			3
283	Heidrun	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1750	z	1500			4
284	Heike	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	830	z	2500			3
285	Heiligendorf	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	800	z	600	x		1
286	Heinersdorf	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	1000			1
287	Heldrunger Sattel	Th	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	600	x		1
288	Helen	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1450	z	2800			1
289	Helga	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	500	z	2500			1
290	Helgoland	SH, DN	5	Salzkissen	Mäßig	-	500	z, ro	3400			1
291	Hella	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1950	z	1900			1
292	Helle	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	261	z	4400			3
293	Helma	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1500	z	3900			4
294	Helpt	BB, MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1000			1
295	Hemmoor	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	800	km	2300			k. A.
296	Hengsterholz	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3250	z	1000			1
297	Hengstlage	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1050			1
298	Henni	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1750	z	2200			1
299	Henni Nord	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2250	z	1600			1
300	Hennstedt	SH	100	Salzstock	Gut	-	390	z, ro	5500			5
301	Henriette	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z	2000			3
302	Hermannshagen	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	800			2
303	Hermine	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1700	z	3800			3
304	Herta	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	700	z	2700			3
305	Herzlake	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	340	jo	1600			k. A.
306	Hilda Nord	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	750	z	2800			1
307	Hilda Süd	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1450	z	2200			1
308	Hilde	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	2800			3
309	Hildesheimer Wald	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt] ; Solegewinnung [in Betrieb]	-165	z	1600			2
310	Hille	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1650	z	2200			4
311	Hiltrud	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1900	z	1700			3
312	Himmelpfort	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1600			1
313	Hinrichshagen	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1600			1
314	Hodenhagen	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	2950	z	1400			2
315	Höfer	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	40	z	4500			4
316	Hohendorf	MV	90	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	750			1
317	Hohenhorn	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	700	z, ro	3500			5
318	Hohenziatz	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	1000	z	800		x	2
319	Holnis	SH	40	Salzkissen	Schlecht	-	1000	km	800			k. A.
320	Holtendorf	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1200			2
321	Honigsee	SH	95	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	650	z, ro	5900			5
322	Hooge	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1350			1
323	Hope	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	4300			4
324	Horndorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	300	z	3500			4
325	Hörnum	SH	5	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1100			1
326	Hörnum Tief	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1050			1
327	Hulda	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2250	z	1400			1
328	Husum	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [Reserve]	68	z	3000			2
329	Huywald	SA	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1400			1
330	Itzehoe	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	550	km	2500			k. A.
331	Jaderberg	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	950	z	4000			3
332	Jahrstedt	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	150	z	1300		x	2
333	Jane	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2100	z, ro	2000			1
334	Jänickendorf	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	700	z	1000		x	1
335	Janina	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2450	z	1250			1
336	Jaqueline	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2550	z	1200			1
337	Jasmin	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	2300			3
338	Jemgum	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	438	z	3800			4
339	Jenni	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2550	z	1300			1
340	Jerchel	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	200	z	600	x		1
341	Jerstedt	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	450	z	1300			1
342	Jerxheim	Ni, SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	0	z	1800			2
343	Jessica	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2450	z	1125			1
344	Jette	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	950	z	2400			3
345	Joachimsthal	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1400			1
346	Johanna	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	750	z, ro	3400			5
347	Jolanda	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1750	z	1500			1

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*[1]	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*[2] [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*[3]	Sek. Mächtig-keit*[4]	Anzahl Struktur-umrisse*[5]	Mindest-fläche*[6]	Typ
348	Joldelund	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1200			1
349	Jorinde	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1150			1
350	Josephine	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	300	z, ro	4000			5
351	Judith	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1350	z, ro	2300			1
352	Juist Nord	Ni, DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1550	z	1800			3
353	Julia	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	300	z	3200			3
354	Juliusburg	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	850	z	3000			3
355	Juno	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2650	z	1150			1
356	Justine	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	150	z, ro	2500			5
357	Jutta	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	850	z	3400			1
358	Kaarßen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	700	z	2400			3
359	Kabelitz	BB, SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1600			1
360	Kakerbeck	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	2000			2
361	Kalleby	SH	40	Salzkissen	Schlecht	-	2250	z	950			1
362	Kallmoor	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	2200			1
363	Kamperfehn	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	400	z	3750			4
364	Karina	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2750	z	1300			1
365	Karla	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z, ro	1600			1
366	Karow	MV	100	Salzkissen	Schlecht	Kavernenstandort [nicht realisiert]	2600	z	2000			1
367	Karstädt	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	z	600			1
368	Kassebruch	Ni	95	Salzkissen	Schlecht	-	4100	z	1300			1
369	Kathi	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1450			1
370	Kathlow	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	600			2
371	Katja	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1250			1
372	Ketzin	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	1600			1
373	Kieler Bucht	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	1650	z	2000			1
374	Kl. Kühren	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	250	z	3700			3
375	Klaushagen	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1800			1
376	Kleinmutz	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	450	z	2800			3
377	Kolkhagen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Bergbau [nicht realisiert]	-8	z	4100			3
378	Königsberg	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1950			1
379	Kora	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2850	z	1100			1
380	Köstorf	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1200	z	2500			3
381	Kotzen	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	250	z	3500			3
382	Kraak	MV	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	249	z	4500			3
383	Krakow	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	2400			1
384	Krautsand	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1400	km, z, ro	3000			5
385	Krempe	SH	70	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	30	z, ro	6500			5
386	Kröpelin	MV	60	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	1600			1
387	Krummendeich	Ni, SH	80	Salzkissen	Mäßig	-	927	km	2500			k. A.
388	Lägerdorf	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	250	z, ro	5100			5
389	Landschaftspolder	Ni	25	Salzstock	Mäßig	-	900	z	2000			4
390	Langenfelde	HH, SH	100	Salzstock	Mäßig	Bergbau [stillgelegt]	0	z, ro	5000			5
391	Langeoog	Ni	40	Salzstock	Schlecht	-	1300	z, ro	3550			5
392	Langsee	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	900	z	2000			3
393	Larrelt	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	500			1
394	Lathen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	175	z	4000			4
395	Laura	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1350	z	1500			3
396	Laura Nord	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1250	z	2600			3
397	Lea	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2170	z	1150			1
398	Lea Nord	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2050	z	1250			1
399	Leer	Ni	100	Salzstock	Gut	-	830	z	3800			4
400	Lehnin	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	650	z	2500			4
401	Lehrte	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	2700			4
402	Leila	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2050	z	1600			1
403	Leila Nord	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2150	z	1200			1
404	Leinetal Sattel	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1800			2
405	Lembruch	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	671	jo	1200			k. A.
406	Lesum	Br, Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	135	z	4615			4
407	Leybucht	Ni	0	Salzstock	Mäßig	-	1500	z	2000			3
408	Liane	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1650	z	1900			3
409	Lichtenhorst	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	100	z	4000			4
410	Liener-Garen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	300	z	3000		x	2
411	Lilienthal	Br, Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	183	z	4000			4
412	Lilli	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	1450	z	2000			1
413	Linda	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	1500	z	1850			3
414	Lisa	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	100	z	3100			3
415	Löcknitz	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1500			1
416	Lohne	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	300	jo	1500			k. A.
417	Lollo	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	300	z	2600			1

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
418	Lübtheen	MV	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-20	z	3500			3
419	Lüdingen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2700	z	1500			1
420	Ludwigslust	MV	100	Salzstock	Mäßig	-	75	z	4000			3
421	Lüge-Liesten	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	250	z	2900			3
422	Lüneburg	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Bergbau [stillgelegt] ; Solegewinnung [in Betrieb]	-56	z	4500			3
423	Lütow	MV	90	Salzkissen	Mäßig	-	1900	z	750			2
424	Lutter Sattel	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	-50	z	1400			2
425	Maasbüll	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1050	z	1800			3
426	Mahlitz	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	3400			3
427	Mahlpfuhl	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1800			2
428	Malchin	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	2400			1
429	Malchow	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	1500			1
430	Manuela	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z, ro	3500			5
431	Manuela Nord	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z, ro	3700			5
432	Marga	DN	0	Salzstock	Mäßig	-	1200	z, ro	3400			5
433	Maria	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1500	z, ro	1800			5
434	Marienburg	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	0	z	1700			2
435	Marne	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	600	km, z, ro	6000		x	5
436	Marnitz	BB, MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	2600			1
437	Martha	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1450	z, ro	1800			5
438	Meckelfeld	HH, Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	480	z, ro	3000			5
439	Meezen	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	550	z, ro	7000			5
440	Meissendorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	91	z	3800			4
441	Meldorf	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z, ro	6500			5
442	Mellenthin	MV, DO	90	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	750			1
443	Mellum	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1050	z, ro	4500			5
444	Memmert Sand	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1500	z	2000			3
445	Merz	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1500	z	900			2
446	Meseberg	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	3000			3
447	Mesekenhagen	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1300	z	1000			2
448	Meßdorf	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	340	z	3300			3
449	Meta	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1100	z	1500			3
450	Mildstedt	SH	70	Salzstock	Schlecht	-	1200	z, ro	1400			5
451	Mira	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1080	z, ro	4300			5
452	Mittenwalde	BB	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [stillgelegt]	101	z	3000			3
453	Mittweide	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	700			1
454	Moeckow	MV	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [Planung/Erkundung]	330	z	2700			2
455	Moisburg	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	650	z	4100			3
456	Mole Norddeich	Ni	10	Salzstock	Mäßig	-	1300	z	2700			3
457	Mölme	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	-50	z	3100			2
458	Monika	DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1560	z	2250			3
459	Mönkloh	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	500	z, ro	6000			5
460	Möwensteert	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z	1550			3
461	Mützel	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	384	z	3040			4
462	Neindorf	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-75	z	2300			2
463	Nettgau	Ni, SA	100	Salzstock	Mäßig	-	196	z	2300			3
464	Netzeband	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	140	z	4200			3
465	Neu Zauche	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	800			2
466	Neuenhuntorf	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	390	z	4400			4
467	Neufelder Sand	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1300	z, ro	5500			5
468	Neustadt	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	350			1
469	Neusustrum	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	180	z	4100			4
470	Neutrebbin	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	1500			1
471	Niehuus	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2300	z	1000			1
472	Niendorf II	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z	3500			2
473	Norderney	Ni	40	Salzstock	Schlecht	-	1150	z, ro	2500			5
474	Nordstrand	SH	80	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1200			1
475	Nostorf	MV, SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	z	3400		x	3
476	Nusse	SH	100	Salzkissen	Mäßig	-	2400	z	2300			1
477	Oberlanger Tenge	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	140	z	3800			4
478	Oderberg	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1500			1
479	Odisheim	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	800	z, ro	5500			5
480	Offlebener Sattel	Ni, SA	100	Salzstock	Mäßig	-	-100	z	1400			1
481	Oldenbrok	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4350	z	1000			1
482	Oldenburg Nordwest	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1450	z	2800			4
483	Oldenburg Süd	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	550	z	3700			4
484	Oldenbüttel	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	300	km, z, ro	6400			5
485	Oldenbüttel Süd	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	500	km, z, ro	5400			5
486	Oldendorf I	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	km, z, ro	3900		x	5

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
487	Oldendorf II	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	600	z	4600			3
488	Oldenswort Mitte	SH	0	Salzstock	Schlecht	-	20	z, ro	7000			5
489	Oldenswort Nord	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	20	z, ro	5000			5
490	Oldenswort Süd	SH	0	Salzstock	Schlecht	-	100	z, ro	7000			5
491	Oppershausen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	1000	z	2500		x	2
492	Örrel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	912	z	3200			3
493	Oscherslebener Sattel	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	0	z	1700			1
494	Ostenholz	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1900			2
495	Ostenwalde	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4000	z	700			2
496	Osterbruch	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	600	z, ro	6000			5
497	Osterby	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	600	km, z, ro	6300			5
498	Osterholz	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	275	z	4200			4
499	Ostervesede	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	300	z	4000			4
500	Ottenbüttel	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	km	3000			k. A.
501	Ottersberg	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4400	z	600			1
502	Otter-Todtshorn	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	600	z	3800			4
503	Paapsand	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	1550	z	1100			3
504	Pahlhude	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	500	km, z, ro	4500			5
505	Paplitz	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	1500			3
506	Peckensen	SA	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	236	z	3000			3
507	Peissen	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	700	z, ro	5000			5
508	Pinnow	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	1800			1
509	Plön	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	2000			1
510	Podelzig	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	900			1
511	Poppau	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	450	z	2500			3
512	Preetz	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	500			2
513	Prenden	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2100	z	1600			1
514	Prenzlau	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1250			1
515	Prerow	MV	60	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	750			2
516	Quedlinburger Sattel	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	z	1300		x	2
517	Quelkhorn	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1010	z	3700			4
518	Quickborn	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	20	z, ro	2500			5
519	Rambow	BB	100	Salzstock	Mäßig	-	100	z	3000			3
520	Ramelsloh	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	1800	km	1000			k. A.
521	Randzelgat	Ni	10	Salzstock	Mäßig	-	1600	z	1500			3
522	Raubkammer	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2900	z	1400			2
523	Rehna-Rüting	MV, SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	1600			1
524	Rehwinkel	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4000	z	500			1
525	Reinkenhagen	MV	100	Salzkissen	Mäßig	-	1000	z	1000		x	2
526	Reinkenhagen Nord	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	1700	z	850			2
527	Reitbrook	HH	100	Salzstock	Mäßig	-	850	z, ro	3100			5
528	Remels	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4100	z	900			1
529	Remmels	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	km	1700			k. A.
530	Rendsburg	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	km	1700			k. A.
531	Rethem	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt]	76	z	4200			4
532	Reuden	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	800	z	1900			2
533	Rhaude	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	700	z	3700			4
534	Rheder Moor	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3500	z	800			1
535	Rhinow	BB, SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	800			1
536	Rhüdener Sattel	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	-134	z	1000			2
537	Ristedt	SA	100	Salzstock	Schlecht	-	352	z	1300			2
538	Rochelsteert	DN	0	Salzkissen	Schlecht	-	2350	z, ro	3800			1
539	Rodau	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2250	z	1250			1
540	Rolfsbüttel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Bergbau [stillgelegt]	0	z	3400			4
541	Rosche-Thondorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z	3300			4
542	Rosenthal	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	650	z	3500			3
543	Roskow	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	1400			1
544	Rotenburg	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3600	z	1100			1
545	Roter Sand	Ni, DN	0	Salzstock	Schlecht	-	250	z, ro	5000			5
546	Rüdersdorf	B, BB	100	Salzkissen	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	470	z	2500			1
547	Rüstringen	Ni	100	Salzstock	Gut	[in Betrieb]	1100	z	5000			3
548	Rütenbrock	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1500			2
549	Sagermeer	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	100	z	3700			4
550	Sahlenburg	Ni	0	Salzkissen	Schlecht	-	1000	km	1500			k. A.
551	Salzgitter	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt] ; Solegewinnung [in Betrieb]	0	z	2000			2
552	Sarstedt	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [Reserve]	-50	z	2700			4
553	Schaphusen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	900	z	3600			4
554	Scharhörn	Ni	0	Salzstock	Schlecht	-	31	z, ro	5000			5

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
555	Scharrel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	701	z	3700			4
556	Scheessel	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	700	z	3600			4
557	Schessinghausen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	300	z	1800		x	2
558	Schieferkaute	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [Reserve]	200	z	2600		x	2
559	Schinkel	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1050	km, z, ro	5300			5
560	Schleimünde	SH	5	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1300			1
561	Schlepzig	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	1000			2
562	Schlieven	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	2400			1
563	Schloss Ricklingen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	500			1
564	Schneeheide	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	1950	z	2300			2
565	Schneflingen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	240	z	2500		x	4
566	Schnelsen	HH, SH	100	Salzstock	Mäßig	-	350	z, ro	5000			5
567	Schneverdingen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3400	z	1000			1
568	Scholen	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	-	3100	z	1100			2
569	Schönberg	SH	50	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1600			1
570	Schönfließ	B, BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1600	z	1800			1
571	Schönwalde	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	250	z	3100			3
572	Schwanebeck	B, BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1200			1
573	Schwedeneck	SH	50	Salzstock	Schlecht	-	300	z, ro	4600			5
574	Schwedt	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1500			1
575	Schweinsrücken	SH	10	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z	1300			1
576	Schwerin	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	900			1
577	Seedorf	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	z	900			1
578	Seefeld	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	800	z	4400			3
579	Segeberg	SH	100	Salzstock	Mäßig	Solegewinnung [in Betrieb]	-91	z, ro	4500			5
580	Sehnde	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	2600			2
581	Setzsteig	BB, SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1000			2
582	Siegelsum	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1350	z	2500			3
583	Siek	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	200	z, ro	3500			5
584	Sievershütten	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	0	z, ro	4500			5
585	Sieverstedt	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1200	z	2400			3
586	Silberborn	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	250	z	600		x	1
587	Söhlingen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	150	z	4400			4
588	Soltau	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Solegewinnung [in Betrieb]	66	z	4300			4
589	Sottorf	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb]	160	z	4500			3
590	Spandau	B, BB	100	Salzkissen	Mäßig	-	1300	z	2100			1
591	Sperenberg	BB	100	Salzstock	Mäßig	-	-66	z	2400			3
592	Spieka	Ni	90	Salzstock	Schlecht	-	750	km, z, ro	5000			5
593	Spiekeroog	Ni	5	Salzstock	Schlecht	-	1200	z, ro	4150			5
594	Spitzsand	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	800	km	1500			k. A.
595	Spreenhagen	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1300	z	1600			1
596	Sprötze	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	4400			3
597	Staakow Nord	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	1000			2
598	Staberhuk Ost	SH, DO	0	Salzkissen	Schlecht	-	1400	z	1000			1
599	Stade	Ni	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [nicht realisiert] ; Solegewinnung [stillgelegt]	0	z, ro	5700			5
600	Staßfurter Sattel	SA	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt]	0	z	1100			1
601	Steinhuder Meer	Ni	100	Salzkissen	Mäßig	Bergbau [Reserve]	732	z	1500		x	2
602	Stemmen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	600	z	3800			4
603	Sternberg	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3300	z	1600			1
604	Sterup	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	260	z, ro	2700			5
605	Stöckendrebber	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1400			2
606	Storkow	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	406	z	3500			3
607	Strackholt	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1250	z	3150			3
608	Straupitz	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	1500	z	1000			2
609	Struvenhütten	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	km	1000			k. A.
610	Südbostel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	800	z	3100			4
611	Süderbrarup	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1400	km	500			k. A.
612	Süderhastedt	SH	100	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	700	z, ro	6000			5
613	Süderneuland	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	3000			3
614	Süderoog	SH	0	Salzkissen	Schlecht	-	2950	z, ro	1650			1
615	Süderstapel	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z, ro	4500			5
616	Sülfeld	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	156	z, ro	4000			5
617	Sülze	Ni	100	Salzstock	Mäßig	Solegewinnung [stillgelegt]	100	z	4000			4
618	Suroide	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2800	z	1400			2
619	Sushörn	SH	100	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	1000	km, z, ro	5800		x	5

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*[1]	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*[2] [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*[3]	Sek. Mächtig-keit*[4]	Anzahl Struktur-umrisse*[5]	Mindest-fläche*[6]	Typ
620	Taaken	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	200	z	4200			4
621	Tarnow	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1600			1
622	Tellingstedt	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	700	km, z, ro	3500			5
623	Teufelsmoor	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	700	z	4400			3
624	Teutschenthal	SA	100	Salzkissen	Gut	Kavernenstandort [in Betrieb] ; Bergbau [stillgelegt] ; Solegewinnung [in Betrieb]	0	z	1077			1
625	Thedinghausen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	275	z	4200			4
626	Theeßen	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	600			2
627	Thiede	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1500			2
628	Thönse	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	3950	z	800			1
629	Timmel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1200	z	3100			3
630	Töps	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1000	z	3600		x	3
631	Travemünde	SH	20	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	1700			1
632	Treuenbrietzen	BB	100	Salzkissen	Mäßig	-	900	z	1600			1
633	Triepkendorf	BB, MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	2000			1
634	Trollegrund Nord	MV, DO	0	Salzkissen	Schlecht	-	3200	z	1400			1
635	Tülau	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	1200	z	750			2
636	Tüttendorf	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1100	km	1500			k. A.
637	Tützpatz	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1800			1
638	Ueckermünde Ost	MV	90	Salzkissen	Schlecht	-	2700	z	1200			1
639	Ueckermünde West	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	2600	z	1000			1
640	Uttum	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1800	z	1900			3
641	Varbitz	Ni, SA	100	Salzstock	Schlecht	-	500	z	3000		x	2
642	Vechelde	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	0	z	2500		x	2
643	Verden	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	300	z	4300			4
644	Viesen	BB	100	Salzstock	Mäßig	-	310	z	3000			4
645	Vinsgrav	SH, DO	0	Salzkissen	Schlecht	-	2450	z	1050			1
646	Volkensen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	1150	z	3600			3
647	Volkwardingen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	150	z	4000			4
648	Volpriehausen	Ni	100	Salzkissen	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	1000		x	1
649	Vorhop	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	200	z	2500			4
650	Waabs	SH	20	Salzstock	Schlecht	-	700	z, ro	3500			5
651	Waabs Nord	SH	0	Salzstock	Schlecht	-	1200	z, ro	2200			5
652	Waddekath	Ni, SA	100	Salzstock	Mäßig	-	300	z	3100			3
653	Wahn	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	265	z	4000			4
654	Wallhöfen	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	4950	z	450			1
655	Wangerooge	Ni	25	Salzstock	Schlecht	-	700	z, ro	4600			5
656	Warnau	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	1300	z, ro	4700			5
657	Wathlingen-Hänigsen	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [in Betrieb]	20	z	4200			4
658	Wedehof	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	75	z	4000			4
659	Weenzen	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	-166	z	1100			4
660	Weesen-Lutterloh	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	49	z	4200			4
661	Wendeburg	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	0	z	3500			4
662	Werle	BB, MV	100	Salzstock	Gut	Kavernenstandort [Planung/Erkundung]	511	z	3700			3
663	Wesenberg	MV	100	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [stillgelegt]	200	z	3600			3
664	Wesendorf	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	400	z	3300			3
665	Westdorf	Ni	80	Salzstock	Mäßig	-	850	z	2900			3
666	Westensee	SH	100	Salzstock	Schlecht	-	600	km, z, ro	5500			5
667	Westerems	Ni	0	Salzkissen	Schlecht	-	2200	z	1200			1
668	Westerhever	SH	25	Salzkissen	Schlecht	-	2500	z	1700			1
669	Westerwanna	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1000	z, ro	5000			5
670	Wettenbostel	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	700	z	4000			4
671	Weyhausen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	200	z	1600			3
672	Wichter Ee	Ni, DN	0	Salzstock	Schlecht	-	1400	z, ro	2700			5
673	Wienhausen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	50	z	4300			4
674	Wieren	Ni	100	Salzstock	Schlecht	-	450	z	3600			4
675	Wietze-Hambühren	Ni	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	0	z	4200			4
676	Wildes Moor	Ni	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	2400			2
677	Wilster	SH	100	Salzkissen	Mäßig	-	1100	km	2667			k. A.
678	Wittenberge	SA	100	Salzstock	Mäßig	-	70	z	3900			3
679	Wittingen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	190	z	2700			4
680	Wittmund	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	1150	z	3800			3
681	Witzhave	SH	100	Salzstock	Mäßig	-	1050	z, ro	3500			5
682	Wolletz	BB	100	Salzkissen	Schlecht	-	2400	z	1300			1
683	Wolthausen	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	310	z	3500			4
684	Wredenhagen	MV	100	Salzstock	Mäßig	Kavernenstandort [nicht realisiert]	70	z	4900			3

Liste aller untersuchten Salzstrukturen im Norddeutschen Becken

Allgemeine Informationen				Strukturbeschreibung			Kriterienrelevante Strukturinformationen			Struktur-geometrie		Interbau-prognose
Lfd. Nr.	Strukturname	Bundes-land	On-shore [%]	Strukturtyp	Erkundungs-grad*1	Konkurrierende Nutzung	Struktur-top*2 [muNN]	Struktur-aufbauendes Salinar*3	Sek. Mächtig-keit*4	Anzahl Struktur-umrisse*5	Mindest-fläche*6	Typ
685	Wrohm	SH	100	Salzkissen	Schlecht	-	1800	km	1500			k. A.
686	Wulkenzien	MV	100	Salzkissen	Schlecht	-	3000	z	1300			1
687	Wulkow	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	335	z	3750			3
688	Wülpen	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1400			2
689	Wustrow I	Ni, SA	100	Salzstock	Gut	Bergbau [stillgelegt]	150	z	3000			3
690	Wustrow II	MV	40	Salzkissen	Schlecht	-	1800	z	1000			1
691	Wybelsum	Ni	70	Salzstock	Mäßig	-	1650	z	1350			3
692	Zechlin	BB, MV	100	Salzstock	Schlecht	-	200	z	4200			3
693	Zerben	SA	100	Salzkissen	Schlecht	-	2000	z	1600			2
694	Zingst	MV	50	Salzkissen	Schlecht	-	1900	z	1000			1
695	Zobbenitz	SA	100	Salzstock	Gut	-	200	z	800		x	4
696	Zühlen	BB	100	Salzstock	Schlecht	-	1160	z	3300			3
697	Zwischenahn	Ni	100	Salzstock	Mäßig	-	290	z	4000			4

Ergänzende Erläuterungen

*1 Für Bewertungsschema siehe Bericht Kap. 3.2.2

*2 In einer Tiefe von >1000 m u. NN gibt es keine Kavernenkonfiguration; bei ≥1500 m u. NN Kriterium nicht erfüllt (Kap. 3.2.4.1)

*3 Bei jo oder km Kriterium nicht erfüllt (Kap. 3.2.4.2)

*4 Je nach Tiefenlage bei <452-582 m Kriterium nicht erfüllt (Kap. 3.2.4.3)

*5 Es müssen mindestens zwei Strukturumrisse in aufeinanderfolgenden Tiefen vorliegen (Kap. 3.2.4.3)

*6 In die verschnittenen Strukturumrisse müssen mindestens drei Kavernen in Reihen- oder Dreiecksanordnung passen (Kap. 3.2.4.4)

Kürzel	Bundesland
B	Berlin
BB	Brandenburg
Br	Bremen
DN	Deutsche Nordsee
HH	Hamburg
MV	Mecklenburg-Vorpommern
Ni	Niedersachsen
SA	Sachsen-Anhalt
SH	Schleswig-Holstein

Kriterium nicht erfüllt

Kriterium nur z. T. erfüllt

Kürzel	Stratigrafie
jo	Oberjura
km	Mittlerer Keuper
z	Zechstein
ro	Oberrotliegend

Anhang 3-2

Salzstrukturen im Norddeutschen Becken (1:750.000)

InSpEE

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

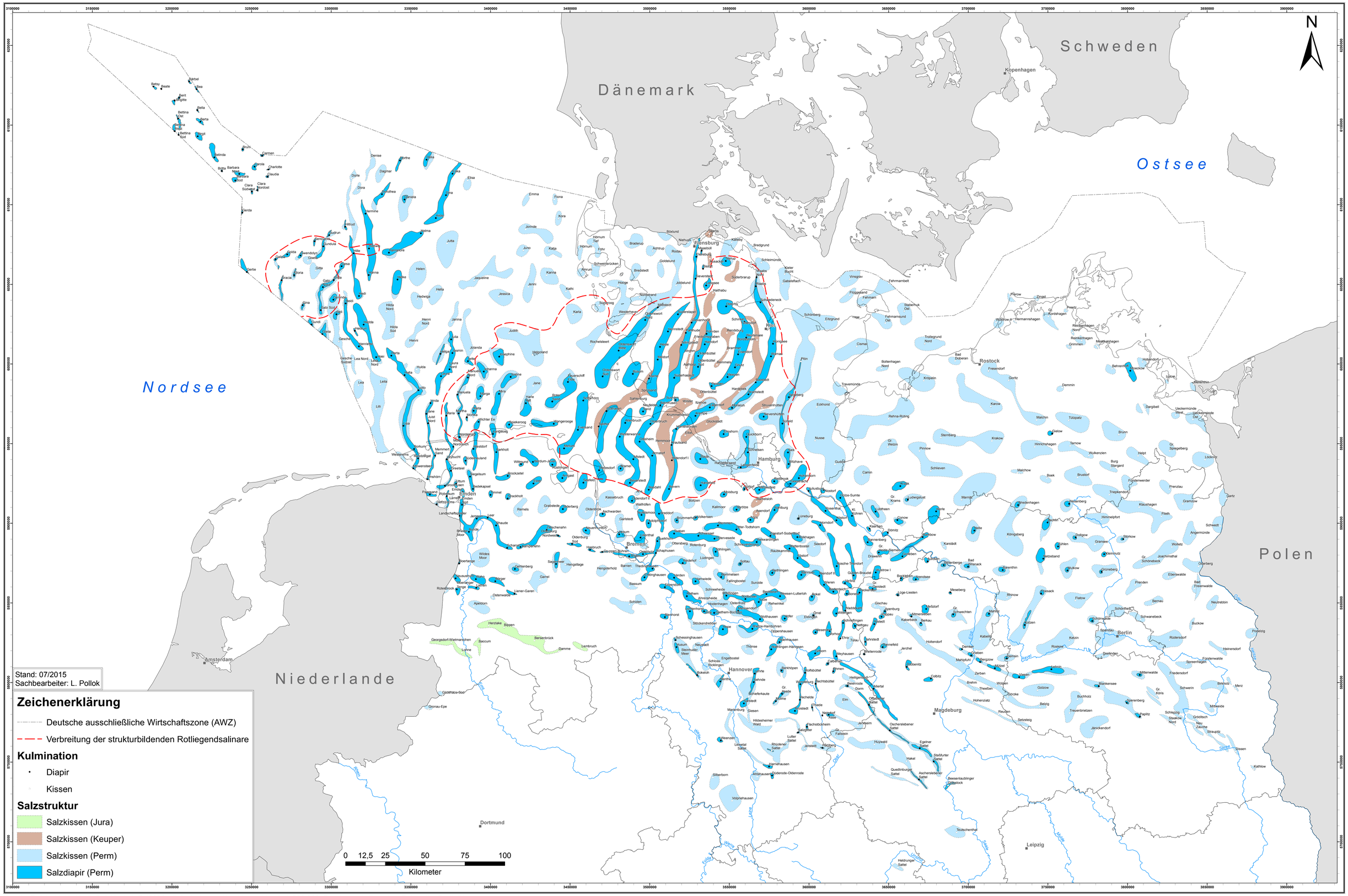
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Salzstrukturen im Norddeutschen Becken (1:750.000)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES

Leibniz Universität Hannover



Quelle: Reinhold, K., Krull, P. & Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1:500.000. Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe, Berlin/Hannover, verändert.

Anhang 3-3

Sekundäre Mächtigkeiten der norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

InSpEE

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

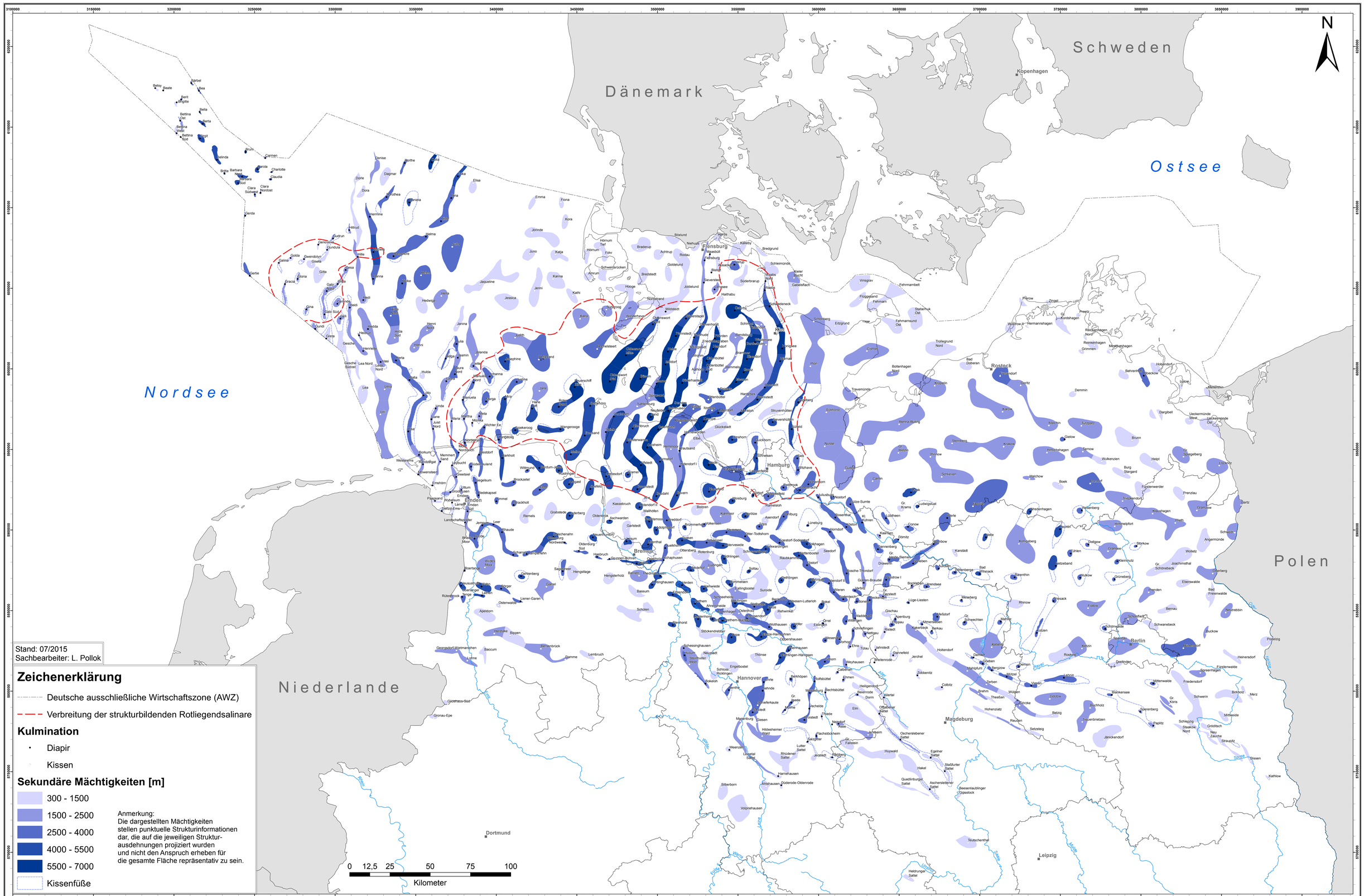
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Sekundäre Mächtigkeiten der norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES

Leibniz Universität Hannover



Für Datenquellen siehe Bericht Kap. 3.1.1

Anhang 3-4

Erkundungsgrad und konkurrierende Nutzungen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

InSpEE

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

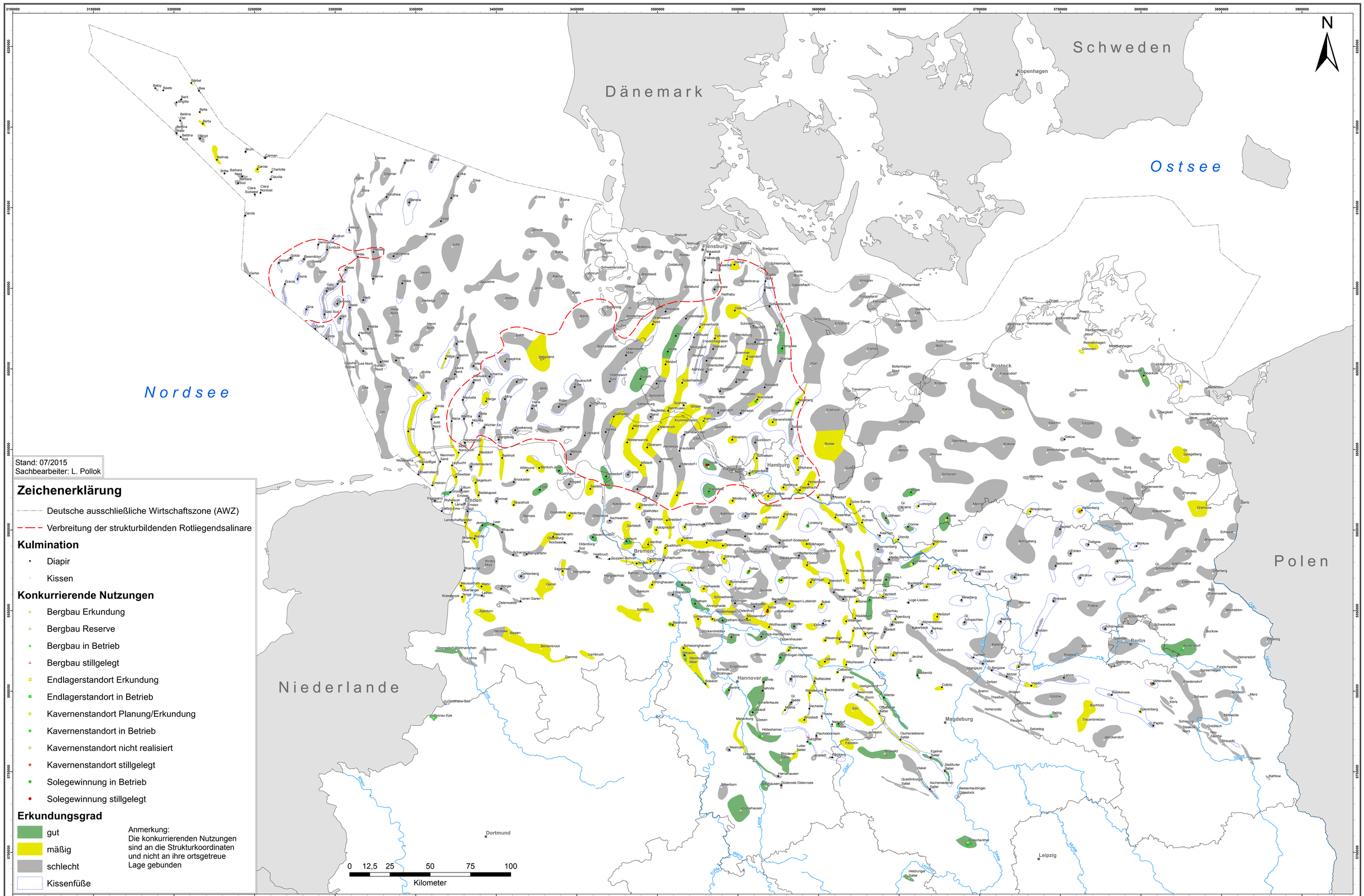
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Erkundungsgrad und konkurrierende Nutzungen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES

Leibniz Universität Hannover



Stand: 07/2015
Sachbearbeiter: L. Pollok

Zeichenerklärung

- Deutsche ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ)
- Verbreitung der strukturbildenden Rotliegendsalinare

Kulmination

- Diapir
- Kissen

Konkurrierende Nutzungen

- Bergbau Erkundung
- Bergbau Reserve
- Bergbau in Betrieb
- Bergbau stillgelegt
- Endlagerstandort Erkundung
- Endlagerstandort in Betrieb
- Kavernenstandort Planung/Erkundung
- Kavernenstandort in Betrieb
- Kavernenstandort nicht realisiert
- Kavernenstandort stillgelegt
- Solegewinnung in Betrieb
- Solegewinnung stillgelegt

Erkundungsgrad

- gut
- mäßig
- schlecht
- Kissenfüße

Anmerkung:
Die konkurrierenden Nutzungen sind an die Strukturkoordinaten und nicht an ihre ortsgetreue Lage gebunden

Für Datenquellen siehe Bericht Kap. 3.1.1

Anhang 3-5

Auswahl von untersuchungswürdigen Salzstrukturen in Norddeutschland

InSpEE

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

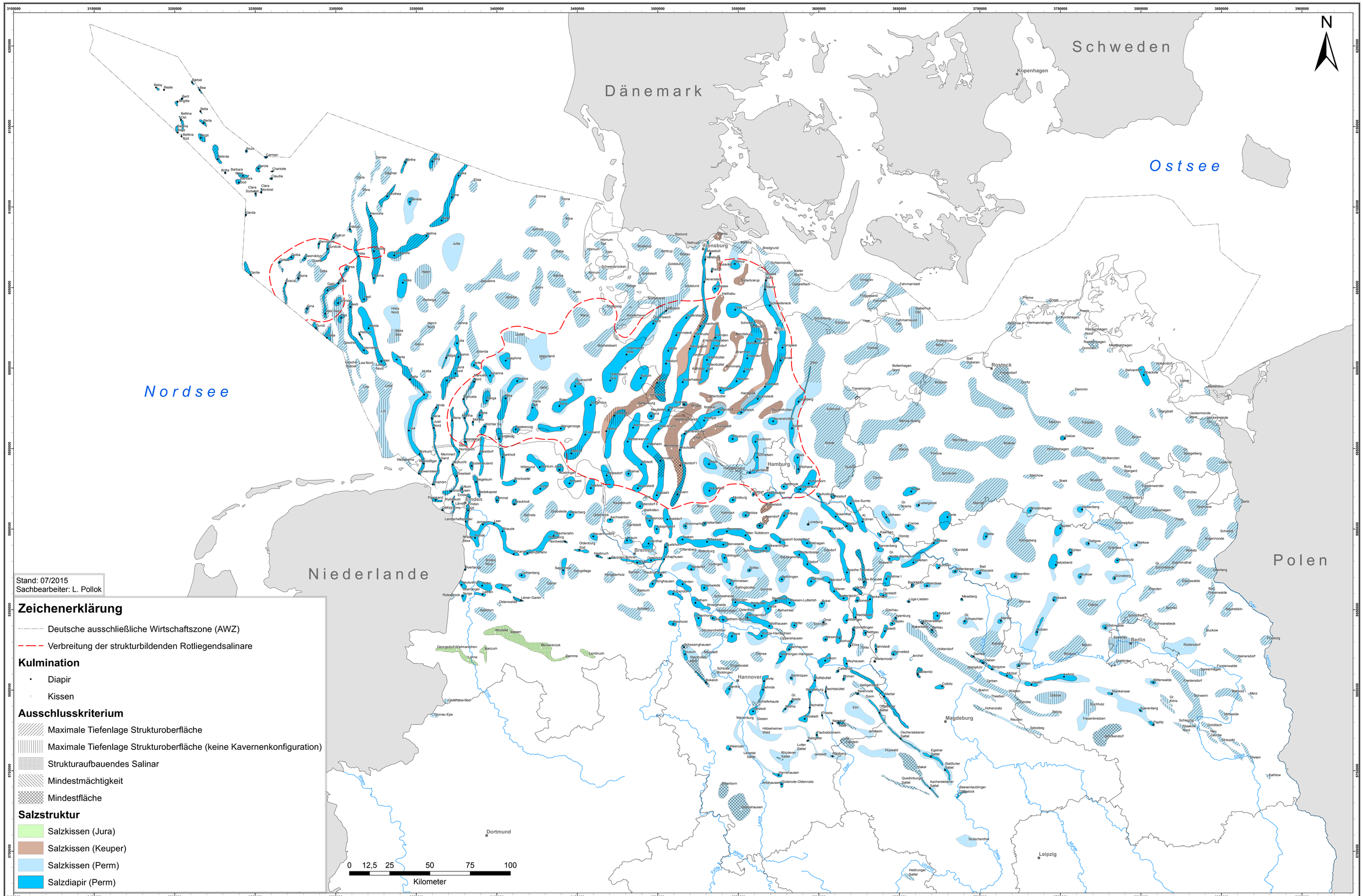
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Auswahl von untersuchungswürdigen Salzstrukturen in Norddeutschland (1:750.000)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER

KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES

Leibniz Universität Hannover



Für Erläuterung der einzelnen Kriterien siehe Bericht Kap. 3.2.4

Anhang 3-6

Verteilung der Internbautypen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

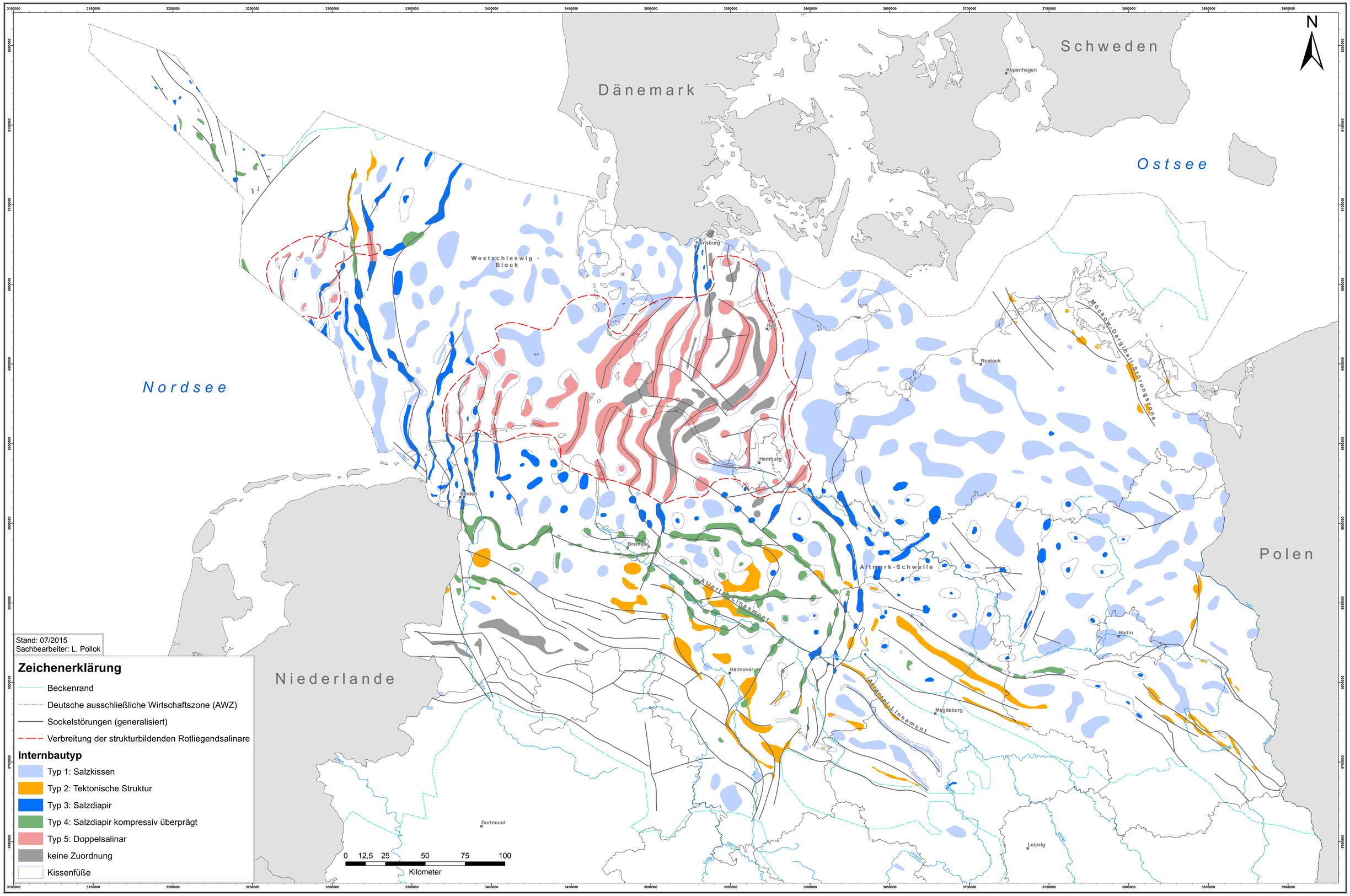
InSpEE

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Verteilung der Internbautypen in norddeutschen Salzstrukturen (1:750.000)

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
GEOZENTRUM HANNOVER
KBB UNDERGROUND TECHNOLOGIES
Leibniz Universität Hannover



Für Datenquellen siehe Bericht Kap. 3.1.1

Anhang 3-7

Gegenüber der Datengrundlage von Reinhold et al. 2008 hinzugefügte und entfernte Salzstrukturen

Gegenüber der Kartengrundlage von Reinhold et al. (2008) hinzugefügte und entfernte Salzstrukturen

Gelöschte Salzstrukturen		
Strukturname	Bundes-land	Begründung
Alfhausen	Ni	keine individuelle Kulmination
Atterwasch	BB	Sockelhochlage
Belinda Nord	DN	eine Struktur, unter Belinda zusammengefasst
Belinda Süd	DN	
Betti	DN	in GPDN ausgeschlossen
Bianca	DN	in GPDN ausgeschlossen
Burg	BB	Sockelhochlage
Clara	DN	getrennt in zwei Strukturen, Clara Nordost und Clara Südwest
Deulowitz	BB	Sockelhochlage
Döbern	BB	Sockelhochlage
Guben I	BB	Sockelhochlage
Guben II	BB	Sockelhochlage
Halbe	BB	gehört zu Gr. Köris
Haseluenne	Ni	keine individuelle Kulmination
Jerischke-Raden	BB	Sockelhochlage
Komptendorf	BB	Sockelhochlage
Luckenwalde	BB	keine Salzakkumulation
Niepars	MV	keine Salzakkumulation
Ohrte	Ni	keine individuelle Kulmination
Rosslebener Sattel	Th, SA	keine Salzakkumulation
Thören	Ni	Salzintrusion, keine Salzstruktur i.e.S.

Hinzugefügte Salzstrukturen		
Strukturname	Bundes-land	Begründung
Belina	DN	gemeinsame Struktur aus Belinda Nord und Belinda Süd
Berit	DN	im GPDN neu identifiziert
Betsy	DN	im GPDN neu identifiziert
Brigitte	DN	im GPDN neu identifiziert
Charlotte	DN	im GPDN neu identifiziert
Clara Nordost	DN	im GPDN neu identifiziert
Clara Südwest	DN	im GPDN neu identifiziert
Claudia	DN	im GPDN neu identifiziert
Denise	DN	kein Strukturname auf Salzkarte vorhanden

Ergänzende Erläuterungen

Kürzel	Bundesland
BB	Brandenburg
DN	Deutsche Nordsee
MV	Mecklenburg-Vorpommern
Ni	Niedersachsen
SA	Sachsen-Anhalt
Th	Thüringen

Anhang 4-1

Speicherung von Druckluft – Berechnungsergebnisse AP3

Die Bezeichnung der Abbildungen bezieht sich auf die Nummerierung der jeweils betrachteten Modellkavernen. Der Buchstabe D bezieht sich auf den Typ der Druckluftkavernen, die nächsten drei Ziffern kennzeichnen den Modelltyp entsprechend den gewählten Ausprägungen. Die Zahlen nach dem Punkt dienen der Nummerierung der Diagramme, in denen die Berechnungsergebnisse für die jeweilige Kaverne dargestellt sind.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 D111 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 2 D111 Druckrate Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 3 D111 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 4 D121 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 5 D121 Druckrate Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 6 D121 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 7 D211 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 8 D211 Druckrate Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 9 D211 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 10 D221 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 11 D221 Druckrate Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 12 D221 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 13 D112 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 14 D112 Druckrate Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 15 D112 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 16 D122 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 17 D122 Druckrate Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 18 D122 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 19 D212 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 20 D212 Druckrate Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 21 D212 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 22 D222 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 23 D222 Druckrate Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 24 D222 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Parameter der folgenden Berechnungen:
Vol. = 200.000 m³ Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 25 D111_a Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
76 Tage Wechsel

Abbildung 26 D111_a Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
76 Tage Wechsel

Abbildung 27 D111_a Kavernentemperatur vs. Zeit
76 Tage Wechsel

Abbildung 28 D111_b Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

Abbildung 29 D111_b Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

Abbildung 30 D111_b Kavernentemperatur vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

Abbildung 31 D111_c Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

Abbildung 32 D111_c Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

Abbildung 33 D111_c Kavernentemperatur vs. Zeit
28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

Abbildung 34 D111_01 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 1 °C

Abbildung 35 D111_01 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 1 °C

Abbildung 36 D111_01 Kavernentemperatur vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 1 °C

Abbildung 37 D111_20 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 20 °C

Abbildung 38 D111_20 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 20 °C

Abbildung 39 D111_20 Kavernentemperatur vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 20 °C

Abbildung 40 D111_40 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 40 °C

Abbildung 41 D111_40 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 40 °C

Abbildung 42 D111_40 Kavernentemperatur vs. Zeit
76 Tage Wechsel Befülltemperatur = 40 °C

Abbildung 43 D111 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 44 D121 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 45 D211 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 46 D221 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 47 D112 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 48 D122 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 200.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 49 D212 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 750 m Druckspiel = 80 - 100 bar

Abbildung 50 D222 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 500.000 m³
Dachteufe = 950 m Druckspiel = 80 - 100 bar

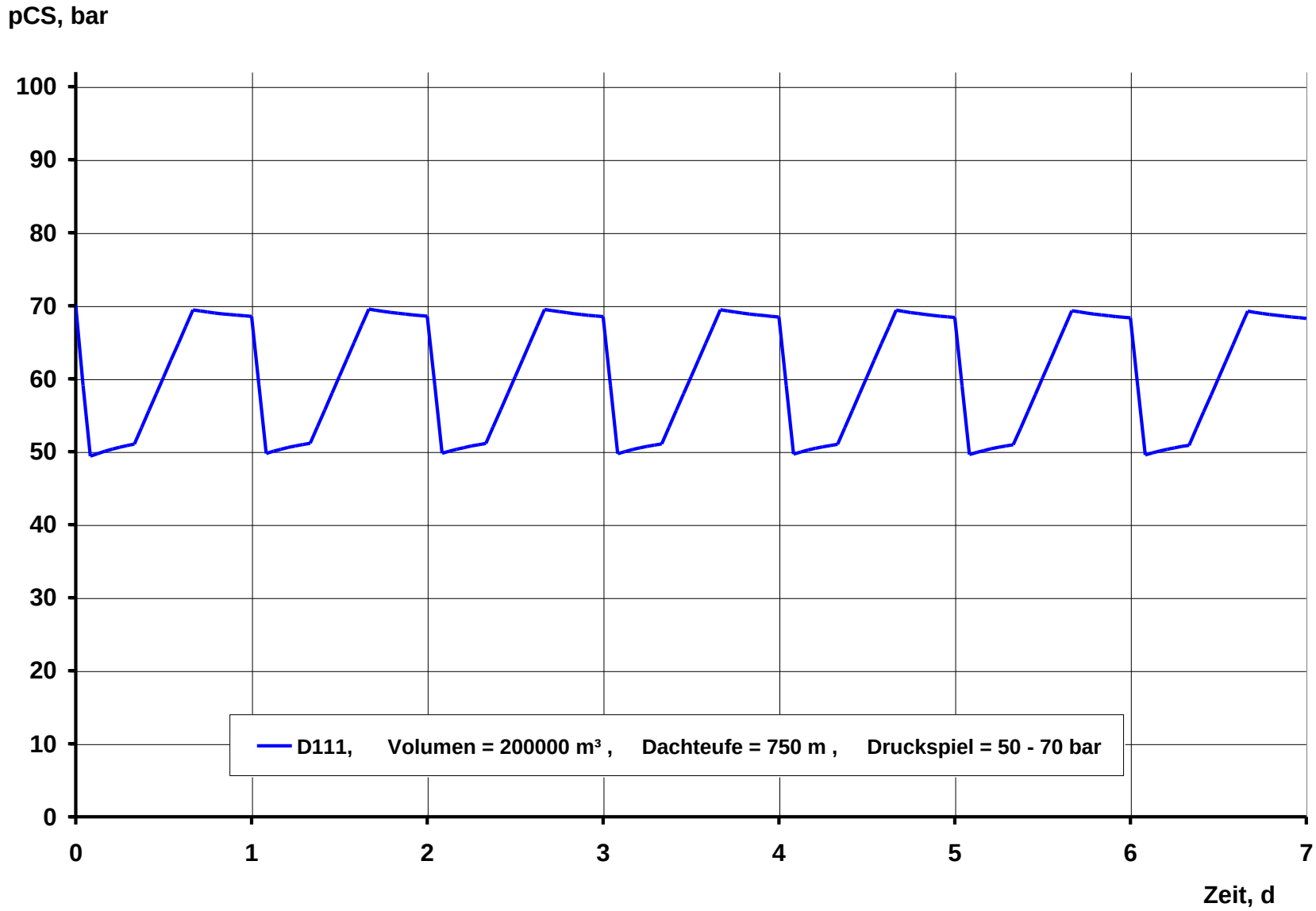

pCS, bar
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D111, Volumen = 200000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 1

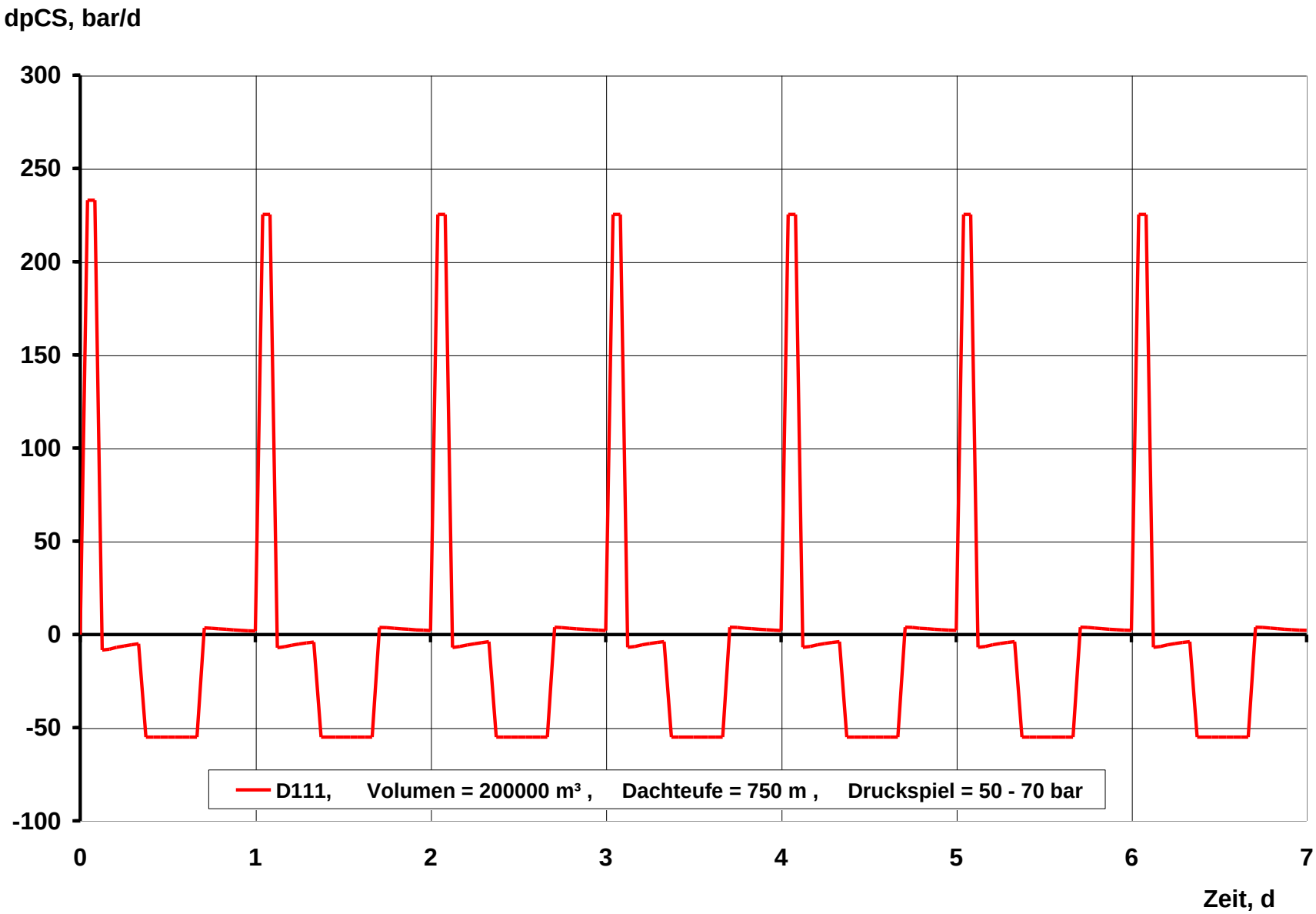

dpCS, bar/d
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D111, Volumen = 200000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 2

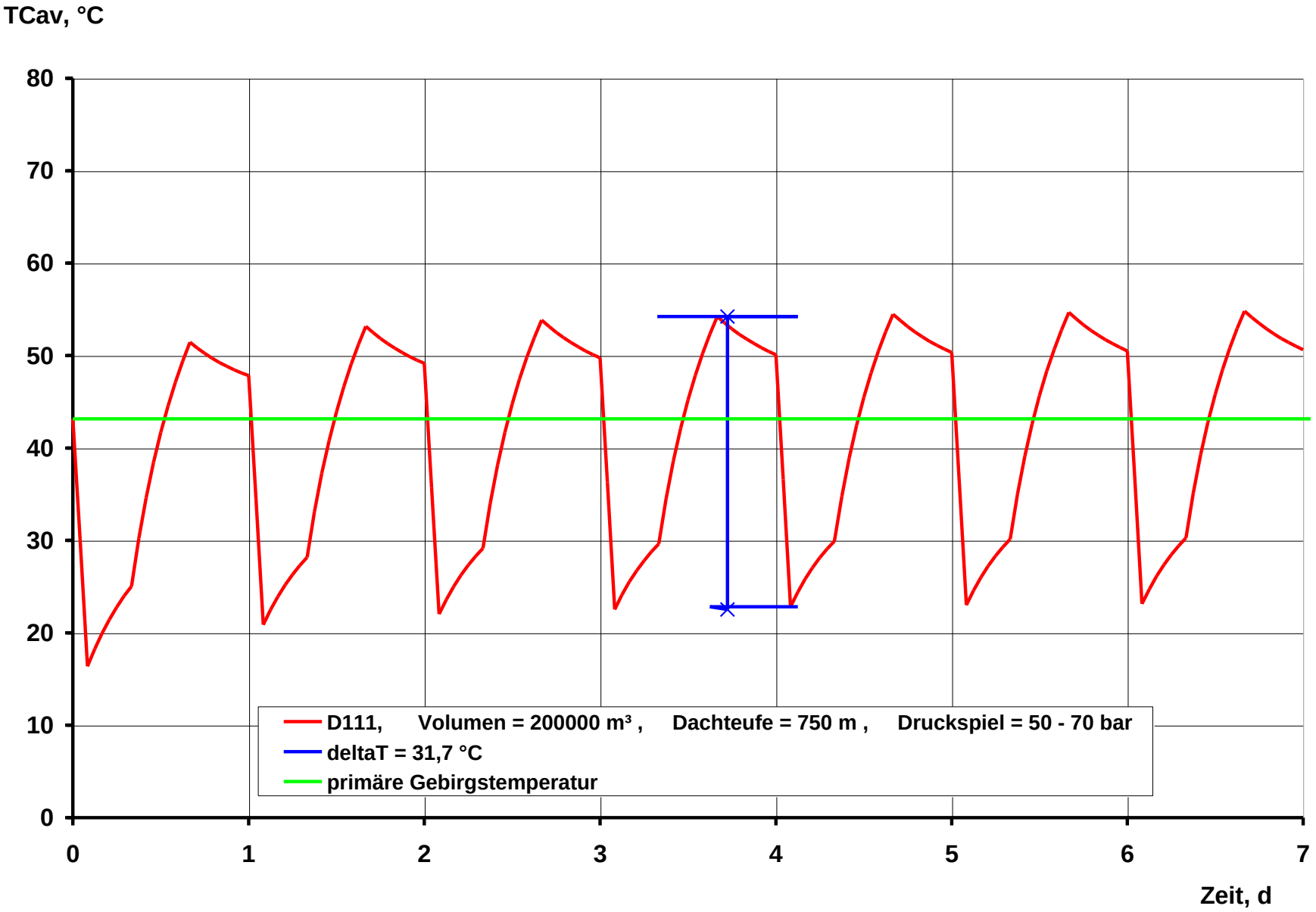

TCav, °C
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D111, Volumen = 200000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar
deltaT = 31,7 °C
primäre Gebirgstemperatur

Abbildung 3

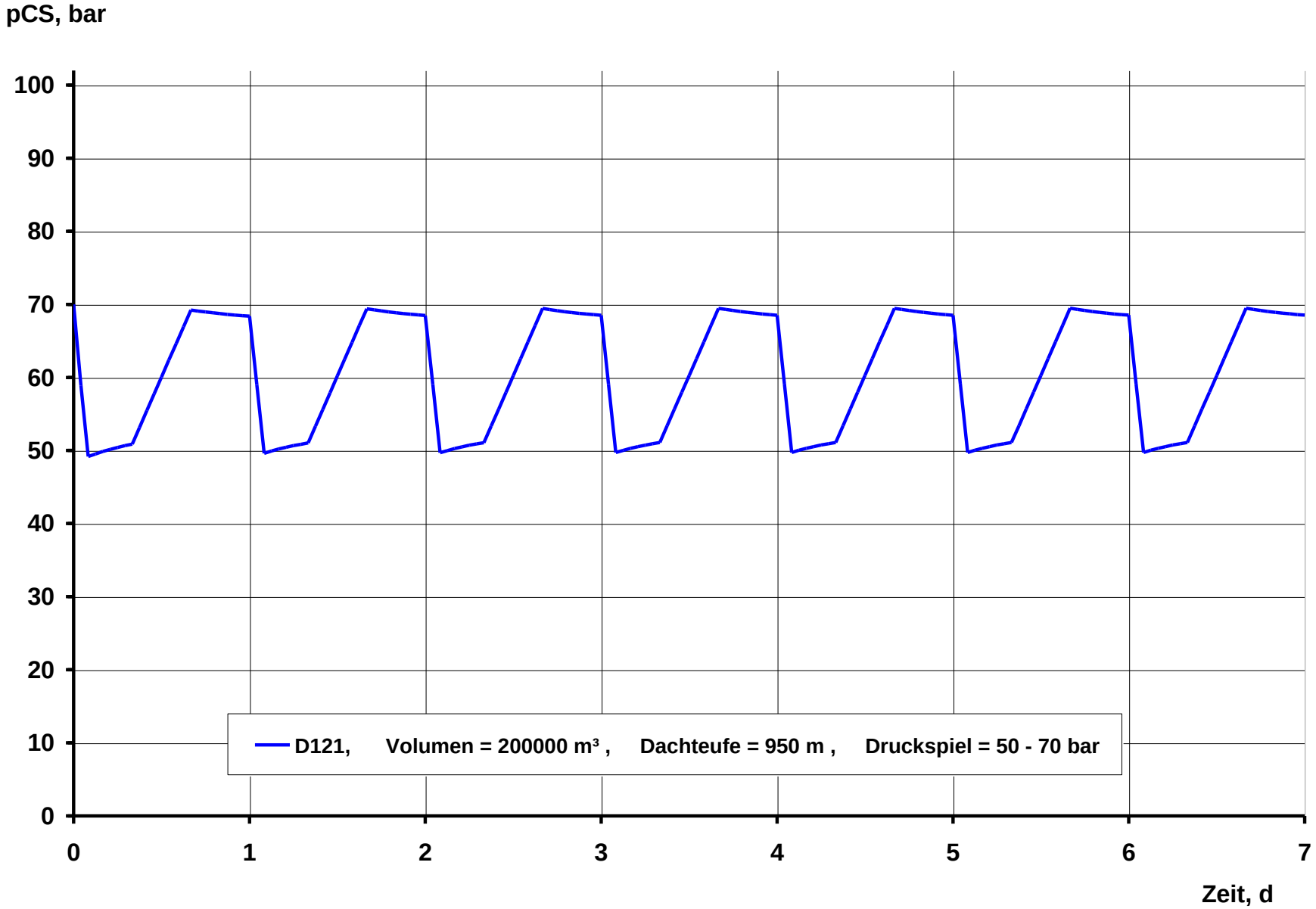


Abbildung 4

03ESP323 InSpEE Sachbericht

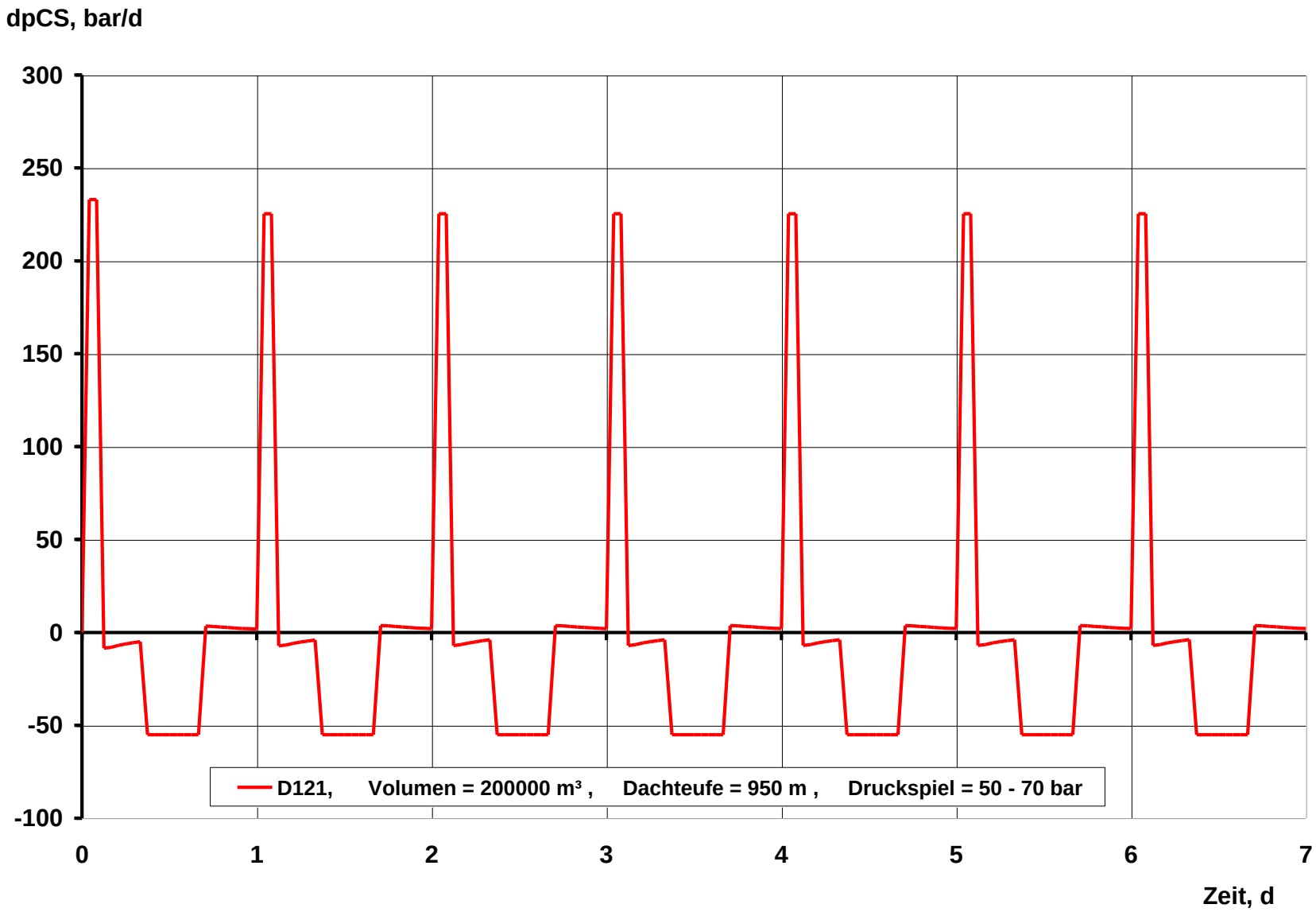

dpCS, bar/d
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D121, Volumen = 200000 m³ , Dachteufe = 950 m , Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 5

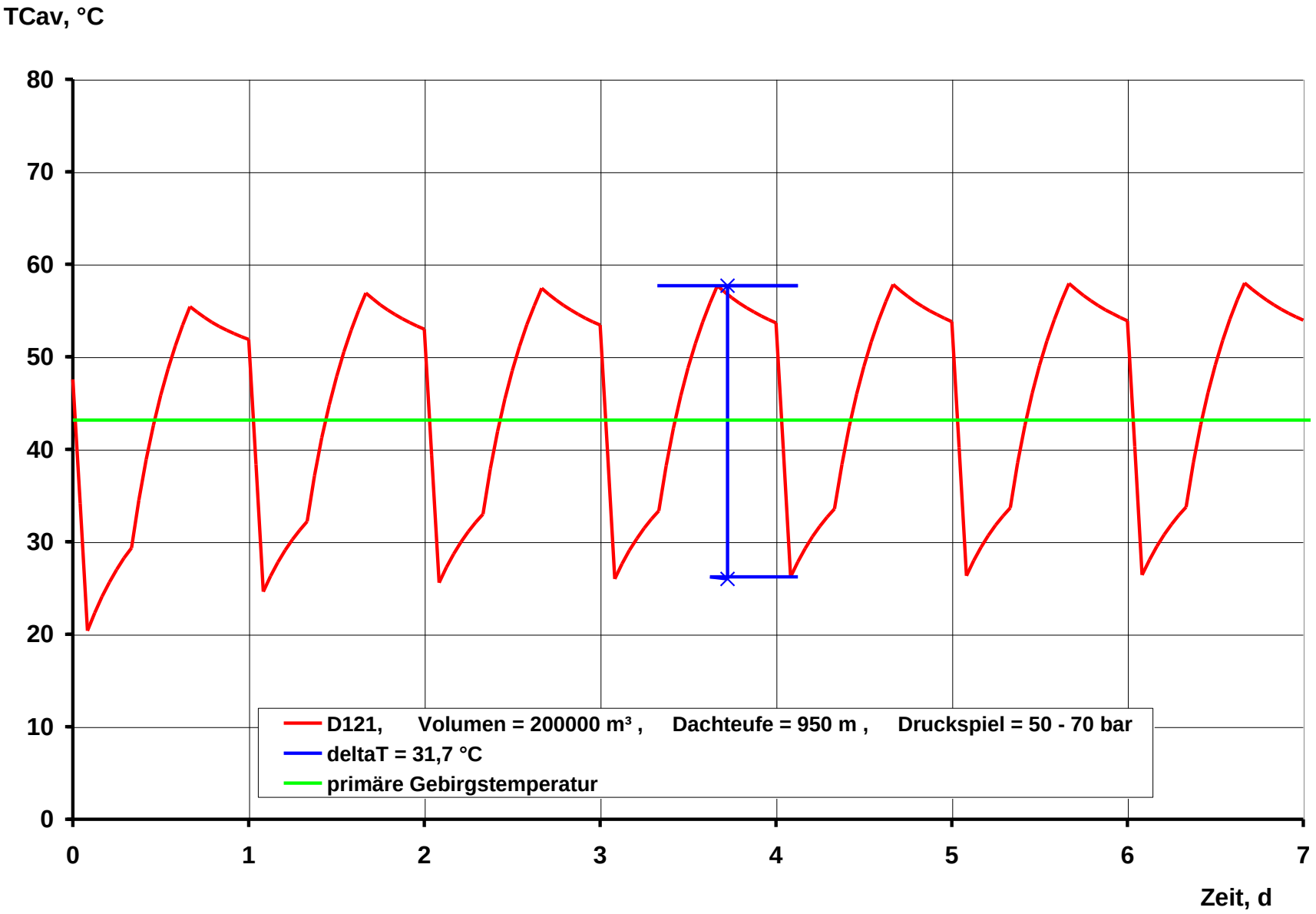

TCav, °C
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D121, Volumen = 200000 m³ , Dachteufe = 950 m , Druckspiel = 50 - 70 bar
deltaT = 31,7 °C
primäre Gebirgstemperatur

Abbildung 6

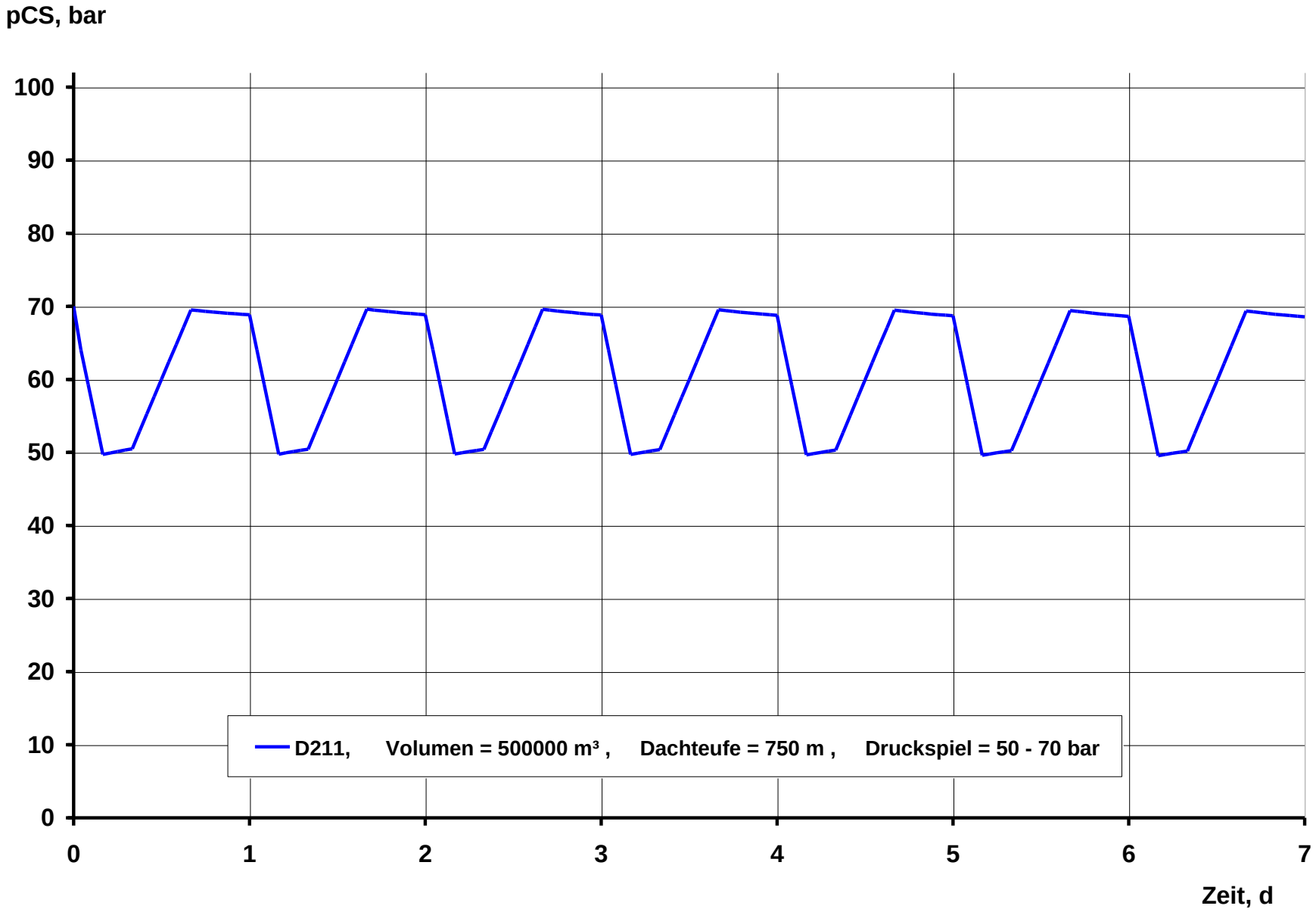

pCS, bar
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D211, Volumen = 500000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 7

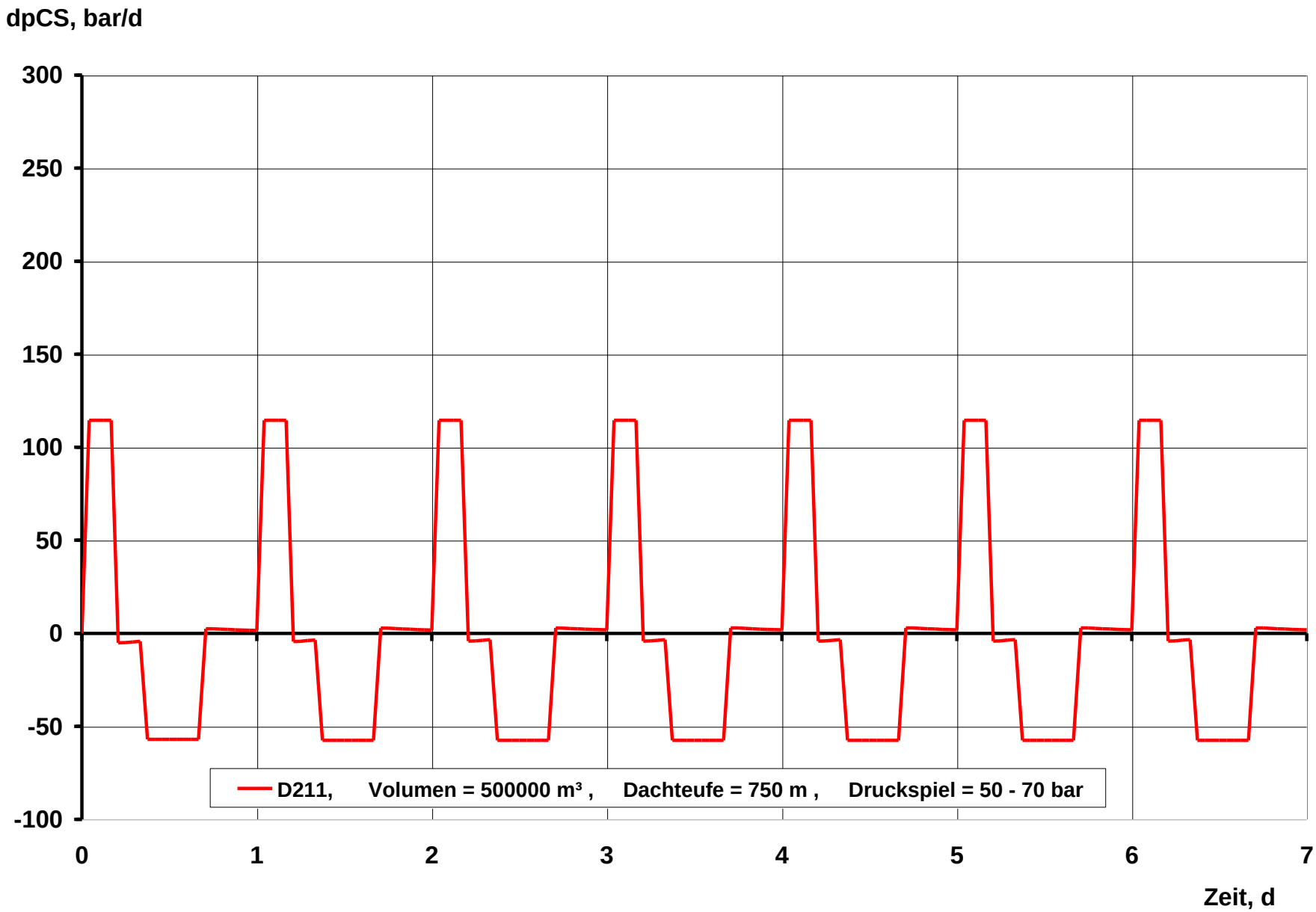

dpCS, bar/d
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D211, Volumen = 500000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar

Abbildung 8

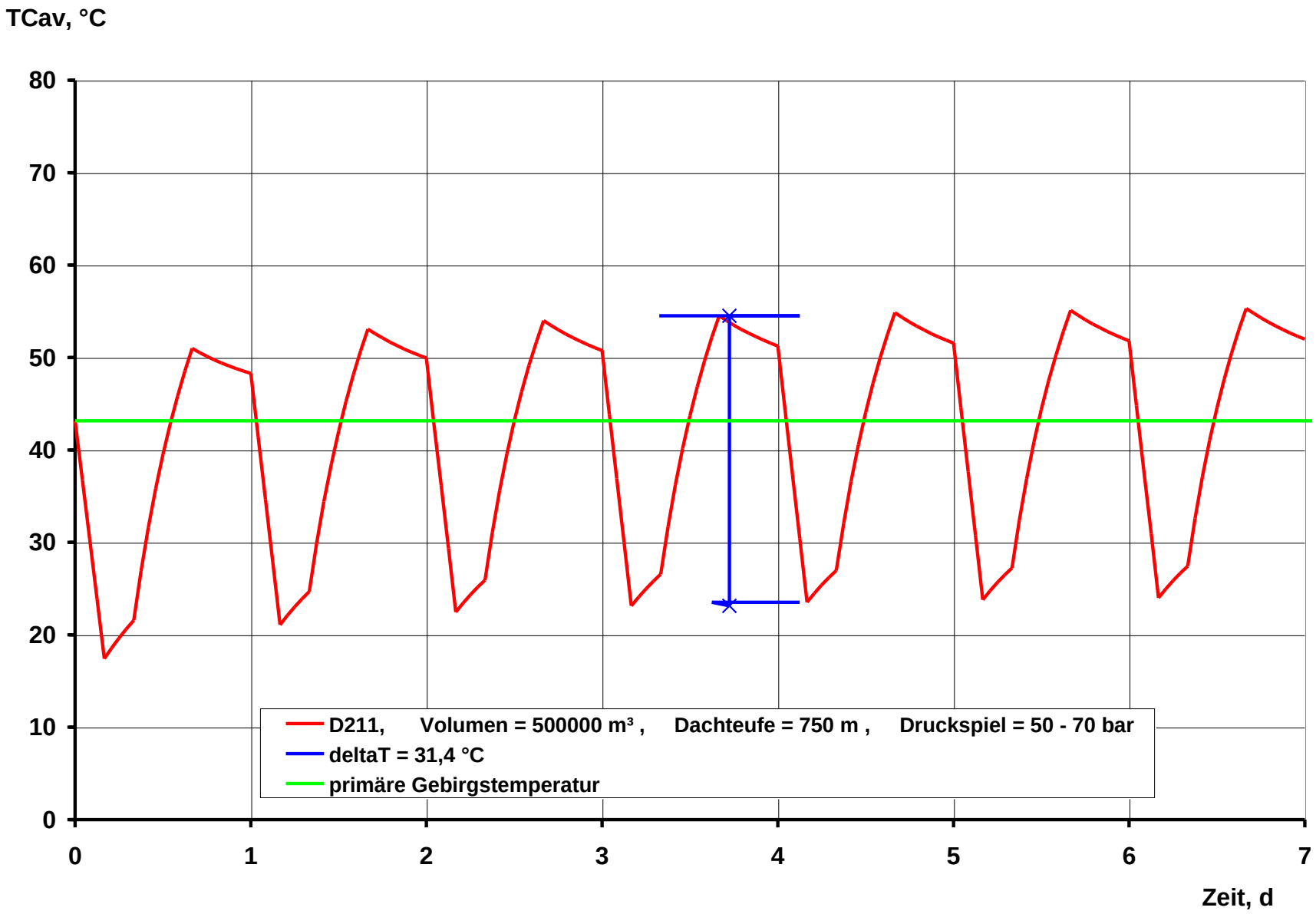

TCav, °C
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
1
2
3
4
5
6
7
Zeit, d
D211, Volumen = 500000 m³ , Dachteufe = 750 m , Druckspiel = 50 - 70 bar
deltaT = 31,4 °C
primäre Gebirgstemperatur

Abbildung 9

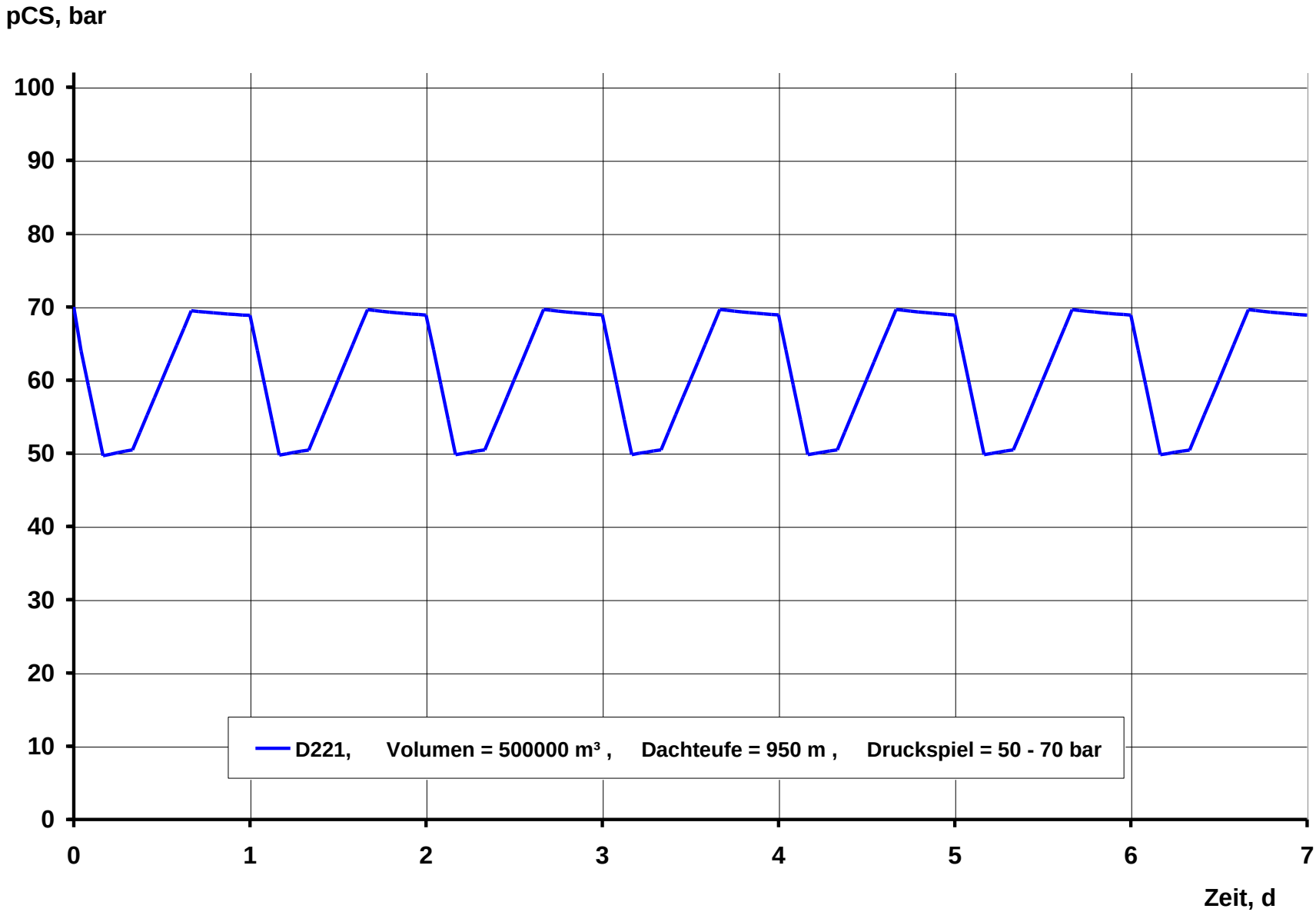


Abbildung 10

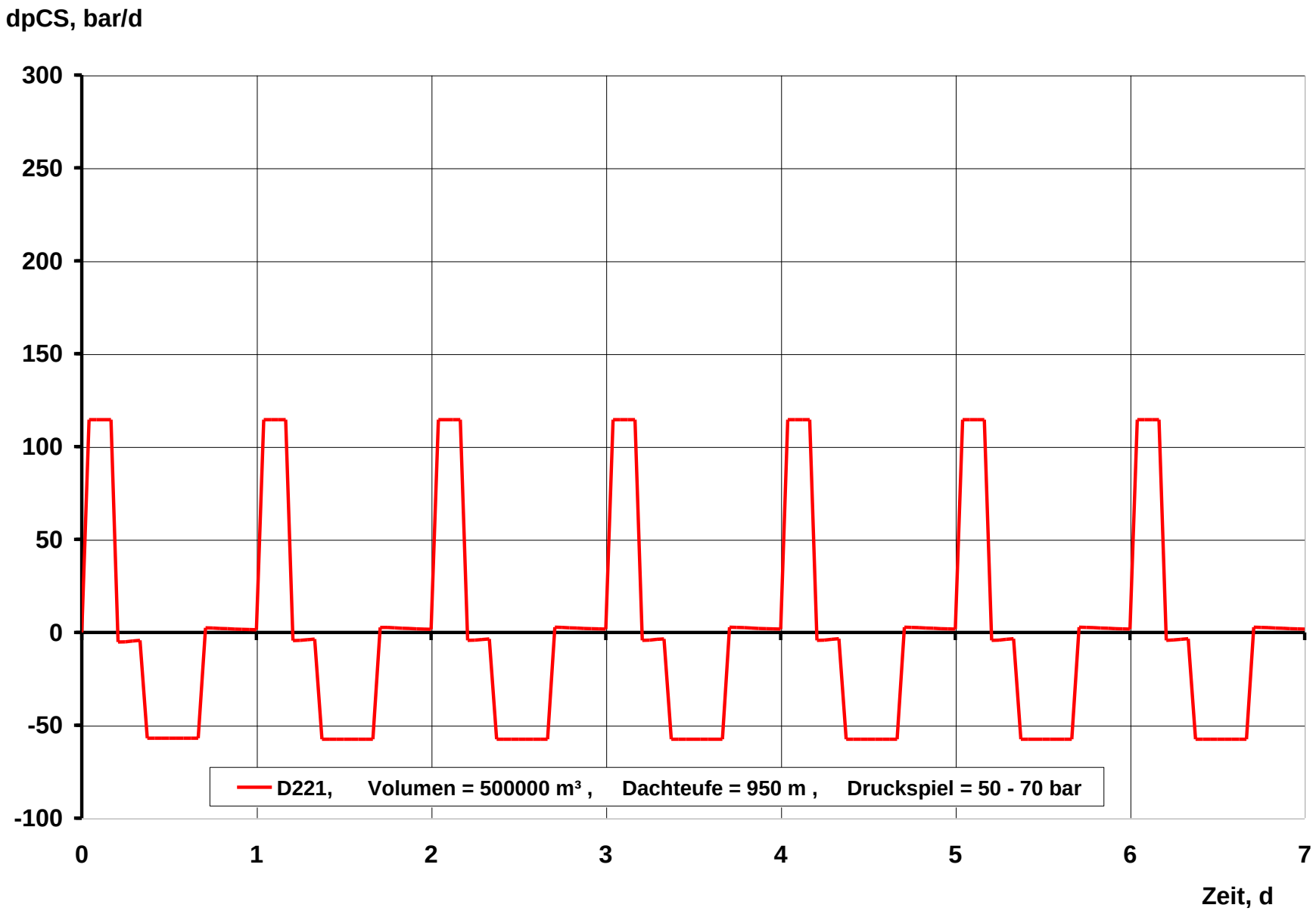


Abbildung 11

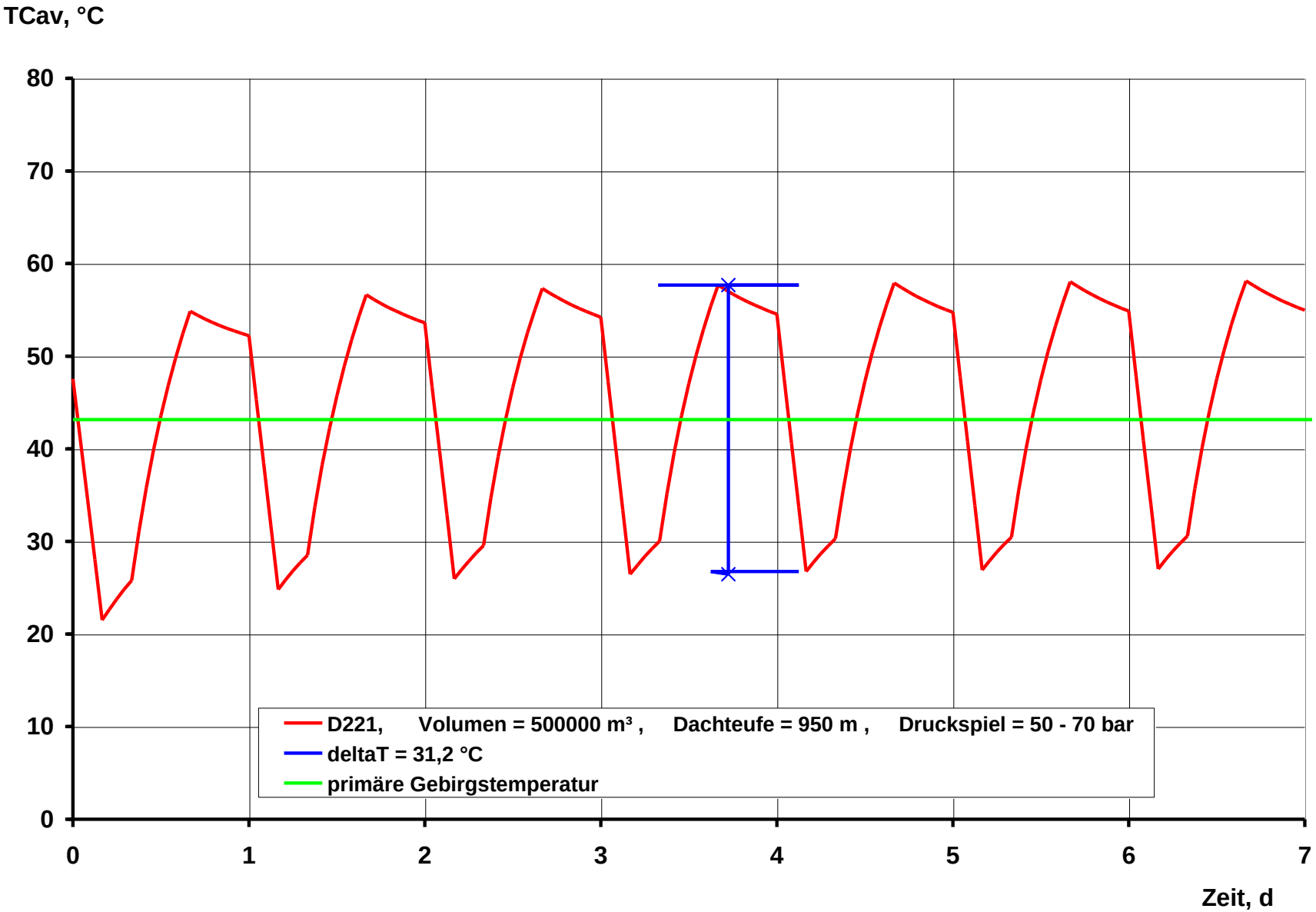


Abbildung 12

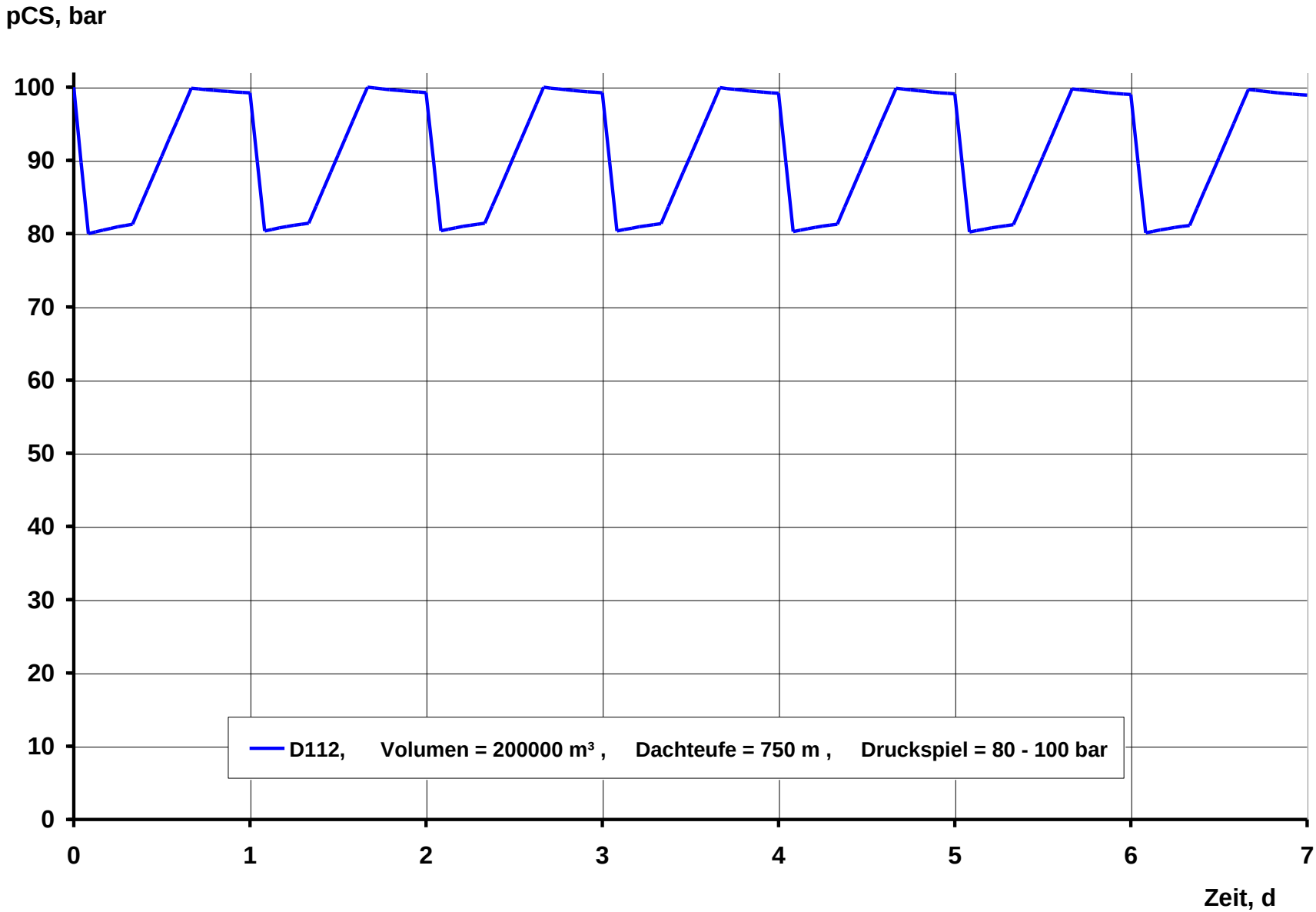


Abbildung 13

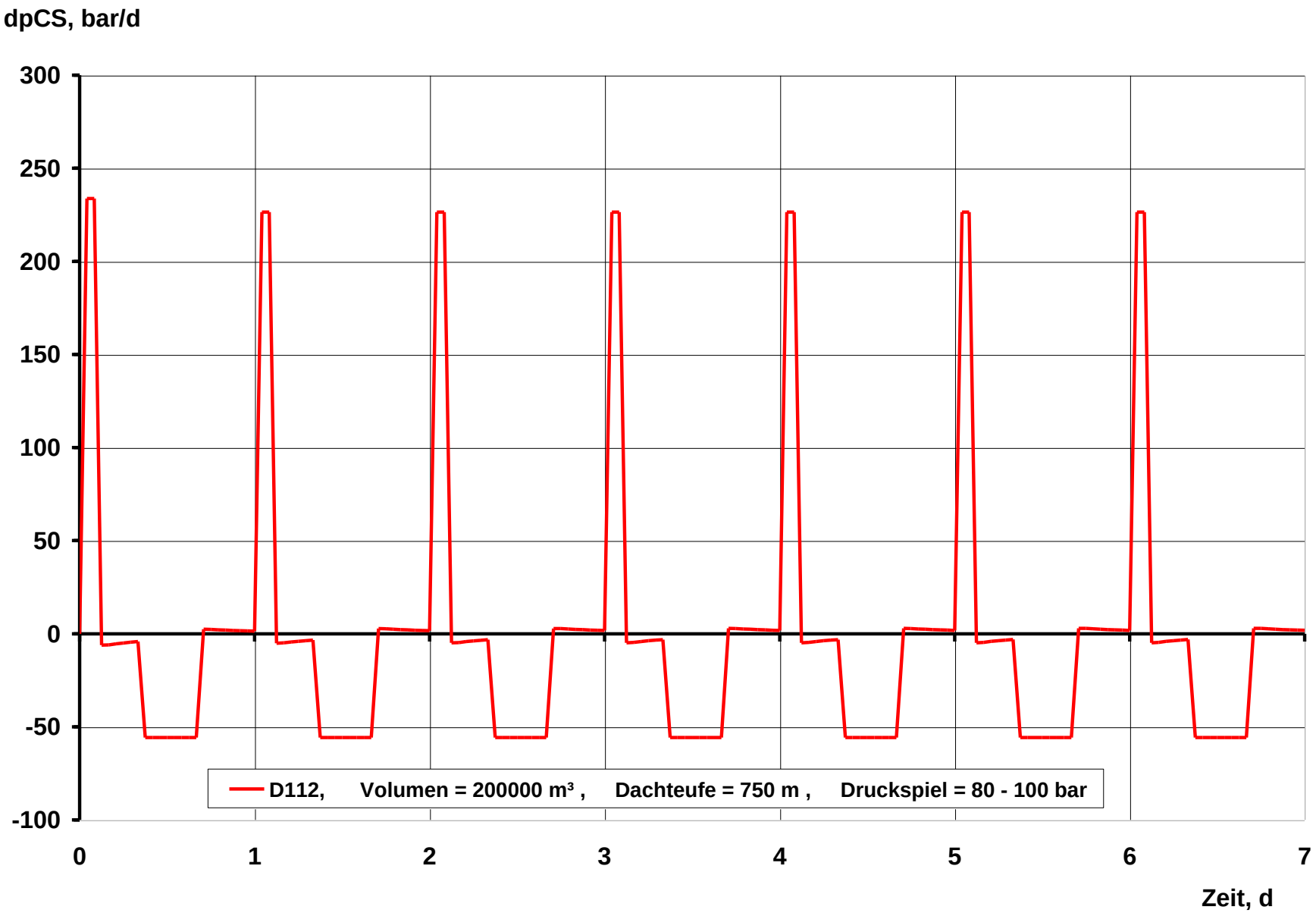


Abbildung 14

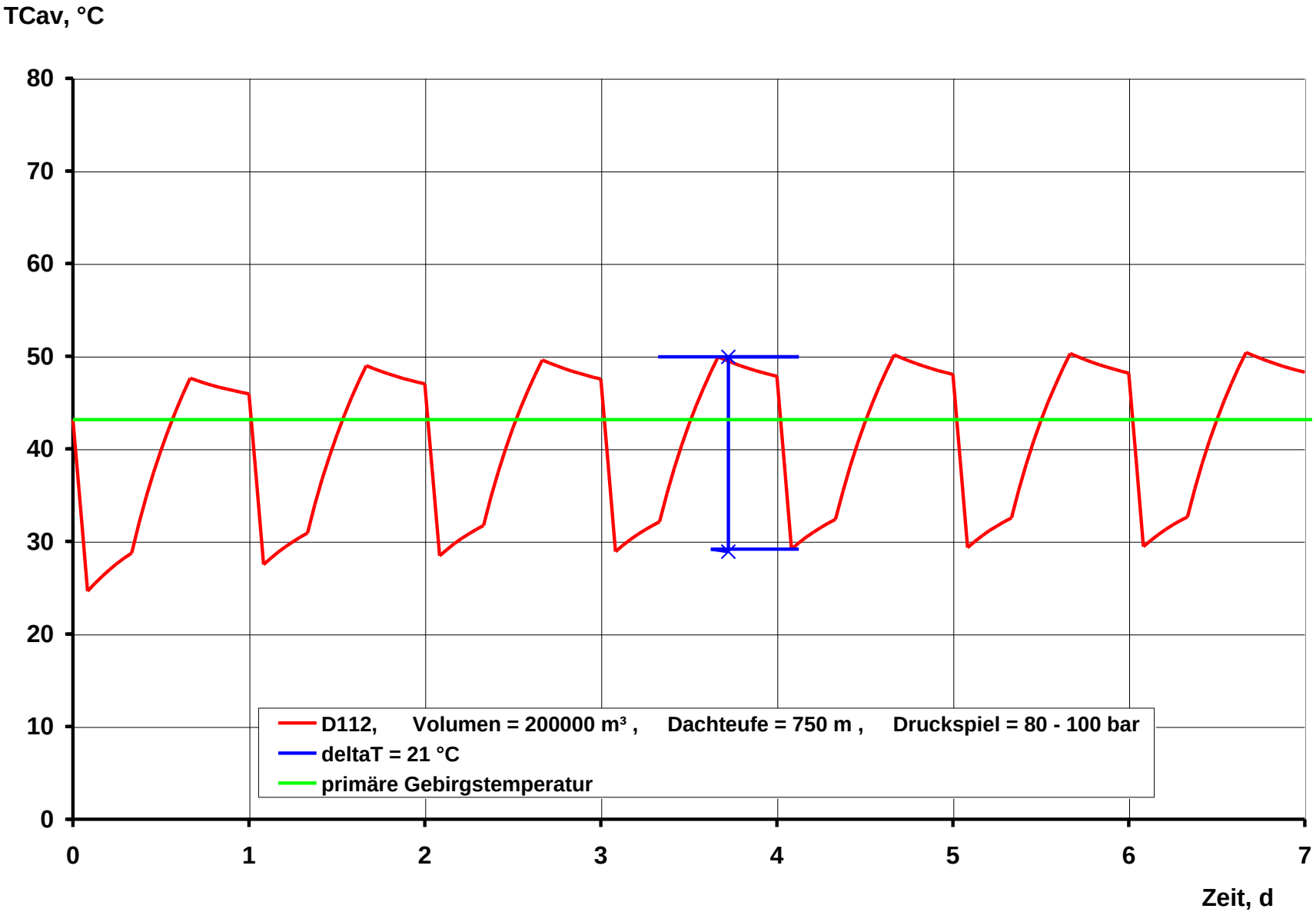


Abbildung 15

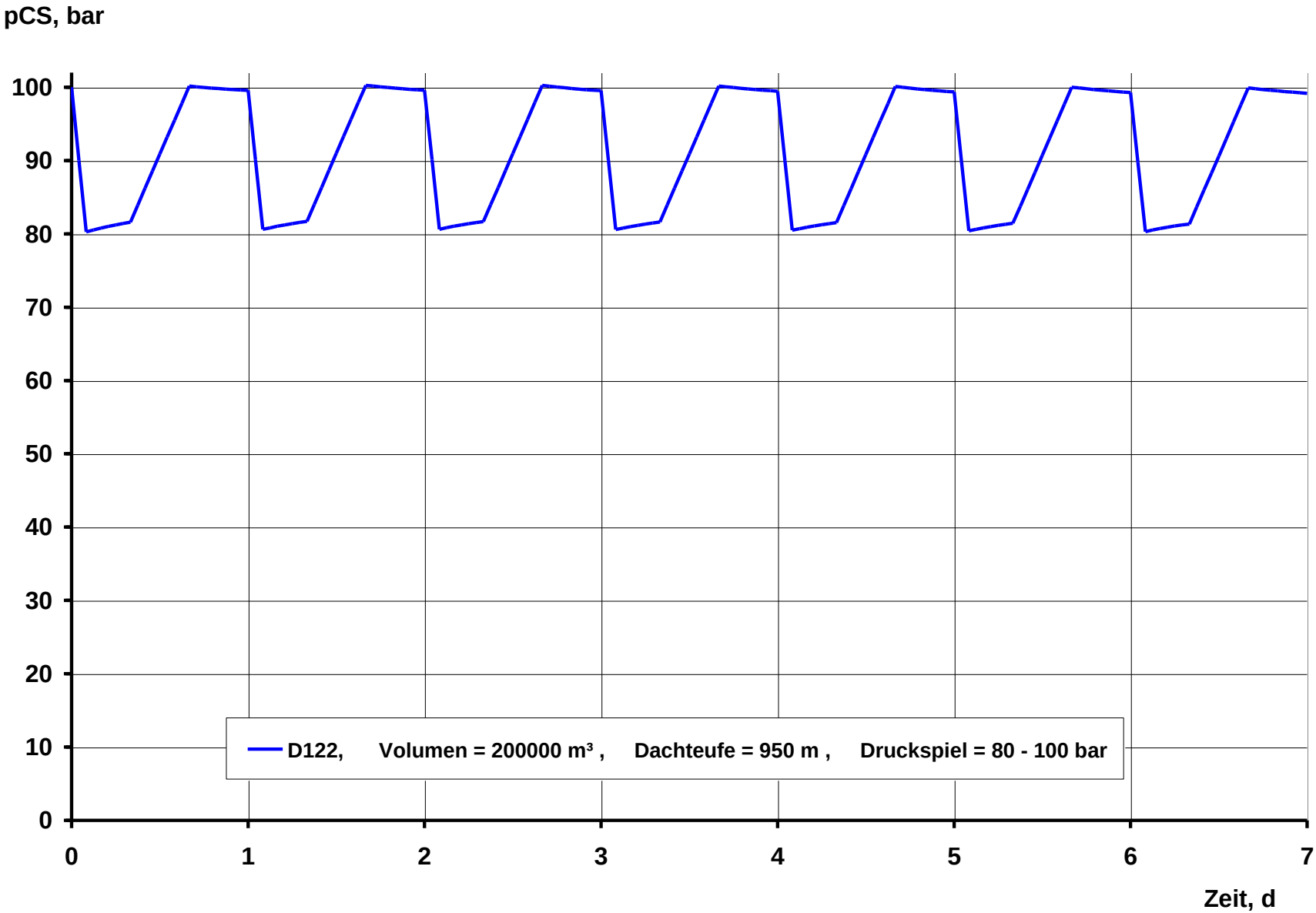


Abbildung 16

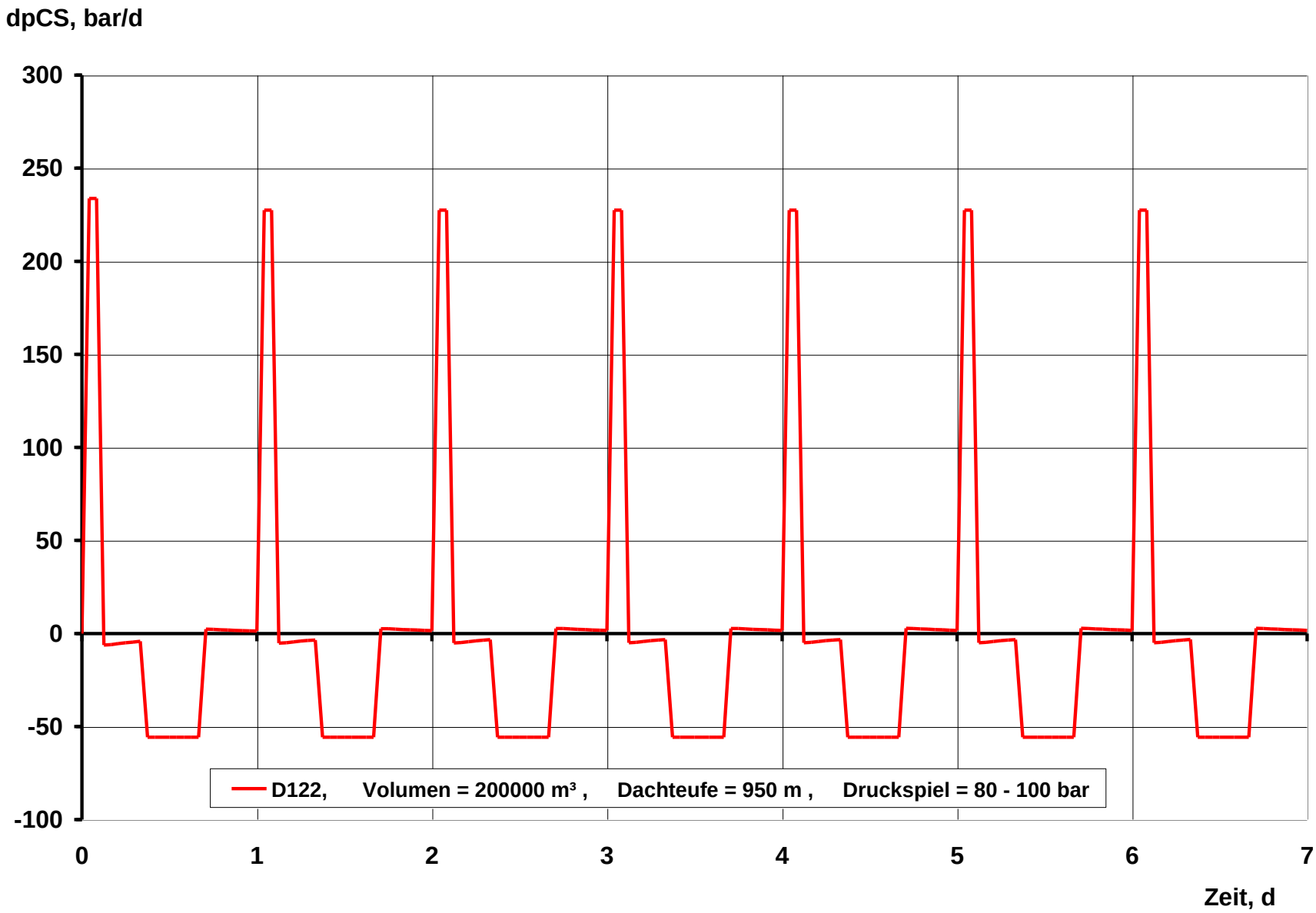


Abbildung 17

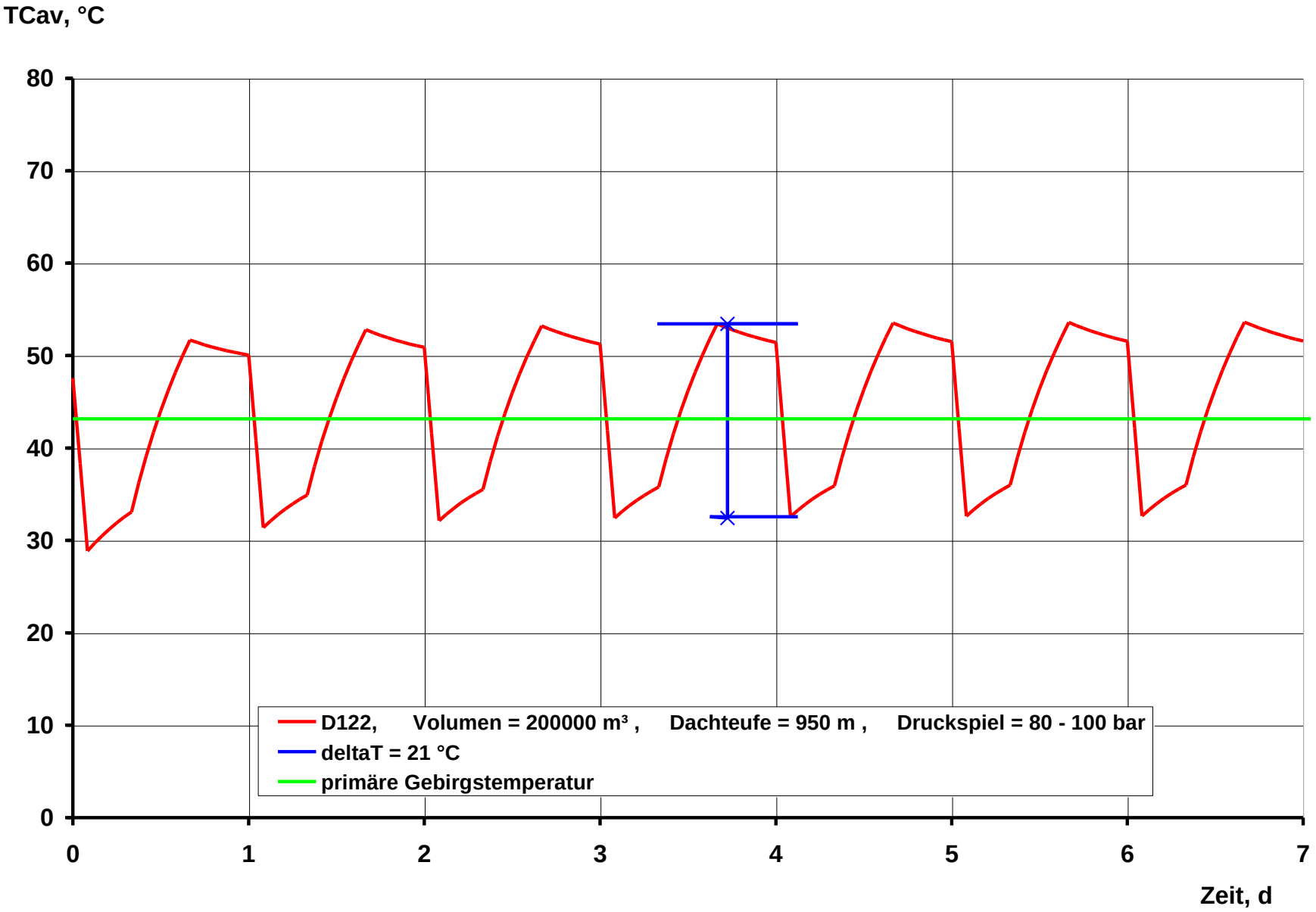


Abbildung 18

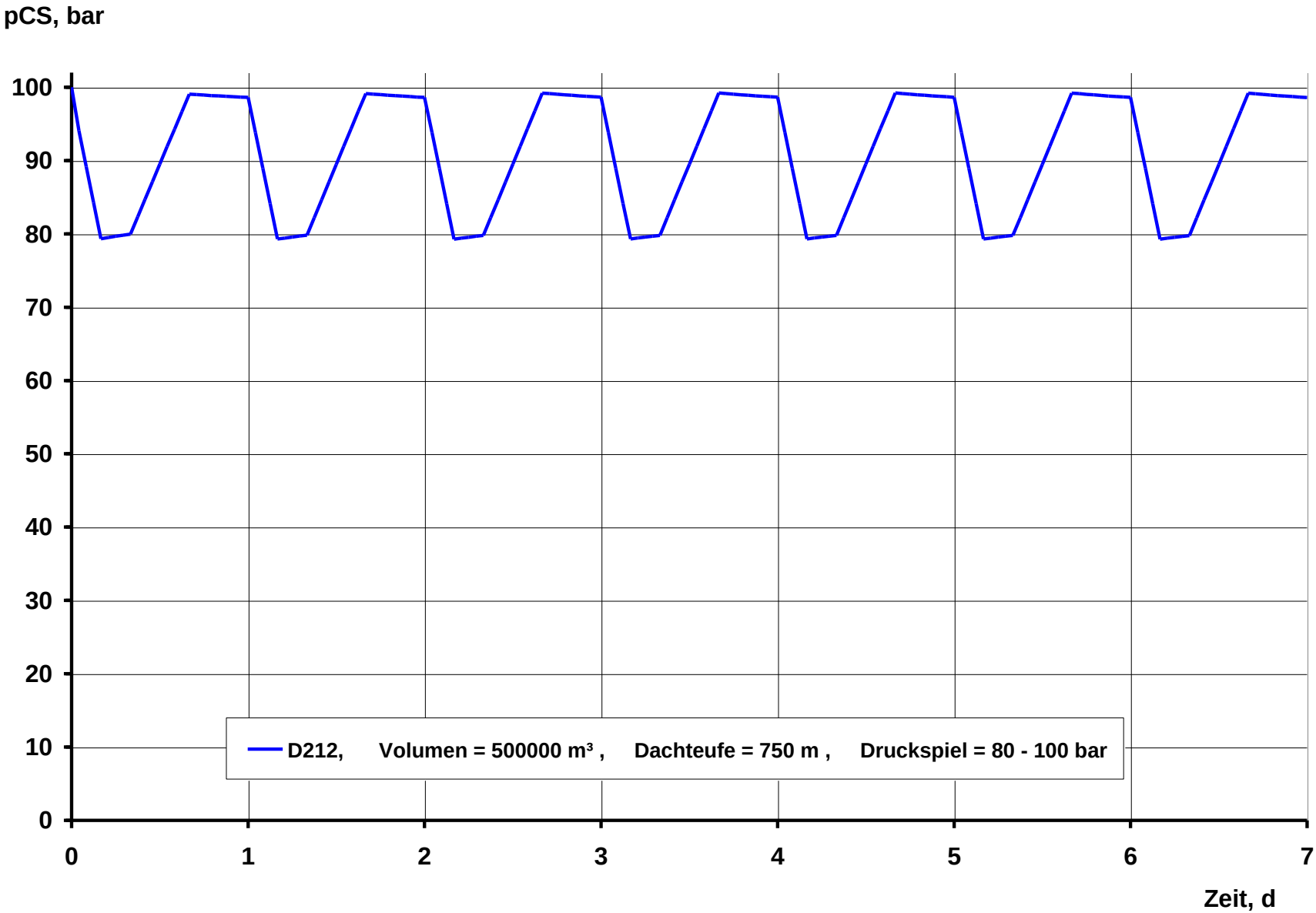


Abbildung 19

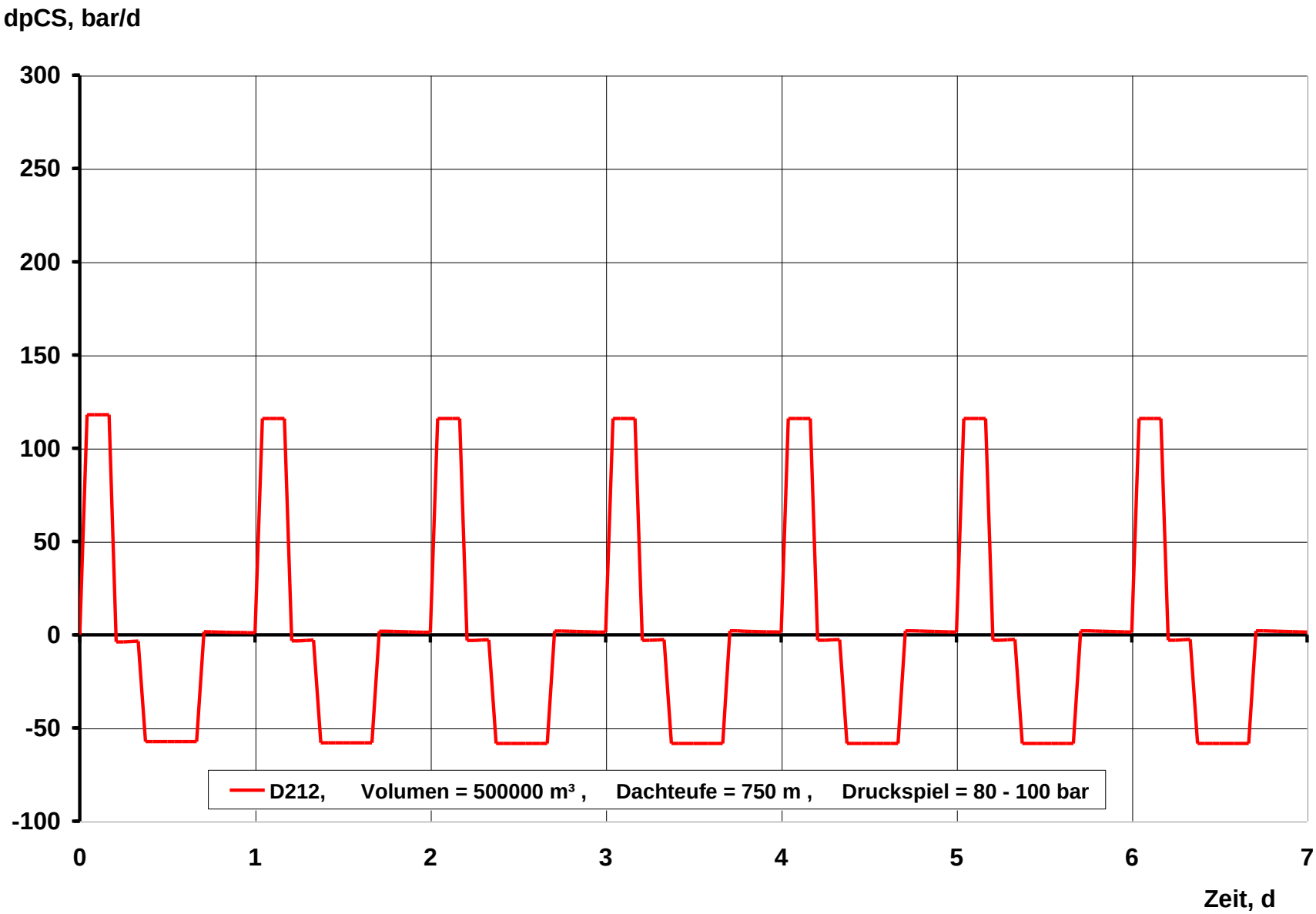


Abbildung 20

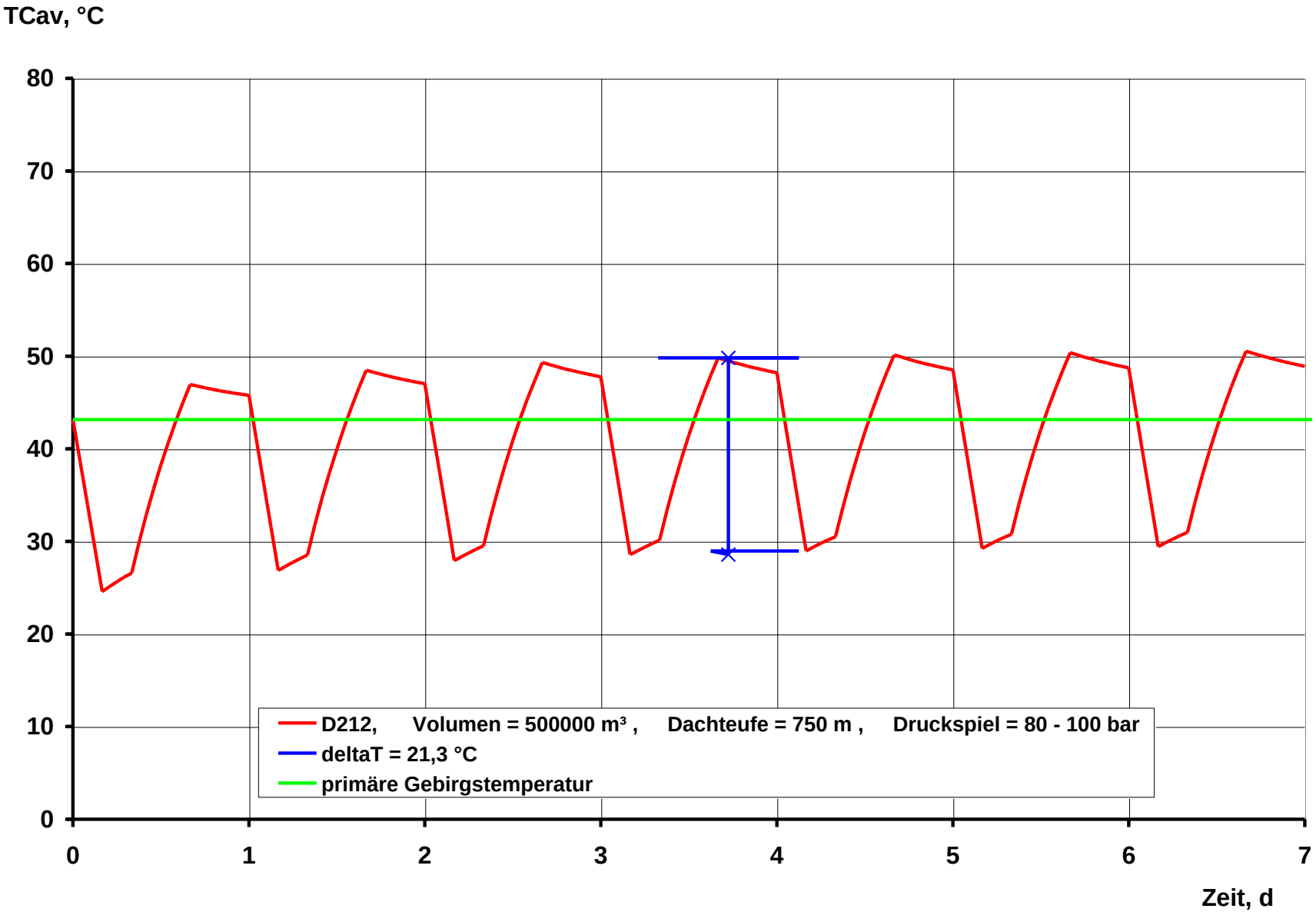


Abbildung 21

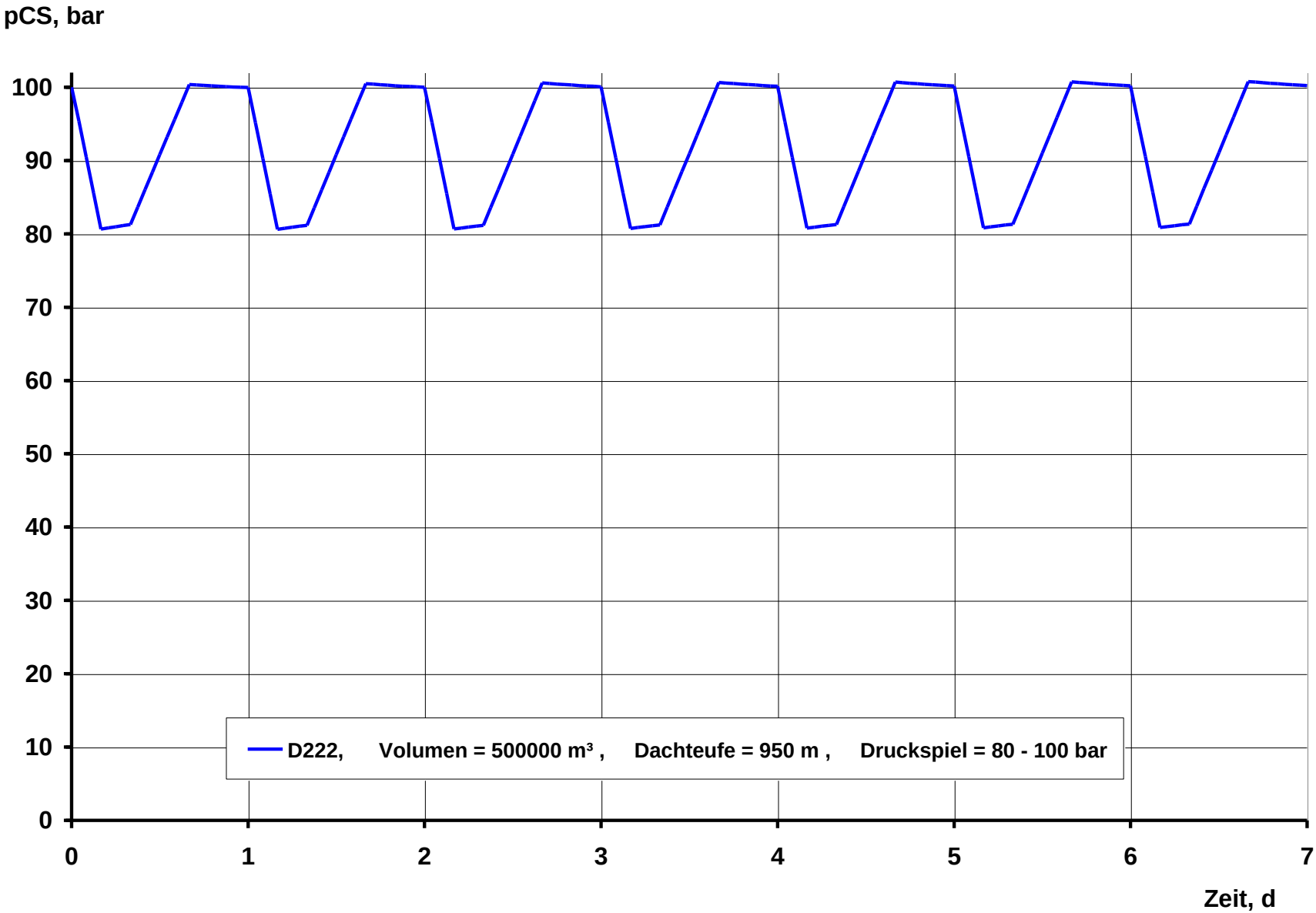


Abbildung 22

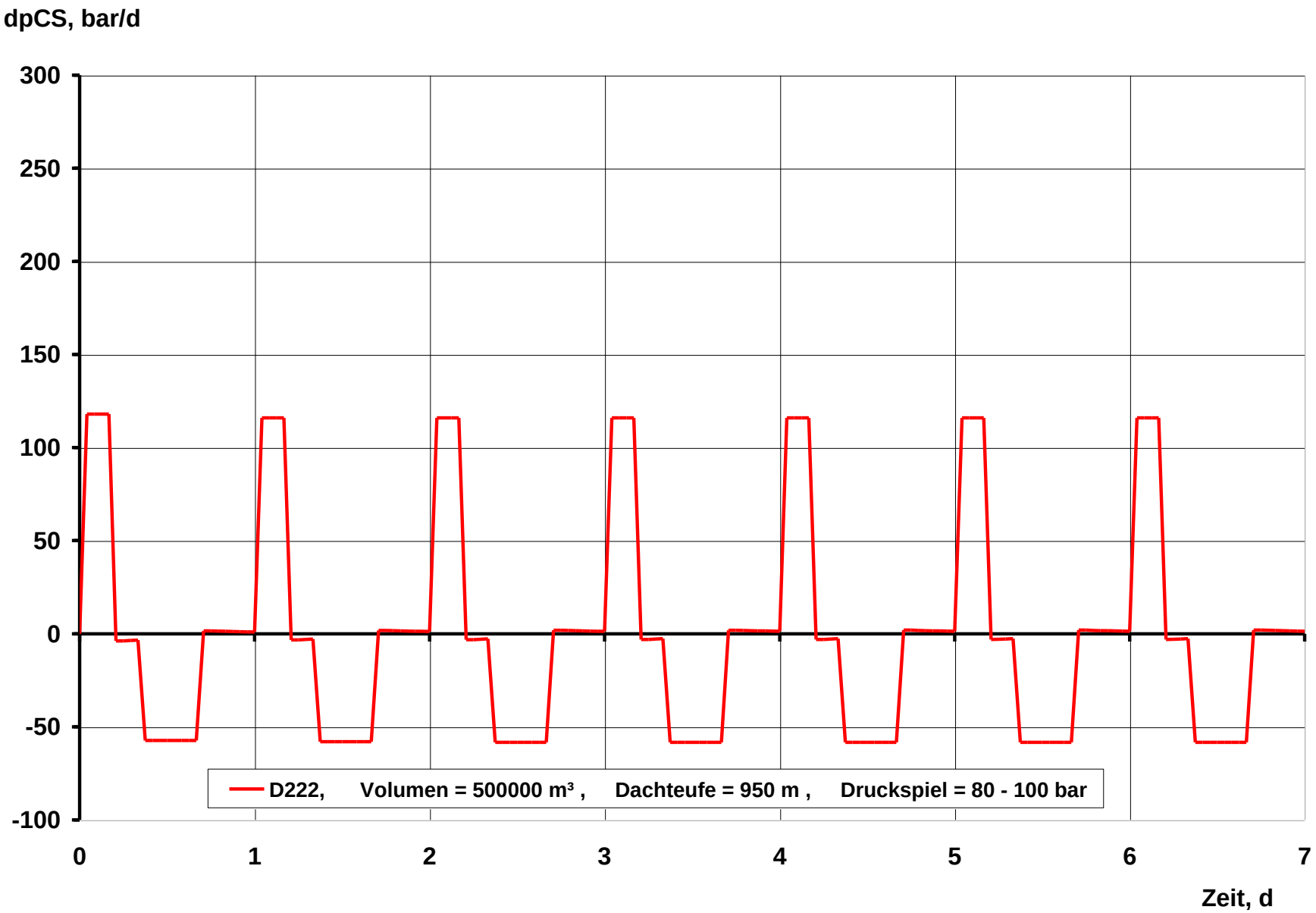


Abbildung 23

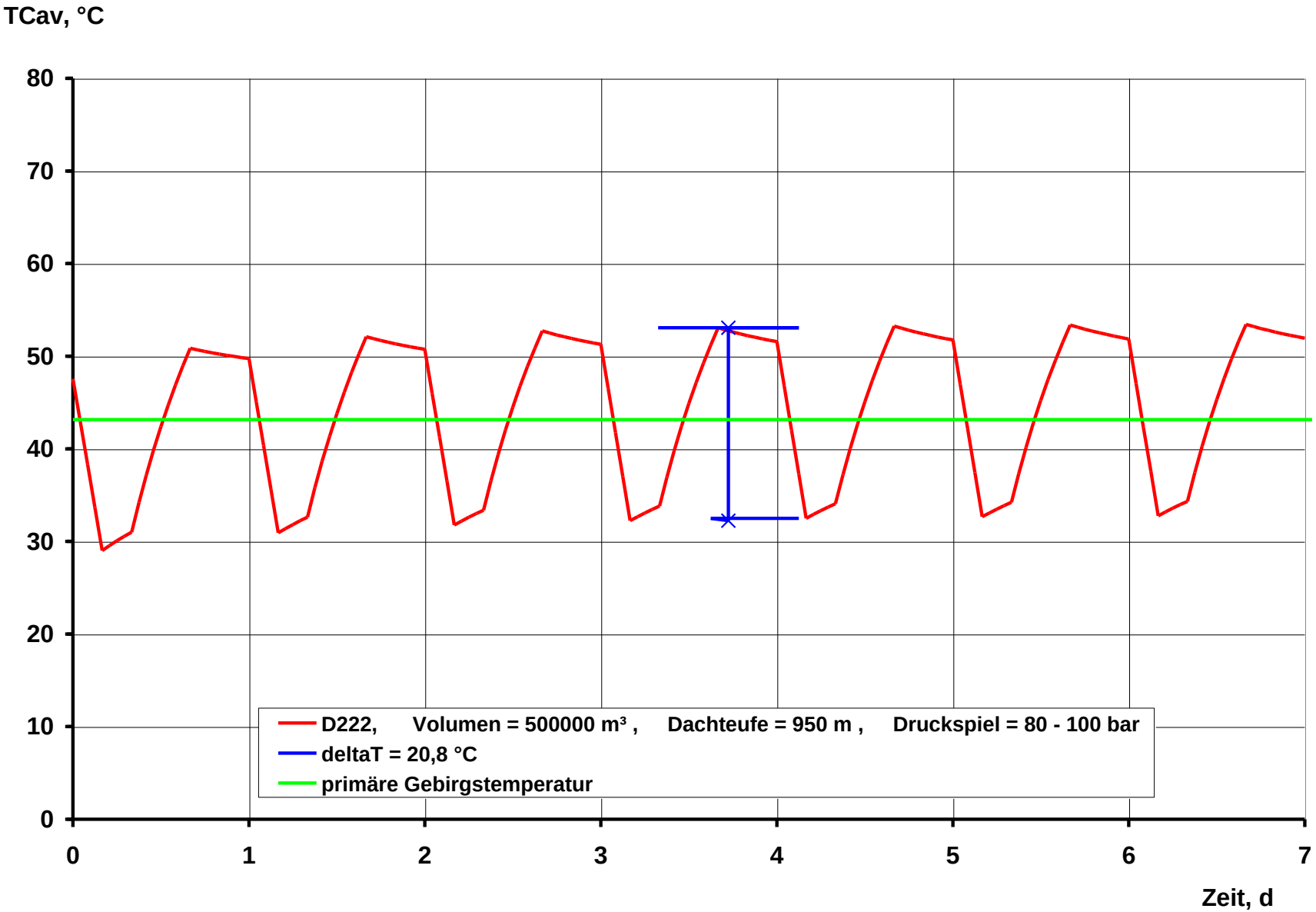


Abbildung 24

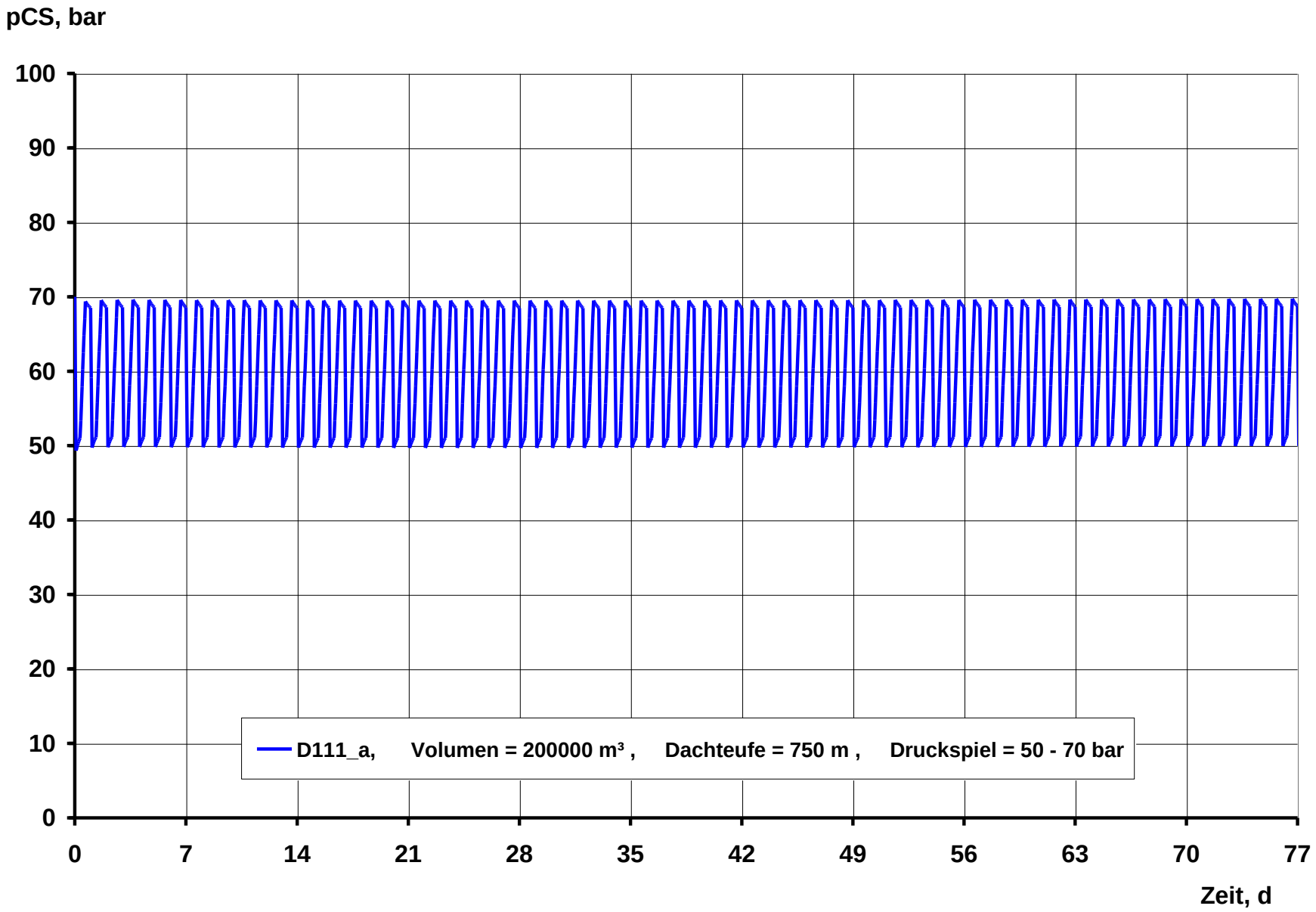


Abbildung 25: 76 Tage Wechsel (wie Berechnung in Abbildung 1)

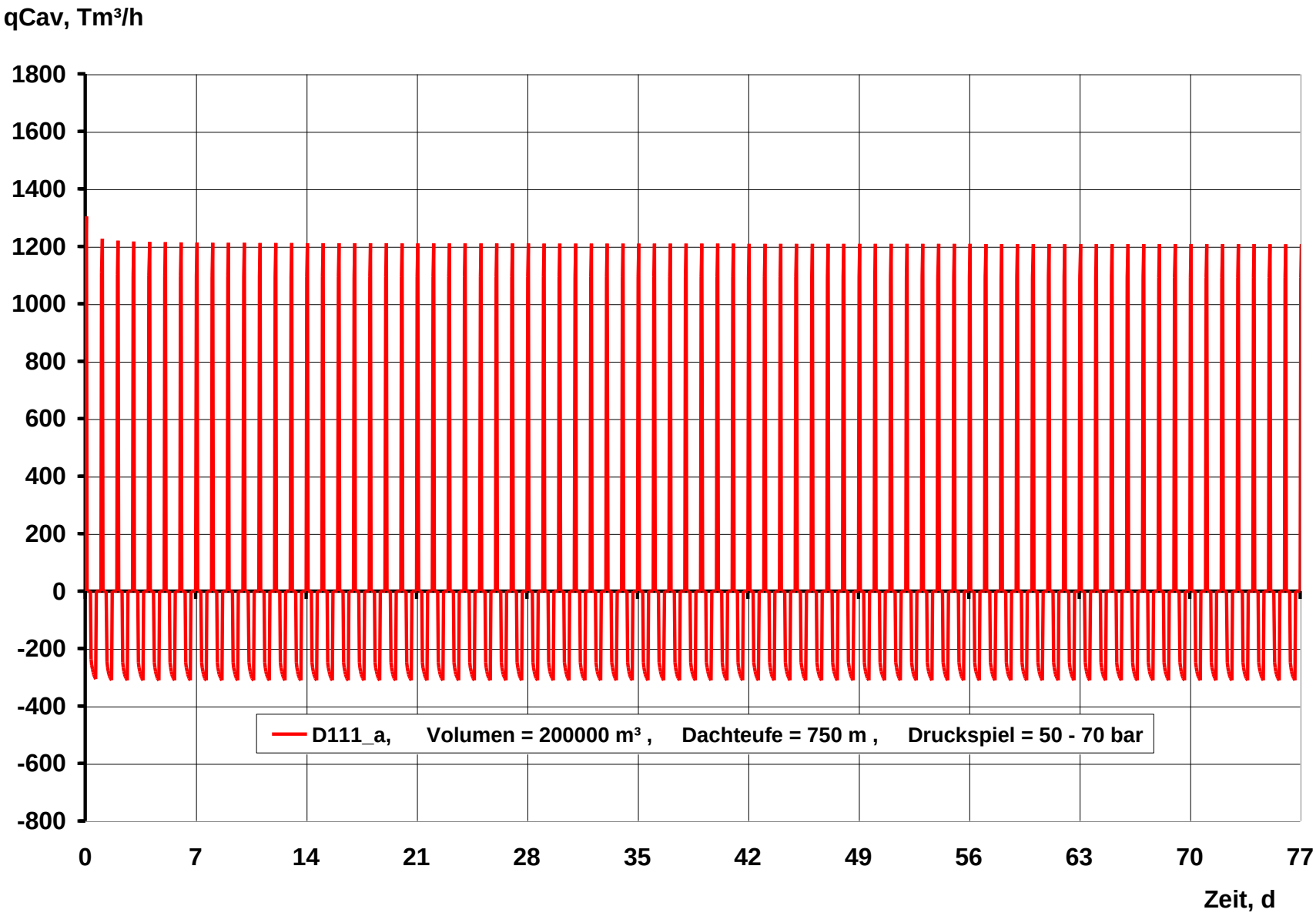


Abbildung 26: 76 Tage Wechsel

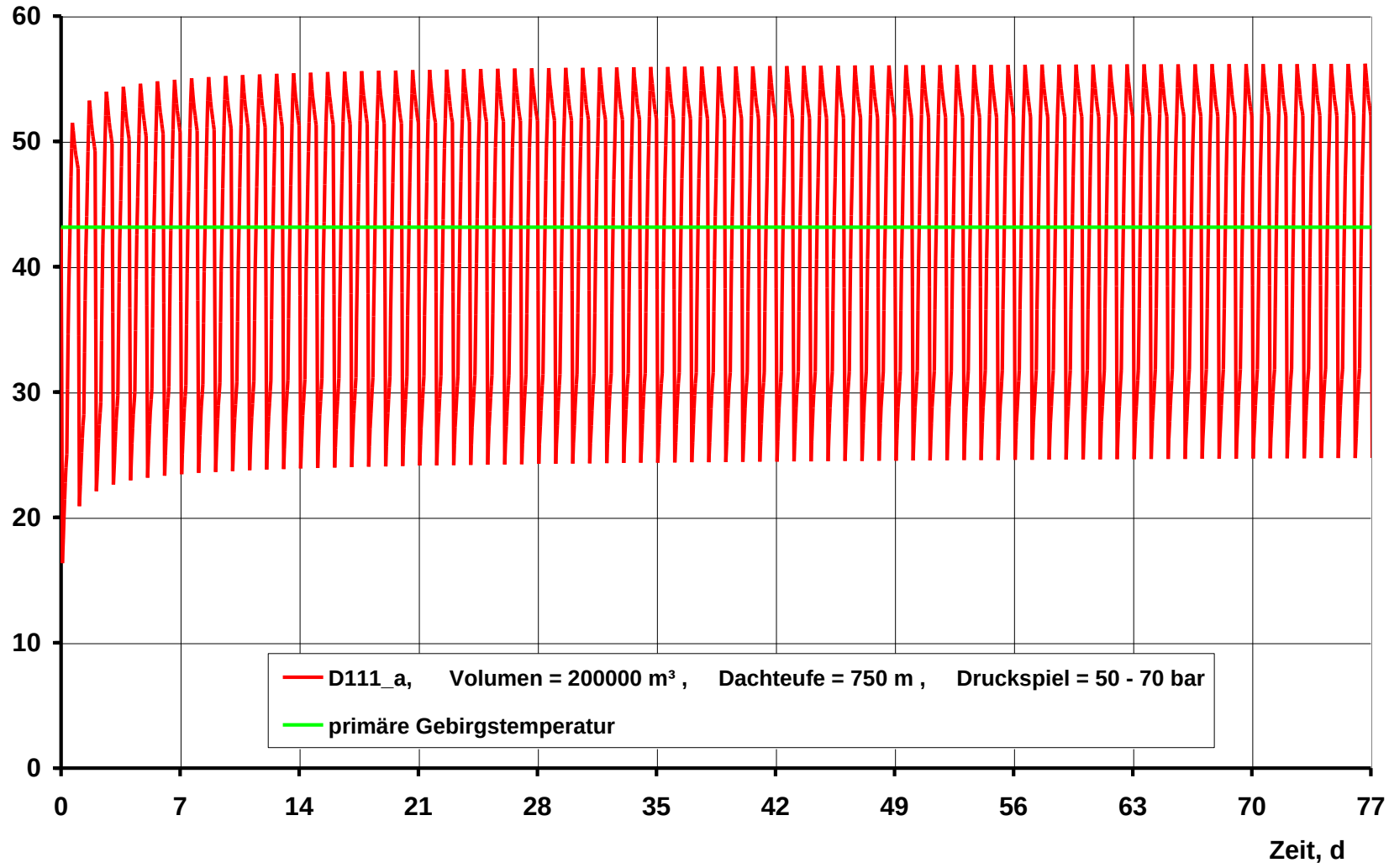


Abbildung 27: 76 Tage Wechsel

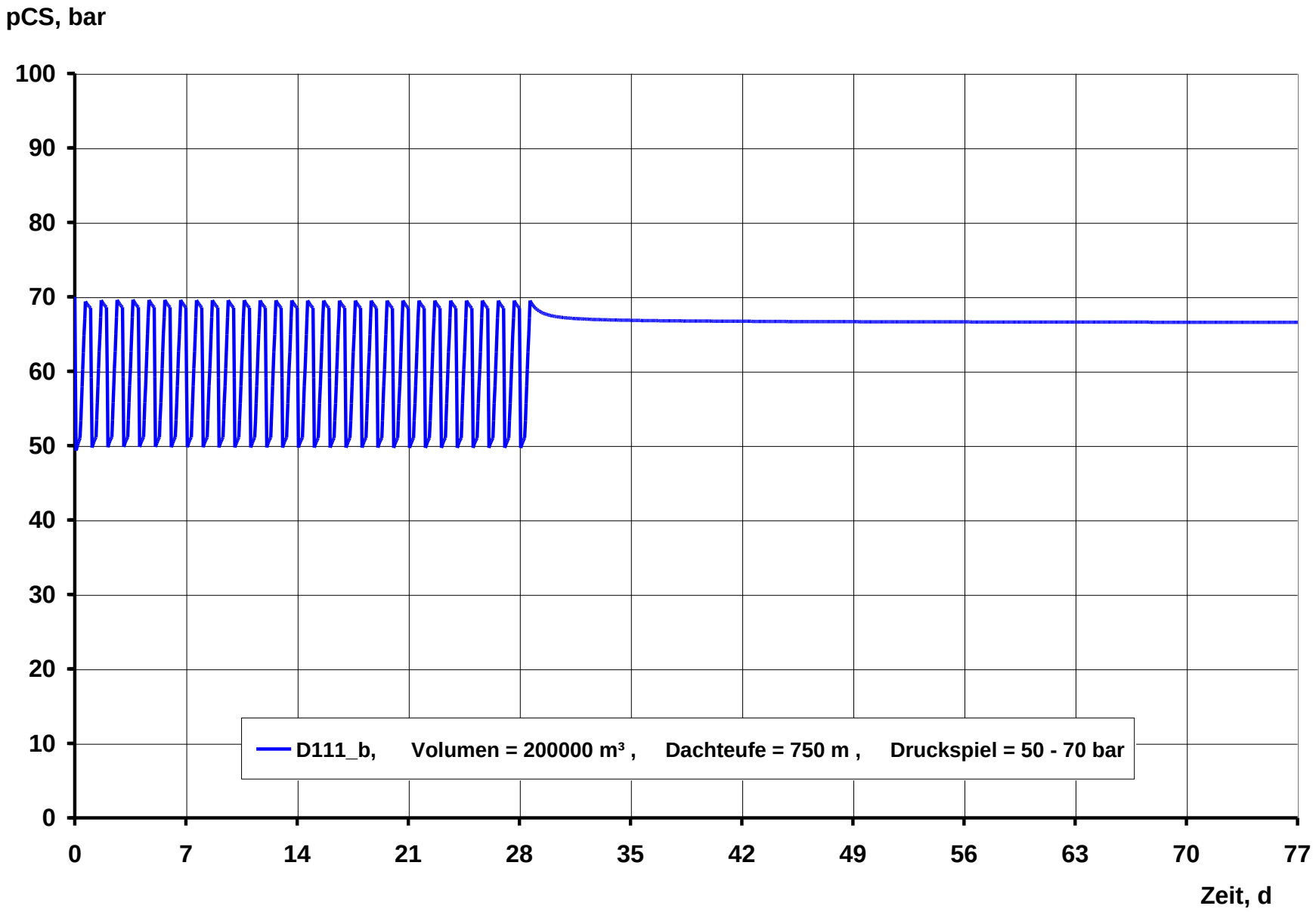


Abbildung 28: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

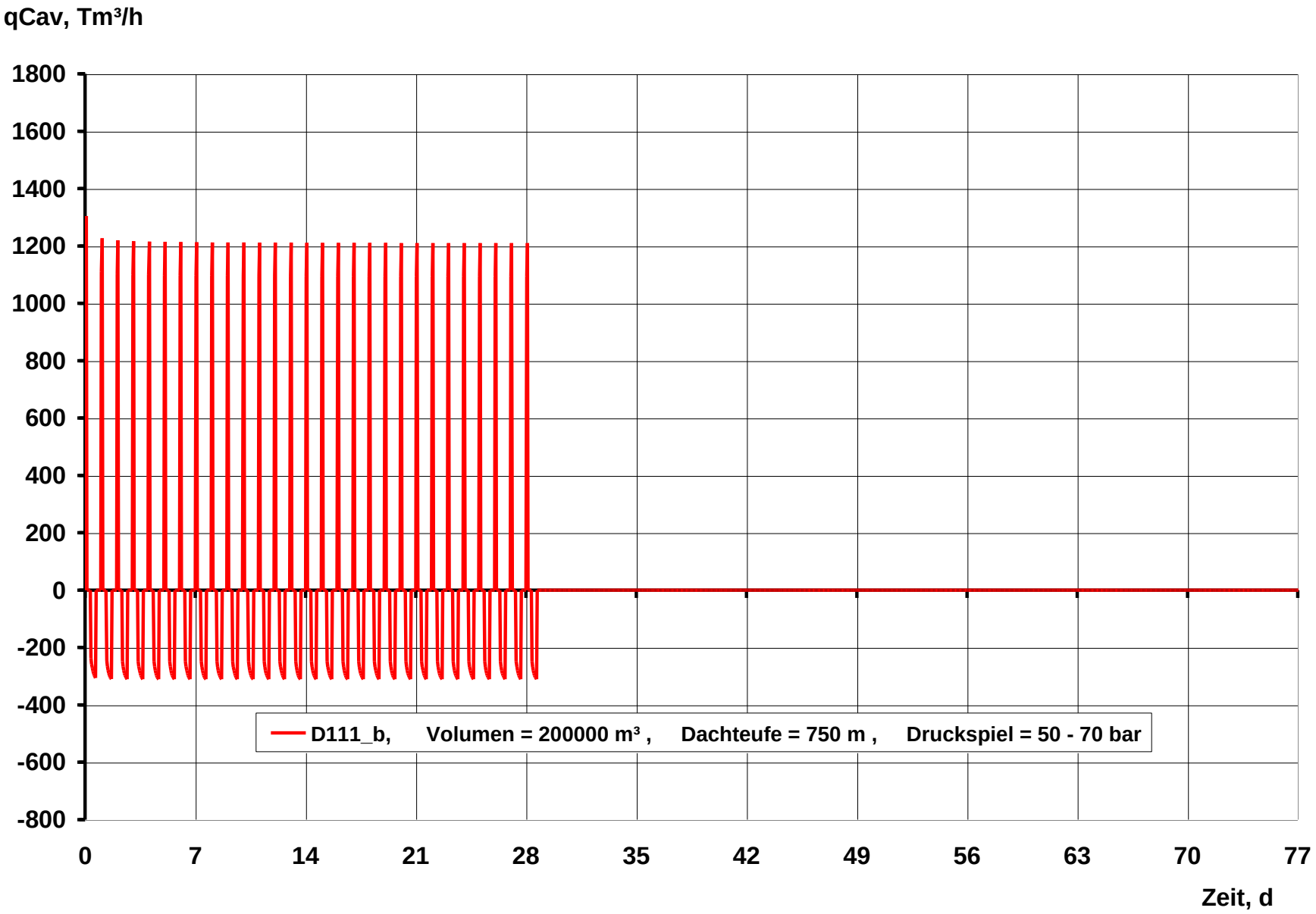


Abbildung 29: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

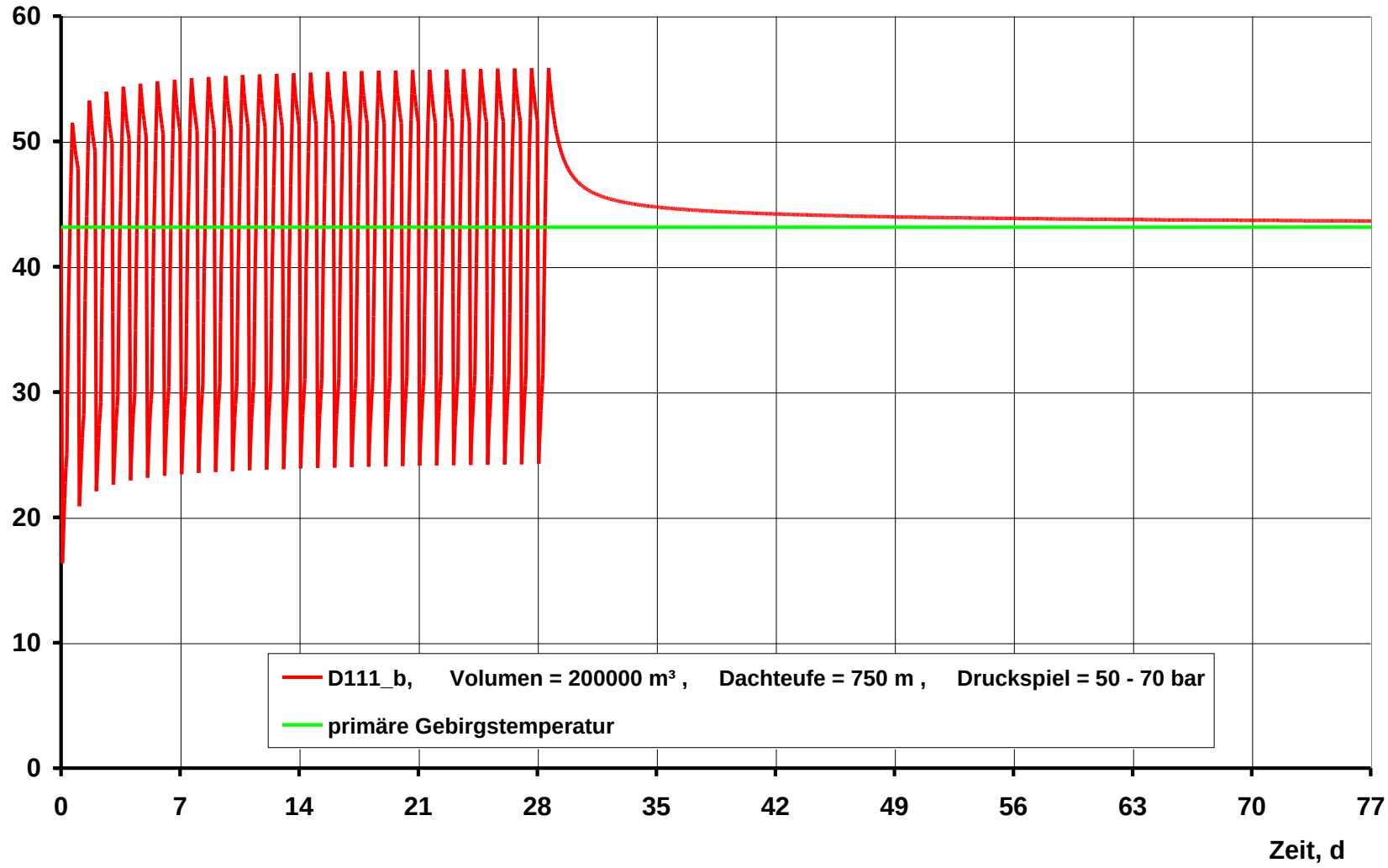


Abbildung 30: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 70 bar

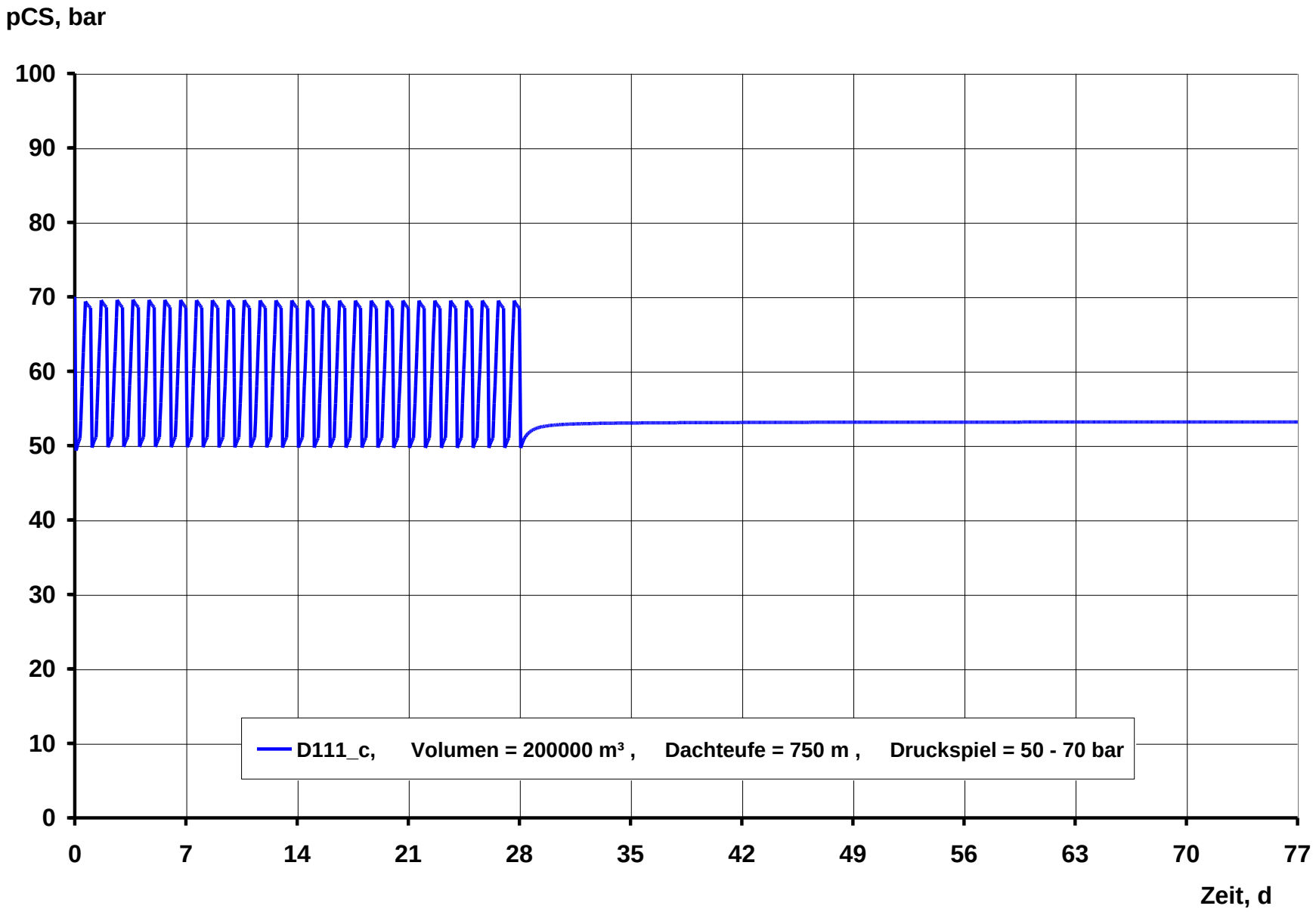


Abbildung 31: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

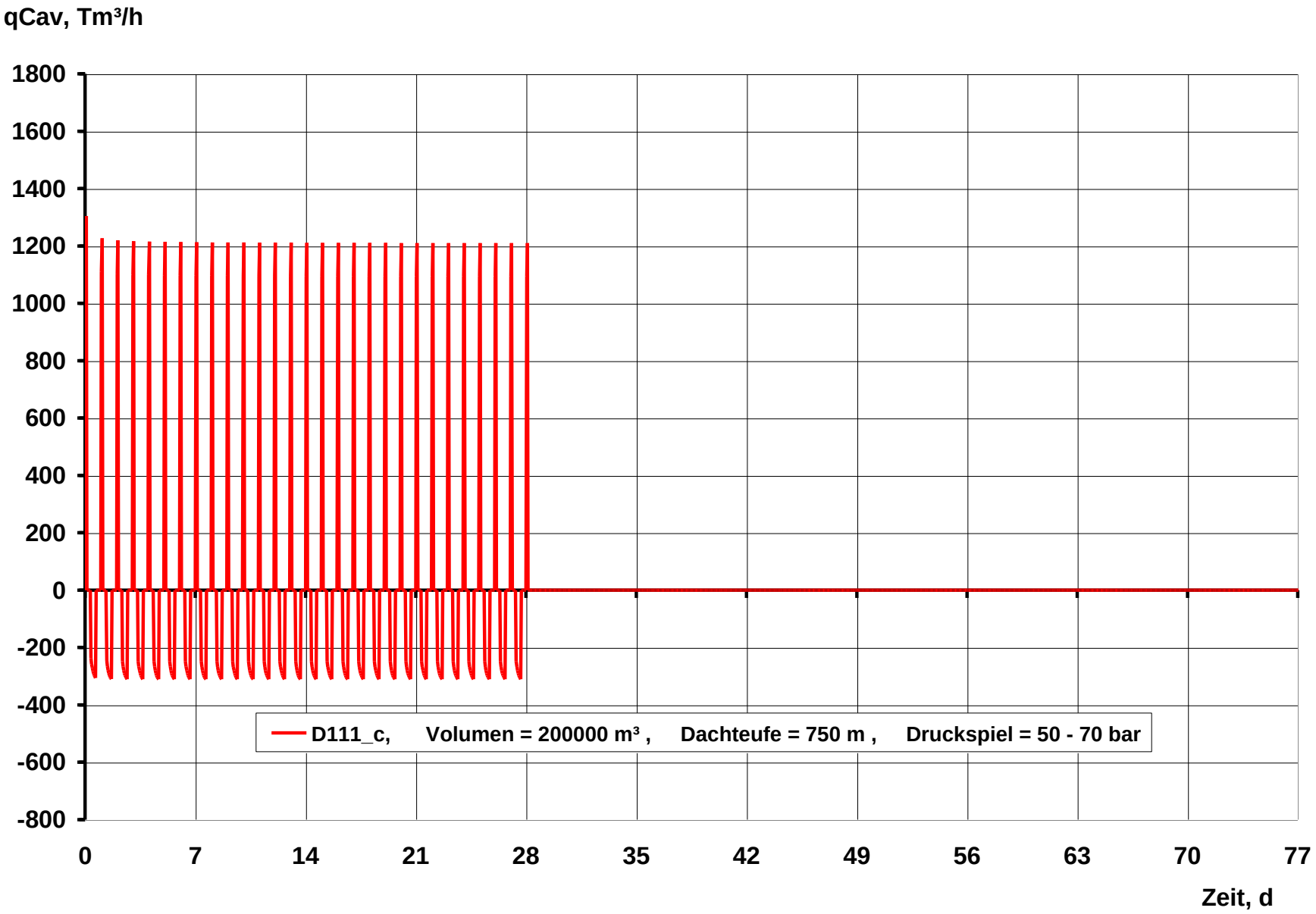


Abbildung 32: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

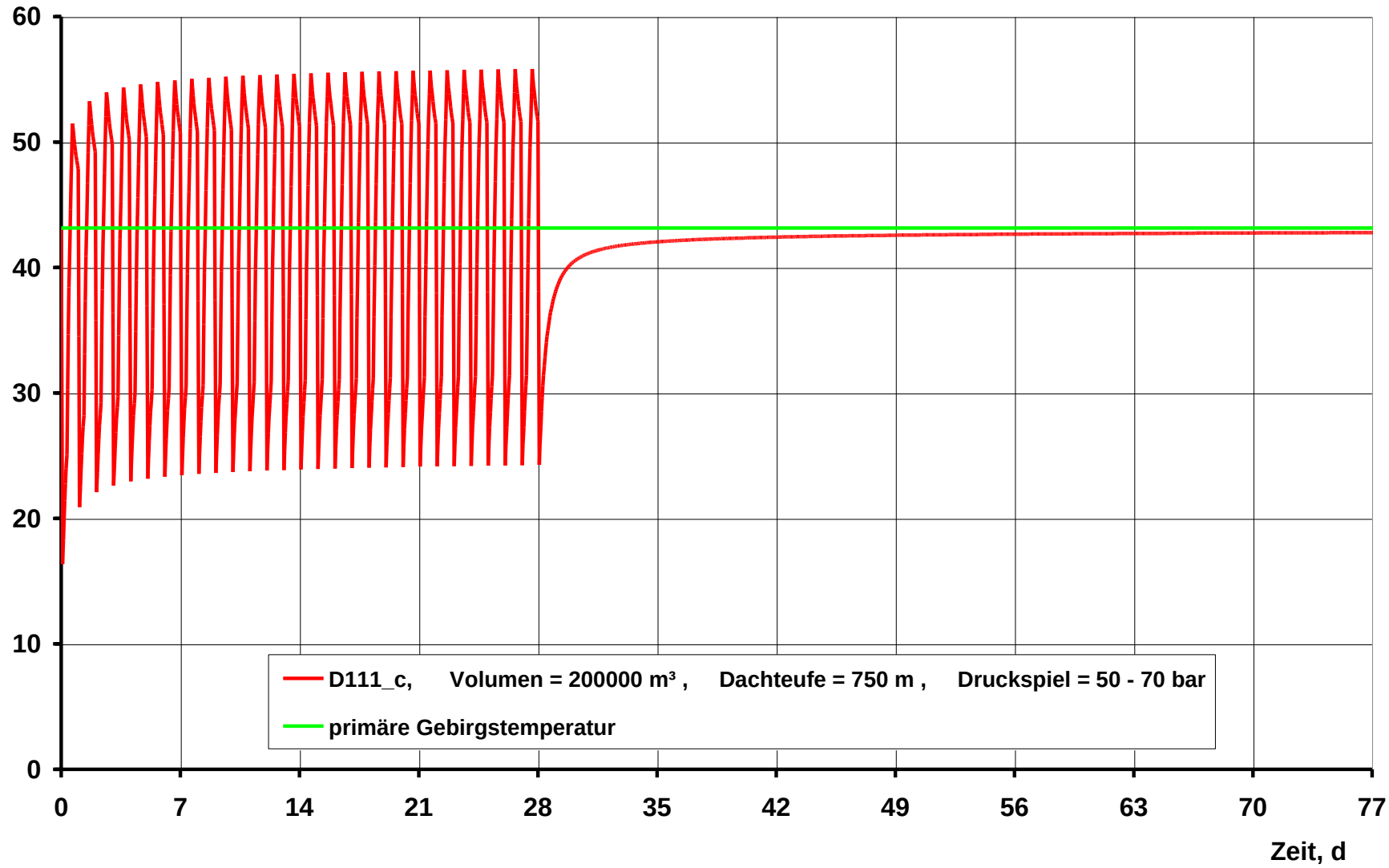


Abbildung 33: 28 Tage Wechsel, danach Stillstand bei 50 bar

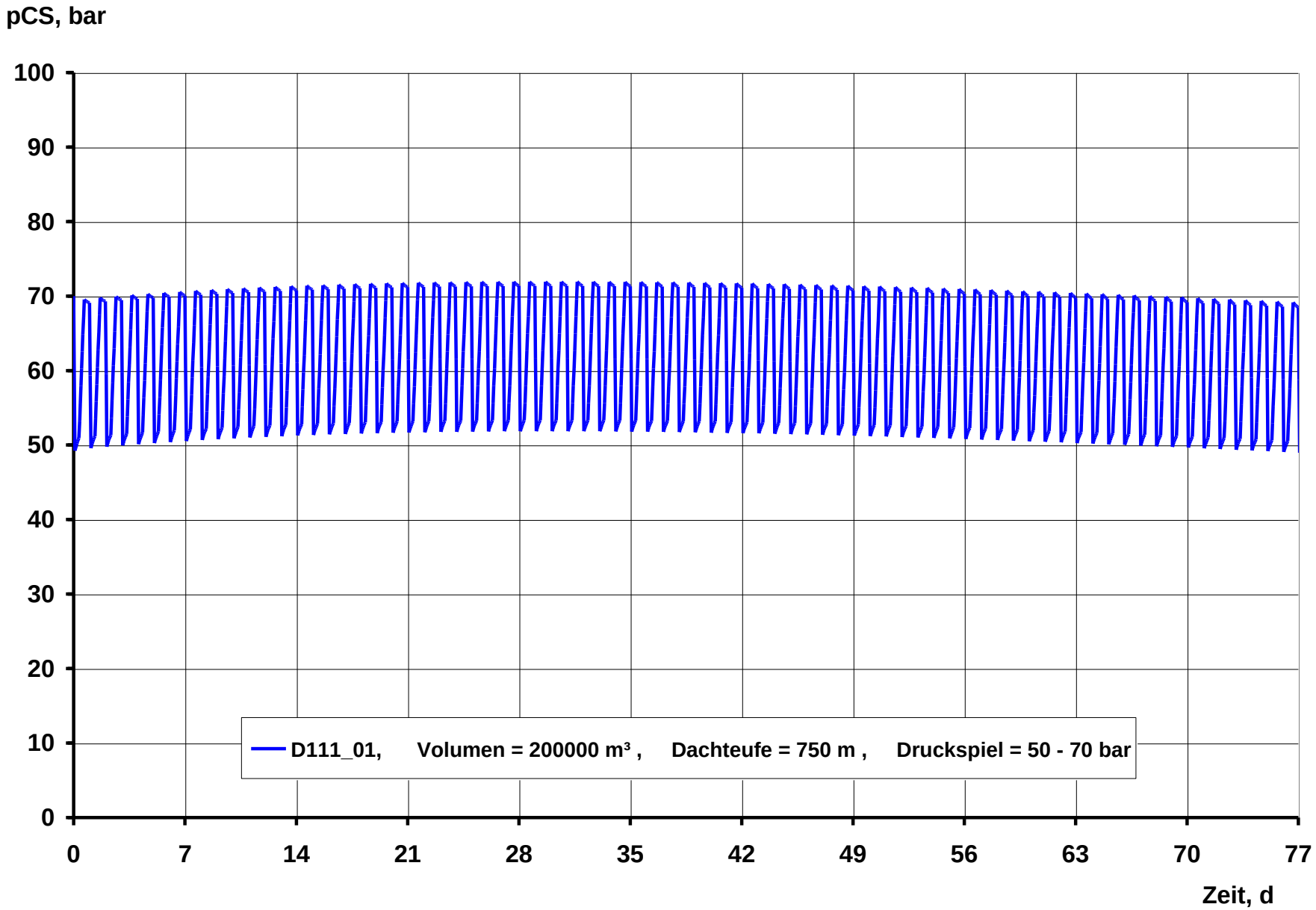


Abbildung 34: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 1 °C

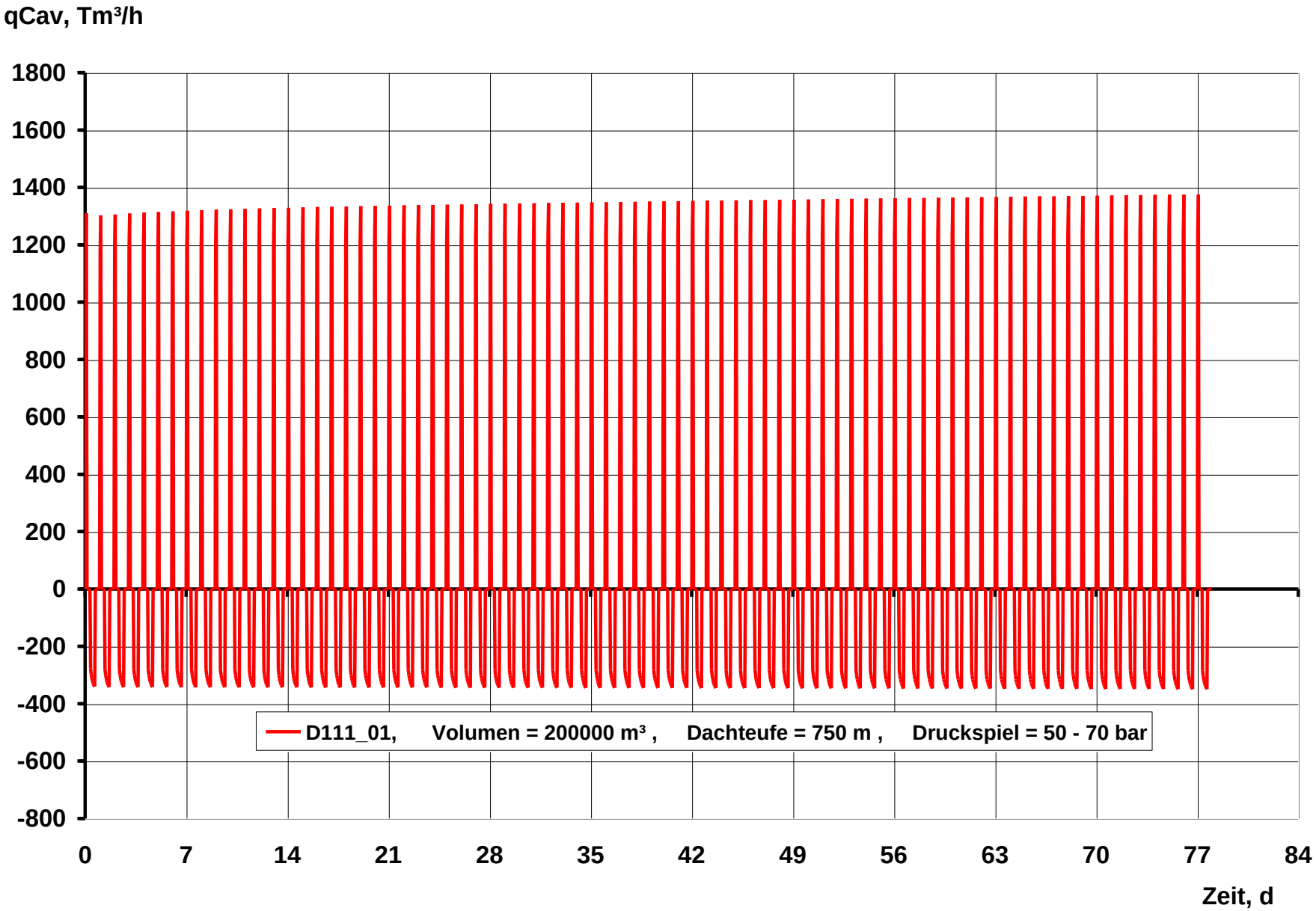


Abbildung 35: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 1 °C

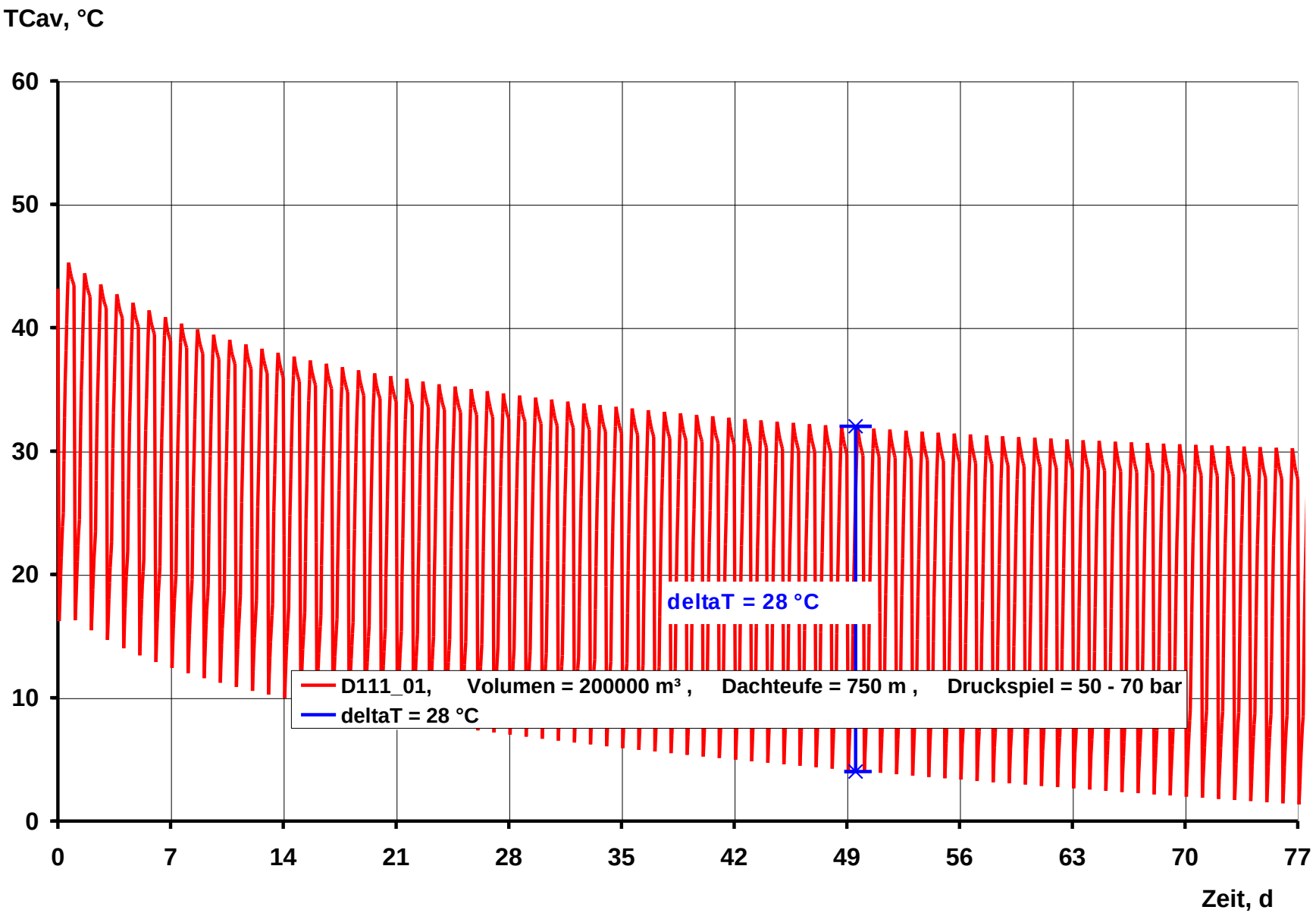


Abbildung 36: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 1 °C

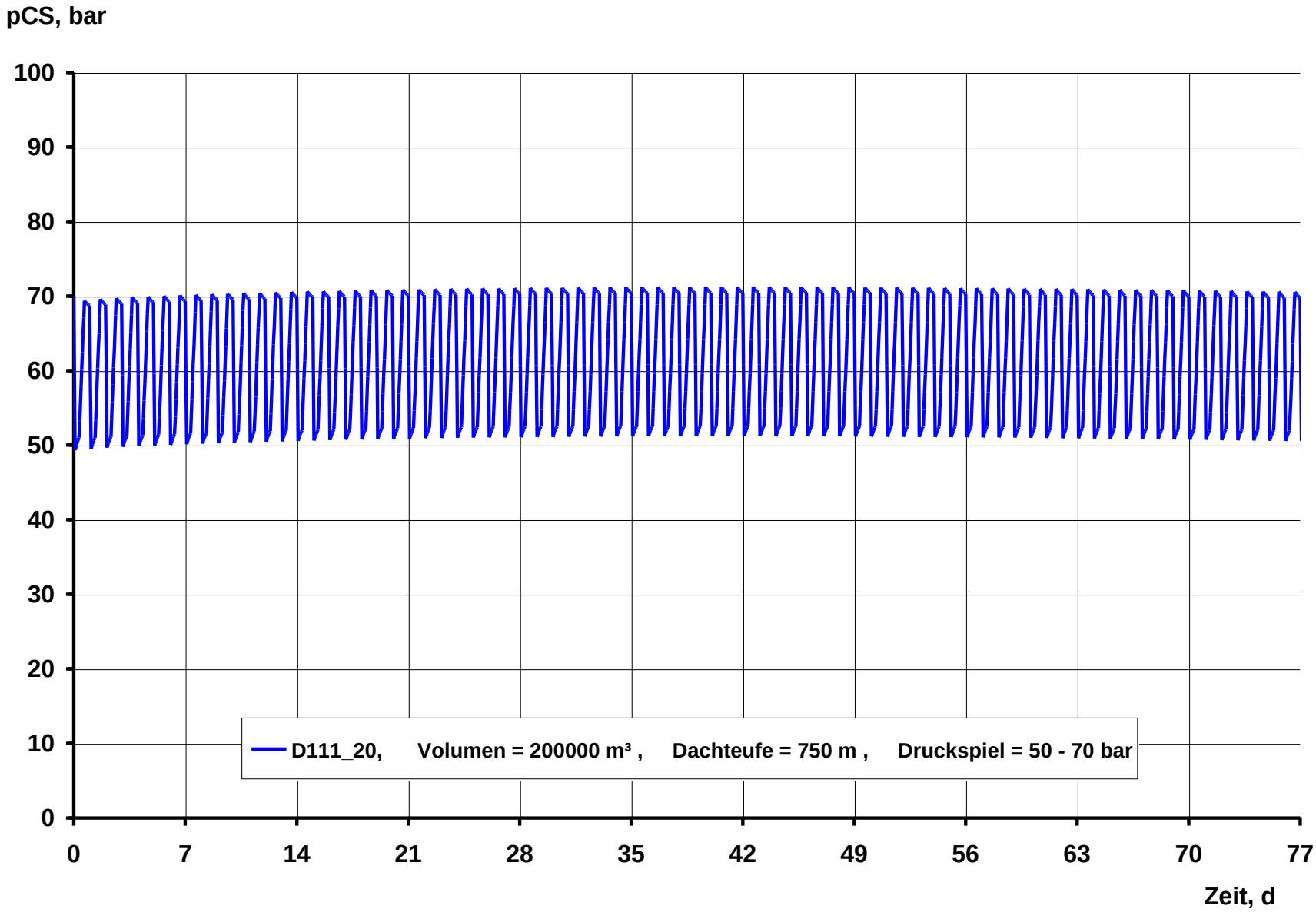


Abbildung 37: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 20 °C

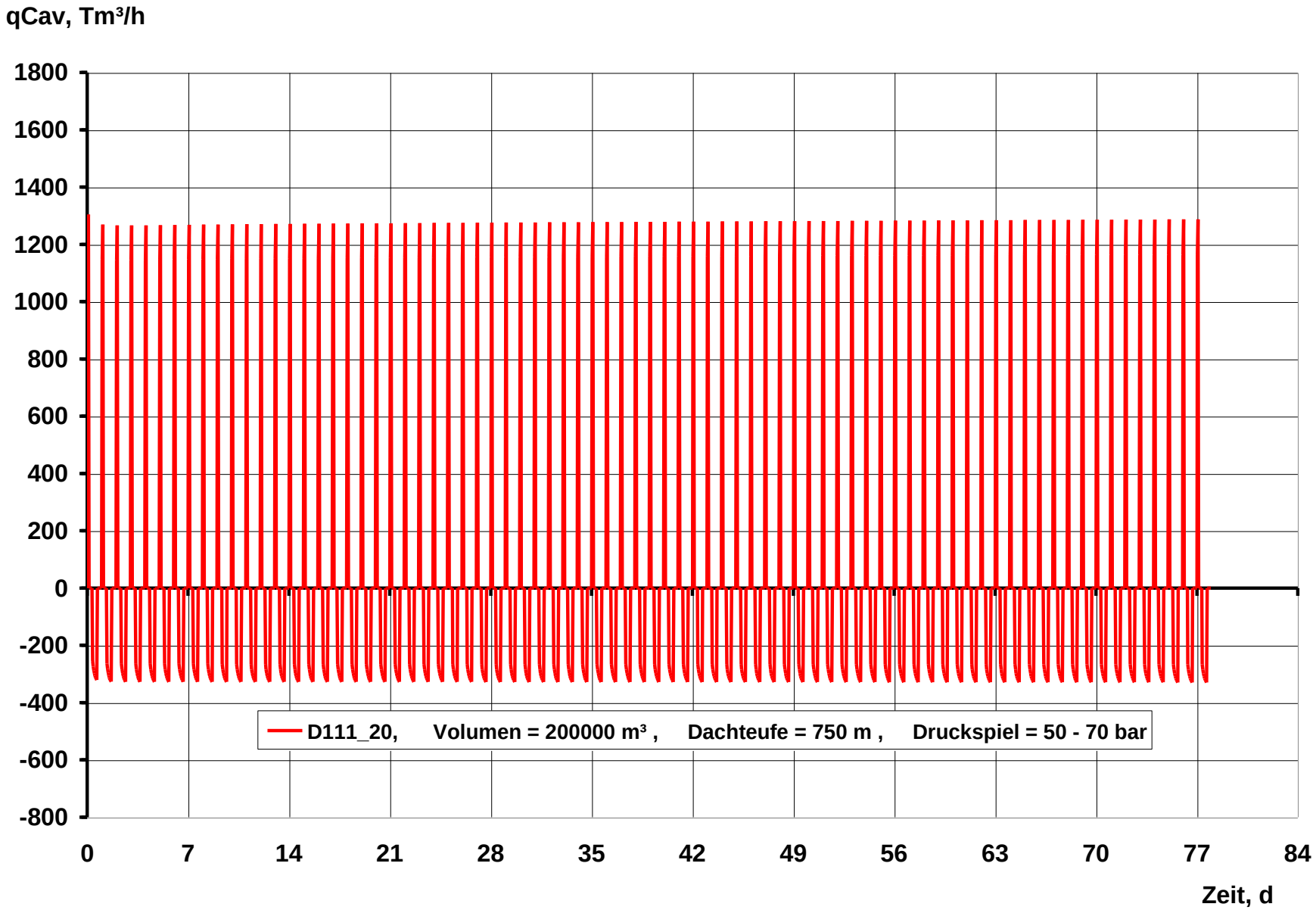


Abbildung 38: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 20 °C

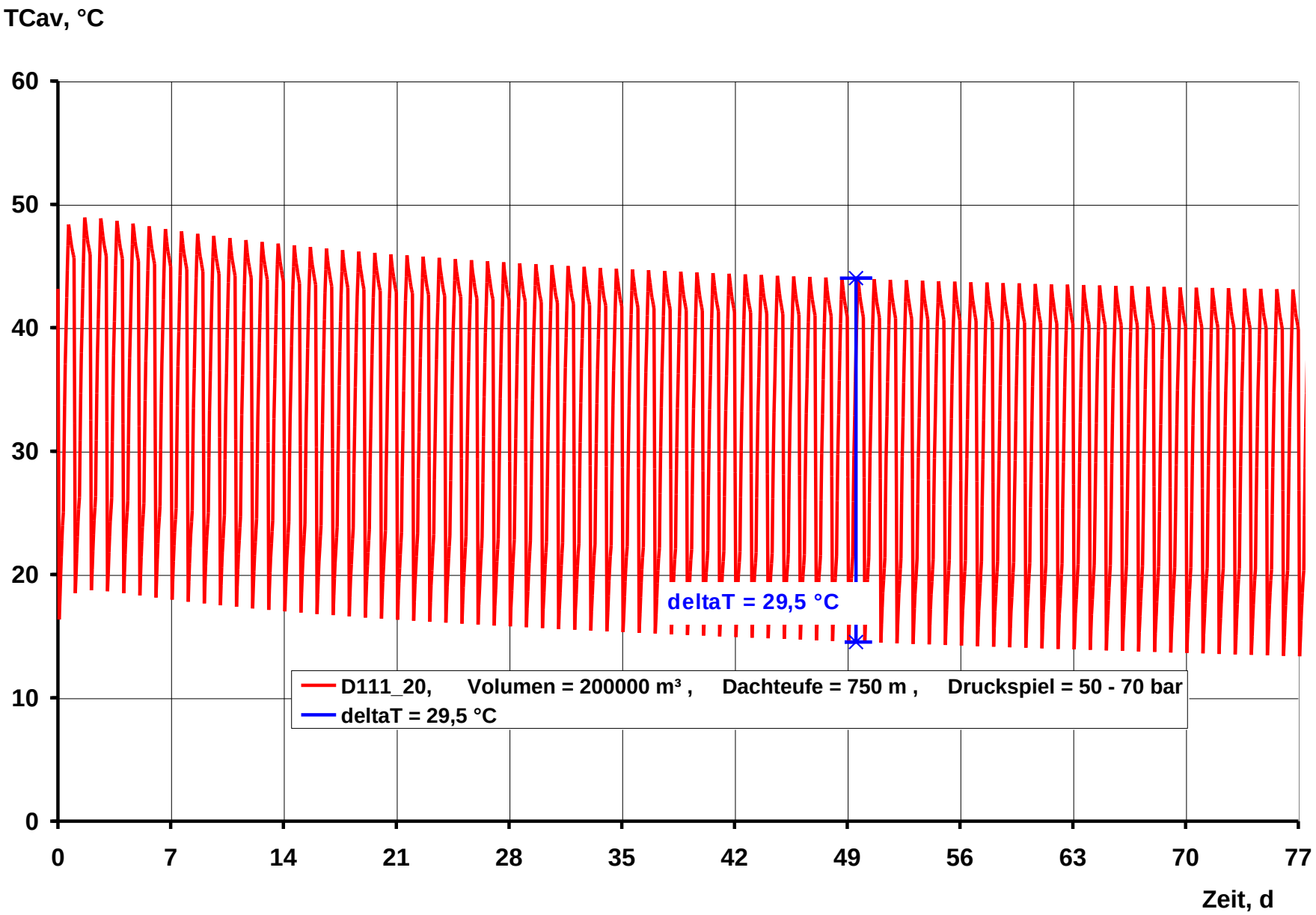


Abbildung 39: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 20 °C

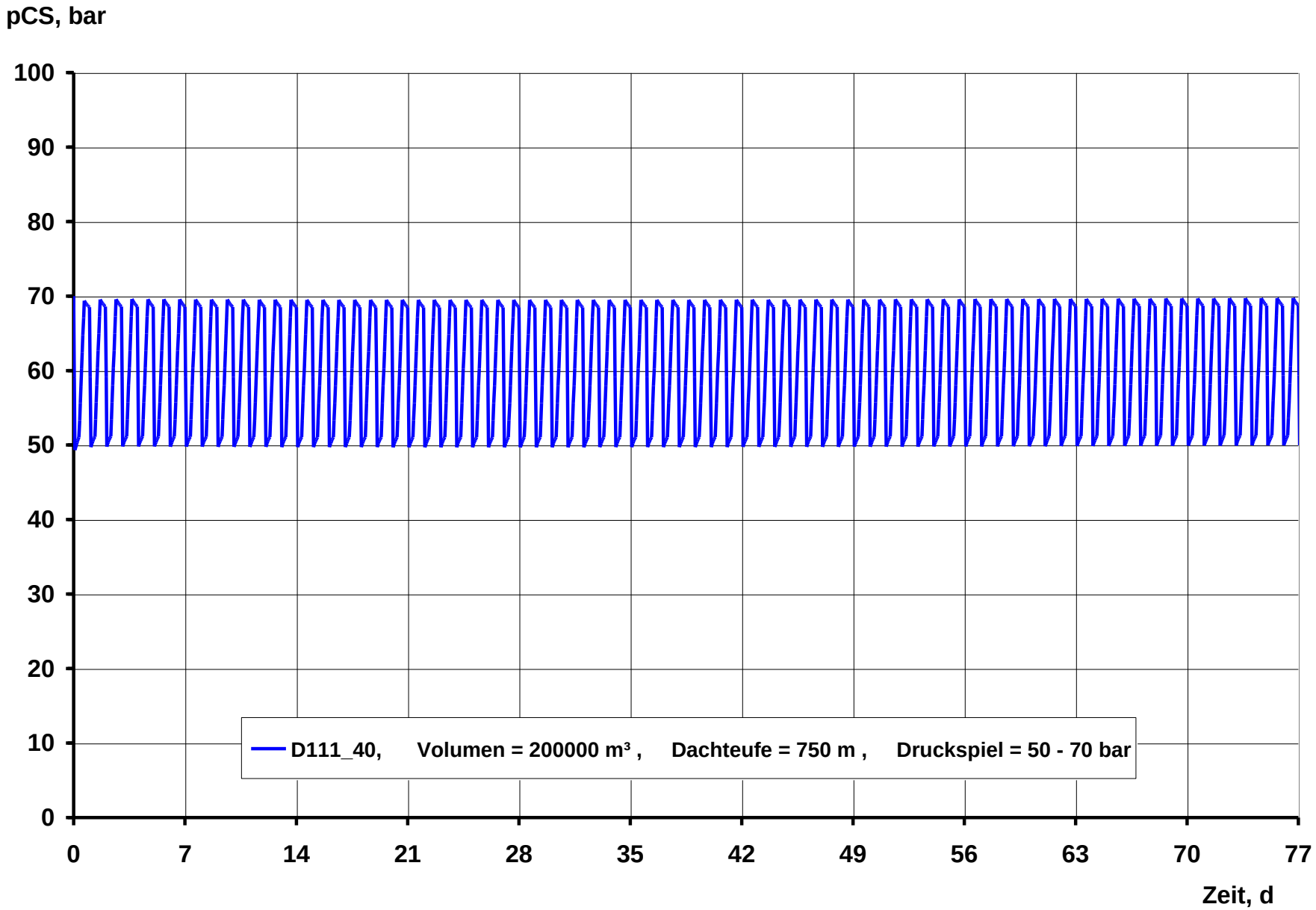


Abbildung 40: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 40 °C

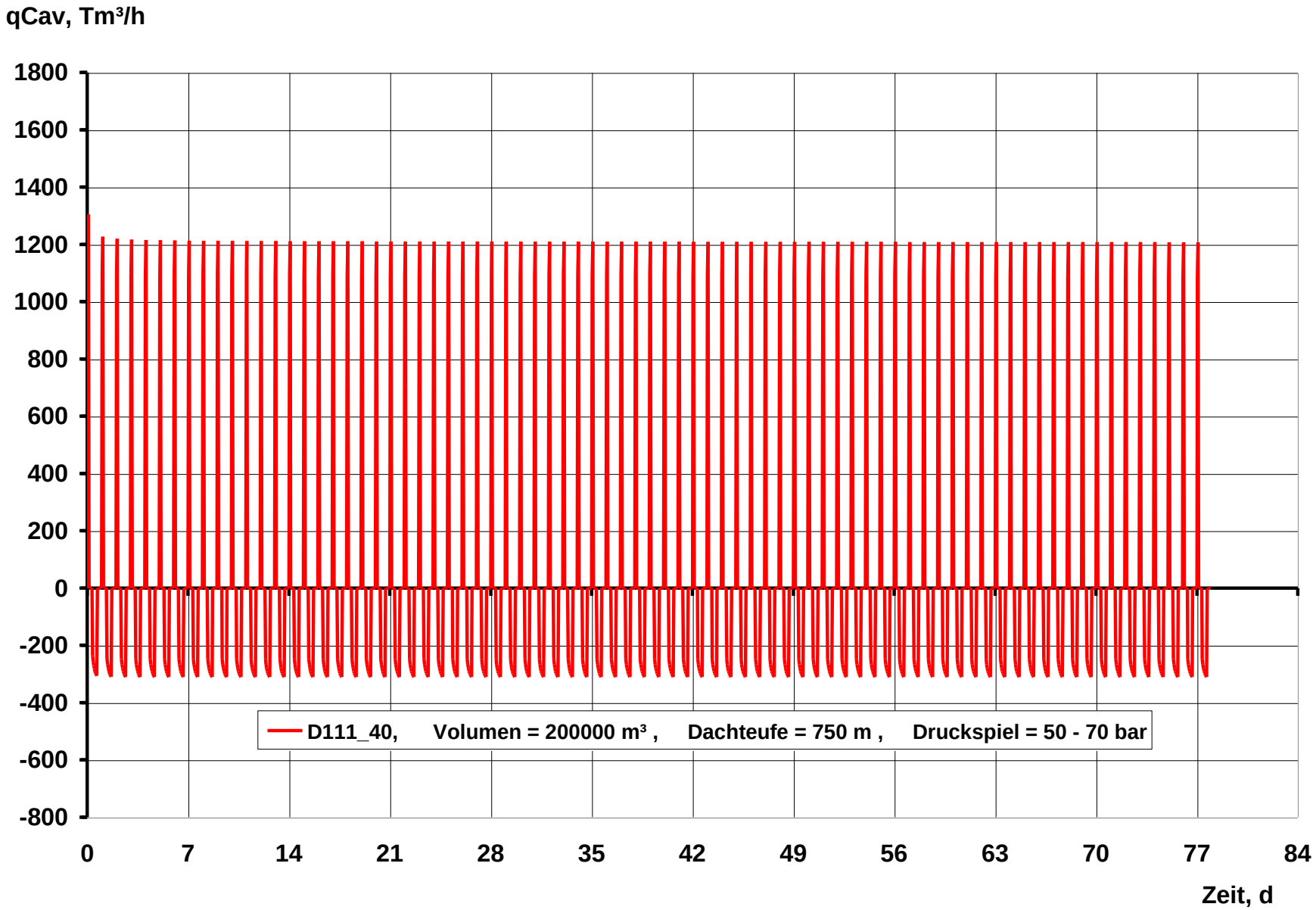


Abbildung 41: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 40 °C

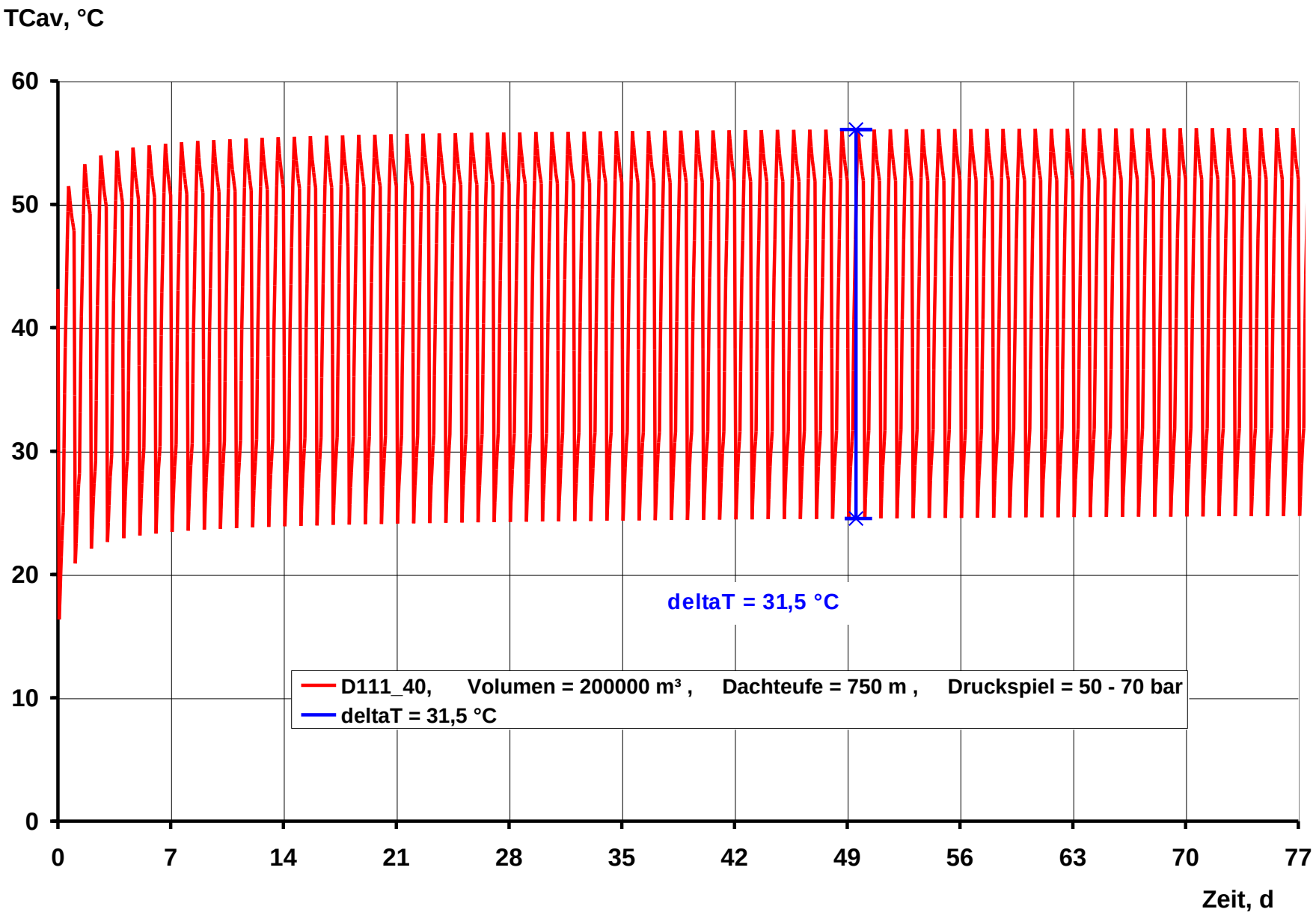


Abbildung 42: 76 Tage Wechsel, Befülltemperatur = 40 °C

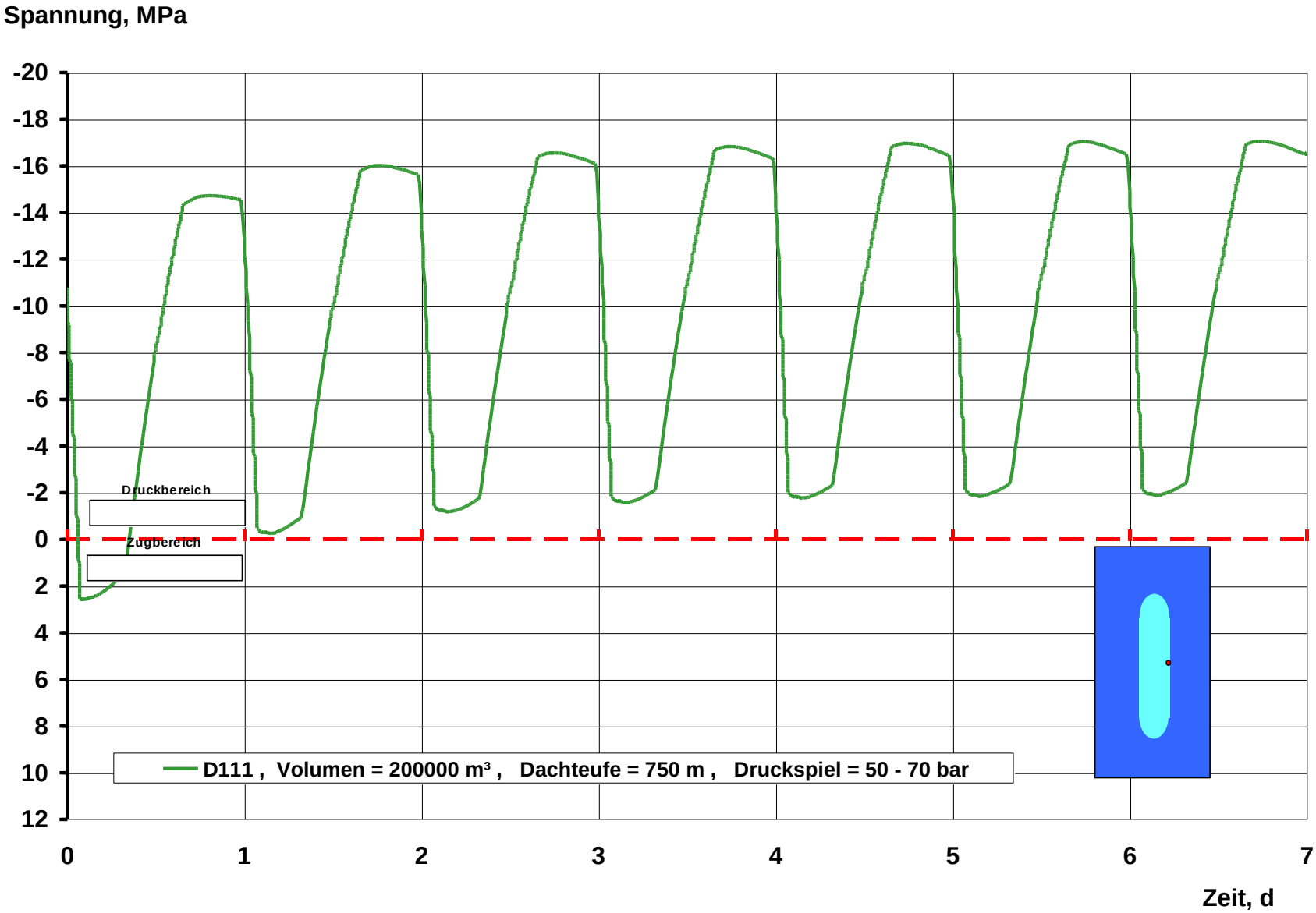


Abbildung 43

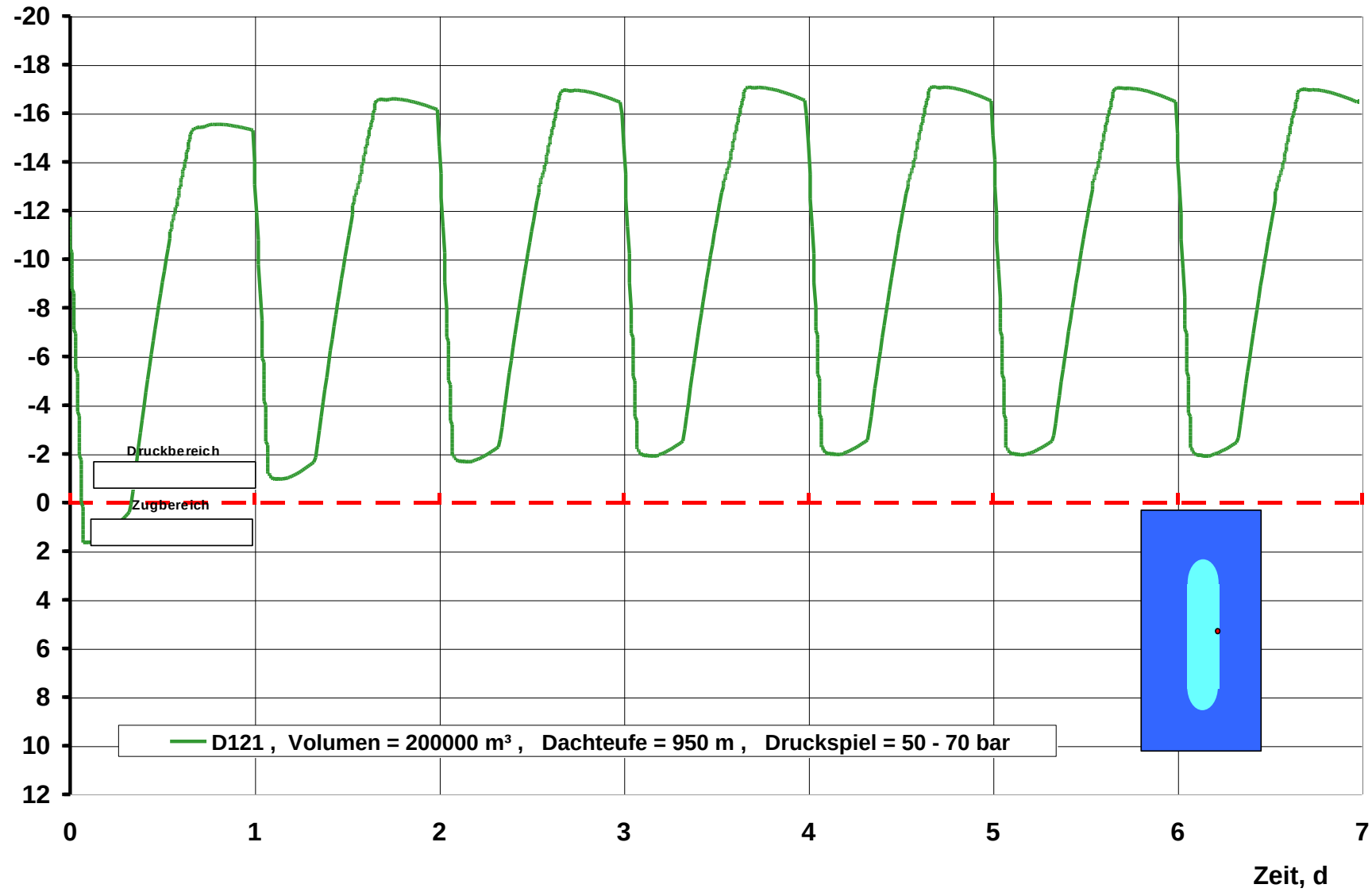


Abbildung 44

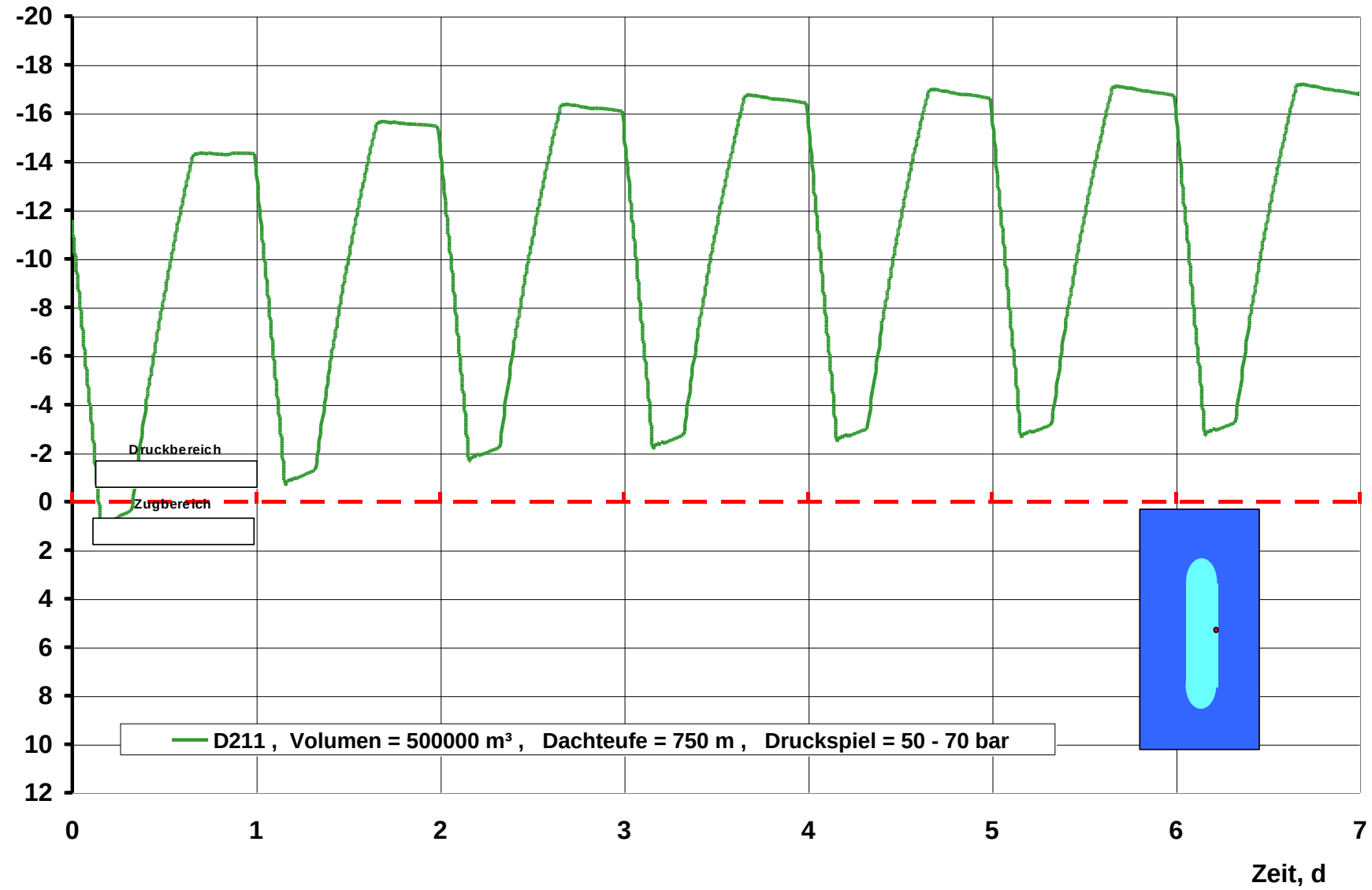


Abbildung 45

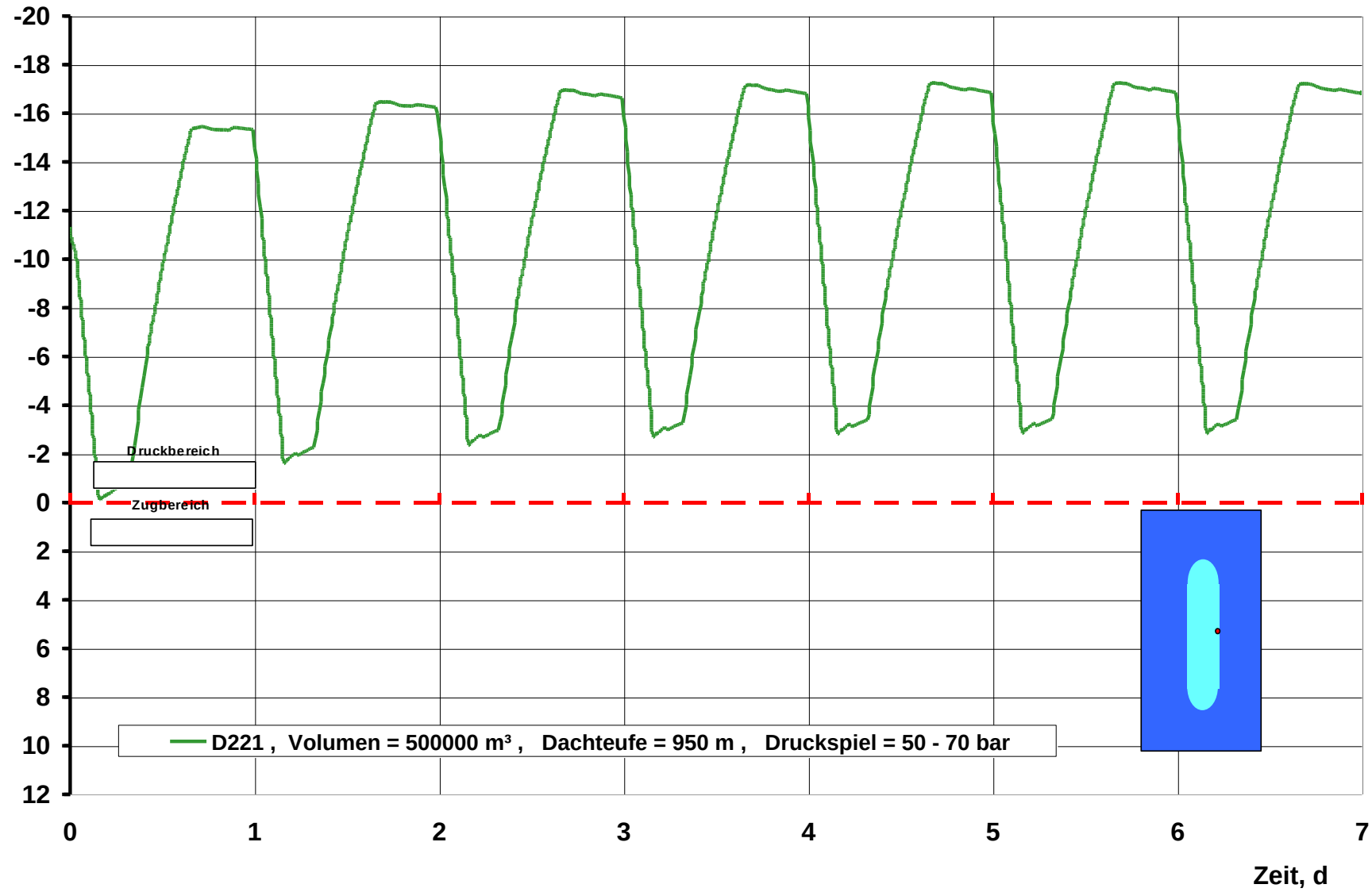


Abbildung 46

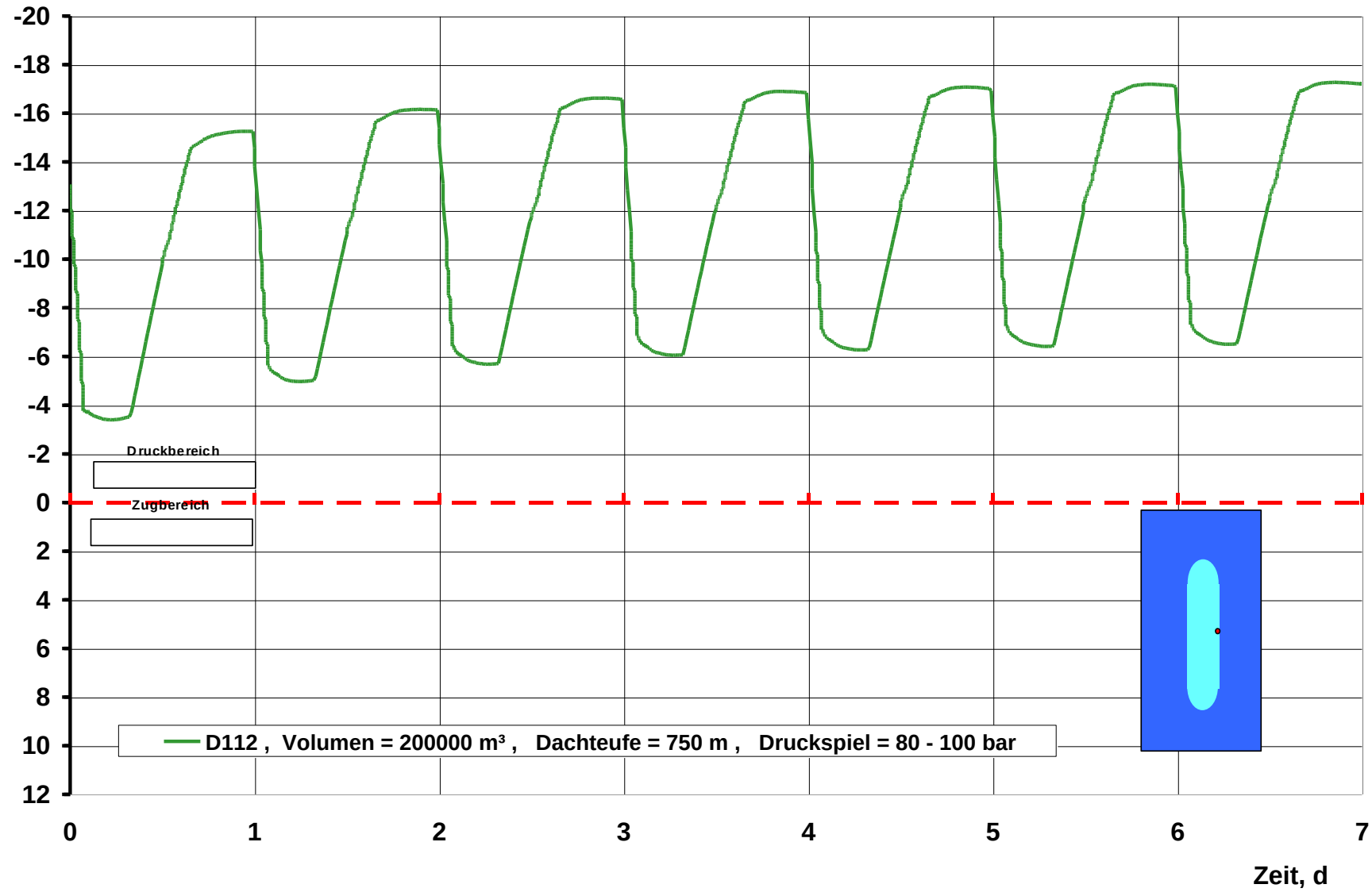


Abbildung 47

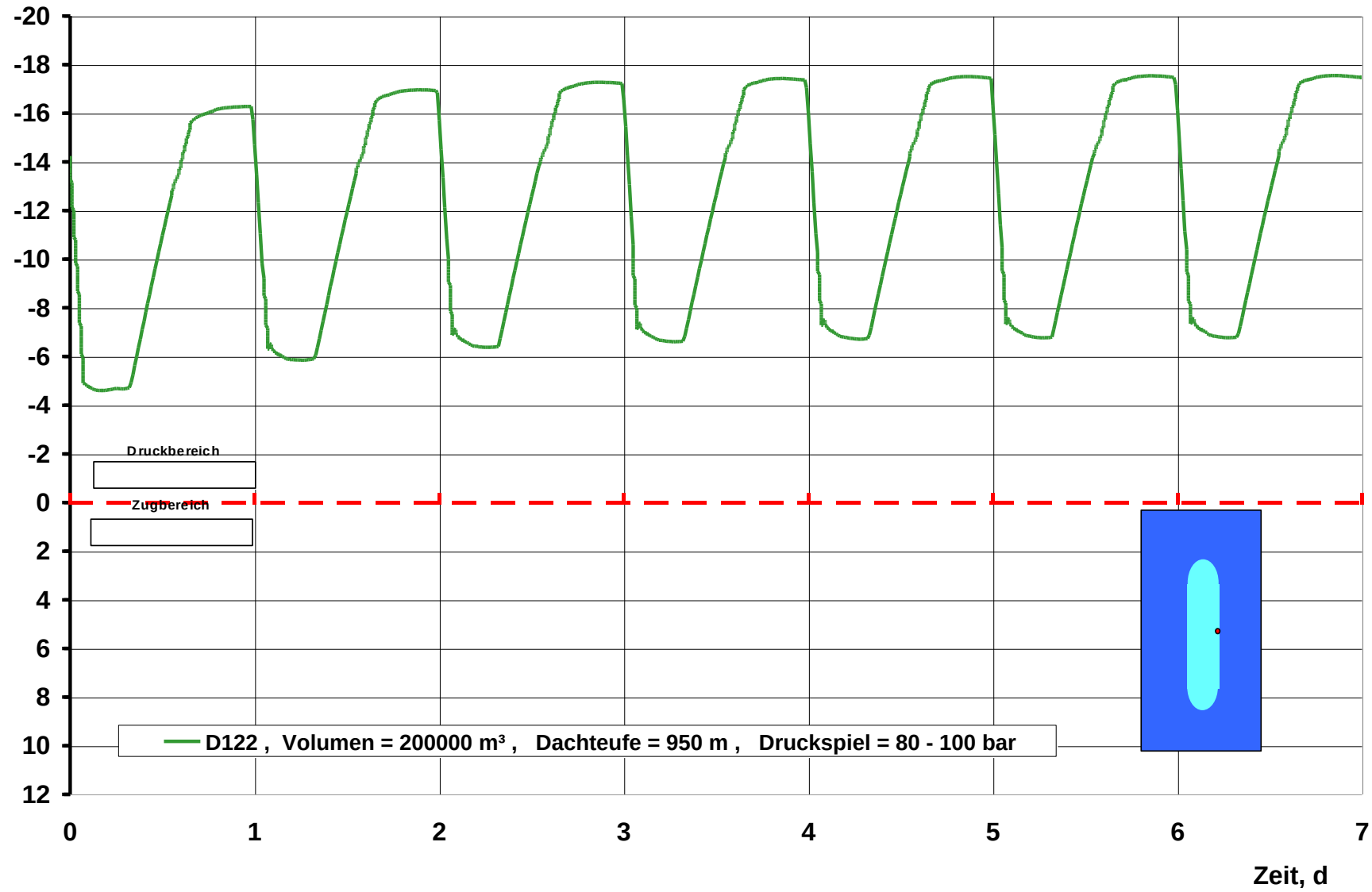


Abbildung 48

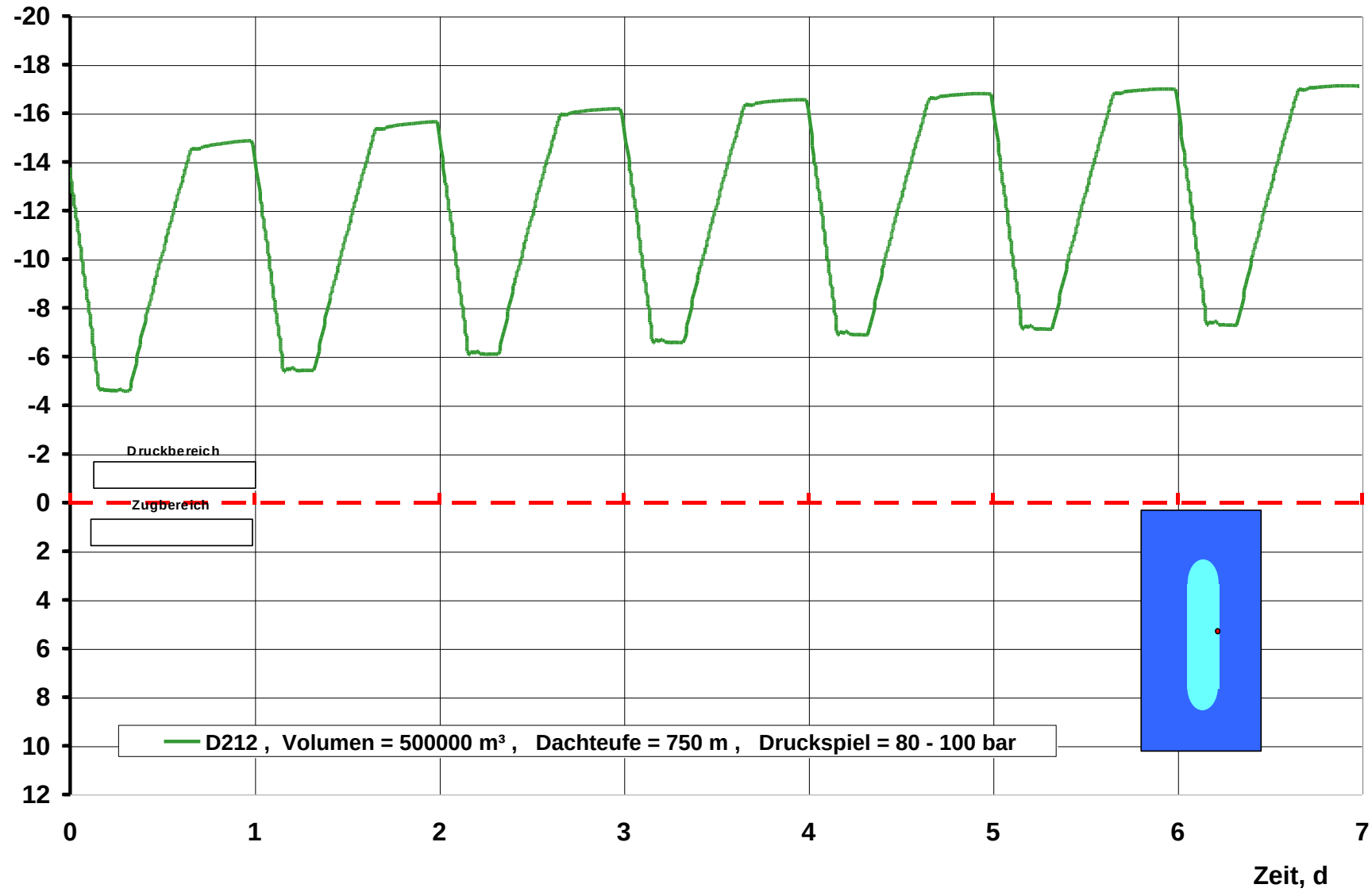


Abbildung 49

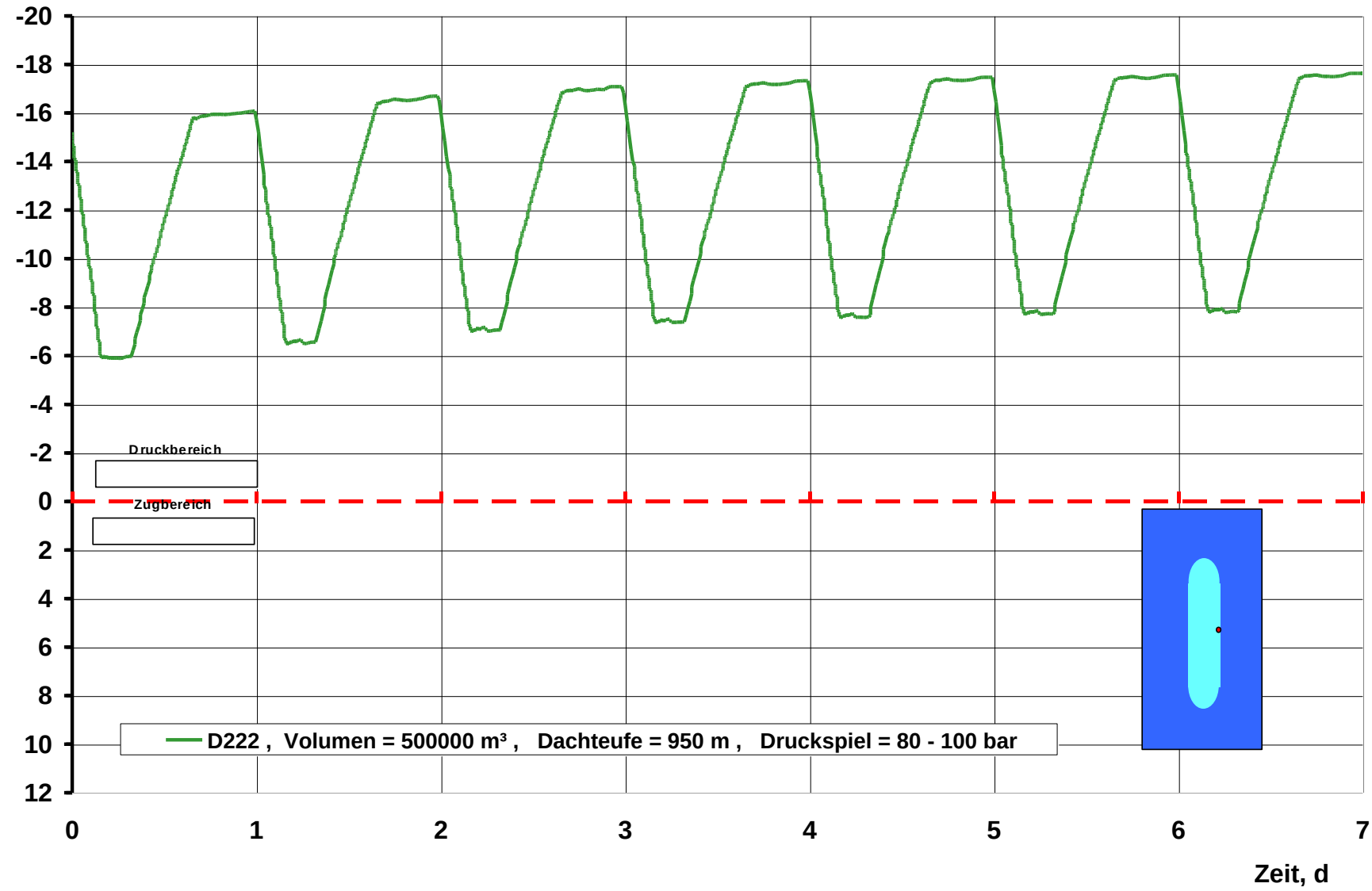


Abbildung 50

Anhang 4-2

Speicherung von Wasserstoff – Berechnungsergebnisse AP3

Die Bezeichnung der Abbildungen bezieht sich auf die Nummerierung der jeweils betrachteten Modellkavernen. Der Buchstabe H kennzeichnet die Wasserstoffkavernen, die nächsten drei Ziffern kennzeichnen den Modelltyp entsprechend den gewählten Ausprägungen. Die Zahlen nach dem Punkt dienen der Nummerierung der Diagramme, in denen die Berechnungsergebnisse für die jeweilige Kaverne dargestellt sind.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 51 H1111 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 52 H1111 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 53 H1111 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 54 H1212 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 55 H1212 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 56 H1212 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 57 H1222 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 58 H1222 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 59 H1222 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 60 H1323 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 61 H1323 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 62 H1323 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 63 H2131 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 64 H2131 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 65 H2131 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 66 H2232 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 67 H2232 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 68 H2232 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 69 H2212 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 70 H2212 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 71 H2212 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 72 H2313 Innendruck in Rohrschuhteufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 73 H2313 Befüll-/Entnahmeraten vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 74 H2313 Kavernentemperatur vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 75 H1111 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 76 H1212 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 77 H1222 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 78 H1323 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 350.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 79 H2131 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.000 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 80 H2232 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 183 m

Abbildung 81 H2212 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.200 m Kavernenhöhe = 350 m

Abbildung 82 H2313 Spannungsverläufe vs. Zeit Vol. = 700.000 m³
Dachteufe = 1.400 m Kavernenhöhe = 350 m

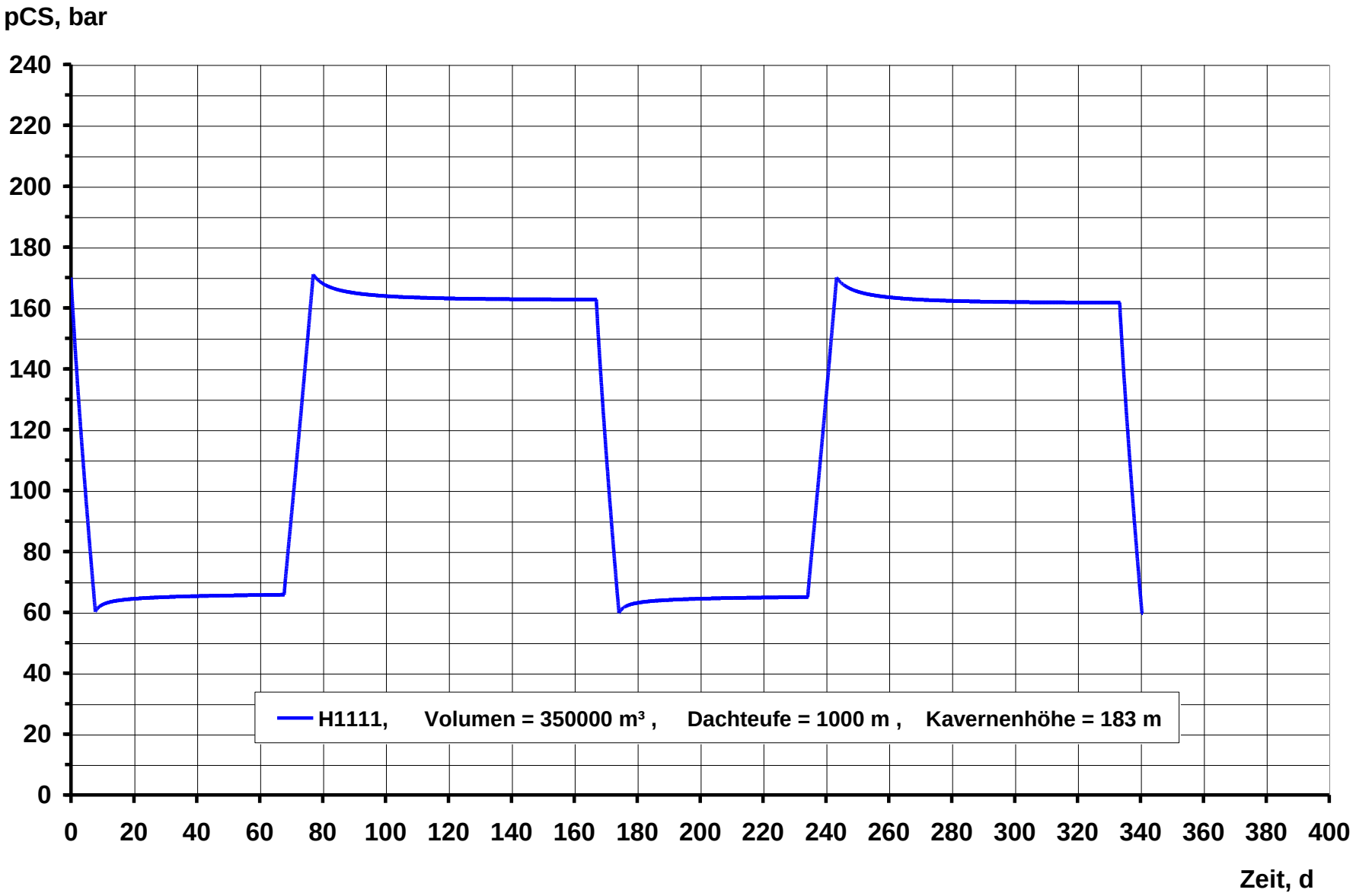


Abbildung 51

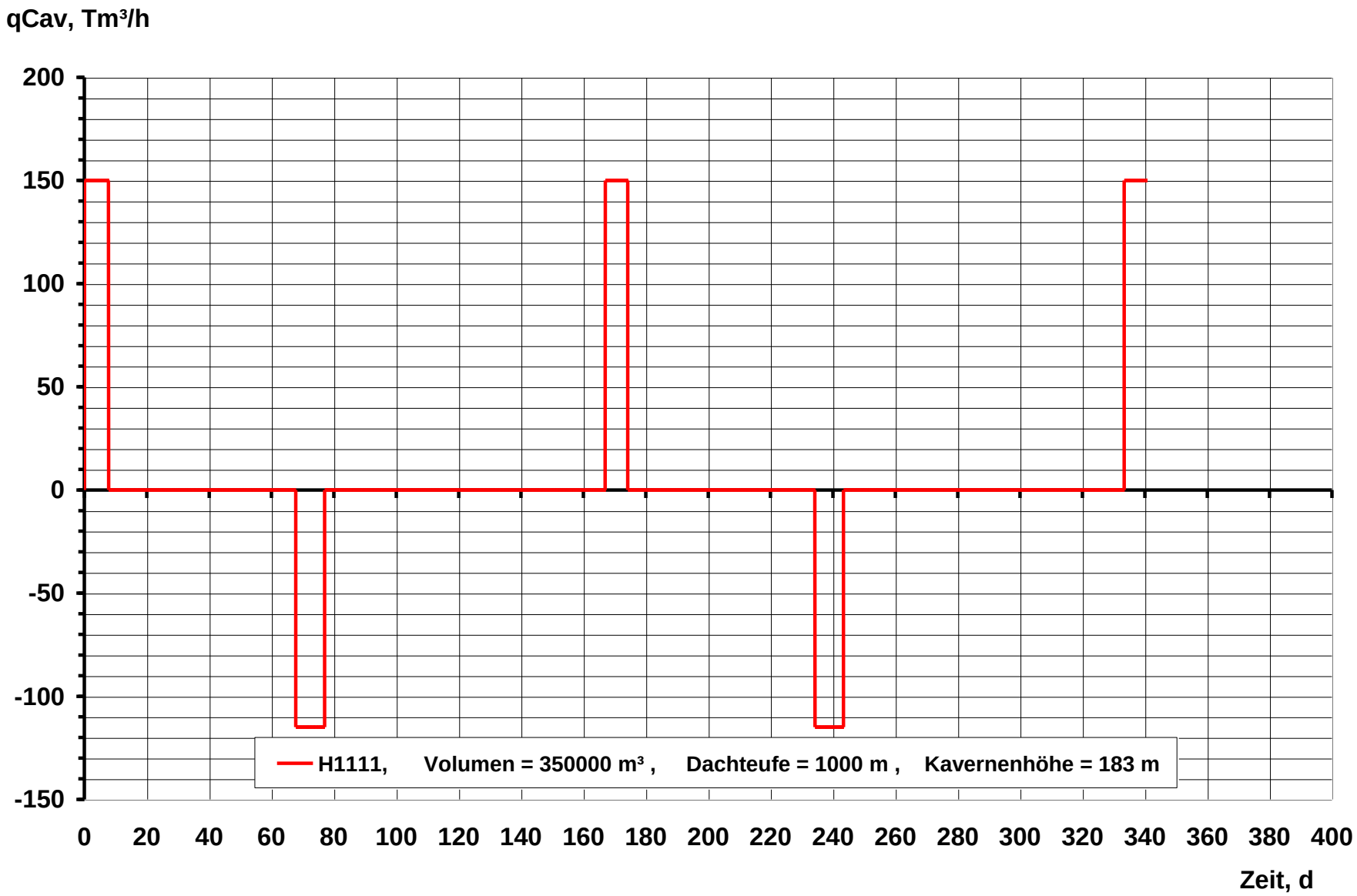


Abbildung 52

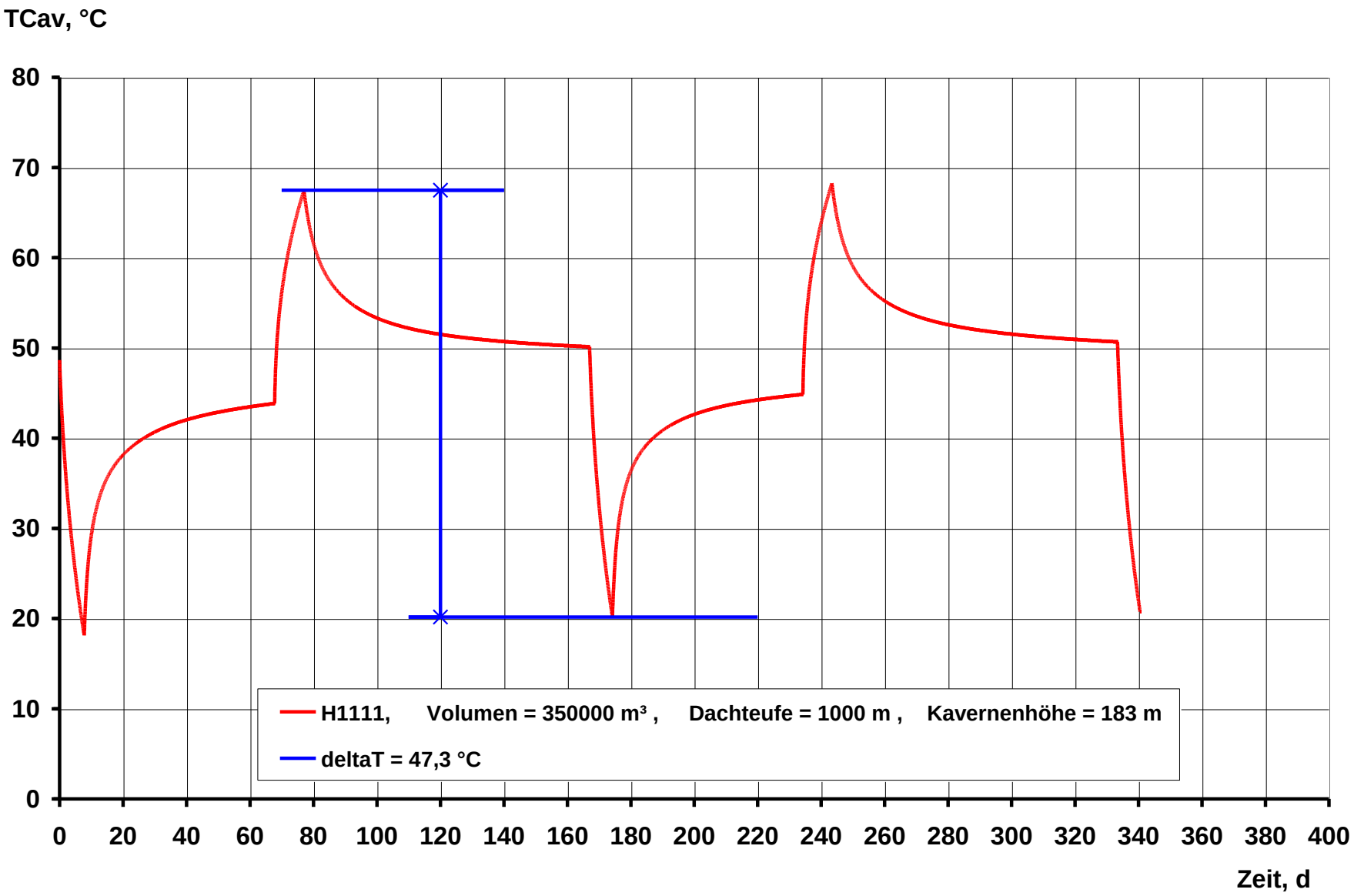


Abbildung 53

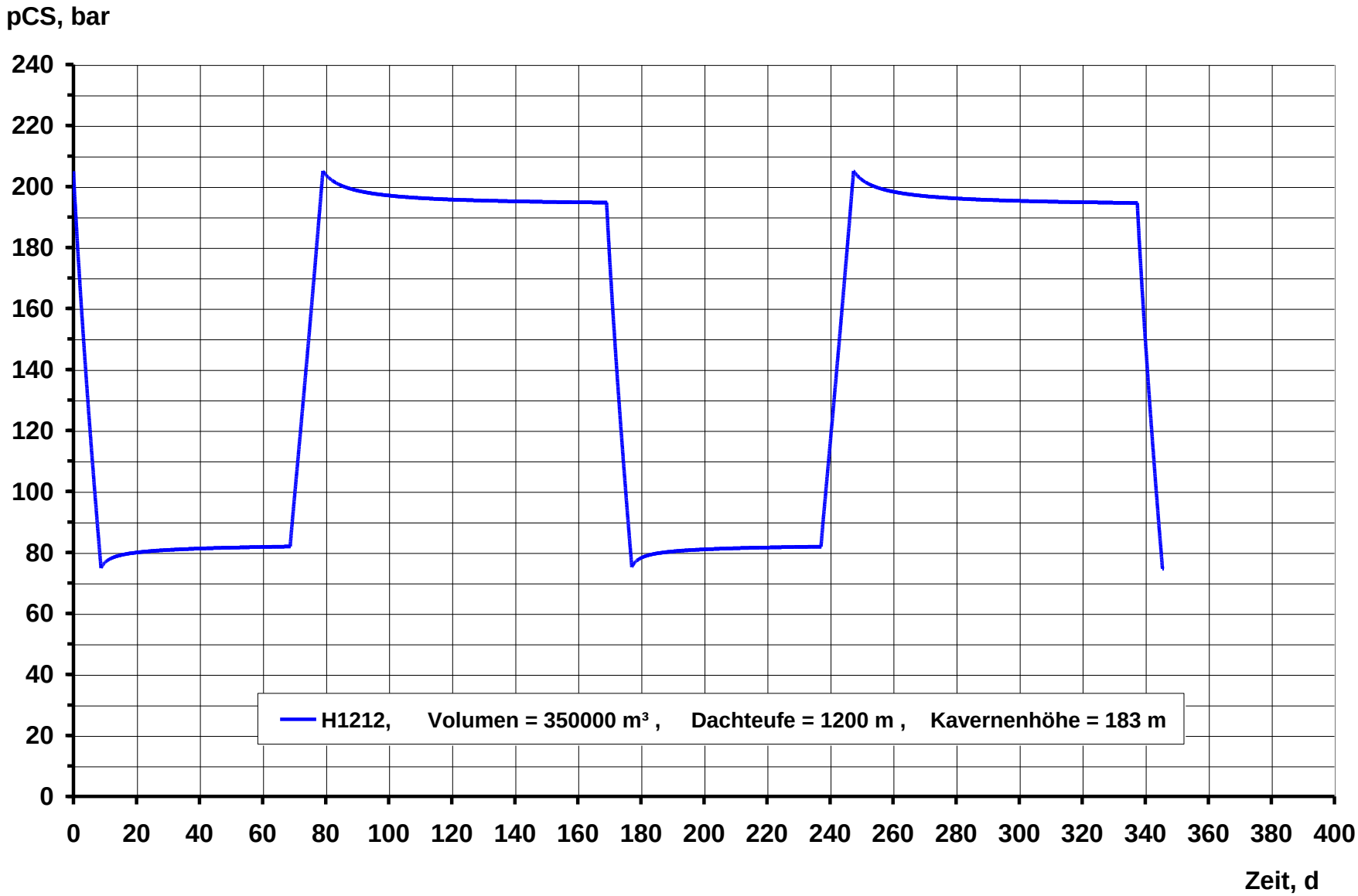


Abbildung 54

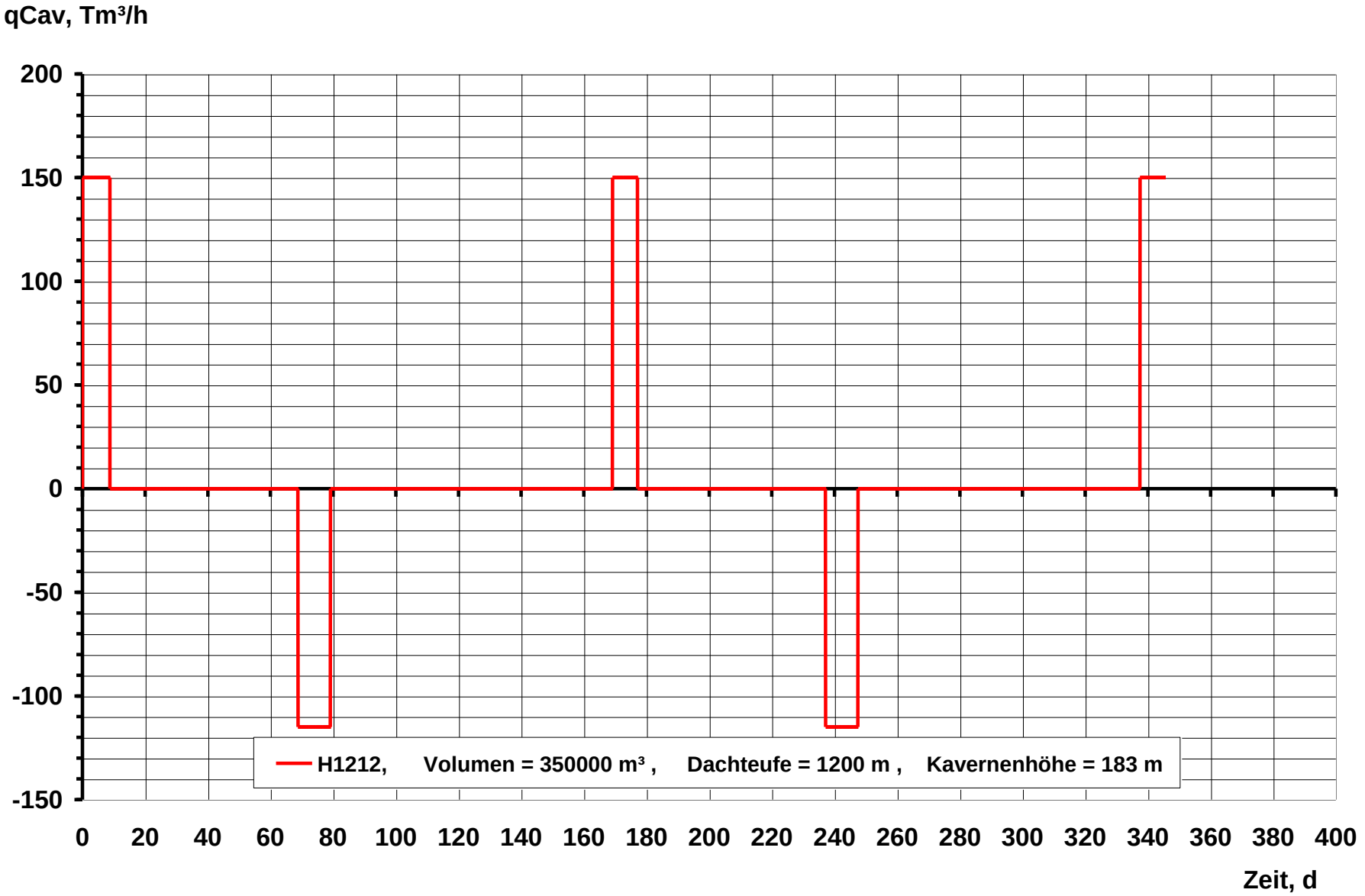


Abbildung 55

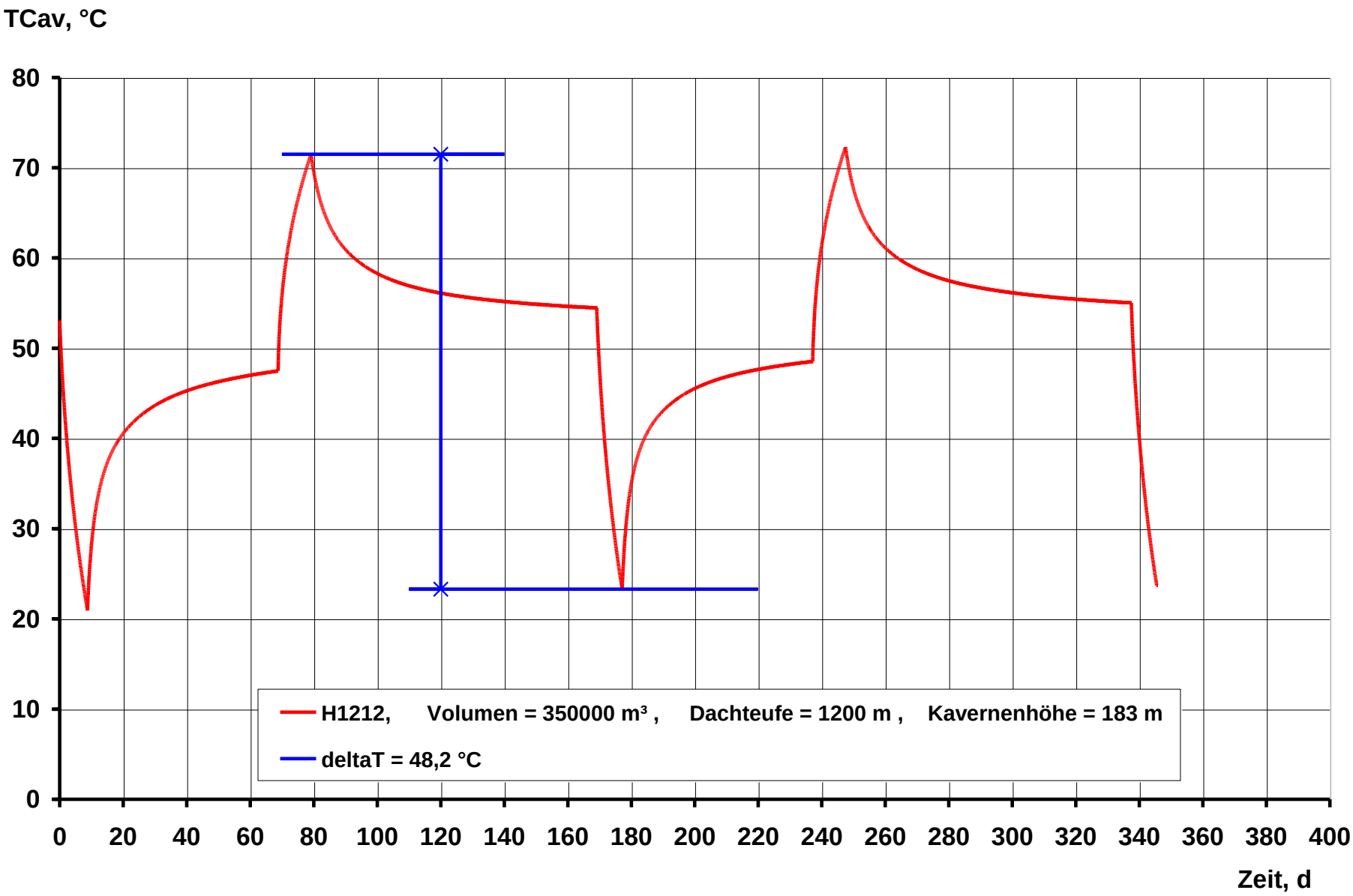


Abbildung 56

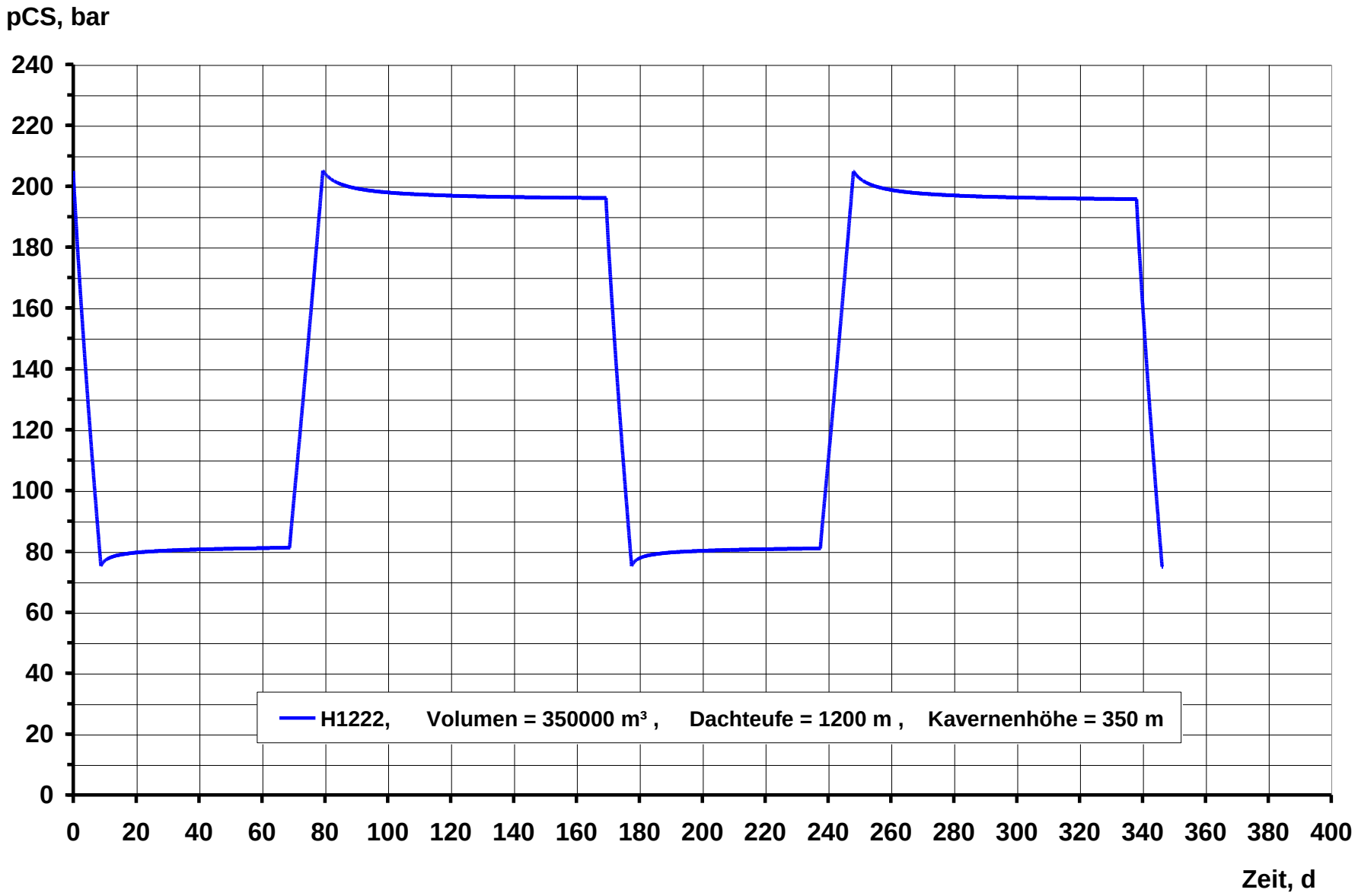


Abbildung 57

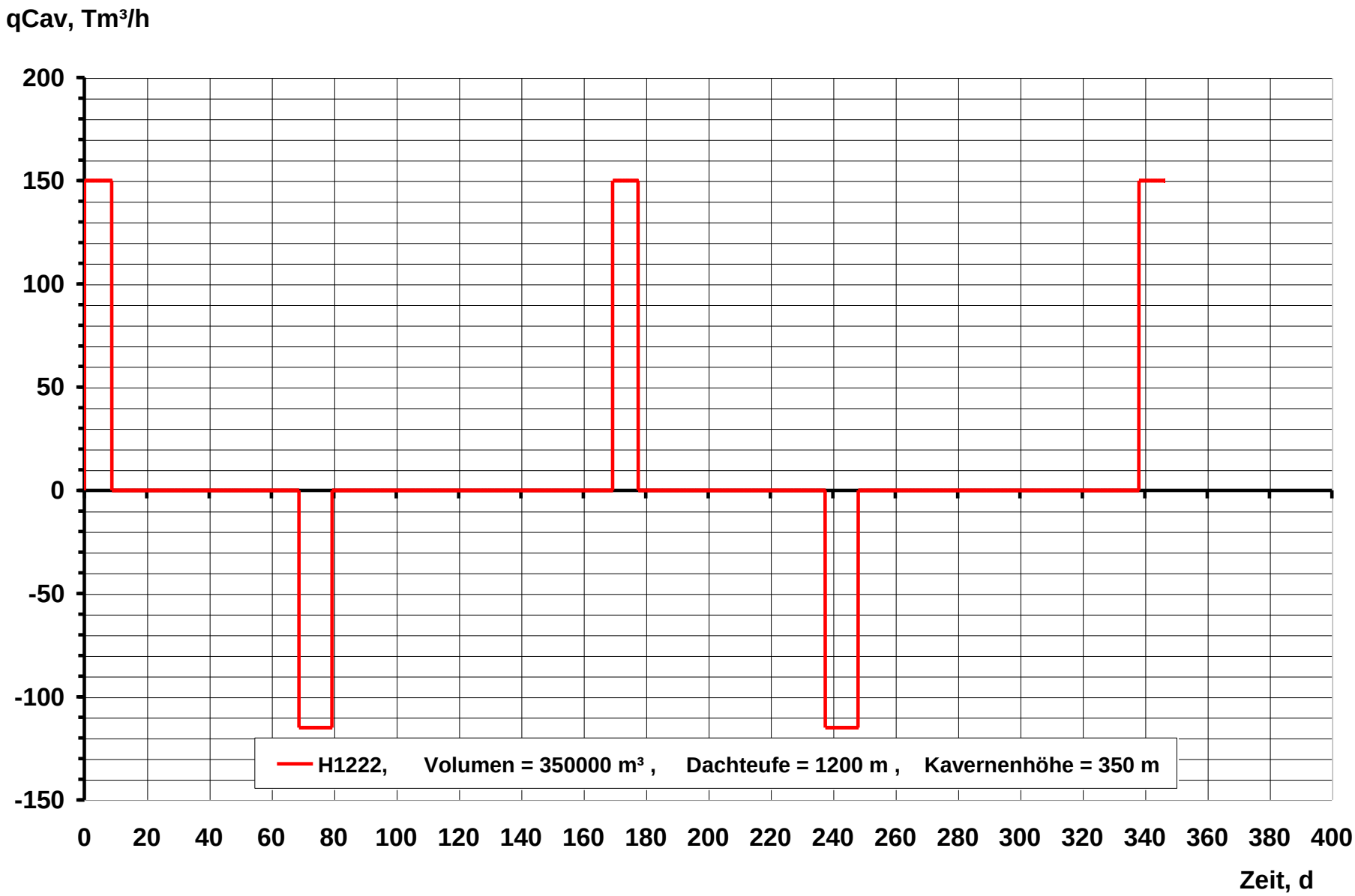


Abbildung 58

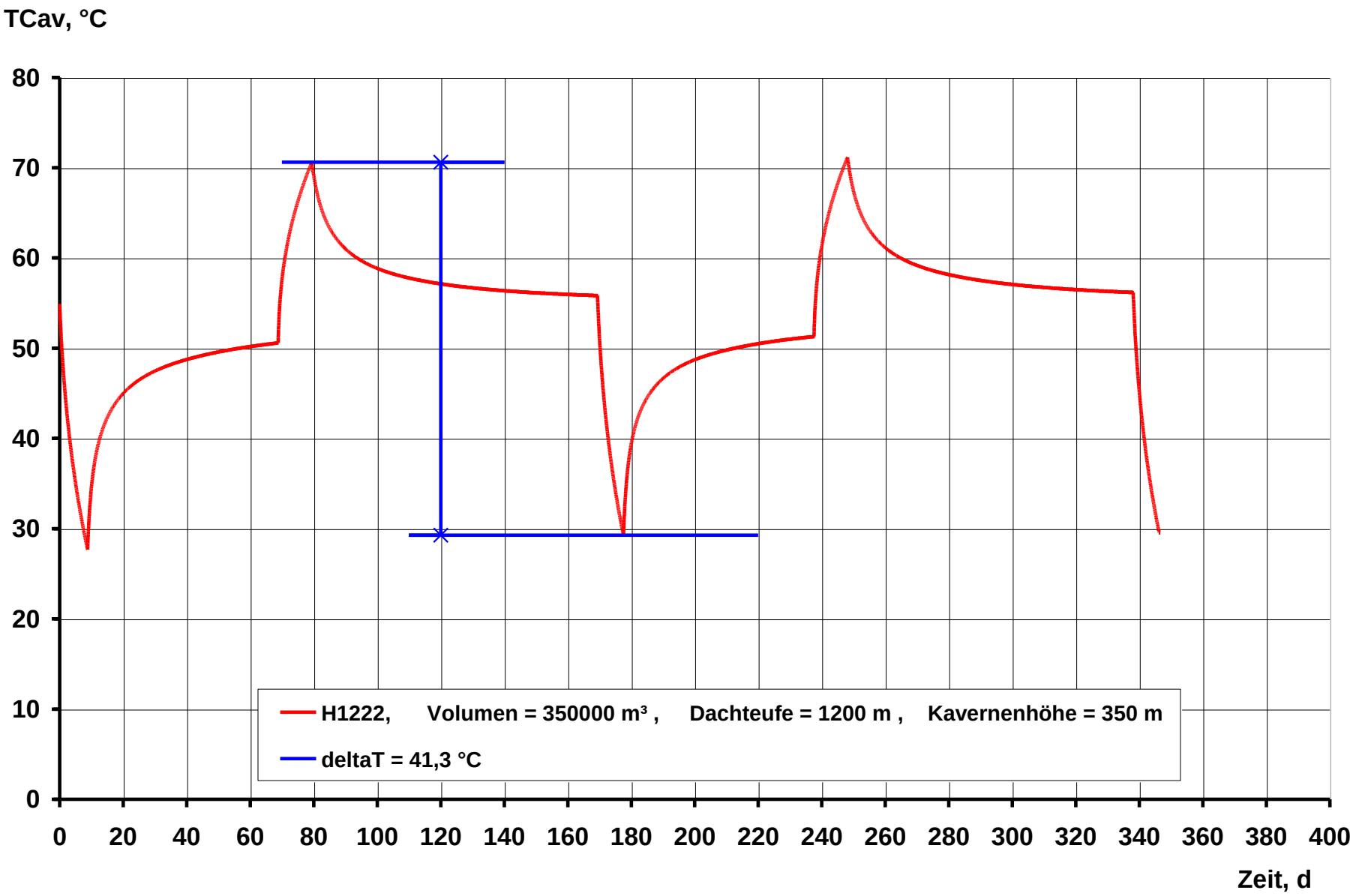


Abbildung 59

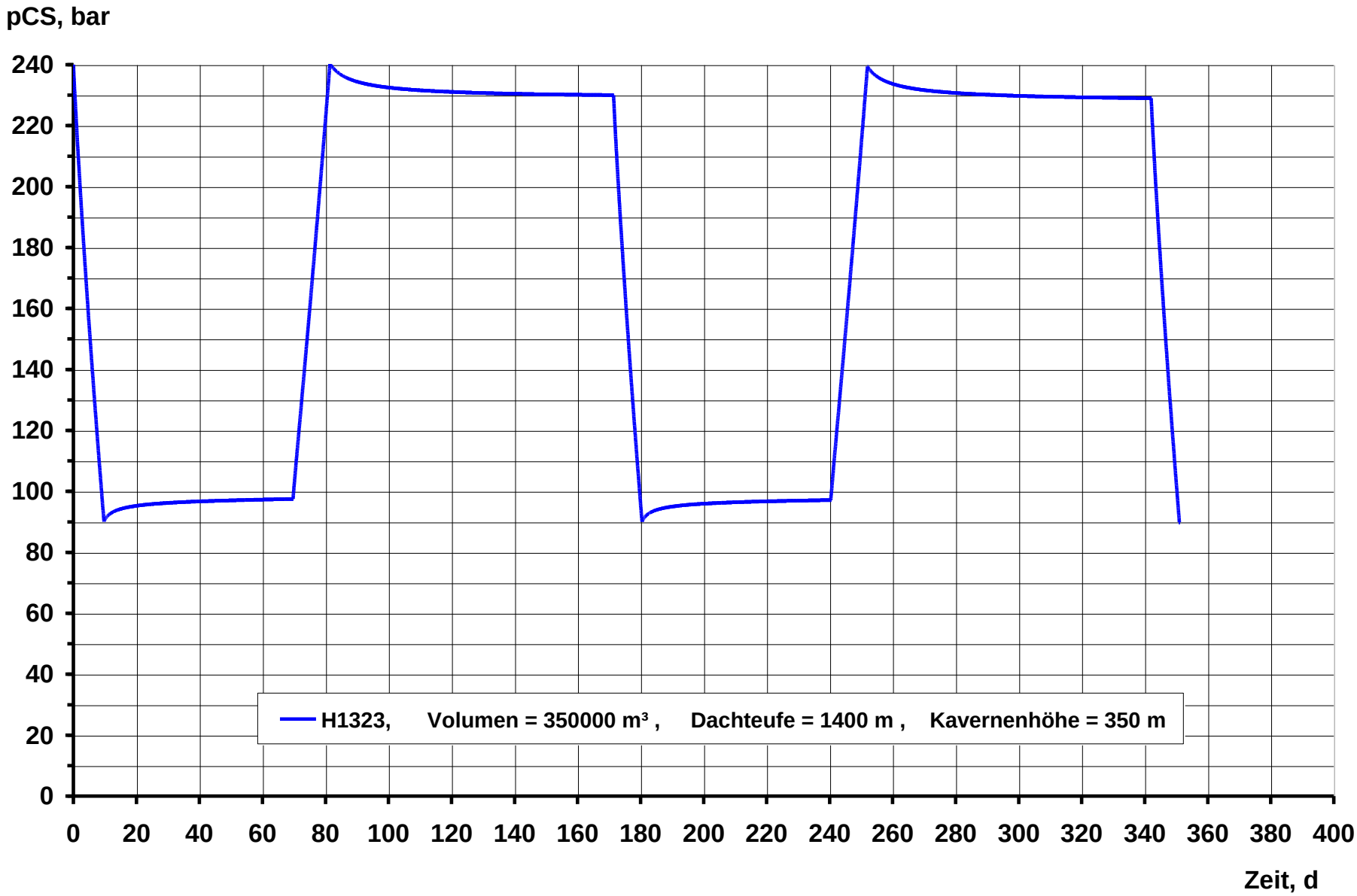


Abbildung 60

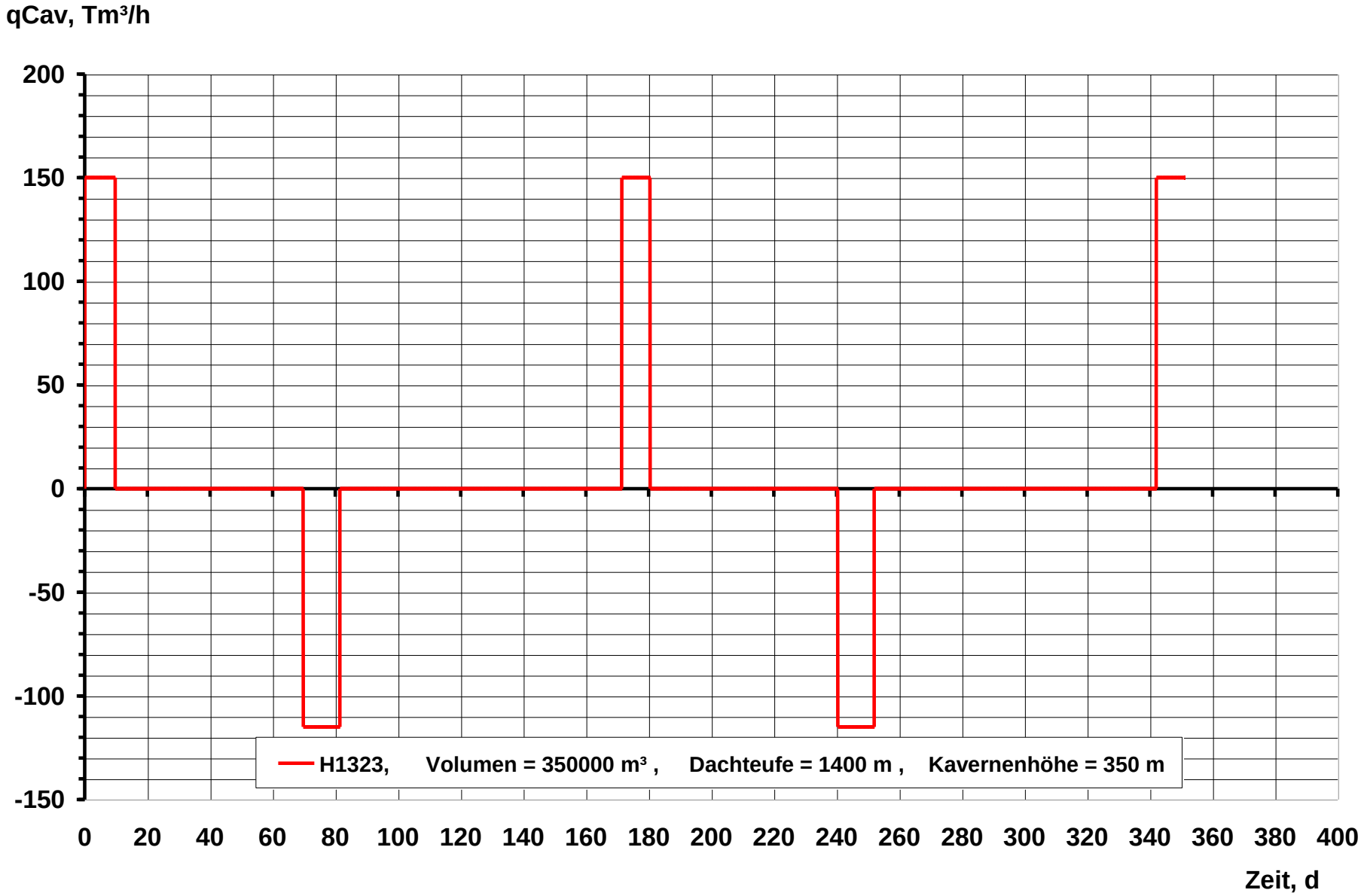


Abbildung 61

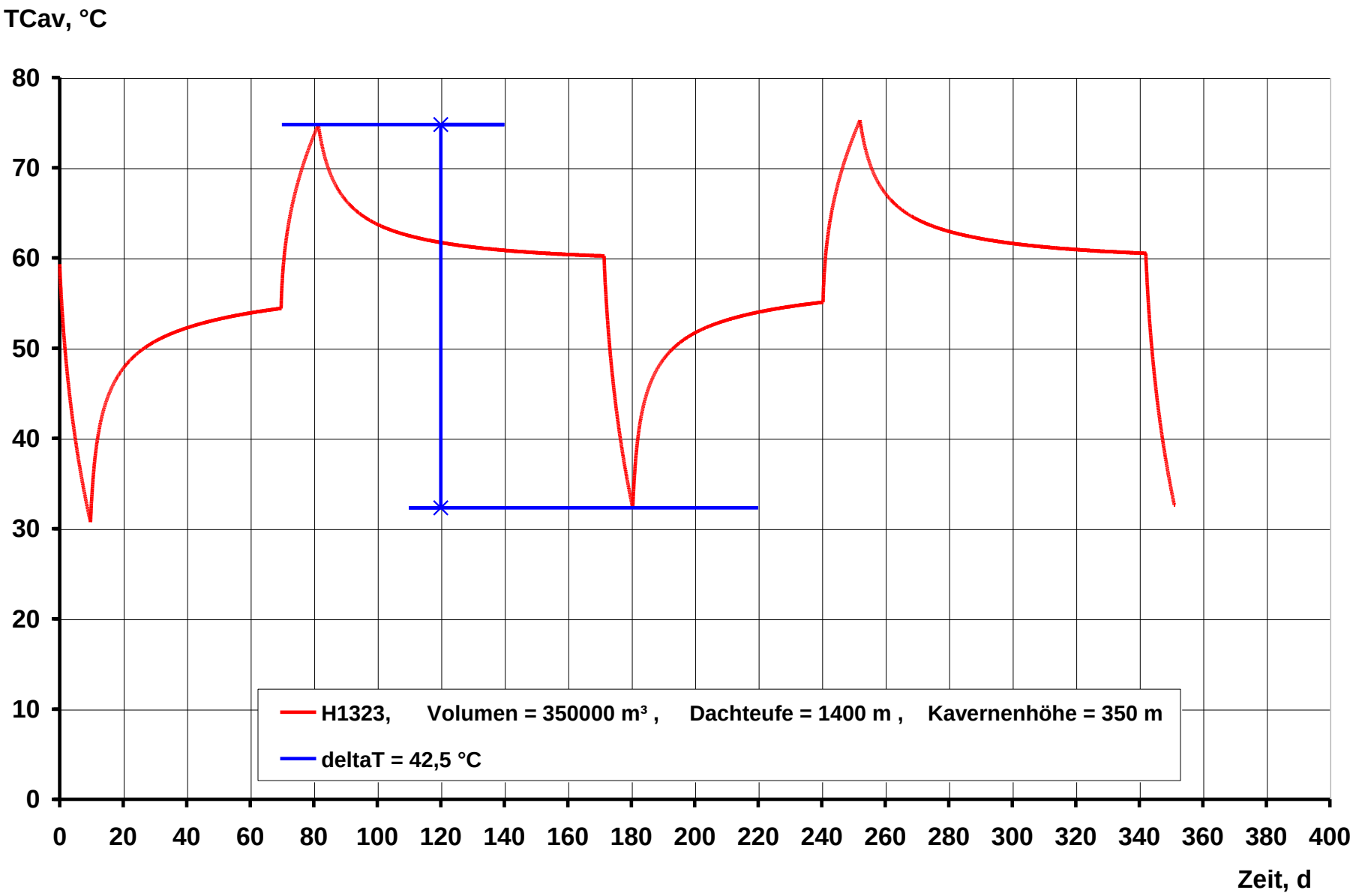


Abbildung 62

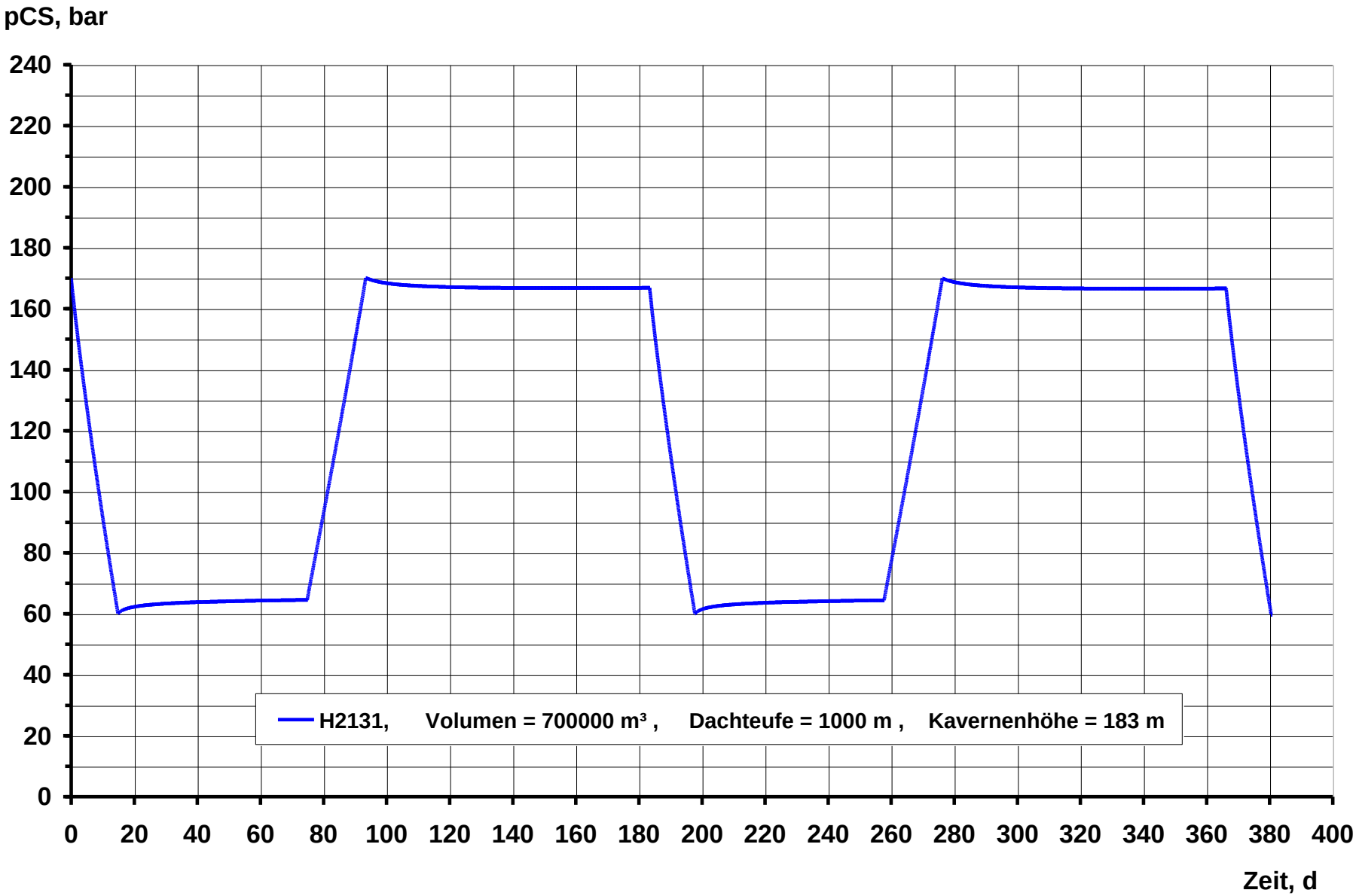


Abbildung 63

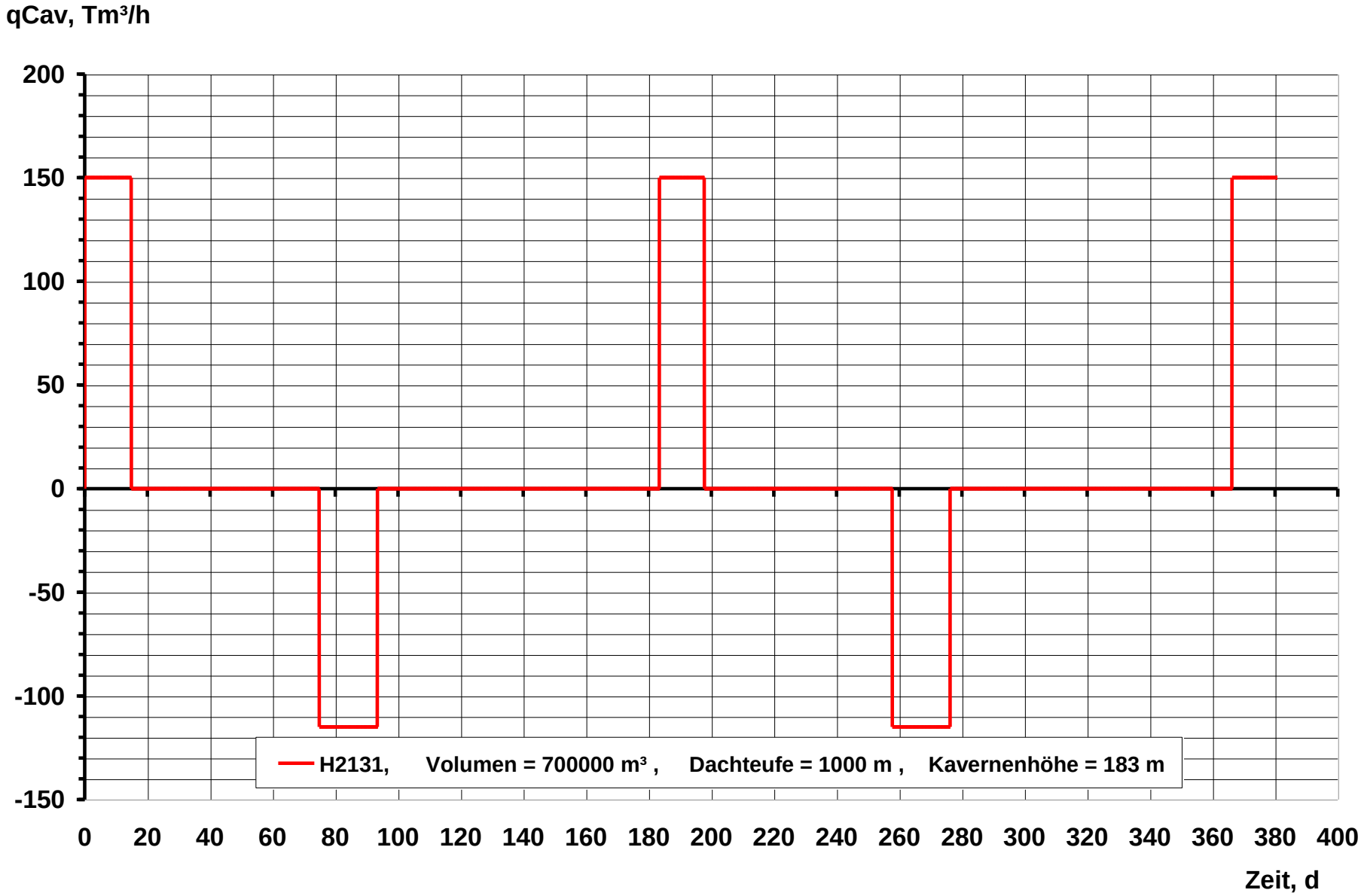


Abbildung 64

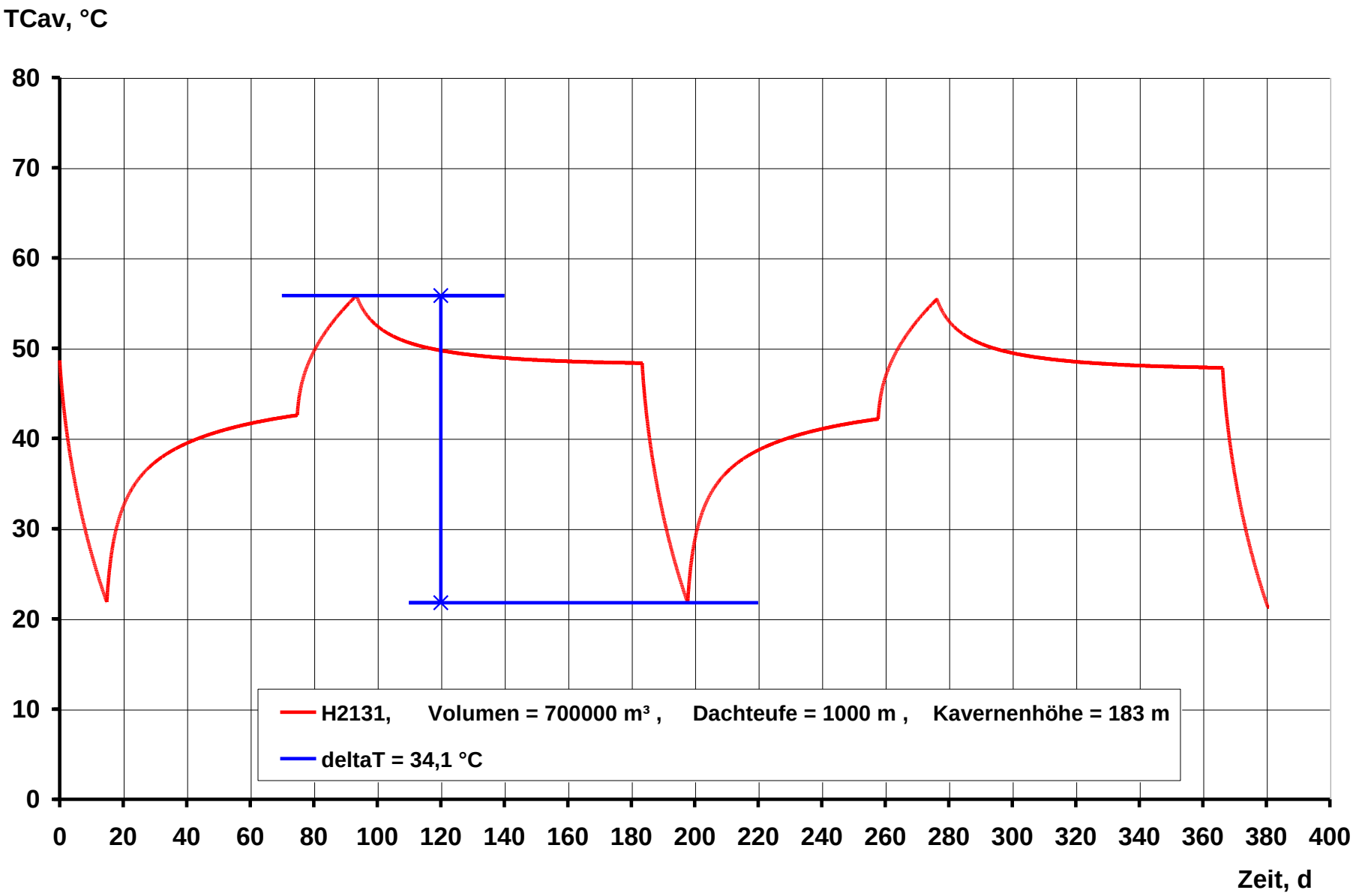


Abbildung 65

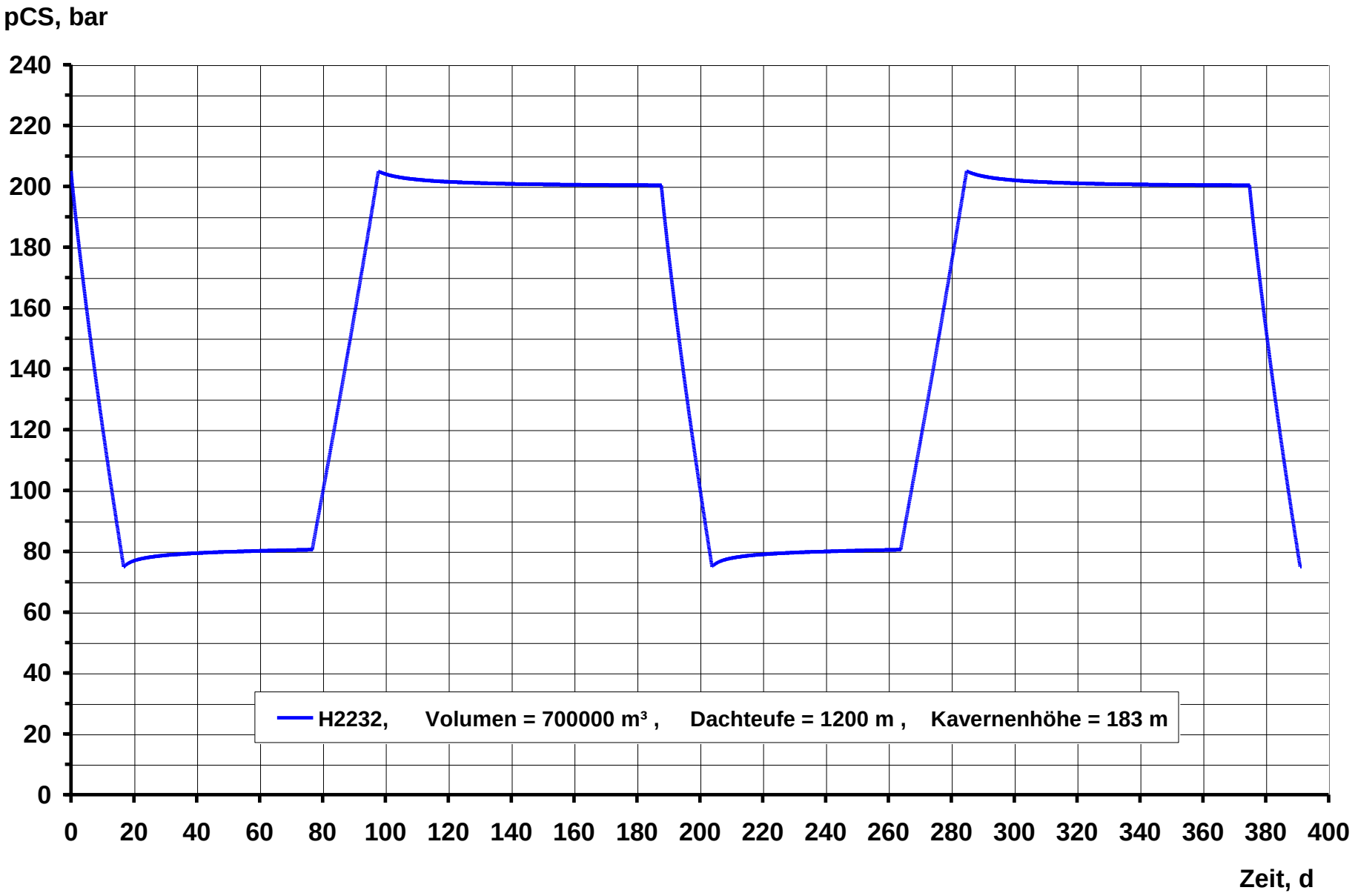


Abbildung 66

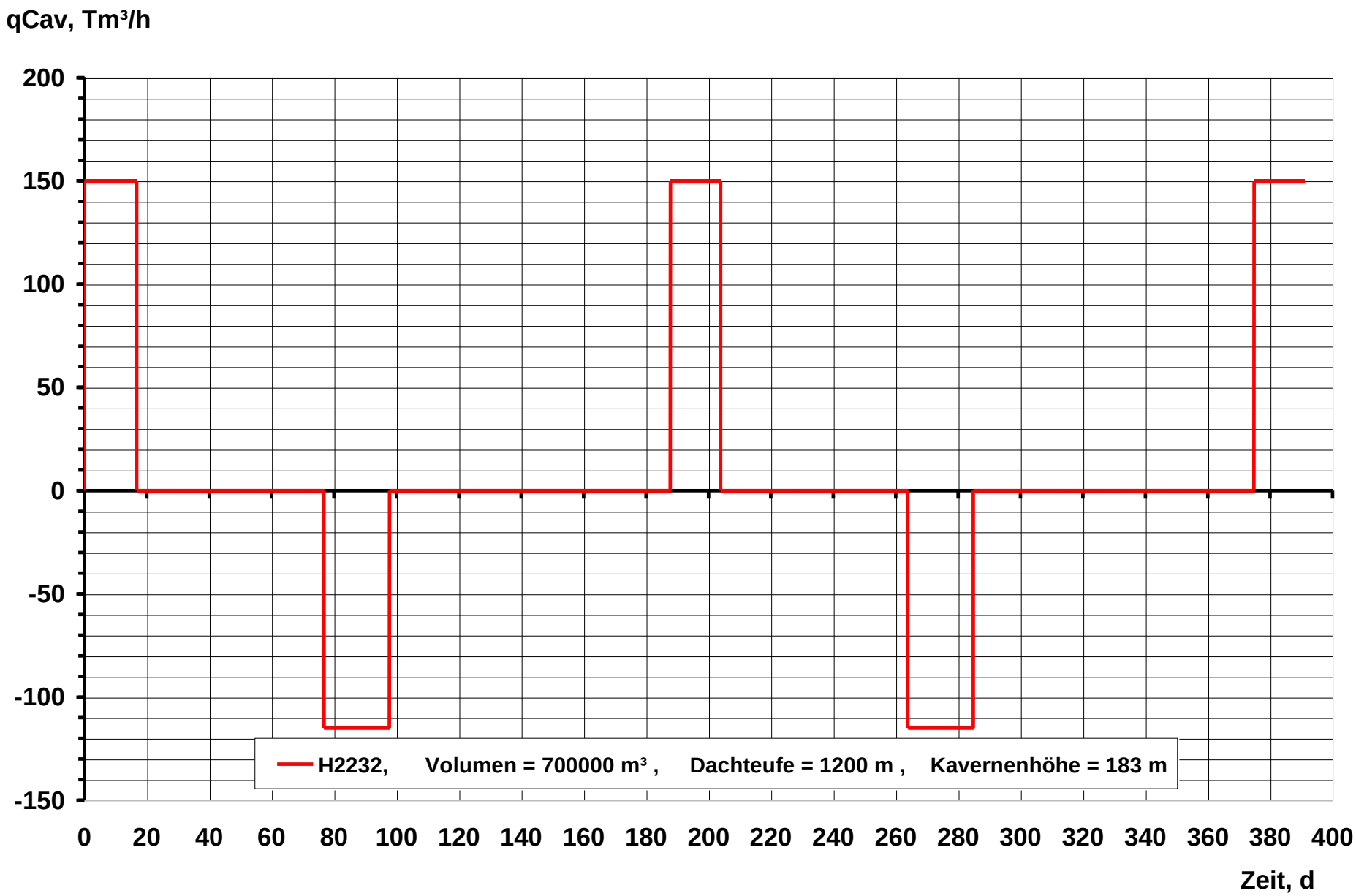


Abbildung 67

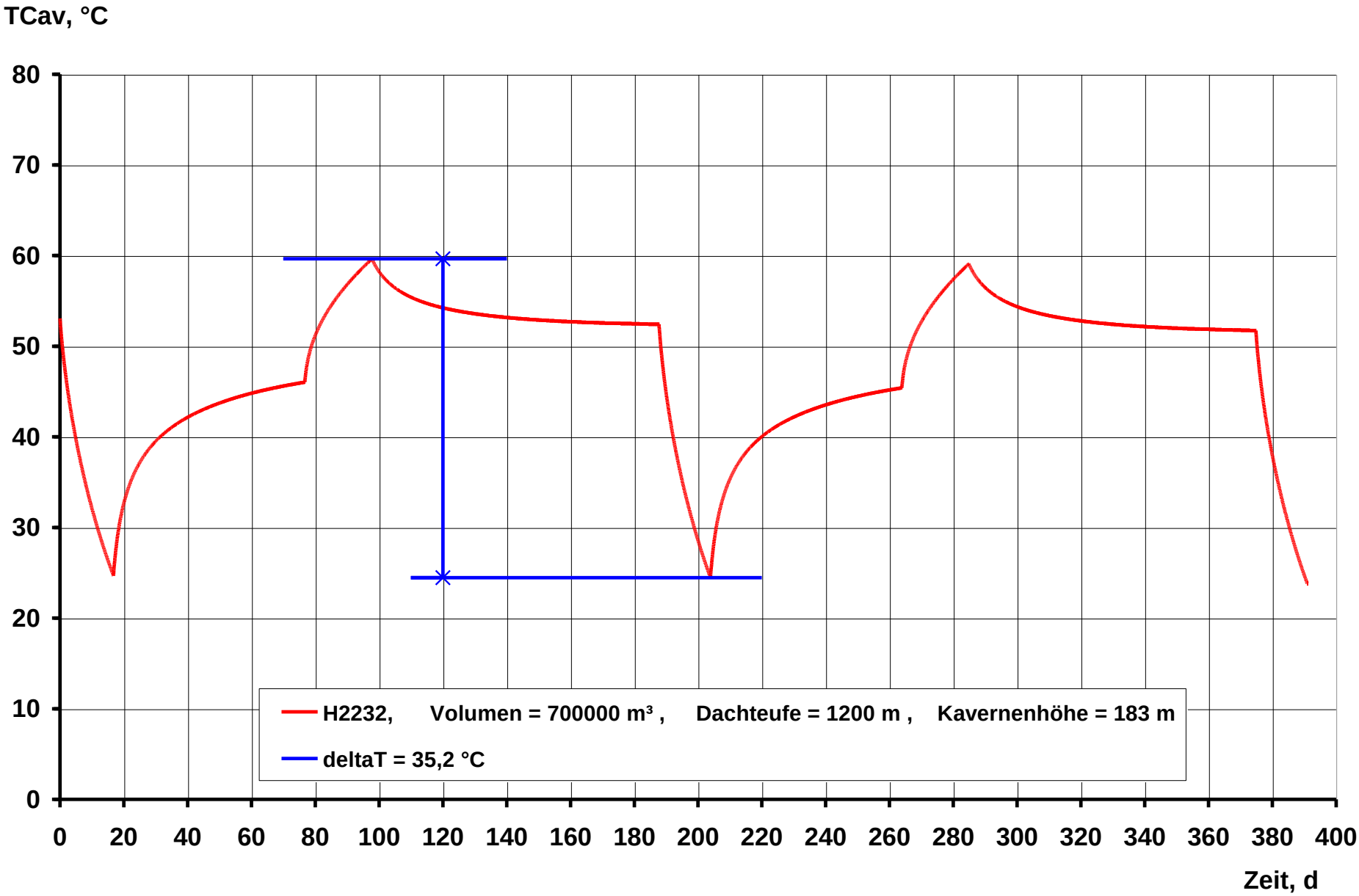


Abbildung 68

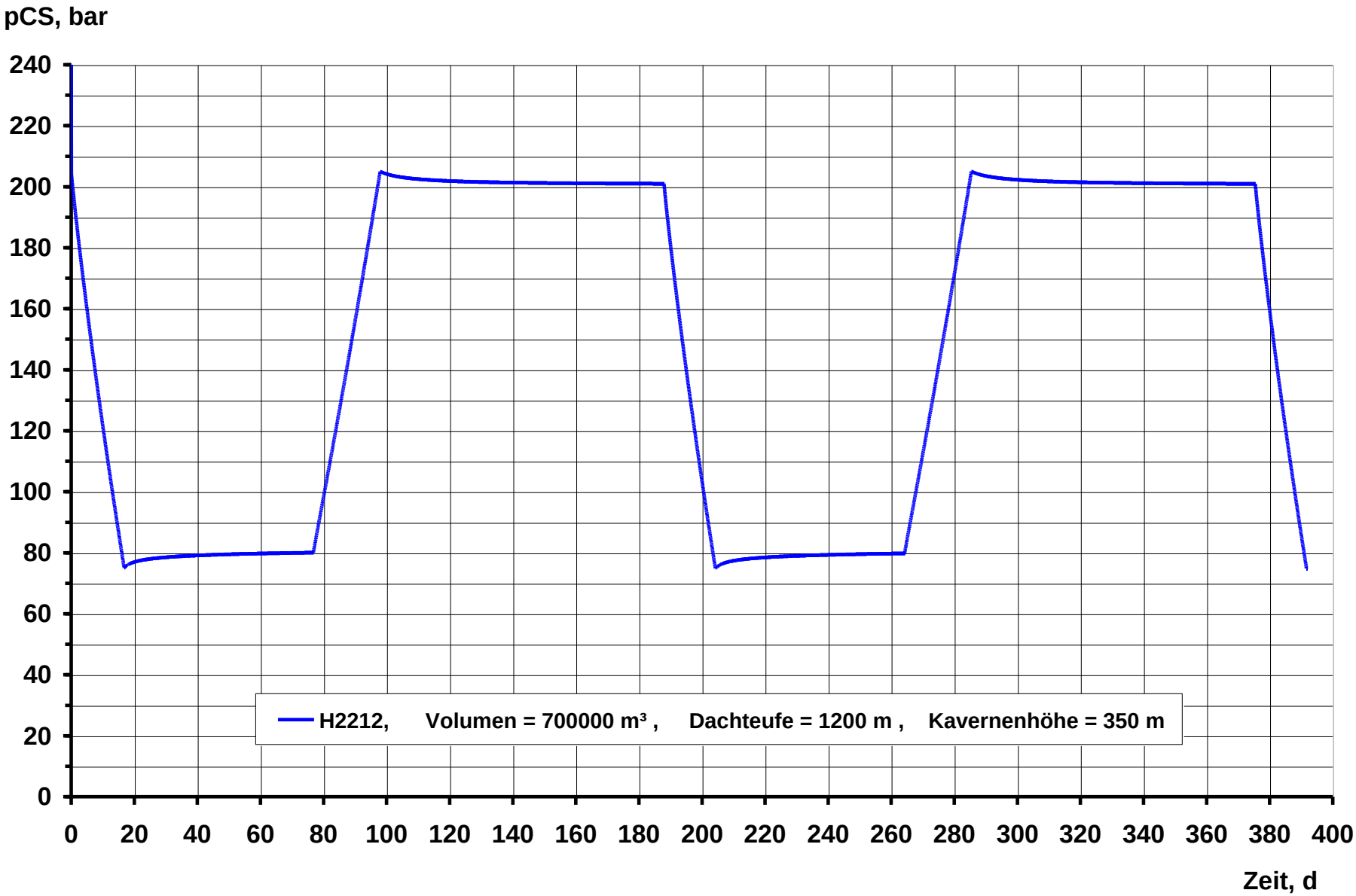


Abbildung 69

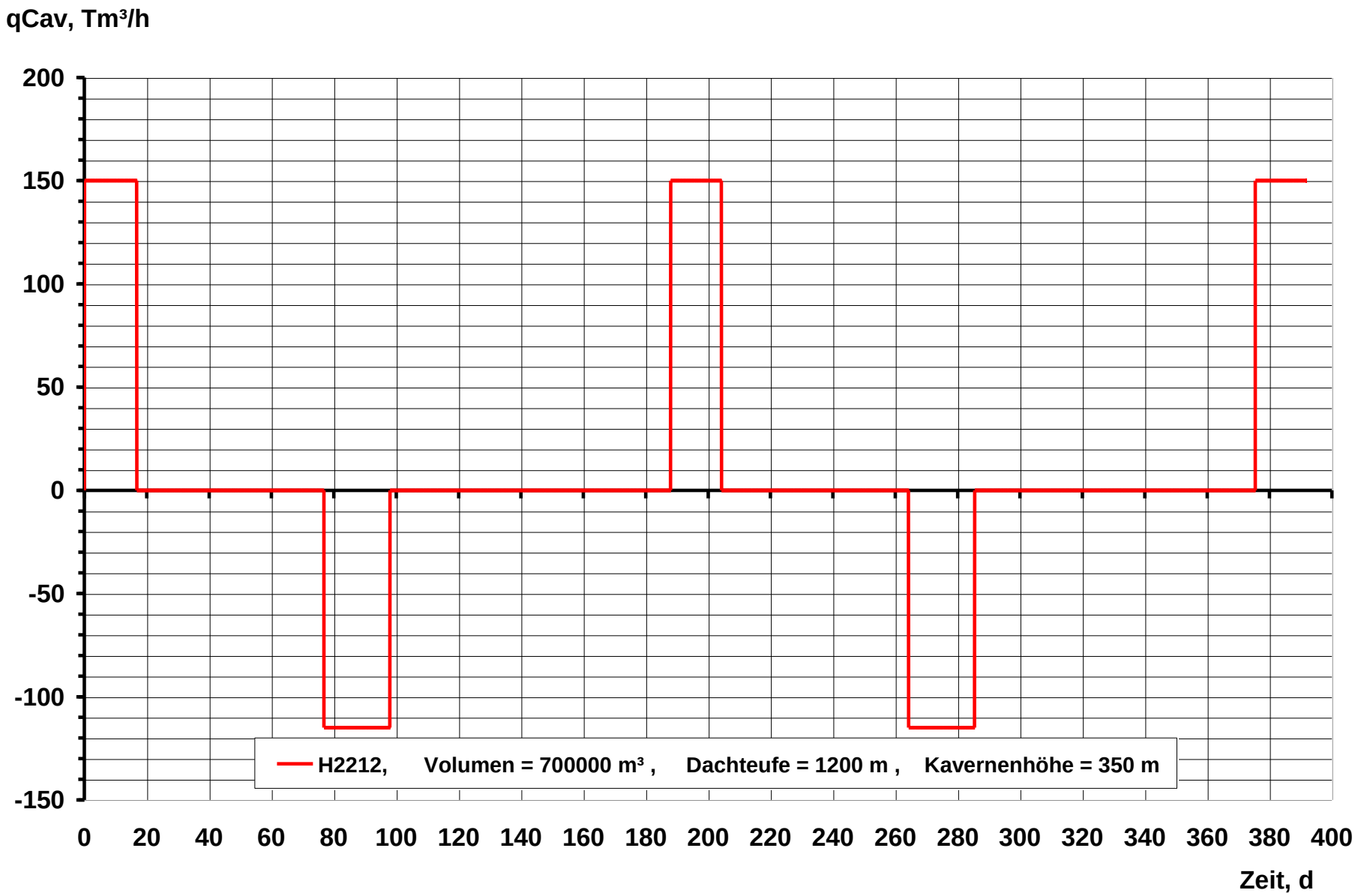


Abbildung 70

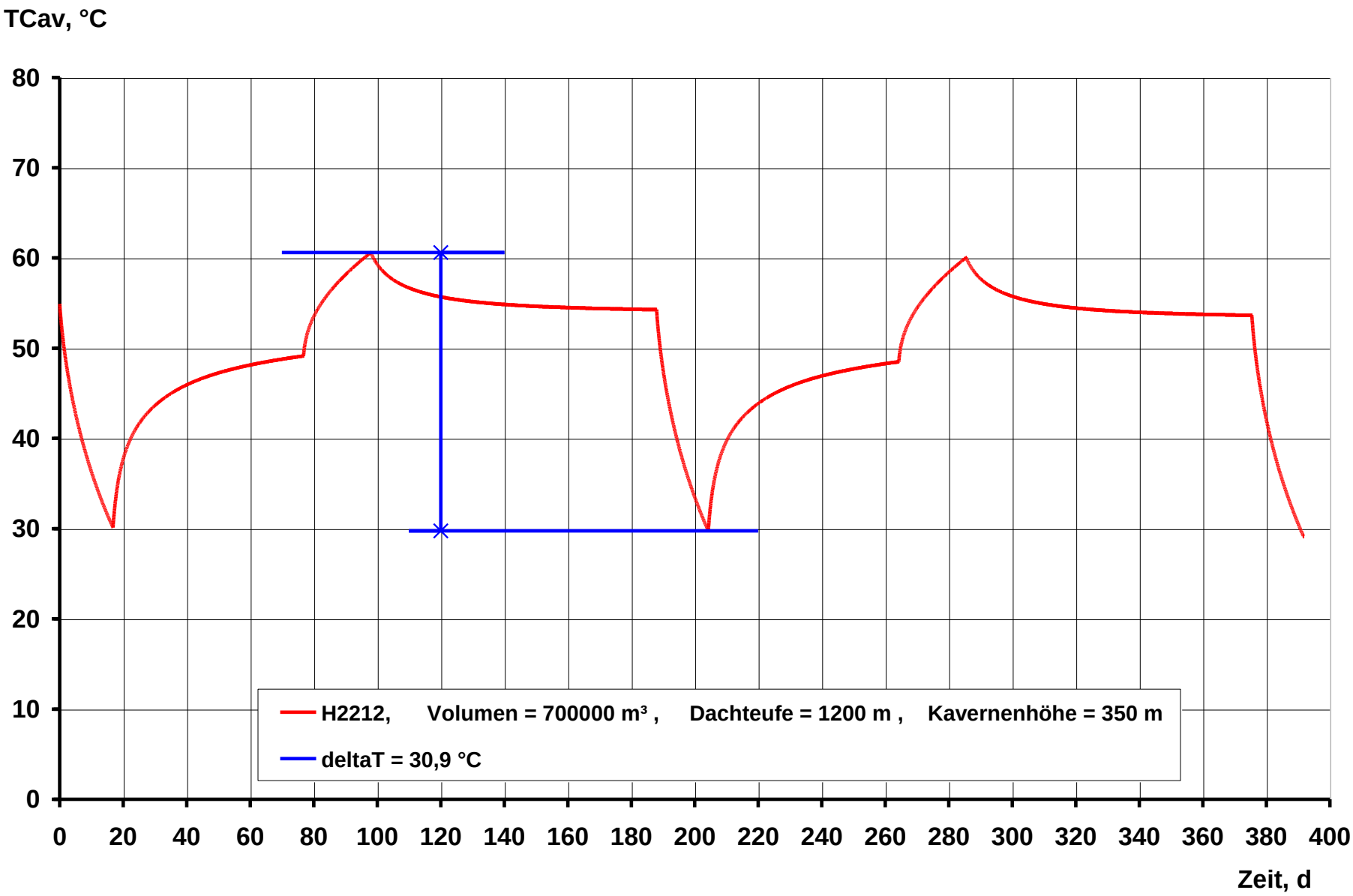


Abbildung 71

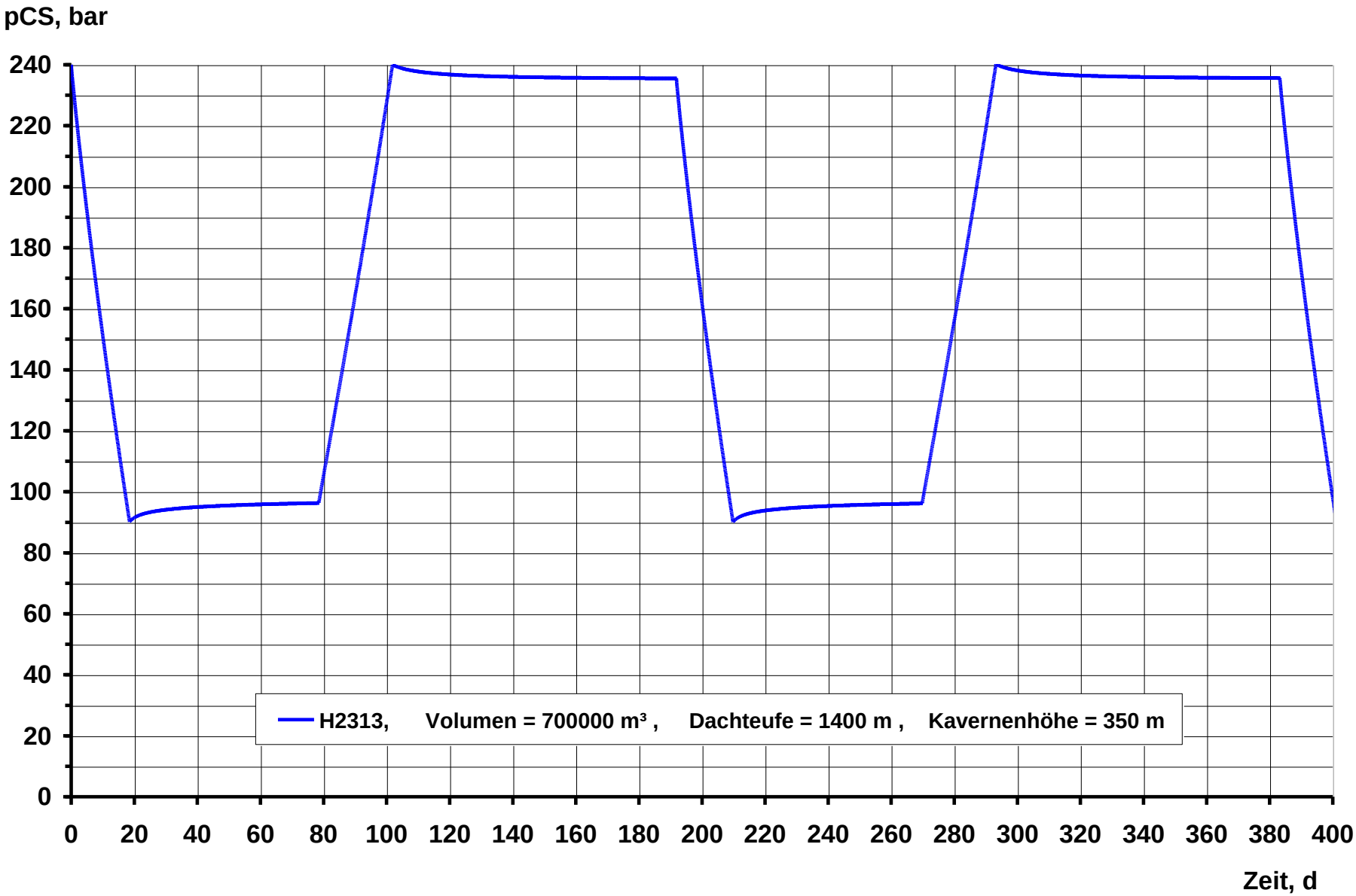


Abbildung 72

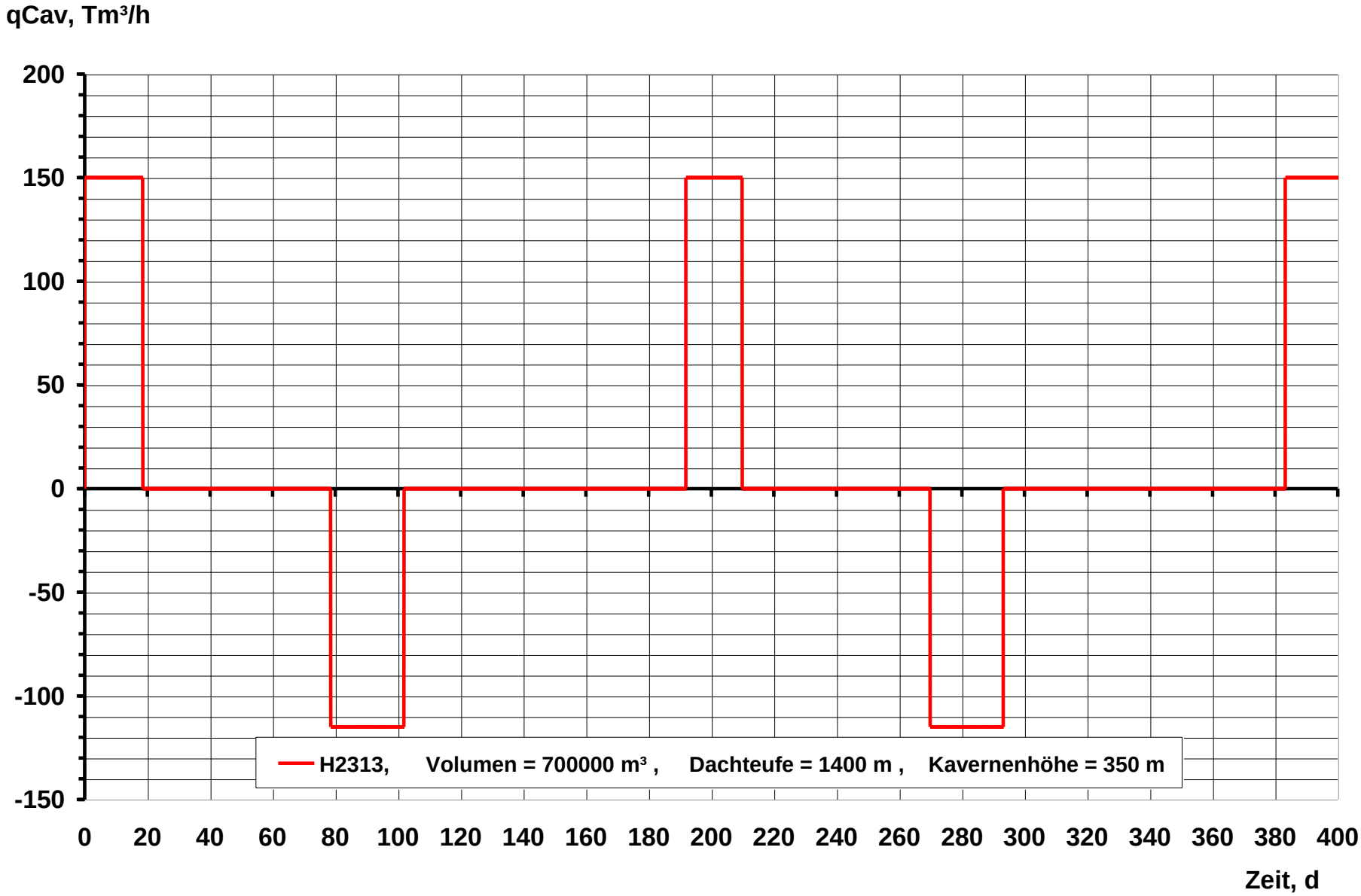


Abbildung 73

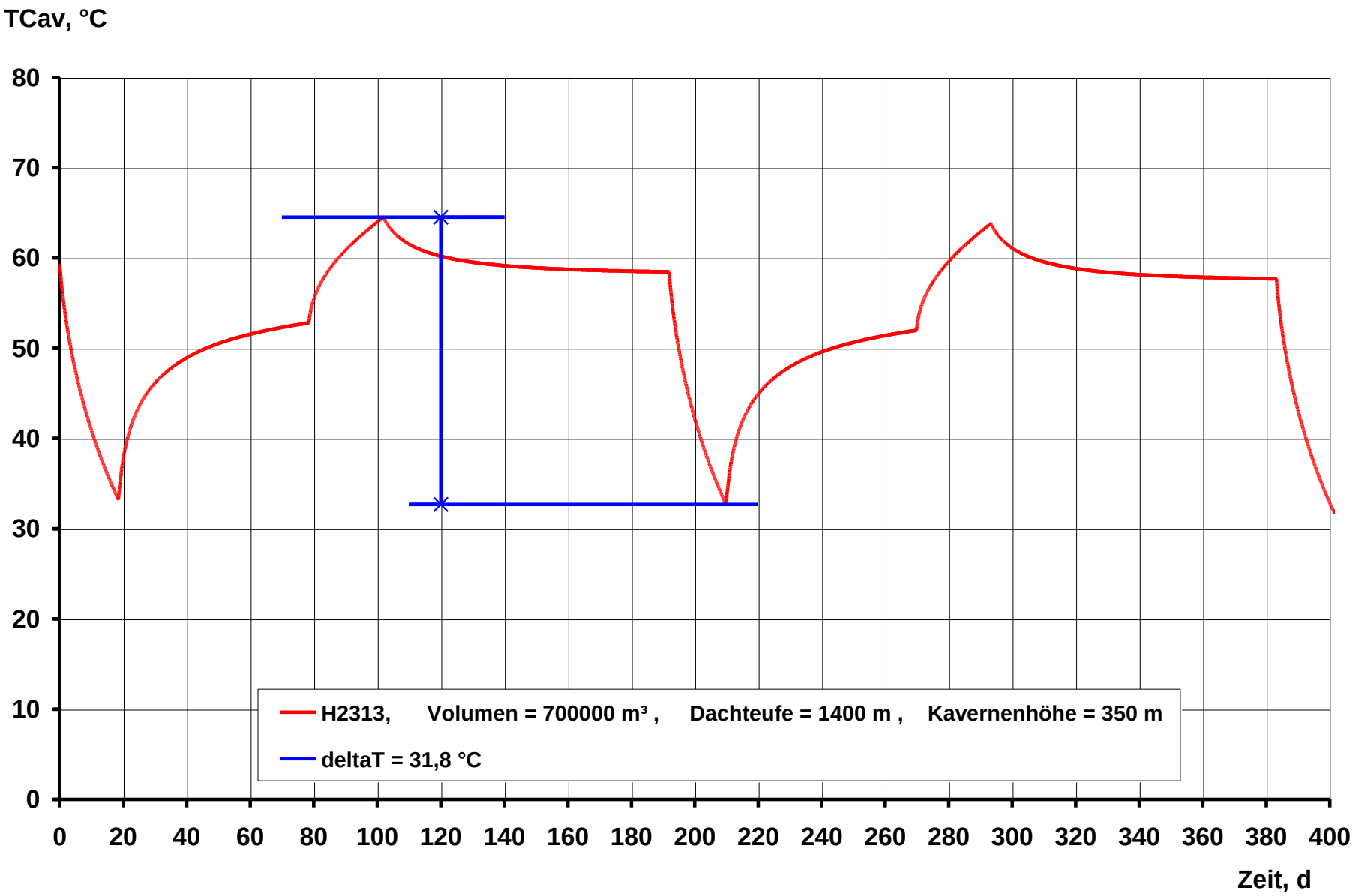


Abbildung 74

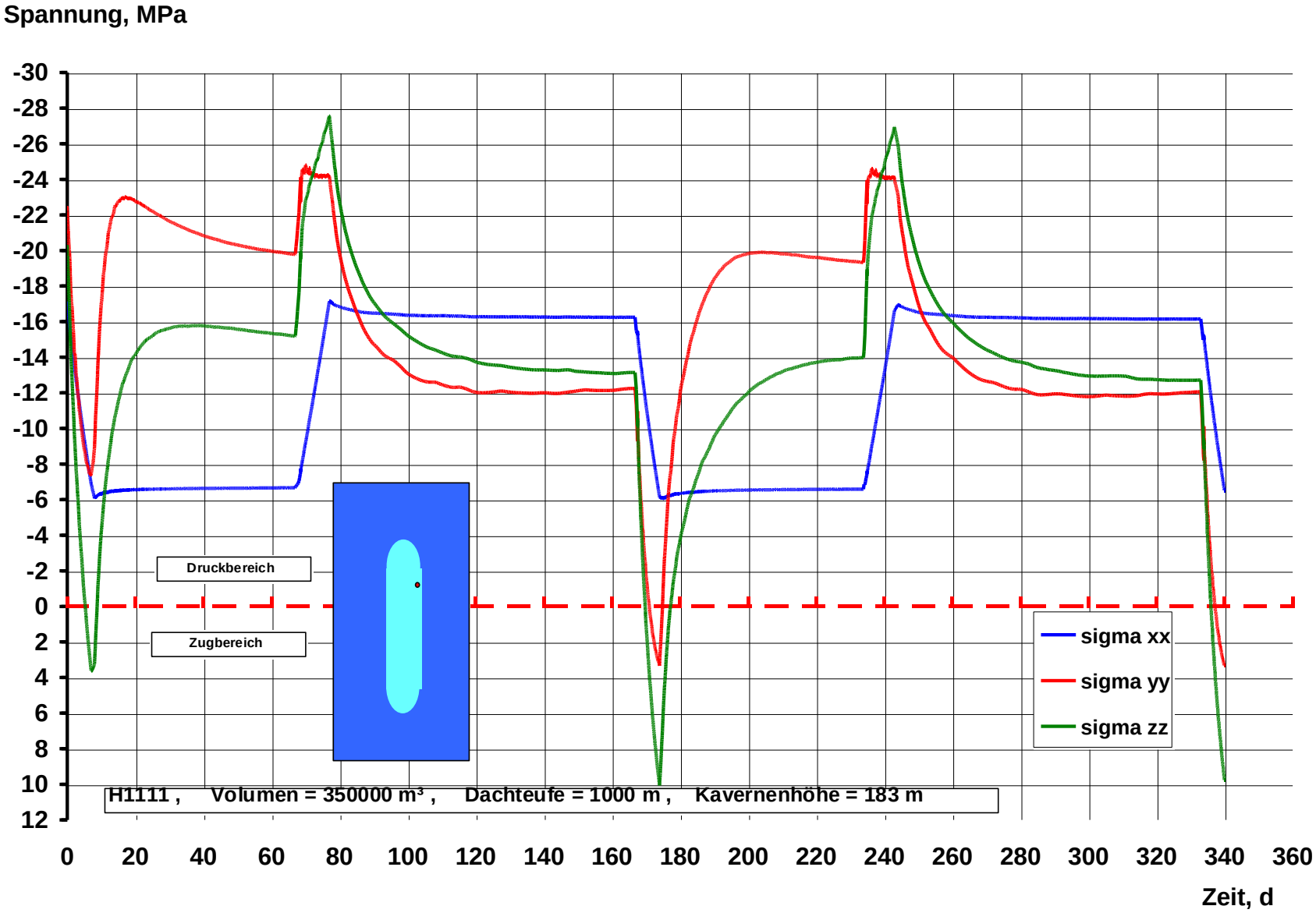


Abbildung 75

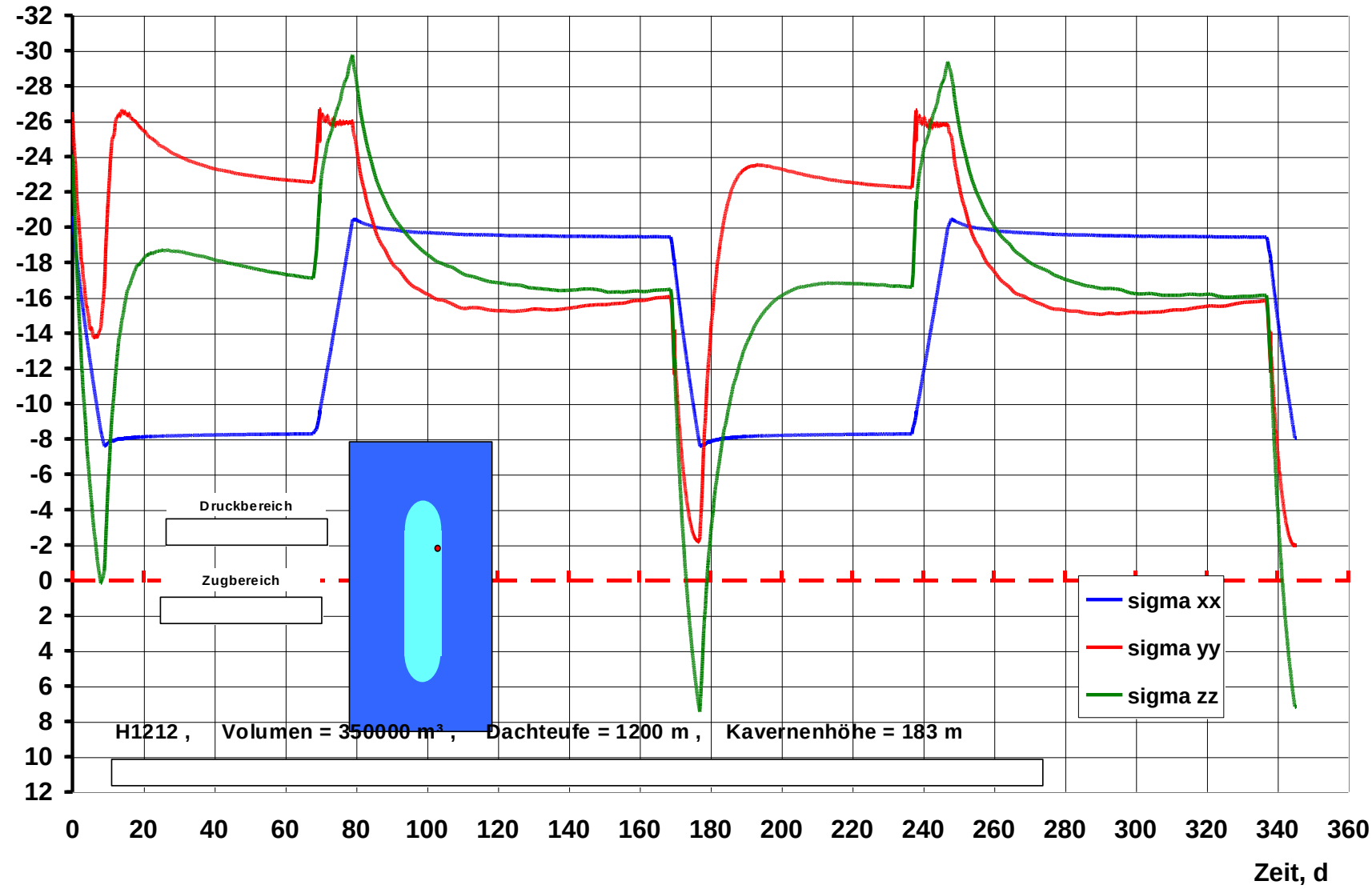


Abbildung 76

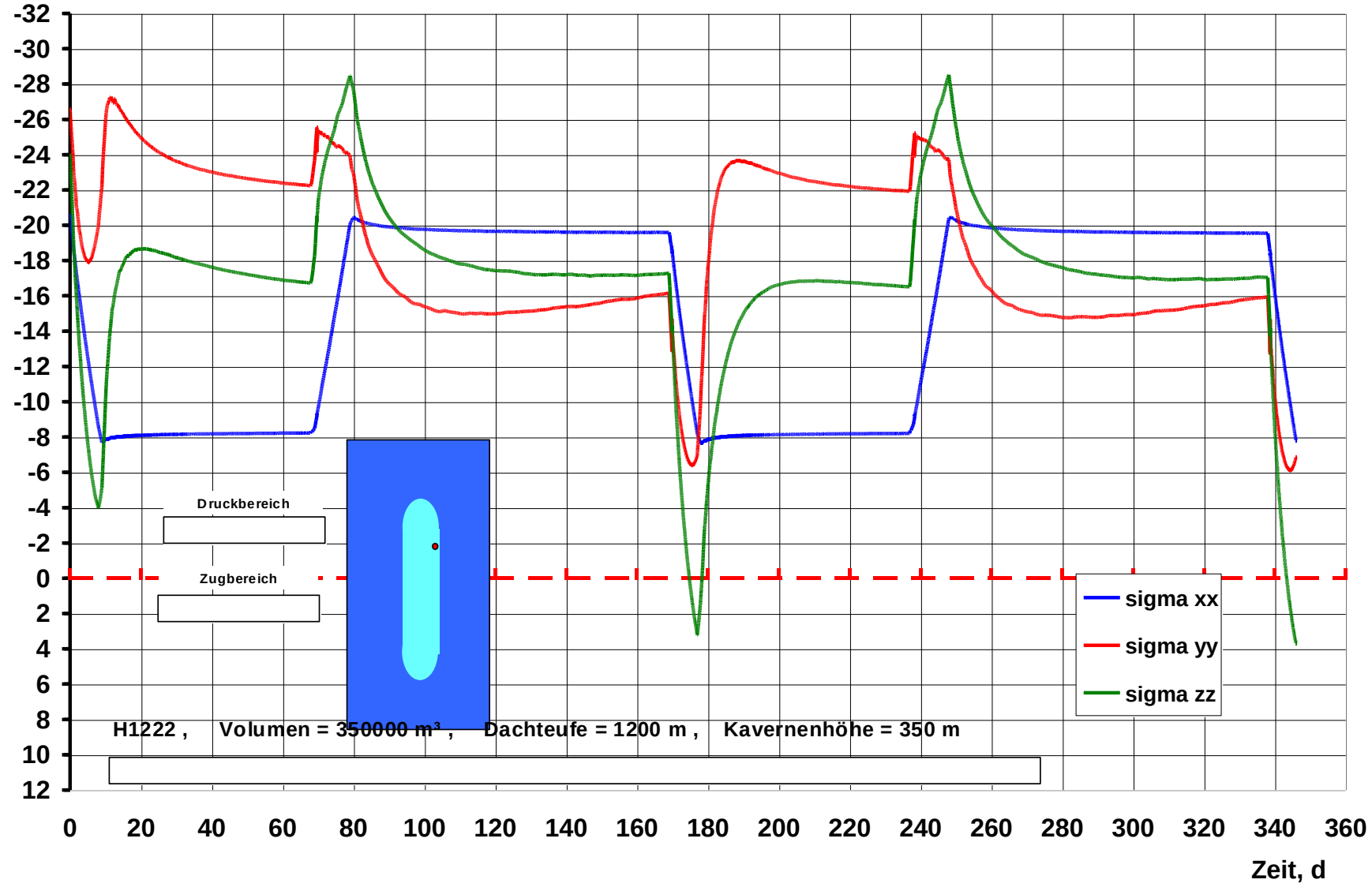


Abbildung 77

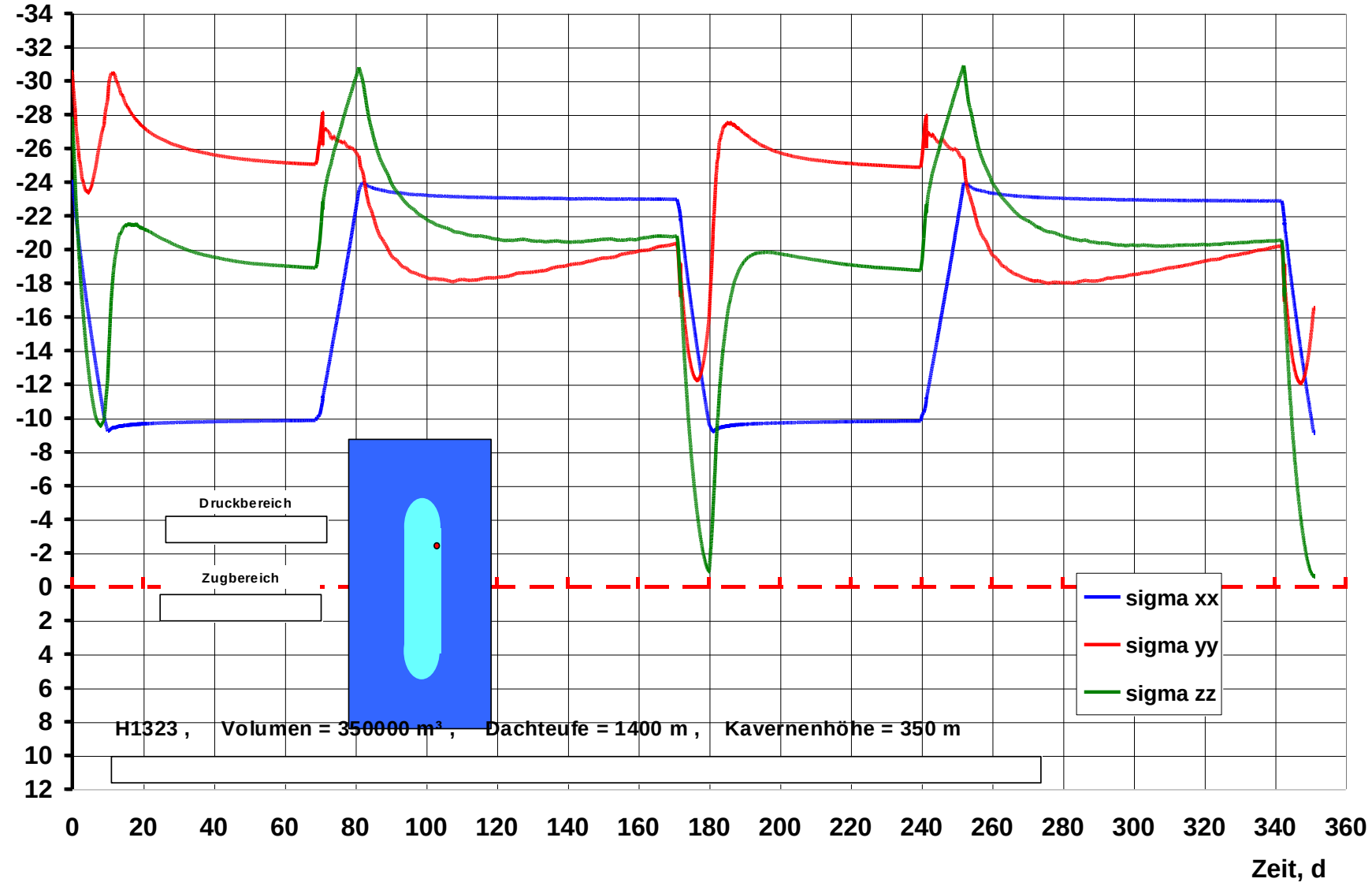


Abbildung 78

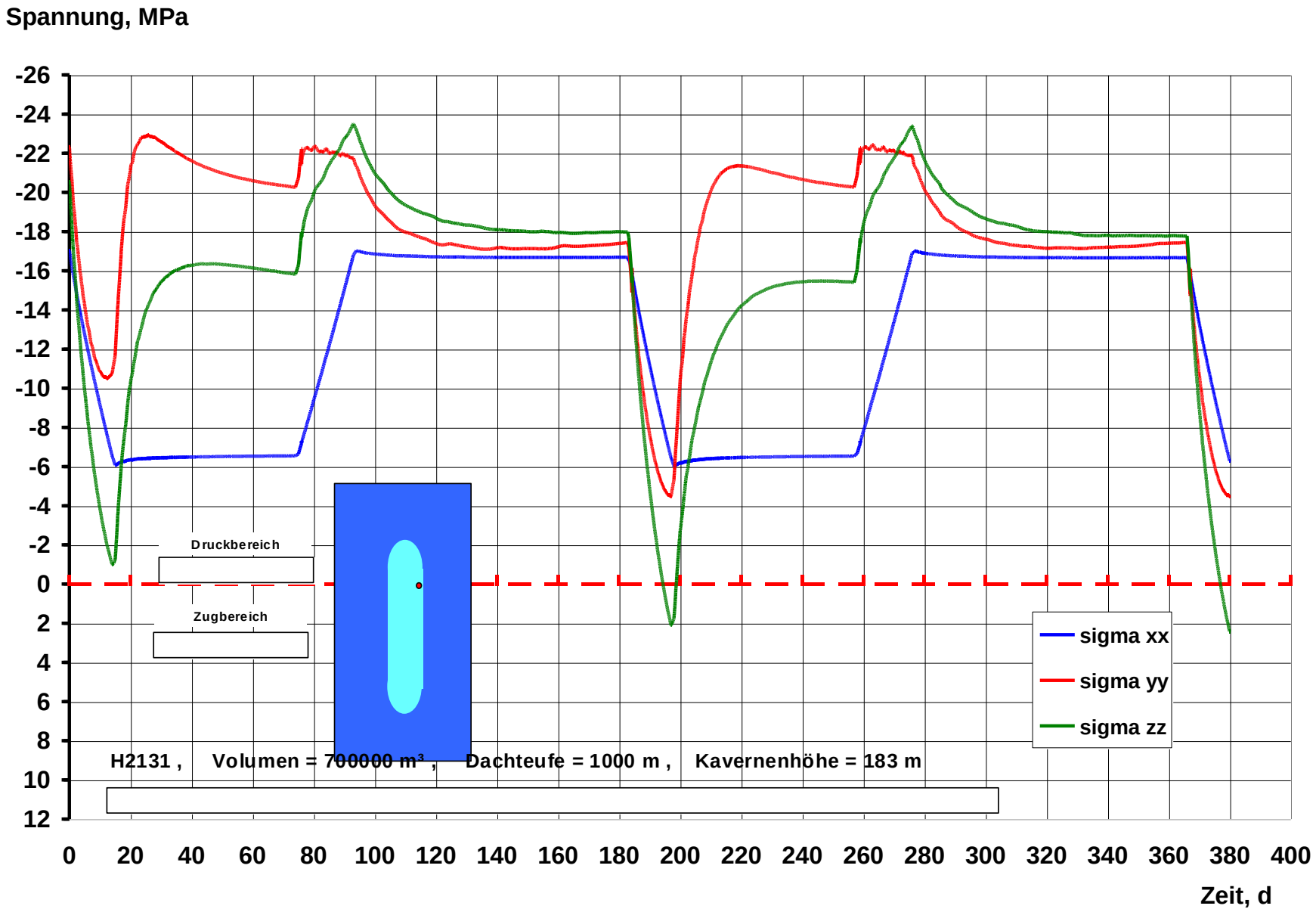


Abbildung 79

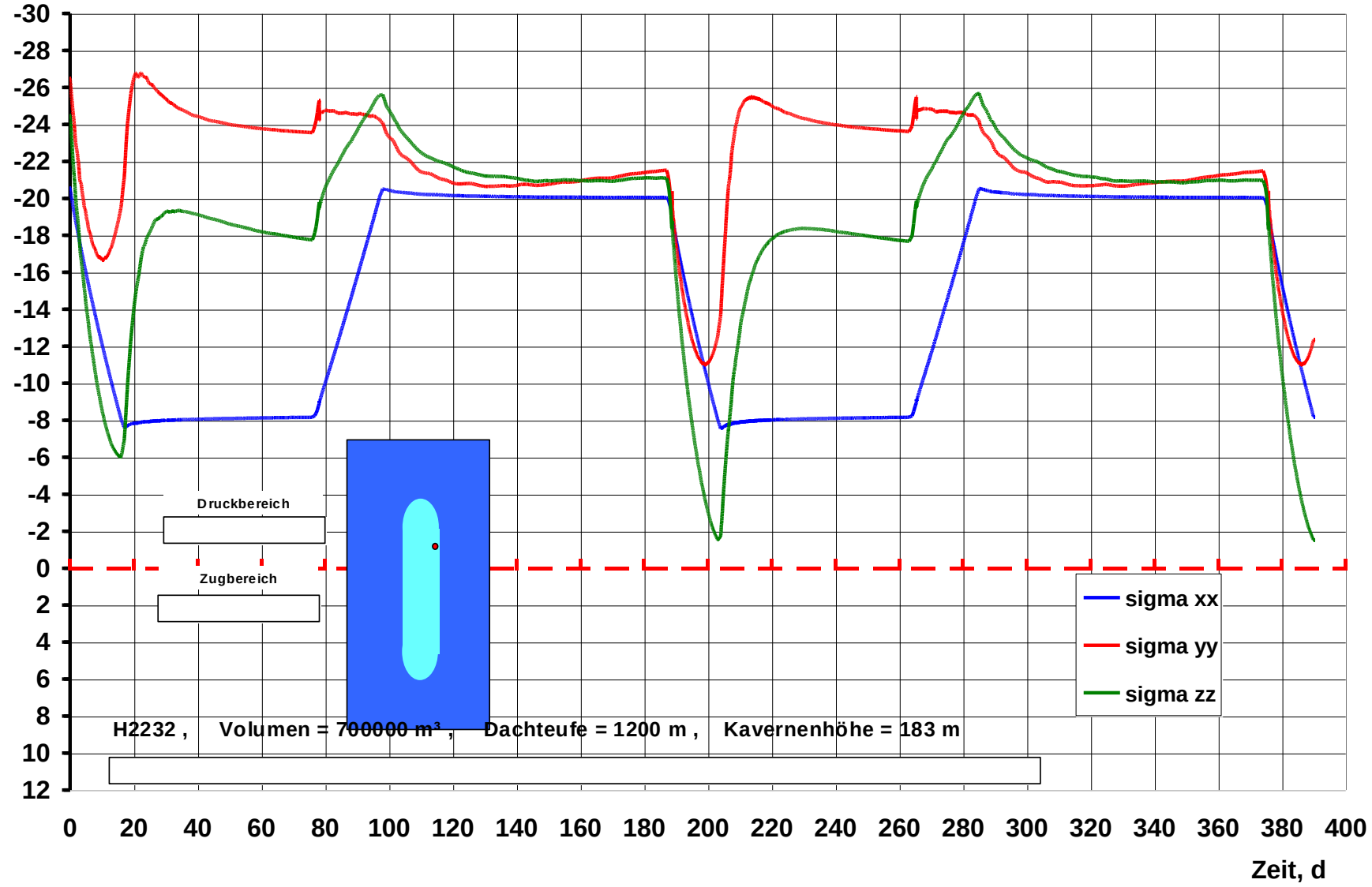


Abbildung 80

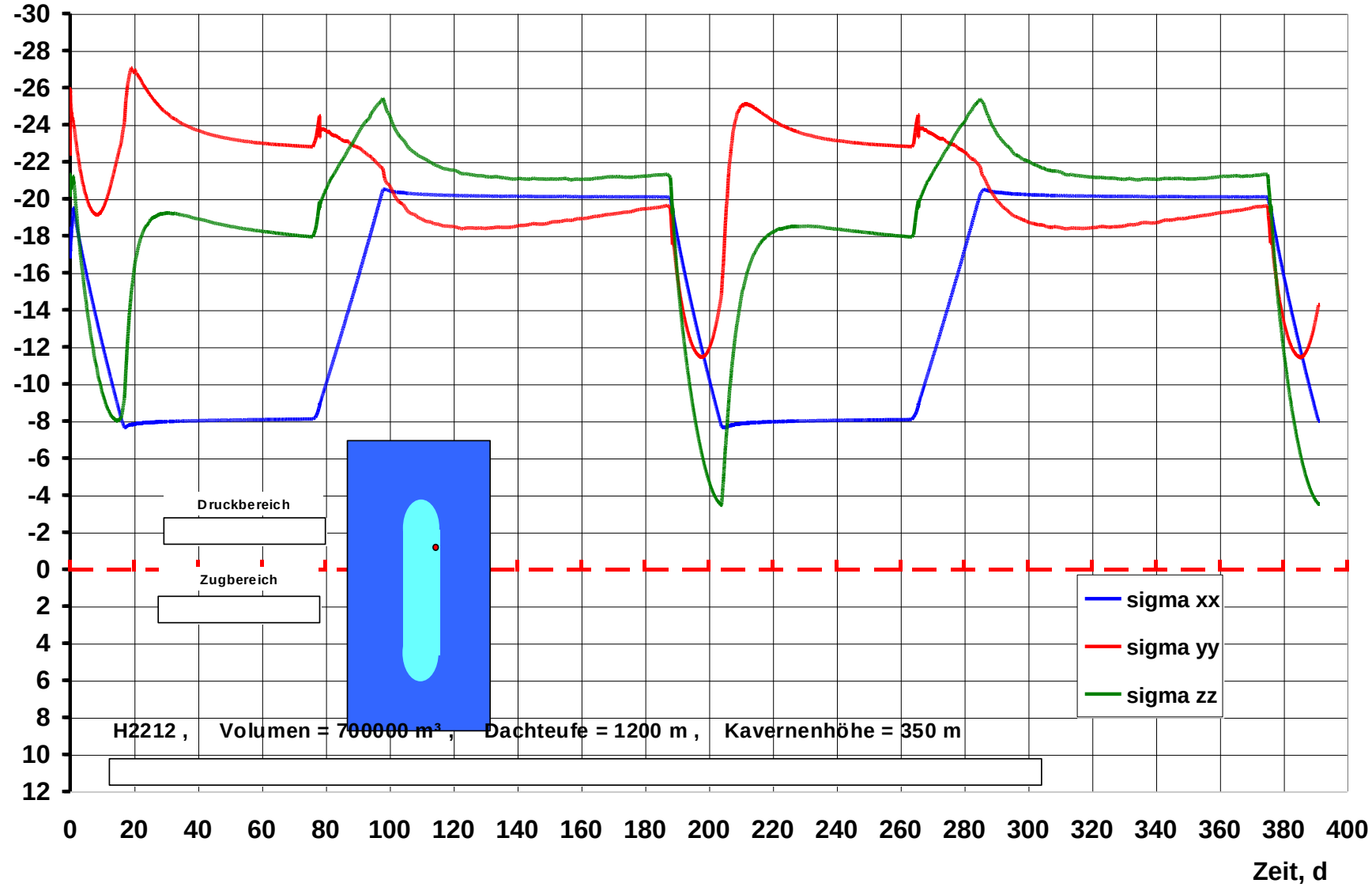


Abbildung 81

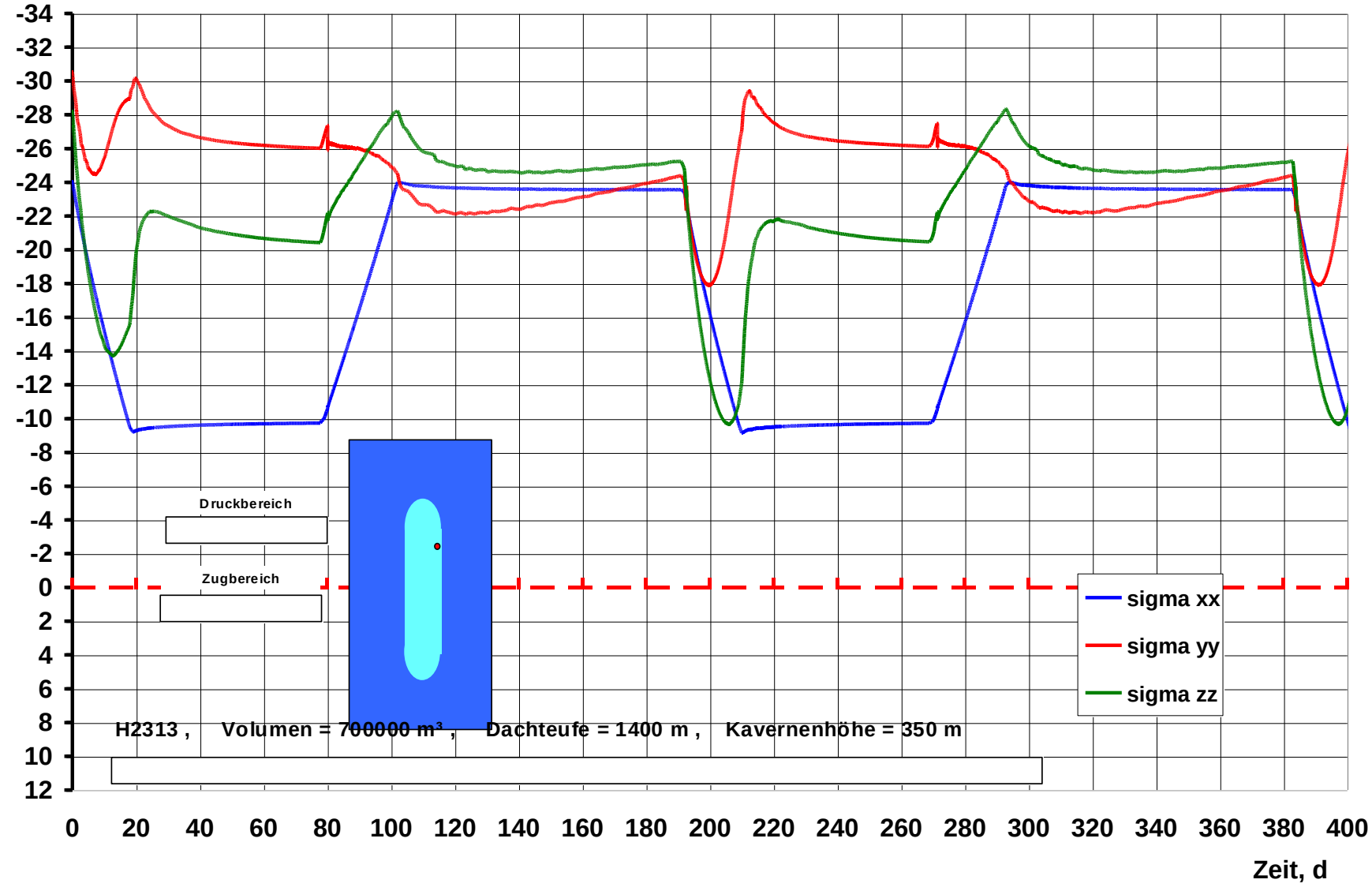


Abbildung 82