



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Ableitung einer
Permeabilitäts-
Porositäts-
beziehung für
Salzgrus und
Dammbau-
materialien**



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Ableitung einer
Permeabilitäts-
Porositäts-
beziehung für
Salzgrus und
Dammbau-
materialien**

**Eckhard Fein,
Ingo Müller-Lyda,
Richard Storck**

**Braunschweig
September 1996**



**GSF-Forschungszentrum
Für Umwelt und Gesundheit
GmbH**

Institut für Tieflagerung

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter den Förderkennzeichen 02 E 8532 1 und 02 E 8775 1 gefördert. Im Zeitraum bis Juni 1995 wurden die Arbeiten vom GSF-Forschungszentrum am Institut für Tieflagerung in Braunschweig durchgeführt, ab Juli 1995 von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH im neugegründeten Fachbereich Endlagersicherheitsforschung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Vorwort

Der Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle erfolgt auf der Basis von standortspezifischen Sicherheitsanalysen. Dafür werden Rechenprogramme und Daten verwendet, mit denen die relevanten physikalischen und chemischen Prozesse bei der Freisetzung der Nuklide, bei der Ausbreitung im Deckgebirge und bei der Exposition in der Biosphäre beschrieben werden. In zahlreichen nationalen und internationalen Vorhaben werden zu den wichtigen physikalischen und chemischen Fragestellungen theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Ein wesentliches Ziel des Vorhabens "Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase", FKZ: 02 E 8532 1 und 02 E 8775 1, war die Verfolgung dieser Arbeiten und die Auswertung der wissenschaftlichen Ergebnisse hinsichtlich der Bereitstellung neuer Modellansätze und Daten für Langzeitsicherheitsanalysen. Im Zeitraum bis Juni 1995 wurden diese Arbeiten vom GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH am Institut für Tief Lagerung in Braunschweig durchgeführt, ab Juli 1995 von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH im neugegründeten Fachbereich Endlagersicherheitsforschung.

Zu diesem sonderfinanzierten Vorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) - heute Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) - in der Zeit vom 01.07.1992 bis 31.03.1996 sind vier wissenschaftliche Berichte entstanden, die die Ergebnisse des Vorhabens dokumentieren. Die Titel dieser Berichte lauten:

- GRS-Bericht 132 Ableitung einer Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien.

- GRS-Bericht 133 Auswertung von in-situ Konvergenzdaten und Ableitung eines Modellansatzes.

- GRS-Bericht 134 Auswertung von Sorptionsdaten hinsichtlich nichtlinearer Sorptionsmodelle für die Nuklidausbreitung im Deckgebirge.

GRS-Bericht 135 Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen

In diesen vier Berichten werden die zu den Schwerpunktthemen des Vorhabens durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten ausführlich dargestellt.

Der vorliegende GRS-Bericht 132 "Ableitung einer Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien" basiert weitgehend auf Arbeiten von Herrn Dr. U. Heemann im GSF-Institut für Tief Lagerung. Die vorliegenden Unterlagen wurden von den Autoren überarbeitet und ergänzt. An dieser Stelle danken die Autoren Herrn Dr. Heemann noch einmal ausdrücklich für die umfangreichen Vorarbeiten.

Für die Bestimmung der statistischen Dichteverteilung der Regressionsparameter der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung wurde ein Auftrag an die Firma RISA Sicherheitsanalysen GmbH, Berlin vergeben. Die Ergebnisse sind in diese Arbeit eingeflossen und an den entsprechenden Stellen zitiert.

Abstract

Durch den Strömungswiderstand von Versatzmaterialien und Verschlüssen wird der Transport von Laugen innerhalb eines Endlagers im Salinar behindert. Dieser Effekt wirkt sich beim Zufluß von Laugen in die Einlagerungsbereiche und beim Auspressen von kontaminierten Laugen aus dem Grubengebäude aus. Die bestimmende Größe für die Strömungswiderstände ist in diesem Falle die Permeabilität. Der durch den Gebirgsdruck hervorgerufene Konvergenzprozeß verringert den vorhandenen Resthohlraum und damit auch die Permeabilität der Versatzmaterialien und Verschlüsse.

In den bisherigen Langzeitsicherheitsanalysen wird der Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität für Salzgrus durch eine Potenzfunktion beschrieben. Sowohl die Ableitung des bisher verwendeten Zusammenhangs als auch die Bestimmung der verwendeten Parameter basieren auf der Auswertung einiger weniger experimenteller Daten, die Mitte 1983 zur Verfügung standen.

Es war daher das Ziel dieser Arbeit, unter Verwendung des bis Ende 1994 bekannt gewordenen Datenmaterials eine verbesserte Relation zwischen Permeabilität und Porosität für Salzgrusversatz abzuleiten. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann die bisher verwendete Potenzfunktion beibehalten werden, lediglich die Parameter müssen leicht modifiziert werden. Zusätzlich wurden für probabilistische Sicherheitsanalysen erstmalig die statistischen Verteilungsfunktionen der miteinander korrelierten Parameter der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung bestimmt.

Für die durchgeführte Auswertung standen noch keine ausreichenden Daten für stark kompaktiertes Salzgrus und damit für den Bereich kleiner Porositäten zur Verfügung. Die Ergebnisse vor kurzem abgeschlossener und einiger noch laufender Vorhaben lassen jedoch erwarten, daß auch hier eine bessere Absicherung möglich ist. Diesbezüglich ist die Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung zu wiederholen.

Die Übertragbarkeit der aus den Labordaten ermittelten Permeabilitäts-Porositätsbeziehung zur Beschreibung der in-situ-Eigenschaften ist noch nicht in ausreichendem Maße belegt. Die hohen Kompaktionsgeschwindigkeiten in Laborversuchen führen zu Veränderungen des Korngefüges, die bei den langsam ablaufenden In-situ-Vorgängen nicht auftreten. Belastbare Daten aus In-situ-Untersuchungen liegen derzeit noch nicht vor. Man darf erwarten, daß entsprechende Ergebnisse aus den laufenden In-situ-Vorhaben

“Experimentelle Untersuchung des Verhaltens von Versatz in Strecken” und “Untersuchung der Langzeit-Dichtwirkung von Bohrlochverschlüssen aus Salzgrus; DEBORA Phase 2” ermittelt werden. Erst nach Vorliegen und Auswertung der Ergebnisse dieser Vorhaben kann gegebenenfalls der Bedarf an weiteren FE-Arbeiten ermittelt werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Einflüsse auf die Permeabilitätsentwicklung	3
2.1 Korngrößenverteilung	3
2.2 Feuchtegehalt	4
2.3 Kompaktionsgeschwindigkeit	5
2.4 Temperatur	5
2.5 Meßfluid	6
3 Experimentelle Daten zur Permeabilität von Salzgrus-Versatz	7
4 Ansätze für empirische Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen	11
5 Statistische Verfahren	13
5.1 Lineare Regression	13
5.2 Bivariate Dichteverteilung für zwei normalverteilte Variablen	17
5.3 Bivariate Dichteverteilung für eine normal- und eine lognormal verteilte Variable	19
5.4 Bivariate Dichteverteilung der Regressionsparameter	20
5.5 Empirische Permeabilitäts-Porositätsrelation	21
6 Salzgrusversatz: Ergebnisse und Diskussion	23
7 Salzformsteine: Experimentelle Daten, Ergebnisse und Diskussion	37
8 Mörtel in Dammbauwerken: Daten, Modelle und Diskussion	43
8.1 Auswertung der Ergebnisse von Walter	43

8.2	Auswertung der Ergebnisse von Franke	48
8.3	Bewertung der Modelle für Mörtel	50
9	Zusammenfassung und Ausblick	53
	Literatur	57
	Anhang A: Meßdaten für Salzgrusversatz	61
	Anhang B: Meßdaten für Salzbricketts	89
	Anhang C: Meßdaten für Salztonmörtel.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Permeabilitäten für Versatz als Funktion der Porosität von allen berücksichtigten Meßwerten.....	10
Abbildung 2	Lineare Regression	14
Abbildung 3	Isolinien der bivariaten Dichteverteilung $f(x,y)$ für verschiedene Korrelationskoeffizienten ρ_{xy}	18
Abbildung 4	Meßdaten und Regressionsgeraden der Gruppen mit einem Korrelationskoeffizienten $0.45 \leq \rho_{nk} \leq 0.99$	24
Abbildung 5	Regression für trocken kompaktierten Salzgrus.....	25
Abbildung 6	Regression der Daten für feucht kompaktierten Salzgrus im Vergleich mit den Datengruppen BGR XII, BGR XIII und TSS.....	26
Abbildung 7	Kornverteilungskurven der bei Albrecht/Suckow verwendeten Salzgrusproben im Vergleich mit dem von Walter verwendeten Material und einer idealen Fuller-Kurve.	29
Abbildung 8	Regression für alle akzeptierten Meßdaten	30
Abbildung 9	Darstellungen der bivariaten Dichteverteilung der logarithmierten Porositäts- und Permeabilitätswerte	32
Abbildung 10	Bivariate Dichteverteilung $f(\alpha,\beta)$ der Regressionsparameter a und b	33
Abbildung 11	Konfidenzbereiche für die wahren Regressionsparameter.....	34
Abbildung 12	Bivariate Dichteverteilung $f(A,m)$ der Parameter A und m.....	35
Abbildung 13	Permeabilitätsmeßdaten zu Originalsalzbriketts und Modellbriketts	39
Abbildung 14	Darstellung der Permeabilitäten von Salzbriketts, Modellbriketts und von Salzgrus.....	40
Abbildung 15	Darstellung der Permeabilitäten von Briketts, Salzgrus und Mörtel	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Angaben zu den verwendbaren Meßergebnissen.....	7
Tabelle 2	Angaben zu den als <u>nicht</u> verwendbar eingestuft Permeabilitätsmessungen	8
Tabelle 3	Meßwerte der akzeptierten Datengruppen.....	9
Tabelle 4	Ergebnis der linearen Regression für die akzeptierten Datengruppen.....	23
Tabelle 5	Ergebnis der linearen Regression für die Daten aus den beiden Kategorien feucht und trocken.....	27
Tabelle 6	Ergebnis der linearen Regression für die 67 bzw. 68 akzeptierten Meßwertpaare	33
Tabelle 7	Angaben zu den Permeabilitätsmessungen an Salzbriketts	37
Tabelle 8	Meßwerte der Datengruppen von Salzformsteinen.....	38
Tabelle 9	Meßwerte von Walter für Steinsalz-Tonmörtel	43
Tabelle 10	Lineare Regressionen und ihre Parameter für unterschiedliche Werte von F_T	47
Tabelle 11	Permeabilitätsbestimmende Parameter in den Untersuchungen von Franke.....	50

1 Einleitung

Zu den langzeitigen physikalischen und chemischen Vorgängen in einem Endlager für radioaktive bzw. chemisch-toxische Abfälle im Salzgestein gibt es keine direkten Erfahrungen. Es bestehen lediglich Kenntnisse aus dem Betrieb von Bergwerken sowie aus In-situ- und Laborversuchen. Um Aussagen über Vorgänge zu machen, die sich über sehr lange Zeiträume erstrecken können, werden Modelle erstellt, welche die bekannten und als relevant eingestuften Wechselwirkungen und Abläufe vorhersagen sollen. Da die Ergebnisse solcher Modellrechnungen experimentell nicht überprüfbar sind, ist es um so notwendiger, Modellansätze mit abgesicherten Parametern für die in einem Endlager ablaufenden Prozesse bereitzustellen.

Ein wichtiges Szenario in den Sicherheitsanalysen für saline Endlager stellt der nicht völlig auszuschließende, störfallbedingte Zutritt von Laugen sowie insbesondere der anschließende Austritt kontaminierter Lauge aus dem Endlager dar. Die Bewegung der Lauge wird durch die Strömungswiderstände des eingebrachten Versatzes und der Verschlußmaterialien behindert. Wichtige Kenngrößen in diesem Prozeß stellen die Permeabilitäten des Versatzes, der Damm- und Bauwerke sowie sonstiger Verschlüsse sowie des Wirtsgesteins selbst dar. Die Permeabilitäten dieser Materialien hängen empfindlich von deren Porosität ab. Insbesondere die Porosität des Versatzes ändert sich durch seine Kompaktion auf Grund der Konvergenz des kriechfähigen Salzgebirges.

In den bisherigen Planungen ist für die Verfüllung der Hohlräume des Endlagers Salzgrus vorgesehen, der beim Auffahren der Strecken und Kammern anfällt. Der in dieser Arbeit durchgeführten Zusammenfassung und den Bewertungen zum Versatz wurden jedoch vorwiegend Untersuchungen an sogenanntem Laborversatz zugrundegelegt. Darunter ist Salzgrus zu verstehen, der aus technischen Gründen eine im Vergleich zu dem Material, das bei der Streckenauffahrung mit einer Teilschnittmaschine anfällt, differierende Korngrößenverteilung aufweist. Im Labor wurden die jeweils verwendeten Körnungen im allgemeinen durch Absieben der Grobfractionen eingestellt. Außerdem weisen die Laborproben in der Regel unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen auf und wurden zudem mit unterschiedlichen Anfangsdichten, Feuchtegehalten und Kompaktionsgeschwindigkeiten und zum Teil auch bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellt. Die oben genannten Unterschiede in der Probenherstellung können auch bei gleicher Porosität zu jeweils unterschiedlichen Permeabilitäten führen. Auch unterschiedliche Permeabilitätsmeßtechniken können insbesondere bei niedrigen Porengehalten die Meßergebnisse systematisch beeinflussen. Die Kenntnis dieser Einflüsse ist für die sachgerechte Bewertung der betrachteten experimentellen Ergebnisse für Salzgrusversatz unbedingt erforderlich.

Zusätzlich zu den Untersuchungsergebnissen an den im Labor hergestellten Versatzproben wurden Meßwerte für alten, über Jahrzehnte in-situ-verfestigten Versatz sowie aus dem In-situ-Versuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung im Forschungsbergwerk Asse einbezogen.

Es war das Ziel dieser Arbeit, die vorliegenden experimentellen Daten zur Permeabilität von Salzgrusversatz, Salzbricketts und Salztönmörtel zusammenzutragen, auf ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf Endlagerverhältnisse zu überprüfen und gegebenenfalls auszuwerten. Zu diesem Zweck werden Regressions- und Korrelationsanalysen an einem hieraus ausgewählten Satz von

Daten durchgeführt. Diese liefern als Ergebnis eine empirische Permeabilitäts-Porositätsbeziehung mit entsprechenden Parametern, Dichteverteilungen und Konfidenzbereichen. In einem weiteren Schritt werden die Verteilungsdichten der stochastisch abhängigen Regressionsparameter bestimmt. Auf der Grundlage dieser Dichtefunktionen können Stichproben der Parameter für die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung als Eingabeparameter, zum Beispiel für probabilistische Langzeitsicherheitsanalysen, gezogen werden.

Mögliche Einflüsse auf die Permeabilitätsentwicklung werden in Kapitel 2 näher erläutert. In Kapitel 3 werden die vorliegenden Experimente und ihre Resultate vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für eine Einbeziehung in diese Analysen klassifiziert. Verschiedene bekannte Ansätze für die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung in Schüttgütern, die nicht für Salzgrus, sondern für Sande entwickelt wurden, werden in Kapitel 4 kurz erläutert. Kapitel 5 beschäftigt sich ausführlich mit den statistischen Methoden zur Auswertung der Daten sowie mit der Bestimmung der Dichteverteilungen und der Konfidenzintervalle der Parameter. Die für Salzgrus erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 7 bzw. 8 werden die Resultate für Salzformsteine und Salzionmörtel dargestellt und erläutert. Kapitel 9 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit, eine Beschreibung des aktuellen Standes und einen Ausblick auf zukünftige FuE-Arbeiten auf diesem Gebiet. In den Anhängen A, B und C sind die zur Verfügung stehenden experimentellen Daten für Salzgrus, Salzformsteine bzw. Salzionmörtel aufgelistet und ausführlich charakterisiert.

2 Einflüsse auf die Permeabilitätsentwicklung

Die in der Einleitung erwähnten Einflüsse spielen nicht nur beim Versatz, sondern auch bei Salzgrusbriketts oder -mörtel eine Rolle und sind mit Einschränkungen auch auf Untersuchungen an festem Steinsalz zu übertragen. Wegen dieser grundlegenden Bedeutung für die Interpretation und die Bewertung der Versuchsdaten sollen diese Einflüsse im folgenden am Beispiel des Salzgrusversatzes detailliert erläutert werden.

2.1 Korngrößenverteilung

In nahezu allen Untersuchungen zum mechanischen oder hydraulischen Verhalten von Versatz wurde jeweils Material mit unterschiedlichen bzw. nicht klar definierten Korngrößenverteilungen benutzt. In der Regel wird nur die maximale Korngröße angegeben, gelegentlich auch der Ungleichförmigkeitsgrad und die Krümmungszahl [1]. Entscheidend für die Permeabilität ist jedoch gerade der Feinanteil.

Die Permeabilität von Schüttgütern verhält sich näherungsweise quadratisch mit dem kleinsten wirksamen Korndurchmesser und wird vergleichsweise geringfügig durch die größeren Anteile beeinflusst. Bei Bruchvorgängen oder Rekristallisationen wird auch diese Größe verändert. Permeabilitätsmessungen an monodispersen Materialien [2] ergaben, offensichtlich beeinflusst durch z.T. starke Bruchvorgänge bei der vergleichsweise sehr schnell ablaufenden Kompaktion, eine Durchmesserabhängigkeit mit einer Potenz $\sim 3/2$. Hierbei ist allerdings auch der Einfluß einer Korngeometrie mit veränderten Korngrößen nicht auszuschließen. In welchem Maße Bruchvorgänge in normalen Kornverteilungen die Permeabilität beeinflussen, ist wohl wegen der schwierigen experimentellen Durchführbarkeit noch nicht systematisch untersucht worden.

Einige Laboruntersuchungen deuten auf einen Ausgleich der Korngrößenverteilung infolge von Bruchvorgängen bei der Kompaktion hin. Dies ist in einem Endlager unter normalen Umständen nicht zu erwarten, da dort Konvergenzraten auftreten, die mit den im Labor möglichen Techniken nicht simulierbar sind bzw. unpraktikable Meßzeiten erfordern. Bei, im Vergleich zu Laborversuchen allem, über lange Zeiträume unter Feuchtbedingungen in situ verfestigtem Versatz sind keine Bruchvorgänge erkennbar [3].

Desweiteren ist im Endlager bei der Verfüllung der Hohlräume eine Entmischung durch Trennung der Fein- und Grobanteile praktisch unvermeidbar. Bei den Laborproben hingegen wird in aller Regel sorgfältig darauf geachtet, daß bei der Herstellung die Entmischung gering ist, da sonst auf Grund der starken Abhängigkeit der Permeabilität von der Korngrößenverteilung die Ergebnisse nur schwer miteinander verglichen werden können. In situ werden die Entmischungen jedoch sogar noch wesentlich stärker ausgeprägt sein als in den kleinen Proben im Labor. Eine einfache Übertragung der Ergebnisse von Labor-Permeabilitätsmessungen unter Feuchtbedingungen auf Endlagerverhältnisse ist somit nur eingeschränkt möglich.

2.2 Feuchtegehalt

Sehr viele Experimente zur Ermittlung der Versatzpermeabilität wurden an Salzgrus mit natürlichem Feuchtegehalt, d.h. hier im Bereich von etwa 0,1 Gew.%, durchgeführt. Der Zutritt von Laugen in ein verfülltes Endlagerbergwerk kann sich in vielfältiger Weise auf die langfristige Permeabilitätsentwicklung des Versatzes auswirken.

Unter dem Einfluß von Feuchtigkeit setzt der Salzgrusversatz der Kompaktion einen geringeren Widerstand entgegen, da

1. die Körner besser aufeinander gleiten können und damit durch einfache Lageänderung ohne wesentliche plastische Verformungen bereits eine deutliche Volumenreduktion durch die Porositätsabnahme ermöglicht wird,
2. die Kristalle durch lokale Lösungsprozesse im Bereich der Kontaktzonen angelöst werden und das gelöste Material über Diffusion an anderer kontaktfreier Stelle wieder auskristallisiert (FADT: fluid assisted diffusional transport [4]). Diese Prozesse laufen auf Grund der zu Beginn noch sehr kleinen Kontaktzonen relativ schnell ab und können somit die Anfangskompaktionsrate wesentlich erhöhen,
3. mit den Um- und Rekristallisationsvorgängen Geometrieänderungen der Körner verbunden sind.

Somit kann die erwünschte niedrige Porosität bzw. Permeabilität in feuchtem Salzgrus insbesondere bei niedrigen Drücken deutlich schneller erreicht werden als im trockenen. Daneben werden durch die feuchtigkeitsbedingte Spannungsreduktion, Verlagerung der Körner in günstigere Positionen und einen Oberflächeneffekt (Joffe-Effekt) [5], Bruchvorgänge in den Körnern vermutlich weitgehend verhindert.

Die Kompaktion von trockenem Versatz verläuft bei kleinen Resthohlräumen analog zur Konvergenz von Strecken und Kavernen. Diese Verringerung ist direkt dem vorhandenen Hohlraum proportional und verläuft daher nach einem Exponentialgesetz. Bei Einwirkung von Feuchte hingegen ist das verbliebene Hohlraumvolumen nicht die entscheidende Größe, sondern die Kontaktfläche und der Kontaktdruck zwischen den verbliebenen Poren und Kanälen. Unter diesen Umständen ist mit einem vollständigen Schließen der schmalen kanalförmigen Wegsamkeiten bzw. einem Abtrennen der Zwickelvolumina zu rechnen, so daß die Permeabilität bereits gegen Null gehen kann, bevor die Restporosität verschwunden ist. Der Fluidtransport ist dann nur noch durch Diffusion möglich.

Andererseits kann aber auch eine Vergrößerung der Versatzkörner durch Umkristallisation eintreten [6], was vermutlich vornehmlich die permeabilitätsbestimmenden Feinanteile betrifft, so daß dann bei einer Kompaktion mit einer abgeschwächten Permeabilitätsabnahme zu rechnen ist. Es ist unbekannt, ob dieser Effekt über den gesamten Kompaktierungsprozeß wirksam oder nur während einer bestimmten Phase von Bedeutung ist. Zudem kann bei Laugendurchfluß im Extremfall eine lokale Auflösung des Versatzes (Dolinen- oder Kanalbildung) auftreten, die eine praktisch vollständigen Durchlässigkeit des Versatzes zur Folge hätte.

Unter Umständen ist bereits ohne eine Kompaktion mit einem "Pseudoverschluß" der Kanäle oder Poren für Gase zu rechnen, denn, wenn eine Flüssigkeitsfront durch eine Wegsamkeit abgesperrt wird, ist ein Druck mindestens von der Höhe des Kapillardrucks erforderlich, damit das Fluid weiterströmen kann. Da der Kapillardruck dem Kehrwert des Kapillarradius proportional ist, ist dieser Effekt auch von der Kompaktion abhängig. Dieses Phänomen ist typisch für bestimmte Zweiphasenströmungen.

Im allgemeinen Fall des Gas-Laugen-Gemischs tritt eine Zwei-Phasenströmung auf, die eine drastische Reduktion der effektiven Permeabilität zur Folge haben kann. Hierzu liegen erste Meßergebnisse [7] vor, eine vollständige oder zuverlässige Beschreibung steht jedoch noch aus.

Geringe Laugezugaben zum Versatz können also nicht nur zu einer schnellen Kompaktion des Versatzes (dies impliziert auch eine geringe Stützwirkung auf das Gebirge), sondern auch zu sehr niedrigen Permeabilitäten führen. Es bleibt zu untersuchen, ob die verringerte Stützwirkung des angefeuchteten Versatzes ausreicht, um eine wesentliche Auflockerung der Streckensäume einschließlich der daraus resultierende erhöhten Durchlässigkeit zu verhindern.

2.3 Kompaktionsgeschwindigkeit

Solange ein bestimmter Deformationsmechanismus während der Kompaktion fortbesteht, hat die Kompaktionsgeschwindigkeit keinen Einfluß auf die Permeabilitätsentwicklung. Es kann aber mit verändertem Kompaktionsdruck (und damit auch veränderter Kompaktionsgeschwindigkeit) zu einem Wechsel des Deformationsmechanismus und damit auch zu Korngeometrieänderungen kommen. Insbesondere ist dieses beim Übergang von bruchfreier zu bruchhafter Deformation und bei feuchtem Versatz zu erwarten, wenn infolge hoher Drücke und Kompaktionsraten die plastischen Kriechprozesse gegenüber den feuchtegeregelten Diffusionsprozessen (FADT) dominieren. Diese Prozesse wurden bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

2.4 Temperatur

Durch Temperaturerhöhung kann insbesondere bei feuchtem Versatz eine wesentliche Steigerung der Kompaktionsrate bei gleichbleibendem Kompaktionsdruck erreicht werden, bzw. bei vorgegebener Kompaktionsrate die notwendige Spannung reduziert sowie eine höhere Enddichte erreicht werden. Im wesentlichen bedeutet dieses einen Zeitraffer-Effekt, der in akzeptablen Untersuchungszeiten in-situ-nahe, brucharm oder sogar bruchfrei ablaufende Kompaktionsversuche ermöglicht.

Im Falle des feuchten Versatzes kann es jedoch durch temperaturinduzierte Umlösungsvorgänge zu starken Einflüssen auf die Permeabilitätsentwicklung kommen. Diese Umlösungsvorgänge sind im Experiment äußerst schwer zu kontrollieren. Bei der Verwendung von Q-Lauge als Meßfluid können bereits sehr kleine Temperaturänderungen eine Messung verfälschen. Deswegen werden experimentelle Untersuchungen mit Lauge als sehr kritisch angesehen und relativ selten

durchgeführt. Im Falle einer reinen NaCl-Lösung in reinem NaCl-Versatz ist die Temperaturabhängigkeit nicht ganz so ausgeprägt. Die Auswirkungen eines Temperaturgradienten auf die Permeabilitätsentwicklung bei einem Laugentransport sind bisher noch nicht untersucht worden.

2.5 Meßfluid

Prinzipiell sollte die gemessene Permeabilität einer Probe unabhängig vom verwendeten Fluid (Flüssigkeiten oder Gase) sein, dessen Eigenschaften in seiner dynamischen Zähigkeit η zusammengefaßt werden. Dementsprechend wird bei den Auswertungen von Messungen üblicherweise unterstellt, daß keine Wechselwirkungen zwischen der Probe und dem Meßfluid stattfinden. Bei hohen Durchlässigkeiten ist dieses auch weitgehend erfüllt. Mit abnehmender Probenporosität kommt es zunehmend zu Wechselwirkungseffekten zwischen dem Meßfluid und der Wand der Probenmatrix. Bei Gasen ergibt sich z.B. ein Gleiteffekt auf der Wandung (Klinkenbergeffekt) [8], der sich allerdings erst bei kleinen Porengeometrien, d.h., wenn der Porendurchmesser kleiner ist als etwa die zehnfache mittlere freie Weglänge der Gasteilchen, bemerkbar macht. Dieser führt dann infolge erhöhten Durchsatzes zu scheinbar erhöhten Permeabilitätswerten. Somit können insbesondere bei kleinen Porositäten systematische Verschiebungen der Meßwerte für flüssige und gasförmige Fluide auftreten [23].

Bei hohen Porositäten und gasförmigen Fluiden können außerdem Turbulenzen [9] auftreten, die eine beträchtliche Verminderung der Permeabilität vortäuschen können. Weiterhin sind bei sehr engen Strömungskanälen ein Transport über den Mechanismus der Knudsen-Diffusion und weiter noch eine Adsorption an der Wandung der Porenräume möglich, was die Permeabilitätsmeßwerte ebenfalls verfälschen kann. Grundsätzlich lassen sich diese Effekte durch hinreichende Variation der experimentellen Randbedingungen (z.B. mittlerer Gasdruck und Gasdruckdifferenz, unterschiedliche Gase) erkennen und weitgehend korrigieren. Dieses erfordert jedoch einen hohen experimentellen Aufwand.

Der Einsatz von Lauge als Meßfluid kann zu anderen Wechselwirkungen, wie z.B. elektrokinetischen Effekten oder Anlagerung von Laugenmolekülen an der Wandung, führen. Dieses kann eine wesentliche Reduzierung der Permeabilität zur Folge haben, ist aber bisher noch nicht quantitativ erfaßbar. Die Bedeutung dieser Effekte ist möglicherweise speziell bei salinaren Lösungen in Salzgrus gering. Vor allem bei niedrigen Permeabilitäten können diese Wechselwirkungen jedoch den Laugendurchfluß beträchtlich verringern und somit große Unterschiede zur Messung mit Gas zur Folge haben. Hinzu kommen kann noch die weitaus schwerwiegendere Auswirkung des Lösungsvermögens der Laugen auf die Körner des Versatzes. Potentiell kann die Lauge die Probe durch An- oder Umlösevorgänge verändern und somit wiederum das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Da jedoch im Endlager mit dem Auftreten solcher Vorgänge gerechnet wird, ist die Verwendbarkeit der Labordaten aus Gasmessungen nicht garantiert. Es ist daher zweckmäßig, diesen Einfluß in eine empirische Permeabilitäts-Porositätsrelation für Langzeitsicherheitsanalysen einzuschließen, was entweder durch eine explizite Berücksichtigung im Modell oder durch größere statistische Streuung der Parameter geschehen kann.

3 Experimentelle Daten zur Permeabilität von Salzgrus-Versatz

Die in diesem Kapitel zusammengetragenen experimentellen Daten zur Permeabilität von Salzgrus können unter Berücksichtigung der in Kap. 2 aufgeführten Einflüsse unter dem Aspekt der Modellierung langfristig ablaufender Vorgänge im Endlager in zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. verwendbar (siehe Tabelle 1)
2. nicht verwendbar (siehe Tabelle 2)

Name	Kennung	Anzahl Meßwerte	Meßfluid	Bemerkung
Pusch/Weber [10]	ITE	12	Gas	trocken kompaktiert bei 200 °C, unzureichende Klinkenbergkorrektur, Turbulenzeffekte, Fullerverteilung bis D = 1 mm
Walter [3]	IFT-Walt3	10		feucht und bruchhaft kompaktiert, Grus oberhalb D = 16 mm abgesiebt, unzureichende Klinkenbergkorrektur
Liedtke [11]	BGR 20 - 25	6	Lauge	feucht kompaktiert, Grus oberhalb D = 20 mm abgesiebt
Liedtke/Offermann [11], [12]	BGR/HMI	7	Lauge	trocken kompaktiert, D ≤ 8 mm
Spiers et al. [4]	Spiers	5	Gas	vorwiegend Einkornmaterial, feucht und langsam kompaktiert, mit Trichlorethan getrocknet, weitestgehend bruchfrei
Albrecht & Suckow [13]	A&S-5	3	Lauge	nicht kompaktierter Salzgrus, D ≤ 5 mm
Albrecht & Suckow [14]	A&S-32	3	Lauge	nicht kompaktierter Salzgrus, D ≤ 32 mm
IT-Corporation [15]	ITC-WIPP	3	Argon	WIPP-Grus, D ≤ 10 mm, trocken kompaktiert
IT-Corporation [15]	ITC-Avery	6	Argon	Avery-Island-Grus, D ≤ 10 mm, trocken kompaktiert
Liedtke/Arnould [11]	BGR XII	2	Lauge	feucht kompaktiert
Liedtke [11]	BGR XIII	6	Lauge	feucht kompaktiert, Grus D ≤ 20 mm
Walter [3]	IFT - alt	4	Gas	alter, in situ feucht kompaktierter Versatz, keine Bruchvorgänge, getrocknet
Liedtke/Gommlich [16]	TSS	1	Gas	Porosität und Permeabilität nur ungenau bekannt, sehr grobe Körnung (Entmischung)

Tabelle 1: Angaben zu den verwendbaren Meßergebnissen.

Die vorwiegend in Laborversuchen gewonnenen Daten unterscheiden sich voneinander hinsichtlich Herkunft der Proben, der Kornverteilung, Kompaktionsgeschwindigkeit, Feuchtegehalt und sonstigen Randbedingungen, wie z.B. dem Meßfluid und der Temperatur. Insbesondere unterscheiden sich alle Proben in der Kornverteilung bzw. durch die gegenüber In-situ-Bedingungen wesentlich erhöhten Kompaktionsgeschwindigkeiten von dem Versatz im Endlager. Hinzu kommen die teilweise lückenhaften Informationen über die experimentellen Randbedingungen. Dieses betrifft die Kompaktionsgeschwindigkeit, die Methode der Permeabilitätsbestimmung und gegebenenfalls die Art der verwendeten Lauge sowie den Grad der Austrocknung einer feucht kompaktierten Probe vor der Permeabilitätsbestimmung mit Gas. Die individuelle Beschreibung und Einstufung der Versuche bezüglich ihrer Verwendbarkeit kann Anhang A entnommen werden. Die als verwendbar eingestuften Meßdaten sind in der Tabelle 3 aufgelistet und in Abb. 1 in doppeltlogarithmischem Maßstab graphisch dargestellt.

Die große Streubreite der Meßwerte verdeutlicht beispielsweise die Datengruppe BGR XIII. Hier wurden unter gleichen Laborbedingungen an Proben mit derselben Porosität Permeabilitäten gemessen, die sich maximal um den Faktor 65 unterscheiden. Auffällig ist ferner der Einzelwert aus dem TSS-Versuch, der etwa zwei Größenordnungen über vergleichbaren Meßwerten von Laborproben liegt. In den nachfolgenden Analysen wird untersucht, wie sich die Einbeziehung dieses speziellen Meßwertes auf die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung auswirkt.

Name	Bemerkung
Simons & Partner [17]	Salzgrus, vermutlich von Teilschnittmaschine; das Meßprotokoll zeigt starke Durchflußschwankungen, die zumindest eine andere Auswertung erforderlich machen.
Holcomb & Shields [18]	relativ hoher Feuchtegehalt (ca. 5 Vol.-%), keine Trocknung, Gas, ⇒ drastische Verfälschung der Permeabilität.
IT-Corporation [15]	Für die feucht kompaktierten Proben gilt die gleiche Kritik wie bei Holcomb & Shields.
Walter [3]	Alte Daten, die von Walter selbst als nicht mehr relevant eingestuft werden.
Spiers et al. [4]	Permeabilität als Funktion des zugänglichen und nicht des gesamten Porenanteils; ⇒ Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit nicht möglich.
Shor et al. [19]	gesiebtetes Einkornmaterial, feucht kompaktiert; ⇒ weder als Salzgrus noch als Brikett einstuftbar.
Liedtke/Arnould [11]	Haldenrückstände, in situ verfestigter Versatz, Meßverfahren unbekannt. Mineralogie, Kornverteilung und Feuchte unbekannt.
Kruse/Rodatz [20]	Briketts, starke Durchflußschwankungen
Kappei/Gessler [21]	Versatz aus alten Carnallit-Abbauen, unterschiedliche Mineralien und Fremdmaterial

Tabelle 2: Angaben zu den als **nicht** verwendbar eingestuften Permeabilitätsmessungen

Gruppe	Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Gruppe	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
ITE	.419	.68 10 ⁻¹²		.099	2.4 10 ⁻¹⁴
	.392	.64 10 ⁻¹²		.099	1.8 10 ⁻¹⁴
	.371	.41 10 ⁻¹²		.043	7.1 10 ⁻¹⁶
	.344	.30 10 ⁻¹²		.043	1.0 10 ⁻¹⁵
	.274	.24 10 ⁻¹²		.043	8.5 10 ⁻¹⁶
	.252	.081 10 ⁻¹²	Spiers	.09	1.23 10 ⁻¹⁵
	.232	.059 10 ⁻¹²		.11	1.73 10 ⁻¹⁵
	.218	.043 10 ⁻¹²		.14	1.09 10 ⁻¹⁴
	.207	.037 10 ⁻¹²		.16	1.30 10 ⁻¹³
	.191	.034 10 ⁻¹²		.21	2.18 10 ⁻¹³
	.173	.029 10 ⁻¹²	A&S-5	.42	1.3 10 ⁻¹¹
	.167	.030 10 ⁻¹²		.34	4.6 10 ⁻¹²
lft-Walt3	.060	3.8 10 ⁻¹⁵		.32	5.3 10 ⁻¹²
	.060	7.0 10 ⁻¹⁵	A&S-32	.38	3.6 10 ⁻¹¹
	.08	5.6 10 ⁻¹⁴		.32	2.5 10 ⁻¹¹
	.09	3.9 10 ⁻¹⁴		.28	1.3 10 ⁻¹¹
	.11	2.25 10 ⁻¹³	ITC-WIPP	.26	4.0 10 ⁻¹²
	.12	1.83 10 ⁻¹³		.21	8.08 10 ⁻¹³
	.15	8.58 10 ⁻¹³		.16	1.3 10 ⁻¹³
	.15	9.5 10 ⁻¹³	ITC-Avery	.247	3.24 10 ⁻¹²
	.20	1.85 10 ⁻¹²		.218	1.69 10 ⁻¹²
	.24	9.5 10 ⁻¹²		.196	8.09 10 ⁻¹³
BGR 20-25	.188	7.8 10 ⁻¹²		.172	3.57 10 ⁻¹³
	.151	1.2 10 ⁻¹²		.146	1.24 10 ⁻¹³
	.119	6.4 10 ⁻¹³		.133	4.64 10 ⁻¹⁴
	.106	1.3 10 ⁻¹³	BGR XII	.0835	2.34 10 ⁻¹⁴
	.052	3.0 10 ⁻¹⁵		.0490	8.20 10 ⁻¹⁵
	.046	8.5 10 ⁻¹⁵	BGR XIII	.067	1.37 10 ⁻¹⁶
BGR/HMI	.173	2.0 10 ⁻¹³		.067	8.89 10 ⁻¹⁵
	.173	5.0 10 ⁻¹³		.067	1.98 10 ⁻¹⁵
	.067	2.29 10 ⁻¹⁶		.178	9.5 10 ⁻¹³
	.067	5.21 10 ⁻¹⁵		.178	9.5 10 ⁻¹³
	.067	1.99 10 ⁻¹⁵	TSS	.365	1.43 10 ⁻⁹
lft-alt	.150	3.32 10 ⁻¹³			
	.150	5.0 10 ⁻¹³			

Tabelle 3: Meßwerte der akzeptierten Datengruppen

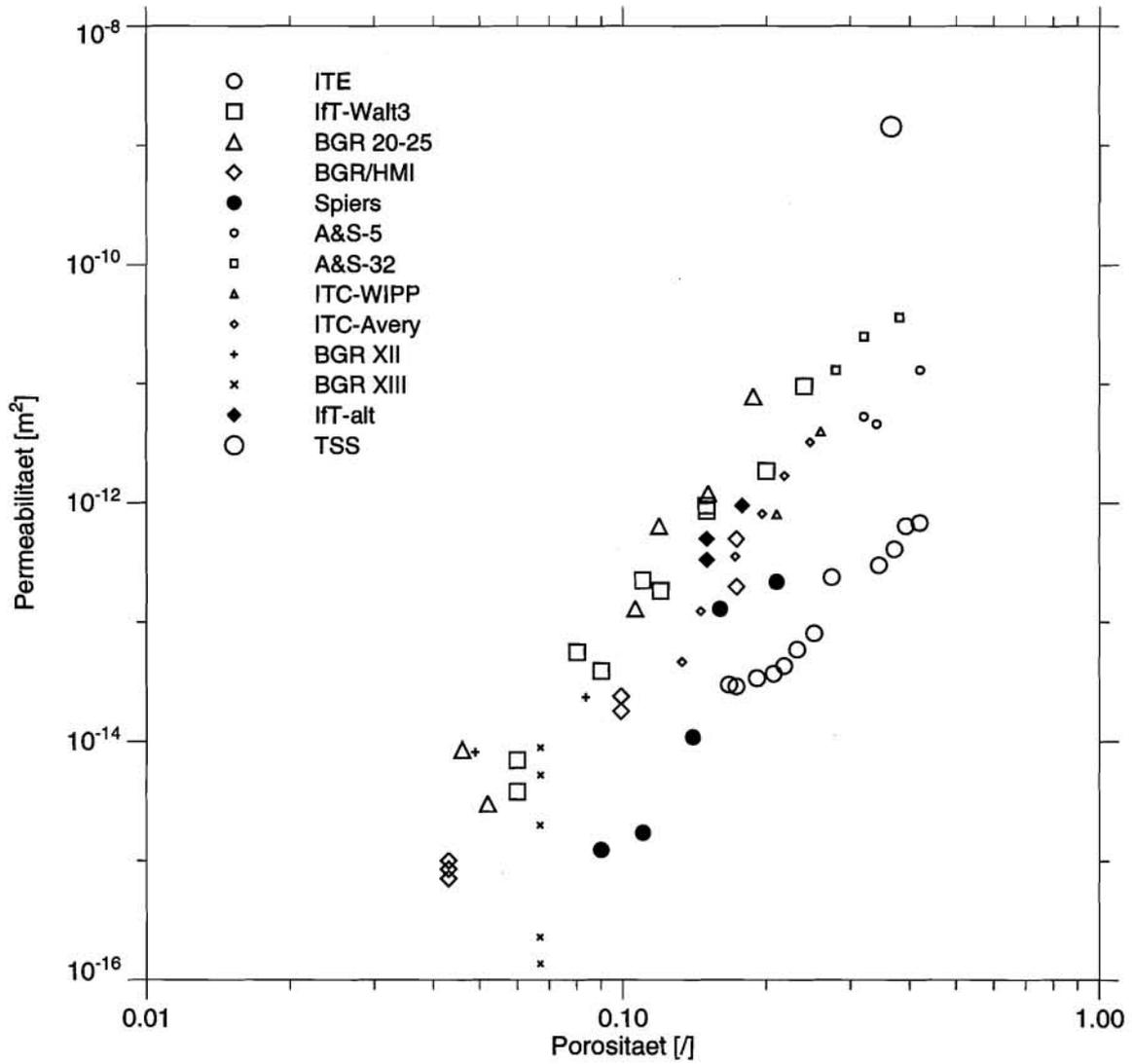


Abbildung 1: Permeabilitäten für Versatz als Funktion der Porosität von allen berücksichtigten Meßwerten

4 Ansätze für empirische Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen

Für eine sinnvolle Auswertung der Daten muß ein physikalisch oder zumindest phänomenologisch begründeter Ansatz vorgegeben werden, dessen Parameter an die Datenbasis angepaßt werden können. In der Literatur existiert kein theoretisch hergeleiteter Ansatz zur Beschreibung der Permeabilität von Salzgrus als Funktion der Porosität oder anderer Einflußgrößen. Wohl aber existieren für Sande analytisch hergeleitete Ansätze.

Hier sind zum Beispiel Scheidegger [22]:

$$k = \frac{n^3}{T^2 S^2} \quad (1)$$

mit k = Permeabilität
 n = Porosität
 T = Tortuosität
 S = innere Oberfläche

sowie Kozeny-Carman / Taylor [23] zu nennen:

$$k = C D^2 \frac{e^3}{1 + e} \quad (2)$$

mit C = Konstante, die den Einfluß der Porengeometrie wiedergibt ($C = 1/2$ bis $1/3$).
 D = maßgeblicher Korndurchmesser, ermittelt aus innerer Oberfläche und Festkörpervolumen
 e = Porenzahl ($e = \frac{n}{1-n}$)

Weitere Ansätze sind z.B. bei Kezdi [24] zu finden, die zumeist durch eine superlineare Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung charakterisiert sind.

Es ist fraglich, ob die Gleichungen (1) und (2), die nicht speziell für Salzgrus hergeleitet worden sind, hier unmittelbar angewendet werden können. Außerdem sind viele der darin enthaltenen Einflußgrößen (innere Oberfläche, Tortuosität, kleinster wirksamer Korndurchmesser etc.) für Salzgrus nicht hinreichend bekannt oder können auf der Basis der bisherigen Daten bzw. wegen sonstiger Einflüsse (z.B. Brucherscheinungen in den Laborversuchen, Entmischungsvorgänge in situ) nicht eindeutig bestimmt werden. Ihr Einfluß läßt sich möglicherweise in Zahlenfaktoren, die empirisch aus den vorliegenden Meßdaten ermittelt werden können, zusammenfassen. Die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise kann dann an Hand statistischer Verfahren überprüft werden. Weitere wesentliche Einflußgrößen, wie der Feuchtgehalt oder der Durchfluß von Laugen mit resultierenden Umlösungsvorgängen, sind einer analytischen Behandlung noch nicht zugänglich. Demnach erscheint es zweckmäßig, zunächst eine einfache empirische Beziehung zwischen der Permeabilität k und der Porosität in Salzgrus abzuleiten.

Die in Abbildung 1 dargestellten Daten lassen für den durch die Meßdaten abgedeckten Porositätsbereich, der sich von $n = 0,043$ bis etwa $n = 0,42$ erstreckt, einen linearen Zusammenhang zwischen $\log(k)$ und $\log(n)$ erkennen und legen damit einen Potenzansatz folgender Form nahe:

$$k = A n^m \quad (3)$$

Hierbei sind A und m Parameter, die aus den experimentellen Daten durch Regression bestimmt werden können. Der Ansatz stellt nur eine phänomenologische Beschreibung der Beziehung dar. Er erscheint geeignet, den größten Teil der Änderung der Permeabilität mit der Porosität zu beschreiben. Aus der Darstellung der Meßwerte in Abbildung 1 geht aber auch hervor, daß die Permeabilität noch durch weitere Einflußgrößen mitbestimmt wird, denn die Meßwerte zu einer Porosität streuen über zwei Größenordnungen.

Der Ansatz nach Gleichung (3) liefert bei der Extrapolation zu kleinen Porositäten für den Grenzfall $n = 0$ den Wert $k = 0$. Es ist aber fraglich, daß dadurch die Verhältnisse im Bereich sehr niedriger Porositäten richtig beschrieben werden. Wegen der Querschnittsverringerung der Wegsamkeiten bei abnehmender Porosität können Wechselwirkungseffekte zwischen dem Fluid und dem Salzgrus in den Vordergrund treten, die eine stärkere Abnahme der Permeabilität bewirken, als sie durch den gewählten Ansatz beschrieben wird.

5 Statistische Verfahren

In den folgenden fünf Unterkapiteln werden die verwendeten statistischen Verfahren dargestellt, bevor ihre spezielle Anwendung auf den Fall der Permeabilitäts-Porositätsrelation beschrieben wird. In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der Arbeiten der Firma RISA Sicherheitsanalysen GmbH, Berlin [28] verwendet. Die benutzten Herleitungen sind ausführlich beschrieben und an den entsprechenden Stellen zitiert.

5.1 Lineare Regression

Es seien N Meßwertpaare (x_i, y_i) als Stichproben einer Grundgesamtheit gegeben. Wir gehen dabei von der Annahme aus, daß die Meßfehler Δx_i der Meßwerte x_i vernachlässigbar und die Δy_i der y_i gleich groß und normalverteilt mit dem Erwartungswert 0 und der Streuung $\hat{\sigma}_y$ sind, d.h.:

$$\Delta x_i \approx 0 \quad \text{und} \quad \Delta y_i = \hat{\sigma}_y \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Dieses bedeutet, daß die Werte der abhängigen Variablen y für gegebene beobachtungsfehlerfreie Werte der unabhängigen Variablen x untereinander unabhängig und normalverteilt sind und die gleiche Restvarianz $\hat{\sigma}_y^2$ aufweisen. Diese Homogenität der Restvarianz wird Homoskedastizität genannt. Geringe Abweichungen von der Normalität und Homoskedastizität können vernachlässigt werden. Die Normalverteiltheit von y ist zur Bestimmung der Schätzwerte für die unbekannt Parameter nicht erforderlich. Diese Voraussetzung wird erst benötigt, wenn man mit statistischen Tests und Konfidenzschätzungen stochastische Zusammenhänge beurteilen möchte. Es sei noch angemerkt, daß im folgenden in der Notation nicht zwischen den Parametern und ihren zugehörigen, durch die Stichprobe festgelegten Schätzern unterschieden wird.

Durch die vorgegebenen Meßwerte wird eine Kurve vom Typ $y = \sum c_j \cdot f_j(x)$ gelegt, welche die experimentell gefundenen Werte am besten wiedergeben soll. Darin sind die c_j beliebige Konstanten und die f_j beliebige, von den c_j unabhängige Funktionen der unabhängigen Variablen x . Der (nach $y = \text{const.}$) einfachste Fall einer solchen linearen Approximationsfunktion ist die Gerade $y = a + b \cdot x$. Die Bestwerte für a und b werden derart bestimmt, daß die Summe der Quadrate der vertikalen Abstände d_i (siehe Abb. 2) der Meßwerte von der Geraden minimal wird. Dieses Verfahren heißt Regression [25], [26]. Durch die oben erfolgte Festlegung des Funktionentyps beschränkt man sich von vornherein auf einen Sonderfall der Regression mit Modellfunktionen der allgemeinen nichtlinearen Form $y = f(x_k, c_j)$ mit mehreren unabhängigen Variablen x_k . Im folgenden wird nur noch der Sonderfall der linearen Regression 1. Ordnung mit einer unabhängigen Variablen betrachtet.

Die Regressionsparameter werden nach der Maximum-Likelihood-Methode oder nach der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepaßt.

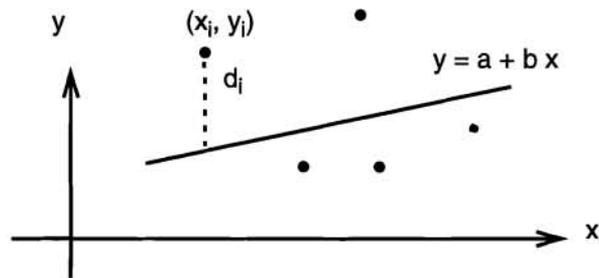


Abbildung 2: Lineare Regression

$$D^2 = \sum_i d_i^2 = \sum_i [y_i - (a + bx_i)]^2 \rightarrow D_0^2 = \min_{a,b} \{D^2(a, b)\} \quad (4)$$

Notwendige Bedingung ist, daß die Ableitungen von D nach a und b im Minimum verschwinden. Hieraus ergeben sich zwei Bestimmungsgleichungen für die Parameter a und b:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D^2}{\partial a} &= 0 \\ \frac{\partial D^2}{\partial b} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Mit den in der Statistik üblichen Abkürzungen gilt für erwartungstreue Schätzer:

$$[x] = \sum_{i=1}^N x_i \quad [xy] = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad \text{bzw.}$$

$$\mu_x = E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{für den Mittelwert,}$$

$$\sigma_x^2 = E[(x - \mu_x)^2] = \text{var}(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad \text{für die Varianz und}$$

$$\sigma_{xy} = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = \text{cov}(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad \text{für die Kovarianz.}$$

Damit ergibt die Lösung der Gleichungen (5) für die beiden Regressionsparameter die Beziehungen:

$$a = \frac{[x^2][y] - [x][xy]}{N[x^2] - [x]^2} = \mu_y - \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} \mu_x$$

und (6)

$$b = \frac{N[xy] - [x][y]}{N[x^2] - [x]^2} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}$$

Wie man der Gleichung (6) direkt entnehmen kann, geht die Regressionsgerade immer durch den Schwerpunkt (μ_x, μ_y) der experimentellen Daten. Führt man weiterhin den sogenannten Korrelationskoeffizienten ρ_{xy} oder das Bestimmtheitsmaß $B = \rho_{xy}^2$ ein,

$$\rho_{xy} = \frac{N[xy] - [x][y]}{\sqrt{(N[x^2] - [x]^2)(N[y^2] - [y]^2)}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y_i - \mu_y}{\sigma_y} \right),$$

läßt sich der Standardfehler der Schätzung oder die Restvarianz schreiben als

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{D_0^2}{N-2} = \frac{N-1}{N-2} \sigma_y^2 (1 - \rho_{xy}^2) . \quad (8)$$

Es läßt sich zeigen, daß immer $-1 \leq \rho_{xy} \leq +1$ gilt. Bei $\rho_{xy} = +1$ liegen alle Datenpunkte auf einer Geraden mit positiver Steigung, bei $\rho_{xy} = -1$ auf einer fallenden Geraden, während für $\rho_{xy} = 0$ kein linearer Zusammenhang erkennbar ist.

Die Varianzen der Parameter a und b ergeben sich damit bei quadratischer Fehlerfortpflanzung zu:

$$\sigma_a^2 = \hat{\sigma}_y^2 \frac{[x^2]}{N[x^2] - [x]^2} \quad \sigma_b^2 = \hat{\sigma}_y^2 \frac{N}{N[x^2] - [x]^2} \quad (9)$$

Alle bisherigen Aussagen über die Parameter a und b und deren Varianzen σ_a und σ_b können mit der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate hergeleitet werden. Falls auch Aussagen über Konfidenzintervalle der Parameter und über bivariate Dichteverteilungen gemacht werden sollen, wird oftmals von der Maximum-Likelihood-Methode als erwartungstreue Schätzmethode ausgegangen. Dieses führt zu den gleichen Bestimmungsgleichungen für die Parameter, erfordert aber als Voraussetzung die Normalverteiltheit und Homoskedastizität der y-Werte. Die Annahme der Normalität kann durch Wahrscheinlichkeitsplots bzw. den verteilungsunabhängigen Kolmogoroff-Smirnov-Test überprüft werden, während die Homoskedastizität mit dem Goldfeld-Quandt-Kriterium [29] getestet werden kann . Auch für den Korrelationskoeffizienten ρ_{xy} läßt sich in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe mit Hilfe des t-Tests ein Vertrauensintervall angeben [25]. Ist der Umfang der Stichprobe $N > 10$, dann läßt sich der 95%-Vertrauensbereich für den Korrelationskoeffizienten durch $z \pm s_z$ approximieren. Hierbei sind

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \rho_{xy}}{1 - \rho_{xy}} \quad \text{und} \quad s_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} .$$

Im Falle eines kleineren Stichprobenumfangs wurde der 95%-Vertrauensbereich der Abbildung 62 in [25] entnommen.

Weiterhin können Aussagen über den Vertrauensbereich der y - Werte der Regressionsgeraden gemacht werden. Generell bewirkt die Variation des Parameters a (Ordinatenabschnitt) eine Verschiebung der Regressionsgeraden längs der y-Achse und die des Parameters b (Steigung) eine Drehung der Geraden um den Schwerpunkt. Der 95%-Vertrauensbereich für eine Schätzung des Wertes y an der Stelle x ist gegeben durch das Intervall: $y - B_x \leq y \leq y + B_x$ mit

$$B_x = t(N-2;0.05) \hat{\sigma}_y \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \mu_x)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}} \quad (10)$$

Hierbei ist $t(N-2;0.05)$ die Signifikanzschränke für den zweiseitigen t-Test mit N-2 Freiheitsgraden und 5%-iger Irrtumswahrscheinlichkeit. Dieser Wert kann Tabellen entnommen werden (z.B. [26] Tabelle A2, Seite 231). Der hierdurch definierte Vertrauensbereich wird in Abhängigkeit von den x-Werten durch zwei Hyperbeläste begrenzt und gilt nur für den von den experimentellen Daten vorgegebenen Bereich. Das in (10) angegebene Vertrauensband schrumpft für $N \rightarrow \infty$ gegen einen Streifen mit der konstanten Breite $2 \cdot B_x = 2 \cdot t(N-2;0.05) \hat{\sigma}_y = 3.92 \cdot \hat{\sigma}_y$.

Weiterhin läßt sich der $100 \cdot (1-q)\%$ -ige Vertrauensbereich für die Parameter α und β durch

$$S_{1-q}(\alpha, \beta) = \hat{\sigma}_y^2 \cdot (N-2) \cdot F(2, N-2, 1-q) \quad (11)$$

angeben [32]. Hierbei ist die Funktion $F(v_1, v_2, x)$ die F-Verteilung mit den Freiheitsgraden v_1 und v_2 zum Vertrauensniveau x und S die Fehlerquadratsumme in Abhängigkeit von α und β , deren Minimierung die Regressionskoeffizienten a und b geliefert hat. Bei der Konstruktion der Konfidenzintervalle für die Parameter a und b bedient man sich der Umkehrfunktion $Q(F, v_1, v_2)$ (siehe [27], Formel 26.6.2). Sowohl die Studentsche t-Verteilung, die Standardnormalverteilung als auch die χ^2 -Verteilung sind Grenzfälle der F-Verteilung.

5.2 Bivariate Dichteverteilung für zwei normalverteilte Variablen

Sind zwei Zufallsvariablen x und y normalverteilt und korreliert, so kann eine bivariate (zweidimensionale) Dichteverteilung $f(x,y)$ als Produkt der Dichteverteilung $f_x(x)$ der Variablen x und der bedingten Dichteverteilung $f_{y/x}(y/x)$ der Variablen y unter der Bedingung x analog zur bedingten Wahrscheinlichkeit $P(A \cap B) = P(A/B) P(B)$ definiert werden [30]:

$$f(x, y) = f_x(x)f_{y/x}(y/x)$$

Diese Dichteverteilung $f(x,y)$ ist dann durch die Mittelwerte μ_x, μ_y , die Varianzen σ_x, σ_y sowie durch den Korrelationskoeffizienten ρ_{xy} festgelegt [31]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right]^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{y-\mu_y-\rho_{xy}\frac{\sigma_y}{\sigma_x}[x-\mu_x]}{\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}}\right]^2} \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} e^{-\frac{1}{2[1-\rho_{xy}^2]}\left(\left[\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right]^2 + \left[\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2 - 2\rho_{xy}\frac{[x-\mu_x][y-\mu_y]}{\sigma_x\sigma_y}\right)}$$

In der Abbildung 3 sind die Verteilungen nach dieser Beziehung in Form von Isoliniendiagrammen für verschiedene Werte von ρ_{xy} dargestellt. Für den Grenzfall $\rho_{xy} = 0$, d.h. für unkorrelierte x und y , ergibt sich die bekannte zweidimensionale Gaußverteilung. Die Isolinien sind in diesem Fall wegen der hier angenommenen Symmetrie der Varianzen σ_x, σ_y konzentrische Kreise um den Punkt (μ_x, μ_y) . Mit zunehmendem $|\rho_{xy}|$ gehen diese Kreise in Ellipsen über, deren Orientierung durch das Vorzeichen von ρ_{xy} festgelegt ist. Im Grenzfall $|\rho_{xy}|$ entarten die Ellipsen in Geraden. Dieses Bild verdeutlicht, daß die Verteilungsfunktion bei starker Korrelation der Variablen in hohem Maße beeinflusst wird. Da auch für die bivariate Dichteverteilung nach Gleichung 12 die

Normierung $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy dx = 1$ gilt, nimmt das Maximum der Dichtefunktion mit wachsenden $|\rho_{xy}|$ und sonst festgehaltenen Parametern zu.

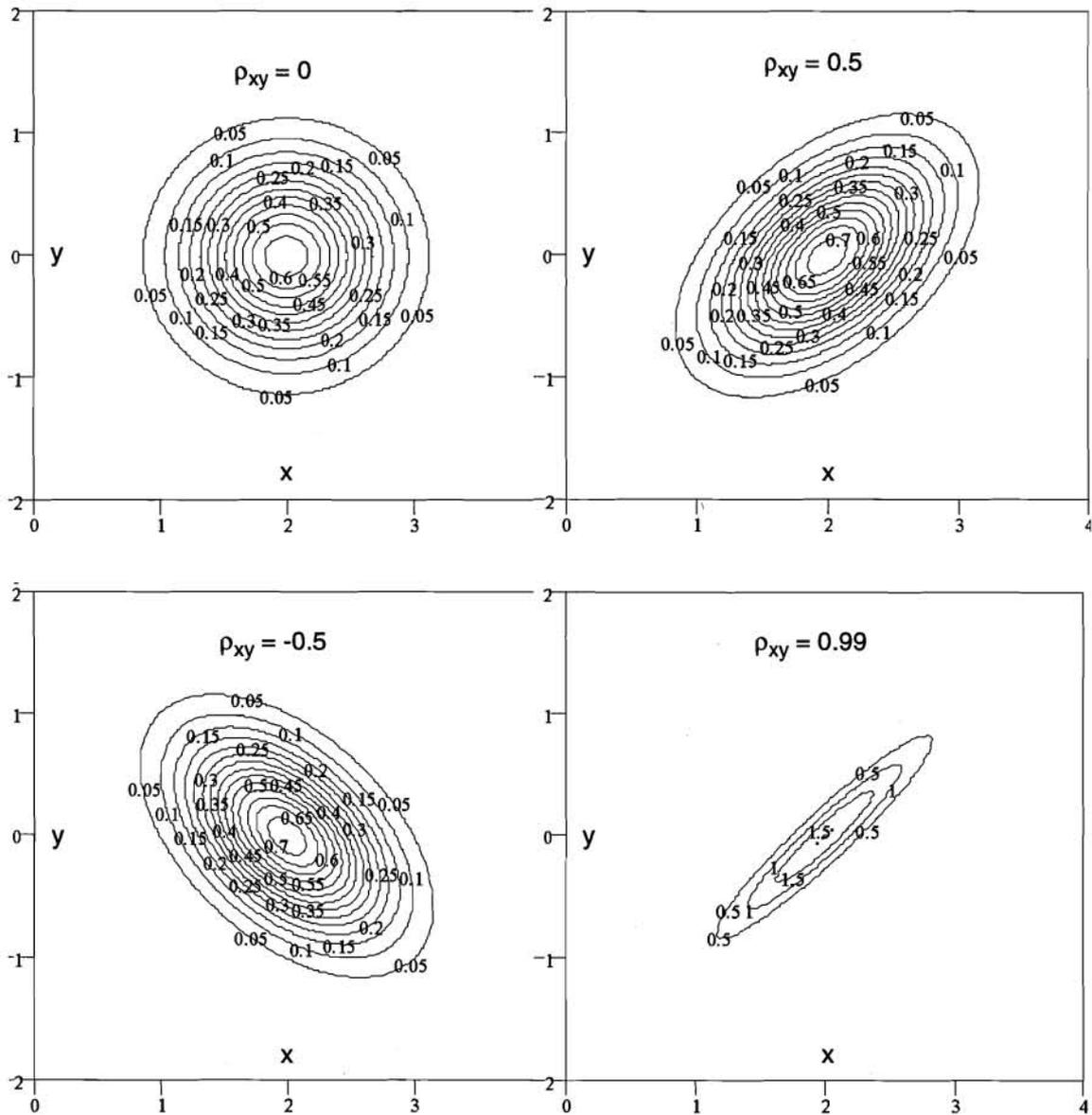


Abbildung 3: Isolinen der bivariaten Dichteverteilung $f(x,y)$ nach Gleichung 12 für $\mu_x = 2$, $\mu_y = 0$, $\sigma_x = \sigma_y = .5$ und für verschiedene Korrelationskoeffizienten ρ_{xy}

Aus der Dichteverteilung nach Gl.(12) kann man den bedingten Erwartungswert $E(y/x)$ der Variablen y unter der Bedingung, daß die Variable x den Wert x annimmt, berechnen:

$$E(y/x) = \int_{-\infty}^y y' \frac{f(x, y')}{f_x(x)} dy' = \int_{-\infty}^y y' f_{y'/x}(y'/x) dy' = \mu_y + \rho_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \mu_x)$$

Es ergibt sich somit erwartungsgemäß die Gleichung für die Regressionsgerade.

5.3 Bivariate Dichteverteilung für eine normal- und eine lognormal verteilte Variable

Die Herleitung in Kapitel 5.2 gilt für den Fall, daß x und y normalverteilt sind. Wenn dagegen eine der Variablen, z.B. x , lognormal verteilt ist, nimmt $f_x(x)$ die allgemeine Form

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot x} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2} \quad (13)$$

an, wobei der Mittelwert λ , die Streuung ζ und der Korrelationskoeffizient $\rho_{\ln xy}$ mit den entsprechenden Werten μ , σ und ρ_{xy} der Normalverteilung folgendermaßen miteinander verknüpft sind ([33], S. 103, [28]):

$$\lambda = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\zeta^2 \quad \zeta^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad \text{bzw.} \quad (14)$$

$$\mu = e^{\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)} \quad \sigma^2 = \mu^2(e^{\zeta^2} - 1)$$

Die Beziehung (15), die den Zusammenhang zwischen den Korrelationskoeffizienten der bivariaten Dichteverteilung mit zwei normalverteilten Variablen und der entsprechenden mit einer normal- und einer lognormalverteilten wiedergibt, ist keinem der hier berücksichtigten Statistik-Lehrbüchern zu entnehmen. Ihre Ableitung ist grundsätzlich nicht schwierig, jedoch vergleichsweise langwierig.

$$\rho_{xy} = \mu_x \frac{\sigma_{\ln x}}{\sigma_x} \rho_{\ln xy} \quad (15)$$

Berücksichtigt man weiterhin, daß auf Grund der hier gewählten Bezeichnungen $\lambda = \mu_{\ln x}$ und $\zeta = \sigma_{\ln x}$ gilt, erhält man die folgende Beziehung für die bivariate Dichteverteilung von $\ln(x)$ und y :

$$\begin{aligned}
f(\ln x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi x} \sigma_{\ln x}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}} \right]^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y \sqrt{1 - \rho_{\ln xy}^2}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y - \rho_{\ln xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_{\ln x}} [\ln x - \mu_{\ln x}]}{\sigma_y \sqrt{1 - \rho_{\ln xy}^2}} \right)^2} \\
&= \frac{1}{2\pi x \sigma_{\ln x} \sigma_y \sqrt{1 - \rho_{\ln xy}^2}} e^{-\frac{1}{2[1 - \rho_{\ln xy}^2]} \left(\left[\frac{x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}} \right]^2 + \left[\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 - 2\rho_{\ln xy} \frac{[x - \mu_{\ln x}][y - \mu_y]}{\sigma_{\ln x} \sigma_y} \right)}
\end{aligned} \tag{16}$$

5.4 Bivariate Dichteverteilung der Regressionsparameter

Die beiden Parameter a und b können ebenfalls als bedingte, normalverteilte Zufallsvariablen α und β mit den Erwartungswerten $E(\alpha) = a$ bzw. $E(\beta) = b$ und den Varianzen $\text{var}(\alpha) = E[(\alpha - a)^2] = \sigma_a^2$ bzw. $\text{var}(\beta) = \sigma_b^2$ angesehen werden. Aus Gl. (12) mit dem Korrelationskoeffizienten $\rho_{\alpha\beta}$ entsprechend Gl. (7) ergibt sich für die beiden Variablen α und β folgende zweidimensionale Dichteverteilung:

$$f(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi \sigma_b \sigma_a \sqrt{1 - \rho_{\alpha\beta}^2}} e^{-\frac{1}{2[1 - \rho_{\alpha\beta}^2]} \left(\left[\frac{\beta - b}{\sigma_b} \right]^2 + \left[\frac{\alpha - a}{\sigma_a} \right]^2 - 2\rho_{\alpha\beta} \frac{[\beta - b][\alpha - a]}{\sigma_b \sigma_a} \right)} \tag{17}$$

Eine entsprechende Beziehung für die Verteilung wird auch in [28] angegeben. Während die Varianzen σ_a und σ_b bereits nach Gl. (9) gegeben sind, wird der Korrelationskoeffizient $\rho_{\alpha\beta}$ wie folgt bestimmt:

$$\rho_{\alpha\beta} = \frac{\sigma_{\alpha\beta}}{\sigma_a \sigma_b}$$

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten $\rho_{\alpha\beta}$ reduziert sich somit auf die Berechnung der Kovarianz $\sigma_{\alpha\beta}$.

Hierzu benutzt man die ursprüngliche Gleichung der Regressionsgeraden $\alpha = y - x\beta$, sowie ihre Eigenschaft durch den Schwerpunkt (μ_x, μ_y) zu gehen. Dabei ist zu beachten, daß jetzt α und β die Variablen sind.

$$\alpha = \mu_y - \mu_x \beta \text{ mit dem Erwartungswert } E(\alpha) = a = \mu_y - \mu_x b \quad (18)$$

Durch Bildung der Differenz der beiden Gleichungen in (18) ergibt sich:

$$\alpha - a = -\mu_x(\beta - b) \quad (19)$$

Betrachtet man weiterhin die Definition der Kovarianz und setzt Gl. (19) ein, so erhält man:

$$\begin{aligned} \text{cov}(\alpha, \beta) &= \sigma_{\alpha\beta} = E[(\alpha - a)(\beta - b)] \\ &= -\mu_x E[(\beta - b)^2] = -\mu_x \text{var}(\beta) = -\mu_x \sigma_b^2 \end{aligned} \quad (20)$$

Damit ist also die Korrelation zwischen α und β gegeben durch

$$\rho_{\alpha\beta} = -\mu_x \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \quad (21)$$

wobei σ_a und σ_b nach Gl.(9) in Verbindung mit Gl.(8) berechnet werden können.

5.5 Empirische Permeabilitäts-/Porositätsrelation

Wie bereits in Kapitel 3 festgestellt wurde, läßt die Darstellung der $\log(k)$ - über den $\log(n)$ -Werten der akzeptierten Datensätze in Abbildung 1 erkennen, daß die Meßwerte durch ein Modell mit einem Potenzansatz der Form:

$$\hat{k} = A \cdot n^m \quad (22)$$

approximiert werden können. Dieses ist ein nichtlineares Modell in dem Sinn, daß es auf ein nichtlineares System von Regressionsgleichungen zur Bestimmung der optimalen Kurvenparameter führt. Durch Logarithmierung läßt es sich aber auf den vorher behandelten Fall der einfachen Regressionsgeraden zurückführen.

$$\log(\hat{k}) = \log(A) + m \cdot \log(n) \quad (23)$$

Diese Eigenschaft bestimmter nichtlinearer Modelle, durch eine Transformation in lineare Modelle überführt werden zu können, wird gelegentlich als "intrinsische Linearität" bezeichnet [32]. Seien k_i die gemessenen Permeabilitätswerte und \hat{k}_i die zugehörigen Werte der Approximationsfunktion für die n_i , die jeweils durch einen multiplikativen Fehlerterm u_i miteinander verknüpft sind. Damit ergibt sich über Gl. (22):

$$k_i = \hat{k}_i \cdot u_i = A \cdot n_i^m \cdot u_i \quad (24)$$

Die logarithmierte Gleichung soll der Einfachheit halber abgekürzt werden mit:

$$y_i = a + b \cdot x_i + \log(u_i) \quad (25)$$

Darin stehen y für $\log(k)$, a für $\log(A)$, b für m und x für $\log(n)$. Es ist die Aufgabe, die Parameter a und b so zu bestimmen, daß die zugehörige Kurve die experimentellen Daten optimal beschreibt. In diesem Fall heißt das, daß die Parameter a und b nach Gl. (6) bestimmt werden, daß die Summe der Quadrate der vertikalen Abstände der Meßwerte von der zugehörigen Ausgleichskurve, $\log(u_i)$, minimal wird. Dabei wird angenommen, daß die $\log(u_i)$ -Werte normalverteilt und daher die u_i -Werte selbst logarithmisch normalverteilt (lognormal) sind.

Die Regression der transformierten Meßwerte $\log(k)/\log(n)$ nach Gl. (23) anstelle von k/n führt, wie oben bereits erwähnt wurde, auf ein lineares Gleichungssystem und ist daher direkt, d.h. ohne iterative Berechnungen, möglich. Ungleich wichtiger als diese rechentechnische Vereinfachung ist jedoch die Tatsache, daß auf diese Weise nicht die Fehlerquadratsumme der absoluten Abweichungen $\sum(k_i - \hat{k}_i)^2$, sondern der relativen Abweichungen $\sum u_i^2 = \sum \left(\frac{k_i}{\hat{k}_i} \right)^2$ minimiert

wird. Die Regression von n und k nach Gl. (24) würde eine unerwünschte starke Wichtung der großen Werte implizieren und die niedrigen Meßwerte, d.h., den Bereich der Permeabilitäten unter 10^{-13} m^2 , nur sehr schlecht approximieren. Insofern ist hier die logarithmische Transformation notwendig, um eine sinnvolle empirische Approximation der k/n -Werte, die mehrere Größenordnungen überstreichen, durchzuführen. Daher werden wir uns im folgenden auf die Bestimmung der Parameter a und b der Geraden und ihrer zugehörigen bivariaten Verteilungsfunktion gemäß Gl. (17) beschränken. Wegen der Voraussetzung, daß $a = \log(A)$ gilt und a normalverteilt ist, folgt, daß A lognormal verteilt ist. Die zugehörige Verteilungsfunktion für die Parameter A und m der Potenzfunktion Gl. (22) ergibt sich analog Gl. (16) und (17), wobei das $f(a)$ hierbei entsprechend Gl. (13) eingesetzt wird.

6 Salzgrusversatz: Ergebnisse und Diskussion

Mit den im vorangegangenen Kapitel vorgestellten statistischen Verfahren wurden die in Kapitel 3 ausgewählten Daten ausgewertet. Dazu wurden zunächst die Regressionsgeraden für einzelne Datengruppen bestimmt. Da manche der in Tabelle 1 aufgeführten Gruppen nur sehr wenige Datenpaare enthalten, wurden mehrere zusammengefaßt: A&S-5 und A&S-32 zu A&S, ITC-WIPP und ITC-Avery zu ITC, sowie BGR XII und BGR XIII zu BGR. Auf diese Weise ergeben sich 9 Gruppen mit jeweils mindestens 4 Meßwerten. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 aufgelistet. Darin sind jeweils der Gruppenname, die Anzahl der Meßwertpaare und die Schätzwerte für die Parameter a und b , deren Unsicherheiten σ_a und σ_b , bzw. die delogarithmierten Werte von a und σ_a , den Korrelationskoeffizienten ρ_{nk} zwischen $\log(k)$ und $\log(n)$ und die Restvarianz $\hat{\sigma}_k^2$ angegeben.

Gruppe	N	a σ_a	A 10^{σ_a}	b σ_b	ρ_{nk}	$\hat{\sigma}_k^2$
ITE	12	-10.740 .1544	$1.820 \cdot 10^{-11}$ 1.4270	3.7667 .2552	.97780	.0142
lft-Walt3	10	-7.879 .2913	$1.321 \cdot 10^{-8}$ 1.9556	5.1605 .3024	.98654	.0350
BGR 20-25	6	-7.570 .6105	$2.691 \cdot 10^{-8}$ 4.0783	5.1559 .5891	.97487	.1066
BGR/HMI	7	-9.362 .2654	$4.350 \cdot 10^{-10}$ 1.8426	4.1997 .2370	.99213	.0258
Spiers	5	-7.822 1.1022	$1.507 \cdot 10^{-8}$ 12.6525	6.9423 1.2586	.95407	.1289
A&S	6	-10.317 1.3150	$4.824 \cdot 10^{-11}$ 20.6526	1.2576 2.7894	.21991	.1498
ITC	9	-7.494 .2598	$3.204 \cdot 10^{-8}$ 1.8188	6.5989 .3560	.98997	.0103
lft-alt	4	-8.315 .9422	$4.849 \cdot 10^{-9}$ 8.7538	4.9465 1.1963	.94619	.0079

Tabelle 4: Ergebnisse der linearen Regression für die akzeptierten Datengruppen, Korrelationskoeffizienten ρ_{nk} zwischen $\log(n)$ und $\log(k)$ und Restvarianzen $\hat{\sigma}_k^2$ nach Gl. 8

Die 95%- Vertrauensbereiche der Korrelationskoeffizienten ρ_{nk} liegen fast immer im Intervall $0.45 \leq \rho_{nk} \leq 0.99$. Eine Ausnahme bildet der Datensatz lft-alt mit $0.09 \leq \rho_{lft-alt} \leq 0.9$, der auf Grund seiner geringen Anzahl von Meßwerten ein sehr großes Konfidenzintervall aufweist, dessen eine Grenze mit dem Wert Null verträglich ist. Für die Messungen A&S gilt $-0.65 \leq \rho_{A\&S} \leq 0.82$. Das Konfidenzintervall schließt also insbesondere den Wert $\rho_{A\&S} = 0$ ein. Deshalb besteht in diesem Fall keine Signifikanz für eine stochastische Korrelation. Ähnlich verhält es sich bei der

Datengruppe BGR. Der zugehörige Korrelationskoeffizient berechnet sich zu $\rho_{BGR} = 6.42 \cdot 10^{-2} \approx 0$. Da in diesem Fall bereits der Korrelationskoeffizient die stochastische Unkorreliertheit anzeigt, sind die Parameter dieser Datengruppe in der Tabelle 4 nicht aufgeführt. Die restlichen fünf Datengruppen sind zusammen mit ihren Regressionsgeraden in Abbildung 4 dargestellt.

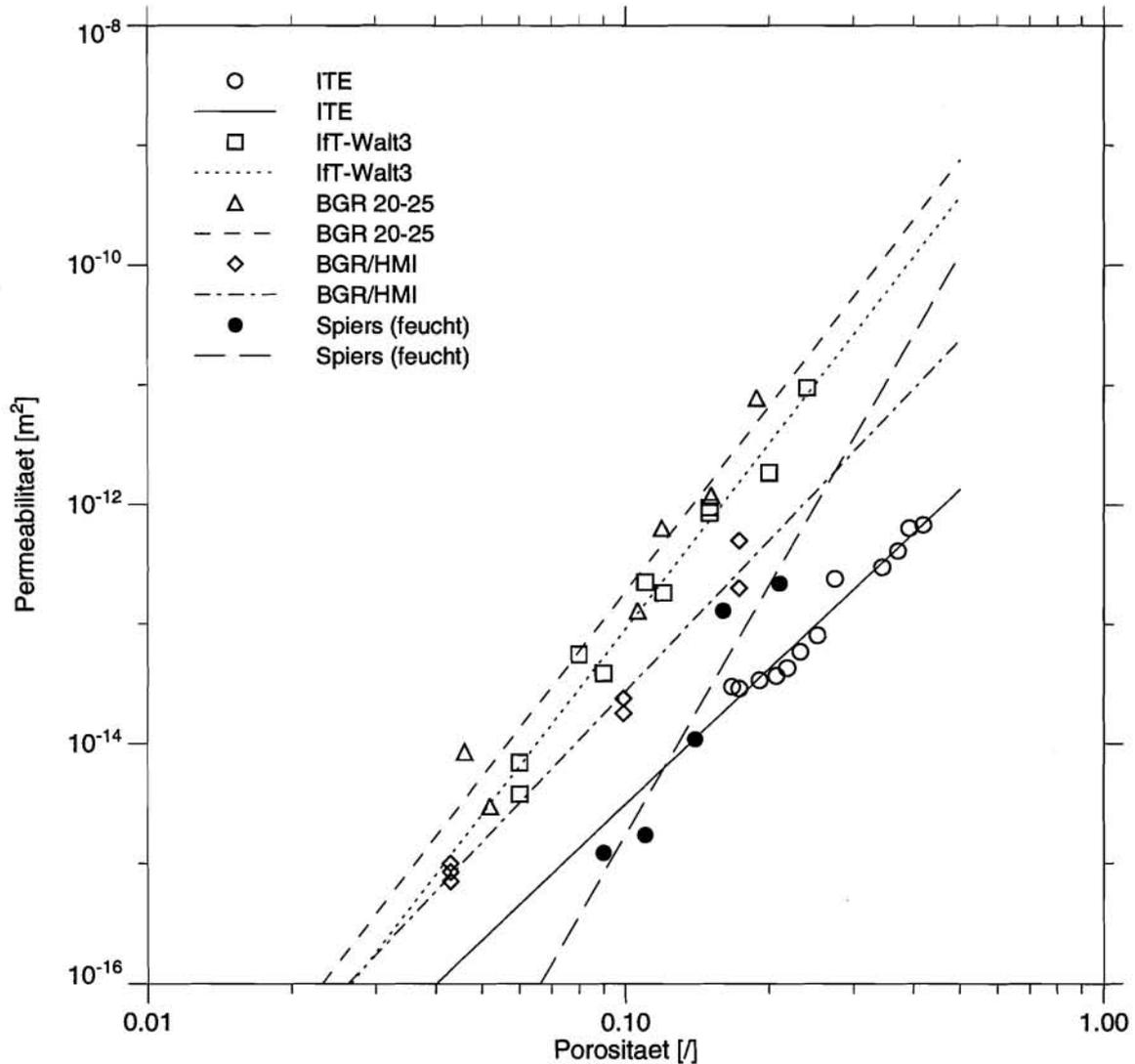


Abbildung 4: Meßdaten und Regressionsgeraden der Gruppen aus Tab. 4 mit einem Korrelationskoeffizienten $0.45 \leq \rho_{nk} \leq 0.99$

In Abbildung 4 hebt sich die Regressionsgerade für den Satz der Daten von Spiers auf Grund ihrer größeren Steigung (≈ 6.9) von den restlichen Geraden (≈ 3.8 bis 5.2) deutlich ab. Dieses legt eine andere Unterteilung der Datengruppen, nämlich in die zwei Kategorien der Messungen an feucht und solche an trocken kompaktierten Proben, nahe. Diese beiden Kategorien können jeweils noch einmal unterteilt werden, je nachdem ob die Kompaktierung bruchhaft oder bruchfrei abläuft.

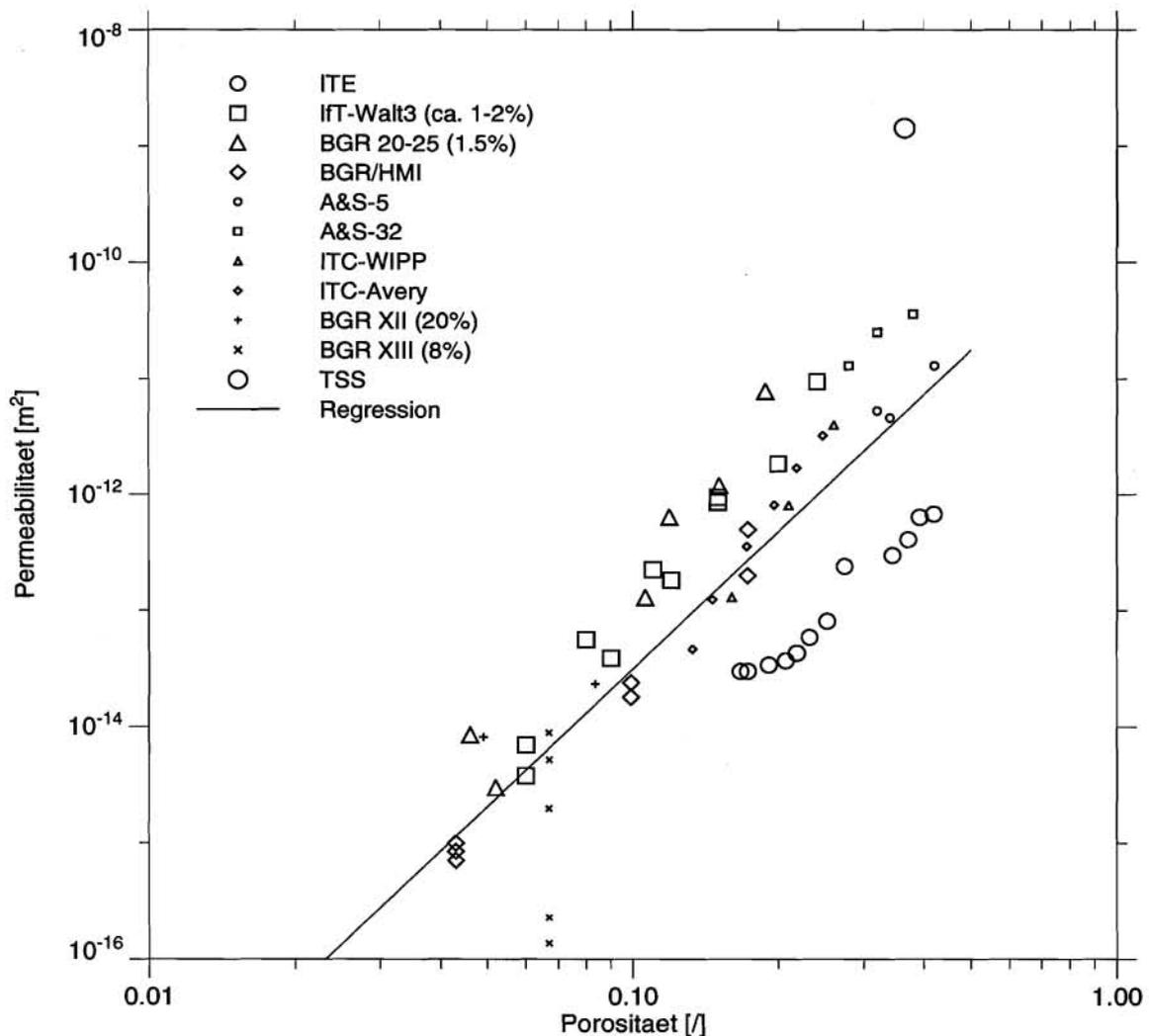


Abbildung 5: Regression für trocken kompaktierten Salzgrus

In Abbildung 5 sind die Meßergebnisse für trocken kompaktierte Proben dargestellt:

- bruchhaft:

Dieser Kategorie sind die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zuzurechnen, bei denen die Kompaktion entweder rasch oder bei erhöhten Temperaturen erfolgte. Hierunter fallen die Gruppen IfT-Walt3, BGR 20-25, BGR/HMI, ITC-WIPP und ITC-Avery. Bei diesen Experimenten wurde die Permeabilitätsentwicklung vermutlich von den Bruchvorgängen in den Körnern beeinflusst. Die Proben aus den Meßreihen BGR XII und BGR XIII wurden zwar mit einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt kompaktiert, auf Grund der hohen angewendeten Spannungen sind jedoch nicht nur Bruchvorgänge zu vermuten, sondern es ist hier auch von einer Dominanz plastischer, kriechbedingter Korndeformationen auszugehen, so daß der Einfluß der Feuchte auf die Permeabilität hier gering gewesen sein kann.

- brucharm:
In diese Kategorie gehören die Meßergebnisse des ITE, von Albrecht und Suckow A&S-5 und A&S-32, sowie die vorliegenden Daten aus dem TSS-Versuch. Letztere sind allerdings eher als Anfangswerte der Permeabilität einer losen Salzgrusschüttung ohne wesentliche Kompaktion anzusehen.

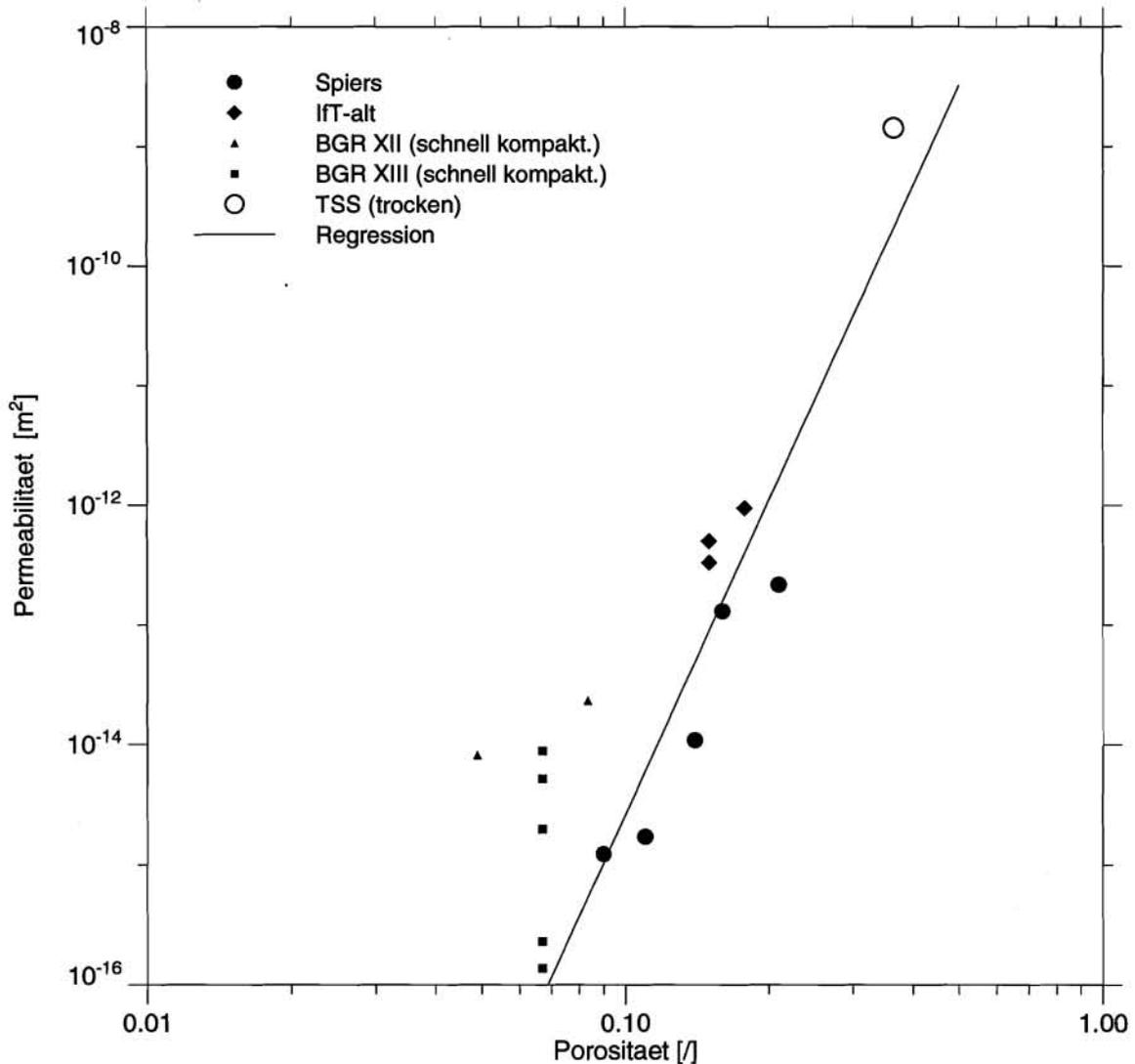


Abbildung 6: Regression der Daten für feucht kompaktierten Salzgrus im Vergleich mit den Datengruppen BGR XII, BGR XIII und TSS

In Abbildung 6 sind die Meßergebnisse für feucht kompaktierte Proben dargestellt:

- bruchhaft:
Prinzipiell wären die Datengruppen BGR XII und BGR XIII wegen der bei der Kompaktion zugefügten Feuchte hier einzuordnen, diese werden aber wegen der hohen angewendeten Spannungen und vergleichsweise hohen Permeabilitäten den trocken kompaktierten Proben zugerechnet. Daher liegen für diese Kategorie keine Meßdaten vor.

- brucharm:
Hierin werden die Daten von Spiers und zum alten Versatz (IfT-alt) eingruppiert.

Eine gesicherte Einteilung der Untersuchungsergebnisse ist jedoch wegen der bereits erwähnten unzureichenden Informationen über den Probenzustand nicht möglich. Die numerischen Resultate der zusammenfassenden Regressionen für trocken (diese auch noch einmal ohne Berücksichtigung des TSS-Wertes) bzw. feucht kompaktierten Salzgrus enthält die Tabelle 4.

Gruppe	N	a σ_a	A 10^{σ_a}	b σ_b	ρ_{nk}	$\hat{\sigma}_k^2$
trocken (mit TSS)	59	-9.572 .320	$2.679 \cdot 10^{-10}$ 2.091	3.9311 .3615	.82145	.6535
trocken (ohne TSS)	58	-9.572 .301	$1.632 \cdot 10^{-10}$ 2.000	3.7260 .3379	.82744	.5524
feucht	9	-5.865 1.633	$1.365 \cdot 10^{-6}$ 42.905	8.7211 1.9488	.86081	.3835

Tabelle 5: Ergebnis der linearen Regression für die Daten aus den beiden Kategorien, sowie die Korrelationskoeffizienten ρ_{nk} zwischen $\log(n)$ und $\log(k)$ und die Restvarianzen $\hat{\sigma}_k^2$ nach Gleichung 8

Für den 95%-Vertrauensbereich der Korrelationskoeffizienten findet man $0.716 \leq \rho_{nk} \leq 0.890$ für die trockene (inklusive des TSS-Wertes) und $0.459 \leq \rho_{nk} \leq 0.970$ für die feuchte Kompaktion.

Entsprechend den Betrachtungen in Kapitel 2 kann zunächst festgestellt werden, daß vermutlich sämtliche untersuchten Proben eine von dem Versatzmaterial, das im Endlager verwendet werden soll, abweichende Korngrößenverteilung besitzen. Diese sollte daher wegen des unterstellten Einflusses des kleinsten maßgeblichen Korndurchmessers (siehe Kap. 2.1) die Permeabilität verkleinern oder vergrößern. Sie hat aber auf die relative Änderung der Permeabilität durch die Kompaktion vermutlich nur einen sehr kleinen Einfluß, der sich noch nicht näher quantifizieren läßt, da leider nur für die wenigsten Messungen eine hinreichende Analyse der Korngrößenverteilung vorliegt.

Darüber hinaus wurde der größte Teil der untersuchten Proben einer im Vergleich zur Endlager-situation relativ schnellen Kompaktion unterzogen. Dabei treten insbesondere in trockenem Versatz Brucheffekte auf, durch die sich die Korngrößenverteilung zugunsten der Feinfraktionen verschiebt. Dieser Effekt überlagert sich der Hohlraumverminderung und bewirkt somit einen schnelleren Abfall der Permeabilität als bei langsam ablaufender, bruchfreier Kompaktion. Letztlich führt dieses zwischen den Laborproben zu einer Angleichung der Korngrößenverteilung und damit schließlich zu einer Angleichung der Permeabilitäten.

Diese Beobachtungen sind mit den eingangs erwähnten Korngrößen- und Brucheffekten vereinbar. Höhere Permeabilitäten zu Beginn der Kompaktion lassen auf größere wirksame Korndurch-

messer in der verwendeten Probe sowie eventuell eine schmalere Bandbreite der Korngrößenverteilung schließen. Dieses läßt sich teilweise auch an Hand der Angaben der Autoren belegen. Je gröber das jeweilige Feinkorn bzw. je schmalbandiger die Verteilung war, um so leichter konnten während der Kompaktion Brüche in den Körnern stattfinden. Je größer also die Permeabilität vor der Kompaktion ist, desto steiler sollte somit deren Abfall mit der Kompaktion sein. Im Versuch ITE hingegen wurde Material mit einer breitbandigen eine Fuller-Verteilung mit einer unteren Korngröße von 0.04 mm verwendet, und die Kompaktion erfolgte bei der vergleichsweise hohen Temperatur von 200 °C, was sich gleichermaßen dämpfend auf die Bruchbildung auswirkt. Durch die Kornverteilung wurde außerdem der Anfangswert der Permeabilität stark erniedrigt.

Die Laborproben für die Meßreihen BGR XII und BGR XIII (siehe Anhang A, Tabelle 3 und Abbildung 1) wurden bei hohen Drücken von 17.3 MPa und 27.5 MPa belastet. Dadurch können zumindest für die erste Kompaktionsphase massive Brucherscheinungen erwartet werden. In dieser Phase sollten außerdem die Deformationen durch plastische Kriechverformungen wesentlich mitbestimmt oder dominiert werden, so daß die diffusionsgesteuerten Vorgänge trotz der Feuchtezugabe hier nur eine untergeordnete Rolle spielen. Während der nachfolgenden Phase mit konstanter Belastung können die Bruchbildungsraten aber wieder stark zurückgehen und dann die diffusionsgesteuerten Deformationsmechanismen mehr in den Vordergrund treten. Insgesamt sind die Proben jedoch trotz der Feuchtezugabe auf Grund der hohen Spannungen bei der Kompaktion eher den trocken bzw. schnell kompaktierten Proben zuzurechnen. Die teilweise sehr niedrigen Permeabilitätswerte, die bei BGR XII beobachtet wurden, sind auf das ungünstige Verhältnis von größtem Korndurchmesser zu den Probenabmessungen und eventuell auch auf 2-Phaseneffekte und Auskristallisationen zurückzuführen.

Für die Ermittlung des für den Versatz in einem Endlager repräsentativen Anfangswertes der Permeabilität müssen weitere Meßdaten herangezogen werden. Die einzigen hierfür verwertbaren Labordaten sind in den zwei Untersuchungen von Albrecht & Suckow (A&S-5, A&S-32) enthalten. Es zeigt sich, daß die Korngrößenverteilung der drei hierbei untersuchten Proben, für die eine maximale Korngröße von 32 mm angegeben wurde, mit der des Materials von Walter für die Gruppe IfT-Walt3 weitgehend übereinstimmt. Tatsächlich stimmen die Permeabilitäten dieser beiden Materialien für große Porositäten auch nahezu überein. Das Material mit dem maximalen Korndurchmesser von 5 mm hat dagegen eine im Vergleich zum gröberen Material um den Faktor 1.5 bis 2 feinere Körnung (siehe Abbildung 7). Wenn die in Kapitel 2.1 erwähnte quadratische Abhängigkeit vom kleinsten wirksamen Korndurchmesser zutreffen sollte, führt dieses zu einer um den Faktor 2.3 bis 4 niedrigeren Permeabilität. Da der Feinkornanteil nicht hinreichend genau ermittelt wurde, können die Unterschiede sogar noch größer sein. Mit dem tatsächlich ermittelten Permeabilitätsunterschied um einen Faktor von ca. 5 stimmt dieses sehr gut überein (siehe Abbildung 5).

Die Untersuchungen der IT-Corporation zur Permeabilität trocken kompaktierten Versatzes (ITC-WIPP, ITC-Avery) sind auf Grund unzureichender Angaben weder in Bezug auf ihre bruchhafte Permeabilitätsentwicklung noch bezüglich ihrer Korngrößenverteilung auswertbar, sondern können lediglich zur Verbreiterung der Datenbasis für die empirische Permeabilitäts-Porositätsbeziehung integriert werden. Sie sind gemeinsam mit den übrigen in die Auswertung einbezogenen Daten in der Abbildung 8 dargestellt.

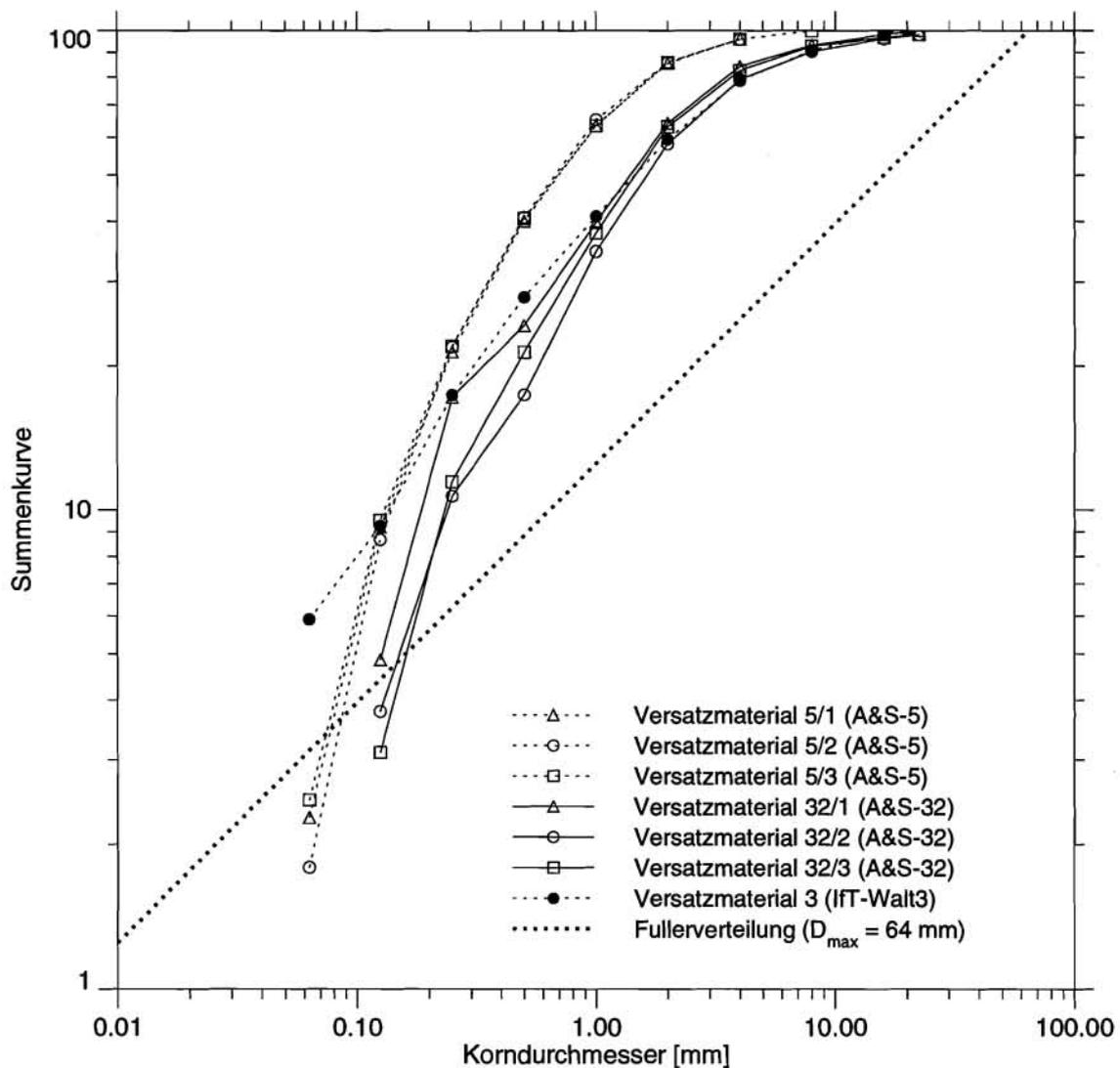


Abbildung 7: Kornverteilungskurven der bei Albrecht/Suckow verwendeten Salzgrusproben im Vergleich mit dem von Walter verwendeten Material und einer idealen Fullerverteilung.

Verglichen mit den Labordaten ist das Meßergebnis aus dem TSS-Versuch von besonderer Bedeutung und Problematik. Der Meßwert liegt etwa 2 Größenordnungen über den auf Grund der Labormessungen zu erwartenden Werten (siehe Abbildung 5). Es ist nicht auszuschließen, daß hierbei Meßfehler einen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis hatten. In diesem In-situ-Versuch in dem Forschungsbergwerk Asse wurden neben den elektrisch beheizten Versuchsbehältern auch perforierte Rohre entlang der Strecke mit Salzgrus versetzt [34]. Bei diesen Messungen wurde in abgegrenzten Bereichen der Rohre Gas aus dem Versatz angesaugt und aus dem eingestellten Unterdruck und dem resultierenden Gasstrom die Permeabilität des Versatzes errechnet. Hierbei sind zahlreiche Fehlerquellen denkbar. Als gravierendste Fehlerquelle kommt ein Gasstrom entlang des Meßrohres durch Hohlräume unter dem Rohr in Frage. Es ist möglich, daß sich solche Hohlräume durch Setzungen des Versatzes unter dem Rohr bilden können. Es

ist demnach nicht auszuschließen, daß diese starken Unterschiede zu den Laborwerten beispielsweise durch diesen Effekt hervorgerufen wurden. Daher muß dieser Wert derzeit als zweifelhaft angesehen werden und bei der statistischen Auswertung unberücksichtigt bleiben.

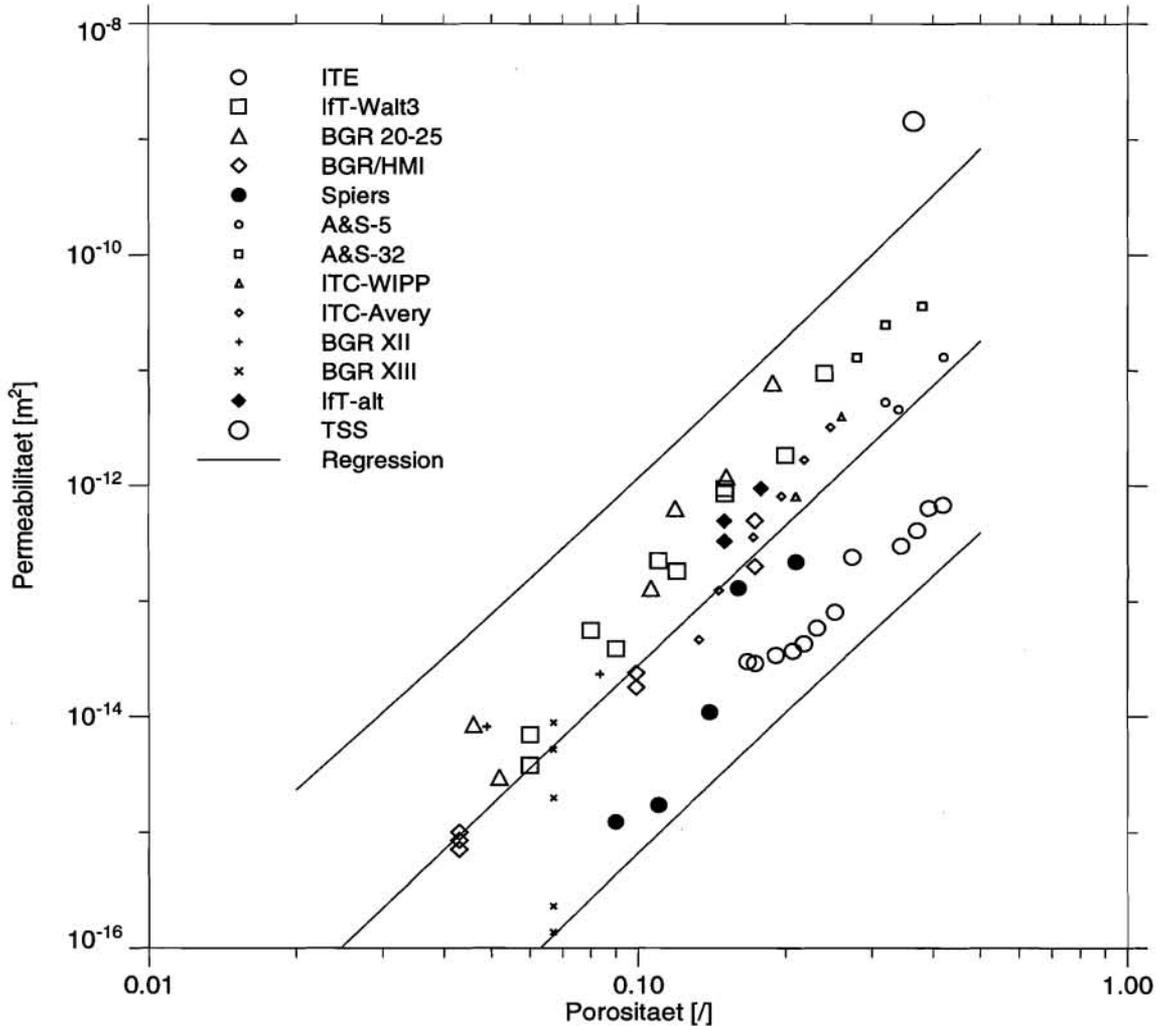


Abbildung 8: Regression für alle akzeptierten Meßdaten
Zusätzlich ist der 95%-Vertrauensbereich für die Permeabilitätswerte angegeben.

Von Interesse ist in diesem Zusammenhang auch die Permeabilität des von Spiers verwendeten Salzgruses, der trotz des in geringem Anteil beigefügten Grobkorns praktisch als Einkorngrus angesprochen werden kann. Mit einer Korngröße von 0.275 mm ist eine um zirka den Faktor 10 größere Permeabilität als bei Walter (IfT-Walt3) oder Albrecht/Suckow (A&S-32) zu erwarten. Zwar ist die Extrapolation der Meßwerte zu hohen Porositäten mit diesem Wert noch vereinbar, aber mit zunehmender Kompaktion liegen die gemessenen Werte sogar um bis zu 2 Größenordnungen unter denen von Walter. Diese starke Abnahme der Permeabilität ist nicht vorrangig auf Brucherscheinungen zurückzuführen, da die Belastung sehr gering war. Das legt die Vermutung nahe, daß diese Unterschiede auf den Einfluß der Feuchte zurückzuführen sind.

Nach den Analysen des Einflusses der Korngrößenverteilungen in den Laborproben und aus dem TSS-Versuch kann davon ausgegangen werden, daß es bei der Verfüllung einer Strecke mit der derzeit vorgesehenen Technik zu wesentlichen Entmischungsvorgängen im Versatz mit gravierenden Konsequenzen für die Permeabilität kommt. Es ist zu vermuten, daß die Anfangspermeabilität dieses Versatzes zwischen der, die sich aus den Untersuchungen von Albrecht/Suckow ergab, und der aus dem TSS-Versuch ermittelten liegen wird. Wie in Kapitel 3 diskutiert wurde, sind in den meisten Untersuchungen zur Permeabilität die Proben so schnell kompaktiert worden, daß die resultierenden Permeabilitätswerte durch Brucheffekte beeinflusst wurden. Die einzige Versuchsreihe, in der Bruchvorgänge vermutlich eine relativ geringe Rolle gespielt haben, ist die von ITE. Die hohen Temperaturen von etwa 200 °C wirken sich bei der Kompaktion bei gegebener Kompaktionsrate lediglich spannungsreduzierend aus, d.h., durch sie kann die Probe in wesentlich kürzerer Zeit bruchlos verdichtet werden (time-scaling).

Wie bereits in Kap. 2 erläutert wurde, ist bei feuchter, hinreichend langsamer Kompaktion von einem durch diffusiven Materietransport bestimmten Deformationsvorgang auszugehen, der auch zu einer gegenüber dem trockenen Versatz veränderten Korn- und Porengeometrie führt. Diese Geometrieänderungen führen, falls es infolge ungesättigter Laugen nicht zu Auflösungen im Versatz kommt, immer zu einer gegenüber dem trockenen Versatz schnelleren Abnahme der Permeabilität. Die Variation der Porosität ist bei den Meßdaten für alten, feucht kompaktierten Versatz, die für die Ableitung der Gesetzmäßigkeit für den steileren Permeabilitätsabfall unter Feuchteeinfluß herangezogen werden könnten, zur Ermittlung einer extrapolierbaren Regressionskurve zu klein. Die Daten weisen eine um fast eine Größenordnung höhere Permeabilität auf, als nach denen von Spiers zu erwarten ist. Bei dem Vergleich ist aber zu beachten, daß auch bei diesen wieder Entmischungsvorgänge eine Rolle gespielt haben können.

Da der Feuchtegehalt und die Korngrößenverteilung in den versetzten Bereichen des Endlagers derzeit noch nicht festgelegt sind und die zeitliche Entwicklung dieser Größen ebenfalls unbekannt ist, muß die in Sicherheitsanalysen benutzte Permeabilitäts-Porositätsbeziehung das Verhalten von trockenem wie feuchtem Salzgrusversatz gleichermaßen beschreiben. Aus diesem Grunde erscheint es wichtig und sinnvoll, eine Beziehung zu bestimmen, die alle akzeptierten Daten sowohl für feuchtes als auch für trockenes Material einschließt. In Tabelle 6 sind die Parameter der Regression für alle akzeptierten Daten angegeben. Das 95%-Konfidenzintervall für die Schätzung der Korrelationskoeffizienten bestimmt sich zu $0.71081 \leq \rho_{nk} \leq 0.87986$ für den Datensatz mit dem TSS-Wert und zu $0.71475 \leq \rho_{nk} \leq 0.88247$ für die Daten ohne TSS-Wert. Die akzeptierten Meßdaten sind zusammen mit ihrer Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensbereich nach Gl. 10 für die Schätzung der Permeabilität in Abhängigkeit von der Porosität in Abbildung 8 dargestellt.

Aus den Angaben in den Tabellen 4 und 6 geht hervor, daß der Ausschluß des TSS-Meßwertes nur einen geringen Einfluß auf die Zahlenwerte für die Parameter a und b der $\log(n)/\log(k)$ -Regression hat. Bei einer Regression der nichtlogarithmierten n- und k-Werte (nichtlineare Regression) würden sich dagegen erheblich größere Unterschiede ergeben, da hierbei nicht die relativen, sondern die absoluten Abweichungen von der Regressionskurve minimiert werden.

Die bivariate Dichteverteilung für $\log(n)$ und $\log(k)$ gemäß Gleichung 12, unter Verwendung des Parameters ρ_{nk} aus Tabelle 6 (ohne TSS), ist in der Abbildung 9 einmal als Isolinienplot (oberes

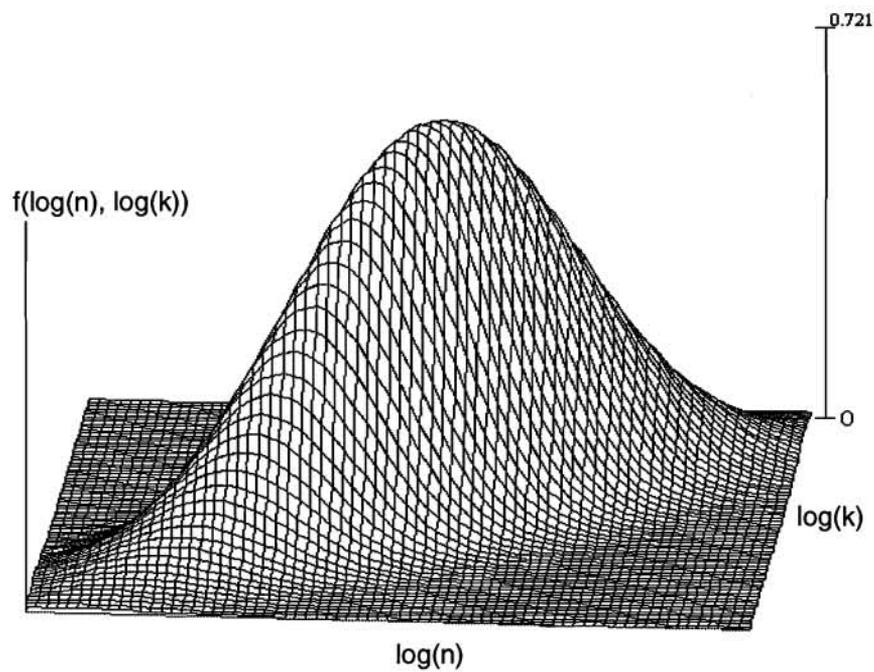
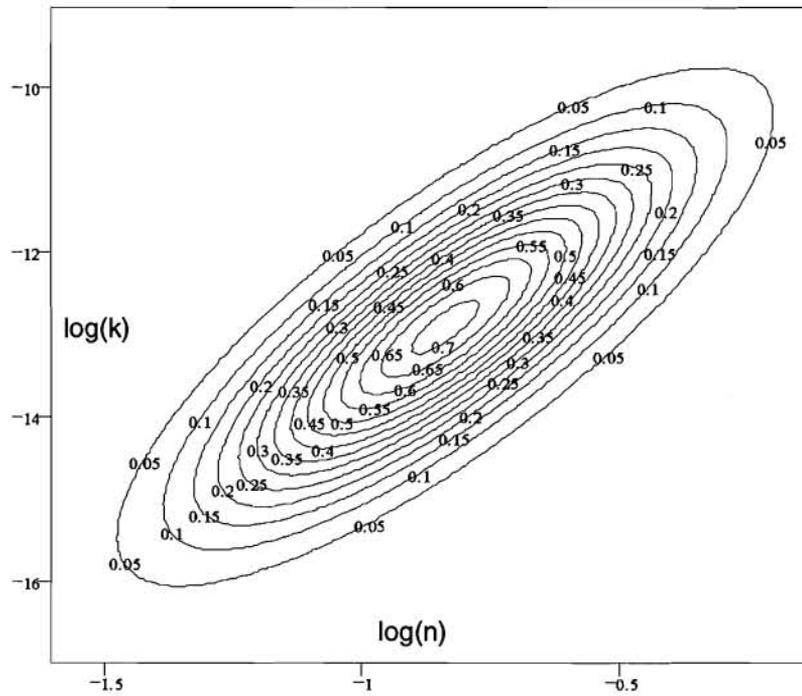


Abbildung 9: Darstellungen der bivariaten Dichteverteilung der logarithmierten Porositäts- und Permeabilitätswerte

Teilbild) und als Oberflächenplot (unteres Teilbild) dargestellt. Das Maximum der Dichteverteilung liegt in dem Punkt $(\mu_{\log(k)}, \mu_{\log(n)})$, wobei die μ die arithmetischen Mittelwerte darstellen. Die Orientierung der Ellipsen des Isolinenplots spiegelt die Korrelation zwischen $\log(n)$ und $\log(k)$ wider, die nach Tabelle 6 durch $\rho_{nk} = 0.81503$ charakterisiert ist.

Gruppe	N	a σ_a	$\frac{A}{10\sigma_a}$	b σ_b	ρ_{nk}	$\hat{\sigma}_k^2$
mit TSS	68	-9.531 0.314	$2.944 \cdot 10^{-10}$ 2.061	4.0233 0.3565	0.81168	0.648
ohne TSS	67	-9.736 0.298	$1.837 \cdot 10^{-10}$ 1.986	3.823 0.337	0.81503	0.562

Tabelle 6: Ergebnis der linearen Regression für die 67 bzw. 68 akzeptierten Meßwertpaare, sowie der Korrelationskoeffizient ρ_{nk} zwischen $\log(n)$ und $\log(k)$ und die Restvarianz $\hat{\sigma}_k^2$ nach Gleichung 8

In Abbildung 10 ist die bivariate Dichteverteilung der Fitparameter a und b gemäß Gleichung 17 dargestellt. Hieraus geht hervor, daß a und b stark positiv korreliert sind. Nach den Rechnungen beträgt dieser $\rho_{ab} = 0.95177$ mit dem 95%-Konfidenzintervall $0,92246 \leq \rho_{ab} \leq 0,97017$. Das bedeutet in diesem Falle, daß die Änderung von $\log(k)$ mit $\log(n)$ nahezu vollständig mit nur einem Parameter beschrieben werden kann. Die Hereinnahme eines zweiten Parameters in das Modell führt nur noch zu einer geringfügigen Verbesserung, die sich in einer Verkleinerung der Restvarianzen $\hat{\sigma}_k^2$ von $\log(k)$ zeigt. Bei einer vorrangig mathematisch-statistisch motivierten Vorgehens-

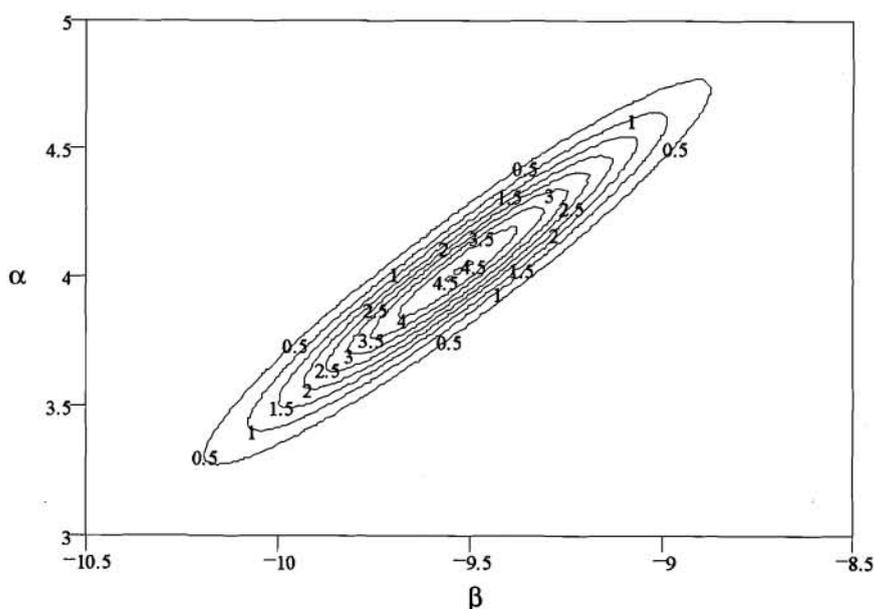


Abbildung 10: Bivariate Dichteverteilung $f(\alpha, \beta)$ der Regressionsparameter a und b nach Gleichung 17

weise würde man ein einparametrisches Modell konstruieren, dessen Parameter eine Linearkombination von a und b sind, die sich aus einer Hauptachsentransformation der Ellipsen im ursprünglichen Modell ergäben. Da dieses zu physikalisch nicht mehr interpretierbaren Variablen führte, wird jedoch an dem zweiparametrischen Modell festgehalten.

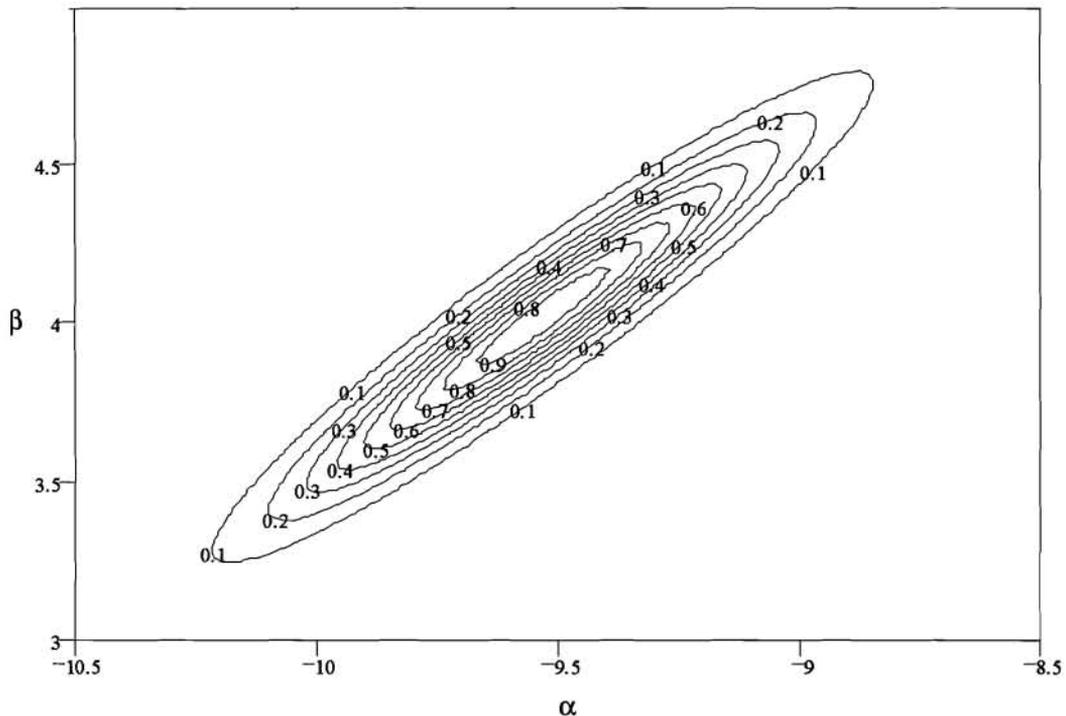


Abbildung 11: Konfidenzbereiche für die wahren Regressionsparameter in Abhängigkeit vom Vertrauensniveau $(1-q)$ mit den mittels Regression ermittelten Schätzwerten a und b

Eine andere Form der Darstellung der Regressionsergebnisse, die häufig in der Literatur verwendet wird, ist in Abbildung 11 gegeben. Hierin sind die Konfidenzbereiche der wahren Regressionsparameter für verschiedene Werte von q dargestellt, wobei die zugehörige Kurve den Bereich umschließt, in dem die wahren Parameter mit einem Vertrauensniveau $(1-q) \cdot 100\%$ enthalten sind. Diese Kurven wurden nach Gleichung 11 in Verbindung mit der Umkehrfunktion Q der F-Verteilung berechnet (siehe Kapitel 5.2). Die Mittelpunkte der Kurven sind durch die Schätzwerte a und b für die wahren Parameter gegeben. Aus dem Bild geht zum Beispiel hervor, daß diese mit einem Vertrauensniveau von 90% innerhalb der äußersten Kurve ($q = 0.1$) liegen.

Die Isolinien der bivariaten Verteilungsfunktion für die Parameter A und m der untransformierten Ausgangsfunktion 3 analog Gleichung 16 enthält die Abbildung 12. Diese entspricht der Darstellung der Dichtefunktion der transformierten Parameter a und b in der Abbildung 9. Aus der Form der Linien geht hervor, daß die Variable A lognormal verteilt und m unverändert normalverteilt sind, d.h., daß ein Schnitt parallel zur Ordinatenachse mit $A = \text{const.}$ eine symmetrische Normalverteilung von m ergibt, während ein Schnitt parallel zur Abszissenachse mit $m = \text{const.}$ die charakteristische, unsymmetrische Log-Normalverteilung entsprechend Gleichung 13 aufweist.

Bei der Berechnung der Funktionswerte analog Gleichung 16 wurden berücksichtigt, daß allgemein $\mu_{\ln(x)} = \mu_{\log(x)} \cdot \ln(10)$ und $\sigma_{\ln(x)} = \sigma_{\log(x)} \cdot \ln(10)$ gilt. Hiermit und unter Verwendung der Gleichungen 14 und 15 erhält man für den Korrelationskoeffizienten zwischen A und m

$$\rho_{\ln xy} = \rho_{ab} \cdot \mu_{\ln x} \cdot \frac{\sigma_{\ln a}}{\sigma_{\ln x}}, \text{ wobei}$$

$$\mu_{\ln x} = e^{\left(a \cdot \ln(10) + \frac{(\sigma_a \cdot \ln(10))^2}{2} \right)} \text{ und}$$

$$\sigma_{\ln x}^2 = \mu_{\ln x}^2 \left(e^{(\sigma_a \cdot \ln(10))^2} - 1 \right) \text{ gilt.}$$

Weiterhin gilt für die normalverteilte Variable $y = b = m$, $\mu_y = b$ und $\sigma_y = \sigma_b$. Darüber sind für den hier betrachteten speziellen Fall die Parameter A und m mit den bereits bekannten a und b der transformierten Verteilungsfunktion verknüpft. Mit den Werten aus Tabelle 6 erhält man $\rho_{Am} = 0,84191$ mit dem 95%-Konfidenzintervall $0,75423 \leq \rho_{Am} \leq 0,90009$. Die Zahlenwert-Gleichung für die in Abbildung 12 dargestellte Dichteverteilung der Parameter A und m ist in Kapitel 9 als Gleichung 43 angegeben.

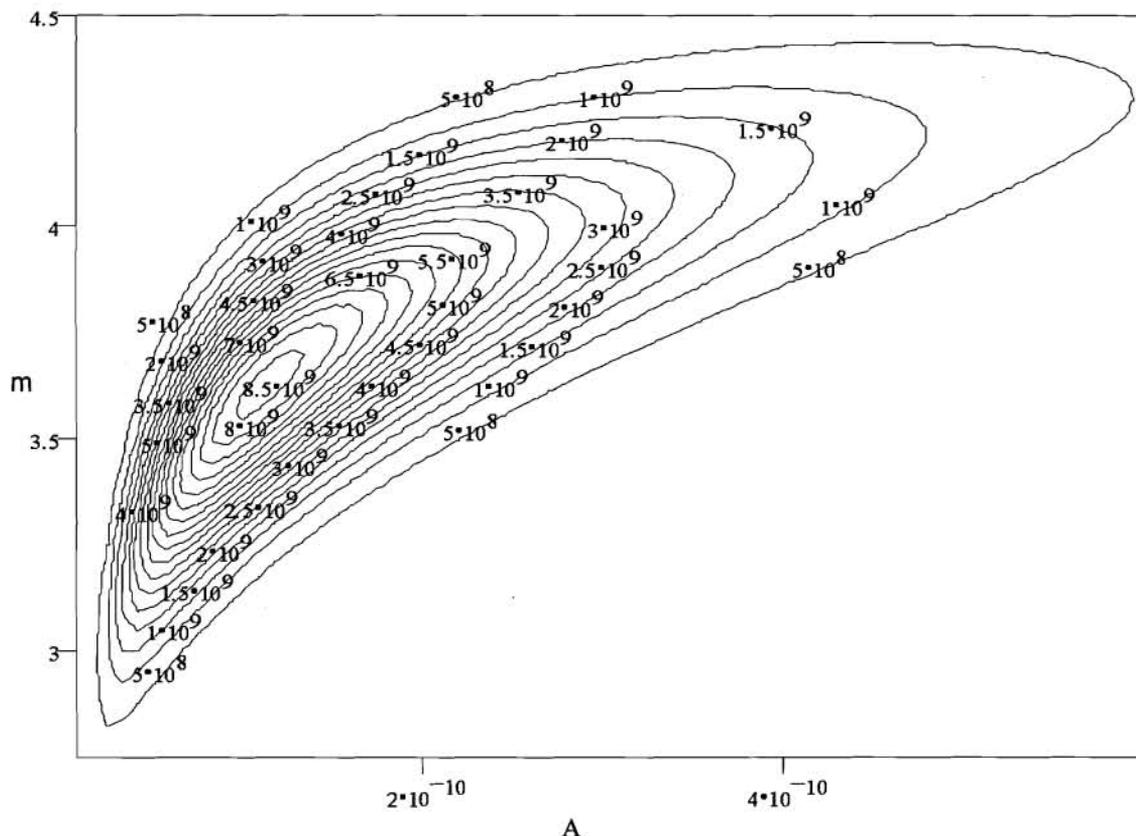


Abbildung 12: Bivariate Dichteverteilung $f(A,m)$ der Parameter A und m aus Gleichung 3. Hierbei ist A lognormal- und m normalverteilt.

7 Salzformsteine: Experimentelle Daten, Ergebnisse und Diskussion

Die Salzformsteine (Briketts) sollen in Langzeitdichtungen von Abschlußdämmen Verwendung finden. In den hier beschriebenen Experimenten wurden sowohl Originalbriketts aus der industriellen Produktion als auch Modellbriketts, die im Labor speziell für diese Messungen hergestellt wurden, untersucht. Salzformsteine unterscheiden sich vom Versatz in den bisher untersuchten Laborproben vorwiegend durch ihre geringe Bandbreite der Korngrößen, ihre im Durchschnitt feineren Korndurchmesser sowie durch die sehr schnelle Kompaktion, die sie bei ihrer Herstellung unter hohen Drücken (ca. 100 MPa) erfahren haben. Außerdem werden sie gewöhnlich trocken kompaktiert. Eine geringe Feuchtigkeit hat bei den verwendeten hohen (schlagartigen) Kompaktionsraten vermutlich ohnehin keinen nennenswerten Einfluß auf die Bruchvorgänge oder die Geometrieänderung. Es ist davon auszugehen, daß die Kompaktion praktisch ausschließlich durch Kornumlagerungen, -brüche und plastische Verformung bestimmt wird. Weiter muß davon ausgegangen werden, daß die mineralogischen Zusammensetzungen der Ausgangsmaterialien differieren.

Name	Kennung	Anzahl Meßwerte	Bemerkung
Pusch/Borgmeier [7]	ITE-rel	8	Original-Briketts für Langzeitdichtung, Porositätsbestimmung mit Lauge
Walter [3]	lft-Walt1	7	Original-Briketts für Langzeitdichtung
Walter [3]	lft-Walt2 Mod	5	feucht (2.4%) kompaktiert
Walter [3]	lft-Walt3 Mod	7	Korngrößenverteilung wie bei Briketts
IT-Corporation [15]	ITC1 Mod	3	schnell kompaktiert, aber relativ breites Kornspektrum bis 3 mm
IT-Corporation [15]	ITC2 Mod	5	steile Kornverteilungskurve bis 0.9 mm, langsam kompaktiert

Tabelle 7: Angaben zu den Permeabilitätsmessungen an Salzbriketts.

Bereits vor einer Analyse der Meßdaten kann hinsichtlich der Permeabilitätsentwicklung folgendes vermutet werden: Durch die rasche Kompaktion unter sehr hohen Spannungen kommt es im einzelnen Salzkorn zu einer massiven Verfestigung des Kristalls. Dies hat zur Folge, daß eine weitere Kompaktion im trockenen Zustand unter dem vergleichsweise niedrigen Gebirgsdruck praktisch nicht mehr erfolgt. Allenfalls kann es im Laufe sehr langer Zeiten zu einer Entfestigung auf Grund lokal noch vorhandener Kriechfähigkeit kommen, die sich infolge von Spannungsumlagerungen ausweiten kann und somit zu einer weiteren, jedoch sehr langsamen Kompaktion führt. Bei Vorhandensein von Feuchte jedoch, z.B. aus dem Mörtel, dem Gebirge oder aus grö-

Bereits bei hohen Laugenvorräten, ist eine weitere Kompaktion durch Lösungs- bzw. Diffusionsvorgänge an den Korngrenzen möglich. Die Charakteristik der Permeabilitätsentwicklung wird dann jedoch von der während der bruchhaften Kompaktion vermutlich deutlich abweichen. Die vorliegenden Daten zur Permeabilitätsentwicklung im Labor unter sehr schneller Kompaktion können also nur die Änderungen während der Herstellung beschreiben und sind für Extrapolationen auf Endlagerbedingungen nicht geeignet.

Diese Erwartung bestätigt sich bei Betrachtung der experimentell ermittelten Permeabilitäten.

Gruppe	Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Gruppe	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
ITE-rel	.0766	8.5 · 10 ⁻¹⁶	IFT-Walt3 Mod	.18	1.178 · 10 ⁻¹³
	.0763	4.3 · 10 ⁻¹⁵		.215	1.29 · 10 ⁻¹³
	.0637	7.2 · 10 ⁻¹⁶		.215	1.29 · 10 ⁻¹³
	.0712	1.9 · 10 ⁻¹⁵		.219	1.70 · 10 ⁻¹³
	.0646	1.13 · 10 ⁻¹⁴		.219	1.71 · 10 ⁻¹³
	.0796	5.0 · 10 ⁻¹⁵		.311	8.69 · 10 ⁻¹³
	.0568	1.75 · 10 ⁻¹⁵		.329	1.14 · 10 ⁻¹²
	.0681	1.2 · 10 ⁻¹⁵	ITC1 Mod	.151	4.0 · 10 ⁻¹⁴
IFT-Walt1	.076	3.26 · 10 ⁻¹⁵		.142	1.3 · 10 ⁻¹⁴
	.076	4.13 · 10 ⁻¹⁵		.096	3.0 · 10 ⁻¹⁵
	.076	4.34 · 10 ⁻¹⁵	ITC2 Mod	.357	1.80 · 10 ⁻¹²
	.076	4.70 · 10 ⁻¹⁵		.30	7.60 · 10 ⁻¹³
	.076	5.37 · 10 ⁻¹⁵		.256	3.16 · 10 ⁻¹³
	.074	6.11 · 10 ⁻¹⁵		.216	1.50 · 10 ⁻¹³
	.074	6.46 · 10 ⁻¹⁵		.19	7.00 · 10 ⁻¹⁴
IFT-Walt2 Mod	.086	1.62 · 10 ⁻¹⁵			
	.086	1.85 · 10 ⁻¹⁵			
	.088	2.15 · 10 ⁻¹⁵			
	.089	1.43 · 10 ⁻¹⁵			
	.091	2.53 · 10 ⁻¹⁵			

Tabelle 8: Meßwerte der Datengruppen von Salzformsteinen

Es liegen insgesamt nur sechs Datensätze für Salzbricketts vor. Sie sind in Tabelle 8 aufgeführt und in Anhang B ausführlicher beschrieben. Zusätzlich sind diese Meßdaten in Abbildung 13 in

doppellogarithmischem Maßstab dargestellt.

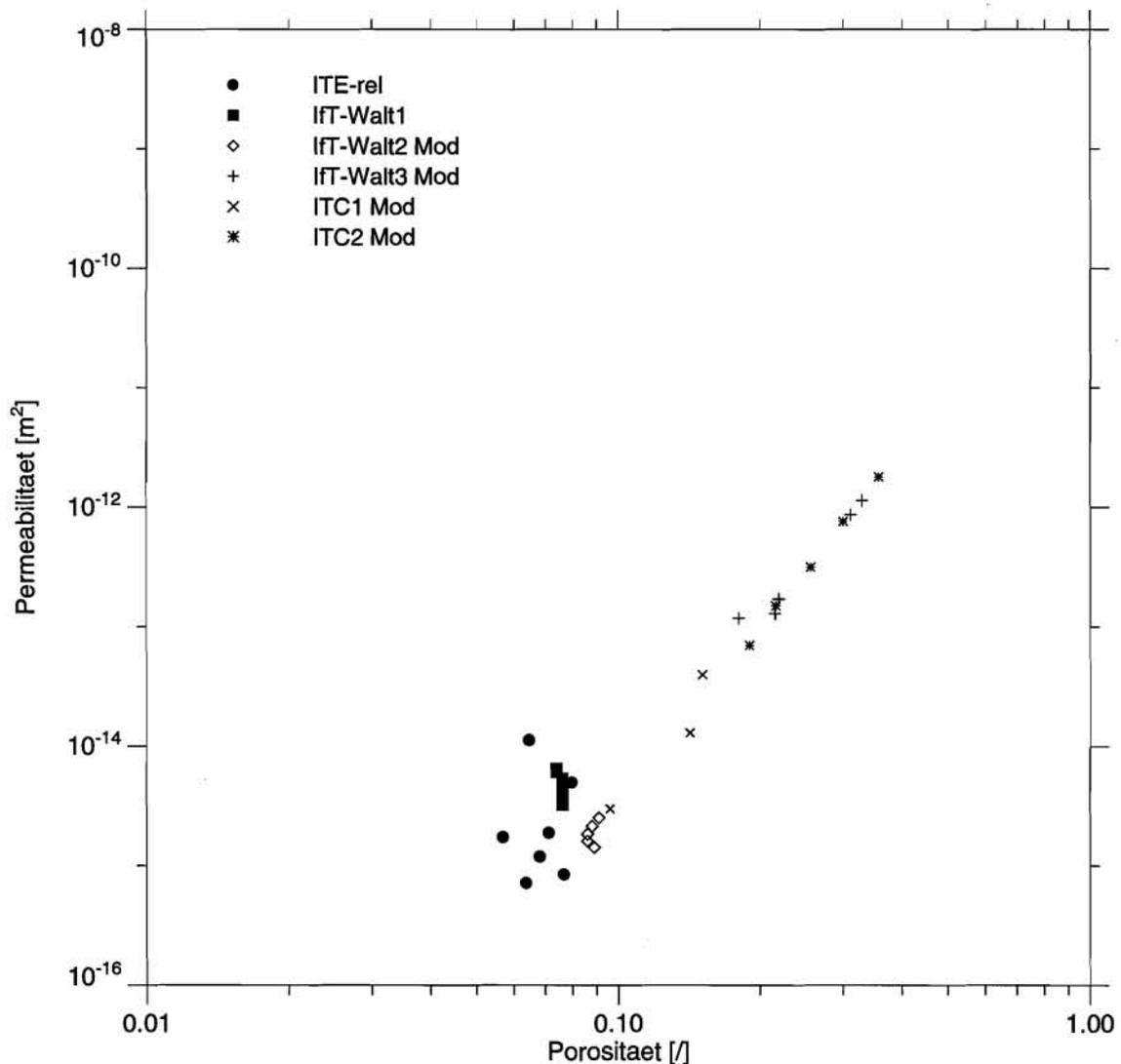


Abbildung 13: Permeabilitätsmeßdaten zu Originalsalzbriketts (gefüllte Symbole) und Modellbriketts, die im Labor kompaktiert wurden.

Offensichtlich können die Daten in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die erste enthält die Daten für die im Labor hergestellten Briketts oder brikettähnlichen Proben, die zweite die der Original-Salzbriketts. Die meisten Meßpunkte der ersten Kategorie liegen sehr gut auf einer Geraden (siehe Abbildung 13). Allerdings weichen gerade die Meßwerte für die Original-Salzbriketts, die für die Abschlußdämme im Endlager Verwendung finden sollen, deutlich hiervon ab. Sie zeichnen sich durch höhere Permeabilitäten und eine größere Streuung aus. Die trotz der relativ geringen Korngrößen höheren Permeabilitäten sind zum einen vermutlich auf die schmalbandige Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials zurückzuführen, zum anderen sind bei der industriellen Herstellung Entmischungsvorgänge unvermeidbar. Auf Grund der schnellen, schlagartigen Kompaktion ist zudem eine inhomogene Dichteverteilung zu erwarten. Dieses zeigt sich in

den lokalen Schwankungen der Porosität der Briketts und sollte im mikroskaligen Bereich (Größenordnung: einige Korndurchmesser) noch wesentlich ausgeprägter sein. Durch diese Inhomogenität lassen sich sowohl die vergleichsweise hohe Permeabilität als auch die große Streuung der Daten, sowohl der Porosität als auch der Permeabilität, erklären. Zusätzlich können die bei der sehr schnellen Kompaktion aufgebauten starken inneren Spannungen in den Briketts gewissermaßen "eingefroren" werden. Dieses kann zu einer starken Rißbildung führen [3]. Diese relativ deutlichen Unterschiede belegen auch hier die zuvor erhobenen Einwände gegen eine zu oberflächliche Bewertung der Meßergebnisse.

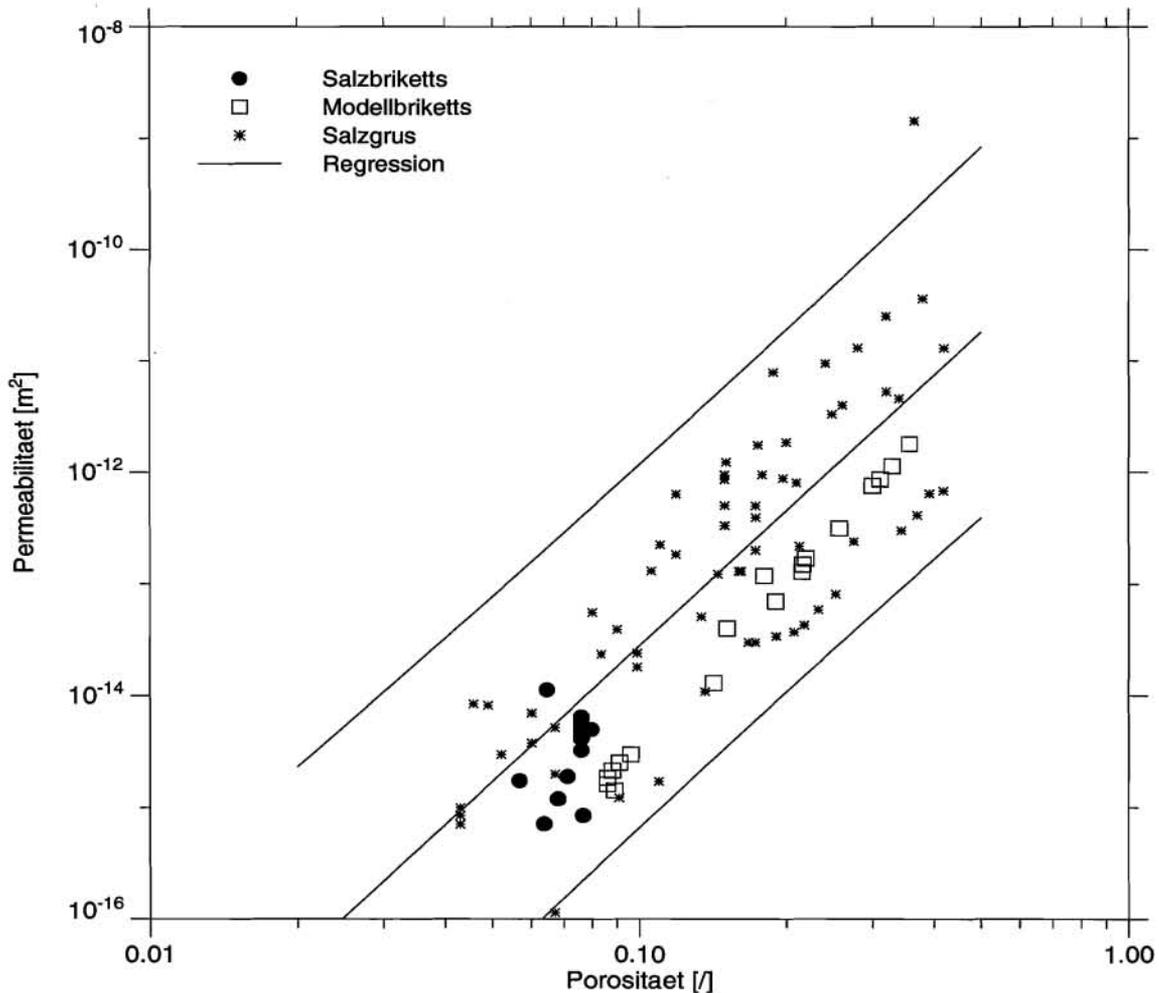


Abbildung 14: Darstellung der Permeabilitäten von Salzbricketts, Modellbricketts und von Salzgrus, zusammen mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensbereich für den Versatz

Da wegen der eingangs erwähnten inneren Verfestigung der Körner erst bei einem Feuchtigkeitszutritt mit einer relevanten Kompaktion gerechnet werden muß, erscheint es sinnvoll, für die Steigung m der Ausgleichsgeraden, durch welche die Permeabilitätsänderung mit der Porosität

festgelegt ist, ebenfalls den Wert für Salzgrus anzunehmen. Im Unterschied zum Versatz weisen die Salzformsteine beim Einbringen in ein Endlager bereits kleinere Porositäten und Permeabilitäten auf. Diesen Anfangswerten können die arithmetischen Mittelwerte k_0 und n_0 der Meßdaten für die Originalbriketts zugeordnet werden. Mit den in Kapitel 5 definierten Beziehungen ergeben sich dann

$$k_0 = \mu_{k_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad \sigma_{k_0}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (k_i - \mu_{k_0})^2$$

bzw.

$$n_0 = \mu_{n_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad \sigma_{n_0}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (n_i - \mu_{n_0})^2$$

zu $n_0 = 7.23 \cdot 10^{-2} \pm 6.29 \cdot 10^{-3}$ und $k_0 = 4.09 \cdot 10^{-15} \pm 2.75 \cdot 10^{-15} \text{ [m}^2\text{]}$.

Die Permeabilität der Salzbricketts hat damit dieselbe Abhängigkeit von der Porosität wie die von Salzgrusversatz. Der Unterschied ist, daß diese Abhängigkeit auf Grund der Kompaktion der Salzformsteine bereits mit einer sehr viel kleineren Anfangsporosität n_0 und -permeabilität k_0 einsetzt. Das bedeutet, daß man die Permeabilität k_B von Salzbricketts durch Multiplizieren der Permeabilität k_G von Salzgrus mit dem Faktor F_B , der durch die oben genannten Mittelwerte k_0 und n_0 bestimmt wird, erhält.

Damit ergibt sich folgende Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzbricketts:

$$k_B = F_B k_G \quad \text{mit } F_B = \frac{k_G(n_0)}{k_0} .$$

Mit den Daten aus Tab. 8 erhält man für F_B den Wert 0.5401.

8 Mörtel in Dammbauwerken: Daten, Modelle und Diskussion

Es ist vorgesehen, in Dammbauwerken, die als technische Barrieren in einem Endlager für radioaktive oder chemisch-toxische Abfälle errichtet werden sollen, die dafür als Baumaterial verwendeten Salzbriketts mit Salz/Ton-Mörtel zu verfugen. Die Zusammensetzung dieses Mörtels wurde noch nicht festgelegt. Nach bisheriger Planung soll dabei entweder reiner, feinkörniger Salzgrus oder Salzgrus mit definiertem Tonanteil als Mörtelmaterial verwendet werden. Beide Materialien sollen feucht eingebaut werden. Es ist jedoch zu vermuten, daß die Feuchtigkeit bereits binnen kurzer Zeit weitgehend von den trockenen Briketts aufgesaugt wird.

Experimentelle Daten über die Permeabilität von Mörtel liegen bisher von Walter [35] und von Franke [36] vor. In beiden Fällen ergaben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse für den Einfluß des Tonanteils auf die Permeabilität. Es mußten deswegen für die Auswertungen für die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung unterschiedliche Modelle entwickelt werden.

8.1 Auswertung der Ergebnisse von Walter

Die experimentellen Daten von Walter [35] zur Permeabilität der Salzgrus-Ton-Gemische wurden nur für praktisch unverdichtetes Material ermittelt. Sie sind im Anhang C zusammengefaßt. Bestimmt wurden der Massenanteil des Tons, die Gesamtporosität und die Permeabilität von insgesamt 30 Proben. In die Auswertung gingen jedoch nur die Ergebnisse von 20 Proben ein, da der Salzgrusanteil der letzten 10 Proben aus gesiebttem Einkornmaterial bestand. Diese Ergebnisse sind in der Tabelle 9 aufgeführt. Die Proben mit diesem Material wiesen keine geringere Permeabilität auf als die anderen Proben, wohl aber eine höhere Porosität. Durch die abweichenden Korngrößen waren sie ungeeignet für eine gemeinsame Auswertung mittels des nachfolgend beschriebenen Verfahrens.

Tongehalt w_T	Dichte ρ_{T0} [kg/m ³]	Porosität n [m ³ /m ³]	Permeabilität k [m ²]
0	1481	0.313	$1.06 \cdot 10^{-12}$
0	1475	0.315	$7.73 \cdot 10^{-13}$
0	1433	0.335	$1.72 \cdot 10^{-12}$
0	1432	0.336	$8.72 \cdot 10^{-12}$
0	1481	0.313	$1.48 \cdot 10^{-12}$
0.09	1438	0.343	$7.22 \cdot 10^{-12}$
0.1	1472	0.329	$1.47 \cdot 10^{-12}$
0.18	1497	0.328	$8.62 \cdot 10^{-13}$

Tabelle 9: Meßwerte von Walter [35] für Steinsalz-Tonmörtel, geordnet nach zunehmendem Tongehalt

0.2	1581	0.293	$7.32 \cdot 10^{-13}$
Tongehalt	Dichte [kg/m ³]	Porosität n [m ³ /m ³]	Permeabilität k [m ²]
0.2	1580	0.293	$1.46 \cdot 10^{-12}$
0.28	1638	0.278	$6.01 \cdot 10^{-13}$
0.3	1628	0.286	$3.77 \cdot 10^{-13}$
0.3	1653	0.275	$1.40 \cdot 10^{-13}$
0.4	1755	0.245	$3.74 \cdot 10^{-14}$
0.4	1781	0.233	$5.21 \cdot 10^{-14}$
0.4	1798	0.226	$4.66 \cdot 10^{-14}$
0.46	1785	0.241	$1.08 \cdot 10^{-13}$
0.5	1934	0.184	$8.31 \cdot 10^{-16}$
0.5	1699	0.283	$4.15 \cdot 10^{-13}$
0.5	1742	0.265	$5.09 \cdot 10^{-14}$

Tabelle 9: Meßwerte von Walter [35] für Steinsalz-Tonmörtel, geordnet nach zunehmendem Tongehalt (Forts.)

Es ist davon auszugehen, daß der Tonanteil nicht in Form einzelner, homogen verteilter Partikel mit dem Salzgrus vermischt ist (siehe [35]). Wahrscheinlicher ist, daß sich mehrere Partikel aneinander anlagern und im Versatz einen Bereich mit relativ niedriger Permeabilität bilden. Die Wirkung des heterogenen Mörtels mit Bereichen unterschiedlicher Permeabilität auf das durchströmende Fluid ist mathematisch analog zur Wirkung eines inhomogenen elektrischen Leiters auf den durchfließenden elektrischen Strom. Die für elektrische Leiter entwickelte Theorie läßt sich demnach sinngemäß auch auf kleine, in Salzgrus homogen verteilte Tonkügelchen übertragen. Falls die Permeabilität k_G des Salzgruses sehr viel größer ist als die Permeabilität k_T des Tonnes, ergibt sich die Gesamtpermeabilität des Mörtels k_M bei kleinem, volumenbezogenem Tonanteil v_T nach [37] zu

$$k_M = \frac{2k_G + k_T + 2v_T(k_T - k_G)}{2k_G + k_T - v_T(k_T - k_G)} k_G \approx \left(1 - \frac{3v_T}{2 + v_T}\right) k_G, \quad k_G \gg k_T. \quad (26)$$

Für großen Tongehalt ($v_T \rightarrow 1$) ergibt sich

$$k_M = \frac{2k_T + k_G + 2(1 - v_T)(k_G - k_T)}{2k_T + k_G - (1 - v_T)(k_G - k_T)} k_T \approx \left(1 - \frac{3(1 - v_T)}{v_T}\right) k_T, \quad k_G \gg k_T. \quad (27)$$

Im Endlager werden dem Mörtel vermutlich nur geringe Tonanteile beigefügt. Diese wiesen auch die meisten der von Walter untersuchten Proben auf, für die somit die Gl. (26) zutrifft.

Walter bestimmte die Korndichten des Salzgruses und des Tons, sowie die Porosität des reinen Tons. Es ist zu beachten, daß wegen der unterschiedlichen Dichten von lockerem Salzgrus und Ton der Volumenanteil v_T mit dem Massenanteil $w_T = M_T / M_M$ nicht identisch ist. Eine Umrechnung zwischen beiden Anteilen läßt sich aber unter Berücksichtigung der jeweiligen Dichten und Porositäten durchführen.

$$v_T = \frac{V_T}{V_M} = \frac{V_{To}/(1-n_T)}{V_{Mo}/(1-n_M)} = \frac{M_T/(\rho_{To}(1-n_T))}{M_M/(\rho_{Mo}(1-n_M))} = \frac{w_T \rho_{Mo}(1-n_M)}{\rho_{To}(1-n_T)} \quad (28)$$

V und M geben Volumina bzw. Massen an, die Indizes T und M stehen für "Ton" und "Mörtel". Der Index o kennzeichnet die Kornvolumina und -dichten. Somit steht n_T für die Porosität des Tones und n_M für die gemessene Gesamtporosität des Mörtels. Die mittlere Korndichte ρ_{Mo} der Salzgrus-Ton-Mischung errechnet sich aus der Summenbilanz der reinen Kornvolumina.

$$V_{Mo} = V_{Go} + V_{To} = \frac{M_M}{\rho_{Mo}} = \frac{M_G}{\rho_{Go}} + \frac{M_T}{\rho_{To}} \quad (29)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\rho_{Mo}} = \frac{1-w_T}{\rho_{Go}} + \frac{w_T}{\rho_{To}} \quad (30)$$

Es wird im weiteren unterstellt, daß im Verlauf der Probenherstellung die Tonporosität konstant blieb. Dichteänderungen der Gesamtprobe bei gleichem Tongehalt werden dem leicht kompaktierbaren Salzgrus zugeschrieben. Aus der Gesamtporosität n_M und der Porosität n_T des Tons läßt sich dann die Porosität des Versatzes n_G aus der Volumenbilanz ermitteln.

$$\begin{aligned} V_M = V_G + V_T &= \frac{V_{Mo}}{1-n_M} = \frac{V_{Go}}{1-n_G} + \frac{V_{To}}{1-n_T} = \\ &= \frac{M_M}{\rho_{Mo}(1-n_M)} = \frac{M_G}{\rho_{Go}(1-n_G)} + \frac{M_T}{\rho_{To}(1-n_T)} \end{aligned} \quad (31)$$

Mit den Massenanteilen w_T und $w_G = M_G / M_M = 1 - w_T$ ergibt sich die Salzgrusporosität zu

$$n_G = 1 - \frac{\frac{(1-w_T)}{\rho_{Go}}}{\frac{1}{\rho_{Mo}(1-n_M)} - \frac{w_T}{\rho_{To}(1-n_T)}} \quad (32)$$

Die Permeabilität k_G des Salzgruses wird analog zu den bisherigen Auswertungen durch einen Potenzansatz für die Porosität beschrieben.

$$k_G = k_{G_0} n_G^m \quad (33)$$

Die Permeabilität des Mörtels ergibt sich somit unter Verwendung der Gleichungen (26) und (33) zu

$$k_M = \left(1 - \frac{3v_T}{2 + v_T}\right) k_{G_0} (n_G)^m, \quad (34)$$

mit v_T nach Gleichung (28) und n_G nach Gleichung (32).

Entsprechend der Vorgehensweise in Kapitel 5 erfolgt die Regression für $\log(k_M)$ und $\log(n_G)$. Dafür lautet Gl. (34):

$$\log(k_M) = \log(k_{G_0}) + \log\left(1 - \frac{3v_T}{2 + v_T}\right) + m \log(n_G) \quad (35)$$

Mit den Substitutionen

$$y = \log(k_M) - \log\left(1 - \frac{3v_T}{2 + v_T}\right), \quad a = \log(k_{G_0}), \quad x = \log(n_G) \quad \text{und} \quad b = m \quad (36)$$

läßt sich die Gl. (35) wieder auf die Form $y = a + bx$ bringen (vergl. Kap. 5.1).

Mit den von Walter angegebenen Materialwerten $\rho_{G_0} = 2155 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{T_0} = 2632 \text{ kg/m}^3$, $n_T = 0.22$ und den übrigen Meßwerten können die Parameter a und b bestimmt werden.

Es ist allerdings zu vermuten, daß der Ton bei der Anmischung mit Salzgrus und insbesondere mit Lauge sowohl aufgelockert wird als auch quillt. Auch bei der vor der Messung durchgeführten Trocknung des Mörtels im Labor wird die Volumenvergrößerung durch Quellen nicht vollständig rückgängig gemacht werden. Es ist also zu erwarten, daß die Porosität der Tonpartikel um einen Faktor $F_T > 1$ zunimmt.

$$n_T' = F_T n_T \quad (37)$$

In der Tabelle 10 werden die Regressionsparameter von vier statistischen Auswertungen aufgeführt, bei denen der Parameter F_T im Bereich von 1 bis 1.5 variiert wurde. Der Wert $F_T = 1.3$ liefert von den vier angenommenen Werten die kleinste Restvarianz $\hat{\sigma}_y^2$. Dieser Wert erscheint unter Berücksichtigung der Quelleigenschaften, wie sie von Walter für die Salzgrus-Ton-Gemische beobachtet wurden, durchaus realistisch. Eine Festlegung auf einen bestimmten Wert von F_T erfordert weitere experimentelle Untersuchungen. Daher kann ein gesicherter Parametersatz nicht angegeben werden. Ferner gilt noch die Einschränkung, daß die aufgetretenen Dichteänderungen in den betrachteten Proben eine exakte Parameterbestimmung ausschließen.

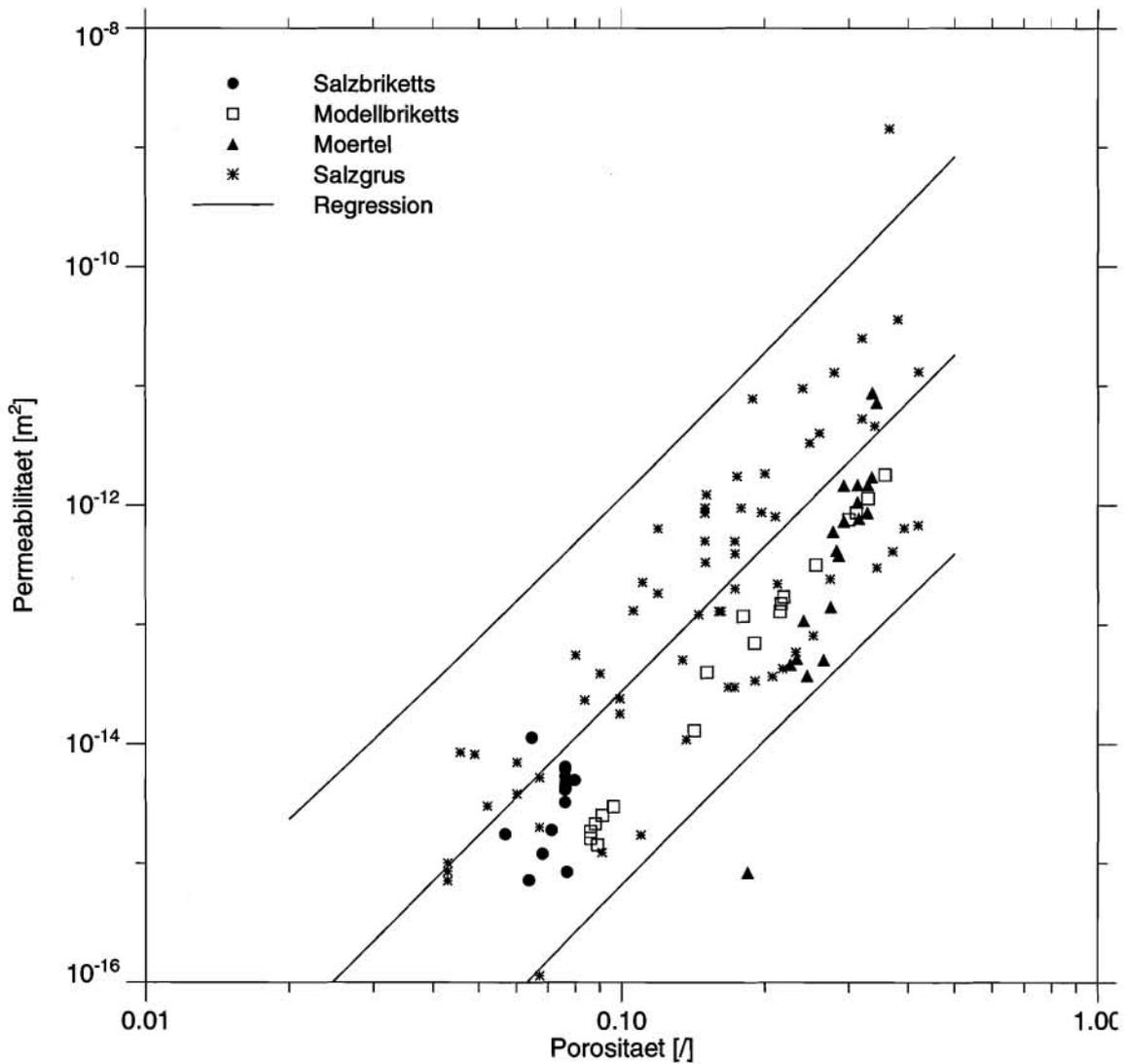


Abbildung 15: Darstellung der Permeabilitäten von Bricketts, Salzgrus und Mörtel, zusammen mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensbereich für den Versatz

F_T	N	a σ_a	A 10^{σ_a}	b σ_b	ρ_{xy}	$\hat{\sigma}_y^2$
1.	20	-7.4839 .4885	$3.281 \cdot 10^{-8}$ 3.0793	8.9875 .9004	.91642	.10919
1.19	20	-8.6768 .3463	$2.105 \cdot 10^{-9}$ 2.2199	6.4358 .6039	.92559	.09600

Tabelle 10: Lineare Regressionen der Walterschen Meßwerte für Salztonmörtel und ihre Parameter für unterschiedliche Werte von F_T

F_T	N	a σ_a	A 10^{σ_a}	b σ_b	ρ_{xy}	$\hat{\sigma}_y^2$
1.3	20	-9.3764 .2922	$4.204 \cdot 10^{-10}$ 1.9598	4.9980 .4897	.84734	.01011
1.5	20	-11.0524 .2001	$8.863 \cdot 10^{-12}$ 1.5851	1.8348 .2640	.84717	.18259

Tabelle 10: Lineare Regressionen der Walterschen Meßwerte für Salztönmortel und ihre Parameter für unterschiedliche Werte von F_T (Forts.)

8.2 Auswertung der Ergebnisse von Franke

Im Rahmen des Dammbauprojektes wurden vom IfT Permeabilitätsuntersuchungen an Salzmörteln unterschiedlicher Zusammensetzung in Auftrag gegeben [36]. Dabei wurden dem Salzgrus tonige Zuschlagstoffe in unterschiedlichen Mengen mit optimiertem Laugenanteil beigemischt. Die Permeabilität des so hergestellten Mörtels wurde mit gesättigter Salzlauge entsprechend DIN 18 130 untersucht. Leider ist in der Untersuchung weder eine Bestimmung der Porosität enthalten, noch wurden die Proben kompaktiert.

Die gemessenen Permeabilitäten weichen signifikant von den Ergebnissen von Walter [35] ab. Im Gegensatz zu Walter, der eine eher lineare Abhängigkeit der Permeabilität vom Salztonanteil ermittelte, fand Franke eine exponentielle Abnahme. Da in seinen Versuchen die Permeabilitäten in einigen Fällen über lange Zeiträume konstant waren, kann dieser Unterschied nicht auf grundsätzlich mögliche Auskristallisationen zurückgeführt werden. Als Ursache kommen somit entweder

- 2-Phasen-Effekte infolge von verbliebenen Gasblasen im Mörtel,
- chemische Wechselwirkungen zwischen Ton und Lauge oder
- eine andere Verteilung des Tons in dem relativ grobkörnigen Salzgrus

in Frage. Gaseinschlüsse im Ton und Salzgrus sind zwar nicht generell auszuschließen, spielen hier als Ursache aber vermutlich eine untergeordnete Rolle. Chemische Wechselwirkungen stellen eine wahrscheinlichere Erklärung dar, sind aber auf Grund des relativ großen Einflusses bereits bei kleinen Anteilen vermutlich nicht allein für den beobachteten Effekt verantwortlich. In den bei Franke durchgeführten Untersuchungen ist der Tonanteil wesentlich feiner als der von Salzgrus. Dann kann sich der Ton vorwiegend zwischen den Salzgruskörnern befinden und lokal zu Verstopfungen der Wegsamkeiten führen. Dieser Verstopfungseffekt steigt überproportional mit dem Tonanteil an, wobei zumindest bei geringen Tonanteilen eine exponentielle Abhängigkeit zu erwarten ist. Diese trat in den Untersuchungen von Franke auch tatsächlich auf.

Bei der Kompaktion werden zunächst die vorhandenen Wegsamkeiten im Salzgrus reduziert. Daneben werden auch die verbliebenen Hohlräume geschlossen werden, da die Salzmatrix auf die Tonpartikel "aufläuft".

Eine exakte analytische Behandlung dieses Vorgangs ist schwierig. Um jedoch wenigstens eine Näherungslösung zu finden, kann folgende Überlegung angestellt werden: Steigt der Volumenanteil V_T bzw. der Gewichtsanteil W_T des Tons an, so ist aus statistischen Gründen ein exponentiell abfallender freier Hohlraumanteil im Salzgrus zu erwarten. Ebenso sollten auch die Verbindungen zwischen den verbleibenden Hohlräumen immer weiter abnehmen. Andere möglichen Abhängigkeiten, wie zum Beispiel die Korngrößenverteilung, werden durch den Fitparameter γ berücksichtigt. Die verbleibende Porosität n_{eff} kann demzufolge näherungsweise beschrieben werden durch

$$n_{eff} = n_0 e^{-\gamma W_T} \quad (38)$$

n_0 stellt die Anfangsporosität des reinen Salzgruses dar. Die Permeabilität reinen Salzgruses kann durch ein Potenzgesetz beschrieben werden.

$$k = F(w_T, n_0) k_0 n_{eff}^m \quad (39)$$

Die Funktion $F(w_T, n)$ stellt eine Reduktion der Permeabilität dar, analog zur Vorgehensweise bei Walter. Durch Einsetzen der Gl. (38) in Gl. (39) erhält man so

$$k = F(w_T, n_0) k_0 n_0^m e^{-\gamma w_T m} \quad (40)$$

Auf diese Weise erhält man für die Permeabilität eine Kombination sowohl der bekannten Potenzabhängigkeit von der Porosität als auch einen exponentiellen Abfall mit steigendem Tonanteil. Es sei jedoch darauf hingewiesen, das Gl. (40) eher als phänomenologischer Ansatz denn als physikalische Gesetzmäßigkeit aufzufassen ist. Auch scheint der Abfall mit dem Tonanteil (hier durch $\gamma \cdot m$ charakterisiert) selbst eine - vermutlich logarithmische - Funktion der Anfangspermeabilität bzw. der -porosität zu sein.

Unter der Vereinfachung $A = F(w_T, n_0) k_0 n_0^m$ ergeben sich an Hand der Abbildungen in [36] für vier Versuchsreihen die in Tabelle 11 zusammengestellten Werte für $\log(A)$ und $\gamma \cdot m$.

Daraus läßt sich folgende Regressionsgerade bestimmen:

$$\gamma m = -4,31(\log(A) + 10,566) \quad (41)$$

log(A)	-12,08	-12,14	-12,4	-12,76
γ_m	5,76	7,48	8,12	9,28

Tabelle 11: Permeabilitätsbestimmende Parameter in den Untersuchungen von Franke

Es ist allerdings nicht auszuschließen, daß die Proben der vier Versuchsreihen durch unterschiedliche Behandlung eine geringe Vorkompaktion erfahren haben, die sich in dem durch Gl. (41) wiedergegebenen Zusammenhang widerspiegelt. Ohne Angaben zum Kompaktionseinfluß und ohne weitere Daten ist der Ansatz in Gl. (40) allerdings nicht anwendbar.

8.3 Bewertung der Modelle für Mörtel

Bei einer kritischen Analyse des hier in Anlehnung an [37] entwickelten Modells müssen folgende Einwände beachtet werden:

- Der graue Salzion wurde als eine große Anzahl kleiner, feinverteilter Partikel betrachtet, die lokal die Permeabilität stark herabsetzen, während ringsum die Wegsamkeiten durch den relativ durchlässigen Salzgrus erhalten bleiben. Diese Annahme ist jedoch nur zutreffend, solange keine Bruchvorgänge im Ton stattfinden.
- Bei einem Salzionanteil bis zu 50% ist der Permeabilitätsansatz in Gl. (26) nicht mehr gültig.
- Der Salzion kann während der Kompaktion fragmentieren. Dadurch kann einerseits die Permeabilität in den Tonbereichen erhöht werden, andererseits können die Wegsamkeiten im Salzgrus durch die Fragmente geschlossen werden. Da sich beide Effekte gegenläufig auf die Gesamtpermeabilität auswirken, ist der Einfluß der Tonfragmentierung nur gering.
- Die Volumenänderung durch Quellen des Tones wurde nicht gemessen.
- Die Bereiche der untersuchten Gesamt- bzw. Salzgrusporosität sind klein. Extrapolationen sind somit äußerst unsicher. Die vorliegende Datenbasis gestattet noch keine Validierung der entwickelten Modelle.
- Bei der Modellierung starker Kompaktionen müssen auch die Permeabilität des Salztions und seine Verteilung berücksichtigt werden.

Mit dem Modell können noch keine Aussagen zur Permeabilitätsänderung unter massivem Laugenzutritt oder bzw. -durchfluß abgeleitet werden. Unter diesen Umständen können sich durch Quellung Dichteänderungen im Ton, sowie durch Ausschwemmungen oder Verstopfungen Änderungen der Wegsamkeiten ergeben. Dieses war bei den Messungen von Franke, auf Grund des hier verwendeten feinkörnigeren Materials, vermutlich der Fall.

Die Kenntnisse über diese Vorgänge sind derzeit noch so gering, daß eine Modellierung noch keine belastbaren Aussagen liefern kann. Die notwendige Datenbasis für eine bessere Modellierung existiert nicht. Insbesondere fehlen bei den Frankeschen Meßergebnissen die Angaben zur jeweiligen Porosität. Darüber hinaus wurden die Proben nicht in einer definierten Weise kompaktiert. Trotzdem ist die Untersuchung für die hier interessierenden Fragestellungen relevant, weil das verwendete Material eher demjenigen entspricht, das später im Endlager verwendet werden soll, als das Waltersche Probematerial.

Abschließend sei noch bemerkt, daß im Labor die Entstehung von Rissen im Verbund von Mörtel und Briketts infolge von Austrocknung des Mörtels beobachtet werden konnte. Diese Ribbildung ist auch unter Endlagerverhältnissen zu erwarten. Dieser Effekt kann möglicherweise im Saumbereich des Dammbauwerkes wegen der dort herrschenden ungleichförmigen Belastung in verstärktem Maße auftreten.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Die Permeabilität für den Mörtel kann mit der für Salzgrus abgeleiteten Beziehung beschrieben werden, solange ihre Anwendung auf Langzeitsicherheitsanalysen beschränkt bleibt.
- Diese Beziehung liefert entweder repräsentative Werte oder überschätzt die Permeabilität, vor allem in Bereichen niedriger Porositäten (siehe Abb. 15).
- Zur Beschreibung der Laborexperimente ist ein gesondertes Modell erforderlich.
- Auf Grund des Massenverhältnisses von Salzbricketts und Mörtel in einem Dammbauwerk und der jeweiligen Permeabilitäten ergibt sich, daß die Permeabilität des Mörtelmaterials nur von untergeordneter Bedeutung für die Durchlässigkeit eines Dammbauwerkes ist.
- Für die Verbesserung der Modelle, die in Langzeit-Sicherheitsanalysen verwendet werden sollen, sind deshalb keine weiteren Messungen an Mörtel mehr nötig.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die bis Ende 1993 bekanntgewordenen Meßdaten zur Porositätsabhängigkeit der Permeabilität von Salzgrus wurden darauf geprüft, ob sie für die Einbeziehung in die Datenbasis für eine statistische Ermittlung der empirischen Beziehung geeignet sind. Dieses ergab einen Satz von zunächst 68 Meßwertpaaren der Permeabilität k und der Porosität n , aus denen die Koeffizienten für das angenommene zweiparametrische Potenzgesetz per Regression ermittelt wurden. Die Regression wurde für die transformierten Größen $\log(n)$ und $\log(k)$ vorgenommen, weil die Approximationskurve die kleinsten relativen Abweichungen von den Meßdaten haben sollte. Dabei wurde gefunden, daß der einzige, aus dem ehemaligen TSS-Versuch stammende In-situ-Meßwert stark von den Labormeßwerten abwich. Dieser Wert wurde daher im folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Die Permeabilitäts-Porositätsbeziehung mit den statistischen Bestwerten für die Parameter A und m lautet für trocken kompaktierten Salzgrus:

$$k = 1,632 \cdot 10^{-10} \cdot n^{3,726} \text{ [m}^2\text{]}.$$

Darin ist für die Porosität n der dimensionslose Zahlenwert einzusetzen. Entsprechend ergab sich aus den vorliegenden Meßwerten für feucht kompaktierten Salzgrus:

$$k = 1,365 \cdot 10^{-6} \cdot n^{8,721} \text{ [m}^2\text{]}.$$

Die einparametrische Regression für alle akzeptierten Meßdaten, bei der nicht mehr zwischen feuchter und trockener bzw. bruchhafter und brucharmer Kompaktion unterschieden wurde, ergab als Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus mit den statistischen Bestwerten für die Parameter A und m :

$$k = 1,837 \cdot 10^{-10} \cdot n^{3,823} \text{ [m}^2\text{]} \quad (42)$$

Die Streuung der in die Regression eingegangenen Meßwerte bedingt eine statistische Unsicherheit der Regressionsparameter. Die statistische Analyse hat ergeben, daß die beiden Parameter der Approximationsfunktion für das gewählte Modell miteinander korreliert sind. Ihre statistische Verteilung kann durch eine spezielle bivariate Dichtefunktion beschrieben werden. Diese lautet mit den für Salzgrus gefundenen Zahlenwerten:

$$f(A, m) = \frac{1,2733}{A} \cdot e^{-\left[\left(\frac{m-13,084-0,4131 \cdot \ln(A)}{0,2573}\right)^2 + \left(\frac{\ln(A)+22,418}{0,9717}\right)^2\right]} \quad (43)$$

Diese Gleichung kann in probabilistischen Rechnungen zur Ziehung der Wertepaare A und m benutzt werden, die dann in den einzelnen Spielen einer Monte-Carlo-Simulation als Koeffizienten in der Permeabilitäts-Porositätsrelation eingesetzt werden.

Die Beziehungen (42) und (43) sind nur für den Porositätsbereich zwischen $n = 0,04$ bis $0,42$ durch Meßdaten belegt. Die Extrapolierbarkeit in den Bereich niedriger Porosität ist insbesondere für $n \leq 0,01$ fraglich. Da die Kompaktion des Versatzes im Endlager langfristig bis in diesen Dichtebereich führt, muß der Geltungsbereich der Relation für die Modellierung dieser Phase erweitert werden, was zusätzliche Messungen an entsprechend verdichtetem Material erfordert. Weitere Messungen in dem bereits untersuchten Porositätsbereich sind dagegen nicht mehr erforderlich.

Der oben angesprochenen Erweiterung der Beziehung in den Bereich niedriger Porositäten kann folgender Gedanke zugrunde gelegt werden: Damit überhaupt ein Fluidstrom durch einen porösen Körper stattfinden kann, muß wenigstens eine durchgängige Wegsamkeit vorhanden sein. Poröse Körper, deren Poren nicht miteinander verbunden sind, besitzen keine Permeabilität. In diesem Falle verschwindet die Permeabilität bei weiterer Kompaktion bereits bei endlichen Porositätswerten. Es besteht somit die Frage, ob ein Schwellenwert n_0 für die Porosität existiert, bei dem die Permeabilität zu Null wird. Wenn dieses zutrifft, wäre eine 2-parametrische Permeabilitäts-Porositätsrelation, beispielsweise in der Form $k = A \cdot (n - n_0)^m$ eine bessere Beschreibung. Wenn genügend viele Meßdaten mit sehr kleinen Porositäten vorliegen ($<1\%$), die eine derartige beschleunigte Abnahme der Permeabilität zeigen, kann der Wert für n_0 daraus über eine nichtlineare Regression ermittelt werden.

Bei der Beschreibung der Strömung gasförmiger Fluide durch hochverdichtete Materialien mit sehr niedriger Porosität muß auch beachtet werden, daß bei den dann sehr kleinen Querschnitten der Strömungskanäle andere Transportmechanismen als die üblicherweise unterstellte reine Darcy-Strömung in den Vordergrund treten. Bei Gasen sind dieses die Gleitströmung und die Knudsen-Diffusion, deren Anteil am Transport vom Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Gasteilchen und dem Durchmesser des Strömungskanals abhängen. Durch diese Effekte wird die Fließgeschwindigkeit im Vergleich zur reinen Darcy-Strömung erhöht. Da diese Effekte auch bei den Messungen im Labor auftreten und die gemessenen Permeabilitätswerte verfälschen, wird üblicherweise eine sogenannte "Klinkenberg-Korrektur" vorgenommen. Diese beruht auf der bei Vorhandensein von Gleitströmung auftretenden scheinbaren Abhängigkeit der Permeabilität vom mittleren Druck des Meßgases in der Probe. Insofern ist davon auszugehen, daß die publizierten Daten immer nur für die Darcy-Strömung von Gasen und Flüssigkeiten gültig sind, auch wenn in den Ergebnisberichten nicht immer darauf hingewiesen wird. Aus diesem Grund war es auch zulässig, die mit gasförmigen und flüssigen Fluiden gemessene Daten in einer statistischen Analyse zusammenzufassen.

Es ist daher noch zu klären, ob es notwendig ist, diese Effekte bei der Beschreibung der Strömung von Gasen oder zweiphasiger Gas-/Laugemische in Endlager-Sicherheitsanalysen, etwa in Form einer inversen Klinkenberg-Korrektur, zu berücksichtigen. In diesem Fall müssen dann die notwendigen Parameter in Abhängigkeit von der Porenstruktur des Materials ermittelt werden. Möglicherweise können aber auch die aus der Literatur bereits bekannten Klinkenberg-Konstanten für verschiedene Materialien herangezogen werden.

Die Modellierung der Darcy-Strömung erfolgt nach dem idealisierenden Konzept, daß die Eigenschaften des Fluids und die des durchströmten Materials vollständig durch seine Zähigkeit bzw. durch dessen Permeabilität bestimmt sind und keine Wechselwirkungen bestehen. In Wirklichkeit treten aber mit kleinerer Porosität zunehmend physikochemische Wechselwirkungen zwischen Fluid und durchströmtem Salzgrus auf, und es ist ebenfalls noch zu klären, in welchem Maße diese eine Rolle bei einer einphasigen Gas- oder Laugenströmung oder bei einer Zweiphasenströmung spielen.

Die Relation Gl.(42) gilt grundsätzlich auch für Salzbricketts und Salzionmörtel. Der spezielle Einfluß der extrem schnellen Kompaktion bei der Brikettherstellung kann durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden: Die für Briketts vorliegenden Permeabilitätswerte sind ungefähr um den Faktor 2 kleiner als die entsprechenden für Salzgrus. Vor dem Hintergrund der statistischen Unsicherheit kann dieser Faktor vernachlässigt werden. Die Meßdaten für Mörtel ähneln denen von feucht kompaktiertem Salzgrus und zeigen einen wesentlich steileren Verlauf als durch die Regressionsgleichung (42) beschrieben wird. Außerdem sind für Porositäten im relevanten Bereich $n \leq 0,2$ die Permeabilitäten von Mörtel immer kleiner oder höchstens gleich den Permeabilitäten von Salzgrus. Das bedeutet, daß die Beschreibung der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Mörtel durch die für Salzgrus abgeleitete Beziehung eine konservative Annahme darstellt.

Die Analyse der Meßergebnisse für Salzgrus und ihre statistische Auswertung haben gezeigt, daß für eine Verbesserung des Modells weitere experimentelle Untersuchungen zum mechanischen, hydrologischen und chemischen Verhalten von Versatz notwendig sind. Die Übertragbarkeit der ausschließlich aus den Labordaten ermittelten Permeabilitäts-Porositätsbeziehung zur Beschreibung der In-situ-Eigenschaften ist noch zu prüfen. Die hohen Kompaktionsgeschwindigkeiten in Laborversuchen führen zu Veränderungen des Korngefüges, die bei den langsam ablaufenden In-situ-Vorgängen nicht auftreten. Belastbare Daten aus In-situ-Untersuchungen liegen noch nicht vor. Derartige Untersuchungen sollen aber in derzeit laufenden Vorhaben durchgeführt werden.

Änderungen oder Erweiterungen des Modells für die Permeabilitäts-Porositätsrelation durch Einbeziehung weiterer Parameter, wie beispielweise die Korngrößenverteilung, den Feuchtegehalt oder die Temperatur, sind prinzipiell möglich. Es hat sich klar gezeigt, daß die Permeabilität vom verdichteten Salzgrus noch von weiteren Parametern abhängt, weil die Regression nach der Porosität allein immer noch eine erhebliche Restvarianz zwischen den Meß- und den Fitwerten zeigt. Dieses geht auch beispielsweise aus einer einzelnen Meßreihe hervor, bei der sich die Ergebnisse von Proben mit derselben Porosität und gleichen Meßbedingungen um den Faktor 65 unterscheiden (vgl. S. 70). Solche Unterschiede können mit dem abgeleiteten Modell nicht beschrieben werden, das Problem kann aber mit Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung der bivariaten Dichteverteilung der Formelparameter weitgehend umgangen werden. Die Einbeziehung weiterer Parameter erfordert dagegen aber nicht nur einen größeren Rechenaufwand, da die Parameterbestimmung dann in der Regel auf nichtlineare Regressionen führt, sondern insbesondere auch eine ausreichend belastbare experimentelle Datenbasis.

Literatur

- [1] H. Prinz: Abriß der Ingenieurgeologie. Ferdinand Enke Verlag, 1982
- [2] G. Kappei, M.W. Schmidt: Untersuchungen über das Tragverhalten von Salzschüttkörpern und deren Permeabilität, Vortrag anlässlich des Informationsseminars "Dammbau im Salzgebirge", DBE, Peine, 1983
- [3] F. Walter: Persönliche Mitteilung. GSF-Institut für Tieflagerung, Braunschweig, 1994
- [4] C.J. Spiers, C.J. Peach, R.H. Brzesowsky, P.M.T.M. Schutchens, J.L. Liezenberg, H.J. Zwart: Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks, Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, EUR 11848, 1989
- [5] A. Joffe: The Physics of Crystals. McGraw-Hill Book Co, New York 1928, International Conference on Physics, Physical Society, London, 72 ff, 1934
- [6] C.J. Spiers, R.H. Brzesowsky: Densification Behaviour of Wet Granular Salt: Theory versus Experiment. Seventh Symposium on Salt, Vol. I, 83-92, 1993
- [7] G. Pusch, M. Borgmeier: Ergebnisbericht der Messungen von relativen Permeabilitäten Gas-Lauge an vier Salzbrikettproben. Auftrag Nr. 31/140169/92, erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tieflagerung, Braunschweig, 1992
- [8] L.J. Klinkenberg: The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases. Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute, Vol. 2, 200-213, 1941
- [9] M. Rieckmann: Untersuchung von Turbulenzerscheinungen beim Fließen von Gasen durch Speichergesteine unter Berücksichtigung der Gleitströmung. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, Bd. 86 (2), 36-71, 1970
- [10] G. Pusch, J.R. Weber: Untersuchungen zum thermoplastischen Verhalten und zur Gasdurchlässigkeit von Salzgranulatpackungen. Laborbericht des Instituts für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung der TU Clausthal, erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tieflagerung, Braunschweig, 1992
- [11] H. Venzlaff, L. Liedtke, H. Schnier, W. Bleich, N. Diekmann: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung. Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben. Fachband 11, Abschlußbericht
- [12] Offermann: Progress report of the program „Radioactive Waste Management“. Jan.-June 1985, Halbjahresbericht des JRC Ispra, Italien
- [13] Albrecht & Suckow: Untersuchung von Steinsalz-Korngemisch, Körnung 0 - 5 mm. erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tieflagerung, Braunschweig, 1982
- [14] Albrecht & Suckow: Untersuchung von Steinsalz-Korngemisch, Körnung 0 - 32 mm. erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tieflagerung, Braunschweig, 1982

- [15] IT-Corporation, Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, BMI/ONWI-631, Columbus 1987
- [16] L. Liedtke, G. Gommlich: Persönliche Mitteilung
- [17] Simons & Partner: Laborversuche an Salzmaterial (Bestellschein Nr. 31/139965/87 vom 8.7.1987), erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tieflagerung, Braunschweig, 1987
- [18] D.J. Holcomb, M. Shields: Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt with added Water. Sandia Report SAND87-1990, Oct. 1987
- [19] A.J. Shor, C.F. Baes Jr., C.M. Canonico: Consolidation and Permeability of Salt in Brine. ORNL-5774, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1981
- [20] Th. Kruse, W. Rodatz: Prüfung des Durchlässigkeitsverhaltens von Salzgesteinsproben. Unterauftrag für GSF-Institut für Tieflagerung (Projekt.-Nr. 1364), Mai 1989
- [21] Kappei, Gessler: In Situ Tests on the Behaviour of Backfill Materials. Proc. of the Second Conference on The Mechanical Behavior of Salt, Hanover, Sept. 24 - 28, 1984, eds. H.R. Hardy, Jr., M. Langer
- [22] A.E. Scheidegger: The Physics of Flow Through Porous Media. New York, MacMillan Co., 1960
- [23] P.C. Carman: Flow of Gases Through Porous Media. Butterworths Scientific Publications, London, 1956
- [24] Kezdi, Handbuch der Bodenmechanik, Bd. I, Bodenphysik. VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin
- [25] Lothar Sachs: Angewandte Statistik. Springer-Verlag, 1992
- [26] Lothar Sachs: Statistische Methoden. Springer-Verlag, 1993
- [27] M. Abramowitz, I. Segun: Handbook of Mathematical Functions. Dover Publications, New York, 1968
- [28] G. Becker, L. Camarinopoulos, G. Pampoukis, G. Zioutas: Investigating the Relationship of Permeability and Porosity. RISA Sicherheitsanalysen GmbH, 1994
- [29] S.M. Goldfeld, R.E. Quandt: Some Tests for Heteroskedasticity. Journal of the American Statistical Association Vol. 60, pp. 539-547, 1965
- [30] D. Plachky, L. Baringhaus, N. Schmitz: Stochastik I. 2. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft, 1983
- [31] Angewandte Geowissenschaften Band II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. Ferdinand Enke-Verlag, Stuttgart, 1985

- [32] N.R. Draper, H. Smith: Applied Regression Analysis. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 1966
- [33] A. H.-S. Ang, W. H. Tang: Probability Concepts in Engineering. Planning and Design. Wiley, 1975
- [34] Kernforschungszentrum Karlsruhe (ed.): Testplan zum Demonstrationsversuch "Thermische Simulation der Streckenlagerung im Salzbergwerk Asse". Karlsruhe, Februar 1993
- [35] F. Walter: Untersuchungen zum Salztou-Mörtel. Abteilungsbericht IFT 6/92, GSF-Institut für Tief Lagerung, Braunschweig, 1992
- [36] E. Franke: Bericht und fachliche Stellungnahme Nr. 20/91, F+E-Vorhaben Dammbau im Salzgebirge, Entwicklung eines Mörtels zur Herstellung der Langzeitdichtung. Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau, TH Darmstadt, im Auftrag des GSF-Instituts für Tief Lagerung, Dez. 1992
- [37] F.S. Grant, G.F. West: Interpretation Theory in Applied Geophysics. International Series in the Earth Sciences, Mc Graw-Hill Book Comp., 1965
- [38] U. Heemann, Transientes Kriechen und Kriechbruch im Steinsalz. Dissertation, Univ. Hannover, Nov. 1989
- [39] M. Borgmeier: Untersuchungen zum belastungsabhängigen Durchlässigkeitsverhalten von Salzgestein für Gase unter besonderer Berücksichtigung der Porenraumbeladung. Dissertation der TU Clausthal 1992
- [40] J.R. Schopper: Petrophysikalische Messungen an Steinsalzproben. Institut für Geophysik der TU Clausthal (Auftragsnr. 31/12 10 08/82), erstellt im Auftrag des GSF-Instituts für Tief Lagerung, Braunschweig, 1982
- [41] N. Jockwer: Persönliche Mitteilung. GSF-Institut für Tief Lagerung, Braunschweig
- [42] F.E. Gloyne, T.D. Reynolds: Permeability Measurements of Rock Salt. Journal of Geophysical Research 6 (11), 3912-3921, 1961
- [43] Lai, C.-S.: Fluid Flow Through Rock Salt Under Various Stress States. Michigan State University, Dissertation, 1971
- [44] C.J. Peach: Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Dissertation, Reichsuniversität Utrecht, 1991
- [45] J.C. Stormont: Gas Permeability Changes in Rock Salt During Deformation. Dissertation, University of Arizona, 1990
- [46] M. Wallner: Standsicherheitsberechnungen für die Pfeilerdimensionierung im Salzbergbau. 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, 1983

- [47] C.-L. Zhang, M.W. Schmidt, G. Staupendahl, U. Heemann: Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus. Bericht Nr. 93-73, Institut für Statik der TU Braunschweig, gemeinsame Veröffentlichung mit dem GSF-Institut für Tieflagerung, Braunschweig, 1993
- [48] S. Förster: Durchlässigkeits- und Rißbildungsuntersuchungen zum Nachweis der Dichtigkeit von Salzkavernen. Neue Bergbautechnik, 4. Jahrg., Heft 4, April 1974
- [49] R. Mieke: Persönliche Mitteilung. GSF-Institut für Tieflagerung, Braunschweig
- [50] Zulässige thermische Belastung in geologischen Formationen, Konsequenzen für die Methoden der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Band 3, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Kernforschung und -technologie, Bericht EUR 8179 DE, 1982

**Anhang A:
Meßdaten für Salzgrusversatz**

Versatz			
Kennung	ITE		
Quelle	Untersuchungen zum thermoplastischen Verhalten und zur Gasdurchlässigkeit von Salzgranulatpackungen. Laborbericht Sept. 1992, Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Clausthal		
Versuchsreihe			
Fluid	N ₂		
Material	Salzgrus		
Körnung	0.04 -1 mm, Verteilung nach Fuller		
Probengröße	H ₀ = 39.71 mm Ø = 80 mm		
Brucherscheinungen	gering, da Kompaktion und Messung bei 200 °C		
Meßgenauigkeit	Permeabilität ist abhängig vom mittleren Gasdruck, Auswertung nach Klinkenberg nicht möglich		
Feuchtegehalt	≈ 0		
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.419	.68 10 ⁻¹²	.173	.029 10 ⁻¹²
.392	.64 10 ⁻¹²	.167	.030 10 ⁻¹²
.371	.41 10 ⁻¹²		
.344	.30 10 ⁻¹²		
.274	.24 10 ⁻¹²		
.252	.081 10 ⁻¹²		
.232	.059 10 ⁻¹²		
.218	.043 10 ⁻¹²		
.207	.037 10 ⁻¹²		
.191	.034 10 ⁻¹²		

Versatz			
Kennung	IfT-Walt3		
Quelle	F. Walter, IfT persönliche Mitteilung (1994)		
Versuchsreihe	Material 3		
Fluid	N ₂		
Material	Salzgrus		
Körnung	0 - 16 mm, Teilschnittmaschine nach Absiebung der höheren Fraktionen		
Probengröße	H ₀ = 5.6 cm, H _{End} = 3.8 - 4.8 cm, Ø = 10.02 cm		
Brucherscheinungen	ja, aufgrund der hohen Kompaktionsgeschwindigkeit von 1 mm/min, trotz Feuchtezugabe		
Meßgenauigkeit	Auskristallisation durch Trocknen Klinkenbergkorrektur		
Feuchtegehalt	gering, ca. 1-2%		
Bemerkungen	Permeabilitätsmessungen wurden an 15 verschiedenen Proben durchgeführt.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.060	3.8 · 10 ⁻¹⁵		
.060	7.0 · 10 ⁻¹⁵		
.08	5.6 · 10 ⁻¹⁴		
.09	3.9 · 10 ⁻¹⁴		
.11	2.25 · 10 ⁻¹³		
.12	1.83 · 10 ⁻¹³		
.15	8.58 · 10 ⁻¹³		
.15	9.5 · 10 ⁻¹³		
.20	1.85 · 10 ⁻¹²		
.24	9.5 · 10 ⁻¹²		

Versatz			
Kennung	BGR 20-25		
Quelle	L. Liedtke, W. Bleich: Stoffverhalten von Salzgrus. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht Fachband 11: Stand-sicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, Kapitel 2, Berlin 1985		
Versuchsreihe	Oedo 20 - 25		
Fluid	gesättigte Salzlauge		
Material	Asse-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 20 mm, Teilschnittmaschine		
Probengröße	H = 15 - 50 mm Ø = 36 mm		
Brucherscheinungen	ja, da Kompaktierung mit ca. 15 - 60 MPa über 0,5 bis 11 Tage		
Meßgenauigkeit	niedrig, wegen Verhältnis Korn- zu Probengröße Lösungs- und Auskristallisationsvorgänge		
Feuchtegehalt	Zugabe von 1.5% Lauge		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.188	7.8 10 ⁻¹²		
.151	1.2 10 ⁻¹²		
.119	6.4 10 ⁻¹³		
.106	1.3 10 ⁻¹³		
.052	3.0 10 ⁻¹⁵		
.046	8.5 10 ⁻¹⁵		

Versatz			
Kennung	BGR/HMI		
Quelle	Offermann (Hahn-Meitner-Institut Berlin). Progress Report of the Program „Radioactive Waste Management“, Jan.-June 1985, Halbjahresbericht des JRC Ispra, Italien		
Versuchsreihe			
Fluid	gesättigte Lauge		
Material	Asse-Steinsalzgrus (Proben der BGR)		
Körnung	0 - 8 mm		
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	trocken kompaktiert (Angabe von Dr. Liedtke, BGR)		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$ (Original $v/g = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$)		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.173	$2.0 \cdot 10^{-13}$		
.173	$5.0 \cdot 10^{-13}$		
.099	$2.4 \cdot 10^{-14}$		
.099	$1.8 \cdot 10^{-14}$		
.043	$7.1 \cdot 10^{-16}$		
.043	$1.0 \cdot 10^{-15}$		
.043	$8.5 \cdot 10^{-16}$		

Versatz			
Kennung	Spiers		
Quelle	C.J. Spiers, C.J. Peach, R.H. Brzesowsky, P.M.T.M. Schutchens, J.L. Liezenberg, H.J. Zwart, Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks, Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, EUR 11848, 1989		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Salzgrus, 2.5% Anhydrit		
Körnung	gesiebt 78.5% D = .275 ± .025mm, 14.3% D = 10mm		
Probengröße			
Brucherscheinungen	während der Vorkompaktion; ansonsten aufgrund der Feuchte und des niedrigen Drucks vernachlässigbar		
Meßgenauigkeit	Spülung mit Trichlorethan, um Auskristallisation zu vermeiden		
Feuchtegehalt	Kompaktion mit 4.8% Lauge		
Bemerkungen	effektiver Kompaktionsdruck von 2MPa über ≤ 140 Tagen. Die 5 Meßwerte wurden an 5 verschiedenen Proben gewonnen.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.09	1.23 10 ⁻¹⁵		
.11	1.73 10 ⁻¹⁵		
.14	1.09 10 ⁻¹⁴		
.16	1.30 10 ⁻¹³		
.21	2.18 10 ⁻¹³		

Versatz			
Kennung	A&S-5		
Quelle	Albrecht und Suckow, Untersuchung von Steinsalz-Korngemisch, im Auftrag des IfT/GSF, Prüfbericht, 1982		
Versuchsreihe	Körnung 0 - 5 mm		
Fluid	gesättigte NaCl - Lauge		
Material	trockener Asse-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 5 mm		
Probengröße	Ø = 150 mm		
Brucherscheinungen	nein, da ohne nennenswerte Kompaktion		
Meßgenauigkeit	Jeder Versuch gemittelt aus 15 Einzelmessungen unsicher, da Umlösungen möglich sind		
Feuchtegehalt	keine Feuchtezugabe		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.42	1.3 10 ⁻¹¹		
.34	4.6 10 ⁻¹²		
.32	5.3 10 ⁻¹²		

Versatz			
Kennung	A&S-32		
Quelle	Albrecht und Suckow, Untersuchung von Steinsalz-Korngemisch, im Auftrag des GSF-Institutes für Tief Lagerung, Prüfbericht, 1982		
Versuchsreihe	Körnung 0 - 32 mm		
Fluid	gesättigte NaCl - Lauge		
Material	Asse-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 32 mm		
Probengröße	Ø = 150 mm		
Brucherscheinungen	nein, da ohne nennenswerte Kompaktion		
Meßgenauigkeit	Jeder Versuch gemittelt aus 15 Einzelmessungen unsicher, da Umlösungen möglich sind		
Feuchtegehalt	keine		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7}$ m s.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.38	3.6 10^{-11}		
.32	2.5 10^{-11}		
.28	1.3 10^{-11}		

Versatz			
Kennung	ITC-WIPP		
Quelle	Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, IT-Corporation, BMI/ONWI-631, Columbus 1987		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	WIPP-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 10 mm, Teilschnittmaschine		
Probengröße	H ₀ = 114 mm Ø = 71 mm		
Brucherscheinungen	ja, Belastung von 3.45 MPa - 17.25 MPa		
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	trocken		
Bemerkungen	Die Daten wurden aus der veröffentlichten Graphik entnommen.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.26	4.0 10 ⁻¹²		
.21	8.08 10 ⁻¹³		
.16	1.3 10 ⁻¹³		

Versatz			
Kennung	ITC-Avery		
Quelle	Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, IT-Corporation, BMI/ONWI-631, Columbus 1987		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Avery-Island-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 10 mm		
Probengröße	H ₀ = 114 mm Ø = 71 mm		
Brucherscheinungen	ja, Belastung von 3.45 MPa - 17.25 MPa		
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	trocken		
Bemerkungen	Die Daten wurden aus der veröffentlichten Graphik entnommen.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.247	3.24 10 ⁻¹²		
.218	1.69 10 ⁻¹²		
.196	8.09 10 ⁻¹³		
.172	3.57 10 ⁻¹³		
.146	1.24 10 ⁻¹³		
.133	4.64 10 ⁻¹⁴		

Versatz			
Kennung	BGR XII		
Quelle	L. Liedtke, W. Bleich, Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, Stoffverhalten von Salzgrus, Fachband 11, Berlin 1985 (Untersuchungen von M. Arnould, ENSM)		
Versuchsreihe	Oedo XII		
Fluid	Luft und/oder Lauge		
Material	Steinsalzgrus		
Körnung	vermutlich 0 - 20 mm Teilschnittmaschine		
Probengröße	H = 15 - 50 mm Ø = 36 mm		
Brucherscheinungen	ja, Kompaktion über 56 Tage mit 17.3 MPa		
Meßgenauigkeit	gering wegen ungünstigem Verhältnis Korn- zu Probengröße, Zweiphasenströmungseffekte, Auskristallisation		
Feuchtegehalt	Zugabe von 20% Salzlauge ($\rho = 1.195 \text{ g/cm}^3$)		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.0835	$2.34 \cdot 10^{-14}$		
.0490	$8.20 \cdot 10^{-15}$		

Versatz			
Kennung	BGR XIII		
Quelle	L. Liedtke, W. Bleich: Stoffverhalten von Salzgrus. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht Fachband 11: Stand-sicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, Kapitel 2, Berlin 1985		
Versuchsreihe	Oedo XIII		
Fluid	gesättigte Salzlauge		
Material	Asse-Steinsalzgrus		
Körnung	0 - 20 mm, Teilschnittmaschine		
Probengröße	H ₀ = 15 - 50 mm Ø = 36 mm		
Brucherscheinungen	ja, aufgrund des hohen Drucks von 27.5 MPa über 23 Tage, trotz Feuchtezugabe		
Meßgenauigkeit	starke Streuung der Meßwerte infolge von Inhomogenitäten		
Feuchtegehalt	Zugabe von 8% Lauge		
Bemerkungen	Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
parallel zur Kompaktionsrichtung			
.067	1.37 · 10 ⁻¹⁶		
.067	8.89 · 10 ⁻¹⁵		
.067	1.98 · 10 ⁻¹⁵		
quer zur Kompaktionsrichtung			
.067	2.29 · 10 ⁻¹⁶		
.067	5.21 · 10 ⁻¹⁵		
.067	1.99 · 10 ⁻¹⁵		

Versatz			
Kennung	IfT - alt		
Quelle	Dr. F. Walter, GSF-IfT persönliche Mitteilung		
Versuchsreihe			
Fluid	N ₂		
Material	alter Versatz, vor ca. 10 Jahren mit etwa 8% Feuchte eingebracht		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen	nein		
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	ca. 2 bis 8%		
Bemerkungen	Verunreinigungen, sehr fein verteilt vorkommende Fremdstoffe (Holz, Metall, Carnallit etc.) Auskristallisation durch Trocknen vor Messung		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.150	3.32 10 ⁻¹³ mit Manteldruck		
.150	5.0 10 ⁻¹³		
.178	9.5 10 ⁻¹³ mit Manteldruck		
.178	9.5 10 ⁻¹³		

Versatz			
Kennung	TSS		
Quelle	Liedtke (BGR), Schneefuß (IfT), Gommlich (IfT) persönliche Mitteilung		
Versuchsreihe			
Fluid	Luft		
Material	Versatz		
Körnung	0 - 64 mm Teilschnittmaschine		
Probengröße	Versuchsfeld, Eindringtiefe des Meßverfahrens einige dm.		
Brucherscheinungen	unwahrscheinlich, aufgrund der langsamen Kompaktion und hoher Temperatur, aber infolge der Korngrößenverteilung, nicht auszuschließen		
Meßgenauigkeit	Die Dichtemessungen werden entlang einer zwischen den Heizcontainern vertikal durch die Versuchsstrecke verlaufenden Linie durchgeführt (Gommlich). Die Permeabilitätsmessungen finden auf halber Höhe entlang der Streckenwand statt (Liedtke). Daraus folgt eine geringe Genauigkeit für die lokale Porosität am Meßort. Weitere Angaben zur Meßgenauigkeit sind dem Bericht zu entnehmen		
Feuchtegehalt	keiner, durch Austrocknung		
Bemerkungen	unter Berücksichtigung von Entmischungsvorgängen am seittl. Rand; Umrechnung mit $v/g = 1.43 \cdot 10^{-6} \text{ m s}$; Abschätzung der Dichte unter Berücksichtigung der Entmischungsvorgänge auf $1.35 - 1.4 \text{ g/cm}^3$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.35 - .38	$1.43 \cdot 10^{-9}$		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Simons & Partner, Laborversuche am Salzmaterial, Laborbericht vom 26.10.1987, im Auftrag des IFT		
Versuchsreihe			
Fluid	gesättigte Salzlauge		
Material			
Körnung	unbekannt		
Probengröße	D ≈ 10 cm, H ≈ 8.8 cm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Permeabilitätsschwankungen um mehrere Größenordnungen, wahrscheinlich durch Temperatureffekte.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.094	2.1 · 10 ⁻¹⁵		
.083	8.3 · 10 ⁻¹⁴		
.131	-		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Simons & Partner, Laborversuche an Salzmaterial, Laborbericht vom 26.10.1987 im Auftrag des IFT		
Versuchsreihe			
Fluid	gesättigte NaCl-Lösung		
Material	offensichtlich verschiedene Salzbriketts		
Körnung			
Probengröße	H = 88 mm Ø = 100 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	starke Variationen der Permeabilität; Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s.}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.094	2.16 10 ⁻¹⁵ - 7.37 10 ⁻¹⁸		
.083	2.79 10 ⁻¹³ - 2.67 10 ⁻¹⁸		
.131	1.05 10 ⁻¹⁶ - 7.75 10 ⁻¹⁷		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Holcomb & Shields, Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt With Added Water, Sandia Report SAND87-1990, Oct. 1987 Probe 1 (27JU6 1)		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Salzgrus		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Kompaktion mit 5.4 Vo.l-% Lauge, die vor der Messung nicht entfernt wurden. Die sich ergebenden Permeabilitäten sind entsprechend zu klein.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.219	1.22 10 ⁻¹⁴		
.213	1.22 10 ⁻¹⁴		
.209	9.87 10 ⁻¹⁵		
.207	8.00 10 ⁻¹⁵		
.205	8.00 10 ⁻¹⁵		
.203	8.58 10 ⁻¹⁵		
.202	8.00 10 ⁻¹⁵		
.199	6.05 10 ⁻¹⁵		
.197	6.05 10 ⁻¹⁵		
.192	5.27 10 ⁻¹⁵		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Holcomb & Shields, Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt With Added Water, Sandia Report SAND87-1990, Oct. 1987 Probe 2 (24OC6 1)		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Salzgrus		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Kompaktion mit 5.2vol% Lauge, die vor der Messung nicht vorher entfernt wurde. Die sich ergebenden Permeabilitäten sind entsprechend zu klein.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.199	9.20 10 ⁻¹⁵	.0938	1.30 10 ⁻¹⁸
.176	4.58 10 ⁻¹⁵	.0875	2.62 10 ⁻¹⁹
.176	3.23 10 ⁻¹⁵	.0799	9.20 10 ⁻²⁰
.171	2.89 10 ⁻¹⁵	.0764	6.49 10 ⁻²⁰
.163	1.85 10 ⁻¹⁵	.0729	3.46 10 ⁻²⁰
.159	1.50 10 ⁻¹⁵	.0674	1.72 10 ⁻²⁰
.159	1.13 10 ⁻¹⁶	.0632	1.30 10 ⁻²⁰
.140	1.13 10 ⁻¹⁶	.0604	9.87 10 ⁻²¹
.129	7.46 10 ⁻¹⁷	.0612	2.44 10 ⁻²⁰
.103	2.44 10 ⁻¹⁷		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Holcomb & Shields, Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt With Added Water, Sandia Report SAND87-1990, Oct. 1987 Probe 3 (25FE6 1)		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Salzgrus		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Kompaktion mit 4.3Vol.-% Lauge, die vor der Messung nicht entfernt wurde. Die sich ergebenden Permeabilitäten sind entsprechend zu klein.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.171	1.98 10 ⁻¹⁴	.139	1.85 10 ⁻¹⁶
.165	1.98 10 ⁻¹⁴		
.162	1.22 10 ⁻¹⁴		
.162	5.27 10 ⁻¹⁵		
.162	4.27 10 ⁻¹⁵		
.153	2.44 10 ⁻¹⁵		
.152	1.13 10 ⁻¹⁵		
.148	6.05 10 ⁻¹⁶		
.142	5,64 10 ⁻¹⁶		
.140	2.62 10 ⁻¹⁶		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	IT-Corporation, Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, BMI/ONWI-631, Columbus 1987		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	feuchtes Salzgrus		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	5 Vol.-% Lauge		
Bemerkungen	Die Permeabilität wurde als Funktion der Gesamtporosität bestimmt ohne Berücksichtigung des Laugenanteils.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.302	4.81 10 ⁻¹¹	.067	2.5 10 ⁻²¹
.178	4.7 10 ⁻¹³	.059	4.1 10 ⁻²¹
.129	1.29 10 ⁻¹⁶	.054	4.4 10 ⁻²¹
.113	2.21 10 ⁻¹⁷		
.098	1.99 10 ⁻¹⁹		
.086	2.06 10 ⁻²⁰		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Dr. F. Walter, IFT, persönliche Mitteilung (1994)		
Versuchsreihe			
Fluid	N ₂		
Material	Asse-Steinsalzgrus		
Körnung	0.1 - 20 mm Teilschnittmaschine		
Probengröße	H = 80 mm Ø = 100 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	trocken		
Bemerkungen	Herkunft und Hintergrund der Daten unklar.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.329	1.1 10 ⁻¹²		
.311	8.2 10 ⁻¹³		
.219	2.4 10 ⁻¹³		
.215	1.9 10 ⁻¹³		
.181	1.1 10 ⁻¹³		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	C.J. Spiers, C.J. Peach, R.H. Brzesowsky, P.M.T.M. Schutchens, J.L. Liezenberg, H.J. Zwart, Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks, Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, EUR 11848, 1989		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	80% NaCl-Grus, 2 - 3% Anhydrit		
Körnung	ca. 80% mit $D = .275 \text{ - } .025 \text{ mm}$ ca. 17% $D=10 \text{ mm}$.		
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Trocken kompakterter Versatz. Permeabilität als Funktion der zugänglichen (connected) Porenzahl n_c $k = 2.55 \cdot 10^{-11} n_c^{2.571} [\text{m}^2]$		
Porosität n	Permeabilität k [m^2]	Porosität n	Permeabilität k [m^2]
.0048	$1.6 \cdot 10^{-17}$		
.015	$1.0 \cdot 10^{-16}$		
.017	$4.1 \cdot 10^{-15}$		
.042	$4.1 \cdot 10^{-15}$		
.082	$8.5 \cdot 10^{-14}$		
.126	$1.8 \cdot 10^{-13}$		
.238	$7.0 \cdot 10^{-13}$		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	C.J. Spiers, C.J. Peach, R.H. Brzesowsky, P.M.T.M. Schutchens, J.L. Liezenberg, H.J. Zwart, Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks, Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, EUR 11848, 1989		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	Salzgrus 2.5% Anhydrit		
Körnung	gesiebt mit: ca. 78.5% D = .275 .025 mm, ca. 14.3% mit D = 10 mm, (4.8% Lauge)		
Probengröße	Ø = 70 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	ca. 4.8% Lauge		
Bemerkungen	Trocken vorkompaktiert bis auf 38.8% Porenanteil. Dann feucht weiterkompaktiert mit 2MPa Effektivdruck. Rekristallisation! bezogen auf die zugängliche Porosität!		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.029	1.2 10 ⁻¹⁵		
.0022	8.5 10 ⁻¹⁹		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	A.J. Shor, C.F. Baes, Jr., C.M. Canonico, Consolidation and Permeability of Salt in Brine, July 1981, ORNL-5774		
Versuchsreihe			
Fluid			
Material	gesiebtetes Salz, demnach Einordnung als Brikett		
Körnung	75 - 150 µm, 150 - 177 µm, 177 - 250 µm, 250 - 420 µm.		
Probengröße	Ø = 12.7 mm bzw. Ø = 25.4 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	4 - 60%		
Bemerkungen	Wegen der feuchten Kompaktion, möglicherweise ohne Bruchvorgänge, Autoren fanden: $k = 3.28 \cdot 10^{-9} z^2 n^6$, mit Korndurchmesser.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	L. Liedtke, W. Bleich, Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, Stoffverhalten von Salzgrus, Fachband 11, Berlin 1985 Untersuchung von M. Arnould		
Versuchsreihe			
Fluid	Luft und/oder Lauge		
Material	Steinsalzgrus Bergmannsseggen Hugo Haldenrückstände		
Körnung	Feinanteile auf der Halde durch Feuchtigkeit weggelöst.		
Probengröße	H = 100 mm Ø = 50 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	In situ verfestigt in der Schachanlage Bergmannsseggen Hugo. Keine eindeutige Angabe zum Durchflußmedium und zu einer eventuellen Trocknung. Umrechnung hier mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s.}$		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.246	$7.85 \cdot 10^{-12}$		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	Th. Kruse, W. Rodatz, Prüfung des Durchlässigkeitsverhaltens von Salzgesteinsproben, Unterauftrag für IfT (Proj.-Nr. 1364), Mai 1989		
Versuchsreihe			
Fluid	gesättigte NaCl-Lösung		
Material	offensichtlich verschiedene Salzbriketts		
Körnung	-		
Probengröße	H = 70 mm Ø = 100 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Messungen über ca. 8 - 19 Tage zeigen starke Variationen der Permeabilität. Umrechnung mit $v/g = 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ m s}$.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.114	$3.8 \cdot 10^{-16}$		
.091	$2.67 \cdot 10^{-16}$		
.10	$2.54 \cdot 10^{-16}$		
.091	$4.95 \cdot 10^{-16}$		
.091	$8.76 \cdot 10^{-16}$		
.11	$3.05 \cdot 10^{-17}$		
.142	$5.60 \cdot 10^{-17}$		

Versatz			
Kennung	nicht akzeptiert		
Quelle	G. Kappei, K. Gessler, In Situ Tests on the Behaviour of Backfill Materials and Accompanying Rock-Mechanical Laboratory Investigations, Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt		
Versuchsreihe			
Fluid	Luft		
Material	Versatz aus alten (ca. 60 Jahre) Carnallit-Abbauen. Der Versatz besteht aus unterschiedlichen Mineralien und weiterem Fremdmaterial (Holz, Papier, Steine).		
Körnung			
Probengröße	H = 30 mm Ø = 30 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.027	3.04 10 ⁻¹³	.105 - .128	1.8 10 ⁻¹⁴ - 2.6 10 ⁻¹³
.041	1.03 10 ⁻¹⁴	.115	6.8 10 ⁻¹⁴
.049	2.58 10 ⁻¹⁴		
.058	1.49 10 ⁻¹⁴		
.067	2.01 10 ⁻¹⁴		
.07	2.45 10 ⁻¹³		
.117	2.60 10 ⁻¹³		
.147	5.87 10 ⁻¹²		

Anhang B:
Meßdaten für Salzbriketts

Salzbrikett			
Kennung	ITE-rel		
Quelle	G. Pusch, M. Borgmeier: Ergebnisbericht der Messungen von relativen Permeabilitäten Gas-Lauge an acht Salzbrikettproben. Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung, TU Clausthal, 1992		
Versuchsreihe			
Fluid	Gas		
Material	Briketts für die Langzeitdichtung in Dammbauwerken		
Körnung			
Probengröße	H = 35 - 53 mm Ø = 30 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
in Kompaktionsrichtung			
.0766	8.5 10 ⁻¹⁶		
.0763	4.3 10 ⁻¹⁵		
.0637	7.2 10 ⁻¹⁶		
.0712	1.9 10 ⁻¹⁵		
senkrecht zur Kompaktionsrichtung			
.0646	1.13 10 ⁻¹⁴		
.0796	5. 10 ⁻¹⁵		
.0568	1.75 10 ⁻¹⁵		
.0681	1.2 10 ⁻¹⁵		

Salzbrikett			
Kennung	IfT-Walt1		
Quelle	F. Walter, GSF - IfT, persönliche Mitteilung (1994)		
Versuchsreihe	OR5, UL2		
Fluid	N ₂		
Material	Briketts für die Langzeitdichtung in Dammbauwerken		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit	auf Grund der niedrigen Drücke eventuell Klinkenberg-Effekt		
Feuchtegehalt			
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.076	3.26 10 ⁻¹⁵		
.076	4.13 10 ⁻¹⁵		
.076	4.34 10 ⁻¹⁵		
.076	4.70 10 ⁻¹⁵		
.076	5.37 10 ⁻¹⁵		
.074	6.11 10 ⁻¹⁵		
.074	6.46 10 ⁻¹⁵		

Salzbrikett			
Kennung	IfT-Walt2 Mod		
Quelle	F. Walter, GSF -IfT, persönliche Mitteilung (1994)		
Versuchsreihe	Bri 1, Bri 4 - 7		
Fluid	N ₂		
Material	Versatz-Material 0		
Körnung			
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	Die Briketts enthielten 2.4% Feuchtigkeit, Trocknung vor der Messung		
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.086	1.62 10 ⁻¹⁵		
.086	1.85 10 ⁻¹⁵		
.088	2.15 10 ⁻¹⁵		
.089	1.43 10 ⁻¹⁵		
.091	2.53 10 ⁻¹⁵		

Salzbrikett			
Kennung	IfT-Walt3 Mod		
Quelle	F. Walter, GSF - IfT, private Mitteilung, 1994		
Versuchsreihe	Mat0 78b, c; Mat0 79; Mat0 79f; Mat0 80e		
Fluid	N ₂		
Material	Versatz-Material 0		
Körnung	95% .04 - 0.3 mm 5% 0.3 - 1 mm Korngröße und -verteilung mit der von Briketts vergleichbar.		
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen			
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.18	1.178 10 ⁻¹³		
.215	1.29 10 ⁻¹³		
.215	1.29 10 ⁻¹³		
.219	1.70 10 ⁻¹³		
.219	1.71 10 ⁻¹³		
.311	8.69 10 ⁻¹³		
.329	1.14 10 ⁻¹²		

Salzbrikett			
Kennung	ITC1 Mod		
Quelle	Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, IT-Corporation, BMI/ONWI-631, Columbus 1987		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	industriell hergestellte Lecksteine (artificial block salt) 1.98% unlösliche Bestandteile		
Körnung	.06 - 3 mm		
Probengröße	203 x 203 x 280 mm ³ (22.7 kg)		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit	Porosität lokal 8% < n < 16%		
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Daten aus Grafik entnommen		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.151	4.0 10 ⁻¹⁴		
.142	1.3 10 ⁻¹⁴		
.096	3.0 10 ⁻¹⁵		

Salzbrikett			
Kennung	ITC2 Mod		
Quelle	Laboratory Investigation of Crushed Salt Consolidation and Fracture Healing, IT-Corporation, BMI/ONWI-631, Columbus 1987		
Versuchsreihe			
Fluid	Argon		
Material	trockener WIPP-Steinsalzgrus, Teilschnittmaschine		
Körnung	0 - .9 mm		
Probengröße	H = 114 mm Ø = 71 mm		
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt	kein Feuchtigkeitszusatz		
Bemerkungen	Belastung stufenweise in Schritten von 3.45 MPa bis 17.25 MPa über insgesamt einen Monat gesteigert Alle Daten aus Graphik entnommen.		
Porosität n	Permeabilität k [m ²]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
.357	1.80 10 ⁻¹²		
.30	7.60 10 ⁻¹³		
.256	3.16 10 ⁻¹³		
.216	1.50 10 ⁻¹³		
.19	7.00 10 ⁻¹⁴		

**Anhang C:
Meßdaten für Salzionmörtel**

Salzton - Mörtel			
Kennung	IfT - Mörtel		
Quelle	F. Walter, Untersuchungen zum Salzton-Mörtel. GSF-Institut für Tief Lagerung, Abteilungsbericht, IfT 6/92, 1992		
Versuchsreihe			
Fluid	Gas		
Material	K&S-Haltpulver grauer Salzton aus Bleicherode		
Körnung	abgesiebte Kornfraktionen < .125 mm		
Probengröße			
Brucherscheinungen			
Meßgenauigkeit			
Feuchtegehalt			
Bemerkungen	Dem Mörtel wurde Wasser oder Lauge bis zur guten Verarbeitbarkeit zugemischt. Vor der Permeabilitätsmessung wurden die Proben getrocknet. Die Porosität des Salztons wurde zu .22 bestimmt		
Tongehalt	Dichte [kg/m ³]	Porosität n	Permeabilität k [m ²]
0	1481.	0.313	1.06 10 ⁻¹²
0	1475.	0.315	7.73 10 ⁻¹³
0.1	1498.	0.317	k.A.
0.2	1750.	0.217	k.A.
0.3	1628.	0.286	3.77 10 ⁻¹³
0.4	1781.	0.233	5.21 10 ⁻¹⁴
0.5	1934.	0.184	8.31 10 ⁻¹⁶
1	2053.	0.220	k.A.
0	1433.	0.335	1.72 10 ⁻¹²
0.1	1472.	0.329	1.47 10 ⁻¹²
0.2	1581.	0.293	7.32 10 ⁻¹³

Salzton - Mörtel			
0.3	1653.	0.275	1.40 10 ⁻¹³
0.4	1798.	0.226	4.66 10 ⁻¹⁴
0.5	1699.	0.283	4.15 10 ⁻¹³
0.5	1742.	0.265	5.09 10 ⁻¹⁴
0	1432.	0.336	8.72 10 ⁻¹²
0.1	1529.	0.303	k.A.
0.2	1580.	0.293	1.46 10 ⁻¹²
0.3	1642.	0.280	k.A.
0.4	1755.	0.245	3.74 10 ⁻¹⁴
0.5	1759.	0.258	k.A.
0	1481.	0.313	1.48 10 ⁻¹²
0.09	1438.	0.343	7.22 10 ⁻¹²
0.18	1497.	0.328	8.62 10 ⁻¹³
0.28	1638.	0.278	6.01 10 ⁻¹³
0.37	1657.	0.283	k.A.
0.46	1785.	0.241	1.08 10 ⁻¹³
Einkornsalzgrus			
0	1361.	0.368	3.32 10 ⁻¹²
0	1446.	0.329	7.12 10 ⁻¹³
0	1392.	0.354	3.15 10 ⁻¹²
0	1342.	0.377	9.79 10 ⁻¹³
Feinkornsalzgrus			
0.33	1365.	0.404	5.10 10 ⁻¹³
0.33	1364.	0.405	4.99 10 ⁻¹³
0.33	1445.	0.370	2.88 10 ⁻¹³
0.31	1436.	0.371	3.92 10 ⁻¹³
0.31	1468.2	0.357	4.43 10 ⁻¹³
0.31	1415.56	0.380	3.67 10 ⁻¹³

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de