

Forschungsvorhaben

Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit- Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung

Förderkennzeichen 02C0800

Abschlussbericht Teil I

Institution: Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Projektleiter: Dr.-Ing. Klaus Kupfer

Unterauftragnehmer
IBEWA Freiberg: Dr.-Ing. Th. Wilsnack

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 01. 2004

Förderkennzeichen 02C0810

Abschlussbericht Teil II

Institution: Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Projektleiter: Dr.-Ing. A. Brandelik

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 10. 2003

Forschungsvorhaben

Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit- Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung

Teil I

Förderkennzeichen 02C0800

Abschlussbericht

Projektleiter: Dr.-Ing. Klaus Kupfer

MFPA Weimar: Dr.-Ing. Klaus Kupfer
Dipl.-Ing. E. Trinks
Dipl.-Ing.(FH) Th. Keiner
Dipl.-Geophys. Th. Schäfer

Unterauftragnehmer: Prof. Dr.-Ing. C. Hübner

Unterauftragnehmer
IBEWA Freiberg: Dr.-Ing. Th. Wilsnack
Dipl.-Math. S. Boy

Unterauftragnehmer
TU BA Freiberg: Dr.-Ing. M. Gruner
Dipl.-Ing. W. Gaßner

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 01. 2004

Institution: Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
Amalienstr. 13; 99425 Weimar

Weimar, 29. 7. 2004

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C0800 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung - Teil I

Kurzfassung

Das vorliegende Vorhaben ist dem FuE-Programm des BMBF „Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ zugeordnet und hat Bezug zu den Themenkreisen B4 Verhalten geotechnischer Barrieren sowie B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen.

Für die Anwendung dielektrischer Messverfahren zur Feuchtebestimmung sind Untersuchungen der Materialeigenschaften vom Verschlussmaterial in salinärer Umgebung und unter den Einflüssen von Druck und Temperatur notwendig. Das Vorhaben dient der Weiterentwicklung von Konzepten zur Kontrolle von langzeitfunktionsfähigen und langzeitsicheren Streckenverschlussbauwerken.

Die Voraussetzungen für das Vorhaben werden im Kapitel 1 vorgestellt.

Die Messung der Feuchteverteilung in nachsorgefrei konzipierten Bauten ist sowohl für die Bewertung des statischen Zustandes, für die nicht bestimmungsgemäße Entwicklung von Lösungszutritten, aber auch für die Datenerfassung von Langzeitsicherheitsanalysen dringend notwendig, auch bei der Beibehaltung der Aufgabe, ein passives System ohne Kontrolle zu schaffen. Da Langzeiterfahrungen fehlen, ist eine messtechnische Kontrolle unter Einbeziehung von Störgrößen über einen relativ langen Überwachungszeitraum unerlässlich. Diese messtechnische Begleitung ist nicht nur für die Qualitätssicherung bei der Bauabnahme erforderlich, sondern sie wird auch den Zeitpunkt der Entlassung aus der Überwachungsphase bestimmen und diese voraussichtlich wesentlich verkürzen.

Die messtechnisch erfassbaren Parameter quellender Materialien sind zeitlich und örtlich veränderlich. Starre Elektroden kommerziell verfügbarer Messgeräte sind zur Messwerterfassung für die auftretenden Quell- und Schwindbewegungen von Bentonit nicht geeignet. Messtechnische Untersuchungen zeigten, dass Genauigkeit und Zuverlässigkeit bekannter Feuchtemessverfahren für den hier definierten Einsatzfall zu gering sind (Kap. 1.2).

Gegenstand des Vorhabens war die Entwicklung von Messmethoden, die es erlauben, ein dielektrisches Messsystem mit flexiblen Elektroden für die Feuchtemessung am Verschlussmaterial Bentonit in salinärer Umgebung einzusetzen, mit dem die beschriebenen Nachteile umgangen werden können. Der eigentliche Sensor wurde als passives, feuchteempfindliches Flachbandkabel ausgeführt, mit dem über die Impulslaufzeit die Dielektrizitätskonstante (DK) des umhüllenden Materials gemessen wurde. Grundlage zur Entwicklung dieser Sensoren bildeten die Patente 19501196 DE, 19755052 DE und die Anmeldung 19833331.5 DE vom FZ Karlsruhe.

Das Vorhaben wurde im Zeitraum von 12/2000 bis 1/2004 durchgeführt und war in folgende Arbeitspakete gegliedert (Arbeitsplan s. Kap. 1.1):

- AP1. Konzeption der Messsysteme für Zeit- und Frequenzbereich, Versuchsplanung
- AP2. Materialuntersuchungen von verschiedenen Bentonitmaterialien unter Laborbedingungen mit dem NWA

- AP3. Modellberechnungen zur Entwicklung einer Messmethode
- AP4. Entwicklung eines TDR-Messsystems
- AP5. Messungen im Frequenzbereich
- AP6. Detektion von Feuchtefronten
- AP7. Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen
- AP8. Prognosemodell (für Feuchteausbreitung im Dichtelement)

Die Vorhaben 02C0800 / 020810 wurden von der MFPA Weimar, AG Feuchtemessverfahren, im Verbund mit der Arbeitsgruppe Aquametry von Herrn Dr. Brandelik vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt. Das Projekt 02C0810 vom Forschungszentrum wurde als eigenständiges Thema realisiert; die Beschreibung befindet sich im Teil II. Die Problemstellungen zum Test der Kabelsensoren unter realitätsnahen Bedingungen AP 7 und Prognosemodelle AP 8 wurden als Unterauftrag von der IBeWa-Ingenieurpartnerschaft und dem Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg bearbeitet. Die Projektleitung wurde von der MFPA Weimar (Dr. Kupfer) übernommen.

Im Kapitel 2 wurden mineralogische Untersuchungen beschrieben, die zur optimalen Anpassung von Sensoren an das Material dienen. Die Bestimmung der mineralogischen Eigenschaften erfolgte mit Differenzthermoanalyse, Röntgendiffraktometrie, Infrarotspektroskopie und Elektronenmikroskopie.

Vom analysierten Probenmaterial wurden folgende Tonmineral/Phyllosilikat-Paragenesen nachgewiesen (Tab. 2.1):

- Calcigel: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer + Kaolinmineral + Chlorit
- MX 80: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer

Bei der Elektronenmikroskopie konnte festgestellt werden, dass die Blättchenstruktur des Bentonits durch den Einfluss von hochkonzentrierten Salzlösungen verkrustet wird, die Aufnahme von Zwischenschichtwasser wird reduziert (vgl. Bilder 2.9-12 und Bilder 2.17-20)¹.

Die dielektrischen Eigenschaften von Bentoniten wurden durch Verwendung eines Netzwerkanalysators, einer koaxialen Messleitung und einer offenen Koaxialsonde in einem breiten Frequenzbereich charakterisiert (Kapitel 3). Mit diesen Messungen wurde es möglich, äußere Einflüsse (z.B. Temperatur (Bilder 3.11, 3.12)) sowie Einflüsse von Materialeigenschaften (Salzgehalt) auf das Messergebnis zu spezifizieren und Sensoren zu optimieren.

Die Bestimmung der komplexen Dielektrizitätskonstante (DK), wie Realteil der DK und Verlustfaktor sind die Grundlage für die Berechnung von Sensormodellen mit dem Finite Elemente Programm HFSS (Bilder 3.8, 3.10).

¹ Bezeichnete Kapitel, Bilder, Gleichungen und Tabellen beziehen sich auf den Gesamtbericht.

Schnellbestimmungen des Feuchtegehaltes mit Oberflächensensoren (Bild 4.6) an einem Bohrlochschachtverschluss bei Salzdetfurth und an Bentonitproben eines Streckenverschlussbauwerkes Sondershausen werden im Kapitel 4 gezeigt. Referenzmessungen wurden zum Feuchtegehalt und zur Leitfähigkeit durchgeführt. Die Leitfähigkeit von Eluatproben zeigte eine gute Korrelation ($BM = 0,977$) über dem Feuchtegehalt (Bild 4.9). Die Messwerte von Resonanzfrequenz und Bandbreite zeigten beim 150 MHz-Sensor starke Streuungen über dem Feuchtegehalt. Die Messung mit E-Feld- und H-Feld-Sensoren bei 2,45 GHz ergab bei Quotientenbildung von Differenzbandbreite und Differenzresonanzfrequenz recht hohe Bestimmtheitsmaße der Kalibrierkurven ($> 0,83$) (Bild 4.27).

Im Kapitel 5 werden die Grundlagen des TDR-Messverfahrens vorgestellt. Bei der Betrachtung der Leitungsparameter wurde mit Modellrechnungen gezeigt, dass das Kabel weiter optimiert werden sollte. Bei hohen Frequenzen zeigt der Skineneffekt starke Wirkung (Bild 5.9); die Ströme fließen vor allem an den Außenkanten des Leiterquerschnittes. Durch mathematische Ableitungen konnte der Zusammenhang zwischen Leitungsparametern, Dämpfungs- und Phasenmaß sowie Impulslaufzeit und Ionenleitfähigkeit ermittelt werden (Gln. 5.7, 5.11).

Die Impulslaufzeit bei TDR-Sensoren ist abhängig von der DK; je feuchter ein Material, desto größer ist die Impulslaufzeit (Bild 5.12). Bei Erhöhung des Salzgehaltes wird bis zu einem bestimmten Maß der Anstieg der Impulsflanke reduziert (Bild 5.13). Mit steigender Temperatur wird die DK und damit die Laufzeit reduziert (Bild 5.15). Zur genauen Bestimmung der Impulslaufzeit wurde ein Messverfahren entwickelt, das die erste und zweite Ableitung an den Wendepunkten der Kurve nutzt (Bild 5.11).

Anforderungen und Berechnungen stark verlustbehafteter Leitungen mit einem Simulationsprogramm werden im Kapitel 6 durchgeführt.

Anforderungen anwendungsnahe Modellrechnungen:

- Darstellung und Berechnung des Sensors
- Berechnung des Sensors umgeben mit verlustbehafteten Materialien
- Berechnung in einem Frequenzbereich, der einer Impulsbreite von 200 ps entspricht (DC – 12,5 GHz)
- Umwandlung der im Frequenzbereich ermittelten Ergebnisse in den Zeitbereich und Bestimmung der Sprungantwort

Diese Anforderungen werden vom 3D-Finite-Elemente-Programm HFSS (Hochfrequenzstrukturanalysator) der Fa. Ansoft erfüllt.

Kalibrierungen bei der Feuchtemessung sind sehr zeitaufwendig, vor allem dann, wenn bei der Erhöhung der Feuchte beim Bentonit gleich mehrere Materialparameter gleichzeitig geändert werden (Feuchte, Dichte, Ionengehalt). Geringfügige Änderungen des Sensors zur Anpassung an das Material sind bei Kalibrierungen mit aufwendigen Neukonstruktionen und Erprobungen verbunden.

Simulationen haben bei der Feuchtemessung den Vorteil, dass bestimmte Eigenschaften in relativ kurzer Zeit hervorgehoben oder unterdrückt werden können. Mit Hilfe eines EM-Feldsimulators wird es möglich, Spezifika des Sensors oder des Materials aus der Datenvielfalt heraus zu filtern und Sensoren zu optimieren.

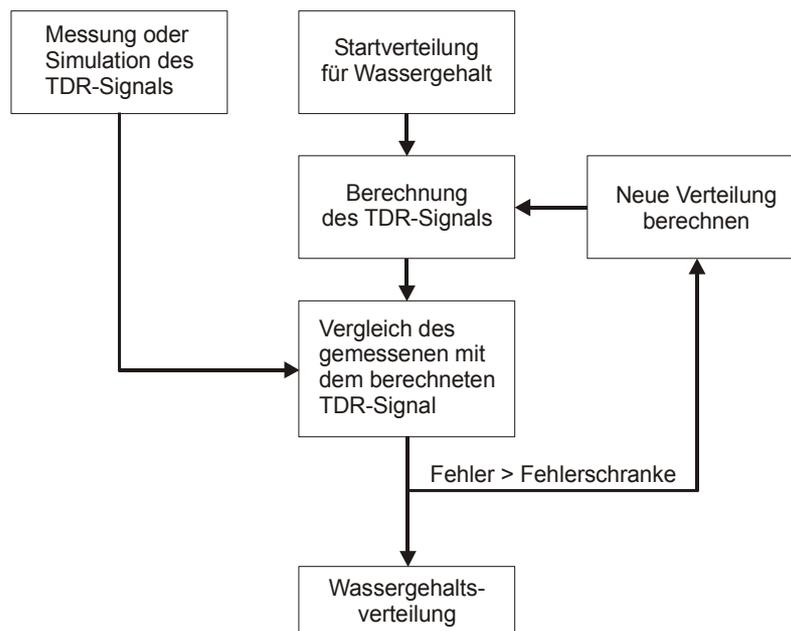
Bei der Simulation wurde zunächst der Sensor konstruiert, Materialparameter (Bild 6.7), Grenzen und Lösungsparameter (Tab. 6.1) eingegeben und das Modell schrittweise berechnet. Grenzen bedingt durch unzureichenden RAM-Bereich des Computers entstanden bei hohen Feuchtwerten und bei hohen Frequenzen.

Die berechneten S-Parameter konnten als Amplituden- oder Phasendiagramme in Abhängigkeit von der Frequenz oder in Smith-Diagrammen aufgetragen werden. Es ist auch möglich, die unterschiedlichen 3D-Feld- oder Vektordarstellungen bzw. Phasenanimationen aufzuzeichnen (Bild 6.4). Mit einer FFT wird das im Frequenzbereich berechnete Modell in den Zeitbereich transformiert. In einer Schaltungssimulation wird eine Transientenanalyse durchgeführt (Bild 6.5).

Mit der Simulation wurden zahlreiche Kalibrierungen für Mischungen von Bentonit-Sand-Wasser und Bentonit-Sand-Salzlösung durchgeführt; die mit praktischen Versuchen gut übereinstimmen.

Ein sehr wichtiges sicherheitsrelevantes Problem kann während der Installation von Kabelsensoren in Bentonitbarrieren auftreten. Durch nicht sachgemäßen Einbau ist es möglich, dass über eine dünne Luftschicht zwischen Material und dem Bandkabel Wasser eindringt und die Dichtung des gesamten Bauwerkes zerstört. Das Kabel fungiert in diesem Fall als „Wasserleiter“. Die dabei entstehenden Einflüsse auf das Messergebnis konnten nur mit einer Simulation realisiert werden, da bei experimentellen Untersuchungen andere Störeinflüsse das Messergebnis verfälschen. Gegenüber einem normal vom Material umschlossenen Kabel wird die Laufzeit durch den Einfluß des Luftspaltes verkürzt. Wird der Spalt mit Wasser gefüllt, so wird die Laufzeit vergrößert (Bild 6.12).

Mit Hilfe von TDR-Rekonstruktionsalgorithmen können Feuchtegehaltsverteilungen entlang einer Kabelstrecke unter bestimmten Randbedingungen bestimmt werden (Kapitel 7). Dabei findet folgendes Flussdiagramm für die Matlab-Simulation und Rekonstruktion Anwendung:



Es wurden Lösungswege zur Realisierung aufgezeigt; Grenzen bestehen bei den vorliegenden stark verlustbehafteten Materialien.

Bei den experimentellen Untersuchungen im Kapitel 8 zur Bestimmung von Feuchteprofilen stand ein Kabeltester zur Verfügung, der Stufenimpulse von 200 ps erzeugte. Folgende Experimente wurden durchgeführt:

- Detektion der Füllhöhe eines Rohres (Bild 8.4)
- Feuchteverteilungen in einem Trog mit Sand, Sand-Bentonit-Gemisch und Bentonitformsteinen (Bilder 8.8 und 8.12)

- Feuchteprofile in einem Trog mit Kammern (Bild 8.14)
 - Die Verschiebung einer Kammer mit trockenem Sand konnte auf der Impulsform abgebildet werden; die Laufzeit blieb konstant (Bild 8.16)
 - Die schrittweise Befüllung der Kammern mit trockenem Sand konnte durch Impulsform und Veränderung der Laufzeit bestimmt werden (Impulsamplitude blieb konstant) (Bild 8.18)
 - Die schrittweise Befüllung mit verschiedenen feuchten Materialien konnte ebenfalls über Impulsamplitude und Veränderung der Laufzeit bestimmt werden (Bild 8.19)
 - Durch genaue Bestimmung von Laufzeit und Impulsamplitude konnten Veränderungen der Dichte bestimmt werden. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für Feuchte- und Dichtebestimmungen im Folgethema (Bilder 8.22 und 8.23).
 - Bei einem Bentonit-Sand-Gemisch wurde die Feuchte schrittweise bis 18,42 % erhöht. Trotz Feuchterhöhung erreichen Impulsform und Laufzeit bei 9,16 % einen Umkehrpunkt, und fielen danach beträchtlich ab (Thixotropie) (Bild 8.24).
- Aufnahme von Feuchteprofilen beim kapillaren Saugen (Bilder 8.25 und 8.28)
Die Wassersäule nahm nach Messzeiten von 6, 10, 16 Tagen deutlich ab; mit dem Kabelsensor konnte das Steigen der Saughöhe ermittelt werden.
- Austrocknung eines Betonprismas (Trocknung von Massebeton, Brücken...) (Bild 8.29)
Es konnte festgestellt werden, dass durch die Stahlbewehrung das Messergebnis nicht beeinflusst wird, sofern die Bewehrungsstäbe vom Kabelsensor genügend weit entfernt sind. Eine veränderte Kurve des Bezugsfeuchtegehaltes im Vergleich zur Impulslaufzeit als Funktionen der Austrocknung rührt u.a. daher, dass die Wasserverteilung im Innern des Prismas eine wesentlich andere war, als dies bei den Referenzmessung ermittelt werden konnte, da die Oberfläche des Prismas zuerst austrocknete (Bild 8.31).

Die Kalibrierung von TDR-Kabelsensoren in Sand-Bentonit-Gemischen ist ein wesentlicher Bestandteil des Vorhabens und wurde im Kapitel 9 vorgestellt.

Eine Kalibrierkurve dient der Quantifizierung der Feuchte und ist eine Funktion der Impulslaufzeit über einem breiten Feuchtebereich. Zur Erstellung einer TDR-Kalibrierkurve ist es notwendig, Impulsantworten von Kabelsensoren aufzunehmen, die im Material eingebettet sind. Die Feuchte des Gemisches wird dabei schrittweise vom trocknen Zustand bis zur Sättigung gesteigert. Es wurden folgende Kalibrierungen an Sand-Bentonit-Gemischen durchgeführt:

- Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Leitungswasser (Bilder 9.5, 9.6)
- Kalibrierung eines Sand-MX 80-Gemisches mit Leitungswasser (Bilder 9.7, 9.8)
- Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Leitungswasser (Bilder 9.9, 9.10)
- Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Steinsalzlösung (Bilder 9.11, 9.12)
- Kalibrierung eines Sand-MX-80-Gemisches mit Steinsalzlösung (Bilder 9.13, 9.14)
- Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Steinsalzlösung (Bilder 9.15, 9.16)
- Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Q-Lauge (Bilder 9.17, 9.18)

Die Kalibrierkurven der Differenzen der Impulslaufzeiten zeigen bei Befeuchtung der Bentonitgemische mit Salzlösungen wesentlich steilere Anstiege über dem Feuchtegehalt, als dies bei Befeuchtung mit Leitungswasser der Fall ist; in diesem Fall verlaufen die Kurven flacher (Bild 9.19). Die Sättigung setzt bei mit Salzlösung befeuchteten Bentonitgemischen bei wesentlich geringeren Feuchtwerten ein, als dies beim Anfeuchten mit Leitungswasser der Fall ist. Für Kalibrierungen sind die Kurven der Impulsanstiege nicht zu gebrauchen, da sie Mehrdeutigkeiten zeigen (z.B. Bild 9.22).

Feuchteprofilbestimmungen unter Laborbedingungen und dem Einfluss von Drücken bis zu 40 bar werden im Kapitel 10 beschrieben.

Ein Druckversuchsstand wurde für Bentonit-Sandgemische und aggressive Flüssigkeiten (Salzlösungen) für Langzeitversuche bis 40bar entwickelt (Bilder 10.1, 10.2). Das Druckrohr hat Längen von 50 cm /100 cm und einen Innendurchmesser von 15 cm (technische Daten Tab. 10.1). In den Außenzylinder des Polycarbonatrohres können verschiedene Sensoren eingebaut werden; gleichzeitig kann visuell die Feuchtefront am Außenrohr positionsgenau mit einem Strichlaser vermessen werden.

Bei der Durchführung folgender Versuche wurden sowohl mechanische als auch elektrische Messwerte aufgezeichnet:

- Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat (binäres Gemisch) und deionisiertem Wasser (200 Tage)
(Bilder 10.11, 10.12)
- Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat und Steinsalzlösung (108 Tage)
(Bilder 10.17, 10.18)

Ziel der Versuche war es, das Vordringen einer Feuchtefront in einem Bentonitverschluss zu detektieren. Dieses Ziel konnte durch gute Übereinstimmung von messtechnisch und visuell ermittelten Werten der Feuchtefront erreicht werden (Bilder 10.14, 10.19).

Beim Versuch mit Steinsalzlösung liegt die Feuchtefront bei wesentlich geringeren Werten der Impulslaufzeit als dies beim Versuch von binärem Gemisch mit Wasser der Fall war. Ein Durchbruch der Lösung am Kabel kam nicht zustande.

Bei halbtechnischen Versuchen im Kapitel 11 wurden binäre Bentonitgemische und Formsteine aus Calcigel und MX 80 zusammen mit Kabelsensoren in großtechnische Apparaturen eingebaut und mit Drücken bis 100 bar beaufschlagt.

Anforderungen an die Verlegung der Kabel im Dichtelement:

Generell sind hydraulische Kurzschlüsse, bzw. bevorzugte Wegsamkeiten durch die Kabel auszuschließen:

- Im Abstand von $< 0,5$ m zur Flüssigkeitsdruckseite und von $< 0,3$ m zur Kontur (zum Gebirge) dürfen sich keine Kabel befinden.
- Die Kabel sind bevorzugt radial zu Mitte zu verlegen. Durchgehende Fugen in axiale Richtung sind auszuschließen.
- Die verlegten Kabel sind mit Bentonitgranulat dicht zu umschließen und nach Möglichkeit nachzuverdichten.

Aus den Testergebnissen der Gebrauchsfähigkeit der Kabelsensoren in Bentonitdichtelementen konnten folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die Kabelsensoren sind auch im Druckbereich von 100 bar mechanisch stabil. Problematisch sind Zugbelastungen infolge von Verformungen im Dichtelement.
- Der Einbau der Kabelsensoren erfordert im Kontaktbereich mit Bentonit eine zusätzliche Fugenbehandlung, um im Bereich der Kabelsensoren die gleiche Bentonittrockendichte wie im Dichtelement zu erreichen. Ist diese Forderung erfüllt, findet kein bevorzugter Flüssigkeitstransport entlang der Kabel statt. Für Bentonitdichtelemente aus binärem Gemisch ist dies nachgewiesen worden.

- Der Einbau des Sensors in Formsteindichtungen erzeugt durch das Bauwerk durchgehende Fugen, die im Moment des Flüssigkeitszutritts einen bevorzugten Fließweg darstellen. Ein Nachverdichten dieser Fuge ist technisch nicht möglich. Eine spezielle Granulatfuge hat eine geringere Bentonittrockendichte, als der Bentonitformstein. Ein Einbau "über Kante" ist aufgrund der geringen Zugfestigkeit der Kabelsensoren nicht möglich.
- Mit den Impulsverläufen, die an den Kabelsensoren während der halbtechnischen Versuche gemessen wurden, konnte sehr gut der Einfluss von Verdichtungen von binären Gemischen oder Formsteinen sowie von eindringendem Wasser detektiert werden. Aus dem Messsignalverlauf konnte qualitativ auf Verdichtungen bzw. auf Durchfeuchtungen geschlossen werden. Die Signalverläufe zeigten gute Übereinstimmung mit der Verteilung von Feuchtwerten, die beim Rückbau gewonnen wurden. Durch Vergleich der Messsignale mit Fluiddruck und Fluidmenge konnten Aufbau des Quelldruckes im Bentonit, gutes Dichtverhalten, aber auch einströmendes Wasser bei undichten Versuchsanordnungen festgestellt werden. Dies wird für folgende Versuche gezeigt:

Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU1) (Bilder 11.7-9)

Versuch mit MX-80-Granulat und Wasser (KU2) (Bilder 11.10-12)

Versuch mit MX-80-Granulat und Steinsalzlösung (KU3) (Bilder 11.13-15)

Versuch mit MX-80-Formsteinen und Steinsalzlösung (KU4) (Bilder 11.16-19)

Versuch mit MX-80-Formsteinen und Wasser (KU5) (Bilder 11.20-23)

Versuch mit Calcigel-Formsteinen und Wasser (KU 6) (Bilder 11.24-26)

Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU7) (Bilder 11.27-30)

Die Ergebnisse der durchgeführten Technikumsversuche lassen folgende vergleichende Bewertung des Dichtverhaltens zu:

- Die mit binären Calcigelgemisch durchgeführten Versuche zeigen übereinstimmende Ergebnisse. Ein "fingering" wurde nicht festgestellt.
- Die trockenen Bereiche eines Dichtelementes aus binärem Gemisch oder aus Granulat werden bei hoher Flüssigkeitsdruckbelastung und bei gleichzeitiger Dichtwirkung des bereits durchfeuchteten Bentonits nachträglich verdichtet. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit, d. h. zu einem langsameren Vordringen der Flüssigkeitsfront. Gleichzeitig lockert sich der unmittelbar druckseitige Bereich des Dichtelements durch die Wirkung des Quelldrucks auf.
- Mit Wasser kann MX-80 – Granulat eine zufriedenstellende Dichtwirkung entwickeln, nachteilig sind die großen Verformungen des Dichtelementes.
- Für NaCl-Lösung ist ein Dichtelement aus MX-80 – Granulat nicht geeignet.
- MX-80 – Formsteine sind als Dichtmaterial für Wasser geeignet. Mit NaCl – Lösung trat in der Anfangsphase ein Flüssigkeitsdurchtritt entlang der Fugen auf, danach verhielt sich das Dichtelement stabil.
- Die Calcigel Formsteine FS40 besitzen gegenüber Wasser ein sehr gutes Dichtverhalten. Ein Vergleichsversuch mit NaCl-Lösung wurde nicht durchgeführt. Dazu liegen aber Ergebnisse des in situ Versuches in Sondershausen vor.

Im Kapitel 12 werden die Ansätze und Ergebnisse der numerischen Simulation der Feuchteausbreitung in einem Bentonitdichtelement als Grundlage einer prognostischen Beurteilung eines großtechnischen Bauwerkes vorgestellt.

Die numerische Simulation der Feuchteausbreitung im Bentonit erfordert die Berücksichtigung folgender Prozesse (Bild 12.3):

- die Zweiphasenströmung im ungesättigten Bentonit,
 - die Änderung der effektiv durchströmbaren Porosität infolge des Quellens sowie der Auflockerung/Kompaktion und
 - der sich einstellenden absoluten Permeabilität des vollständig gesättigten Bentonits.
- Für die modellgestützte Abbildung der Feuchteausbreitung wurde ein Modellkonzept entwickelt, das, gestützt auf die ermittelten Materialparameter, die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche und die entwickelten Interpolationsansätze, eine Abbildung der Feuchteausbreitung in Bentonitdichtelementen ermöglicht (Bilder 12.5-14). Die Ergebnisse der Modellrechnungen stimmen gut mit den in den halbtechnischen Versuchen ermittelten Feuchteverteilungen überein.
- Das entwickelte Modellkonzept kann als Grundlage für die Abbildung der Feuchteausbreitung in großtechnischen Dichtbauwerken angewendet werden.
- Für eine Qualifizierung des Modellansatzes sind die messtechnische Erfassung der Porositätsveränderung (Dichteveränderung) und der Einfluss auf die Feuchtemessung zu erfassen. Darüber hinaus muss der Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Materialparametern (z. B. $k_{abs, 0}$; $k_{abs, gesättigt}$) der unterschiedlichen Bentonitarten und –formen vertieft werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung und Aufgabenstellung	1
1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens/ Zusammenarbeit mit anderen Stellen	2
1.2 Stand von Wissenschaft und Technik	4
1.2.1 Leitfähigkeitsmessung an festen Stoffen	4
1.2.1.1 Grundlagen der Messung	4
1.2.1.2 Vier-Elektroden-Systeme	4
1.2.2 Dielektrische Messverfahren	5
1.2.2.1 FDR-Verfahren (Messverfahren im Frequenzbereich)	5
1.2.2.2 TDR-Verfahren (Messverfahren im Zeitbereich)	6
1.2.3 TDR-Sensorentwicklung	7
1.2.3.1 Voraussetzungen	7
1.2.3.2 Entwicklung eines Sensors für das Salinar	7
1.3 Literatur- und Patentrecherchen	8
1.4 Durchführung von Konferenzen / Veröffentlichungen	8
2 Mineralogische Untersuchungen	10
2.1 Mineralogische Zusammensetzung	10
2.2 Differenzthermoanalyse	11
2.3 Elektronenmikroskopische Untersuchungen	13
3 Materialuntersuchungen mit dem Netzwerkanalysator	16
4 Oberflächensensoren	24
4.1 Einsatzuntersuchungen mit einem Oberflächensensor in Bad Salzdettfurth	24
4.2 Untersuchungen mit E- und H-Feld-Resonatoren bei 2,45 GHz	30
4.3 Untersuchungen an Proben vom Rückbau des Schachtverschlusses in Sondershausen	33
5 TDR-Messverfahren (Messungen im Zeitbereich)	38
5.1 Grundlagen	38
5.2 Leitungsparameter	40
5.3 Time-Domain-Reflektometrie im stark verlustbehafteten Material	43
6 Berechnungsverfahren für Leitungen in verlustbehafteten Materialien	49
6.1 Einführung	49
6.2 Simulationen zur Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes um den Sensor	50
7 Rekonstruktionsalgorithmen für TDR-Signale	57
7.1 Rekonstruktion bei verlustlosen Materialien	57
7.2 Rekonstruktion bei verlustbehafteten Materialien	61
7.3 Überblick Rekonstruktionsalgorithmen	63
7.4 Weiterentwickelter Rekonstruktionsalgorithmus	64
7.5 Rekonstruktionsbeispiele	65
7.6 Zusammenfassung und Ausblick	68
8 Experimentelle Untersuchungen zu Feuchteprofilen	70
8.1 Detektion der Füllhöhe eines Rohres	71
8.2 Feuchteverteilung in einem Trog mit Sand und Sand-Bentonit-Gemisch	73
8.3 Feuchteprofil in einem Trog mit Kammern	76
8.4 Feuchteprofil beim kapillaren Saugen	84

8.5 Austrocknung eines Betonprismas	87
9 Kalibrierung von Kabelsensoren im Sand-Bentonit-Gemisch	90
9.1 Grundlagen	90
9.2 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Leitungswasser	91
9.3 Kalibrierung eines Sand-MX 80-Gemisches mit Leitungswasser	93
9.4 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Leitungswasser	94
9.5 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Steinsalzlösung	95
9.6 Kalibrierung eines Sand-MX-80-Gemisches mit Steinsalzlösung	96
9.7 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Steinsalzlösung	97
9.8 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Q-Lauge	98
9.9 Vergleich der Kalibrierungen mit Leitungswasser und Salzlösungen	99
10 Feuchteprofilbestimmungen unter dem Einfluss von Drücken bis 40 bar	103
10.1 Konstruktion eines Druckversuchsstandes	103
10.2 Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat und deionisiertem Wasser	104
10.3 Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat und Steinsalzlösung	110
11 Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen	113
11.1 Versuchsplanung	113
11.2 Eingesetzte Versuchstechnik	114
11.3 Druckbeaufschlagung	117
11.4 Messtechnik	118
11.5 Versuchseinbau	119
11.5.1 Versuche Br 1 und Br 2	119
11.5.2 Versuche KU 1 – 3 und KU 7	120
11.5.3 Versuche KU 4 – 6	120
11.6 Rückbau	121
11.7 Versuchsergebnisse	121
11.7.1 Versuch Br 1	121
11.7.2 Versuch Br 2	122
11.7.3 Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU1)	122
11.7.4 Versuch mit MX-80-Granulat und Wasser (KU2)	124
11.7.5 Versuch mit MX-80-Granulat und Steinsalzlösung (KU3)	126
11.7.6 Versuch mit MX-80-Formsteinen und Steinsalzlösung (KU4)	127
11.7.7 Versuch mit MX-80-Formsteinen und Wasser (KU5)	129
11.7.8 Versuch mit Calcigel-Formsteinen und Wasser (KU 6)	131
11.7.9 Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU7)	133
11.8 Schlussfolgerungen zu den Versuchen	135
11.9 Eignung der Kabelsensoren	135
11.10 Verhalten der getesteten Dichtelemente	
12 Prognosemodell zur Feuchteausbreitung im Dichtelement	137
12.1 Prozessbeschreibung	137
12.1.1 Allgemeine Prozessbetrachtungen	137
12.1.2 Zweiphasenströmung	138
12.1.3 Veränderung der Porosität durch Quellen	144

12.1.4 Flüssigkeitsströmung im gesättigten Porenraum	146
12.1.5 Beeinflussung durch Dichteveränderung	147
12.1.6 Gleichgewichtseinstellung zur Luftfeuchte	148
12.2 Eingangsdaten für die Modellierung	148
12.2.1 Charakterisierung des Einbauzustandes	148
12.2.2 Kompaktionsverhalten des binären Gemisches	149
12.2.3 Quelldruck von Calcigel	151
12.2.4 Hydraulische Leitfähigkeit von Calcigel	152
12.3 Numerische Simulation der Feuchteausbreitung	153
12.3.1 Programmsystem ‚TWO PHASE‘	153
12.3.2 Modellkonzept	153
12.3.2.1 Abbildung des Quellens von Ton – Korrektur absolute Permeabilität	155
12.3.2.2 Abbildung der Auflockerung/Kompaktion – Korrektur absolute Permeabilität	156
12.3.2.3 Zweiphasenströmung	160
12.3.3 Modellaufbau und –parameter	164
12.3.3.1 Modellgeometrie und Randbedingungen	164
12.3.3.2 Parameterbelegung	164
12.4 Ergebnisse der Modellrechnungen	170
12.4.1 Ergebnis Versuch Br1	170
12.4.2 Ergebnis Versuch Br2	170
12.4.3 Ergebnis KU1	171
12.4.4 Ergebnis KU2	172
12.4.5 Ergebnis KU3	173
12.4.6 Ergebnis KU4	174
12.4.7 Ergebnis KU5	175
12.4.8 Ergebnis KU6	176
12.4.9 Ergebnis KU7	177
12.5 Zusammenfassung	178
12.6 Literatur	180

Anlagen

Abschlussbericht Teil II (FZ Karlsruhe)

1 Einführung und Aufgabenstellung

Nicht verwertbare und überwachungsbedürftige Abfälle werden nach der TA Abfall in der Bundesrepublik Deutschland in Untertagedeponien im Salzgestein entsorgt. Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurde ebenfalls diese Möglichkeit in Betracht gezogen. Diese Deponie-Systeme sollen so konzipiert werden, dass sie relativ schnell aus einer Überwachungsphase entlassen werden können. Die Langzeitisolation vom äußeren Biozyklus soll durch geotechnische Barrieren realisiert werden; dazu gehören Verschlussbauwerke, wie Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse, deren Langzeitfunktionsfähigkeit nachzuweisen ist (Bild 1.1). Als Dichtmaterial werden vorwiegend Tone/Bentonite eingesetzt. Bentonite sind plastische Tongesteine, die sich überwiegend aus Tonmineralen der Smektit-Gruppe (Montmorillonit) zusammensetzen und deren physikalische Eigenschaften bestimmen [1.1].



Bild 1.1
Streckenverschlussbauwerk in einem Salzbergwerk in Sondershausen [1.3]

Nach dem Stand der Technik sind Langzeitfunktionsfähigkeit und Langzeitsicherheit von Bentonitabdichtungen im Falle eines angenommenen Flüssigkeitszutritts, d.h. unter dem Einfluss von feuchten salinaren Bedingungen bisher messtechnisch nicht ausreichend untersucht. Des Weiteren fehlen Prüfverfahren, die den Einbauzustand unter in-situ Bedingungen simulieren und eine halbtechnische Bewertung der verschiedenen Beanspruchungen ermöglichen. Die Grundlagen für die exakte Bemessung von Dichtelementen sind somit nicht vorhanden [1.2-3].

Bei Kontakt des trockenen Bentonits mit gesättigter Salzlauge kommt es durch die Wasseraufnahme des Bentonits zu einem Entzug von Lösungsmittel aus der Salzlösung, zur Auskristallisation von Salzen und somit zu einer Verbesserung der Abdichteigenschaften infolge des Verstopfens der Fließwege durch auskristallisiertes Salz. Ein Einbau von feuchtem Ton führt zur Reduzierung des nutzbaren Quellpotentials; in salinärer Umgebung entstehen durch Wasserentzug Schrumpfrisse [1.2-3].

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zeigen, dass im Vergleich zwischen salinärer Umgebung und Wasser die hydraulische Leitfähigkeit und der Quelldruck bei gleicher Bentonittrockendichte durch Salzeinflüsse verschlechtert werden.

Das Langzeitverhalten von Bentonit – Salz – Systemen ist in Abhängigkeit von elementaren Lastzuständen, von Umgebungsparametern (Druck, Temperatur, chemische Einflüsse) sowie von Veränderungen der Materialeigenschaften zu bewerten. Im Bergbau wird mit Gebirgsdrücken von max. 25 MPa gerechnet. In hydraulisch geschlossenen Systemen können die Flüssigkeitsdrücke ebenfalls im Bereich des Gebirgsdruckes liegen. Dagegen wird in hydraulisch offenen Systemen mit einem maximalen hydrostatischen Flüssigkeitsdruck von ca. 12 MPa gerechnet [1.2].

Im vorliegenden Vorhaben soll versucht werden, diese Druckparameter anzunähern.

Die Messung der Feuchteverteilung in nachsorgefrei konzipierten Bauten ist sowohl für die Bewertung des statischen Zustandes, für die nicht bestimmungsgemäße Entwicklung von Lösungszutritten, aber auch für die Datenerfassung von Langzeitsicherheitsanalysen dringend notwendig, auch bei der Beibehaltung der Aufgabe, ein passives System ohne Kontrolle zu schaffen. Da Langzeiterfahrungen fehlen, ist eine messtechnische Kontrolle unter Einbeziehung von Störgrößen über einen relativ langen Überwachungszeitraum unerlässlich. Diese messtechnische Begleitung ist nicht nur für die Qualitätssicherung bei der Bauabnahme erforderlich, sondern sie wird auch den Zeitpunkt der Entlassung aus der Überwachungsphase bestimmen und diese voraussichtlich wesentlich verkürzen.

Messtechnische Untersuchungen zeigten, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit bekannter Feuchtemessverfahren für den hier definierten Einsatzfall zu gering ist. Die meisten bereits bekannten Lösungsvorschläge beruhen auf der Messung der elektrischen oder thermischen Leitfähigkeit feuchter Materialien; nachteilig ist die Abhängigkeit der Messwerte von Dichte, Druck und Temperatur. In quellenden Materialien sind diese Parameter bis zum Erreichen eines statischen Zustands sowohl örtlich als auch zeitlich veränderlich. Des Weiteren sind starre Elektroden kommerziell verfügbarer Messgeräte zur Messwerterfassung für die auftretenden Quell- und Schwindbewegungen von Bentonit nicht geeignet [1.4-6].

Gegenstand des Vorhabens ist es, ein dielektrisches Messsystem mit flexiblen Elektroden für die Feuchtemessung am Verschlussmaterial Bentonit in salinärer Umgebung zu schaffen, mit dem die beschriebenen Nachteile umgangen werden können. Einflüsse von chemisch gebundenem Wasser, Ionenleitfähigkeit, Druck, Dichte, Temperatur sollen eingehend untersucht und in die Messungen einbezogen werden.

Elektromagnetische Feldsimulationen vom Sensor und Ausbreitungen von Feldern im umgebenden Medium sind neu. Sie sollen dazu beitragen, den Sensor zu optimieren sowie die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messmethode zu erhöhen.

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens/ Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde im Zeitraum von 12/2000 bis 1/2004 durchgeführt und war in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP1. Konzeption der Messsysteme für Zeit- und Frequenzbereich, Versuchsplanung
- AP2. Materialuntersuchungen von verschiedenen Bentonitmaterialien unter Laborbedingungen mit dem NWA
- AP3. Modellberechnungen zur Entwicklung einer Messmethode
- AP4. Entwicklung eines TDR-Messsystems
- AP5. Messungen im Frequenzbereich
- AP6. Detektion von Feuchtefronten
- AP7. Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen
- AP8. Prognosemodell (für Feuchteausbreitung im Dichtelement)

Der Arbeitsplan mit Aufgabenstellungen und Zeitabläufen wird wie folgt dargestellt:

und Klimaforschung des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt. Das Projekt 02C0810 vom Forschungszentrum wurde als eigenständiges Thema realisiert; die Beschreibung befindet sich im Teil II. Die Problemstellungen zum Test der Kabelsensoren unter realitätsnahen Bedingungen im Rahmen von halbtechnischen Versuchen AP 7 und der Erarbeitung von Prognosemodellen AP 8 wurden als Unterauftrag von der IBeWa-Ingenieurpartnerschaft und dem Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg bearbeitet. Die Leitung des Projektes wurde von der MFPA Weimar (Dr. Kupfer) übernommen.

1.2 Stand von Wissenschaft und Technik

In der Vergangenheit führte die Feuchtegehaltsbestimmung in Tonmineralen bedingt durch chemisch gebundenes Wasser oft zu Fehlmessungen, zu aufwendigen und unsicheren Kalibrierungen und wurde deshalb oft umgangen. In der Ziegelindustrie ist z.B. die Feuchte vom Tonstrang ein Maß für Formbarkeit und die Qualität des Ziegels; zu hohe Feuchte führt zu Schrumpfrissen beim Brennen. Erst der Einsatz von Mikrowellenfeuchtemessgeräten brachte in den letzten Jahren sichtbare Erfolge bei der Qualitätssicherung. Für Feuchtemessungen im Salz und an Tonmineralen werden in neuerer Zeit mehrere Materialfeuchtemessverfahren angewendet. Es soll der Stand der Technik der wichtigsten Messverfahren charakterisiert werden, um die Vorteile des verwendeten TDR-Messsystems herauszustellen.

1.2.1 Leitfähigkeitsmessung an festen Stoffen [1.4]

Sehr hohe Leitfähigkeiten in feuchten Körpern werden meist durch hohe Salzkonzentrationen verursacht, wobei keine eindeutige quantitative Zuordnung zum Feuchte- oder Salzgehalt möglich ist. Bei Tonmineralien wird die Stoffstruktur nicht nur durch Reinheit aller Einzelkomponenten bestimmt, sondern auch durch Einflussfaktoren der Porenstruktur, wie Verdichtung, Erhärtung, Produkte der Hydratation und des Ionenaustausches. Durch vorhandene Salze, chemische Umwandlung oder Auswaschung können im Messobjekt die Konzentrationen wasserlöslicher Substanzen verändert werden. Andere Störgrößen, wie unterschiedliche Dichte, schwankender Salzgehalt, inhomogene Verteilung der Feuchte, Einfluss von Körnung, Struktur und Faserrichtung können das Messergebnis stark beeinflussen. Entscheidend für die Nutzbarkeit des Leitfähigkeitsprinzips für quantitative Aussagen zum Feuchtegehalt ist, dass in höherem Maße als bei vielen anderen Verfahren alle Bedingungen einer im Labor erfolgten Kalibrierung am realen Messobjekt in der Praxis eingehalten werden müssen.

1.2.1.1 Grundlagen der Messung

Die spezifische Leitfähigkeit ist abhängig von der Porengrößenverteilung und vom Porenvolumen. In porösen Stoffen können in Verbindung mit Salzen partielle Trennungen von Ladungsschichten zustande kommen. Tonminerale neigen ebenfalls zur Ausbildung negativer Oberflächenladungen, die die Beweglichkeit von Anionen in dünnen Porenkanälen stark einschränken, so dass sich dort positive Ladungen ansammeln können. Bei Schichten polarisierter Ladungsträger, die bis zu 0,1 mm beieinander liegen, wurden Kapazitäten von 10 bis 100 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ermittelt. Die Eigenschaft des Untersuchungsmaterials, elektrische Energie zu speichern, wird auch als Aufladbarkeit oder induzierte Polarisierung bezeichnet; sie ist dabei der vorhandenen Feuchte proportional. Die induzierte Polarisierbarkeit ist vergleichbar mit Flächenladungen an Grenzschichten, die durch Ladungsdoppelschichten in Verbindung mit Maxwell-Wagner-Effekten entstehen.

Messungen der Leitfähigkeit sind in sehr starkem Maße von der Ankopplung der Messelektroden an den feuchten festen Stoff abhängig. Ihre Kontaktierung mit dem Material (Kontaktfläche, Anpressdruck) sowie Messstrom- und Messspannung sind entscheidend für die erreichbare Genauigkeit.

Der Übergang von der Elektronen- zur Ionenleitung und damit die Genauigkeit der Messung kann durch weit mehr Störfaktoren beeinflusst werden, als bei der Leitfähigkeitsmessung in flüssigen Materialien. Die Messelektroden müssen an den speziellen Einsatzfall angepasst werden.

1.2.1.2 Vier-Elektroden-Systeme

Mit einer Vier-Elektroden-Anordnung ist es möglich, die durch den Stromfluss entstehenden Übergangswiderstände für die Spannungsmessung unwirksam zu machen. Über äußere Elektroden wird ein Strom eingespeist und an den inneren Elektroden der Spannungsabfall des Ionenstromes hochohmig gemessen. Die durch die Polarisation verursachten Randschichtimpedanzen entstehen dabei nur an den äußeren Elektroden. Die Sondierungstiefe kann durch den Abstand der Elektroden festgelegt werden. Beim Einsatz eines Vier-Elektroden-Messsystems zur Bestimmung des spezifischen Materialwiderstandes sind folgende Bedingungen erforderlich:

Homogenes und isotropes Messmedium mit ebener Oberfläche; dabei dürfen zwischen den Elektroden keine Oberflächenströme fließen. Die Elektroden sollten sich auf einer Gerade befinden und Punktkontakt besitzen. Ihre Abstände müssen klein im Vergleich zum Messobjekt sein. In der Geophysik können nach dem Prinzip einer Wenner-Feldanordnung mit Hilfe von Vielfachelektrodensystemen Widerstandstomogramme aufgezeichnet werden. Mit diesen Anordnungen können genauere Ergebnisse der Feuchte oder Feuchteverteilung an festen mineralischen Objekten erzielt werden als mit einfachen punktförmigen Zwei-Elektroden-Systemen. Mit diesen Messanordnungen wurden auch im Salinar bereits mehrfach Untersuchungen durchgeführt.

1.2.2 Dielektrische Messverfahren

1.2.2.1 FDR-Verfahren (Messverfahren im Frequenzbereich)

Handelsübliche kapazitive und Mikrowellenfeuchtemessgeräte arbeiten im Frequenzbereich. Im Bereich der Bodenfeuchte wird ein **FD-Verfahren von IMAG DLO** (Niederlande) bei 20 MHz mit einem ASIC realisiert. Es beruht auf der Messung der komplexen Impedanz eines durch eine Zweidrahtanordnung gebildeten Kondensators.

Der Vorteil des Sensors besteht darin, dass für die Länge der Elektroden keine untere Grenze besteht, sie kann beliebig gestaltet werden und wird durch die Repräsentativität des Probevolumens bestimmt.

Nachteile des Sensors:

- geringes Messvolumen kein Integrationseffekt,
- Probleme bei inhomogenen Feuchteverteilungen
- Dichteabhängigkeit
- geringe Eindringtiefe
- an Zweipolanordnung gebunden
- Sensorlänge ist abhängig von den Eingangsimpedanzen
- Messfehler bei Leitfähigkeitsmessungen in dielektrisch verlustbehafteten Böden

Zu den vom Hersteller IMAG DLO vorgestellten Kennwerten ist anzumerken, dass die angegebene Messgenauigkeit der Kalibrierung von 1 % nur für Idealböden (feiner Sand) realistisch erscheint, nicht aber für reale Böden. Bei der Bestimmung des Realteiles der DK werden keine Aussagen über die statistische Schwankungsbreite der Messwerte gemacht. Die angegebene Genauigkeit der Leitfähigkeitsmessung gilt nur bei Kalibrierung an NACI-Lösung; in Böden ist mit höheren Messunsicherheiten zu rechnen.

Die **Theta-Sonde** ist eine kapazitive Messsonde mit 4 Messelektroden (Länge 60 mm); sie arbeitet bei einer Messfrequenz von 100 MHz. Durch die höhere Messfrequenz ist der Einfluss des Salzgehaltes geringer als bei der IMAG-Messsonde. Infolge der kurzen Messelektroden wird allerdings nur ein relativ geringes Messvolumen erfasst, so dass u.U. die Probe für die Kalibrierung nicht repräsentativ ist. Die Kalibrierung für Bentonit und Salzlösung war Gegenstand von Untersuchungen. Es wurde festgestellt, dass ein starker Einfluss der Dichteabhängigkeit vorhanden ist. Die Anwendung der Theta-Sonde erfolgte auch im Salzbergwerk im Bentonitverschluss; der Dichteinfluss wurde durch Ummantelung mit einem Bentonitpressling reduziert (s. Abschnitt 4.1).

Nachteile von starren Messsonden:

Die Luftporen wirken sich auf den Anzeigewert in ähnlicher Weise aus, wie lockerer Boden; der Feuchtemesswert ist gegenüber einer normalen Verdichtung geringer.

Beeinflussung durch:

- Variation der Bodendichte und Bodenzusammensetzung
- Steine nahe an den Sensorstäben
- Wurzeln an den Sensorstäben (auch durchbohrte)
- Unterbodendrainage

1.2.2.2 TDR-Verfahren (Messverfahren im Zeitbereich)

Das TDR-Verfahren stammt aus dem Bereich der Fehlerortung in Elektrokabeln. Es basiert auf der Messung der Laufzeit und Amplitude eines in eine Leitung eingespeisten und am Kabelende reflektierten Signals und wird sehr häufig zur Bestimmung der Bodenfeuchte angewendet. Die Laufzeit korreliert dabei mit dem Realteil der Dielektrizitätskonstante (DK) des Materials, das die Leitung umgibt. Die Amplitude korreliert mit dem Imaginärteil der DK und damit verbunden mit der Ionenleitfähigkeit des Bodens. Entsprechend der Anstiegszeit und der Impulslänge kann dem Messsignal ein breites Frequenzspektrum zugeordnet werden.

Vorteile des TDR-Verfahrens:

- Messvolumen innerhalb und in geringem Maße außerhalb der Elektroden
- hohe Auflösung und Genauigkeit bei hohen Feuchtwerten (lange Pulsreflexionsdauer)
- durch Laufzeitmessung (proportional der Phasenmessung im Frequenzbereich) sind Fehlererflüsse durch Temperatur und Salzgehalt auf das Messsignal gering
- erlaubt Feuchteprofilmessung durch Wechsel der Sonden
- einfacher Aufbau, in der Praxis bei vielen Anwendungsfällen bewährt

Bisherige Nachteile:

- Dichteabhängigkeit
- bei hohen Ionenleitfähigkeiten kann das reflektierte Signal sehr schwach sein
- minimale Messunsicherheit ist abhängig von der Zeitauflösung der Messung (minimale Länge der Messelektroden > 100 mm)
- Messgenauigkeit / Auflösung ist bei niedrigen Feuchten gering
- maximale Länge der Messelektroden wird durch zulässige Dämpfung auf einige dm begrenzt

Bedingt durch die Dringlichkeit einer messtechnischen Kontrolle von Bentonitverschlussbauwerken wurde ein Projekt konzipiert, bei dem die fehlende Messtechnik entwickelt und in in-situ Versuchen getestet wurde. Folgende Untersuchungen waren erforderlich:

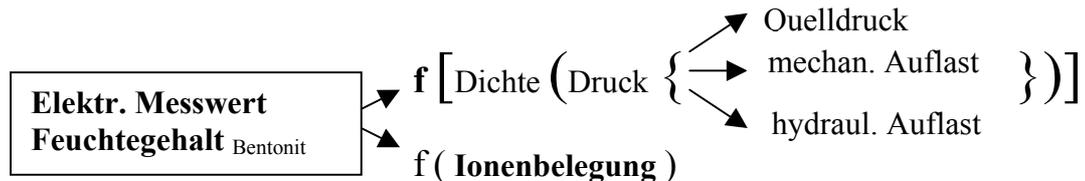
1. Laborversuche mit begleitender Untersuchung der spezifischen Materialeigenschaften
2. Entwicklung und insitu-Untersuchungen einer dielektrischen Messmethode mit Simulation der Feldverteilung
3. Zeitlich begrenzte Überwachung von Originalsystemen unter Verwendung von Modellen

Die Messungen wurden zerstörungsfrei mit volumetrischer Erfassung der Feuchte konzipiert.

1.2.3 TDR-Sensorentwicklung

1.2.3.1 Voraussetzungen

Die Feuchteausbreitung wie auch die gesamten Durchfeuchtungsbedingungen hängen außer von den geometrischen Randbedingungen von zahlreichen mechanischen und mineralogischen Eigenschaften des Verschlussbauwerkes ab. Der elektrische Messwert des Feuchtegehaltes von Bentonit ist abhängig von zahlreichen Einflussfaktoren:



Ausgehend von den Nachteilen bekannter Messmethoden, wurde zur Bestimmung der Feuchteverteilung in Bentonitmaterialien mit dielektrischen Messverfahren in salinärer Umgebung und bei hohen Drücken ein Forschungsvorhaben durchgeführt. Eigenschaften des Dichtungsmaterials auf Bentonitbasis, wie Ioneneinflüsse, druckabhängiges Quellverhalten und komplizierte Wasserbindungen waren zu charakterisieren und zu quantifizieren. Neben diesen Einflüssen traten bei Tonmineralen Flächenladungen an den Grenzschichten auf, die die Messungen erheblich störten. Da die Wirkungen der genannten Materialeigenschaften relativ komplex und unerforscht waren, war es notwendig, Materialuntersuchungen in das Vorhaben zu integrieren.

Im Fachgebiet Geotechnik der MFPA wurden Bentonite (Calcigel, MX 80) aufbereitet, um Materialeigenschaften mit analytischen und elektrischen Methoden zu untersuchen. Zur Charakterisierung der Sensoreigenschaften wurden in verschiedenen Versuchen Materialdichten bei statischer und hydraulischer Auflast in wässriger und salinärer Umgebung variiert. Geotechnische und elektrotechnische Untersuchungen sowie die daraus abgeleiteten Entwicklungen der Feuchtesensorik wurden in kurzer Reihenfolge nacheinander durchgeführt. Diese Verfahrensweise sicherte die Erfassung bestimmter Effekte und half Entwicklungszeit einzusparen.

Großvolumige Sensoren oder starre Sensorelektroden konnten in dünnen Schichten oder Schichten, die mit hohem Druck belastet waren, schlecht untergebracht werden. Sensoren durften nur geringen Volumenanspruch haben und die natürliche Hydraulik des Materials nicht beeinflussen; dem gegenüber steht der Anspruch einer feinvolumigen Messwertauflösung.

1.2.3.2 Entwicklung eines Sensors für das Salinar

Der eigentliche Sensor wurde als passives, feuchteempfindliches Flachbandkabel ausgeführt, mit dem über die Impulslaufzeit die Dielektrizitätskonstante (DK) des Materials gemessen wurde, in dem es eingebettet war. Grundlage zur Entwicklung dieser Sensoren bildeten die Patente 19501196 DE, 19755052 DE und die Anmeldung 19833331.5 DE vom FZ Karlsruhe. Mit diesen Sensoren wurde der volumetrische Wassergehalt des Bentonits unabhängig vom Druck durch Frequenz- oder Zeitbereichsmessungen bestimmt. Es war Ziel der Untersuchungen, die komplexe DK durch Reflexions- und Transmissionsmessungen zu erfassen und qualitativ die Leitfähigkeit zu bestimmen. Grundlage zur Entwicklung der neuen Messmethode bildeten Feldsimulationen, mit denen die Verteilung des elektrischen Feldes um die Sensoren im wässrigen / salinaren Materialgemisch berechnet wurde.

Die Anwendung von Feldsimulationen für den Einsatz von Feuchtesensoren in stark verlustbehafteten Materialien war neu und sollte helfen, Sensoreigenschaften zu optimieren, die Eindringtiefe

des Feldes zu bestimmen, aber auch die Zuverlässigkeit der Messmethode und der Kalibrierung zu erhöhen. Sie konnte dazu beitragen, bisher nur unvollständig gelöste Probleme bei der Kalibrierung sowie den Einfluss von Störgrößen genauer zu erkennen und die Genauigkeit der Messung zu erhöhen.

Zur Bestätigung der Untersuchungen wurde das Messsystem in-situ sowohl im Rahmen von Laboruntersuchungen als auch im Rahmen von halbertechnischen Versuchen an der TU Bergakademie Freiberg erprobt. Prognoseberechnungsmodelle konnten mit messtechnisch ermittelten Werten validiert werden; sie trugen dazu bei, die Aussagen zum Langzeitverhalten zu unterstützen.

1.3 Literatur- und Patentrecherchen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden monatlich Literaturauswertungen aus der Literaturschau FIZ Technik „Messen Mechanischer Größen“ sowie „Zerstörungsfreie Prüfung“ vorgenommen, in denen die Feuchtemesstechnik enthalten ist. Des Weiteren wurde eine Patentrecherche „Bestimmung des Feuchte- oder Wassergehaltes in untertägigen Bentonit-Verschlussbauwerken“ durchgeführt.

1.4 Durchführung von Konferenzen / Veröffentlichungen

Während der Durchführung des Projektes wurden von der MFPA (AG Feuchtemessverfahren) in Weimar im Mai 2001 die 4. Internationale Konferenz „Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances“ und im September 2002 der „11. Feuchtetag 2002“ als europäische Konferenz organisiert. Die Projektergebnisse wurden vorgestellt und als Beiträge veröffentlicht. Während der Projektlaufzeit wurden folgende Beiträge veröffentlicht:

K. Kupfer, E. Trinks, Th. Schäfer, Th. Keiner: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Feuchteprofilen mittels TDR-Messleitung. 11. Feuchtetag 2002; Weimar Sept. 2002; S. 23-35

Klaus Kupfer, Eberhard Trinks: Measurement Method for Long-Term Monitoring of Geotechnical Sealed Barriers in Salt Mines. Proc. 5th Int. Conf. on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Rotorua, New Zealand, March 2003; pp. 181-189

K. Kupfer, E. Trinks, Th. Schäfer: Feuchtemessungen und -simulationen in Bentonitmaterien für Verschlussbauwerke mit TDR. 1. Fachgespräch für Geophysik und Barriersysteme, Leipzig März 2003

K. Kupfer; E. Trinks; Th. Schäfer: Messsystem zur Feuchtedetektion in Bentonit-Verschlussbauwerken in salinärer Umgebung. Workshop „Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis“ Karlsruhe Juli 2003

K. Kupfer, E. Trinks, Th. Schäfer: Implantierte TDR-Sensoren zur Feuchteprofilbestimmung in Bentonitbauwerken. 3. Weimarer Bauphysiktage Okt. 2003; S. 4/1- 4/9

E. Trinks, K. Kupfer: TDR-Sensoren zur Feuchteprofilbestimmung – Simulationen, Experimente. 2. Fachgespräch für Geophysik und Barriersysteme, Leipzig November 2003

K. Kupfer, E. Trinks: Simulations and Experiments for Detection of Moisture Profiles in a Saline Environment. In: Electromagnetic Aquametry (Ed. K. Kupfer); Springer 2004 in Prep.; pp. 349-365

Literatur

- [1.1] Bentonit im Tiefbau. IBECO Bentonit Technologie GmbH, Mannheim 1998
- [1.2] Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonitbasis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar PTE Abschlussbericht 02 C 0193, Freiberg 1997
- [1.3] Sitz, P.; Koch, G.; Gruner, M.: *Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar*. Statusgespräch 15./16. Mai 2001. Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 7. - Karlsruhe, Juli 2001.
- [1.4] K. Kupfer; J. Neue: *Leitfähigkeitsmessverfahren*
Materialfeuchtemessung K. Kupfer u.a. expert-Verlag Renningen 1997

2 Mineralogische Untersuchungen

2.1 Mineralogische Zusammensetzung

Ziel der Untersuchungen war es, die mineralogischen Zusammensetzungen der Bentonitmaterialien Calcigel (Fa. Südchemie) und MX 80 (Wyoming) festzustellen, um hieraus Rückschlüsse über zu erwartende elektrische Effekte zu ziehen, die durch gebundenes Wasser, Ioneneinflüsse und Blättchenstruktur bei zunehmender Befeuchtung, bei Verdichtung und bei der Anwesenheit von Salzlauge entstehen.

Die röntgendiffraktometrischen Analysen wurden an einem PHILIPS PW 1710-BASIS-Röntgendiffraktometer und die Infrarot-Messungen an einem MATTSON 3020 FTIR-Spektrometer von der Fa. Gehlken ausgeführt [2.1].

Die Auswertung der Röntgendiffraktometer-Diagramme erfolgt manuell nach sedimentpetrographischen Standardverfahren und die Auswertung der FTIR-Spektren manuell auf der Grundlage der von Flehmig und Kurze (1973) entwickelten und von Gehlken (1997, 1998) modifizierten quantitativen infrarotspektroskopischen Bestimmungsmethode.

Durch die Kombination der röntgendiffraktometrischen und infrarotspektroskopischen Arbeitsverfahren gelingt es, bei den quantitativen Bestimmungen der einzelnen Mineralphasen einen relativen Fehler von < 10 % einzuhalten.

Bei der Probenpräparation werden von dem zuvor repräsentativ geteilten Probenmaterial für die Röntgendiffraktometeraufnahmen (RDA) und für die Infrarotspektren (FTIR) folgende Spezialpräparate angefertigt:

Untersuchungsergebnisse Mineralbestand

Vom analysierten Probenmaterial wurden folgende Tonmineral/Phyllosilikat-Paragenesen nachgewiesen (Tab.2.1):

Calcigel: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer + Kaolinmineral + Chlorit

MX 80: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer

Tab. 2.1: Nachgewiesene Mineralphasen (Gew. %) Gesamtproben:

Probe	Σ TM	Smektit	Il./Gl.	Kaolinm.	Chlorit	Quarz	Cristob.	Na-Plag.	Kfsp.	Calcit	Dolomit
Calcigel	82	71	9	1	1	9		3	2	2	2
MX 80	91	89	2			3	4		1	< 1	

(Σ TM Summe Tonminerale/Phyllosilikate; Il./Gl. Illit/dioktaedrischer Glimmer; Kaolinm. Kaolinmineral (Kaolinit oder Kaolinit-D); Cristob. Cristobalit; Na-Plag. Na-Plagioklas; Kfsp. Kalifeldspat)

Während es sich bei dem Smektit aus dem Bentonit Calcigel um einen Ca-belegten, dioktaedrischen Smektit handelt, liegt in dem Bentonit MX 80 ein Na-belegter, dioktaedrischer Smektit vor. Bei den Smektiten könnte es sich entweder um Montmorillonite oder aber um Beidellite handeln. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen handelt es sich bei den Smektiten wahrscheinlich um Montmorillonite, d. h. zum einen um einen Calciummontmorillonit (Calcigel) und zum anderen um einen Natriummontmorillonit (MX 80).

Die exakte Unterscheidung zwischen Montmorillonit oder Beidellit kann allerdings nur durch weitere Untersuchungen, am besten durch den Greene-Kelly-Test durchgeführt werden. Smektiten werden als innerkristallin quellfähige Dreischichtminerale klassifiziert. Die innerkristalline Reaktivität der Smektiten ist mit Glycerin überprüft worden (Solvationstests).

In beiden Bentonitproben bilden die dioktaedrischen Smektiten die Haupttonkomponente. Die tonmineralogischen Eigenschaften der Proben werden daher vornehmlich durch die Smektiten geprägt. Die anderen Phyllosilikate treten nur in geringen Anteilen auf, so dass sie auf die tonmineralogischen Eigenschaften der Proben keine großen Einflüsse ausüben.

Bei dem in dem Bentonit Calcigel vorliegenden Kaolinmineral kann aufgrund des geringen Anteiles nicht zwischen Kaolinit oder dem nach der b-Achse fehlgeordneten Kaolinit-D unterschieden werden. Kaolinminerale werden als innerkristallin nicht quellfähige Zweischichtminerale klassifiziert. Bei den Illiten/dioktaedrischen Glimmern handelt es sich um innerkristallin nicht quellfähige Dreischichtminerale und Chlorite können als innerkristallin nicht quellfähige Vierschichtminerale aufgefasst werden.

Neben den Phyllosilikaten sind in dem Bentonit Calcigel die Tektosilikate Quarz, Na-Plagioklas und Kalifeldspat in geringen Anteilen vorhanden, wobei der Albitgehalt höher als der Kalifeldspatgehalt ist. In dem Bentonit MX 80, Wyoming tritt neben dem Quarz noch die SiO₂-Modifikation Cristobalit auf. In diesem Bentonit liegt als einziges Feldspatmineral Kalifeldspat (1 Gew. %) vor. In beiden Bentonitproben lassen sich geringe Gehalte an Karbonatmineralen identifizieren. In der Probe Calcigel können Calcit und Dolomit, in der Probe MX 80 nur Calcit nachgewiesen werden.

2.2 Differenzthermoanalyse

Die Differenzthermoanalyse (DTA) basiert auf der Messung der Temperaturdifferenz zwischen Analysenprobe und einer thermisch inerten Standardprobe. Die DTA wurde ebenfalls an Calcigel-Granulat und MX 80 durchgeführt. Mit dieser Untersuchungsmethode war es möglich, verschiedenartig gebundenes Wasser festzustellen.

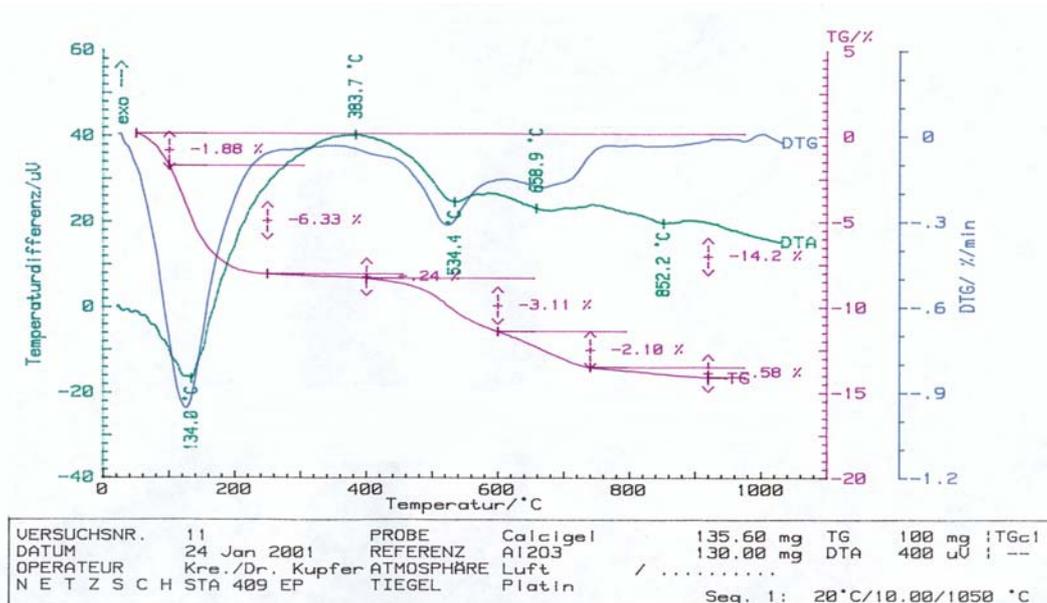


Bild 2.1 Diagramm der Differentialthermoanalyse von Calcigel (DTA – Temperaturdifferenz zur inerten Probe; TG – Thermogravimetrie (Trockengehalt); DTG – Derivative Thermogravimetrie (Geschwindigkeit des Masseverlustes))

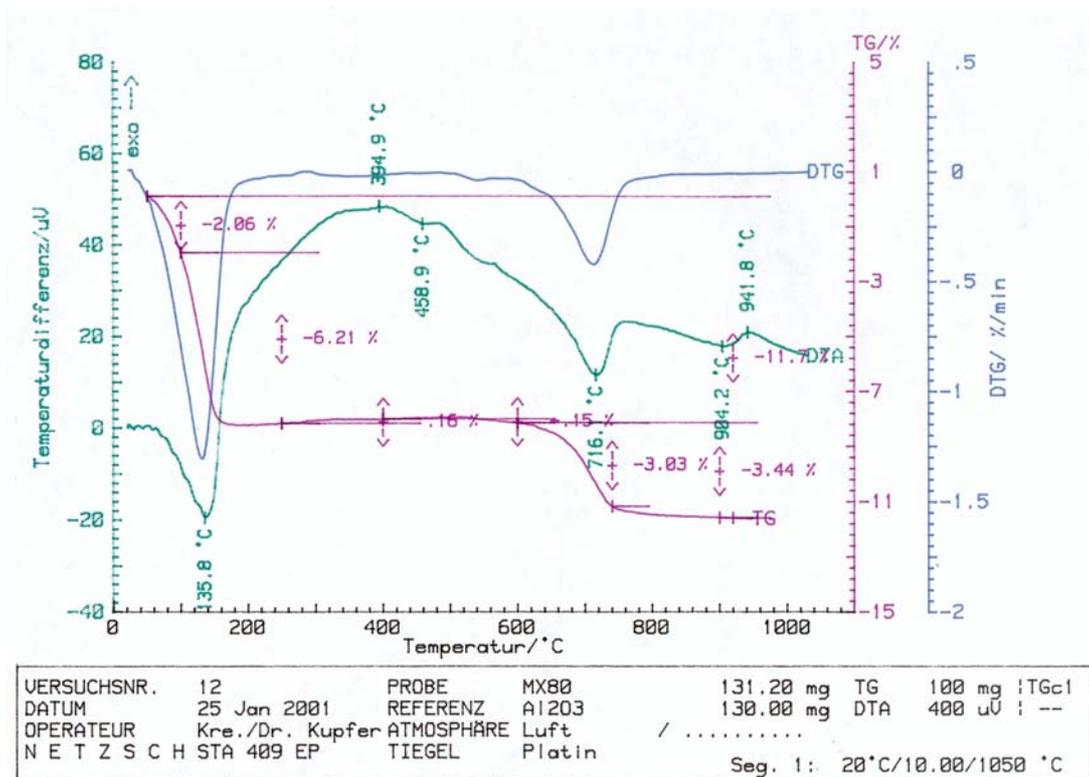


Bild 2.2 Digramm der Differenzthermoanalyse von MX 80

Schichtsilikate, wie Montmorillonite, weisen mehrere Entwässerungsstufen zwischen Raumtemperatur und 1000°C auf. Die DTA- und DTG-Kurven weisen zusätzliche endo- und exotherme Phasenübergänge auf, deren Peaks angezeigt sind. Der erste Peak in den DTA/DTG-Kurven wird durch adsorptiv gebundenes Wasser bestimmt (Calcigel 134°C; MX 80 136°C). Der Bereich, in dem Zwischenschichtwasser ausgetrieben wird liegt bei Calcigel von 200 – 535°C und bei MX 80 von 200 – 716°C. Beim Vergleich der Diagramme in den Bildern 2.1 und 2.2 wird ersichtlich, dass MX 80 einen wesentlich breiteren Bereich aufweist, der durch Zwischenschichtwasser charakterisiert ist. MX 80 kann als das reinere Mineral bezeichnet werden. Calcigel weist bei Temperaturen ≥ 400 °C einen hohen Anteil von Kaolinit auf, dies wurde auch in der Röntgendiffrakometrie bestätigt.

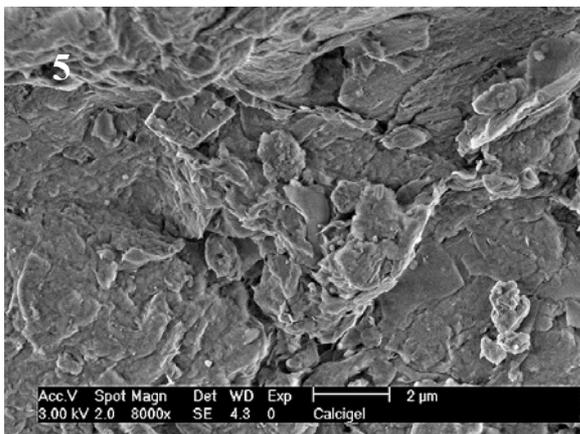
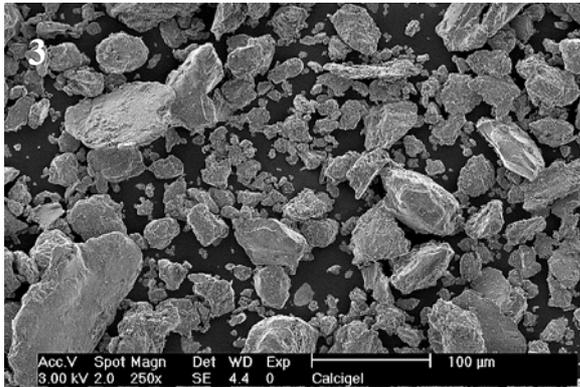
Literatur

[2.1] Untersuchungsbericht 3001/01 Bentonite; Fa. P.-L. Gehlken, Ebergötzen

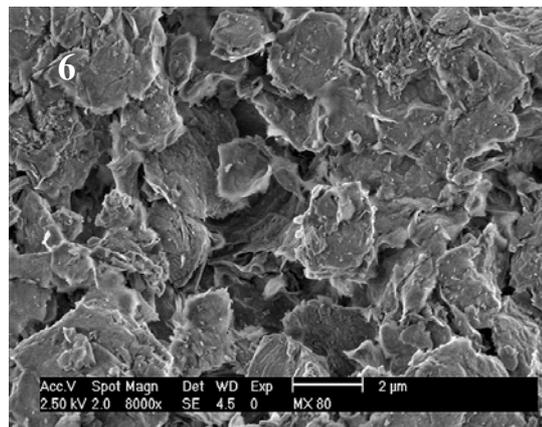
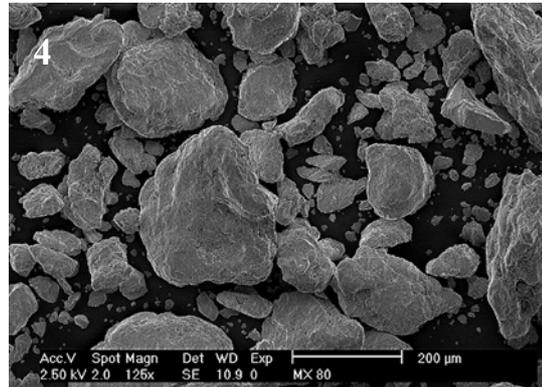
2.3 Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Elektronenmikroskopische Untersuchungen hatten zum Ziel, die Struktur der Bentonitmaterien Calcigel und MX 80 kennen zu lernen. Des Weiteren sollten die Veränderungen der Materialstruktur des Bentonits beim Einwirken von konzentrierter Salzlösung erkannt werden.

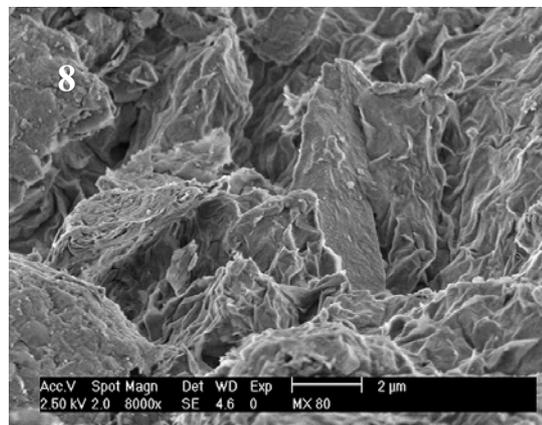
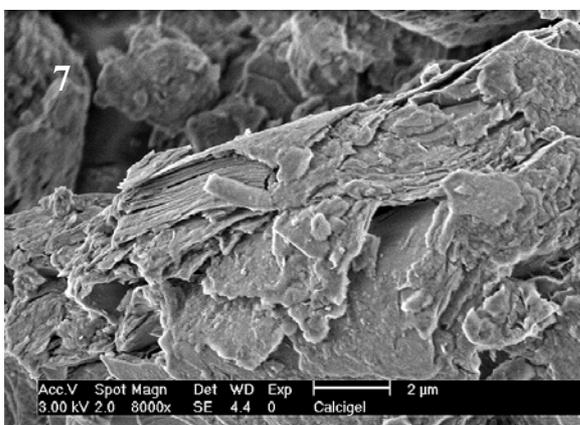
Calcigel



MX 80



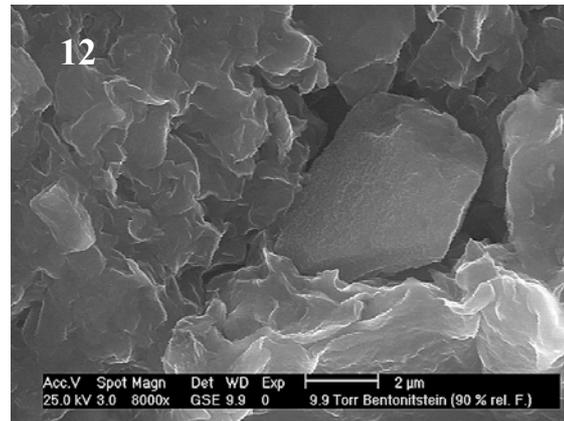
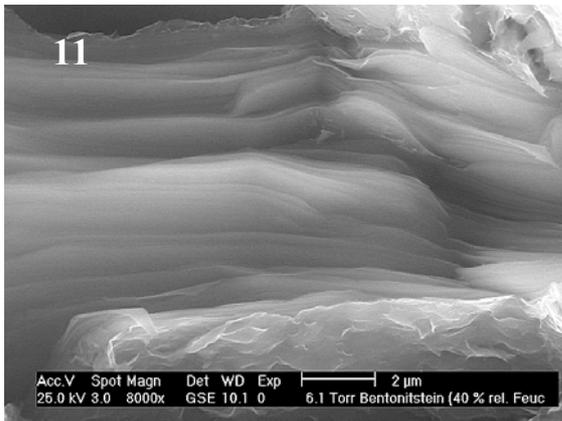
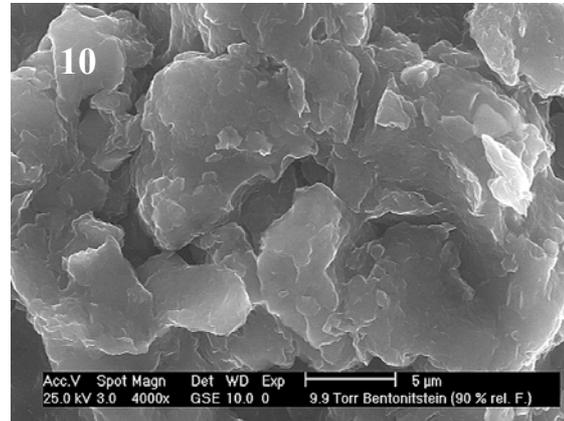
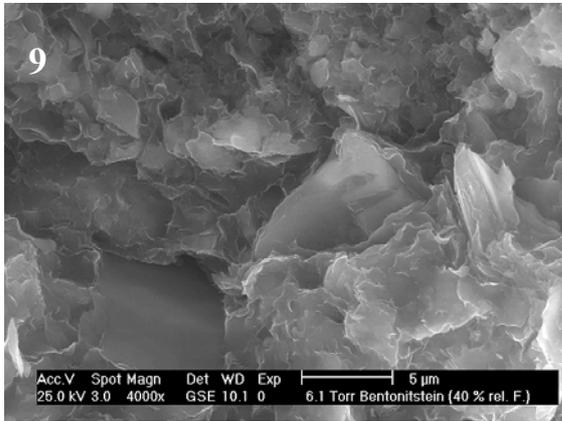
Bei den **Bildern 2.3 – 8** wurden Calcigel- und MX 80-Proben unter Vakuum miteinander verglichen. Bei den vorliegenden Aufnahmen kann selbst bei Vergrößerungen von 8000 kein deutlicher Unterschied erkannt werden (s. Anlage 1). Bei Calcigel ist die Plättchenstruktur deutlicher ausgeprägt (Bilder 2.7, 2.8).



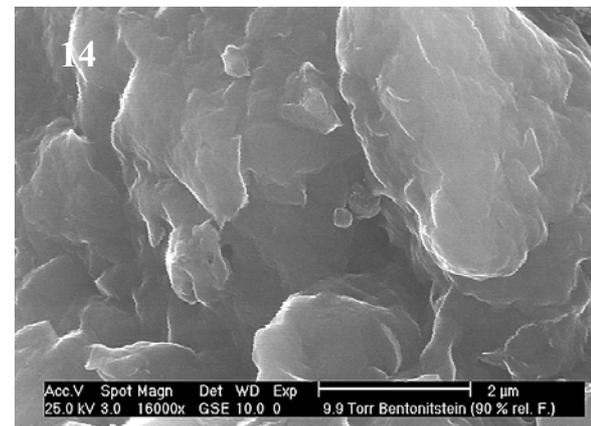
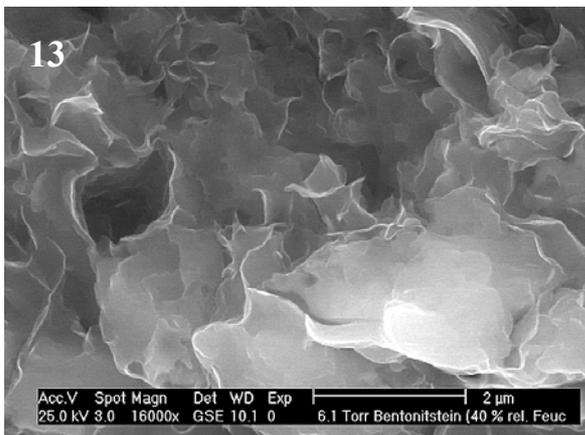
In den folgenden **Bildern 2.9 - 12** wurden die Proben (Calcigel-Sandgemisch) bei der Aufnahme unter verschiedenen Luftfeuchten gelagert. Es werden hier Aufnahmen von 40 und 90 % r.H. miteinander verglichen:

trockene Proben bei 40 % r.H

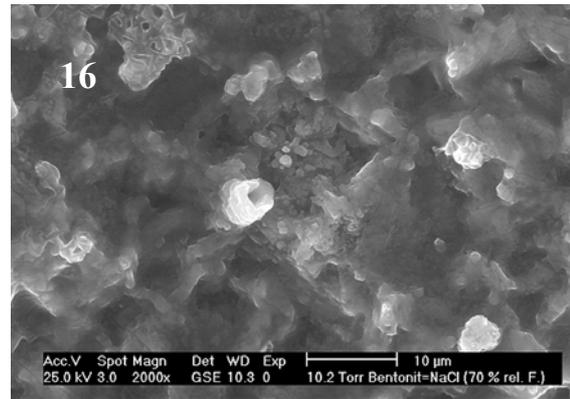
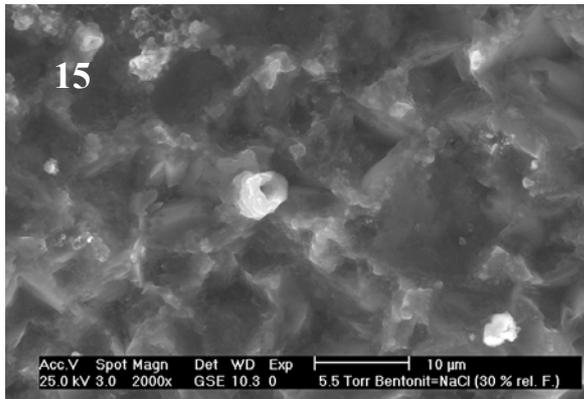
feuchte Proben bei 90 % r.H.



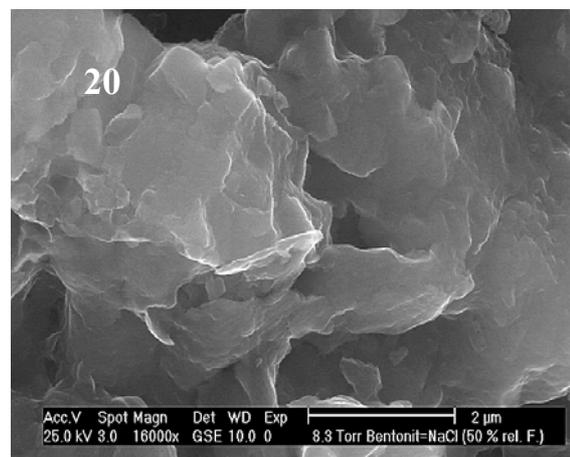
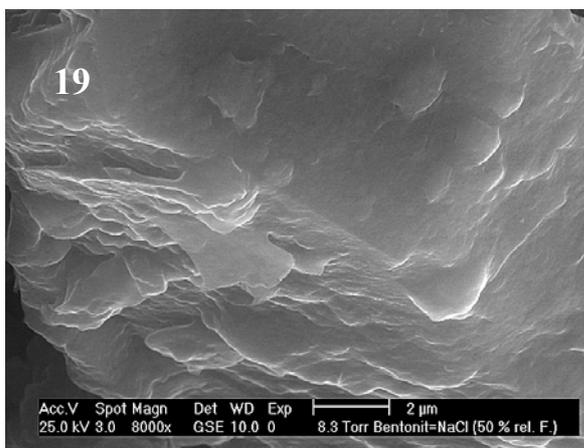
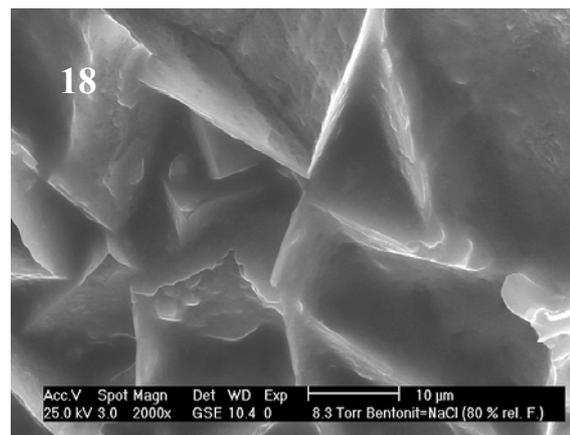
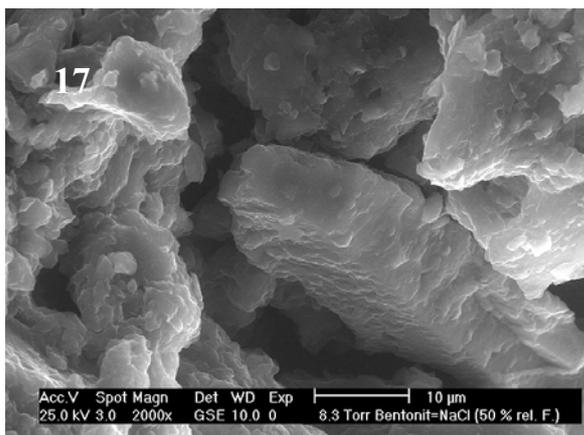
Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Calcigel eine starke Blättchenstruktur besitzt (Bild 2.11). Zwischen diese Blättchen lagert sich das sog. Zwischenschichtwasser ein. Des Weiteren bilden sich Flächenladungen an Grenzschichten aus, die zu wesentlichen Veränderungen der komplexen Dielektrizitätskonstante führen. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben, die bei 40 % r.H. und bei 90 % r.H. aufgenommen wurden, ist nicht zu erkennen. Es deutet sich aber an, dass die Blättchenstruktur unschärfer wird bzw. durch das aufgenommene Wasser quillt und die dünnen Plättchen verschwinden (Bild 2.14).



Die folgenden Untersuchungen wurden an einem Bentonit-Sandgemisch durchgeführt, das in einer konzentrierten Salzlösung gelagert wurde. Vor der elektronenmikroskopischen Aufnahme wurde die Probe getrocknet, um die Wirkung des Salzes besser sichtbar zu machen.



Durch die Erhöhung der Luftfeuchte von 30 % (Bild 2.15) auf 70 % (Bild 2.16) geht die kristalline Struktur in Lösung über. Die charakteristischen Blättchenstruktur des Bentonits ging verloren. Durch die wesentlich größeren Ionen der Salzlösung werden die Wassermoleküle gebunden und können somit nicht mehr ihre Quellfunktion in den Zwischenschichten erfüllen. Die Verkrustung der Materialstruktur wird bei höheren Vergrößerungen (2000, 8000 und 16000) nochmals in den Bildern 2.17 - 20 gezeigt.



Die Salzstruktur geht bei Erhöhung der Feuchte in Lösung über. Die Dichtwirkung des Bentonits, die durch Wasser entsteht, wird beim Eindringen einer Salzlösung reduziert. Das TDR-Verfahren basiert in diesem Fall im Wesentlichen auf den hohen Verlusten der Ionenleitfähigkeit.

3 Materialuntersuchungen mit dem Netzwerkanalysator

(Messungen im Frequenzbereich)

Bei der Verwendung von dielektrischen Messverfahren im Zeit- und Frequenzbereich für den Einsatz in Bentonitverschlussbauwerken, ist es notwendig, die Eigenschaften des den Sensor umgebenden Materials zu kennen, um Messeffekte zu deuten oder den Sensor zu optimieren. Die dielektrischen Eigenschaften von Bentoniten werden durch Verwendung eines Netzwerkanalysators, einer koaxialen Messleitung oder einer offenen Koaxialsonde in einem breiten Frequenzbereich gemessen (Bilder 3.1, 3.2).



Bild 3.1 Netzwerkanalysator mit Messleitung, offener Koax-Sonde und angeschlossener Messwertverarbeitung

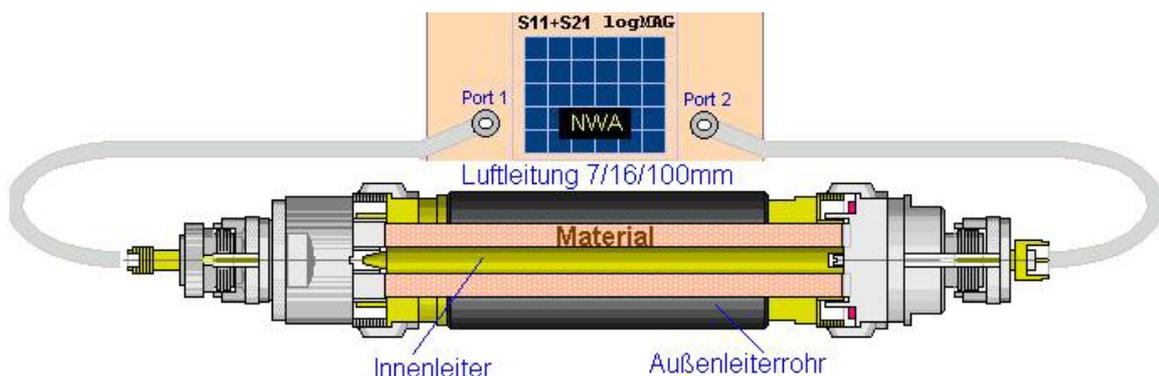


Bild 3.2 Netzwerkanalysator mit koaxialer Messleitung

Das Material wird dabei in eine koaxiale 50-Ohm Luftleitung gefüllt (Bild 3.2). Die Messung in der koaxialen Messleitung hat den Vorteil, dass eine homogene Feldverteilung vorliegt und in einem breiten Frequenzbereich gemessen werden kann. Vor der Messung muss dafür Sorge getragen werden, dass die Dichte pulverisierter Proben in der Leitung möglichst gleich ist, wenn die Messwerte verschiedener Materialien miteinander verglichen werden sollen. An den Messkabeln des Netzwerkanalysators ist vor der Messung eine "Full-Wave-Two-Port-

Calibration" mit Kalibrierstandards notwendig. Durch die Kalibrierung wird die Messebene an den Probekörper herangelegt, Fehlereinflüsse durch Messkabel und Übergänge werden bei der Kalibrierung eliminiert.

Infolge der symmetrischen Anordnung und der Reziprozität des Materials weisen die Streuparameter $S_{11} = S_{22}$ (Eingangsreflexionsfaktor) und $S_{21} = S_{12}$ (Transmissionsfaktor) von beiden Seiten der Messleitung jeweils gleiche Werte auf. (Streuparameter sind für reflexionsfreien Abschluss, d. h. bei ausgangsseitiger Anpassung definiert).

Beim NWA-Anschluss ist die Voraussetzung gegeben, dass keine Fehlanpassungen von Quelle und Last auftreten. Ausgehend von den gemessenen komplexen S-Parametern in Gl. (3.1) können die Größen Γ und T des Materials bestimmt werden..

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2\Gamma^2} \quad S_{21}(\omega) = \frac{(1 - \Gamma^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2\Gamma^2} \quad (3.1)$$

$$\Gamma = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} + 1} \quad (3.2)$$

$$T = \exp\left[-j \frac{\omega}{c} \cdot d \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}\right] \quad (3.3)$$

Γ ist der Reflexionsfaktor hervorgerufen durch den Wellenwiderstandssprung zwischen dem Wellenwiderstand Z_0 (Luft) und Z_S (Material). T ist der Transmissionsfaktor im Material endlicher Länge. Diese beiden Größen sind relevant für die Dämpfung des Materials in der Leitung. Durch die Verwendung der Gleichungen von Nicolson und Ross wird es möglich, über Reflexions- und Transmissionsfaktor (Gl. 3.2, 3) die komplexen Werte für Permittivität ϵ (Dielektrizitätskonstante) und Permeabilität μ zu bestimmen [3; 4]. Es wird dazu eine Materialsoftware HP 85071C verwendet, mit der nach der Bestimmung der S-Parameter im Frequenzbereich von 100 MHz – 10 GHz die komplexen Größen von ϵ und μ berechnet werden können (μ_r bei dielektrischen Materialien = 1).

Für die Messung von Bentonitproben wurde eine koaxiale Messleitung 13/30 konzipiert. Sie bietet die Voraussetzung relativ große Proben in einem breiten Frequenzbereich zu messen. Fehler bei der Messung entstehen durch Rauigkeiten, unterschiedliche Verdichtungen, Luftspalte sowie durch das Entstehen von Moden höherer Ordnung.

Messung der Dielektrizitätskonstante mit Luftleitung 7/16/100 mm
NWA HP8720D und Materialsoftware HP85071C

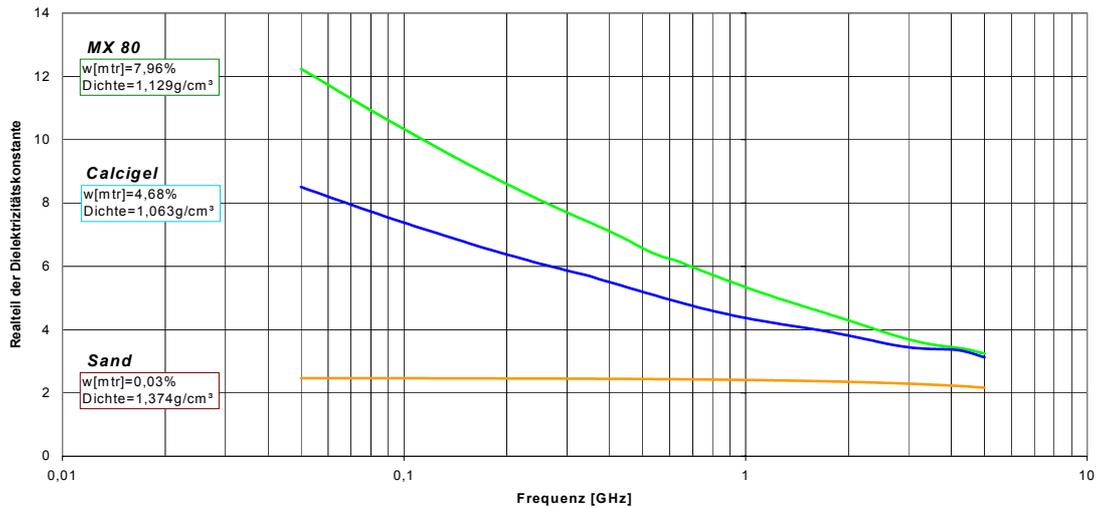


Bild 3.3 Realteil der komplexen DK von Calcigel und MX 80

Messung der Dielektrizitätskonstante mit Luftleitung 7/16/100 mm
NWA HP8720D und Materialsoftware HP85071C

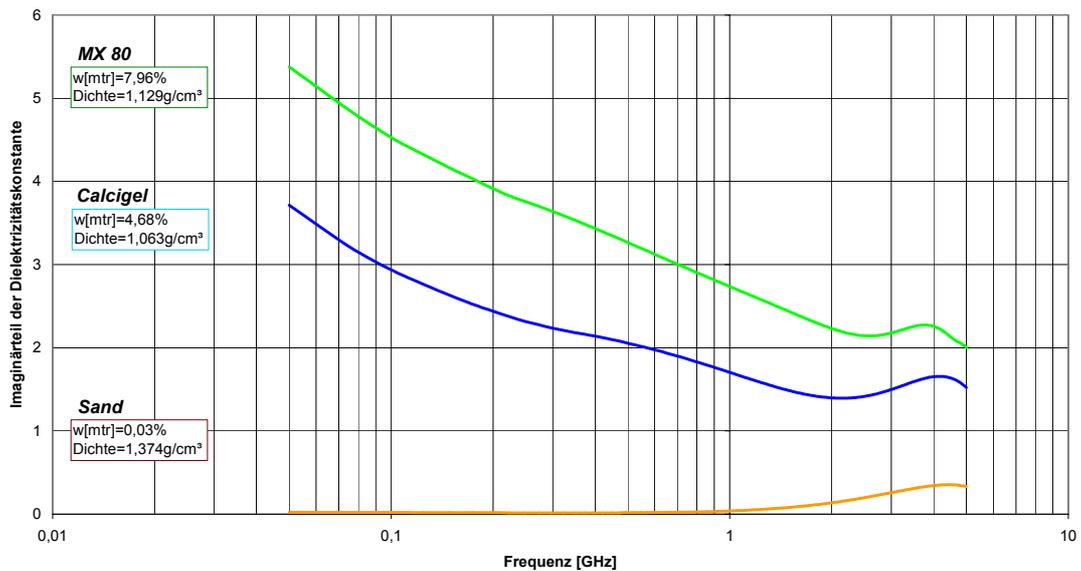


Bild 3.4 Imaginärteil der komplexen DK von Calcigel und MX 80

In den Bildern 3.3 und 3.4 sind Real- und Imaginärteil der komplexen DK von Calcigel und MX 80 im Frequenzbereich von 50 MHz – 5 GHz dargestellt. MX 80 weist sowohl höhere Werte des Realteils als auch des Imaginärteils auf. Dies kann auf den höheren Anteil an gebundenem Wasser bei MX 80 zurückgeführt werden. Das Ansteigen der Kurven im Frequenzbereich < 400 MHz ist auf den hohen Anteil der Ionenleitfähigkeit zurückzuführen, der im niederen Frequenzbereich zunimmt.

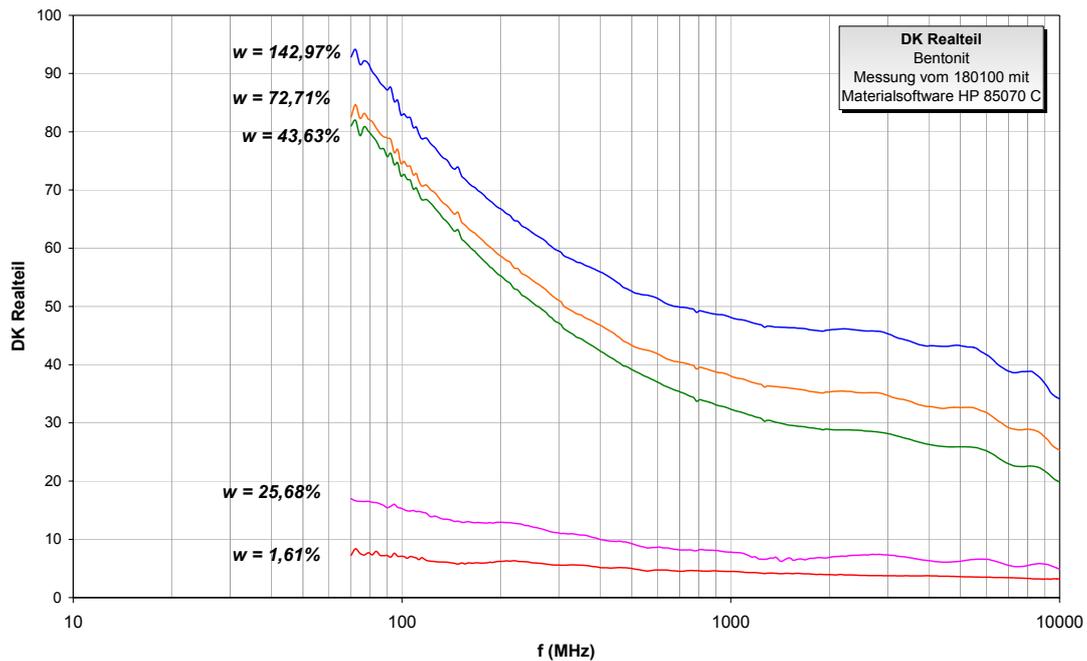


Bild 3.5 Realteil der DK bei Bentonit in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Feuchtegehalt w

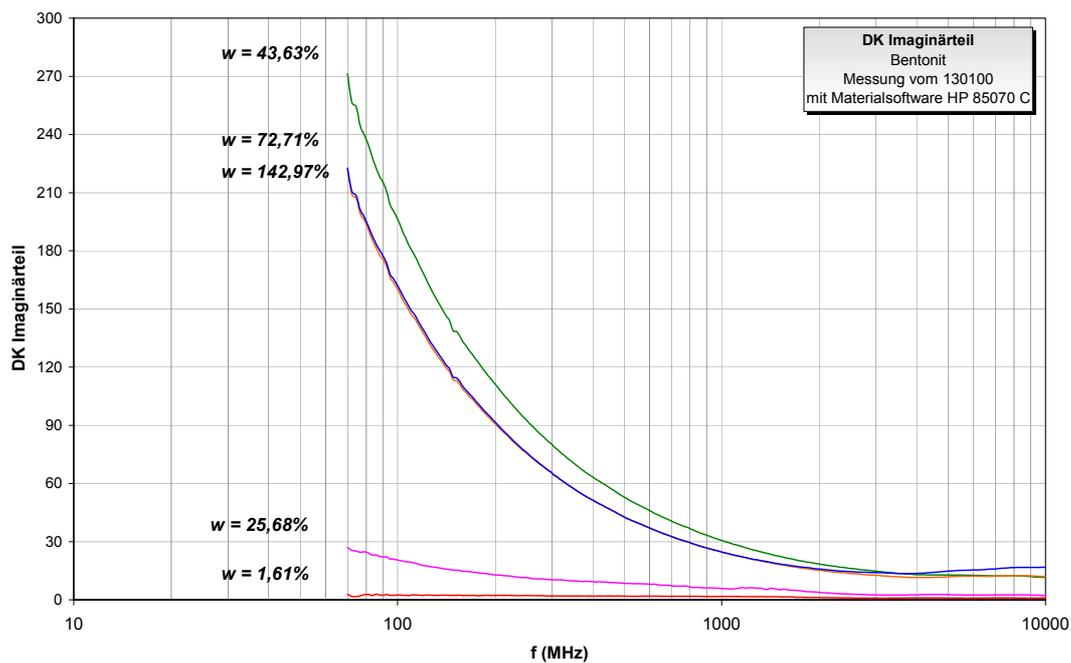


Bild 3.6 Imaginärteil der DK in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Feuchtegehalt w

In den Bildern 3.5 und 3.6 werden Realteil und Imaginärteil der DK von Bentonit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt gezeigt. Die Messungen wurden mit einer offenen Koaxialsonde durchgeführt. Bis zu einem Wert von 25,7 % sind noch keine wesentlichen Änderungen der Kurven zu verzeichnen, diese treten erst beim Vorliegen von freiem Wasser auf. Die Unterschiede der Kurven in den Bild 3.5, 3.6 bei Wassergehalten von 43,6 % bis zu 143 % sind relativ gering, so dass in diesem Bereich Absolutwerte bei verschiedenen Feuchtegehalten schwer zu unterscheiden sind und eine Kalibrierung erschweren würden. Bei einem Feuchte-

gehalt von 43,6 % wurden außerordentlich hohe Werte der komplexen DK bei 50 MHz gemessen:

Realteil bei $\epsilon_r' \approx 80$; Imaginärteil $\epsilon_r'' \approx 270$. Die Kurven von ϵ_r'' fallen bei Feuchtegehalten von 72,7 % und 143 % fast übereinander und liegen unter dem Wert von 43,6 %. Durch diesen Effekt entsteht beim Verlustfaktor $\tan \delta = \epsilon_r''/\epsilon_r'$ eine umgekehrte Reihenfolge der Kurven, als sie zu erwarten wäre (Bild 3.7).

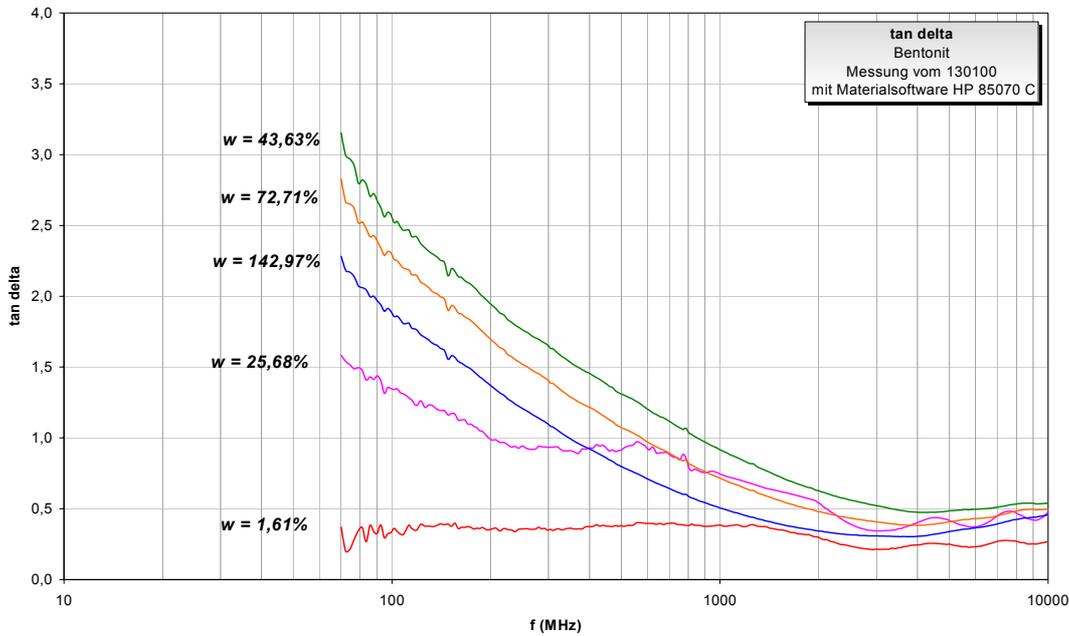


Bild 3.7 Verlustfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Feuchtegehalt w

Die Bilder 3.8 und 3.9 zeigen Realteil und Imaginärteil der DK bei steigenden Parametern des Feuchtegehaltes. Um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, ist die Dichte der Proben bei der Messung möglichst konstant zu halten.

Messung der Dielektrizitätskonstante von Sand/Calcigel-Gemisch (50/50)
NWA HP8720D mit Koax-Sonde und Materialsoftware HP85070C

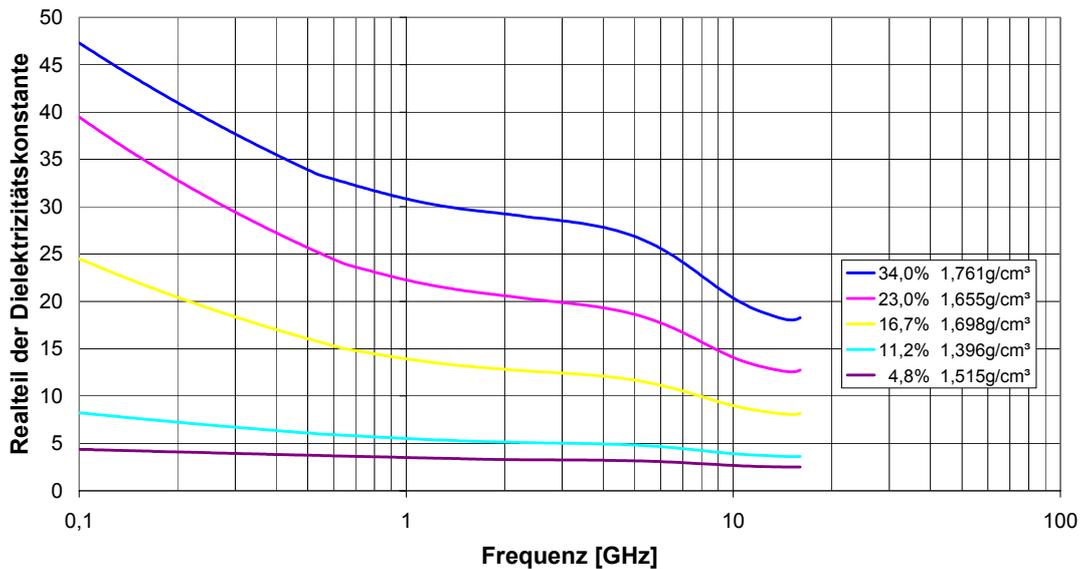


Bild 3.8 Realteil der DK bei steigendem Feuchtegehalt w

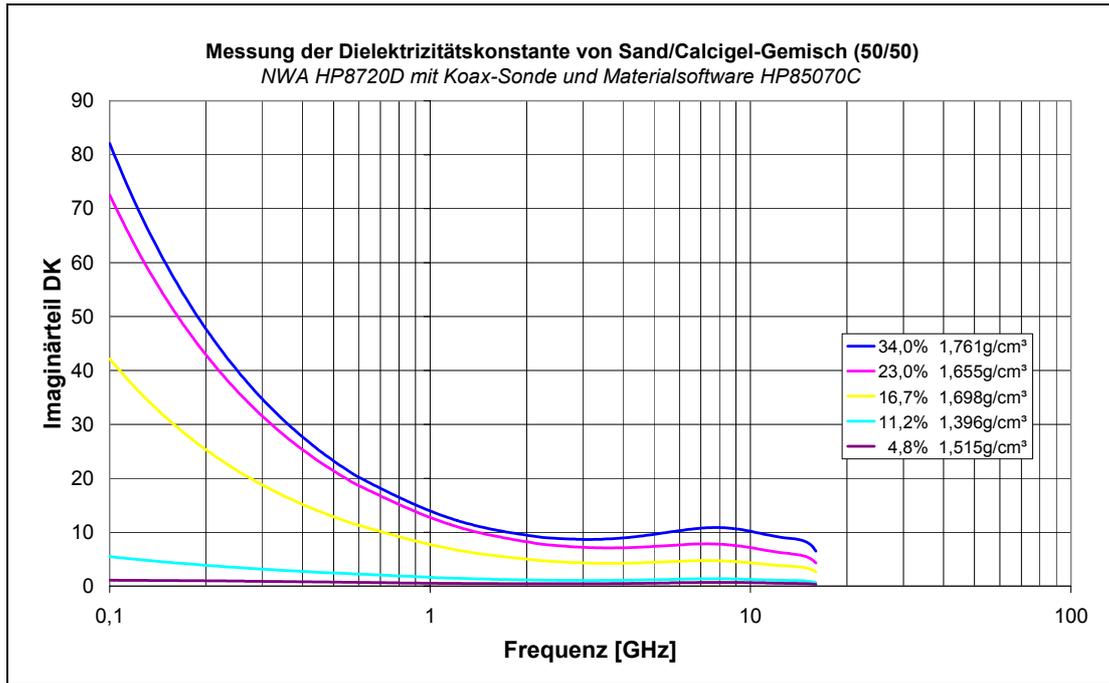


Bild 3.9 Imaginärteil der DK bei steigendem Feuchtegehalt w

Bei hohen Feuchtegehalten steigt im Niederfrequenzbereich der Einfluss der Ionenleitfähigkeit stark an. Die Kurve des Quotienten aus Imaginärteil und Realteil der DK wird als Verlustfaktor $\tan \delta$ bezeichnet und bei der Berechnung mit dem Hochfrequenzstruktursimulator HFSS verwendet (Bild 3.10).

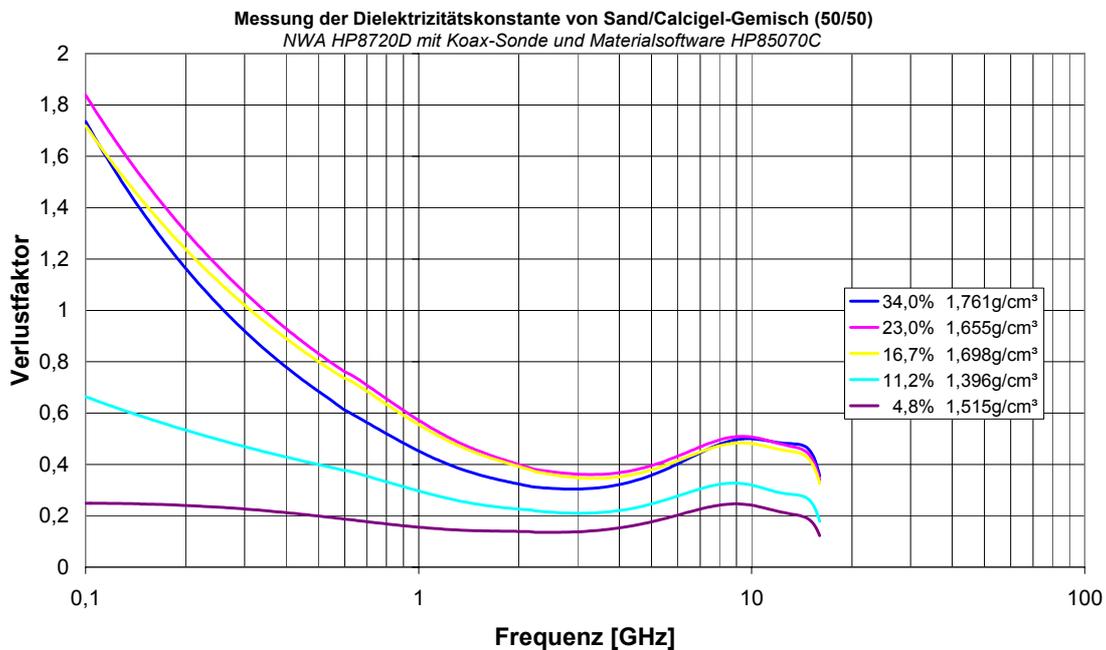


Bild 3.10 Verlustfaktor bei steigendem Feuchtegehalt

Zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit vom Bentonit MX 80 bei verschiedenen Feuchtegehalten wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe folgender Messaufbau verwendet (Bild 3.11) (s. auch Anl. 3).

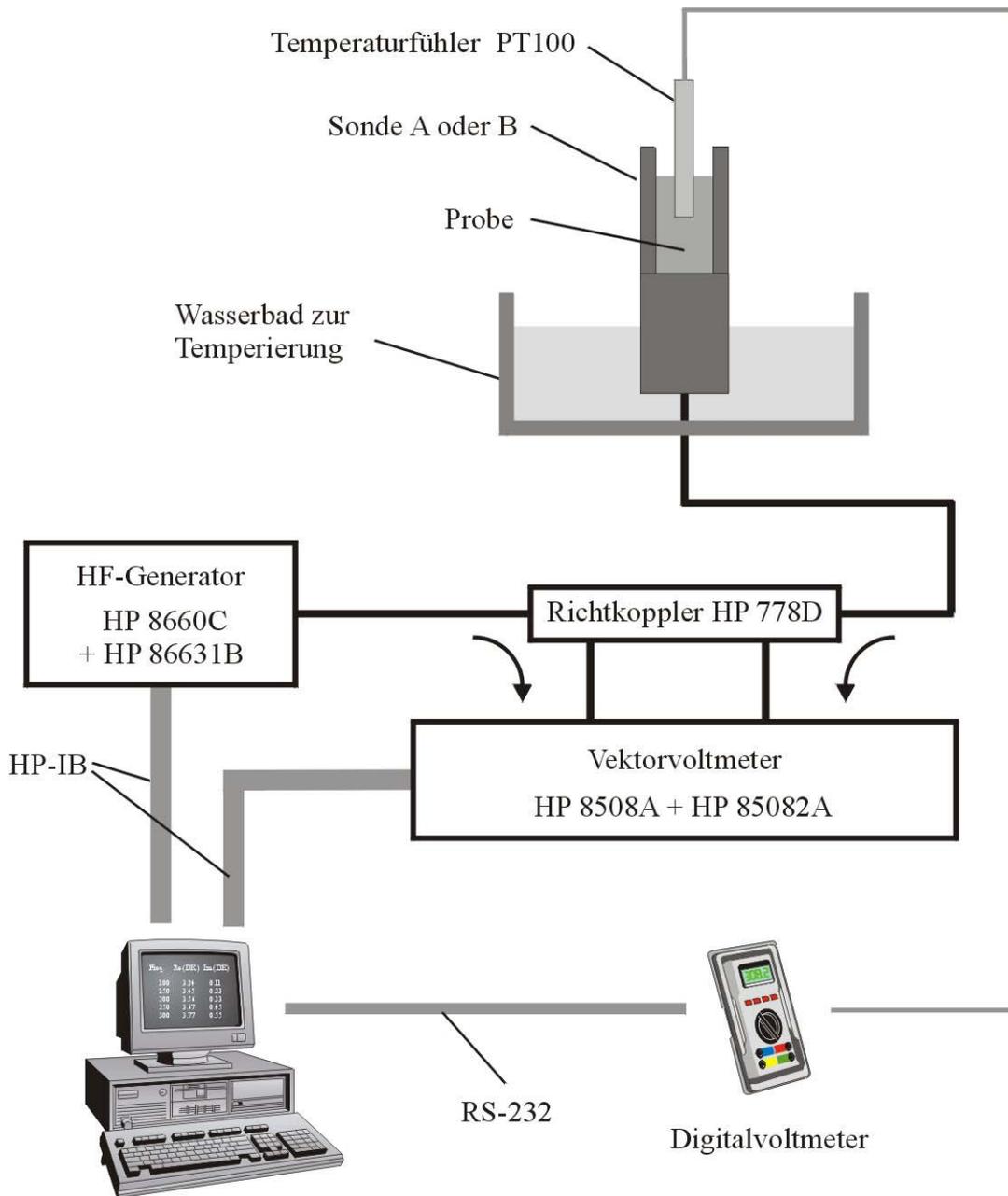


Bild 3.11 Messplatz zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von Bentonit

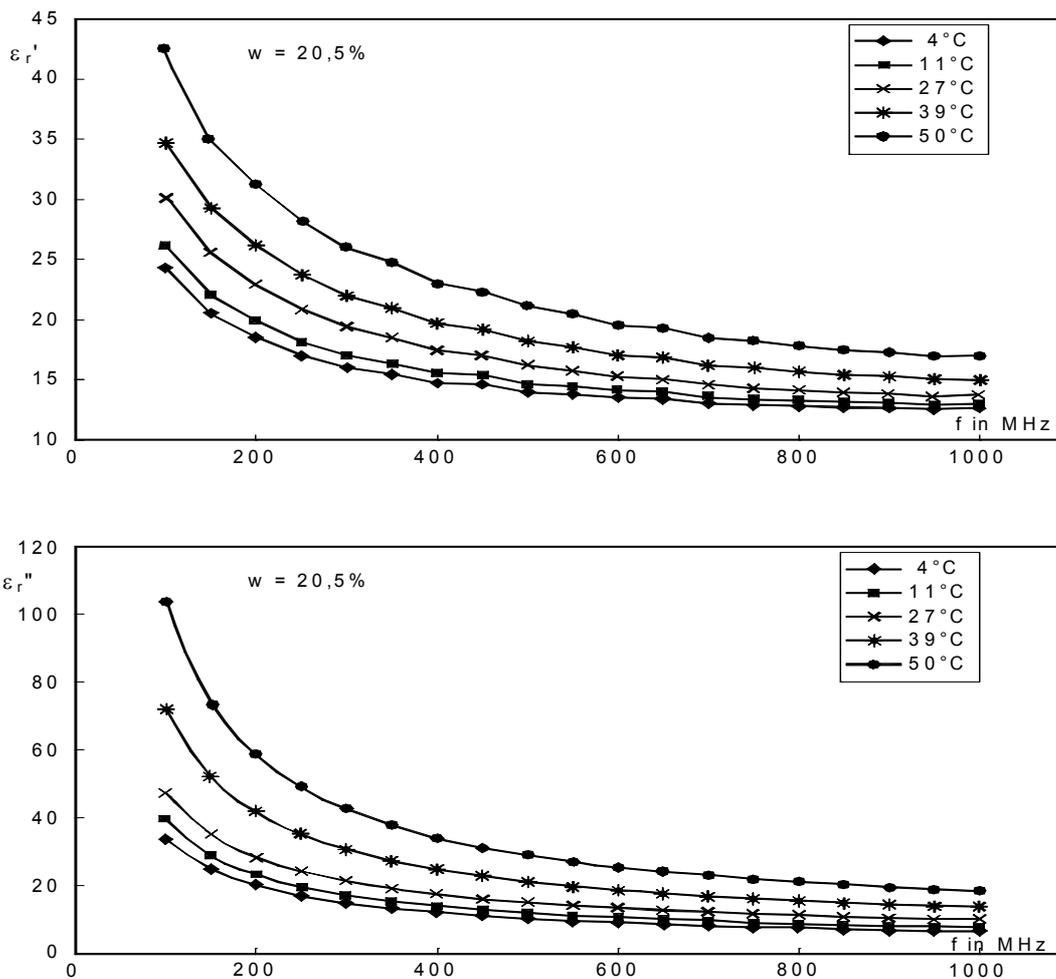


Bild 3.12 Temperaturabhängigkeit von Realteil (ϵ_r') und Imaginärteil (ϵ_r'') der DK in einem Frequenzbereich von 0,1 GHz – 1 GHz bei einem Feuchtegehalt von 20,5 %

Bei Erhöhung der Temperatur steigt die Mobilität der Wassermoleküle, die Kurven von Realteil (ϵ_r') und Imaginärteil (ϵ_r'') der DK werden bei konstantem Feuchtegehalt in einen höheren Wertebereich verschoben.

Der Mittelwert des Imaginärteils (ϵ_r'') liegt im Niederfrequenzbereich bei einem Feuchtegehalt von $w = 9 \%$ auf bei ca. 4; bei $w = 20,5 \%$ steigt er auf ca. 80 und erreicht bei $w = 31 \%$ einen Wert von ca. 150 (s. Anl. 2). Durch die Erhöhung des Feuchtegehaltes kommt es zur Vergrößerung der Anzahl der freien Wassermoleküle und somit zur steigenden Leitfähigkeit. Dieser Effekt wird durch die Temperaturerhöhung noch verstärkt.

Literatur

- [3.1] A.M. Nicolson, G.F. Ross: Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time Domain Techniques. IEEE Trans. Inst., Vol. IM-19, No.4, 1970, pp. 377-382
- [3.2] Hewlett and Packard: Product Note 8510-3: Materials Measurement - Measuring the dielectric constant of solids with the HP 8510 network analyzer

4 Oberflächensensoren

(Messungen im Frequenzbereich)

4.1 Einsatzuntersuchungen mit einem Oberflächensensor in Bad Salzdetfurth



Bild 4.1 Durchfeuchtete Stellen in einem Bohrschachtverschluss in Salzdetfurth

Um die Bentonitdichtung eines Bohrschachtverschlusses im Salzbergwerk Bad Salzdetfurth zu überprüfen, wurde über eine Druckkammer Salzlösung in den Verschluss gepresst (Bilder 4.1, 4.2). Der Aufbau des Verschlusses ist im Bild 4.2 mit Messhorizonten dargestellt. Das Material des Dichtelementes bestand im Bereich, in dem die Messungen durchgeführt wurden, aus einem binärem Gemisch aus Bentonitgranulat und gepressten Bentonitkissen.

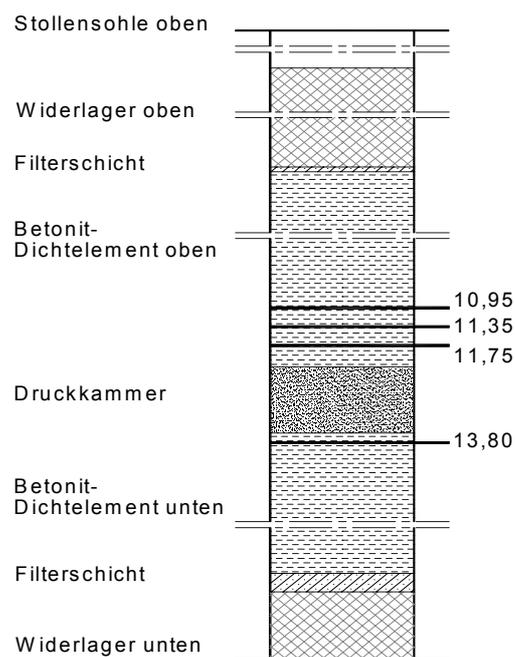


Bild 4.2

Aufbau des Bohrschachtverschlusses mit Druckkammer und Messhorizonten [4.1]

Zur stationären Feuchtemessung waren in bestimmten Messhorizonten von DBE-Technology GmbH kapazitive Feuchtemessgeräte (Thetasonden) mit Gabelelektroden eingebaut (Bild 4.3) [4.1]. Die Gabelelektroden wurden mit einem Bentonitpressling mit einer Trockendichte von ca. $1,7 \text{ g/cm}^3$ ummantelt, um den Einfluss von Dichteunterschieden zu eliminieren. Das Messprinzip basiert auf einem Materialfeuchteausgleichsverfahren von Stoff zu Stoff, wie es auch bei Gipsblöcken zur Feuchtemessung in Böden angewandt wird [4.2]. Das Wasser der Umgebung diffundiert „relativ schnell“ in den porösen Gipsblock, bei Bentonit dauert dieser Ausgleichvorgang entsprechend länger. Die aufgenommene Feuchte von Gips- oder Bentonitblöcken kann durch Trockenschrankverfahren, Leitfähigkeitsverfahren, kapazitive Messverfahren bzw. TDR-Verfahren bestimmt werden. Materialausgleichsverfahren sind nicht für schnelle Messungen verwendbar, da der Ausgleichvorgang von Stoff zu Stoff relativ hohen Zeitaufwand erfordert.



Bild 4.3 Thetasonden nach dem Ausbau

Da die Thetasonden nur an bestimmten Stellen des Bohrschachtverschlusses stationär eingebaut waren, bestand die Aufgabe, das Eindringen der Salzlösung an Leckstellen des Verschlusses schneller zu identifizieren, als dies mit dem herkömmlichen Trockenschrankverfahren realisierbar war. Dazu kam ein Feuchtemessgerät mit einem Streufeldresonator zum Einsatz, das bei einer Messfrequenz von 150 MHz arbeitete (Bild 4.4). Zur Vermeidung von undefinierbaren Ankopplungen, die beim Aufsetzen des Oberflächensensors entstehen können, war es notwendig, die Messfläche zu glätten.



Bild 4.4 Feuchtemessgerät absiMoist mit Streufeldsensor

Die Messungen erfolgten während des Rückbaus des Verschlusses an der Schachtwand, am Boden und an stark durchfeuchteten Stellen (s. Bild 4.6a). Bei jeder Messung wurde im Rechner eine vollständige Resonanzkurve erfasst, die die Feuchteparameter charakterisiert.



Bild 4.5 Messstation am Boden des Bohrschachtverschlusses



Messung mit Oberflächensensor
absiMoist (150 MHz)



Bild 4.6 Messung an stark durchfeuchteten Stellen (a) und an der Wand (b)

Durchfeuchtete Stellen an der Wand der Bohrung konnten mit dem Messgerät wesentlich besser erkannt werden als es visuelle Betrachtungen durch feuchte Ränder zuließen (Bild 4.6b). Bei Messungen auf stark durchnässten Stellen wurde der Streufeldsensor häufig durch die konzentrierte Salzlösung kurzgeschlossen. Deshalb erfolgte eine Isolation des Sensors durch eine Folie. Die Messungen erfolgten auf den im Bild 4.7 eingezeichneten Messpunkten auf den freigelegten Messhorizonten in unterschiedlichen Teufen. Von den Messstellen am Boden wurden Proben herausgehoben und im Labor analysiert. Für die Referenztrocknung wurde ein Konvektionstrockenschrank, in dem die Proben 24 bzw. >48 h bei 105°C lagerten, und ein Mikrowellentrockenschrank mit integrierter Waage verwendet, der den Vorzug einer geringen Trockenzeit aufweist (20 min). (Bei der Mikrowellentrocknung tritt die höchste Wärme an den Stellen auf, die die höchsten Verluste aufweisen. Meist ist dies im Innern der Probe der Fall. Einflüsse durch den hohen Salzgehalt führten nicht zum Glühen der Probe, was bei hoher Leitfähigkeit aber durchaus möglich sein kann).

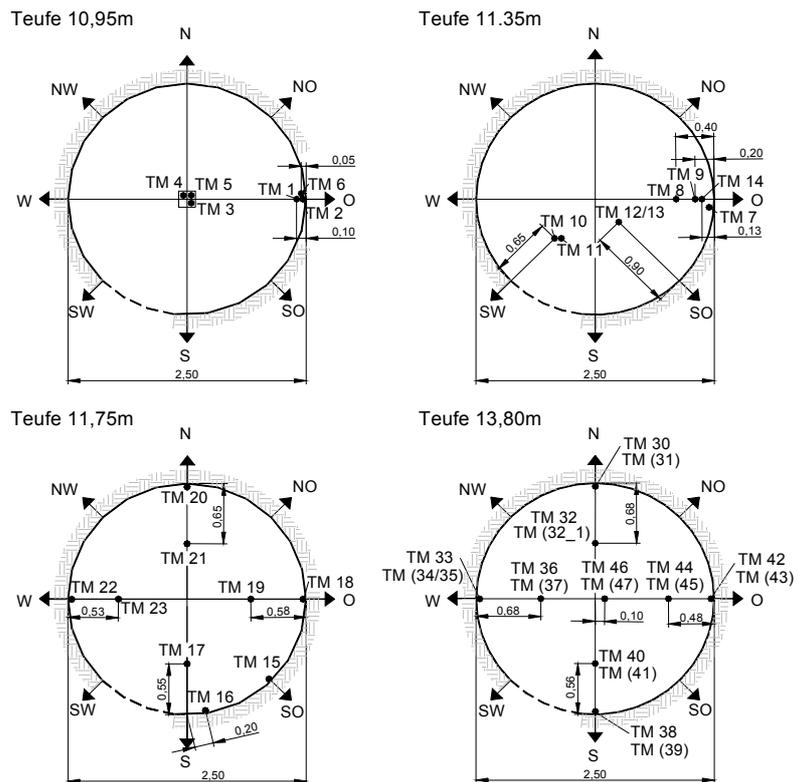


Bild 4.7 Verteilung der Feuchtemesspunkte mit absiMoist in verschiedenen Teufen

Die Verteilung der Messwerte in Abhängigkeit von Feuchtegehalt, Dichte, Leitfähigkeit, Resonanzfrequenz und Bandbreite werden in Anlage 4 (Bilder 1-4) gezeigt. (An den mit einer Klammer versehenen Messpunkten im Bild 4.7 (Teufe 13,80 m) wurde bei Messungen mit dem Feuchtemessgerät absiMoist eine Folie untergelegt).

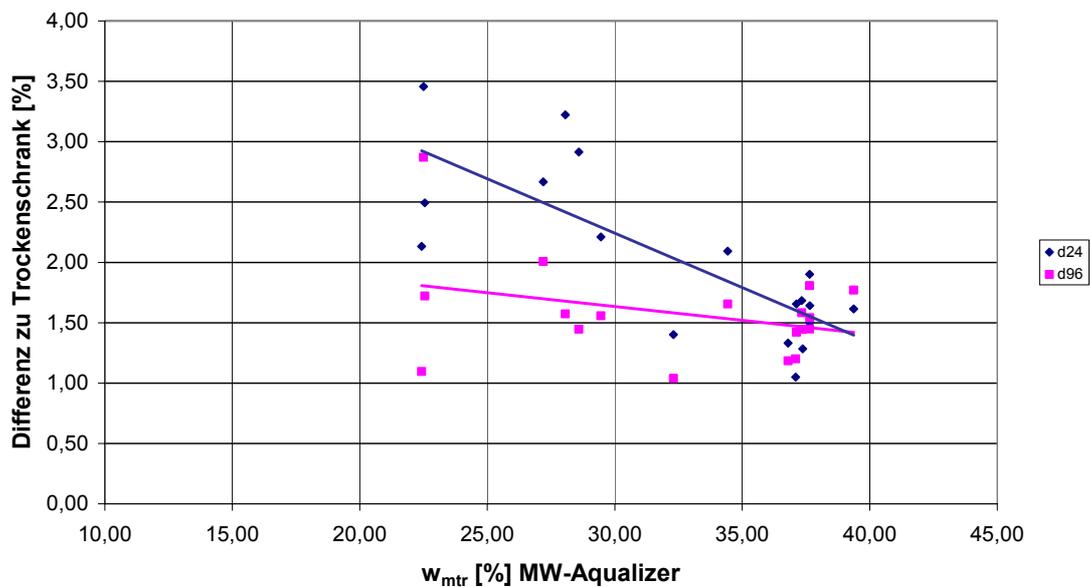


Bild 4.8 Differenz der Referenzwerte im Trockenschrank (Trockenzeit 24 bzw. >48 h) zu denen, die im Mikrowellentrockenschrank ermittelt wurden

Bild 4.8 zeigt einen Vergleich der Referenzwerte, die bei allen Messungen im Mikrowellentrockenschrank gemessen wurden, zu denen die im Trockenschrank bei 105°C und bei Trockenzeiten von 24 bzw. > 48 h ermittelt wurden. Die relative große Streuung und der günstigere Mittelwert bei >48 h kommen durch die relativ lange Zeit zustande, die für das Verdampfen des Zwischenschichtwassers erforderlich ist.

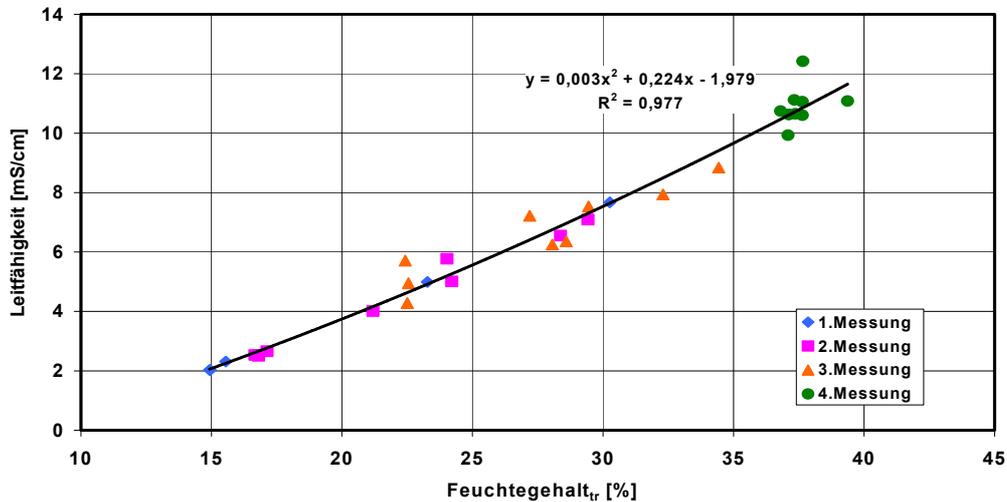


Bild 4.9 Leitfähigkeit von Eluaten aus der Bentonitprobe in den Teufen 10,95 m, 11,35 m, 11,75 m und 13,8 m (Bilde 4.2, 4.7)

Im Bild 4.9 wird die Leitfähigkeit von Eluaten der Messpunkte in den verschiedenen Teufen gezeigt. Zur Herstellung der Eluate wird trockenes, gemahlenes Bentonit 24 h in destilliertem Wasser gelagert. Die Leitfähigkeit des entstehenden Eluats wird in einer Leitfähigkeitmesszelle bestimmt. Die Leitfähigkeit im Bild 4.9 ergibt eine sehr gute Korrelation zu dem Referenz-Feuchtegehalt, der mit dem Mikrowellenverfahren ermittelt wurde. Daraus kann aber nicht der Schluss gezogen werden, Leitfähigkeitsverfahren mit Erfolg einsetzen zu können, denn bei der Anwendung von Leitfähigkeitsmessverfahren treten bei festen Materialien zahlreiche Probleme auf, z.B. Kontaktandruck der Messelektroden, Dichteeinflüsse, Ionenleitfähigkeit usw. [4.2].

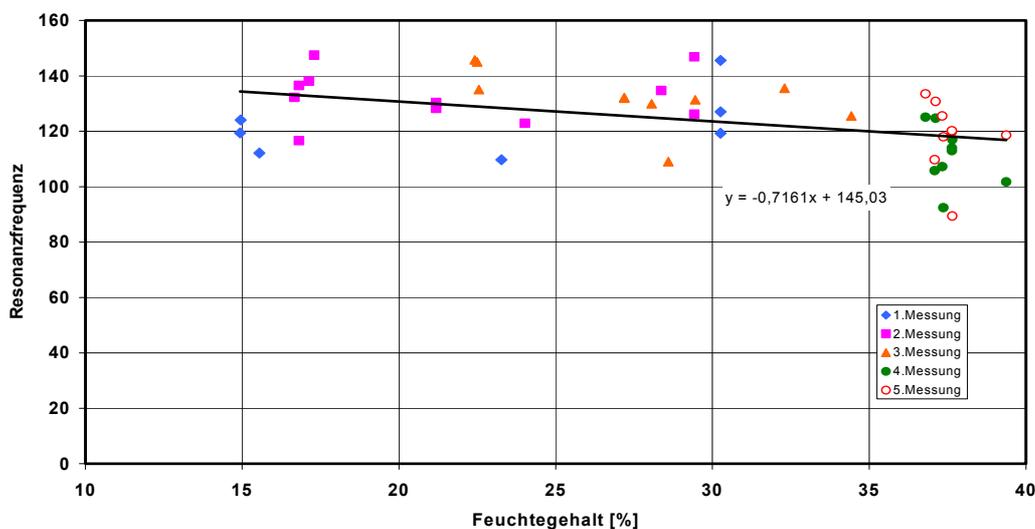


Bild 4.10 Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Beim Resonatorverfahren dienen die Messwerte Resonanzfrequenz f_r näherungsweise zur Beurteilung des Realteils der DK ϵ_{Mat} und die Bandbreite B_w zur Beurteilung der Verluste $\tan\delta_{\text{Mat}}$ [4.2] (f_0 und B_{w0} kennzeichnen den unbelasteten Resonator).

$$f_r \approx f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Luft}}}{\epsilon_{\text{Mat}}}} \approx f_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{Mat}}}} \quad (4.1)$$

$$B_w = \frac{f_0}{Q} = f_0 (\tan \delta_L + \tan \delta_C + \tan \delta_{\text{Mat}}) \approx f_0 \tan \delta_{\text{Mat}} \quad (4.2)$$

$$\Delta f_r = f_0 - f_r \quad (4.3)$$

$$\Delta B_w = B_w - B_{w0} \quad (4.4)$$

Bild 4.10 zeigt den Parameter der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt an den im Bild 4.7 gezeigten Messstellen. Bei sehr hohen Feuchtegehalten (Bild 4.6a) werden die Elektroden des Streufeldresonators nahezu kurzgeschlossen. In Teufe 13,80 m wurde deshalb bei einer zweiten Messung eine Folie unter den Resonator gelegt (5. Messung). Über die Feuchtwerte aller Messstellen ergibt sich eine Kalibriergerade. Die relativ hohe Streuung der Messwerte kommt durch die ungleichmäßige Verteilung der Feuchte an den Messstellen, den hohen Einfluss der Ionenleitfähigkeit bei der relativ niedrigen Messfrequenz, die Dichteunterschiede sowie die Kontaktproblematik des Sensors bei rauen Oberflächen zustande. Ein kräftigerer Andruck des Sensors führt zu einem besseren Kontakt mit der feuchten Oberfläche und damit zu veränderten Werten von Frequenzverschiebung und Bandbreite (Anl. 4 Bilder 4-6). Die Messwerte der Teufe von 13,80 m zeigten die höchsten Feuchtwerte, dort wurden auch die größten Werte von Resonanzfrequenzverschiebung und Bandbreite gemessen.

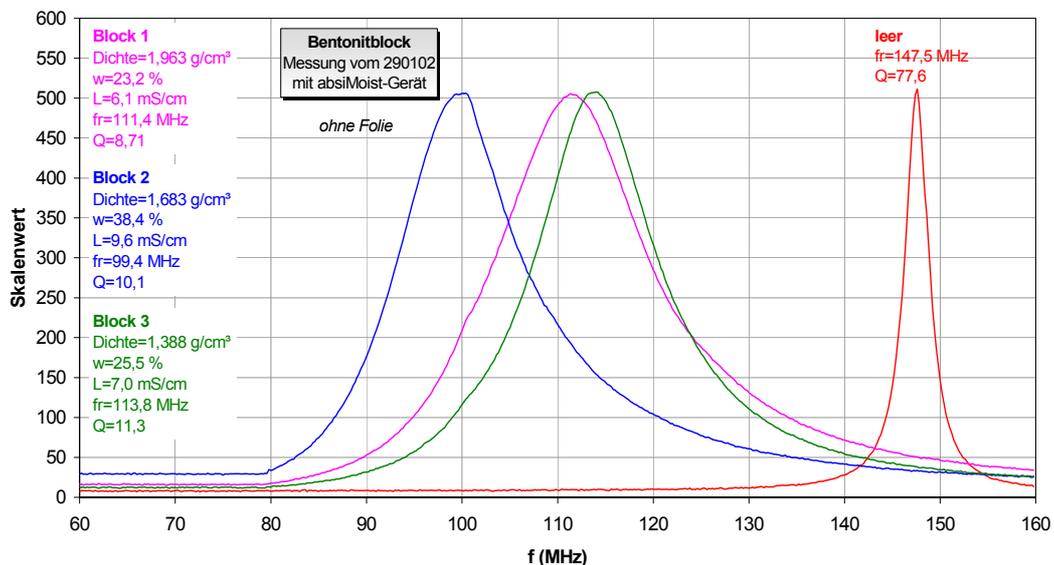


Bild 4.11 Verschiebung der Resonanzkurve und Vergrößerung der Bandbreite bei Erhöhung von Feuchte, Dichte und Leitfähigkeit im Vergleich zum leeren Resonator

Von den am Einsatzort untersuchten Messstellen der Teufen 11,15 m (Block 1), 13,8 m (Block 2) und 11,75 m (Block 3) m wurden Blöcke herausgehoben und im Labor mit analytischen Verfahren, dem absiMoist sowie mit höherfrequenten Resonatoren und dem Netzwerk-

analysator untersucht. Im Bild 4.11 wird die hohe Selektivität des Resonatorverfahrens gegenüber Feuchte- und Dichteänderungen gezeigt. Infolge der hohen Feuchte erfolgt beim Block 2 die größte Resonanzfrequenzverschiebung. Durch die größere Dichte erfährt die Resonanzkurve von Block 1 eine stärkere Verschiebung, als dies für den feuchteren Block 3 der Fall ist.

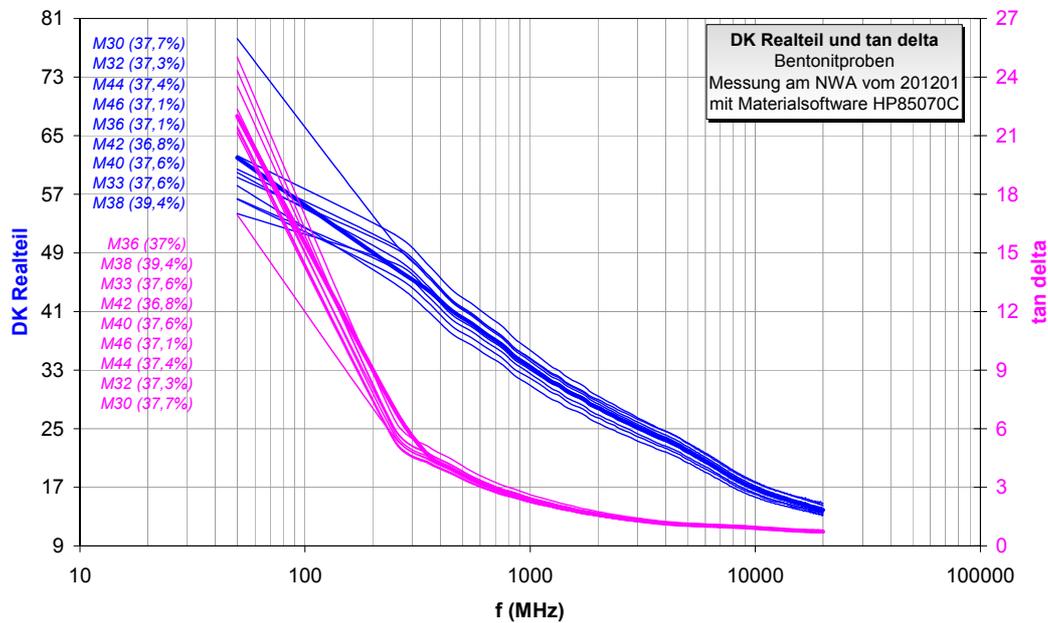


Bild 4.12 Realteil der DK und Verlustfaktor im Frequenzbereich von 50 MHz – 20 GHz

Bild 4.12 zeigt Realteil der DK und Verlustfaktor im Frequenzbereich von 50 MHz – 20 GHz an den Messstellen der Teufe 13,80 m. Durch diese Messung wird erkennbar, dass die Messwerte der Materialproben an den einzelnen Messstellen sowohl beim Realteil der DK als auch beim Verlustfaktor im Frequenzbereich < 300 MHz starke Streuungen aufweisen, obwohl die Feuchtwerte nur relativ gering streuen. Der Verlustfaktor steigt in diesem Frequenzbereich durch die hohe Leitfähigkeit stark an. Aus diesen Kurven lässt sich für diesen Einsatzfall die Schlussfolgerung ableiten, eine höhere Messfrequenz bei der ISM-Frequenz 2,45 GHz zu wählen.

4.2 Untersuchungen mit E- und H-Feld-Resonatoren bei 2,45 GHz

Die folgenden Untersuchungen an Bentonitproben wurden mit Resonatoren durchgeführt, bei denen einmal vorzugsweise das E-Feld und zum anderen vorzugsweise das H-Feld mit dem Material in Wechselwirkung treten (Bild 4.13).

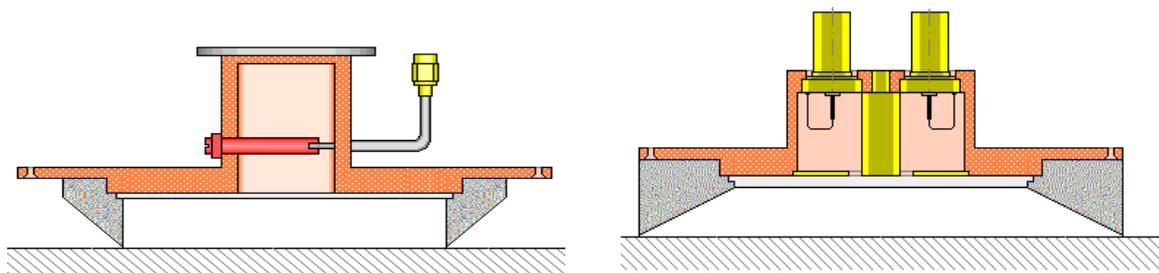


Bild 4.13 H-Feld-Sensor (links) und E-Feld-Sensor (rechts)

Beim E-Feld-Sensor wird beim direkten Auflegen des Sensors auf die Materialprobe durch den hohen Salzgehalt das Feld fast kurzgeschlossen (Bild 4.14); beim H-Feld-Sensor erfolgt bedingt durch das leitfähige Material eine Resonanzüberhöhung (Bild 4.15). Das Unterlegen eines Abstandsbleches und Folien führte zu geringen Entkopplungen (s. auch Anl. 4 Bilder 7, 8).

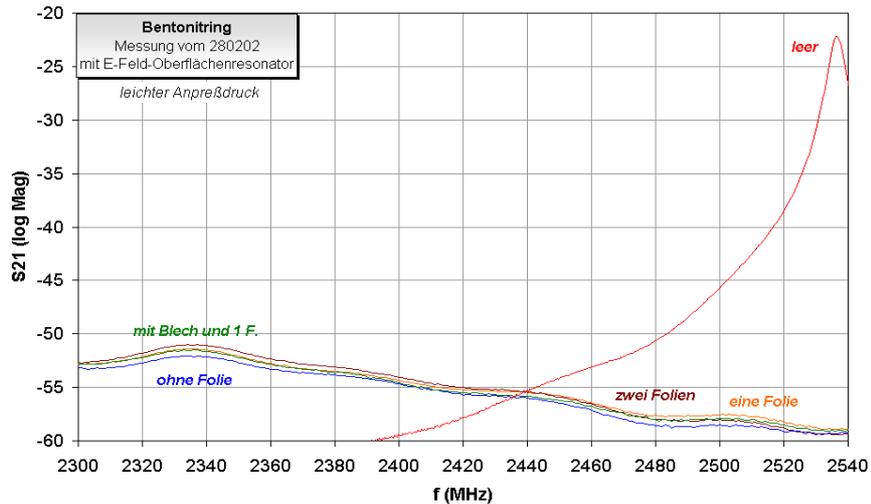


Bild 4.14 Messungen mit E-Feld-Sensor und untergelegten Folien an Bentonitproben

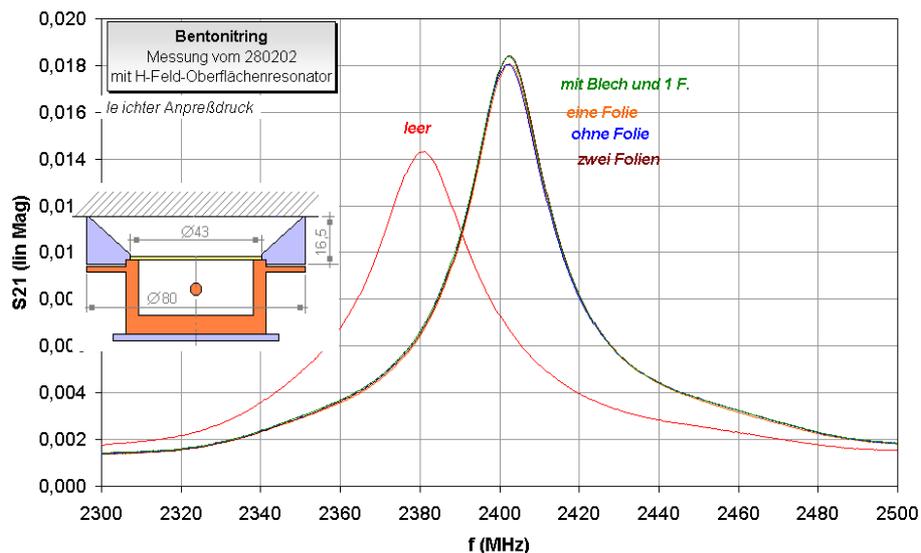


Bild 4.15 Messungen mit H-Feld-Sensor und untergelegten Folien an Bentonitproben

Im Bild 4.16 wird der Einfluss hoher Verluste, die durch Feuchte, Dichte und Ionenleitfähigkeit entstanden, auf die Form der Resonanzkurven gezeigt. Eine leichte Entkopplung zwischen Sensor und Material wurde durch das Unterlegen eines Ringes geschaffen. Durch die Verwendung eines trichterförmigen Aufsatzes wurde zwischen Resonatoroberfläche des E-Feld-Resonators und Material eine Distanz von 16,5 mm eingestellt (Bild 4.17). Dies hat zwar den Nachteil der Zwischenschaltung einer Luftschicht, die den Resonator unempfindlicher macht, jedoch den Vorteil, dass Unebenheiten das Messergebnis weniger stören und Kontakte zwischen Resonator und Material ausgeschaltet werden. Im Bild 4.18 werden Messungen an den gleichen Proben mit einem H-Feldsensor und einem Rohransatz gezeigt. Beim E-Feldsensor verursacht der Feuchteinfluss eine Frequenzverschiebung beim H-Feldsensor eine Amplitudenänderung.

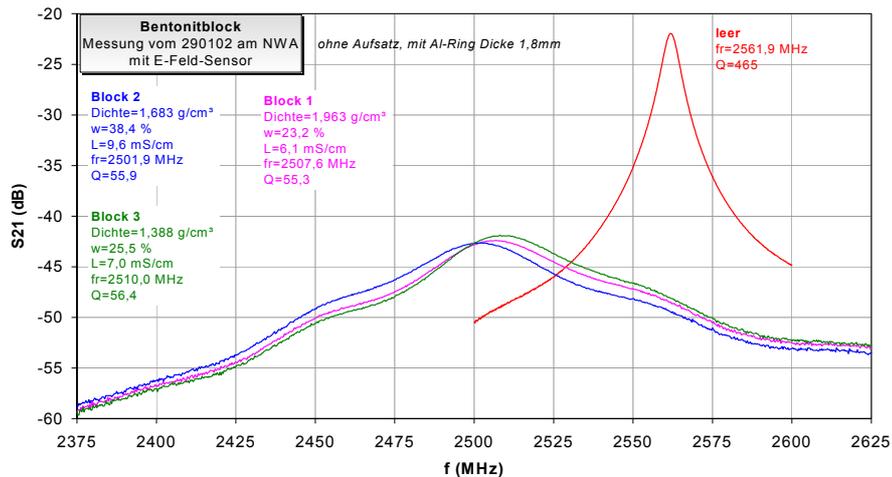


Bild 4.16 Einfluss starker Verluste durch den Salzgehalt auf die Resonanzkurven des E-Feld-Sensors

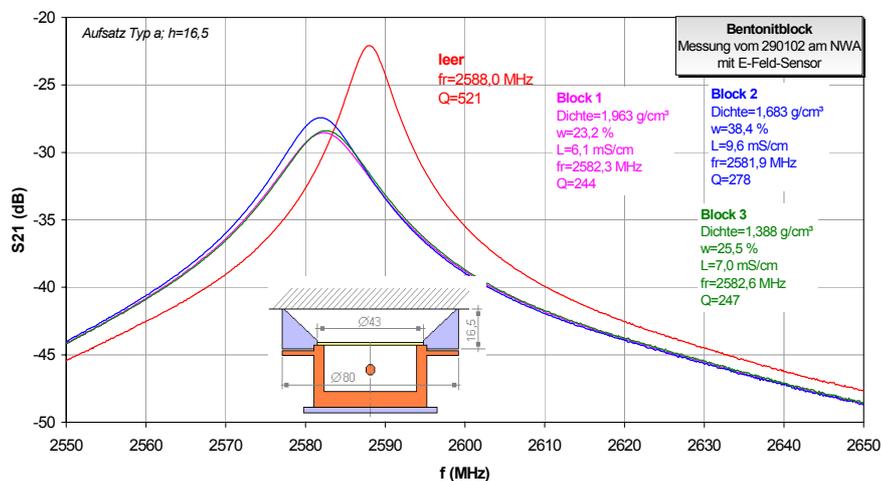


Bild 4.17 Resonanzkurven an Bentonitproben, gemessen mit E-Feldsensor und Trichteraufsatz

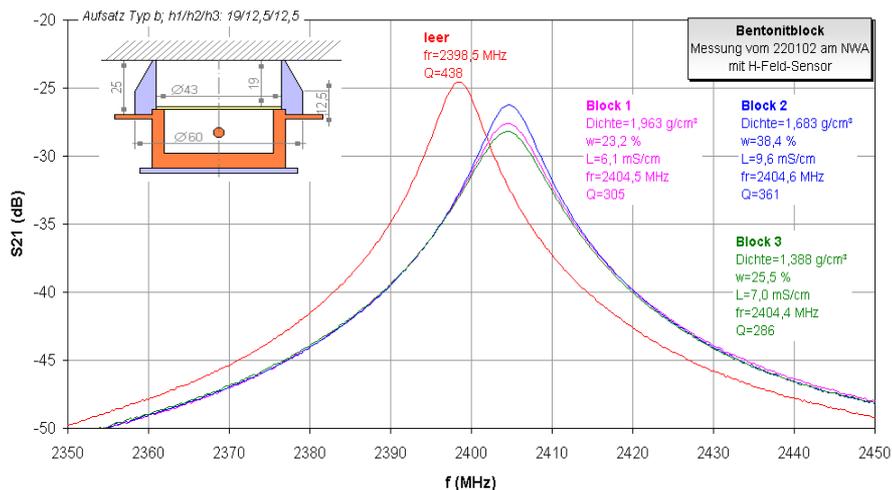


Bild 4.18 Resonanzkurven an Bentonitproben gemessen mit H-Feldsensor und Rohraufsatz

4.3 Untersuchungen an Proben vom Rückbau des Schachtverschlusses in Sondershausen

Die Messungen erfolgten an Proben vom Rückbau des Schachtverschlusses aus Sondershausen.

Datum	Bezeichnung der Schale
05. 03. 2002	Formsteinschale in Dichtelement II
26. 03. 2002	Druckseite Dichtelement II
22. 04. 2002	16. Schale rechter Stoß und 17. Schale links unten und mitte
28. 05. 2002	Randbereich südlicher Stoß 8. Schale
25. 06. 2002	Dichtelement I, 2. Schale Nähe Firste
08. 07. 2002	1. Schale und 8. Schale

Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Feuchtebestimmung mit Mikrowellenanalyser ¹
- Dichtebestimmung
- Bestimmung der Leitfähigkeit von Eluat in der Leitfähigkeitsmesszelle
- Bestimmung von Real- und Imaginärteil der DK mit Netzwerkanalysator
- Messung mit Feuchtemessgerät absiMoist
- Messung mit E-Feld-Sensor und Netzwerkanalysator
- Messung mit H-Feld-Sensor und Netzwerkanalysator

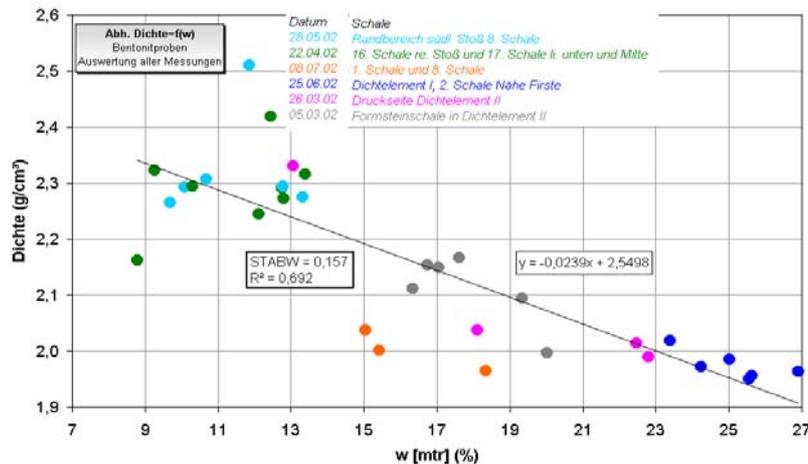


Bild 4.19 Dichte in Abhängigkeit von der Feuchte der Proben

Die Dichte in Abhängigkeit von der Feuchte der einzelnen Proben wird im Bild 4.19 gezeigt. Im Bild 4.20 erfolgt die Darstellung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Eine Gerade wird durch die Messwerte mit hohem Bestimmtheitsmaß angenähert.

In den Bildern 4.21, 4.22 werden Real- und Imaginärteil der DK von ausgewählten Proben gezeigt. Die Werte für den Imaginärteil steigen bei < 100 MHz auf > 1000 an, während der Realteil zwischen 30 und 90 schwankt. Das Verschlussmaterial wurde mit Salzlösung verpresst. Die hohe Leitfähigkeit wird vor allem bei hohen Feuchtwerten durch die freiere Beweglichkeit der Ionen sehr deutlich.

¹ Mikrowellenofen mit integrierter Waage

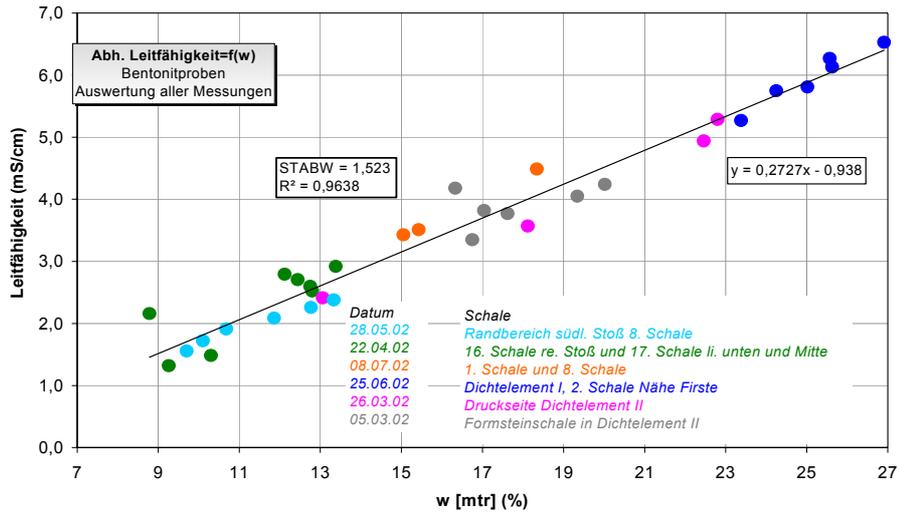


Bild 4.20 Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Probe

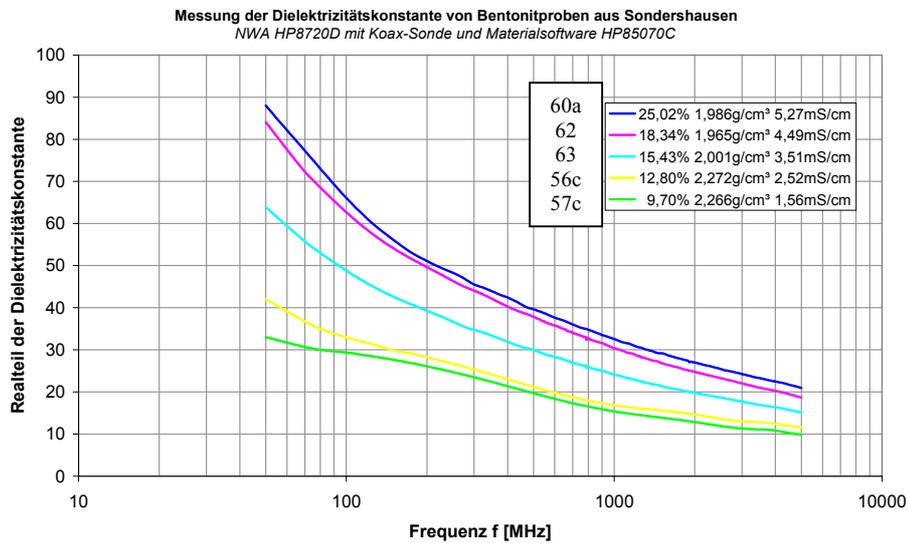


Bild 4.21 Realtell der DK von ausgewählten Proben (60a, 62, 63, 56c, 57c)

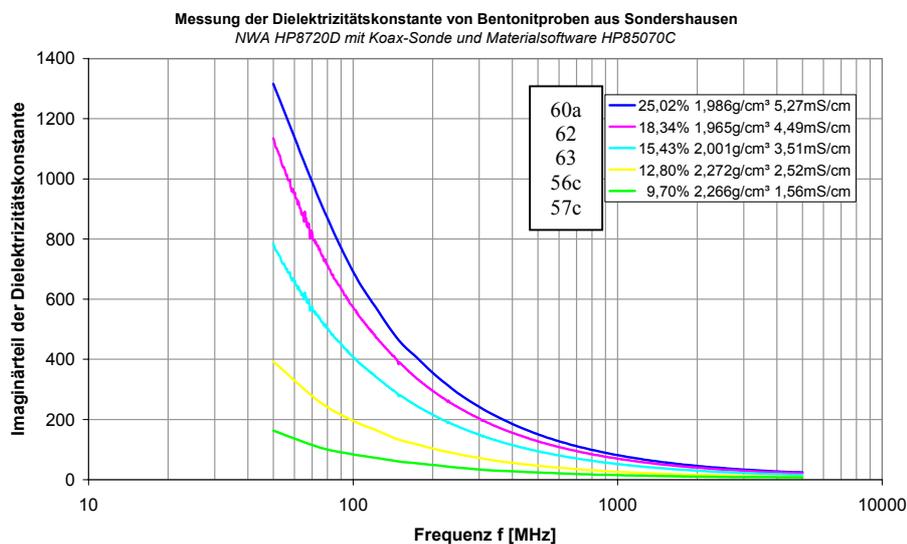


Bild 4.22 Imaginärteil der DK von ausgewählten Proben (60a, 62, 63, 56c, 57c)

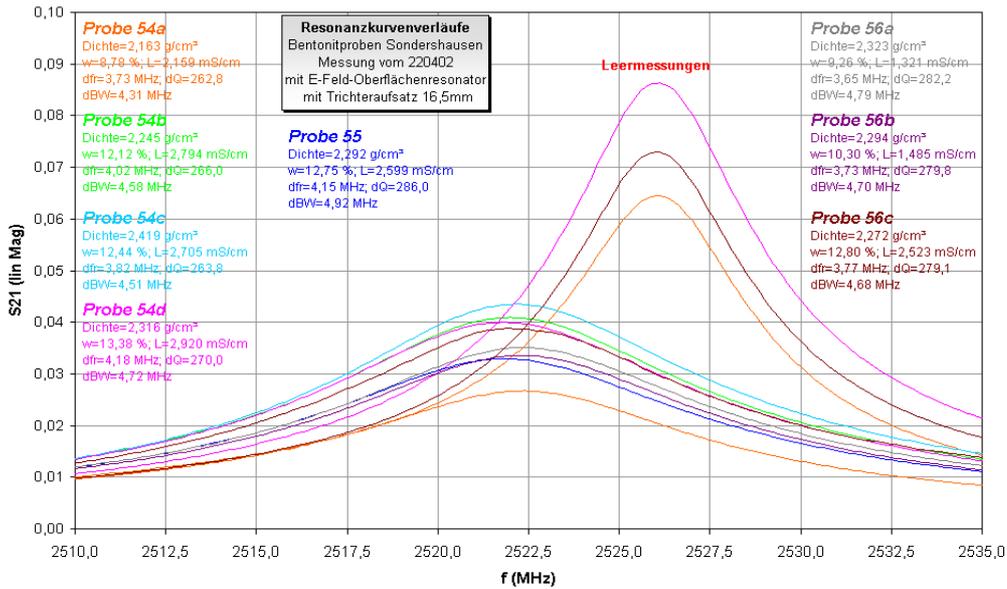


Bild 4.23 Messungen verschiedener Bentonitproben mit E-Feld-Sensor

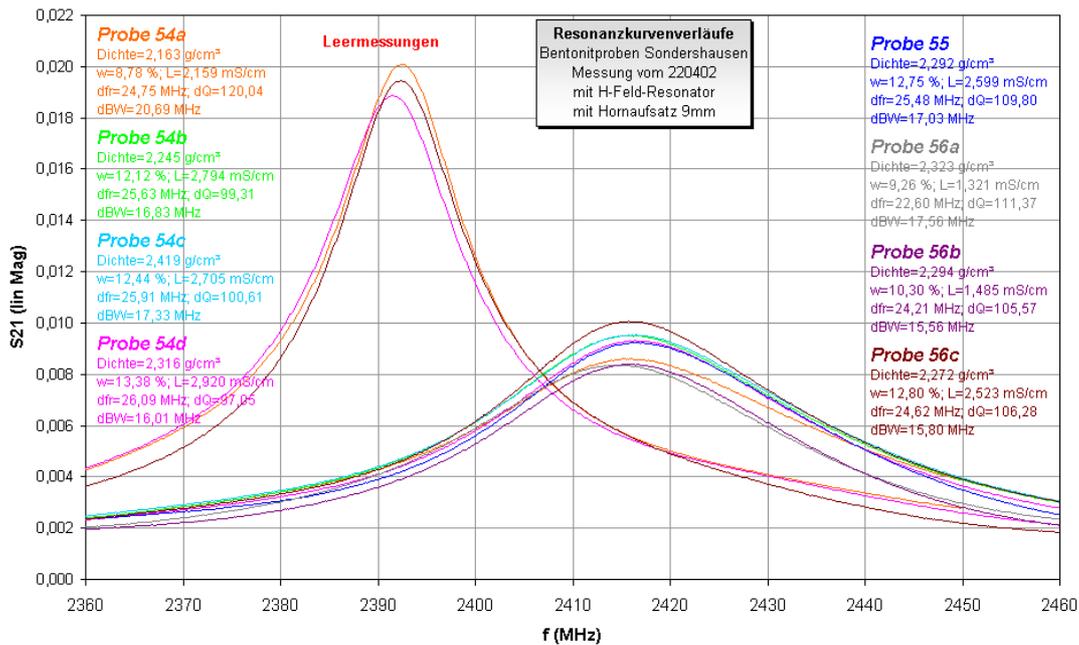


Bild 4.24 Messungen verschiedener Bentonitproben mit H-Feld-Sensor

In den Bildern 4.23 und 4.24 werden beispielhaft Messungen verschiedener Bentonitproben mit E-Feld und H-Feld-Sensor gezeigt. Die Entkopplung vom Material erfolgt durch die im Bild 4.13 gezeigten Aufsätze. Die Feuchte- und Dichtewerte der Proben unterscheiden sich nur wenig voneinander. Analog erfolgen beim E-Feld-Sensor nur geringe Frequenzverschiebungen (Bild 4.23) und beim H-Feld-Sensor nur geringe Amplitudenänderungen (Bild 4.24). Eine Proportionalität zu Feuchte ist nicht immer gewährleistet, da als weitere Einflussgrößen Dichte und Ionenleitfähigkeit die Messungen maßgeblich beeinflussen. Die Darstellung der mit absiMoist aufgenommenen Messwerte erfolgt in Anl. 4 Bild 9. In diesem Bild wird nochmals der hohe Einfluss des Anpressdruckes auf die Messergebnisse gezeigt.

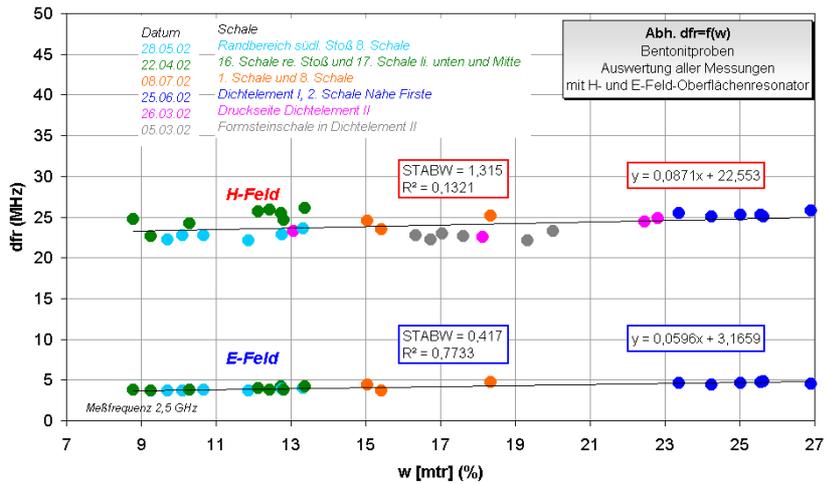


Bild 4.25 Differenzresonanzfrequenz von E-Feld- und H-Feld-Resonator in Abhängigkeit von der Feuchte

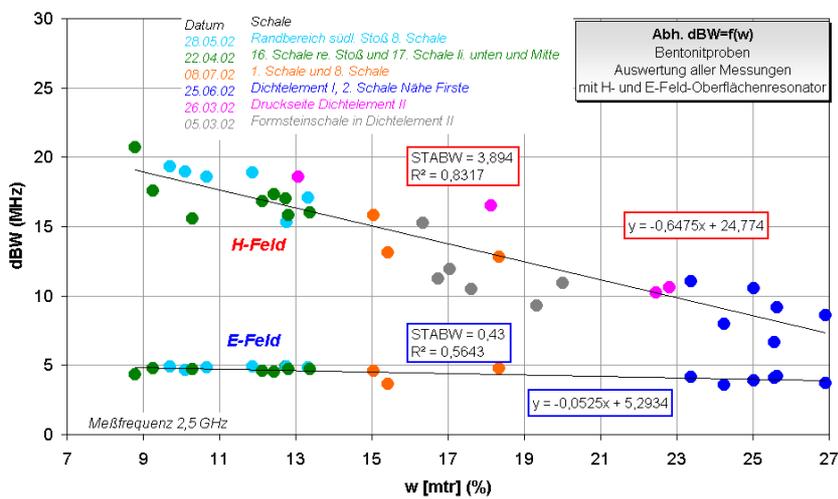


Bild 4.26 Differenzbandbreite von E-Feld- und H-Feld-Resonator in Abhängigkeit von der Feuchte

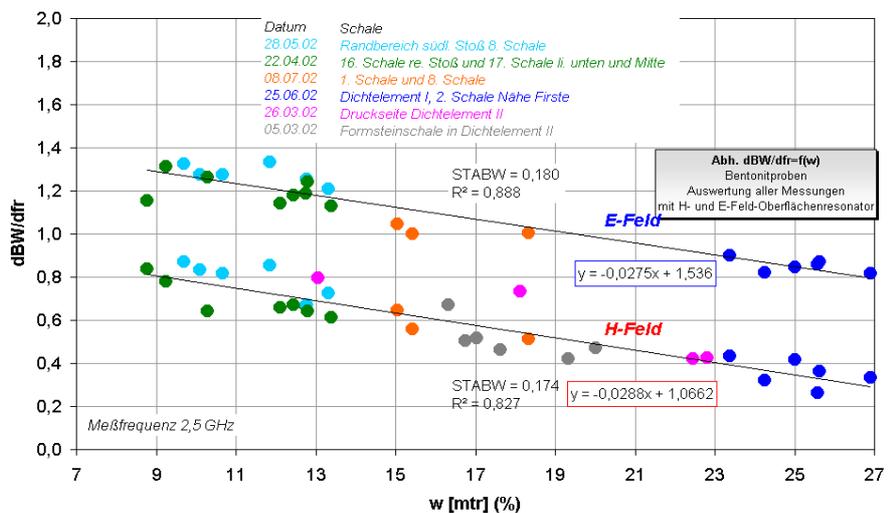


Bild 4.27 Quotient von Differenzbandbreite und Differenzresonanzfrequenz von E-Feld- und H-Feld-Resonator in Abhängigkeit von der Feuchte

In den Bildern 4.25 und 4.26 wurden alle Messwerte von Differenzfrequenz (Δf_r) und Differenzbandbreite (ΔB_w), die mit E-Feld- und H-Feld-Sensoren an allen Proben ermittelt wurden, in Abhängigkeit von der Feuchte aufgetragen (Feuchtebereich 9 – 27 %). Obwohl in diesen Diagrammen die Streuung der Dichtewerte (Bild 4.19) auf die Messwerte übertragen wird, wurde der Streubereich gegenüber Differenzfrequenz und Bandbreite, die mit dem absiMoist bei 150 MHz ermittelt wurden, wesentlich reduziert (vgl. Anl. 4 Bilder 5, 6). Im Bild 4.27 ist der Quotient beider Größen über der Feuchte aufgetragen. In diesem Diagramm werden Streuungen gegenüber den Einzelmesswerten Δf_r und ΔB_w (Bilder 4.25, 4.26) wesentlich reduziert, da der Dichteeinfluss durch die Quotientenbildung reduziert wurde. Die Quotientenbildung führt bei beiden Regressionsgeraden zur Erhöhung der Bestimmtheitsmaße und bei den neuen Datenreihen der Quotienten zur Reduzierung der Werte der Standardabweichung bis ca. 0,18.

Literatur

[4.1] F. Manthee, W. Fischle: Feuchtemessung in Tondichtungen mittels Thetasonden. 11. Feuchtetag, Weimar 2002; S. 176-186

[4.2] Kupfer et.al. Materialfeuchtemessung, expert Verlag Renningen Malsheim 1997

5 TDR-Messverfahren (Messungen im Zeitbereich)

5.1 Grundlagen

Ch. Hübner und K. Kupfer

Bild 5.1 zeigt einen Vergleich von Messungen im Frequenz- und im Zeitbereich. Im Frequenzbereich erfolgt eine Anregung mit Sinusschwingungen. Unter Verwendung des Netzwerkanalysators werden als Messdaten Reflektionsfaktor S_{11} und Transmissionsfaktor S_{21} als Funktion der Frequenz erhalten. Im Zeitbereich erfolgt eine Anregung mit Impulsen. Die Spungantwort ist eine Funktion der Zeit. Die Umrechnung beider Messwerte erfolgt mit einer Fouriertransformation.

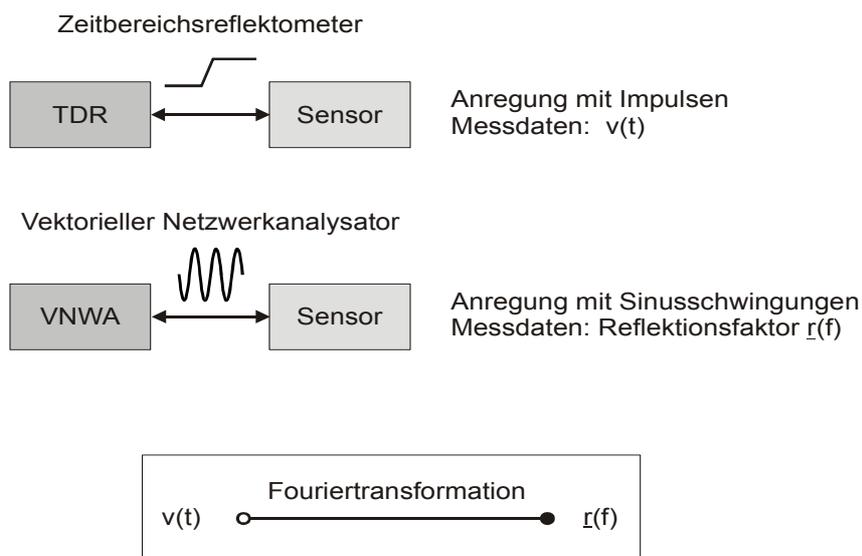


Bild 5.1 Analogie von Messungen im Frequenzbereich und im Zeitbereich

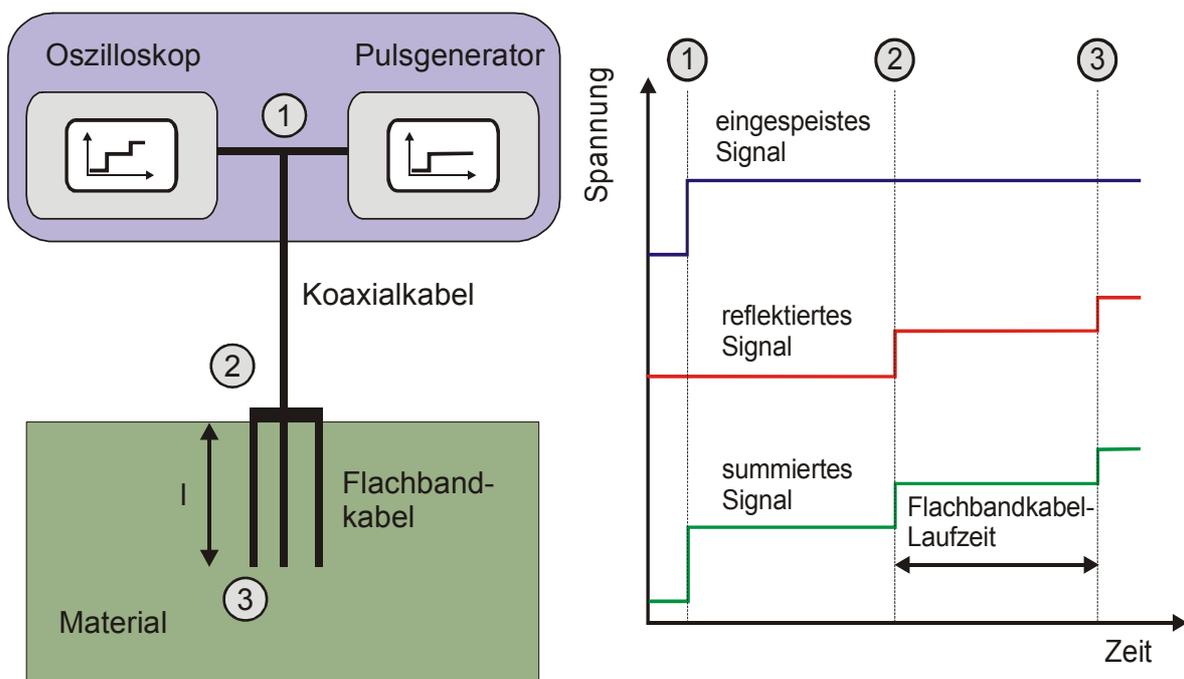


Bild 5.2 Prinzip der Time-Domain-Reflektometrie und Signalverläufe

Die Time Domain Reflectometry diente ursprünglich als Kabelradar und wurde bereits frühzeitig zur Feuchtemessung in Böden verwendet. Koaxialleitungen als Messfühler wurden als starre 2- oder 3-Leitersysteme ausgeführt. Ein Pulsgenerator sendet einen steilflankigen elektromagnetischen Impuls aus (1), der sich entlang des Koaxialkabels ausbreitet. Ein Teil dieser Welle wird am Wellenwiderstandssprung (2) reflektiert. Der transmittierte Teil der Welle läuft bis zum offenen Ende des Flachbandkabels (3) und erfährt dort eine Totalreflektion. Betrachtet man mit einem Oszilloskop die Summenspannung von vor- und rücklaufender Welle auf dem Koaxialkabel am Punkt 1, so ergibt sich der im Bild 5.2 gezeigte idealisierte Spannungsverlauf. Die Methode basiert auf der Detektion der Laufzeit eines Impulses am Ende einer offenen Leitung, die mit einem feuchten Material umgeben ist [1;2;3]. Die Messleitung wurde als 3-Leiter-Bandkabel ausgeführt (Bild 5.3); es besteht aus 3 Kupferbandleitern, die mit einer Isolierung aus Polyethylen versehen sind.

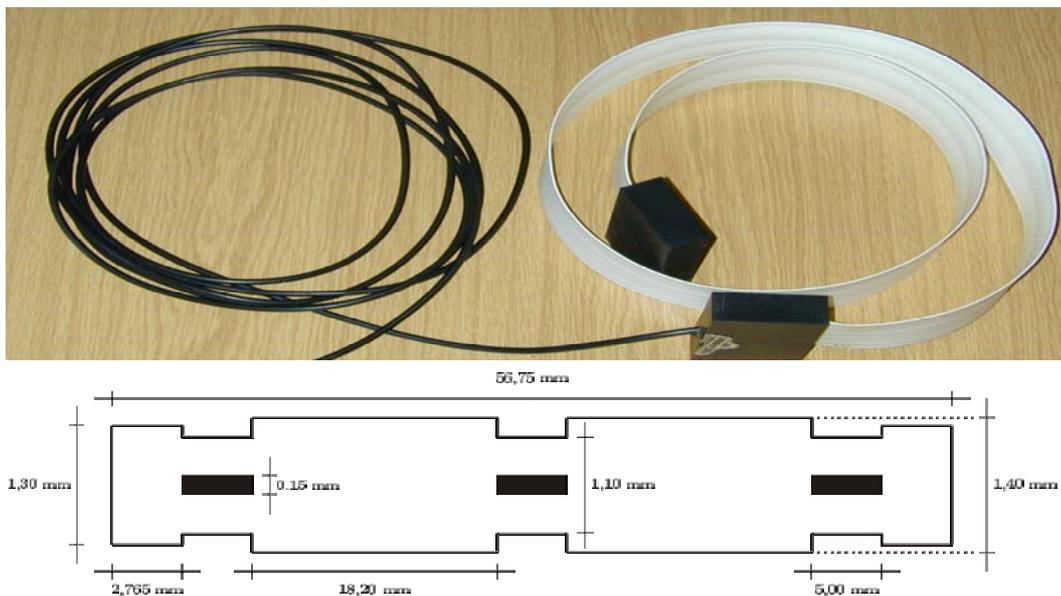


Bild 5.3 Drei-Leiter-Bandkabel mit Querschnitt [4]

Um das Kabel bildet sich ein elektrisches Feld aus: Die Feldbilder umgeben mit Luft wurden mit dem 2D-Simulator „Maxwell“ berechnet und sind in Bild 5.4 dargestellt.

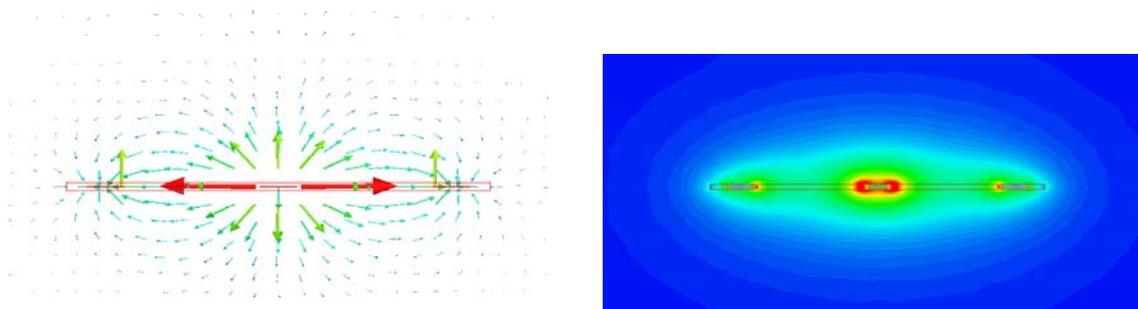


Bild 5.4 Darstellung des E-Feldes um das Bandkabel (links vektorielle Darstellung)

5.2 Leitungsparameter

Ch. Hübner und K. Kupfer

Eine Leitung kann durch eine Kettenschaltung von R, G, L, C- Gliedern dargestellt werden.

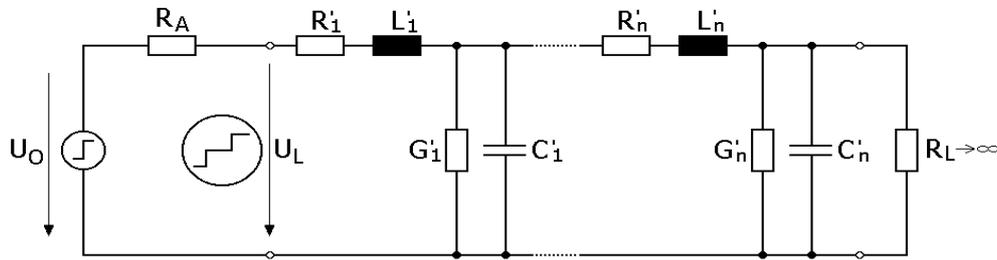


Bild 5.5 Modell einer Leitung mit R, G, L, C-Gliedern

Der Kapazitätsbelag C' , Induktivitätsbelag L' , Widerstandsbelag R' sowie der Ableitungsbelag G' können frequenzabhängig sein und sind für eine vollständige Beschreibung einer so modellierten Leitung ausreichend, wenn die höheren Moden und die Abstrahlung vernachlässigt werden können. Das Flachbandkabel kann auf diese Weise modelliert werden. Die Ausbreitungskonstante γ wird in Abhängigkeit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ wie folgt definiert,

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (5.1)$$

und der Wellenwiderstand Z_L :

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (5.2)$$

Es gibt folgende Beispiele für die Anwendung der Formeln zur Berechnung von:

- Flachbandkabel im verlustfreien homogenen Medium (Berechnung von C)
- Flachbandkabel im verlustfreien inhomogenen Medium (vorgegebener mit Luft oder Wasser gefüllter Spalt, Berechnung von C)
- Flachbandkabel im verlustbehafteten homogenen Medium (Berechnung von C und G)
- Flachbandkabel im verlustbehafteten inhomogenen Medium (vorgegebener mit Luft oder Wasser gefüllter Spalt, Berechnung von C und G)
- Untersuchung des Skin-Effekts (Berechnung von R und L)

Die Kapazität C_1 beschreibt die elektrischen Feldlinien, die von einem Leiter durch den Steg, d. h. das Dielektrikum, auf den anderen Leiter übergehen, während die Kapazitäten C_2 und C_3 aus der Reihenschaltung Ummantelung-Medium-Ummantelung gebildet werden.

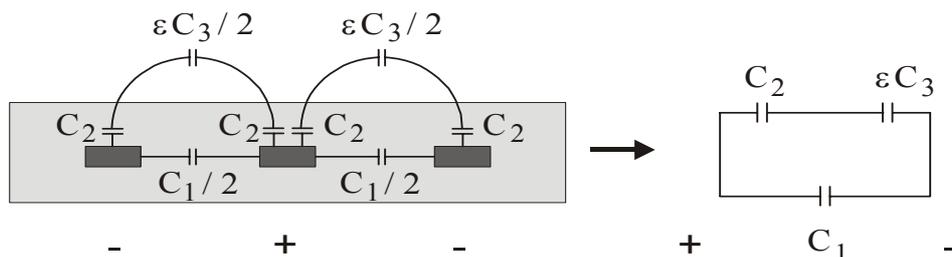


Bild 5.6 Ersatzschaltbild für die Kapazität des Flachbandkabels

Für die Gesamtkapazität C_{gesamt} in Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl ϵ des Mediums, in dem sich das Kabel befindet, gilt:

$$C_{\text{gesamt}} = C_1 + \frac{C_2 \epsilon C_3}{C_2 + \epsilon C_3} \quad (5.3)$$

Mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus für nichtlineare Gleichungen wurde aus den mit Maxwell berechneten Daten die Ersatzschaltbildgrößen C_1 , C_2 und C_3 bestimmt.

Tab. 5.1: Ersatzschaltbildelemente

Ersatzschaltbildelement	Kapazität in pF/m
C_1	4,094
C_2	303,67
C_3	13,72

Im Bild 5.7 sind die mit dem Simulator „Maxwell 2D“ und dem Ersatzschaltbild berechneten Kapazitäten für den verlustlosen Fall aufgetragen.

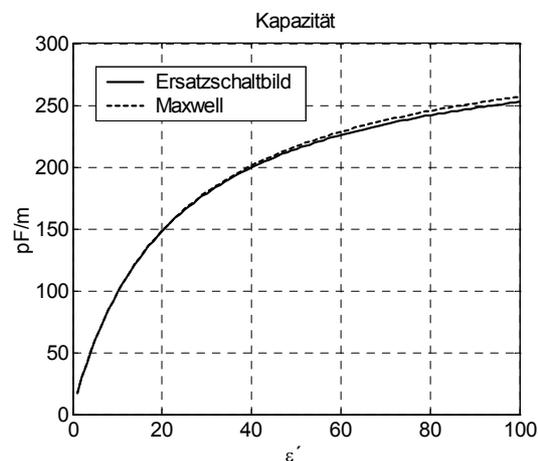


Bild 5.7 Kapazitätsverlauf in Abhängigkeit von der DK

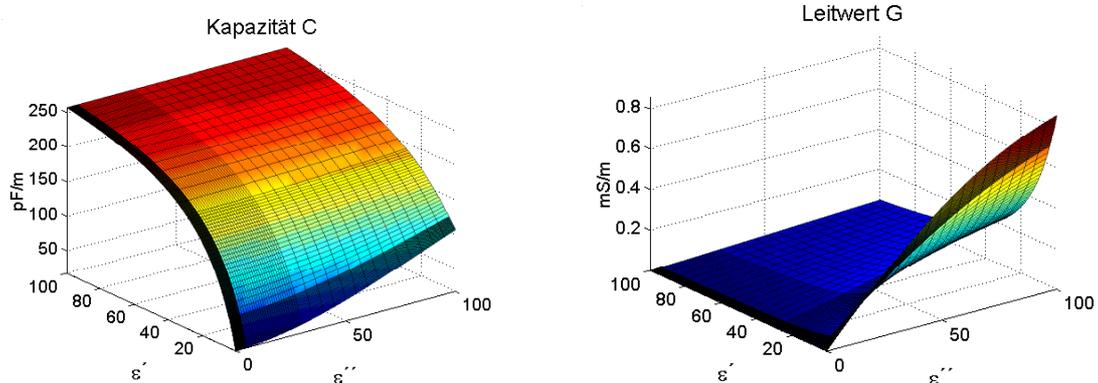


Bild 5.8 3D-Darstellung von Kapazitätsbelag und Ableitungsbelag in Abhängigkeit von Real- und Imaginärteil der komplexen DK

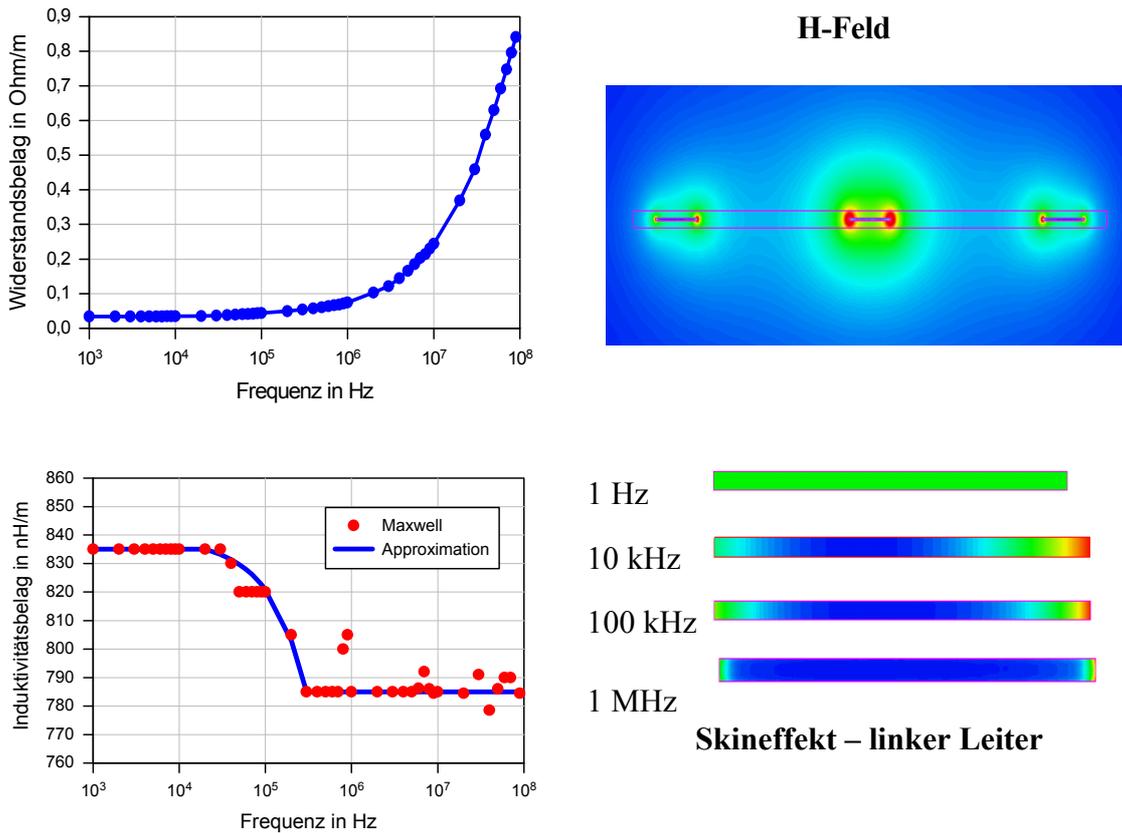


Bild 5.9 Berechnungen und Simulationen von Widerstandsbelag, Induktivitätsbelag, H-Feld-Darstellung sowie Skin-Effekt beim linken Leiter

Impulse von 200 ps umfassen einen Frequenzbereich von DC bis 12,5 GHz, d. h. der stromführende Kupferleiter und das Dielektrikum des Kabels sind so auszulegen, dass sie diesen Anforderungen entsprechen. Aus dem H-Feldbild lassen sich die Diagramme von Widerstands- und Induktivitätsbelag ableiten. Das Diagramm des Widerstandsbelages zeigt, dass der Widerstand des ohmschen Leiters oberhalb 1 MHz stark zunimmt. Diese Tatsache ist durch den Skin-Effekt bedingt. Mit steigender Frequenz verlagert sich der Stromfluss an die Außenseiten der Kupferbandleitung (Bild 5.9 rechts unten).

Mit dem Time-Domain-Reflektometer wird die Sprungantwort des Flachbandkabels gemessen. Aus der Laufzeit, d.h. dem Abstand der Reflektionsstellen und der Amplitude kann auf die dielektrischen Eigenschaften des Materials um das Flachbandkabel bzw. dessen Feuchtegehalt geschlossen werden. Die zu erwartenden Sprungantworten können bei bekannten Leitungsparametern und dielektrischen Eigenschaften berechnet werden. Der einfachste Fall betrifft eine homogene Feuchteverteilung entlang des Flachbandkabels. Die Sprungantwort wird mit dem Reflexionsfaktor berechnet:

- Reflexionsfaktor zwischen Flachbandkabel (Wellenwiderstand Z) und Koaxialkabel (Wellenwiderstand Z_0):

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (5.13)$$

- Eingangsreflektionsfaktor S_{11} eines Flachbandkabelstückes der Länge l mit offenem Ende.

$$S_{11} = \frac{1}{1 + \Gamma} e^{-2\gamma l} (\Gamma + e^{-2\gamma l}) \quad (5.14)$$

Der Reflexionsfaktor für die Frequenz $f = 0$ ist explizit anzugeben. Bei den hier verwendeten isolierten Leitern ist dieser Reflexionsfaktor 1. Es ist zu beachten, dass das Ersatzschaltbild in Bild 5.5 dies nicht ergibt, falls $G > 0$. Vielmehr müsste das Kapazitätsersatzschaltbild in Bild 5.6 verwendet und die Kapazität in o. g. Ersatzschaltbild eingesetzt werden. G würde dann ersatzlos entfallen. Verluste würden dann nur durch eine komplexe DK bei C_3 erzeugt werden. Damit ist selbst bei nichtdispersiven Materialeigenschaften eine Dispersion vorhanden, die durch den Maxwell-Wagner-Effekt hervorgerufen werden kann.

- Rücktransformation in den Zeitbereich mit Hilfe der Fouriertransformation

Das reflektierte Signal ergibt sich aus der Faltung des transformierten Eingangsreflexionsfaktors mit dem Einheitssprung.

5.3 Time-Domain-Reflektometrie im stark verlustbehafteten Material

K. Kupfer und E. Trinks

Der Messaufbau eines Time Domain Reflektometers, dessen prinzipieller Aufbau im Bild 5.2 gezeigt wurde, wird im Bild 5.10 vorgestellt. Ein Impuls mit einer Anstiegszeit von 200 ps wird von einem Kabeltester 1502 C (Tektronix) erzeugt. Die Auswertung der Impulsantwort und die Bestimmung der Laufzeit erfolgt an R_A (Bild 5.5) mit einer geeigneten Software. Aus der Sprungantwort kann unmittelbar auf die dielektrischen Eigenschaften des um das Flachbandkabel befindlichen Materials geschlossen werden. Im Laufe der Zeit haben sich die folgenden, auf das jeweilige Anwendungsgebiet spezialisierte Messmethoden herausgebildet:

- Unter Voraussetzung eines homogenen, verlustfreien und nichtdispersiven Mediums können die dielektrischen Eigenschaften unmittelbar aus der Laufzeitdifferenz nach Bild 5.2 bestimmt werden (Topp et al., 1994)
- Der Fall einer inhomogenen Feuchteverteilung kann mit Hilfe von Rekonstruktionsalgorithmen betrachtet werden (Schlaeger et al., 2001). Diese Berechnungsverfahren sind bis jetzt nur für verlustfreie und verlustbehaftete nichtdispersive Medien verfügbar.
- Daneben lässt sich das Fortschreiten von Feuchtefronten in einem Material qualitativ durch direkte Analyse des Messsignals der Zeitbereichsreflektometrie ermitteln.



Bild 5.10
TDR-Messplatz mit Kabeltester, Computer und Bandleitung

Die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle ist durch die Ausbreitungskonstante γ charakterisiert, die sich aus Dämpfungskonstante α und Phasenkonstante β zusammensetzt. Gleichung (5.4) zeigt die Ausbreitungskonstante in Abhängigkeit der Kabelparameter [5.4]:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \approx \sqrt{j\omega L'(G' + j\omega C')} \quad (5.4)$$

Die Verluste des umgebenden Materials beeinflussen bei einer verlustlosen Leitung die Werte von Kapazität und Leitfähigkeit pro Längeneinheit.

Die folgenden Näherungen sind gültig für die Durchstrahlung eines Dielektrikums mit hohen Verlusten in einem großem Volumen

$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta_e} - 1 \right]} \quad (5.5)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta_e} + 1 \right]} \quad (5.6)$$

Die imaginäre Phasenkonstante β (Gl. 5.6) kann benutzt werden, um die Geschwindigkeit der Welle sowie deren Laufzeit zu bestimmen [5.1]. Hin- und Rücklauf der Welle werden mit der doppelten Leitungslänge l_L bewertet:

$$t_p = \frac{2l_L}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2} \left[1 + (1 + \tan^2 \delta)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (5.7)$$

Zur Bestimmung einer definierten Laufzeit wurde folgendes Verfahren entwickelt:

Die Laufzeit des Impulses t_p kann nach Bild 5.11 durch zweifache Differentiation an den Wendepunkten ermittelt werden. Die erste Ableitung der Kurve zeigt im Wendepunkt ein Maximum, die zweite ergibt einen Nulldurchgang. Die Impulslaufzeit ergibt sich als Zeitdifferenz zwischen zwei Wendepunkten.

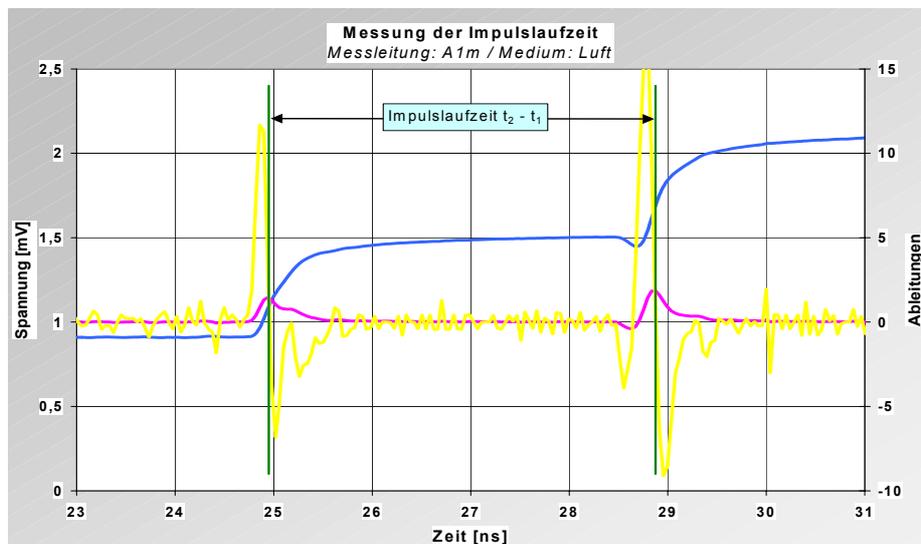


Bild 5.11 Bestimmung der Impulslaufzeit mit Hilfe der 2. Ableitung

Bei einer Leitung, die mit Materialien hoher Verluste umgeben ist, werden die Verluste ($\tan \delta$) wie folgt charakterisiert (σ - Leitfähigkeit):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon_0}}{\varepsilon_r'(\omega)}$$

mit folgenden Näherungen:

$$\tan \delta \approx \frac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \quad \text{für Frequenzen} < 3 \text{ GHz} \quad (5.8)$$

$$\tan \delta \approx \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad \text{für Frequenzen} > 1 \text{ GHz}$$

In Gl. 5.8 dominieren bei niedrigen Frequenzen die Leitfähigkeitsverluste, bei höheren Frequenzen wird dieser Anteil reduziert, und es dominieren die dielektrischen Verluste. Diese Näherung ist gültig bei geringer Salzkonzentration. Bei Verwendung steiler Impulse und Salzlösungen müssen dielektrische Verluste und Verluste durch Ionenleitfähigkeit berücksichtigt werden.

Im Bild 6.7b und Gleichung 5.8 ist zu sehen, dass Leitfähigkeitsverluste bei Frequenzen < 3 GHz dominieren; die dielektrischen Verluste dominieren bei Frequenzen > 3 GHz. Diese Näherung ist gültig bei geringen Salzkonzentrationen. Bei Verwendung steiler Impulse und Materialien mit hohen Verlusten, müssen sowohl dielektrische als auch Leitfähigkeitsverluste berücksichtigt werden.

Mit $Z_0 = (\mu_0 / \varepsilon_0)^{1/2} = 120\pi \Omega \approx 377 \Omega$ als Wellenwiderstand des freien Raumes wird die Dämpfungskonstante α wie folgt angegeben:

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' + \sigma)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r'}{2} \left[1 + (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} \right]}} \quad (5.9)$$

Ein Impuls wird längs der Transmissionsleitung um den Faktor $f = e^{-\alpha L}$ reduziert. Die Verringerung der Amplitude wird benutzt, um die Dämpfungskonstante für ein Testkabel bekannter Länge zu bestimmen. Am Quellwiderstand R_A (Bild 5.5) kann die reflektierte Spannung U_2 gemessen werden:

$$\frac{U_2}{U_1} = e^{-\alpha \cdot 2l_L} \quad (5.10)$$

Durch Kombination der Gleichungen 5.9 und 5.10 kann die Ionenleitfähigkeit σ ermittelt werden:

$$\sigma = \frac{1}{120\pi l_L} \cdot \ln \frac{U_1}{U_2} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r'}{2} \left[1 + (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} \right]} - \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r' \quad (5.11)$$

Die Laufzeit der Impulse im Kabel in Abhängigkeit vom umgebenden Medium (Luft, feuchter Sand und Wasser) werden im Bild 5.12 gezeigt. Die Erhöhung der Feuchte im Sand führt mit der Vergrößerung der Dielektrizitätskonstante zur Erhöhung der Laufzeit. Eine Erhöhung der Salzkonzentration einer Lösung führt zu einer Verringerung des Anstieges der Impulsflanke (Bild 5.13). Die Kurven von 0,05; 0,1; 0,5 und 1 normalen Salzwasser fallen fast übereinander, so dass Konzentrationsunterschiede des Salzgehaltes als Funktion des Anstieges nicht unterschieden werden können.

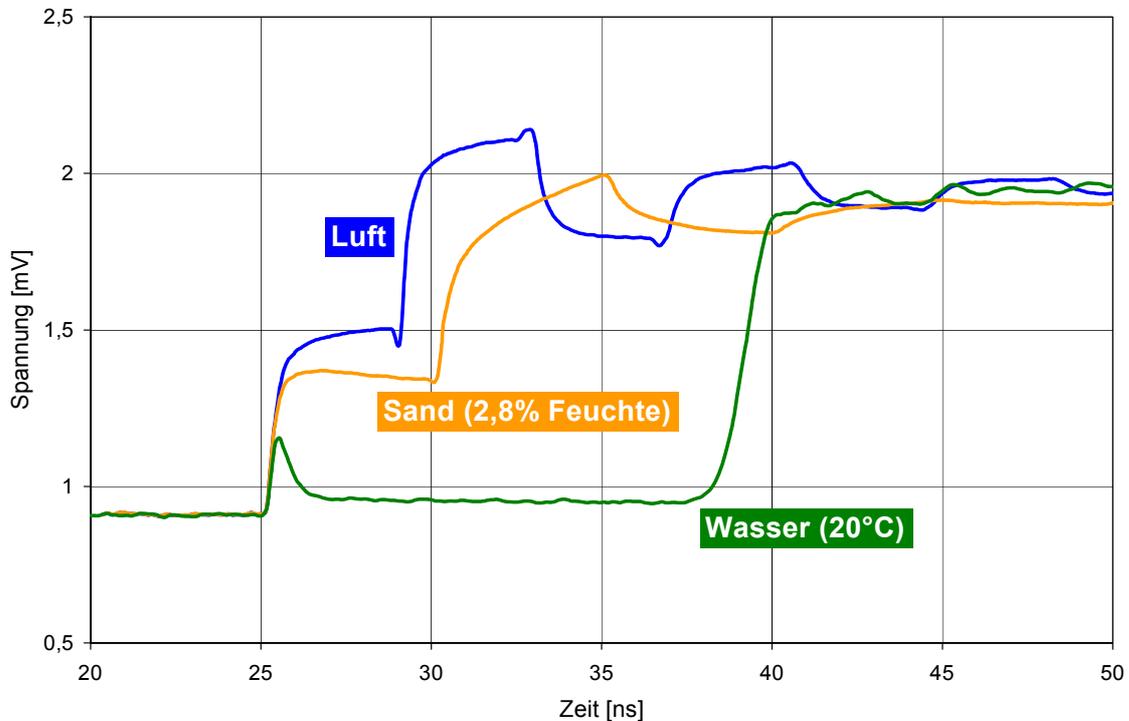


Bild 5.12 Laufzeit in Abhängigkeit vom umgebenden Medium (Luft, feuchter Sand und Wasser)

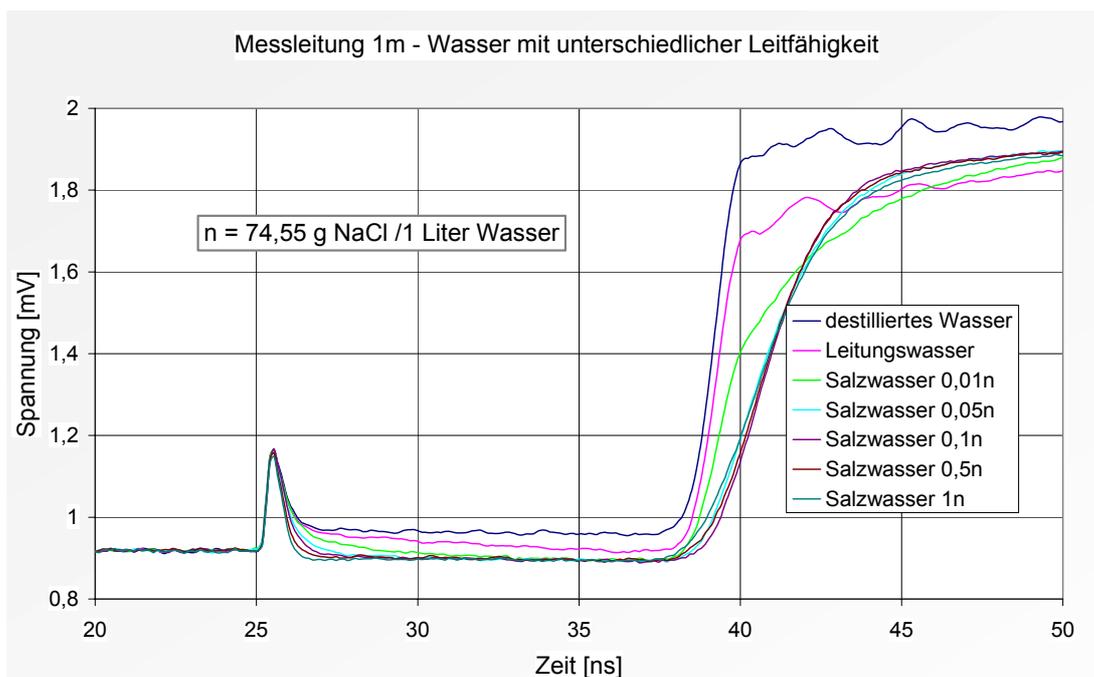


Bild 5.13 Einfluss der Leitfähigkeit von Salzwasser auf den Anstieg der Impulsflanke



Bild 5.14 Messaufbau zur Temperaturmessung

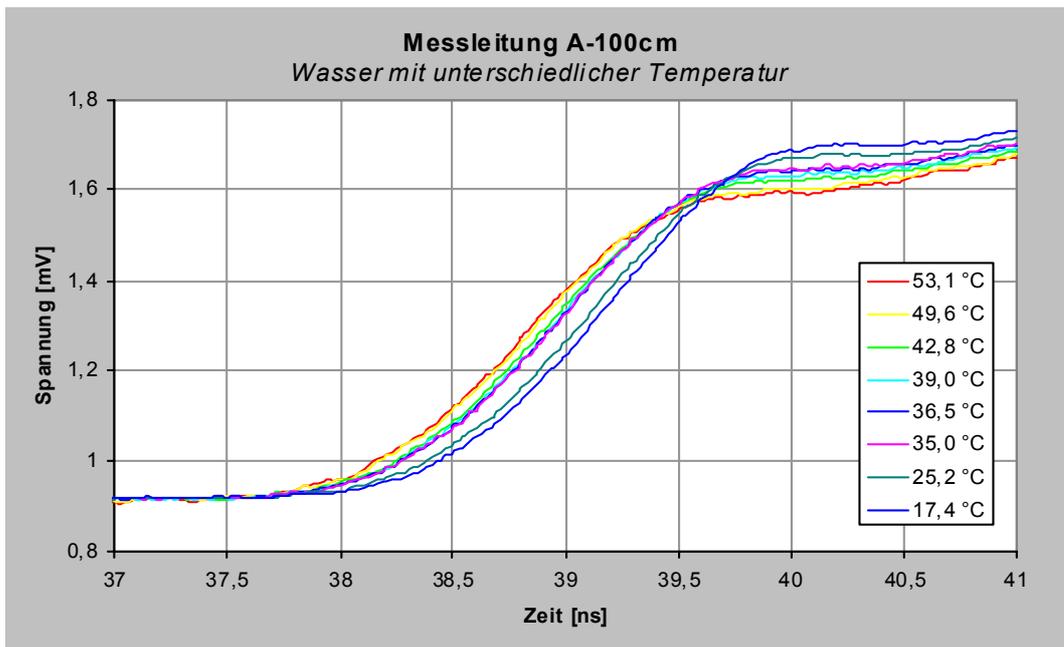


Bild 5.15 Einfluss der Temperatur von Wasser auf den Anstieg der Impulsflanke

Im Bild 5.14 wird ein Messaufbau zur Temperaturmessung von Wasser vorgestellt. Im Bild 5.15 wird gezeigt, dass mit steigender Temperatur ε_r' und damit die Laufzeit verringert wird, der Anstieg bleibt in diesem relativ geringen Temperaturbereich relativ konstant.

Für die Temperaturabhängigkeit der statischen DK wird in [5.5] folgende Form angegeben ($\vartheta/^\circ\text{C}$):

$$\varepsilon_s(\vartheta) = 88,045 - 0,4147\vartheta + 6,295 \cdot 10^{-4}(\vartheta) + 1,075 \cdot 10^{-5}(\vartheta)^3 \quad (5.12)$$

Der mit Gl. (5.12) berechnete Temperaturverlauf wird im Bild 5.16 gezeigt.

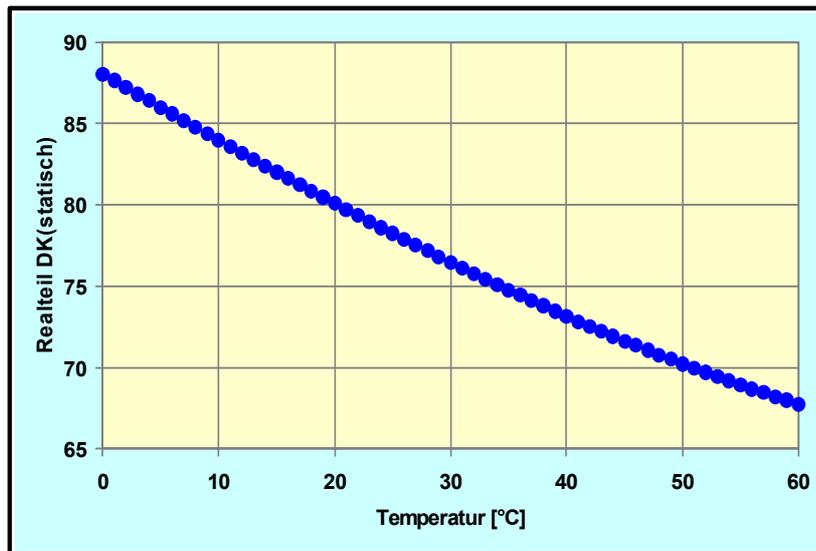


Bild 5.16 Berechneter Verlauf des Realteiles der DK in Abhängigkeit der Temperatur

Literatur

- [5.1] Ferre, P.A.; Topp, G.C.: Time-domain Reflectometry Sensor Techniques for Soil Water Content Measurements and Electrical Conductivity Measurements. In Sensor Update Vol. 7; RF and Microwave Sensing of Moist Materials, Food and other Dielectrics; Editors: Kupfer, Kraszewski, Knöchel, Wiley-VCH Verlag 2000; pp. 277
- [5.2] Stacheder, M.; Koehler, K.; Fundinger, R.: New Time-domain Reflectometry Sensors for Water Content Determination in Porous Media. In Sensor Update Vol. 7; RF and Microwave Sensing of Moist Materials, Food and other Dielectrics; Editors: Kupfer, Kraszewski, Knöchel, Wiley-VCH Verlag 2000; pp. 301
- [5.3] Hübner, Ch.; Brandelik, A.: Distinguished Problems and Sensors in Soil and snow Aquametry In Sensor Update Vol. 7; RF and Microwave Sensing of Moist Materials, Food and other Dielectrics; Editors: Kupfer, Kraszewski, Knöchel, Wiley-VCH Verlag 2000; pp. 317
- [5.4] Kupfer, K., Trinks, E.: Simulations and Experiments for Detection of Moisture Profile in a Saline Environment In Electromagnetic Aquametry; Editor K. Kupfer, Springer Verlag 2004; in preparation

6 Berechnungsverfahren für Leitungen in verlustbehafteten Materialien

6.1 Einführung

In der Hochfrequenztechnik können folgende Verfahren zur Berechnung der Sprungantwort von Leitungen in verlustbehafteten Materialien angewendet werden (Bild 6.1)

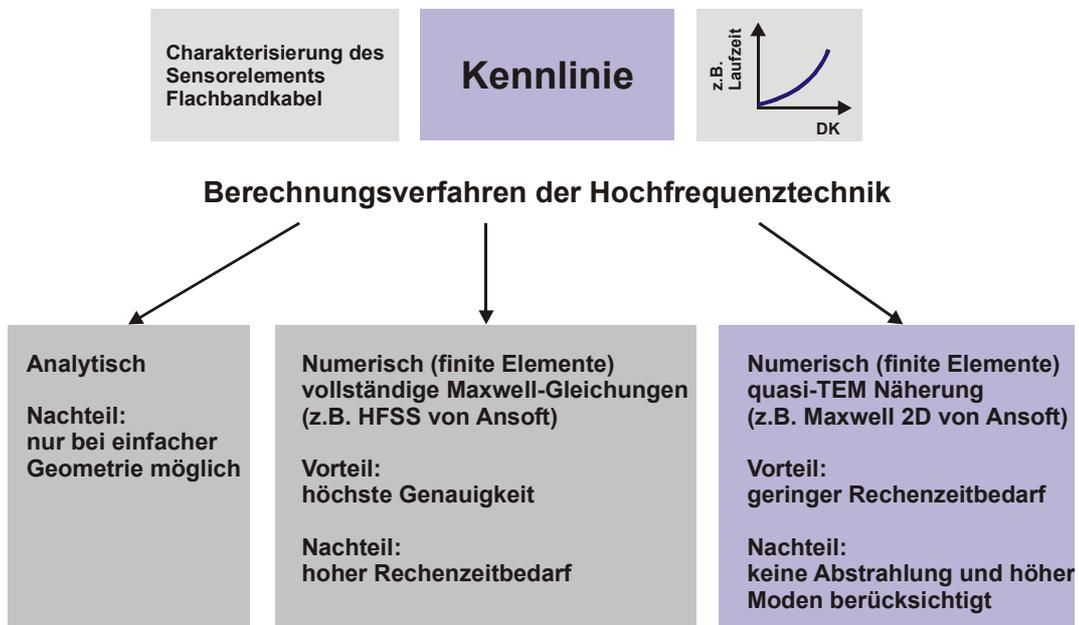


Bild 6.1 Verfahren zur Berechnung der Sprungantwort von Leitungen in verlustbehafteten Materialien

Das Programm soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Darstellung und Berechnung des Sensors
- Berechnung des Sensors umgeben mit verlustbehafteten Materialien
- Berechnung in einem Frequenzbereich, der einer Impulsbreite von 200 ps entspricht (DC – 12,5 GHz)
- Umwandlung der im Frequenzbereich ermittelten Ergebnisse in den Zeitbereich und Bestimmung der Sprungantwort

Die Kennwerte der verlustbehafteten Materialien, wie DK und Verlustfaktor, werden mit dem Netzwerkanalysator in einem breiten Frequenzbereich bestimmt (s. Abschnitt 3).

Diese Anforderungen werden vom 3D-Finite-Elemente-Programm HFSS (Hochfrequenzstrukturanalysator) der Fa. Ansoft erfüllt. Das Programm Maxwell 2D arbeitet mit quasistatischen Lösungen und konstanten Materialparametern. HFSS verwendet zur Speisung von Strukturen Leistungen, Maxwell 2D dagegen Ströme. Eine punktweise Abarbeitung des breiten Frequenzbereiches würde einen sehr hohen Zeitaufwand erfordern und kommt demzufolge nicht in Frage. HFSS hat einen flexibleren Anwendungsbereich und kann Felddarstellung im 3D-Bereich realisieren.

6.2 Simulationen zur Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes um den Sensor

Kalibrierungen bei der Feuchtemessung sind sehr zeitaufwendig, vor allem dann, wenn bei der Erhöhung der Feuchte beim Bentonit gleich mehrere Materialparameter gleichzeitig geändert werden (Feuchte, Dichte, Ionengehalt). Geringfügige Änderungen des Sensors zur Anpassung an das Material sind bei Kalibrierungen mit aufwendigen Neukonstruktionen und Erprobungen verbunden; oft dominiert das Prinzip „trial and error“.

Simulationen haben bei der Feuchtemessung den Vorteil, dass bestimmte Eigenschaften in relativ kurzer Zeit hervorgehoben oder unterdrückt werden können. Mit Hilfe eines EM-Feldsimulators wird es möglich, Spezifika des Sensors oder des Materials aus der Datenvielfalt heraus zu filtern und Sensoren zu optimieren.

Das Kabel ist mit Polyethylen isoliert und wird zunächst entsprechend dem Original im 3-D-Modeler konstruiert. Es wird mit einem Zylinder von 1 m Länge umgeben, in dem das verlustbehaftete Dielektrikum eingefüllt werden kann. Da die Berechnungen in einem breiten Frequenzbereich bei hoher DK und stark verlustbehafteten Materialien hohe Rechenkapazität beanspruchen und sehr lange dauern, wurde ein Symmetriemodus angewandt und nur $\frac{1}{4}$ des Modells berechnet. Das Bandkabel wird am Eingang (Port) von einem kurzen Koaxkabel (50Ω) gespeist. An den Enden ist es mit Widerständen $2 \times 1 \text{ M}\Omega$ abgeschlossen.

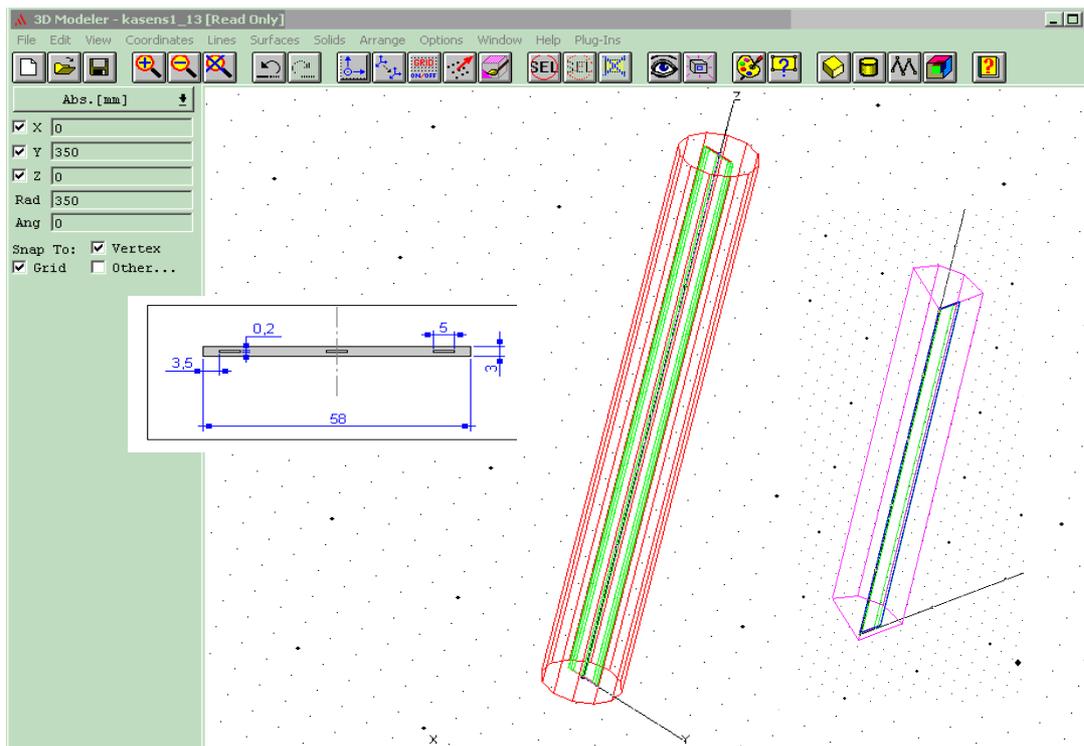


Bild 6.2 Konstruktion des Bandkabels in einem Zylinder mit Originalabmessungen

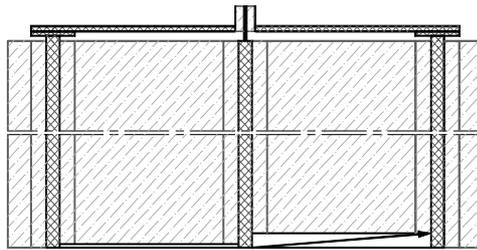


Bild 6.3 Koax-Anschluss und Lastwiderstände des Kabels als vektorielle Stromflussleitungen in orthogonaler Lage

Die dielektrischen Materialeigenschaften, wie Dielektrizitätskonstante und Verlustfaktor (ϵ_r' und $\tan \delta$) werden mit dem Netzwerkanalysator in einem breiten Frequenzbereich ermittelt (1 MHz...15 GHz), in das Menü „Materialmanager“ eingetragen und dem Zylinderinnenraum zugeordnet. Im Materialmanager werden auch die Materialien für das Kabel eingetragen. Im „Boundary/Source-Manager“ werden Ports und Abschlusswiderstände definiert, Leitwerte bestimmten Flächen zugeordnet sowie Symmetrieebenen und Begrenzungsflächen (boundaries) definiert. In einer Lösungstabelle (Solution Setup) werden Startkennwerte für die Berechnung vorgegeben (Tab. 6.1):

Tabelle 6.1. Startkennwerte für die Berechnung

Startfrequenz:	1 MHz	Rechenläufe:	8
Stoppfrequenz:	12,5 GHz	Max. Delta S^1 :	0,02
Mittl. Frequenz:	6 GHz	Fehler Toleranz:	0,2
Anzahl von Schritten:	2999	Max. Lösungen:	100
Interpolierender Sweep		Tetraeder-Verfeinerung:	20
Mesh-Verfeinerung:	adaptiv	:	

¹Betrag der relativen Änderung der S-Parameter

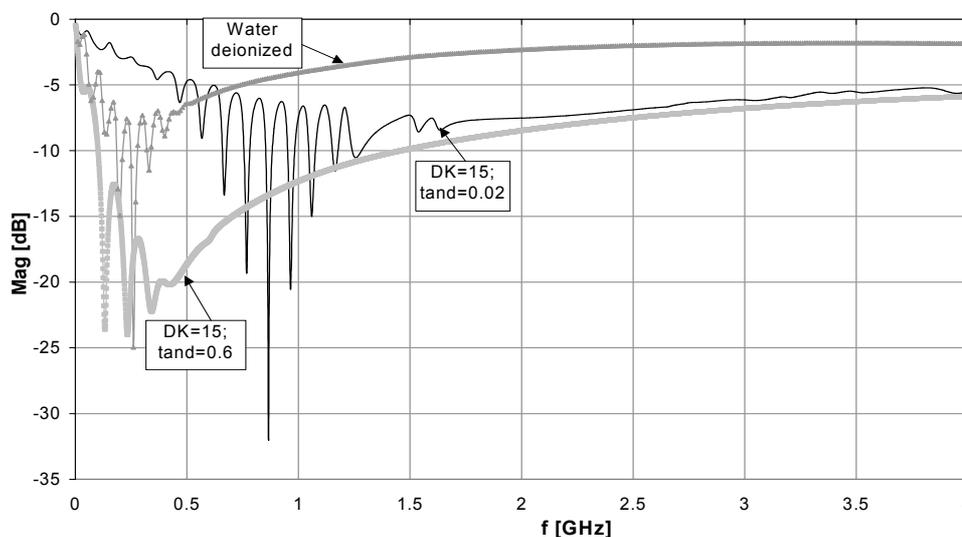


Bild 6.3 Amplituden-Frequenz-Diagramme verschiedener Materialien mit konstanten Werten für ϵ_r' und $\tan \delta$ im Vergleich zu deionisiertem Wasser

Das Kabel wird mit einem Stufenimpuls mit einer Anstiegszeit von 200 ps gespeist. Bei Berechnung der Anstiegsflanke mit 5 Punkten, entspricht diese Anstiegszeit einem Frequenzbereich von DC – 12,5 GHz. Für hochfeuchte oder mit Salzlösung getränkte Materialien, die hohe dielektrische Verluste aufweisen, muss die obere Grenzfrequenz reduziert werden (ca. 10 GHz), da > 130000 Tetraeder berechnet werden und die Rechenleistung des Computers sonst überschritten wird. Die untere Frequenzgrenze muss ebenfalls aus Gründen der Rechenleistung von DC auf 1 MHz angehoben werden.

Unter dem Menü „Postprocessing“ können die berechneten S-Parameter im Menü „HFSS-Matrix-Plot“ als Amplituden- oder Phasendiagramme in Abhängigkeit von der Frequenz oder in einem Smith-Diagramm aufgetragen werden. Die unterschiedlichen 3D-Feld- oder Vektordarstellungen bzw. Phasenanimationen können im Menü „HFSS-Field Display“ aufgezeichnet werden. Bild 6.3 zeigt die Amplituden-Frequenzabhängigkeit eines TDR-Systems, das von verschiedenen Materialien mit konstanten Parametern für ϵ_r und $\tan \delta$ umgeben ist. Im Vergleich dazu ist die Kurve von deionisiertem Wasser angegeben.

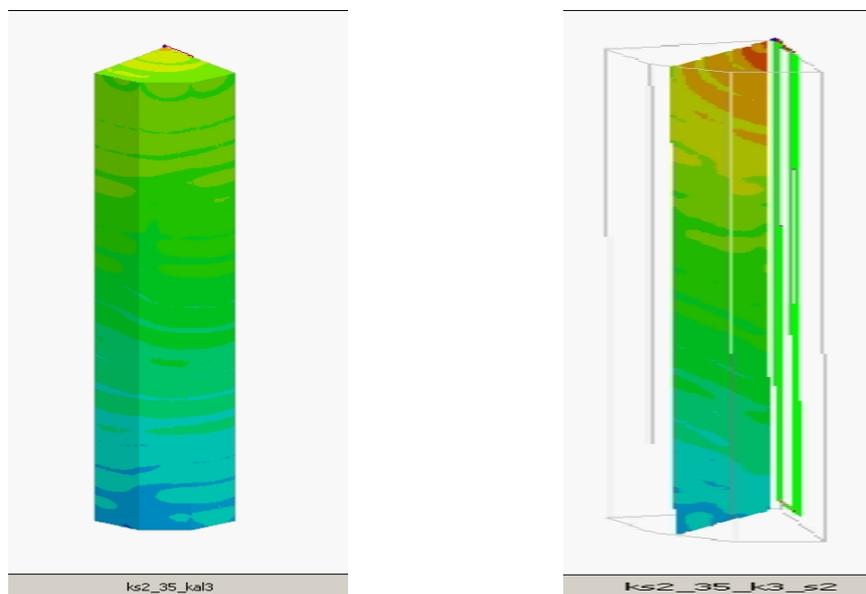


Bild 6.4 E-Felddarstellungen der Messleitung, die von einem feuchten Material umgeben ist

Die berechneten frequenzabhängigen Funktionen werden in das Zusatztool „HFSS-Spice Simulator“ exportiert. Mit einer FFT wird das im Frequenzbereich berechnete Modell in den Zeitbereich transformiert. In einer Schaltungssimulation wird eine Transientenanalyse durchgeführt. Dabei wird an das Zweitor des offenen Bandkabels (Bild 6.5) ein Impuls mit einer Anstiegszeit von 200 ps angelegt; die resultierende Sprungantwort wird am Widerstand R1 (50 Ω) gemessen.

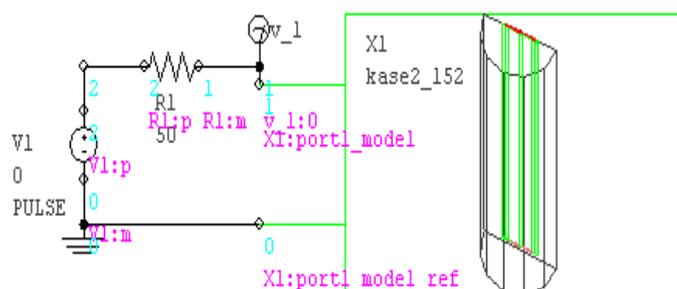


Bild 6.5 Schaltungssimulation und Transientenanalyse im HFSS-Spice-Simulator

Die Amplitudenabhängigkeiten im Frequenzbereich, wie sie im Bild 6.3 dargestellt sind, wurden in den Zeitbereich transformiert und im Bild 6.6 als Sprungantworten dargestellt. Das Bild zeigt Sprungantworten von Materialien mit relativ niedrigen und hohen Werten von DK und Verlustfaktor: $\epsilon_r' / \tan \delta = 4/0,1$ und $15/0,1$ und $\epsilon_r' / \tan \delta = 4/1$ und $15/1$; bei diesen Werten besteht keine Frequenzabhängigkeit. Diese Darstellungen können nur mit einer Simulation gewonnen werden. Die Veränderung des Verhältnis von $\epsilon_r' / \tan \delta$ von $4/0,1$ auf $15/0,1$ bewirkt eine Parallelverschiebung der Sprungantworten zu höherer Pulslaufzeit; der Anstieg bleibt konstant. Durch Erhöhung des Verlustfaktors von $0,1$ auf 1 wird der Anstieg wesentlich geringer. Bei Erhöhung des Verhältnisses $\epsilon_r' / \tan \delta$ von $4/1$ auf $15/1$ findet aber wiederum eine Parallelverschiebung der Sprungantworten statt.

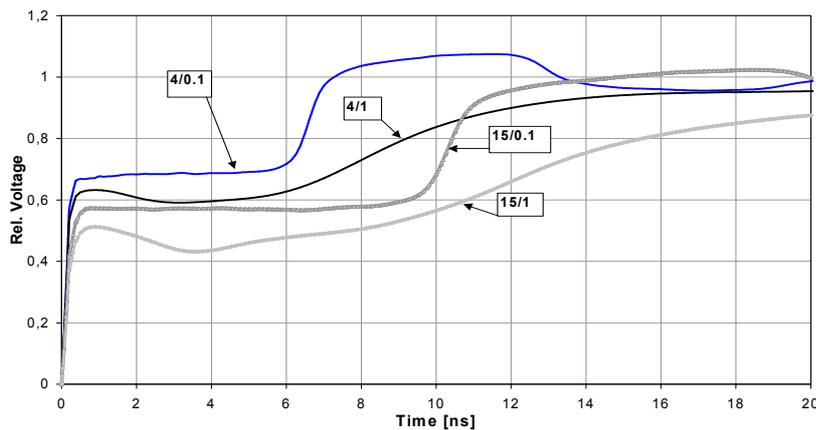


Bild 6.6 Pulsantworten des TDR-Kabelsensors, umgeben mit verschiedenen verlustbehafteten Dielektrika (Parameter: $\epsilon_r' / \tan \delta$)

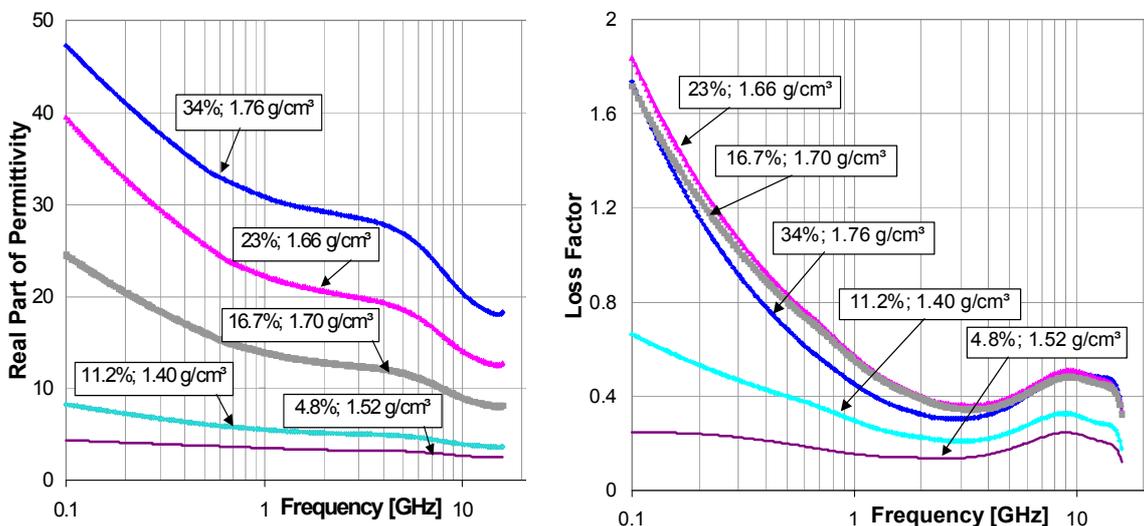


Bild 6.7 Realteil der DK und Verlustfaktor von Bentonit in Abhängigkeit von der Frequenz bei verschiedenen Feuchtegehalten / Dichten

Die dielektrischen Materialeigenschaften von Bentonit (ϵ_r' and $\tan \delta$) werden mit dem Netzwerkanalysator in dem Frequenzbereich bestimmt, der zur Berechnung der Pulsantwort erforderlich ist (1 MHz – 15 GHz). Die Materialproben wurden bei der Kalibrierung direkt unter dem Kabelsensor entnommen. Beispiele für frequenzabhängige Materialcharakteristika von ϵ_r' und $\tan \delta$ sind im Bild 6.7 dargestellt. Die dazugehörigen Datenreihen werden in den HFSS-Materialmanager eingegeben.

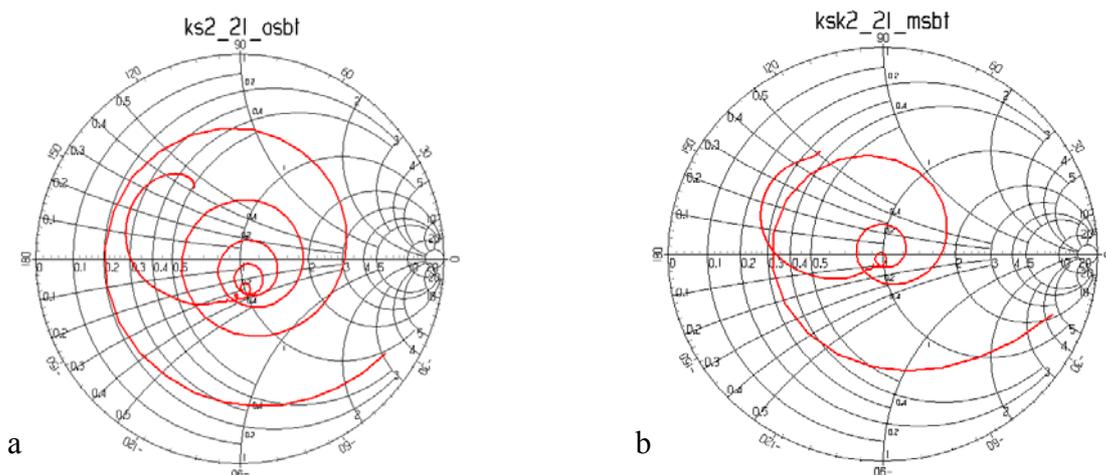


Bild 6.8. Berechnetes Smith-Diagramm eines Bentonit-Sand-Wasser-Gemisches (a) und eines Bentonit-Sand-Salzlösungsgemisches (250g/l) (b)

Bild 6.8 zeigt einen Vergleich der berechneten Smith-Diagramme eines Bentonit-Sand-Wasser-Gemisches (a) und eines Bentonit-Sand-Salzlösungsgemisches (250 g/l) (b). Die Salzlösung verursacht eine starke Dämpfung im Bereich niedrigerer Frequenzen.

Die berechneten Kurven der Sprungantworten der Impulslaufzeit bei verschiedenen Feuchtegehalten bei Bentonit-Sand-Wasser-Gemischen und bei Bentonit-Sand-Salzlösungsgemischen werden in den Bildern 6.9a und b gezeigt. Basierend auf verschiedenen Werten der Pulslaufzeit können die Kalibrierkurven in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bzw. vom Gehalt der Salzlösung ermittelt werden. Die Sprungantworten von Bentonit-Wassergemischen weisen deutlich kürzere Anstiegszeiten auf, als bei Bentonit-Salzlösungsgemischen.

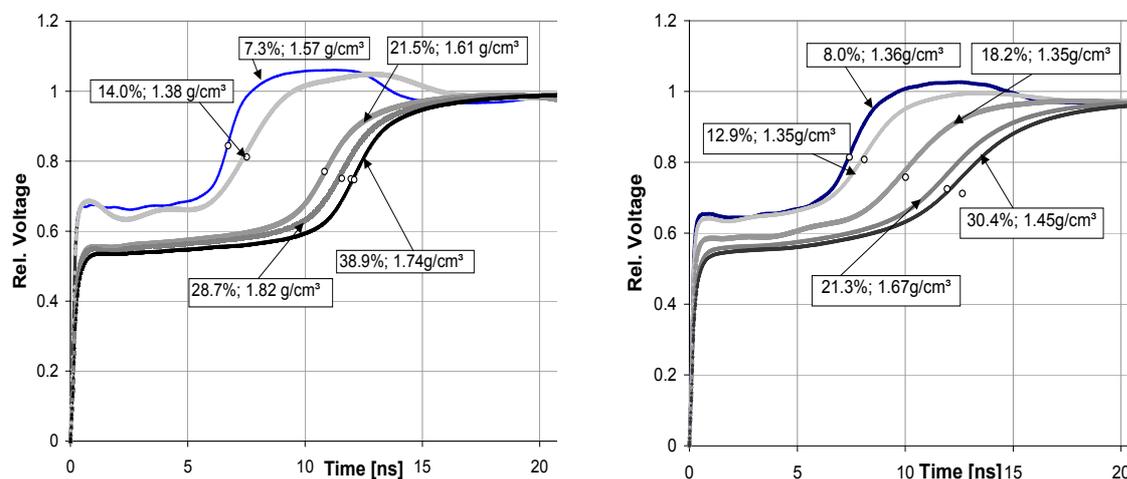


Bild 6.9 Berechnete Sprungantworten für (a) Bentonit-Sand-Wassermischungen verschiedener Feuchtegehalte und für (b) von Bentonit-Sand-Salzwassermischungen verschiedener Gehalte an Salzlösung

Der Verlauf der Kalibrierkurve Bild 6.10 zeigt im Bereich 7 – 12 % Feuchtegehalt / Gehalt an Salzlösung einen geringen Anstieg, der durch das gebundene Zwischenschichtwasser bestimmt ist. Im Bereich 12 – 21 % liegt freies Wasser vor, über 21 % befindet sich der Sättigungsbereich.

Die Kalibrierkurve der Mischung Bentonit-Salzlösung liegt ungefähr mit konstanter Distanz über der Kalibrierkurve, die für ein Bentonit-Sand-Wassergemisch aufgenommen wurde. Der

Grund dafür liegt darin, dass der Salzgehalt nicht nach der Referenztrocknung von der Masse der Mischung subtrahiert wurde.

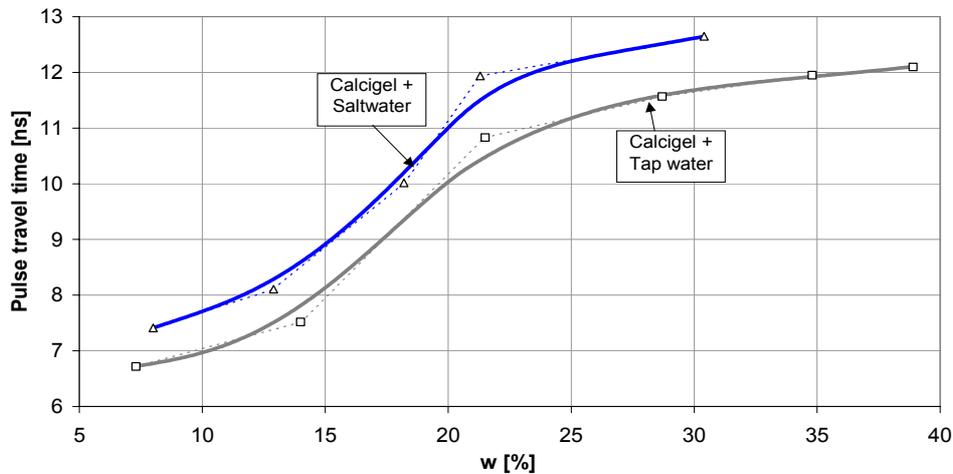


Bild 6.10 Kalibrierkurven der Pulslaufzeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bzw. Gehalt an Salzlösung

Ein sehr wichtiges sicherheitsrelevantes Problem kann während der Installation von Kabelsensoren in Bentonitbarrieren auftreten. Durch nicht sachgemäßen Einbau kann über eine dünne Luftschicht zwischen Material und dem Bandkabel Wasser eindringen und die Dichtung des gesamten Bauwerkes zerstören. Das Kabel fungiert in diesem Fall als „Wasserleiter“ Bild 6.11.

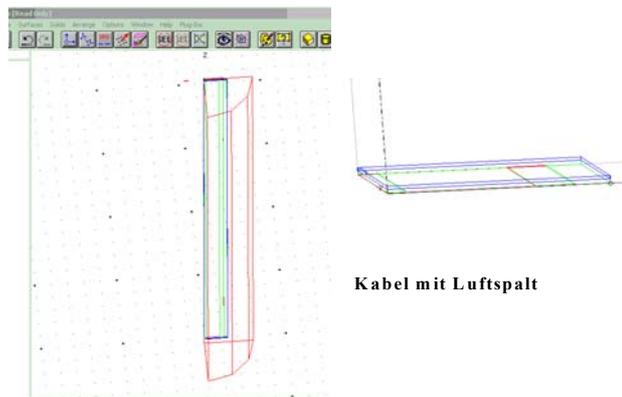


Bild 6.11 Kabel mit Luftspalt im 3D-Modeler

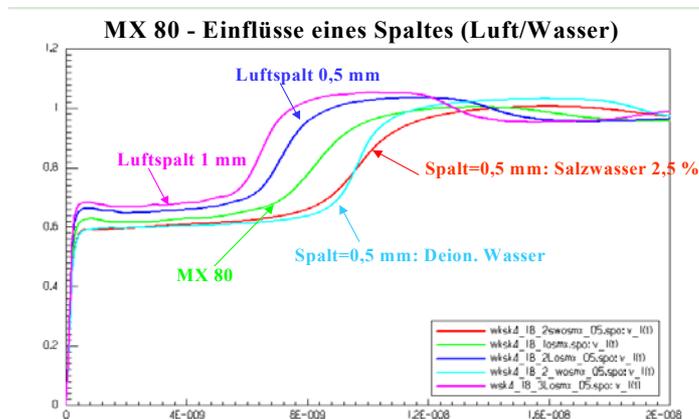


Bild 6.12 Einfluss einer dünnen Luftschicht über dem Kabel, gefüllt mit Wasser oder Salzlösung, auf das Messsignal [Rel. Spannung = f(Laufzeit)]

Verglichen mit einem Sensor, der voll mit Bentonit (MX 80) umschlossen ist, werden im Bild 6.12 Änderungen im Messsignal gezeigt. Bei einem Vorhandensein eines Luftspaltes mit 0,5 oder 1 mm Dicke entsteht eine geringere Laufzeit; wird der Spalt mit Wassergefüllt, erhöht sich die Laufzeit. Beim Vorhandensein von Salzwasser wird die Anstiegszeit geringer.

Diese Ergebnisse können nur mit einer Simulation realisiert werden, da bei experimentellen Untersuchungen andere Störeinflüsse das Messergebnis verfälschen können.

Die Installation der Kabelsensoren hat demzufolge sehr sorgfältig zu erfolgen, um das Auftreten dieser Probleme zu reduzieren (s. Abschnitt 11).

7 Rekonstruktionsalgorithmen für TDR-Signale

Ch. Hübner

Aus der Pulsantwort des TDR-Signales (Bild 5.2) kann auf die dielektrischen Eigenschaften des um das Flachbandkabel befindlichen Materials geschlossen werden. Im Laufe der Zeit haben sich die folgenden, auf das jeweilige Anwendungsgebiet spezialisierte Messmethoden herausgebildet:

- Unter Voraussetzung eines homogenen, verlustfreien und nichtdispersiven Mediums können die dielektrischen Eigenschaften unmittelbar aus der Laufzeitdifferenz (Bild 5.2) bestimmt werden (Topp et al., 1994) [7.1]
- Der Fall einer inhomogenen Feuchteverteilung kann mit Hilfe von Rekonstruktionsalgorithmen betrachtet werden (Schlaeger et al., 2001) [7.2]. Diese Berechnungsverfahren sind bis jetzt nur für verlustfreie und verlustbehaftete nichtdispersive Medien verfügbar.
- Daneben lässt sich das Fortschreiten von Feuchtefronten in einem Material qualitativ durch direkte Analyse des Messsignals der Zeitbereichsreflektometrie ermitteln.

Es sollen in diesem Abschnitt Rekonstruktionsalgorithmen untersucht und entwickelt werden, um näherungsweise ein Profil des Feuchtegehaltes zu bestimmen. Dabei soll auf grundsätzliche Methoden und deren spezifische Vor- und Nachteile eingegangen werden.

7.1 Rekonstruktion bei verlustlosen Materialien

Im verlustlosen Fall wird von einem verschwindenden Widerstandsbelag ($R = 0$) und einem verschwindenden Ableitungsbelag ($G = 0$) ausgegangen. Der Kapazitätsbelag C und der Induktivitätsbelag L werden als frequenzunabhängig angenommen. Die Umrechnung zwischen Feuchtegehalt und C erfolgt zweistufig. Im ersten Schritt wird der Feuchtegehalt in eine reelle DK mit Hilfe der Näherung nach Topp et al. (1994) [7.1] überführt. Die Umrechnung dieser DK in C erfolgt im zweiten Schritt mit Gl. (5.3) bzw. dem darauf basierenden Leitungsmodell.

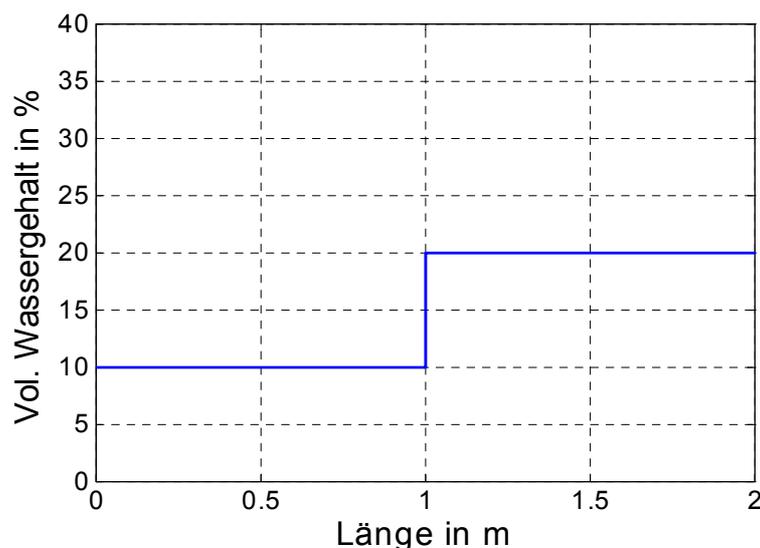


Bild 7.1 Einfaches zweistufiges Feuchtegehaltsprofil

Bild 7.1 zeigt ein einfaches zweistufiges Feuchtegehaltsprofil; die Kabellänge beträgt 2 m. Unter den oben angeführten Voraussetzungen ergibt sich das in Bild 7.2 gezeigte TDR-Signal.

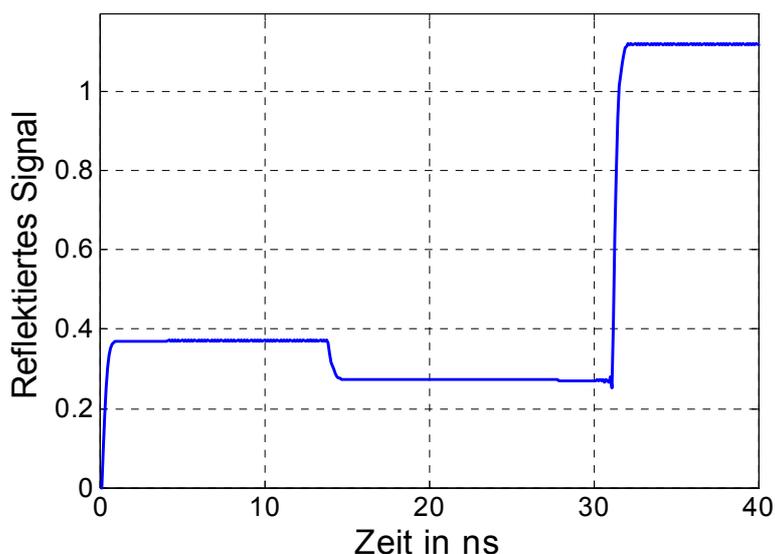


Bild 7.2 TDR-Signal für das einfache zweistufige Feuchtegehaltsprofil (verlustlos)

Aus Bild 7.2 ist erkennbar, dass der Bereich niedrigen Feuchtegehalts mit der hohen Signalamplitude und der Bereich hohen Feuchtegehalts mit der niedrigen Signalamplitude korrespondiert. Die Zeiten für die einzelnen Bereiche sind jedoch unterschiedlich. Bei niedrigem Feuchtegehalt läuft der Impuls schneller als bei hohem Feuchtegehalt. Um vom TDR-Signal auf die Feuchtegehaltsverteilung zu schließen muss sowohl die Amplitude als auch die Laufzeit betrachtet werden. In diesem einfachen Fall ist es möglich, das TDR-Signal dahingehend auszuwerten. Dabei ist zuerst der Reflektionsfaktor am Einspeisepunkt und daraus der Wellenwiderstand des ersten Teilstücks zu bestimmen. Aus dem Wellenwiderstand kann mit Hilfe des bekannten L der Kapazitätsbelag C und der Feuchtegehalt berechnet werden. An der Übergangsstelle zwischen dem ersten und dem zweiten Teilstück ist wiederum der Reflexionsfaktor zu bestimmen und unter Verwendung des zuvor berechneten Wellenwiderstands des ersten Teilstücks der Wellenwiderstand des zweiten Teilstücks zu berechnen. Daraus ergibt sich über das entsprechende C der Feuchtegehalt. Dieses Verfahren ist nur praktikabel für zwei Teilstücke und bestimmte Längenverhältnisse der Teilstücke und zwar so, dass keine Mehrfachreflexionen innerhalb des Beobachtungszeitraums bis zur Reflexion am Leitungsende auftreten. Bei komplizierteren Feuchtegehaltsprofilen ist dieses Auswerteverfahren nicht mehr praktikabel.

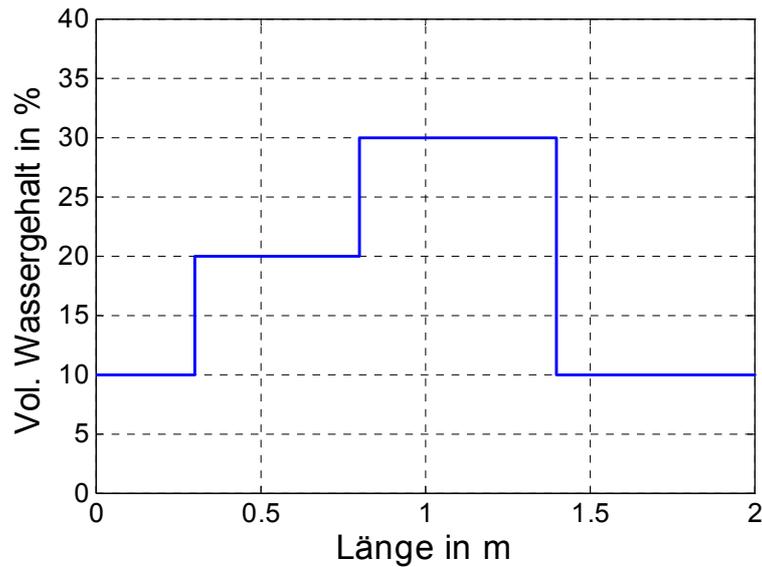


Bild 7.3 Einfaches mehrstufiges Feuchtegehaltsprofil

Ein einfaches mehrstufiges Feuchtegehaltsprofil ist im Bild 7.3 zu erkennen. Der Feuchtegehalt steigt in zwei Stufen an und fällt dann wieder auf den Ausgangswert zurück. Die einzelnen Teilstücke haben vergleichbare Längen.

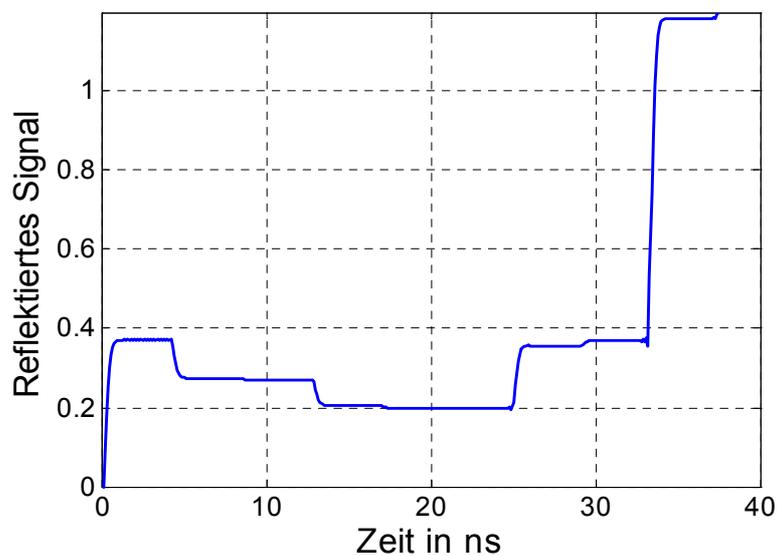


Bild 7.4 TDR-Signal für das einfache mehrstufige Feuchtegehaltsprofil (verlustlos)

Aus dem in Bild 7.4 gezeigten TDR-Signal kann qualitativ auf die Feuchtegehaltsverteilung geschlossen werden. Das Absinken der Amplitude in zwei Schritten deutet auf das Ansteigen des Feuchtegehalts hin. Es zeigen sich jedoch auch schon die ersten Anzeichen der Mehrfachreflexionen, die im dritten Amplitudenbereich zu einem leichten Absinken der Spannung bei etwa 18 ns führen. Dies korrespondiert mit einer Mehrfachreflexion, die durch das erste Teilstück hervorgerufen wird. Auch im letzten Amplitudenbereich vor der steilen Reflexion am offenen Ende zeigen sich die Auswirkungen von Mehrfachreflexionen durch einen kleinen Sprung bei etwa 29 ns nach oben.

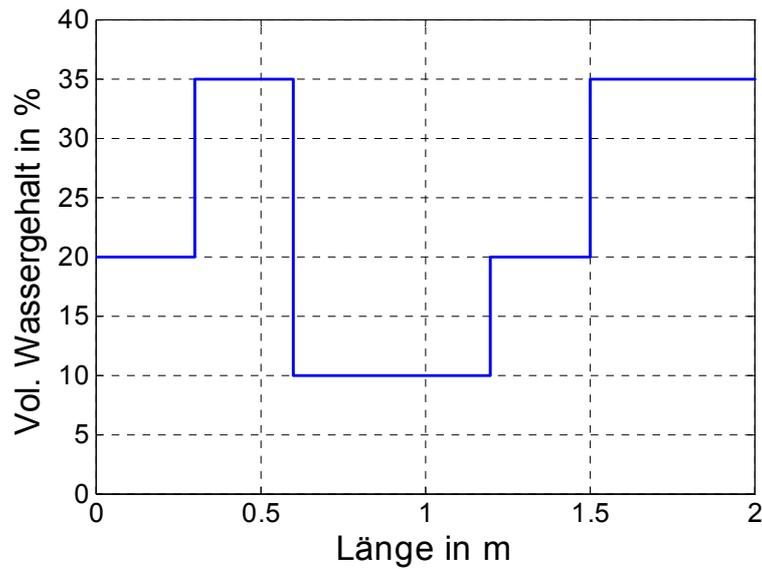


Bild 7.5 Kompliziertes mehrstufiges Feuchtegehaltsprofil

Noch schwieriger werden die Verhältnisse bei der im Bild 7.5 gezeigten komplizierten mehrstufigen Feuchtegehaltsverteilung. Hier wechseln sich Gebiete mit hohem und niedrigem Feuchtegehalt in schneller Folge ab. Obwohl diese Feuchtegehaltsverteilung in realen Fällen eher unüblich ist, sollen hier auch solche Konstellationen betrachtet werden. Denkbar sind diese Feuchtegehaltsverteilungen in geschichteten Medien mit stark unterschiedlichen Materialeigenschaften wie sie z.B. bei Kapillarsperren auftreten.

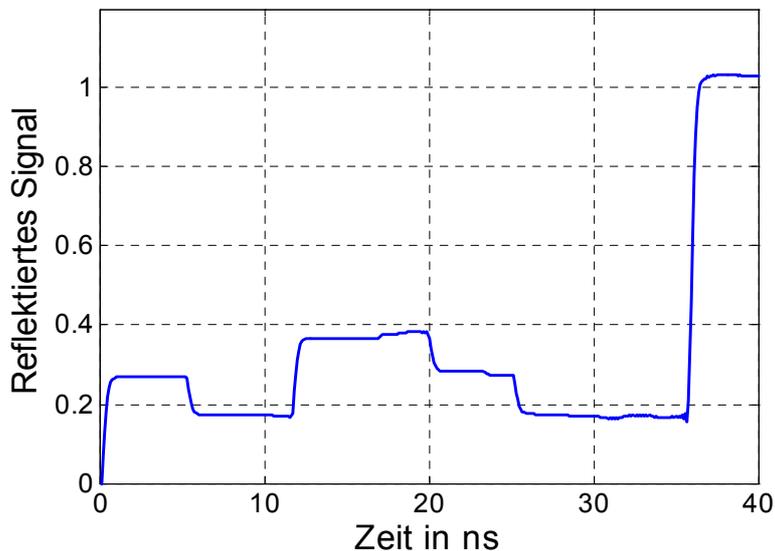


Bild 7.6 TDR-Signal für das komplizierte mehrstufige Feuchtegehaltsprofil (verlustlos)

Auch das TDR-Signal in Bild 7.6 ist entsprechend kompliziert. Dennoch könnte man hier noch vergleichsweise gut auf den Feuchtegehalt schließen. Die Signalspannungen in Gebieten gleichen Feuchtegehalts sind näherungsweise gleich, wie z. B. in den Teilstücken 1 und 4 oder den Teilstücken 2 und 5. Es treten jedoch zunehmend Mehrfachreflektionen auf (z.B. bei etwa 17 ns).

7.2 Rekonstruktion bei verlustbehafteten Materialien

Bei verlustbehafteten Materialien wird das Eingangssignal gedämpft und es kommt zu einem Absinken der TDR-Spannung. Hier wird ein einfacher Verlustmechanismus angenommen, der durch einen frequenzunabhängigen Ableitungsbelag G repräsentiert werden soll. Dieses G steht jedoch in Beziehung zum Kapazitätsbelag C , so wie auch die elektrische Leitfähigkeit des Bodens mit zunehmenden Feuchtegehalt üblicherweise ansteigt. G soll also proportional zu C sein, wobei die Proportionalitätskonstante die Höhe der Verluste charakterisiert und variiert werden soll.

Begonnen werden soll hier wieder mit der einfachen zweistufigen Feuchtegehaltsverteilung (s. Bild 7.1), die vom niedrigen Feuchtegehalt zu hohem Feuchtegehalt in der Mitte der 2 m langen Strecke wechselt.

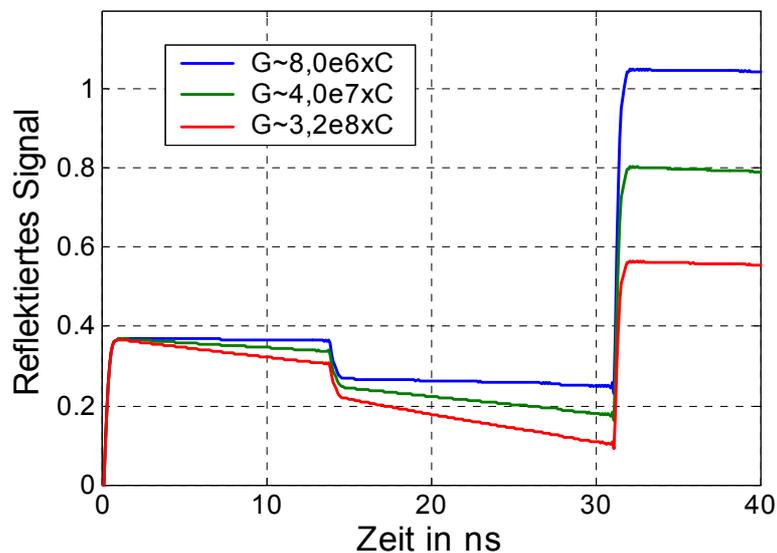


Bild 7.7 TDR-Signal für das einfache zweistufige Feuchtegehaltsprofil (verlustbehaftet)

Das im Bild 7.7 gezeigte TDR-Signal zeigt den Einfluss steigender Verluste. Bei höheren Verlusten nimmt die TDR-Spannung immer stärker ab. An den Laufzeiten und an den Anstiegszeiten ist noch keine Änderung zu erkennen. Dies liegt daran, dass bei diesem Modell keine Dispersion berücksichtigt ist und damit keine Impulsverschleifung beobachtet werden kann. Dennoch ist dieses Modell ein erster Ansatz, um die verlustbehaftete Wellenausbreitung zu beschreiben.

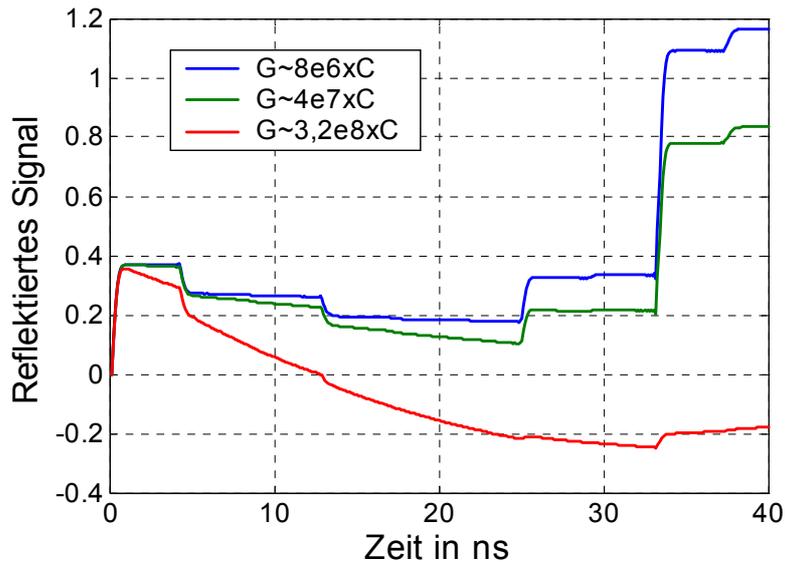


Bild 7.8 TDR-Signal für das einfache mehrstufige Feuchtegehaltsprofil (verlustbehaftet)

Analog zum verlustfreien Fall wird jetzt die einfache mehrstufige Feuchtegehaltsverteilung betrachtet (s. Bild 7.3). Mit zunehmender Leitfähigkeit sinkt die TDR-Spannung immer weiter ab. Im Fall der höchsten Leitfähigkeit werden die Übergangsreflexionen zwischen den einzelnen Teilstücken immer weniger deutlich sichtbar. Sogar die Reflexion am Leitungsende ist nur noch schwach zu erkennen. Eine quantitative Aussage über die Feuchtegehaltsverteilung wird dadurch immer schwieriger. Selbst qualitative Aussagen über den Feuchtegehalt und die Identifikation von Bereichen gleichen Feuchtegehaltes sind kaum möglich.

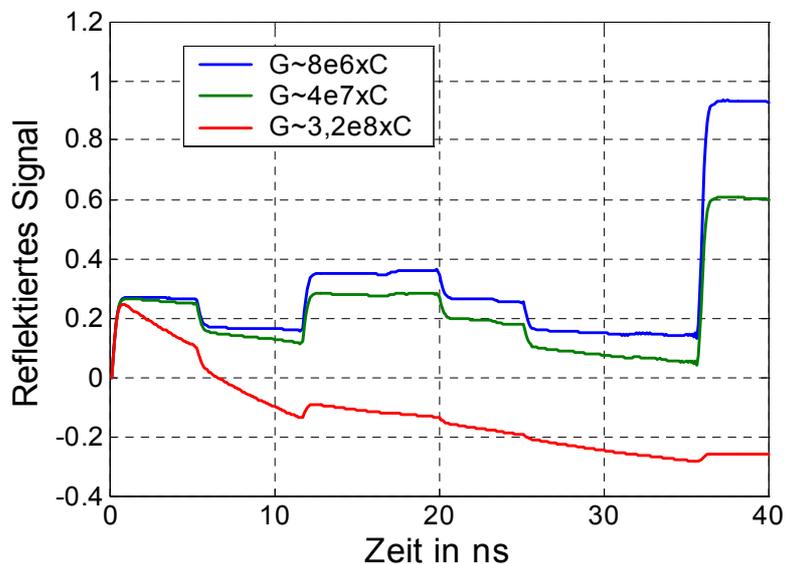


Bild 7.9 TDR-Signal für das komplizierte mehrstufige Feuchtegehaltsprofil (verlustbehaftet)

Ähnlich schwierig ist die Interpretation der TDR-Kurve für den Fall der komplizierten mehrstufigen Feuchtegehaltsverteilung (s. Bild 7.5), die im Bild 7.9 aufgetragen ist. Auch hier fällt mit steigenden Verlusten die TDR-Spannung immer weiter ab und es werden die Übergangsreflexionen zwischen den einzelnen Teilstücken immer undeutlicher. Lediglich die zwei ersten Teilstücke sind klar erkennbar.

Nach dieser Vorstellung typischer TDR-Signale im verlustlosen und verlustbehafteten Fall bei verschiedenen Feuchtegehaltsverteilungen beschäftigen sich die darauffolgenden Kapitel mit der Rekonstruktion. Die Rekonstruktion soll als weitgehend automatisiertes Verfahren aus den TDR-Signalen die Feuchtegehaltsprofile zurückliefern.

7.3 Überblick Rekonstruktionsalgorithmen

Die Rekonstruktion von Leitungsparametern wurde von mehreren Forschergruppen bearbeitet. Vorrangig zu nennen sind hier:

- Lundstedt und He (1996)[7.3]:
 - Optimierungsalgorithmus im Zeitbereich
 - Frequenzunabhängiges R, L, C, G
- Norgren und He (1996)[7.4]:
 - Optimierungsalgorithmus im Frequenzbereich
 - Frequenzunabhängiges C, G, frequenzabhängiges R, L
- Schlaeger (2002)[7.5]:
 - Optimierungsalgorithmus im Zeitbereich
 - Frequenzunabhängiges R, L, C, G

Nachfolgend werden die grundlegenden Eigenschaften dieser Algorithmen mit ihren Vor- und Nachteilen kurz beschrieben.

Verfahren nach Lundstedt und He

Der Algorithmus von Lundstedt und He beruht auf der Lösung der Telegraphengleichung im Zeitbereich mit Hilfe von „Wave Splitting“ und Greenschen Funktionen. Es werden frequenzunabhängige Leitungsparameter R, L, C, G und das im Bild 5.5 gezeigte Ersatzschaltbild verwendet. Der Rekonstruktionsalgorithmus ist schnell und liefert zuverlässige Ergebnisse. Nachteil ist jedoch, dass das Verfahren nicht ohne weiteres automatisiert werden kann. Sowohl die Gesamtlaufzeit als auch weitere Reflektionsparameter müssen manuell bestimmt werden. Der Algorithmus ist darüber hinaus nicht so einfach auf dispersive Medien zu erweitern. Dies ist ein grundsätzliches Problem von Zeitbereichsrekonstruktionsalgorithmen.

Verfahren nach Norgren und He

Norgren und He beschreiben ein Verfahren zur Rekonstruktion im Frequenzbereich. Auch hier wird wieder das Ersatzschaltbild Bild 5.5 verwendet. Das direkte Problem wird dabei wie bei Lundstedt und He über „Wave Splitting“ angegangen. Die Optimierung selbst basiert auf einem Fehlerfunktional und explizit berechneten Gradienten. Diese Gradienten können für den Fall frequenzunabhängiger Parameter und für einen einfachen dispersiven Fall angegeben werden. Im Vergleich zu rein numerisch berechneten Gradienten ergeben sich dadurch erhebliche Vorteile bezüglich Rechenzeit. Beliebige frequenzabhängige Leitungsparameter sind damit aber nicht möglich. Eine dahingehende Erweiterung würde den Rechenzeitvorteil zunichte machen. Es zeigt sich, dass ein Leitungsparameter mit Hilfe einseitiger Reflexionsdaten bestimmt werden kann. Die Rekonstruktion von zwei Leitungsparametern mit Hilfe einseitiger Reflexionsdaten war im Gegensatz zum Verfahren von Lundstedt und He nicht möglich. Norgren und He schlagen deshalb vor, Reflexionsdaten von beiden Seiten der Kabelstrecke

aufzunehmen. Die Rekonstruktion von einem reaktiven Parameter (L oder C) und einem dissipativen Parameter (R oder G) scheint damit selbst im dispersiven Fall möglich zu sein.

Verfahren nach Schlaeger

Schlaeger beschreibt ein Verfahren zur Rekonstruktion im Zeitbereich, das sich durch besonders kurze Rechenzeit und hohe Ortsauflösung auszeichnet. Er verwendet ebenfalls das Ersatzschaltbild im Bild 5.5 und frequenzunabhängige Leitungsparameter. Das inverse Problem wird mit Hilfe einer numerischen Optimierung auf der Basis konjugierter Gradienten gelöst, die sich durch besonders schnelle Konvergenz auszeichnet. Zur Bestimmung des Leitungsparameters C sind einseitige Messungen im Zeitbereich von $[0, 2 t_p]$ mit t_p als einfacher Signallaufzeit bis zum Kabelende durchzuführen. Sind zwei Leitungsparameter zu rekonstruieren, so benötigt man entweder einseitige Messungen im Zeitintervall $[0, 4 t_p]$ oder beidseitige Messungen jeweils im Zeitintervall $[0, 2 t_p]$. Günstig erweist sich die beidseitige Messung, da bei einseitigen Messung von $[0, 4 t_p]$ Messfehler stärker ins Gewicht fallen. Nachteil des Verfahrens von Schlaeger ist, dass es nur schwer auf beliebige frequenzabhängige Leitungsparameter erweitert werden kann und dann in zunehmenden Maße auf Grenzen bezüglich Speicherplatz und Rechenzeit auftreten können. Das Verfahren von Schlaeger ist für die Bestimmung von Feuchtegehaltsprofilen am weitesten ausgereift. Anhand einer Reihe von Experimenten in sandigen und schluffigen Böden ergaben sich maximale Kabellängen zwischen 10 und 15 m. Bei stärker verlustbehafteten Böden sind kürze maximale Kabellängen zu erwarten.

7.4 Weiterentwickelter Rekonstruktionsalgorithmus

Um die Möglichkeiten und Grenzen der Rekonstruktion von Leitungsparametern einschätzen zu können wurde mit Hilfe der mathematischen Programmiersprache MATLAB Simulationen und Rekonstruktionen auf der Basis kombinierter Zeit/Frequenzbereichsverfahren durchgeführt.

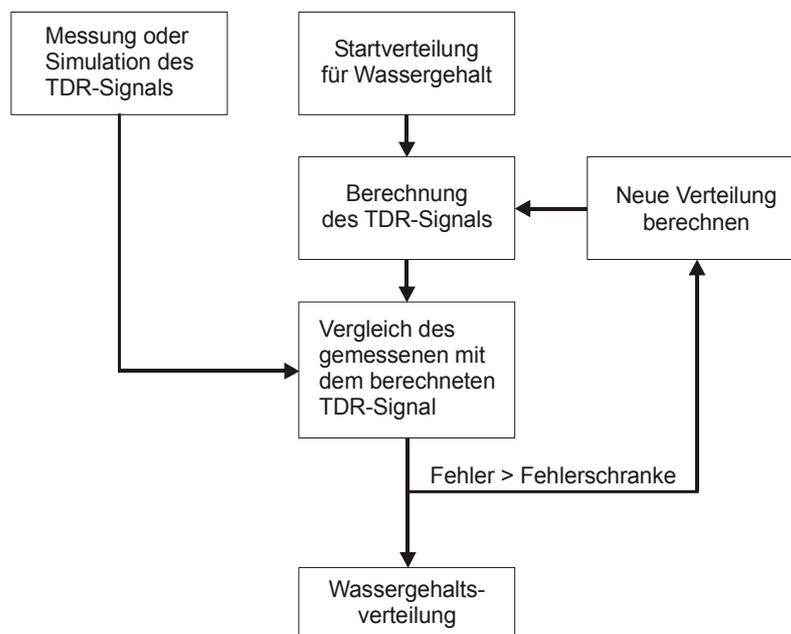


Bild 7.10 Flussdiagramm für die Matlab-Simulation und Rekonstruktion

Im Bild 7.10 ist der typische Berechnungsgang anhand eines Flussdiagramms zu erkennen. Eine Rekonstruktion startet mit der Messung oder Simulation eines TDR-Signals. Die Feuchtegehaltsverteilung, die zu diesem TDR-Signal führt, sei für den Rekonstruktionsalgorithmus unbekannt. Es wird deshalb eine konstante Startverteilung angenommen. Der konstante Feuchtegehalt dieser Startverteilung sollte möglichst nahe der tatsächlichen Verteilung liegen, um eine schnelle Konvergenz der numerischen Optimierung zu ermöglichen. Ein sinnvoller Wert kann z.B. aus der Betrachtung der Gesamtlaufzeit ermittelt werden. Für diese Startverteilung kann nun die entsprechende Sprungantwort oder das TDR-Signal mit HFSS berechnet werden (direktes Problem, s. Abschnitt 6). Der Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen TDR-Signal ergibt einen Fehler. Man kann dazu über Beträge der Abweichungen der TDR-Signale aufsummieren. Um diesen Fehler zu verringern muss eine neue Feuchtegehaltsverteilung bestimmt werden. Matlab stellt für diese Art von Problemen spezielle Werkzeuge in Form der Optimization Toolbox zur Verfügung. Die Funktion `fminunc` ermöglicht das Finden des Minimums einer Funktion mehrerer Parameter. Diese Parameter sind die Feuchtegehalte in den einzelnen Teilstücken des Kabels. In einem iterativen Prozess wird die Feuchtegehaltsverteilung immer weiter geändert, bis die daraus berechnete TDR-Kurve mit der gemessenen TDR-Kurve übereinstimmt. Die Eindeutigkeit der Lösung ist dann gegeben, wenn die von Schlaeger aufgestellten Bedingungen für den notwendigen Zeitbereich der Messung eingehalten werden. Dieses Verfahren mit Hilfe der Optimization Toolbox von Matlab, die die Gradienten numerisch berechnet, ist im Vergleich zu den anderen Verfahren sehr langsam. Der Vorteil ist jedoch, dass es keine Beschränkungen hinsichtlich des funktionalen Zusammenhangs zwischen Feuchtegehalt und Leitungsparametern gibt. Es können damit beliebige frequenzabhängige Leitungsparameter angesetzt werden. Dies wird praktikabel im Frequenzbereich durchgeführt. Anschließend erfolgt die Transformation in den Zeitbereich für den Vergleich mit der gemessenen TDR-Kurve (s. Abschnitt 6). Die Notwendigkeit bei jeder Lösung des direkten Problems eine FFT durchzuführen verlangsamt den Algorithmus erheblich. Die im nachfolgenden Abschnitt 7.5 gezeigten Rekonstruktionsbeispiele benötigen etwa 2 Stunden Rechenzeit auf einen Intel Celeron mit 700 MHz und dies bei einer Diskretisierung mit nur 20 Teilstücken. Der Versuch die Rechenzeit durch einmalige Transformation der gemessenen TDR-Daten in den Frequenzbereich und dortigen numerische Optimierung zu verkürzen war leider nicht erfolgreich und führte zu Konvergenzproblemen. Konvergenzprobleme der numerischen Optimierung gab es auch bei stark dispersiven Materialien. Dazu sind weitergehende Betrachtungen notwendig, die den Rahmen dieser Untersuchung überschreiten würden.

Nachfolgend soll anhand zweier Beispiel gezeigt werden, wie sich dieser Rekonstruktionsalgorithmus für verlustlose und verlustbehaftete Materialien einsetzen lässt.

7.5 Rekonstruktionsbeispiele

Im Bild 7.11 ist ein Rekonstruktionsbeispiel für den verlustlosen Fall zu erkennen. Das „unverrauschte“ Signal ist das simulierte TDR-Signal für die im Bild 7.5 gezeigte Feuchtegehaltsverteilung. Um die Sensitivität des Rekonstruktionsalgorithmus auf Messfehler zu überprüfen wurde diese Signal verrauscht. Als Startverteilung für den Feuchtegehalt wurde ein konstante Verteilung mit 10 % volumetrischen Feuchtegehalt angenommen. Die Diskretisierung der 2 m langen Kabelstrecke erfolgte in 20 Schritten, d.h. mit einer Ortsauflösung von 10 cm. Nach der numerischen Optimierung stimmt das rekonstruierte TDR-Signal gut mit dem simulierten TDR-Signal überein. Das Rauschen wird dabei ausgemittelt, da es bei der gewählten Diskretisierung nicht möglich ist, das schnell veränderliche Rauschen abzubilden.

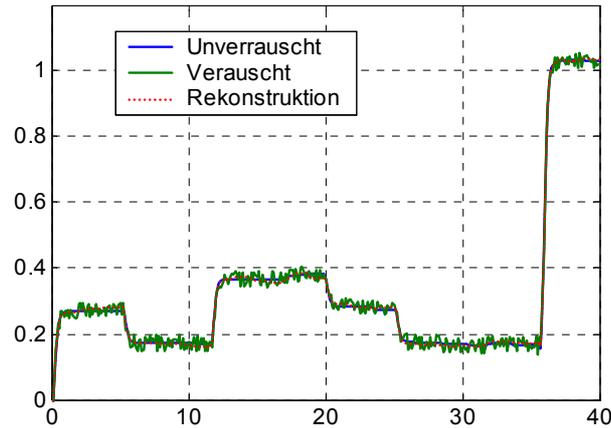


Bild 7.11 TDR-Rekonstruktionsbeispiel (verlustlos)

Im Bild 7.12 ist die rekonstruierte Feuchtegehaltsverteilung im Vergleich mit dem exakten Profil zu erkennen. Aufgrund des verrauschten Eingangssignals kommt es zu geringen Abweichungen. Man erkennt, dass der Algorithmus stabil arbeitet und bei diesen simulierten Messfehlern mit einem Ergebnis nahe der tatsächlichen Verteilung konvergiert. Rekonstruiert man aus dem unverrauschten Signal die Feuchtegehaltsverteilung, so stimmt diese mit der tatsächlichen Feuchtegehaltsverteilung überein.

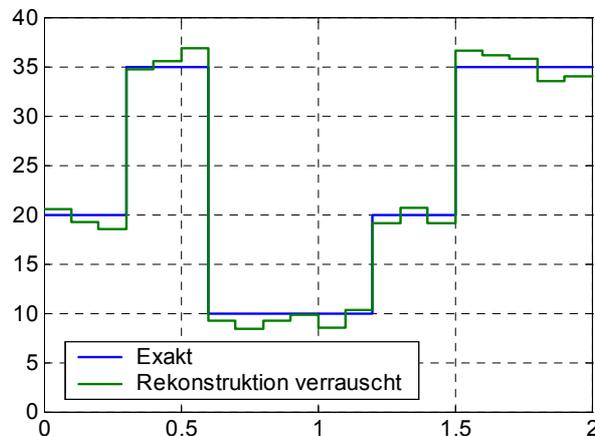


Bild 7.12 Rekonstruktionsergebnis (verlustlos)

Im Bild 7.13 ist ein Rekonstruktionsbeispiel für den verlustbehafteten Fall aufgetragen. Das „unverrauschte“ Signal ist das simulierte TDR-Signal für die im Bild 7.5 gezeigte Feuchtegehaltsverteilung, jetzt aber unter der Berücksichtigung von Verlusten (s. Bild 7.9). Um die Sensitivität des Rekonstruktionsalgorithmus auf Messfehler zu überprüfen, wurde auch hier das Signal verrauscht. Als Startverteilung für den Feuchtegehalt wurde ein konstante Verteilung mit 10 % volumetrischen Feuchtegehalt angenommen. Die Diskretisierung der 2 m langen Kabelstrecke erfolgte in 20 Schritten, d.h. mit einer Ortsauflösung von 10 cm. Nach der numerischen Optimierung stimmt das rekonstruierte TDR-Signal wiederum gut mit dem simulierten TDR-Signal überein. Genauso verhält es sich mit der Ausmittlung des Rauschens.

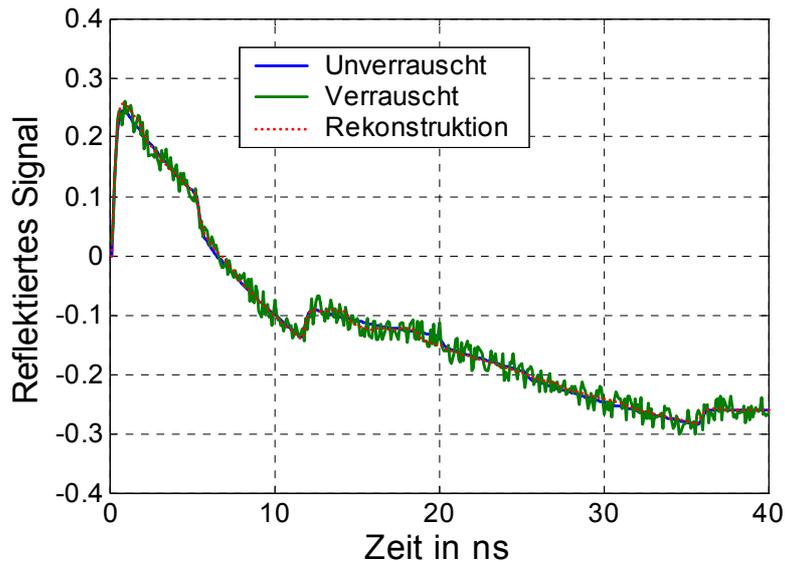


Bild 7.13 TDR-Rekonstruktionsbeispiel (verlustbehaftet)

Im Bild 7.14 ist die rekonstruierte Feuchtegehaltsverteilung im Vergleich mit dem exakten Profil zu erkennen. Aufgrund des verrauschten Eingangssignals kommt es zu Abweichungen. Diese Abweichungen sind ausgeprägter als im verlustlosen Fall. Man erkennt jedoch trotzdem, dass der Algorithmus stabil arbeitet und bei diesen simulierten Messfehlern mit einem Ergebnis nahe der tatsächlichen Verteilung konvergiert. Rekonstruiert man das unverrauschte TDR-Signal, so erhält man wiederum den tatsächlichen Feuchtegehalt.

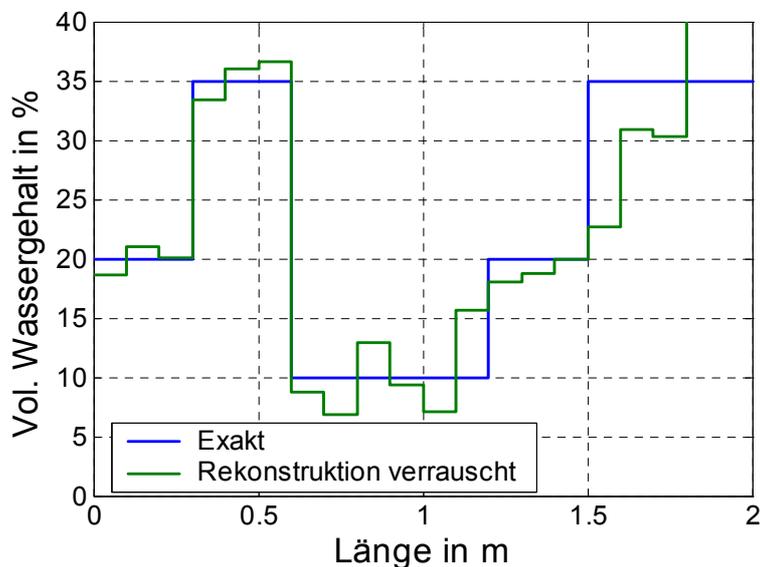


Bild 7.14 Rekonstruktionsergebnis (verlustbehaftet)

Das zugefügte Rauschen war im verlustfreien als auch im verlustbehafteten Fall gleich. Im verlustbehafteten Fall sind die Reflexionen infolge der Dämpfung wesentlich geringer. Die Rekonstruktion wird deshalb im verlustbehafteten Fall deutlich stärker durch das Rauschen gestört. Man kann daraus schließen, dass sich Messfehler im verlustbehafteten Fall stärker auswirken werden und deshalb höhere Ansprüche an die Messgenauigkeit gestellt werden müssen.

7.6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von TDR-Rekonstruktionsalgorithmen können Feuchtegehaltsverteilungen entlang einer Kabelstrecke unter bestimmten Randbedingungen bestimmt werden. Anhand einer Literaturrecherche und eigenen Berechnungen wurden diese Randbedingungen untersucht. Nach dem Stand der Technik können für folgende Fälle Rekonstruktionen durchgeführt werden:

- Frequenzunabhängige, verlustlose Leitungsparameter ($R = 0, G = 0$)
- Frequenzunabhängige, verlustbehaftete Leitungsparameter

Anhand von konkreten Beispielen wurde die Leistungsfähigkeit dieser Algorithmen auch bei zugefügtem Rauschen demonstriert. Erste orientierende Berechnungen zeigen, dass für schwach dispersive Leitungsparameter ebenfalls eine Rekonstruktion möglich ist. Für stark dispersive Leitungsparameter waren die bisherigen Bemühung noch nicht erfolgreich. Es scheint so zu sein, dass stark dispersive Leitungsparameter die Impulse so verschleifen, dass die Informationen der einzelnen Reflexionen über breite Zeitbereiche verteilt werden und dadurch die Konvergenz der numerischen Optimierung leidet. Es könnte sein, dass bei starker Dispersion viele lokale Minima beim Fehlerfunktional entstehen und dadurch das globale Minimum nicht gefunden wird. Abhilfe könnten verbesserte numerische Optimierungsverfahren liefern ggf. in Zusammenarbeit mit mehreren Durchläufen mit verschiedenen Startwerten. Dadurch wird sich jedoch die Rechenzeit erhöhen.

Die bisherigen Untersuchungen basieren auf theoretischen Untersuchungen, die mit Hilfe von zugefügtem Rauschen realitätsnäher gestaltet wurden. Eigene praktische Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Ergebnisse in die Praxis übertragen werden können. Folgende Voraussetzungen müssen dafür gegeben sein:

- Das eingespeiste Signal muss gut bekannt sein. Dazu bringt man ein Relais an der Anschlussstelle des Messkabels an, mit dem das Messkabel zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Im abgeschalteten Zustand erhält man ein offenes Ende. Der eingespeiste Impuls wird mit dem Reflexionsfaktor 1 zurückgespiegelt und kann somit erfasst werden. Damit kann insbesondere die Impulsabflachung durch das koaxiale Zuführungskabel erfasst und berücksichtigt werden.
- Um die TDR-Signale mit dem Feuchtegehalt in Beziehung zu setzen benötigt man entweder geeignete Mischungsmodelle oder Messungen der dielektrischen Eigenschaften über den relevanten Frequenzbereich. Dieser Frequenzbereich hängt von der Länge der Kabelstrecke und den dielektrischen Materialeigenschaften ab. Bei einer Kabellänge von 2 m liegt die Laufzeit um die 40 ns. Als grobe Abschätzung müssen deshalb Frequenzen mindestens bis hinab zu $1/(40 \text{ ns}) = 25 \text{ MHz}$ berücksichtigt werden.
- Die Übergangsstelle zwischen Koaxialkabel und Flachbandkabel ist in der Regel nicht stoßstellenfrei, d.h. es findet dort eine Reflexion statt, die die Rekonstruktion stört. Diese Stoßstelle könnte z.B. durch eine konzentrierte Kapazität oder ein anderes Ersatzschaltbild modelliert werden.
- Es ist vorteilhaft die TDR-Messungen von beiden Seiten der Messstrecke durchzuführen, speziell wenn 2 Leitungsparameter rekonstruiert werden sollen oder Dispersion vorhanden ist. Aufgrund der eingeschränkten Messgenauigkeit von TDR-Geräten ist es besser von 2 Seiten über den Zeitbereich $[0,2 t_p]$ zu messen als von einer Seite über den Zeitbereich $[0,4 t_p]$.

Literatur

- [7.1] Topp, C. G., Zegelin, S. J. und I. White, 1994, *Monitoring Soil Water Content Using TDR: An Overview of Progress*, Symposium on TDR in environmental, infrastructure and mining applications, U.S. Bureau of Mines Special Publication, 19, 67-80.
- [7.2] Schlaeger, S., Huebner, C., Scheuermann, A. and J. Gottlieb, 2001, *Development and Application of TDR Inversion Algorithms with High Spatial Resolution for Moisture Profile Determination*, Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Evanston, September 5-7, 236-248
- [7.3] Lundstedt, J. und S. He, 1996, *A time-domain optimization technique for simultaneous reconstruction of the characteristic impedance, resistance and conductance of a transmission line*, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 10(1), 19-50.
- [7.4] Norgren, M. and S. He, 1996, *An optimization approach to the frequency-domain inverse problem for a nonuniform LCRG transmission line*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 44(8), 1503-1507.
- [7.5] Schlaeger, S., 2002, *Inversion von TDR-Messungen zur Rekonstruktion räumlich verteilter bodenphysikalischer Parameter*, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 156, ISSN 0453-3267.

8 Experimentelle Untersuchungen zu Feuchteprofilen

Für die experimentellen Untersuchungen stand ein Tektronix-Kabeltester K 1502C mit folgenden Kennwerten zur Verfügung:

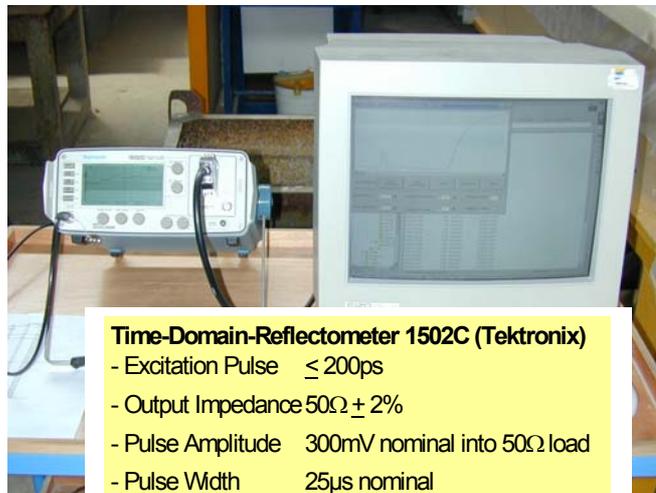


Bild 8.1 TDR-Messplatz zur Aufnahme von Feuchteprofilen

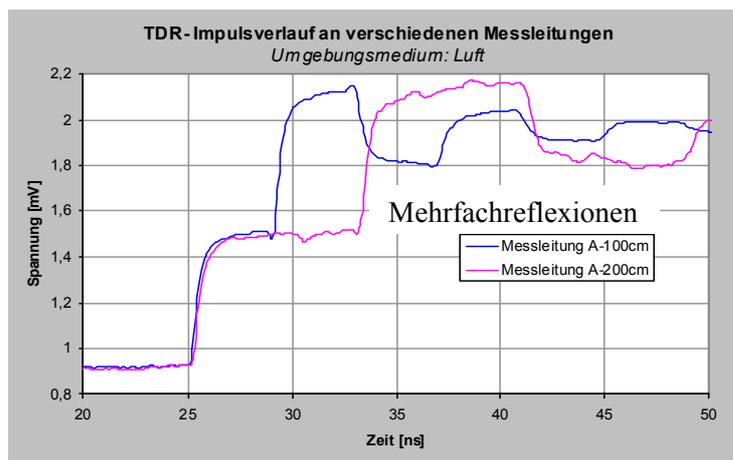


Bild 8.2 Impulsantwort verschieden langer Messleitungen (Umgebungsmedium Luft)

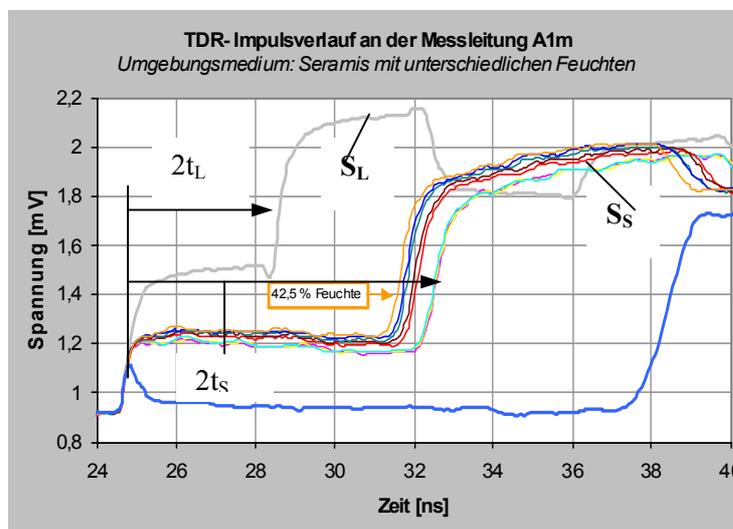


Bild 8.3 Impulsantwort einer Messleitung (1m Länge) bei umgebender Luft, feuchtem Seramis und Wasser

Im Bild 8.2 werden die Impulsantworten verschieden langer Messleitungen umgeben von Luft gezeigt; der Kabelsensor mit einer Länge von 2 m zeigt eine doppelt so lange Laufzeit. Welligkeiten des summierten Signales resultieren aus Mehrfachreflexionen. Im Bild 8.3 werden die Impulsantworten einer Messleitung von 1m Länge bei umgebender Luft, feuchtem Seramis und Wasser dargestellt. Hier wird der Einfluss der Erhöhung der Dielektrizitätskonstante sowohl auf die Laufzeit als auch auf die Amplitude sichtbar. Im Signalverlauf sind die doppelte Laufzeit und das summierte Signal von Luft ($2t_L$; S_L) und Seramis ($2t_S$; S_S) eingezeichnet. Das summierte Signal S setzt sich aus eingespeistem und reflektiertem Signal zusammen.

8.1 Detektion der Füllhöhe eines Rohres

Zur Detektion der Füllhöhe eines Rohres bei Befüllung mit destilliertem Wasser und Salzwasser wurde der Versuchsaufbau im Bild 8.4 verwendet.



Bild 8.4 Versuchsaufbau zur Befüllung eines Rohres

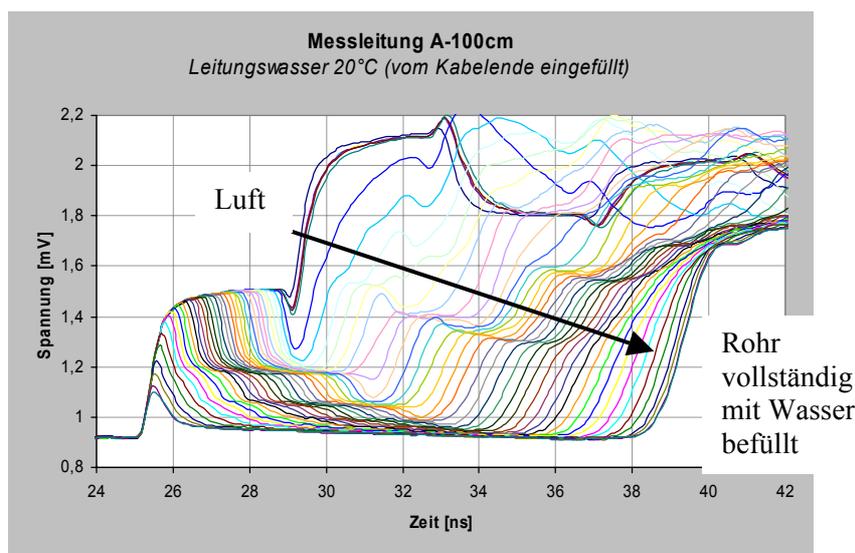


Bild 8.5 Schrittweises Befüllen eines Rohres mit Leitungswasser (Einfüllung vom Kabelende)

Bild 8.5 zeigt das schrittweise Befüllen eines Rohres, bei dem das Kabelende nach unten hängt (s. Bild 8.4) und das Wasser von unten aufsteigt. Die erste Kurve (links) zeigt die Impulsantwort des Kabelsensors bei umgebender Luft. Steigt das Wasser von unten an, so verschiebt sich der Übergang Luft/Wasser in Richtung Ursprung des Diagrammes bzw. zum Kabelanfang. Die Impulsantworten sinken mit steigendem Wasserpegel zunächst nach unten ab, beim Austritt aus dem Wasser entstehen an der Grenzschicht Luft/Wasser Mehrfachreflexionen, die zu verschiedenen Plateaupunkten führen. Beim vollständig gefüllten Rohr sind diese Plateaupunkte verschwunden (s. auch Bild 8.3).

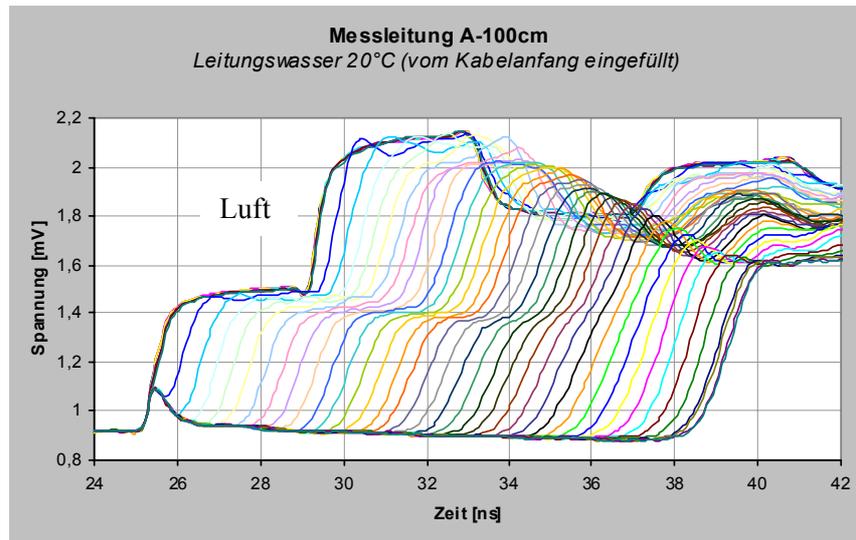


Bild 8.6 Schrittweises Befüllen eines Rohres mit Leitungswasser (Einfüllung vom Kabelanfang)

Bei der Darstellung Bild 8.6 wird das Kabel umgekehrt in das Rohr gehängt, d. h. der Kabelanfang liegt am Boden und wird mit aufsteigendem Wasser bedeckt. Die Kurven verlaufen bei geringen Füllhöhen fast parallel zur Kurve der Luft. In diesem Fall ist am Kabelanfang keine Luftstrecke vorhanden, an der Mehrfachreflexionen entstehen können. Die Reflexion ist am Plateaupunkt sichtbar, der durch den Übergang Wasser/Luft entsteht. Mit zunehmender Füllhöhe verschwindet der Plateaupunkt im mittleren Bereich, der Kabelsensor ist vollständig mit Wasser bedeckt. Bei dieser Kurvenschar ist zwischen Luft und der entsprechenden Wassermenge, d.h. der entsprechenden Füllhöhe eine sehr genaue Laufzeitbestimmung möglich. Mehrfachreflexionen entstehen bei größeren Füllhöhen erst im oberen Teil der Kurve, der der Laufzeit des Kabels entspricht. Durch die genaue Laufzeitbestimmung kann die Füllhöhe der Laufzeit zugeordnet werden und somit eine Ortsbestimmung erfolgen.

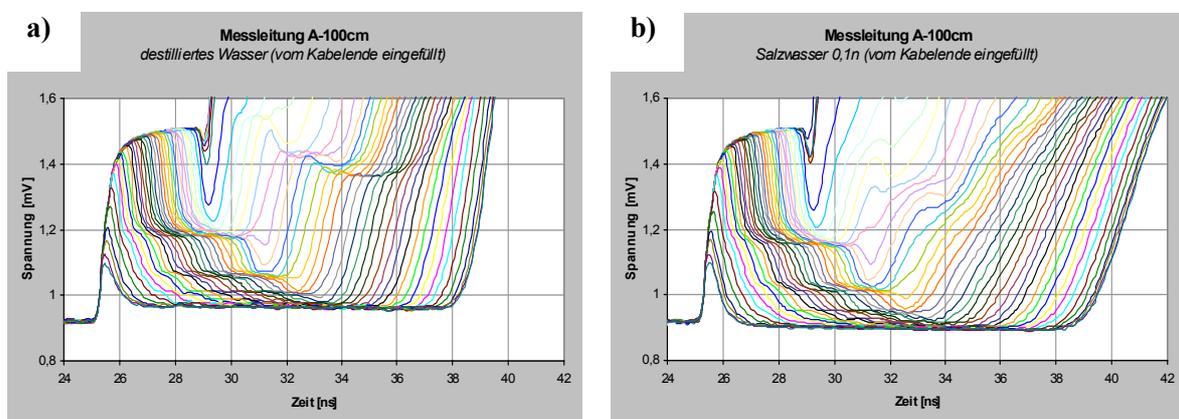


Bild 8.7 Schrittweises Befüllen eines Rohres mit a) mit destilliertem Wasser und b) mit 0,1 n Salzwasser (Einfüllung vom Kabelende)

Bild 8.7 zeigt das schrittweise Befüllen eines Rohres mit destilliertem Wasser (a) und mit 0,1-normaler (n) Salzlösung¹ (b); das Einfüllen erfolgte in Normallage vom Kabelende her. Der Anstieg der Impulsantwort (rechts im Bild 8.7b) bei verschiedenen Füllhöhen ist durch den Einfluss der Leitfähigkeit wesentlich geringer (s. Bild 5.13).

8.2 Feuchteverteilung in einem Trog mit Sand und Sand-Bentonit-Gemisch

Im Bild 8.8 wird eine Messanordnung gezeigt, mit der Feuchteverteilungen untersucht werden sollen. Ein Sensorkabel von 200 cm wurde hierbei in einem Trog mit feuchtem Sand eingebettet.



Bild 8.8 Messanordnung zur Bestimmung der Feuchteverteilung in einem Trog (Messleitung 200 cm)

Im Bild 8.9 sind Impulsantworten von Luft, trockenem Sand und Sandgemischen mit verschiedenen Wassergehalten aufgezeichnet. Mit der Erhöhung der Dielektrizitätskonstante verschiebt sich die Laufzeit nach höheren Werten.

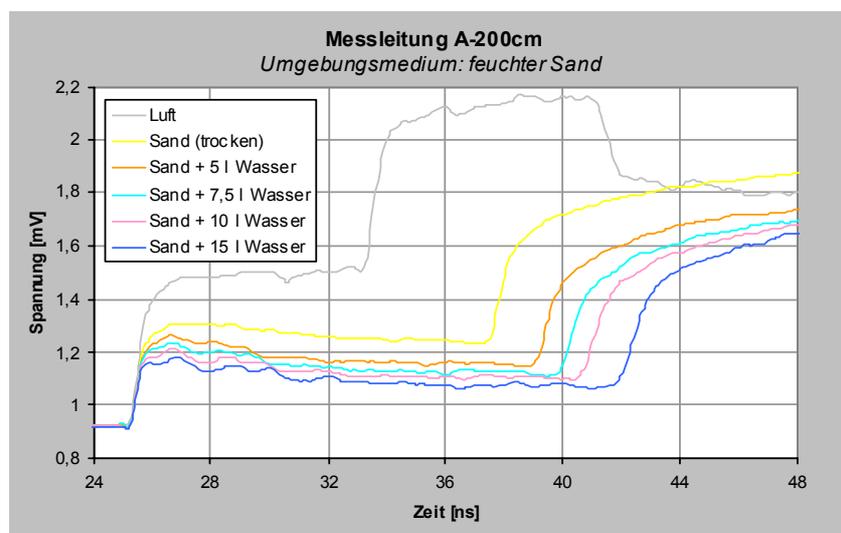


Bild 8.9 Impulsantworten von Luft, trockenem Sand und feuchtem Sand bei Erhöhung der Wasserdosierung

¹ Salinität der Normallösung: $1n = 74,555 \text{ g/l}$

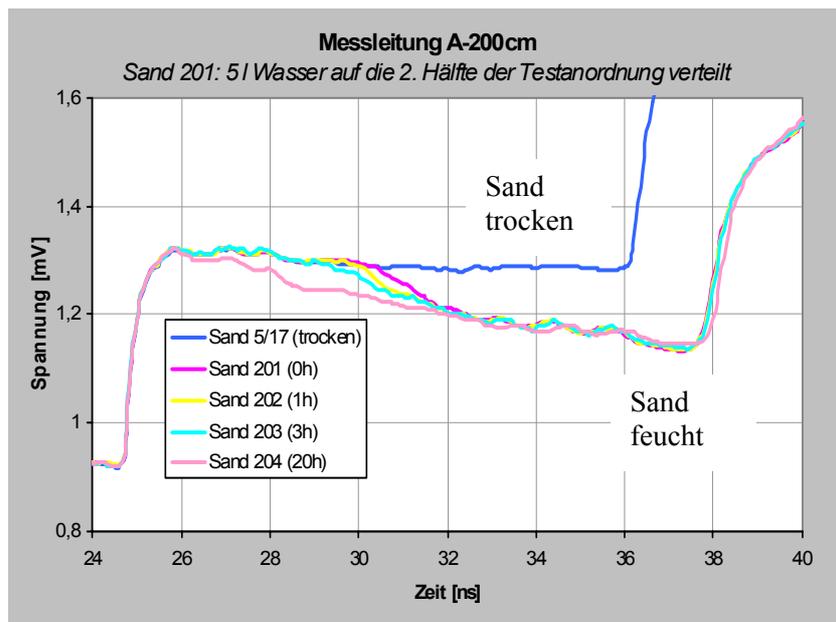


Bild 8.10 Feuchteprofil an einem Trog, bei dem nur die Hälfte des Sandes befeuchtet wurde

Im Bild 8.10 wurde die Messleitung mit trockenem Sand bedeckt und vom Kabelende bis zur Kabelmitte gleichmäßig befeuchtet. Die Kurve (blau) zeigt die Impulsantwort vom trockenem Sand. Die folgenden Kurven zeigen die Impulsantworten sofort (pink), 1 h (gelb), 3 h (türkis) bzw. 20 h (rosa) nach der Befeuchtung. Die Impulsantwort (rosa) zeigt, dass mit zunehmender Zeit das Wasser in den vorderen trockenen Teil des Sandes eindringt und eine Vergleichmäßigung einsetzt.

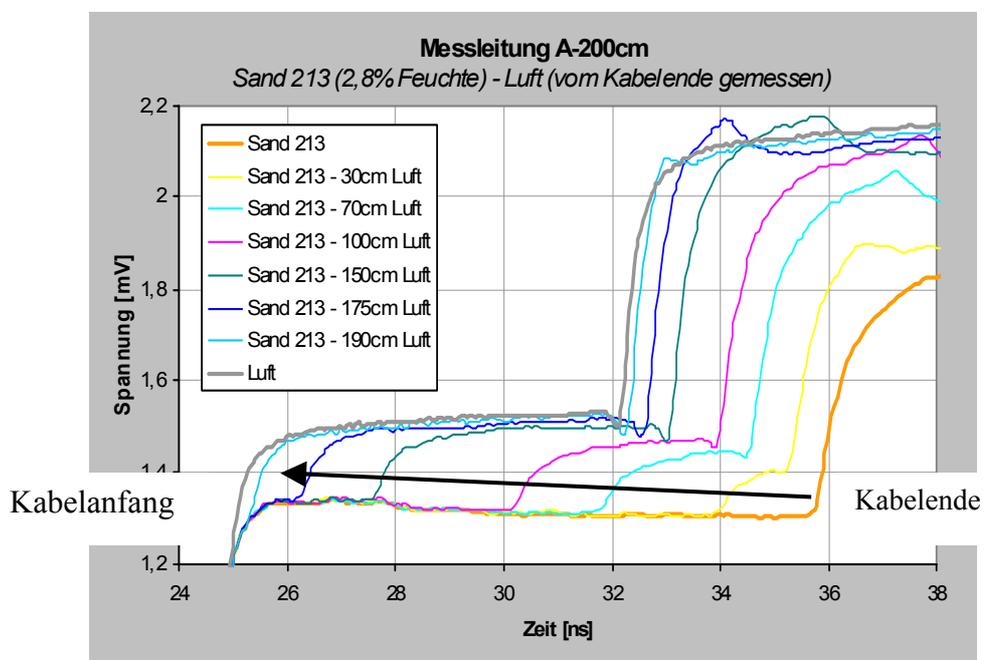


Bild 8.11 Impulsantworten beim schrittweisen Entleeren des Troges vom Kabelende im Vergleich zu den Impulsantworten von Luft und einem vollständig mit Sand gefülltem Trog

Bild 8.11 zeigt Impulsantworten, die beim schrittweisen Entleeren des Troges vom Ende des Kabels her entstehen, im Vergleich zu den Impulsantworten von Luft und einem vollständig mit Sand gefülltem Trog (Sandfeuchte 2,8 %).



Bild 8.12 Sensorkabel zur Bestimmung der Impulsantwort in Bentonitformsteinen

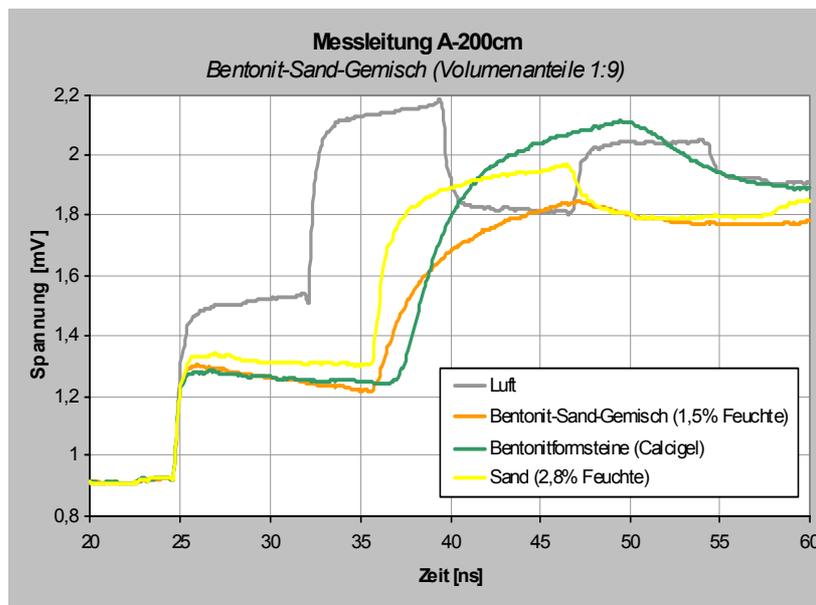


Bild 8.13 Impulsantworten von Luft, Sand (2,8 %), Sand-Bentongemisch und Bentonitformsteinen

Bild 8.12 zeigt ein eingebautes Sensorkabel zur Bestimmung der Impulsantwort von Bentonitformsteinen. Einen Vergleich der Impulsantworten von Luft, Sand mit 2,8 % Feuchte, einem Sand Bentonit-Gemisch mit 1,5 % Feuchte und Bentonitformsteinen wird im Bild 8.13 gezeigt. Die höhere Laufzeit beim Sand-Bentonit-Gemisch und bei den Bentonitformsteinen ist begründet durch die höhere Dielektrizitätskonstante bzw. durch den hohen Anteil von 8 – 10 % gebundenem Wasser im Bentonit.

8.3 Feuchteprofil in einem Trog mit Kammern

Zur Untersuchung von Feuchteprofilen längs des Kabelsensors wurde ein Trog mit einer Unterteilung für das Befüllen mit unterschiedlichen Dielektrika verwendet (Bild 8.14). Das Kabel wurde zunächst senkrecht eingesetzt, um Wasseransammlungen auf der Kabeloberfläche zu vermeiden.



Bild 8.14 Trog mit Kabelsensor und Kammern, die mit Materialien unterschiedlicher Feuchte befüllt werden können

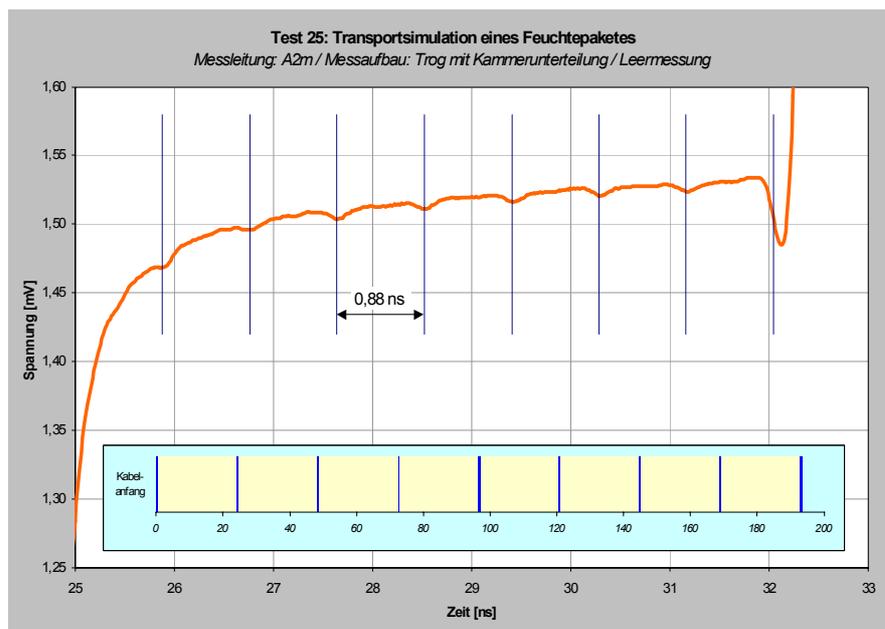


Bild 8.15 Abbildung der Kammerunterteilung auf der Impulsform

Bild 8.15 zeigt die Abbildung der Kammerunterteilung auf die Form der Impulsantwort.

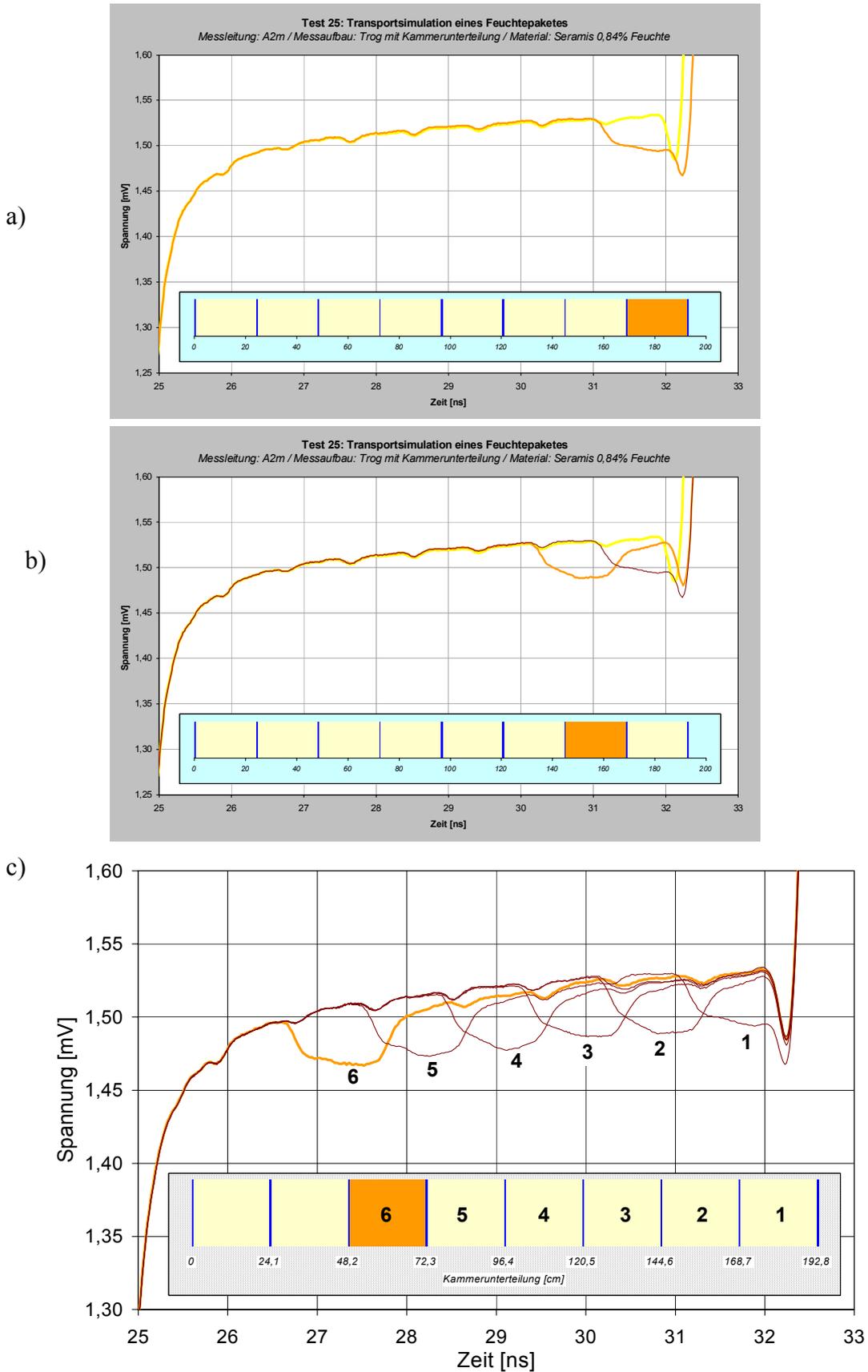


Bild 8.16 Darstellung des Transportes eines Feuchtpaketes durch die Impulsform

Beim Versuch (Bild 8.16) wurde bei einer Messung nur jeweils eine Kammer mit Sand (Feuchtegehalt ca. 0,5 %) befüllt (1), dabei entstand die Kurve mit Impulsform 1 (Bild 8.16a). Danach

wurde die Kammer 2 befüllt (Bild 8.16b) usw. bis Kammer 6 (Bild 8.16c) und die entsprechende Impulsform 6 erreicht waren. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass mit der Impulsform Veränderungen der Feuchte im Trog bzw. ein Feuchteprofil aufgezeichnet werden können. (Die Kurven 1 – 5 resultierten aus früheren Messungen; die Kurve 6 zeigt den aktuellen Zustand).

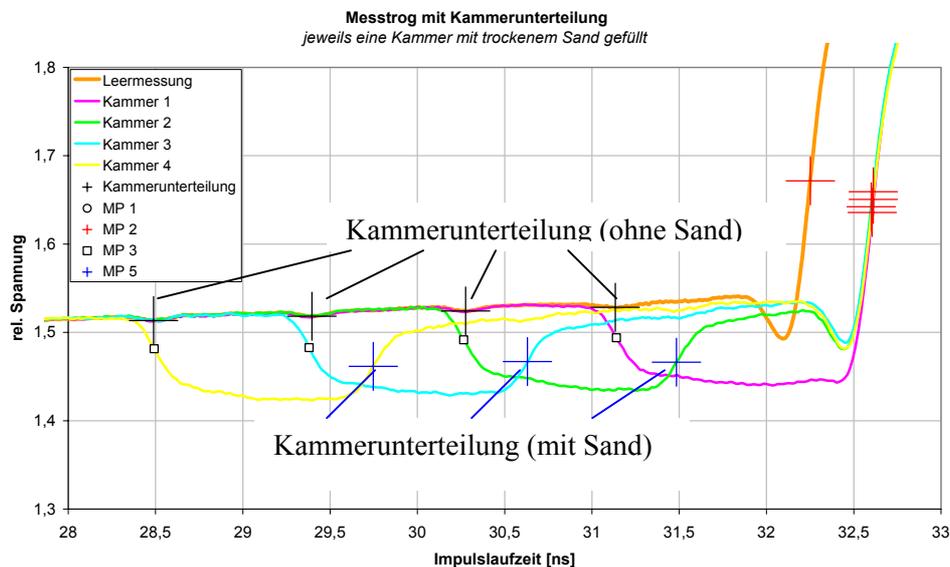


Bild 8.17 Messtrog mit Kammerunterteilung – jeweils eine Kammer mit trockenem Sand gefüllt

Im Bild 8.17 sind die Kammerteilungen des leeren Messtroges und deren Verschiebungen dargestellt, wenn jeweils ein Kammer mit trockenem Sand befüllt ist. Anfangs- und Endpunkt der Kammer (+) liegen jeweils auf dem Wendepunkten des Impulsverlaufes. Die Verschiebung der Kammer wird im Impulsverlauf deutlich abgebildet, der Kurvenverlauf rückt nach rechts, bleibt aber unverändert.

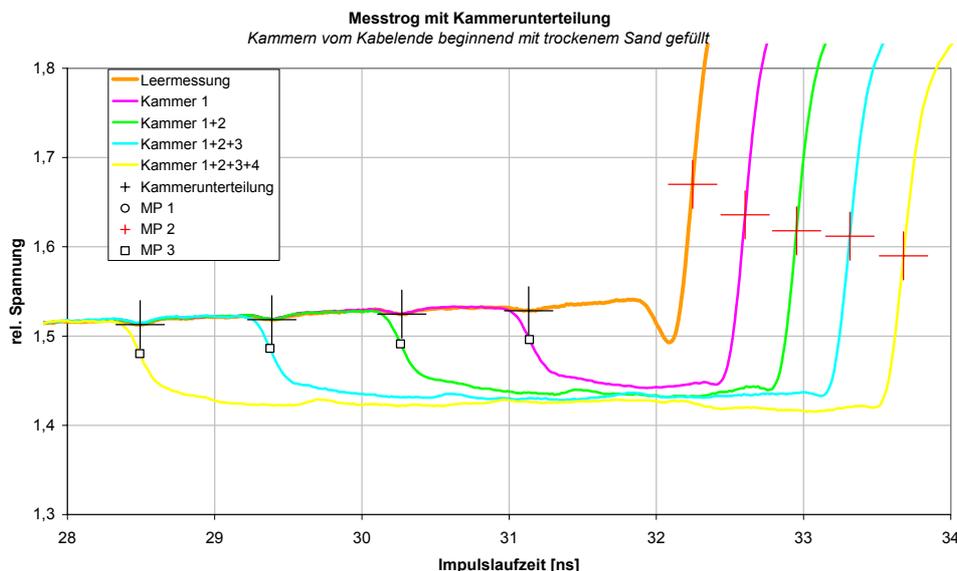


Bild 8.18 Messtrog mit Kammerunterteilung – Kammern vom Kabelende beginnend mit trockenem Sand befüllt

Beim Impulsverlauf Bild 8.18 werden die Kammern beginnend vom Kabelende mit Sand befüllt. Im Vergleich zu Bild 8.17 entstehen sowohl Veränderungen der Impulsverläufe für 1 Kammer, 1+2 Kammern 1+2+3 Kammern und 1+2+3+4 Kammern, aber auch zeitliche Verschiebungen in Abhängigkeit von der Zahl der Kammern.

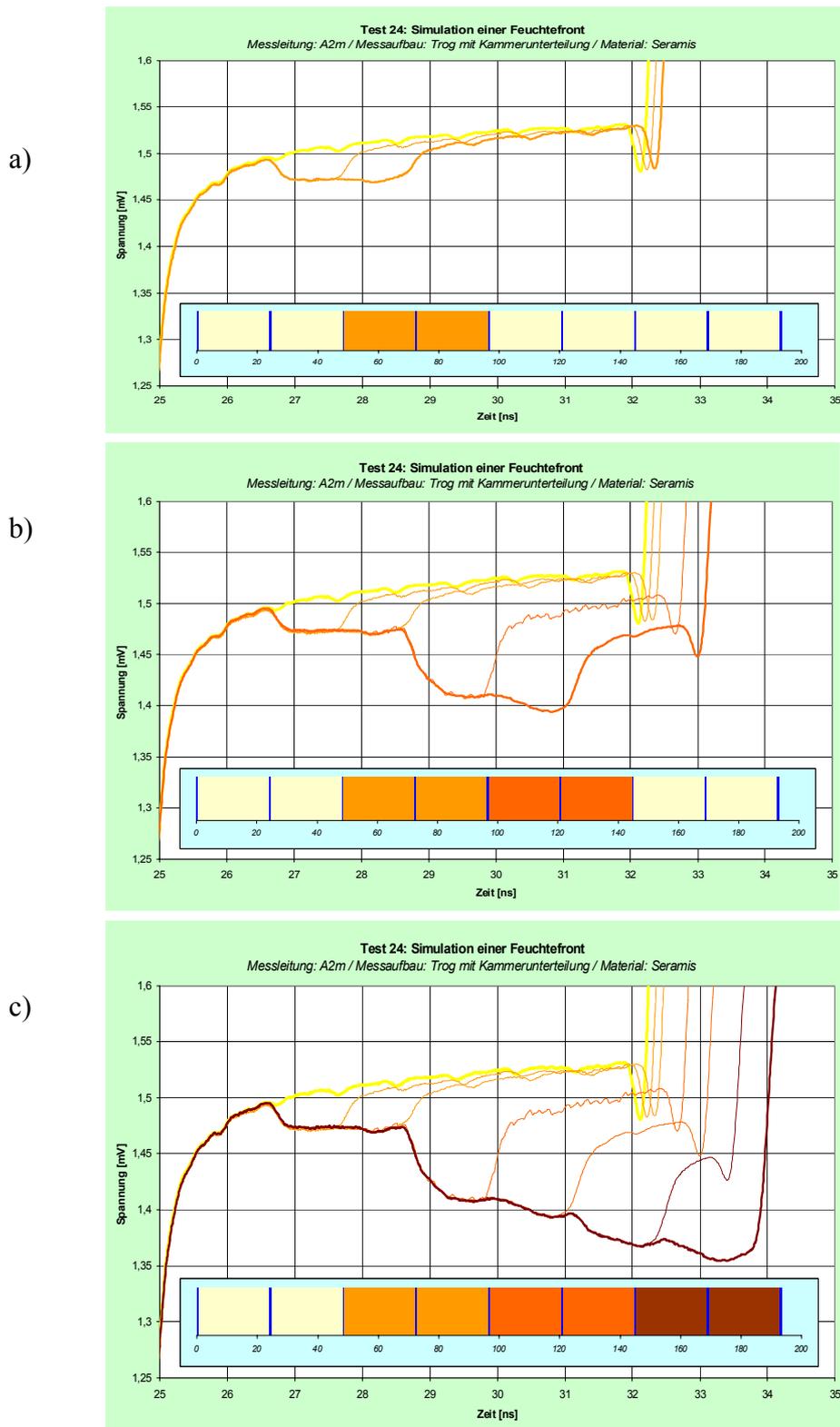


Bild 8.19 Feuchteprofil im Trog bei verschieden feuchten Material (Seramis)

Im Bild 8.19 wird das Feuchteprofil von Seramis im Trog gezeigt, wenn 3 unterschiedliche Feuchtwerte (3 %, 10 % und 17 %) eingestellt wurden. Bei diesem Versuch wurden zwei

nebeneinanderliegende Kammern mit Materialien gleicher Feuchte befüllt (Bilder 8.19a, b, c). Beim Vergleich von Bild 8.16 und 8.19 wird gezeigt, dass sowohl die Amplitude, aber auch die Laufzeit bei der Erhöhung der Feuchte beeinflusst werden.

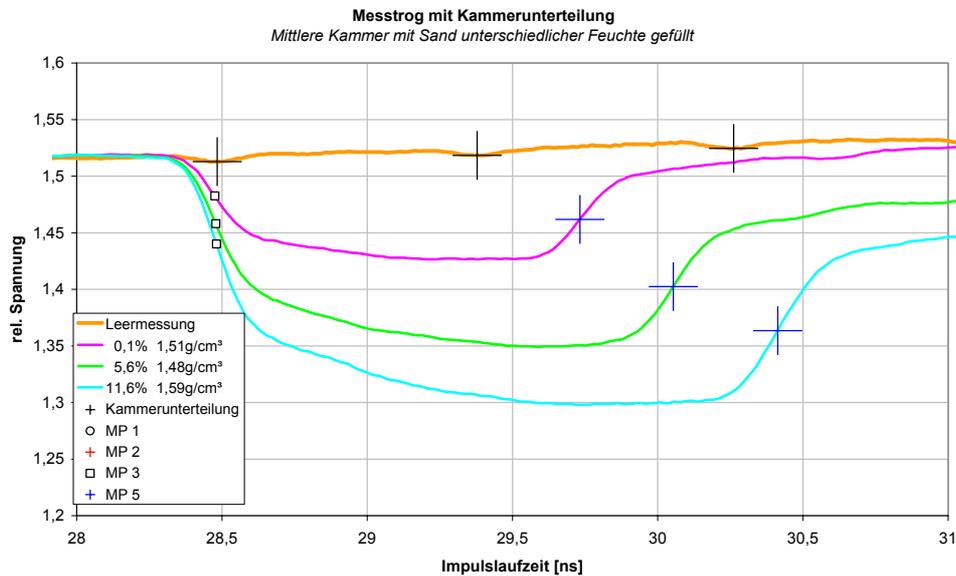


Bild 8.20 Messtrog mit Kammerunterteilung – mittlere Kammer mit Sand unterschiedlicher Feuchte befüllt.

Bild 8.20 zeigt die Befüllung der mittleren Kammer mit Feuchtegehalten von 0,1 %, 5,6 % und 11,6 %. Mit steigender Feuchte verschiebt sich das Ende der Kammer (+) zu höheren Laufzeiten und zu geringeren Amplituden des Impulsverlaufes.

Bild 8.21 zeigt einen Versuchsaufbau zur Bestimmung von Feuchte und Dichte in einem Bentonit-Sand-Gemisch (Volumenanteile 4:6). Das Messgut befindet sich in der mittleren Kammer.

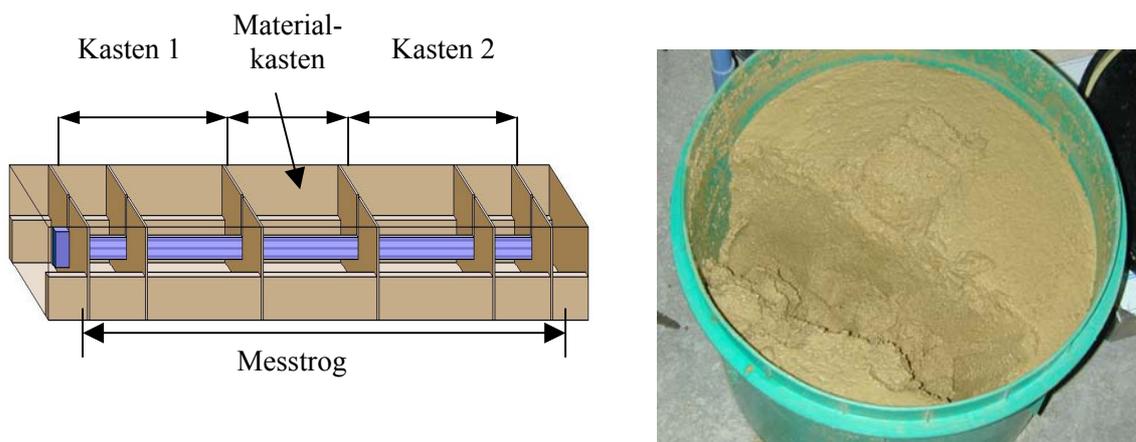


Bild 8.21 Versuchsaufbau zur Feuchte- und Dichtebestimmung in einem Bentonit-Sandgemisch (Volumenanteile 4:6)

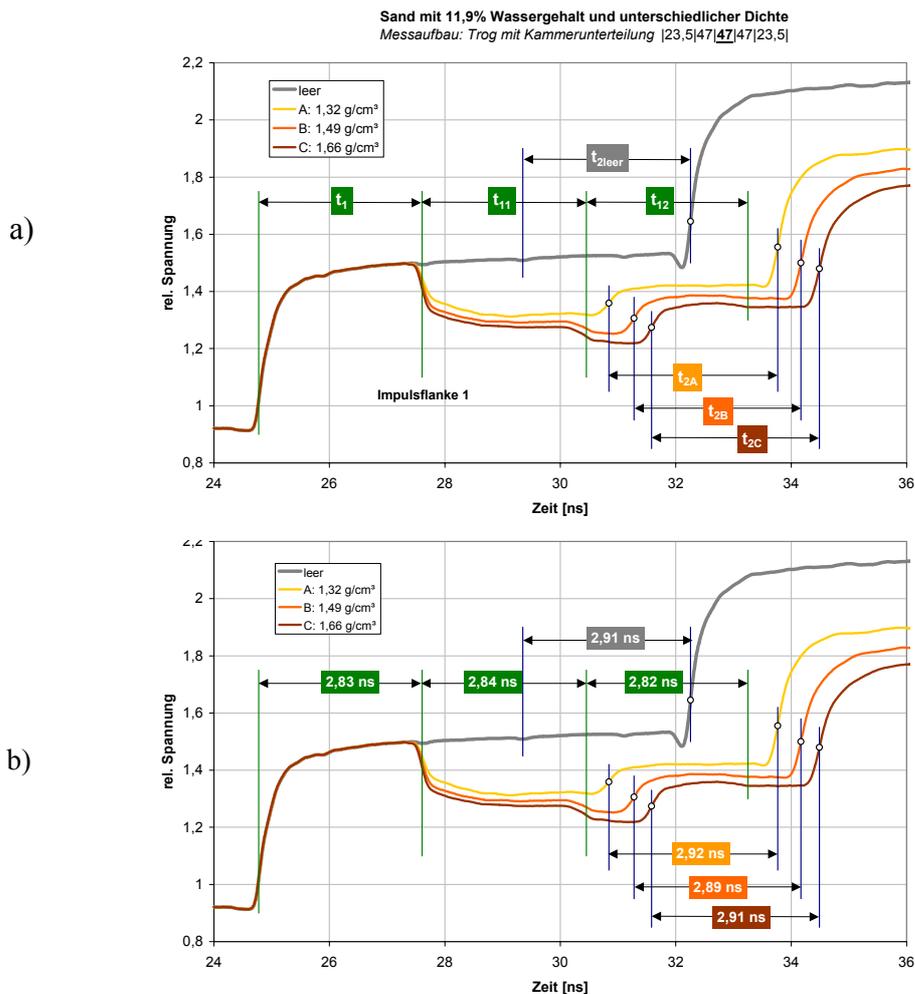


Bild 8.22 Einfluss der Dichte bei konstanter Feuchte (11,9 %) auf Veränderungen der Laufzeit eines 2 m-Kabelsensors a) Messgrößen; b) Werte

Bei konstanten Feuchtwerten führen Veränderungen der Dichte zur Erhöhung der Laufzeit (vgl. Bild 8.22). Im Vergleich dazu wird die Impulsantwort von Luft gezeigt. Ein Dichteerhöhung ist mit einer Zusammendrängung von Wasserbahnen und damit mit einer Erhöhung der Dielektrizitätskonstante verbunden. Tabelle 8.1 zeigt die im Bild 8.22a aufgeführten Laufzeiten und deren Bezeichnungen; die Werte der Laufzeiten werden im Bild 8.22b aufgeführt.

Tab. 8.1 Laufzeiten nach Bild 8.22a, Werte und Bezeichnungen

Größe	Wert	Bezeichnung
t_1	2,83 ns	Laufzeit im leeren Kasten 1
t_2		Laufzeit im leeren Kasten 2
$t_{2\text{leer}}$	2,91 ns	Laufzeit im leeren Kasten 2 bei leerem Materialkasten
t_{2A}	2,92 ns	Laufzeit im leeren Kasten 2; Materialkasten gefüllt mit Dichte A = 1,32g/cm³
t_{2B}	2,89 ns	Laufzeit im leeren Kasten 2; Materialkasten gefüllt mit Dichte B = 1,49g/cm³
t_{2C}	2,91 ns	Laufzeit im leeren Kasten 2; Materialkasten gefüllt mit Dichte C = 1,66g/cm³
t_{11}	2,84 ns	Laufzeit der 1. Reflexion der Impulsflanke 1
t_{12}	2,82 ns	Laufzeit der 2. Reflexion der Impulsflanke 1

Mit den Darstellungen im Bild 8.22 soll versucht werden, Veränderungen der Dichte zu quantifizieren. Aus den Messwerten lassen sich folgende Näherungen für die Reflexionen der ersten Impulsflanke ableiten:

$$t_1 \cong t_{11} \cong t_{12} \quad (8.1)$$

Die Impulslaufzeiten t_2 sind sowohl bei leerem Kasten, als auch bei mit Material gefüllten Kasten näherungsweise gleich:

$$t_{2\text{leer}} \cong t_{2A} \cong t_{2B} \cong t_{2C} \quad (8.2)$$

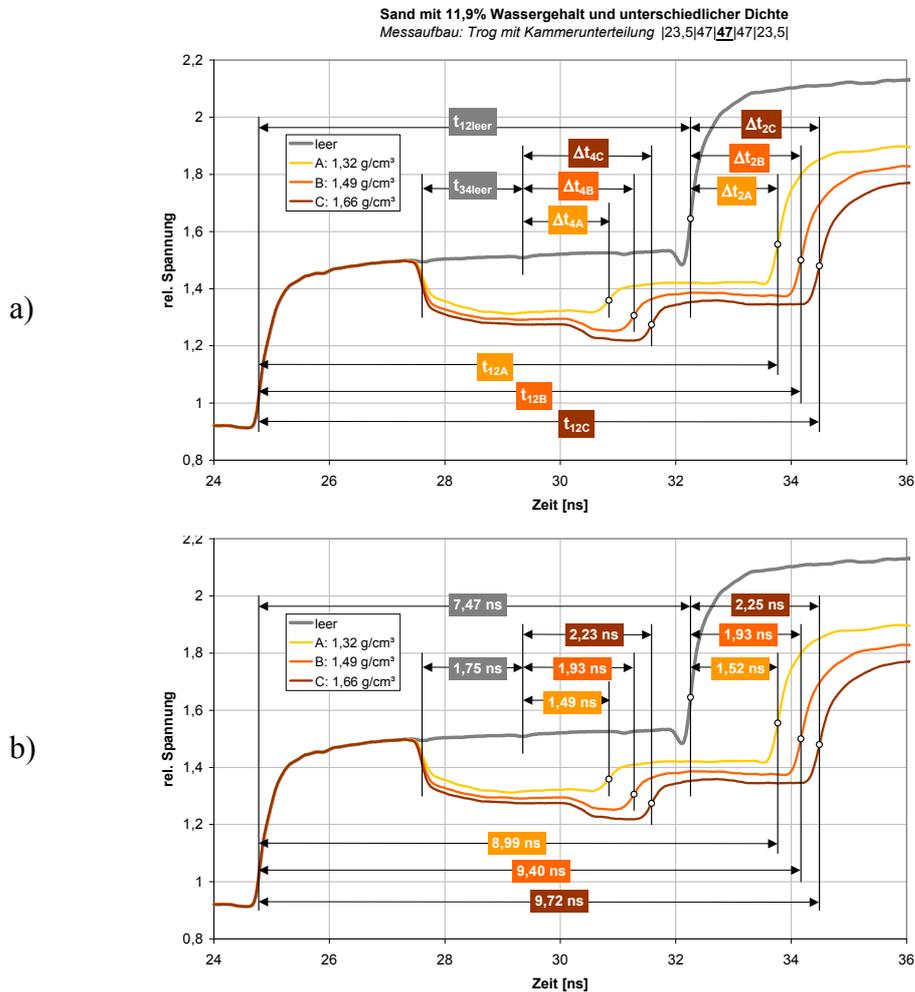


Bild 8.23 Bestimmung der Laufzeiten bei einem Material mit konstanter Feuchte (11,9%) und unterschiedlicher Dichte eines 2 m-Kabelsensors a) Messgrößen, b) Werte

Tab. 8.2 Laufzeiten nach Bild 8.23a, Werte und Bezeichnungen

Größe	Wert	Bezeichnung
$t_{12\text{leer}}$	7,47 ns	Laufzeit im leeren Messtrog
$t_{34\text{leer}}$	1,56 ns	Laufzeit im leeren Materialkasten
t_{12A}	8,99 ns	Gesamtlaufzeit bei gefüllten Materialkasten mit Dichte A = 1,32 g/cm ³
t_{12B}	9,40 ns	Gesamtlaufzeit bei gefüllten Materialkasten mit Dichte B = 1,49 g/cm ³
t_{12C}	9,72 ns	Gesamtlaufzeit bei gefüllten Materialkasten mit Dichte C = 1,66 g/cm ³

Aus Bild 8.23 ergeben sich folgende Näherungen:

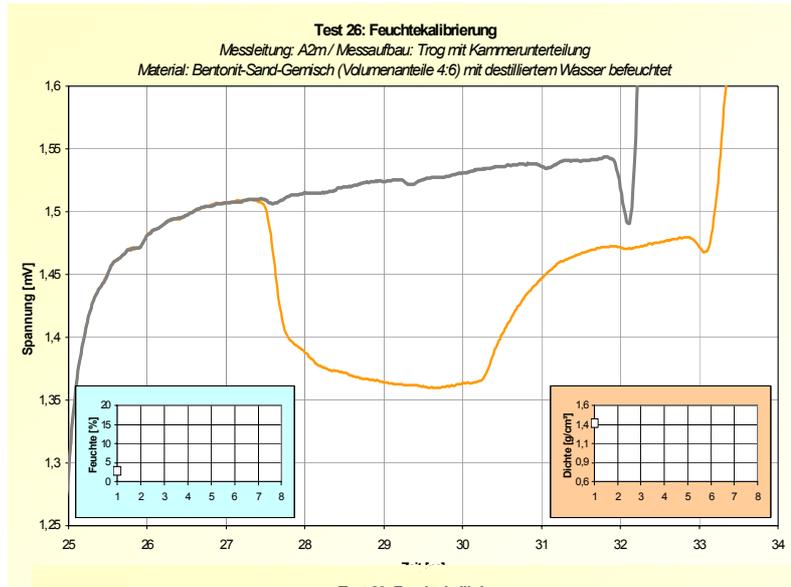
$$\Delta t_{2A} = t_{12A} - t_{12\text{leer}} \quad (8.3)$$

$$\Delta t_{2B} = t_{12B} - t_{12\text{leer}} \quad (8.4)$$

$$\Delta t_{2C} = t_{12C} - t_{12\text{leer}} \quad (8.5)$$

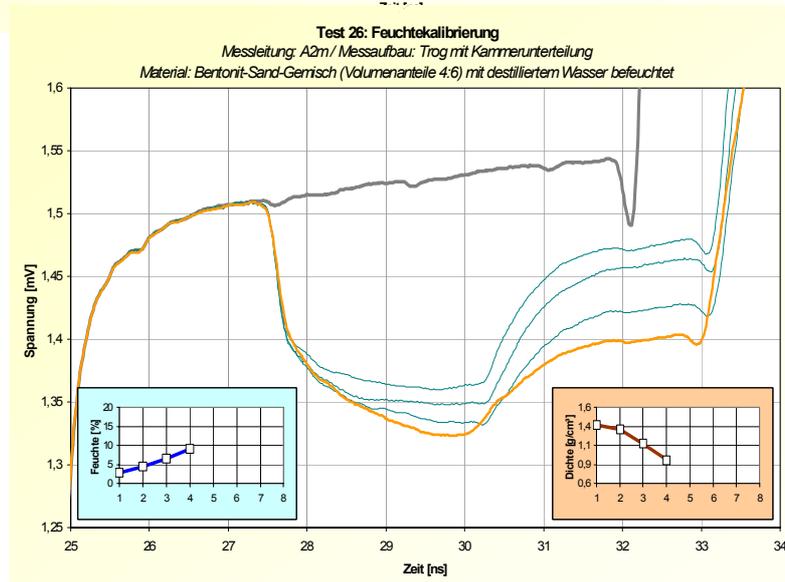
$$\Delta t_{4A} \cong \Delta t_{2A} ; \quad \Delta t_{4B} \cong \Delta t_{2B} ; \quad \Delta t_{4C} \cong \Delta t_{2C} \quad (8.6)$$

a)
 Feuchte = 2,81 %
 Dichte = 1,37 g/cm³



b)
 Feuchte = 9,16 %
 Dichte = 0,91 g/cm³

Feuchte %	Dichte g/cm ³
2,81	1,37
4,46	1,31
6,54	1,13
9,16	0,91



c)
 Feuchte = 18,42 %
 Dichte = 0,64 g/cm³

Feuchte %	Dichte g/cm ³
9,16	0,91
12,22	0,69
14,36	0,68
15,49	0,67
18,42	0,64

(pink)

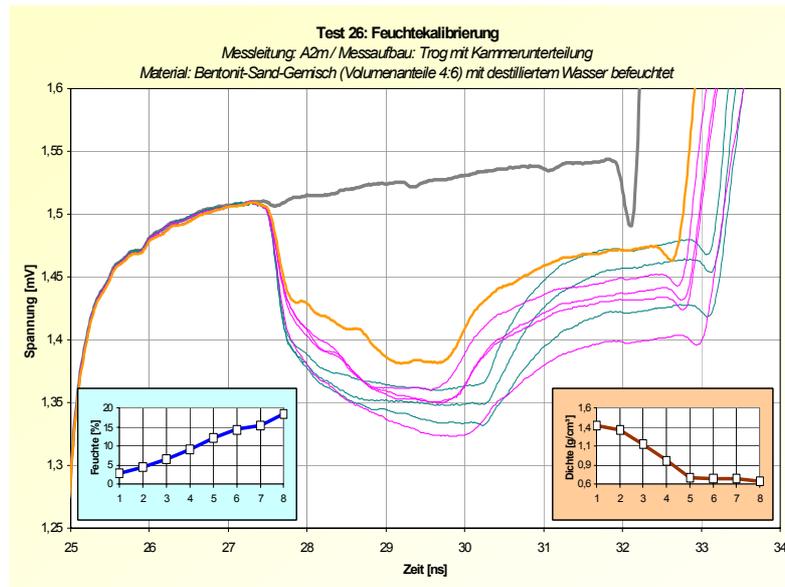


Bild 8.24 Impulsantworten bei Erhöhung der Feuchte in einem Bentonit-Sandgemisch

Bild 8.24 zeigt die Impulsantworten in einem Bentonit-Sandgemisch bei Erhöhung der Feuchte.

Ausgehend von einer Feuchte 2,8 % und einer Dichte von $1,37 \text{ g/cm}^3$ (Bild 8.24a) wird die Feuchte schrittweise zunächst bis zu 9,16 % gesteigert, die Dichte reduziert sich auf $0,91 \text{ g/cm}^3$ (Bild 8.24b). Die dazwischen liegenden Feuchtwerte korrespondieren mit dem in Bild 8.20b angegebenen Dichtewerten. Mit steigender Feuchte reduziert sich die Dichte. Die Impulsform passt sich diesem Verhältnis an, die Laufzeit ändert sich nur geringfügig. Im Bild 8.20c wird eine weitere Steigerung der Feuchte ab 9,16 – 18,42 % gezeigt, die Dichte reduziert sich von $0,91$ auf $0,64 \text{ g/cm}^3$. Trotz Feuchteerhöhung erreichen Impulsform und Laufzeit bei 9,16 % einen Umkehrpunkt, und gehen danach beträchtlich zurück (Kurven pink). Die Reduzierung der Dichte bzw. eine Verflüssigung (Thixotropie) entsteht durch das mechanische Homogenisieren des Bentonit-Sandgemisches bei hohen Feuchtwerten. Es ist die bei mechanischen Einwirkungen (z.B. Mischen) eintretende Verflüssigung viskoser Materialien, die vorher steif und zäh waren, sowie die wieder eintretende Verfestigung nach Abschluss der Bewegung. Sie beruht auf der Zerstörung von Strukturen, die sich im Ruhezustand über Nebervalenzverknüpfungen ausgebildet haben und sich nach Beendigung der mechanischen Einwirkungen wieder herstellen. Dieser Vorgang befindet sich im Bereich der Feuchtesättigung des Gemisches, in dem keine weitere Erhöhung der Dielektrizitätskonstante zustande kommen kann. Durch die Feuchtesättigung und die geringer werdende Dichte entsteht ein Umkehrpunkt von Impulsform und Laufzeit und ein rückläufiger Vorgang setzt ein.

8.4 Feuchteprofil beim kapillaren Saugen

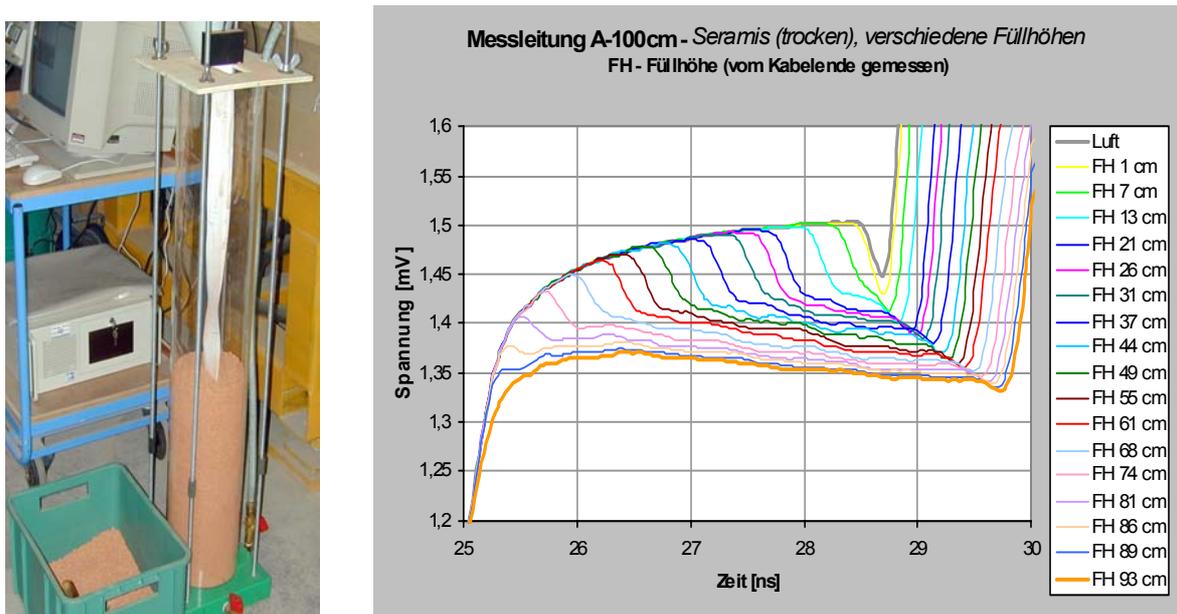


Bild 8.25 a) Versuchsstand zur Aufnahme des Feuchteprofils beim kapillaren Saugen
b) Impulsantworten in verschiedenen Füllhöhen des trockenen Seramis

Im Bild 8.25a wird der Versuchsstand zur Aufnahme des Feuchteprofils beim kapillaren Saugen gezeigt. Ausgehend von Luft zeigt Bild 8.25b die Veränderung der Impulsantwort an einem 1 m langen Kabelsensor bei Vergrößerung der Füllhöhe mit trockenem Seramis von 1 cm bis 93 cm.



Bild 8.26 Versuch kapillares Saugen

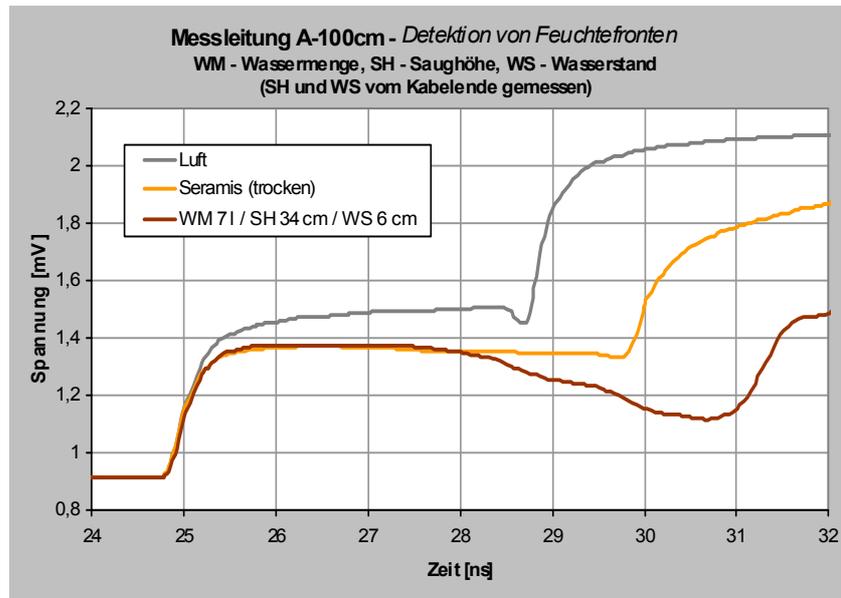
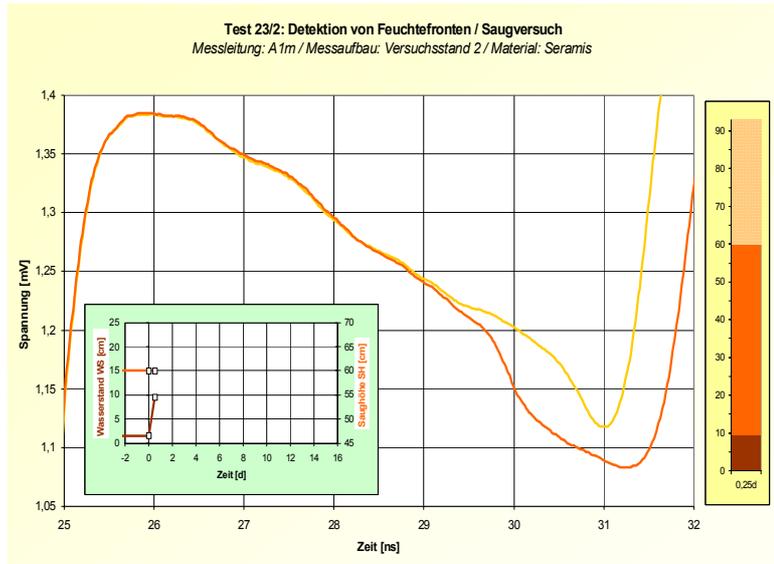


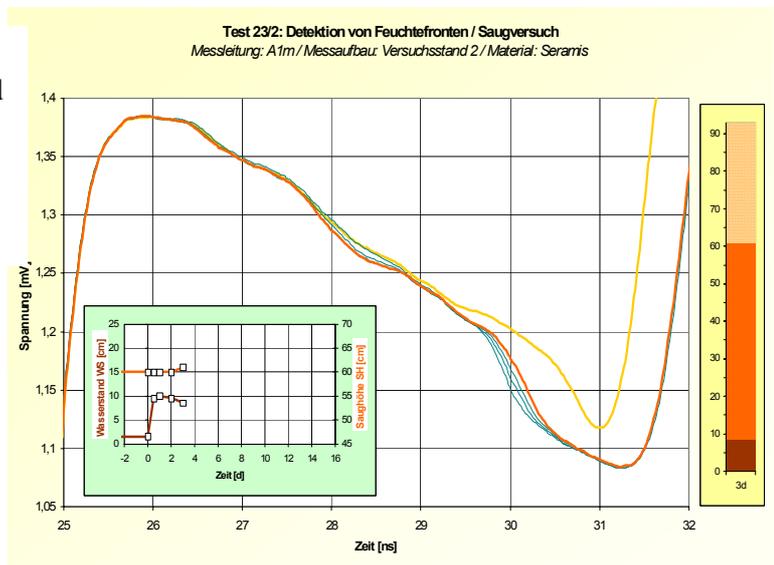
Bild 8.27 a) Versuchsstand für das kapillare Saugen; b) Vergleich der Impulsantworten von Luft, trockenem Seramis und feuchtem Seramis nach dem Einfüllen von 7 Liter Wasser (SH-Saughöhe; WS -Wassersäule)

Bild 8.26 und 8.27a zeigen den Versuchsstand für das kapillare Saugen. Im Bild 8.27b werden die Impulsantworten von Luft, trockenem und feuchtem Seramis nach dem Einfüllen von 7 Liter Wasser miteinander verglichen.

- a)
Ausgangszustand (gelb)
1. WM 8 l / SH 60 cm / WS 1,5 cm
2. WM 9 l / SH 60 cm / WS 9,5 cm
(braun)



- b)
WM 9 l / SH 60 cm / WS 10 cm / 1 d
WM 9 l / SH 60 cm / WS 9,5 cm / 2 d
WM 9 l / SH 61 cm / WS 8,5 cm / 3 d
(braun)



- c)
WM 9 l / SH 63 cm / WS 8 cm / 6 d
WM 9 l / SH 65 cm / WS 7 cm / 10 d
WM 9 l / SH 66 cm / WS 6,5 cm / 16 d
(braun)

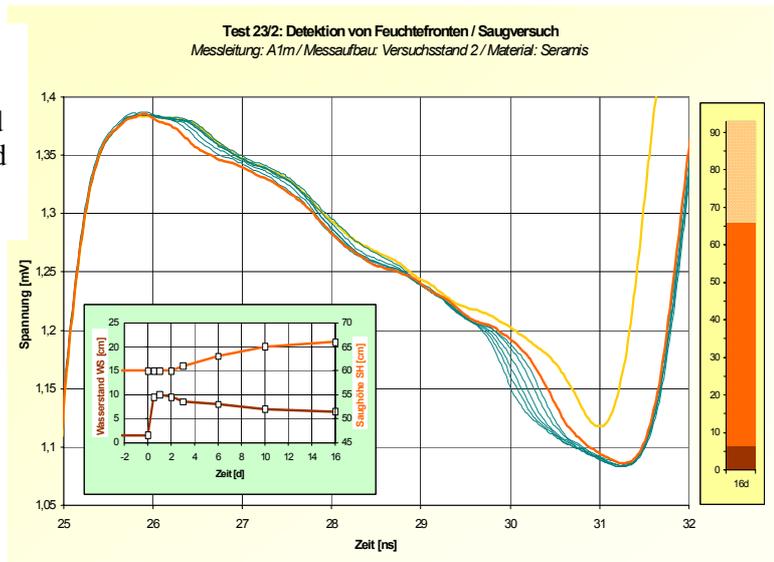


Bild 8.28 Kapillares Saugen mit Angabe der zugegebenen Wassermenge (WM), der am Boden befindlichen Wassersäule (WS) und der Saughöhe (SH)

Bild 8.28 zeigt den Vorgang des kapillaren Saugens mit Angabe der zugegebenen Wassermenge (WM), der am Boden befindlichen Wassersäule (WS) und der entstehenden Saughöhe (SH).

Im Bild 8.28a wird der Vorgang nach Zugabe von 8 bzw. 9 Liter Wasser gezeigt, es ist eine Wassersäule am Boden von 1,5 cm und eine Saughöhe von 60 cm vorhanden.

Ohne Wasserzugabe zeigt Bild 8.28b die Veränderung der Wassersäule und der Saughöhe nach einem, zwei und drei Tagen. Das kapillare Saugen wird vor allem im Bild 8.28c deutlich; die Wassersäule nimmt nach Messzeiten von 6, 10, 16 Tagen deutlich ab und die Saughöhe steigt. Die Impulsform der braunen Kurve geht im unteren Teil (rechts) etwas zurück, ein deutlicher Zuwachs ist im linken oberen Teil sichtbar, in dem die Verteilung der Feuchte über der Länge des Kabelsensors dargestellt wird.

8.5 Austrocknung eines Betonprismas

Bei der Herstellung unterirdischer Bauten, bei Brücken oder im Massebeton erhebt sich häufig die Fragestellung, wann der Beton soweit ausgetrocknet ist, dass die Schalung abgenommen werden kann. Zu diesem Zweck wurden Kabelsensoren in Betonprismen eingebaut. Der Kabelsensor war einmal mit einem Drahtkorb umgeben, im zweiten Fall nicht. Es sollte der Einfluss des elektrischen Feldes auf die Messgenauigkeit untersucht werden.



Bild 8.29 a) Einbau eines Kabelsensors in ein Betonprisma mit Drahtkorb; b) Versuchsaufbau nach Abnahme der Schalung; c) Messaufbau nach dem Ausschalen; c) Querschnitt mit Kabelsensor

Tab. 8.3 Rezeptur der Betonmischung

Zuschlag 1800 kg/m³; 50 % 0...4 und 50 % 4...8

Zement 32,5 R

w/z: 0,45...0,5

Zementgehalt 320 kg/m³ bzw. 160 Liter Wasser pro m³

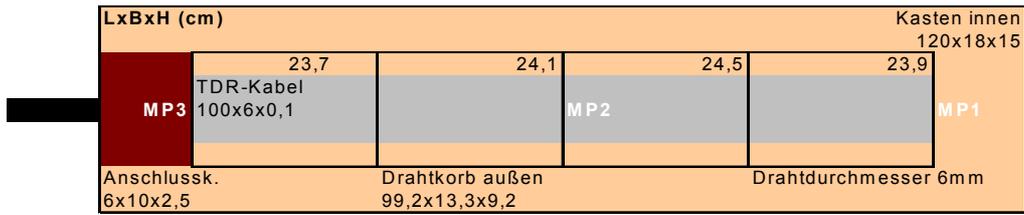


Bild 8.30 Lage des Kabelsensors im Betonprisma

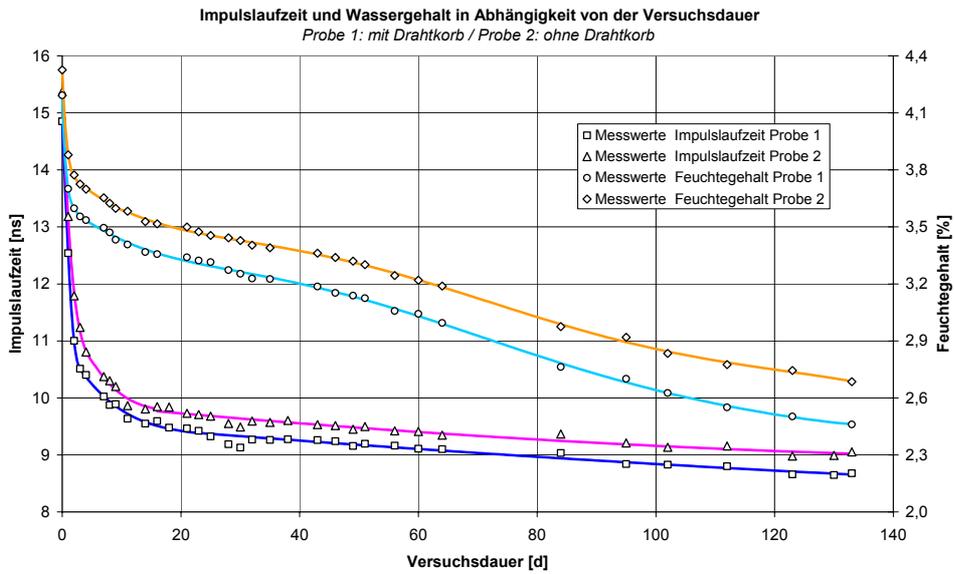


Bild 8.31 Impulslaufzeit und Feuchtegehalt in einem Betonprisma (mit und ohne Drahtkorb) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Tabelle 8.3 zeigt die Zusammensetzung der Betonmischung und Bild 8.30 die Lage des Kabelsensors im Drahtkorb des Prismas.

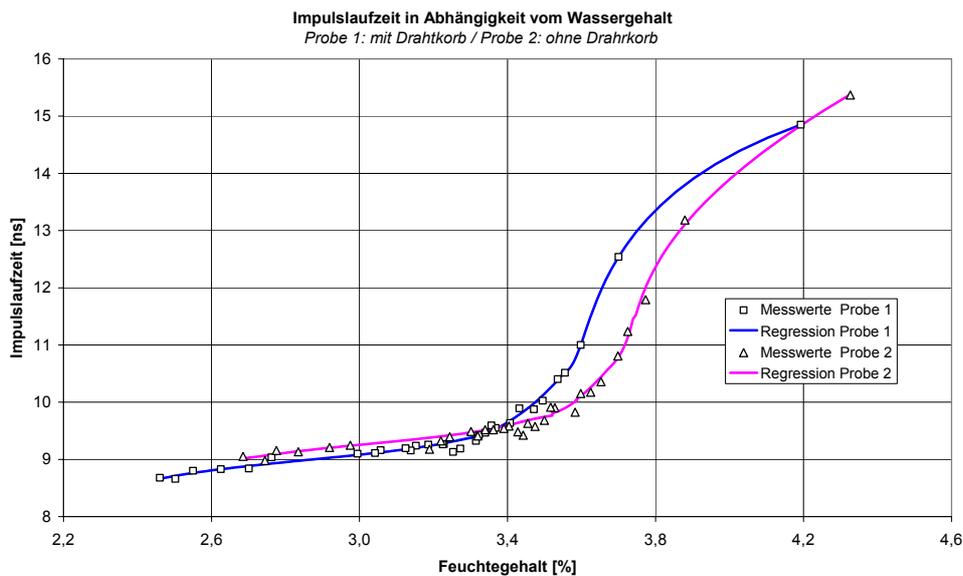


Bild 8.32 Impulslaufzeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt in einem Betonprisma (mit und ohne Drahtkorb)

Der Beton wurde in die Schalung eingebracht; danach wurden jeden Tag mit dem TDR-Kabelsensor Messwerte der Impulslaufzeit ermittelt und Wägungen durchgeführt. Nach einer Versuchsdauer von 135 Tagen erfolgte eine Referenztrocknung der Prismen bei 105°C. Bei der Bestimmung des Feuchtegehaltes wurden die täglich gemessenen Massewerte auf die Referenzmasse bezogen.

Bild 8.31 zeigt Feuchtegehalt und Impulslaufzeit in einem Betonprisma (mit und ohne Drahtkorb) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer. Nach den Messungen kann eingeschätzt werden, dass der Drahtkorb keine Rolle spielt, da das Bandkabel von den Stählen genügend weit weg war. Die veränderte Kurvenform beim Feuchtegehalt verglichen mit der Impulslaufzeit rührt daher, dass die Wasserverteilung im Innern des Prismas doch eine wesentlich andere ist, als dies bei den Referenzmessung ermittelt werden konnte, da die Oberfläche des Prismas zuerst austrocknet. Bild 8.32 zeigt die Impulslaufzeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Die hohen Werte der Impulslaufzeit bei Feuchtegehalten $>3,5\%$ rechts im Diagramm zeigen den frischen Beton; der geringe Abfall der Feuchte im Verlauf der Trocknung wird im Bereich $<3,4\%$ gezeigt.

9 Kalibrierung von Kabelsensoren im Sand-Bentonit-Gemisch

9.1 Grundlagen

Bei der Kalibrierung wird einem Feuchtwert, der nach dem Dörr-Wägeverfahren bestimmt wurde, ein elektrischer Messwert zugeordnet. Beim TDR-Verfahren ist ein Kalibrierwert durch die Laufzeit der Impulsantwort bei einer bestimmten Feuchte gekennzeichnet. Eine Kalibrierkurve dient der Quantifizierung der Feuchte und ist eine Funktion der Impulslaufzeit über einem breiten Feuchtebereich. Zur Erstellung einer TDR-Kalibrierkurve ist es notwendig, Impulsantworten von Kabelsensoren aufzunehmen, die vom Materialgemisch umgeben sind, dessen Feuchte vom trocknen Zustand bis zur Sättigung gesteigert wird. Im trockenen Zustand liegt beim Bentonit-Gemisch nur gebundenes Wasser vor; im Sättigungszustand ist das Gemisch mit Wasser gesättigt, und es tritt freies Wasser auf. Bei der Kalibrierung eines Sand-Bentonit-Gemisches muss jeder Feuchtwert mit neuem Material eingestellt werden, da durch den Quellvorgang neues hinzugefügtes Wasser sehr schwer oder gar nicht vom feuchten, teilweise gesättigten Material angenommen wird. Der Fehler der Reproduzierbarkeit gibt an, mit welcher Abweichung zwei oder mehrere aufeinander folgende Kalibrierungen, die unter gleichen Messbedingungen durchgeführt wurden, auseinanderliegen.



a)



b)



c)

Bild 9.1 a) Messaufbau zur Kalibrierung mit eingebautem Sensor; b) Lage des Kabelsensors im Sand-Bentonit-Gemisch; c) Entnahme von Materialproben unter dem Kabelsensor zur Bestimmung von ϵ_r' und $\tan\delta$ mit dem Netzwerkanalysator

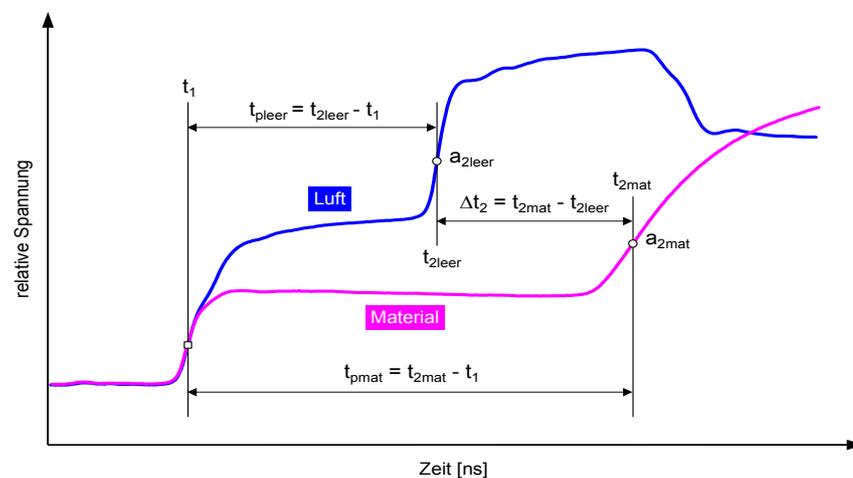


Bild 9.2 Definition der Laufzeiten bei der Kalibrierung

Die Bestimmung der Laufzeit erfolgte nach dem Wendepunkt-Verfahren nach Bild 5.11. Die Laufzeiten eines Kabelsensors sind nach Bild 9.2 wie folgt definiert:

Die Impulslaufzeit t_1 resultiert aus Verzögerungen bedingt durch die Zuleitung (Koaxleitung) zum Kabelsensor. Die Impulslaufzeit $t_{p\text{leer}} = t_{2\text{leer}} - t_1$ ist die Laufzeit durch ein mit Luft umgebenes Messkabel (Gl. 9.1). Die Differenz der Laufzeit zwischen einem mit Material umgebenen und einem mit Luft umgebenen bzw. leeren Kabel wird als Δt_2 in Gl. 9.2 angegeben.

Die Impulslaufzeit $t_{p\text{mat}}$ ist die Laufzeit in einem mit Material umgebenen Sensor (Gl.9.3).

Die Differenz des Impulsanstieges Δa_2 ergibt sich aus dem Impulsanstieg eines mit Luft umgebenen Kabelsensors $a_{2\text{leer}}$ zum Impulsanstieg des mit Material umgebenen Kabelsensors $a_{2\text{mat}}$ (Gl. 9.4).

$$t_{p\text{leer}} = t_{2\text{leer}} - t_1 \quad (9.1)$$

$$\Delta t_2 = t_{2\text{mat}} - t_{2\text{leer}} \quad (9.2)$$

$$t_{p\text{mat}} = t_{2\text{mat}} - t_1 \quad (9.3)$$

$$\Delta a_2 = a_{2\text{leer}} - a_{2\text{mat}} \quad (9.4)$$

9.2 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Leitungswasser

Bei der Kalibrierung Kal 01 wurde ein Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Volumenverhältnis 50 : 50) ausgehend von 4,7 % in Schritten 9,0 %; 13,6 %; 18,4 %; 22,0 %; 25,5 %; 31,3 % mit Leitungswasser befeuchtet bis bei 36,9 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.3 gezeigt.

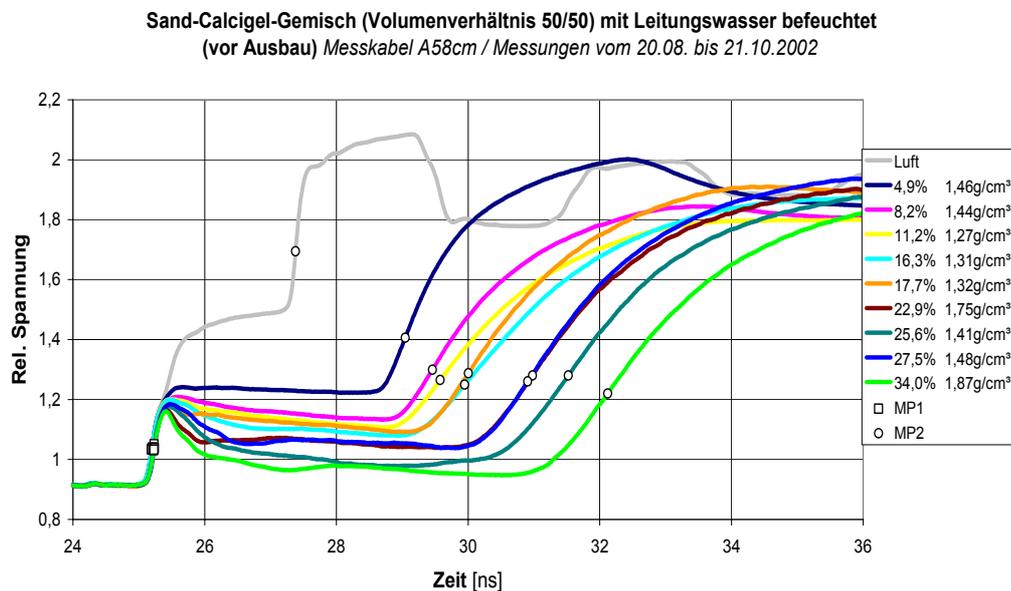


Bild 9.3 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches (Volumenverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchten (mit Leitungswasser befeuchtet)

Im Diagramm Bild 9.4 werden die Differenzen der Impulslaufzeiten Δt_2 der mit Material umgebenen Kabelsensoren zur Impulsantwort der Luft in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt aufgezeigt. In Abhängigkeit vom Feuchtegehalt zeigt die Differenz der Impulslaufzeit eine kubische Abhängigkeit. Im Feuchtebereich von 5 – 10 % ist dies durch gebundenes Wasser und im Bereich >30 % durch die Feuchtesättigung bedingt. Die Differenz des Impulsanstieges Δa_2 steigt zu-

nächst steil an und bleibt im Feuchtebereich von >12 % relativ konstant; während die Dichte im gesamten Bereich relative Konstanz aufweist.

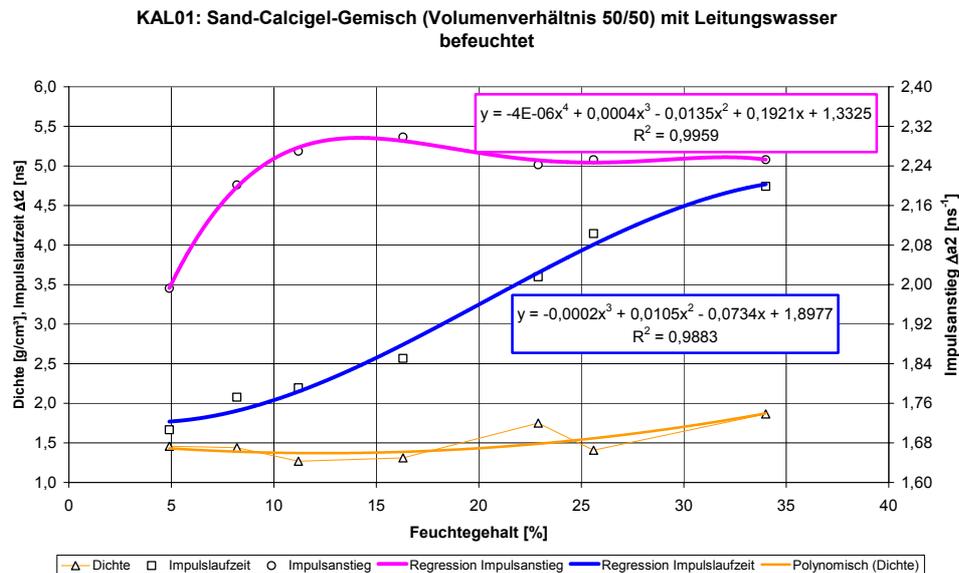


Bild 9.4 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Volumenverhältnis 50 : 50)

Bei der Kalibrierung Kal 03 wurde im Vergleich zu Kal 01 ein Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 4,2 % in Schritten 7,3 %; 14 %; 21,5 %; 28,7 %; 34,8 %; mit Leitungswasser befeuchtet bis bei 38,9 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.5 gezeigt.

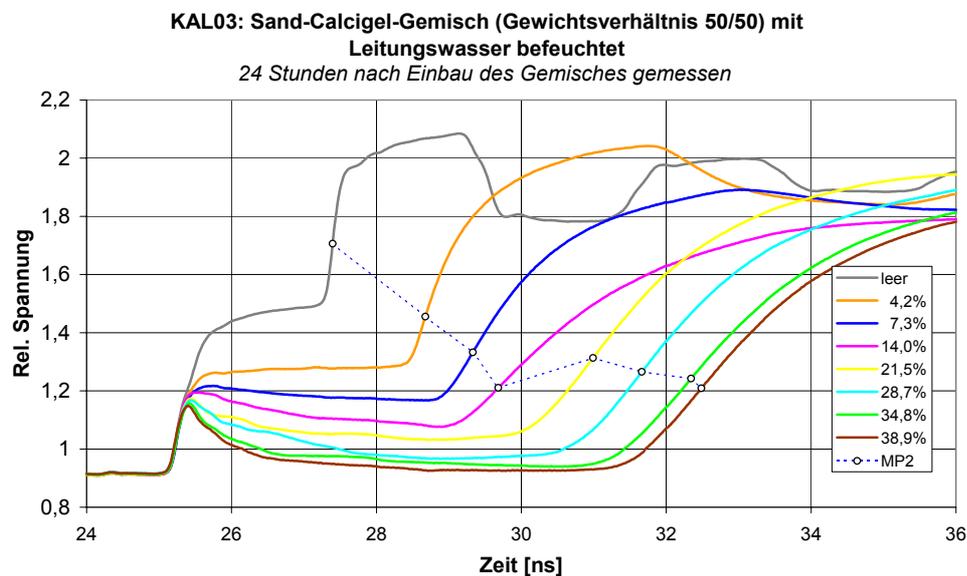


Bild 9.5 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Leitungswasser befeuchtet)

Im Bild 9.6 werden Differenzen von Impulslaufzeit und -anstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt gezeigt. Die Impulslaufzeiten, die aus Bild 9.5 bestimmt wurden, nehmen über dem Feuchtegehalt im Bereich von 10 – 30 % näherungsweise linear zu, wobei die Feuchtdichte in diesem Bereich relativ konstant bleibt. Aus der Mischung nach

Volumen- und Massenverhältnissen (Bilder 9.3 und 9.5) resultieren keine wesentlichen Unterschiede. Der Impulsanstieg (Bild 9.4) steigt bis zu einem Feuchtegehalt von ca. 12 % stark an, sinkt danach bis 20 % leicht ab und bleibt danach bis 39 %, d.h. im Bereich der Feuchte-sättigung, relativ konstant.

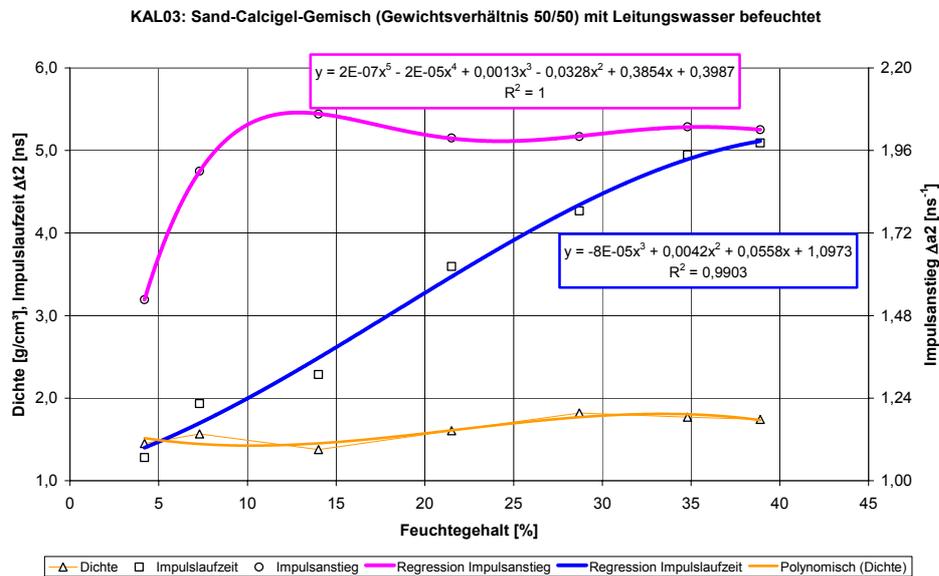


Bild 9.6 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50)

9.3 Kalibrierung eines Sand-MX 80-Gemisches mit Leitungswasser

Bei der Kalibrierung Kal 04 wurde ein Sand-MX 80-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 5 % in Schritten 11,4 %; 18,3 %; 28,1 %; 33,5 %; mit Leitungswasser befeuchtet bis bei 41,5 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten wurden im Bild 9.7 aufgezeichnet.

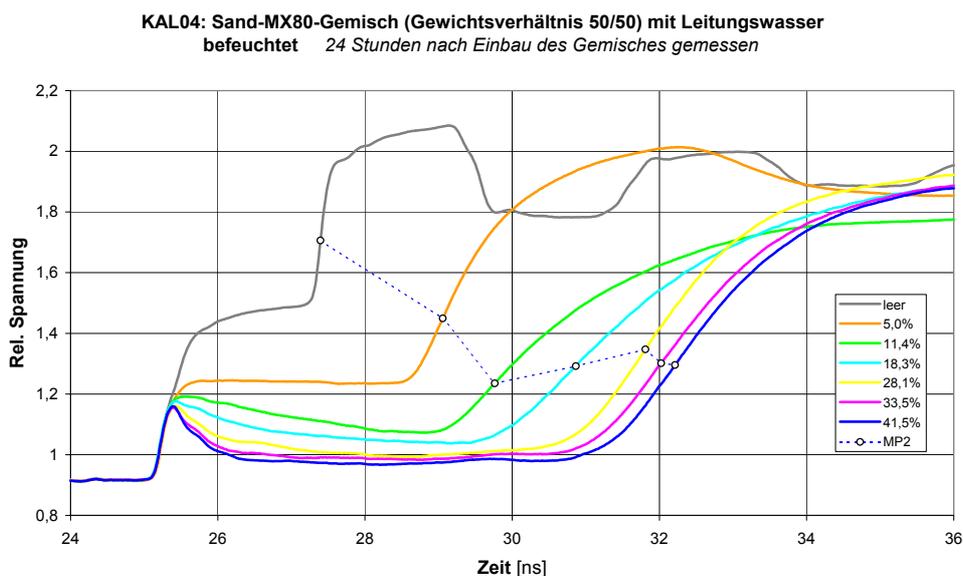


Bild 9.7 Impulsantworten eines Sand-MX 80-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Leitungswasser befeuchtet)

Aus dem Vergleich der Differenzen der Impulslaufzeiten (Bild 9.6 und 9.8) resultiert beim Calcigel-Granulat eine wesentlich höhere Linearität über einem Bereich des Feuchtegehaltes von ca. 7 % bis zu 34 %; bei MX-80 liegt diese Linearität im Bereich des Feuchtegehaltes von ca. 7 – 17 % vor. Über diesen Grenzen befindet sich der Bereich der Feuchtesättigung.

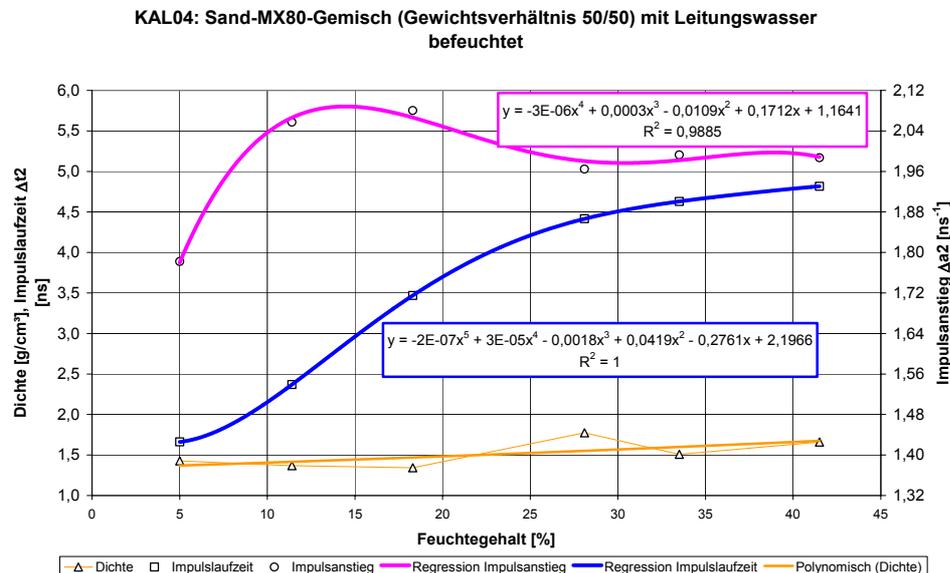


Bild 9.8 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-MX80-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50)

9.4 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Leitungswasser

Bei der Kalibrierung Kal 06 wurde ein Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 3,4 % in Schritten 9,7 %; 19,5 %; 24,9 %; 29,2 %; 39,7 % mit Leitungswasser befeuchtet bis bei 39,7 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.9 gezeigt.

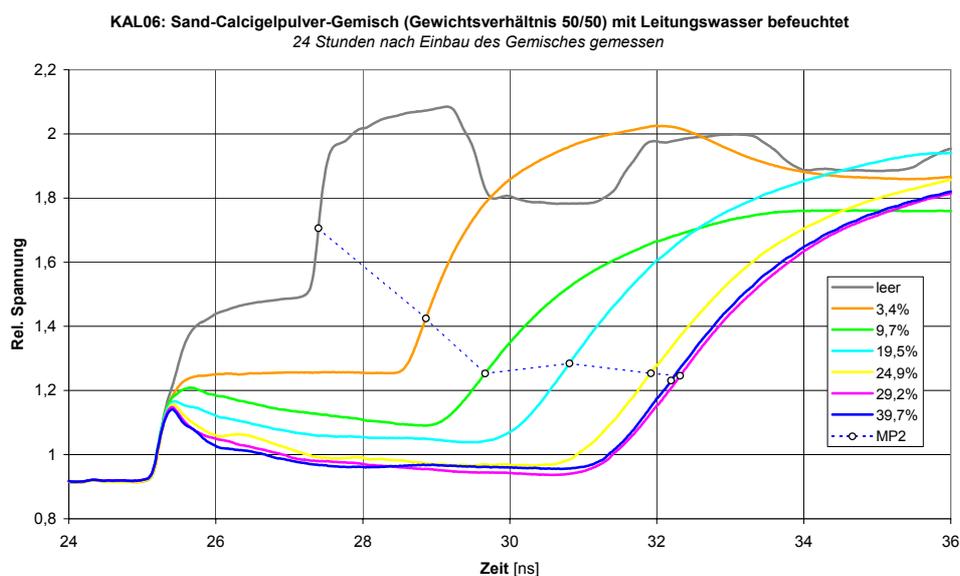


Bild 9.9 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Leitungswasser befeuchtet)

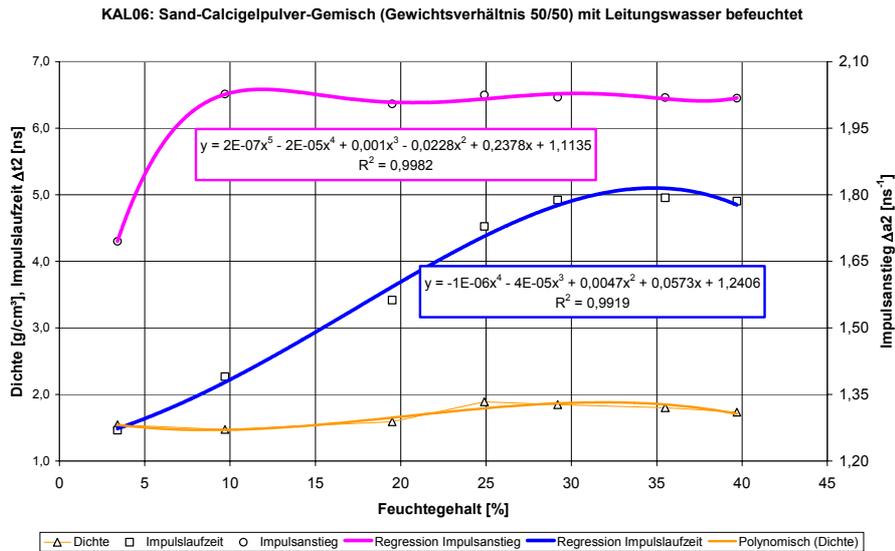


Bild 9.10 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50)

Die Kalibrierkurve der Impulslaufzeit zeigt auch beim Calcigel-Mehl einen sehr breiten Feuchtebereich.

9.5 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches mit Steinsalzlösung

Bei der Kalibrierung Kal 02 wurde ein Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 4,5 % in Schritten 8,2 %; 12,1 %; 18,7 %; 21,7 %; 25,4 %; 31,7 % mit Steinsalzlösung (250 g/l) befeuchtet bis bei 36,3 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.11 gezeigt.

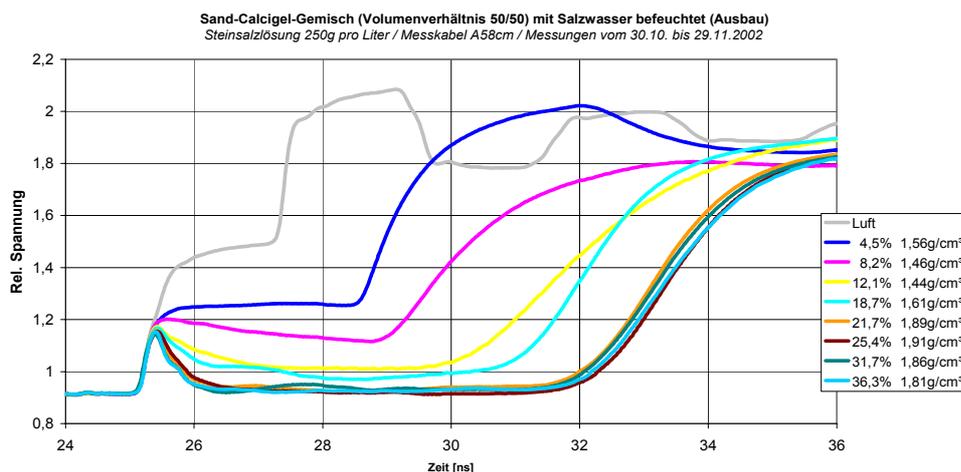


Bild 9.11 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

Die für die Untersuchungen verwendete Steinsalzlösung kommt den natürlichen Bedingungen am nächsten. Faustgroße Steinsalzstücke wurden zerkleinert und mit deionisiertem Wasser in Lösung gebracht. In der Lösung waren Anteile KCl, MgSO₄, NaCl, CaSO₄, CaCl₂ vorhanden, ihre Dichte betrug ca. 1,2 g/cm³.

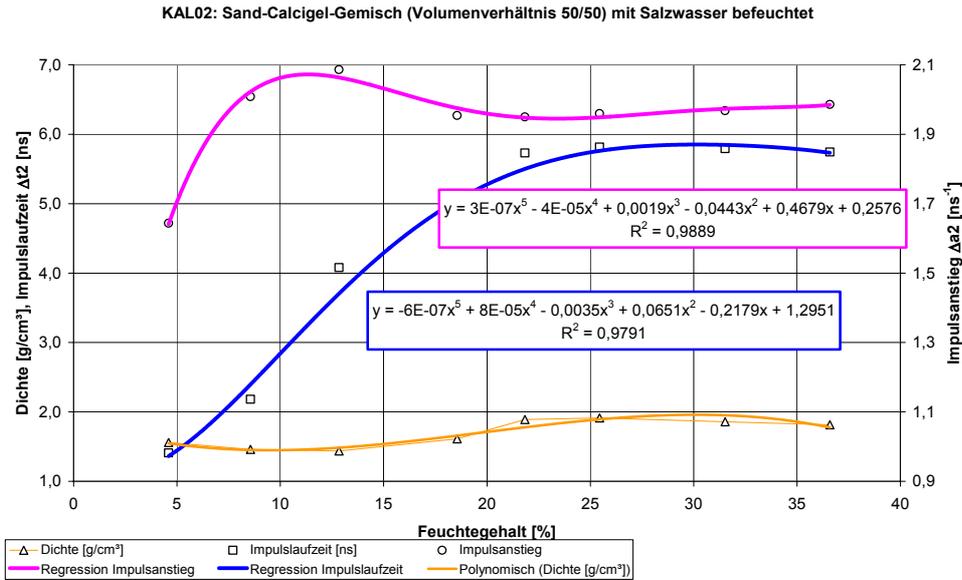


Bild 9.12 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Volumenverhältnis 50 : 50; mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

Bei allen Kalibrierungen mit Salzlösungen stellt der Feuchtegehalt den Gehalt an Salzlösung dar. Die Differenz der Impulslaufzeit zeigt, dass die Feuchtesättigung bei der Kalibrierung mit Salzlösung bei deutlich geringeren Werten einsetzt, als dies beim Leitungswasser der Fall war. Die Feuchtdichte sinkt vor allem im Sättigungsbereich stark ab.

9.6 Kalibrierung eines Sand-MX-80-Gemisches mit Steinsalzlösung

Bei der Kalibrierung Kal 05 wurde ein Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 5 % in Schritten 8,4 %; 10,9 %; 16,2 %; 19,7 %; 25,1 % mit Steinsalzlösung (250 g/l) befeuchtet bis bei 28,9 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.13 gezeigt.

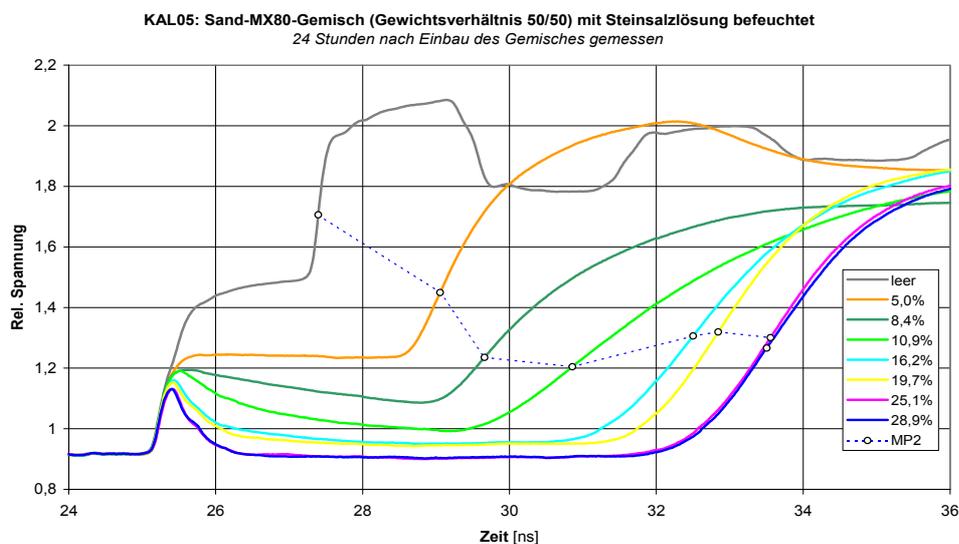


Bild 9.13 Impulsantworten eines Sand-MX 80-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

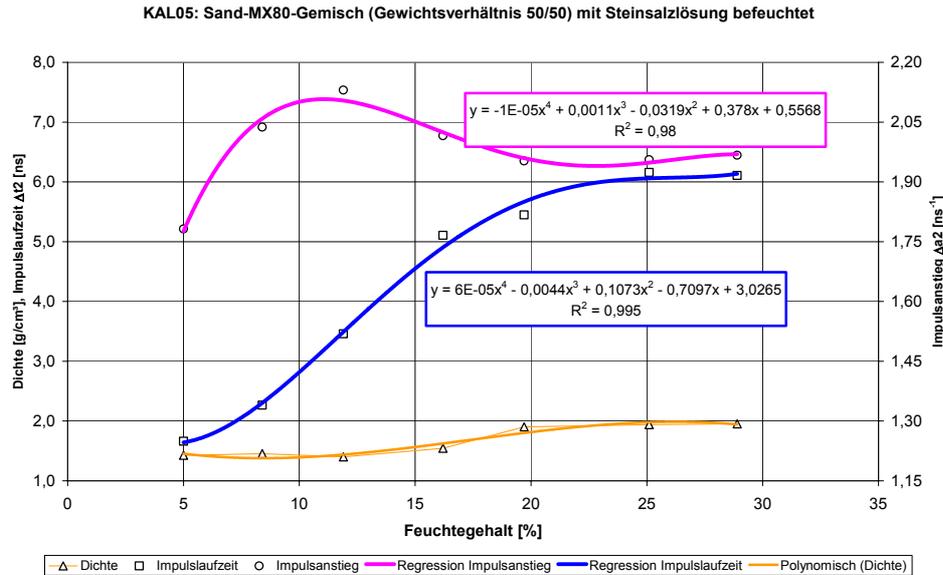


Bild 9.14 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-MX 80-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50; mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

9.7 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Steinsalzlösung

Bei der Kalibrierung Kal 07 wurde ein Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50:50) ausgehend von 3,4% in Schritten 8,2%; 12,5%, 19,6% mit Steinsalzlösung (250g/l) befeuchtet bis bei 26,6% die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.15 gezeigt.

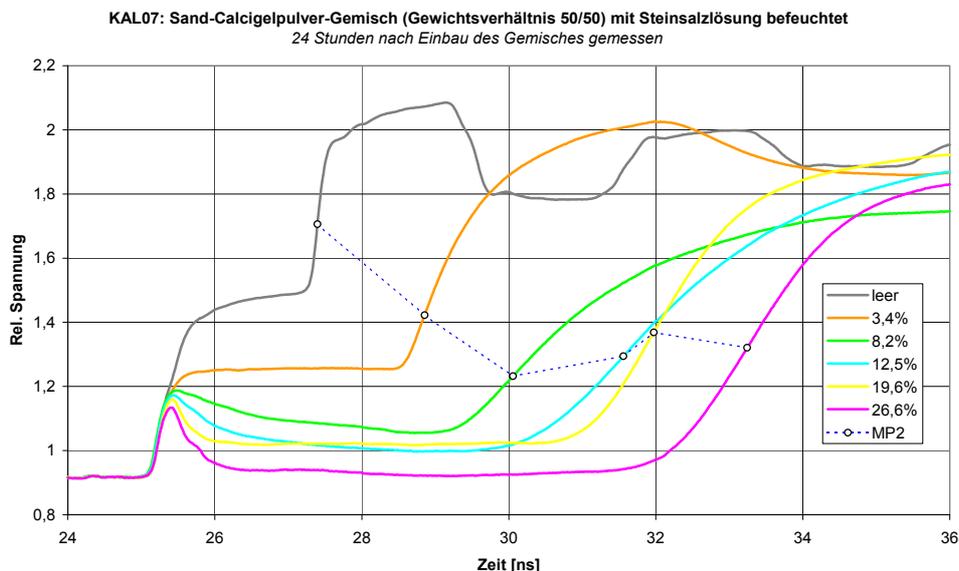


Bild 9.15 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

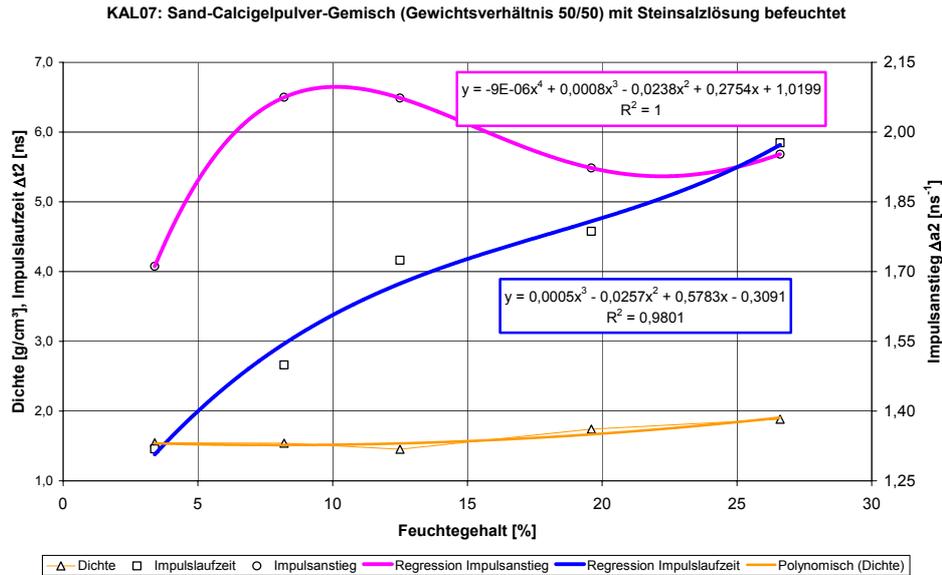


Bild 9.16 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) (mit Steinsalzlösung 250 g/l befeuchtet)

9.8 Kalibrierung eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches mit Q-Lauge

Bei der Kalibrierung Kal 08 wurde ein Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) ausgehend von 3,4 % in Schritten 8,4 %; 13,6 %, 17,4 % mit IP 21 oder Q-Lösung befeuchtet bis bei 23,2 % die Feuchtesättigung erreicht war, die entsprechenden Impulsantworten werden im Bild 9.17 gezeigt.

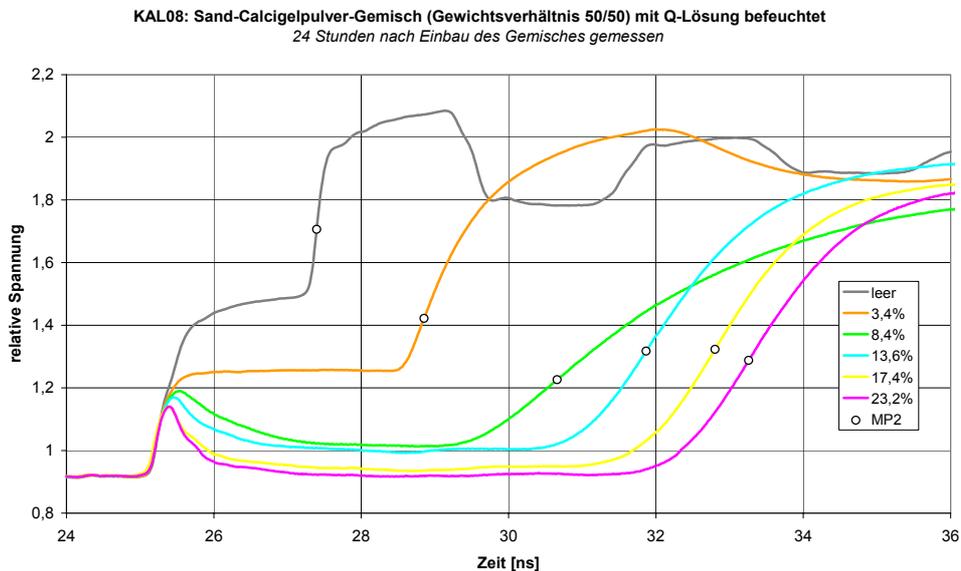


Bild 9.17 Impulsantworten eines Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches (Masseverhältnis 50 : 50) bei unterschiedlichen Feuchtegehalten (mit Q-Lösung befeuchtet)

Die IP21-Lösung oder Q-Lösung wird bei 25°C mit deionisiertem Wasser und Salzanteilen von CaCl_2 , $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, KCl , NaCl , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ und $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ unter ständigem Rühren hergestellt. Die Dichte soll 1,29 g/cm³ betragen.

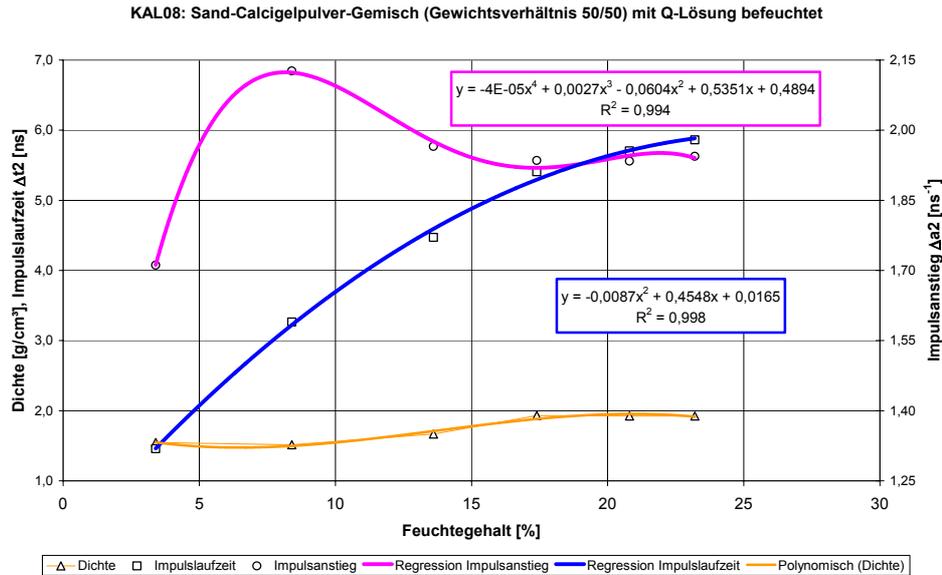


Bild 9.18 Differenzen von Impulslaufzeit und Impulsanstieg sowie Feuchtdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt bei einem Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch (Masseverhältnis 50 : 50) (mit Q-Lösung befeuchtet)

9.9 Vergleich der Kalibrierungen mit Leitungswasser und Salzlösungen

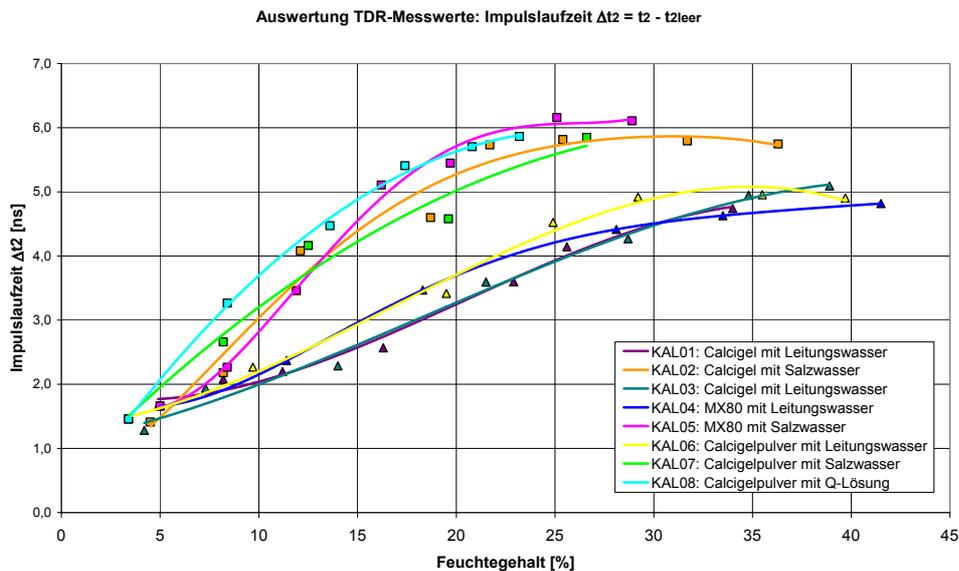


Bild 9.19 Vergleich der Kalibrierkurven der Differenzen der Impulslaufzeiten von Sand-Calcigel-Gemisch, Sand-MX 80-Gemisch bei Anfeuchtung mit Leitungswasser, Steinsalzlösung und Q-Lösung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Bild 9.19 zeigt einen Vergleich der Kalibrierkurven von Differenzen der Impulslaufzeiten Δt_2 von Sand-Calcigel-Gemisch, Sand-MX 80-Gemisch bei Anfeuchtung mit Leitungswasser, Steinsalzlösung und Q-Lösung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

Der Feuchtegehalt ist bei den Untersuchungen auf den Gehalt an Wasser bzw. bei Anfeuchtung mit Steinsalzlösung und Q-Lösung auf den Gehalt an Salzlösung bezogen. Die Masse

des Salzes m_{sa} führt bei der Referenztrocknung zu einer Erhöhung des Bezugswertes für das trockene Material und zu einer Reduzierung des Feuchtwertes (s. Gl. 9.5):

$$F = \frac{m_w + m_{tr} + m_{sa} - (m_{tr} + m_{sa})}{m_{tr} + m_{sa}} = \frac{m_w}{m_{tr} + m_{sa}} \quad (9.5)$$

Etwas komplizierter werden die Probleme bei der Entstehung von Kristallwasser oder bei der Hydratation, d.h. wenn neue Stoffe entstehen oder Stoffe sich bei der Trocknung verflüchtigen.

Die Kalibrierkurven der Differenzen der Impulslaufzeiten (Kal 02, 05, 07, 08) zeigen bei Befeuchtung der Bentonitgemische mit Salzlösungen wesentlich steilere Anstiege über dem Feuchtegehalt, als dies bei Befeuchtung mit Leitungswasser der Fall ist (Kal 01, 03, 04, 06); in diesem Fall verlaufen die Kurven flacher. Wie auch die Untersuchungen zeigen, setzt die Sättigung bei mit Salzlösung angefeuchteten Bentonitgemischen bei wesentlich geringeren Feuchtwerten ein, als dies beim Anfeuchten mit Leitungswasser der Fall ist. Bei den Kurven Kal 01 und Kal 03, bei denen volumen- und massebezogene Mischungen vorlagen, konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Kalibrierkurven und somit geringe Abweichungen bei der Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Besonders steil ist der Anstieg der Kurve Kal 05 Sand-MX 80-Gemisch bei der Anfeuchtung mit Salzlösung. Bis ca. 7 % ist der Einfluss des gebundenen Wassers zu sehen; danach steigt die Kurve wesentlich steiler an, als dies bei vergleichbaren Sand-Calcigel-Gemischen der Fall ist.

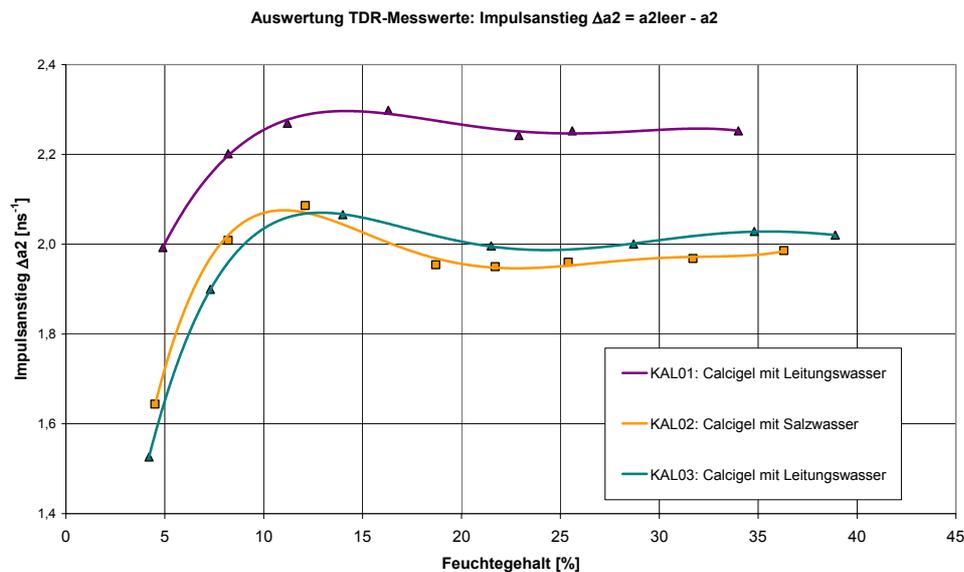


Bild 9.20 Vergleich der Impulsanstiege bei Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch Kal 01 (Volumenverhältnis 50 : 50), Kal 03 (Masseverhältnis 50 : 50) befeuchtet mit Leitungswasser und Kal 02 (Volumenverhältnis 50 : 50) befeuchtet mit Salzlösung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt

Beim Vergleich der Impulsanstiege bei Sand-Calcigel-Granulat-Gemisch in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt wird gezeigt, dass die beiden Kurven von Kal 01 und Kal 03 bedingt durch die Mischung nach Volumen- und Masseverhältnis parallel verschoben sind. Bei Befeuchtung mit Salzlösung zeigt die Kurve Kal 02 gegenüber Kal 03 bei Leitungswasserbefeuchtung eine Verschiebung des Maximums nach geringeren Feuchtwerten und eine deutlich stärkere Einsattelung und Sättigung bei Feuchtwerten $> 17\%$. Bei Leitungswasserbefeuchtung ist die Einsattelung erst bei Feuchtwerten $> 20\%$ vorhanden und nicht so stark ausgeprägt.

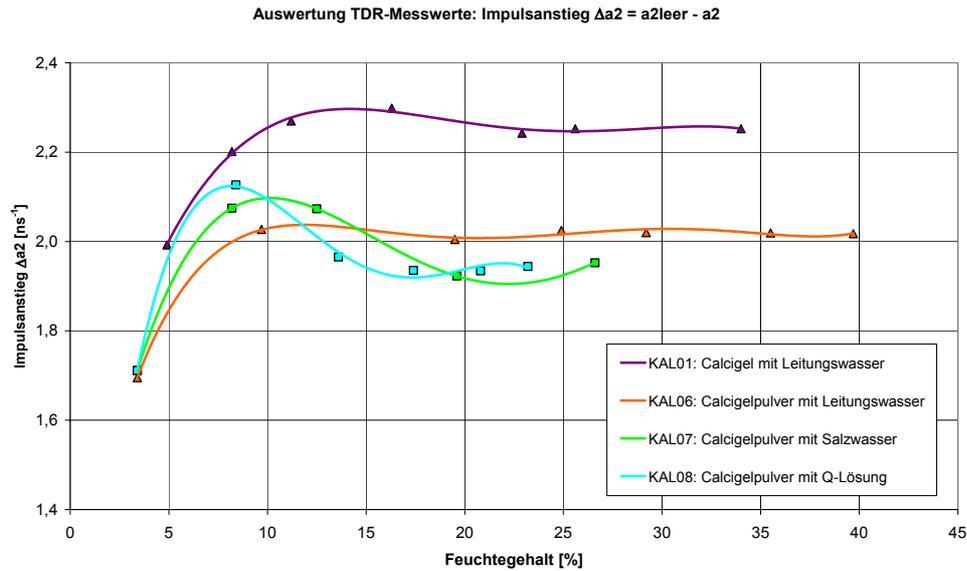


Bild 9.21 Vergleich der Kalibrierkurven der Impulsanstiege bei Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch Kal 06 (Masseverhältnis 50 : 50), befeuchtet mit Leitungswasser, Kal 07 befeuchtet mit Steinsalzlösung und Kal 08 befeuchtet mit Q-Lösung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt; die Kurve des Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches Kal 01 (Volumenverhältnis 50 : 50) dient dem Vergleich

Bild 9.21 zeigt den Vergleich der Impulsanstiege bei Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch Kal 06 (Masseverhältnis 50 : 50), befeuchtet mit Leitungswasser, Kal 07 befeuchtet mit Steinsalzlösung und Kal 08 befeuchtet mit Q-Lösung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Die Kurve des Sand-Calcigel-Granulat-Gemisches Kal 01 zeigt gegenüber Kal 06 eine Parallelverschiebung. Dies bedeutet, dass bei gleichen Materialien gleiche Formen der Impulsanstiege vorliegen. Durch die Befehuchtung mit Steinsalzlösung Kal 07 wird das Maximum der Kurve erhöht und zu geringeren Feuchtwerten 10 % verschoben; bei >15 % erfolgt eine tiefe Einsattelung. Bei Befehuchtung mit Q-Lösung wird das Maximum zu einem Feuchtwert von ca. 8 % verschoben. Der vergleichbare Feuchtwert der Einsattelung liegt bei ca. 12,5 %.

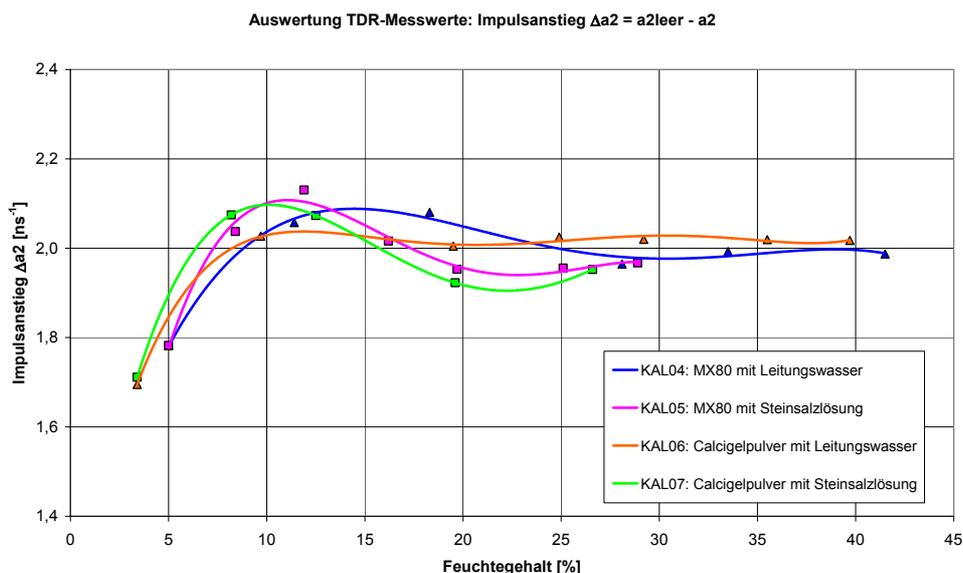


Bild 9.22 Vergleich der Impulsanstiege bei Sand-Mx 80-Gemisch Kal 04 befeuchtet mit Leitungswasser, Kal 05 befeuchtet mit Steinsalzlösung, bei Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch Kal 06 befeuchtet mit Leitungswasser, Kal 07 befeuchtet mit Steinsalzlösung

Beim Vergleich der Impulsanstiege des Sand-Calcigel-Mehl-Gemisches und des Sand-MX 80-Gemisches befeuchtet mit Leitungswasser zeigt sich beim MX-Gemisch ein stärker ausgeprägtes Maximum zwischen 14 und 15% und eine stärkere Einsattelung bei Feuchtwerten >25 % als dies beim Calcigel-Gemisch vorliegt. Die Maxima der Bentonit-Gemische befeuchtet mit Steinsalzlösung sind nach tieferen Feuchtwerten verschoben. Sie liegen beim Sand-Calcigel-Mehl-Gemisch bei 10 % und beim Sand-MX 80-Gemisch bei ca. 12 %. Die Kurven haben gleiche Form, sind nahezu parallel verschoben und weisen relativ starke Einsattelungen auf. Für Kalibrierungen sind die Kurven der Impulsanstiege nicht zu gebrauchen, da sie Mehrdeutigkeiten zeigen.

10 Feuchteprofilbestimmungen unter dem Einfluss von Drücken bis 40 bar

10.1 Konstruktion eines Druckversuchsstandes

Die Versuchseinrichtung wurde für durchlässige Medien (Bentonit-Sandgemische) und aggressive Flüssigkeiten (Salzlösungen) für Langzeitversuche entwickelt. Sie hat Längen von 50 cm /100 cm und einen Innendurchmesser von 15cm. In den Außenzyylinder des Polycarbonatrohres können verschiedene Sensoren (hier Membrandrucksensoren) eingebaut werden; gleichzeitig kann visuell die Feuchtefront am Außenrohr positionsgenau mit einem Strichlaser vermessen werden. In Bild 10.1 sind ein schematischer Querschnitt und im Bild 10.2 der Druckversuchsstand mit Kabelsensor und Messwertverarbeitungseinheit dargestellt.

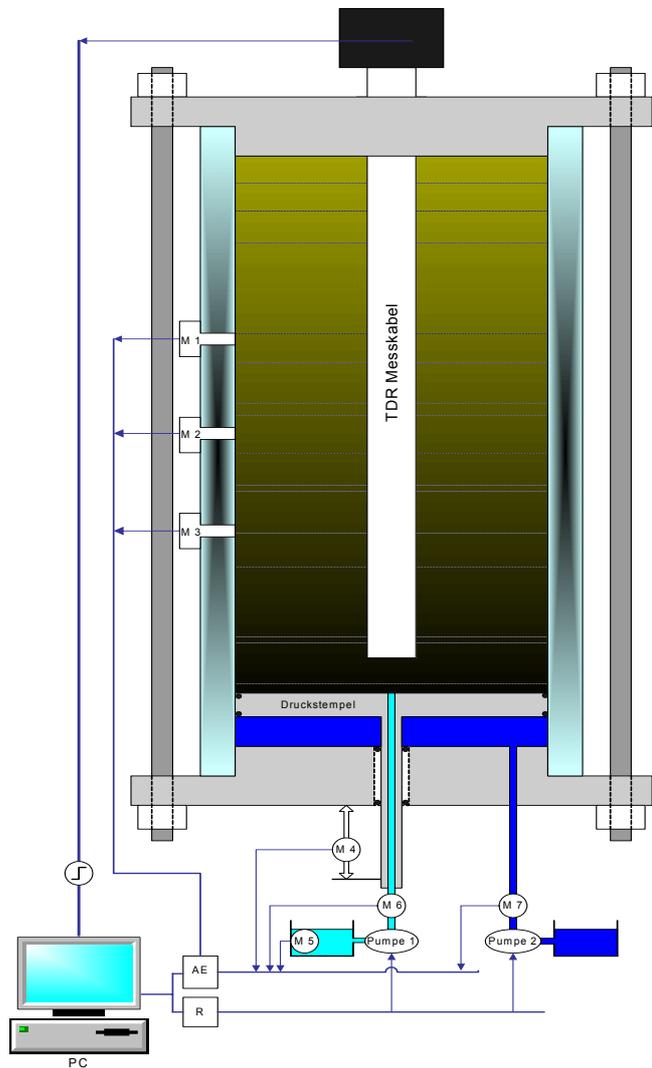


Bild 10.1 Schematische Darstellung des Druckversuchsstandes mit Kabelsensor und Messwertverarbeitungseinheit



Bild 10.2 Druckversuchsstand mit Kabelsensor und Messwertverarbeitungseinheit

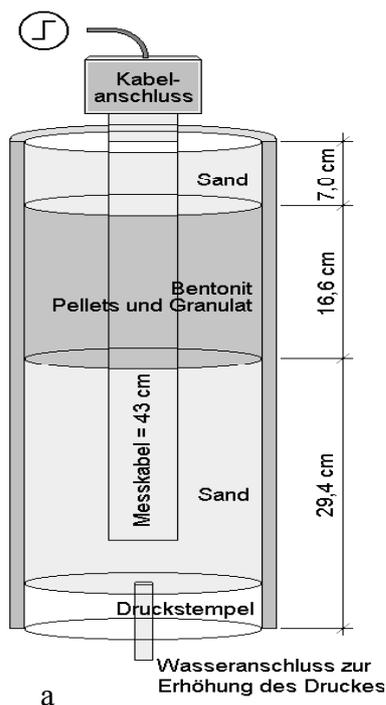
Tab. 10.1 Technische Daten des Druckversuchsstandes:

Parameter	Symbol	Messbereich	Messgenauigkeit	Bemerkung
Länge der Versuchskammer	L	0,5 oder 1,0 m	-	durchsichtig, beständig gegen aggressive Flüssigkeiten
Durchmesser der Versuchskammer	D_1	150 mm	-	
Maximaler Druck Polycarbonatrohr	p_{max}	80 bar	-	
Druck im Prüfmedium	M1 bis M3	50 bar	$\pm 0,2\%$	Membransensoren
Druckstempelweg	M4	25 mm	$\pm 0,01$ mm	Digitalmessuhr
Fluidmenge des Prüfmediums	M5	30 ml / 5000 ml	0,1 ml / 1,0 ml	Portionierer
Druck Prüfmedium	M6	50 bar	$\pm 0,2\%$	Membransensor
Stempeldruck	M7	50 bar	$\pm 0,2\%$	Membransensor
Feindosierpumpe für Prüfmedium	P1	40 bar / 100 bar	-	
Feindosierpumpe für Druckstempel	P2	40 bar / 100 bar	-	

Alle verwendeten Anschlüsse, Messsensoren und Pumpen sind für aggressive Medien ausgelegt.

10.2 Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat und deionisiertem Wasser

Ziel des Versuches war es, das Vordringen einer Feuchtefront in einem Bentonitverschluss zu detektieren. Dazu wurde im Druckversuchsstand der Kabelsensor, 2 Sandschichten sowie Calcigel-Pellets und Calcigel-Granulat eingebettet (Bild 10.4).



Versuchsfluid: destilliertes Wasser
 Bentonitmaterial: Calcigel-Granulat 72 M%
 Calcigel-Pellets 28 M%
 Einbaudichte: 1,73 g/cm³
 Druckstufen: 7, 10, 20 u. 30 bar



b

Bild 10.4 a) Schichtung im Druckversuchsstand
 b) Sand, Calcigel-Granulat, Calcigel-Pellets

Beim Druckversuchsstand werden Druckstempel und Fluidmenge gesteuert. Als mechanische Messgrößen kommen Fluiddruck, Druck in den Sand- und Bentonitschichten, visuelle Steigehöhe, Fluidmenge, Stempelweg sowie Stempeldruck in Frage (Bild 10.5).

Laststufe	Fluidaufnahme/Tag
7 bar	7 / 10 ml
10 bar	6 ml
20 bar	5 ml
30 bar	3 ml

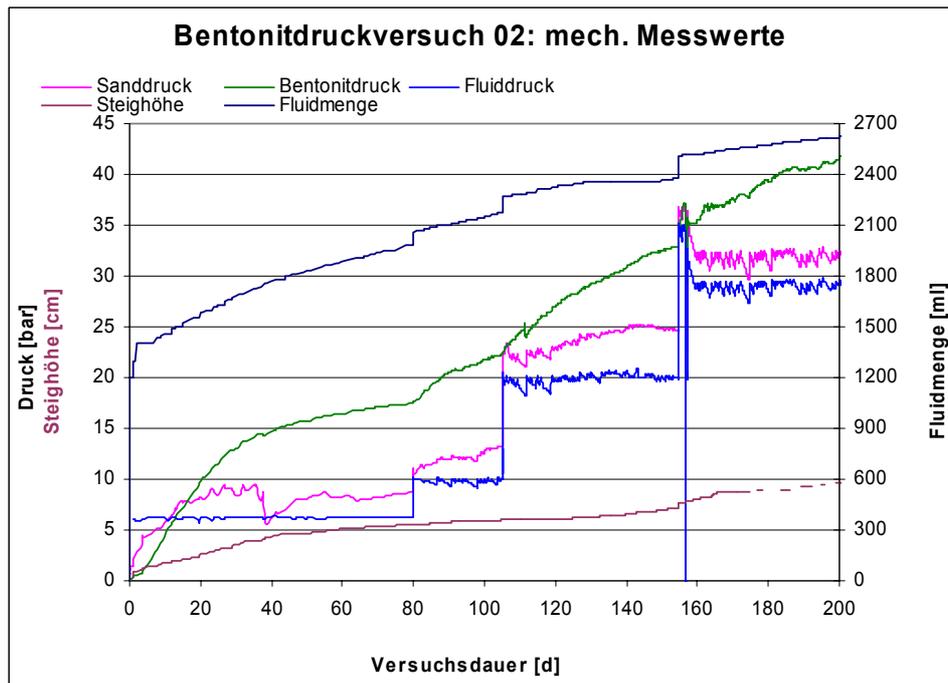


Bild 10.5 Druck im Sand, Bentonit, Wasser sowie Steighöhe, Wassermenge in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

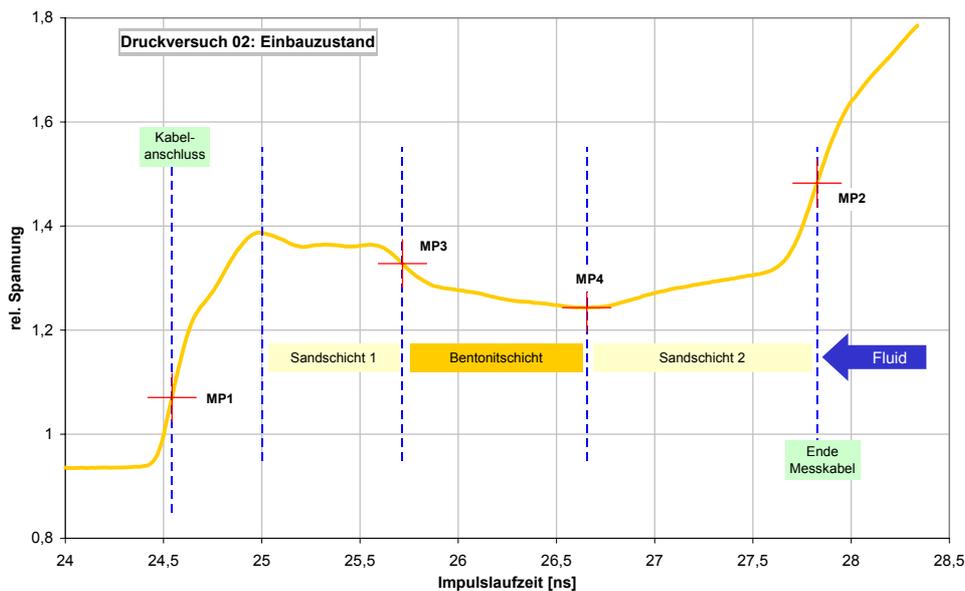


Bild 10.6 Lokalisierung von Impulslaufzeit und Messpunkten im Einbauzustand

Bild 10.6 zeigt die Lokalisierung von Impulslaufzeit und Messpunkten im Einbauzustand des Kabelsensors im trockenen Zustand. Die Messpunkte befinden sich an den Wendepunkten der Kurve. Der Anfang des Messkabels (Kabelanschluss) befindet sich am Koaxstecker, MP1 - Beginn des Bandkabels; MP2 - Ende des Messkabels; MP3 - obere Grenzschicht zwischen Sandschicht 1 und Bentonitschicht; MP4 – Grenzschicht zwischen Bentonitschicht und Sandschicht 2). Das Fluid, hier destilliertes Wasser, wird in Pfeilrichtung durch die Sandschicht und anschließend durch die Bentonitschicht gepresst.

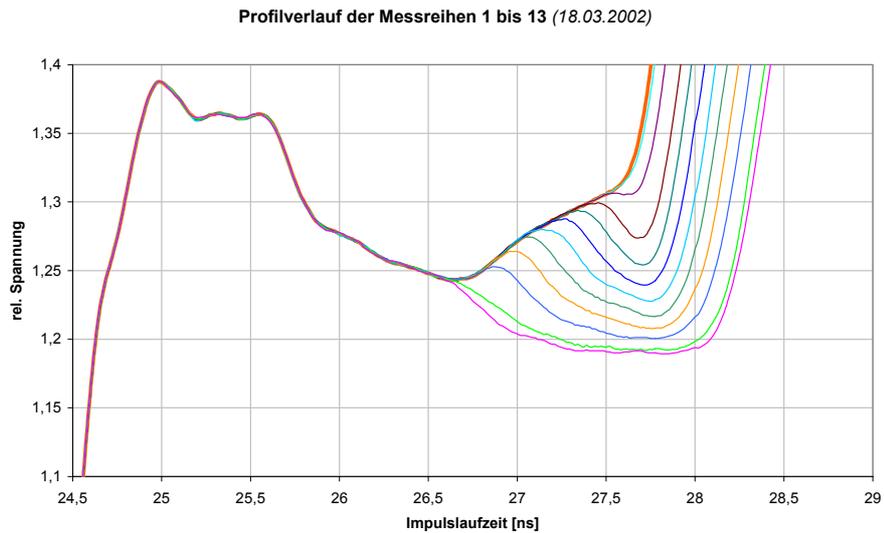


Bild 10.7 Impulslaufzeiten der Messreihen 1 – 13 nach dem Durchdringen der Feuchtfrent durch die Sandschicht

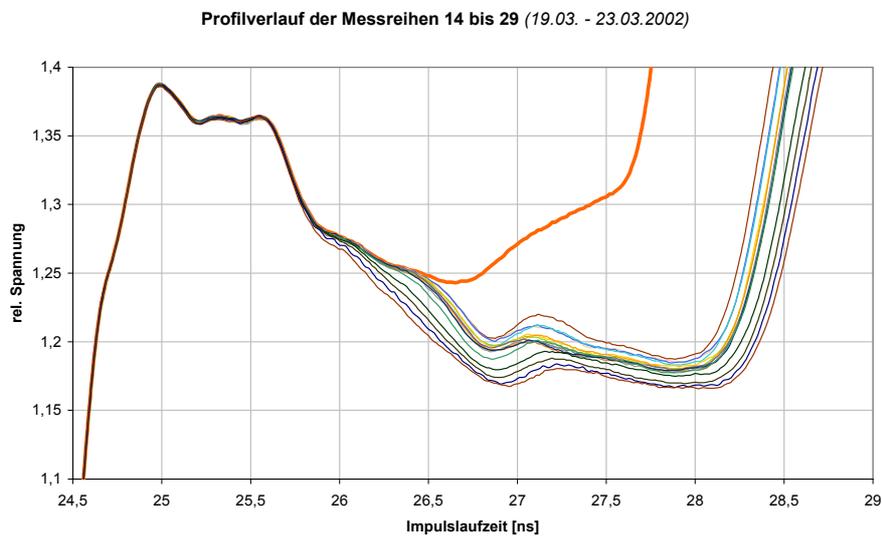


Bild 10.8 Impulslaufzeiten der Messreihen 14 – 29 5 Tage nach dem Eindringen der Feuchtfrent in die Bentonitschicht

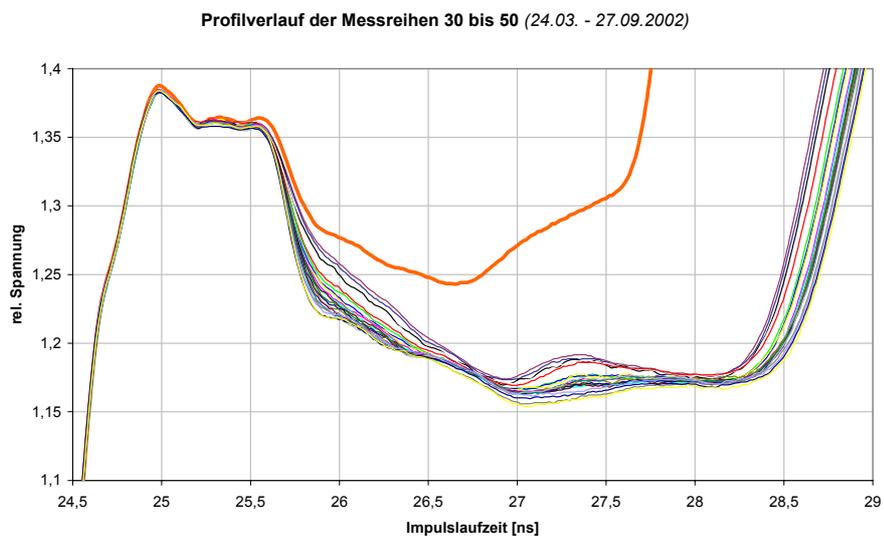


Bild 10.9 Impulslaufzeiten der Messreihen 30 – 50 200 Tage nach dem Eindringen der Feuchtfrent in die Bentonitschicht

Im Bild 10.7 werden die Impulslaufzeiten der Messreihen 1 – 13 nach einem Tag, nach dem Durchdringen der Feuchtefront durch die Sandschicht gezeigt. Die Bilder 10.8, 10.9 zeigen die Impulslaufzeiten der Messreihen 14 – 29 5 Tage und 30 - 50 200 Tage nach dem Eindringen der Feuchtefront in die Bentonitschicht.

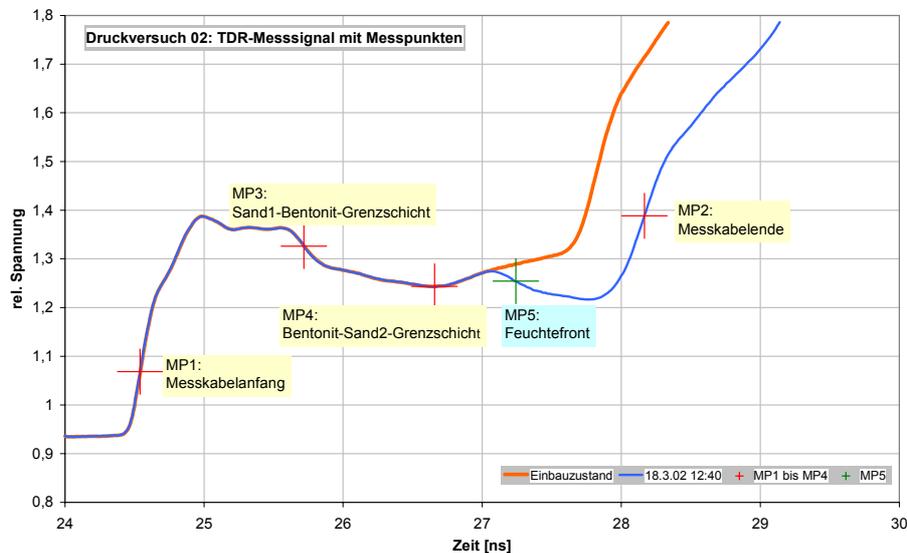


Bild 10.10 Impulslaufzeiten und Messpunkte nach dem Durchdringen der Sandschicht

Die Veränderung der Messpunkte nach dem Durchdringen der Sandschicht werden im Bild 10.10 dargestellt; MP5 kennzeichnet die Feuchtefront.

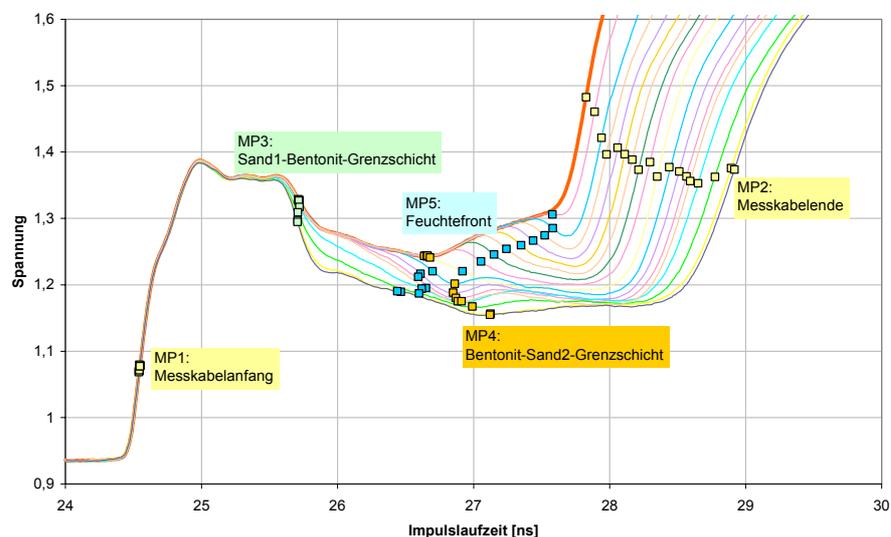


Bild 10.11 Veränderung der Messpunkte über den Versuchszeitraum

Bild 10.11 zeigt die Veränderung der Messpunkte (MP1-Beginn des Bandkabels; MP2-Messkabelende; MP3-obere Sand1-Bentonit-Grenzschicht; MP4-untere Bentonit-Sand2-Grenzschicht) über die Länge des Versuchszeitraumes von 200 Tagen. Die Veränderung der Feuchtefront über dem Versuchszeitraum wird durch die Aufreihung von MP5 gezeigt.

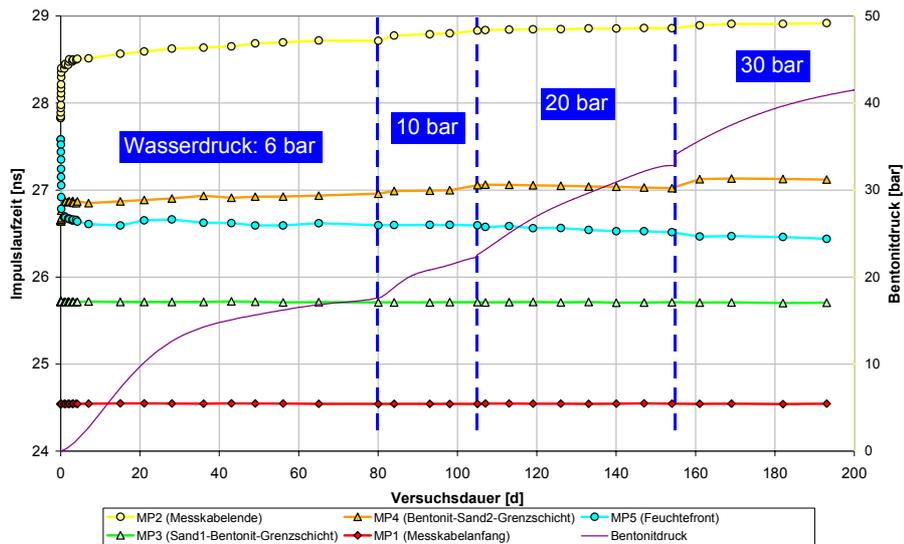


Bild 10.12 Impulslaufzeiten an MP1 Messkabelanfang, an MP2–Messkabelende; an MP3-obere Sand1-Bentonit-Grenzschicht; an MP4-untere Sand2-Bentonit-Grenzschicht sowie an MP5-Feuchtefront; Darstellung der Druckstufen (blau) und der Steigerung des Druckes im Bentonit (violett)

Im Bild 10.12 werden die Impulslaufzeiten an MP2–Messkabelende; an MP3-obere Sand1-Bentonit-Grenzschicht; an MP4-untere Sand2-Bentonit-Grenzschicht sowie an MP5-Feuchtefront über der Versuchsdauer von 200 Tagen aufgezeichnet. Des Weiteren werden die Schritte der Druckerhöhungen (blau) sowie die damit verbundene Steigerung des Druckes im Bentonit gezeigt.

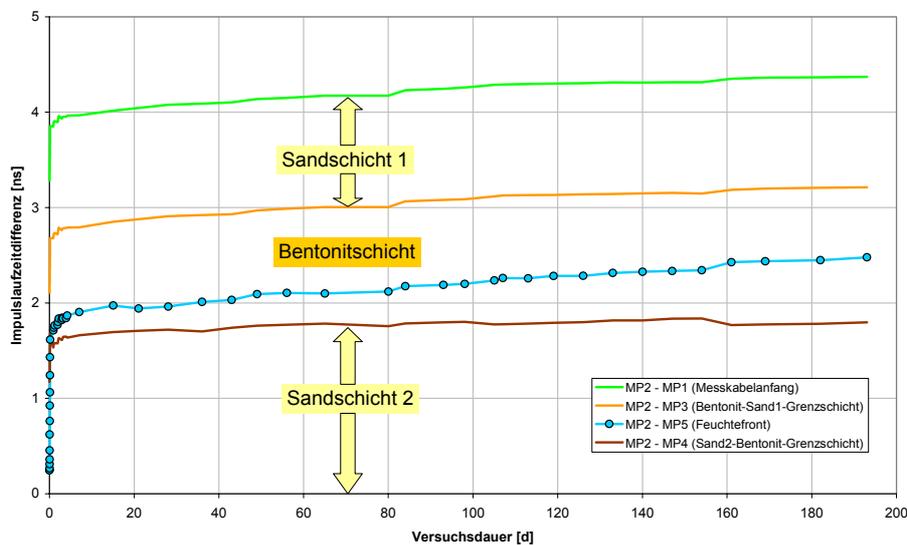


Bild 10.13 Differenzen der Impulslaufzeiten zwischen den Sand-Bentonit-Grenzschichten bezogen auf das Messkabelende über der Versuchsdauer von 200 Tagen

Im Bild 10.13 wurden die Differenzen der Impulslaufzeiten zwischen den Sand-Bentonit-Grenzschichten bezogen auf das Messkabelende MP2 dargestellt. Deutlich ist bei der Feuchtefront das schnelle Durchdringen der Sandschicht und das langsame Eindringen in die Bentonitschicht zu sehen.

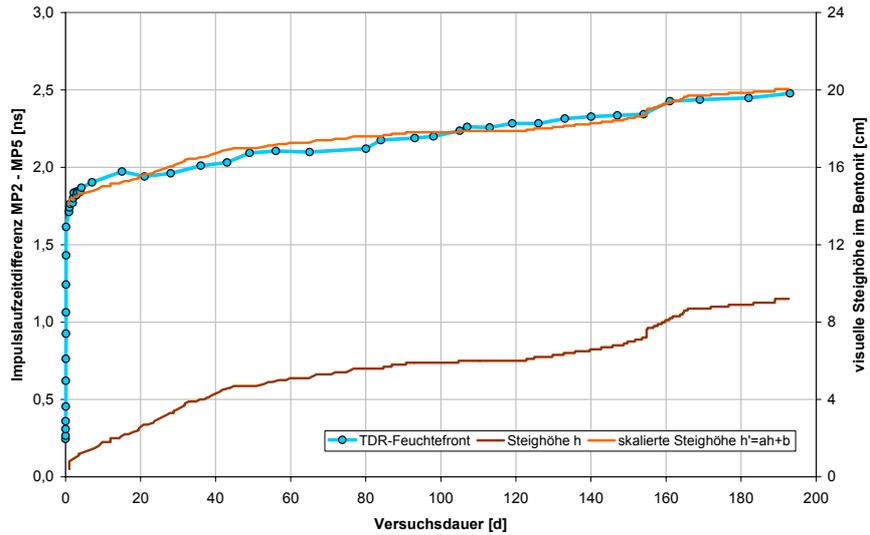


Bild 10.14 Vergleich der gemessenen Feuchtefront MP5 mit dem visuell ermittelten Verlauf

Im Bild 10.14 wird der Verlauf der an MP5 gemessenen Feuchtefront mit den visuell ermittelten Werten verglichen und zeigt eine gute Übereinstimmung.

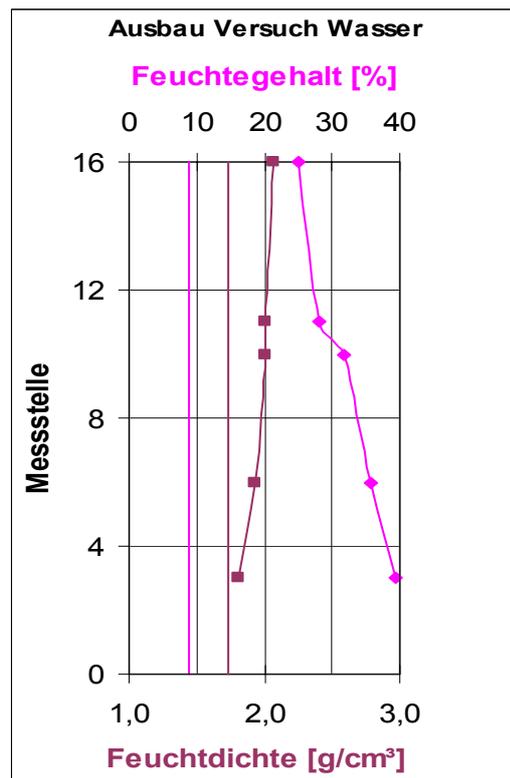
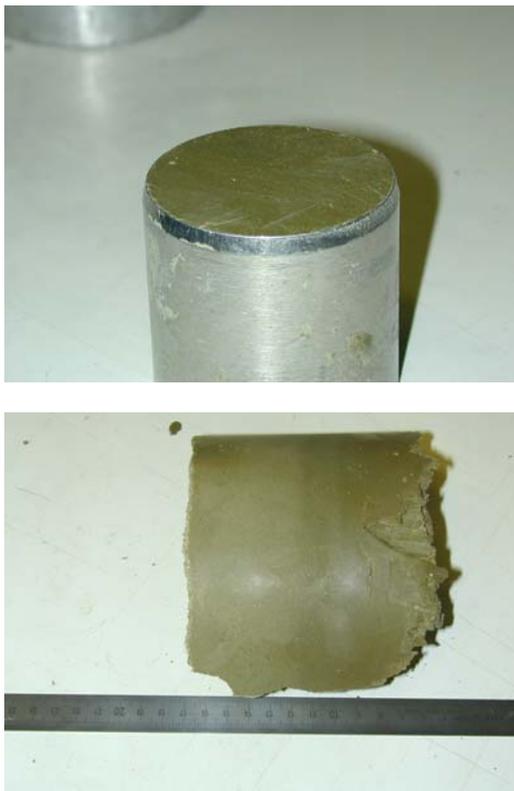


Bild 10.15 Bestimmung von Feuchtegehalt und Dichte vom ausgebauten Material über der Länge des Druckrohres

Bild 10.15 zeigt Feuchtegehalt und Dichte des Materials nach dem Ausbau sowie ausgebaute Proben über der Länge des Druckrohres. Einbaufeuchte und Einbaudichte werden durch die durchgehenden Linien gezeigt.

10.3 Versuch mit Calcigel-Pellets, Calcigel-Granulat und Steinsalzlösung

Bei diesem Versuch wurde der Druckversuchsstand mit Calcigel-Pellets (72 M%) und Calcigel-Granulat 28M%) gefüllt und Steinsalzlösung mit einer Dichte von $1,15\text{g/cm}^3$ durch das binäre Gemisch mit einer Einbaudichte von $1,73\text{g/cm}^3$ gepresst. Die Druckstufen betragen 5, 10, 20, 30 und 40 bar. Die Untersuchungen wurden von Messung 1 - 65 mit dem Tektronix-Kabeltester und die Versuche 66 – 109 mit dem TDR-100 Messsystem durchgeführt.



Bild 10.16 TDR-100 Messsystem mit Multiplexer

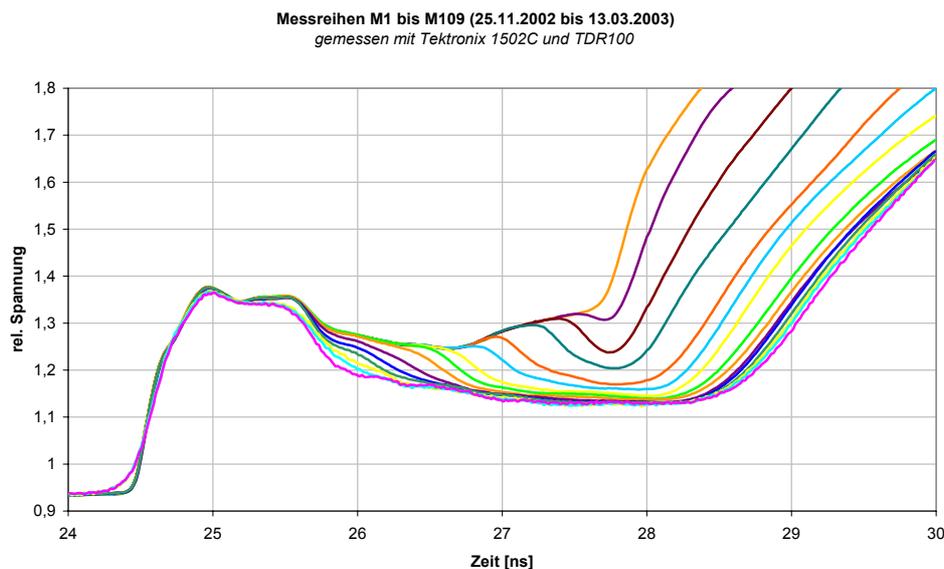


Bild 10.17 Impulslaufzeiten der Messreihen 1-109 108 Tage nach dem Eindringen der Feuchtefront in die Bentonitschicht

Im Bild 10.17 werden die Impulslaufzeiten der Messreihen 1-109 109 Tage nach dem Durchdringen der Sandschicht (1 Tag) sowie nach dem Eindringen der Feuchtefront in die Bentonitschicht gezeigt (108 Tage).

Im Impulsdiagramm wird deutlich, dass sich zwischen 25,7 und 26,8 ns eine starke Feuchtefront längs des Kabels bewegt; ein Unterschied zwischen den Grenzschichten konnte nicht mehr detektiert werden. Ein Durchbruch der Lösung am Kabel kam nicht zustande. Der Freiraum zwischen den Kurven wurde durch den notwendigen Wechsel von Kabeltester und TDR-100 verursacht.

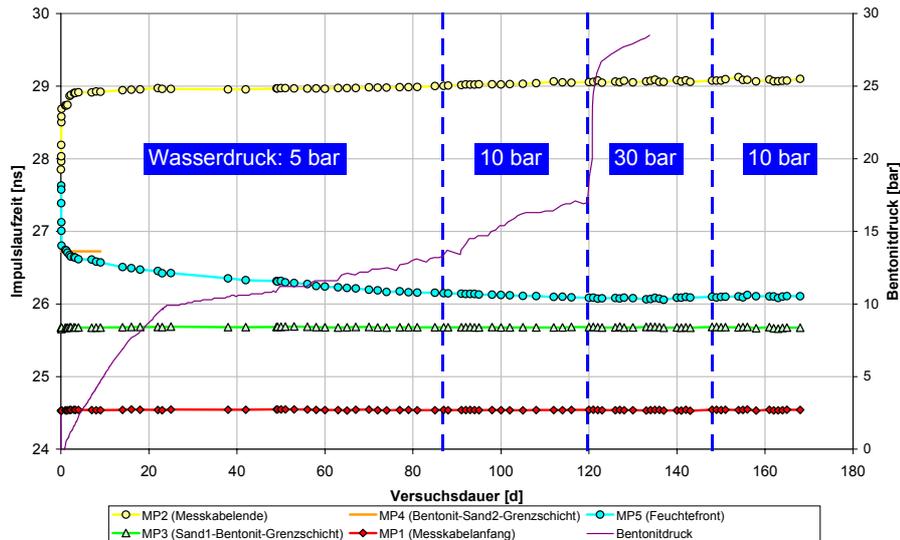


Bild 10.18 Impulslaufzeiten an MP1 Messkabelanfang, an MP2–Messkabelende; an MP3–obere Sand1-Bentonit-Grenzschicht; an MP4–untere Sand2-Bentonit-Grenzschicht sowie an MP5-Feuchtefront; Darstellung der Druckstufen (blau) und der Steigerung des Druckes im Bentonit (violett)

Im Bild 10.18 werden die Impulslaufzeiten an MP2 –Messkabelende; an MP3–obere Sand1-Bentonit-Grenzschicht; an MP4–untere Sand2-Bentonit-Grenzschicht sowie an MP5-Feuchtefront über der Versuchsdauer von 168 Tagen aufgezeichnet. Des Weiteren werden die Schritte der Druckerhöhungen (blau) sowie die damit verbundene Steigerung des Druckes im Bentonit gezeigt. Die Feuchtefront liegt bei wesentlich geringeren Werten der Impulslaufzeit als dies Versuch 1 beim Bentonit mit Wasser der Fall war. Der Druck im Bentonit steigt bei Erhöhung des Druckes auf 30 bar sprunghaft an.

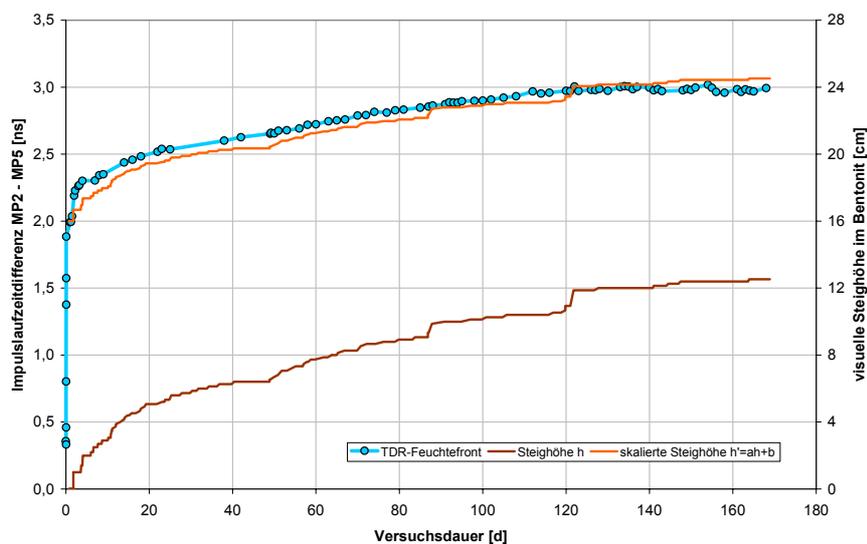


Bild 10.19 Vergleich der gemessenen Feuchtefront MP5 mit dem visuell ermittelten Verlauf

Im Bild 10.19 wird der Verlauf der an MP5 gemessenen Feuchtefront mit den visuell ermittelten Werten verglichen und zeigt auch hier eine gute Übereinstimmung.

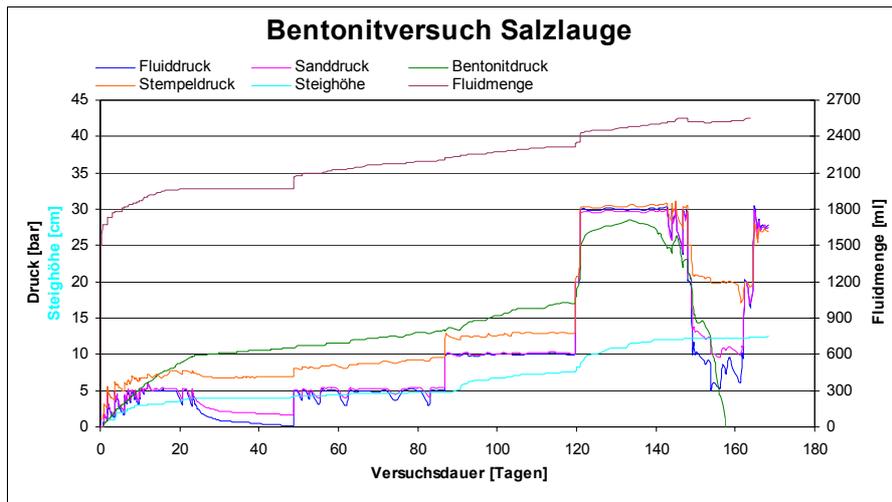


Bild 10.20 Druck im Sand, Bentonit, Steinsalzlösung und Steighöhe, Menge der Steinsalzlösung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Laststufe	Fluidaufnahme/Tag
5 bar	5 ml
10 bar	4 ml
20 bar	4 ml
30 bar	6 ml

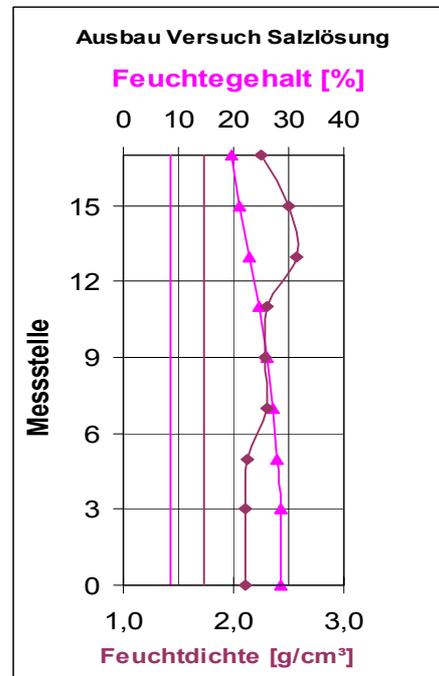


Bild 10.21 Bestimmung von Feuchtegehalt und Dichte vom ausgebauten Material über der Länge des Druckrohres

Zum Ausbau des Bentonitpfropfens nach dem Versuch wurde das Polykarbonatrohr durch Erwärmen aufgeweitet. Bild 10.21 zeigt Feuchtegehalt vom ausgebauten Material über der Länge des Versuchsrohres. Einbaufeuchte und Einbaudichte werden durch die durchgehenden Linien gezeigt.



Bild 10.22 Ausbau des Bentonitpfropfens durch Erwärmen des Polykarbonatrohres

11 Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen

M. Gruner und W. Gassner (IBB Freiberg), K. Kupfer und E. Trinks (MFPA Weimar)

11.1 Versuchsplanung

Für den Test der Kabelsensoren unter realitätsnahen Bedingungen gelten folgende Prämissen:

- hochkonzentrierte NaCl – Lösung (entsprechend Praxissituation bei Anwendung im Salinargebirge),
- gleiche Dichtmaterialien wie in der Praxis (binäres Gemisch aus Briketts und Granulat, Bentonitformsteine),
- Flüssigkeitsdrücke in der Größenordnung von 4 ... 6 Mpa,
- Flüssigkeitsdruckgradienten: 20 ... 200 m/m.

Daraus resultiert folgender Versuchsplan:

Tab. 11.1 Versuchsplan der halbtechnischen Untersuchungen

Bentonitsorte	Prüfmedium	Materialart
Calcigel	Wasser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formsteine ▪ Binäres Gemisch
Calcigel	NaCl-Lösung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formsteine ▪ Binäres Gemisch
MX-80	Wasser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formsteine ▪ Granulat
MX-80	NaCl-Lösung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formsteine ▪ Granulat

Der natürliche Ca-Bentonit Calcigel wurde im Ergebnis früherer Untersuchungen als Vorzugsmaterial für untertägige Dichtelemente im Salinar ausgewählt. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde für vertikale Dichtelemente (z. B. für Schachtverschlüsse) ein binäres Gemisch aus Calcigel-Briketts und Calcigel-Granulat entwickelt. Für horizontale Dichtelemente (in Streckenverschlüssen) wurden spezielle Bentonitformsteine entwickelt. Beide Materialarten wurden im Rahmen von in situ Großversuchen erfolgreich getestet /Sitz et al., 2003/.

Der natürliche Na-Bentonit MX-80 (Wyoming Bentonit, „Volclay“) ist ein international bekanntes Referenzmaterial, in erster Linie für Anwendungsfälle im Hartgestein /Schmidt et al., 1992/. Für Vergleichsuntersuchungen unter salinaren Bedingungen wurde MX-80 in die Betrachtungen einbezogen /Herbert & Moog, 2002/. Er ist nur als Feingranulat lieferbar. Briketts oder ein binäres Gemisch aus MX-80 standen nicht zur Verfügung.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde von der Preiss-Daimler Industries GmbH – Feuerfestwerke Wetrop eine Testcharge von 200 Stück (880 kg) Formsteinen aus 60 % MX-80 und 40 % Sand hergestellt. Diese Zusammensetzung ist dem Formstein FS40 (aus Calcigel und Quarzsand) vergleichbar.

Im Rahmen des Vorhabens wurde folgendes Programm der halbtechnischen Versuche (HTV) realisiert.

Tab. 11.2 Zusammenstellung der durchgeführten halbtechnischen Versuche

Versuch	Dichtmaterial	Prüfmedium	Max. Flüssigkeitsdruck
Br 1	Calcigel – Binäres Gemisch	NaCl – Lsg. (80 g/l)	20 bar
Br 2	Calcigel – Binäres Gemisch	NaCl – Lsg. (250 g/l)	60 bar
KU 1	Calcigel – Binäres Gemisch	Wasser	100 bar
KU 2	MX-80 Granulat	Wasser	50 bar
KU 3	MX-80 Granulat	NaCl – Lsg. (250 g/l)	0
KU 4	MX-80 Formsteine	NaCl – Lsg. (250 g/l)	120 bar
KU 5	MX-80 Formsteine	Wasser	120 bar
KU 6	Calcigel Formsteine FS40	Wasser	50 bar
KU 7	Calcigel – Binäres Gemisch	Wasser	50 bar

Abweichungen vom ursprünglichen Versuchsplan (Tab. 11.1) waren folgende:

- Versuch Br 1 wurde mit verdünnter NaCl – Lösung durchgeführt (war ursprünglich mit Wasser geplant).
- Die in den Versuchen Br 1 und Br 2 getesteten Dichtelemente waren in einer Sandwich-Bauweise mit Zwischenschichten aus Sand aufgebaut.
- Mit Calcigel Formsteinen FS40 und NaCl-Lösung wurde kein Versuch durchgeführt. Dafür sollte im Versuch KU 7 der Einfluss von Änderungen der Bentonitdichte (infolge der Kompaktion und Auflockerung im leichtverformbaren binären Gemisch) auf das Messsignal untersucht werden.

11.2 Eingesetzte Versuchstechnik

Für Untersuchungen an Verschlusselementen oder Dichtmaterialien stehen am Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg Versuchsapparaturen im Labor- sowie halbtechnischen Maßstab zur Verfügung. Die halbtechnischen Apparaturen zeichnen sich dadurch aus, dass die geometrischen Dimensionen gegenüber in situ Verhältnissen nur um den Faktor 10 verkleinert sind. Die Versuchsanlagen sind so dimensioniert, dass die Größtkornabmaße der zu untersuchenden Dichtmaterialien sowie die Abmaße der in die Elemente eingebauten Messensorik noch keinen störenden Maßstabseinfluss ausüben.

Von einer Reduzierung aufgrund der Maßstäblichkeit ausgenommen ist die Absoluthöhe des Fluiddruckes. In den Versuchen wird die unter realen Bedingungen zu erwartende Druckhöhe realisiert. Das bedeutet, dass die Proben mit einem 10-fach überhöhten Druckgradienten belastet werden können, was in der Beurteilung der Sicherheiten einen konservativen Ansatz gestattet. Die Arbeiten zum Test der Kabelsensoren wurden in zwei verschiedenen Apparaturen durchgeführt:

- großkalibrige Durchströmungsapparatur (GrokaPerm),
- halbtechnische Anlage für Lastabtrag und Durchströmung (HALP 1).

Grundsätzlicher Unterschied dieser Versuchsstände ist neben den geometrischen Abmessungen und dem Vorhandensein einer Zusatzlasteinrichtung (HALP 1), die Einströmrichtung der Fluide und der realisierbare Fluiddruck. Die Einströmrichtung in den Prüfraum der HALP 1-Apparatur ist in Richtung der Schwerkraft von oben. In die GrokaPerm-Apparatur

wird das Fluid von unten eingebracht. Durch die unterschiedliche Anordnung des Fluideinlasses ist die Simulation unterschiedlicher in situ Flutungsszenarien mit Druckbelastung von oben bzw. von unten möglich.

Die Zusatzlasteinrichtung (HALP 1) ist ein hydraulisches Kolbensystem, welches die eingebauten Materialproben mit einer äußeren statischen Last mit bis zu 25 MPa beaufschlagt. Es eignet sich als Einbauverdichter bzw. kann während des Versuches die Rückdehnung des Dichtkörpers verhindern. Nach Versuchsende ist es durch die Zusatzlasteinrichtung möglich, die Materialprobe auszupressen und dabei die erforderlichen Kräfte zu registrieren.

In den Zylindern kann Dichtmaterial im Verhältnis $l/d < 2,5$ manuell eingebracht, ggf. verdichtet und anschließend mit Flüssigkeit beaufschlagt werden. Der Flüssigkeitsdruck kann bis zu 10,0 bzw. 30,0 MPa (HALP 1) betragen

Gemessene bzw. abgeleitete Parameter sind:

- Versuchszeit,
- eingebrachte Flüssigkeitsmenge (kumulativ und Volumenstrom),
- Flüssigkeitsdruck,
- Auflast- bzw. Verdichtungsdruck,
- Gesamt- bzw. Quelldruck in der Probe,
- punktuelle 3-D-Spannungsverteilung innerhalb der Probe,
- Lastabtrag der Dichtelemente,
- Temperaturen innerhalb und außerhalb der Probe,
- qualitative, punktuelle Information zur Feuchteverteilung.



Bild 11.1 Großkalibrige Durchströmungsapparatur (GrokaPerm)



Bild 11.2 Halbtechnische Anlage für Lastabtrag und Permeabilität (HALP 1)

Die Versuche Br1 und Br2 wurden in der GrokaPerm-Apparatur, die Versuche KU1 bis KU7 in der HALP1-Apparatur durchgeführt. Die beiden Versuchseinrichtungen werden in Anlage 1 beschrieben.

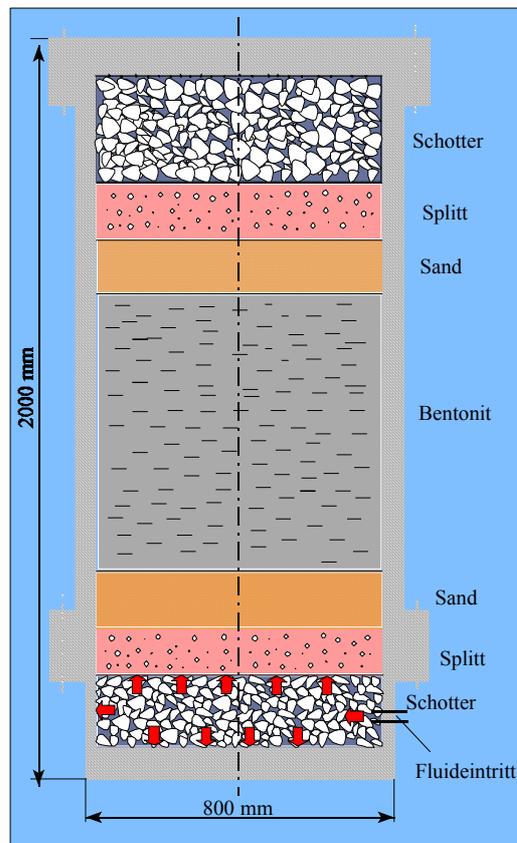


Bild 11.3 Großkalibrige Permeabilitätsapparatur und Schichtenaufbau der Befüllung

Zur Gewährleistung einer stabilen Einstellung des Fluiddruckes, sollte der Schotter in einer Schichtdicke von 20 cm eingebaut werden. Das binäre Gemisch (Calcigel-Kissen und Calcigel-Granulat) soll im oberen Bereich mit einer abgestuften Zusammensetzung eingebaut werden, um einströmseitig eine höhere Durchlässigkeit und damit schnellere Aufsättigung des Materials zu ermöglichen. Calcigel-Granulat kommt mit einem Korngrößenband 0 - 2 mm und 1 - 2 mm zum Einsatz.

11.3 Druckbeaufschlagung

Der in der Aufgabenstellung geforderte Druck von 100 bar, machte den Einsatz von Druckluftübersetzerpumpen erforderlich. Dieses System ermöglicht durch mechanisch verbundene Kolben mit unterschiedlichen Kolbendurchmessern im primären Pneumatik- und sekundären Hydrauliksystem die Erzeugung von hohen Hydraulikdrücken mit dem Betriebsdruck handelsüblicher Niederdruck-Druckluftnetze.

Anfällig sind die Druckluftübersetzerpumpen durch den direkten Kontakt des Fluids mit den beweglichen Teilen der Pumpensteuerung und den Zylinder- und Kolbenoberflächen im Hydraulikteil. Gerade die konzentrierten Salzlösungen, mit ihrer Neigung zum Auskristallisieren und hoher Aggressivität gegenüber den verwendeten Materialien, führen oft zu Ausfällen der Pumpe und zu einer sich verändernden Kennliniencharakteristik mit zunehmender Nutzungsdauer.

Systembedingt besitzen die Pumpen eine große Schalthysterese, da sich die Ein- und Ausschaltimpulse, bedingt durch das Kolbenübersetzungsverhältnis, entsprechend verzögern. Das relativ große Hubvolumen des Hydraulikteils dieser Pumpen führt dazu, dass bei inkompressiblen Systemen, wie sie gequollener hochkompakter Bentonit darstellt, wenige Pumpenhübe genügen, um große Druckzunahmen zu erzeugen. In dieser Situation ist es nicht möglich, mit den Druckluftübersetzerpumpen konstante oder quasikonstante (± 1 bar) bzw. linear ansteigende Druckverläufe zu realisieren. Die Fluidzuführung ist diskontinuierlich. Während jedes Pumpenhubes tritt eine Druckspitze auf. Gerade in der Anfangsphase der Flutung von Dichtkörpern ist eine solche Druckspitze gefährlich, da mit ihr eine dünne, schon gequollene Bentonitpartie punktuell zerstört werden kann und durch diese Störung das Fluid strahlförmig in den dahinter liegenden trockenen Bentonit einschießt. Das kann unter Umständen zur Auswaschung von Strömungskanälen führen, durch die die Lösung schnell weit in die Dichtung vordringt.

Zur Vermeidung dieser unregelmäßigen Durchfeuchtung des Bentonitkörpers wurden in den Versuch Br 1 und Br 2 im Druckbereich bis 10 bar die Flutung mit einem Druckflüssigkeitsspeicher begonnen. Erst ab Drücken größer 10 bar wurde die Druckluftübersetzerpumpe eingesetzt.

In den Versuchen KU 2, 6 und ab dem 04.07.03 auch bei KU 7 wurden Membranpumpen mit manuell verstellbarem Hub und elektronisch geregelter Drehzahl eingesetzt. Besonders geeignet sind Membranpumpen für Versuche mit aggressiven Medien, da keine beweglichen Teile mit dem Medium im Kontakt sind. Bauartbedingt erzeugen diese Pumpen einen stetigen Volumenstrom ohne Druckspitzen. Durch den Druckabfall im Gesamtsystem als Regelgröße, bedingt durch das Fluidvordringen in den Bentonitkörper, wird der Volumenstrom variiert. Die Auslegung der Regelparameter und das kleine Arbeitsvolumen der Membrankammer ermöglichen eine maximale Regelabweichung von ± 1 bar bei Volumenströmen von 0 ml/min bis zur Maximalfördermenge von 16 l/h.

Die Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung erfolgte im Einklang mit den realen Belastungsszenarien für Bentonitdichtelemente. Im Salinar ist der Flüssigkeitszutritt ein angenommener Fall. Dabei wird von einem exponentiellen Druckanstieg vom Beginn des Flüssigkeitszutritts ($p = 0$) bis zum Maximaldruck ausgegangen. Die Höhe des exponentiellen Anstiegs hängt von einer Vielzahl standortbezogener Faktoren ab. Für die Detektion der Flüssigkeitsfront bei unterschiedlichen Flüssigkeitsdrücken wurden druckkonstante Versuchsphasen gefahren. Die Dauer dieser Phasen wurde in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Messsignale der Feuchtegeber festgelegt.

Nach Beendigung des Einbaus wurde die Druckkammer mit der entsprechenden Prüfflüssigkeit befüllt. Danach wurde der Flüssigkeitsdruck in folgenden Stufen erhöht: 1 bar, 5 bar, 10 bar, 30 bar, 40 bar, 50 bar, 70 bar, 100 bar. Die Genauigkeit der Einstellung dieser Druckstufen hängt vom Versuch (Dichtwirkung des Testelementes) und von der Regelgenauigkeit des Pumpstandes ab. Aufgrund des großen Regelintervalls konnten die geforderten Druckstufen nicht genau realisiert bzw. konnten Druckstöße nicht verhindert

fen nicht genau realisiert bzw. konnten Druckstöße nicht verhindert werden. Diese Druckstöße führten zu einer stärkeren Beanspruchung des Dichtelementes. Unter realen Bedingungen sind derartige Druckspitzen bzw. kurzzeitige Höchstbelastungen nicht zu erwarten. In den Versuchen KU 2, KU 6 und KU 7 wurde ein spezieller Pumpstand eingesetzt, der ein wesentlich geringeres Regelintervall hatte. Dadurch wurden Druckstöße ausgeschlossen und Druckstufen in 5 bar-Schritten ermöglicht.

11.4 Messtechnik

Die Messwerterfassung während aller Versuche erfolgte computergestützt. Zeitbezug für die Versuche war Ortszeit; dadurch vereinfachte sich die Synchronisierung der Daten.

Zur Vermeidung von Störeinflüssen auf das TDR-Signal wurde auf den Einbau zusätzlicher Sensoren in den Prüfkörper weitestgehend verzichtet.

Zusätzliche Sensoren wurden nur in folgenden Versuchen eingebaut:

Br 1	Zwei Feuchtedetektoren (Freiberger Bauart)
KU7	Drei Keller-Druckkugeln (siehe Bild 11.4)



Bild 11.4 Keller-Druckkugeln und Kabelsensor (KU 7)

Für die Ermittlung des Fluiddrucks wurden in die Druckleitung Pumpe-Versuchszelle externe piezo-resistive Transmitter eingebaut. Für die Fluidmengenermittlung kamen kapazitive 50 mbar-Pegeltransmitter zur Anwendung. Der Messwert zum Fluidverbrauch wurde indirekt über den Staudruck des Mediums aus der Füllhöhe im Vorratsgefäß ermittelt. Da sowohl Geometrie des Vorratsgefäßes als auch die Dichte des Fluides den Messwert beeinflussen, wurden die entsprechenden Abhängigkeiten für die verwendeten Lösungen und das jeweilige Vorratsgefäß ermittelt. Leider kam es bei diesem Verfahren zur Erfassung des Fluidverbrauches zu Sensorausfällen, da sich der Geber im ständigen Kontakt mit dem Fluid befand.

Als geeigneter in der Ermittlung des Fluidmengenverbrauches wurde das Wägeverfahren eingeschätzt. Hierzu wurde das Vorratsgefäß an eine auf Zug belastbare DMS-Wägezelle gehängt und der Flüssigkeitsverbrauch aus der Gewichtsabnahme ermittelt. Die Geometrie des Vorratsbehälters hat dabei keinen Einfluss. Ebenso ist der Geber nicht im direkten Kontakt mit dem Fluid.

Das Messprinzip der Freiberger Feuchtedetektoren beruht auf dem sich verändernden elektrischen Widerstand der Kontaktstelle Detektor-Probekörper in Abhängigkeit von der Feuchte. Da die sich ergebende Widerstandsänderung aber nicht nur von dem Feuchteunterschied, sondern auch von noch anderen Einflussgrößen (Ankopplungsbedingungen des Kontaktes an das

Prüfmaterial, Salinität) abhängt, ist mit den Detektoren nur eine qualitative Aussage zur Feuchteänderung möglich.

Bei den im Versuch KU 7 in das Probematerial integrierten Keller-Druckkugeln handelt es sich um in Silikonkunststoff eingebettete Drucktransmitter, die aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung nahezu richtungsunabhängig Spannungen aufzeichnen können. Das Verformungsverhalten des Kugelmateriale ist dem des durchfeuchteten Tons ähnlich. Durch die nachgiebige Einbettung des Sensors in den umgebenden Bentonit wird erreicht, dass mechanische Spannungsumlagerungen auf den Sensor vermieden werden können und nur der tatsächlich herrschende Gesamtdruck gemessen wird.

Da alle nichtelektrischen Messgrößen (Druck, Temperatur, Volumen) auf analoge elektrische Größen zurückgeführt wurden, bot sich an, diese über Analog-Digital-Umsetzer (ADU) zu digitalisieren, rechnergestützt zu erfassen und weiter zu verarbeiten.

Als ADU kam ein 20-kanaliges, 5^{1/2}-stelliges Digitalvoltmeter der Firma Agilent zum Einsatz, welches über die Loggerfunktion auch die Messwertspeicherung übernahm. Das Auslesen der Datensätze erfolgte mit der geräteeigenen Software Benchlink in ein ASCII-Format. Weiterverarbeitet, archiviert und visualisiert wurden die Daten mit Excel.

11.5 Versuchseinbau

Die zu testenden Kabelsensoren wurden in Bentonitdichtelemente verschiedener Ausführung (s. Tab. 11.2) eingebaut. Die Unterschiede sind nachfolgend beschrieben.

11.5.1 Versuche Br 1 und Br 2

Die Versuche Br 1 und Br 2 wurden in der 0,8 m Versuchszelle durchgeführt, um eine Anordnung von 4 Kabelsensoren zu testen. Die Flüssigkeitsdruckbelastung erfolgte von unten. Eine Besonderheit der Versuche war der Test eines Dichtelementes in Sandwich-Bauweise aus binärem Calcigel-Gemisch und zwischengelagerten Sandschichten. Hierbei sollte der Einfluss der Sandschichten auf die Flüssigkeitsausbreitung untersucht werden. Die druckseitige (untere) Bentonitschicht sollte in der Durchlässigkeit höher sein, was durch eine geringere Trockendichte bzw. eine Abmagerung des Granulatanteiles im binären Gemisch erreicht wurde. Den Aufbau der Versuche Br 1 und Br 2 sowie die erreichten Einbautrockendichten zeigen die Anlagen 11.3.1 und 11.4.1. Die Bentonittrockendichte im Versuch Br 1 war relativ gering, da das Dichtelement entsprechend durchlässig sein sollte, um die Flüssigkeitsausbreitung messtechnisch deutlich feststellen zu können.



Bild 11.4 Einbau von binärem Gemisch und Bandkabeln in die großkalibrige Permeabilitätsapparatur

11.5.2 Versuche KU 1 – 3 und KU 7

Die Versuche KU 1 – 3 und der Versuch KU 7 wurden in einer 0,3 m Versuchszelle durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein mittig angeordneter Kabelsensor getestet. Die Dichtelemente bestanden aus binärem Calcigel-Gemisch oder MX-80-Granulat. Der Einbau erfolgte lagenweise mit einer mechanischen Nachverdichtung durch Stampfen. Beim Einbau wurde darauf geachtet, dass um den Kabelsensor und an der Randzone keine Imperfektionen und somit bevorzugte Fließwege entstehen.

Die Einbauskizzen der Versuche zeigen die Anlagen 11.5.1, 11.6.1, 11.7.1 und 11.11.1, ebenso die erreichten Einbautrockendichten.

Hervorzuheben ist, dass mit dem MX-80-Granulat nur eine Einbautrockendichte von $1,04 \text{ g/cm}^3$ erreicht wurde, die erwartungsgemäß zu hohen Durchlässigkeiten und sehr geringen Quelldrücken führte.

Mit dem binären Gemisch (Calcigel) wurden Einbautrockendichten von $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Dieser Wert ist zufriedenstellend und entspricht den Anforderungen an flüssigkeitsdichte Dichtelemente unter salinaren Bedingungen.



Bild 11.5 Halbtechnische Anlage für Lastabtrag und Permeabilität (HALP 1) mit eingebautem Sensor

11.5.3 Versuche KU 4 – 6

Die Versuche KU 4 – 6 wurden in einer 0,3 m Versuchszelle durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Kabelsensor getestet. Im Unterschied zu den Versuchen KU 1 – 3 und 7 bestanden die Dichtelemente aus Bentonitformsteinen. Der Einbau erfolgte lagenweise. Die entsprechenden Teilsteine wurden aus den handelsüblichen Bentonitformsteinen passend zugesägt. Die Restfugen wurden mit Bentonitgranulat (entsprechend Calcigel oder MX-80) verfüllt. Dabei wurde darauf geachtet, dass besonders um den Kabelsensor und an der Randzone keine Imperfektionen und somit bevorzugte Fließwege entstehen.

Die Einbauskizzen und die erreichten Einbautrockendichten der Versuche KU 4 und 5 sind in den Anlagen 11.8.1 und 11.9.1 dargestellt. Sie entsprechen auch dem Einbau des Versuches KU 6. (Anlage 11.10.1). Bild 11.6 zeigt ein Beispiel eines Dichtelementes aus Bentonitformsteinen mit eingebautem Kabelsensor.

Die Unterschiede in den Einbautrockendichten sind durch subjektive Faktoren begründet. Auf Grund der erforderlichen Anpassung der Formsteine an die Rundung des Versuchszylinders und dem mittig gelegten Kabelsensor war der Einbau der Formsteine in die Versuchszylinder technisch sehr aufwendig.



Bild 11.6 Einbau der Bentonitformsteine im Versuch KU 4 (links: mit Kabelsensor, rechts: mit Granulat verfüllte Oberfläche der Druckseite)

Im Laufe der Untersuchungen konnte der technisch aufwendige Einbau der Formsteine verbessert werden, was an der steigenden Einbaudichte der Formsteine (ohne Granulat) ersichtlich ist. Je genauer der Formsteinverband eingebaut werden kann, um so weniger Fugen müssen nachträglich mit Granulat verfüllt werden.

Die in den Versuchen KU 5 und 6 erreichten Bentonittrockendichten von $1,65 \text{ g/cm}^3$ entsprechen den in situ erreichten Werten.

11.6 Rückbau

Um die Feuchteausbreitung im Dichtelement ermitteln zu können, wurde nach Beendigung der Versuche ein Rückbau des Dichtelementes durchgeführt. Dabei wurde nach einem vorgegebenen Raster in verschiedenen Ebenen Proben aus den Bentonitdichtelementen entnommen und der gravimetrische Wassergehalt durch Ofentrocknung (105°C) bestimmt. Aus diesen Werten wurde die Feuchteverteilung am Ende des Versuches bestimmt. Mit dieser Feuchteverteilung können die Messwerte der Kabelsensoren (Zustand am Versuchsende) verifiziert werden. Weiterhin dient die im Rückbau bestimmte Feuchteverteilung im Dichtelement zur Kalibrierung der hydraulischen Modellrechnung zur Flüssigkeitsausbreitung im Bentonitdichtelement.

11.7 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse beinhalten folgende Daten in Abhängigkeit von der Versuchszeit:

- Dichteverteilung bei Versuchsbeginn,
- Flüssigkeitsdruck,
- kumulatives Flüssigkeitsvolumen (aus dem Füllstand berechnet) und Volumenstrom,
- Temperatur (in Einzelfällen),
- Feuchteverteilung im Dichtelement am Ende des Versuches.

Die Versuchsergebnisse sind in den Anlagen 11.3 - 11 zusammengefasst.

11.7.1 Versuch Br 1

Der Versuch Br 1 wurde mit binärem Calcigelgemisch und verdünnter NaCl-Lösung durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.1). Die Versuchsdaten zu Flüssigkeitsdruck, Temperatur und Füllstandsvolumen sind in Anlage 11.3.3 zusammengefasst. Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt, neben den durch die Pumptechnik (großes Regelintervall) bedingten Druckstößen, zusätzliche Druckspitzen und Druckabfälle. Diese Druckabfälle korrespondieren mit Anstiegen des Flüssigkeitsverbrauches (abfallender Füllstandswert). Der maximal erreichbare Flüssig-

keitsdruck betrug 20 bar. Über längere Zeit war nur ein Flüssigkeitsdruck von ca. 5 bar haltbar. Diese Instabilitäten weisen auf ein undichtes Verhalten des Dichtelementes hin.

Dieser Befund wird durch die Ergebnisse der Feuchteverteilung am Versuchsende (nach dem Ausbau) bestätigt (siehe Anlage 11.3.4):

- bevorzugte Durchfeuchtung entlang aller Kabelsensoren,
- besonders intensiver Flüssigkeitsdurchbruch entlang des Kabelsensors 1.1 - 1.2 bis zur Luftseite,
- gleichmäßig stark durchfeuchteter und aufgelockerter Bereich bis zu einer Entfernung von ca. 30 cm von der Luftseite.

Die Ursachen liegen in der relativ geringen Einbautrockendichte des Bentonitdichtelementes (siehe Anlage 11.3.1). Der druckseitige Bereich wurde nur aus Bentonitkissen (ohne Granulat) aufgebaut (Einbautrockendichte $1,22 \text{ g/cm}^3$), um eine gleichmäßige Durchfeuchtung auf der Druckseite zu erreichen. Über die Wirkung der zwischenliegenden Sandschichten (Sandwich-Aufbau) können keine Aussagen gemacht werden. Zumindest haben diese Schichten den bevorzugten Flüssigkeitsdurchtritt entlang der Kabelsensoren nicht verhindert. Die Schwächere zonen im Bereich der Kabelsensoren sind, neben dem Vorhandensein der Kabel, durch die geringe Einbautrockendichte des Bentonits (ungenügender self sealing Effekt) und durch die Schwierigkeiten der Verdichtung des Bentonits entlang der Kabelsensoren beim Einbau bedingt.

11.7.2 Versuch Br 2

Der Versuch Br 2 wurde mit binärem Calcigelgemisch und NaCl-Lösung durchgeführt. Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch zeigt Anlage 11.4.2. Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt, neben den durch die Pumptechnik (großes Regelintervall) bedingten Druckstößen, leichte Instabilitäten bei der Phase der Flüssigkeitsdruckerhöhung von 50 bar auf 70 bar.

Abweichungen vom geplanten Versuchsverlauf ergaben sich durch Baumaßnahmen in der Versuchshalle, durch die eine Fortsetzung der Druckbelastung nicht möglich war. Der Versuch wurde "angehalten", wodurch es zum natürlichen Druckabfall im System kam. Dies führte zur Entspannung des Dichtelementes, d.h. zum Zurückquellen in Richtung Druckkammer. Durch den Rückbau wurde bestätigt, dass es in dieser Phase zu Rissbildungen im Dichtelement und zu einem Abriss eines Kabelsensors kam. Nach Abschluss der Baumaßnahmen wurde festgelegt, eine Zweitbelastung des Dichtelementes durchzuführen.

Die Lage der Probenahmepunkte beim Rückbau zeigt Anlage 11.4.3. Die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Anlage 11.4.4. Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.4.5. Daraus ist ersichtlich, dass es im Versuch Br 2 gelang, durch eine höhere Einbautrockendichte ($1,52 \text{ g/cm}^3$ auf der Druckseite) eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu erreichen. Bevorzugte Fließwege entlang der Kontur oder der Kabelsensoren wurden nicht festgestellt. Die Grenze der beim Ausbau ermittelten Flüssigkeitsfront fällt zusammen mit der Lage der zweiten Sandschicht (siehe Anlage 11.4.5).

11.7.3 Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU1)

Der Versuch KU 1 wurde mit binärem Calcigelgemisch und Wasser durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.2). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch zeigt Bild 11.7. Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt die durch die Pumptechnik (Regelintervall ca. 5 bar) bedingten Druckstöße. Instabilitäten sind nicht erkennbar. Nach der Befüllungsphase erhöht sich mit zunehmendem Flüssigkeitsdruck die verbrauchte Flüssigkeitsmenge nur geringfügig.

Daraus lässt sich ein ausgesprochen gutes Dichtverhalten des Systems ableiten. Der maximale Flüssigkeitsdruck von 100 bar wurde problemlos erreicht und gehalten.

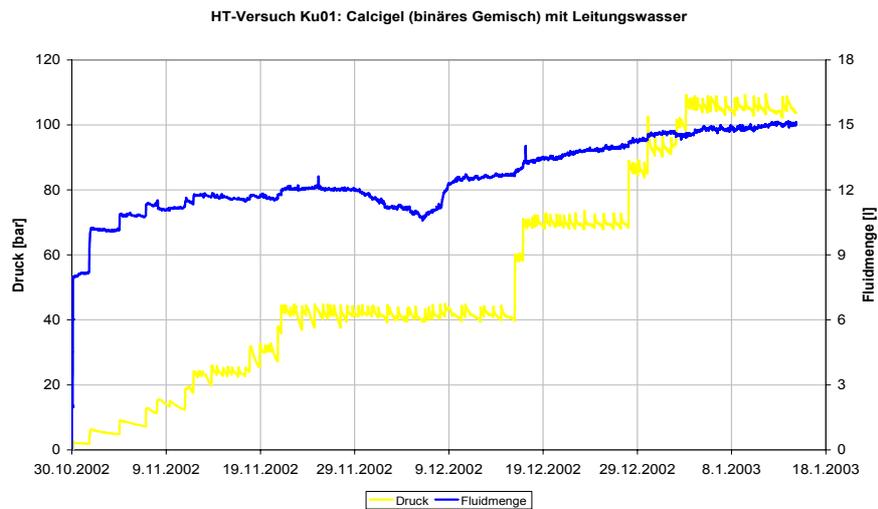


Bild 11.7 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU01

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der entnommenen Proben zeigt Bild 11.8 (Anlage 11.5.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Bild 11.8 und Anlage 11.5.4. Die Feuchteverteilung im Dichtelement ist vollkommen gleichmäßig. Weder an der Kontaktzone zur Behälterwand noch am Kabelsensor wurden Unregelmäßigkeiten festgestellt. Aufgrund des Quelldruckes des durchfeuchteten Bentonits, der Verformbarkeit der Druckkammer und der Nachverdichtung des trockenen Bereiches des Dichtelementes ist die Druckseite des Dichtelementes um 2,3 cm in Richtung der Druckkammer aufgequollen. Dadurch kam es zu einer bevorzugten Auflockerung des druckseitigen Bereiches des Dichtelementes. Dies führte zu einer höheren Wasseraufnahme des Bentonits.

Bild 11.8 zeigt die Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter nach dem Ausbau, hierbei strömte das Wasser von unten (im Bild links) in den Behälter. Der Kabelsensor wurde von oben in das binäre Gemisch eingebaut; sein Ende ist dem einströmenden Fluid am nächsten.

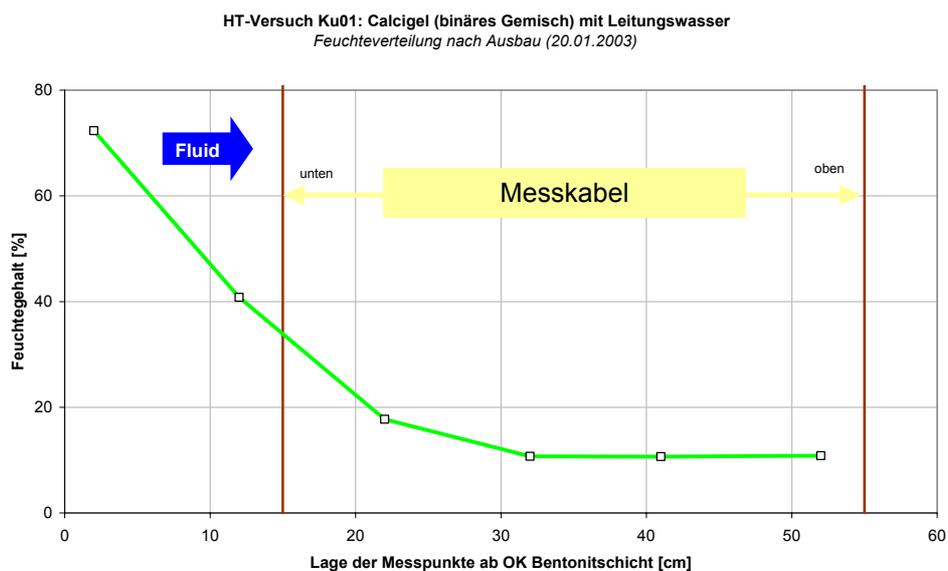


Bild 11.8 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Auswertungen der Impulsverläufe zwischen Einbau und Ausbau des Versuches (Bild 11.9) während einer Versuchsdauer von 40 Tagen bestätigen die im Bild 11.8 gezeigte Feuchteverteilung.

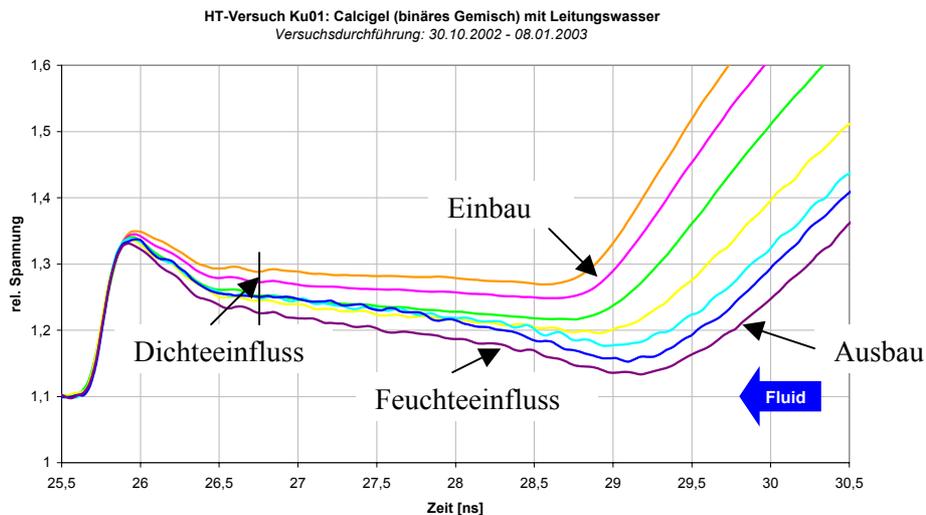


Bild 11.9 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 40 Tagen

Entlang des Kabels baut sich ein hoher Quelldruck auf (links), der mit einer Aufweitung der Impulsverläufe im Bereich von 26,5 bis 28 ns einhergeht. Das Eindringen der Feuchte zwischen den Messpunkten 10 und 20 (Bild 11.8) im Bereich $> 28,5$ ns wird durch einen weiteren Abfall der Impulsverläufe sichtbar.

11.7.4 Versuch mit MX-80-Granulat und Wasser (KU2)

Der Versuch KU 2 wurde mit MX-80-Granulat und Wasser durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.2). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit zeigt Bild 11.10. Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt den durch die bessere Pumptechnik (Regelintervall ca. 1 bar) gleichmäßigeren Druckverlauf ohne Druckstöße. Instabilitäten sind nicht erkennbar. Nach der Befüllungsphase erhöht sich mit zunehmendem Flüssigkeitsdruck die verbrauchte Flüssigkeitsmenge nur geringfügig. Daraus lässt sich ein ausgesprochen gutes Dichtverhalten des Systems ableiten. Der maximale Flüssigkeitsdruck von 50 bar wurde problemlos erreicht und gehalten.

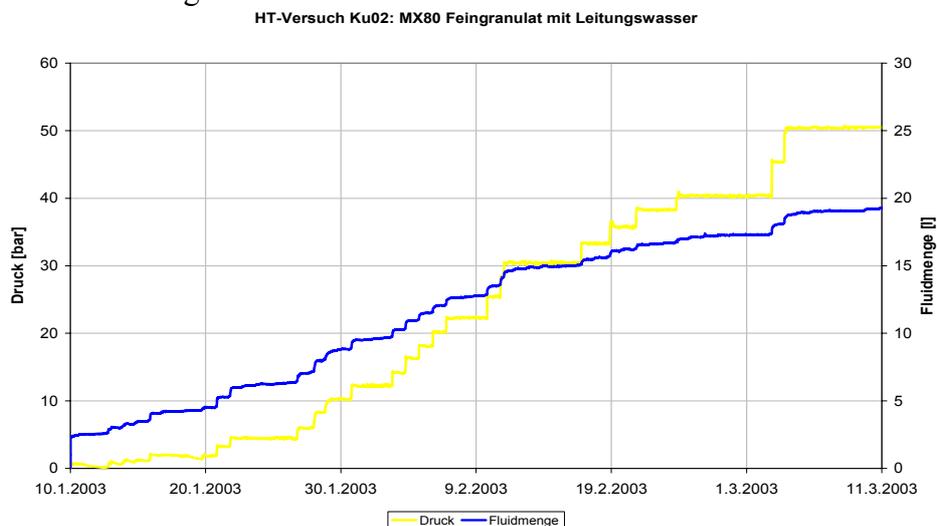


Bild 11.10 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU 2

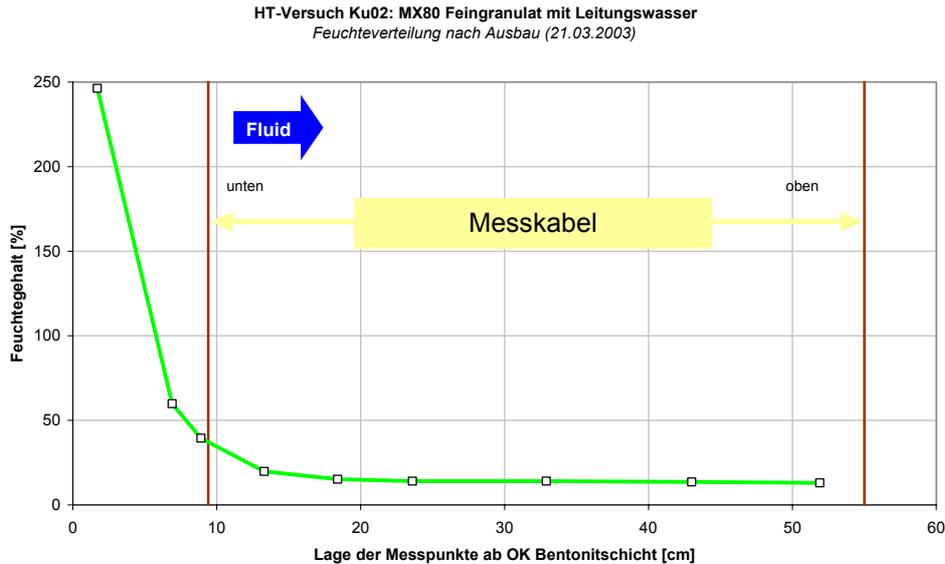


Bild 11.11 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.11 (Anlage 11.6.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.6.4. Die Feuchteverteilung im Dichtelement ist relativ gleichmäßig. Die Grenze der Flüssigkeitsfront im Dichtelement ist ausgesprochen scharf. Dies wird durch die Impulsverläufe am Kabelsensor Bild 11.12 bestätigt. Am Kabelsensor kommt fast keine Feuchtigkeit an. An der Kontaktzone zur Behälterwand wurden keine Unregelmäßigkeiten festgestellt. Geringfügige Unregelmäßigkeiten der Lage der Flüssigkeitsfront (einige "cm") wurden am Kabelsensor beobachtet. Anders als beim Versuch KU 1 (Zurückquellen des Dichtelementes) trat eine Kompaktion des Dichtelementes um 9,3 cm auf (ca. 14 % der Länge). Dies ist durch die nur geringe Einbautrockendichte des MX-80-Granulats von $1,04 \text{ g/cm}^3$ bedingt, bei der sich ein nur geringer Quelldruck ($< 1 \text{ bar}$) bilden kann. Infolge der gegenüber Wasser vorhandenen Dichtwirkung (ausreichend geringe hydraulische Leitfähigkeit) kam es zu einer Kolbenwirkung des durchfeuchteten Teiles gegenüber dem trockenen bzw. ungesättigten Teil des Dichtelementes. Diese Kolbenwirkung führt zu einer Verdichtung des trockenen Teils des Dichtelementes und zu einer Aufweitung im Impulsverlauf zwischen 25 und 25,5 ns (s. Bild 11.12).

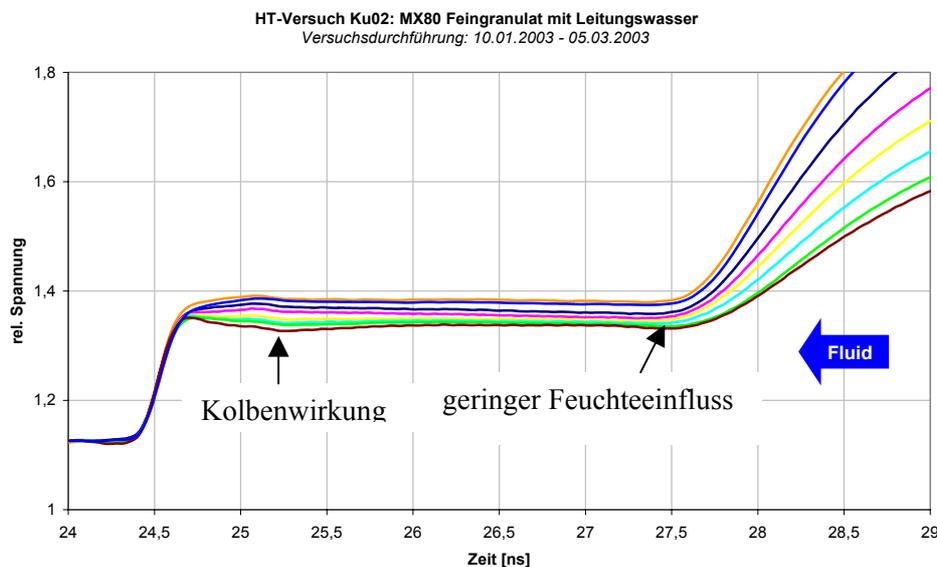


Bild 11.12 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 55 Tagen

11.7.5 Versuch mit MX-80-Granulat und Steinsalzlösung (KU3)

Der Versuch KU 3 wurde mit MX-80-Granulat und NaCl-Lösung durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.2). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit zeigen Bild 11.13 (Anlage 11.7.2). Es wird deutlich, dass sich über den Versuchsverlauf kein Flüssigkeitsdruck aufbaut. Die NaCl-Lösung trat praktisch drucklos in das Dichtelement ein. Der Versuch wurde nach 19 Tagen beendet. Gegenüber NaCl-Lösung war das Dichtelement aus MX-80-Granulat undicht. Dies lag an der nur geringen erreichbaren Einbautrockendichte von $1,04 \text{ g/cm}^3$.

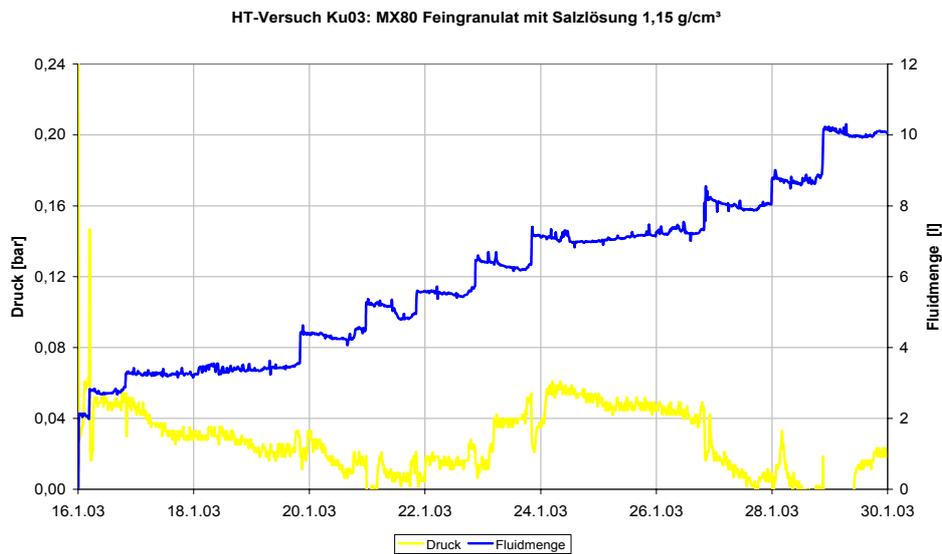


Bild 11.13 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU 3

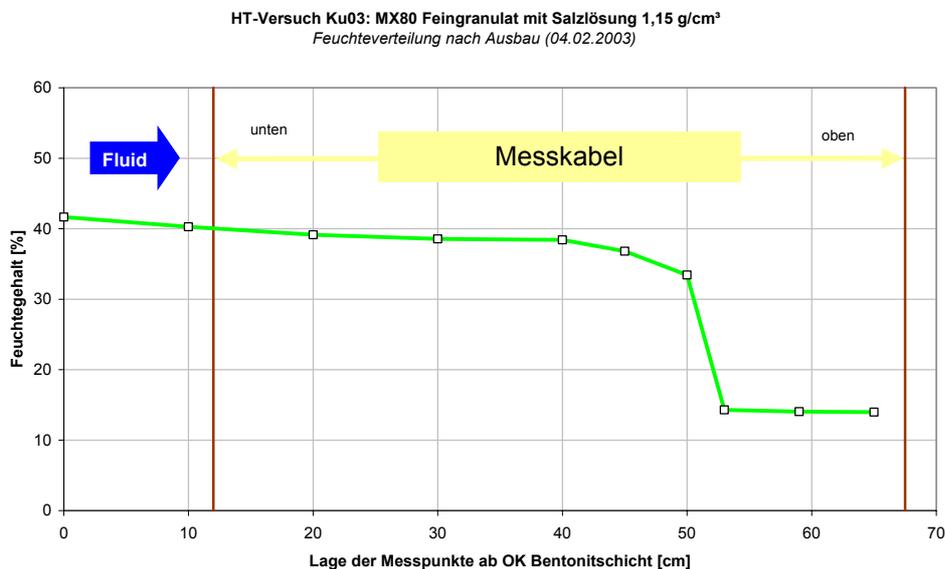


Bild 11.14 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.14 (Anlage 11.7.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.7.4. Das Dichtelement ist fast durchgehend durchfeuchtet. In der Mitte (Kabelsensor) läuft die Feuchtefront gegenüber dem Rand etwas (einige "cm") voraus. Das Dichtelement ist weder gequollen, noch kompaktiert. Das Durchdringen der Feuchte durch den Versuchsaufbau, ohne dass sich ein Quelldruck aufbaut, wird in den Impulsverläufen des Bildes 11.15 deutlich.

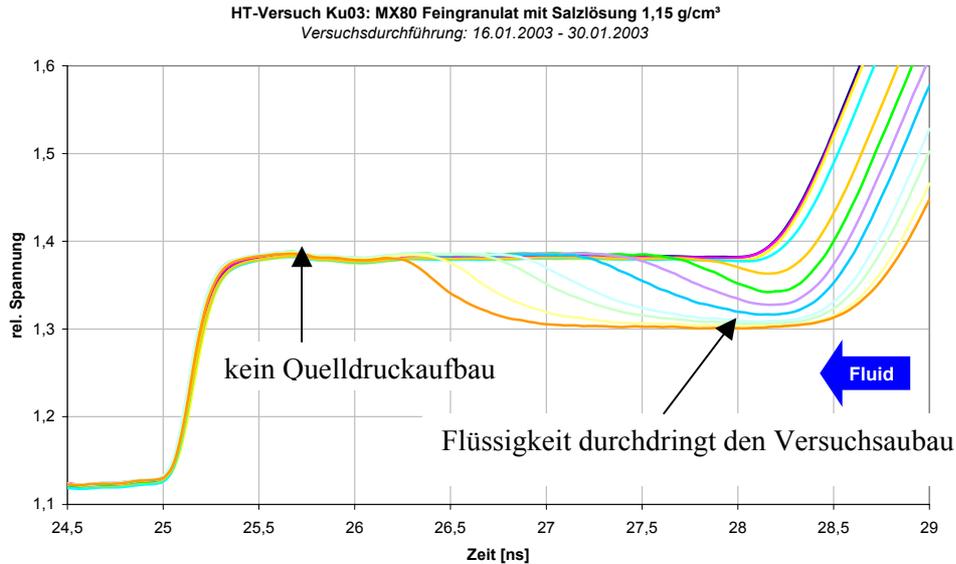


Bild 11.15 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 19 Tagen

11.7.6 Versuch mit MX-80-Formsteinen und Steinsalzlösung (KU4)

Der Versuch KU 4 wurde mit MX-80-Formsteinen und NaCl-Lösung durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.3). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit zeigt Bild 11.16 (Anlage 11.8.2).

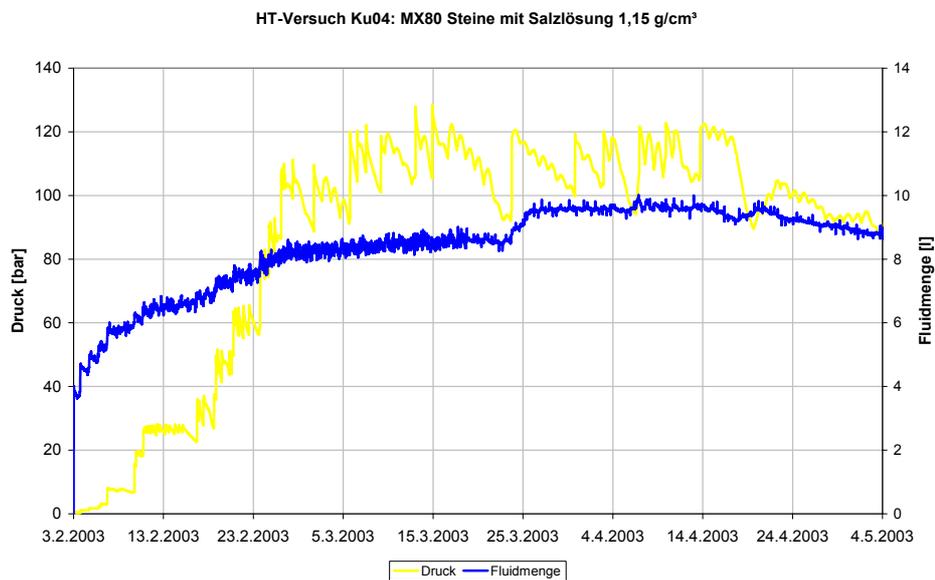


Bild 11.16 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU 4

Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt die durch die Pumptechnik (Regelintervall ca. 20 bar) bedingten Druckstöße bis zu max. 25 bar. Ungeachtet dessen traten beim Flüssigkeitsverbrauch keine Unregelmäßigkeiten auf. Nach der Befüllungsphase und der relativ schnellen Drucksteigerung auf ca. 100 bar (innerhalb von 3 Wochen) erhöht sich die verbrauchte Flüssigkeitsmenge nur geringfügig. Daraus lässt sich ein gutes Dichtverhalten des Systems ableiten. Der maximal Flüssigkeitsdruck von 120 bar wurde problemlos erreicht und im Rahmen der möglichen Regelgenauigkeit gehalten.

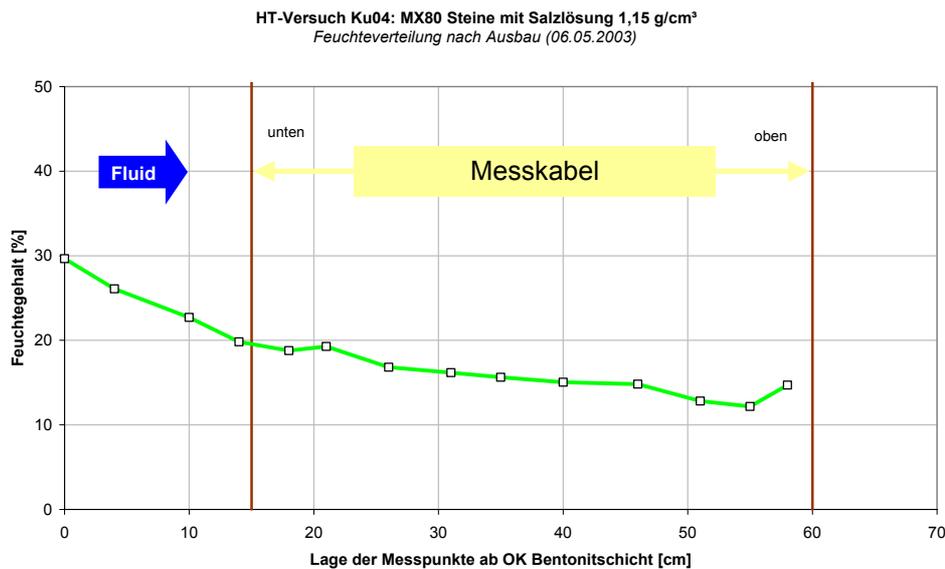


Bild 11.17 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.17 (Anlage 11.8.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.8.4. Das Dichtelement ist unregelmäßig durchfeuchtet. Es lassen sich Hinweise (feuchte Luftseite) auf einen möglichen Flüssigkeitsdurchtritt über den Rand ableiten. Da das Dichtelement sich bis zum maximalen Flüssigkeitsdruck stabil verhielt, folgt daraus, dass die Unregelmäßigkeiten der Durchfeuchtung in der Anfangsphase durch eine Flüssigkeitsausbreitung über die noch trockenen Fugen zwischen den Formsteinen hervorgerufen wurden. Nach dem Zuquellen der Fugen verhält sich das Gesamtsystem stabil. Das Dichtelement ist praktisch nicht verformt. Bild 11.18 zeigt eine Ebene im druckseitigen Bereich des Dichtelementes, aus dem erkennbar ist, dass sich durch das Quellverhalten der Bentonitformsteine ein homogener Bentonitkörper gebildet hat.



Bild 11.18 Gleichmäßige Durchfeuchtung der MX-80 – Formsteine (Versuch KU 4)

Die Auswertung der Impulsverläufe (Bild 11.19) bestätigen o.g. Beobachtungen. Das Wasser schießt in der Anfangsphase durch den Versuchsaufbau entlang des Kabels und es entsteht weder Flüssigkeits- noch Quelldruck (s. Bild 11.16). Im Impulsdiagramm Bild 11.19 zeigt sich, dass im Spalt zwischen Kabel und Formsteinen ein Wasserfilm vorhanden ist. Erst nach einiger Zeit, nach der gleichmäßigen Durchfeuchtung der Steine baut sich der Quelldruck auf.

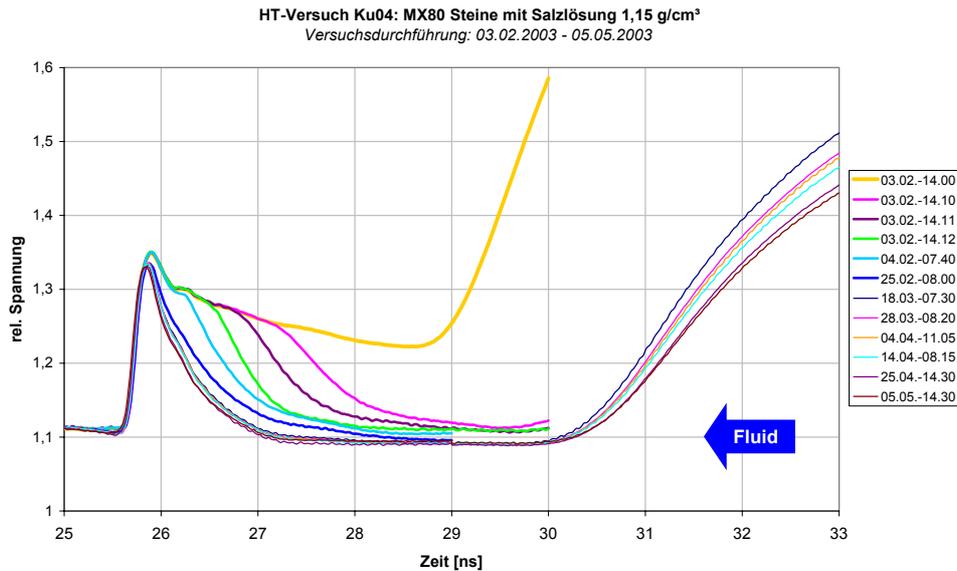


Bild 11.19 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 92 Tagen

11.7.7 Versuch mit MX-80-Formsteinen und Wasser (KU5)

Der Versuch KU 5 wurde mit MX-80-Formsteinen und Wasser durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.3). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit zeigt Bild 11.20 (Anlage 11.9.2).

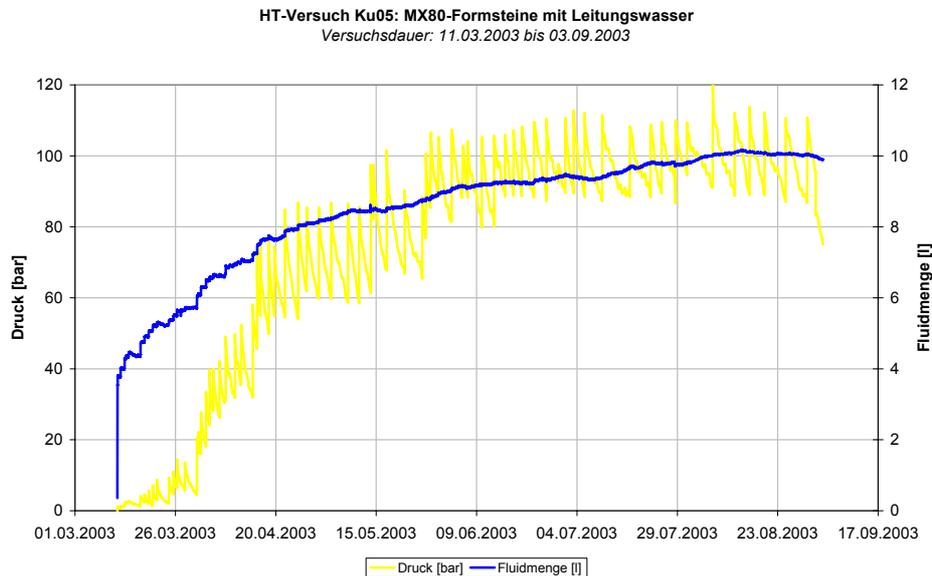


Bild 11.20 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU 5

Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt die durch die Pumptechnik (Regelintervall ca. 20 bar) bedingten Druckstöße bis zu max. 25 bar. Ungeachtet dessen traten beim Flüssigkeitsverbrauch keine Unregelmäßigkeiten auf. Nach dem Erreichen des geplanten Flüssigkeitsdruckes von 100 bar erhöhte sich die verbrauchte Flüssigkeitsmenge nur geringfügig. Daraus lässt sich ein ausgesprochen gutes Dichtverhalten des Systems ableiten. Der maximale Flüssigkeitsdruck von 120 bar wurde problemlos erreicht und im Rahmen der technisch möglichen Regelgenauigkeit gehalten.

HT-Versuch Ku05: MX80-Formsteine mit Leitungswasser
 Feuchteverteilung nach Ausbau (05.09.2003)

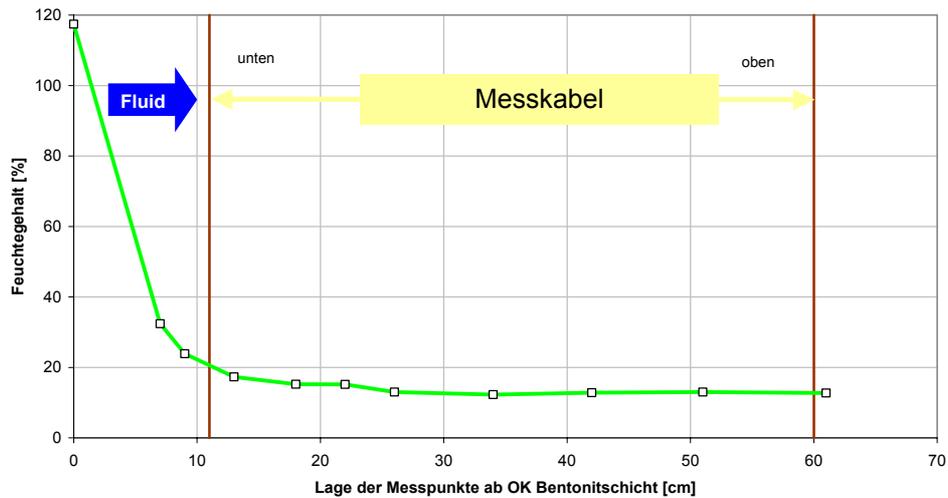


Bild 11.21 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.21 (Anlage 11.9.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.9.4. Das Dichtelement ist regelmäßig durchfeuchtet. Die Druckseite des Dichtelementes war um 4,3 cm in Richtung der Druckkammer aufgequollen. Dadurch kam es zu einer bevorzugten Auflockerung des druckseitigen Bereiches des Dichtelementes. Dies führte zu einer höheren Wasseraufnahme des Bentonits (siehe Bild 11.22)



Bild 11.22 Auflockerung/Suspension des Bentonits an der Druckseite des Dichtelementes (Versuch KU 5)

Das gute Dichtverhalten kann mit den Impulsverläufen im Bild 11.23 bestätigt werden. Es entsteht ein guter Quelldruckaufbau um das Messkabel. Übereinstimmend mit Bild 11.21 zeigen die Impulsverläufe, dass fast keine Feuchtigkeit an das Messkabel gelangte.

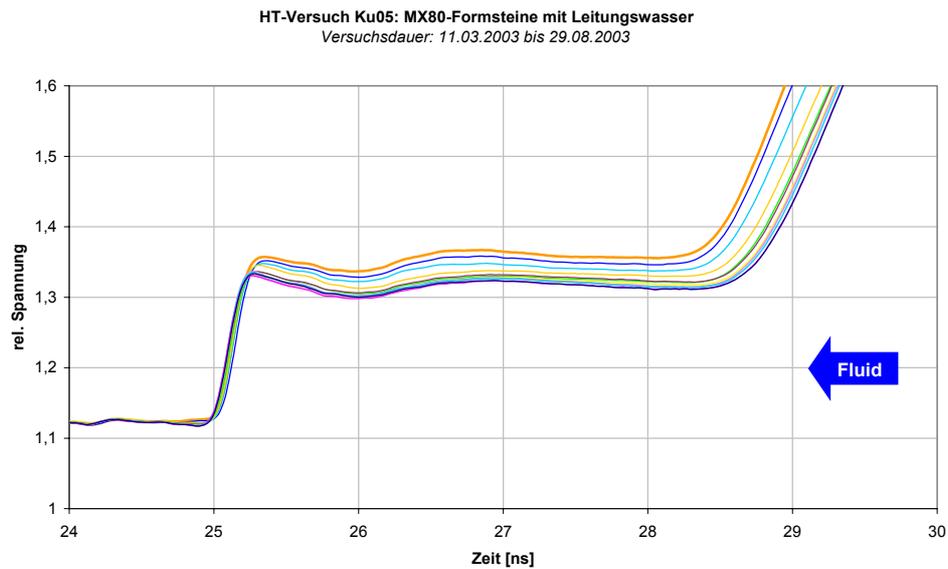


Bild 11.23 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 171 Tagen

11.7.8 Versuch mit Calcigel-Formsteinen und Wasser (KU 6)

Der Versuch KU 6 wurde mit Calcigel-Formsteinen FS40 und Wasser durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.3). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch in Abhängigkeit von der Zeit zeigt Bild 11.24 (Anlage 11.10.1). Durch eine Pumpanlage mit geringem Regelintervall wurde ein gleichmäßiger Flüssigkeitsdruckverlauf erreicht. Druckstöße traten nicht auf. Durch den Ausfall eines Füllstandsensors trat eine Lücke in der Registrierung des kumulativen Flüssigkeitsverbrauches auf, die jedoch das Endergebnis nicht beeinflusste. Der geplante Enddruck von 50 bar wurde über ca. 3 Monate konstant gehalten.

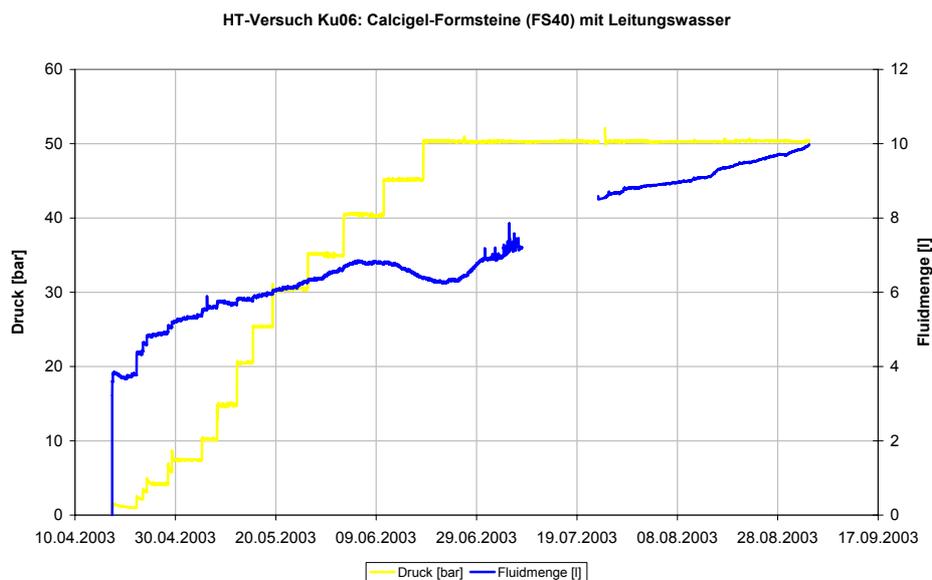


Bild 11.24 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU06

HT-Versuch Ku06: Calcigel-Formsteine (FS40) mit Leitungswasser
 Feuchteverteilung nach Ausbau (12.09.2003)

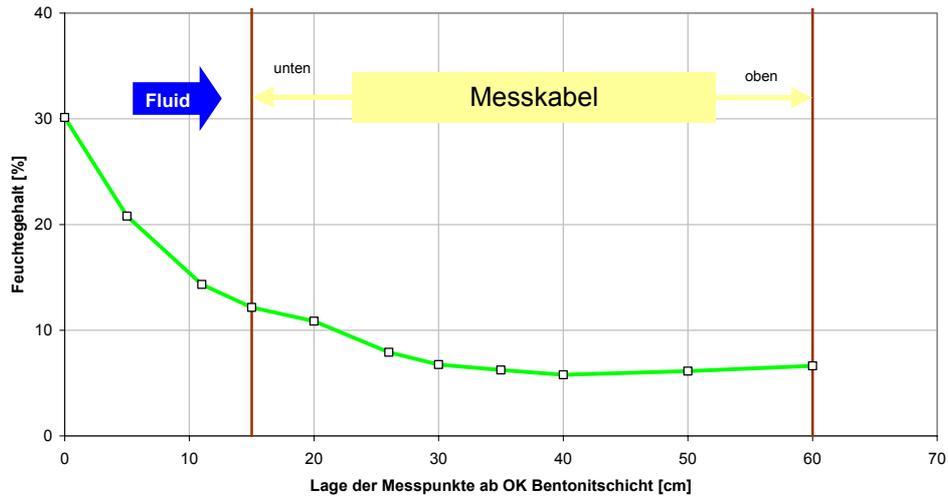


Bild 11.25 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.25 (Anlage 11.10.2). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.10.3. Die Feuchteverteilung im Dichtelement ist regelmäßig. Das Dichtelement wurde um 0,5 cm kompaktiert.

HT-Versuch Ku06: Calcigel-Formsteine (FS40) mit Leitungswasser
 Versuchsdauer: 17.04.2003 bis 29.08.2003

Wasser drang in Anfangsphase
 in Versuchsaufbau ein

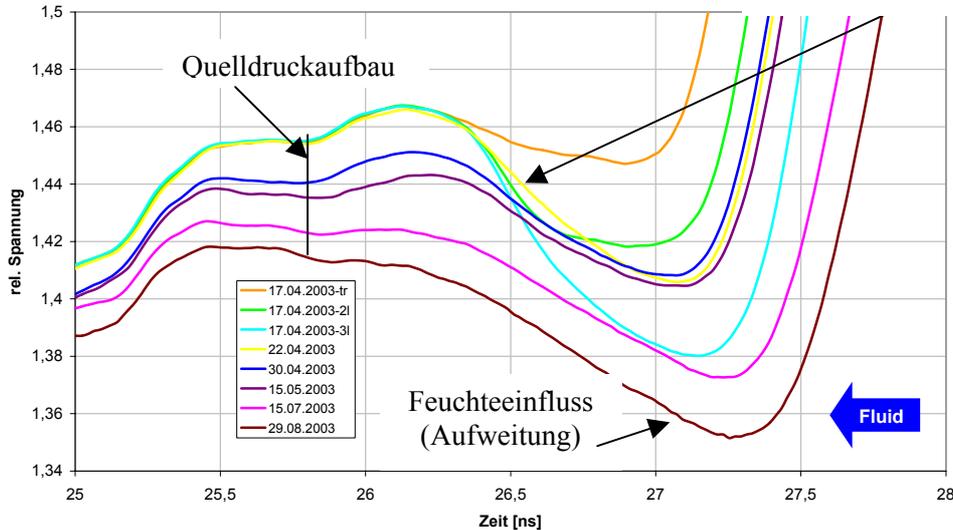


Bild 11.26 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 134 Tagen

In der Anfangsphase (17. 4. 2003) drang Wasser in den Versuchsaufbau ein (Bereich 26,3 bis 27,5 ns) (s. auch Bild 11.25), danach wurde erst ein Quelldruck aufgebaut (Bereich 25 bis 26 ns). Die zunehmende Aufweitung von April bis August nach der Ausbildung des Quelldruckes (Bereich 26,2 bis 27,5 ns) wurde durch eindringende Feuchte verursacht.

11.7.9 Versuch mit binärem Calcigel-Gemisch und Wasser (KU7)

Der Versuch KU 7 diente der Reproduzierbarkeit von Versuch KU1 (s. Abschn. 11.7.3) und wurde nochmals mit binärem Calcigelgemisch und Wasser durchgeführt (siehe Abschnitt 11.5.2). Den Flüssigkeitsdruck und den Flüssigkeitsverbrauch zeigt Anlage 11.11.2. Der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes zeigt die durch die Pumpentechnik bedingten Druckstöße. Bei 25 bar Flüssigkeitsdruck wurde der Pumpstand gewechselt. Dadurch bedingte Instabilitäten sind nicht erkennbar. Im Versuch KU 7 wurden für zusätzliche Messungen der axialen Lastverteilung im Dichtelement zwei Drucksensoren (Keller-Kugelsensoren) eingebaut. Für diese Untersuchungen wurden zwei Phasen mit konstantem Flüssigkeitsdruck, bei 30 bar und bei 50 bar, realisiert. Durch den Ausfall eines Füllstandsensors musste der Kurvenverlauf der Fördermenge zum tatsächlichen Endverbrauch interpoliert werden. Der geplante Enddruck von 50 bar wurde über ca. 2 Monate konstant gehalten.

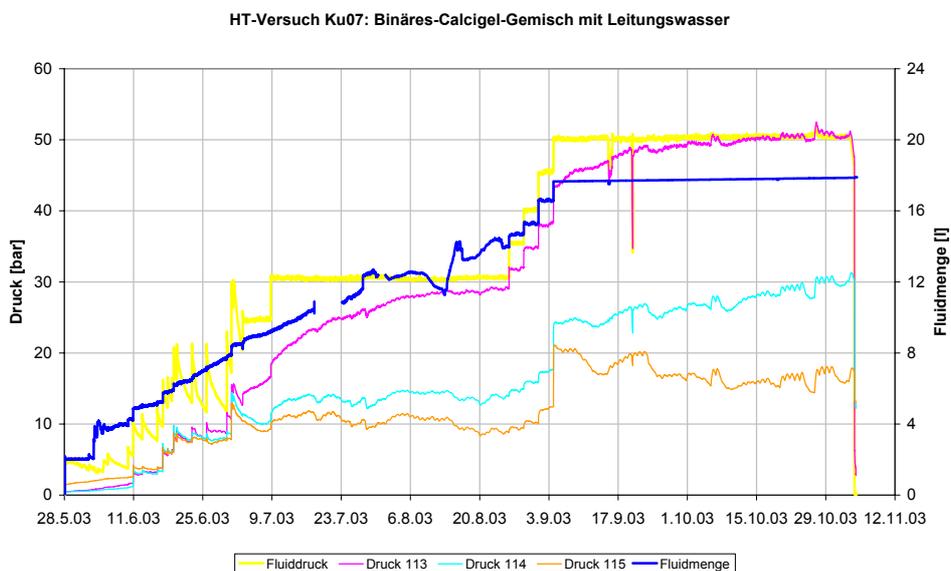


Bild 11.27 Steigerung des Fluiddruckes und der Fluidmenge beim Versuch KU 6

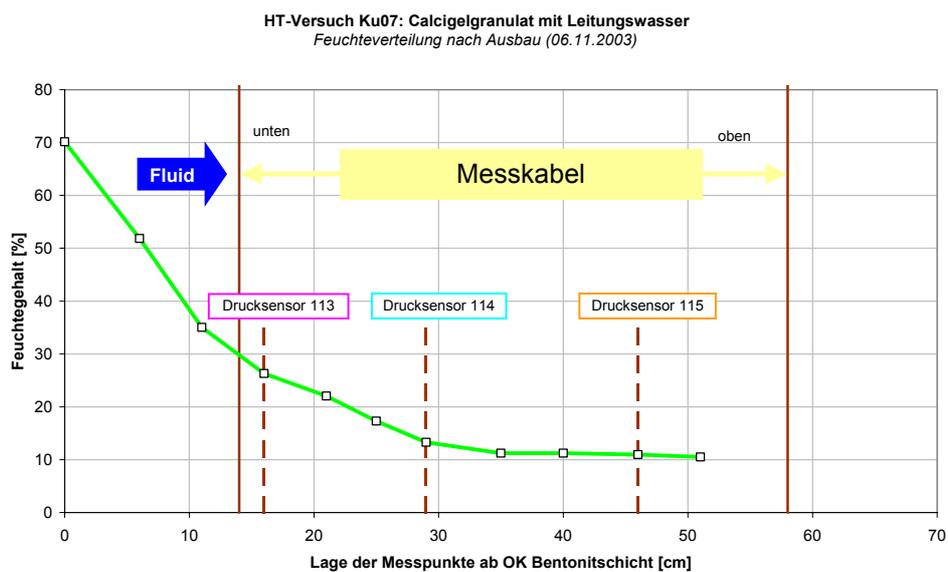


Bild 11.28 Verteilung des Feuchtegehaltes im Druckbehälter

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsbestimmung der einzelnen Proben zeigt Bild 11.28 (Anlage 11.11.3). Die daraus abgeleitete Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt Anlage 11.11.4. Die Feuchteverteilung im Dichtelement zeigt geringfügige Unregelmäßigkeiten (einige "cm") an der Grenze feucht/trocken. Aufgrund des Quelldruckes des Bentonits, der Verformbarkeit der Druckkammer und der Nachverdichtung des trockenen Bereiches des Dichtelementes ist die Druckseite des Dichtelementes um 2,8 cm in Richtung der Druckkammer aufgequollen. Dadurch kam es zu einer bevorzugten Auflockerung des druckseitigen Bereiches des Dichtelementes. Dies führte zu einer höheren Wasseraufnahme des Bentonits (siehe Bild 11.29).



Bild 11.29 Aufgelockerter Bereich des Dichtelementes im Versuch KU 7

Der mit den Kugelsensoren gemessene Druck folgt dem Verlauf des Flüssigkeitsdrucks (siehe Bild 11.27). Aus den gemessenen Werten kann der Einfluss des Druckes auf das Messsignal der Feuchtemessung abgeleitet werden.

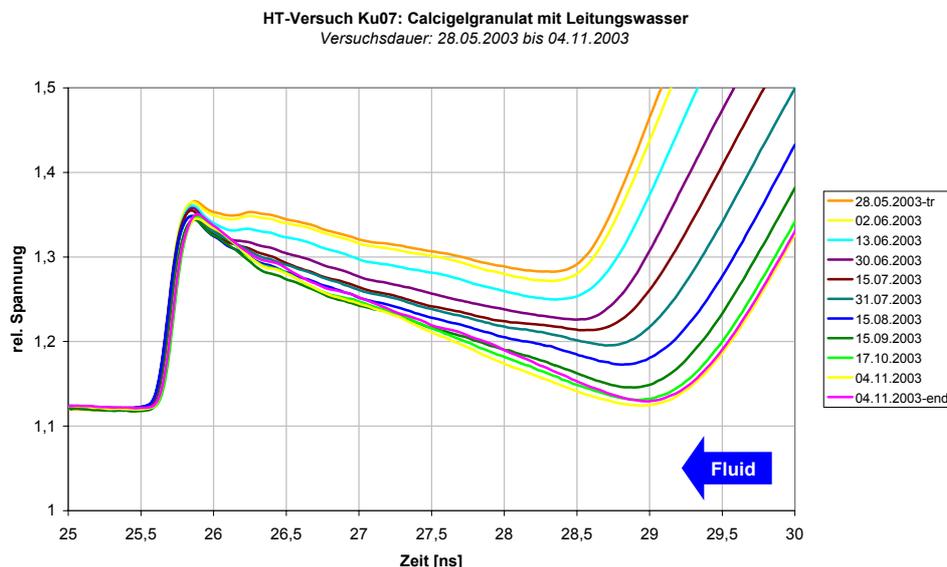


Bild 11.30 Veränderung des Impulsverlaufes während der Versuchsdauer von 161 Tagen

Der Impulsverlauf (Bild 11.30) ist vergleichbar mit der Beschreibung zu Versuch KU 1. Im Bereich von 26,2 bis ca. 27 ns ist die Aufweitung der Impulsverläufe durch den Druck bedingt. Eine zusätzliche Aufweitung ab 27,5 bis 29 ns entsteht durch die eindringende Feuchte (s. auch Bild 11.28). Es konnte durch die Druckmessungen mit den zusätzlich eingebauten Sensoren bestätigt werden, dass durch die Dichteänderung des trockenen binären Gemisches eine Messsignalveränderung zustande kam.

11.8 Schlussfolgerungen zu den Versuchen

Das vorgegebene Versuchsprogramm (siehe Tab. 11.1) wurde erfüllt. Die Änderung der Versuchsbedingungen für den Versuch KU 7 (ursprünglich geplant: FS40 – NaCl-Lösung) war durch den Auftraggeber (MFPA) veranlasst worden, um weitere Informationen über den Einfluss der sich infolge Quellen/Kompaktion des binären Gemisches veränderten Dichte auf das Messsignal der Feuchtemessung erhalten zu können.

Eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zeigt die nachfolgende Tabelle 11.4.

Tab. 11.4: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Nr.	Material	Fluid	Einbautrockendichte (Bentonit) [g/cm ³]	Einbauhöhe [cm]	Ausbauhöhe [cm]	Bentonitausbautrockendichte (mittel) [g/cm ³]	Flüssigkeitsvolumen in der DK [l]
Br1	Calcigel BG	verd. NaCl-Lösg.	gestaffelter Aufbau mit Sandschichten				
Br2	Calcigel BG	NaCl-Lsg.	1,55	gestaffelter Aufbau mit Sandschichten			
Ku1	Calcigel BG	Wasser	1,66	52	54,3	1,59	5,58
Ku2	MX-80 Granulat	Wasser	1,04	65	55,7	1,21	10,53
Ku3	MX-80 Granulat	NaCl-Lsg.	1,04	65	65,3	1,04	2,62
Ku4	FS (MX-80)	NaCl-Lsg.	1,55	60,5	60,3	1,56	4,63
Ku5	FS (MX-80)	Wasser	1,65	60	64,3	1,54	1,10
Ku6	FS40	Wasser	1,65	64,8	64,3	1,66	3,35
Ku7	Calcigel BG	Wasser	1,62	52,5	55,3	1,54	4,99

Die Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen beziehen sich auf die Eignung der Kabelsensoren, auf das Verhalten der getesteten Dichtelemente und auf die Fortsetzung der Arbeiten.

11.9 Eignung der Kabelsensoren

An die Kabelsensoren wurden folgende Anforderungen gestellt:

Anforderungen an die Kabel:

- minimaler Querschnitt,
- glatte Oberfläche,
- hohe Flexibilität (keine elastisch "zurückfedernden" Kabel),
- keine mehrschichtigen Ummantelungen oder Schutzschläuche (Kabel können sonst "durchströmt" werden).

Anforderungen an die Verlegung der Kabel im Dichtelement:

Generell sind hydraulische Kurzschlüsse, bzw. bevorzugte Wegsamkeiten durch die Kabel auszuschließen:

- Im Abstand von < 0,5 m zur Flüssigkeitsdruckseite und von < 0,3 m zur Kontur (zum Gebirge) dürfen sich keine Kabel befinden.
- Die Kabel sind bevorzugt radial zur Mitte zu verlegen. Durchgehende Fugen in axiale Richtung sind auszuschließen.
- Die verlegten Kabel sind mit Bentonitgranulat dicht zu umschließen und nach Möglichkeit nachzuverdichten.

Diese Anforderungen konnten nicht vollständig umgesetzt werden. Insbesondere betrifft dies die vorgenommene Verlegung der Kabelsensoren in axialer Richtung, d.h. in Fließrichtung. Aus den Testergebnissen der Gebrauchsfähigkeit der Kabelsensoren in Bentonitdichtelementen konnten folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Die Kabelsensoren sind auch im Druckbereich von 100 bar mechanisch stabil. Problematisch sind Zugbelastungen infolge von Verformungen im Dichtelement (Kabelabriss beim Versuch Br 2).
- Der Einbau der Kabelsensoren erfordert im Kontaktbereich mit Bentonit eine zusätzliche Fugenbehandlung, um im Bereich der Kabelsensoren die gleiche Bentonittrockendichte wie im Dichtelement zu erreichen. Ist diese Forderung erfüllt, findet kein bevorzugter Flüssigkeitstransport entlang der Kabel statt. Für Bentonitdichtelemente aus binärem Gemisch ist dies nachgewiesen worden.
- Der Einbau des Sensors in Formsteindichtungen erzeugt durch das Bauwerk durchgehende Fugen, die im Moment des Flüssigkeitszutritts einen bevorzugten Fließweg darstellen. Ein Nachverdichten dieser Fuge ist technisch nicht möglich. Eine spezielle Granulatfuge hat eine geringere Bentonittrockendichte, als der Bentonitformstein. Ein Einbau "über Kante" ist aufgrund der geringen Zugfestigkeit der Kabelsensoren nicht möglich.
- Mit den Impulsverläufen, die an den Kabelsensoren während der halbtechnischen Versuche gemessen wurden, konnte sehr gut der Einfluss von Verdichtungen von binären Gemischen oder Formsteinen sowie von eindringendem Wasser detektiert werden. Aus dem Messsignalverlauf konnte qualitativ auf Verdichtungen bzw. auf Durchfeuchtungen geschlossen werden. Die Signalverläufe zeigten gute Übereinstimmung mit der Verteilung von Feuchtwerten, die beim Rückbau gewonnen wurden. Durch Vergleich der Messsignale mit Fluiddruck und Fluidmenge konnten Aufbau des Quelldruckes im Bentonit, gutes Dichtverhalten, aber auch einströmendes Wasser bei undichten Versuchsanordnungen festgestellt werden.

11.10 Verhalten der getesteten Dichtelemente

Die Ergebnisse der durchgeführten Technikumsversuche lassen folgende vergleichende Bewertung des Dichtverhaltens zu:

- Die mit binären Calcigelgemisch (KU1, KU7) durchgeführten Versuche zeigen übereinstimmende Ergebnisse. Ein "fingering" wurde nicht festgestellt.
- Die trockenen Bereiche eines Dichtelementes aus binärem Gemisch oder aus Granulat werden bei hoher Flüssigkeitsdruckbelastung und bei gleichzeitiger Dichtwirkung des bereits durchfeuchteten Bentonits nachträglich verdichtet. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit, d. h. zu einem langsameren Vordringen der Flüssigkeitsfront. Gleichzeitig lockert sich der unmittelbar druckseitige Bereich des Dichtelementes durch die Wirkung des Quelldrucks auf.
- Mit Wasser kann MX-80 – Granulat eine zufriedenstellende Dichtwirkung entwickeln. Nachteilig sind die großen Verformungen des Dichtelementes.
- Für NaCl-Lösung ist ein Dichtelement aus MX-80 – Granulat nicht geeignet.
- MX-80 – Formsteine sind als Dichtmaterial für Wasser geeignet (KU5). Mit NaCl – Lösung trat in der Anfangsphase ein Flüssigkeitsdurchtritt entlang der Fugen auf, danach verhielt sich das Dichtelement stabil (KU4).
- Die Calcigel Formsteine FS40 besitzen gegenüber Wasser ein sehr gutes Dichtverhalten (KU6). Ein Vergleichsversuch mit NaCl-Lösung wurde nicht durchgeführt. Dazu liegen aber Ergebnisse des in situ Versuches in Sondershausen vor.

12 Prognosemodell zur Feuchteausbreitung im Dichtelement

Th. Wilsnack und S. Boy

12.1 Prozessbeschreibung

12.1.1 Allgemeine Prozessbetrachtungen

Die Feuchteausbreitung in einem Bentonitdichtelement kann in die im Bild 12.1 schematisch dargestellten Strömungsprozesse

- Zweiphasenströmung (Strömung im teilgesättigten Porenraum) und
 - Flüssigkeitsströmung im gesättigten Porenraum
- unterschieden werden.

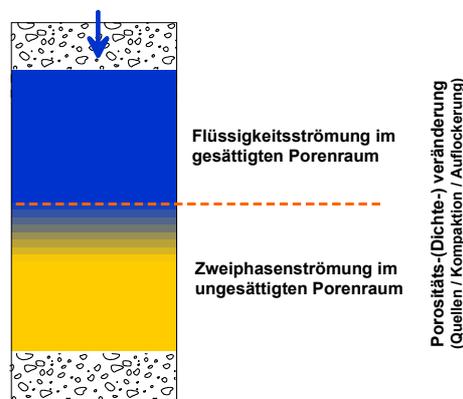


Bild 12.1 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strömungsprozesse in einem Bentonitdichtelement

Die genannten Strömungsprozesse werden überlagert durch:

- die Veränderung der effektiven Phasenpermeabilitäten in Folge der Aufsättigung des Porenraumes,
- die Veränderung der Dichte / Porosität des Materials in Folge
 - des Quellprozesses des Bentonits – Umverteilung des Porenraumes,
 - der Kompaktion bzw. Auflockerung des Bentonitkörpers – Veränderung der Dichte,
- die Veränderung des Flüssigkeitsgehaltes bzw. der Porenraumsättigung durch die Gleichgewichtseinstellung zur relativen Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre bzw. in der Gasphase im Porenraum.

Zu den einzelnen Strömungsprozessen wird nachfolgend eine kurze Erläuterung gegeben, die Auswirkungen der überlagernden Einflussprozesse diskutiert und der Parameterbedarf für die modellgestützte Abbildung aufgezeigt. Die numerische Umsetzung der einzelnen Einflussprozesse wird im Abschnitt 4 beschrieben.

12.1.2 Zweiphasenströmung

Der Prozess der Aufsättigung des Bentonits ist durch eine Zweiphasenströmung im ungesättigten Porenraum gekennzeichnet. Die Strömung der beiden Phasen (Gas und Flüssigkeit) wird durch die Phasenpermeabilität beschrieben. Diese ist von folgenden Materialeigenschaften sowie System- und Prozessparametern abhängig:

Material- und Fluidparameter

- Porengrößenverteilung und daraus resultierendes Kapillardruckverhalten p_{cap} ,
- effektive Phasenpermeabilität k_{eff} ,
- effektive Porosität n_{eff} ,
- Restsättigungen für Gas und Flüssigkeit im Porenraum S_{rg} , S_{rw} ,
- dynamische Viskosität des strömenden Fluides η_{phase} .

System- und Prozessparameter

- zeitabhängig wirksamer hydrostatischer Druck p_{hyd} ,
- durchströmte Geometrie x , y , z ,
- Einbauimperfectionen,
- Chemo-, Thermo-, Elektro-Osmose, Diffusion, Adsorption.

Ausgewählte Größen werden nachfolgend kurz beschrieben und hinsichtlich der Besonderheiten für die Feuchteausbreitung in quellfähigen Bentonitmaterialien diskutiert.

Die allgemeinen Erläuterungen zu den einzelnen hydraulischen Parametern im nachfolgenden Abschnitt haben das Ziel, eine argumentative Basis für das Prozessverständnis und die Ableitung des Modellkonzeptes zu schaffen. Eine umfassendere Darstellung der Parameter und Prozesse der Zweiphasenströmung in porösen Materialien im Allgemeinen und unter Berücksichtigung der Besonderheiten für hochkompaktierte Bentonite wird u.a. in /Häfner et al., 1985; Standing, 1975; Miller et al., 1998/ gegeben.

Porengrößenverteilung und Kapillardruckfunktion

Das Porengefüge eines porösen Stoffes wird durch eine Vielzahl unterschiedlich großer Poren – Makro-, Meso- und Mikroporen – gebildet. Aus dem Volumenanteil der genannten Porenklassen am Gesamtvolumen resultiert das Kapillardruckverhalten des jeweiligen Materials und damit seine Fähigkeit, Flüssigkeit aufzunehmen und zu speichern bzw. zu halten (Saugspannung, kapillare Steighöhe). So werden beim Aufsättigungsprozess eines trockenen Materials zuerst die Poren mit kleinen Radien und großen Saugspannungen gefüllt,

während beim umgekehrten Prozess der Entwässerung zuerst die großen Poren mit geringen Saugspannungen bzw. Kapillardrücken entwässert werden.

Der Kapillardruck in einer Pore ist abhängig von der Oberflächenspannung des Fluides, dem daraus resultierenden Benetzungswinkel und dem Durchmesser bzw. Radius der Pore.

$$p_{cap} = \frac{2 \cdot \cos \varphi \cdot \sigma}{r} \quad (12.1)$$

p_{cap}	-	Kapillardruck	Pa
φ	-	Benetzungswinkel	-
σ	-	Oberflächenspannung der benetzenden Phase	N/m
r	-	Porenradius (Annahme: zylindrische Porenkanäle)	m

Für die Bestimmung der Kapillardruckkurve gibt es unterschiedliche Konzepte. Beispielhaft seien an dieser Stelle die direkten Verfahren: Quecksilber-Injektion-Verfahren und Zentrifugenverfahren /u.a. Häfner et al., 1985/ sowie die indirekten Verfahren „Chilled mirror dewpoint technique“ und Dampf-Gleichgewichts-Verfahren /u.a. Triphaty & Schanz, k.A.; Agus & Schanz, 2003-1/2/ genannt. Aus dem beschriebenen Zusammenhang von Kapillardruck und Sättigungsverteilung resultiert der große Einfluss des Kapillardruckes auf die effektive Phasenpermeabilität in Abhängigkeit von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit. Mit zunehmender Anzahl von Mikro- und Mesoporen erhöht sich der immobile Porenanteil in einem Material und damit verringert sich die Permeabilität. Zur Beschreibung dieses Zusammenhangs wurden insbesondere im Zusammenhang mit der Erdöl- und Erdgasexploration aber auch in der Bodenkunde empirische Gleichungen entwickelt. Die Ableitung dieser funktionalen Zusammenhänge stützt sich auf die sehr aufwendigen Untersuchungen an Referenzmaterialien, für die die Kapillardruckfunktionen und effektiven Phasenpermeabilitäten laborativ ermittelt wurden. Der Nachweis entsprechender materialspezifischer Funktionen ermöglicht die indirekte Bestimmung der effektiven Phasenpermeabilitäten über die Kapillardruck-Sättigungs-Funktion. Im Abschnitt 0 und Anlage 11 wird auf diese Ansätze näher eingegangen.

Für die eingesetzten Bentonitmaterialien lagen keine Kapillardruck-Sättigungsfunktionen vor. Für eine Charakterisierung der Kapillareigenschaften erfolgte daher die Bestimmung des Zusammenhangs von Porengrößenverteilung und Kapillardruck nach dem Quecksilber-Injektions-Verfahren. Die Ergebnisse für die untersuchten Bentonitmaterialien sind in Bild 12.2 dargestellt. Für die Darstellung wurde der Injektionsdruck nach dem Ansatz von POHL /Häfner et. al, 1985/:

$$p_{cap}(1, 2) = \frac{\sigma_{1,2} \cdot \cos \varphi_{1,2}}{\sigma_{3,4} \cdot \cos \varphi_{3,4}} \cdot p_{cap}(3,4) \quad (12.2)$$

$\sigma_{1,2}$	-	Oberflächenspannung an der Grenzfläche NaCl-Lösung/Luft	N/m
$\sigma_{3,4}$	-	Oberflächenspannung an der Grenzfläche Hg/Luft	N/m

auf den entsprechenden Druck einer NaCl-Lösung umgerechnet.

Der Verlauf der Kapillardruckkurven im Bild 12.2 zeigt für den Bereich geringer Sättigungen (< ca. 50 %) sehr hohe Kapillardrücke. Daraus kann geschlossen werden, dass am Versuchsanfang auf der Einströmseite und generell im ungesättigten Bentonit der Kapillardruck den von außen aufgetragenen Flüssigkeitsdruck um ein Vielfaches übersteigt und damit bestimmend für den Prozess der Feuchteausbreitung ist.

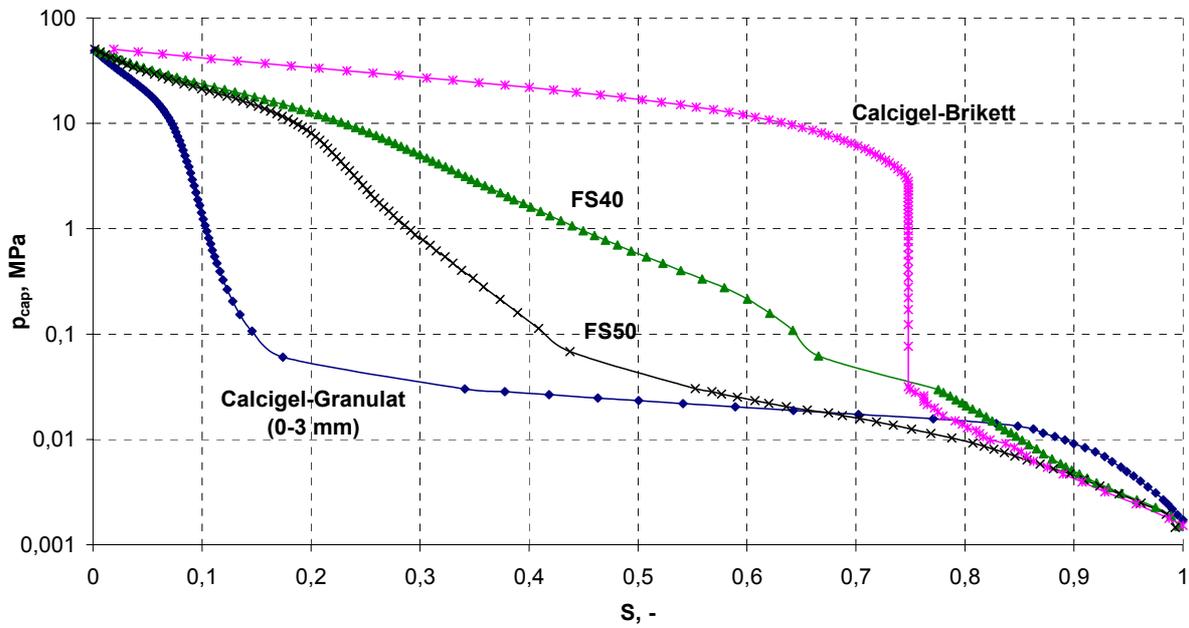


Bild 12.2 Kapillardruck-Sättigungsfunktionen für die eingesetzten Bentonite – ermittelt im Quecksilber-Injektionsversuch

Die ermittelten Kapillardruck-Sättigungsfunktionen bilden die Eigenschaften im trockenen, nicht gequollenen Zustand ab. Eine Veränderung des Kapillardruckverhaltens im Ergebnis des Quellens und der daraus resultierenden Porengrößenveränderung wird durch die Bestimmung im Quecksilber-Injektionsversuch nicht berücksichtigt. Der Vergleich der Porengrößenverteilungen für einen gequollenen und einen nicht gequollenen Bentonit im Bild 12.3 zeigt den Einfluss der Umverteilung des Porenraumes (mobil → immobil; Makro- → Meso- → Mikroporen) auf den Kapillardruck /Agus & Schanz, 2003/. Die Umverteilung des Makroporenanteils zu Meso- und Mikroporen führt zu einem höheren Kapillardruck (s. Gleichung (12.1)) und zu einer Verringerung der Permeabilität des Bentonitmaterials. Die beschriebene, quellbedingte Veränderung des Materials führt zeitabhängig zu einer Verringerung der absoluten und der effektiven Permeabilität. Auf diese Zusammenhänge wird im Abschnitt 0 nochmals eingegangen.

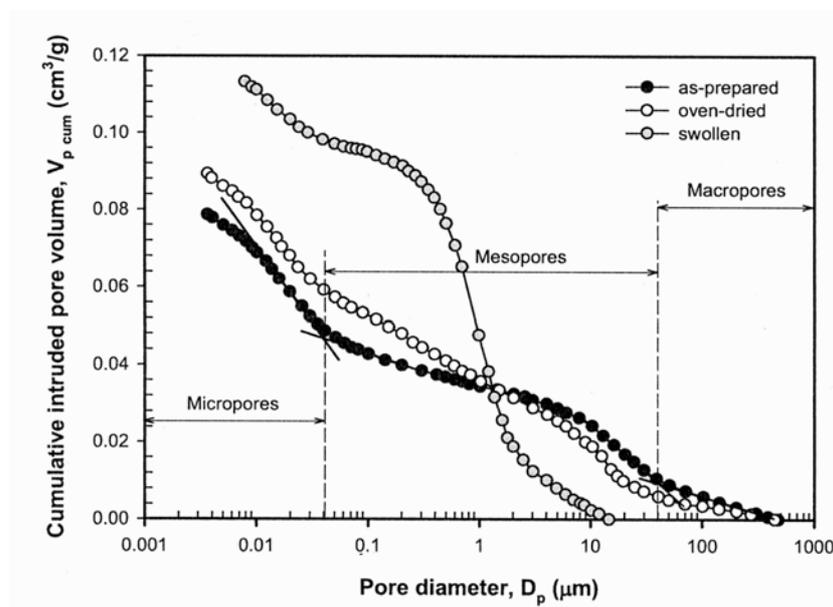


Bild 12.3 Gegenüberstellung der Porengrößenverteilung für gequollenen und nicht gequollenen Bentonit /Agus & Schanz, 2003/

Effektive Phasenpermeabilität

Die effektive Permeabilität für die zu betrachtenden Fluide Gas und Flüssigkeit wird bestimmt durch die absolute Permeabilität der porösen Matrix und die Sättigungsverteilung der benetzenden Flüssigkeitsphase im Porenraum.

Die absolute Permeabilität als primäre Gesteinseigenschaft bzw. Materialeigenschaft ist abhängig vom Aufbau der Gesteinsmatrix, der Porengrößenverteilung und der Porengrößenform. Die maximale bzw. absolute Permeabilität wird wirksam, wenn der durchströmte Porenraum vollständig mit der betrachteten Fluidphase gesättigt ist. Beim Vorhandensein beider Phasen stellt sich die effektiv wirksame Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigungsverteilung der Phasen im Porenraum ab.

Das Verhältnis von effektiv wirksamer zu absoluter Permeabilität wird als relative Permeabilität bezeichnet:

$$k_{\text{rel}} = \frac{k_{\text{eff}}}{k_{\text{abs}}} \quad (12.3)$$

- | | | | |
|------------------|---|---|--------------|
| k_{rel} | - | relative Permeabilität | - |
| k_{eff} | - | effektive Phasenpermeabilität (abhängig von der Porenraumsättigung mit der benetzenden Phase) | m^2 |
| k_{abs} | - | absolute Permeabilität (für $S_{\text{Phase}} = 1$) | m^2 |

Bild 12.4 zeigt den oben beschriebenen Zusammenhang von Fluidsättigung des Porenraumes und resultierender relativer Permeabilität.

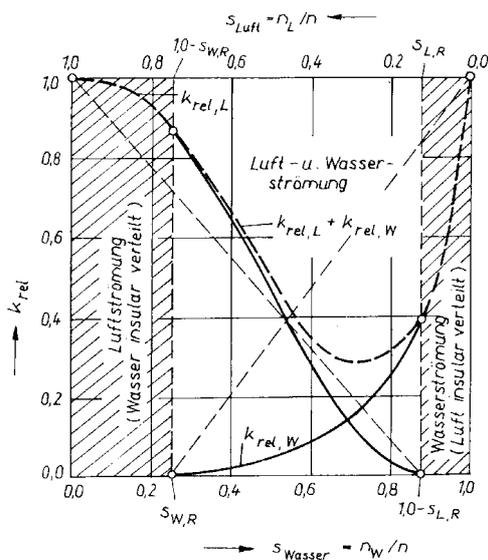


Bild 12.4 Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeiten von der Porenraumsättigung /Luckner & Schestakow, 1986/

Aus der Dicke dieses Haftwasserfilms resultiert ein Restporenraum, der effektiv für Strömungsprozesse zur Verfügung steht (mobiler Porenanteil – effektive Porosität). Bild 12.5 zeigt schematisch die beschriebenen Porenraumanteile.

$$n_t = n_{\text{immo}} + n_{\text{eff}} \quad (12.4)$$

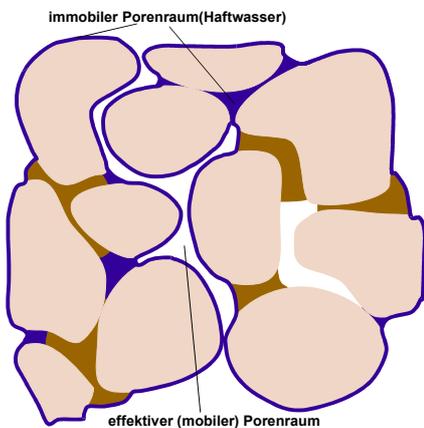


Bild 12.5 Schematische Darstellung des immobilen und effektiv für den Strömungsprozess verfügbaren Porenraumes

Die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit als zweite wesentliche Einflussgröße ist abhängig von dem Kapillardruckverhalten des Porengefüges. Sie wird von der Porengrößenverteilung in der Porenmatrix bestimmt (s. Porengrößenverteilung und Kapillardruckfunktion). Dieser Zusammenhang wurde im vorangegangenen Abschnitt erläutert.

In Abhängigkeit vom Saugspannungsverhalten und den elektrochemischen Wechselwirkungen zwischen Partikeloberfläche und Porenflüssigkeit wird an der Porenwandung und in den Porenzwickeln ein unbeweglicher Haftwasserfilm fixiert (immobiler Porenanteil).

Mit zunehmender Sättigung des Porenraumes reduziert sich in der Folge der für eine Gasströmung zur Verfügung stehende gasgefüllte Porenraum, während sich der für die Strömung der benetzenden flüssigen Phase erforderliche effektive Porenraum vergrößert.

Bedingt durch das Quellen der Tonminerale im Verlauf der Hydratation kann die Verteilung von immobil und effektivem Porenraum in den Tonmaterialien nicht als konstant angesehen werden.

Im Verlauf des Quellprozesses kommt es zu einer Umverteilung der Porositätsanteile und einer Verringerung der effektiven Porosität. Im Abschnitt 0 wird, im Zusammenhang mit den Erläuterungen zum Einfluss des Quellens, auf diese Porenraumveränderung nochmals eingegangen.

Für die untersuchten Bentonitmaterialien lagen keine Erfahrungen zur Veränderung des Porengefüges im Ergebnis des Quellens vor. Entsprechende Grundlagenuntersuchungen

werden gegenwärtig u. a. in dem BMBF-Forschungsvorhaben 02C0881¹, BMBF 02C0720² am Institut für Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt.

Die Bestimmung der effektiven Phasenpermeabilität kann auf zwei unterschiedlichen methodischen Wegen erfolgen:

- Laborative Ermittlung der effektiven Phasenpermeabilität für unterschiedliche Sättigungszustände des Gesteins /u.a. BMBF-02C0881, 2004¹; Giese, 2001; Kemmisis, 1995; Pusch, 1980/,
- Ableitung der effektiven Phasenpermeabilität aus empirischen Ansätzen, die auf der Kapillardruck-Sättigungsfunktion und/oder der Korngrößenverteilung beruhen (siehe Abschnitt „Porengrößenverteilung und Kapillardruckfunktion“; Abschnitt 0 und Anlage 11), /u.a. van Genuchten, 1980; Brooks & Corey, 1964; Honapour et al., 1989; Häfner et al., 1985; Knecht, 1986/.

Für hochkompaktierte Bentonite liegen aus vielfältigen Untersuchungen des Institutes für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg im Zusammenhang mit der Entwicklung und dem Test von Bentonitdichtmaterialien absolute Flüssigkeitspermeabilitäten für unterschiedliche Tonarten (z. B. Ca-Bentonit – Calcigel; Na-Bentonit – MX80), Materialformen (z. B. Granulat, Mehl, Kissen/Briketts, Formsteine) und Flüssigkeiten (z. B. Wasser, Laugen) vor. In Auswertung der Laborergebnisse wurde der in Abschnitt 12.2.4 dargestellte funktionale Zusammenhang von absoluter Flüssigkeitspermeabilität für NaCl-Lauge und Bentonittrockenrohddichte³ abgeleitet /Sitz & Gruner, 2003/.

Für die effektive Permeabilität von Bentoniten liegen in der Literatur in erster Linie Angaben für die Gasphase bei unterschiedlichen Flüssigkeitsgehalten vor. Angaben zu effektiven Flüssigkeitspermeabilitäten sind nur in wenigen Quellen /u.a. Andrews et al., 1986; Kenney et al., 1992; Knecht, 1986; Pusch, 1989/ dokumentiert. Die Ursache für diese sehr begrenzte Datenbasis ist in der geringen Permeabilität der Bentonitmaterialien und den daraus resultierenden großen Schwierigkeiten bei der laborativen Ermittlung effektiver Permeabilitäten zu sehen.

Im Rahmen von Grundlagenforschungen zum Saugspannungsverhalten kompaktierter Bentonite am Institut für Geotechnik der Bauhausuniversität Weimar wird gegenwärtig der Zusammenhang des Quellprozesses und des Kapillardrucks untersucht¹. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden auch Aussagen zur effektiven Flüssigkeitspermeabilität angestrebt.

¹ Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken mit Bentonit-Gemischen als Dichtelement im Salinar (BMBF 02C0881)

² Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit Berücksichtigung von Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie (BMBF 02C0720)

³ Bentonittrockenrohddichte ρ_{BT} ; $\rho_{BT} = \frac{m_{\text{Bentonit}}}{V_{\text{ges}}} (m_{\text{Bentonit}} - \text{Masse Bentonit, kg; } V_{\text{ges}} - \text{Gesamtvolumen, m}^3)$

Restwasser- und Restgassättigung

Die Restwasser- und Restgassättigung sind Materialparameter, die zum einen vom Kapillardruckverhalten des Porenraumes und zum anderen von der Oberflächenspannung der benetzenden Flüssigkeit abhängig sind. Mit zunehmendem Kapillardruck bzw. abnehmender Porengröße steigen der Anteil des immobilen Porenraumes und des Haftwassers im Porengefüge und damit der Anteil der nicht entwässerbaren Restwassersättigung. Dem gegenüber verbleibt im Porenraum ein gewisser Restgasanteil bei der Aufsättigung, der auf Grund des nicht benetzenden Verhaltens der Gasphase nicht vollständig verdrängt werden kann. Dieser Porenvolumenanteil wird als Restgassättigung bezeichnet (s. Bild 12.5). Ermittelt werden können diese beiden Bilanzgrößen aus den Betrachtungen zur Porosität und zum Anteil der einzelnen Teilporositäten (effektive Porosität, totale Porosität und Haftwasserporosität).

Für die untersuchten Materialien lagen keine Kenntnisse über die Restgas- bzw. Restflüssigkeitssättigungen vor. Die Restflüssigkeitssättigung wurde aus dem mittleren Einbauwassergehalt der Bentonitmaterialien und der nach DIN 52102 ermittelten totalen Porosität abgeschätzt. Die angesetzte Restwassersättigung entspricht damit dem sich in Abhängigkeit von Temperatur, einstellenden Gleichgewicht zwischen Flüssigkeitsgehalt im Porenraum und relativer Luftfeuchte in der Atmosphäre. Für die einzelnen Materialien wurden auf diese Weise Restwassersättigungen im Bereich von 0,22 bis 0,44 abgeschätzt:

Die Restgassättigung wurde mit 5 % für alle Materialien angenommen.

12.1.3 Veränderung der Porosität durch Quellen

In einer vereinfachten Beschreibung stellt der Quellprozess des Bentonites die Hydratation der einzelnen Schichtgittersilikate dar. Dabei wird in Abhängigkeit von elektrochemischen Bindungskräften der einzelnen Tonminerale das Wasser in die Schichtzwischenräume der Tonminerale eingelagert und dadurch der Abstand zwischen den Silikaten aufgeweitet. Das Gesamtvolumen des Materials erhöht sich. In Abhängigkeit von der Höhe der elektrochemischen Bindungskräfte bildet sich bei einer Volumenbeschränkung des Quellprozesses ein Quelldruck aus, der eine Größenordnung von mehreren MPa erreichen kann. Für die Beurteilung der Feuchtigkeitsausbreitung in Bentonitdichtelementen kann primär von einer Volumenbegrenzung des Dichtelementes ausgegangen werden, so dass sich im Ergebnis des Quellens des Bentonites die Dichte des Materials und damit die Gesamtporosität nicht ändert. In Folge des beschriebenen Quellprozesses und unter Berücksichtigung der Erläuterungen zu den unterschiedlich in Porositätsanteilen (immobiler und mobiler Porosität – Abschnitt 0) kommt es zu einer Umverteilung der für den Strömungsprozess nutzbaren Porosität und zu einer Verringerung der absoluten Flüssigkeitspermeabilität

Die Intensität des Quellprozesses und die daraus resultierende Veränderung des Porengefüges wird von einer Vielzahl Einflussgrößen bestimmt:

- Geochemische Beschaffenheit der zuzitenden Lösung,

- Volumenbeschränkung des Bentonitkörpers,
- mineralogische Zusammensetzung des Bentonitmaterials,
- totale Porosität des Bentonitmaterials,
- Verteilung der Porosität im Bentonitmaterial – z. B. totale Porosität im binären Gemisch – Granulat - hohe Anfangsporosität; Pellets – geringe Anfangsporosität,
- primäre Verteilung von immobilierter und mobiler Porosität im Bentonitmaterial,

Die vorangegangene Aufzählung macht deutlich, welche komplexen Prozesse und Wechselwirkungsmechanismen beim Quellprozess wirksam werden und welche Vielzahl von Einflussparametern die Intensität des Quellprozesses bestimmt. Im Rahmen der hier dokumentierten Teilleistung zum Forschungsvorhaben war es nicht Aufgabe, diese Detailprozesse für die unterschiedlichen untersuchten Bentonitmaterialien in ihrem Einfluss auf die Porosität und Permeabilität zu klären. In der Literatur und in gegenwärtig laufenden Forschungsvorhaben werden ausgewählte Ansätze zur Beschreibung des Quellverhaltens untersucht (s. Abschnitt 0). Dazu gehören z. B. das Double-Layer-Konzept /Xie et al., 2003; Tripathy et al., k.A.; Kemmesis, 1995; Kröhn, 2004/. Von den Autoren dieses Berichtes wird eingeschätzt, dass gegenwärtig noch kein abschließendes Modellkonzept vorliegt, das die komplexe Vielfalt der o. g. Einflussgrößen und Prozesse erfolgreich abbildet. In dieser Situation wurde der Einfluss des Quellens auf die absolute Permeabilität in einer empirischen Funktion $k_{\text{abs}} = f(S)$ abgebildet, die für die Kalibrierung des numerischen Versuchsmodells an der gemessenen Feuchteverteilung am Versuchsende angepasst bzw. gefittet wurde (Abschnitt 0). Bild 12.10 zeigt beispielhaft einzelne Ansätze für diese Funktion.

Die absolute Permeabilität des jeweiligen Bentonitmaterials wurde aus den Versuchsdaten der halbtechnischen Versuche ermittelt. Unter Berücksichtigung der Erläuterungen zum Beginn der Durchströmung eines Bentonitdichteelementes im Abschnitt 12 wird der Strömungsprozess am Versuchsbeginn durch die hohe kapillare Saugspannung, die primäre Permeabilität des Bentonitgranulats und die sich schnell ändernden Sättigungsbedingungen (stark veränderliche Phasenpermeabilitäten) bestimmt. Für eine Abschätzung der Ausgangspermeabilität wurde in dieser Situation der am Versuchsbeginn gemessene Volumenstrom und eine angenommene Schichtmächtigkeit von 0,01 m als bereits gesättigte Bentonitschicht für eine Abschätzung der absoluten Permeabilität über das DARCY-Gesetz verwendet. Die absolute Permeabilität des Bentonitmaterials am Versuchsende wurde aus dem Volumenstrom und der aus dem Rückbau ermittelten Mächtigkeit des vollständig gesättigten Bentonitkörpers berechnet. Bei dieser Permeabilität handelt es sich um eine integrale Größe, die die Permeabilitätsverteilung über den Bentonitkörper abbildet (mit Auflockerung und Kompaktion).

Bild 12.6 zeigt am Beispiel des Versuches KU 1 die beschriebene Auswertung der Versuchsdaten. Die Ergebnisse der Auswertung der Einzelversuche sind in Tab. 12.3 zusammengestellt.

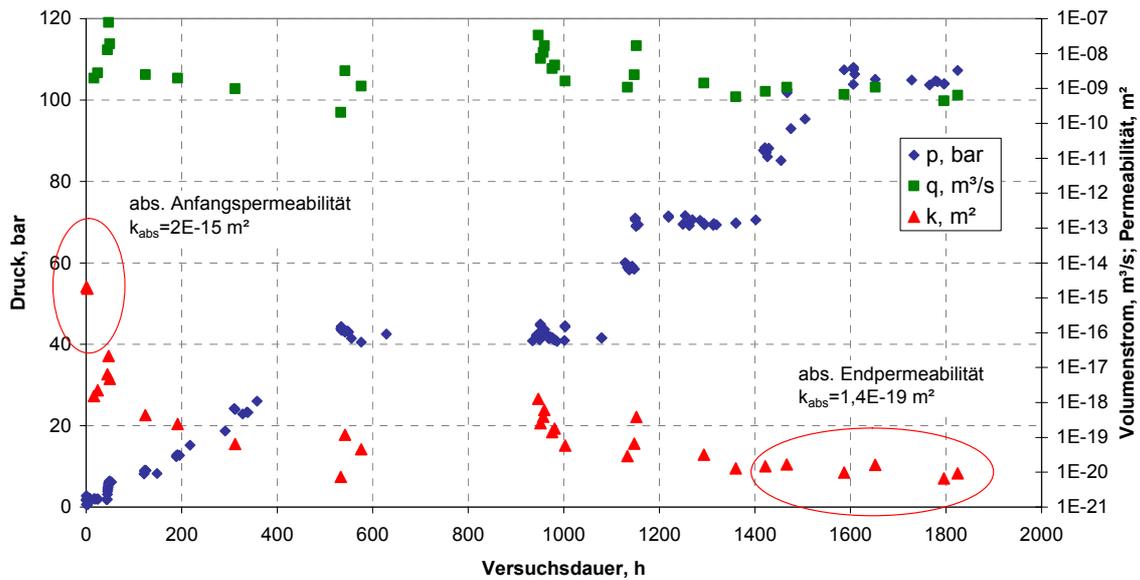


Bild 12.6 Versuchsdaten KU1 – Ermittlung der absoluten Permeabilität am Versuchsanfang und Ende

12.1.4 Flüssigkeitsströmung im gesättigten Porenraum

Ist die Flüssigkeitssättigung des Dichtmaterials erreicht, kann von einer laminaren Flüssigkeitsströmung im gesättigten Porenraum des Dichtmaterials ausgegangen werden. Bereits für eine geringe Eindringtiefe der Aufsättigungsfront in das Dichtelement wird das Fortschreiten der Sättigung nicht mehr durch die Zweiphasenströmung, sondern durch das Nachströmen der Flüssigkeit durch den bereits gesättigten Bereich des Dichtelementes bestimmt.

Unter Berücksichtigung des im Abschnitt 0 dargestellten Zusammenhangs von effektiver und absoluter Permeabilität (Bild 12.4) ist die Permeabilität des gesättigten Bentonits die größte effektiv wirksame Permeabilität im durchströmten Bauwerk (die möglicherweise erhöhte Permeabilität in der Auflockerungszone und die erhöhte Anfangspermeabilität – insbesondere im binären Gemisch; s. Abschnitt 0 – vernachlässigt). Diese Schlussfolgerung ist falsch. Nicht die höchste Permeabilität $\hat{=}$ kleinster Widerstand bestimmt den Fluss, sondern kleinste Permeabilität $\hat{=}$ größter Widerstand.

Vorschlag:

Der Fluiddurchfluss nach dem Darcy-Gesetz

$$Q_{Fl} = A \cdot \frac{k_{eff}}{\eta} \cdot \text{grad } p_{Fl}$$

wird unter dem Einfluss des Kapillardruckes sowohl von der gesättigten Zone (ohne Einfluss des Kapillardruckgradienten) als auch der teilgesättigten Zone (mit vorwiegendem Einfluss des Kapillardruckgradienten) gesteuert. Es ist zu erwarten, dass sich bei den ausgewiesenen hohen Kapillardrücken steile Sättigungsfronten, d. h. auch große Kapillardruckgradienten,

einstellen werden. Die Nachlieferung von Flüssigkeit durch die gesättigte Zone und durch die nahezu gesättigte Zone mit geringen Kapillardruckgradienten ($S_{FI} = 0,75 \dots 1$, s. Bild 12.2) wird jedoch die beschränkende Größe – trotz einer relativen Permeabilität von nahe 1 – darstellen.

Für die eingesetzten Bentonitmaterialien, wie bereits im Abschnitt 0 dargestellt, liegen nur begrenzt Erfahrungen zur absoluten Flüssigkeitspermeabilität u. a. aus Untersuchungen des Institutes für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg vor. Für die Modellrechnungen wurde der aus diesen Untersuchungen abgeleitete Zusammenhang von Permeabilität und Bentonittrockendichte angewendet (s. auch Abschnitt 3.3).

12.1.5 Beeinflussung durch Dichteveränderung

In Auswertung der durchgeführten halbtechnischen Versuche an unterschiedlichen Bentonitmaterialien wurde festgestellt, dass es in den Körpern zu Dichteveränderungen im Verlauf des Durchströmungsprozesses kommt. Dies wurde, im besonderen für die als binäres Gemisch eingebauten Materialien, aber auch mit einem geringeren Ausmaß für die als Formsteine eingebauten Materialien, festgestellt. Dieser Prozess wird in einer Modellvorstellung in folgende Teilprozesse untergliedert:

1. Einbau der Bentonitmaterialien mit einer Einbaudichte, die nicht der optimalen Materialverdichtung entspricht ($\rho_T < \rho_{Proctor}$),
2. nachträgliche Verdichtung des Bentonitmaterials unter dem Einfluss des hydrostatischen Druckes und der Feuchteerhöhung → Entstehung eines sekundären Volumens einströmseitig; Kompaktion des Bentonits im teilgesättigten Bentonitkörper (ausströmseitig),
3. Ausfüllung des sekundär entstandenen Volumens im Ergebnis des Quellprozesses des Bentonites → Reduzierung der Bentonitdichte, Vergrößerung des Porenraumes, Erhöhung der Permeabilität.

Die beschriebenen, sich überlagernden Effekte führen zu einer erhöhten Permeabilität auf der Druckseite des Bentonitdichtelementes, die zu einem schnelleren Fortschreiten der gesättigten Flüssigkeitsfront führt. Im teilgesättigten Bereich des Bentonitdichtelementes wird, in Abhängigkeit von der primären Dichte, der Kohäsion des Bentonits an der Wandung, dem Flüssigkeitsgehalt, dem Quelldruck und der Höhe des wirkenden hydrostatischen Druckes eine Kompaktion und Reduzierung der absoluten Permeabilität hervorgerufen. Für die Abbildung der im Technikumsversuch gemessenen Feuchtigkeitsausbreitung im Dichtelement in einem numerischen Prozessmodell ist insbesondere die Berücksichtigung der einströmseitigen Auflockerung erforderlich, da diese maßgeblich das Fortschreiten der gesättigten Flüssigkeitsfront bestimmt.

12.1.6 Gleichgewichtseinstellung zur Luftfeuchte

In Folge des Kontaktes zur umgebenden Atmosphäre und zur Gasphase im Porenraum kommt es durch die Gleichgewichtseinstellung zur relativen Luftfeuchte zur Feuchtigkeitsaufnahme des Bentonits und zu einer Veränderung des Porenraumes durch Quellen oder Trocknen. Für die Modellrechnungen wurden diese Prozesse aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt:

- für die durchgeführten Untersuchungen liegen keine versuchsbegleitenden Messergebnisse zur relativen Luftfeuchte und zur Temperatur im Versuchskörper und der Versuchsumgebung vor,
- für die eingesetzten Bentonitmaterialien liegen keine Kenntnisse zur Wasserdampfadsorption und der Auswirkungen auf das Porengefüge und die resultierende Permeabilität vor,
- eine modelltechnische Berücksichtigung des Wasserdampftransportes und der Gleichgewichtseinstellung zwischen Bentonit und relativer Luftfeuchte ist im verwendeten Programmsystem „Twophase“ nicht möglich.

12.2 Eingangsdaten für die Modellierung

Die nachfolgenden Angaben beziehen sich auf das binäre Calcigel-Gemisch. Die Angaben für die hydraulische Leitfähigkeit und den Quelldruck der Bentonitformsteine sind über die reduzierte Bentonittrockendichte im Formstein übertragbar.

12.2.1 Charakterisierung des Einbauzustandes

Korndichte (Reindichte) des Bentonits	2,65 g/cm ³
Einbautrockendichte des Bentonits (binäres Gemisch)	1,65 g/cm ³
▪ Untere Grenze	1,60 g/cm ³
▪ Maximalwert	1,75 g/cm ³
Anfangswassergehalt	9 %
Anfangssättigungsgrad	40 %
▪ Untere Grenze	30 %
▪ Maximalwert	45 %

12.2.2 Kompaktionsverhalten des binären Gemisches

Die Angaben zum Kompaktionsverhalten der binären Calcigel-Gemische sind in Tab. 12.1 sowie in den Bildern 12.7 und 12.8 zusammengefasst.

Tabelle 12.1 Kompaktionsverhalten binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen

Presslingsmischung	Einbautrockendichte g/cm ³	Normalspannung kN/m ²	Gesamtverformung %	Steifemodul kN/m ²
Granulat 1-3 mm Presslingsdichte 2 g/cm ³ Zeit	1,57	42	0,52	8,15
		95	0,99	11,055
		194	1,84	11,39
		389	3,39	12,114
		790	5,35	19,102
		1590	8,22	24,994
		3194	11,82	37,564
		6393	15,91	60,796
Granulat 0-3 mm Presslingsdichte 2 g/cm ³ Zeit	1,64	44	0,1	42,9
		94	0,35	19,857
		195	0,92	17,778
		393	1,91	19,538
		791	3,47	24,562
		1592	5,67	34,004
		3194	8,44	51,479
		6395	11,74	81,136
8997	13,46	118,328		

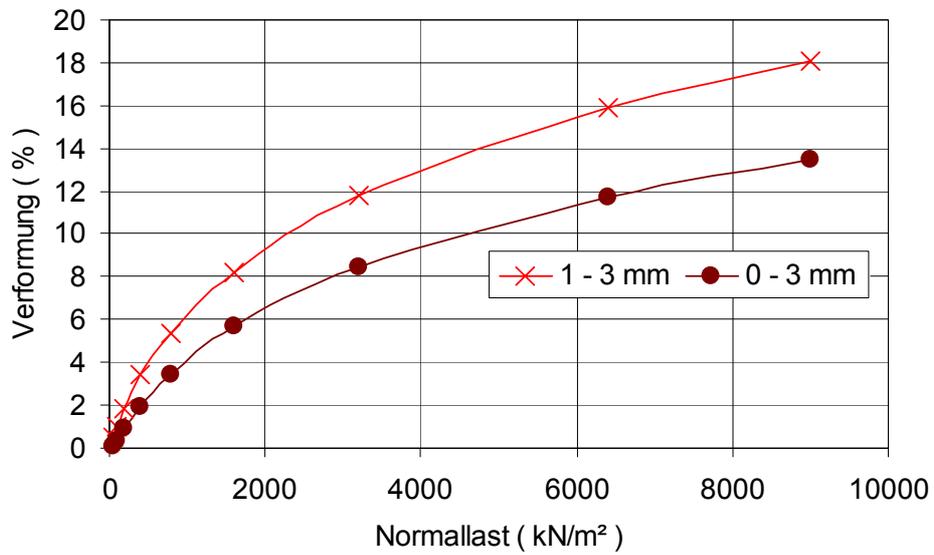


Bild 12.7 Verformung binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen in Abhängigkeit von der Normalspannung (Großoedometer)

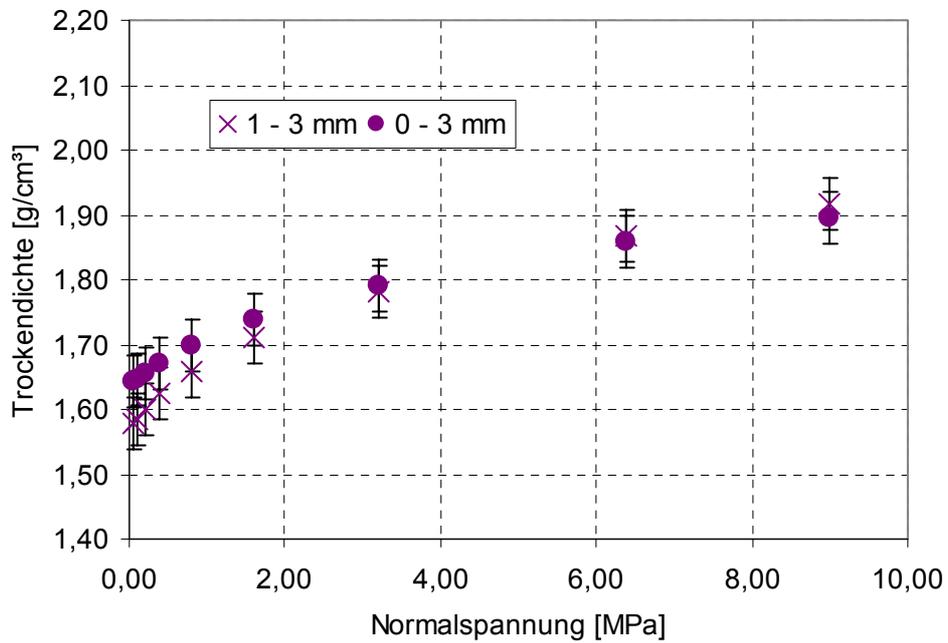


Bild 12.8 Trockendichte binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen in Abhängigkeit von der Normalspannung (Großoedometer)

12.2.3 Quelldruck von Calcigel

Der gemessene Quelldruck hängt nach der folgenden Formel vom Flüssigkeitsdruck (bzw. dem Porenwasserdruck eines Elementes) ab:

$$p_q = p_{q,0} + m \cdot p_{Fl} \quad (12.5)$$

p_q	-	gemessene totale Quelldruckspannung	MPa
p_{Fl}	-	äußerer Flüssigkeitsdruck	MPa
m	-	Flüssigkeitsdruckübertragungsfaktor	-
$p_{q,0}$	-	Quelldruck bei $p_{Fl} \rightarrow 0$ (Initialwert)	MPa

Der Quelldruck bei $p_{Fl} \rightarrow 0$ hängt neben der Tonsorte und der Flüssigkeitszusammensetzung von der reduzierten Trockendichte ρ_{red} des Tones ab:

$$\lg p_{q,0} = -\frac{A_0}{\rho_{red}} + B_0 \quad (12.6)$$

A_0, B_0 sind empirischen Parameter, die für eine bestimmte Kombination eines Tones und eines Fluids gültig sind.

Die reduzierte Trockendichte ist wie folgt definiert:

$$\rho_{red} = \frac{m_{tr}}{V_0 + \Delta V} = \frac{\rho_{tr}}{1 + \varepsilon_q} \quad (12.7)$$

ρ_{red}	-	reduzierte Trockendichte	g/cm^3
ρ_{tr}	-	Trockendichte im Ausgangszustand	g/cm^3
m_{tr}	-	Trockenmasse	g
V_0	-	Ausgangsvolumen	cm^3
ΔV	-	zugelassenes freies Volumen (auftretende Tonexpansion)	cm^3
ε_q	-	Quelldeformation	-

Aus experimentellen Daten wurde für das System Calcigel (trockener Einbau) – NaCl – Lösung folgende Ergebnisse (Quelldruck in MPa) erhalten:

$$\lg p_{q,0} = 4,935 - \frac{7,5476}{\rho_{red}} \quad (B_0 = 4,935, A_0 = 7,5476) \quad (12.8)$$

Für den Faktor "m" gilt folgende Abhängigkeit:

$$m = 1 - \exp(1,806 \cdot \rho_{red} - 4,57) \quad (12.9)$$

Allerdings ist diese Abhängigkeit nur durch wenige Messwerte untersetzt.

12.2.4 Hydraulische Leitfähigkeit von Calcigel

Aus der Darstellung der experimentellen Daten der hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porenzahl erhält man folgende empirische Gleichung:

$$k_f = 3 \cdot 10^{-10} \cdot e^{6,3678} \quad (12.10)$$

$$e = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{red}}} - 1 \quad (12.11)$$

e	-	Porenzahl	-
ρ_0	-	Korndichte des Bentonits (2,65 g/cm ³)	g/cm ³

Bei der Bestimmung der Porenzahl wird die jeweilige Bentonittrockendichte zugrunde gelegt, d. h. nicht die Einbautrockendichte, sondern die reduzierte Bentonittrockendichte.

12.3 Numerische Simulation der Feuchteausbreitung

12.3.1 Programmsystem ‚TWOPHASE‘

Die Modellierung erfolgt mit dem Programmsystem ‚TWOPHASE‘, einer Modifikation des Programms ‚MULTIF‘ /Nekrassov, 2002/.

Das Programm MULTIF wurde für die 3d-Modellierung von Mehrphasen-Systemen unter Berücksichtigung des Mehrkomponententransportes im Zusammenhang mit der Förderung aus Erdöl-/Erdgas-Lagerstätten entwickelt. Als vereinfachter Spezialfall für Strömungsprobleme in einem Zweiphasensystem wurde das Programm TWOPHASE abgeleitet. Als numerisches Lösungsschema wird ein Finite-Volumenverfahren angewendet. Neben der Vorgabe der Parameterfelder (k_x , k_y , k_z , n_{eff}), Anfangs- und Randbedingungen (p , S), Dichte und Viskosität der beiden Phasen, sind tabellarisch die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der benetzenden sowie die relativen Permeabilitäten für benetzende und nicht benetzende Phase zu definieren.

Des Weiteren sind folgende Vorgaben bzw. Optionen möglich:

- Voreinstellung der Druckberechnung (Gas oder Wasser/Lauge),
- Dichte und Viskosität im Abhängigkeit vom Druck,
- Einteilung des Strömungsraumes in beliebig viele Zonen, in denen unterschiedliche Kapillardrücke wirken können,
- zeitabhängige Vorgabe von Druckverläufen in Form von Randbedingungen.

Das Programmsystem wurde für ein Zweiphasensystem an der BUCKLEY-LEVERETT-Theorie /Buckley&Leverett, 1942/ verifiziert. Nekrassov /Nekrassov, 2002/ vergleicht die Berechnungen sowohl mit der für dieses Problem existierenden analytischen Lösung als auch mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung mit ECLIPSE¹.

12.3.2 Modellkonzept

Unter Berücksichtigung der Erläuterungen im Abschnitt 12.1-2 ergibt sich für die numerische Simulation des Fortschreitens einer Feuchtigkeitsfront in einem Bentonitdichtelement die Notwendigkeit der Berücksichtigung folgender Prozesse:

- Zweiphasenströmung im teilgesättigten Porenraum,
- Einphasenströmung im gesättigten Porenraum,
- Veränderung der absoluten Permeabilität des Bentonites in Folge der Veränderung des Porengefüges durch den Quellvorgang ($n_{\text{mobil}} \rightarrow n_{\text{immobil}}$),
- Veränderung der absoluten Permeabilität in Folge Dichteveränderung des Bentonitmaterials (Auflockerung/Kompaktion).

Die Veränderung des Porengefüges in Folge des Quellvorganges und der Dichteveränderung macht die Ermittlung von effektiven Phasenpermeabilitäten für jeden Materialzustand erforderlich. Entsprechende Versuchsdaten und/oder empirische Ansätze zur Ableitung der effektiven Permeabilität aus Kapillardruck-Sättigungsfunktionen liegen gegenwärtig nicht vor. Entsprechende Daten werden z. Zt. Im Rahmen von Forschungsvorhaben ermittelt (s. Abschnitt 0).

Langfristig wird die Feuchteausbreitung in einem Bentonitdichtelement und der sich einstellende maximale Volumenstrom durch den Dichtkörper durch die absolute Permeabilität des gesättigten Bentonits definiert. Die Zweiphasenströmung nimmt lediglich Einfluss auf die Feuchteverteilung in einer ungesättigten Saumzone, die dem gesättigten Bentonitbereich vorausleitet.

Unter Berücksichtigung der o. g. Einflussprozesse wurden für die einzelnen Technikumsversuche (s. Abschnitt 2) numerische Modelle entwickelt, die die Feuchteausbreitung in den Versuchen abbilden. Für die Modellrechnungen wurde das in Abschnitt 0 vorgestellte Programmsystem „TWOPHASE“ weiterentwickelt und durch folgende Programmoptionen ergänzt:

- Abbildung der Veränderung der absoluten Permeabilität in Abhängigkeit vom Quellen des Bentonits,
- Abbildung der Veränderung der absoluten Permeabilität in Abhängigkeit von der Auflockerung und Kompaktion des Bentonitmaterials.

Das Modellkonzept für die Berücksichtigung der Einflussprozesse ist im Bild 12.9 in einer Übersicht dargestellt. Die einzelnen Teilansätze werden in den im Bild 12.9 genannten Abschnitten erläutert.

Zweiphasen-Strömung

$$k_{\text{Phase}} = k_{\text{abs_korr}} \cdot k_{\text{rel_Phase}} \leftarrow k_{\text{rel_Phase}} = f(p_{\text{cap}}, S_{\text{WR}}) \quad (\text{s. Abschnitt 4.2.3})$$

$$k_{\text{abs_korr}} = k_{\text{abs,Quellen}} \cdot F(A/K)$$

Quellen

$$k_{\text{abs,Quellen}} = f(a, b, S_{\text{WR}}, k_{\text{abs,0}})$$

Fitting-Funktion (s. Abschnitt 4.2.1)

Kompaktion/Auflockerung

$$F(A/K) = f(k_{\text{abs,0}}, \rho_{T,0}, \rho_{T,A}, \rho_{T,K})$$

- Massenumverteilung durch Auflockerung /Kompaktion (s. Abschnitt 4.2.2)

Bild 12.9 Modellkonzept (Detailerläuterungen in den angegebenen Querverweisen)

¹ Standardsimulator des Petroleum Engineering

Grundlage der Modellentwicklung bilden die umfangreichen Untersuchungen an Bentonitmaterialien des Institutes für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg, die Auswertung der durchgeführten halbtechnischen Durchströmungsversuche und die Ermittlung ausgewählter Materialeigenschaften im Rahmen des Vorhabens.

Anzumerken ist, dass die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise speziell für die hier vorliegende Aufgabenstellung, der Nachrechnung eines gemessenen Endzustandes der Durchströmung eines Dichtelementes aus hochkompaktiertem Bentonit, entwickelt wurde. Über den zeitlichen Verlauf bis zur Sättigung und der damit verbundenen Änderungen der Einflussparameter (Dichte, Porosität, Permeabilität) liegen keine Messungen vor, so dass dort bestimmte Annahmen getroffen bzw. Parameter über Kalibrierung bestimmt wurden. Die sich mit den Eigenschaften des Tones ändernden Parameter der Zweiphasenströmung (Kapillardruck-Sättigungsfunktion, relative Permeabilitäten) bleiben für die Modellrechnungen unverändert.

Voraussetzungen für die Modellentwicklung sind die genaue Kenntnis des Ausgangszustandes des Dichtelementes (u. a. Einbaudichte, Ausgangswassergehalt, Abmaße) und die Charakterisierung des am Ende des Versuches erreichten Sättigungszustandes (u. a. Feuchteverteilung, Eindringtiefe) sowie die Berücksichtigung der im Versuchsverlauf registrierten Parameter (u. a. Druckverlauf, Flüssigkeitsvolumen).

In den nachfolgenden Abschnitten 0 und 0, ist die programmtechnische Realisierung für die Korrektur der absoluten Permeabilität in Folge Auflockerung und Kompaktion dargestellt.

12.3.2.1 Abbildung des Quellens von Ton – Korrektur absolute Permeabilität

Für die Berücksichtigung des Quellens des Bentonits (s. Abschnitt 3.3) wurde eine empirische Funktion zur Beschreibung der Verringerung der absoluten Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung aufgestellt. Die Koeffizienten sind Fitparameter, die anhand der Feuchteverteilung im Ausbauzustand angepasst wurden.

Für die modellgestützte Abbildung der im halbtechnischen Versuch nachgewiesenen Feuchteverteilung wurde die nachfolgende Funktion (Gleichung 12) so lange variiert, bis eine möglichst gute Anpassung der Modellergebnisse an die Messwerte erreicht wurde.

$$k_{\text{abs_Quellen}} = k_{\text{abs},0} e^{-b (S(t) - S_{\text{WR}})^a} \quad (12.12)$$

$k_{\text{abs_Quellen}}$	absolute Permeabilität unter Berücksichtigung des Quellens von Bentonit	m^2
$k_{\text{abs},0}$	absolute Permeabilität im Einbauzustand (s. Abschnitt 0; Tab. 12.3)	m^2
S	berechnete Sättigung zum Zeitpunkt t	-
S_{WR}	Restwassersättigung (s. Abschnitt 3)	-

a, b	Fitparameter	-
t	Zeit	s,d,a

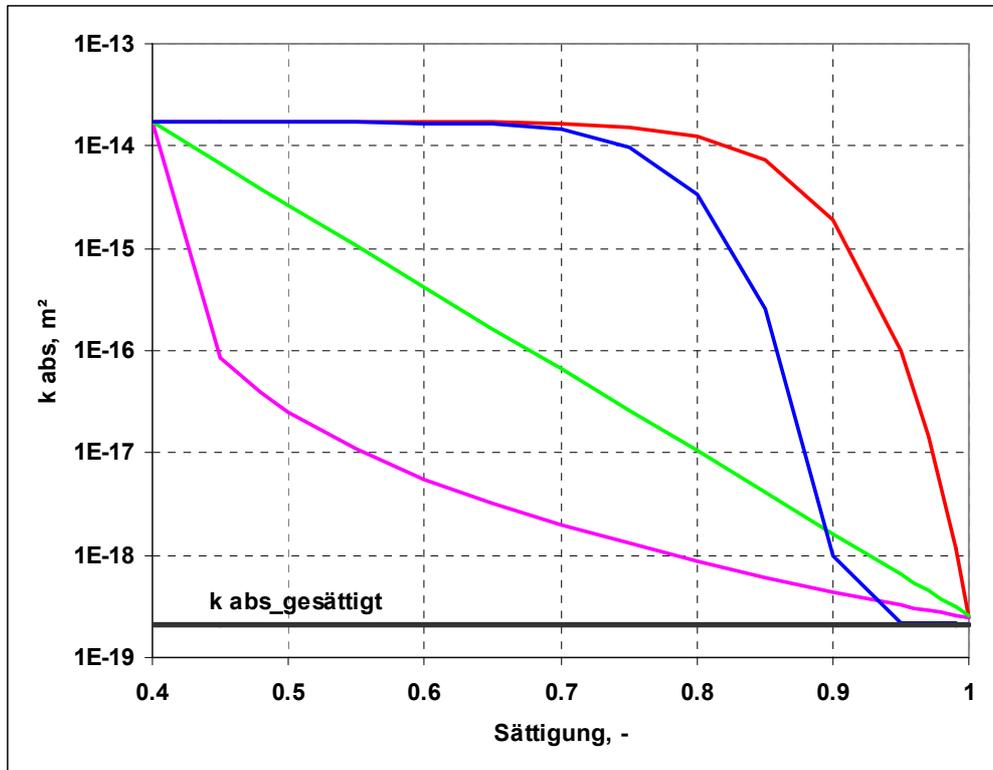


Bild 12.10 Schematische Darstellung möglicher empirischer Funktionen der Veränderung der absoluten Permeabilität von der Flüssigkeitssättigung ($k_{abs_gesättigt}$ – ermittelt aus Versuchsdaten s. Abschnitt 0)

12.3.2.2 Abbildung der Auflockerung/Kompaktion – Korrektur absolute Permeabilität

Für die durchgeführten halbertechnischen Versuche wurde eine Längenänderung der Dichtelementkörper beobachtet. Die zugrunde liegenden Prozesse wurden im Abschnitt 3.5 erläutert. Für die Nachrechnung dieses Prozesses wurde folgendes Konzept gewählt:

AUFLOCKERUNG

Aus den Wassergehalten nach Abschluss des Versuches lassen sich nach Gleichung (12.14) Sättigungen unter der Annahme berechnen, dass sich Porosität und Dichte des Probematerials nicht verändert haben (Gleichung (12.13)). Die sich im gesättigten Bereich ergebenden Sättigungen > 1 sind ein Maß für die einströmseitige Auflockerung. Durch Umstellen der Gleichung (12.14) verbunden mit der Bedingung $S=1$ im gesättigten Zustand ergibt sich die Gleichung (12.15) zur Berechnung der Dichte $\rho_{Tr,A}$ aus der sich wiederum eine korrigierte Porosität berechnen lässt.

Für die modelltechnische Berücksichtigung der Auflockerung/Kompaktion und die Auswirkungen auf die absolute Permeabilität wurden folgende Teilschritte realisiert:

- Berechnung der Porosität im Einbauzustand aus den einbaubegleitenden Dichtemessungen

$$n_{t,0} = 1 - \frac{\rho_{T,0}}{\rho_S} \quad (12.13)$$

$n_{t,0}$	-	totale Porosität im Einbauzustand	-
$\rho_{T,0}$	-	Trockenrohddichte im Einbauzustand	g/cm^3
ρ_S	-	Rohkorndichte ($\rho_S = 2,65 \text{ g/cm}^3$)	g/cm^3

- Berechnung der Sättigungen für die im Endzustand ermittelten Flüssigkeitsgehalte

$$S = \frac{V_F}{V_P} = \frac{w \cdot \rho_{T,0}}{\rho_F \cdot n_{t,0}} \quad (12.14)$$

V_p	-	Porenvolumen	cm^3
V_F	-	Flüssigkeitsvolumen	cm^3
w	-	Flüssigkeitsgehalt	-
S	-	Sättigung	-
ρ_F	-	Flüssigkeitsdichte	g/cm^3

- Berechnung der veränderten Dichte für Bereiche mit Übersättigung ($S > 1$)

$$\rightarrow \rho_{T,A} = \frac{S \cdot \rho_F}{w + \frac{S}{\rho_S}} \quad \text{für } S = 1 \quad (12.15)$$

$\rho_{T,A}$	-	aus Übersättigung (Auflockerung) berechnete, korrigierte Trockenrohddichte	g/cm^3
S	-	Sättigung nach Rückbau	-
$n_{t,A}$	-	totale Porosität im übersättigten Bereich	-

- Aus den Kenntnissen der Trockendichten im Einbauzustand ($S = S_{WR}$) und nach Ausbau (korrigiert nach Gl. 15) erfolgt im Programm eine Berechnung der Dichte für $1 < S < S_{max}$ linear nach

$$\rho_{T,A} = \rho_{T,0} + (\rho_{T,0} - \rho_{T,A}) \cdot S \quad (12.16)$$

S_{max}	-	maximale Sättigung; ermittelt aus Rückbau	-
-----------	---	---	---

- Umrechnung der korrigierten Trockenrohddichte in Bentonittrockendichte

$$\rho_{BT, A} = \frac{m_B \cdot \rho_{T, A}}{m_s} \quad (12.17)$$

$\rho_{BT, A}$	-	Bentonittrockendichte (korrigiert)	g/cm^3
m_B	-	Masse Bentonit	g
m_s	-	Masse Feststoff	g

- Berechnung der Porenzahl nach

$$e = \frac{n_{BT, A}}{1 - n_{BT, A}} \quad (12.18)$$

- Berechnung einer korrigierten Permeabilität $k_{abs, A}$ nach Gl. (12.10).

Eine Veranschaulichung der Parameterveränderung durch Auflockerung, wie sie im Programm abgebildet wird, zeigt Bild 12.11.

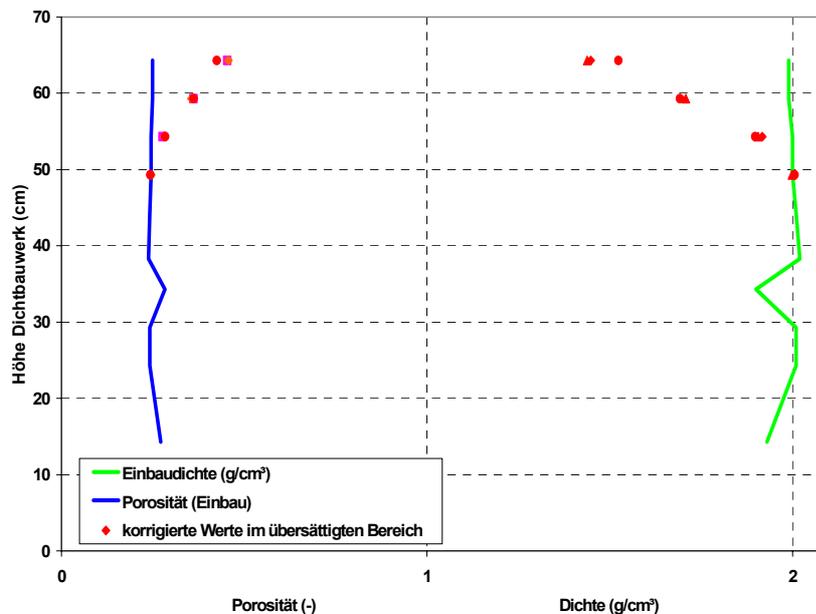


Bild 12.11 Änderung der Trockenrohddichte und Porosität im Dichtelement in Folge der einströmseitigen Auflockerung

KOMPAKTION

Die einströmseitige Auflockerung des Bentonitkörpers ist nur bei einer gleichzeitigen Kompaktion des teilgesättigten Bereiches möglich¹. Die aus der Übersättigung ermittelte Auflockerung ist ein Maß für die Kompaktion des ungesättigten Bentonitkörpers. Die Verringerung der Dichte im aufgelockerten Bereich muss im kompaktierten Bereich zu einer entsprechenden Dichtezunahme (Massenzunahme) führen. Die Massenumverteilung ergibt sich aus folgender Bilanz für jedes Modellelement:

¹ Für die modellgestützte Prozesssimulation wird eine Kompaktion der einströmseitigen Sandschicht und/oder ein Eindringen des Bentonits in diese Sandschicht vernachlässigt.

- $m_1 = V_A(S,t) \cdot \rho_{T,A}$ Masse nach Ausbau im aufgelockerten Bereich
 $m_2 = V_0 \cdot \rho_{T,0}$ Masse im Einbauzustand
 $m_{diff} = m_2 - m_1$ Masseänderung (über alle gesättigten Modellschichten)
- V_A - Volumen aufgelockerter Bereich cm^3
 V_0 - Volumen Ausgangszustand cm^3

Für eine Aufteilung der Masse auf den ungesättigten Bereich sind verschiedene Konzepte möglich (s. Bild 12.12). Für die Nachrechnung der durchgeführten Versuche wurde eine lineare Zunahme der Masse über die verbleibende Dichtelementlänge angenommen (blaue Linie). Dieser Ansatz wurde unter Berücksichtigung der empirischen Erfahrungen der Mitarbeiter des Institutes für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg ausgewählt. Diese weisen für in situ großtechnische und halbtechnische Versuche eine zunehmende Kompaktion über die gesamte teilgesättigte Dichtelementlänge nach. Inwiefern dieser Ansatz repräsentativ für den realen Prozess ist, sollte in weiteren Untersuchungen mit begleitender Überwachung der Dichteveränderung identifiziert werden.

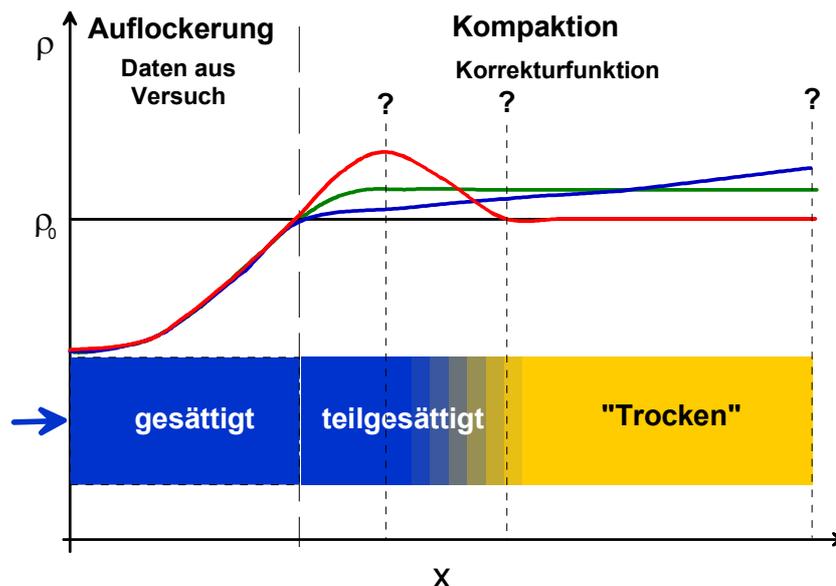


Bild 12.12 Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Masseverteilung im Ergebnis der Kompaktion

$$m_{korr} = m + m_{diff} \cdot f \quad (12.19)$$

- m_{korr} - korrigierte Masse im teilgesättigten Bereich g
 m - Masse im teilgesättigten Bereich g
 f - Wichtungsfaktor zur Realisierung des linearen Anstiegs -

Aus den korrigierten Massen kann sich, bei gleichbleibendem Elementvolumen, eine korrigierte Trockendichte berechnen:

$$\rho_{T, K} = \frac{m_{\text{korr}}}{V_0 - V_A} \quad (12.20)$$

- Analog zur Auflockerung werden Porosität $n_{t,K}$ und Permeabilität k_K berechnet.

Die Korrektur der absoluten Permeabilität durch Auflockerung/Kompaktion erfolgt kontinuierlich in Abhängigkeit der zeitlichen Veränderung der Eindringtiefe des Fluids in das Dichtelement.

Der Überlagerung von Quellen, Auflockerung und Kompaktion wird durch folgende Korrektur der für das Quellen berechneten Permeabilität Rechnung getragen:

$$k_{\text{abs_korr}} = \frac{k_{\text{abs_A/K}} \times k_{\text{abs_Quellen}}}{k_{\text{abs,0}}} \quad (12.21)$$

mit $k_{\text{abs_A/K}}$ für Auflockerung/Kompaktion und $k_{\text{abs_Quellen}}$ nach Gl. (12.12).

Diese Korrektur wird sowohl für den aufgelockerten als auch für den kompaktierten Bereich durchgeführt.

12.3.2.3 Zweiphasenströmung

Die modelltechnische Abbildung der Zweiphasenströmung in einem hochkompaktierten Bentonit setzt voraus, dass Kenntnisse bzw. geeignete Ansätze zur Vorgabe der Kapillardruck-Sättigungsfunktion sowie der Abhängigkeit der Phasenpermeabilitäten von der Poren-sättigung bekannt sind.

Die Berücksichtigung der aus dem Quellen und der Auflockerung/Kompaktion resultierenden Veränderung der absoluten Permeabilität erfolgte nach dem unter 0 und 0 beschriebenen Konzept. Entsprechend des Modellkonzeptes (Bild 12.9) erfolgt eine Umrechnung der angepassten absoluten Permeabilität nach

$$k_{\text{Phase}} = k_{\text{abs_korr}} \cdot k_{\text{rel_Phase}} \quad (12.22)$$

zur Abbildung der Zweiphasenströmung.

k_{Phase}	- effektive Phasenpermeabilität	m^2
$k_{\text{rel_Phase}}$	-relative Permeabilität für die Phase = f(S)	-

Für die Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Kapillardruck und effektiver Flüssigkeitssättigung sowie zwischen Kapillardruck-Sättigungsfunktion und den relativen Permeabilitäten für Gas und Flüssigkeit wurden verschiedene, in der Literatur veröffentlichte Ansätze /Brooks&Corey, 1964; van Genuchten et al., 1980, 1985; Guerrero et al., 1998;

Romero et al., 1999; Ward et al., 1987; Chen et al., 1999; Mische et al., 1998 Andrews et al., 1986/ ausgewertet, die in Anlage 11 zusammengefasst sind.

Für die eingesetzten Bentonitmaterialien lagen keine Kenntnisse zur effektiven Phasenpermeabilität in Abhängigkeit von der Porensättigung vor. Im Ergebnis einer Literaturrecherche wurden Untersuchungsergebnisse der NAGRA zum Permeabilitätsverhalten ungesättigter Bentonite ausgewertet /Andrews et al., 1986/. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde gezeigt, dass die gemessenen effektiven Permeabilitäten durch den nachfolgend beschriebenen Ansatz von Brooks und Corey abgebildet werden können (Bild 12.13).

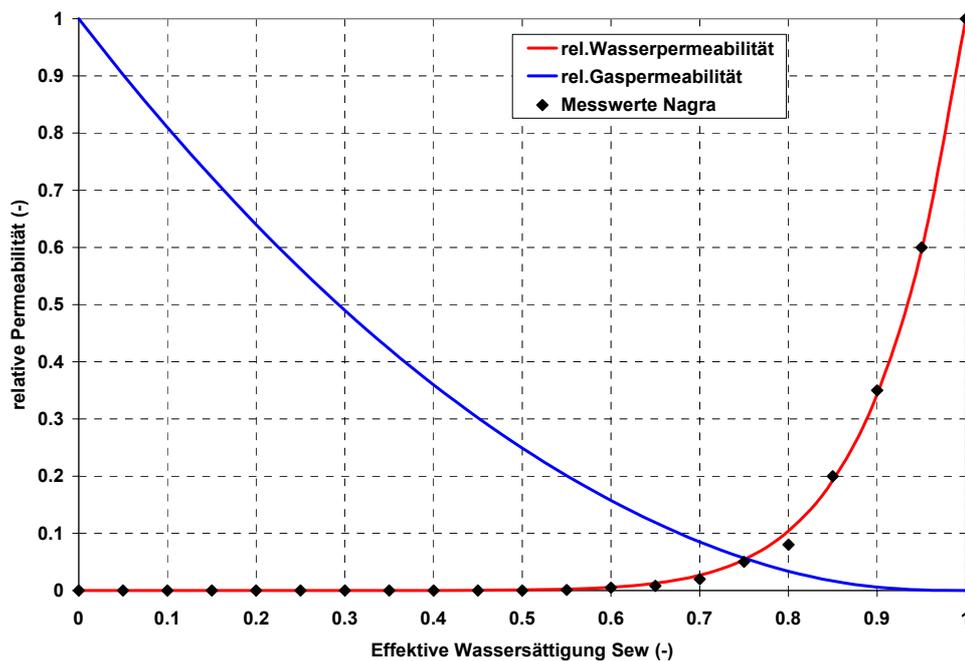


Bild 12.13 Darstellung der von /Andrews et al., 1986/ ermittelten relativen Wasserpermeabilitäten und der Anpassung nach Brooks-Corey mit $\lambda = 28$

Ansatz Kapillardruck:
$$P_c = P_0 \cdot S_{ew}^{-1/\lambda} \quad (12.23)$$

Ansatz relative Wasserpermeabilität:
$$k_{rw} = S_{ew}^{3+2/\lambda} \quad (12.24)$$

Ansatz relative Gaspermeabilität:
$$k_{rn} = (1 - S_{ew})^2 \left[1 - S_{ew}^{1+2/\lambda} \right] \quad (12.25)$$

P_c Kapillardruck MPa

S_{ew} effektive Wassersättigung -

P_0, λ Fitparameter MPa, -

Aus der Anpassung der für die Bentonitmaterialien ermittelten Kapillardruck-Sättigungsfunktionen (Bild 12.2) mittels mathematischer Suchverfahren nach Levenberg-Marquardt

/Draper et al., (1966)/ wurden die empirischen Parameter λ und P_0 bestimmt (12.23). Da es sich hierbei um ein statistisches Verfahren handelt, lassen sich die gewonnenen Aussagen nur mit einer bestimmten statistischen Sicherheit (Irrtumswahrscheinlichkeit) treffen, d.h. es können keine Absolutwerte ermittelt werden, sondern so genannte Konfidenzbereiche. Für eine statistische Sicherheit von 90 % ergibt sich für λ ein Schwankungsbereich von 0,32 bis 0,45. Die Auswirkung auf die Modellkurven für die relativen Permeabilitäten ist in Bild 12.14 dargestellt, wobei für die Simulation $\lambda = 0,38$ verwendet wurde.

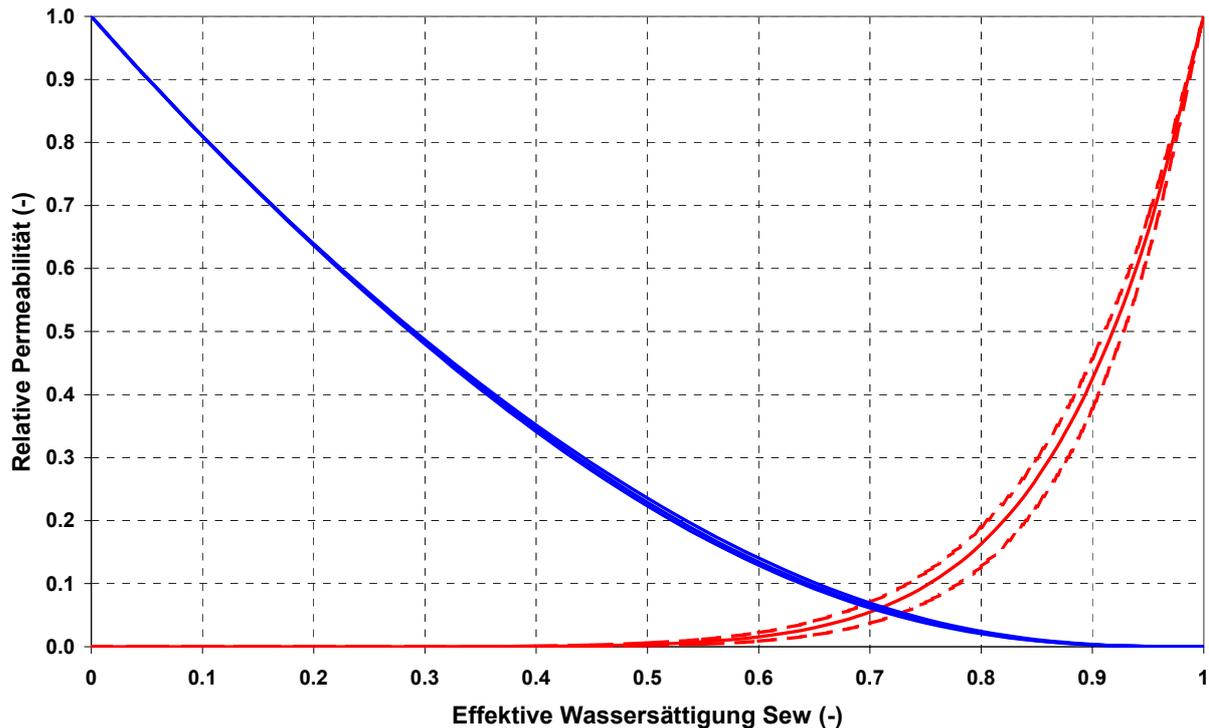


Bild 12.14 Relative Permeabilitäten für die Formsteine FS 50 in Abhängigkeit von der effektiven Sättigung (S_{we}) im Ergebnis des Ansatzes nach BROOKS UND COREY mit $\lambda = 0,38$

Wie die Darstellung der Abhängigkeit der relativen Phasenpermeabilität von der Flüssigkeitssättigung im Bild 12.14 zeigt, ist eine Flüssigkeitspermeabilität des Materials erst nach der Überschreitung einer effektiven Anfangssättigung von ca. 55 % (entspricht realer Sättigung von ca. 70 %) gegeben. So lange diese nicht überschritten wird, kommt es nicht zu einer zusammenhängenden Flüssigkeitsströmung.

Das dargestellte Modellkonzept zur Ermittlung der Materialparameter (Quecksilberporosimetrie) und die modelltechnische Abbildung der Zweiphasenströmung stellt einen modelltechnischen Ansatz für die Abbildung der realen Zweiphasenströmung in den Versuchen dar. Diese wird durch die zeitabhängigen materialspezifischen Eigenschaften (Porengrößenverteilung, Quellverhalten, effektive Permeabilität) und die versuchsspezifischen Bedingungen (Einspannung, Inhomogenitäten, Verdichtung, Druckregime) bestimmt. Diese Komplexität im Modell abzubilden, ist auf Grund der fehlenden prozessbeschreibenden Parameter und

Funktionen nicht möglich. Vor diesem Hintergrund hat der verwendete Ansatz das Ziel, die Zweiphasenströmung in generalisierter Form, gestützt auf für einen Bentonit gemessene Zusammenhänge /Andrews et al., 1986/, abzubilden.

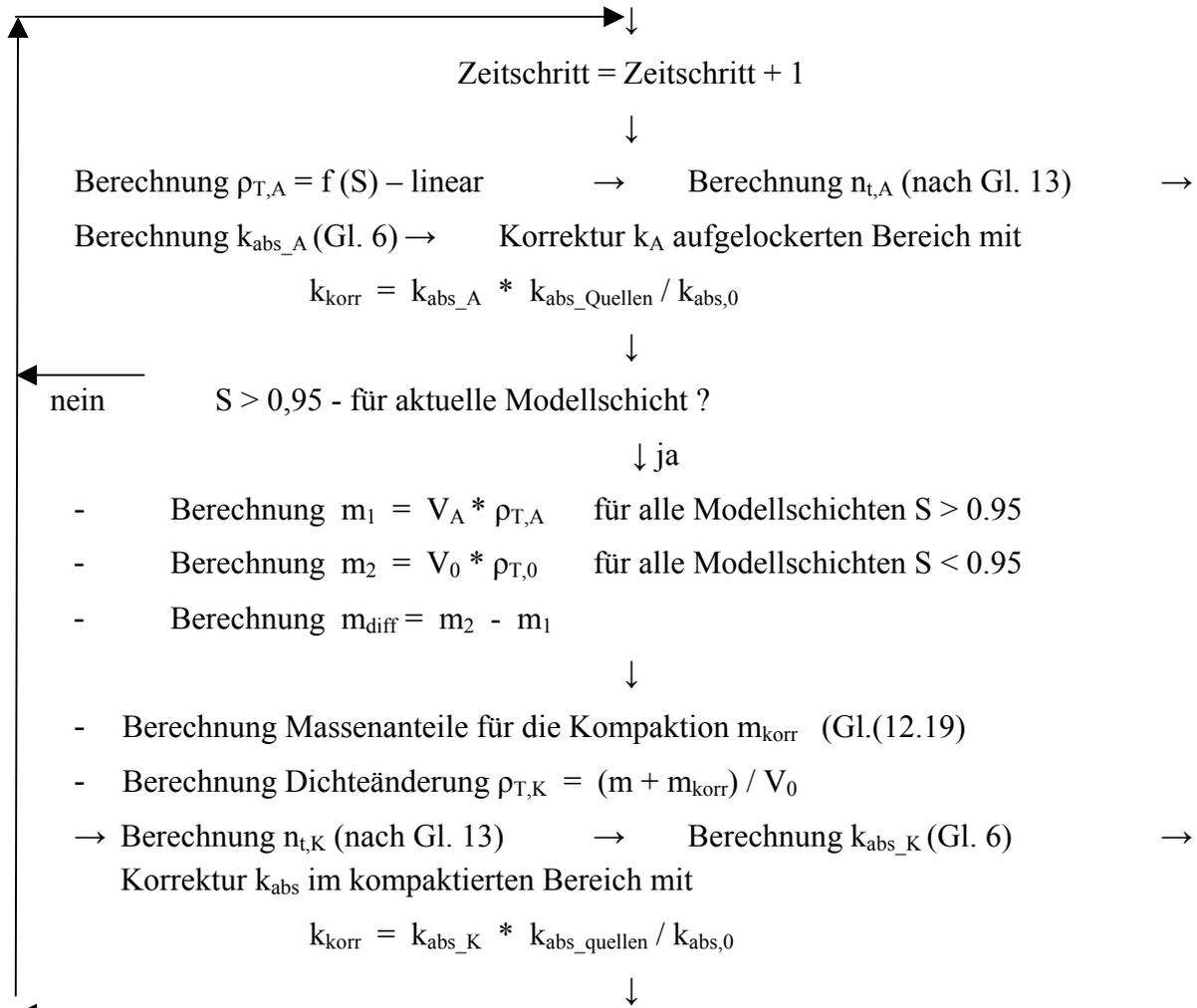


Bild 12.15 Programmablauf für die Korrektur der absoluten Permeabilität in Folge Auflockerung und Kompaktion

12.3.3 Modellaufbau und -parameter

12.3.3.1 Modellgeometrie und Randbedingungen

Für die Versuche KU1 bis KU7 wurde die in Bild 12.16 dargestellte Diskretisierung in x-z-Richtung mit den angegebenen Randbedingungen für die numerische Simulation zugrunde gelegt. In Abhängigkeit der Höhe der Bentonitschicht sowie der Anzahl und Art der angebrachten Kabelsensoren wurden die Modelle in ihrem Aufbau angepasst. Da für die Versuche KU1 – KU7 nur entlang eines zweidimensional ebenen Messprofils über die Mächtigkeit der Bentonitelemente Flüssigkeitsgehalte bzw. Sättigungen ermittelt wurden, erfolgte die Simulation für diese Versuche nur in zweidimensionalen Modellen. In Tab.12.2 sind die den einzelnen Berechnungen zugrunde liegenden Größen zusammengefasst.

Für die Modellrechnungen wurden folgende Randbedingungen vorgegeben:

- Druckverlauf einströmseitig entsprechend Versuchsmonitoring (z. B. Anlage 5.2)
- Druckverlauf ausströmseitig – Luftdruck
- Schotter wurde zum Zeitpunkt $t \geq 0$ als gesättigt angenommen

Die Modellrechnungen bilden die gesamte Versuchsdauer der Einzelversuche ab. Dabei wurden die Druckstufen aus den in den Anlagen 5.2 dargestellten gemessenen Druckverläufen entnommen. Bild 12.17 zeigt am Beispiel des Versuches KU2 das gemessene und im Modell berücksichtigte Druckregime.

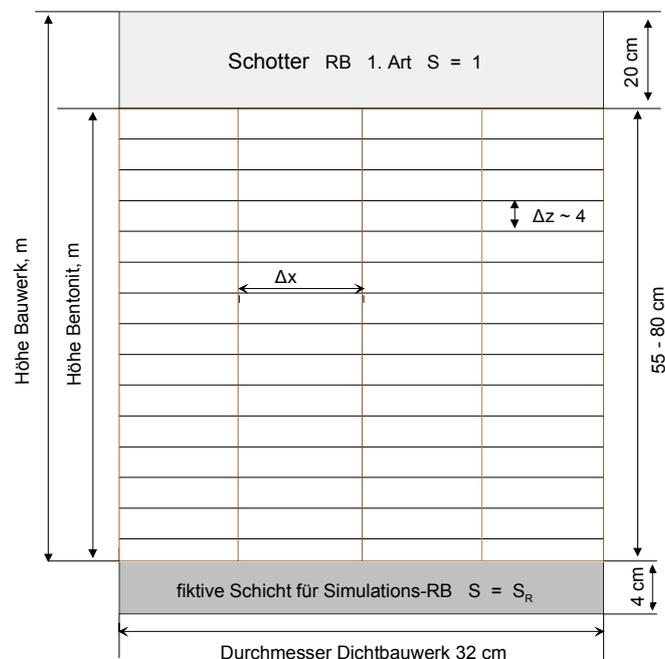


Bild 12.16 Schematischer Vertikalschnitt durch das Modell in der x-z-Ebene für die Versuche KU1 bis KU7

Den Modellrechnungen liegen folgende Prämissen zu Grunde:

- Strömung vertikal,
- Modellschicht 1 ist „Druckkammer“ für Flüssigkeit; letzte Modellschicht bildet RB 1. Art (=S_{WR}) bei Eindringen Flüssigkeit von oben, von unten umgekehrt,
- Material weitgehend homogen (KU1- KU7),
- Anfangszustand Bentonit (Einbau) ungesättigt, Restwassersättigung und Trockendichte bekannt,
- Permeabilität im Einbauzustand bekannt, Permeabilitäten in x-, y- und z-Richtung werden als gleich angesetzt,
- Funktion zur Abbildung des Einflusses des Quellens auf die absolute Permeabilität für alle Modellelemente im Bentonit gleich.

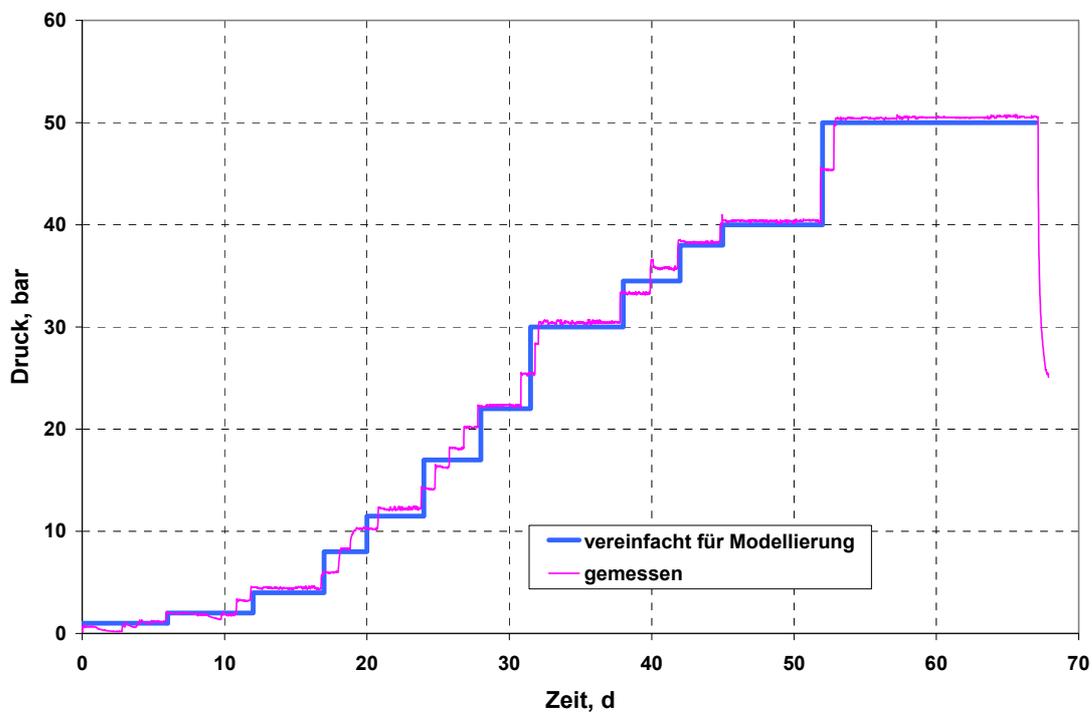


Bild 12.17 Druckverlauf für Versuch KU2

Tab.12.2 Zusammenstellung der Diskretisierung und Randbedingungen aller ausgewerteten Versuche

Variante	Bentonit-höhe (Einbau)	Anz. Modellschichten / Mächtigkeit Modellschichten (Δz)	Anz. Elemente x Richtung / Länge Gitterelemente (Δx)	Anz. / max. Differenz Druckstufen (zeitabh. RB 1.Art)	Simulationszeit
	cm	- / cm	- / cm	- / bar	d
KU1	52,0	15 / 4	4 / 5 - 11	7 / 8 - 105	77

KU2	65,0	15 / 4 - 13	4 / 5 - 11	12 / 1 - 50	67
KU4	60,5	15 / 4 - 6	4 / 5 - 11	6 / 8 - 115	91
KU5	60,0	18 / 4	3 / 10 - 12	4 / 8 - 105	176
KU6	64,8	18 / 4 - 5	3 / 10 - 12	11 / 4 - 50	147
KU7	52,5	13 / 4 - 7	3 / 10 - 12	9 / 5 - 50	150
Br2	151,0	38 / 5	6 / 13,6	16 / 1 - 44	227

Auf Grund der in Abschnitt 11.7 beschriebenen Versuchsverläufe für die Versuche KU3 und Br1 war eine Modellierung dieser Versuche nicht möglich.

Für den Versuch Br2 wurde, auf Grund der räumlichen Verteilung der Messsensoren (Anlage 3.3) und der Bestimmung der Flüssigkeitsgehalte (Sättigungen) über die Bentonitmächtigkeit, ein 3D-Modell aufgebaut, dessen Diskretisierung in Bild 12.18 dargestellt ist. Weitere Angaben zum Modell sind in Tab.12.2 zusammengestellt.

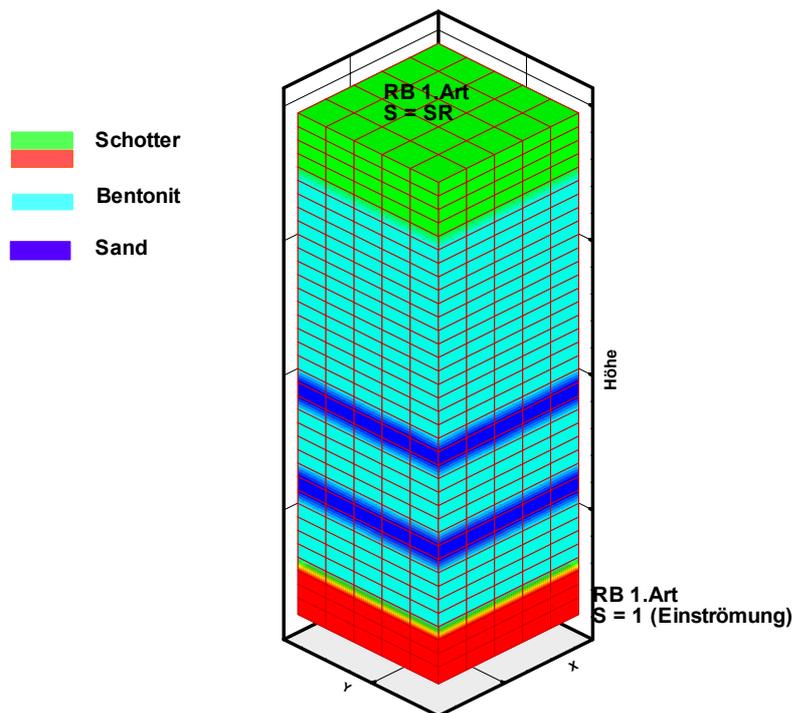


Bild 12.18 Diskretisierung des Modells für die numerische Simulation des Versuches Br2

12.3.3.2 Parameterbelegung

In Anlage 11 sind die Vorgehensweise und die statistische Bewertung der Modellanpassung für die Kapillardruckkurven sowie die Auswirkungen der ermittelten Parameter und deren Unsicherheiten auf die Bestimmung der relativen Permeabilitäten dargestellt.

In Tab. 12.3 sind die Ausgangsparameter und α -Funktionen der Modellrechnungen für die einzelnen Versuche zusammengefasst.

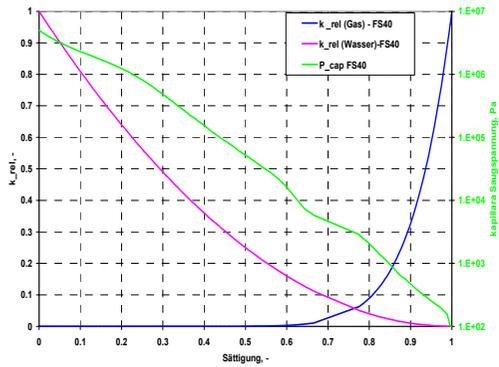
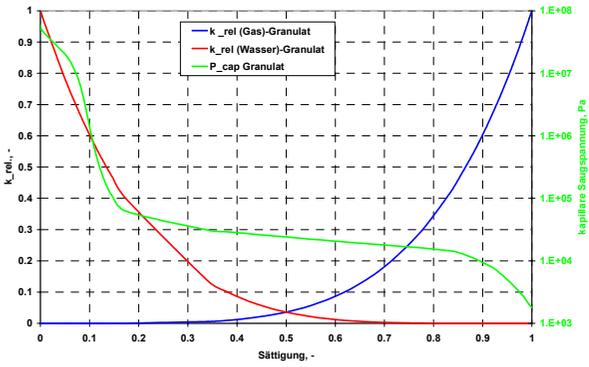
Die angegebenen Materialparameter beziehen sich auf den Einbauzustand des Dichteelementes. Zusätzlich wird die in Abschnitt 0 beschriebene Vorgehensweise der ermittelten absoluten Permeabilität im gesättigten Zustand angegeben.

Tab. 12.3 Übersicht der Ausgangsparameter und –funktionen der einzelnen Versuchsmodelle

Versuch	Totale Porosität $n_{t,0}$	Restwasser-sättigung S_{WR}	Material / Fluid	Relative Permeabilität k_{rel}	Absolute Permeabilität ¹ $k_{abs,0}$	Absolute Permeabilität ² $k_{abs,ungesättigt}$
Br1			Calcigel/NaCl			
Br2	0,35	0,38				
KU1	0,37	0,43	Calcigel/NaCl		$1,4e^{-19}$	$2,0e^{-15}$
KU2	0,6	0,22	MX80 Granulat/Wasser		$2,3e^{-17}$	$1,6e^{-15}$
KU3			Calcigel/Wasser			
KU4	0,93	0,29	MX80-Formsteine/NaCl		$1,2e^{-19}$	$1,6e^{-14}$
KU5	0,32	0,4	MX80-Formsteine/Wasser		$4e^{-20}$	$8e^{-15}$

¹ ermittelt aus Versuchsdaten am Versuchsende

² ermittelt aus Versuchsdaten am Versuchsanfang

Versuch	Totale Porosität $n_{t,0}$	Restwasser-sättigung S_{WR}	Material / Fluid	Relative Permeabilität k_{rel}	Absolute Permeabilität ¹ $k_{abs,0}$	Absolute Permeabilität ² $k_{abs,ungesättigt}$
KU6	0,29	0,33	FS40-Formsteine/Wasser		$2,1e^{-19}$	$1,7e^{-17}$
KU7	0,39	0,44	Calcigel/Wasser		$1,8e^{-18}$	$8,8e^{-16}$

12.4 Ergebnisse der Modellrechnungen

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für die einzelnen halbtechnischen Versuche werden nachfolgend in einer grafischen Gegenüberstellung der gemessenen Sättigungsverteilung und der im Modell abgebildeten Sättigungsverteilung (im Ergebnis der Anpassung der Quellfunktion – Abschnitt 0) gegenübergestellt. Dabei werden die Modellergebnisse den gemessenen Verteilungen sowohl im 2D-Vertikalschnitt als auch als Messwertprofil über die Bentonitmächtigkeit gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass mit dem angewendeten Modellkonzept eine relativ gute Abbildung der gemessenen Feuchteausbreitung im Modell möglich ist.

12.4.1 Ergebnis Versuch Br1

Auf Grund des Flüssigkeitsdurchbruches entlang der Kabelsensoren (s. Abschnitt 11.7.1) erfolgte keine modellgestützte Simulation dieses Versuches.

12.4.2 Ergebnis Br2

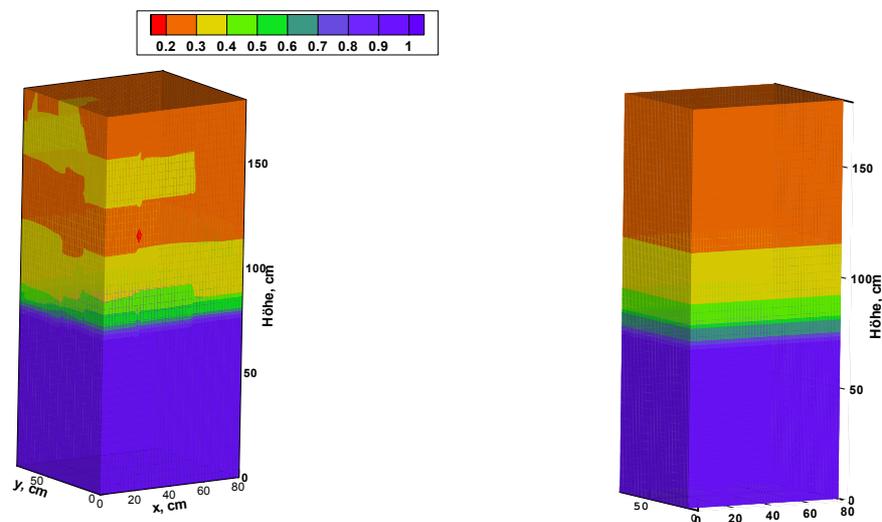


Bild 12.19 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk Br2

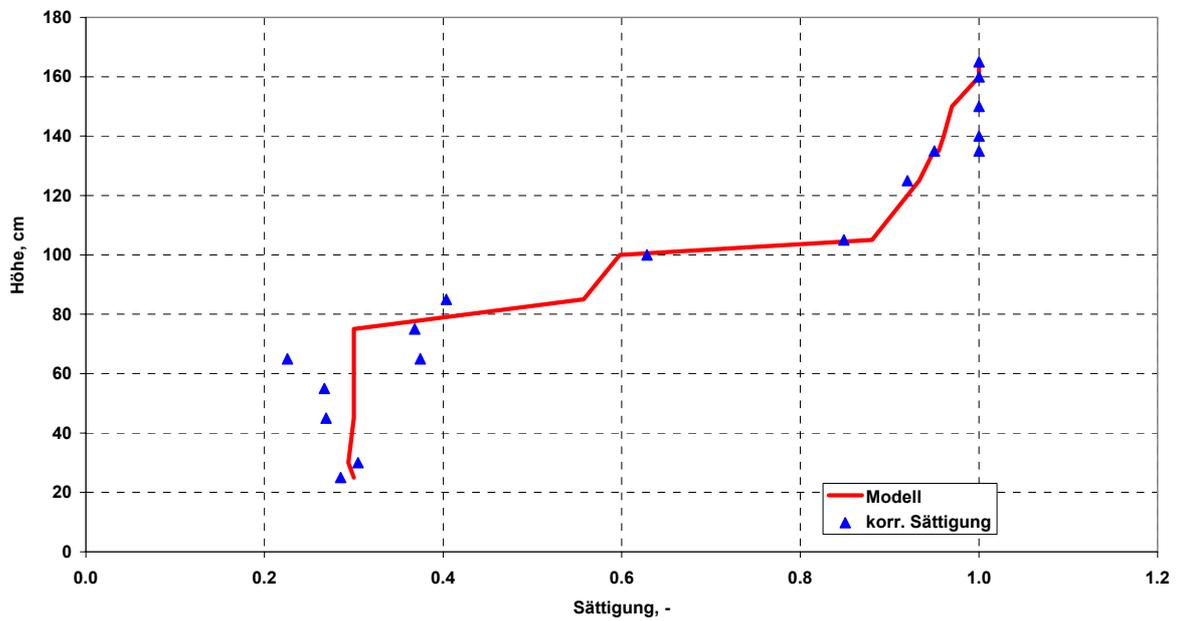


Bild 12.20 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in ausgewählten Messpunkten Br2

12.4.3 Ergebnis KUI

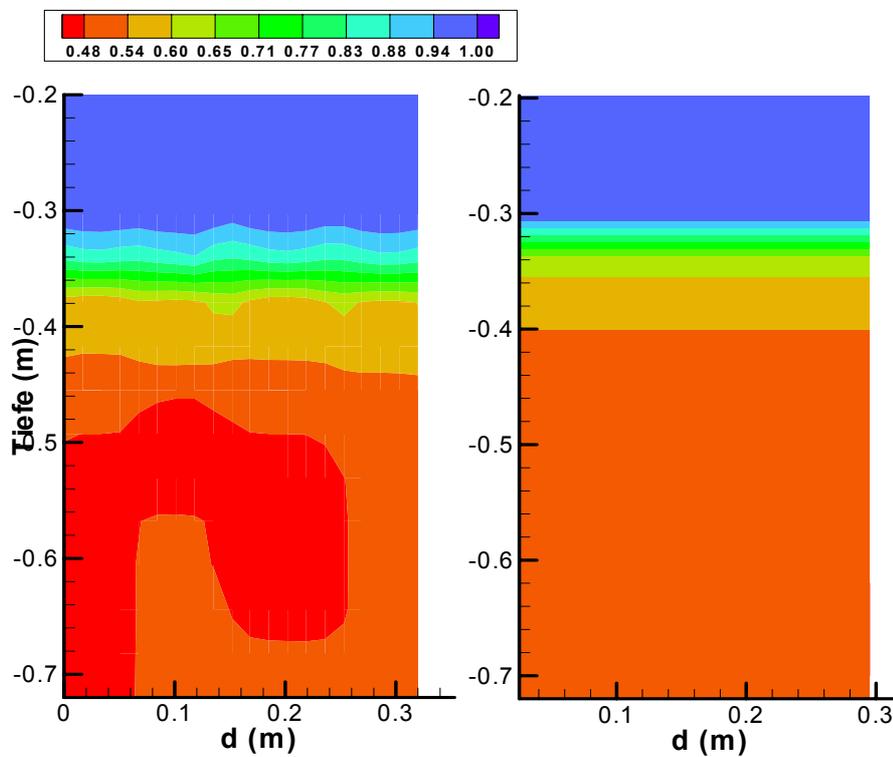


Bild 12.21 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KUI

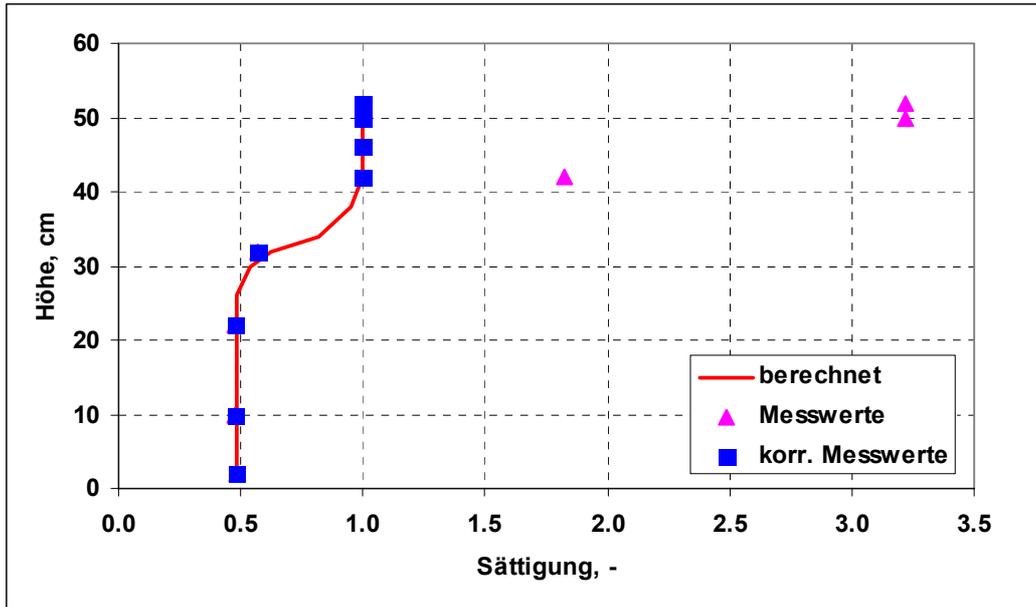


Bild 12.22 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU1

12.4.4 Ergebnis KU2

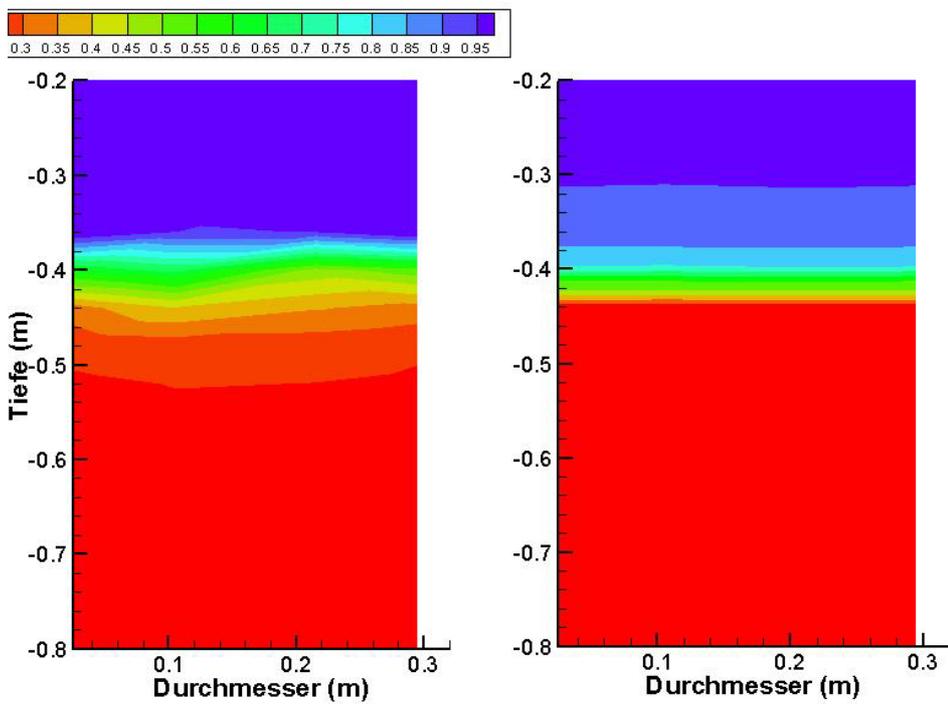


Bild 12.23 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU2

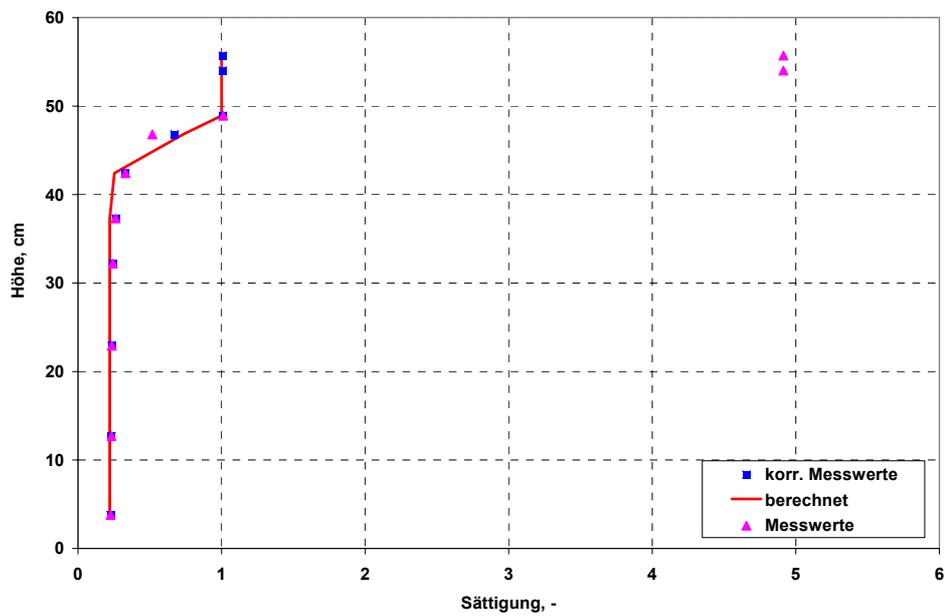


Bild 12.24 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU2

12.4.5 Ergebnis KU3

Auf Grund des Versuchsverlaufes konnte dieser Versuch nicht ausgewertet werden (s. Abschnitt 11.7.5).

12.4.6 Ergebnis KU4

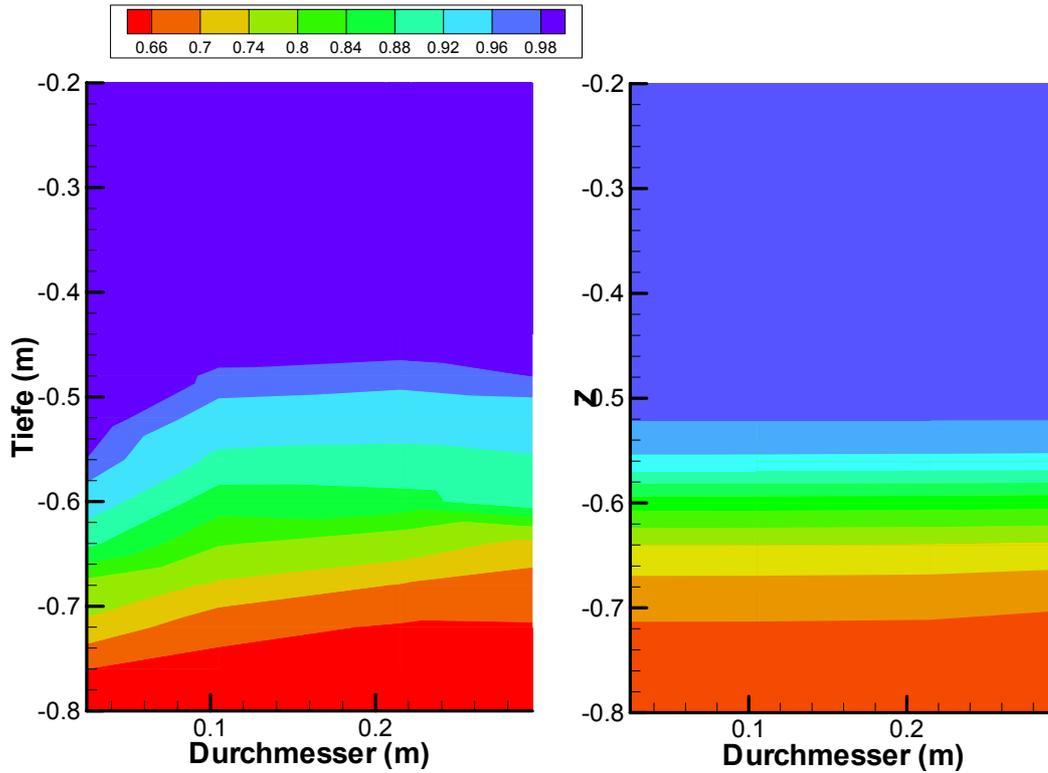


Bild 12.25 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU4

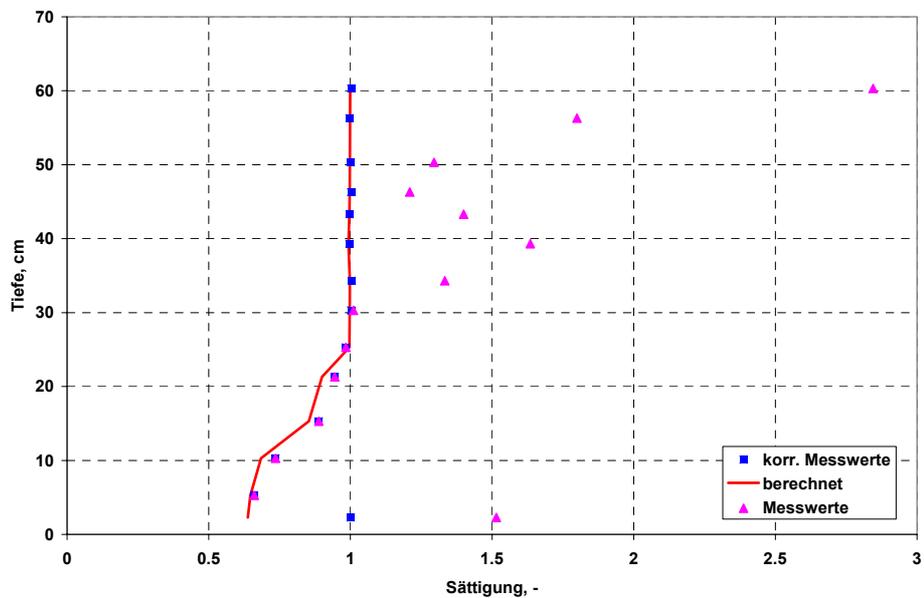


Bild 12.26 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU4

12.4.7 Ergebnis KU5

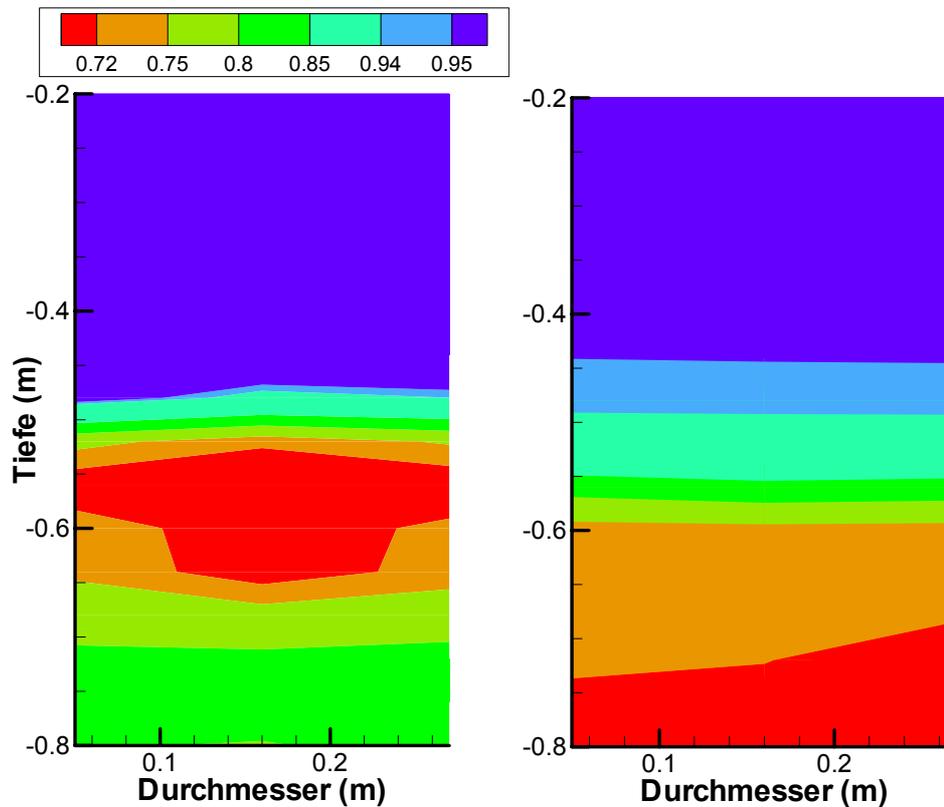


Bild 12.27 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU5

Für diesen Versuch ergaben die gemessenen Wassergehalte einen höheren Gehalt im unteren Bereich des Dichtelementes im Vergleich zum mittleren Teil. Dies deutet auf einen hydraulischen Kurzschluss über die Bentonitmächtigkeit hin. Dieses Phänomen lässt sich numerisch nicht nachbilden, da hierbei von einem kontinuierlichen Fortschreiten der Sättigungsfront ausgegangen wird.

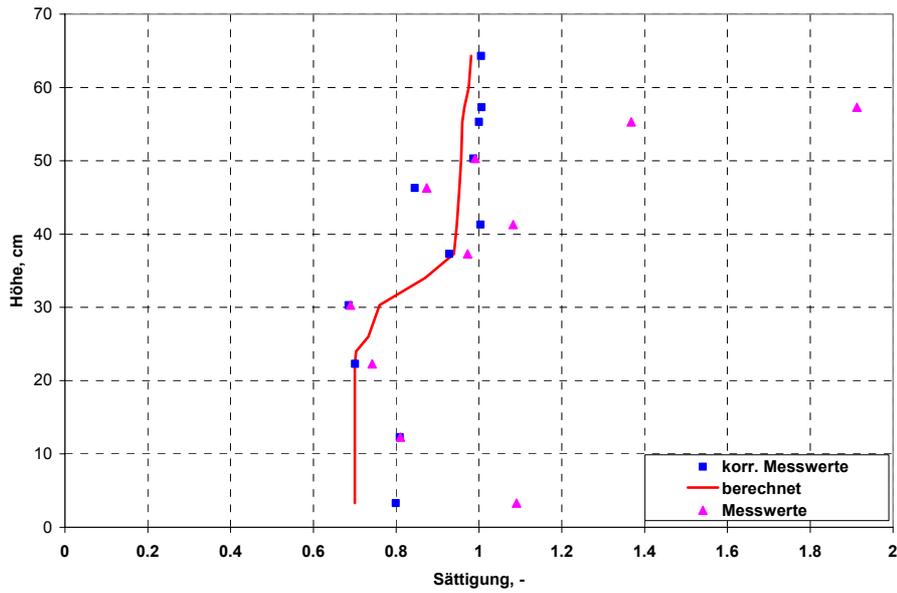


Bild 12.28 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU5

12.4.8 Ergebnis KU6

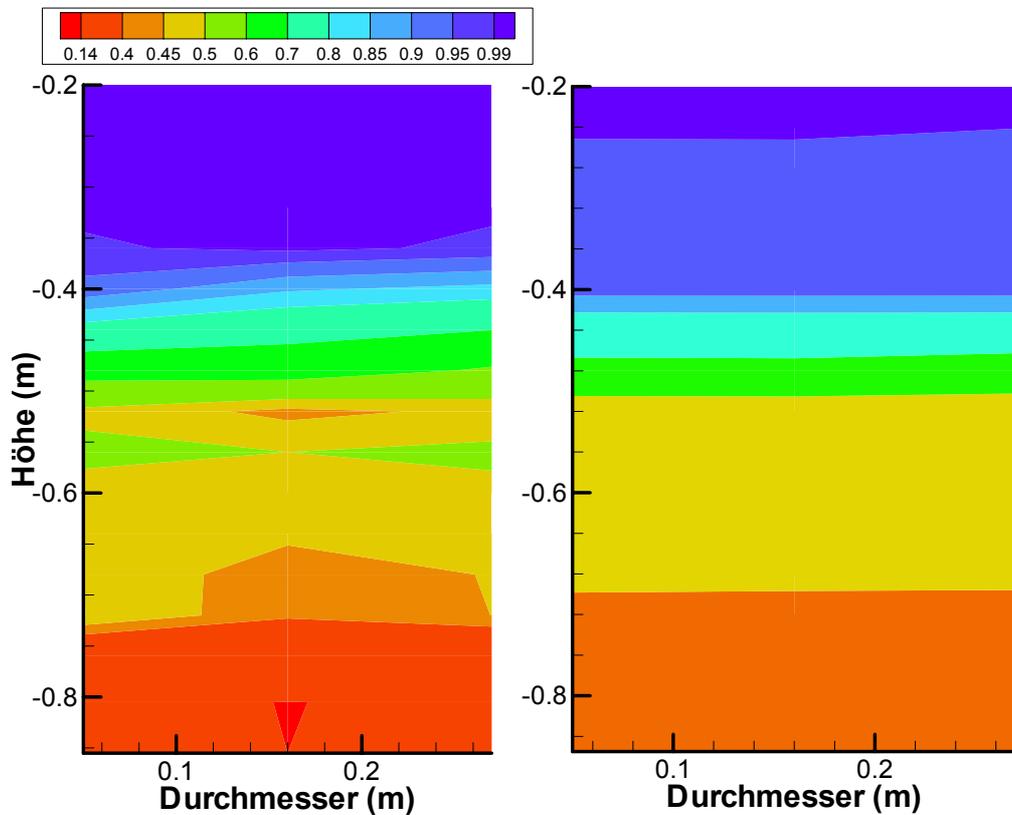


Bild 12.29 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU6

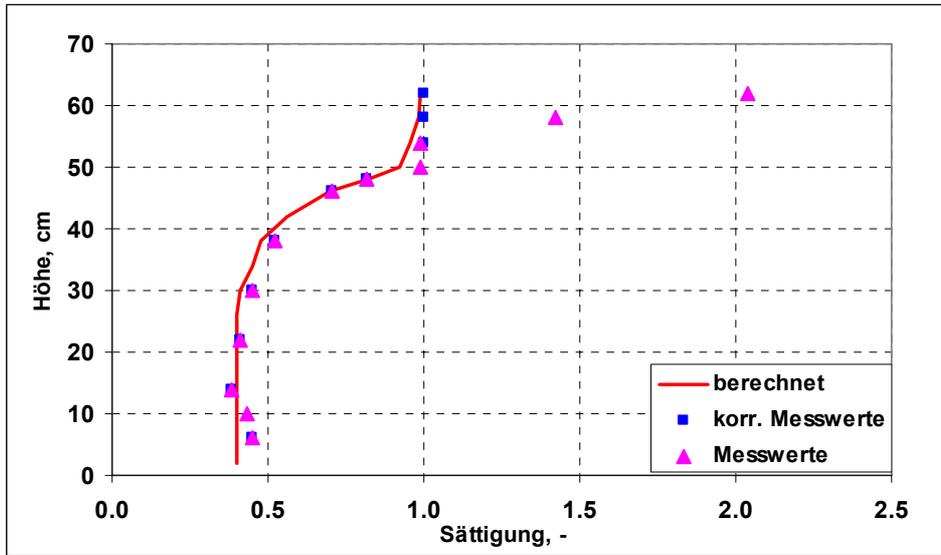


Bild 12.30 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU6

12.4.9 Ergebnis KU7

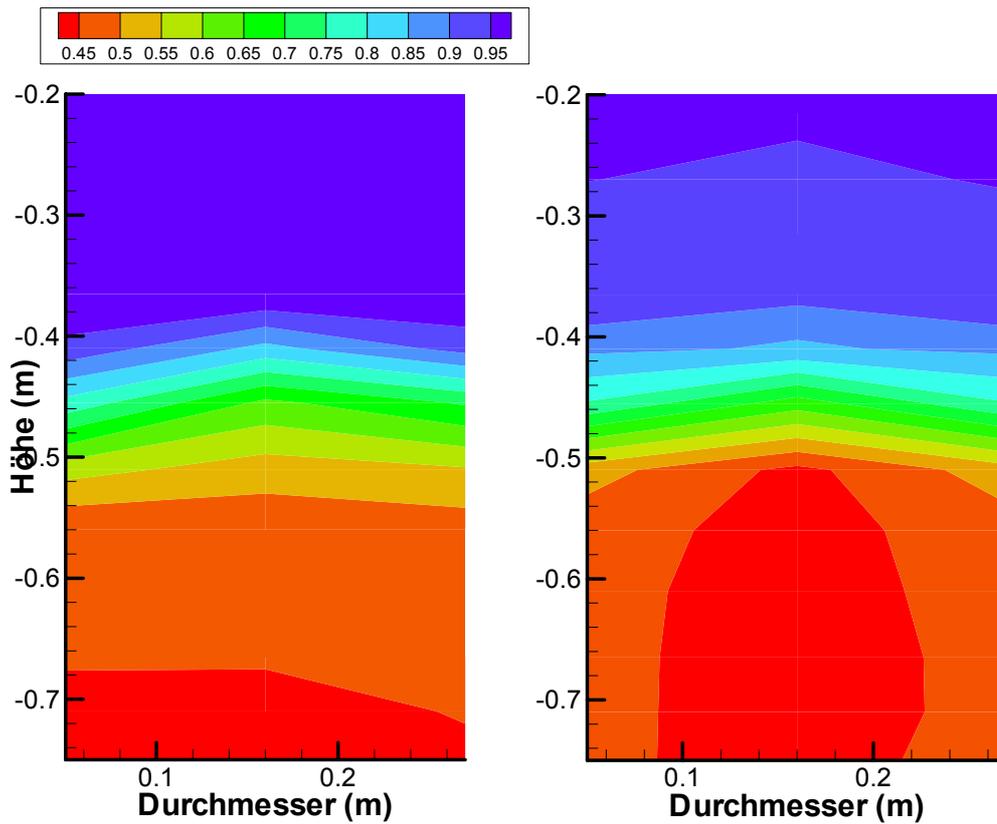


Bild 12.31 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU7

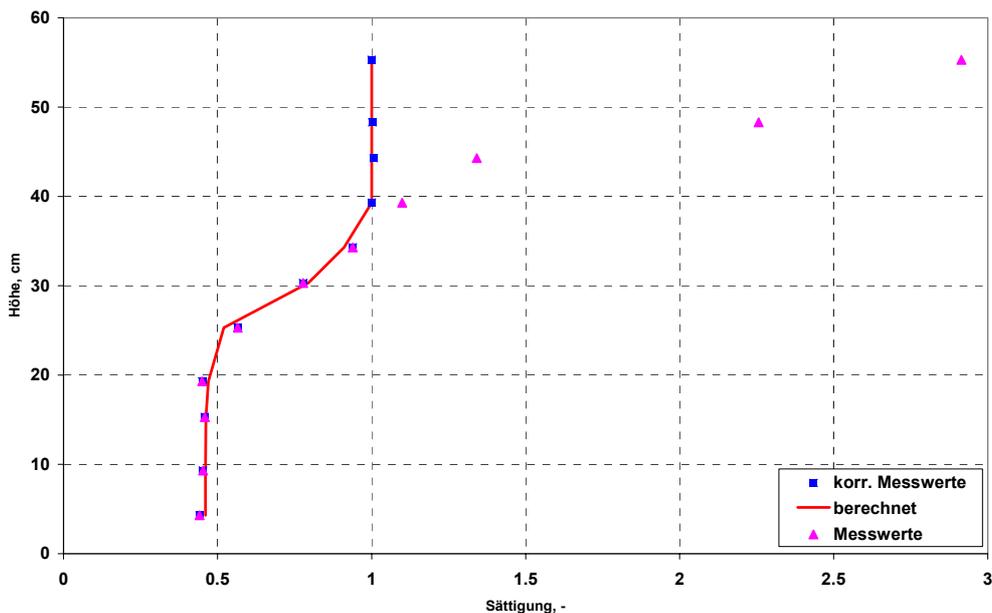


Bild 12.32 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU7

12.5 Zusammenfassung

Auf der Grundlage der Versuchsdaten, der über den Versuchsverlauf erfassten Parameter und der Ergebnisse aus dem Versuchsrückbau wurden numerische Modelle zur Abbildung der Strömungsprozesse bei der Flüssigkeitsausbreitung im Bentonit entwickelt. Voraussetzung für die modellgestützte Abbildung der halbtechnischen Versuche war eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Strömungsvorgänge im Bentonit sowie die Entwicklung eines Modellkonzeptes für die Berücksichtigung der dominierenden Einflussprozesse - Zweiphasenströmung, Quellen des Bentonits und Auflockerung/Kompaktion des Bentonitkörpers - auf den Strömungsprozess. Im Ergebnis der modellgestützten Prozessabbildung wurden Schlussfolgerungen formuliert werden:

Numerische Prozesssimulaion

- Die Strömungsprozesse im Bentonit werden bestimmt durch:
 - absolute Permeabilität des gesättigten Materials
 - Porositätsveränderung in Folge Quellen + Auflockerung/Kompaktion
 - relative Permeabilität (Flüssigkeitssättigung im ungesättigten Dichtmaterial)
- Aus den halbtechnischen Versuchen können folgende Prozessparameter abgeleitet werden:
 - absolute Permeabilität
 - Auflockerung/Kompaktion
- Es liegen keine Prozessparameter zur Abbildung der Veränderung der relativen Permeabilität in Abhängigkeit der Porositätsveränderung durch Quellen + Auflockerung/Kompaktion vor.

- Das entwickelte kombinierte Modellkonzept bildet die Zweiphasenströmung und die Porositätsveränderung in Folge Quellen + Auflockerung/Kompaktion in den durchgeführten halbtechnischen Versuchen gut ab.
- Für die Weiterentwicklung der Feuchtemessung mit den Kabelsensoren ist es erforderlich den Einfluss von Veränderungen der Materialeigenschaften auf die indirekte Feuchtigkeitsmessung (Porositäts-(Dichte-) veränderung) zu ermitteln.
- Die modellgestützte Prozesssimulation kann durch eine Vertiefung der Kenntnisse zu den Material- und Prozessparametern - Absicherung $k_{abs}=f(\rho_T)$; $k_{abs, 0}=f(\rho_T)$; Bestimmungskonzept für $\rho_{in situ}$ – qualifiziert werden.

12.6 Literatur

- Agus, S.S.; Leong, E.C.; Schanz, T. (2003): Assessment of statistical models for indirect determination of permeability functions from soil-water characteristic curves. *Geotechnique* 53, No.2, 2003.
- Agus, S.S.; Schanz, T. (2003-1): Swelling pressures and wetting-Drying curves of a highly compacted bentonite-sand mixture. Bauhaus-Universität Weimar.
- Agus, S.S.; Schanz, T. (2003-2): Vapour equilibrium technique for tests on a highly compacted bentonite-sand mixture. Bauhaus-Universität Weimar.
- Andrews, R.W.; LaFleur, D.W.; Pahwa, S.B. (1986): Resaturation of backfilled tunnels in granite. NAGRA, Technical Report 86-27.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964): Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 27 pp.
- Bucher, F.; Jedelshausen, P.; Mayor, P.-A. (1986): Quell-, Durchlässigkeits- und Schrumpfvversuche an Quarzsand - Bentonit – Gemischen. Nagra Technischer Bericht 86-13, Nagra, Schweiz.
- Bühmann, C. (1995): The Swelling Capacity of Illite/Smectite Interstratifications. Conference on Clay Mineralogy and Petrology.
- Chatterji, P.K.; Morgenstern, N.R. (1990): A modified shear strength formulation for swelling clay soils. *Physico-chemical aspects of Soil and related materials*, 1990.
- Chen, J.; Hopmans, J.W.; Grismer, M.E. (1999): Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Advances in Water Resources* Vol.22, No.5, 479-493.
- Cheung, S.C.H.; Oscarson, D.W.; Lopez, R.S. (1984): Factors influencing mass diffusion in bentonite and mixtures of bentonite and sand. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 26 (1984).
- Chul-Soo, L.; Hong-Tae, K.; Tae-Won, S.; Snag-Hoon, P. (1993): Diffusivities for ions through compacted Na-Bentonite with varying dry bulk density. *Waste Management* Vol. 13 1993.
- Cooley, R.L. (1983): Some New Procedures for Numerical Solution of Variably Saturated Flow Problems. *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 5, S. 1271-1285, 10/1983..
- Couture, R.A. (1985): Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. *Nature* Vol. 318, 7.Nov. 1985.
- Daeman, J.; Ran, Ch. (1996): Bentonite as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material. University of Nevada-Reno, Nevada, Dezember 1996.
- Delage, P.; Howat, M.D.; Cui, Y.J. (1998): The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology* 50 (1998).
- Dunn, R. J.; Mitchel, J. K. (1984): Fluid conductivity testing of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Band 110, Heft 11, Seite 1648-1665.
- Einstein, H.H. (1990): Rheologic behavior of natural argillaceous ground. Nagra, Interner Bericht 90-18, Februar 1990.
- Finsterle, S.; Pruess, K. (1995): Solving the estimation-identification problem in two-phase flow modeling. *Water Resource Res.*, Vol.31, No.4, 1995.
- Gabener, H.-G. (1983): Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindigen Böden. *Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik / Universität Essen* Dissertation.
- Gattermann, J.; Wittke, W.; Erichsen, C. (2001): Modelling water uptake in highly compacted bentonite in environmental sealing barriers. *Clay Minerals* (2001) 36.

- Giese, R. (2001): Zur Hydraulik dreier nicht mischbarer Fluide in porösen Medien. Proceedings des DGFZ e.V., Heft 22.
- Graham, J.; Halayko, K.G.; Hume, H.; Kirkham, T.; Gray, M.; Oscarson (2002): A capillarity-advective model for gas break-through in clay. Engineering Geology 64 (2002).
- Graham, J.; Saadat, F.; Gray, M.N.; Dixon, D.A.; Zhang, Q.-Y. (1988): Strength and volume change behavior of a sand-bentonite mixture. Can. Geotech. J. Vol. 26, 1989.
- Gruner, M.; Kawka, A. (2002): Versuchsverschlussbauwerk EU 1 – Sondershausen. Teilbericht Rückbau – Dichtelement I. Institut für Bergbau, TU Bergakademie Freiberg.
- Guerrero, M.T.; Satik, C.; Finsterle, St.; Horne, R. (1998): Inferring relative permeability from dynamic boiling experiments. Proceedings on geothermal reservoir engineering, Stanford, California.
- Häfner, F.; Voigt, H. D.; Bamberg, H.-F.; Lauterbach, M. (1985): Geohydrodynamische Erkundungen von Erdöl-, Erdgas- und Grundwasserlagerstätten. Berlin : Hrsg.: Wissenschaftlich-Technischer Informationsdienst des Zentralen Geologischen Institutes, Jg. 26.
- Helmig, R. (1997): Multiphase flow and transport processes in the subsurface. Berlin, Heidelberg, New York : Springer. - ISBN 3-540-62703-0
- Herbert, H.-J.; Moog, H.C. (2002): Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen. GRS-179 (2002).
- Honapour, M.; Koederitz, L.; Harvey, A. H. (1986): Relative Permeability of Petroleum reservoirs. O: Schrank geheftet. - ISBN 0-8493-5739-X
- Honapour, M.; Koederitz, L.; Harvey, A. H. (1989): Introduction to petroleum reservoirs analysis. . - ISBN 0-87201-591-2
- Horseman, S.T.; Harrington, J.F.; Sellin, P. (1999): Gas migration in clay barriers. Engineering Geology 54 (1999).
- Horst, M. (1997): Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen zur Qualitätssicherung mineralischer Abdichtungen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik / TU Braunschweig Heft Nr.:54Dissertation.
- Hou, Z. (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. Habilitationsschrift, Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Heft 13, 2002.
- Huang, D. D.; Honarpour, M. M. (1998): Capillary end effects in coreflood calculations. Journal of Petroleum Science and Engineering 19, Seite 103-117.
- Hubert, R. (1993): Untersuchungen der Gas- und Feuchteverteilung im Bereich eines Endlagerbohrloches für radioaktive wärmefreisetzende Abfälle in Steinsalzformationen. Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Band 15Dissertation. - ISBN 3-86073-221-8
- Hueckel, T.; Borsetto, M.; Peano, A. (1987): Modelling of coupled thermo-elastoplastic-hydraulic response of clays subjected to nuclear waste heat. Numerical methods for transient and coupled problems, 1987.
- Jockwer, N.; Mieke, R.; lyda, I.-M. (2000): Untersuchungen zum Zweiphasenfluss und diffusiven Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen. GRS Abschlußbericht.
- Kanno, T.; Wakamatsu, H. (1992): Water uptake and swelling properties of unsaturated bentonite buffer materials. Can. Geotech. J. Vol. 29, 1992.
- Kemmesies, O. (1995): Prozeßmodellierung und Parameteridentifikation von Mehrphasenströmungsprozessen in porösen Medien. Proceedings des DGFZ e. V., Heft 7Dissertation. - ISSN 1430-0176

- Kenney, T.C.; van Veen, W.A.; Swallow, M.A.; Sungiala, M.A. (1992): Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. In: *Can. Geotechn. J.* 29, S.364-374.
- Knecht, B. (1985): Bentonite resaturation: A simplified calculation. Nagra, Baden.
- Knecht, B. (1986): Capillary pressures and relative permeabilities in bentonites investigated in the Nagra Programmes. Nagra, Baden.
- Kraehenbuehl, F.; Stoeckli, H.F.; Brunner, F.; Kahr, G.; Mueller-Vonmoos, M. (1987): Study of the Water-Bentonite System by Vapour Adsorption, Immersion Calorimetry and X-Ray Techniques: I. Micropore Volumes and internal surface areas, Following Dubinin's Theory. *The Mineralogical Society, Clay Minerals* (1987) 22.
- Kröhn, K.-P. (2004): Modelling the re-saturation of bentonite in final repositories in crystalline rock. GRS mbH, GRS 199, März 2004.
- Land, C.S. (k.A.): Calculation of Imbibition Relative Permeability for Two- and Three-Phase Flow From Rock Properties. .
- Lehners, C. (1992): Analyse von Strömungen in wassergesättigten Kornhaufwerken. Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen / TU Braunschweig Dissertation.
- Lineham, T.R. (k.A.): A Laboratory study of gas transport through intact clay samples. Nirex-Dokumentation.
- Lins, Y.; Schanz, T. (k.A.): Determination of hydro-mechanical properties of sand. Bauhaus-Universität Weimar.
- Luckner, L.; Schestakow, W.M. (1986): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. Leipzig : Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- Miehe, R.; Jockwer, N.; Wiczorek, K.; Rothfuchs, T. (2000): Qualification of Clay Barriers in Underground Repository Systems. GRS Bericht.
- Miehe, R.; Kröhn, K.-P.; Moog, H. (2003): Hydraulische Kennwerte tonhaltiger Mineralgemische zum Verschluss von Untertagedeponien (KENTON). GRS mbH, GRS 193. - ISBN ISBN 3-9319995-61-5
- Miller, C.T.; Christakos, G.; Imhoff, P.T.; McBride, J.F.; Pedit, J.A. (1998): Multiphase flow and transport modeling in heterogeneous porous media: challenges and approaches. *Adv. in Water Resources* 21, No.2, 1998.
- Moseley, W. A.; Vijay K.; Dhir, k. (1996): Capillary pressure-saturation relations in porous media including the effect of wettability. *Journal of Hydrology* 178, Seite 33-53.
- Nekrassov, A. (2002): Development of a Reservoir Simulation Tool with the Local Equilibrium Approach to Composite Water-Hydrocarbon Systems for Application to the Multi-Phase Flow both in Petroleum Reservoirs and in Aquifers Taking into Account the Hydrodynamic Dispersion. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg.
- Nishida, Y. (1961): Eine einfache Formel zur Abschätzung des Durchlässigkeitskoeffizienten von Tonböden. *Der Bauingenieur* 36, Heft12, Seite 461-463.
- Olsen, H. W. (1962): Hydraulic Flow through Saturated Clays. *Clays and Clayminerals*, No. 9, New York, Seite 131-161.
- Olsen, H. W. (1965): Deviations from Darcy's Law in Saturated Clays. *Soil Science Society Proceedings*, No. 29 (2), Madison, Wis., Seite 135-140.
- Ouyang, S.; Daemen, J.J.K. (1992): Sealing performance of bentonite and bentonite/crushed rock borehole plugs. University of Arizona, NUREG/CR-5685.
- Persoff, P.; Pruess, K. (k.A.): Two-phase visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fractures. *American Geophysical Union*, 95WR00171.

- Pfeifle, T.W. (1991): Consolidation, Permeability, and Strength of Crushed Salt/Bentonite Mixtures with Application to the WIPP. Topical Report RSI-0357, SAND90-7009.
- Piskarev, V.I.; Palatnik, B.M. (k.A.): The numerical method for the problem of two-phase flow. .
- Pöttinger, J. (1991): Sorption databases for bentonite, crystalline and marl. Nagra, Baden.
- Pusch, G.; Reitenbach, V. (1997): Messung hydraulischer Parameter des Zweiphasenflusses an Steinsalzproben. Abschlussbericht, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, TU Clausthal.
- Pusch, R. (1980): Permeability of highly compacted bentonite. SKBF/KBS Teknisk Rapport 80-16.
- Pusch, R. (k.A.): Swelling pressure of highly compacted bentonit. SKBF/KBS Teknisk Rapport 80-13.
- Pusch, R. (k.A.): Water uptake, migration and swelling characteristics of unsaturated and saturated, highly compacted bentonite. SKBF/KBS Teknisk Rapport 80-11.
- Push, R.; Ranhagen, L.; Nilsson, K. (1985): Gas migration through MX-80 Bentonite. Swedish Geological, Lund, Sweden, Techn. Rep. 85-36.
- Radhakrishna, H.S.; Crawford, A.M.; Kjartanson, B.; Lau, K.C. (1992): Numerical modelling of coupled heat and moisture transport through bentonit -sand buffer. In: Can. Geotech.J. vol.29 (1992), S.1044-1059.
- Romero, E.; Gens, A.; Lloret, A. (1999): Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay. Engineering Geology 54, 117-127.
- Schanz, T.; Lins, Y.; Tripathy, S.; Agus, S.S. (k.A.): Model test for determination of permeability and collapse potential of a partially saturated sand. Bauhaus-Universität Weimar.
- Schmidt, W.; Sitz, P.; Keßler, J.: Physikalische und chemische Eigenschaften von verdichteten Bentoniten als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung - Literaturstudie. NAGRA Techn. Bericht 92 - 37, November 1992.
- Sitz, P.; Gruner, M.; Rumphorst, K.: Verschlussbauwerke für Endlager und Untertagedeponien. 6. Projektstatusgespräch des Projektträgers des BMBF und BMWA für Wassertechnologie und Entsorgung, 27./28. Mai 2003, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 8. - Karlsruhe, August 2003.
- Sridharan, A.; Rao, S.M.; Gajarajan, V.S. (1990): Effect of sulfate contamination on the volumen change behavior of bentonite. Physio-chemical aspects of soil and related materials, ASTM STP 1095, 1990.
- Srivastava, R.C.; Avasthi, P.K. (1973): Electro-osmotic effects in a bentonite-water system. Jour. Of Hydrology, 1973 Nr. 2?.
- Standing, M. B. (1975): Notes on relative permeability relationship. Division of petroleum engineering and applied geophysics, University of Trondheim.
- Tessier, D.; Lajudie, A.; Petit, J.-C. (1992): Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. Applied Geochemistry Suppl. Issue No.1, pp. 151-161, 1992.
- Tomlinson, M.J. (k.A.): Migration of gases through argillaceous Rocks. Nirex-Dokumentation
- Torstenfelt, B. (1986): Migration of fission products and actinides in compacted bentonite. SKB Technical report 86-14 (1986).
- Tripathy, S.; Schanz, T. (k.A.): Evaluation of two new devices for measuring total suction of unsaturated soils. Bauhaus-Universität Weimar.
- Tripathy, S.; Schanz, T.; Sridharan, A. (k.A.): Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory. Bauhaus-Universität Weimar.
- van Duijn, C.J.; de Neef, M.J. (1998): Similarity solution for capillary redistribution of two phases in a porous medium with a single discontinuity. Advances in Water Resources 21, 1998.

- Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form Equation for predicting the Hydraulic Conductivity of unsaturated Soils. Soil Sci. Soc., Jahrgang 44, Seite 892-898.
- Van Genuchten, M. Th.; Nielsen, D.R. (1985) : On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Ann. Geophys. 3, S. 615-628.
- Villar, M.V. (1999): Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests. Engineering Geology, Vol. 54, September 1999.
- Voigt, H.-D. (2002): In situ Ermittlung der Konturdurchlässigkeiten am Standort des Dichtelementes am Standort Sondershausen nach dem Rückbau des Elementes. Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, TU Bergakademie Freiberg.
- Ward, J.S.; Morrow, N.R. (1987): Capillary Pressures and Gas Relative Permeabilities of Low-Permeability Sandstone. SPE Formation Evaluation.
- Wittke, W. (1996): Abdichtung von Strecken im Endlager Morsleben mit hochverdichtetem Bentonit. Geotechnik 19, 4, S. 304 – 311.
- Xie, M.; Kolditz, O.; Engelhardt, I. (2003): Numerical modelling of swelling process in heated bentonite/crushed rock mixtures. Techn. Report, Fed. Inst. Of Geoscience and Nat. Res. (BGR), Hannover, 2003.
- Xie, M.; Wang, W.; De Jonge, J.; Kolditz, O. (2003): A new mechanistic approach to swelling processes in bentonite materials. Uni Tübingen, GeoProc Stockholm 2003.
- Yong, R.N. (1999): Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineering clay barriers. Engineering Geology Vol. 54 (1-2) pp. 3-13.
- Zhang, C., Stührenberg, D. (1998): Compaction and its effect on the permeability of crushed salt with added brine or bentonite. In: Salzmechanik, Band 17, BGR Hannover.

12.7 Bildverzeichnis

Bild 12.1 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Strömungsprozesse in einem Bentonitdichtelement.....	137
Bild 12.2 Kapillardruck-Sättigungsfunktionen für die eingesetzten Bentonite – ermittelt im Quecksilber-Injektionsversuch	140
Bild 12.3 Gegenüberstellung der Porengrößenverteilung für gequollenen und nicht gequollenen Bentonit /Agus & Schanz, 2003/	141
Bild 12.4 Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeiten von der Porenraumsättigung	142
Bild 12.5 Schematische Darstellung des immobilen und effektiv für den Strömungsprozess verfügbaren Porenraumes	142
Bild 12.6 Versuchsdaten KU1 – Ermittlung der absoluten Permeabilität am Versuchsanfang und Ende	146
Bild 12.7 Verformung binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen in Abhängigkeit von der Normalspannung (Großoedometer)	150
Bild 12.8 Trockendichte binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen in Abhängigkeit von der Normalspannung (Großoedometer)	150
Bild 12.9 Modellkonzept (Detailerläuterungen in den angegebenen Querverweisen).....	154
Bild 12.10 Schematische Darstellung möglicher empirischer Funktionen der Veränderung der absoluten Permeabilität von der Flüssigkeitssättigung ($k_{abs_gesättigt}$ – ermittelt aus Versuchsdaten s. Abschnitt 12.1.3)	156
Bild 12.11 Änderung der Trockenrohdichte und Porosität im Dichtelement in Folge der einströmseitigen Auflockerung.....	158
Bild 12.12 Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Masseverteilung im Ergebnis der Kompaktion	159

Bild 12.13 Darstellung der von /Andrews et al., 1986/ ermittelten relativen Wasserpermeabilitäten und der Anpassung nach Brooks-Corey mit $\lambda = 28$	161
Bild 12.14 Relative Permeabilitäten für die Formsteine FS 50 in Abhängigkeit von der effektiven Sättigung (S_{we}) im Ergebnis des Ansatzes nach BROOKS UND COREY mit $\lambda=0,38$	162
Bild 12.15 Programmablauf für die Korrektur der absoluten Permeabilität in Folge Auflockerung und Kompaktion	163
Bild 12.16 Schematischer Vertikalschnitt durch das Modell in der x-z-Ebene für die Versuche KU1 bis KU7	164
Bild 12.17 Druckverlauf für Versuch KU2	165
Bild 12.18 Diskretisierung des Modells für die numerische Simulation des Versuches Br2.....	166
Bild 12.19 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk Br2	170
Bild 12.20 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in ausgewählten Messpunkten Br2.....	171
Bild 12.21 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt Ku1	171
Bild 12.22 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU1	172
Bild 12.23 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU2	172
Bild 12.24 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU2	173
Bild 12.25 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU4	174
Bild 12.26 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU4	174
Bild 12.27 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU5	175
Bild 12.28 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU5	176
Bild 12.29 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU6	176
Bild 12.30 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU6	177
Bild 12.31 Vergleich gemessene – berechnete Sättigungsverteilung im Dichtbauwerk / Vertikalschnitt KU7	177
Bild 12.32 Vergleich gemessene – berechnete Sättigung im Dichtbauwerk in bestimmten Messpunkten KU7	178

12.8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 12.1 Kompaktionsverhalten binärer Calcigel-Gemische mit unterschiedlichen Granulatkorngrößen ...	149
Tabelle 12.2 Zusammenstellung der Diskretisierung und Randbedingungen aller ausgewerteten Versuche	165
Tabelle 12.3 Übersicht der Ausgangsparameter und –funktionen der einzelnen Versuchsmodelle.....	168

Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonitabschlussbauwerken in salinärer Umgebung

Anlagenverzeichnis

Nummer des Kapitels und Nummer der Anlage stimmen überein.

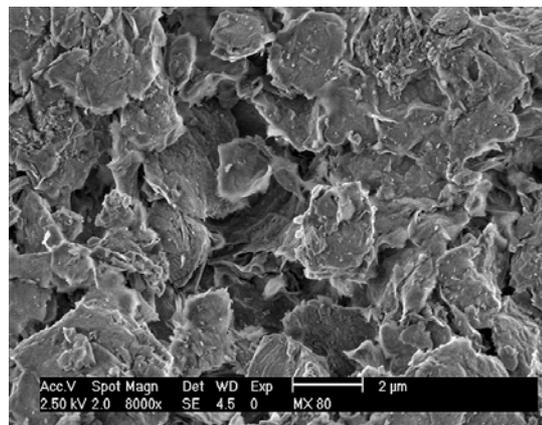
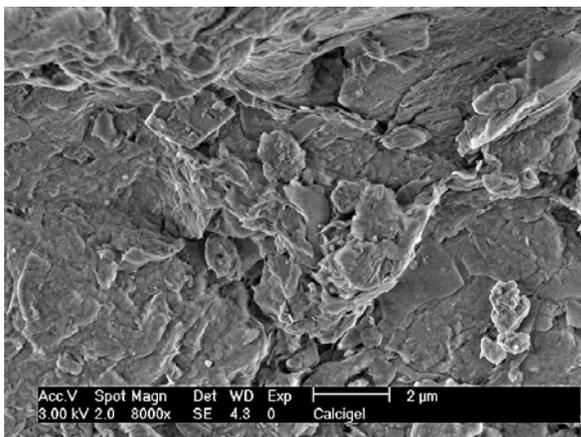
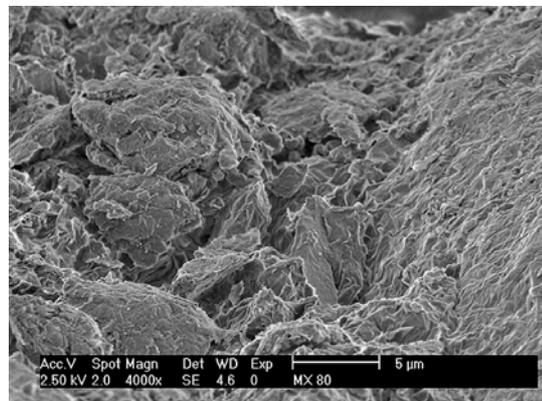
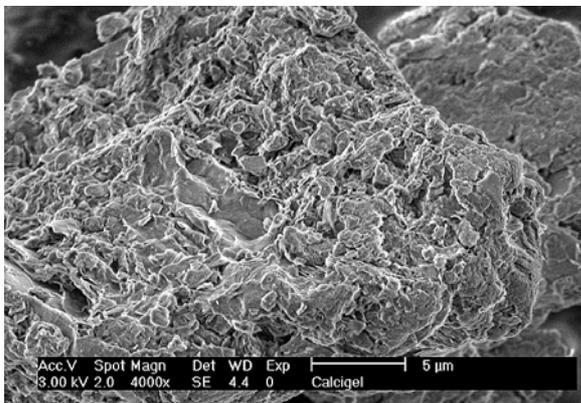
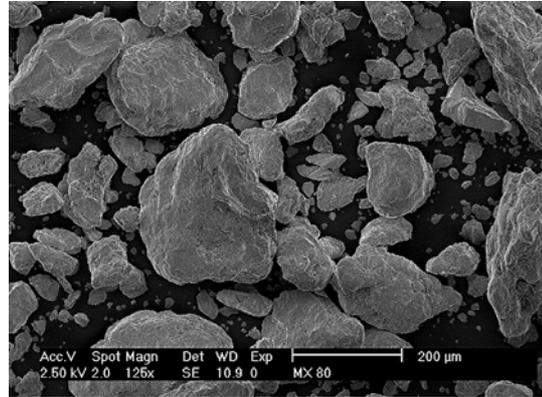
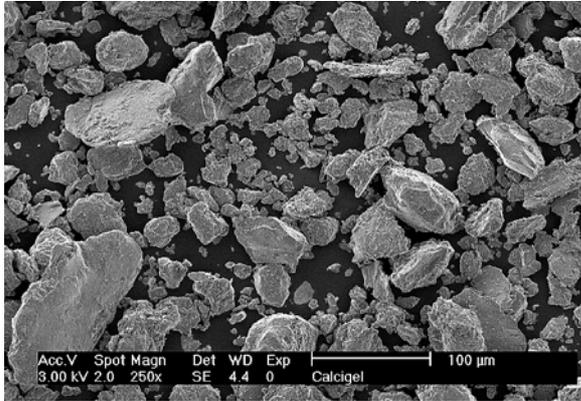
Anlage 2	Elektronenmikroskopische Untersuchungen	
Anlage 3	Temperaturmessungen mit dem NWA	
Anlage 4	Oberflächensensoren	
Anlage 11	Halbtechnische Versuche - Versuchseinrichtungen	1
Anlage 11.1	GrokaPerm-Apparatur	1
Anlage 11.2	HALP 1-Apparatur	1
Anlage 11.3	Versuch Br1	2
Anlage 11.3.1	Aufbau	2
Anlage 11.3.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	3
Anlage 11.3.3	Feuchtegehalt	4
Anlage 11.3.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	5
Anlage 11.4	Versuch Br2	6
Anlage 11.4.1	Aufbau	6
Anlage 11.4.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	7
Anlage 11.4.3	Lage der Probenahmepunkte	7
Anlage 11.4.4	Feuchtegehaltsbestimmung	8
Anlage 11.4.5	Feuchteverteilung nach Ausbau	16
Anlage 11.5	Versuch KU 1	17
Anlage 11.5.1	Aufbau	17
Anlage 11.5.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	18
Anlage 11.5.3	Feuchtegehaltsbestimmung	19
Anlage 11.5.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	20
Anlage 11.6	Versuch KU 2	21
Anlage 11.6.1	Aufbau	21
Anlage 11.6.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	21
Anlage 11.6.3	Feuchtegehaltsbestimmung	23
Anlage 11.6.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	24
Anlage 11.7	Versuch KU 3	25
Anlage 11.7.1	Aufbau	25
Anlage 11.7.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	26
Anlage 11.7.3	Feuchtegehaltsbestimmung	27
Anlage 11.7.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	28
Anlage 11.8	Versuch KU 4	29
Anlage 11.8.1	Aufbau	29
Anlage 11.8.2	Versuch Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	30
Anlage 11.8.3	Feuchtegehaltsbestimmung	31
Anlage 11.8.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	32
Anlage 11.9	Versuch KU 5	33
Anlage 11.9.1	Aufbau	33
Anlage 11.9.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	34

Anlage 11.9.3	Feuchtegehaltsbestimmung	35
Anlage 11.9.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	36
Anlage 11.10	Versuch KU 6	37
Anlage 11.10.1	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	37
Anlage 11.10.2	Feuchtegehaltsbestimmung	38
Anlage 11.10.3	Feuchteverteilung nach Ausbau	39
Anlage 11.11	Versuch KU 7	40
Anlage 11.11.1	Aufbau	40
Anlage 11.11.2	Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches	40
Anlage 11.11.3	Feuchtegehaltsbestimmung	42
Anlage 11.11.4	Feuchteverteilung nach Ausbau	43
Anlage 12	Prognosemodell - Literaturlauswertung zu verschiedenen Ansätzen zur Berechnung von Mehrphasenströmung in Bentonitmaterialien	1

Elektronenmikroskopische Untersuchungen

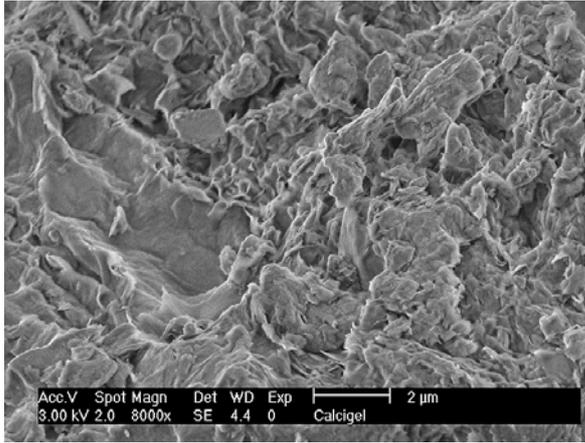
Calcigel

MX 80

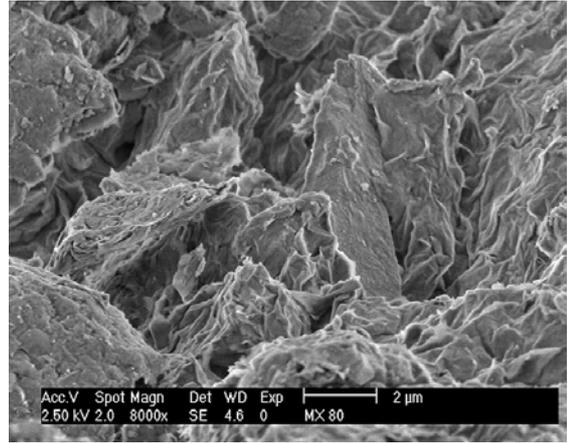


Bei den elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden Calcigel- und MX 80-Proben unter Vakuum miteinander verglichen. Bei den dargestellten Aufnahmen mit Vergrößerungen von 4000 und 8000 kann kein deutlicher Unterschied erkannt werden. Bei Calcigel ist die Plättchenstruktur deutlicher ausgeprägt.

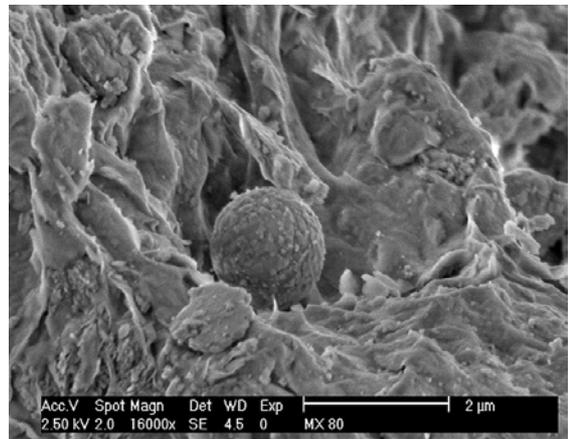
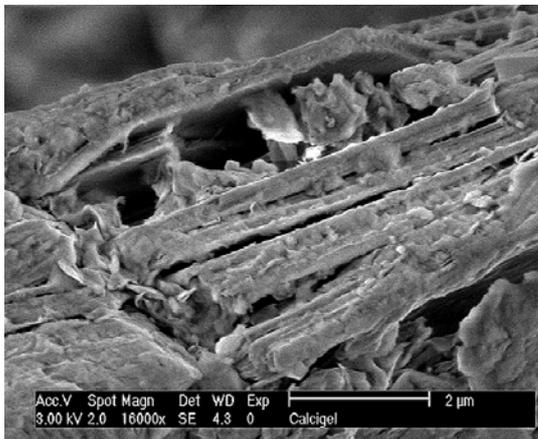
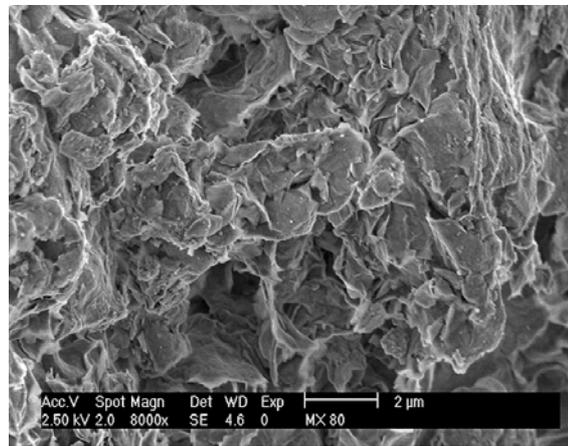
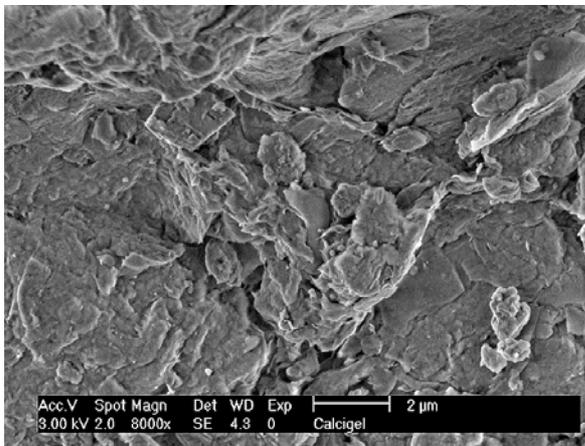
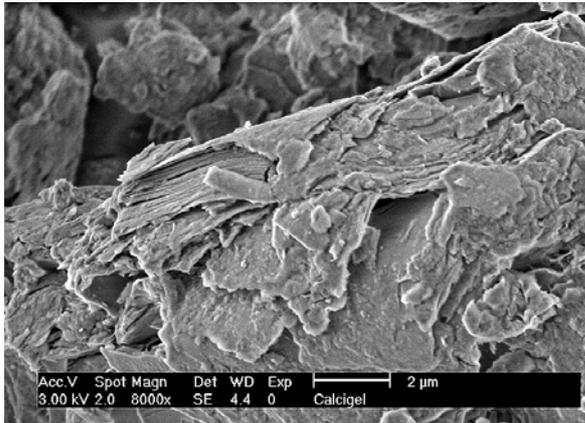
Anlage 2 – Elektronenmikroskopische Untersuchungen



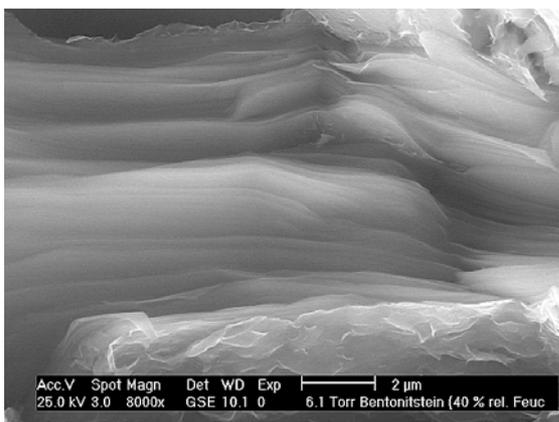
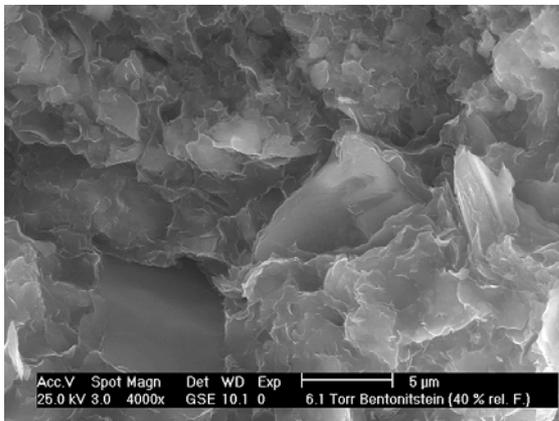
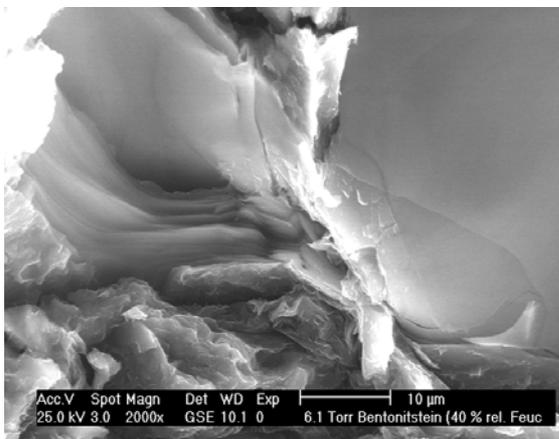
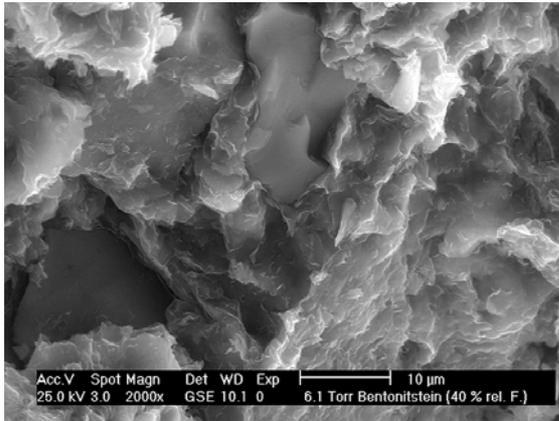
1J



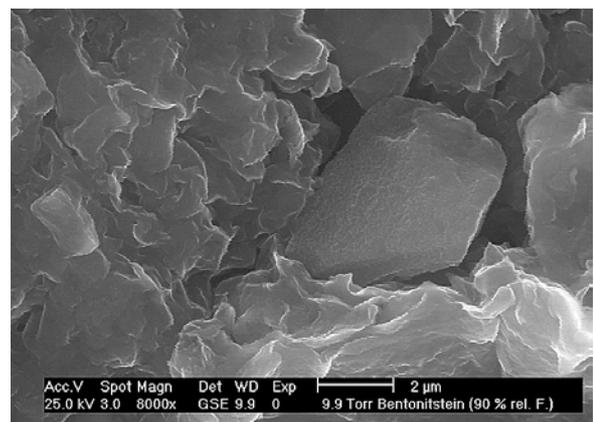
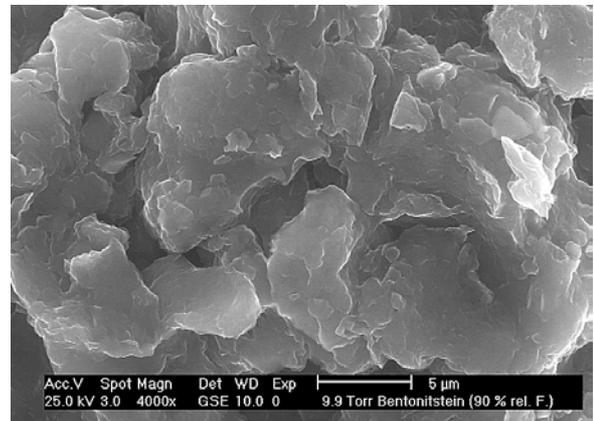
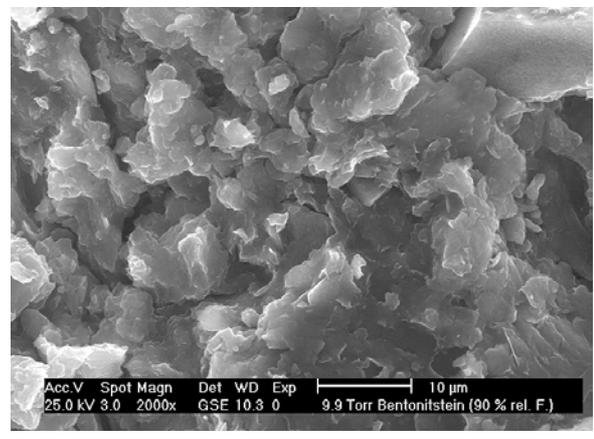
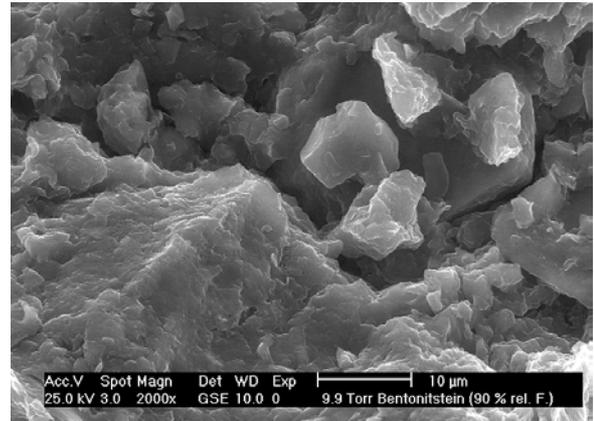
1J



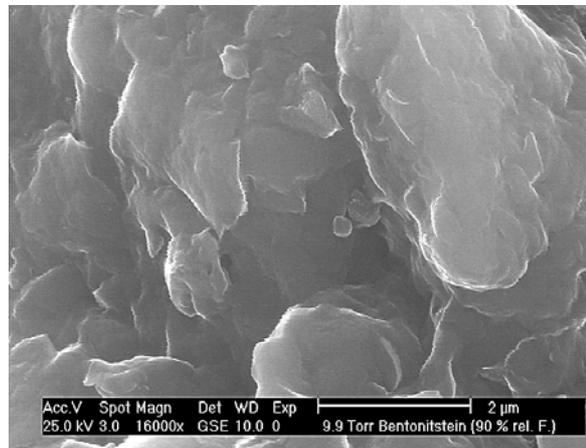
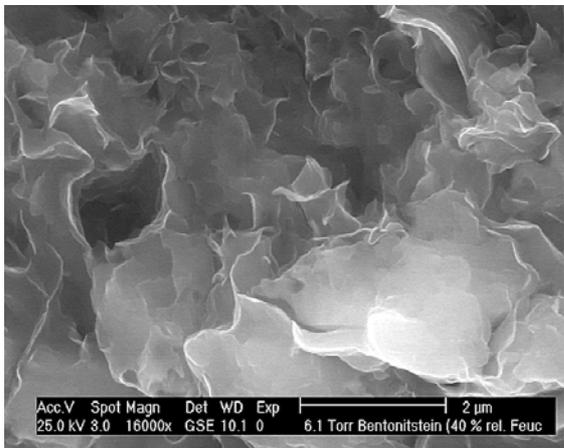
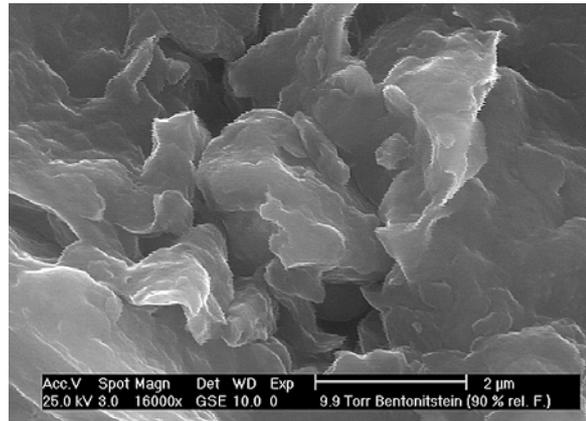
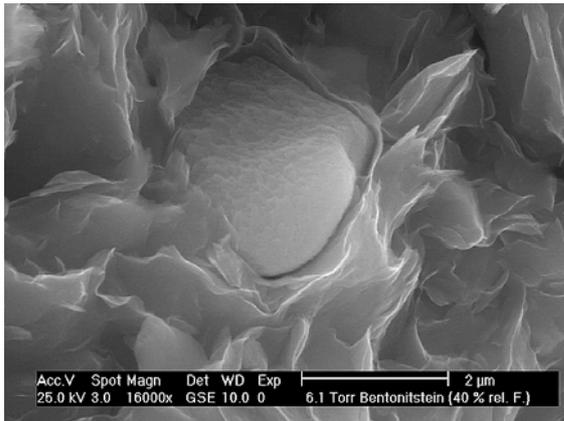
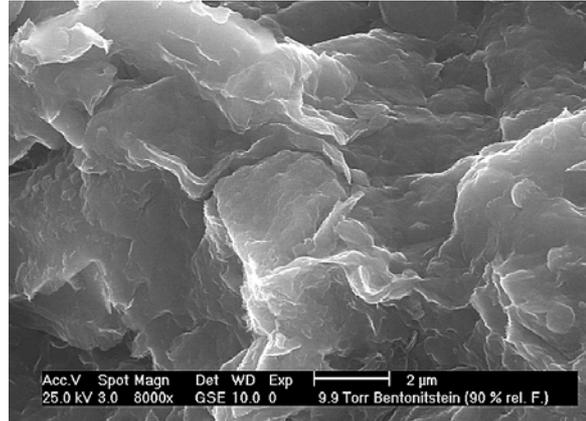
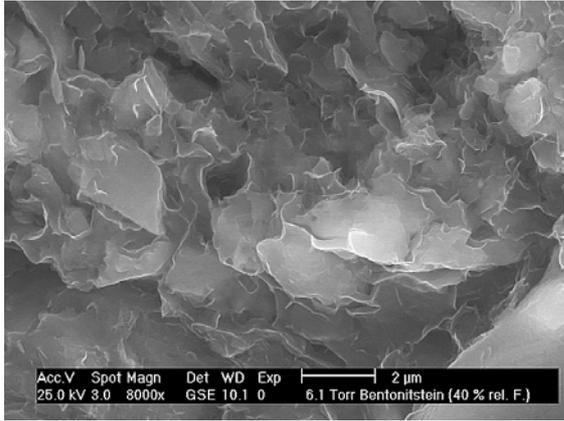
trockene Proben bei 40 % r.H



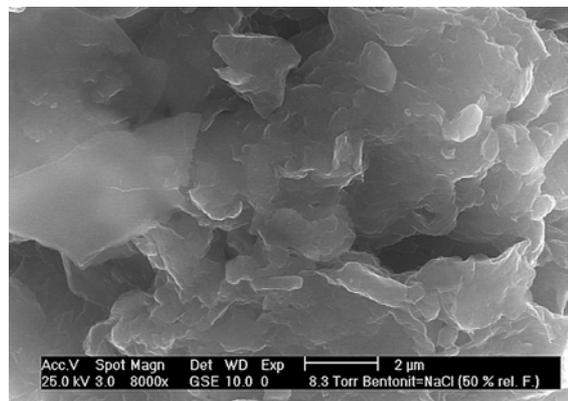
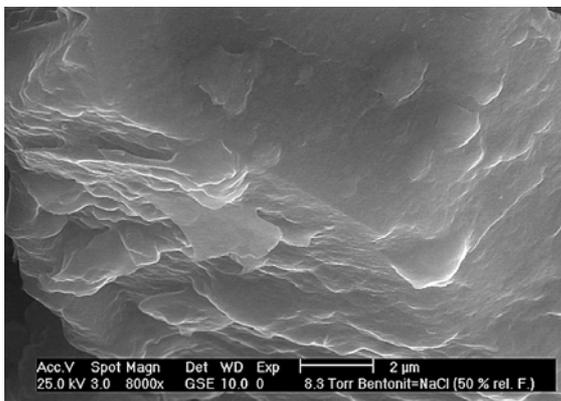
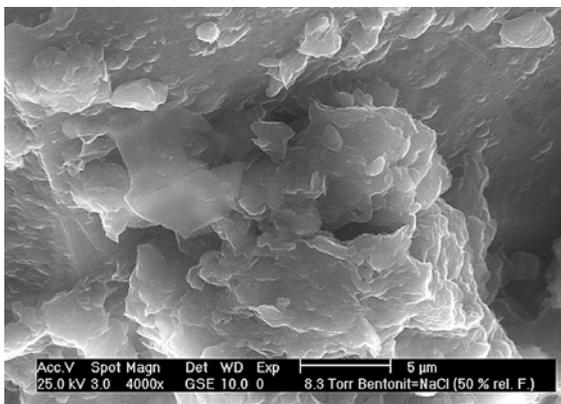
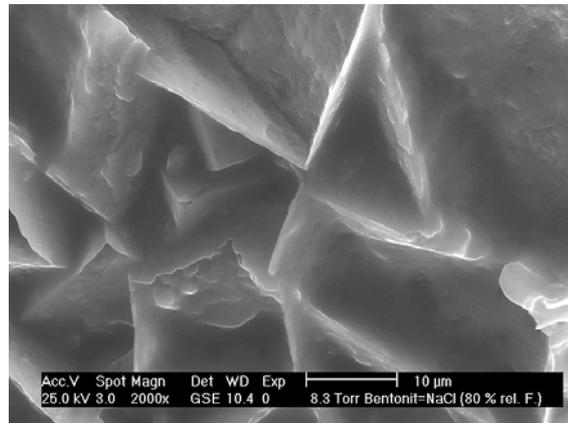
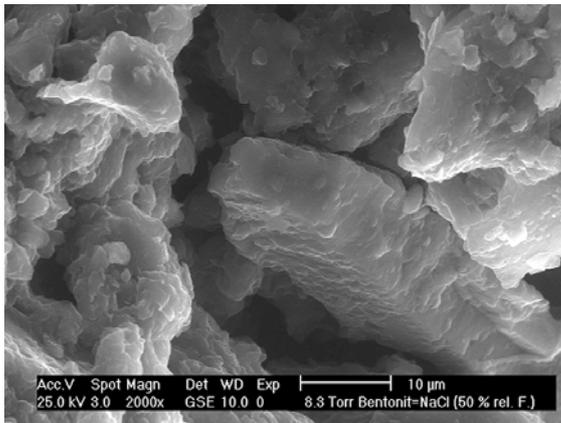
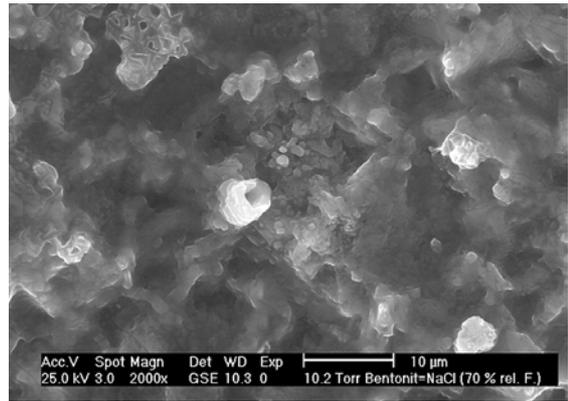
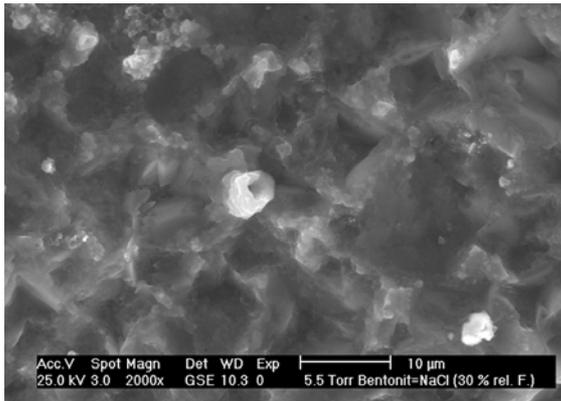
feuchte Proben bei 90% r.H.



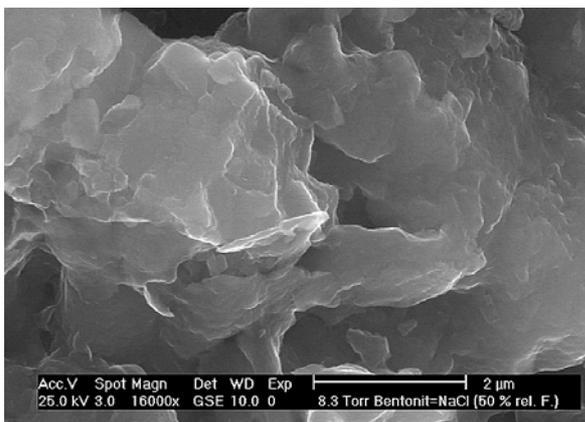
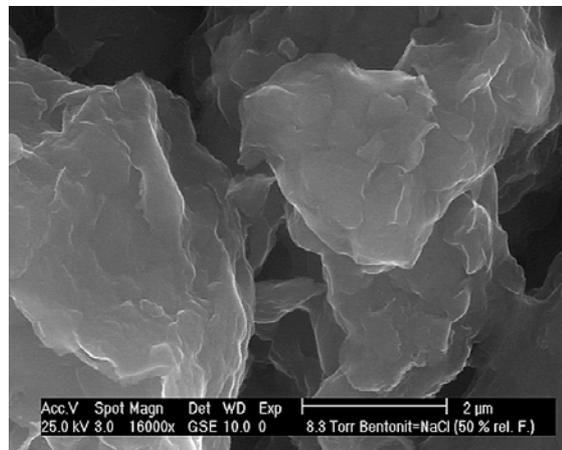
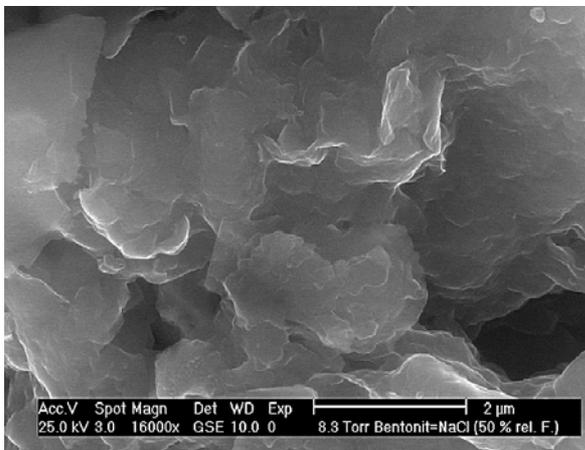
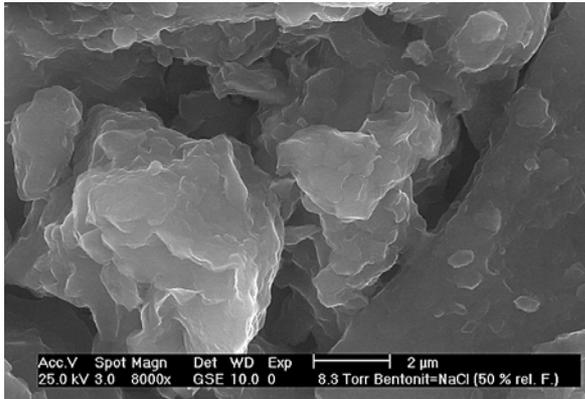
Anlage 2 – Elektronenmikroskopische Untersuchungen



Proben mit hohem Salzgehalt und verschiedener Luftfeuchte



Filigrane Struktur von Tonplättchen bei konstanter Luftfeuchte und bei Vergrößerungen 8000 und 16000



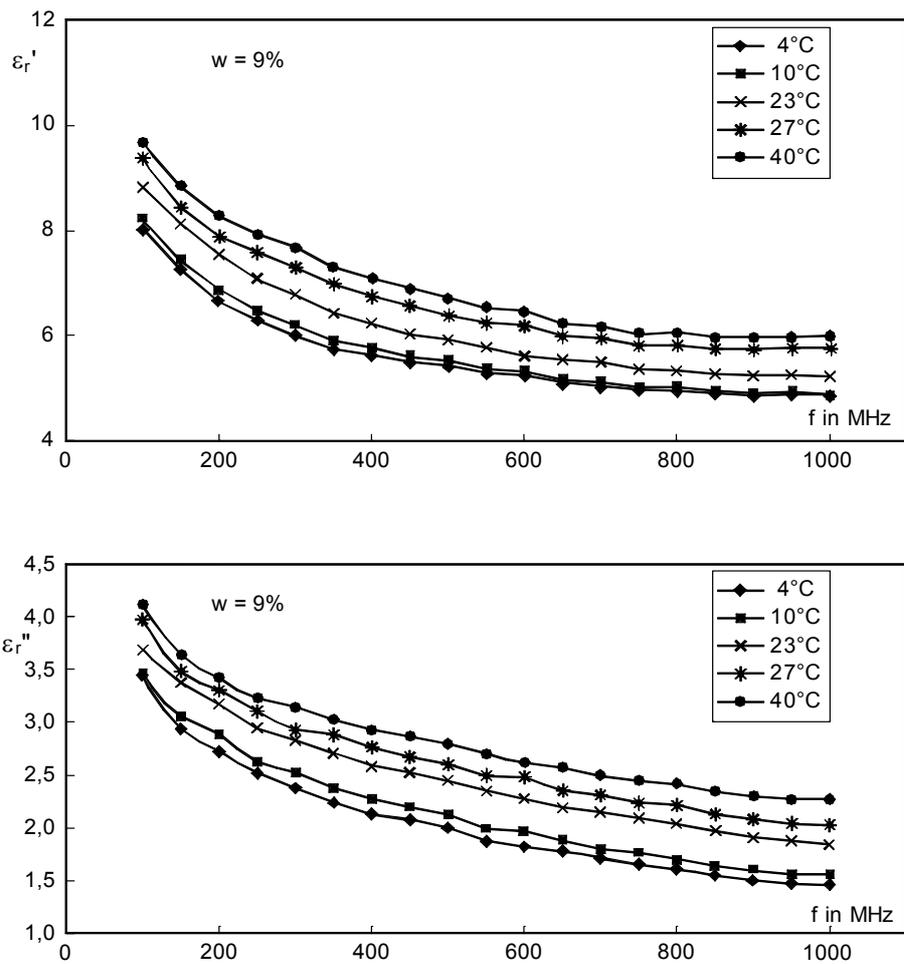


Bild 1 Temperaturabhängigkeit von Realteil (ϵ_r') und Imaginärteil (ϵ_r'') der DK bei einem Wassergehalt von 9 %

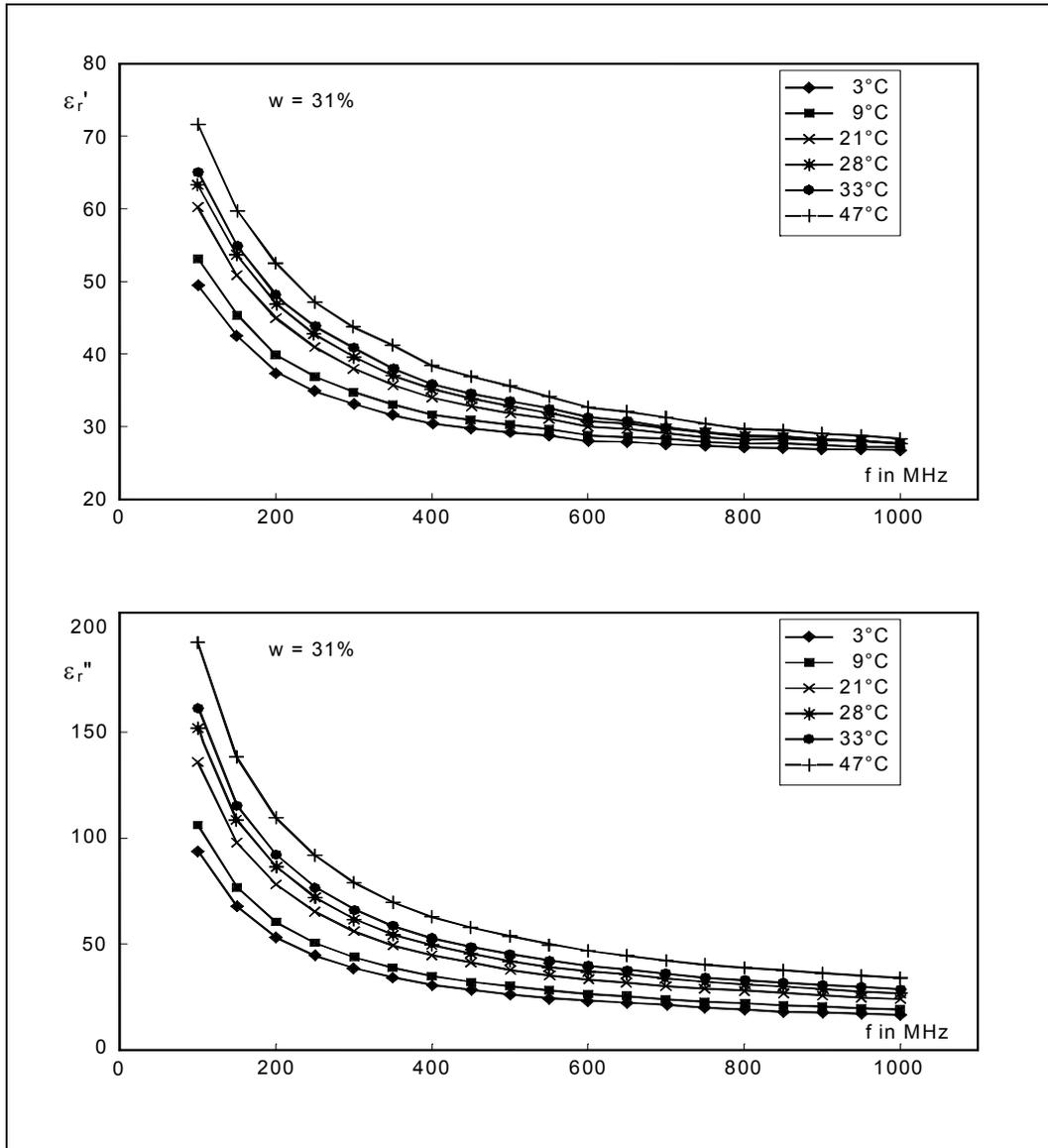


Bild 2 Temperaturabhängigkeit von Realteil (ϵ_r') und Imaginärteil (ϵ_r'') der DK bei einem Wassergehalt von 31 %

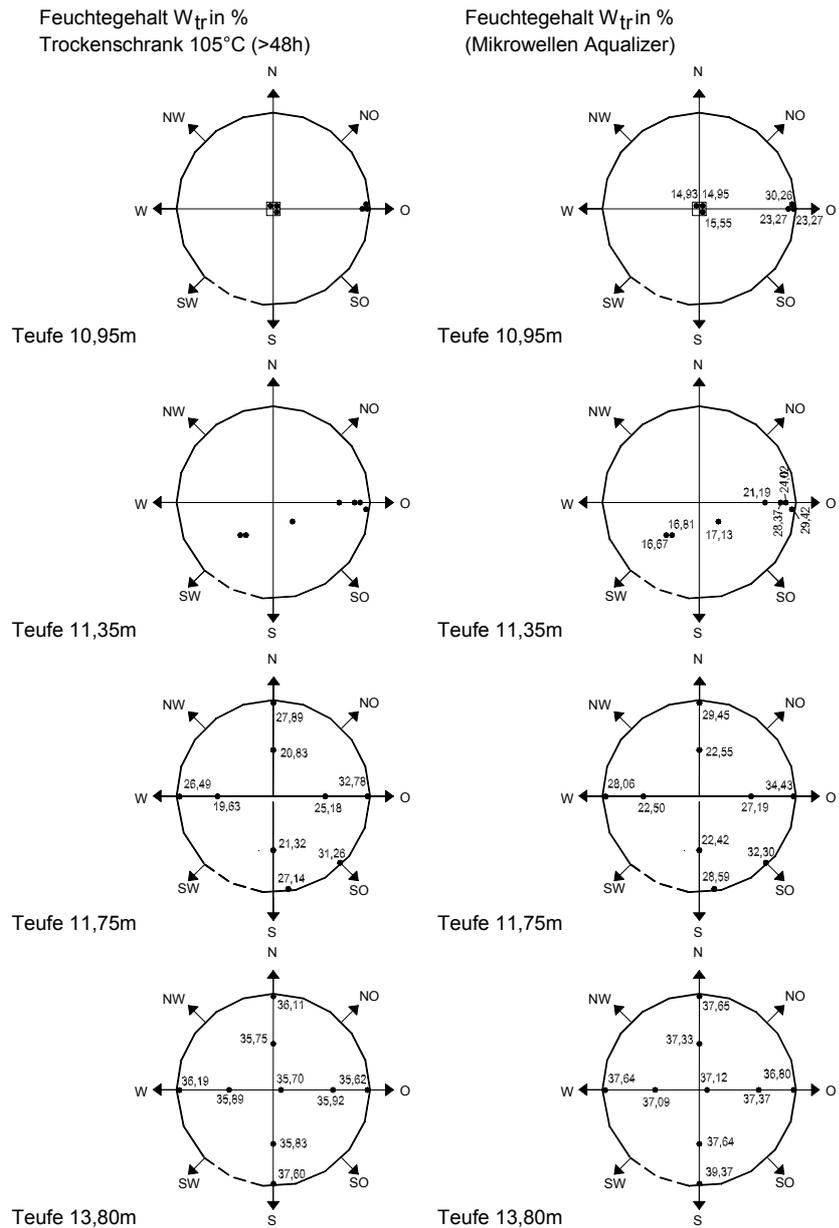


Bild 1 Verteilung der Feuchtemesswerte, ermittelt im Trockenschrank und Mikrowellenanalyzer, in den verschiedenen Teufen

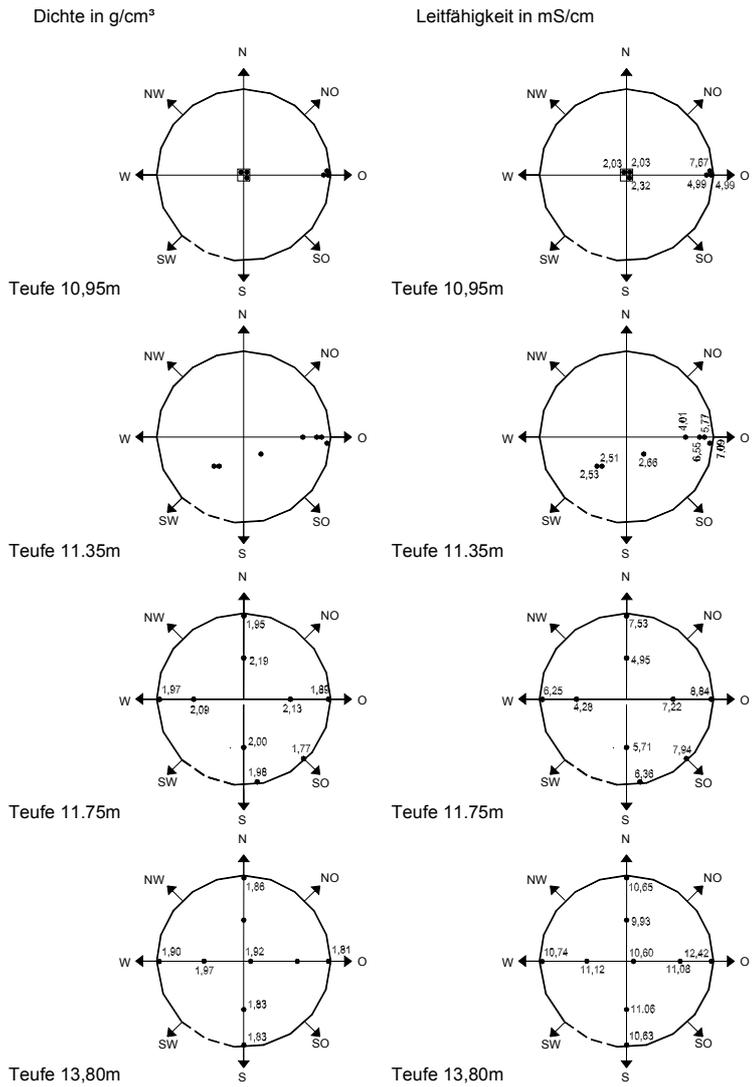


Bild 2 Verteilung der Messwerte von Dichte und Leitfähigkeit in den verschiedenen Teufen

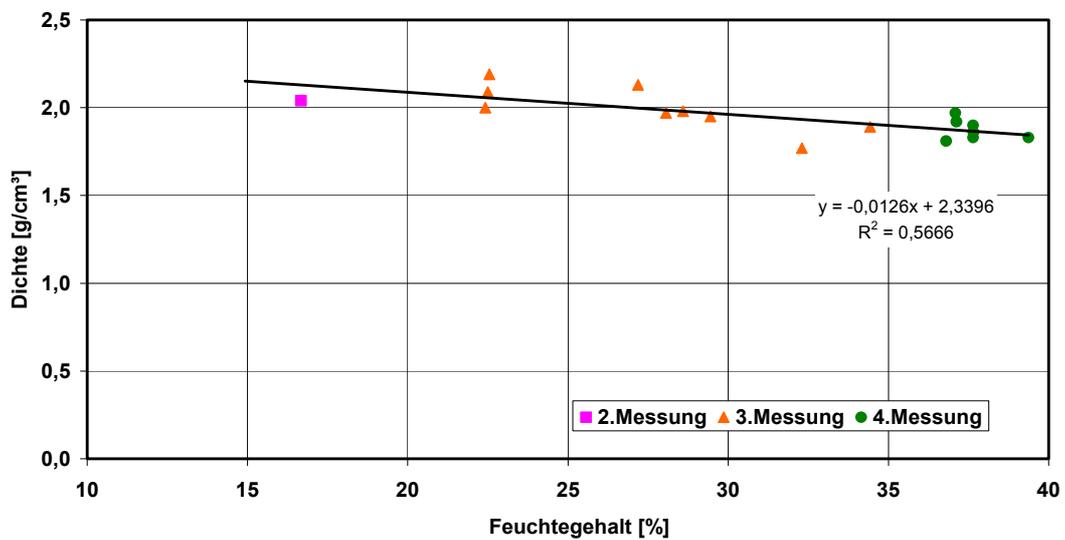


Bild 3 Dichte in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit in den 3 unteren Teufen

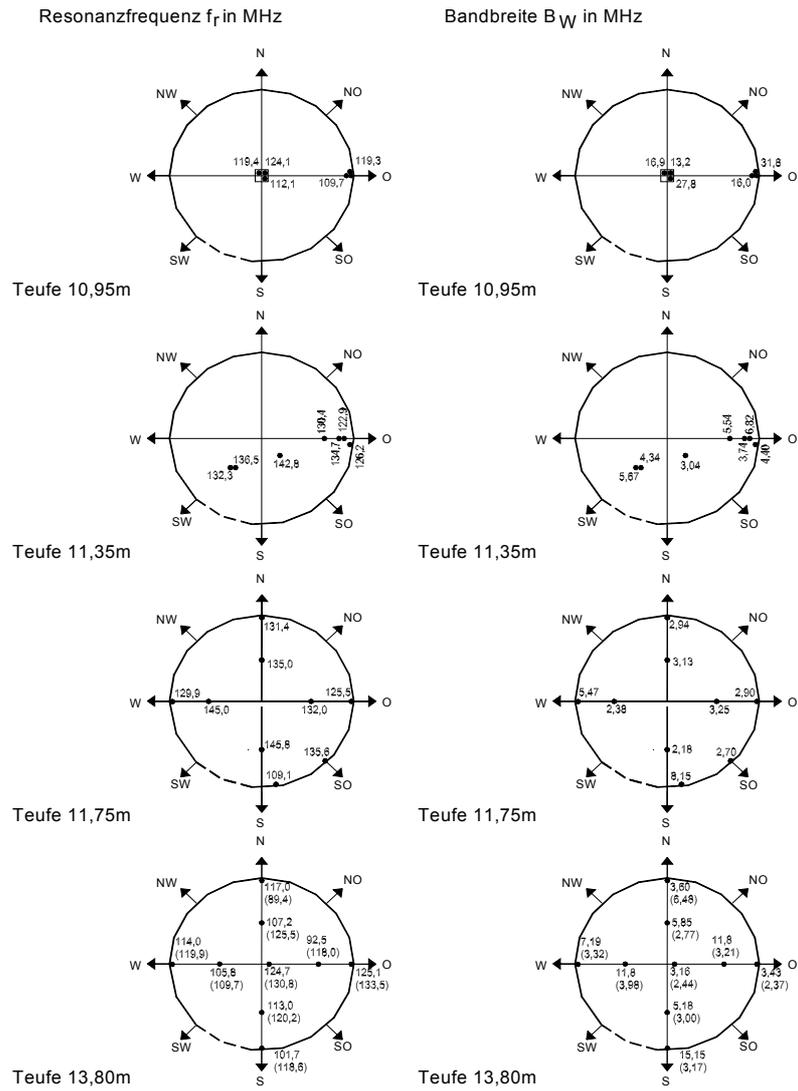


Bild 4 Verteilung der Messwerte von Resonanzfrequenz und Bandbreite in den unterschiedlichen Teufen

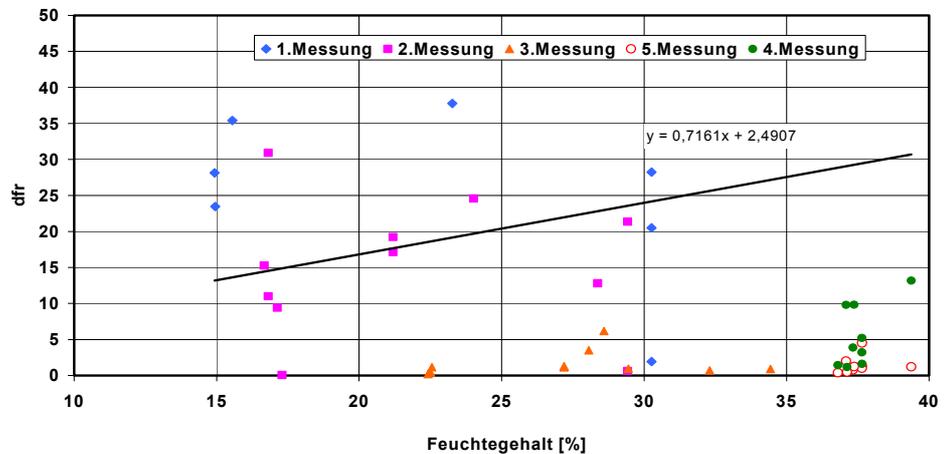


Bild 5 Streuung der Messwerte von Differenzfrequenz (Gl. 4.3) über dem Feuchtegehalt in den unterschiedlichen Teufen

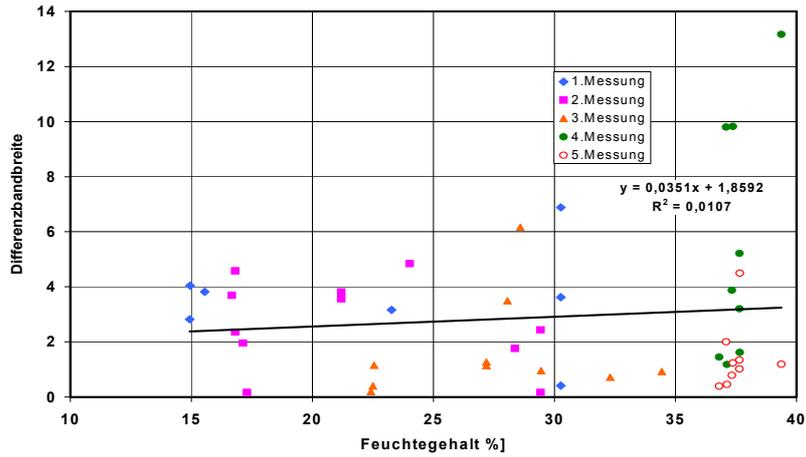


Bild 6 Streuung der Messwerte von Differenzbandbreite (Gl. 4.4) über dem Feuchtegehalt in den unterschiedlichen Tiefen

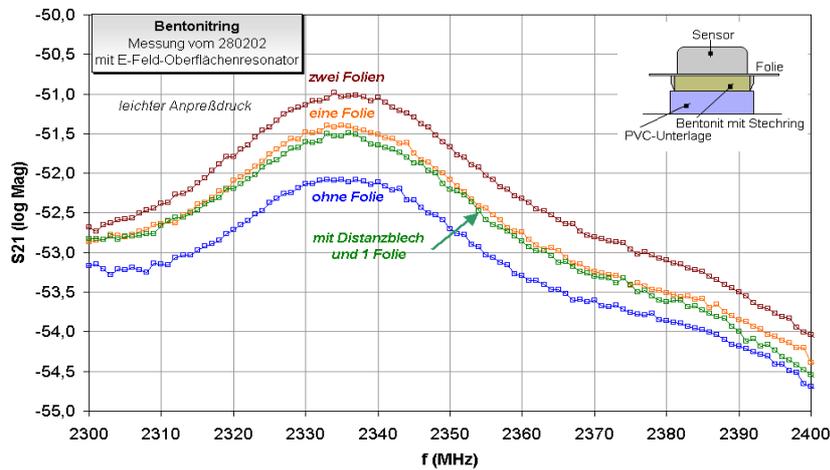


Bild 7 Resonanzkurven des E-Feld-Resonators bei der Feuchtemessung an Bentonitproben (direkter Kontakt, 1,6 mm dicke Luftschicht, Isolation durch PE-Folien) (s. Bild 4.12)

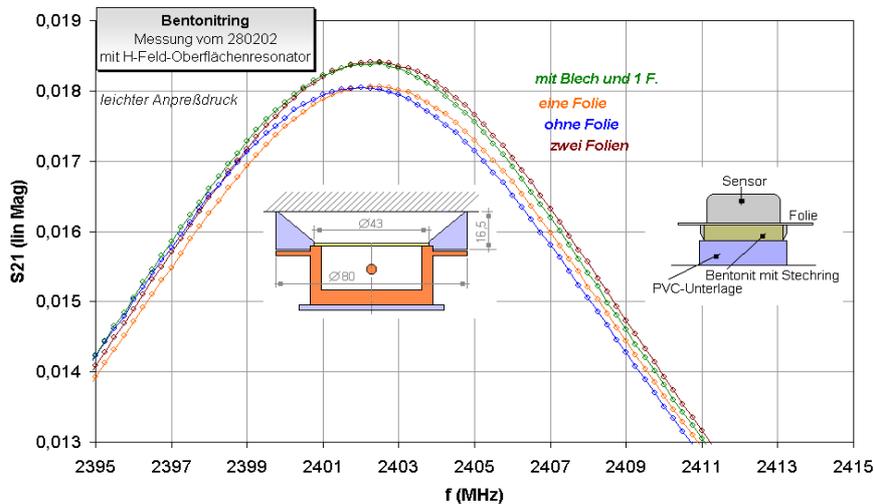


Bild 8 Resonanzkurven des H-Feld-Resonators bei der Feuchtemessung an Bentonitproben (direkter Kontakt, 1,6 mm dicke Luftschicht, Isolation durch PE-Folien) (s. Bild 4.13)

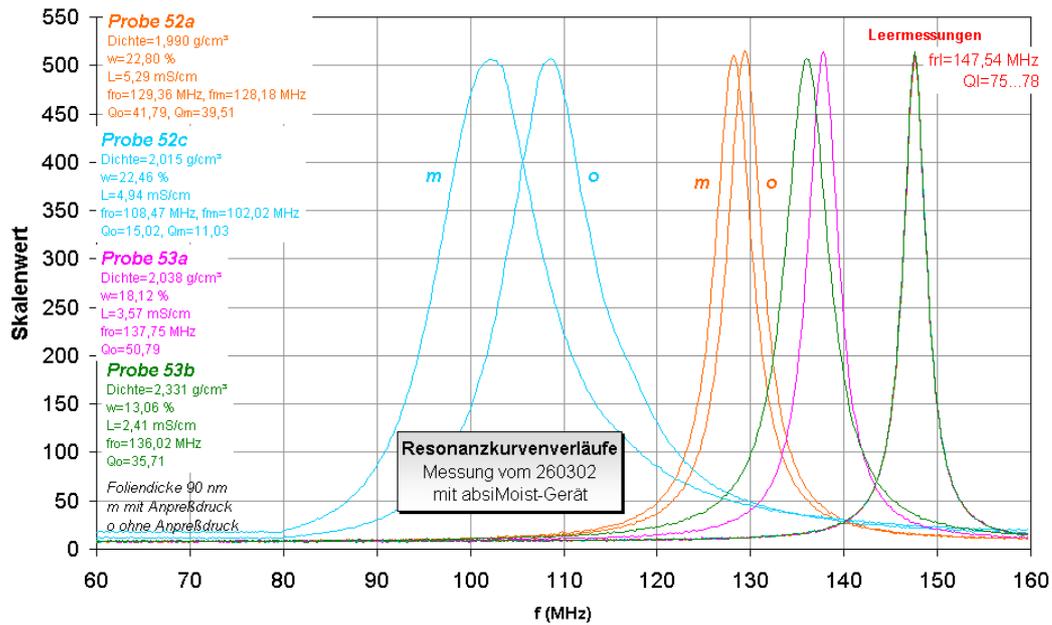


Bild 9 Messwerte an Bentonitproben mit absiMoist mit PE-Folie (90 nm) abgedeckt - mit und ohne Anpreßdruck

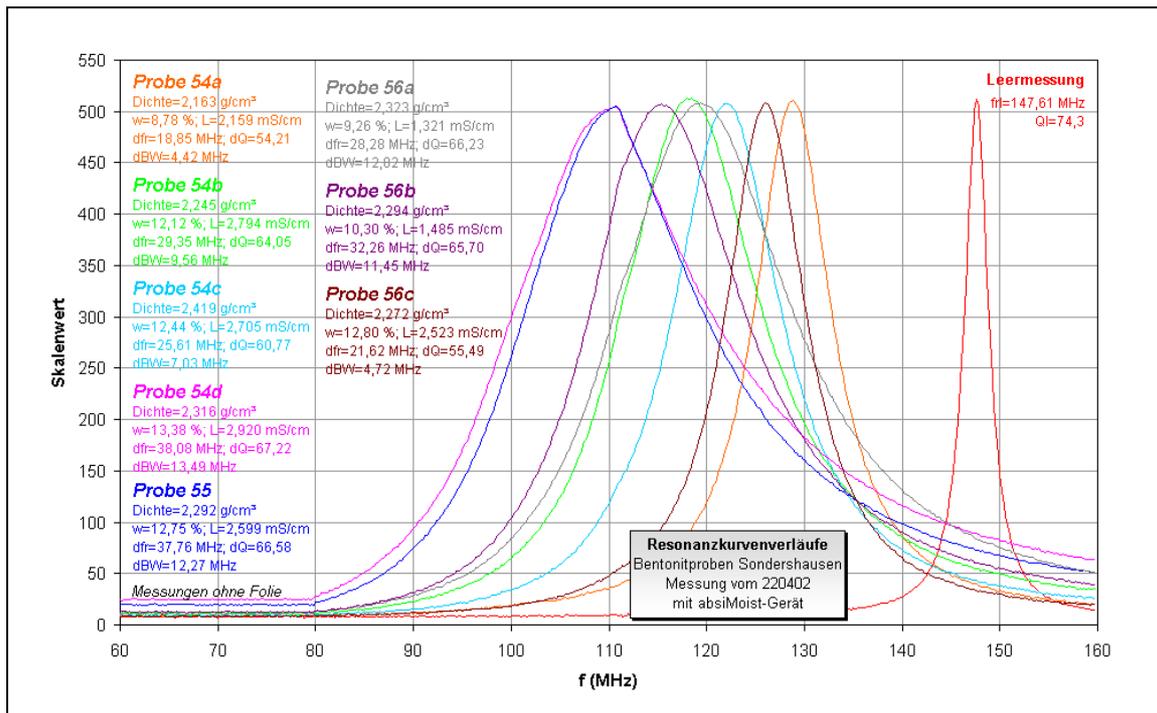


Bild 10 Messwerte an Bentonitproben mit absiMoist an Proben aus Sondershausen unterschiedlicher Dichte und Feuchte

Anlage 11 Halbtechnische Versuche - Versuchseinrichtungen

Anlage 11.1 GrokaPerm-Apparatur

Die Versuche „Br1“ und „Br2“ wurden in einer dickwandigen, zylindrischen Stahlzelle mit einer nutzbaren Gesamtlänge von 2000 mm und einem Innendurchmesser von 800 mm durchgeführt (siehe Bild 11.1). Der Zylinder wird in senkrechter Position durchströmt. Am unteren Zylinderdeckel, der druckdicht gegenüber Atmosphäre ausgeführt ist, befindet sich der Fluideinlass. Durch den oberen Deckel werden alle Verbindungsleitungen zu den Sensoren geführt. Der große Durchmesser der Anlage gestattet den gleichzeitigen Einbau mehrerer Sensoren in einer Messebene, ohne dass diese sich gegenseitig beeinflussen. Die Innenwand ist mit einer Korrosionsschutzfarbe versehen.



Bild 1 Großkalibrige Permeabilitätsapparatur (GrokaPerm)

Anlage 11.2 HALP 1-Apparatur

In der HALP1-Apparatur wurden die Versuche KU1 bis KU7 durchgeführt. Es stehen drei baugleiche Versuchszellen mit den Abmaßen Länge 1000 mm, Durchmesser 325 mm zur Verfügung, die hängend angeordnet sind (siehe Bild 11.2). Der Fluidzutritt erfolgt von oben. Das luftseitig offene Ende des Zylinders befindet sich am unteren Deckel. Der Innendurchmesser von 325 mm limitiert die Anzahl einzubauender Sensoren je Messebene, z.B. ließen sich nur jeweils ein TAUPE-Kabelsensor in jeden Einzelversuch integrieren.

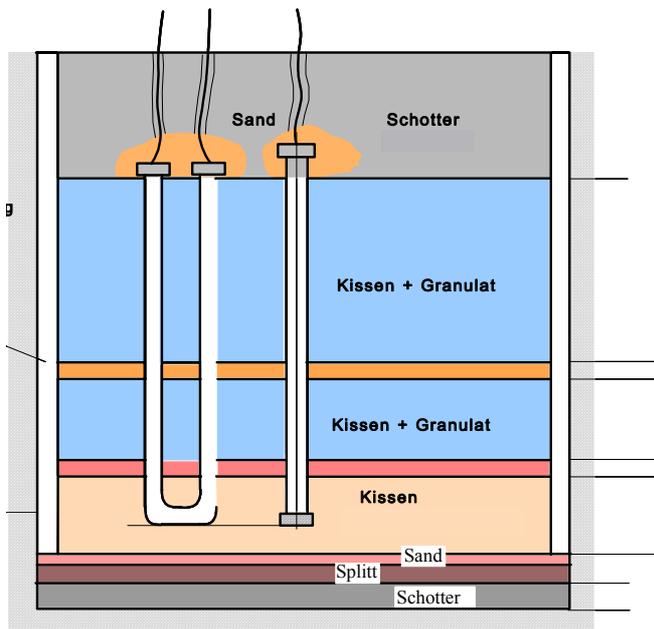
Die drei Versuchszellen bestehen aus Stahl. Die Zylinderinnenfläche ist aus Korrosionschutzgründen vernickelt. Ein Inliner wird nicht verwendet.



Bild 2 Halbtechnische Anlage für Lastabtrag und Permeabilität (HALP 1)

Anlage 11.3 Versuch Br1

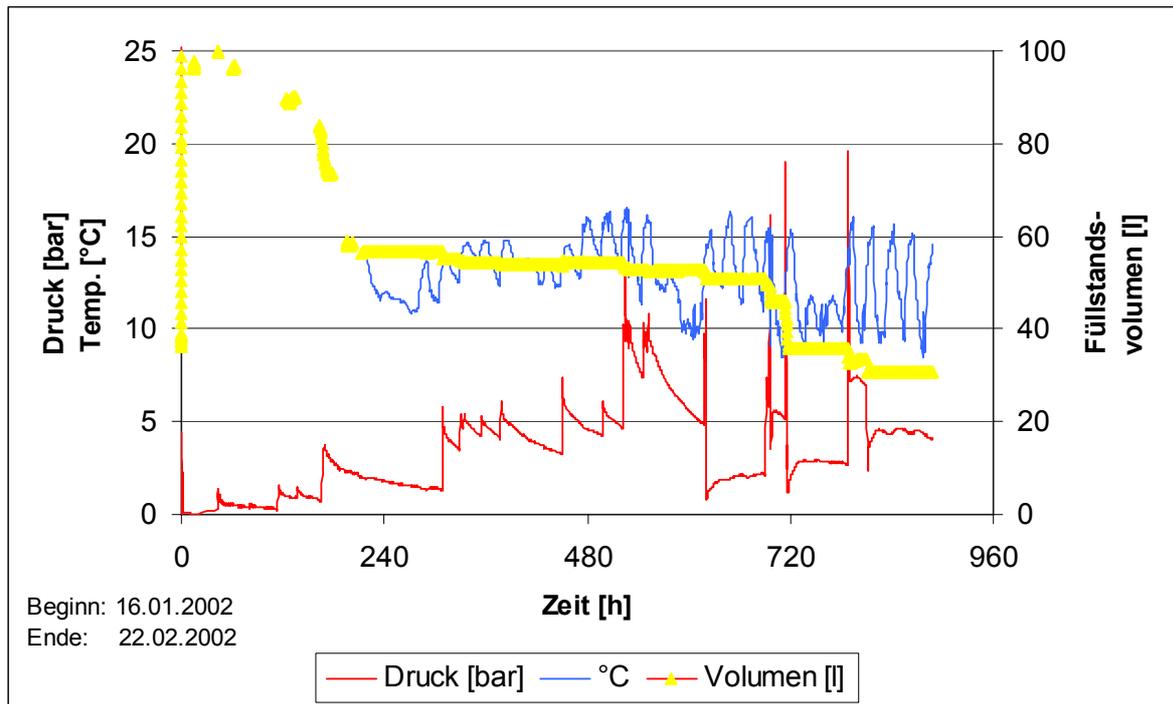
Anlage 11.3.1 Aufbau



Schicht	Volumen [l]	Masse [kg]	Dichte	Einbautrockendichte
U1	125,7	168	1,34	1,22
M	125,7	200	1,59	1,45
O	301,6	486	1,61	1,46

Summe 854

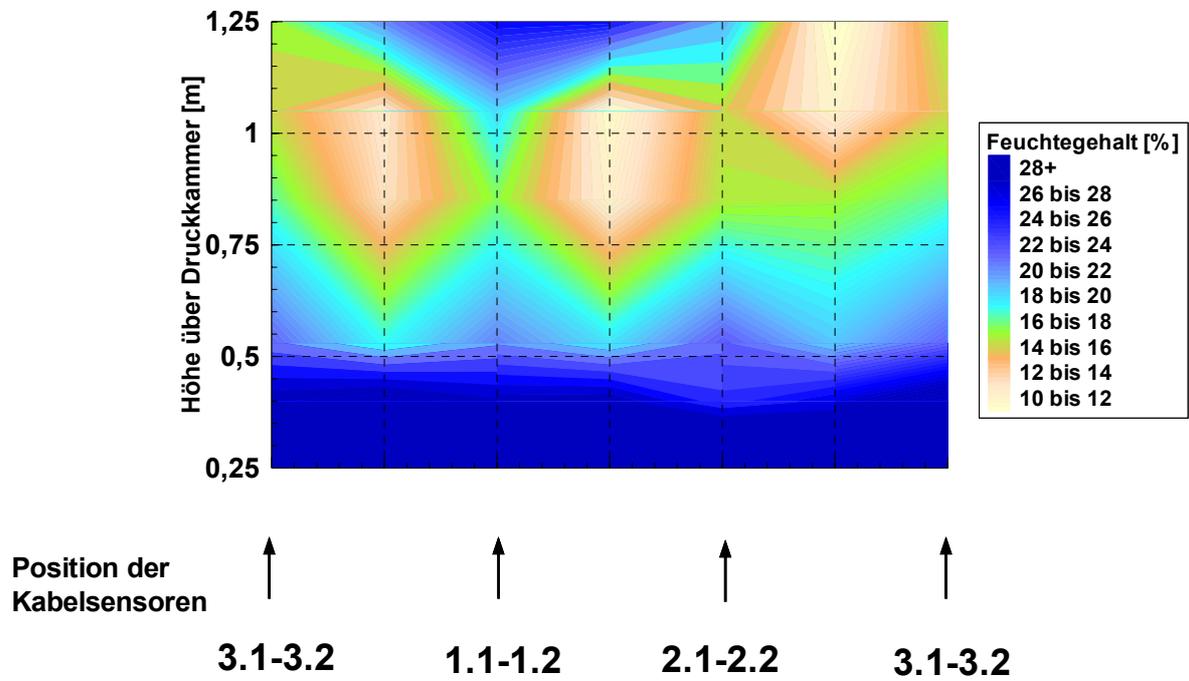
Anlage 11.3.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.3.3 Feuchtegehalt

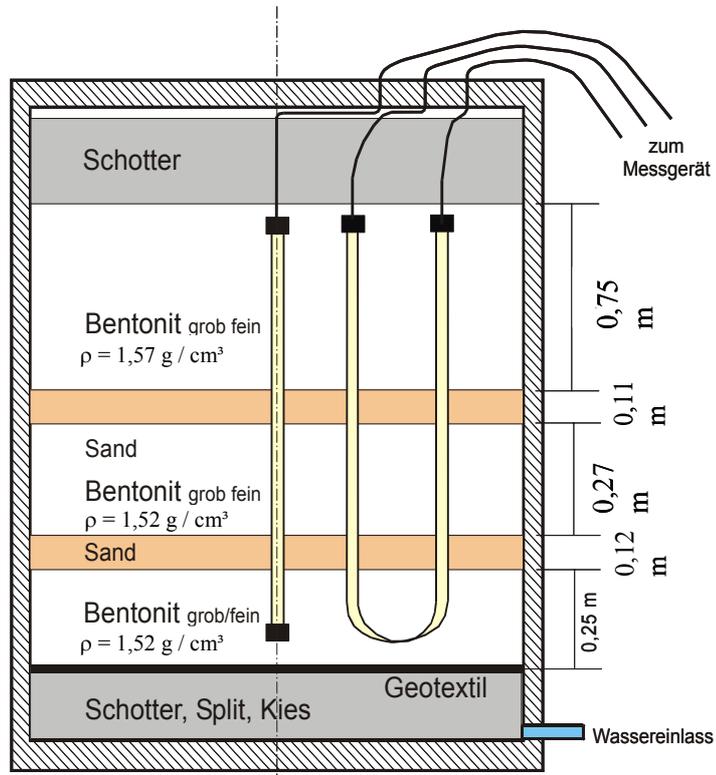
Proben- horizont	Schale [g]	S. + Pr. feu. [g]	S. + Pr. tr. [g]	Wassergeh. [%]	Probe am Sensor	
0,45-1	51,456	154,191	139,926	16,12	x	
0,45-2	52,042	263,524	219,642	26,18	x	
0,45-3	50,336	297,499	255,174	20,66	x	
0,45-4	52,35	203,211	176,675	21,34		
0,45-5	52,972	277,183	257,615	9,56		
0,45-6	112,236	313,386	271,894	25,99		
0,65-1	51,456	243,926	218,669	15,10	x	
0,65-2	52,042	226,577	198,441	19,22	x	
0,65-3	50,336	232,387	208,288	15,26	x	
0,65-4	52,35	280,548	257,832	11,05		
0,65-5	52,972	272,89	249,624	11,83		
0,65-6	112,236	387,331	361,405	10,40		
0,85-1	53,66	182,709	163,659	17,32	x	
0,85-2	50,377	252,353	223,674	16,55	x	
0,85-3	52,072	240,583	214,999	15,70	x	
0,85-4	51,898	237,229	211,757	15,93		
0,85-5	53,576	263,163	240,261	12,27		
0,85-6	51,812	281,539	258,302	11,25		
1,10-1	52,182	122,353	121,915	0,63	x	Sandhorizont
1,10-2	51,94	134,649	133,686	1,18	x	Sandhorizont
1,10-3	50,657	117,885	117,409	0,71	x	Sandhorizont
1,10-4	53,013	128,946	128,51	0,58		Sandhorizont
1,10-5	52,487	132,647	132,224	0,53		Sandhorizont
1,10-6	50,172	141,87	140,843	1,13		Sandhorizont
1,17-1	50,172	210,458	181,29	22,25	x	
1,17-2	53,013	158,209	139,633	21,45	x	
1,17-3	50,657	201,58	173,717	22,64	x	
1,17-4	52,487	237,191	206,944	19,58		
1,17-5	51,94	228,344	201,228	18,16		
1,17-6	52,182	243,522	213,164	18,86		
Mitte	52,35	251,116	218,916	19,33		
1,30-1	51,456	224,028	183,689	30,51	x	
1,30-2	52,042	155,011	131,576	29,47	x	
1,30-3	50,336	194,516	165,839	24,83	x	
1,30-4	51,898	198,19	166,765	27,36		
1,30-5	52,972	349,048	276,13	32,68		
1,30-6	112,236	304,749	260,3	30,02		
1,45-1	53,66	209,125	163,967	40,94	x	
1,45-2	50,377	263,541	203,551	39,16	x	
1,45-3	52,072	203,775	157,572	43,79	x	
1,45-4	53,576	200,051	158,275	39,90		
1,45-5	51,812	221,041	171,631	41,24		

Anlage 11.3.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.4 Versuch Br2

Anlage 11.4.1 Aufbau



Schicht	Höhe [m]	Volumen [l]	m Kissen	m Granulat	x Granulat	Masse [kg]	Dichte	w	Einbautrockendichte
U1	0,25	125,7	152,0	55,3	26,68%	207,3	1,65	8,49%	1,52
M	0,27	135,7	130,0	93,1	41,73%	223,1	1,64	8,37%	1,52
O	0,75	377,0	460,0	182,4	28,39%	642,4	1,70	8,47%	1,57

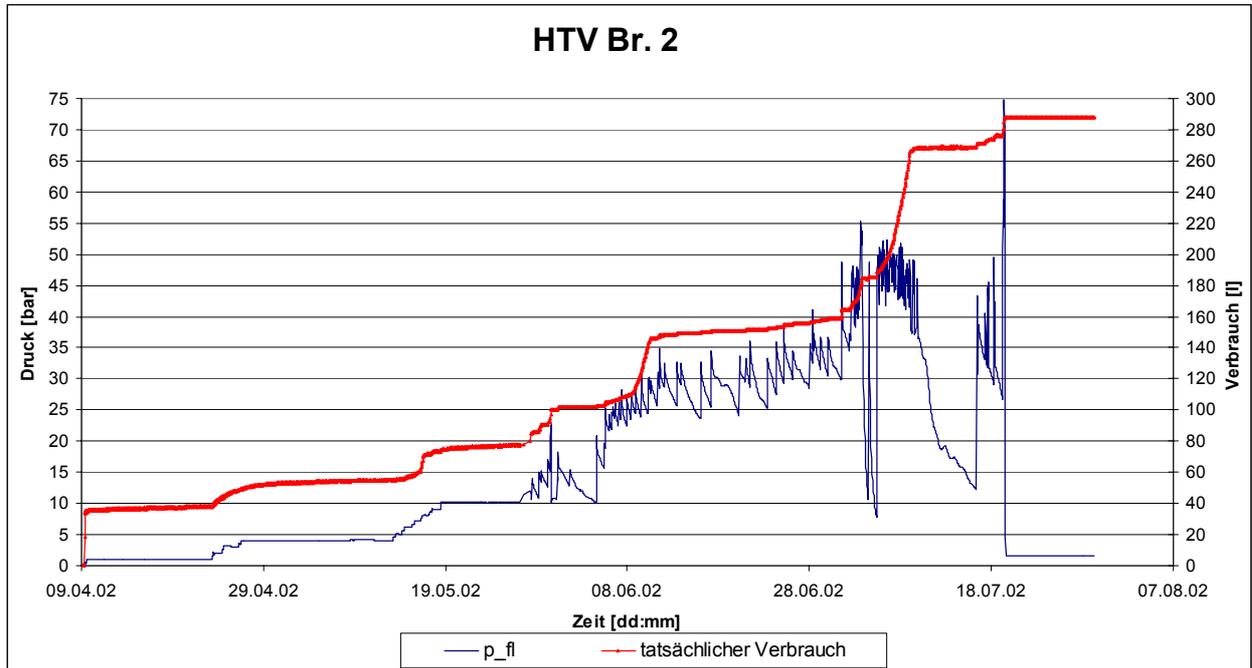
w_Granulat 7,90%
w_Kissen 8,70%

Gesamt 1,27

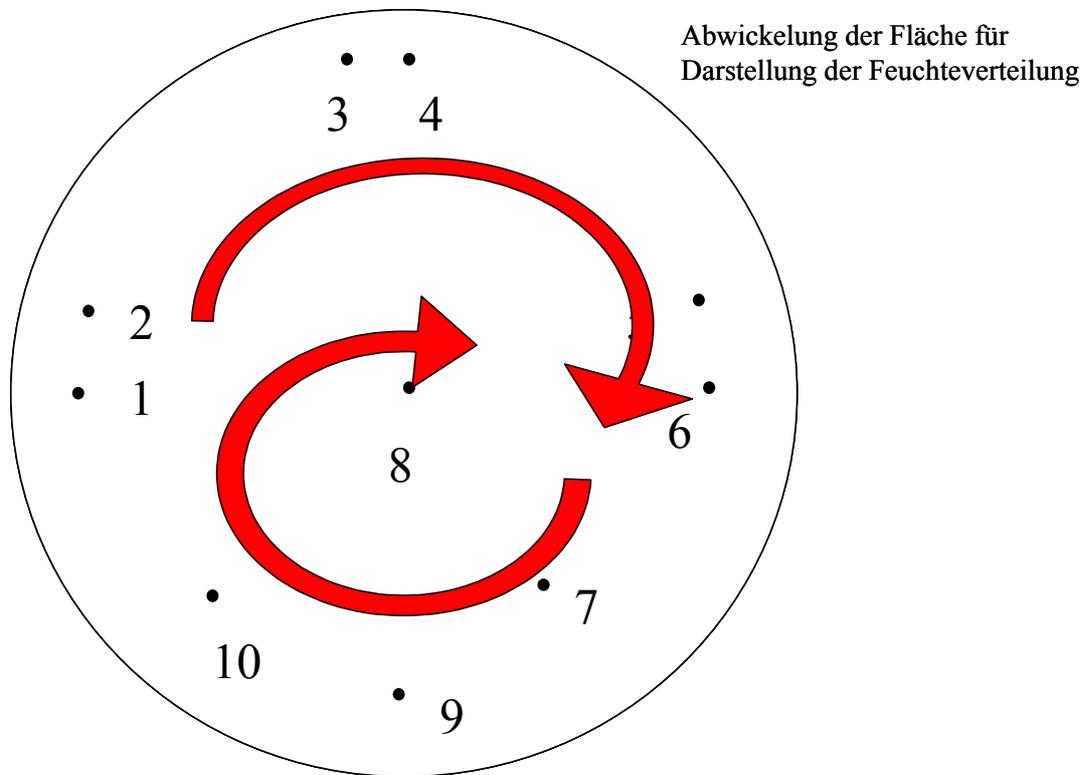
1072,8

1,55

Anlage 11.4.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.4.3 Lage der Probenahmepunkte



Anlage 11.4.4 Feuchtegehaltsbestimmung

lfd. Vers.-Nr.:	HTV BR2			Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau		
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse			Datum			
Mitarbeiter	Wasowicz			02.12.2002			
1. Materialien							
a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch							
<i>Bemerkungen zum Mineralgemisch</i>							
2. Versuchsverlauf							
Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
		g	g	g	g	%	%
29 cm	1	51,27	251,517	232,639	232,364	10,58	
Bentonithöhe	2	50,795	255,372	236,108	235,989	10,47	
OE 10 cm	3	52,634	243,044	225,427	225,076	10,42	
	4	50,685	214,479	199,276	199,197	10,29	
	5	50,171	209,857	194,934	194,75	10,45	
	6	53,012	219,248	203,207	203,309	10,61	
	7	52,381	188,188	175,789	175,376	10,42	
	8	52,319	195,225	181,639	181,463	10,66	
	9	52,30	206,40	191,857	191,813	10,45	
	10	51,47	236,67	219,633	219,056	10,51	10,48
4. Bemerkungen							
Brutto= Naßgewicht							
Netto= Gewicht nach Trocknung							
<i>Bemerkungen zum Versuchsablauf</i>							

lfd. Vers.-Nr.:	HTV BR2			Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau		
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse			Datum			
Mitarbeiter	Wasowicz			02.12.2002			
1. Materialien							
a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch							
<i>Bemerkungen zum Mineralgemisch</i>							
2. Versuchsverlauf							
Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
		g	g	g	g	%	%
38,4 cm	1	51,943	182,33	169,27	169,18	11,22	
Bentonithöhe	2	52,183	233,27	215,4	215,18	11,10	
OE 20 cm	3	52,411	243,68	225,49	225,15	10,73	
	4	52,794	187,22	173,76	173,56	11,31	
	5	69,342	234,5	218,38	218,05	11,06	
	6	77,856	239,45	223,93	223,7	10,80	
	7	74,716	255,65	237,96	237,77	10,97	
	8	50,555	230,16	212,77	212,46	10,93	
	9	51,59	231,24	213,73	213,59	10,89	
	10	50,66	229,18	211,3	211,08	11,28	11,03
4. Bemerkungen							
Brutto= Naßgewicht							
Netto= Gewicht nach Trocknung							
<i>Bemerkungen zum Versuchsablauf</i>							

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		02.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
49 cm	1	71,036	241,23	224,77	224,48	10,92	
Bentonithöhe	2	77,123	212,96	200,08	199,98	10,57	
OE 30 cm	3	72,279	196,77	185,04	184,99	10,45	
	4	72,872	222,3	208,38	208,32	10,32	
	5	77,189	208,21	195,61	199,55	7,08	
	6	77,563	222,54	208,27	208,13	11,04	
	7	50,945	204,12	189,31	189,09	10,88	
	8	52,673	199,58	185,32	185,24	10,82	
	9	53,55	199,27	184,66	184,56	11,23	
	10	50,75	225,10	207,93	207,7	11,09	10,44

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		02.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
58,5 cm	1	52,986	168,12	157,76	157,75	9,90	
Bentonithöhe	2	51,893	191,2	178,37	178,29	10,21	
OE 40 cm	3	52,465	249,9	231,74	231,71	10,15	
	4	53,682	180,82	169,37	169,34	9,93	
	5	51,314	182,49	169,98	169,87	10,64	
	6	51,039	167,97	157,3	157,28	10,06	
	7	52,075	165,42	154,71	154,6	10,55	
	8	51,899	177,29	165,96	165,87	10,02	
	9	50,38	141,10	132,91	132,83	10,03	
	10	53,66	171,46	160,15	160,09	10,68	10,22

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		02.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
67,5 cm	1	71,056	210,176	198,926	198,337	9,30	
Bentonithöhe	2	52,583	187,433	176,195	175,846	9,40	
OE 50 cm	3	52,673	159,764	151,009	150,716	9,23	
	4	52,21	220,533	206,521	206,105	9,38	
	5	53,576	169,252	159,408	159,137	9,58	
	6	51,814	167,199	157,682	157,311	9,37	
	7	70,438	172,456	163,922	163,624	9,48	
	8	74,448	185,499	176,302	176,017	9,34	
	9	75,03	178,54	169,913	169,569	9,49	
	10	78,22	178,93	170,815	170,493	9,14	9,37

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		02.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
77 cm	1	52,339	172,22	161,74	161,59	9,73	
Bentonithöhe	2	50,332	224,79	209,83	209,59	9,54	
OE 60 cm	3	52,863	191,07	179,08	178,77	9,77	
	4	52,032	209,56	195,91	195,75	9,61	
	5	52,39	178,69	167,55	167,43	9,79	
	6	51,811	164,49	151,9	151,65	12,86	
	7	52,47	167,69	157,58	157,39	9,82	
	8	52,189	189,85	178,07	177,92	9,49	
	9	51,73	175,24	164,21	163,97	10,04	
	10	50,43	208,68	194,54	194,64	9,74	10,04

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		02.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
86 cm	1	52,394	165,94	156,04	155,96	9,64	
Bentonithöhe	2	52,293	182,93	172,07	172,05	9,09	
OE 70 cm	3	52,196	193,13	181,39	181,38	9,10	
	4	52,044	171,34	160,98	160,97	9,52	
	5	50,611	170,67	160,13	160,08	9,67	
	6	52,734	161,01	151,42	151,31	9,84	
	7	51,026	190,63	178,06	177,98	9,96	
	8	51,496	229,7	214,06	213,98	9,67	
	9	51,19	197,16	184,29	184,2	9,74	
	10	53,62	197,68	185,27	185,24	9,45	9,45

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara g	Brutto g	Netto 1 g	Netto 2 g	w %	Mittelwert %
101 cm	1	52,958	176,62	165,376	165,014	10,36	
Bentonithöhe	2	51,457	191,01	179,396	178,975	9,44	
ZE 5 cm	3	69,282	198,37	186,783	186,276	10,34	
	4	71,926	182,51	172,318	172,175	10,31	
	5	52,38	150,85	141,886	141,593	10,38	
	6	52,429	194,65	181,907	181,457	10,22	
	7	51,447	174,77	163,128	162,84	10,71	
	8	50,91	184,53	171,988	171,618	10,70	
	9	71,71	211,27	197,926	197,309	11,12	
	10	73,65	220,59	206,543	205,885	11,12	10,47

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung
ZE= Zwischenelement

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
109,5 cm		g	g	g	g	%	%
	1	71,25	194,757	178,348	178,207	15,47	
Bentonithöhe	2	69,205	205,697	187,863	187,691	15,20	
ZE 15 cm	3	78,092	227,134	207,319	207,339	15,32	
	4	70,55	202,457	185,338	185,184	15,07	
	5	70,236	179,315	165,695	165,595	14,39	
	6	70,155	184,41	167,347	167,242	17,68	
	7	69,081	231,061	205,215	205,028	19,15	
	8	70,02	246,038	222,639	222,461	15,47	
	9	71,35	162,79	150,124	150,03	16,21	
	10	71,26	193,22	176,059	175,831	16,63	16,06

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung
 ZE= Zwischenelement

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
114 cm		g	g	g	g	%	%
	1	51,813	155,831	136,819	136,683	22,56	
Bentonithöhe	2	51,941	205,022	179,837	179,556	19,96	
ZE 20 cm	3	53,012	154,653	138,431	138,268	19,22	
	4	52,753	159,503	141,328	141,222	20,66	
	5	52,734	185,125	161,553	161,31	21,93	
	6	52,371	183,794	160,338	160,107	21,99	
	7	53,8	160,19	139,615	139,397	24,29	
	8	52,416	167,04	148,498	148,291	19,56	
	9	52,30	190,95	165,535	165,212	22,79	
	10	51,47	176,70	155,28	155,037	20,91	21,39

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung
 ZE= Zwischenelement

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
122,5 cm		g	g	g	g	%	%
	1	70,147	125,48	111,09	111,05	35,28	
Bentonithöhe	2	74,05	175,26	149,28	149	35,04	
UK ZE	3	70,334	130,9	116,8	116,65	30,77	
	4	69,468	169,82	146,12	145,96	31,19	
	5	71,103	152,33	132,6	132,51	32,28	
	6	69,694	148,79	129,3	129,16	33,01	
	7	69,61	172,89	149,16	148,86	30,32	
	8	69,274	143,51	127,53	127,41	27,69	31,95

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung
 ZE= Zwischenelement

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
118 cm		g	g	g	g	%	%
	1	50,171	149,874	126,02	125,78	31,87	
Bentonithöhe	2	53,012	184,573	156,86	156,53	27,09	
ZE 24 cm	3	51,27	206,715	170,82	170,41	30,47	
	4	50,795	183,372	155,46	155,01	27,21	
	5	50,658	143,597	123,73	123,54	27,52	
	6	52,484	156,331	134,6	134,37	26,82	
	7	52,634	186,886	159,16	158,74	26,53	
	8	50,685	148,989	124,43	124,13	33,85	
	9	52,32	162,48	139,76	139,42	26,47	
	10	72,55	175,08	153,53	153,16	27,20	28,50

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung
 ZE= Zwischenelement

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
134 cm		g	g	g	g	%	%
	1	70,943	176,17	148,85	148,51	35,66	
Bentonithöhe	2	51,188	166,36	140,94	140,63	28,77	
UE	3	52,381	164,15	132,92	132,89	38,83	
	4	50,663	120,61	102,9	102,72	34,37	
	5	52,794	132,76	111,84	111,66	35,84	
	6	68,199	164	138,76	138,41	36,45	
	7	52,411	159,24	126,93	126,53	44,13	
	8	72,708	156,55	134,46	134,29	36,15	
	9	73,99	200,12	163,2	162,89	41,88	
	10	50,75	153,81	124,53	124,1	40,50	37,26

4. Bemerkungen

Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung
 UE=unteres Element

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum	
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002	

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
144 cm		g	g	g	g	%	%
	1	52,673	181,74	145,48	145,11	39,63	
Bentonithöhe	2	50,945	181,98	143,44	143,05	42,27	
UE 10 cm	3	51,943	190,03	148,08	148	43,76	
	4	52,183	202,21	156,93	156,88	43,30	
	5	50,555	172,89	138,94	138,82	38,60	
	6	51,586	162,32	128,57	128,28	44,38	
	7	77,123	199,19	162,97	162,69	42,66	
	8	71,036	179,11	146,19	145,88	44,40	
	9	69,34	178,16	144,62	144,36	45,06	
	10	77,86	226,02	181,14	180,85	43,86	42,79

4. Bemerkungen

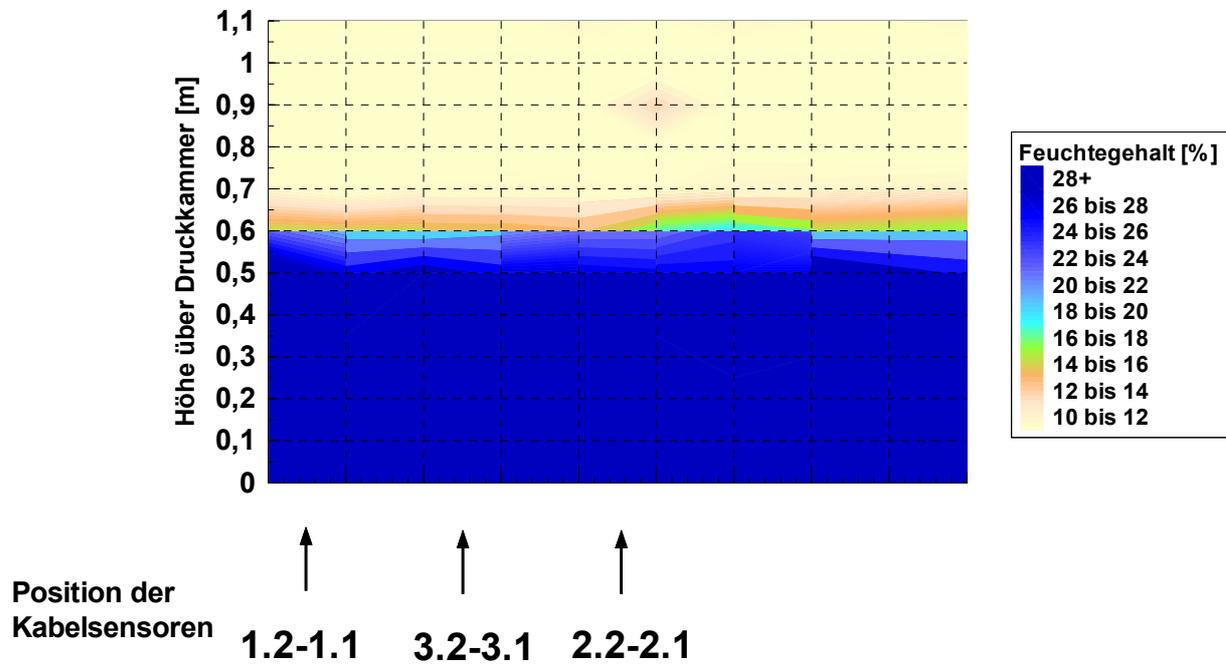
Brutto= Naßgewicht
 Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

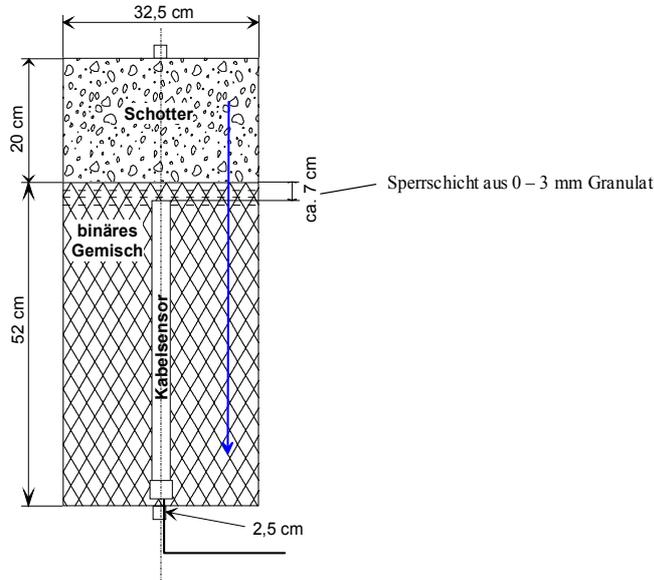
Ifd. Vers.-Nr.:	HTV BR2		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau			
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum				
Mitarbeiter	Wasowiecz		03.12.2002				
1. Materialien							
a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch							
<i>Bemerkungen zum Mineralgemisch</i>							
2. Versuchsverlauf							
Höhe ab OK	Lage	Tara	Brutto	Netto 1	Netto 2	w	Mittelwert
169 cm		g	g	g	g	%	%
	1	53,549	151,26	121,06	120,76	45,38	
Bentonithöhe	2						
UE Unterkante	3						
	4	72,872	173,37	140,9	140,53	48,54	
	5						
	6	77,189	198,466	159,384	158,869	48,48	
	7						
	8	77,563	229,321	181,699	181,679	45,76	
	9						
	10	72,28	189,34	155,5	155,38	40,87	45,80
4. Bemerkungen							
Brutto= Naßgewicht							
Netto= Gewicht nach Trocknung							
<i>Bemerkungen zum Versuchsablauf</i>							

Anlage 11.4.5 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.5 Versuch KU 1

Anlage 11.5.1 Aufbau



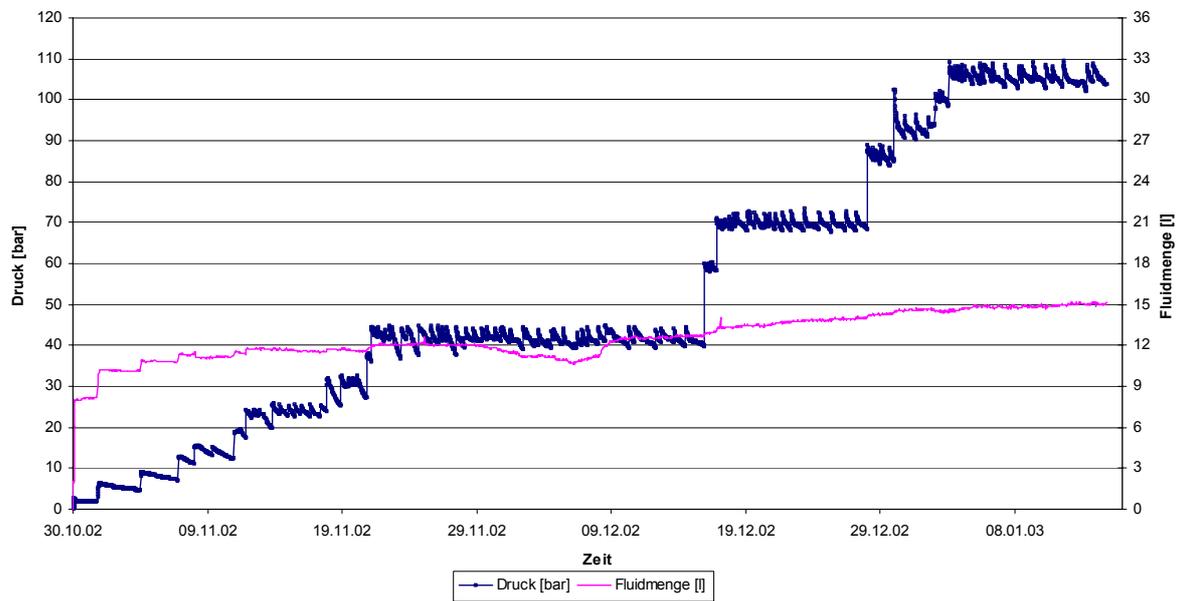
Dichtmaterial: Calcigel - Binäres Gemisch
 Prüfmedium: Wasser
 Apparatur: 300 mm, Zelle 1

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,08
 Einbauwassergehalt - Kissen: 0,09
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm ³]	Masse Granulat [kg]	Masse Kissen [kg]	Gesamtdichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
u (mit Granulat 0-3 mm)	44,0	36232	21,35	44,50	1,82	1,67
o (mit Granulat 1-3 mm)	8,0	6518	3,45	8,05	1,76	1,62
Gesamt	52,0	42750	24,80	52,55	1,81	1,66
			Summe Bentonit	77,35		

Anlage 11.5.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches

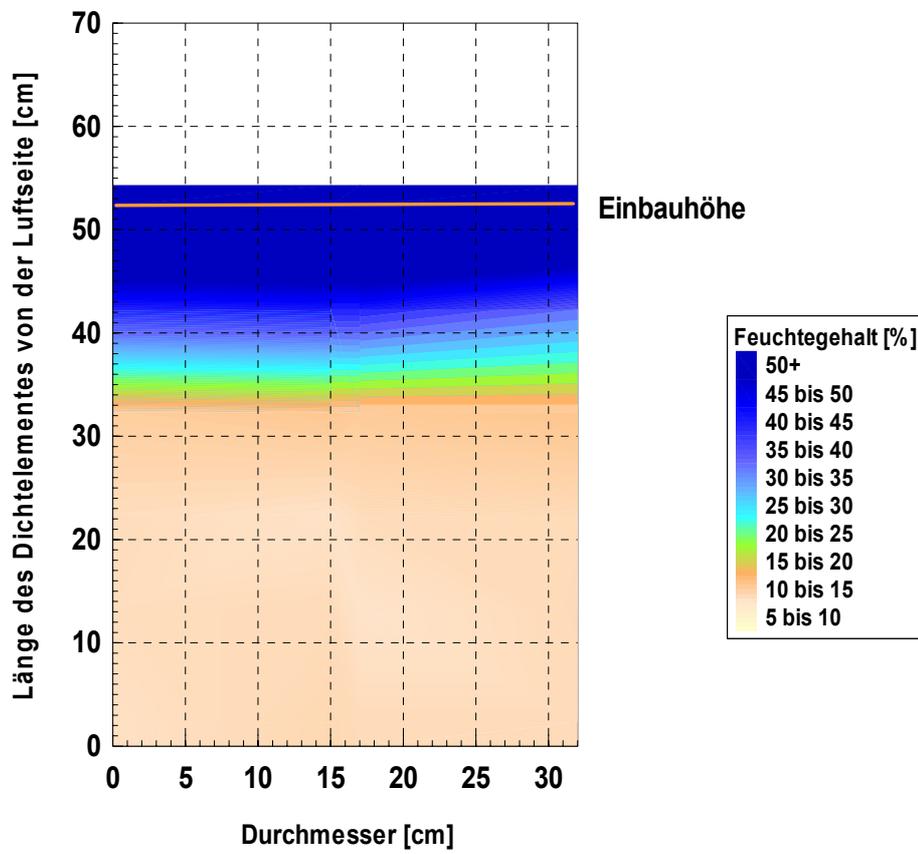
HTV Ku 1



Anlage 11.5.3 Feuchtegehaltsbestimmung

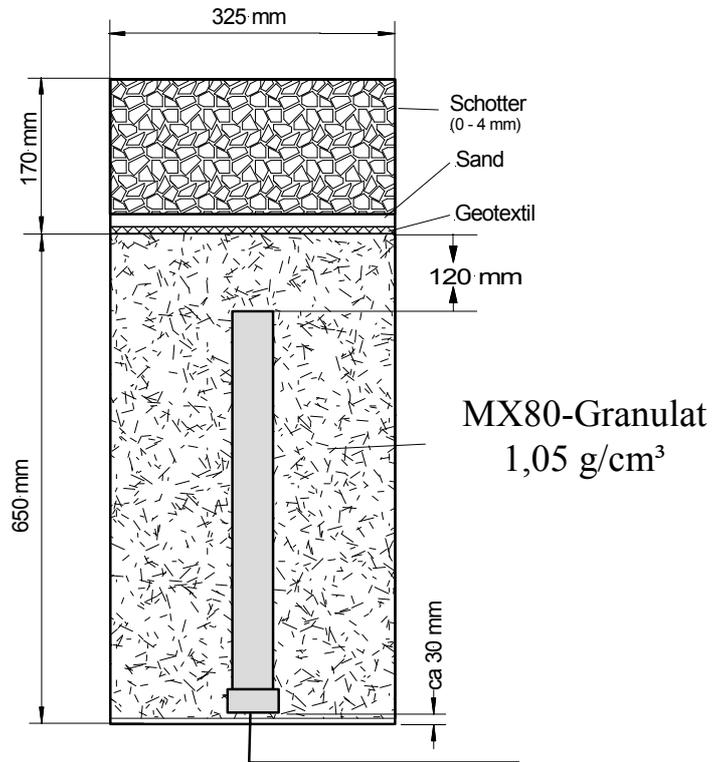
lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 1				Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau		
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse				Datum	#####		
Mitarbeiter	Wasowicz							
1. Materialien								
a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch								
Versuch mit Wasser								
<i>Bemerkungen zum Mineralgemisch</i>								
2. Versuchsverlauf								
cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter	Lage	Tara	Brutto	Netto1	Netto2	w	Mittelwert
	cm		g	g	g	g	%	%
OK Bentonit	28							
2	30	M1	50,658	127,609	95,292	95,190	72,80	
kein Feuchtemesser		M2	52,484	146,457	106,713	106,548	73,82	
		R1	53,549	146,252	107,626	107,554	71,66	
		R2	50,745	168,377	119,787	119,532	71,01	72,32
12	40	M1	52,189	162,144	129,596	129,472	42,28	
kein Feuchtemesser		M2	52,470	163,377	130,047	129,868	43,29	
		R1	53,012	130,547	108,141	107,968	41,09	
		R2	52,753	144,750	120,437	120,135	36,53	40,80
Anfang Meßstreifen	43							
22	50	M1	51,813	193,441	178,096	177,160	12,99	
Feuchtemesser ab 15 cm		M2	51,941	147,234	137,057	136,650	12,49	
		R1	50,431	239,981	220,179	219,180	12,33	
		R2	51,730	164,905	152,200	151,751	13,15	12,74
32	60	M1	52,032	203,808	190,749	189,690	10,26	
		M2	52,863	206,228	192,111	191,227	10,84	
		R1	51,811	209,477	194,983	194,105	10,80	
		R2	52,390	195,048	181,957	180,976	10,94	10,71
41	69	M1	52,794	206,275	192,261	191,180	10,91	
		M2	52,411	210,247	195,945	195,945	9,96	
		R1	53,800	287,249	266,584	264,684	10,70	
		R2	52,416	193,144	180,199	179,166	11,03	10,65
52	80	M1	52,299	255,074	236,078	234,696	11,17	
		M2	51,465	210,142	195,462	194,533	10,91	
		R1	51,893	265,942	247,283	245,735	10,42	
		R2	52,210	251,254	232,898	231,701	10,89	10,85
4. Bemerkungen								
Probenahme diagonal								
M1	links von Meßstreifen							
M2	rechts von Meßstreifen							
R1	Rand neben M1							
R2	Rand neben M2							
Brutto= Naßgewicht								
Netto= Gewicht nach Trocknung								
<i>Bemerkungen zum Versuchsablauf</i>								

Anlage 11.5.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.6 Versuch KU 2

Anlage 11.6.1 Aufbau

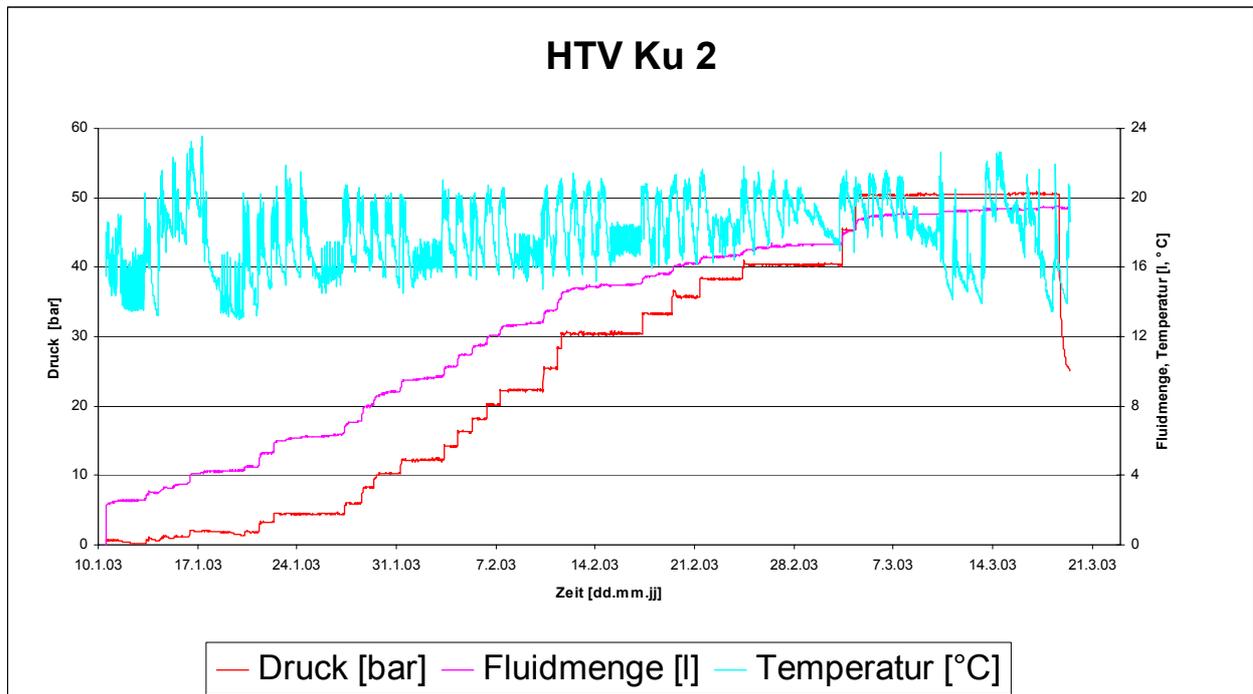


Dichtmaterial: MX-80 Granulat
 Prüfmedium: Wasser
 Apparatur: 300 mm, Zelle 3

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,1255
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm³]	Masse Granulat [kg]	Gesamtdichte [g/cm³]	Trockendichte [g/cm³]
Gesamt	65,0	53455	62,45	1,17	1,04

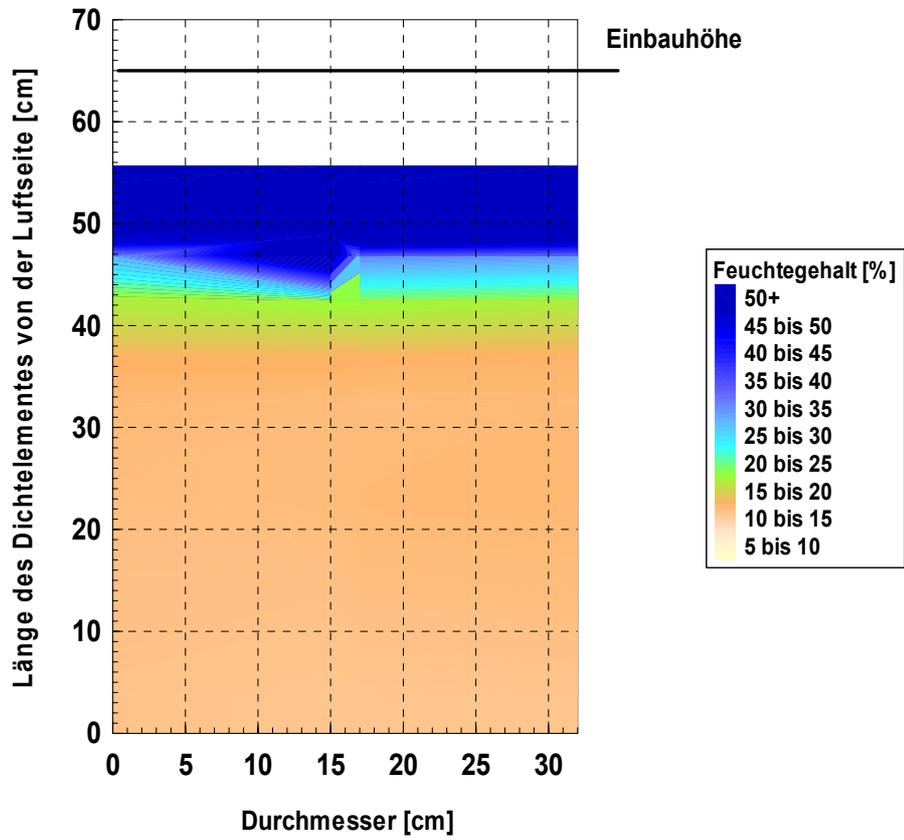
Anlage 11.6.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.6.3 Feuchtegehaltsbestimmung

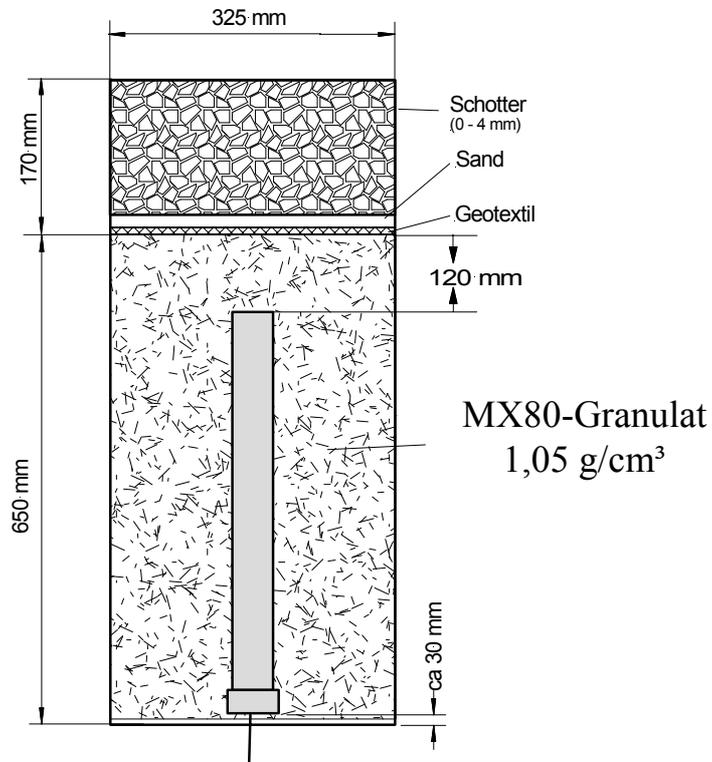
lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 2			Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau			
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse			Datum:	21.03.2003			
Mitarbeiter	Wasowiecz							
1. Materialien								
a) Mineralgemisch		MX 80	Feingranulat					
Versuch mit Wasser								
<i>Bemerkungen zum Mineralgemisch</i>								
2. Versuchsverlauf								
cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter	Lage	Tara	Brutto	Netto1	Netto2	w	Mittelwert
	cm		g	g	g	g	%	%
OK Kies	19,9							
OK Bentonit	26,6							
1,7	28,3	M1	51,893	130,816	75,294	75,262	237,73	
kein Feuchtemesser		M2	50,795	130,784	75,166	75,136	228,62	
		R1	51,941	123,150	70,366	70,343	286,96	
		R2	51,270	142,162	78,689	78,663	231,81	246,28
6,9	33,4	M1	53,012	110,367	89,609	89,582	56,84	
kein Feuchtemesser		M2	52,339	123,002	95,245	95,227	64,76	
		R1	51,813	129,287	100,583	100,558	58,94	
		R2	50,332	128,310	99,434	99,420	58,85	59,85
8,9	35,5	M1	50,378	158,514	117,316	117,302	61,58	
kein Feuchtemesser		M2	52,075	150,954	126,163	126,144	33,50	
		R1	53,663	92,193	83,263	83,251	30,22	
		R2	51,899	134,296	114,161	114,132	32,40	39,42
Feuchtemesseranfang	36							
13,3	39,9	M1	53,682	86,701	81,131	81,113	20,37	
Feuchtemesser		M2	53,576	94,250	87,402	87,357	20,40	
		R1	51,039	87,753	81,821	81,810	19,31	
		R2	51,814	97,700	90,277	90,259	19,35	19,86
18,4	45,0	M1	72,279	133,690	125,493	125,480	15,43	
		M2	52,673	107,503	100,261	100,248	15,25	
		R1	72,872	124,247	117,453	117,447	15,26	
		R2	50,945	121,294	112,144	112,130	14,98	15,23
23,6	50,1	M1	52,484	102,275	96,188	96,171	13,97	
		M2	52,465	105,521	99,155	99,077	13,82	
		R1	50,658	114,750	106,884	106,794	14,17	
		R2	52,673	113,666	106,152	106,097	14,17	14,03
32,9	59,4	M1	51,465	91,000	86,171	86,145	14,00	
		M2	52,794	111,002	103,782	103,771	14,18	
		R1	52,299	104,600	98,309	98,299	13,70	
		R2	52,411	112,821	105,268	105,254	14,32	14,05
43,0	69,6	M1	74,716	138,545	131,013	130,997	13,41	
		M2	52,416	114,023	106,681	106,646	13,60	
		R1	52,753	93,888	88,993	88,965	13,59	
		R2	53,800	131,398	122,021	121,998	13,78	13,60
51,9	78,5	M1	77,856	143,998	136,447	136,399	12,98	
		M2	78,215	143,077	135,677	135,593	13,04	
		R1	69,342	123,454	117,163	117,126	13,24	
		R2	75,029	140,611	133,070	133,031	13,07	13,08
4. Bemerkungen								
Probenahme diagonal								
M1	links von Meßstreifen							
M2	rechts von Meßstreifen							
R1	Rand neben M1							
R2	Rand neben M2							
Brutto= Naßgewicht								
Netto= Gewicht nach Trocknung								
<i>Bemerkungen zum Versuchsablauf</i>								

Anlage 11.6.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.7 Versuch KU 3

Anlage 11.7.1 Aufbau

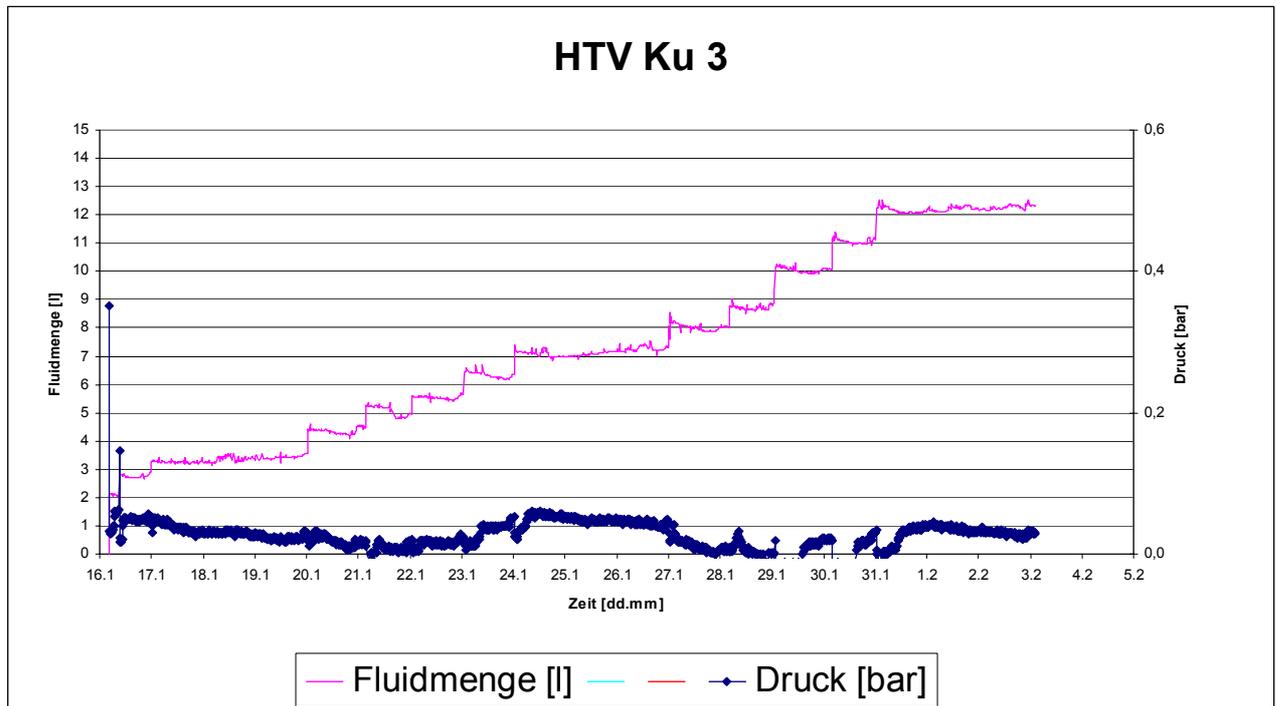


Dichtmaterial: MX-80 Granulat
 Prüfmedium: NaCl-Lösung
 Apparatur: 300 mm, Zelle 3

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,1255
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm³]	Masse Granulat [kg]	Gesamtdichte [g/cm³]	Trockendichte [g/cm³]
Gesamt	65,0	53455	62,70	1,17	1,04

Anlage 11.7.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.7.3 Feuchtegehaltsbestimmung

lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 3	Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse	Datum	04.02.2003
Mitarbeiter	Wasowiecz		

1. Materialien

a) Mineralgemisch MX 80 Feingranulat

Versuch mit Salzlösung 1,15 g/cm³

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter cm	Lage	Tara g	Brutto g	Netto1 g	Netto2 g	w %	Mittelwert %
OK Bentonit	17	M1	50,658	123,824	102,318	102,308	41,66	
kein Feuchtemesser		M2	52,484	165,646	132,108	132,068	42,19	
		R1	52,416	127,618	106,585	106,569	38,87	
		R2	53,800	135,618	112,478	112,477	39,44	40,54
10	27	M1	51,893	138,065	113,325	113,325	40,27	
kein Feuchtemesser		M2	52,210	146,393	119,853	119,826	39,29	
		R1	51,941	119,749	101,340	101,326	37,30	
		R2	51,813	131,523	109,806	109,790	37,49	38,59
Anfang Meßstreifen	29							
20	37	M1	52,416	108,530	92,780	92,743	39,15	
Feuchtemesser ab 12 cm		M2	51,465	119,798	100,761	100,759	38,62	
		R1	50,431	131,918	110,076	110,041	36,70	
		R2	51,730	146,616	121,064	121,011	36,96	37,86
30	47	M1	52,794	130,732	109,132	109,132	38,34	
		M2	52,411	128,120	107,256	107,221	38,13	
		R1	51,270	128,193	108,180	108,118	35,31	
		R2	50,795	130,572	109,124	109,600	35,66	36,86
40	57	M1	53,012	139,565	115,566	115,543	38,42	
		M2	52,753	123,378	103,822	103,801	38,35	
		R1	52,189	140,812	118,739	118,690	33,27	
		R2	52,470	146,014	121,630	121,569	35,38	36,35
45	62	M1	52,734	132,612	111,164	111,125	36,80	
		M2	52,371	142,455	119,438	119,392	34,41	
		R1	51,943	99,383	91,099	91,080	21,22	
		R2	52,183	123,305	107,012	107,012	29,72	30,54
50	67	M1	51,039	115,959	99,733	99,693	33,43	
		M2	53,682	101,449	89,726	89,677	32,70	
		R1	50,171	80,359	76,635	76,635	14,07	
		R2	53,012	123,959	114,720	114,703	15,00	23,80
53	70	M1	53,549	95,561	90,321	90,305	14,30	
		M2	50,745	71,701	69,121	69,073	14,34	
		R1	51,811	70,305	68,086	68,046	13,91	
		R2	52,390	81,703	78,173	78,143	13,82	14,09

59	76	M1	52,339	98,269	92,614	92,614	14,04	
		M2	50,332	106,326	99,544	99,516	13,85	
		R1	52,319	107,552	100,849	100,809	13,91	
		R2	52,381	126,356	117,349	117,314	13,93	13,93
65	82	M1	71,036	98,244	94,906	94,906	13,98	
		M2	77,123	109,770	105,700	105,700	14,24	
		R1	72,554	147,153	137,680	137,680	14,55	
		R2	73,647	143,435	133,854	133,854	15,91	14,67

4. Bemerkungen

Probenahme diagonal

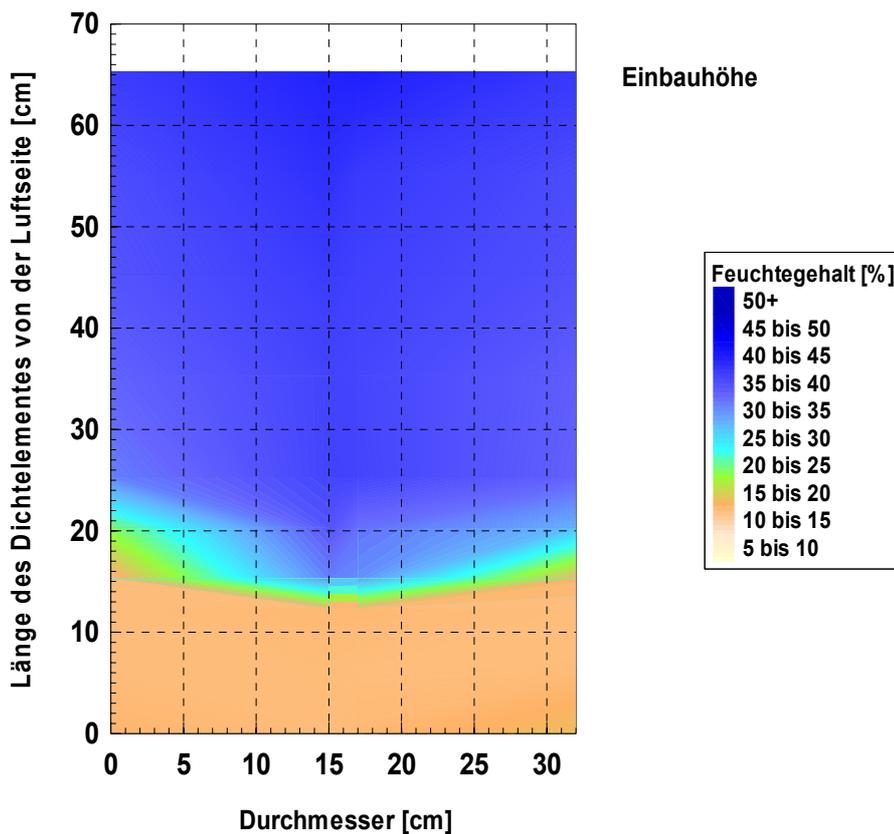
M1 links von Meßstreifen
 M2 rechts von Meßstreifen
 R1 Rand neben M1
 R2 Rand neben M2

Brutto= Naßgewicht

Netto= Gewicht nach Trocknung

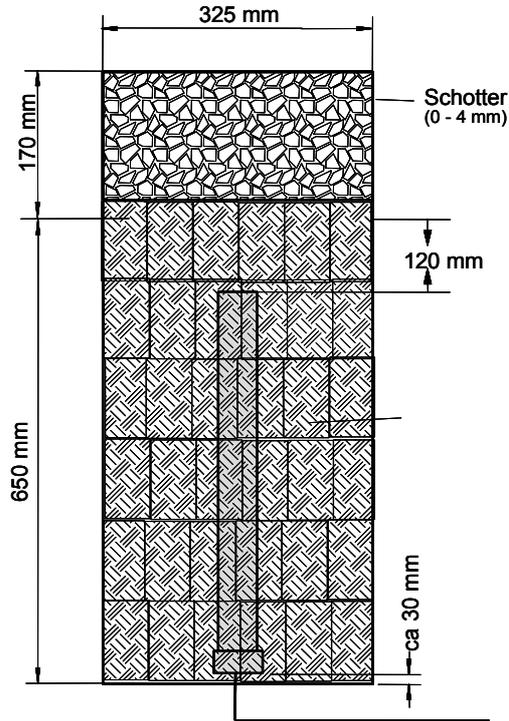
Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11.7.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.8 Versuch KU 4

Anlage 11.8.1 Aufbau



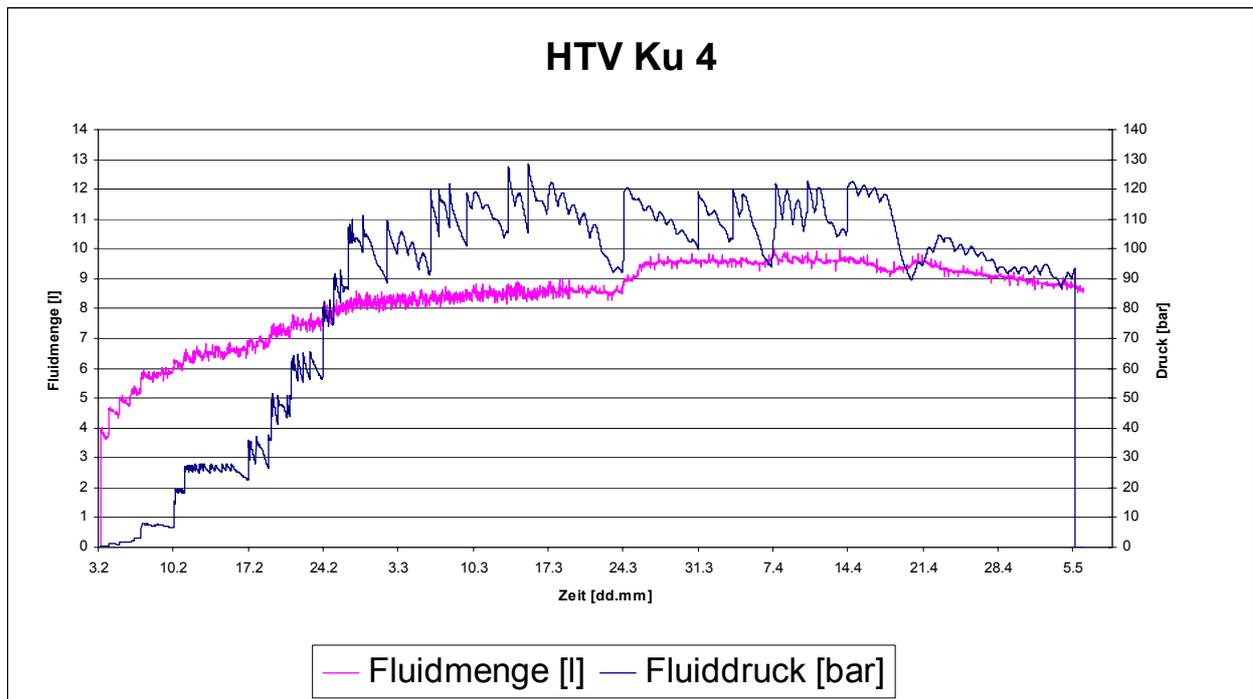
Dichtmaterial: Formsteine aus MX-80
 Prüfmedium: NaCl-Lösung
 Apparatur: 300 mm, Zelle 2

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - FS: 0,07
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,12
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm ³]	Masse FS [kg]	Masse Granulat [kg]	Gesamtdichte [g/cm ³]	Trockendichte FS [g/cm ³]	Bentonittrockendichte [g/cm ³]
0 (MX-80 Granulat)	2,5	2059		4,45	2,16	0	1,93
Lage 1 (mit Kasten)	14,0	11458	20,55	1,10	1,89	1,68	1,43
Lage 2	12,5	10293	19,40	1,00	1,98	1,76	1,53
Lage 3	12,5	10293	21,00	0,85	2,12	1,91	1,68
Lage 4	13,0	10705	19,95	0,95	1,95	1,74	1,50
Lage 5	6,0	4941	10,75	0,50	2,28	2,03	1,85
Gesamt	60,5	49749	91,65	8,85	2,02	1,72	1,55

Summe Bentonit 100,50

Anlage 11.8.2 Versuch Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.8.3 Feuchtegehaltsbestimmung

lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 4		Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse		Datum:	06.05.2003
Mitarbeiter	Wasowiecz			

1. Materialien

a) Mineralgemisch MX 80 Steine

Versuch mit Salzlösung 1,15 g/cm³

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter cm	Lage	Tara g	Brutto g	Netto1 g	Netto2 g	w %	Mittelwert %
OK Bentonit	22	M1	50,685	123,636	106,083	106,063	31,73	
kein Feuchtemesser		M2	77,563	192,726	165,100	165,022	31,68	
		R1	52,634	146,725	126,022	125,849	28,51	
		R2	77,189	173,848	153,518	153,487	26,69	29,65
4	26	M1	72,554	161,327	142,466	142,388	27,12	
kein Feuchtemesser		M2	52,734	140,160	121,603	121,593	26,96	
		R1	73,647	146,276	131,727	131,712	25,08	
		R2	52,371	168,084	144,841	144,825	25,16	26,08
10	32	M1	52,390	126,830	112,897	112,894	23,03	
		M2	50,663	131,020	115,874	115,816	23,34	
		R1	51,811	122,730	109,883	109,832	22,23	
		R2	51,314	136,530	121,057	121,054	22,19	22,70
14	36	M1	70,438	132,970	122,942	122,887	19,22	
		M2	78,215	149,210	137,739	137,718	19,31	
		R1	74,448	119,670	111,894	111,899	20,75	
		R2	75,029	145,610	133,855	133,853	19,99	19,82
18	39	M1	51,586	98,040	91,087	91,044	17,73	
		M2	53,549	97,420	90,604	90,595	18,42	
		R1	50,555	103,800	95,111	95,109	19,51	
		R2	50,745	122,000	110,372	110,369	19,51	18,79
21	43	M1	52,583	96,620	89,707	89,700	18,64	
		M2	50,171	104,710	96,397	96,411	17,95	
		R1	52,986	109,310	99,618	99,614	20,79	
		R2	53,012	110,220	100,798	100,785	19,75	19,28
26	48	M1	50,945	94,530	88,400	88,360	16,49	
		M2	52,465	99,620	93,066	93,025	16,26	
		R1	52,673	115,560	106,477	106,445	16,95	
		R2	52,673	110,420	101,810	101,786	17,58	16,82
31	52	M1	52,470	83,900	79,678	79,644	15,66	
		M2	52,381	88,020	83,203	83,200	15,64	
		R1	52,189	103,390	96,069	96,038	16,77	
		R2	52,319	99,900	93,126	93,105	16,66	16,18
35	57	M1	53,682	88,070	83,532	83,517	15,26	
		M2	53,012	108,510	101,183	101,184	15,21	
		R1	51,039	104,540	97,064	97,030	16,33	
		R2	52,753	140,390	128,491	128,475	15,74	15,63
40	61	M1	52,183	108,680	106,048	101,599	14,33	
		M2	52,794	100,920	98,044	94,616	15,07	
		R1	51,943	120,620	118,051	111,318	15,67	
		R2	52,411	106,550	104,083	99,450	15,09	15,04

46	67	M1	52,416	98,020	92,265	92,265	14,44	
		M2	52,299	103,240	97,094	97,094	13,72	
		R1	53,800	142,790	130,033	129,966	16,84	
		R2	51,465	168,480	153,857	153,857	14,28	14,82
51	72	M1	72,554	129,170	122,818	122,818	12,64	
		M2	77,563	140,030	133,087	133,087	12,50	
		R1	73,647	150,620	141,246	141,205	13,94	
		R2	77,189	170,880	160,715	160,715	12,17	12,81
55	77	M1	70,438	130,570	124,039	124,039	12,18	
		M2	78,215	172,090	162,005	162,005	12,04	
		R1	74,448	195,460	182,004	182,004	12,51	
		R2	75,029	161,320	152,074	152,074	12,00	12,18
58	80	M1	51,314	107,340	100,038	100,038	14,99	
		M2	52,794	94,890	89,557	89,522	14,62	
		R1	50,663	106,950	99,397	99,397	15,50	
		R2	52,411	118,310	110,359	110,359	13,72	14,71

4. Bemerkungen

Probenahme diagonal

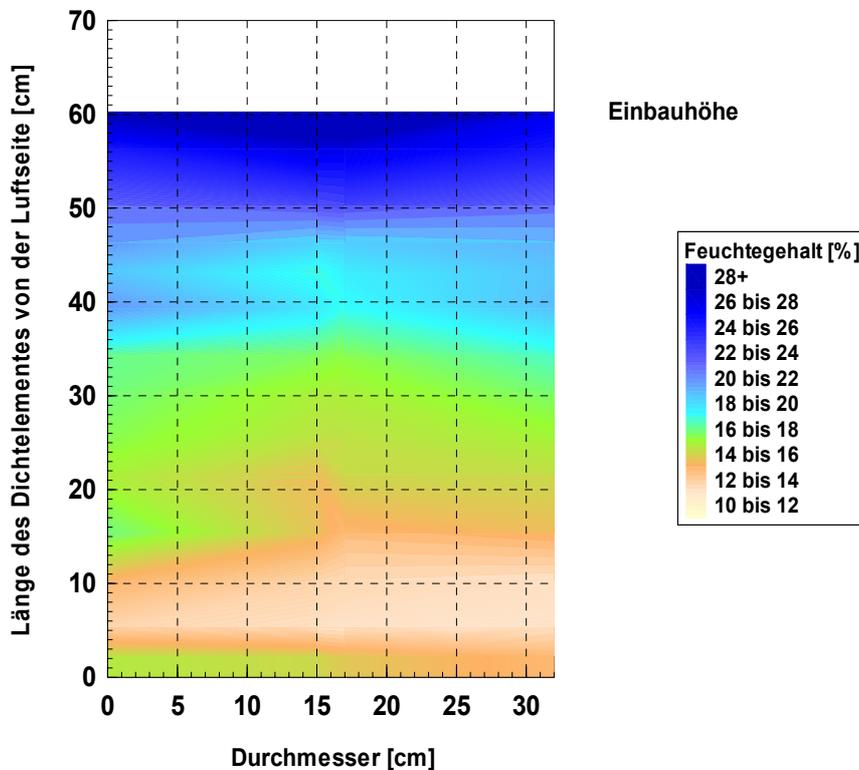
M1 links von Meßstreifen
 M2 rechts von Meßstreifen
 R1 Rand neben M1
 R2 Rand neben M2

Brutto= Naßgewicht

Netto= Gewicht nach Trocknung

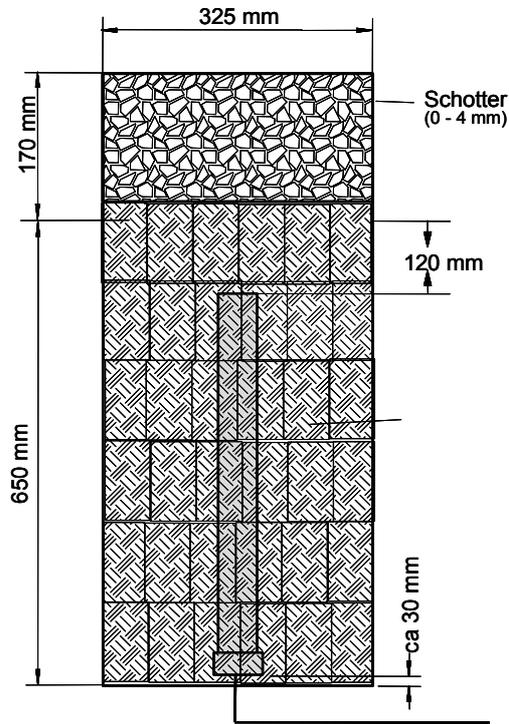
Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11.8.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.9 Versuch KU 5

Anlage 11.9.1 Aufbau



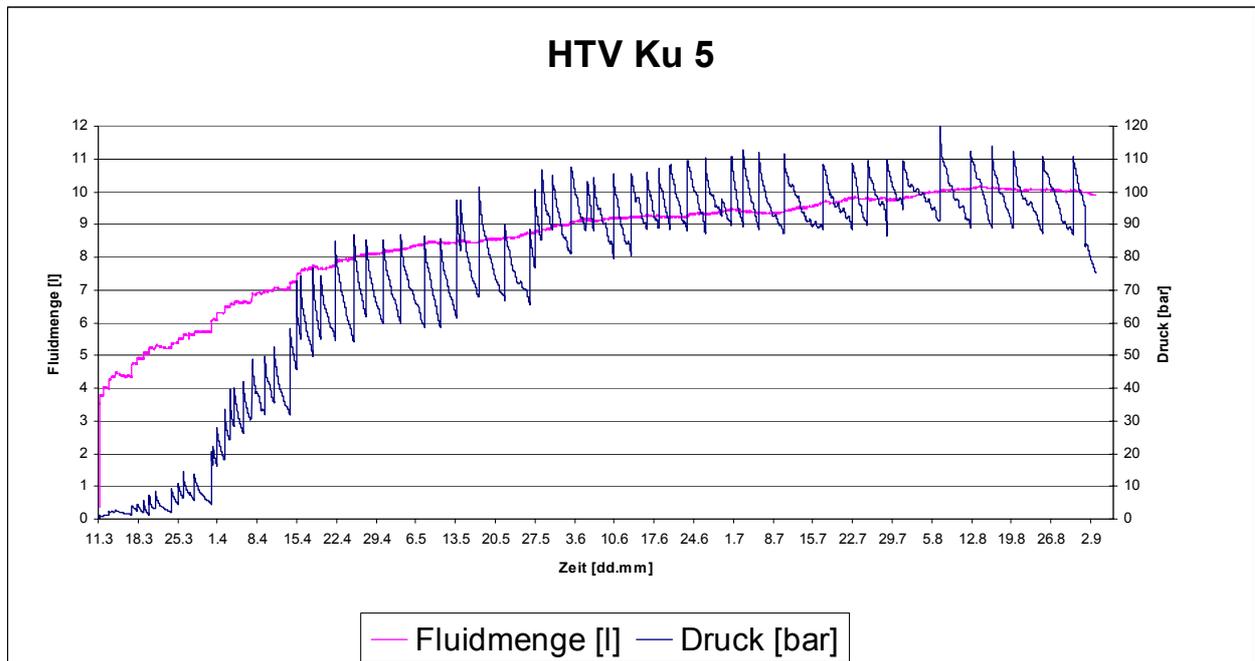
Dichtmaterial: Formsteine aus MX-80
 Prüfmedium: Wasser
 Apparatur: 300 mm, Zelle 2

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - FS: 0,07
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,12
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm ³]	Masse FS [kg]	Masse Granulat [kg]	Gesamtdichte [g/cm ³]	Trockendichte FS [g/cm ³]	Bentonittrockendichte [g/cm ³]
0 (MX-80 Granulat)	2,5	2059		4,45	2,16		0
Lage 1 (mit Kasten)	12,5	10223	20,40	1,00	2,09	1,86	1,64
Lage 2	12,5	10293	21,35	0,70	2,14	1,94	1,70
Lage 3	12,5	10293	21,35	1,00	2,17	1,94	1,73
Lage 4	13,0	10705	20,65	0,75	2,00	1,80	1,55
Lage 5	7,0	5764	11,55	0,75	2,13	1,87	1,68
Gesamt	60,0	49338	95,30	8,65	2,11	1,81	1,65

Summe Bentonit 103,95

Anlage 11.9.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11.9.3 Feuchtegehaltsbestimmung

lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 5	Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse	Datum:	05.09.2003
Mitarbeiter:	Wasowiecz		

1. Materialien

a) Mineralgemisch MX 80 Steine

Versuch mit Wasser

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter cm	Lage	Tara g	Brutto g	Netto1 g	Netto2 g	w %	Mittelwert %
OK Bentonit	18	R1	52,189	121,620	82,200	82,170	131,58	
kein Feuchtemesser		R2	52,470	140,000	91,760	91,760	122,78	
		R3	51,811	163,110	107,070	107,070	101,41	
		R4	52,390	179,360	112,230	112,230	112,18	
		M	51,943	197,210	118,260	118,240	119,12	117,41
7	25	R1	52,183	148,250	126,100	126,020	30,11	
kein Feuchtemesser		R2	52,673	147,150	123,350	123,290	33,79	
		R3	50,945	115,500	100,590	100,540	30,16	
		R4	51,314	178,300	145,220	145,170	35,30	
		M	50,663	162,570	135,070	135,030	32,64	32,40
9	27	R1	52,381	142,500	125,640	125,570	23,13	
kein Feuchtemesser		R2	52,319	123,790	109,980	109,980	23,95	
		R3	52,583	150,170	131,860	131,780	23,22	
		R4	52,986	133,740	117,960	117,930	24,34	
		M	52,634	156,250	135,740	135,680	24,77	23,88
11 Feuchtemesser								
13	32	R1	52,416	112,590	103,610	103,560	17,66	
		R2	53,800	109,370	101,120	101,090	17,51	
		R3	52,753	107,550	99,680	99,650	16,85	
		R4	53,012	120,570	110,810	110,760	16,99	
		M	50,685	117,450	107,520	107,470	17,58	17,31
18	36	R1	52,794	138,000	126,580	126,520	15,57	
		R2	51,586	130,010	119,730	119,660	15,20	
		R3	50,555	163,200	148,680	148,590	14,90	
		R4	50,778	110,320	102,470	102,420	15,30	
		M	50,332	143,770	131,560	131,540	15,06	15,21
22	41	R1	52,465	168,660	153,580	153,550	14,95	
		R2	52,673	147,990	135,750	135,720	14,77	
		R3	50,658	171,880	155,870	155,860	15,23	
		R4	52,484	171,840	155,685	155,690	15,65	
		M	53,682	182,650	165,602	165,600	15,23	15,17
26	45	R1	52,189	159,060	146,430	146,410	13,43	
		R2	52,470	174,990	160,940	160,910	12,98	
		R3	52,183	176,250	162,040	162,020	12,96	
		R4	51,943	191,320	175,440	175,420	12,88	
		M	51,811	184,530	169,470	169,450	12,82	13,01
34	52	R1	52,390	110,870	104,460	104,470	12,29	
		R2	51,314	126,380	118,200	118,180	12,26	
		R3	50,663	190,220	174,940	174,880	12,35	
		R4	52,673	173,910	160,750	160,730	12,20	
		M	50,945	171,220	158,140	158,130	12,21	12,26

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

42	60	R1	53,682	129,030	120,220	120,230	13,22	
		R2	52,794	189,020	173,315	173,320	13,03	
		R3	52,411	187,410	172,285	172,290	12,61	
		R4	52,583	159,880	147,670	147,660	12,85	
		M	52,986	164,330	151,970	151,970	12,49	12,84
51	70	R1	52,753	209,360	191,490	191,360	12,99	
		R2	53,012	152,910	141,420	141,370	13,06	
		R3	52,381	166,190	153,220	153,130	12,96	
		R4	52,319	207,190	189,520	189,430	12,95	
		M	50,945	182,280	167,320	167,210	12,96	12,98
61	79	R1	52,583	202,660	185,640	185,580	12,84	
		R2	52,411	276,980	252,270	252,140	12,44	
		R3	52,986	233,690	212,900	212,800	13,07	
		R4	53,682	169,050	156,270	156,190	12,55	
		M	52,794	215,190	196,880	196,750	12,81	12,74

4. Bemerkungen

Probenahme

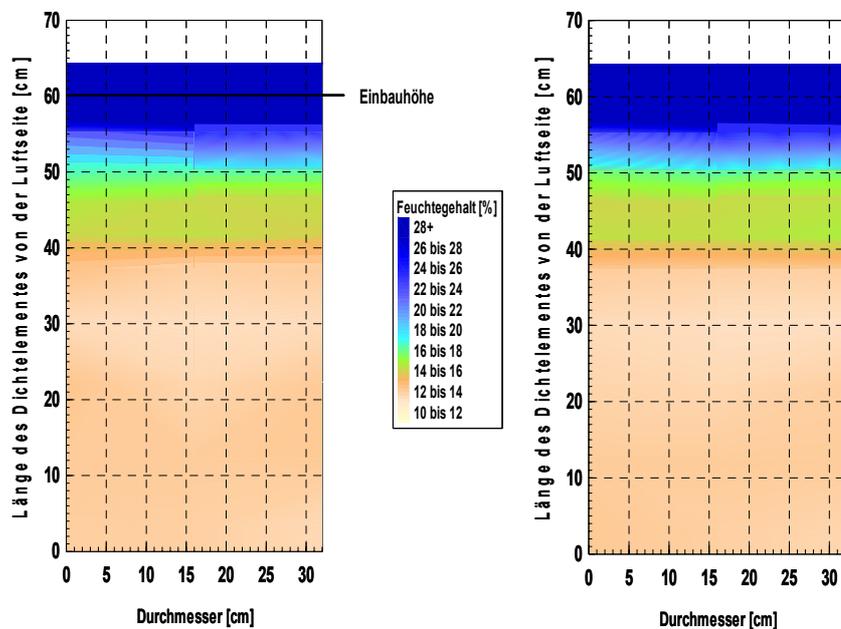
R1 -R4 Randproben in 90 ° Abstand
M Probe am Meßstreifen

Brutto= Naßgewicht

Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

Anlage 11.9.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



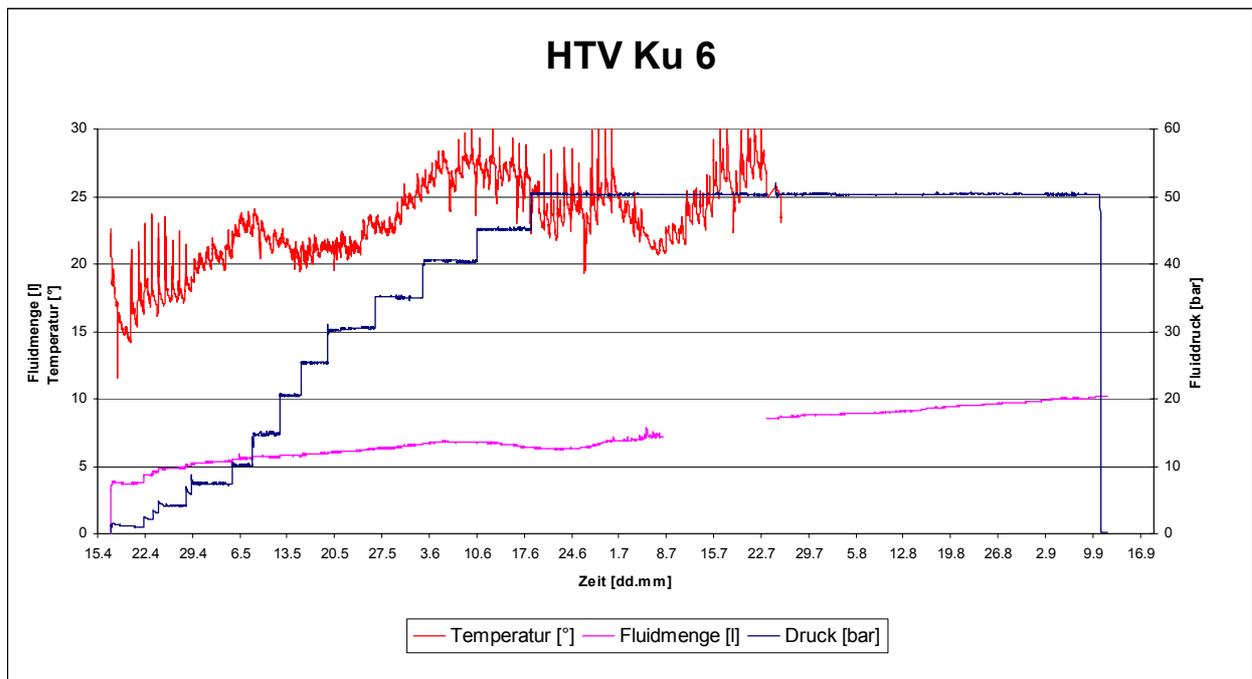
Anlage 11.10 Versuch KU 6

Dichtmaterial: Formsteine FS40
 Prüfmedium: Wasser
 Apparatur: 300 mm, Zelle 3
 Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - FS: 0,05
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,1
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm³]	Masse FS [kg]	Masse Granulat [kg]	Gesamtdichte [g/cm³]	Trockendichte FS [g/cm³]	Bentonittrockendichte [g/cm³]
0 (Calcigel Granulat)	3,0	2470		3,09	1,25	0	1,14
Lage 1 (mit Kasten)	12,5	10223	20,72	0,24	2,05	1,93	1,66
Lage 2	12,3	10129	21,36		2,11	2,01	1,73
Lage 3	12,2	10046	21,30		2,12	2,02	1,74
Lage 4	12,4	10211	21,42		2,10	2,00	1,72
Lage 5	12,4	10211	21,35		2,09	1,99	1,71
Gesamt	64,8	53290	106,15	3,33	2,05	1,90	1,65

Summe Bentonit 109,48

Anlage 11.10.1 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches



Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

40	58	R1	50,663	163,610	157,590	157,540	5,68	
		R2	53,800	174,830	168,250	168,220	5,78	
		R3	52,416	177,630	170,270	170,260	6,25	
		R4	52,673	151,710	146,490	146,490	5,56	
		M	50,945	151,990	146,630	146,610	5,62	5,78
50	68	R1	50,778	146,810	140,450	140,410	7,14	
		R2	50,332	202,430	193,410	193,280	6,40	
		R3	52,189	194,120	186,370	186,360	5,78	
		R4	52,470	158,760	153,230	153,180	5,54	
		M	52,319	162,900	156,880	156,830	5,81	6,13
60	78	R1	51,039	138,150	132,540	132,490	6,95	
		R2	53,682	145,96	140,160	140,140	6,73	
		R3	50,555	207,820	198,890	198,870	6,03	
		R4	51,586	136,310	130,720	130,680	7,12	
		M	52,381	184,590	176,750	176,720	6,33	6,63

4. Bemerkungen

Probenahme

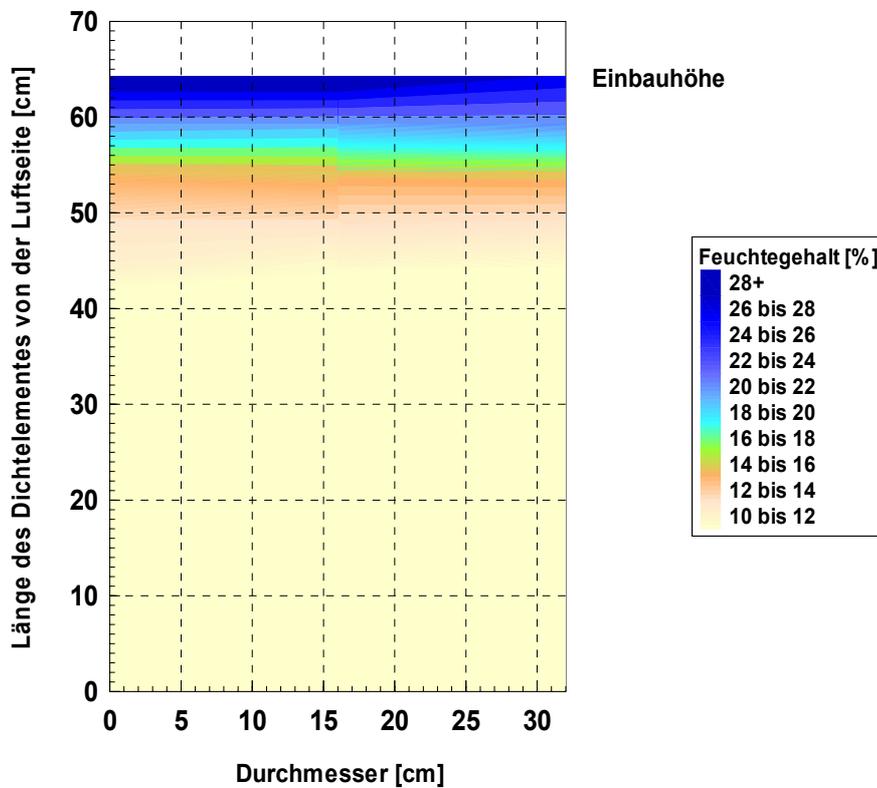
R1 -R4 Randproben in 90 ° Abstand
M Probe am Meßstreifen

Brutto= Naßgewicht

Netto= Gewicht nach Trocknung

Bemerkungen zum Versuchsablauf

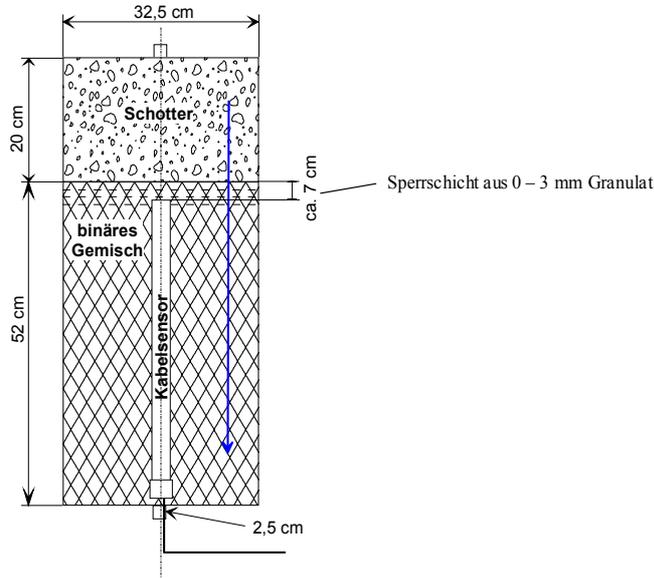
Anlage 11.10.3 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 11.11 Versuch KU 7

Anlage 11.11.1 Aufbau

(bei KU 7 fehlt obere Sperrschicht)



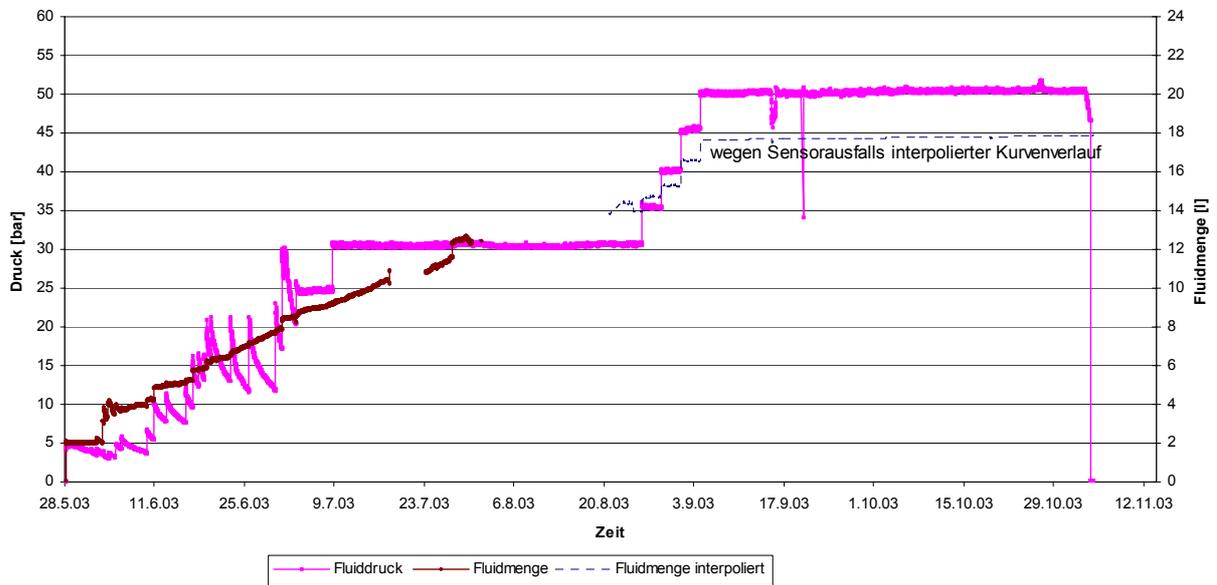
Dichtmaterial: Calcigel, binäres Gemisch
 Prüfmedium: Wasser
 Apparatur: 300 mm, Zelle 1

Durchmesser: 32,38 cm
 Einbauwassergehalt - Granulat: 0,1048 (Gesamtprobe)
 Einbauwassergehalt - Kissen: 0,1048
 Volumen Sensorkasten: 70 cm³

Lage	Höhe [cm]	Volumen [cm ³]	Masse Granulat [kg]	Masse Kissen [kg]	Gesamtdichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
Gesamt	52,5	43162	24,80	52,55	1,79	1,62

Anlage 11.11.2 Zeitlicher Verlauf des Fluiddruckes und des Flüssigkeitsverbrauches

HTV Ku 7



Anlage 11.1.3 Feuchtegehaltsbestimmung

lfd. Vers.-Nr.:	HTVKu 7	Ort:	TU BAF/Inst. für Bergbau
Durchführung:	105 °C, bezogen auf Trockenmasse	Datum:	06.11.2003
Mitarbeiter	Wasowiecz		

1. Materialien

a) Mineralgemisch Calcigel binäres Gemisch

Versuch mit Wasser

Bemerkungen zum Mineralgemisch

2. Versuchsverlauf

cm ab Bentonit-OK	Höhe ab OK Behälter cm	Lage	Tara g	Brutto g	Netto1 g	Netto2 g	w %	Mittelwert %
OK Bentonit	27	R1	52,32	128,53	97,18	97,17	69,92	
kein Feuchtemesser		R2	52,38	151,06	109,05	109,05	74,13	
		R3	52,48	160,29	115,96	115,95	69,86	
		R4	50,66	183,51	128,87	128,82	69,97	
		M	51,31	186,58	132,47	132,40	66,82	70,14
6	34	R1	52,67	175,62	132,61	132,44	54,13	
kein Feuchtemesser		R2	50,95	131,54	104,73	104,68	49,99	
		R3	51,94	143,96	113,71	113,11	50,44	
		R4	52,18	144,71	113,18	113,11	51,87	
		M	50,66	156,53	120,08	119,92	52,86	51,86
11	38	R1	53,01	144,33	122,29	122,10	32,18	
kein Feuchtemesser		R2	50,17	138,67	115,88	115,72	35,01	
		R3	52,63	148,61	123,48	123,35	35,72	
		R4	50,69	159,19	131,07	130,80	35,44	
		M	52,73	142,16	118,25	118,11	36,79	35,03
14 cm Feuchtemesser								
16	43	R1	52,99	162,37	139,98	139,54	26,38	
Kugel 1	Kugeloberkante 43,5	R2	50,66	166,37	142,13	141,74	27,04	
Abstand Rand- Kugelmitte: 9,6 cm		R3	52,48	166,76	143,52	143,13	26,07	
Abstand Feuchtemesser- Kugelmitte: 6,6 cm		R4	53,01	137,85	120,41	120,10	26,46	
		M	52,75	156,86	136,04	135,67	25,56	26,30
21	48	R1	52,47	154,53	136,17	135,77	22,52	
		R2	52,67	176,90	154,79	154,33	22,20	
		R3	53,55	174,76	152,69	152,29	22,76	
		R4	50,75	143,01	126,24	125,92	22,73	
		M	50,80	162,50	144,18	143,85	20,04	22,05
25	52	R1	52,73	174,01	154,96	154,94	18,66	
		R2	51,94	218,77	195,16	194,95	16,66	
		R3	52,18	137,64	124,44	124,47	18,22	
		R4	50,66	176,13	157,37	157,30	17,66	
		M	51,31	214,92	193,30	193,21	15,30	17,30
29	57	R1	52,38	185,01	169,32	169,16	13,57	
Kugel 2	Kugeloberkante 57,5	R2	52,32	230,76	210,62	210,25	12,99	
Abstand Rand- Kugelmitte: 8,9 cm		R3	52,67	171,49	157,34	157,30	13,56	
Abstand Feuchtemesser- Kugelmitte: 6,2 cm		R4	50,95	148,37	136,76	136,54	13,82	
		M	51,59	276,49	252,25	251,38	12,57	13,30
35	63	R1	53,01	308,74	284,23	283,83	10,79	
		R2	50,17	241,05	222,51	221,69	11,29	
		R3	52,63	266,59	245,30	244,84	11,32	
		R4	50,69	188,45	174,32	174,17	11,56	
		M	50,56	243,60	224,98	224,26	11,13	11,22

Anlage 11 – Halbtechnische Versuche

40	67	R1	51,94	261,62	241,72	240,84	11,00	
		R2	51,81	193,34	179,29	178,95	11,32	
		R3	50,78	158,44	147,60	147,47	11,35	
		R4	50,33	206,37	190,99	190,60	11,24	
		M	52,19	209,40	193,97	193,50	11,25	11,23
46	73	R1	53,01	248,10	229,85	228,98	10,87	
Kugel 3	Kugeloberkante 71,8	R2	52,75	183,50	170,90	170,55	10,99	
Abstand Rand- Kugelmittle: 8,2 cm		R3	50,66	211,64	196,60	196,04	10,73	
Abstand Feuchtemesser- Kugelmittle: 8,4 cm		R4	52,48	151,94	142,81	141,88	11,25	
		M	52,47	212,94	197,86	197,15	10,91	10,95
51	78	R1	51,27	197,10	183,19	183,13	10,59	
		R2	50,80	187,15	173,85	173,79	10,86	
		R3	52,47	241,26	223,57	223,49	10,39	
		R4	52,67	251,40	232,75	232,65	10,42	
		M	52,99	247,68	229,55	229,37	10,38	10,53

4. Bemerkungen

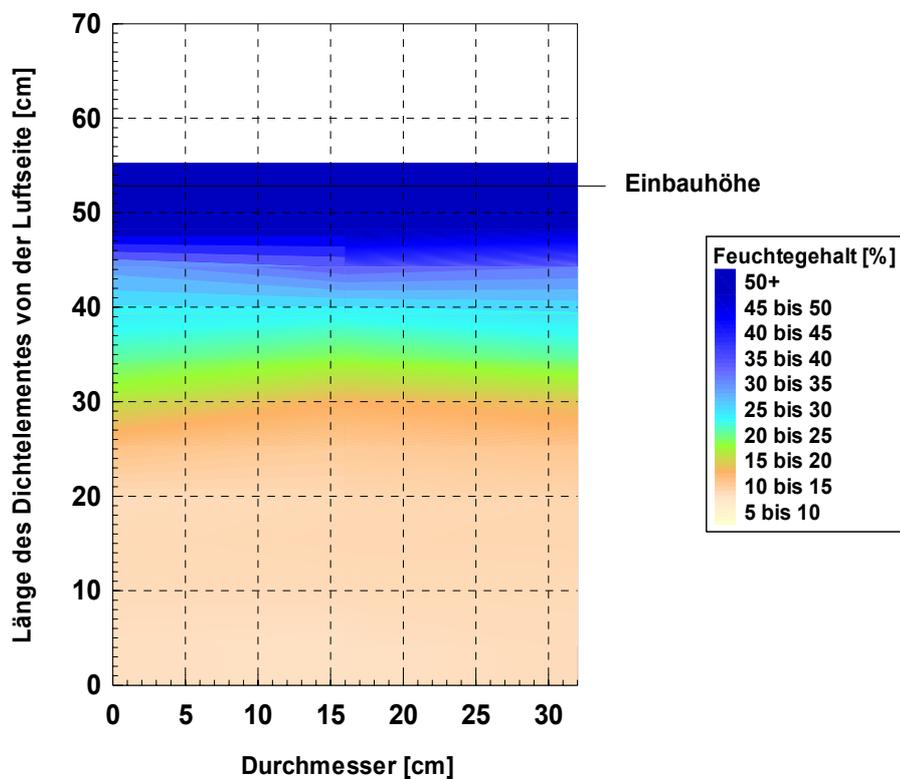
Probenahme

R1 -R4
M

Randproben in 90 ° Abstand
Probe am Meßstreifen

Brutto= Naßgewicht
Netto= Gewicht nach Trocknung

Anlage 11.11.4 Feuchteverteilung nach Ausbau



Anlage 12 Literaturlauswertung zu verschiedenen Ansätzen zur Berechnung von Mehrphasenströmungen in Bentonitmaterialien

In Tab. 1 sind die in die Auswertung einbezogenen Literaturstellen mit einer kurzen Angabe zu den untersuchten Materialien zusammengefasst.

Daraus resultierend wurden in Tab. 6 die verschiedenen Ansätze zur Berechnung der relativen Permeabilitäten zusammengefasst.

Tab. 1 Übersicht berücksichtigter Literaturstellen

<i>Quelle</i>	<i>Material</i>
C.S.Land: Calculation of Imbibition Relative Permeability for Two- and Three-Phase. Flow From Rock Properties	theoretische Ansätze
C.J.van Duijn; M.J. de Neef: Similarity solution for capillary redistribution of two phases in a porous medium with a single discontinuity; Advances in Water Resources 21, (1998), 451-461	theoretische Untersuchungen
E.Romero;A.Gens; A.Lloret: Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay, Engineering Geology 54 (1999), 117-127	Boom clay (Belgien) / Ton
S.T.Horseman; J.F.Harrington; P.Sellin: Gas migration in clay barriers, Engineering Geology 54 (1999), 139-149	Bentonit Mx80
J.Graham; K.G.Halayko; H.Hume; T.Kirkham; M.Gray; D. Oscarson: A capillarity- advective model for gas break-through in clay, Engineering Geology 64 (2002), 273-	Ton, Ton-Sand, Bentonit
H.Müller-Kirchbauer; J.Rogner; W.Marquardt; W.Friedrich: Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Deponieoberflächendichtungen aus bindigen Erdstoffen, Müll und Abfall 1/90	Ton
D.Tessier; A.Lajudie; J.-C.Petit: Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructuraä properties, Applied Geochemistry, Suppl.Issue No.1, 1992,	Ton
J.Gattermann; W.Wittke; C.Erichsen: Modelling water uptake in highly compacted betonite in environmental sealing barriers, Clay Minerals (2001)36, 435-446	Bentonit
J.Chen; J.W.Hopmans; M.E.Grismer: Parameter estimation of two-fluid capillar pressure-saturation and permeability functions, Advances in Water Resources Vol.22, No.5, 479-493, 1999	sandiger Lehm (9.3% Ton), Sand (2% Ton)
T.Kanno; H.Watamatsu: Can.Geotech.J. 29 (1992), 1102-1107	Na-Bentonit / KunigelV1
Th.J.S.Keijzer; P.J.Kleingeld; J.P.G.Loch: Chemical osmosi in compacted clayed material and the prediction of water transport, Engineering Geology 53 (1999), 151-159	Bentonit (Ankerpoort Colclay A90 batch 61202)
W. Wittke: Abdichtung von Strecken im Endlager Morsleben mit hochverdichtetem Bentonit, Geotechnik 19 (1996), Nr. 4	hochverdichteter Bentonit

<i>Quelle</i>	<i>Material</i>
M.V.Villar: Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests, Engineering Geology, Elsevier science (1999), Volume 54, page 67-73	Bentonit (almeria,Spanien)
H.W.Olsen: Hydraulic Flow through Saturated Clays, Clay and Clayminerals No.9 (1962)	Ton
Rodwell, Nash: Mechanisms and Modelling of Gas Migration from Deep Radioactive Waste Repositories, Nagra NSS/R250	Ton, geklüftet; Granulat
Full-Scale engineered Barriers Experiment in crystalline Host Rock - Pre-operational Stage summary Report, FEBEX, Publication Tecnica No.01/98	FEBEX Bentonit , kompakt, S-2
R.W.Andrews,D.W.LaFleur, S.B.Pahwa: Resaturation of backfilled Tunnels in Granite, INTERA Technologies Inc., Austin, Texas, U.S.A. (1986)	Ton MX-80
R.Pusch: Water uptake, migration and swelling characteristics of unsaturated and saturated, highly compacted bentonite, SKBF/KBS Teknisk Rapport 80-11	MX-80, Erbslöh Ca bentonit
R.Pusch: Swelling pressure of highly compacted bentonit, SKBF,KBS Teknisk Rapport 80-13	MX-80, Erbslöh bentonite
H.-J. Herbert, H.C. Moog: Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen, GRS-179 (2002)	MX-80, Calcigel, Salztone
R.Pusch: Permeability of highly compacted bentonite, SKBF/KBS Teknisk Rapport 80-16 (1980)	MX-80, Erbslöh Ca-Bentonite
B.Torstenfelt: Migration of fission products and actinides in compacted bentonite, SKB Technical report 86-14 (1986)	Bentonit
T.R.Lineham: A Laboratory Study of Gas Transport through Intact Clay Samples, Nirex- Dokumentation	Kimmeridge+London Clay
R.Miehe, N.Jockwer, K.Wieczorek, T.Rothfuchs: Qualification of Clay Barriers in Underground Repository Systems, GRS	Ton-Sand-Gemisch

Für die in der Problemstellung durchzuführenden Modellrechnungen war es erforderlich, aus den gemessenen Kapillardruckkurven (vgl. Bericht Abschnitt 3.2) für die verwendeten Materialien einen Ansatz zur Berechnung der relativen Permeabilitäten zu finden, der eine möglichst gute Übereinstimmung mit den in der Literatur veröffentlichten und an Ton getesteten Ansätzen zeigt.

Dabei wurde in zwei Schritten vorgegangen:

1. Anpassung von Modellkurven an Messkurven zur Beschreibung der Änderung des Kapillardruckes in Abhängigkeit der effektiven Sättigung durch Parameterfitting.
2. Aufstellen von Modellansätzen für die Berechnung der relativen Permeabilität mittels der gefitteten Parameter und der in der Literatur veröffentlichten Ansätze.

Es wurden Kapillardruckkurven für 4 unterschiedliche Bentonit-Formen gemessen.

Granulat, FS40, FS50 und Briketts (s. Bild 1)

Zusätzlich wurden die in /Andrews et al., 1986/ veröffentlichten Messungen an MX80-Bentonit mit ausgewertet.

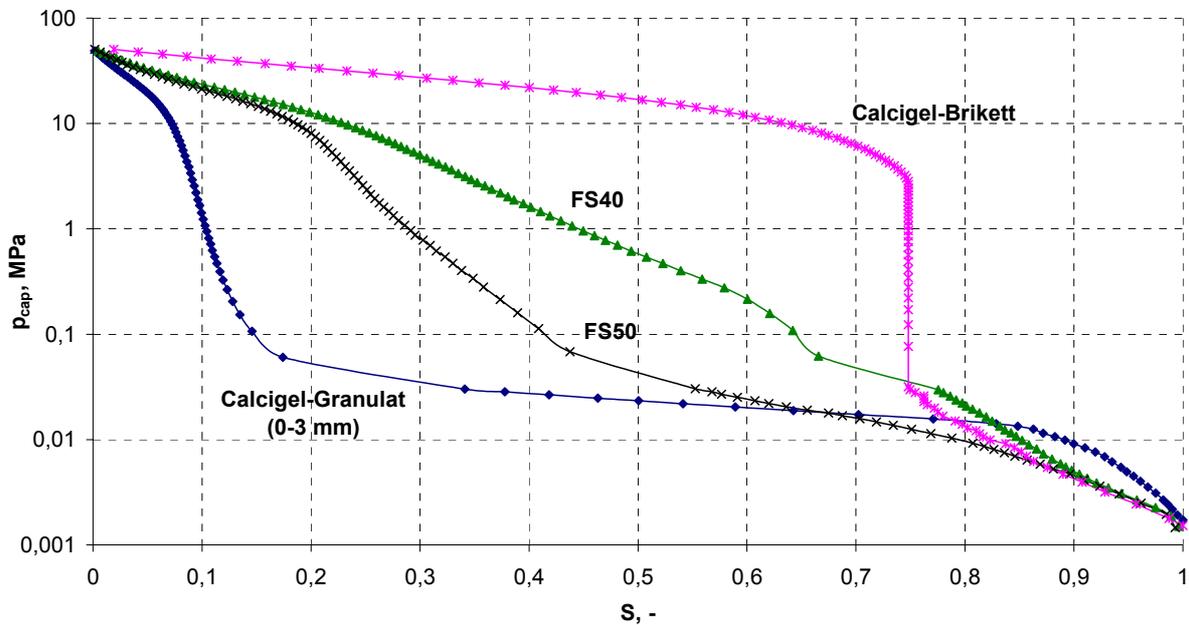


Bild 1 Messkurven für Kapillardrücke

Zum besseren Verständnis der im Folgenden dargestellten Ergebnisse sollen einige kurze Bemerkungen zur Verfahrensweise gemacht werden. Sowohl das Parameterfitting nach Levenberg-Marquardt /Draper et al., (1966)/ als auch die statistischen Einschätzungen als Gütekriterien beruhen auf der Auswertung der Differenz zwischen gemessenen und Modellwerten.

Zur Bestimmung dieser Abweichung wird die aus der mathematischen Statistik bekannte Gaußschen Fehlerquadratsumme σ^2 , im Folgenden als Zielfunktional J bezeichnet, berechnet.

$$J = \sigma^2 = \frac{1}{N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (p_i^b - p_i^g)^2$$

$p^g = p(S)$: gemessener Kapillardruck

$p^b = p(S, f_p)$: berechnete Spiegelhöhe zur Zeit t im Volumenelement i,j,k

N_h : Anzahl Messwerte

f_p : Fittparameter je nach Ansatz

Mathematische Suchverfahren (z.B. Gauß-Newton, Levenberg-Marquardt, Gradienten- oder Simplexverfahren) sind Algorithmen, die nach bestimmten Kriterien die Fittparameter so verändern, dass die Zielfunktion J minimal wird.

Als Güte wird dann die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{J}$ betrachtet, aus der sich wiederum das so genannte Bestimmtheitsmaß berechnen lässt:

Es existieren Tabellen mit Prüfwerten, anhand derer eingeschätzt werden kann, ob bei einem errechneten Wert für das Bestimmtheitsmaß die ermittelte Modellkurve die Messwerte signifikant widerspiegeln. Dabei bedeutet der Wert 1 eine optimale Anpassung. Da der Wert stark abhängig ist von der Anzahl der Messwerte (Je mehr Werte, desto günstiger wird das Bestimmtheitsmaß), sollte bei der Güteeinschätzung besser die Standardabweichung betrachtet werden, da diese eine mittlere, maßeinheitenbezogene Abweichung ausweist. Außerdem bildet sie die Grundlage zur Berechnung der Konfidenzintervalle für die gefitteten Parameter. Diese geben einen Bereich ein, innerhalb dessen der Parameter variieren kann. Das heißt, die mittels Suchverfahren gefitteten Parameterwerte sind keine Absolutwerte, es kann stets nur ein Wertebereich mit einer bestimmten statistischen Sicherheit ermittelt werden.

Parameter, für die kein Konfidenzbereich angegeben wird, sind nicht sensitiv, d. h. deren Wert hat nur minimalen Einfluss auf die Güte der Anpassung. Für weitere Berechnungen wird der Vorgabewert verwendet, da er das Ergebnis nur unwesentlich beeinflusst.

Die gewählten grafischen Darstellungen zum optischen Vergleich der Ergebnisse zeigen zum Einen die in Abbildung 1 gewählte Form. Anschaulicher bezüglich der Abweichungen Messkurve – Modellkurve ist die 2. Form, in der Messwerte gegen Modellwerte aufgetragen sind. In diesem Fall muss eine optimale Anpassung einen linearen Verlauf diagonal über das Diagrammfeld ergeben. Je größer die Abweichung von dieser Geraden ist, desto schlechter ist die Anpassung.

PARAMETERFITTING FÜR GEMESSENE KAPILLADRUCK-SÄTTIGUNGSKURVEN

Für die Messkurven wurden bekannte (van Genuchten, Brooks-Corey) bzw. speziell für Ton modifizierte (Corey, Kahr) Modellansätze mittels Parameterfitting (Levenberg-Marquard) angepasst.

(A) van Genuchten:

$$P_c = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(S_{we}^{-1/m} - 1 \right)^{1/n}$$

(B) Brooks-Corey

$$P_c = P_0 \cdot S_{we}^{-1/\lambda}$$

(C) Modifizierter Ansatz Corey (Guenero et al.)

$$P_c = P_0 \cdot S_{ew}^{(2-3 \cdot \lambda)/\lambda}$$

(D) Ansatz nach Kahr (/Andrews et al., 1986/)

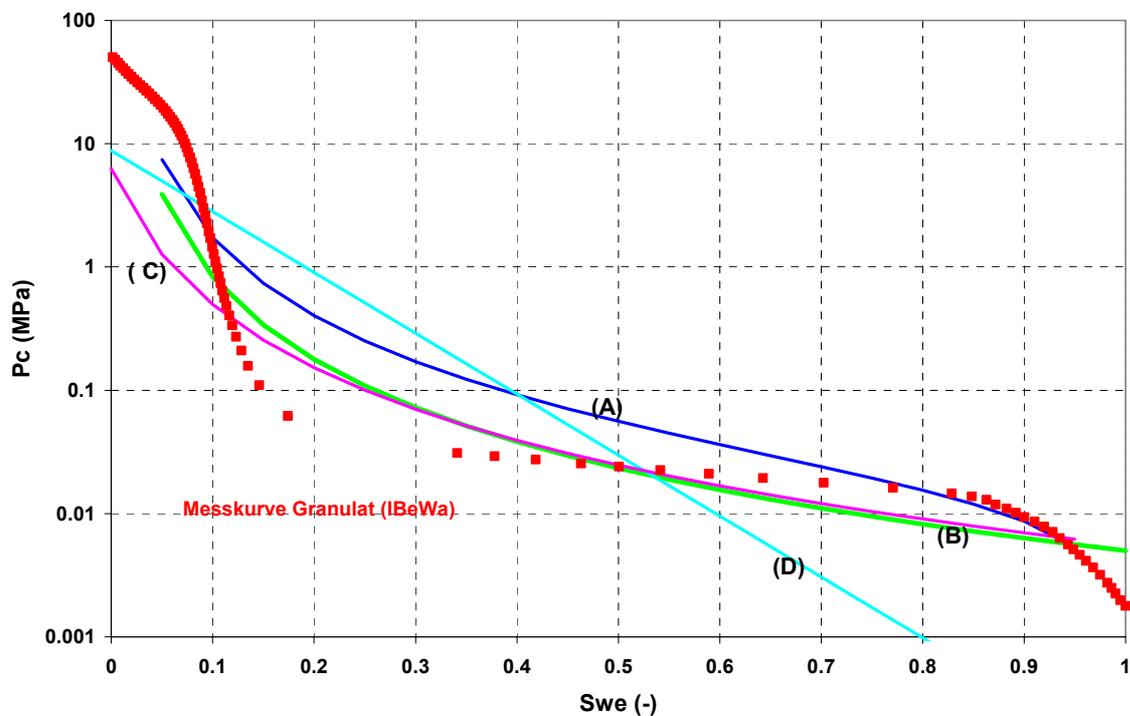
$$P_c = P_0 \exp(-\alpha W_s)$$

$$\text{mit } W_s = S_{we} \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \cdot \frac{\rho_w}{\rho_d}$$

Granulat

Tab. 2 Ansätze mit entsprechenden Parametern und deren statistischen Sicherheit (90%) für Granulat

Ansatz	Parameter	mittlerer Wert	Konfidenz- grenzen	Standard- abweichung MPa	r
(A)	α	72,8	-		0,997
	m	0,28	0,166 – 0,384	131,1	
	n	1,7	1,146 – 2,203		
(B)	P_d	0,005		20,0	0,999
	λ	0,45	0,44 – 0,47		
(C)	P_d	0,0062	- 0,001 – 0,012	229,2	0,990
	λ	2,9	-		
(D)	P_0	8,8	-	15,6	0,999
	α	40,5	37,7 – 42,8		

**Bild 2** Darstellung Messkurve und Modellkurven (berechnet mit den in Tab. 2 angegebenen Parametern) für Granulat

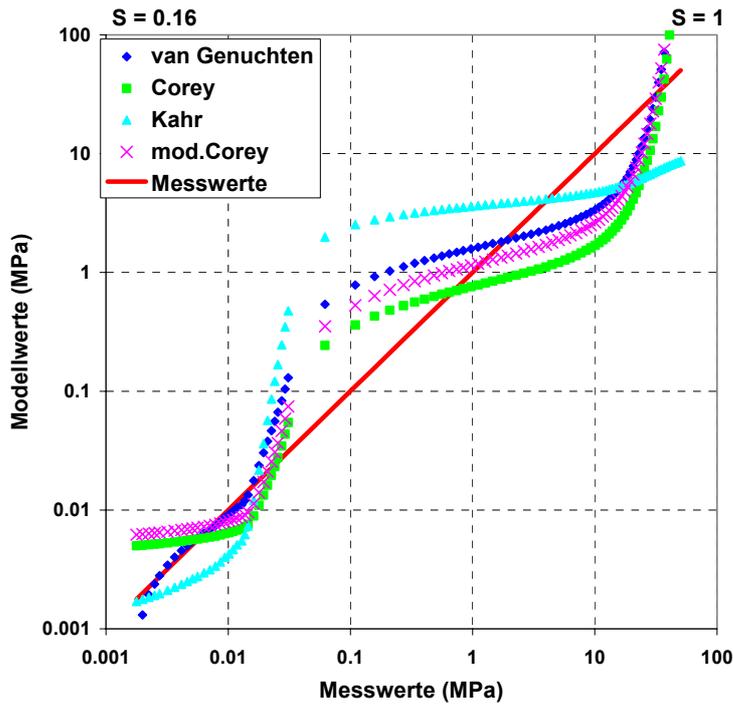


Bild 3 Abweichung der Modellwerte von den Messwerten bei verschiedenen Ansätzen - Granulat

Formsteine FS 40

Tab. 3 Ansätze mit entsprechenden Parametern und deren statistische Sicherheit (90 %) für FS40-1

Ansatz	Parameter	mittlerer Wert	Konfidenzgrenzen	Standardabweichung MPa	r
(A)	α	0,001			
	m	12,7		11,3	0,999
	n	0,4	0,39 – 0,42		
(B)	P_d	0,04	0,003 – 0,1		
	λ	0,37	0,26 – 0,47	12,6	0,999
(C)	P_d	0,035	-0,04 – 0,05	287,7	0,983
	λ	6,5	-		
(D)	P_0	93,9	-		
	α	51	50,6 – 51,3	14,56	0,999

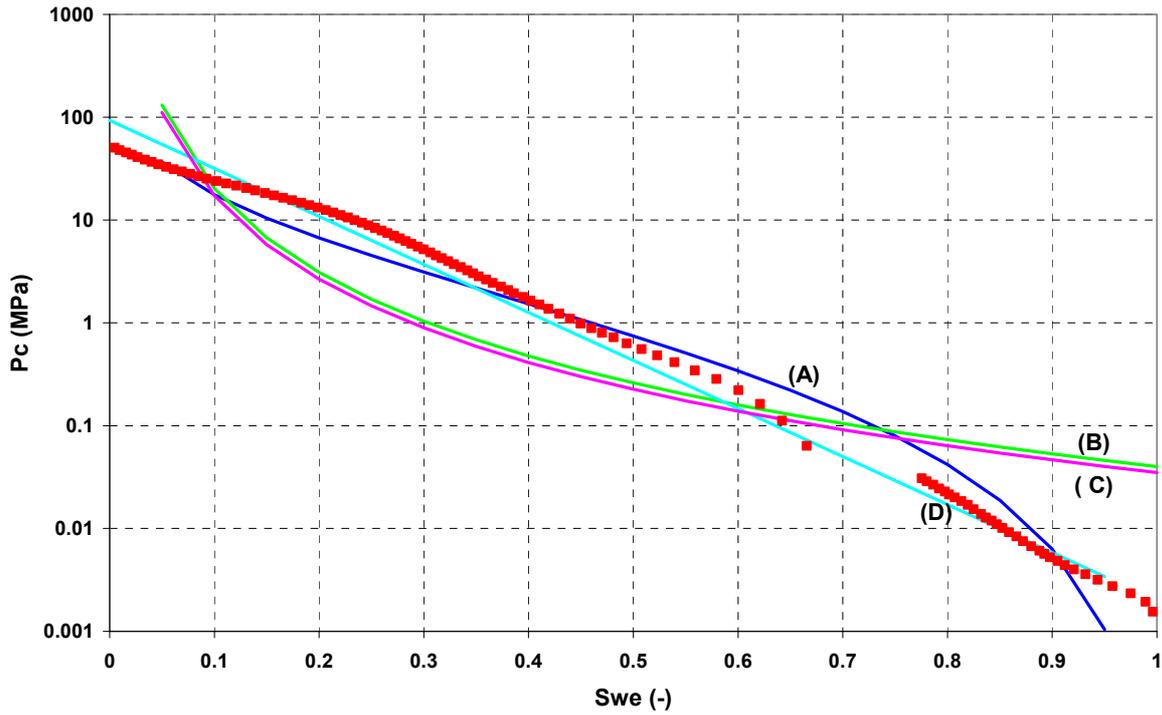


Bild 4 Darstellung Messkurven und Modellkurven (berechnet mit den in Tab. 3 angegebenen Parametern) – FS 40

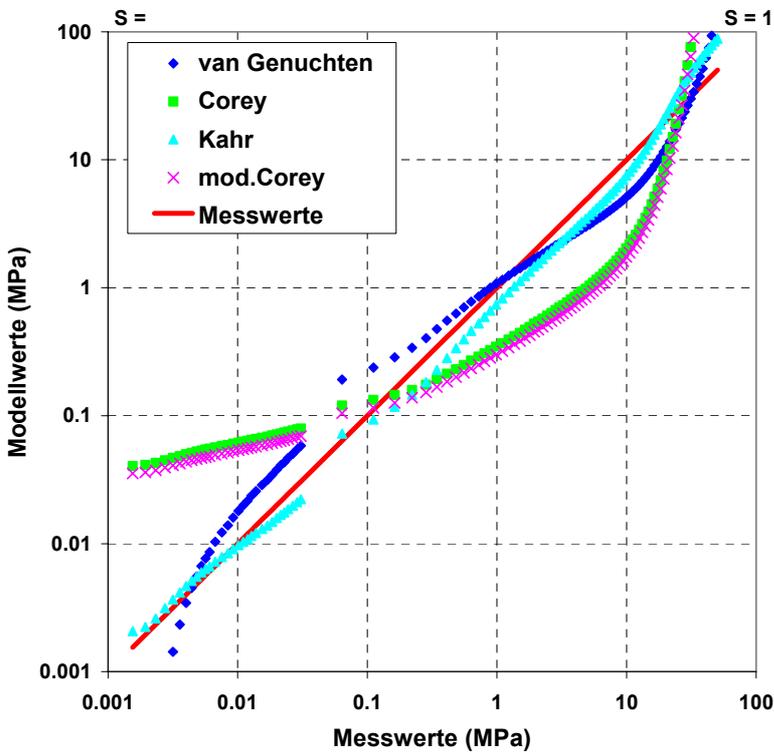


Bild 5 Abweichung der Modellwerte von den Messwerten bei verschiedenen Ansätzen – FS 40

Formsteine FS 50

Tab. 4 Ansätze mit entsprechenden Parametern und deren statistische Sicherheit (90%) für FS50- 1

Ansatz	Parameter	mittlerer Wert	Konfidenz-grenzen	Standard-abweichung MPa	r
(A)	α	2,12	-		
	m	1,28	1,15 – 1,4	67,65	0,999
	n	0,72	0,59 – 0,84		
(B)	P_d	0,01	- 0,02 – 0,10	435,7	0,964
	λ	0,39	0,32 – 0,45		
(C)	P_d	0,007	-0,014 – 0,024	578,8	0,936
	λ	6,8	-		
(D)	P_0	43	-		
	α	53	51,4 – 53,6	15,2	0,9999

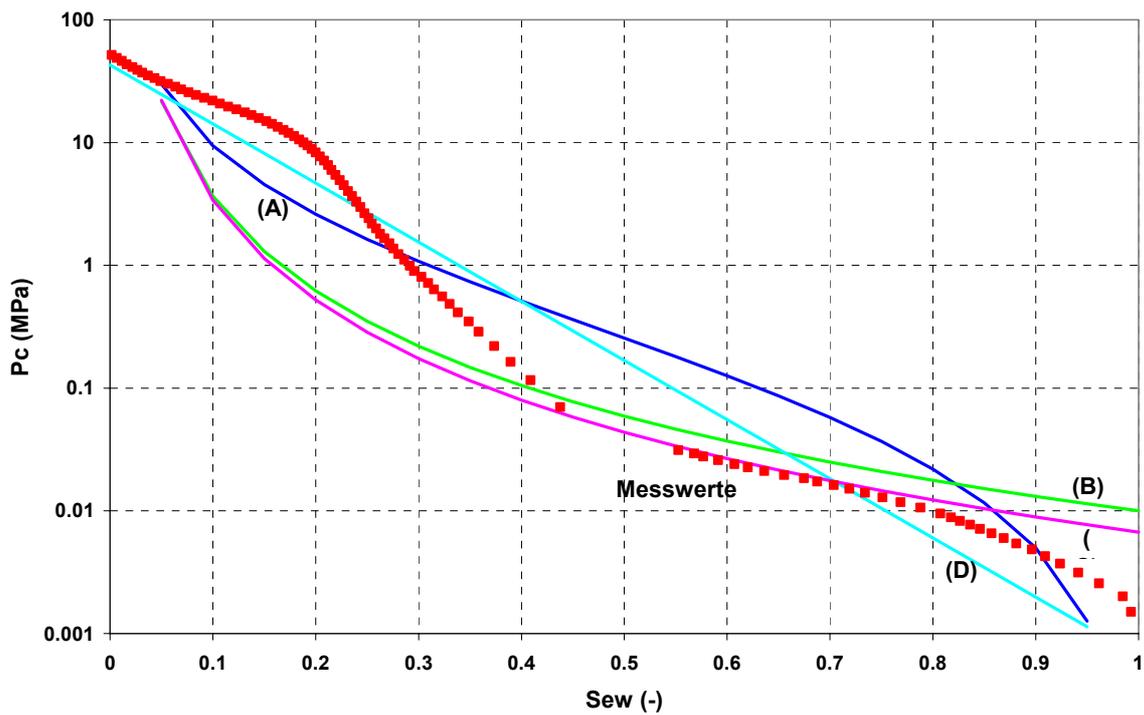


Bild 6 Darstellung Messkurve und Modellkurven (berechnet mit den in Tabelle 4 angegebenen Parametern) FS 50

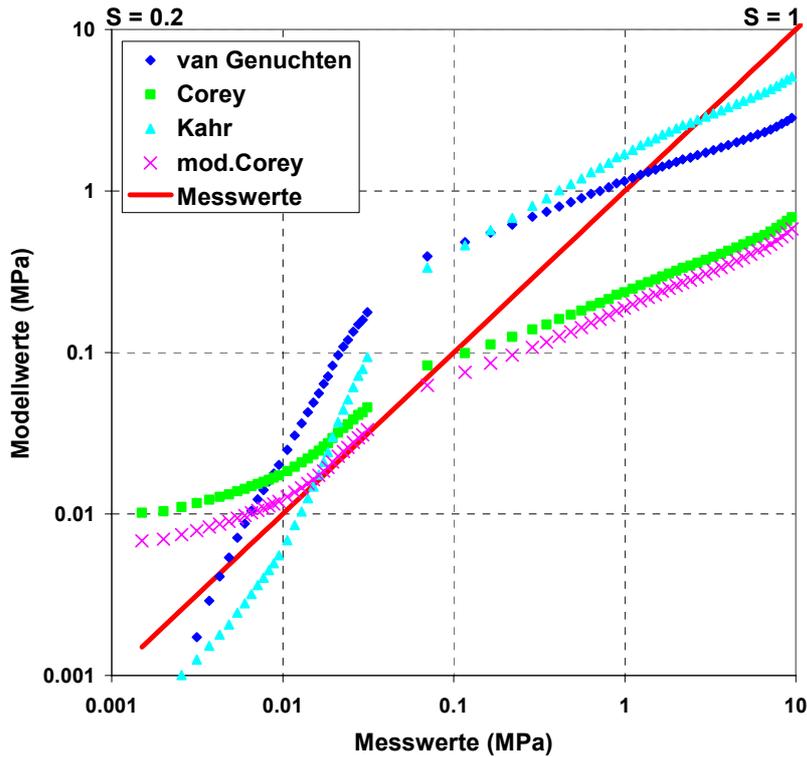


Bild 7 Abweichung der Modellwerte von den Messwerten bei verschiedenen Ansätzen – FS 50

Bentonit MX-80/NAGRA

Tab. 5 Ansätze mit entsprechenden Parametern und deren statistische Sicherheit (90%) für MX – 80/NAGRA

Ansatz	Parameter	mittlerer Wert	Konfidenz-grenzen	Standard-abweichung MPa	r
(A)	α	31,3	-		
	m	0,26	0,13 – 0,37	107	0,999
	n	1,16	0,69 – 1,56		
(B)	P_d	0,0062	- 0,074 – 0,075	12,2	0,999
	λ	0,28	0.18 – 0.37-		
(C)	P_d	0,04	0,013 – 0,063	9,9	0,999
	λ	19			
(D)	P_0	96,2	-		
	α	49,9	47,6 – 52,3	58,6	0,999

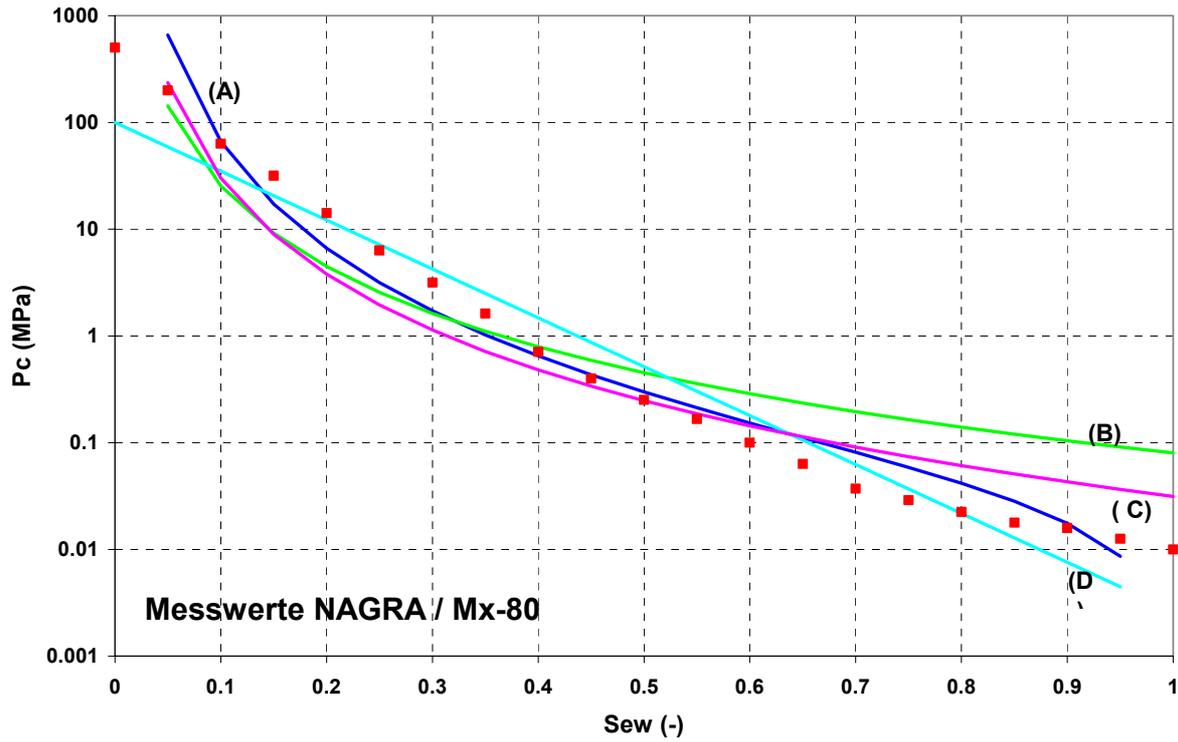


Bild 8 Darstellung Messkurve und Modellkurven (berechnet mit den in Tab. 5 angegebenen Parametern) - NAGRA

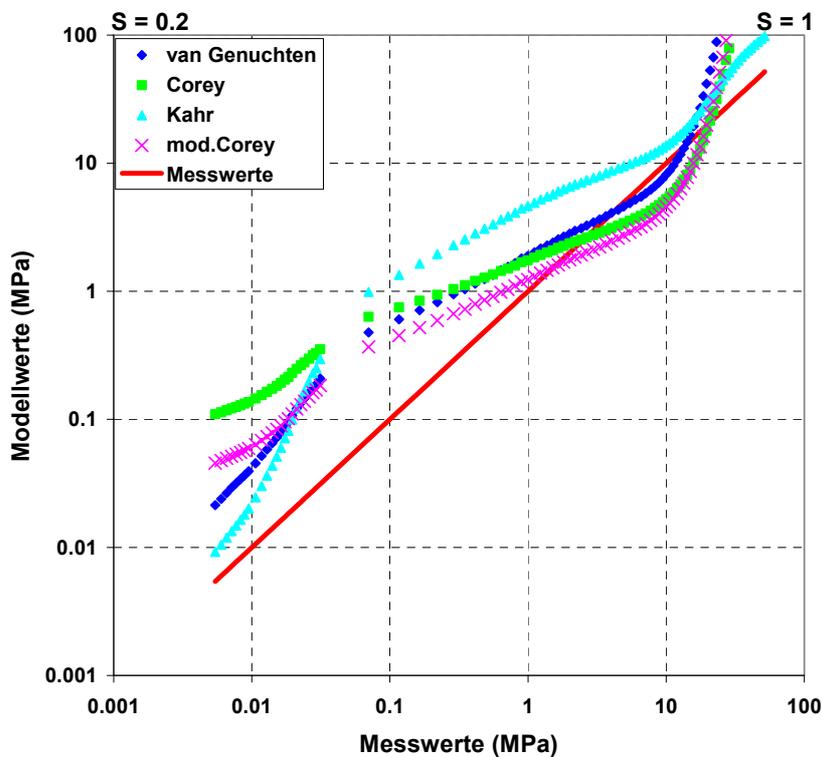


Bild 9 Abweichung der Modellwerte von den Messwerten bei verschiedenen Ansätzen - NAGRA

Tab. 6 Zusammenstellung verschiedener Modellansätze für Kapillardruck-Sättigungsfunktionen und relative Permeabilitäten

Modellansatz	Parameter	Kapillardruckfunktionen	Funktionen zur Berechnung der relativen Permeabilitäten
VGM & VGB (van Genuchten- Mualem/Burdin e)	$\Theta_{ws}, \Theta_{wr}, k$ α_{vg}, n, η	$S_{ew} = \frac{1}{\left[1 + (\alpha_{vg} h_c)^n\right]^m}$	VGM: ($m = 1 - 1/n$): $k_{rw} = S_{ew}^\eta \left[1 - \left(1 - S_{ew}^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$ $k_{rw} = S_{ew}^2 \left[1 - \left(1 - S_{ew}^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]$ VGB: ($m = 1 - 2/n$): $k_{rw} = (1 - S_{ew})^\eta \left[1 - S_{ew}^{\frac{1}{m}}\right]^{2m}$ $k_{rw} = (1 - S_{ew})^2 \left[1 - S_{ew}^{\frac{1}{m}}\right]^m$
BCM & BCB (Brooks/Corey- Mualem/Burdin e)	$\Theta_{ws}, \Theta_{wr}, k$ h_e, λ, η	$S_{ew} = \left(\frac{h_e}{h_c}\right)^\lambda$	BCM: $k_{rw} = S_{ew}^{2+2/\lambda}$ $k_{rw} = (1 - S_{ew})^\eta \left[1 - S_{ew}^{1+1/\lambda}\right]^2$ BCB: $k_{rw} = S_{ew}^{3+2/\lambda}$ $k_{rw} = (1 - S_{ew})^2 \left[1 - S_{ew}^{1+2/\lambda}\right]$
LNM (Lognormal Distribution- Mualem)	$\Theta_{ws}, \Theta_{wr}, k$ h_m, σ, η	$S_{ew} = F_n \left[\ln(h_m/h_c)/\sigma\right]$	$k_{rw} = S_{ew}^\eta \left\{F_n \left[F_n^{-1}(S_{ew}) + \sigma\right]\right\}^2$ $k_{rw} = (1 - S_{ew})^\eta \left\{1 - F_n \left[F_n^{-1}(S_{ew}) + \sigma\right]\right\}^2$ $F_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$
BRB (Brutsaert- Burdine)	$\Theta_{ws}, \Theta_{wr}, k,$ β, γ	$S_{ew} = \frac{\beta}{\beta + h_c^\gamma}$	$k_{rw} = S_{ew}^2 \left[1 - (1 - S_{ew})^{1-2/\gamma}\right]$ $k_{rw} = (1 - S_{ew})^{3-2/\gamma}$
GDM (Gardner- Mualem)	$\Theta_{ws}, \Theta_{wr}, k, \alpha_g$	$S_{ew} = \left(1 + \frac{1}{2} \alpha_g h_c\right) e^{-\frac{1}{2} \alpha_g h_c}$	$k_{rw} = e^{-\alpha_g h_c}$ $k_{rw} = \left(1 - e^{-\frac{1}{2} \alpha_g h_c}\right)^2$
Kahr	P_c^0, α	$P_c = P_c^0 \exp(\alpha W)$	
Corey- modifiziert nach Sampath/Keiglin	k_∞		$k_{rG} = (1 - S_w/0.7)^{1.5} (1 - S_w)^2$ $k_{rw} = \left(\frac{S - S_{WR}}{1 - S_{WR}}\right)^4 \frac{k_{abs}}{k_\infty}$
Romero (mod. Van Genuchten)	λ		$k_{rw} = S_e^\lambda$ mit $\lambda = 3.76 - 7.94$ (Boom Clay)

Forschungsvorhaben

**Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-
Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung**

Förderkennzeichen 02C0810

Abschlussbericht Teil II

Projektleiter: Dr.-Ing. Alexander Brandelik

IMK-TRO: Dr.-Ing. Alexander Brandelik
Dr.-Ing. Rainer Schuhmann
Dipl.-Ing. Franz Königer
Alexander Rohleder

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 10. 2003

Institution: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Mitglied der Hermann von
Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (HGF),
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Herrmann-von-Helmholtzplatz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Karlsruhe, 24. 5. 2004

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen
02C0810 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt
bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorhabensziele	3
2	Voruntersuchungen zur Entwicklung einer Messmethode.....	3
2.1	einfache Versuche mit Bentonit und Leitungswasser	3
2.2	einfache Versuche mit Bentonit und Salzlösung.....	3
2.3	Optimierung der Sensorkabel.....	4
2.4	Messungen im Frequenzbereich.....	4
2.5	Messungen im Zeitbereich	5
2.6	Konzeption eines Messsystems	5
3	Aufbau der halbtechnischen Versuche BRA1 und BRA2	5
3.1	Aufbau der Bentonitschichten im Druckbehälter.....	5
3.1.1	Halbtechnischer Versuch BRA1	6
3.1.2	Halbtechnischer Versuch BRA2.....	6
3.2	Einbau der Sensorkabel	7
3.3	Aufbau der Messeinrichtung und Messmethode.....	8
3.4	Datenaufnahme.....	8
4	Versuchsablauf	9
4.1	Halbtechnischer Versuch BRA1	9
4.2	Halbtechnischer Versuch BRA2	10
5	Diskussion der Ergebnisse	11
5.1	Halbtechnischer Versuch BRA1	11
5.1.1	Feuchtigkeitsverlauf auf den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln.....	11
5.1.2	Feuchtigkeitsverlauf auf Sensorkabel M	12
5.1.3	Vergleich der Feuchtepegel an den Sensorkabeln.....	12
5.1.4	Abbau der Füllung	13
5.1.5	Zusammenfassung des ersten halbtechnischen Versuchs BRA1	13
5.2	Halbtechnischer Versuch BRA2	13
5.2.1	Feuchtigkeitsverlauf an den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln.....	15
5.2.2	Feuchtigkeitsverlauf an dem mittleren, einseitig angeschlossenen Sensorkabel	16
5.2.3	Feuchtigkeitsverlauf nach dreimonatiger Ruhezeit	16
5.2.4	Ausbau des Materials aus dem Druckbehälter	16
5.3	Auswertung nach dem Wassergehalt	17
5.4	Bewertung verschiedener Mischungsregeln.....	18
5.5	Vergleich der Feuchteniveaus aus der Laufzeitmessung und aus dem Rückbau.....	20
5.6	Abschätzung der einsetzbaren Sensorlänge	21
5.7	Beständigkeit der Sensorkabel	21
6	Zusammenfassung	22
7	Literatur.....	24
8	Anhang	25

1 Vorhabensziele

Die Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen erfordert die Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien (UTD). Dazu gehört auch die Messung der Feuchteverteilung in Barrieren, die zur Erfassung des statischen Zustandes, zur Überwachung des ungewollten Zutritts von Lösungen von außerhalb und zur Datenerfassung für Langzeitanalysen erforderlich ist.

Als Dichtmaterial in solchen Barrieren werden vorwiegend Tone bzw. Bentonite verwendet, die durch ihr Quellvermögen bei Zutritt von Wasser oder Salzlösung die Abdichtung bewirken. Der Druck des Gebirges kann abhängig von der Teufe des Bauwerkes bis zu 25 Mpa (250 bar) betragen.

Bekanntes Feuchtemessverfahren sind hinsichtlich der Genauigkeit, der Zuverlässigkeit und der Erfassung eines volumenmäßigen Wassergehaltes unter den Bedingungen in einer UTD für einen längerfristigen Einsatz nicht geeignet.

Das Projektziel ist die Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung mittels eines dielektrischen Messverfahrens ([1] bis [3] und [5] bis [11]). Damit sollen Langzeitmessungen zur Feuchteüberwachung und zur Ausbreitung von Feuchtefronten möglich sein, unabhängig von der Art der zu lagernden Abfälle. Die Messungen sollen zerstörungsfrei mit der volumetrischen Erfassung der Feuchte konzipiert werden.

Die Eigenschaften von Bentonit als Dichtungsmittel für Abschlussbauwerke sind zu ermitteln und Modellrechnungen für die Messmethode aufzustellen, um das Verständnis der Vorgänge zu vertiefen und auf eine allgemeine Basis zu stellen. Das Vorhaben wird in Kooperation und in enger Abstimmung mit den Arbeiten der MFPA Weimar im BMBF-geförderten FuE-Vorhaben mit den Förderkennzeichen 02C0800/02C0810 ausgeführt. Das MFPA Weimar übernimmt die Materialuntersuchungen von verschiedenen Bentonitmaterialien unter Laborbedingungen sowie die sehr grundlegenden Modellberechnungen zur Entwicklung einer Messmethode. Außerdem erstellt sie ein Prognosemodell für die Feuchteausbreitung im Dichtelement.

Die Aufgabe des Forschungszentrums Karlsruhe ist es, eine dielektrische Feuchtemessmethode zu entwickeln und auf ihre Eignung bei der Detektion von Feuchtefronten in Bentonitschichten zu überprüfen. Dazu werden die hier entwickelten Sensoren in halbtechnischen, realitätsnahen Versuchen getestet.

2 Voruntersuchungen zur Entwicklung einer Messmethode

2.1 einfache Versuche mit Bentonit und Leitungswasser

Versuche im Labor mit Bentonitpulver und normalem Leitungswasser ohne Druck haben ergeben, dass sich nahezu sofort eine feuchte Zone im Bentonit an der Kontaktstelle ausbildet und der Quellvorgang in Gang gesetzt wird. Diese Dichtungszone ist sehr schmal (ca. 1 cm) und breitet sich im Verlauf von 10 Tagen nur noch unwesentlich über Diffusion aus.

2.2 einfache Versuche mit Bentonit und Salzlösung

Mit Salzwasser (gesättigte Lösung, >300 g/l) weitet sich die Feuchtefront im Bentonitpulver deutlich aus. Das Gemisch Bentonitpulver und Salzlösung bleibt flüssig und es bildet sich keine Dichtungszone aus. Nur in entsprechend hoher Verdichtung des Bentonits von über 1,6 g/cm³,

unter der Verwendung von gepressten Bentonitkissen (Dichte ca. 2 g/cm^3) und Bentonitgranulat, reicht der Quelldruck aus, um eine Dichtwirkung zu erzielen.

2.3 Optimierung der Sensorkabel

Die in das Dichtungsbauwerk eingebrachten Sensoren dürfen kaum Volumenanspruch haben und die natürliche Hydraulik des Materials nicht beeinflussen; demgegenüber steht der Anspruch auf eine feinvolumige Messwertauflösung. Sie dürfen durch die Druckeinwirkung und den Kontakt mit der gesättigten Salzlauge in ihrer Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden sollen ihre Messfähigkeit über lange Zeiträume behalten.

Der eigentliche Sensor wird als passives, feuchteempfindliches Flachbandkabel ausgeführt, mit dem der Dielektrizitätskoeffizient (DK) des Materials gemessen wird, in dem es eingebettet ist. Grundlage zur Entwicklung dieser Sensoren bilden die Patente 19501196 DE, 19755052 DE und 19833331.5 DE vom Forschungszentrum Karlsruhe. Mit solchen Sensoren soll der volumetrische Wassergehalt des Bentonits unabhängig vom Druck durch Frequenz- oder Zeitbereichsmessungen bestimmt werden. Mit der Anwendung von Feldsimulationen für den Einsatz von Feuchtesensoren in stark verlustbehafteten Materialien werden die Sensoreigenschaften optimiert. Laboruntersuchungen in Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Verlusten verifizieren die hohe Sensitivität sowohl im Bereich niedriger dielektrischer Verluste (geringer elektrischer Leitfähigkeit), als auch in einer Umgebung mit hoher elektrischer Leitfähigkeit.

2.4 Messungen im Frequenzbereich

Im Frequenzbereich werden Messungen zur Bestimmung der Feuchte in einem möglichst breiten Frequenzumfang (<100 MHz bis 1000 MHz) zur Erfassung der dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Materials durchgeführt. Laboruntersuchungen an Bentonitmaterialien haben ergeben, dass für die Messung in salinärer Umgebung mit ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit, bzw. dielektrischen Verlusten, nur der Frequenzbereich zwischen etwa 500 und 1000 MHz übrig bleibt. Darunter sind die Messergebnisse nur sehr eingeschränkt zu verwenden. Das Wasser setzt aus dem Bentonit gelöste Ionen frei, dadurch erhöhen sich seine elektrische Leitfähigkeit und damit seine dielektrischen Verluste (Imaginärteil des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten (DK)) deutlich. Ist die Güte, das ist das Verhältnis des Realteils zum Imaginärteil des DK, kleiner als 1, führen die üblicherweise benutzten Mischungsregeln (Verknüpfung des DK mit dem Wassergehalt) zu unakzeptablen Fehlern. Schon eine Befeuchtung von 25 % mit Leitungswasser ergab eine Güte in dem Frequenzbereich von 0,6, mit einer Salzlösung sinkt der Wert deutlich ab.

Die Ergebnisse der Bentonitsorten Calcigel und MX80 unterscheiden sich nur wenig voneinander, bei Calcigel mit 25 % Leitungswasser betragen die Einschränkungen im Frequenzbereich 100 bis etwa 300 MHz.

Für eine Lokalisierung der Wasserfront durch die Anwendung der Fouriertransformation reicht das nicht aus. Die fehlenden niederfrequenten Komponenten im Messsignal würden die Rekonstruktion der Feuchte entlang des Kabels nur in einem sehr groben Maßstab erlauben. Aus diesem Grund wurde auf die weitere Anwendung der Frequenzbereichsmethode verzichtet und nur die Zeitbereichsmethode weiterverfolgt.

Die Änderung des DK gegenüber Temperaturänderungen ist in dem Frequenzbereich von 300 bis 1000 MHz klein und modellierbar. So ändert sich z.B. bei einem volumetrischen Wassergehalt von 30 % des DK nahezu linear von 30 auf 40, wenn die Temperatur um 40 Kelvin ansteigt.

2.5 Messungen im Zeitbereich

Das TDR-Verfahren (Time Domain Reflectometry) stammt aus dem Bereich der Fehlerortung in Elektrokabeln. Es basiert auf der Messung der Laufzeit und der Amplitude eines in eine Leitung eingespeisten und am Kabelende reflektierten Signals und wird sehr häufig zur Bestimmung der Bodenfeuchte angewendet. Die Laufzeit korreliert dabei mit dem Realteil des Dielektrizitätskoeffizienten des Materials, das die Leitung umgibt, während die Amplitude mit dem Imaginärteil des DK verbunden ist und auf die dielektrischen Verluste im Material reagiert. Entsprechend der Anstiegszeit und der Impulslänge kann mit dem Messsignal ein breites Frequenzspektrum zugeordnet werden.

Das Verfahren kann zusammen mit den im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Sensorkabeln volumenhaft die dielektrischen Eigenschaften in der Umgebung erfassen. Durch die Laufzeitmessungen sind Fehlereinflüsse aufgrund von Temperatur und Salzgehalt auf das Messsignal gering. Nachteilig ist dabei die Dichteabhängigkeit des Messverfahrens. Die maximale Länge der Sensorkabel ist begrenzt durch die starke Dämpfung der Signale in einem Material mit hoher elektrischer Leitfähigkeit. Die Zeitauflösung der Messung sinkt stark ab, da besonders die höherfrequenten Anteile im Messsignal abgeschwächt werden.

Versuche im Labor zeigen eine gute Auflösung sowohl hinsichtlich der Feuchte im Bentonitmaterial als auch der örtlichen Auflösung.

2.6 Konzeption eines Messsystems

Damit beschränkt sich ein Messsystem zur Feuchtemessung auf ein TDR-Messgerät, die Sensorkabel, eventuell einen Kabelumschalter (Multiplexer) zur Beaufschlagung mehrerer Sensorkabel mit einem Messsignal und die notwendige Ansteuerungssoftware auf einem Messrechner (*Bild 1*). Die Einzelkomponenten dazu wurden beschafft und zu einem Messsystem zusammengeschaltet. Die notwendige Software zur Steuerung des TDR-Messgerätes und zur Übernahme der Messdaten wurde entwickelt und an die Gegebenheiten der Versuchsaufbauten angepasst.

3 Aufbau der halbtechnischen Versuche BRA1 und BRA2

3.1 Aufbau der Bentonitschichten im Druckbehälter

Die praktische Umsetzung der halbtechnischen Versuche nach den Vorgaben des Forschungszentrums Karlsruhe mit dem Einbau der Dicht- und Kontrollschichten und der Messeinrichtung in einen Druckbehälter führte die Bergakademie/TU Freiberg in ihrer Technikumshalle aus (*Bild 2*). Der Druckbehälter hat einen Innendurchmesser von 0,8 m und eine nutzbare Höhe von 1,8 m.

Ein erster, im Januar und Februar 2002 betriebener halbtechnischer Versuch, zeigte die prinzipielle Anwendung der Messtechnik mit dem TAUPE-Feuchtemesssystem. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde ein zweiter Versuch aufgebaut und von April bis Dezember 2002 durchgeführt.

3.1.1 *Halbtechnischer Versuch BRA1*

Der Aufbau folgt der Skizze in Bild 3:

- ganz unten befindet sich eine Schicht von 0,2 m Mächtigkeit aus einem Gemisch aus Schotter, Kies und Split zur Verbesserung der Wasserverteilung über den gesamten Querschnitt.
- darüber ist eine Bentonitschicht (Calcigel, 0,25 m, grobe Kissen, Dichte von $1,33 \text{ g/cm}^3$),
- gefolgt von einer Sandschicht (0,05 m Kies/Split),
- einer weiteren Calcigelschicht (0,25 m, Kissen und Granulat, Dichte von $1,59 \text{ g/cm}^3$),
- einer zweiten Sandschicht (0,05 m),
- einer dritten Calcigelschicht (0,6 m, Kissen und Granulat, Dichte $1,61 \text{ g/cm}^3$)
- und darüber einer Schotterschicht zur Abdeckung und zum Abschluss nach oben hin.

Der Versuchsaufbau war von der Bergakademie/TU Freiberg ursprünglich für die Anwendung von Süßwasser konzipiert, weshalb die Dichte der Schichten weniger als $1,6 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Um eine Annäherung an die Aufgabe der Entwicklung einer Feuchtemessmethode in salinärer Umgebung zu erhalten, wird eine schwache Salzlösung von 50 g NaCl pro Liter Wasser verwendet. Dadurch ändert sich allerdings die Quellfähigkeit des Bentonits, was die Dichtwirkung der Anordnung in Frage stellt. Der Ionenaustausch zwischen Bentonit und Salzlösung sowie das Auskristallisieren von Salz beeinflussen die Ausbildung des Quelldrucks und seine Heterogenität wesentlich. Das führt dazu, dass das Zusammenwirken der schwachen Salzlösung mit der niedrigen und inhomogenen Dichte der binären Bentonitmischung in den Dichtungsschichten einen zu geringen Quelldruck erzeugt und Wegsamkeiten im Material und besonders entlang der Sensorkabel begünstigt. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Messverfahrens konnte damit aber demonstriert werden, da die Verfolgung des Verlaufs der Feuchtefronten davon nicht berührt wird. Allerdings erfolgte die Ausbreitung der Salzlösung sehr schnell, da auch der Anfangsdruck zu hoch gewählt war. Zusätzlich ragten die Sensorkabel nach oben hin aus der Dichtungsschicht heraus, wodurch das Wasser bis in die obere Schotterschicht durchbrechen konnte. Diese Ergebnisse stellten sich bereits nach kurzer Zeit ein, deshalb wurde beschlossen den Versuch abubrechen und einen zweiten, mit besser angepassten Parametern, aufzubauen und durchzuführen.

3.1.2 *Halbtechnischer Versuch BRA2*

Der zweite Versuch wird mit einer konzentrierten salinaren Lösung durchgeführt, wofür die Dichte besonders im Bentonit deutlich höher sein muss, als im ersten Versuch. Um eine hohe und besonders eine homogene Verdichtung bei dem sukzessiven Aufbau der Bentonitschichten durch mechanische Maßnahmen zu erzielen, mussten die tatsächlichen Positionen der Sensorkabel gegenüber der Skizze in *Bild 4* leicht variiert werden. Sie sind eher Richtung Rand verlegt und auf einem Drei-Viertel Kreis angeordnet; der prinzipielle Aufbau folgt aber *Bild 4*:

- ganz unten befindet sich eine Schicht von 0,2 m Mächtigkeit aus einem Gemisch aus Schotter, Kies und Split zur gleichmäßigen Verteilung der eingepressten Wasserlösung über den gesamten Querschnitt des Druckbehälters. Diese Schicht ist mit einem Vlies (Geotextil) abgedeckt, mit dem eine zusätzliche Homogenisierung der Wasserverteilung erreicht werden soll. Gleichzeitig wird verhindert, dass feines Granulatmaterial aus dem binären Bentonitgemisch nach unten in die Schotterschicht absinkt und die gleichmäßige Wasserzufuhr über die gesamte Querschnittsfläche behindert.
- darüber ist eine 0,25 m starke Calcigelschicht aus groben Kissen und feinem Granulat mit einer Dichte von $1,65 \text{ g/cm}^3$ eingebaut,

- gefolgt von einer 0,10 m dicken Sandschicht,
- einer weiteren 0,25 m mächtigen Calcigelschicht, ebenfalls aus Kissen und Granulat mit einer Dichte von $1,65 \text{ g/cm}^3$,
- einer zweiten 0,10 m dicken Sandschicht,
- einer dritten 0,70 m mächtigen Calcigelschicht aus Kissen und Granulat mit einer höheren Dichte von $1,70 \text{ g/cm}^3$
- und darüber einer 0,2 m starken Schotterschicht zur Abdeckung.

Durch den verbesserten Einbau der Bentonitschichten im zweiten Versuch sollte der Wasserdurchbruch entlang der Kabel, wie er im ersten Versuch mit zunehmendem Druck auftrat, vermieden werden. Außerdem entspricht die höhere Dichte den tatsächlichen Umgebungsbedingungen in einem salinaren Verschlussbauwerk unter der Einwirkung des umgebenden Gebirgsstockes. Um die natürlichen Bedingungen in einer salinaren Umgebung zu modellieren, wurde in den Druckbehälter von unten eine konzentrierte Salzwasserlösung von 250 g NaCl pro Liter Wasser eingepresst.

Die Sandschichten mit 0,05 m Dicke waren im ersten Versuch (BRA1) wegen der schwankenden Dichte in den Materialien in den Messsignalen nicht gut zu erkennen. Im zweiten Versuch (BRA2) sind dickere Sandschichten (0,10 m) eingebaut, die zum einen als Ausgleichselement dienen, indem sie darin das Wasser und damit den Druck über die gesamte Querschnittsfläche der Schicht verteilen und so lokale Druckspitzen, z.B. im Bereich der Sensorkabel verhindern. Zum anderen dienen sie gleichzeitig als eindeutige Marker für die TDR-Messungen.

3.2 Einbau der Sensorkabel

Nach *Bild 3* und *Bild 4* wurden drei lange TAUPE-Sensorkabel (2,4 m) mit koaxialen Verbindungskabeln von jeweils 5 m Länge an jedem Ende in einer symmetrischen U-Form sternförmig und mit den Anschlüssen nach oben eingebracht. Ein weiteres, kurzes Sensorkabel (1,2 m) mit einem Koaxialkabel nur an einem Ende ist zentral in den Druckbehälter eingebaut.

Die insgesamt vier Sensorkabel mit sieben elektrischen Anschlüssen sind aus Flachbandkabel mit einem Dielektrikum von 3 mm Stärke und 70 mm Breite hergestellt und mit koaxialen Verbindungskabeln (5 m) an das Time-Domain-Reflectometry (TDR) Messsystem (Kabeltester Tektronix 1502B) angeschlossen. Die Flachbandkabel (TAUPE-Sensorkabel) bestehen aus drei äquidistant in ein Dielektrikum eingebettete flache Kupferleiter [6, 7, 8, 9, 12]. Der mittlere Leiter führt das Signal, während die beiden Außenleiter miteinander verbunden sind und der Signalarückführung in einer quasikoaxialen Anordnung dienen.

Die Übergänge von dem Koaxialkabel zum Sensorkabel und das Ende des einseitig angeschlossenen Sensorkabels in der Mitte sind zum Schutz gegen Beschädigung und gegen eindringendes Wasser in ein Kästchen eingebettet und mit Harz ausgegossen.

Einen höheren Schutz gegen das in dem ersten halbtechnischen Versuch erfolgte Vordringen des Wassers entlang der Kabel bis zu der Oberkante der oberen Schotterschicht sollte dadurch erreicht werden, dass die Enden der Sensoren mit den Anschlusskästchen an das Koaxialkabel sich noch innerhalb der Bentonitschicht befinden. Es sind nur noch die Koaxialkabel hindurchgeführt, wodurch ein zusätzlicher Dichteffekt nach oben zur Schotterschicht stattfindet.

Beim Einbau der Sensoren war darauf geachtet worden, dass der tiefste Punkt bei allen Sensorkabeln etwa auf gleicher Höhe liegt. Die frei hängenden Sensorkabel erschweren den gleichförmigen Einbau in das umgebende Material, so dass geringfügige Unterschiede in den Auswertekurven zu erwarten sind. Außerdem ist bei dem mittleren Kabel der tiefste Punkt durch das Vergusskästchen am Ende definiert, die damit aufgenommenen Messkurven zeigen deshalb einen Versatz gegenüber den symmetrisch eingebauten Sensorkabeln, da das eigentliche Messkabel erst etwa sechs Zentimeter höher beginnt.

Im Gegensatz zu dem ersten Versuch ist die Position der langen, beidseitig angeschlossenen Sensoren geändert. Um einen besseren Zugang für die mechanische Verdichtung zu gewährleisten und um mit der Messung eine größere Fläche abzudecken, war geplant, die Sensorkabel nicht mehr radial einzubauen, sondern um 45° gegen den Radius gedreht. Außerdem ist der Abstand der parallelen Kabelhälften zueinander vergrößert. Die Einschränkungen beim mechanischen Einbau der Sensoren erforderten die beschriebene Änderung gegenüber *Bild 4*. Der Aufbau der Schichten um die Kabel herum erfolgte sukzessiv und mit möglichst gleicher Verdichtung.

3.3 Aufbau der Messeinrichtung und Messmethode

Die Messeinrichtung besteht aus einem Kabeltester der Firma Tektronix vom Typ 1502B, der mit einer seriellen Schnittstelle für die Kommunikation und die Datenübertragung zu dem angeschlossenen Messrechner ausgerüstet ist. Das Tektronix 1502B arbeitet nach dem Time-Domain-Reflectometry (TDR)-Verfahren. Ein kurzer Puls mit einem sehr steilen Anstieg von etwa 300 ps wird auf die koaxiale Leitung mit dem angeschlossenen TAUPE-Sensorkabel aufgegeben. Dieser Puls breitet sich auf der Leitung aus und wird an jeder Störstelle entlang des Sensorkabels reflektiert [6 - 12]. Störstellen sind der Übergang Koaxialkabel – Sensorkabel, Rückwirkungen entlang des Sensorkabels über den komplexen Dielektrizitätskoeffizient von dem umgebenden Material und das Ende des Sensorkabels. Die zeitliche Zuordnung der am Eingang des Tektronix ankommenden reflektierten Signale ergibt ein Abbild von dem Zustand des Materials, in welches das Sensorkabel eingebettet ist. Eine zunehmende Feuchte des umgebenden Materials verlängert die Laufzeit des Pulses auf der Leitung und ändert aufgrund der zunehmenden elektrischen Leitfähigkeit die Amplitudenverhältnisse im Messsignal. Gegenüber einer Referenzmessung im trockenen Zustand ändern sich die Kurven mit dem Vordringen der Feuchtefront im tieferen Bereich des Druckbehälters, also am Ende der Messkurve, zunehmend, während der Anfang mit der Referenzmessung übereinstimmt. Aus dem Verlauf der Änderungen erkennt man den Verlauf der Front und kann über die Zuordnung der geometrischen Länge aus der Einbautiefe der Sensorkabel zu der elektrischen Laufzeit eine sehr gute Lokalisierung des Ortes vornehmen. Die eingebauten Sandschichten erleichtern die Ortsbestimmung über ihre Markerfunktion zusätzlich. Die Änderung der Signalamplitude gegenüber der Referenzmessung während des Versuchsverlaufs ergibt eine gute Aussage über den Grad der Feuchte in der entsprechenden Tiefe des Aufbaus. Die Bewertung des tatsächlichen Wassergehaltes mit hoher Genauigkeit erfolgt normalerweise über die Bestimmung der Gesamtlaufzeit des Pulses entlang des Sensorkabels, wobei die Feuchteverteilung entlang des Sensors über eine aufwändige Rekonstruktionsrechnung möglich ist. Aus Gründen, die in Kapitel 5.3 und 5.4 erläutert werden, ist es in dem Bentonitmaterial allerdings nur mit sehr hohem Aufwand möglich, eine Zuordnung der Messdaten zu einem exakten Wassergehalt zu bilden.

Der Messrechner stellt über ein Softwareprogramm die notwendigen Parameter, das sind der Ausschnitt im Zeitbereichs, die Verstärkung und die Anzahl der Mittelungen mehrerer Messungen für die Rauschreduzierung am Tektronix ein und übernimmt die Messdaten.

3.4 Datenaufnahme

Die koaxialen Verbindungskabel werden nacheinander mit dem Tektronix 1502B verbunden. Ein entsprechendes Softwareprogramm liest die Laufzeit-Daten aus dem Tektronix aus und stellt die Messwerte auf einem Bildschirm dar. Um den gewünschten Ausschnitt aufzuzeichnen, muss eine Startzeit (Laufzeit kurz vor dem Anfang eines Sensorkabels) und eine Stoppzeit (bei den

symmetrischen Sensoren die Laufzeit jenseits der Kabelmitte, beim einseitigen Sensor nach dem Eintreffen der Reflektion am offenen Leitungsende) eingestellt sein.

Die Ermittlung der Mitte der symmetrischen Sensorkabel gestaltet sich etwas schwierig, da wegen der auftretenden Mehrfachreflektionen, bedingt durch den inhomogenen Aufbau des Materials in der Sensorumgebung, dieser Punkt nicht ortsgenau zu bestimmen ist.

Zur Erfassung der korrekten Höhe der Feuchtefront ist das einseitig angeschlossene Kabel besser geeignet. Dort gibt es eine eindeutige Reflektion am offenen Kabelende, die sowohl optisch aus dem Diagramm, als auch messtechnisch gut zu erfassen ist.

Ein Datensatz umfasst 251 Messpunkte. Diese Messdaten werden auf Datenträger abgespeichert und später grafisch ausgewertet.

Zusätzlich zu den Sensordaten sind der Druck im Druckbehälter, die eingebrachte Wassermenge und die Signale zweier einfacher Feuchtesensoren zur groben Erfassung der Wasserhöhe in den Sandschichten aufgenommen und gespeichert worden. Die Sensoren bestehen aus einem Plättchen Isoliermaterial, auf dem zwei abisolierte Drahtenden befestigt sind. Die Drähte sind aus dem Druckbehälter herausgeführt und mit einem Niederfrequenzgenerator verbunden. Die Ausgangsspannung des Generators wird überwacht. Erreicht das Wasser den Sensor, wird das Signal kurzgeschlossen und ergibt dadurch eine eindeutige Bewertung des Wasserstandes. Um damit eine kontinuierliche Messung in dem gesamten Volumen zu gewährleisten, müssten allerdings sehr viele solche Sensoren eingebaut und exakt vermessen sein. Dieser Aufwand wäre beträchtlich und erlaubt letztendlich nur eine Aussage über den aktuellen Stand des Wassers. Für die zusätzliche Kontrolle und den örtlichen Vergleich mit der TDR-Messung sind die einfachen Feuchtesensoren gut geeignet. In *Bild 5* sind unterschiedliche Signalamplituden der Sensoren erkennbar. Das rührt von einem falschen elektrischen Abschluss des Signalanschlusses her und wurde im Verlauf des Versuches beseitigt.

4 Versuchsaufbau

Nach dem Einbau der verschiedenen Dicht- und Sandschichten, der Installation der Kabel in den Druckbehälter, sowie dem Auflegen des Deckels und seiner Montage wurden die Messungen begonnen. Eine Nullmessung aller Kabel im trockenen Zustand dient als Referenz für die Ermittlung des Vordringens der Wasserfront im Behälter. Die Vorgänge sind für beide halbtechnischen Versuche getrennt beschrieben.

4.1 Halbtechnischer Versuch BRA1

Eine Pumpe drückt die Salzlösung (50 g/l) aus einem 100 l-Vorratsbehälter mit einem Anfangsdruck von etwa 4,5 bar unten in den Druckbehälter ein. In *Bild 5* sind Druckverlauf und verbleibende Wassermenge im Vorratsbehälter aufgezeichnet. In dem Diagramm sind die auftretenden Druckspitzen mit nachfolgender Entspannung auf den Regelmechanismus der Pumpe zurückzuführen.

Im Verlauf der Versuchsdurchführung erfolgten reihum an allen Sensoranschlüssen ständig Messungen. Da die Wasserzunahme im Behälter am Anfang schneller geschah als vermutet, wurde der Vordruck auf unter 1 bar abgesenkt und die Wasserzufuhr beim Erreichen der ersten Sandschicht (erster einfacher Feuchtesensor spricht an) gestoppt und in diesem Zustand eine komplette Messreihe durchgeführt. Aus *Bild 5* ist ersichtlich, dass aufgrund des eingebrachten Wasservolumens von etwa 65 Litern die Kabel bereits feucht sein mussten, was sich durch die Messwerte bestätigte (*Bild 8* bis *Bild 11*).

Die Weiterführung des Versuches zeigte die Zunahme der Wasserfront mit einem weiteren Stopp in der zweiten Sandschicht beim Ansprechen des zweiten Feuchtesensors. Danach war an

einigen Kabeln ein Durchbruch der Wasserfront über die gesamte Sensorlänge zu beobachten. Die eingebrachte Wassermenge betrug etwa 70 bis 80 Liter.

In diesem Zustand blieb das System etwa drei Tage, dann erfolgte der Versuch einer leichten Druckerhöhung (ca. 1,5 bar). Der Druck baute sich rasch ab, das heißt, ein Verdichtungseffekt im Bentonit war nicht in dem erwarteten Maße aufgetreten. Weitere Druckerhöhungen bis etwa 20 bar im weiteren Verlauf der Untersuchungen führten zu keinem stabilen Druck im Behälter, deshalb wurde Mitte Februar der Versuch abgebrochen, um einen zweiten mit geänderten, an die realen Begebenheiten in einem Salzbergwerk angepassten Parametern, zu installieren.

4.2 Halbtechnischer Versuch BRA2

In Abänderung der Verhältnisse des ersten halbtechnischen Versuchs wird die Salzlösung (jetzt 250 g/l, das entspricht einer stark konzentrierten Lösung) aus dem 100 l-Vorratsbehälter bei niedrigen Drücken nicht mit der Pumpe direkt, sondern über einen Druckbehälter (*Bild 2*), im Hintergrund links) eingepresst. Damit kann ein Druckbereich zwischen etwa 1 bar und 16 bar vorgegeben werden. Der Druckverlauf ist dann wesentlich stabiler als im Pumpenbetrieb.

In *Bild 6* sind Druckverlauf und Wasserverbrauch aufgezeichnet. Daraus ist ersichtlich, dass der Druck während der ersten zwei Wochen konstant bei etwa 1 bar bleibt. Es fließt nur so viel Wasser nach, wie das Bentonit aufnehmen kann. Bei der Druckerhöhung im weiteren Verlauf steigt jedes Mal die zufließende Wassermenge an, bleibt dann aber nahezu konstant. Die Druckerhöhung erfolgt nicht in einem großen Sprung, sondern in kleinen Schritten über mehrere Tage verteilt, um dem System Zeit zu geben, sich zu stabilisieren. Das Bentonit erfüllt seine Dichtwirkung, vermutlich hat sich, im Gegensatz zum ersten Versuch, durch den Quelldruck gleich zu Beginn eine dünne, dichtende Schicht ausgebildet, die durch die Druckerhöhung weiter vorangetrieben wird. Es wird nur jeweils soviel Wasser eingebracht, um den Druck zu halten, deshalb kann sich die Dichtungsschicht langsam ausbreiten, ohne dass sich ein Durchbruch ausbildet.

Oberhalb etwa 10 bar wird auf den Pumpenbetrieb umgeschaltet, dort zeigen sich die höheren Schwankungen aufgrund des schlechteren Regelmechanismus der Pumpe. Es ergeben sich Druckspitzen mit anschließendem Abfall auf ein niedrigeres Druckniveau. Aus dem Verlauf der verbrauchten Wassermenge über der Zeit ist zu ersehen, dass die Versuchsanordnung bis zu Drücken von etwa 70 bar dicht ist. Dieser Druck wurde nur etwa einen Tag anstehen gelassen, da an dem unteren Flansch des Druckbehälters bereits Undichtigkeiten auftraten.

Während dem Ansteigen des Wassers erfolgten reihum an allen Sensoranschlüssen mehrmals wöchentlich Messungen.

Nach Beendigung des Versuchs stand der ungeöffnete Druckbehälter im Verlauf des Umbaus der Versuchshalle gute drei Monate in drucklosem Zustand. Dieser Vorgang wird in der Natur so nicht auftreten, deshalb ist der weitere Verlauf nur von geringer Relevanz für das Ergebnis. Absicht war es, einerseits heraus zu finden, ob nach dieser Zeit die Ergebnisse der vorigen Messungen mit der Druckerhöhung reproduzierbar sind und um andererseits mehr Zeit für die Einwirkung der salinaren Umgebung auf die Sensorkabel zu haben. Aus dem Zustand der Sensorkabel können nach Abschluss des Versuches Rückschlüsse auf ihre Standfestigkeit in der salinaren Lösung gezogen werden.

Um das System nicht zu überlasten, wurde bei dem Wiederanfahren mit einem niedrigen Druck begonnen und dieser langsam gesteigert. Aus Zeitgründen konnte der Druck nur bis maximal 20 bar gefahren werden. Anschließend erfolgten der Rückbau des Versuchs und die Auswertung der Messungen.

5 Diskussion der Ergebnisse

Im Gegensatz zum Aufbau des ersten halbtechnischen Versuchs, bei dem bei einigen Kabelsensoren bereits nach kurzer Zeit ein Durchbruch der Salzlösung zum oberen Ende des Bentonitaufbaus erfolgte, tritt derartiges bei dem zweiten Versuch über den Druckbereich von ca. 1 bar bis 70 bar bei keinem der Sensoren auf. Die Feuchtefront hat sich sehr gleichmäßig und homogen über den Querschnitt ausgebreitet.

Bild 7 stellt eine Messung bei dem ersten Versuch an einem beidseitig anschließbaren Sensor dar, hier ist die Impulsantwort des Kabels 2 von einem Ende aus über seine gesamte Länge aufgezeichnet. Man erkennt die geringere Dichte in der unteren Bentonitschicht an der höheren Amplitude in der Mitte des Kabels. In Richtung Ende des Sensorkabels ergibt sich durch die Dämpfung des Pulses entlang dem Kabel aufgrund der dielektrischen Eigenschaften des Dichtungsmaterials und die auftretenden Mehrfachreflektionen eine Verschleifung des Impulsverlaufs. Der Übergang zum Koaxialkabel am Ende des Sensors kann im Gegensatz zu dem am Anfang nicht mehr gut aufgelöst werden.

Deshalb wird für die Auswertung nur die Laufzeit bis etwas über die Mitte eines Sensorkabels hinaus aufgezeichnet und dafür von beiden Enden her ausgemessen. Der Übersichtlichkeit halber werden nicht alle durchgeführten Messzyklen besprochen, sondern nur diejenigen, die eine Änderung gegenüber vorangegangenen Ergebnissen zeigen.

5.1 Halbtechnischer Versuch BRA1

In den *Bild 8* bis *Bild 11* sieht man deutlich die Auswirkung der zunehmenden und höher steigenden Feuchte im Ausgangssignal des Tektronix-Kabeltesters. Die mit „trocken“ bezeichnete Messung stellt die Referenz für alle weiteren Ergebnisse dar. Daraus kann auch die Mitte bei den symmetrisch eingebrachten Sensorkabeln abgelesen werden. Die angegebenen Höhen beziehen sich auf den Boden des Druckbehälters und sind nur ungefähre Anhaltspunkte. Es sind folgende Zeitpunkte der Messungen beschrieben:

- trockener Zustand (= Referenz; 16.01.2002)
- Einbringung einer größeren Menge an Salzlösung bis zu einem Niveau in Höhe des tiefsten Punktes der Sensorkabel (0,32 m; Druck ca. 4 bar; 16.01.2002)
- weitere Wasserzufuhr (0,5 m; Druck ca. 4 bar; 16.01.2002)
- weitere Wasserzufuhr (0,8 m; Druck ca. 4 bar; 16.01.2002)
- Stehen lassen, dann Versuch der Druckkonstanz bei 1 bar (23.01.2002)
- vorsichtige Druckerhöhung bis 10 bar (11.02.2002)
- weitere Erhöhung bis 20 bar (18.02.2002)
- Versuch der Druckhaltung bei 20 bar (23.02.2002)

5.1.1 Feuchtigkeitsverlauf auf den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln

Die beidseitig angeschlossenen Sensoren weisen im trockenen Zustand bei den Messungen von beiden Seiten einen ähnlichen Kurvenverlauf mit einem ausgeprägten Maximum auf (siehe beispielsweise in *Bild 8*). Das Maximum zeigt die Lage des U-Bogens am tiefsten Punkt der Messanordnung an. Die eingebrachten Sandschichten sind als Bereiche mit niedrigerer Dichte sichtbar, wobei die untere Sandschicht auf Grund der vergleichbaren Dichte von der darunter liegenden groben Bentonitschicht nicht klar zu trennen ist.

Die im Folgenden angegebene Höhe ist der Wert beginnend am Boden des Druckbehälters.

Die Messung bei einem Wasserstand von ca. 0,32 m, knapp über dem untersten Punkt der eingebrachten Sensorkabel, hat bereits eine leichte Eindellung im Signalverlauf. Der Punkt, bis

zu dem das Wasser angestiegen ist, wird durch die Abweichung der Messkurve von derjenigen im trockenen Zustand beschrieben.

Bei ca. 0,5 m befindet sich die untere Sandschicht. Der erste separate Feuchtesensor in dieser Schicht hat angesprochen und wird als Vergleichswert für die Höhe verwendet. Der Verlauf der Messwerte ist bei beiden Enden der Sensoren sehr ähnlich. Abweichungen sind durch einen etwas unsymmetrischen Einbau zu erklären.

Die Feuchtefront verläuft auch bei etwa 0,8 m bei beiden Messungen eines Sensors in gleicher Höhe. Hier befindet sich die zweite Sandschicht, ebenfalls durch einen separaten Feuchtesensor erfasst.

Das Ziel, einen stationären Zustand herzustellen, bei dem eine Dichtung in den Bentonitschichten erreicht wird, konnte mit der Fortsetzung des Versuches mit zunehmendem Druck nicht erreicht werden. In den *Bild 8* bis *Bild 10* ist klar zu erkennen, dass mit dem Erreichen des Drucks von ca. 20 bar das Wasser bei allen Sensorkabeln durchgebrochen ist. Dennoch lässt sich eine steigende Durchfeuchtung des Bentonits erkennen, da sich zum einen die Laufzeit erhöht und das Ende der Kurven weiter nach rechts wandert, zum anderen die Amplitude entlang des Sensors absinkt, bis sich ein annähernd konstanter Wert über die Sensorlänge einstellt.

Die Spitze am Anfang der Kurven zeigt den Einfluss des Vergusskästchens mit dem Übergang des Koaxialkabels zum Sensorkabel.

5.1.2 Feuchtigkeitsverlauf auf Sensorkabel M

Das im Zentrum des Druckbehälters angebrachte Sensorkabel M (= Mitte; *Bild 11*) ist nur an einem Ende mit einem Koaxialkabel verbunden, hat aber an beiden Enden Vergusskästchen. Aus der Art des Anschlusses am Ende resultiert, dass im Gegensatz zu den übrigen Sensorkabeln die Kurven am Ende stark ansteigen (Leerlauf). Damit ergibt sich eine eindeutige Bestimmung des Leitungsendes aus dem Kurvenverlauf und eine bessere Zuordnung des Wasserniveaus.

Es ist klar zu erkennen, dass das trockene Kabel die kürzeste Laufzeit hat, mit zunehmendem Feuchtepegel nimmt diese zu und der Anstieg am Ende wandert nach rechts. Gleichzeitig sinkt die Amplitude ab, bis zu der geometrischen Höhe, die dem Stand der Feuchtefront entlang des Kabels entspricht.

Da das Sensorkabel erst nach dem Vergusskästchen auf die Feuchte reagiert, und möglicherweise dieses Kabel etwas höher eingebracht wurde, als die übrigen Kabel, ergibt sich für die Wasserhöhe 0,32 m der gleiche Verlauf wie bei dem trockenen Kabel. Erst dann macht sich die Feuchte bemerkbar. Das Vergusskästchen am Anfang und der obere Teil des Kabels befinden sich in Material mit einer geringeren Gesamtdichte, deshalb bildet sich der starke Höcker am Anfang aus.

5.1.3 Vergleich der Feuchtepegel an den Sensorkabeln

In *Bild 12* sind die Feuchteniveaus der Sensorkabel bezogen auf das Vergusskästchen aufgetragen. Das Ende der Kabel im trockenen Zustand ist auf ein Niveau von etwa 115 cm bezogen. Dies entspricht der tatsächlichen Länge bis zum tiefsten Punkt der symmetrisch angeschlossenen Sensoren. Das mittlere Kabel (120 cm lang) ragt deshalb höher heraus und fängt wegen dem Vergusskästchen am Ende erst etwa sechs Zentimeter später an Wasser zu sehen. Die untere Sandschicht wird von allen Kabeln, außer Kabel M gut reproduziert, während die obere Sandschicht schon größere Abweichungen zeigt. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass das Wasser an den verschiedenen Sensoren unterschiedlich stark aufsteigt. Die Messung in der oberen Dichtungsschicht sagt aus, dass außer an der Anschlussseite des Sensors 1.1 und an M das Wasser an allen Kabeln durchgebrochen ist.

5.1.4 Abbau der Füllung

Nach Abbruch des Versuches wurde die Füllung aus dem Druckbehälters ausgebaut. Dabei wurden Fotos bei verschiedenen markanten Höhen gemacht, sie sollen die Ausbreitung der Wasserfront dokumentieren.

An der Oberfläche der oberen Bentonitschicht (*Bild 13*, -0,45 m unterhalb von der Oberkante des Druckgefäßes) ist zu sehen, dass sich das Wasser über den größten Bereich der Fläche ausgebreitet hat, was die Messergebnisse mit den Durchbrüchen gut belegt. In der oberen Bentonitschicht (*Bild 14*, -0,85 m) ist das Material nur in der Umgebung der Kabel feucht, das Wasser steigt nicht flächig auf, sondern dringt nur in der Umgebung der Kabel durch. An diesen Stellen ist die Dichte des umgebenden Materials noch niedriger als in der weiteren Umgebung, da das Material dort mit dem mechanischen Rüttler nicht so gut erreicht werden konnte.

In der oberen Sandschicht (*Bild 15*, -1,12m) hat sich das Wasser über die gesamte Fläche verteilt, der Bentonit ist an dieser Stelle komplett feucht. Etwas tiefer in der mittleren Bentonitschicht (*Bild 16*, -1,20 m) ist das Material dagegen wieder nahezu trocken.

Erst kurz oberhalb der unteren Sandschicht (*Bild 17*, -1,30 m) wird die mittlere Bentonitschicht wieder deutlich feuchter und nach dem Ausbau der unteren Sandschicht zeigt sich, dass die untere Bentonitfüllung (*Bild 18*) komplett durchfeuchtet ist. Hier ist auch die Dichte am niedrigsten, da nur die groben Bentonitkissen eingeschüttet waren.

Zwei Bodenproben wurden entnommen; die Erste oberhalb der unteren Sandschicht, die Zweite deckt die untere Sandschicht und etwa 10 cm unterhalb ab. Der Wassergehalt, gravimetrisch bestimmt, betrug für die erste Probe 22,6 % (Dichte $\rho = 1,71 \text{ g/cm}^3$), für die zweite Probe 26,6 % ($\rho = 1,95 \text{ g/cm}^3$). mit dem Volumen der zylindrischen Probegefäße von 1570 cm^3 ergibt das einen volumetrischen Wassergehalt von 38,7 % und 52,0 %.

5.1.5 Zusammenfassung des ersten halbtechnischen Versuchs BRA1

Durch die Konzeption als Süßwasserversuch mit niedriger Einbaudichte des Materials war es nicht möglich, mit der gewählten Salzwasserlösung von 50 g/l eine Dichtung in der Bentonitmischung gegen den anstehenden Wasserdruck zu erreichen. Zudem sorgte der anfänglich hohe Druck bei der Wassereinbringung für einen sehr schnellen Durchbruch zur Oberfläche an nahezu allen Kabeln. Die Dichtmasse erfüllte auch nach längerem stationärem Zustand nicht ihre Aufgabe, so dass der Versuch abgebrochen wurde. Es wurde vereinbart, einen zweiten Versuch aufzubauen mit einer abgewandelten Sensorkabeleinbringung, die Dichte des Bentonitmaterials sollte möglichst überall homogen sein und den Wert von $1,6 \text{ g/cm}^3$ überschreiten. Als Salzlösung wird eine konzentrierte Lösung von 250 g NaCl pro Liter Wasser verwendet. Weiter soll der Druckaufbau im Behälter durch das Wasser langsamer erfolgen, um dem Bentonit Zeit zum Quellen zu geben. Dadurch wird vermieden, dass das Wasser sofort nach oben durchdringt.

5.2 Halbtechnischer Versuch BRA2

In der Beschreibung der Ergebnisse sind folgende Zeitpunkte dargestellt:

- Trockener Zustand (= Referenz; 09.04.2002)
- Einbringung einer größeren Menge an Salzlösung zur Füllung des unteren Schotterbereichs (32 l; 1 h)
- Stehen lassen und weitere Wasserzufuhr zur Aufrechterhaltung des Druckes (34,5 l; 2 h)
- dito (34,5 l; 3,5 h)

- dito (35 l; 7,5 h)
- dito (35 l; 24 h)
- nach Druckerhöhung (4 bar; 07.05.2002)
- nach Druckerhöhung (16 bar; 05.06.2002)
- nach Druckerhöhung (40 bar; 01.07.2002)
- nach Druckerhöhung (45 bar; 09.07.2002)
- nach Druckerhöhung (70 bar; 19.07.2002)

und nach Wiederanfahren des Versuches:

- als Vergleich aus vorhergehenden Messung (70 bar; 19.07.2002)
- Messbeginn ohne Wasser (0 bar; 11.11.2002)
- nach Druckerhöhung (2 bar; 13.11.2002)
- nach Druckerhöhung (4 bar; 19.11.2002)
- nach Druckerhöhung (10 bar; 25.10.2002)
- nach Druckerhöhung (20 bar; 29.11.2002)

Die Messung des trockenen Zustandes dient wieder als Referenz für die weiteren Messungen mit zunehmendem Druck und Feuchte im Dichtungsmaterial. Am Anfang aller Messkurven ist nach dem steilen Anstieg der Signalamplitude die Antwort des Messsystems auf die Vergusskästchen am Übergang Koaxialkabel-Sensorkabel als Maximum zu erkennen. Der niedrige Dielektrizitätskoeffizient (DK) der Vergussmasse führt zu einer höheren Amplitude als die Umgebung mit dem höheren DK, in die sie eingebettet sind.

Die eingebauten Sandschichten mit einer Mächtigkeit von je etwa 10 cm sind in allen Messungen klar als zwei lokale Maxima im mittleren Bereich der Diagramme zu erkennen. Die Ortsauflösung der Messmethode ist deutlich besser als die Stärke der Sandschichten, die Verschleifung der Kurven lässt auf eine Übergangszone mit einer Vermischung von Bentonit und Sand schließen. Durch die hohe Ortsauflösung lassen sich auch Welligkeiten auf den Kurven durch die Schichtung der Bentonitmischungen aus groben Kissen und feinem Granulat erklären. Derartige Strukturen waren im ersten halbtechnischen Versuch deutlicher zu erkennen, was aus dem anderen Aufbau (untere Schicht nur Bentonitkissen) und der geringeren Verdichtung verständlich erscheint.

Aus dem Verlauf der Messkurven ist zu ersehen, dass die Verdichtung des Materials in der unteren (rechts vom zweiten Sandmaximum) und mittleren Bentonitschicht (zwischen erstem und zweitem Sandmaximum) etwas niedriger ausgefallen ist, als in der oberen Dichtungsschicht links vom ersten Sandmaximum. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Dichtebestimmung bei der Befüllung (siehe *Bild 4*).

Eine niedrigere Amplitude im Signalverlauf deutet bei ansonsten unveränderten Parametern (z.B. Einbaufeuchte des Bentonitgemisches) auf eine höhere Dichte des umgebenden Materials hin. An allen Sensoren zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der TDR-Signale; das bedeutet, die Dichte über den Querschnitt ist ebenfalls recht homogen.

Das TDR-Messgerät wird für jeden Messzyklus neu eingeschaltet, dadurch können ein leichter Zeitversatz oder auch eine Offsetverschiebung und/oder eine Amplitudenänderung gegenüber vorhergegangenen Messungen auftreten. Die gemessenen Daten werden so angepasst, dass die Antwort des koaxialen Zuleitungskabels, die Anfangssteigung und -amplitude übereinstimmen.

Die dargestellten Kurven repräsentieren nur einen kleinen Ausschnitt aller Messungen.

Bei dem Übergang von 40 auf 70 bar in der ersten Versuchsphase ist ein starker Anstieg des Wasserverbrauchs zu verzeichnen (*Bild 6*). Die Feuchtefront hat die erste Sandschicht erreicht und geflutet, deshalb sinkt die Druckkurve zuerst ab. Danach wird der Druck bis über 70 bar erhöht. Auch unter diesen Bedingungen zeigt sich der Versuchsaufbau als dicht, nur an der

unteren Flanschdichtung war an wenigen Stellen Tropfenbildung festzustellen. Der Versuch wurde daraufhin abgebrochen, um eine Beschädigung des Druckbehälters zu vermeiden.

5.2.1 Feuchtigkeitsverlauf an den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln

Der Signalverlauf von Sensorkabel 1 (Bild 19) soll beispielhaft das Verhalten an den Kabeln 2 (Bild 20) und 3 (Bild 21) zeigen.

Bild 19 zeigt Messungen bei unterschiedlichen Zeiten und Drücken von jeweils einem Ende (siehe *Bild 4*) her. Es sind drei Messvorgänge in der Grafik zu unterscheiden:

- Die Bentonitschüttungen in trockenem Zustand frisch nach dem Einbau. Diese Messung wird als Referenz verwendet
- Das Auffüllen des Schottervolumens unterhalb der ersten Bentonitschicht mit Salzwasserlösung; Druck etwa 1 bar
- Das Erhöhen des Drucks im Behälter in Stufen bis etwa 70 bar.

Für alle Sensoren ist der Verlauf der Kurven in den ersten 24 Stunden nahezu identisch. Die dargestellten Kurven repräsentieren nur einen kleinen Ausschnitt aller Messungen.

Das Einbringen der ersten größeren Menge an Salzlösung bewirkt bereits ein Absinken der Kurvenamplitude im unteren Bereich aller Sensorkabel.

Der Verlauf der Kurve des trockenen Aufbaus zeigt am Anfang das erste Maximum am Anschlusskästchen, weiter die zwei Sandschichten (Maxima) und die untere Schlaufe des Sensorkabels (Minimum). Diese Kurve dient als Referenz für die weiteren Messungen, hieran lässt sich das Fortschreiten der Feuchtefront ablesen.

Nach dem Auffüllen des Schottervolumens im unteren Bereich des Druckbehälters mit einer größeren Menge an Salzlösung hat sich dieser Teil der Kurve schon von der trockenen Referenzkurve getrennt. Das Dichtungsmaterial hat Feuchte aufgenommen und nach oben transportiert. Dieser Transport muss gleichmäßig erfolgt sein, da der Verlauf der Kurven bei allen Kabeln sehr ähnlich ist. Da das Dichtmaterial erst langsam zu quellen beginnt, steigt die Feuchtigkeit kontinuierlich bis zur unteren Sandschicht an. Die Dichtwirkung ist noch nicht sehr ausgeprägt. Im Verlauf von 24 Stunden ändert sich an dem Verlauf nichts.

Die Erhöhung des anliegenden Wasserdruckes bringt eine weitere Verschiebung der Feuchtefront nach oben in Richtung der zweiten Sandschicht. Bei 15 bis 20 bar erfolgt ein stärkerer Anstieg des Wasserverbrauchs aus dem Vorratsbehälter, die Kurve zeigt eine deutliche Abweichung vom Verlauf der trockenen Kurve, die auch schon die untere Sandschicht umfasst. Die Erhöhung des Wasserdrucks auf etwa 40 bar ändert zunächst nur wenig, erst bei der Überschreitung in Richtung 50 bar tritt ein steiler Anstieg des Wasserverbrauchs auf. Er zeigt die vollständige Flutung der unteren Sandschicht an. Zu diesem Zeitpunkt hat auch der einfache Feuchtesensor in der unteren Sandschicht angesprochen. Die zugehörigen Kurven trennen sich von der „trockenen“ Kurve etwas unterhalb der oberen Sandschicht. Bis 70 bar ändert sich wenig an dem Signalverlauf, die volle Dichtwirkung des Bentonits hat eingesetzt.

Der weitere Verlauf der Kurven links von dem feuchten Teil zeigt deutlich, dass nach oben hin kein Wasser durchdringt. Insbesondere gibt es keine Wegsamkeiten entlang der Sensorkabel, was sich auch beim Ausbau des Dichtungsmaterials am Ende des Versuches zeigt.

Ein weiteres Phänomen tritt auf: in der Grafik senkt sich der Verlauf links von der oberen Sandschicht mit zunehmendem Druck ab. Da die Kurven am Anfang und in dem Bereich der oberen Sandschicht übereinander liegen, kann dies kein Feuchteeffekt sein, sondern muss mit einer zunehmenden Verdichtung der oberen Bentonitschicht durch das anstehende Wasser zusammenhängen. Bei dem Ausbau zeigte sich, dass sich das gesamte Dichtungsmaterial um etwa fünf Zentimeter angehoben hatte.

Der Übergang zwischen der gesättigten und der trockenen Zone kann aus dem Vergleich der geometrischen Länge und der Laufzeit abgeschätzt werden und erstreckt sich etwa über einen schmalen Höhenbereich von 20 bis 25 cm, wobei der Grenzbereich feucht-trocken sehr scharf ausgeprägt zu sein scheint. Leichte Unterschiede in den *Bild 19* bis *Bild 21* sind auf die Schwierigkeiten beim Aufbau der Schichten um die Kabel zurückzuführen. Insgesamt zeigt sich ein recht homogenes Bild an allen sechs Kabelanschlüssen. In jeden Fall ist die obere Sandschicht nicht vom Wasser berührt.

5.2.2 Feuchtigkeitsverlauf an dem mittleren, einseitig angeschlossenen Sensorkabel

Die im Kapitel 4.1 gemachten Beobachtungen treffen auch auf das einseitig angeschlossene Sensorkabel zu. Ein Unterschied liegt darin, dass das offene Kabelende mittels des TDR-Verfahrens aus dem Kurvenverlauf eindeutig zu bestimmen ist. Ein Vergleich der *Bild 19* bis *Bild 21* und *Bild 22* lässt darauf schließen, dass das mittlere Kabel bedingt durch das Anschlusskästchen etwa 6 cm höher beginnt, als die symmetrisch eingebrachten Sensoren, dafür aber im oberen Bereich etwa 10 cm höher herausragt. Dies bestätigte sich beim Ausbau der Kabel.

Eine Zuordnung der gemessenen Laufzeit der Ereignisse zu der geometrischen Einbauhöhe ist im Rahmen der Schwankungen, die durch den Einbau selbst bedingt sind, bei allen Sensorkabeln direkt möglich. Die Auswertung wurde anhand von *Bild 22* durchgeführt, da hier das Ende der Leitung am besten zu erfassen ist (siehe Kap. 5.5).

5.2.3 Feuchtigkeitsverlauf nach dreimonatiger Ruhezeit

Nachdem nach dreimonatiger Ruhezeit der Versuch langsam wieder angefahren wurde, zeigte sich ein interessantes Ergebnis. Bei nahezu allen Sensorkabeln wird direkt unterhalb der oberen Sandschicht von dem TDR-System ein Leerlauf, also ein steiler Anstieg des Signals wie bei Kabel M, detektiert. Das bedeutet, dass an dieser Stelle die Kabel in der gleichen Höhe gerissen sein müssen (*Bild 23* bis *Bild 26*).

Mit zunehmendem Druck des anstehenden Wassers scheint es dann bei Kabel 1.1 einen scheinbaren Selbstheilungsprozess zu geben, der bei den übrigen Kabeln nicht zu beobachten ist. Die Bilder sind demnach so zu interpretieren (*Bild 27*), dass durch die eingepresste Salzlösung die Dichtungsschichten komprimiert (siehe Abschnitt 5.2.1) und um etwa 5 cm nach oben verschoben wurden. Während der Ruhepause in drucklosem Zustand über die Zeitdauer von drei Monate bildet sich ein Riss entlang dem scharfen Übergang von der trockenen, intakten binären Bentonitmischung nach der feuchten, wo sowohl die Kissen als auch das Granulat sich durch den Durchfeuchtungs- und Quellvorgang zu einer einheitlichen Masse vermischt haben, und der durchfeuchtete Anteil senkt sich ab. Zusätzlich schrumpft die Bentonitschicht bei Wasserentzug und verstärkt den Vorgang noch.

Die Kabel werden im oberen und unteren Bereich durch die Haltekräfte aufgrund der Mantelreibung und in dem unteren Teil zusätzlich durch die U-förmige Schlaufe, bzw. das Vergusskästchen, festgehalten und dadurch an dem sich vergrößernden Spalt zunehmend gedehnt. Beim Überschreiten der Dehnungsgrenze der Kupferleiter reißen diese ab und unterbrechen den Signalpfad (*Bild 27*, *Bild 28*). Mit zunehmendem Wasserdruck beim Wiederanfahren schließt sich der Spalt wieder, wodurch bei Kabel 1.1 die Selbstheilung eintritt. Das hat bei den übrigen Sensoren nicht funktioniert.

5.2.4 Ausbau des Materials aus dem Druckbehälter

Nach Beendigung des zweiten Versuchs wurde das Material sukzessive aus dem Behälter ausgebaut. Fotografien (z.B. *Bild 30* bis *Bild 32*) belegen den Zustand in Schichten von etwa 10

cm, außerdem werden an 10 Positionen über den Querschnitt Materialproben entnommen und gravimetrisch ausgewertet (*Tab. 2*).

Bis unterhalb der oberen Sandschicht bleibt das Material trocken (ca. 10 % Wassergehalt gravimetrisch), dann erfolgt der scharfe Übergang zum feuchten Bereich (15 % bis 35 % Wassergehalt gravimetrisch). Am Übergang zur unteren Sandschicht muss sich ebenfalls ein schmaler Riss gebildet haben; er macht sich durch den akustischen Unterschied beim Abklopfen bemerkbar und ist durch Tasten mit den Fingern zu fühlen. Unterhalb der unteren Sandschicht erstreckt sich der vollständig durchfeuchtete Bereich (35 % bis 49 % Wassergehalt gravimetrisch).

Die gravimetrische Auswertung (*Bild 33* (Punkte jeweils über alle Messstellen gemittelt), *Bild 34* (komplettes Niveau der einzelnen Messstellen)) belegt den scharfen Übergang von der trockenen zur feuchten Zone und zum gesättigten Bereich.

5.3 Auswertung nach dem Wassergehalt

Die Erwartung, den Wassergehalt aus den gemessenen Laufzeitdaten direkt und mit hoher Genauigkeit, d.h. mit einer Unsicherheit kleiner als 5 %, bestimmen zu können erweist sich als nicht sehr praktikabel. Die Eigenschaften des Bentonit-Salzlösungsgemisches wären nur mit einem sehr hohen Aufwand durch eine Kalibrationsmessung im Labor mittels Feuchtereihen zu erfassen:

- bei dem eingebrachten Bentonit handelt es sich um eine binäre Mischung aus Kissen und Granulat, wobei die Gesamtdichte des Materials abhängig ist von seiner Zusammensetzung und der Komprimierung beim Einbau,
- die Eigenschaften des Bentonit-Salzlösungsgemisches ändern sich mit dem Quellvorgang durch die eingebrachte Wassermenge. Der Ionenaustausch zwischen dem Bentonit und der Salzlösung und das Auskristallisieren von Salz beeinflussen den Quelldruck im Bentonit und seine Heterogenität. Dadurch ändert sich die elektrische Leitfähigkeit in der Umgebung der Sensorkabel und damit die Dispersion der elektrischen Signale entlang der Kabel. Dies wirkt sich über den komplexen Dielektrizitätskoeffizient direkt auf das Ergebnis der Feuchtebestimmung aus,
- die Näherungen sind für den Zusammenhang zwischen dem komplexen Dielektrizitätskoeffizient DK (und damit dem Wassergehalt) und einer beliebigen Materialmischungen immer nur für einen eingeschränkten Parametersatz (siehe Kap. 5.4) gültig. Die Ergebnisse der Laufzeitmessung sind stark abhängig von der Temperatur im Material, seiner lokalen Zusammensetzung und von Dispersionsänderungen aufgrund von Dichteänderungen durch Quelldruck-Inhomogenitäten beim Vordringen der Feuchtefront.

Bei der Feuchtemessung mit den Sensorkabeln zeigen sich weitere Unsicherheiten in der Bestimmung des Wassergehaltes. Bei den beidseitig anschließbaren Kabeln kann keine exakte Längenbestimmung und damit Zuordnung zu einer Laufzeit erfolgen, da die Bestimmung der Position des unteren Bogens in den Diagrammen mit einem erheblichen Ablesefehler behaftet ist. Im Gegensatz dazu ist das Ende bei dem einseitig angeschlossenen Sensorkabel gut bekannt. Aber entlang der Sensorkabel ist bei der korrekten Funktion des Dichtungsbauwerks der trockene Anteil des Volumens zu dem feuchteten Teil groß und damit die verwertbare Laufzeit im feuchten Material kurz. Das trifft besonders auf den Versuchsbeginn zu, wo das Material noch wenig befeuchtet ist und das Ende der Sensorkabel gerade benetzt wird.

Mit der üblichen Auswertung würde die Gesamtlaufzeit (trocken + feucht) auf dem Sensor erfasst und in Beziehung zum Wassergehalt aus der Kalibrierfunktion gesetzt. Das ungünstige Verhältnis von trockenem zu feuchtem Sensoranteil würde über das integrale Verhalten immer

einen zu niedrigen Wassergehalt ergeben. Die automatische Auswertung ausschließlich des feuchten Anteils des TDR-Signals wäre möglich, liefert aber aufgrund der kleinen Laufzeitunterschiede nur eine begrenzte Genauigkeit für die Bestimmung des Wassergehaltes.

Der Vergleich mit den gravimetrischen Wassergehaltsbestimmungen (*Bild 33*) lässt immerhin nachträglich eine grobe Abschätzung des Wassergehaltes über den Amplitudenunterschied auf der Messkurve zwischen dem trockenen und dem durchfeuchteten Material zu, der in weiteren Aufbauten als Anhaltspunkt verwendet werden kann.

Insgesamt ist unter diesen Voraussetzungen auf jeden Fall eine Art Pegelstandsmessung mit einer Abschätzung der Durchfeuchtung und der Mächtigkeit der Übergangszone möglich. Das Eindringen von Wasser in die Dichtungsschicht lässt sich sicher verfolgen. Mit dem in der Mitte eingebauten Sensorkabel kann die Position der Sandschichten in dem Laufzeitdiagramm (*Bild 22*) in trockenem Zustand des Materials aus den Einbaumaßen gut bestimmt werden. Es steht damit eine Referenz für die Positionsbestimmung der Feuchtefront in dem feuchten Material zur Verfügung.

Die Änderung der Struktur im binären Bentonitgemisches ist gut aus *Bild 35* und *Bild 36* zu erkennen. Die erste Bild zeigt eine Probe aus dem etwas feuchten Bereich, die Struktur der Kissen ist noch gut erkennbar. In der zweiten Bild sind die Strukturen vollständig aufgelöst, das Material sieht sehr einheitlich aus. Diese Probe wurde am Übergang von dem feuchten zu dem gesättigten Bereich genommen, die gesättigte Zone erscheint deutlich dunkler als die weniger feuchte. Der Übergang erfolgt sehr scharf.

5.4 Bewertung verschiedener Mischungsregeln

Die Bestimmung der Feuchte einer Materialzusammensetzung kann über die Erfassung der dielektrischen Eigenschaften der Mischung erfolgen. Dies geschieht über die Laufzeitmessung mit den eingebrachten Sensorkabeln. Dazu müssen sie auf das umgebende Material und dessen Feuchte kalibriert sein.

Um den Zusammenhang zwischen den dielektrischen Materialeigenschaften eines Gemisches und seiner Feuchte herzustellen, gibt es, vereinfacht gesagt, zwei Möglichkeiten:

- Nachbildung der Materialmischung im Labor mit einem definierten Wassergehalt und die gleichzeitige Messung ihrer dielektrischen Eigenschaften. Dieser Weg ist gangbar für ein in sich homogenes Material, bei Materialgemischen ist die Herstellung einer Mischung mit einem definierten Wassergehalt äußerst aufwendig und erfordert eine sehr große Anzahl an Messreihen. Bei inhomogenen und seine Struktur ändernden Materialien wie im vorliegenden Fall, ist diese Kalibrierung nahezu unmöglich. In dem Druckgefäß ändert sich das Gefüge des Bentonits (Pellets und Granulat) unter dem Einfluss des Drucks und durch die mineralogischen Änderungen, wie z.B. dem Quellen/Schrumpfen oder dem Ionenaustausch, mit der eingebrachten Salzlösung. Durch diese Vorgänge variiert auch die Dichte in dem Druckbehälter. Dies führt zu einem weiten Parameterfeld und lässt sich nur sehr umständlich und äußerst aufwendig für eine Kalibration der Sensorkabel verwenden. Zusätzlich wäre die Bestimmung des Wassergehalts durch die nur unzureichend bekannte Situation im Inneren des Druckbehälters selbst nur mit sehr mäßiger Genauigkeit zu erreichen.
- Durchführung von einigen wenigen Messungen mit verschiedener Feuchte und Bewertung (Kalibration) mit empirisch ermittelten Näherungsfunktionen (Mischungsregeln).

Über Mischungsregeln ist der effektive Dielektrizitätskoeffizient (DK) von zwei oder mehr Materialien mit den DK der Einzelkomponenten verknüpft [6]. Es existiert keine exakte Beschreibung der komplexen elektromagnetischen Zusammenhänge bei der Vermischung verschiedener Materialien, deshalb stellen die unterschiedlichen Mischungsregeln nur empirisch ermittelte Näherungen dar. Sie versuchen durch idealisierte Annahmen (z.B. sphärische oder elliptische Körper eingebettet in eine homogene Masse) die realen Bedingungen analytisch zu beschreiben. Abhängig von solchen Annahmen nähern die Mischungsregeln jeweils eine Zusammensetzung verschiedener Materialien an [4]. Eine Änderung der Materialeigenschaften kann durchaus zu einer nichtlinearen oder mehrdeutigen Abhängigkeit der Dielektrizitätskoeffizient von der Materialzusammensetzung führen (*Bild 37 bis Bild 41*), insbesondere wenn der DK komplex betrachtet wird, was unter den gegebenen Bedingungen (hoher Salzgehalt, hohe Leitfähigkeit, hohe dielektrische Verluste) der Fall sein muss.

Es formen sich zwei Gruppen von Mischungsregeln heraus, solche die durch ein Potenzgesetz gebildet werden und solche die durch eine verallgemeinerte Mischungsregel beschrieben sind. Nach dem Potenzgesetz ergibt sich für zwei Materialien (ϵ_1, ϵ_2) die allgemeine Beziehung (5.1) für die Mischung (ϵ_{eff})

$$\epsilon_{\text{eff}}^\alpha = f \cdot \epsilon_1^\alpha + (1-f) \cdot \epsilon_2^\alpha \quad (5.1)$$

Bekannte Mischungsregeln sind der einfache lineare Zusammenhang ($\alpha = 1$), die Birchak-Formel ($\alpha = 1/2$) oder die Looyenga-Formel ($\alpha = 1/3$). Die Zusammensetzung der Mischung beschreibt der Volumenfaktor f .

In gleicher Weise gilt die verallgemeinerte Mischungsregel

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_2}{\epsilon_{\text{eff}} + 2 \cdot \epsilon_2 + \nu \cdot (\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_2)} = f \cdot \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2 \cdot \epsilon_2 + \nu \cdot (\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_2)} \quad (5.2)$$

Diese Formel (5.2) enthält einen dimensionslosen Parameter ν . Die Wahl von ν bestimmt die bekanntesten Mischungsregeln: $\nu = 0$ ergibt die Maxwell-Garnett Regel, $\nu = 2$ beschreibt die Polder-van-Santen Beziehung und $\nu = 3$ die „Coherent-Potential“ Näherung.

Die ersten beiden Beziehungen der Potenz-Regel (linear, Birchak) und die drei Beispiele der verallgemeinerten Mischungsregel sind in *Bild 37 bis Bild 41* für unterschiedliche komplexe Dielektrizitätskoeffizienten von Material 1 und Material 2 dargestellt. Material 1 stellt ein Boden-Material mit einem Realteil des DK von $\epsilon_1' = 4$ und vier verschiedenen Werten für den imaginären Anteil ($\epsilon_1'' = 0, 4, 8, 12$; in den Darstellungen entsprechen die einzelnen Kurven dieser Reihenfolge von unten nach oben) des komplexen Dielektrizitätskoeffizient $\epsilon_1 = \epsilon_1' + j \epsilon_1''$ dar. Es wird gemischt mit Wasser ($\epsilon_2' = 80$). Der Imaginärteil seines DK soll mit dem Salzgehalt variieren ($\epsilon_1'' = 20, 200, 800$) und die dielektrischen Verluste verdeutlichen.

Während niedrige dielektrische Verluste des Wassers zu einer monotonen Zunahme des Realteils des Mischungs-DK führen, sind bei höheren Werten von ϵ_1'' deutliche Mehrdeutigkeiten bei den verallgemeinerten Mischungsregeln zu erkennen.

Bei der Maxwell-Garnett Regel tritt dies besonders deutlich bei hohem Wasseranteil über 90 % Volumenanteil auf, bei der Polder-van-Santen Beziehung im Bereich zwischen 25 % und 45 % und bei der Coherent-Potential Näherung zwischen 15 % und 35 %. Der Imaginärteil ist davon nicht berührt. Die Mischungsregeln nach dem Potenzgesetz sind davon ebenfalls nicht betroffen. Allerdings liefern sie für tonige oder organische Materialien mit hohen dielektrischen Verlusten keine ausreichend gute Aussage über den Feuchtegehalt der Mischung.

Für die Umsetzung in die Praxis bedeutet dies, dass es in Abhängigkeit von dem verwendeten Modell zu großen Variationen, bzw. zu Mehrdeutigkeiten bei der Bestimmung des

volumetrischen Wassergehalts aus den Messwerten kommt. Der Bereich zwischen 20 % und 40 % ist von der Wahl der Mischungsregel besonders stark betroffen. Hier ist eine exakte Angabe des volumetrischen Wassergehaltes unter diesen Voraussetzungen nicht möglich. Die einfacheren Mischungsregeln nach dem Potenzgesetz (linear, Birchak) lassen sich aus den oben genannten Gründen für die Kalibration der Sensorkabel in Bentonit nicht anwenden, da der Fehler in den ermittelten Feuchtwerten zu groß wird.

Die Umrechnung der Laufzeit in einen Wassergehalt über eine Mischungsregel funktioniert mit „normalen“ Materialien wie Schluff oder Sand ganz gut, bei Bentonit dagegen, besonders in Verbindung mit der salinaren Lösung, ist auch dieses Verfahren kaum anwendbar (Kap 5.3). Denn durch die hohe elektrische Leitfähigkeit muss der Imaginärteil des komplexen DK auf jeden Fall mit berücksichtigt werden.

Um das Problem der ungenauen Bestimmung des Wassergehaltes weiter einzuschränken, sind weitere Arbeiten zu der Kalibration der Sensorkabel nötig. Kalibrierkurven zu verschiedenen Materialzuständen können zumindest eine bessere Näherung einer zahlenmäßigen Bestimmung des Wassergehaltes ermöglichen. Das ist mit den in den beiden durchgeführten halbtechnischen Versuchen erhaltenen Ergebnissen nicht möglich. Ziel des Projektes war es, eine Methode zur Lokalisierung von Feuchtefronten in Bentonit zu entwickeln und dies ist in den Versuchen an der Bergakademie in Freiberg unter Verwendung eines Time-Domain-Reflectometry- (TDR) Verfahrens und mit im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Sensorkabel gelungen.

5.5 Vergleich der Feuchteniveaus aus der Laufzeitmessung und aus dem Rückbau

Aus Laufzeitmessungen lassen sich Rückschlüsse ziehen auf die Orte von Änderungen im umgebenden Material entlang eines Sensorkabels. Grundlage und Referenz dafür sind die Messungen in trockenem Material und der Vergleich des geometrischen Ortes mit der gemessenen Laufzeit. Die Länge des Sensorkabels ist bekannt und seine Einbaulage ebenfalls näherungsweise. Die eingebauten Sandschichten dienen als zusätzlichen Marker, da ihre Lage in dem Druckbehälter ebenfalls bekannt ist. Die Unsicherheit bei dem Einbau der Sensorkabel beträgt einige Zentimeter, wobei die Kabel auch gegeneinander in diesem Bereich variieren können.

Ansonsten lassen sich durch die Markerschichten und die bekannte Länge der Sensorkabel sehr genau die Orte einzelner Feuchteereignisse zuordnen und mit den beim Ausbau gewonnenen Maßen vergleichen (*Tab. 2*). Letztere weisen natürlich ebenfalls eine gewisse Unsicherheit auf, da durch die aufgetretene Verdichtung im oberen Bereich des Behälters sich die Maße um nahezu 5 cm nach oben verschoben haben.

In *Bild 4* sind auf der linken Seite neben dem Behälter die Orte angegeben, die beim Ausbau ermittelt wurden, auf der rechten Seite diejenigen aus den Kabellaufzeiten errechneten. Sie stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit sehr gut überein und erreichen eine Auflösung von besser als 5 Zentimeter. Durch den hohen Wasseranteil und den recht homogenen Aufbau der Schichtungen ist die Auswirkung auf den Signalverlauf sehr deutlich ausgeprägt und sehr gut ablesbar. Die Messung im trockenen Zustand bildet immer den Ausgangspunkt für die Berechnung des Ortes eines bestimmten Feuchtezustandes. Sie wird immer von der Anschlussseite des Sensorkabels (trockene Seite) durchgeführt. Inhomogenitäten im Material führen zu unterschiedlichen Laufzeiten und damit zu Verzerrungen beim Ablesen des Ortes.

Die Orte verschiedener Zustände (Laufzeit) auf dem einseitig angeschlossenen Sensor ist aus *Bild 22* ausgemessen und in reale Längen umgerechnet. Hierbei ist zu beachten, dass das mittlere, einseitig angeschlossene Sensorkabel oben etwa 9 cm höher herausragt, als die symmetrischen Sensoren. Alle Sensoren beginnen unten auf gleicher Höhe und bei dem nur einseitig anschließbaren Sensorkabel bestimmt das Kästchen am Ende den Beginn der Leitung.

Dies ist in *Tab. 1* berücksichtigt, indem der Beginn des Kabels auf 0,26 m bezogen auf Oberkante (OK) Behälter gesetzt wird und zu allen Angaben in der Spalte „umgerechneter Ort“ addiert wird (Werte in Klammer).

Tab. 1 Bestimmung der Orte auf dem Sensorkabel „Mitte“ (Ausbaudaten beziehen sich auf Oberkante (OK) Behälter. Der umgerechnete Ort auf dem Kabel wird auf OK korrigiert (Werte in Klammer))

Ort	aus <i>Bild 21</i> ausgemessene Länge [mm]	umgerechneter Ort [m]	Ort aus Ausbau bestimmt [m]
Übergang Koax – Sensorkabel	0	0,00 (0,26)	0,26
1. Sandschicht	58	0,70 (0,96)	0,94
Übergang trocken – feucht	71	0,84 (1,10)	1,08
2. Sandschicht	88	1,06 (1,32)	1,28
Gesättigtes Material	90	1,09 (1,35)	1,34
Ende der Leitung	99	1,20 (1,46)	1,44

Die Übereinstimmung zwischen den während des Ausbaus ermittelten Werten und denen aus der Laufzeit berechneten ist sehr gut. Der Unterschied liegt in allen Fällen unter 5 Zentimeter.

5.6 Abschätzung der einsetzbaren Sensorlänge

Die Untersuchungen anhand der beiden halbertechnischen Versuche mit Sensorlängen von 1,2 Metern zeigen, dass mit solchen verhältnismäßig kurzen Kabeln sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Lokalisierung von Feuchtefronten und der Abschätzung der anstehenden Feuchte erreicht werden kann. Aus *Bild 7* ist ein zunehmendes Verschleifen von steilen Amplitudenänderungen aufgrund von Mehrfachreflexionen und der Dispersion im umgebenden Material zu erkennen. Bei größeren zu überwachenden Abschlussbauwerken im Untertagebau sind auch längere Sensoren erforderlich. Die Ortsauflösung, die für die Lokalisierung von Feuchtefronten notwendig ist, kann sicher geringer sein, als dies sich in den Versuchen ergeben hat. Die mächtigeren Schichten erlauben einen mindestens doppelt so hohen Wert, wie die hier abgeschätzten etwa fünf Zentimeter.

Zusätzlich kann die Ortsauflösung über den Einbau der Kabel gesteuert werden. Die Einspeisung des TDR-Pulses muss von der trockenen Seite her erfolgen, damit die Dispersion aufgrund der mit der Salinität und der Feuchte zunehmenden elektrischen Leitfähigkeit nicht so sehr zum Tragen kommt. Auf dieser Seite ist eine höhere Ortsauflösung sehr viel sinnvoller als auf der feuchten Seite. Zudem ist das Auftreten einer Feuchtefront von außen her auch bei längeren Sensorkabeln deutlich zu erkennen. Die Amplitude im Messsignal geht auf jeden Fall sichtbar zurück und gibt einen eindeutigen Hinweis auf die Vorgänge entlang der Leitung.

Es kann daher abgeschätzt werden, dass für eine Ortsauflösung von 10 bis 20 Zentimeter bei korrektem Einbau der Sensoren Leitungslängen zwischen vier und sechs Metern eingesetzt werden können. Zu bevorzugen sind einseitig angeschlossene Sensoren um die Zuordnung der Position zu erleichtern, außerdem sind die Anschlusskästchen auf eine minimale Störung der Geometrie des Dichteelementes hin zu optimieren.

5.7 Beständigkeit der Sensorkabel

Die Sensorkabel wurden nach Beendigung der Versuche vorsichtig zusammen mit dem Bentonitmaterial aus dem Behälter ausgebaut und auf mechanische und chemische Beeinträchtigungen untersucht. Es zeigten sich zwar einige Dellen und Stauchungen an dem

Dielektrikumsmaterial der Kabel, die durch die hohe mechanische Verdichtung des Bentonitmaterials aufgetreten sind. Besonders die größeren Kissen haben sich fest in das Kabelmaterial eingedrückt, wodurch sich zum einen die Dichtigkeit des Aufbaus entlang der Sensorkabel ergeben hat, zum anderen führte die sehr starke Mantelreibung des Dielektrikums an den trockenen Bentonitkissen zu den Kabelrissen an der Grenze zum feuchten Bereich, weil das Material darunter wegen der geringeren Reibung an der Wand zusammen mit dem Kabel abgesackt ist. Hierbei spielte das Vergusskästchen am Ende des einseitig angeschlossenen Kabels und die Schlaufen der symmetrisch belegten Kabel sicher eine große Rolle.

Die Sensorkabel haben im Verlauf des zweimonatigen ersten Versuchs und des acht Monate dauernden zweiten halbtechnischen Versuchs keine erkennbaren Schäden am Dielektrikum durch die Einwirkung der Salzlösung erkennen lassen. Bei einer längerfristigen Überwachung eines Verschlussbauwerkes würde das Sensorkabel im trockenen Teil nicht in Verbindung mit der Salzlauge kommen und auch im feuchten Teil wäre die Einwirkung nach den Versuchsergebnissen sicher als gering einzustufen.

Die Messfähigkeit mit den Sensorkabeln wurde durch die mechanische Verformung über die verdichteten Bentonitkissen nicht beeinträchtigt, zumal sich alle Messungen auf die Referenzmessung an dem trockenen Aufbau beziehen, wodurch alle Kabeleigenheiten bereits mit einbezogen sind.

6 Zusammenfassung

In den Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse von Messungen im Frequenzbereich an verschiedenen Mischungen von Wasser mit Bentonitmaterial nicht zu einer ausreichenden Auflösung hinsichtlich des Ortes (Feuchtefront) und des Wassergehaltes möglich sind. Die weiteren Untersuchungen erfolgten deshalb mittels von Messungen im Zeitbereich und zeigten eine gute Empfindlichkeit der Sensorkabel zur Verfolgung von Feuchteinflüssen.

Die in Zusammenarbeit mit der Bergakademie/TU in Freiberg durchgeführten halbtechnischen Versuche sollten die Eignung dieser Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung zeigen. Die erzielten Ergebnisse belegen sehr gut die Fähigkeit der Methode, das Auftreten von eindringender Feuchtigkeit und wandernde Feuchtefronten in dem Bentonitmaterial durch das in den Druckbehälter eingepresste Wasser nachzuweisen.

Die eingesetzte Messmethode ist das bekannte Time-Domain-Reflectometry Verfahren (TDR) zusammen mit speziellen, für die Anwendung optimierten Sensorkabeln. Sie bestehen aus drei flachen, räumlich getrennten Kupferleitern in einer Ebene, die von einem Dielektrikum umgeben sind. Die Ergebnisse der Messungen zeigen in dem Verlauf der Kurvenform zum einen die zunehmende Feuchtigkeit im Dichtungsmaterial und zusätzlich das Fortschreiten der Feuchte an. Wesentliche Punkte der Untersuchung sollten sowohl für ein echtes Abschlussbauwerk verwertbare Ergebnisse als auch die mechanische und elektrische Beständigkeit der Sensorkabel in dem mit einer gesättigten Salzlösung durchfeuchteten Dichtungsmaterial, auch unter hohem Druck, sein.

Die beiden durchgeführten halbtechnischen Versuche unterschieden sich in ihrem Aufbau, in der Einbaudichte des Dichtmaterials und in der Salinität der Salzlösung.

In dem ersten halbtechnischen Versuch (Salzlösung 50 g/l) waren die physikalischen Voraussetzungen bezüglich der Dichtfähigkeit des Materials und der Schichtungen nicht gegeben. Durch die Konzeption als Süßwasserversuch mit geringerer, nicht homogener Dichte und Aufbau reagierte das System mit der schwach salinaren Lösung erheblich langsamer in der Dichtwirkung. Bentonit hat eine wesentlich bessere Quellfähigkeit mit Süßwasser als mit Salzwasser. Deshalb konnte die mit zunehmendem Druck anstehende Salzlösung schneller

vordringen, was letztendlich zum Versagen der Dichtung schon bei einem Druck von etwa 20 bar führte. Die Sensorkabel bildeten zusätzlich eine Störung des Dichtungssystems. Wegen der geringen mechanischen Verdichtung und dem zu hohen Druck, mit dem zu Beginn die Salzlösung eingepresst wurde, ist entlang der Kabel mit zunehmendem Druck das Wasser vorgeedrungen. Trotzdem sind die Ergebnisse brauchbar, da sie die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Messsystems zur Feuchtebestimmung belegen. Das Fortschreiten der Feuchtefront wird klar dokumentiert und erlaubt eine Aussage über den Ort und in geringerem Maße auch über die Feuchte selbst.

In dem anschließend durchgeführten zweiten halbtechnischen Versuch mit angepassten physikalischen Parametern, d.h., sowohl mit höherer Dichte und homogenem Aufbau des Dichtungsmaterials als auch mit einer konzentrierten Salzlösung mit 250 g/l Salzgehalt, treten die Unwegsamkeiten entlang der Sensorkabel nicht mehr auf. Der Versuchsaufbau erweist sich bis zu Drücken der anstehenden Salzlösung von etwa 70 bar als dicht. Das Fortschreiten der Feuchte kann mit dem Messverfahren sehr gut verfolgt werden.

Im Gegensatz zum ersten Versuch baut sich eine homogene Feuchtefront über den gesamten Querschnitt auf. Dies belegen die Ergebnisse der Bodenproben, die beim Ausbau des Materials genommen wurden. Sie zeigen auch den rapiden Übergang zwischen trockenem und gesättigtem Material. An dieser Stelle hat sich eine Dichtungsschicht in der binären Bentonitmischung aufgebaut, die das Vordringen der Feuchtefront bei dem anstehenden hohen Druck stoppt. Die Untersuchung der Bentonitproben aus dem durchfeuchteten Bereich zeigen, dass sowohl die größeren Kissen als auch das Granulat ihre Struktur aufgelöst haben und sich zu einer annähernd homogenen, feinkörnigen Masse verbunden haben. Oberhalb dieser Schicht ist die Struktur des binären Gemisches erhalten geblieben.

Der Bruch der Sensorkabel während der anschließenden dreimonatigen Ruhezeit aufgrund der sehr hohen mechanischen Belastung sollte unter realen Bedingungen nicht auftreten. Dadurch, dass sich der gesamte Materialaufbau unter der Einwirkung der mit zunehmendem Druck zugeführten Salzlösung um etwa fünf Zentimeter angehoben hat, war nach dem Abbau des anstehenden Drucks die durchfeuchtete Schicht nach unten abgesackt und hatte das Sensorkabel stark überdehnt.

Wegen der Beschaffenheit des binären Bentonitgemisches ist eine Kalibration der Sensoren auf die absolute Feuchte mit vertretbarem Aufwand nicht einfach durchführbar. Dazu müssten Kalibriermessungen an allen möglichen Materialzusammensetzungen, von trocken bis feucht, mit allen Kombinationen von Kissen und Granulat in einem entsprechendem Dichtebereich durchgeführt werden. Zusätzlich müsste auch die Konzentration der Salzlösung variiert werden. Weil sich aber die Zusammensetzung während der Wasserbeaufschlagung mit steigendem Druck ständig ändert, ist eine feste und genaue Zuordnung der Feuchte zu dem Messergebnis nicht zu erreichen. Die Kalibration über eine im Labor ermittelte Funktion kann ebenfalls nur mit geringer Genauigkeit durchgeführt werden, da aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Salzlösung mit zunehmender Feuchte die dielektrischen Verluste sehr hoch sind. In diesem Bereich sind die gebräuchlichen Mischungsregeln für eine Kombination verschiedener Materialien aufgrund der Feuchte/Salinität nicht mehr anwendbar. Die Berücksichtigung des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten über eine angepasste Mischungsregel führt mit zunehmenden Verlusten bzw. zunehmender Leitfähigkeit in dem zu untersuchenden Material zu einem mehrdeutigen Ergebnis, das je nach Mischungsregel in einem verschiedenen Bereich des Mischungsverhältnisses der beteiligten Materialien liegt. Sind mehr als zwei Materialien beteiligt, wird die Vorhersage der Feuchte aus der Laufzeitmessung sehr ungenau.

Ein weiterer Punkt ist, dass das Sensorkabel nicht über seine gesamte Länge in einem ähnlich feuchten Material eingebettet ist. Der Übergang von dem trockenem zum durchfeuchteten Bereich erfolgt auf einer Strecke von etwa 30 cm. Die übliche Auswertung einer mittleren

Feuchte über die Laufzeit eines Pulses entlang des gesamten Sensors und die Beziehung auf eine im Labor ermittelte Kalibrierfunktion lässt sich so nicht mit der gewünschten Genauigkeit anwenden.

Insgesamt belegen die Ergebnisse der beiden halbtechnischen Versuche die sehr gute Eignung dieses Messverfahrens in Kombination mit den Sensorkabeln für die Bestimmung des Auftretens von Feuchtigkeit und des Ortes einer Feuchtefront in salinärer Umgebung. Die Genauigkeit mit der eine Aussage gemacht werden kann, an welchem Ort sich eine Feuchtefront gebildet hat, liegt bei Verwendung der Messung in trockenem Material bei etwa fünf Zentimeter auf einer Kabellänge von etwa 1,2 Metern. Längere Sensoren werden aufgrund der Abflachung der Signalsteilheiten wegen der hohen Leitfähigkeit der salinaren Lösung zum Ende hin eine zunehmende Verschleifung der Kurve erfahren, was eine Verschlechterung der Ortsauflösung zur Folge hat. Dieses Problem kann durch einen entsprechenden Einbau der Sensorkabel in das Dichtmaterial zumindest reduziert werden.

7 Literatur

- [1] A. Brandelik, R. Nüesch, C. Hübner und R. Schuhmann, „Verschlussstopfen und Verfahren zum Verschließen von untertägigen Hohlräumen“, Deutsches Patent 2002, Nr. 10149972
- [2] A. Brandelik, R. Schuhmann und F. Königer, „Dichtungskontrollsystem für Deponien“, BW-Plus-Statusbericht II, März 2002
- [3] A. Brandelik, C. Hübner und R. Schuhmann, „Dichtungskontrollsystem für Deponien“, BW-Plus-Statusbericht I, Februar 2001
- [4] A. Sihvola, “Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients, Subsurface Sensing Technologies and Applications”, Vol. 1, No. 4, October 2000, p. 393-415.
- [5] A. Brandelik, C. Hübner, “Subsurface Sensing, Subsurface Aquametry, Subsurface Sensing Technologies and Applications”, Vol. 1, No. 4, October 2000, p. 365-376.
- [6] Hübner C., „Entwicklung hochfrequenter Messverfahren zur Boden- und Schneefeuchtebestimmung“, Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6329 (Juli 99) Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [7] A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, “Moisture sensor for large area layers“, US Patent 1999, Nr. 5942904
- [8] A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, „Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten“, europäisches Patent 1998, Nr. 0804724
- [9] A. Brandelik, G. Krafft, C. Hübner, P. Ruppert, H. Schwarzmüller, F. Herbst, R. Schuhmann, R. Zischak, H. Hölzl, „Zerstörungsfreie In-situ-Messung der Feuchte und Dichteänderung von mineralischen Deponieabdichtungen - Erfahrungsbericht“, Müll & Abfall Heft 1/1997
- [10] A. Brandelik, G. Krafft, C. Hübner, P. Ruppert, H. Schwarzmüller, F. Herbst, R. Schuhmann, R. Zischak, H. Hölzl, „Zerstörungsfreie In-situ-Messung der Feuchte und Dichteänderung von mineralischen Deponieabdichtungen“, Müll & Abfall Heft 4/1996
- [11] A. Brandelik, R. Schuhmann und C. Hübner, „Feuchtesensor für ausgedehnte Schichten“, deutsches Patent 1996, Nr. 19501196

8 Anhang

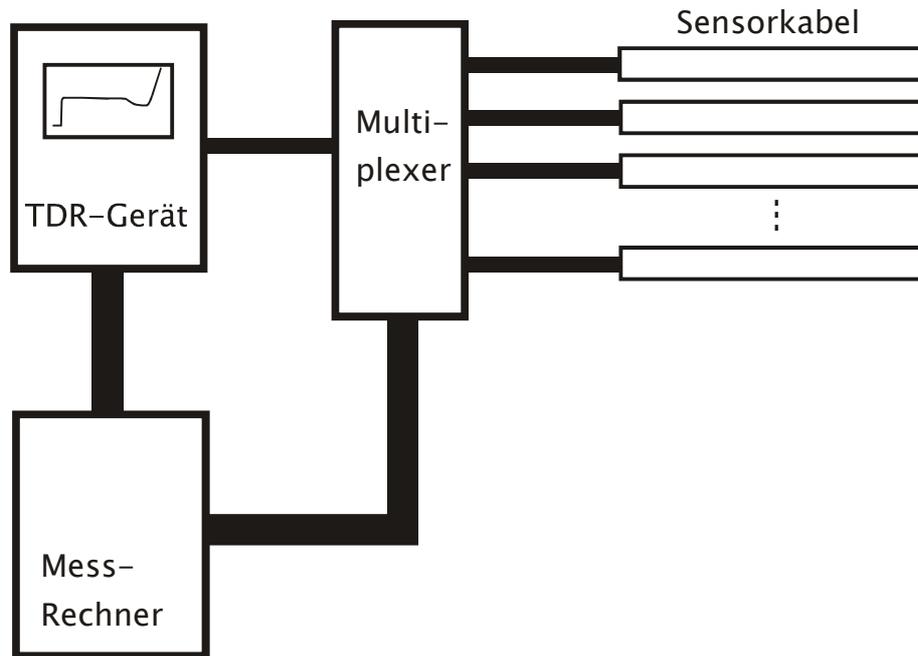


Bild 1 Prinzip des TDR-Messsystems



Bild 2 Druckbehälter in der Technikumschale

Versuchsaufbau I für salinaren Verschluss (Salz 50 g/l)

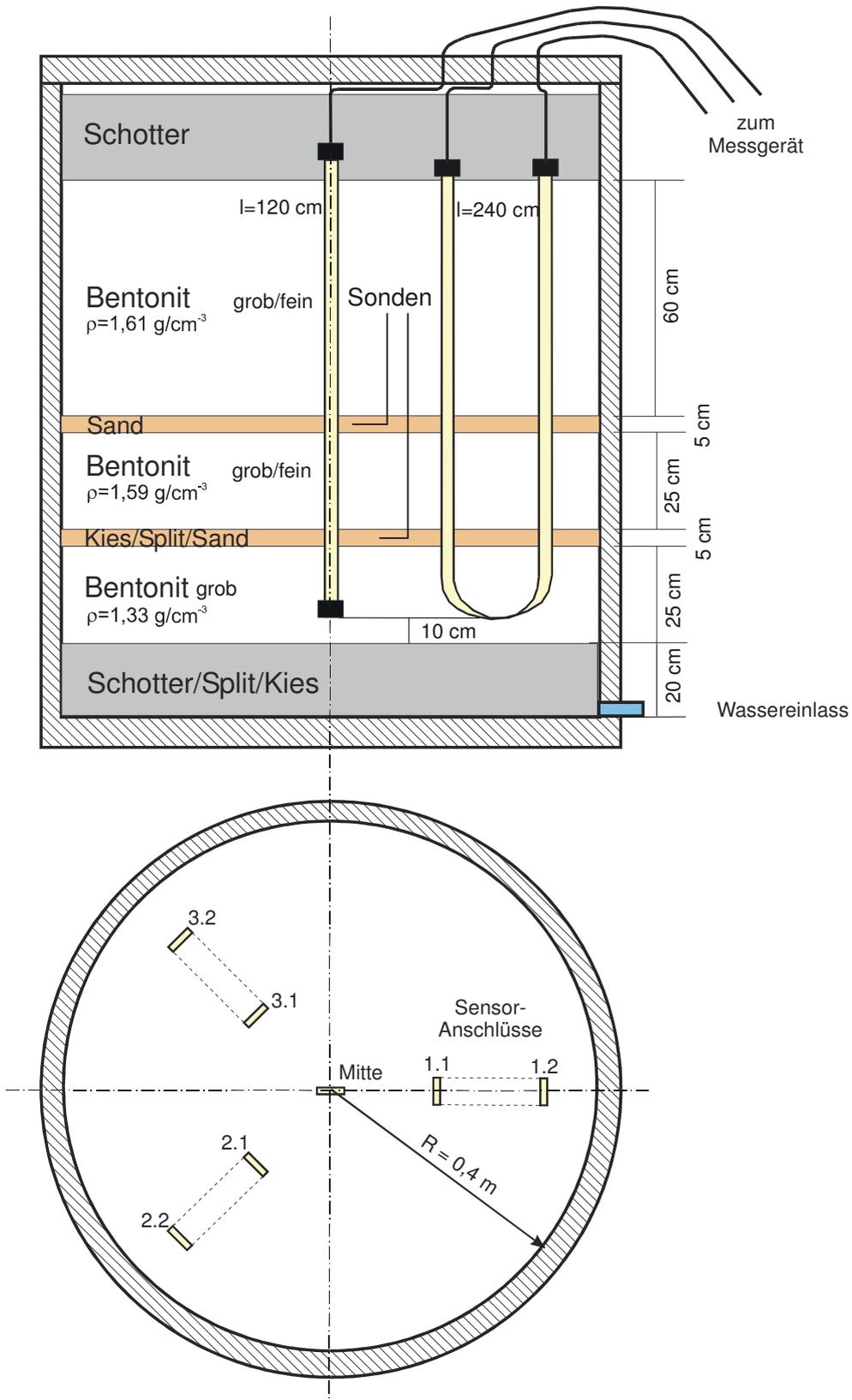


Bild 3 Aufbauskeizze und Position der Sensorkabel (BRA1)

Versuchsaufbau II für salinaren Verschluss (Salz 250 g/l)

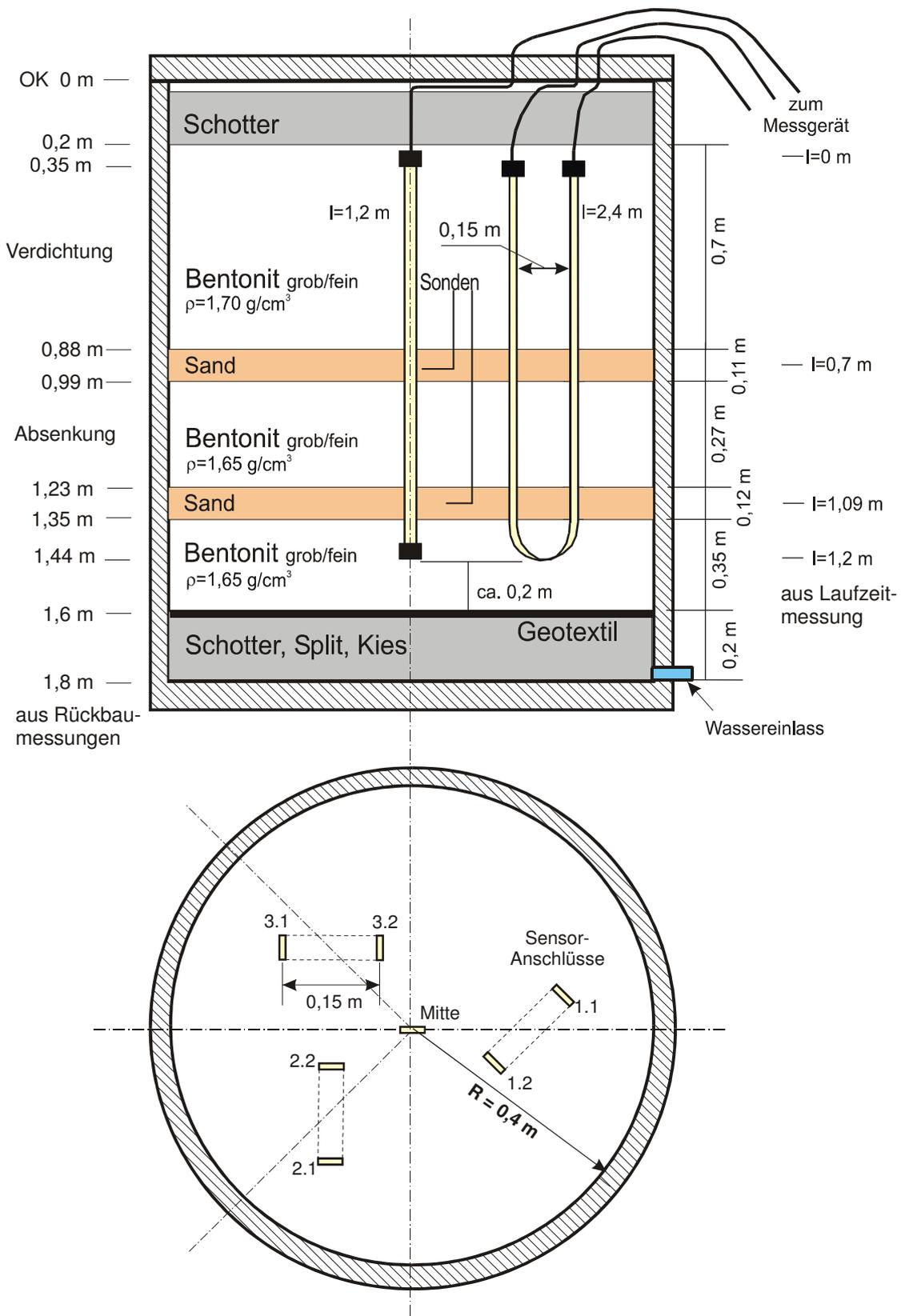


Bild 4 Aufbauskeizze und Position der Sensorkabel (BRA2)

FG No. 1: Wasserdruck und eingebrachtes Wasservolumen

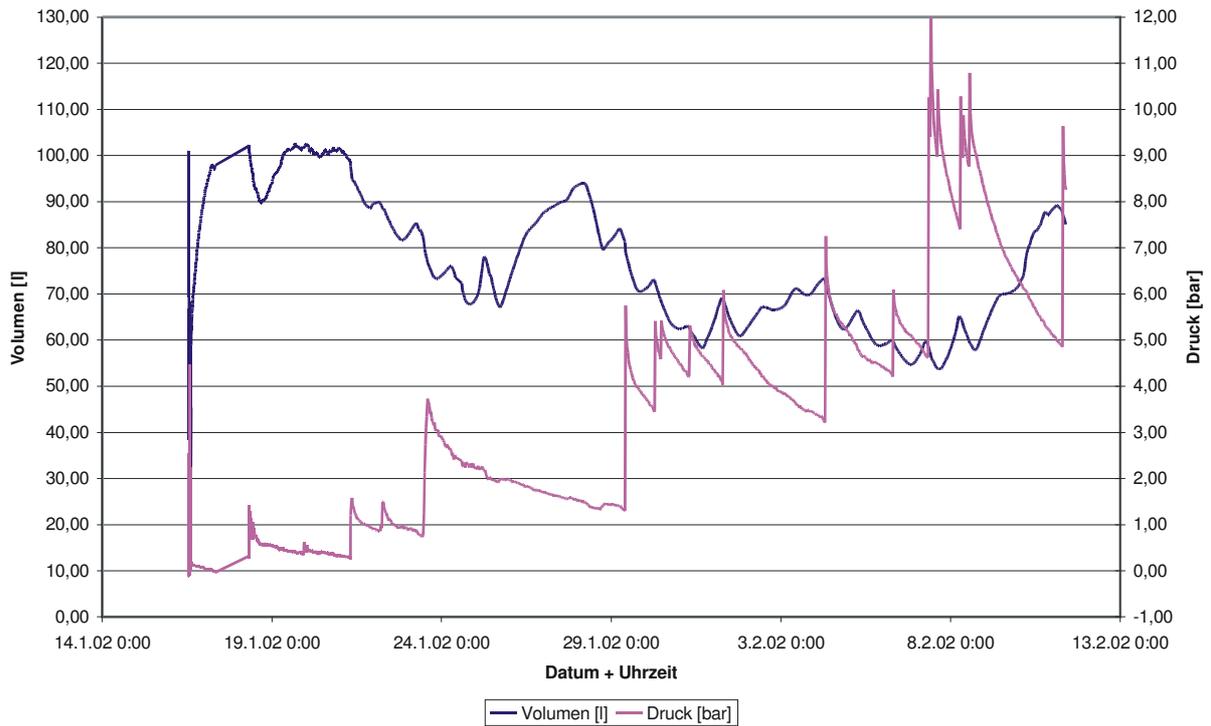


Bild 5 Druckverlauf und eingebrachtes Wasservolumen im Druckbehälter (BRA1)

HTV FG No. 2: Wasserdruck und eingebrachtes Wasservolumen

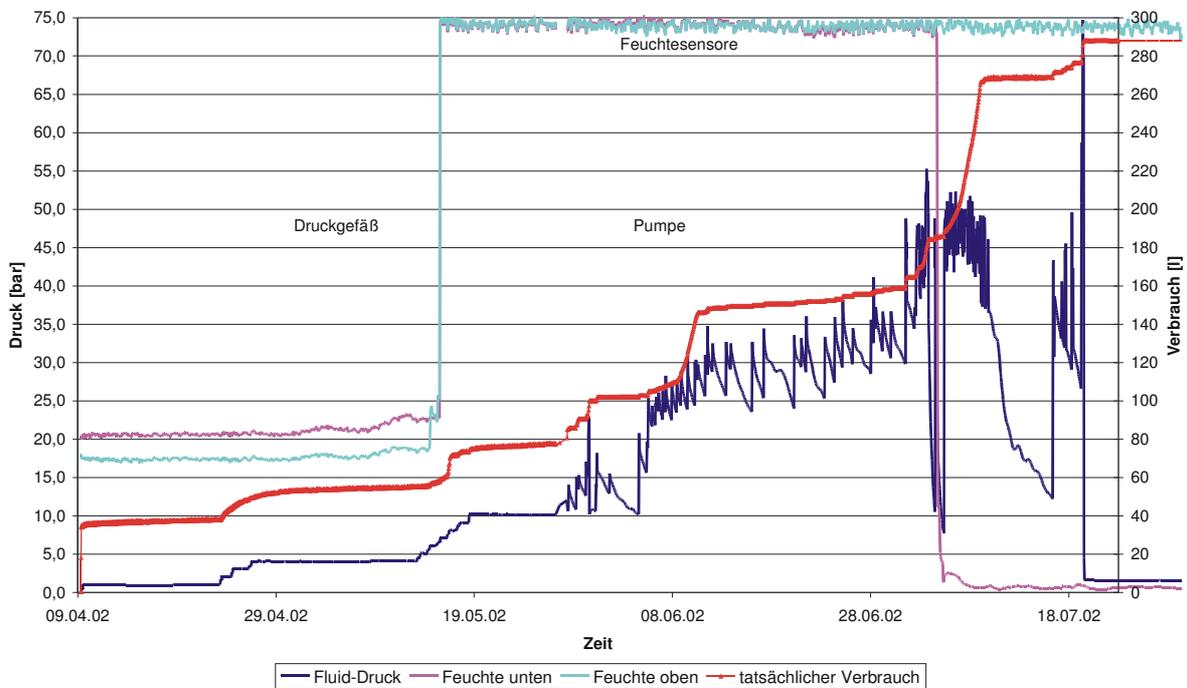


Bild 6 Druckverlauf und eingebrachtes Wasservolumen im Druckbehälter (BRA2)

FG (16.01.2002): salinärer Abschluss: Calcigel trocken; Kabel 2.2 komplett

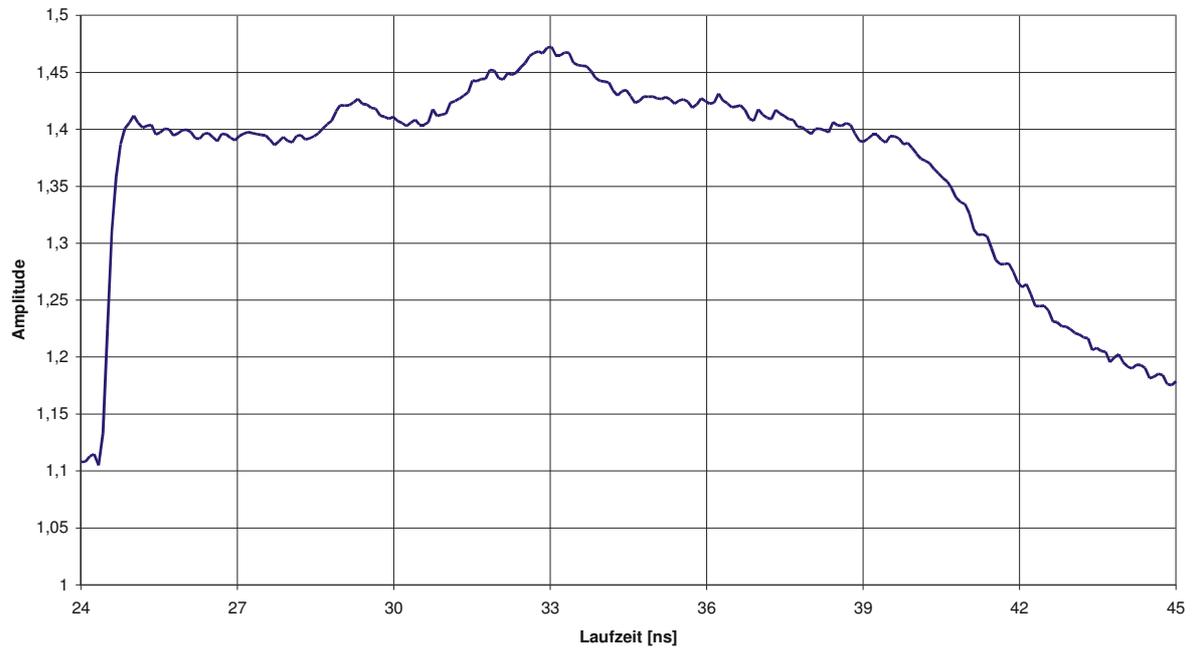


Bild 7 Komplettaufnahme der TDR-Werte von Kabel 2 (BRA1)

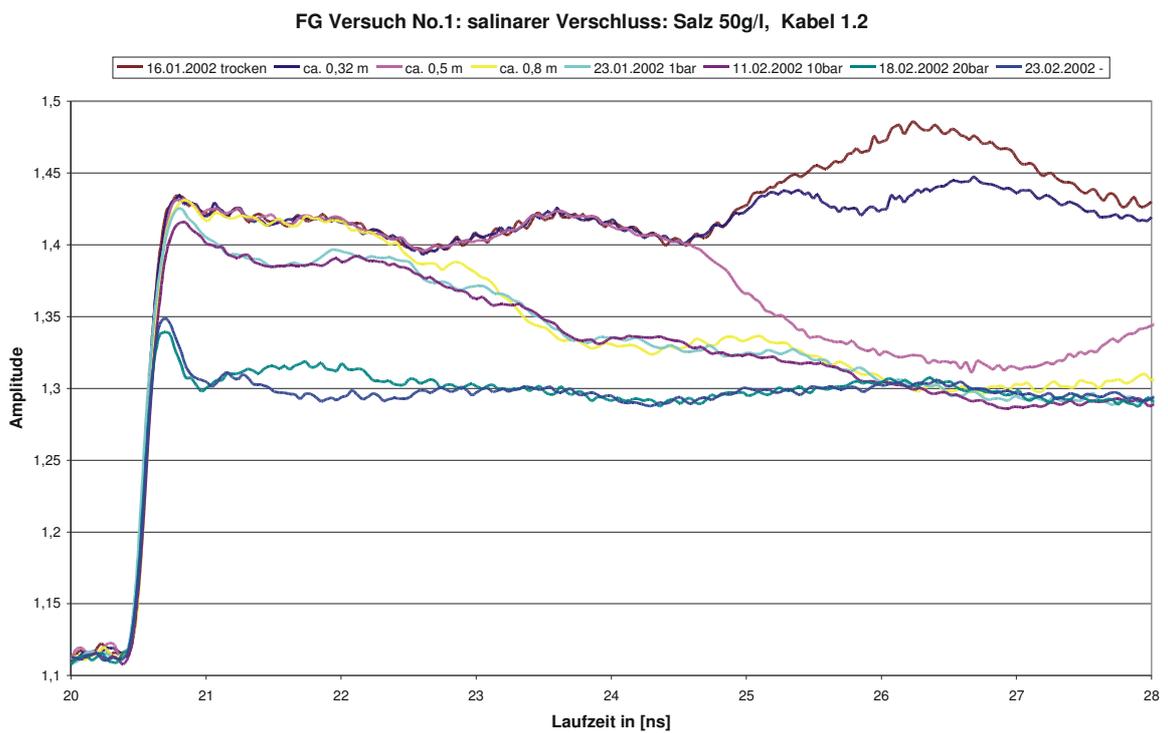
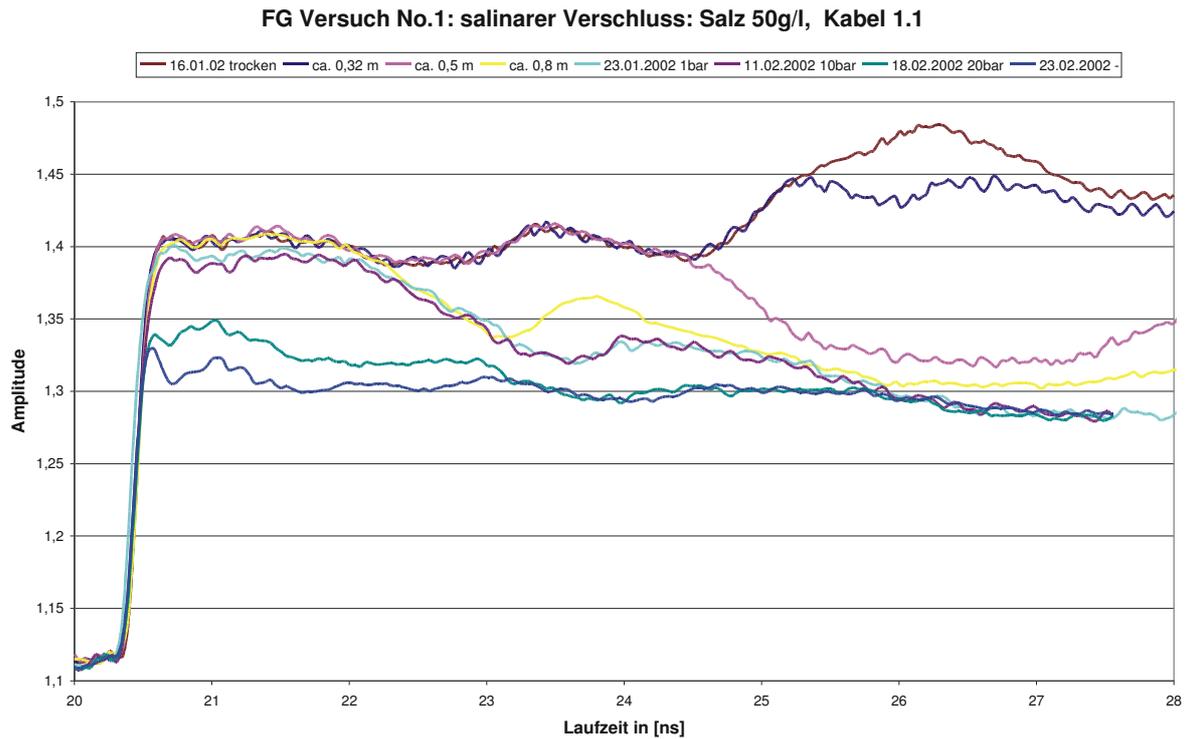
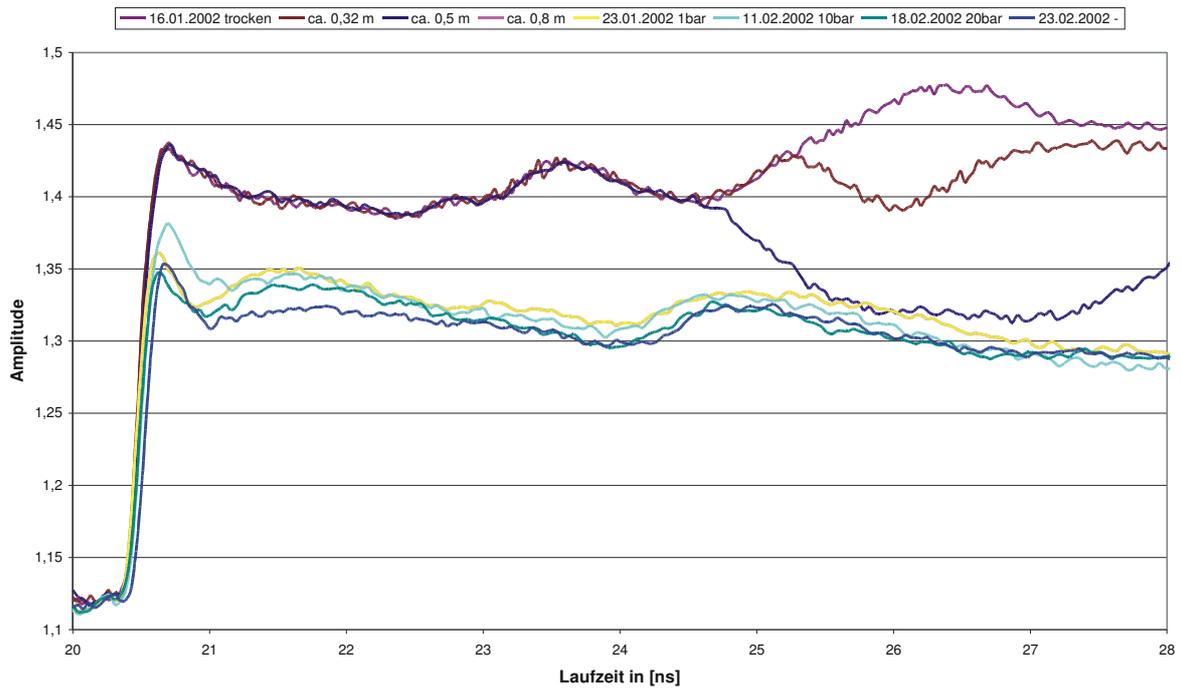


Bild 8 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 1 (beide Anschlüsse, BRA1)

FG Versuch No.1: salinärer Verschluss: Salz 50g/l, Kabel 2.1



FG Versuch No.1: salinärer Verschluss: Salz 50g/l, Kabel 2.2

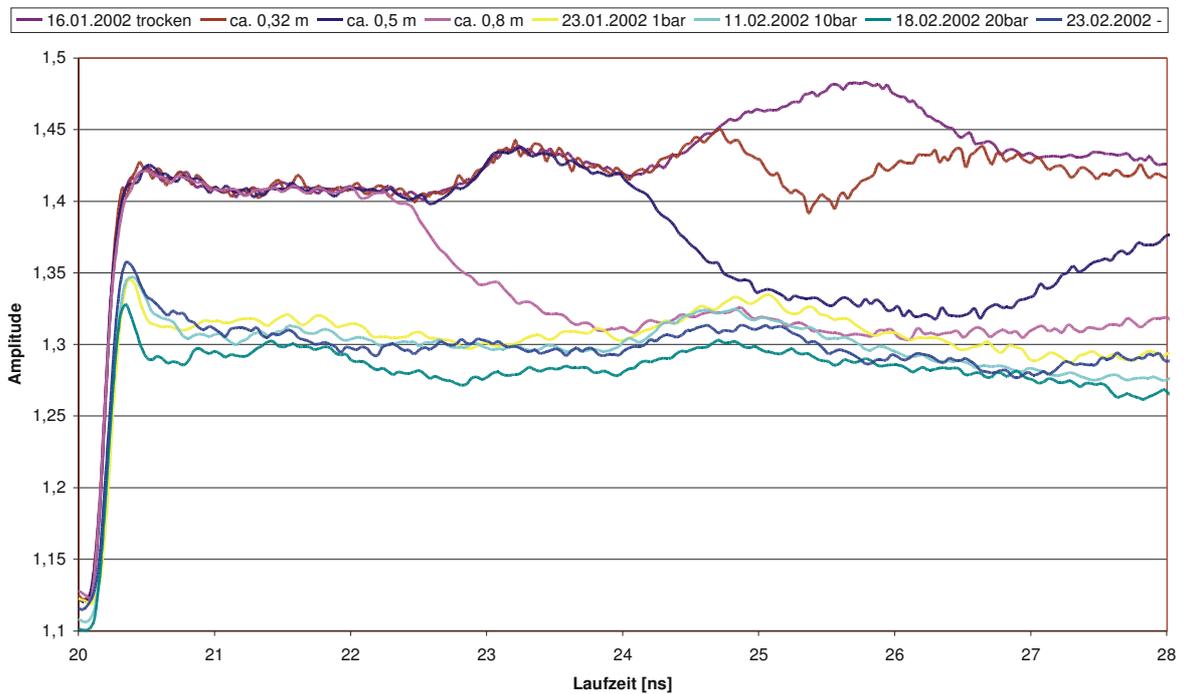


Bild 9 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 2 (beide Anschlüsse, BRA1)

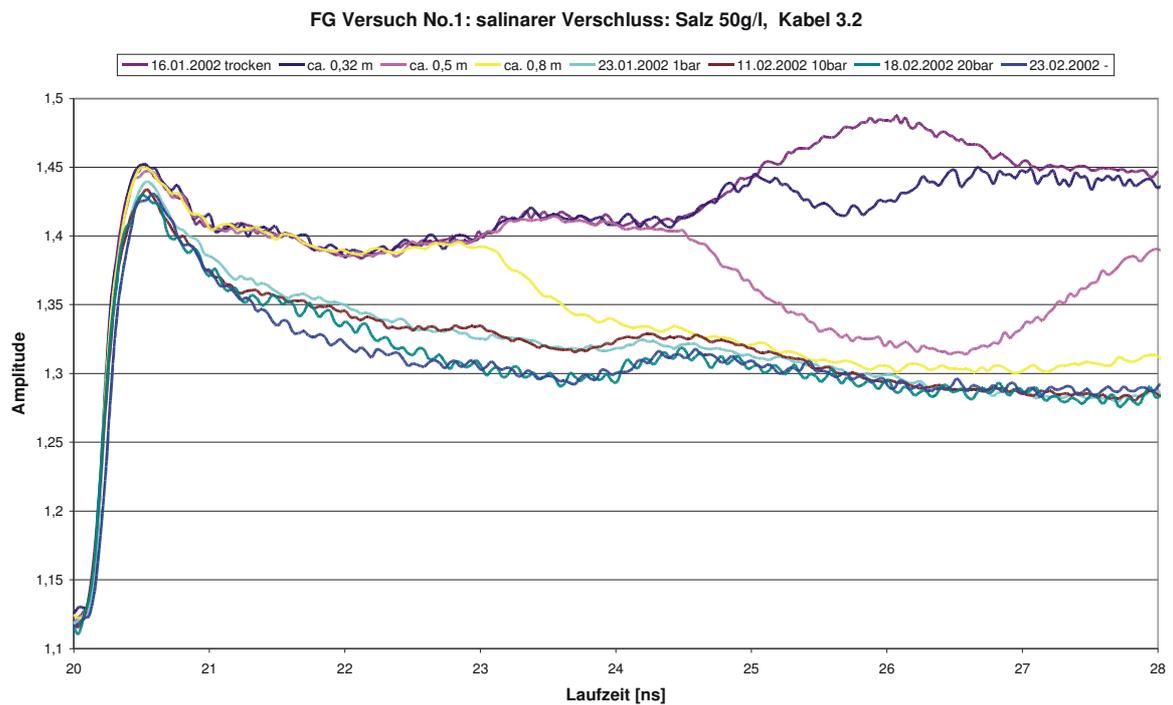
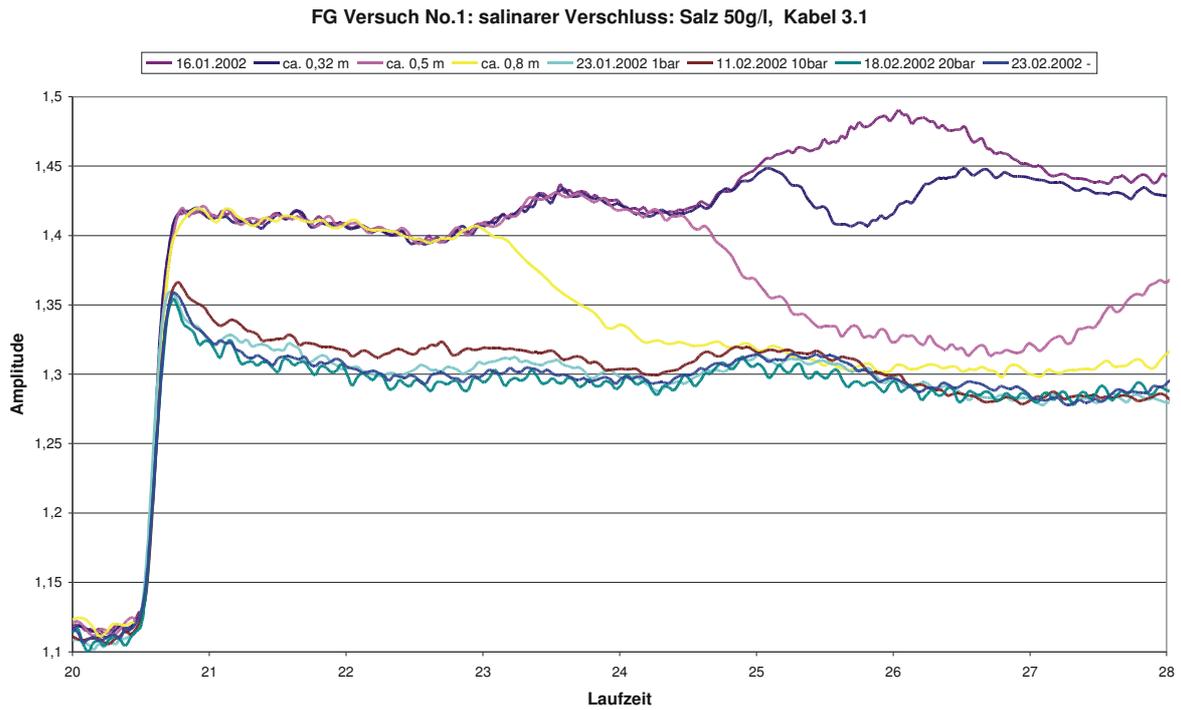


Bild 10 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 3 (beide Anschlüsse, BRA1)

FG Versuch No.1: salinärer Verschluss: Salz 50g/l, Kabel Mitte

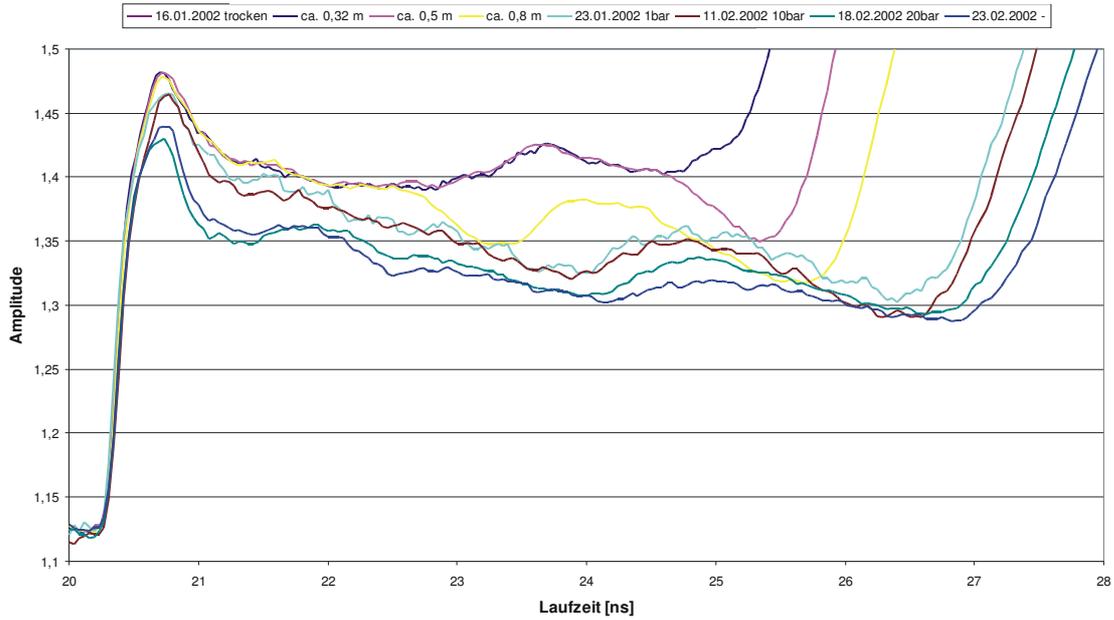


Bild 11 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel Mitte (beide Anschlüsse, BRA1)

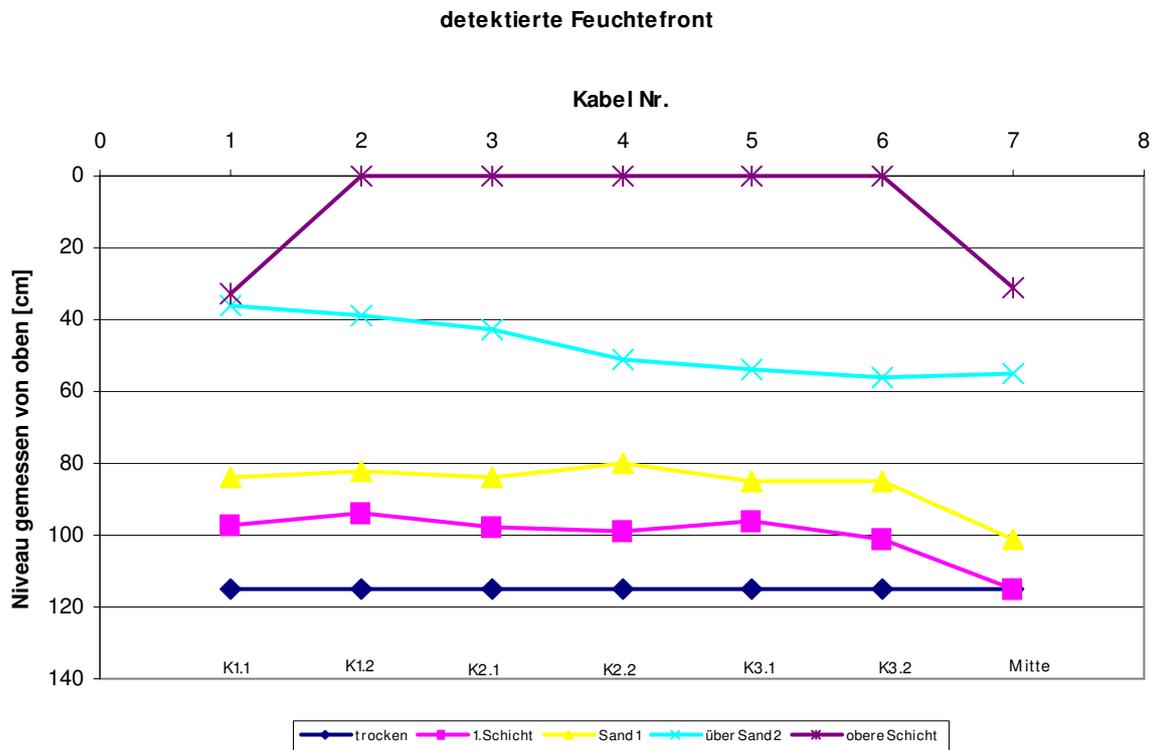


Bild 12 Ermittlung des Feuchtepegels an allen Sensoren (bezogen auf das Vergusskästchen als Anfang)



Bild 13 Schotter ausgebaut (-0,45 m)
Oberfläche binäres Gemisch



Bild 14 obere Bentonitschicht (-0,85 m)
nur an den Kabeln feucht



Bild 15 obere Sandschicht entfernt
gesamte Fläche feucht (-1,12 m)



Bild 16 mittlere Bentonitschicht
relativ trocken (1,20 m)

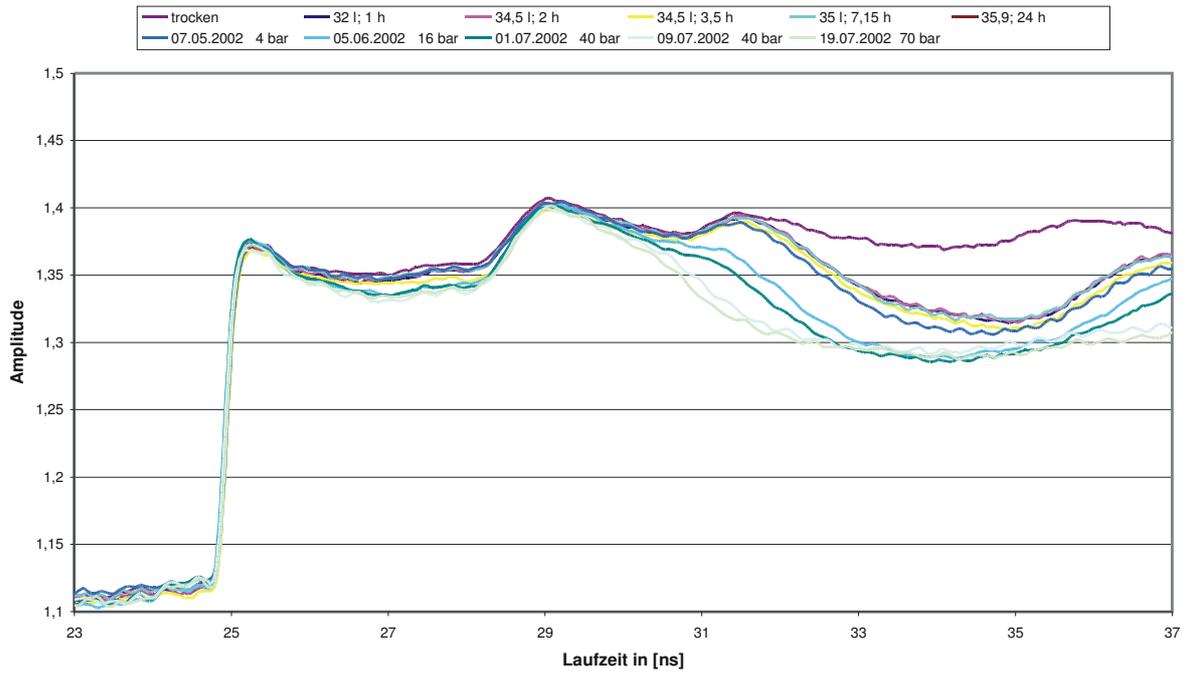


Bild 17 mittlere Bentonitschicht (-1,30 m)
deutliche Zunahme der Feuchte



Bild 18 untere Bentonitschicht (Kissen)
komplett durchfeuchtet

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 1.1



FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 1.2

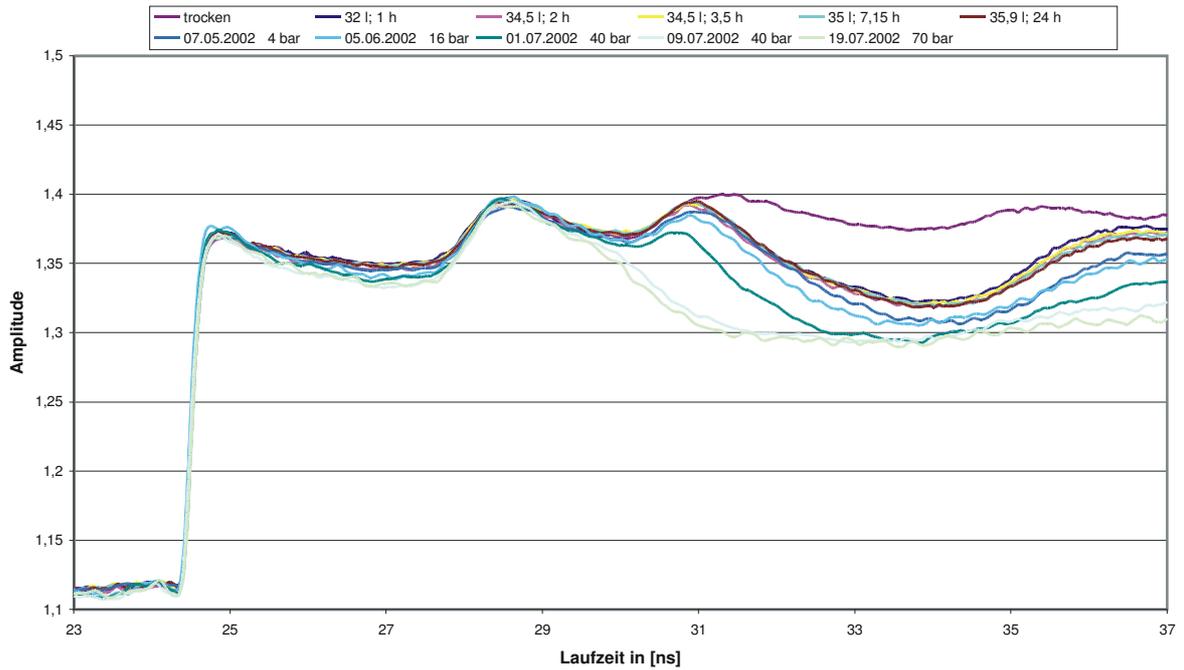
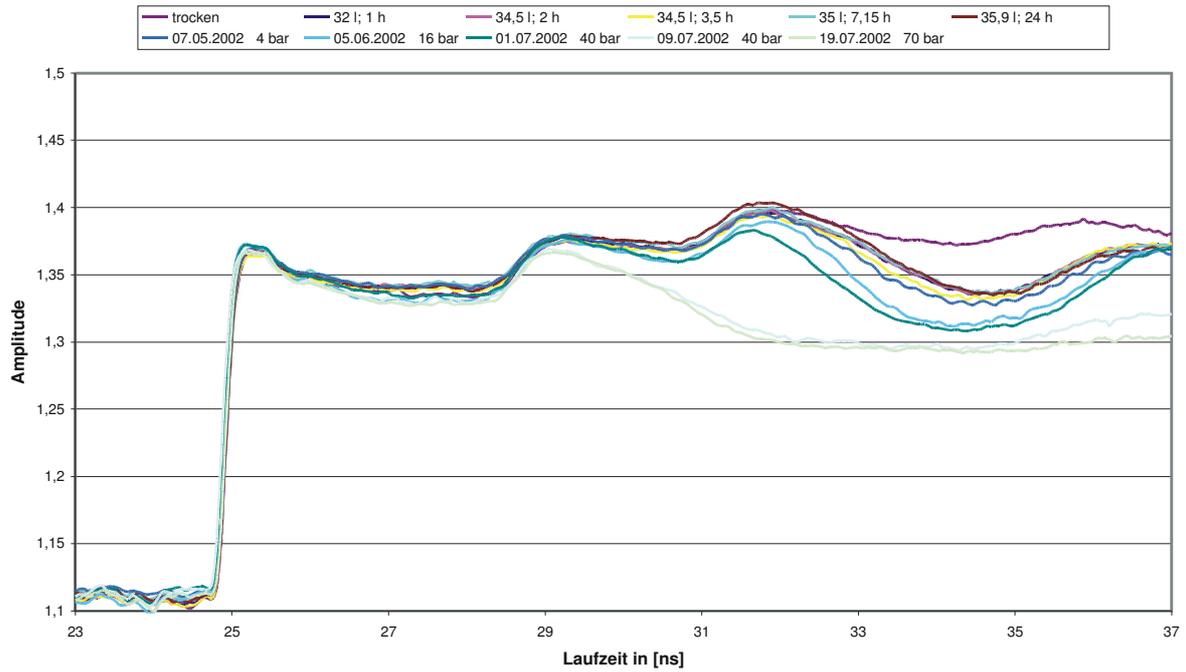


Bild 19 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 1 (Versuch BRA2, beide Anschlüsse)

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 2.1



FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 2.2

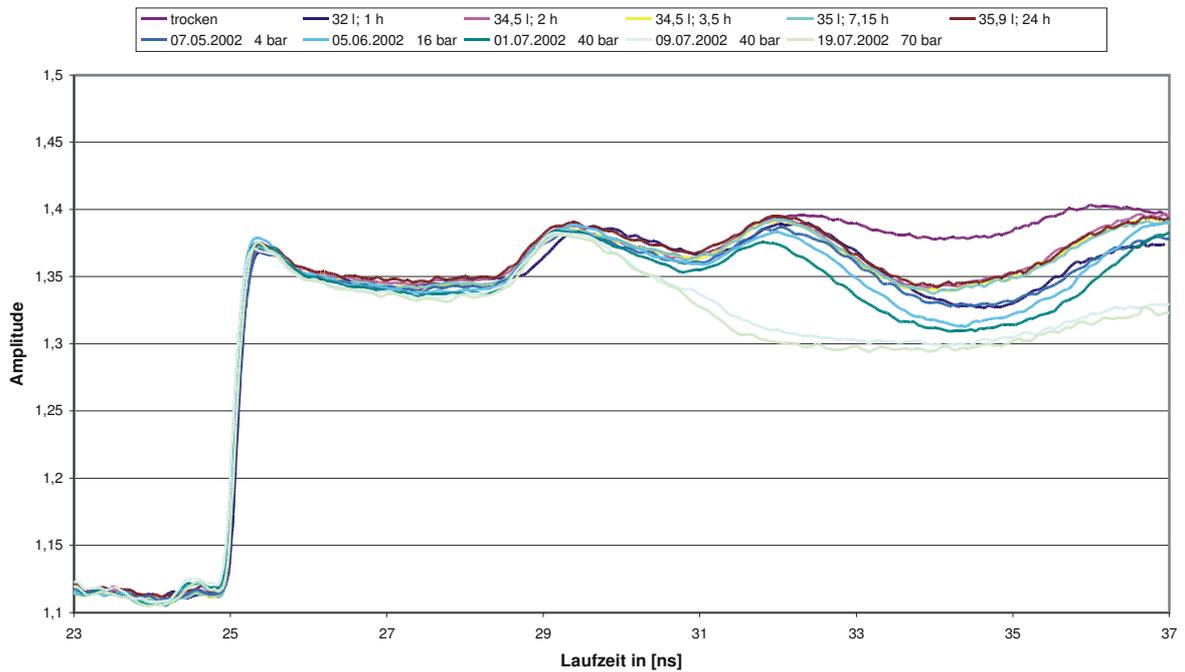
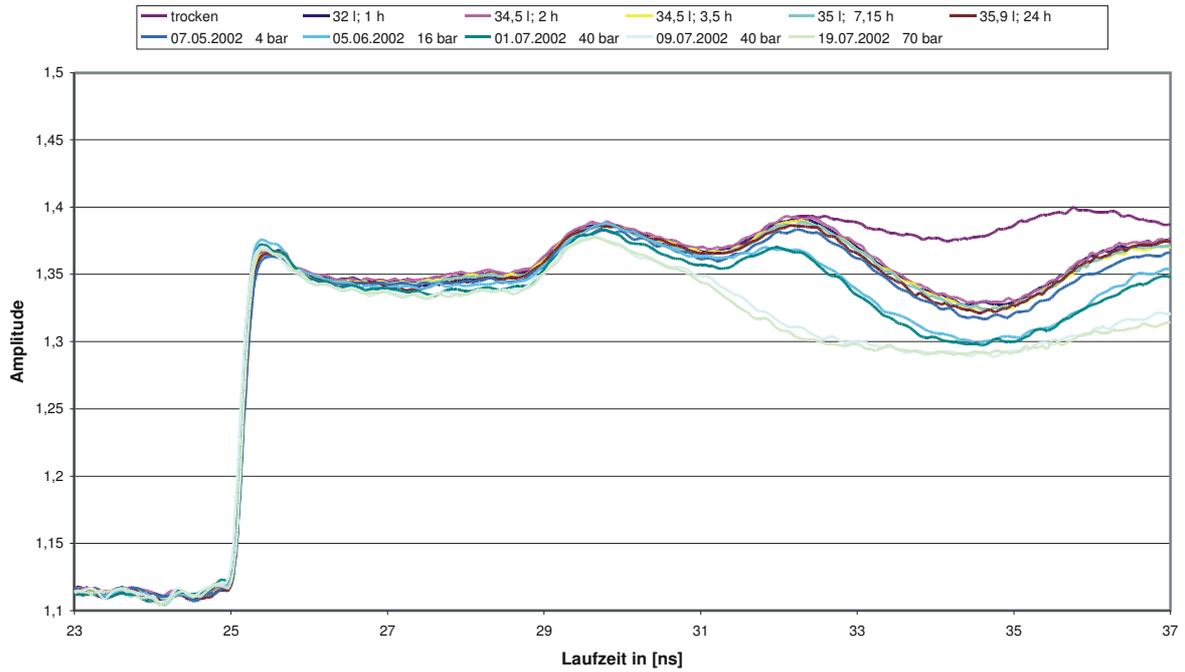


Bild 20 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 2 (Versuch BRA2, beide Anschlüsse)

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 3.1



FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 3.2

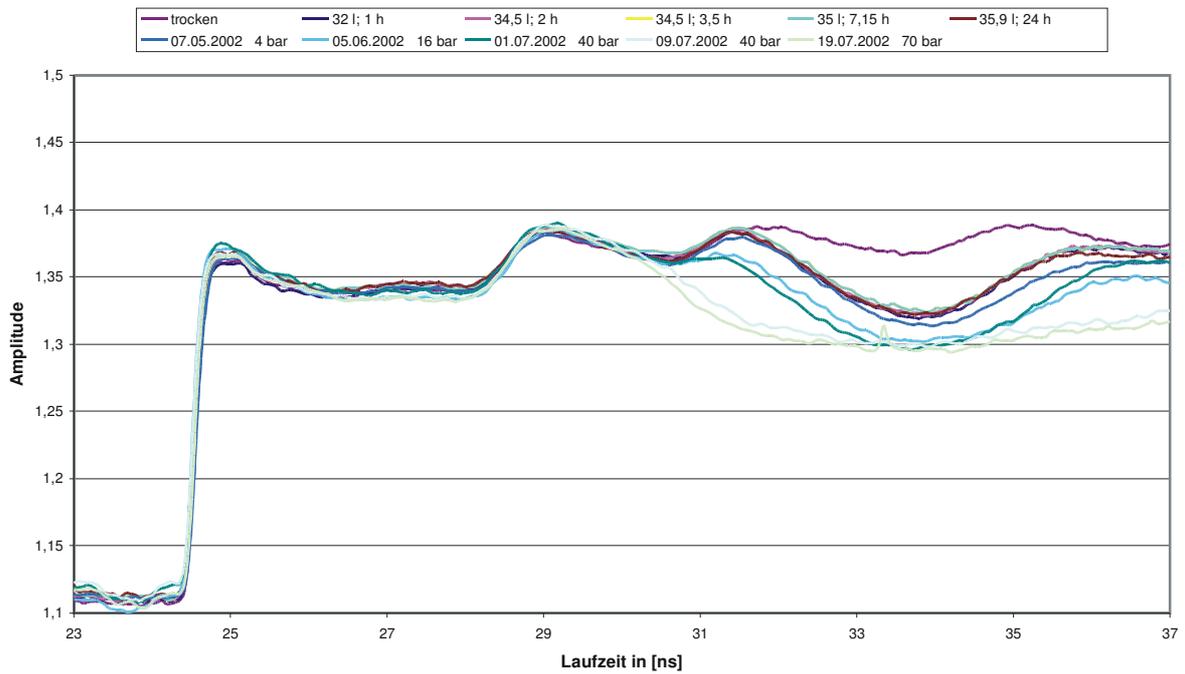


Bild 21 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel 3 (Versuch BRA2, beide Anschlüsse)

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel Mitte

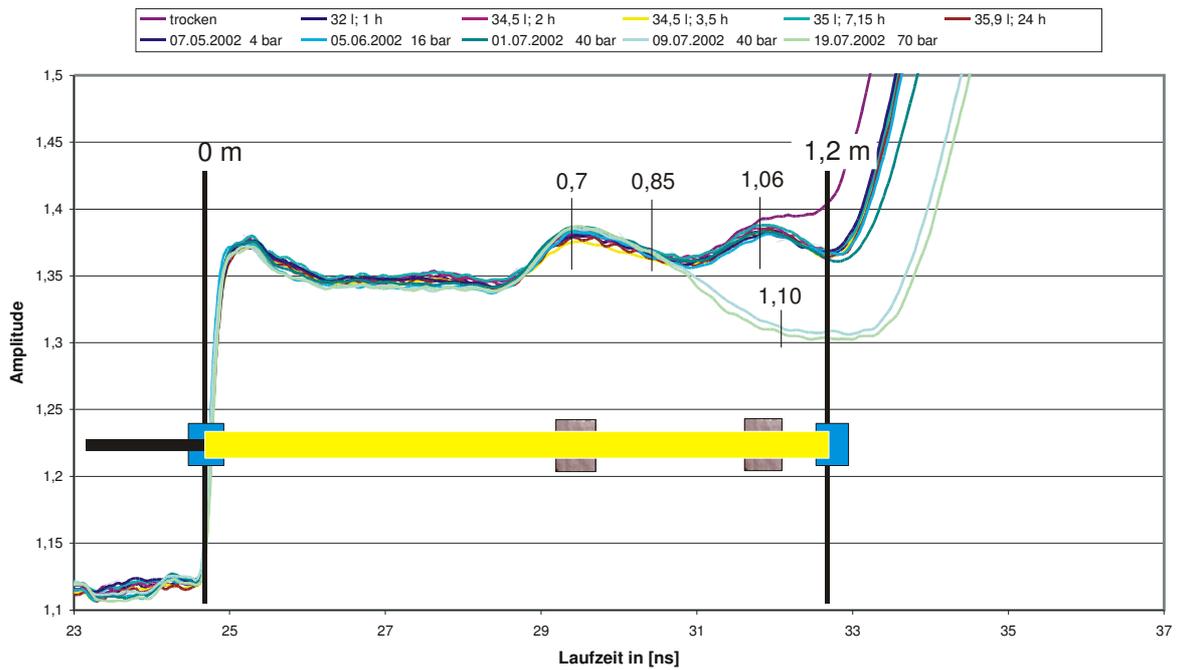


Bild 22 Ausbreitung der Wasserfront für das Sensorkabel in der Mitte (Versuch BRA2, nur ein Anschluss); Eintrag der berechneten Orte in Meter, Sandschichten bei 0,7 m und bei 1,06 m

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel Mitte

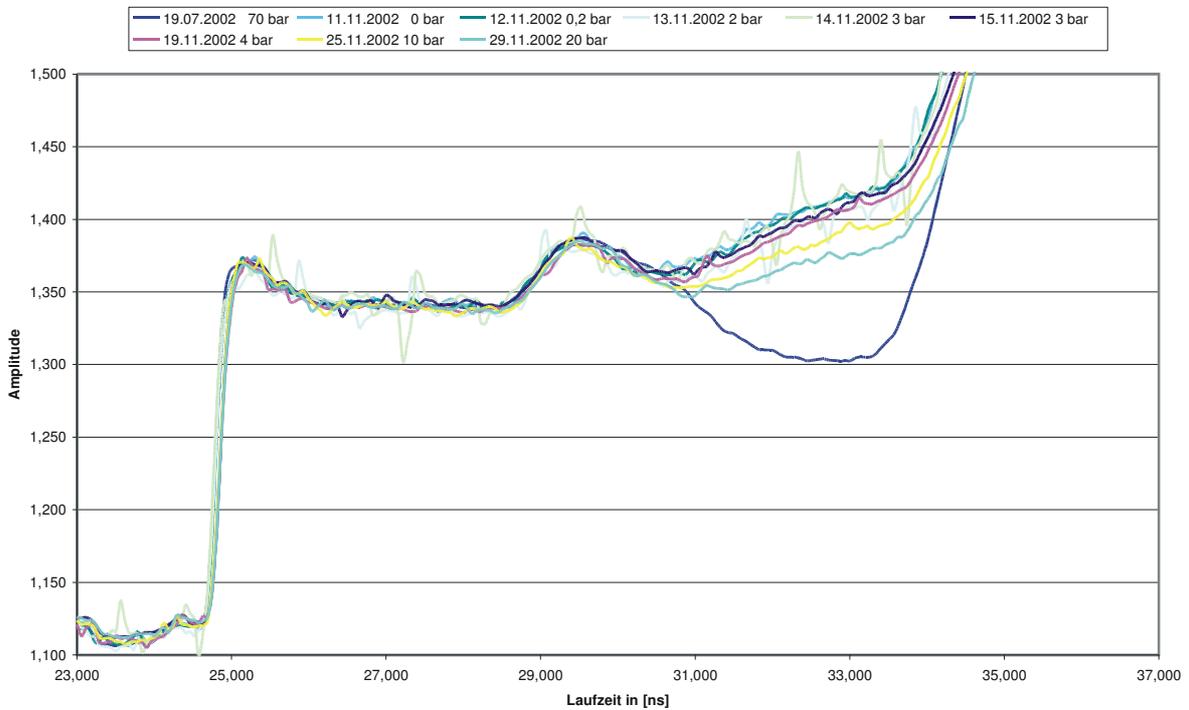
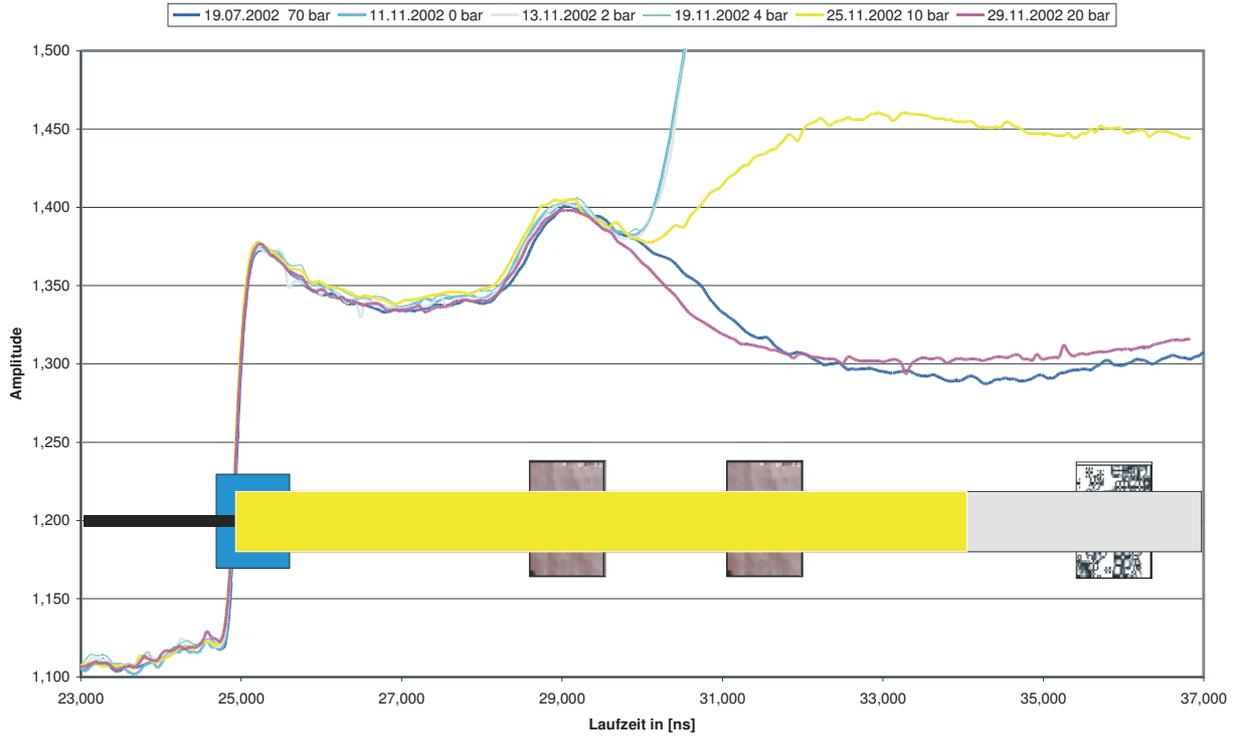


Bild 23 Ausbreitung der Wasserfront nach Wiederanfahren (Versuch BRA2, Sensorkabel Mitte)

FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 1.1



FG Versuch No. 2 (09.04.02): salinärer Verschluss: Salz 250g/l, Kabel 1.2

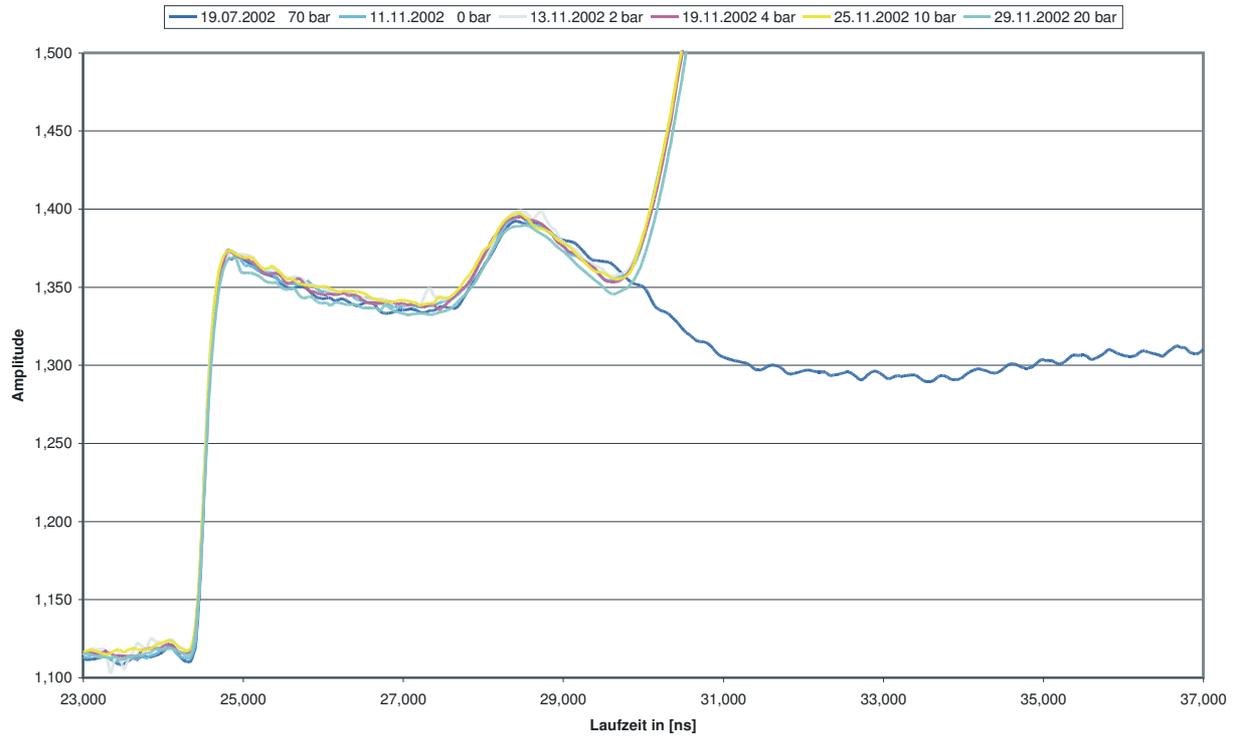


Bild 24 Ausbreitung der Wasserfront nach Wiederanfahren (Versuch BRA2, Sensorkabel 1)

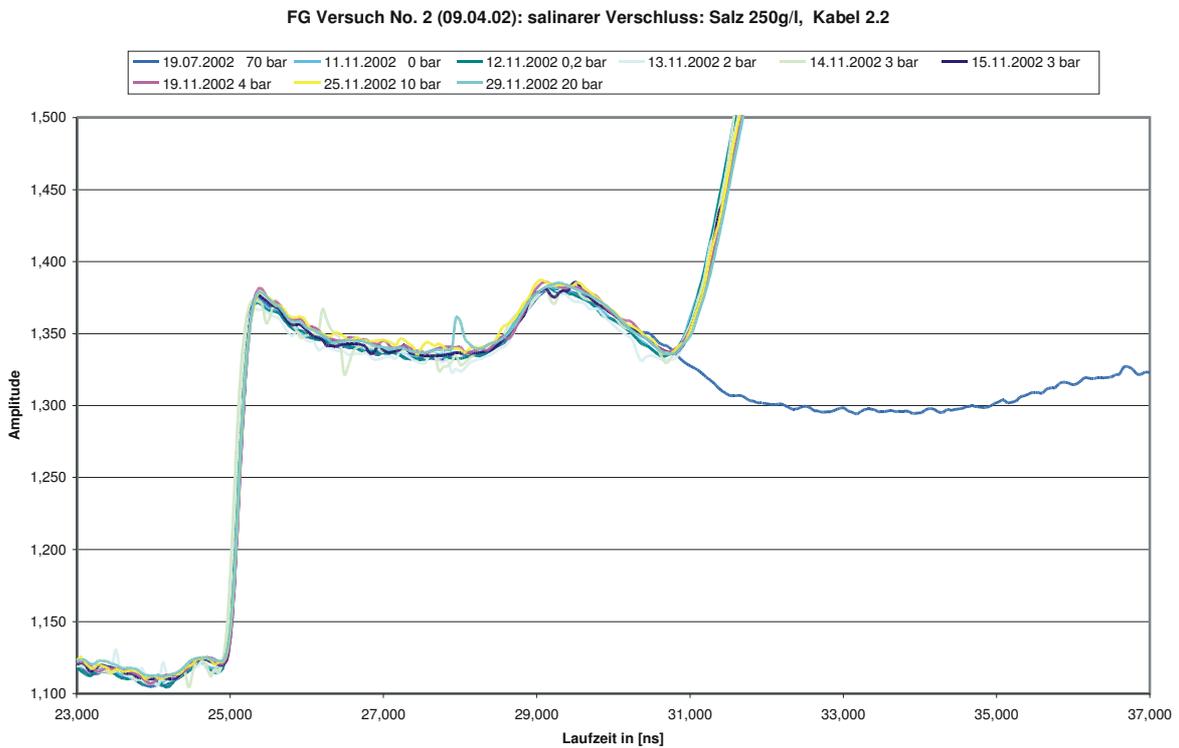
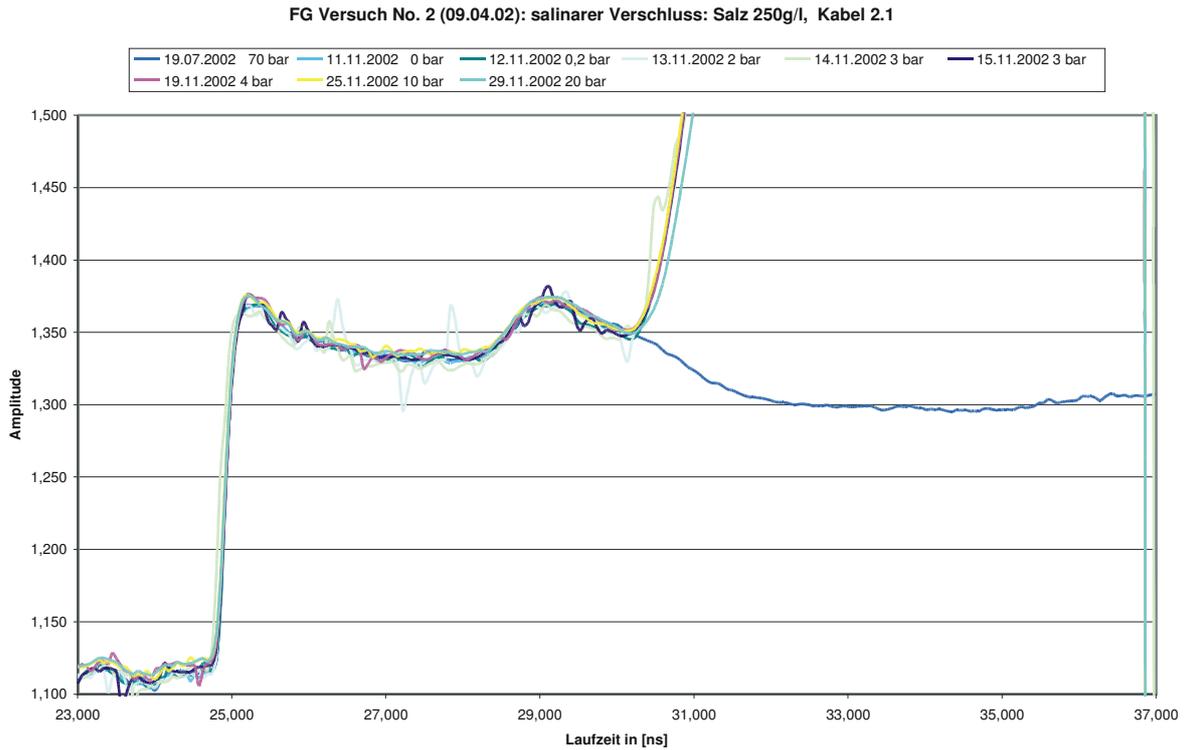


Bild 25 Ausbreitung der Wasserfront nach Wiederanfahren (Versuch BRA2, Sensorkabel 2)

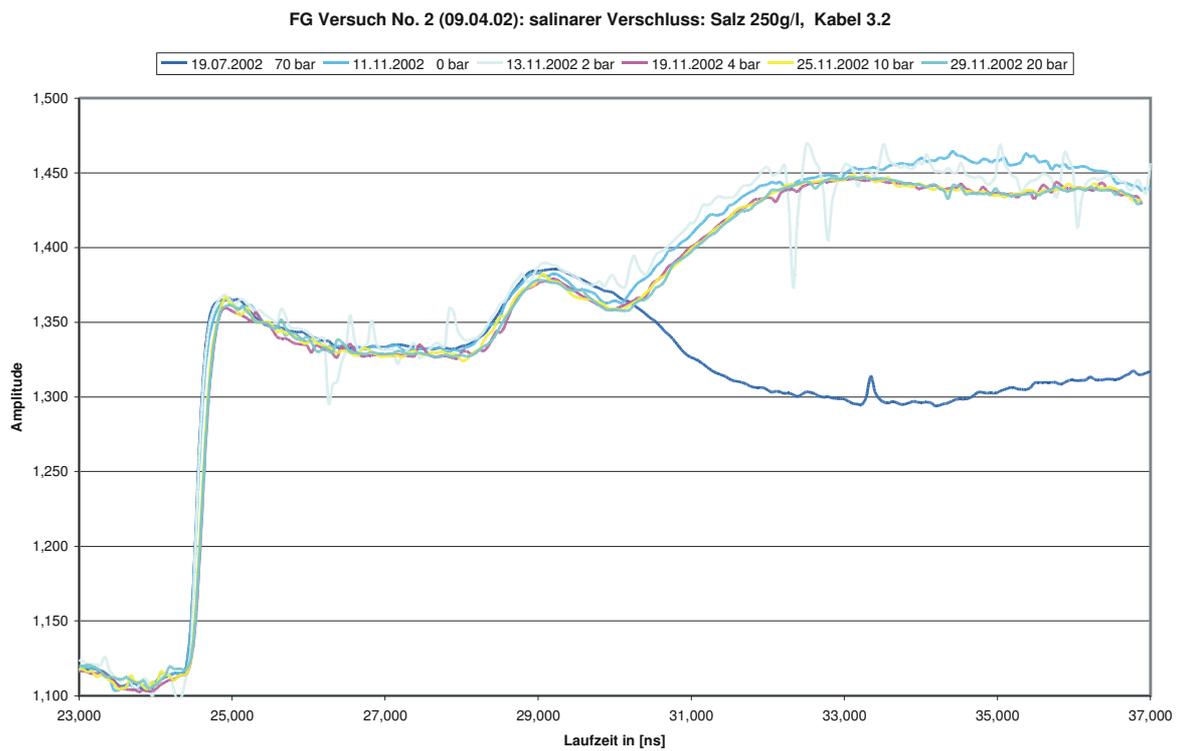
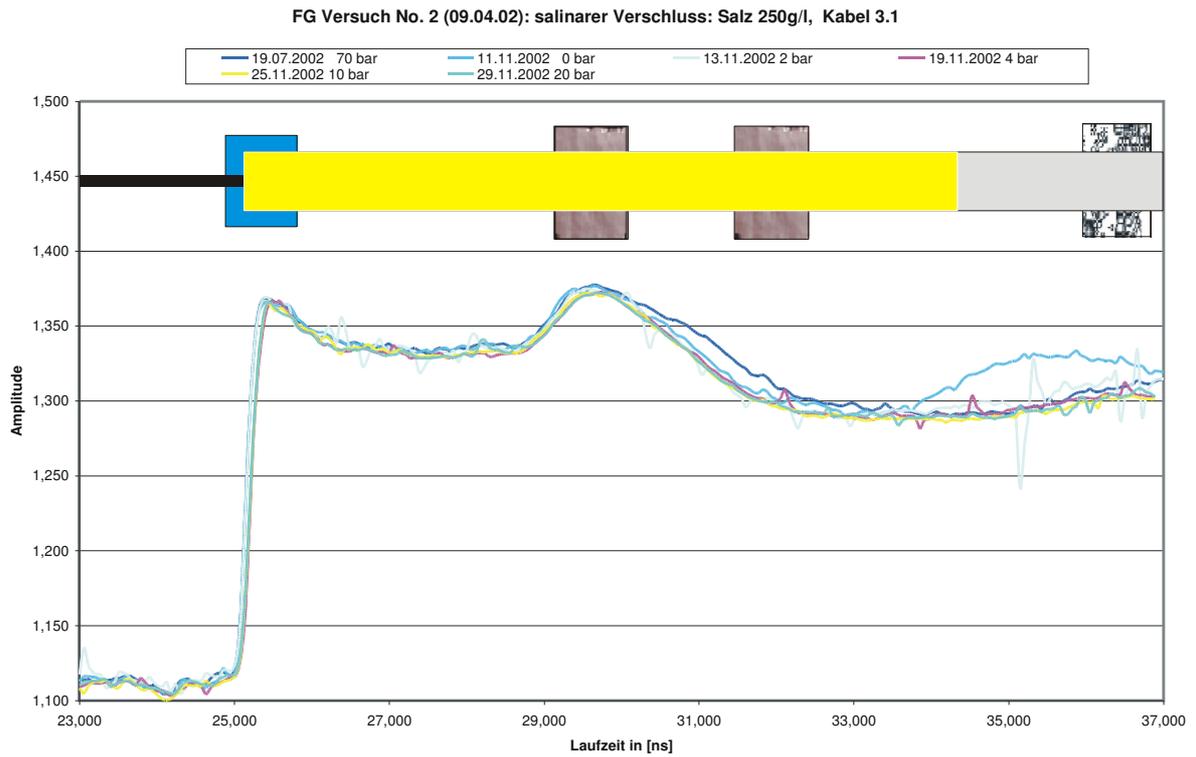


Bild 26 Ausbreitung der Wasserfront nach Wiederanfahren (Versuch BRA2, Sensorkabel 3)

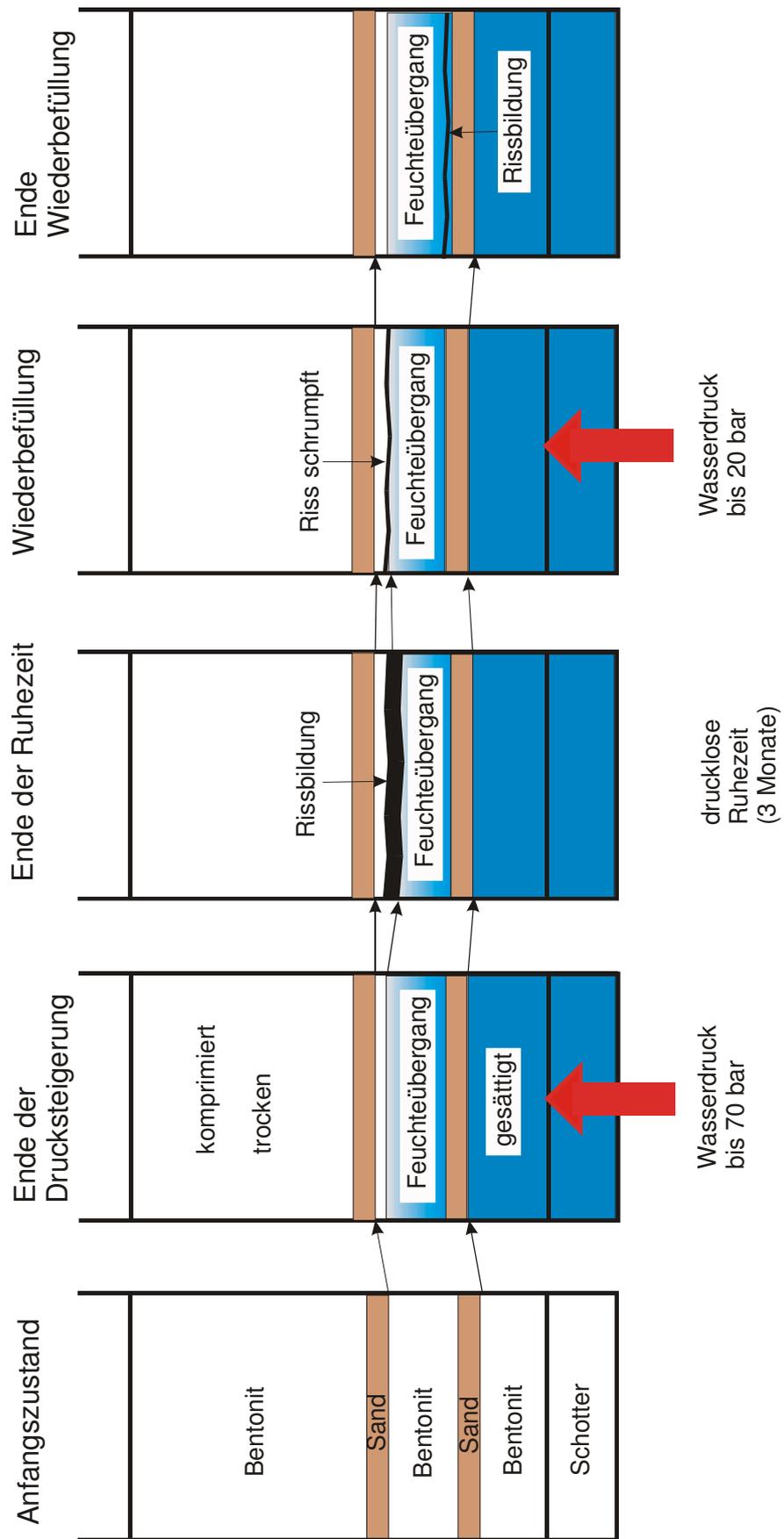


Bild 27 Rissbildung während der Ruhezeit und -schrumpfung bei der Wiederbefüllung

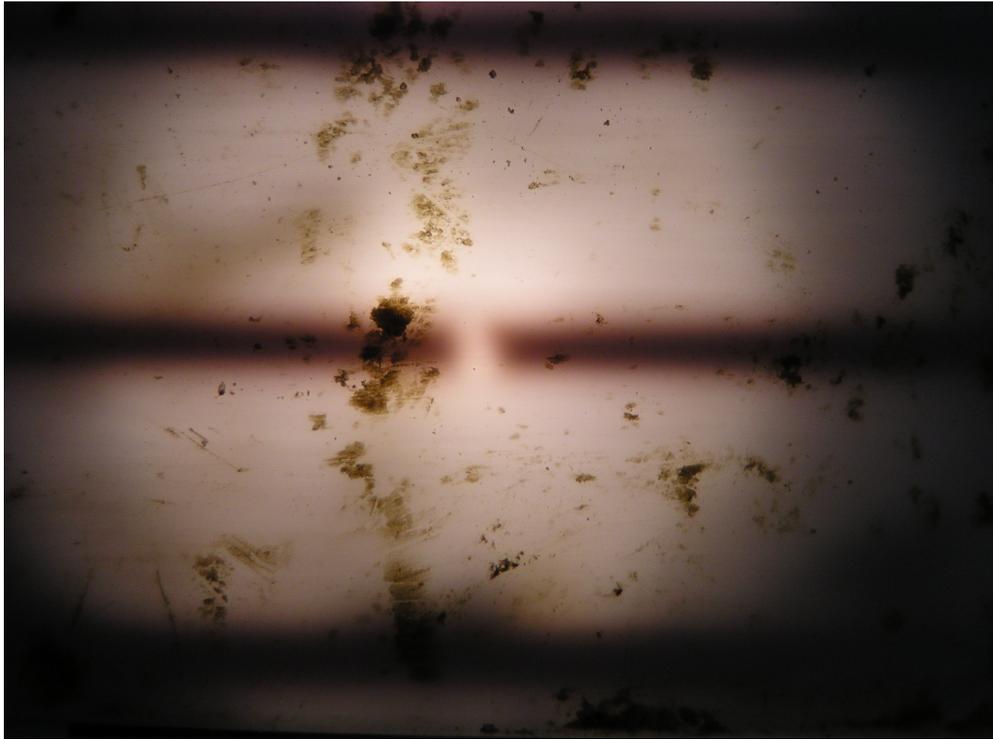


Bild 28 Bruch in Sensorkabel 1.2

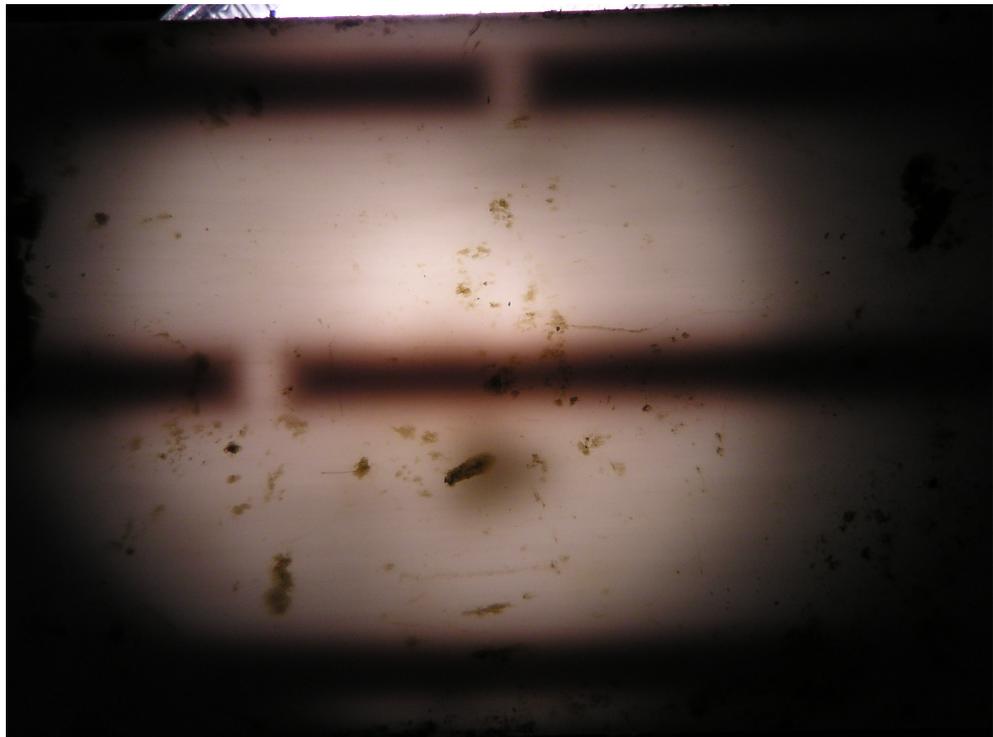


Bild 29 Brüche in Sensorkabel 2.1



Bild 30 Unterkante obere Sandschicht (ca. 0,9 m)



Bild 31 zwischen Sandschichten (ca. 1,1 m)



Bild 32 Unterhalb unterer Sandschicht (ca. 1,4 m)

		Oberes Element (OE)							
Höhe ab OK [cm]	18,5	29	38,4	49	58,5	67,5	77	86	
Bentonithöhe [cm]	0	10	20	30	40	50	60	70	
Ort	Wassergehalt grav. [%]								
1	10,46	10,58	11,22	10,92	9,9	9,3	9,73	9,64	
2	10,09	10,47	11,1	10,57	10,21	9,4	9,54	9,09	
3	10,26	10,42	10,73	10,45	10,15	9,23	9,77	9,1	
4	10,04	10,29	11,31	10,32	9,93	9,38	9,61	9,52	
5	10,31	10,45	11,06	7,08	10,64	9,58	9,79	9,67	
6	10,4	10,61	10,8	11,04	10,06	9,37	12,86	9,84	
7	10,21	10,42	10,97	10,88	10,55	9,48	9,82	9,96	
8	10,71	10,66	10,93	10,82	10,02	9,34	9,49	9,67	
9	10,54	10,45	10,89	11,23	10,03	9,49	10,04	9,74	
10	9,2	10,51	11,28	11,09	10,68	9,14	9,74	9,45	
Mittelwert	10,22	10,48	11,03	10,44	10,22	9,37	10,04	9,45	
Beschreibung	trocken								Sand
		Zwischen-Element (ZE, zwischen den					Unteres Element (UE)		
Höhe ab OK [cm]	101	109,5	114	118	122,5	134	144	169	
Bentonithöhe [cm]	5	15	20	24	29	0	10	35	
Ort	Wassergehalt grav. [%]								
1	10,36	15,47	22,56	31,87	35,28	35,66	39,63	45,38	
2	9,44	15,2	19,96	27,09	35,04	28,77	42,27		
3	10,34	15,32	19,22	30,47	30,77	38,83	43,76		
4	10,31	15,07	20,66	27,21	31,19	34,37	43,3	48,54	
5	10,38	14,39	21,93	27,52	32,28	35,84	38,6		
6	10,22	17,68	21,99	26,82	33,01	36,45	44,38	48,84	
7	10,71	19,15	24,29	26,53	30,32	44,13	42,66		
8	10,7	15,47	19,56	33,85	27,69	36,15	44,4	45,76	
9	11,12	16,21	22,79	26,47		41,88	45,06		
10	11,12	16,63	20,91	27,2		40,5	43,86	40,87	
Mittelwert	10,47	16,06	21,39	28,5	31,95	37,26	42,79	44,93	
Beschreibung	trocken		feucht			Sand		sehr feucht	
Probennahmeort:	1: Kabel 2.1 2: Kabel 2.2 3: Kabel 3.1 4: Kabel 3.2 5: Kabel 1.1 6: Kabel 1.2 7: Kabel M 8: nahe K 1.2 9: Mitte zwischen K 1.2 und K 2.1 10: nahe K2.1								

Tab. 2 Wassergehaltsbestimmung (gravimetrisch) der Bodenproben durch Ofentrocknung nach dem Ausbau

FG: HTV BR2: gemittelter Verlauf des grav. Wassergehaltes über der Füllhöhe

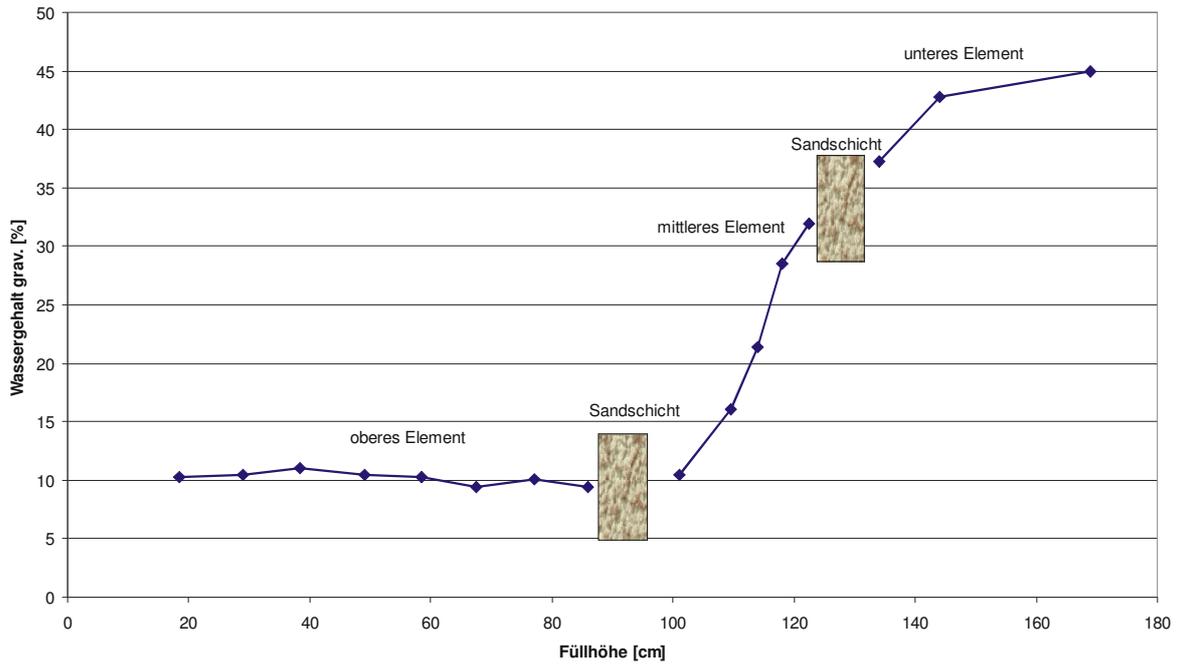


Bild 33 Auswertung der Bodenproben beim Ausbau des Materials; gemittelte Werte

FG: HTV BR2: Wassergehalt aus Bodenproben über der Höhe (ab Oberkante Behälter in cm)

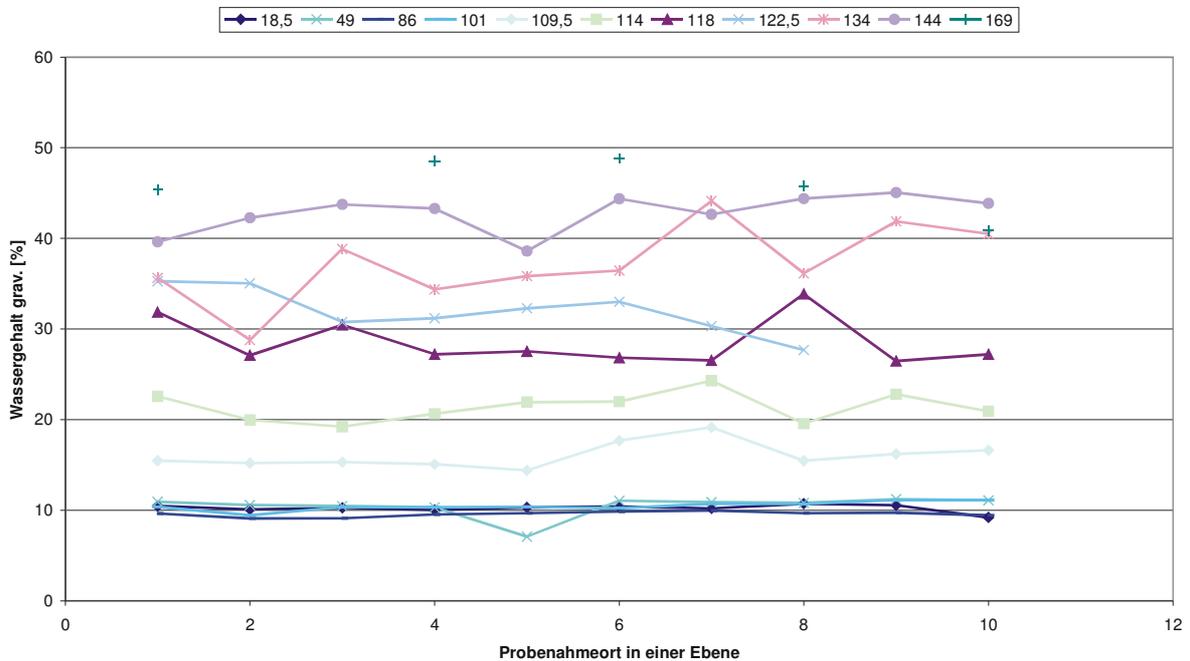


Bild 34 Auswertung der Bodenproben beim Ausbau des Materials; alle Werte



Bild 35 Bentonitprobe aus dem feuchten Bereich; Kissenstruktur noch erkennbar



Bild 36 Bentonitprobe aus der Grenzschicht gesättigt - feucht

Auswirkung der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ auf die Mischungsregel

lineare Mischungsregel:

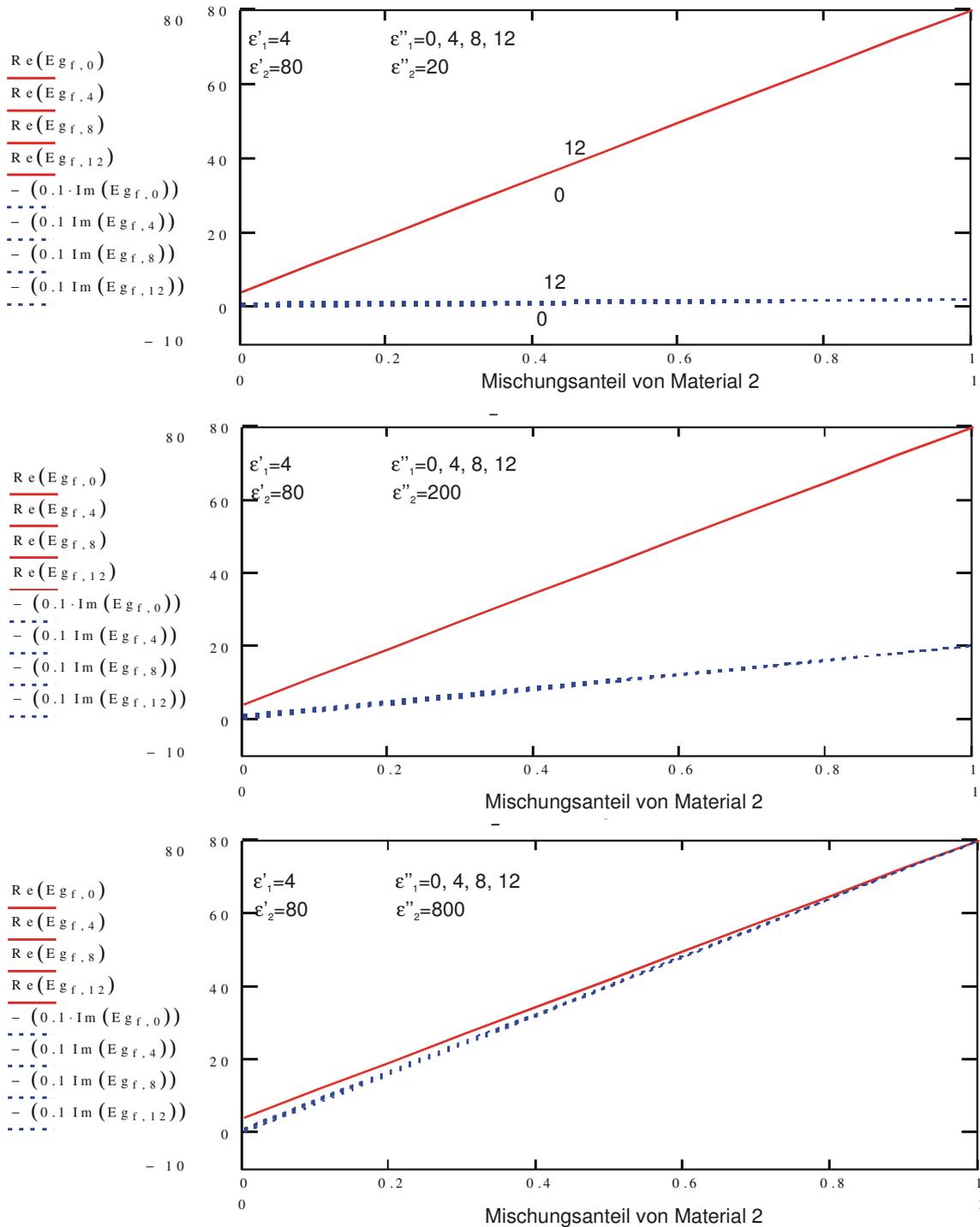


Bild 37 Anwendung komplexe Mischungsregel

Auswirkung der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ auf die Mischungsregel

Birchak Mischungsregel:

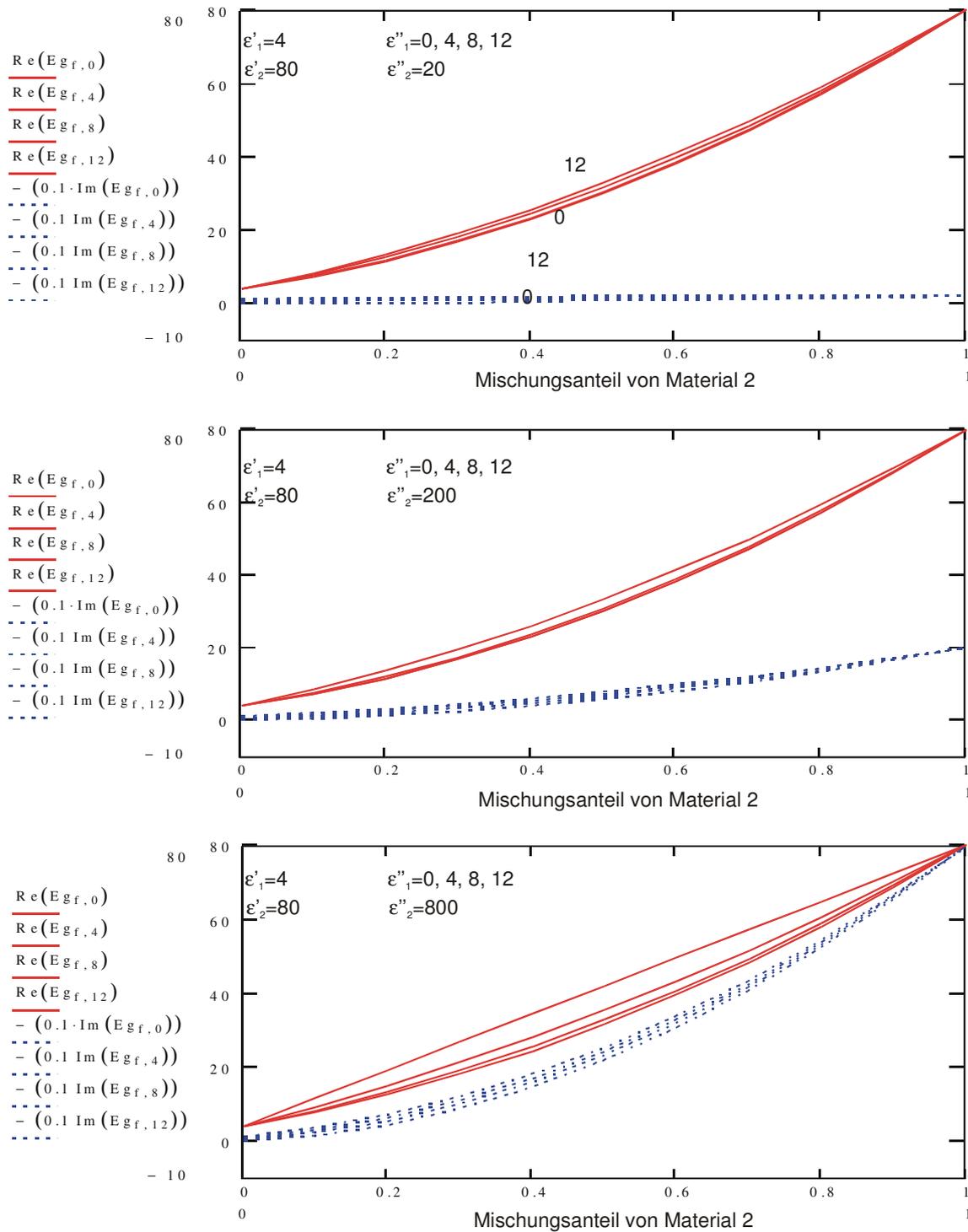


Bild 38 Anwendung komplexe Mischungsregel

Auswirkung der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ auf die Mischungsregel

Maxwell-Garnett Mischungsregel:

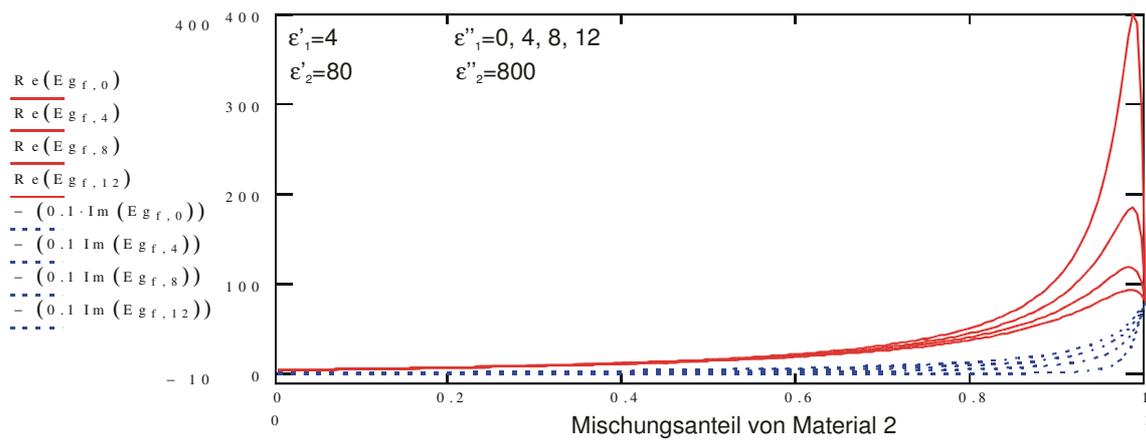
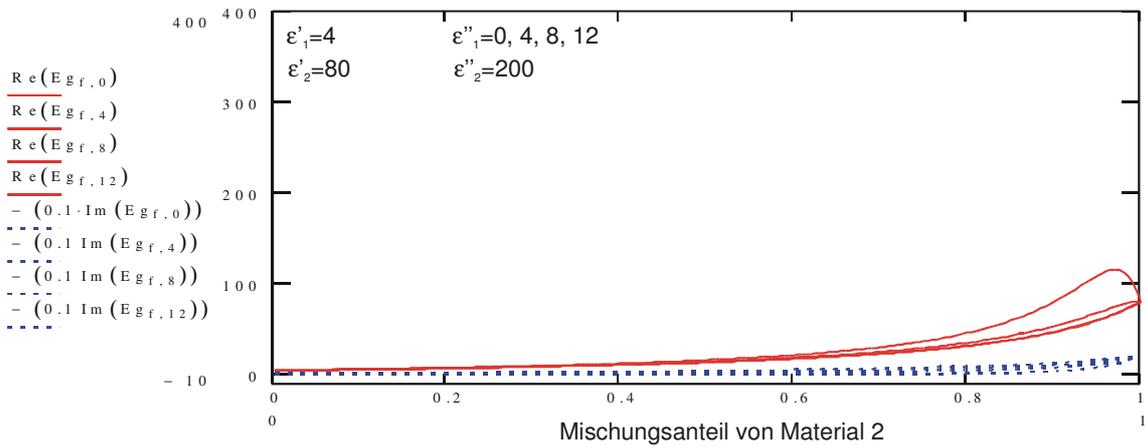
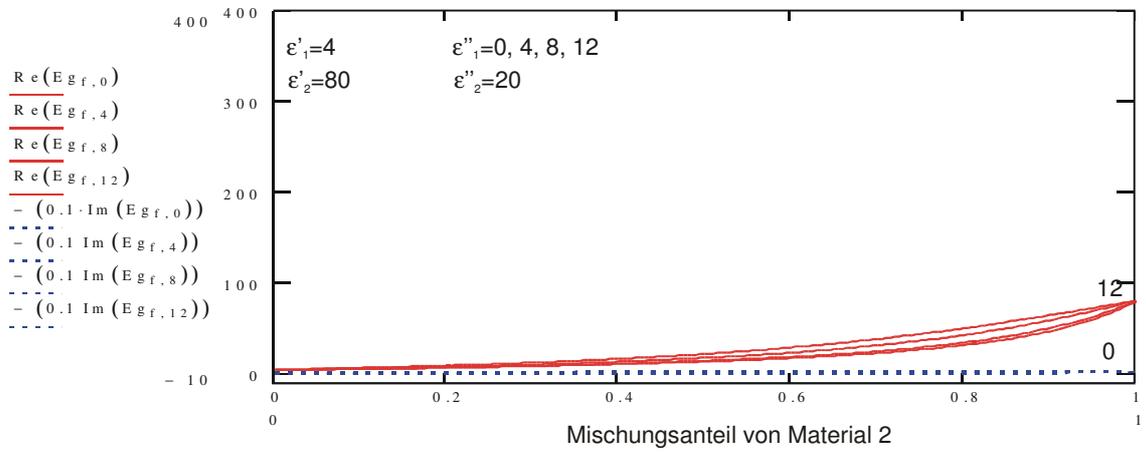


Bild 39 Anwendung komplexe Mischungsregel

Auswirkung der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ auf die Mischungsregel

Polder-van Santen Mischungsregel:

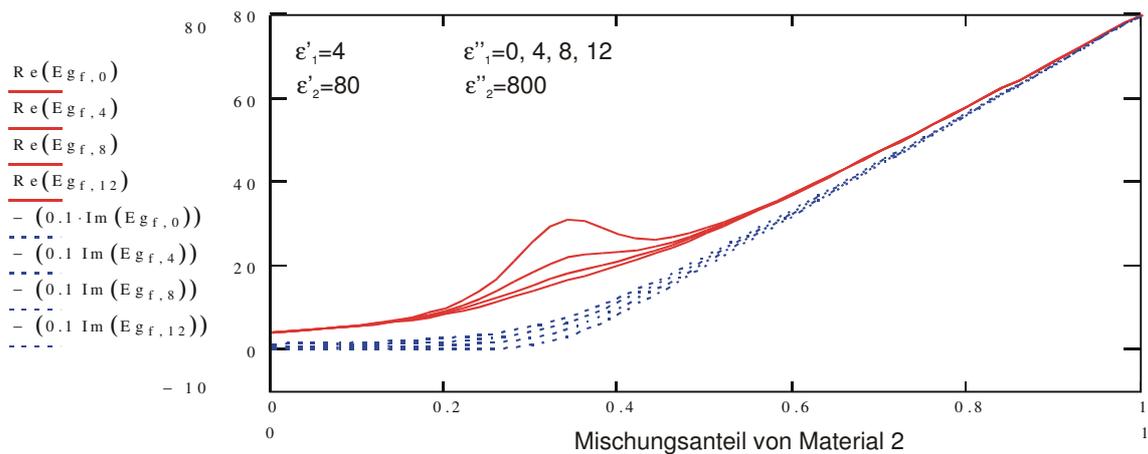
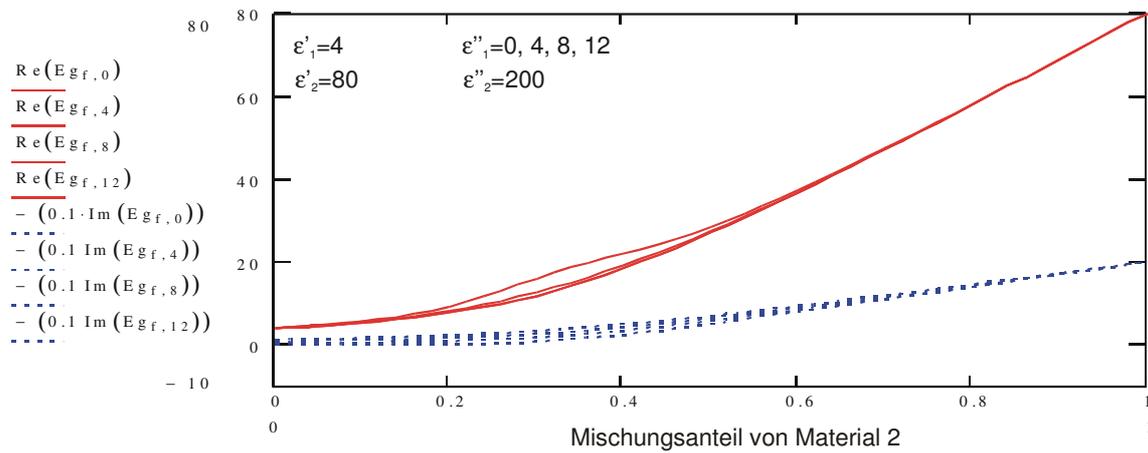
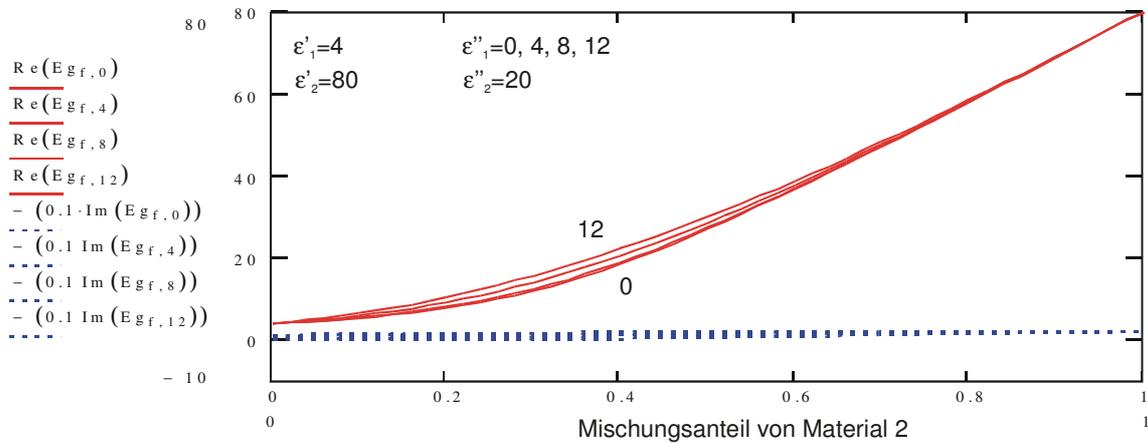


Bild 40 Anwendung komplexe Mischungsregel

Auswirkung der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ auf die Mischungsregel

coherent potential approximation:

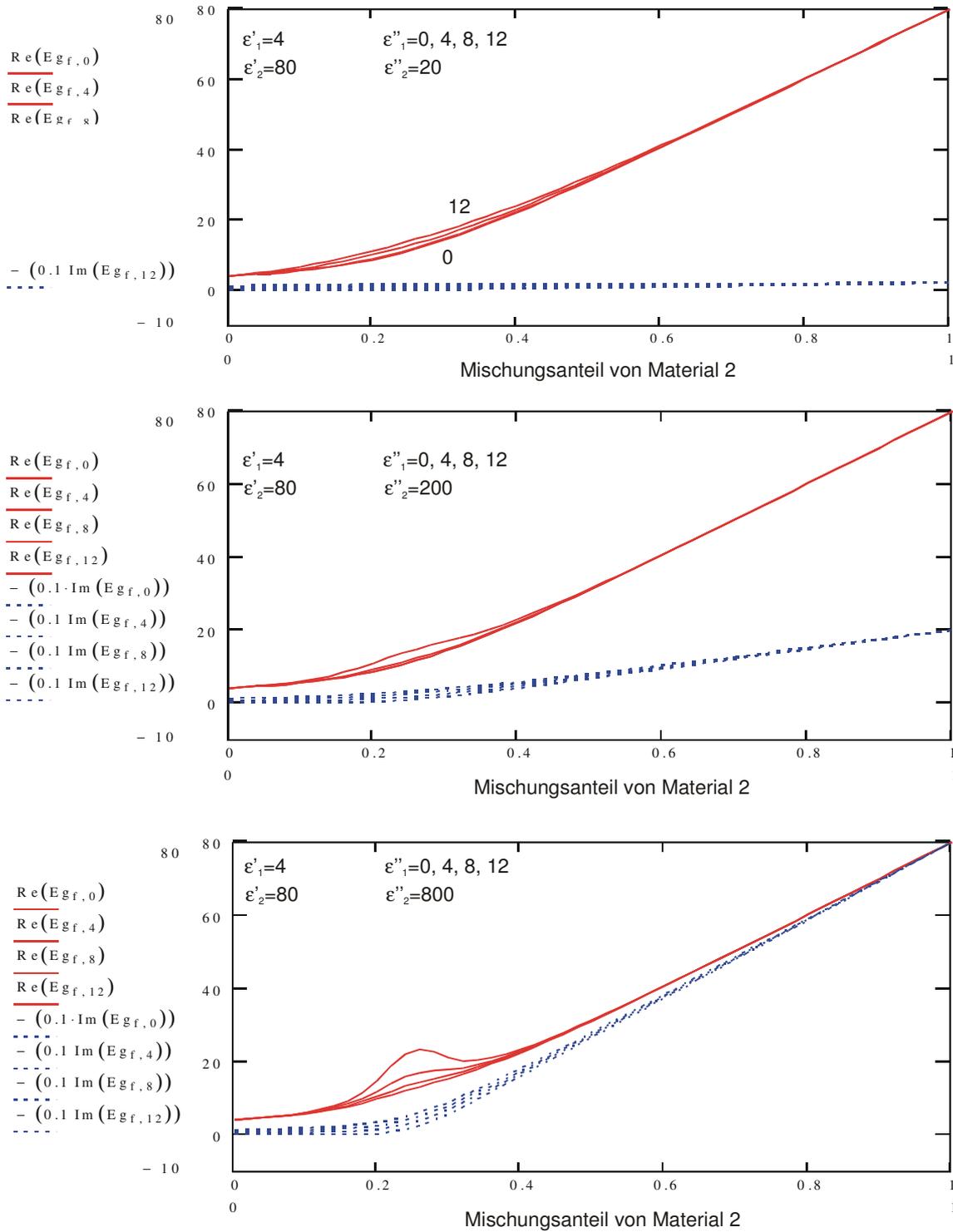


Bild 41 Anwendung komplexe Mischungsregel