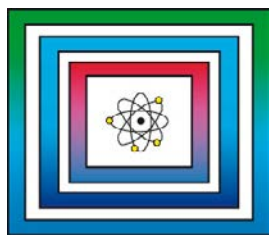


# Standortauswahl

9S2018010000

Kristallines Wirtsgestein in der  
Endlagerung: Überblick zu  
Standortverfahren, Datenerhebung  
und Modellierung



Ergebnisbericht

Hannover, November 2020

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND  
ROHSTOFFE HANNOVER

Standortauswahl

Strukturinventar, Stoffbestand und Eigenschaften von  
Störungszonen und Kluftnetzwerken in magmatischen Gesteinen  
Deutschlands (DaFNe)

Kristallines Wirtsgestein in der Endlagerung: Überblick zu  
Standortverfahren, Datenerhebung und Modellierung

Ergebnisbericht

Autoren:	Weihmann, Sarah, Dr. Loeckle, Filip Kumar, Vinay
Auftraggeber:	BGR
Auftragsnummer:	9S2018010000
Datum:	16.11.2020
TK-Nummer:	2363
Geschäftszeichen:	B3.2/B50161-07/2020-0003/001
Gesamtblattzahl:	58

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste  
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung .....	3
1 Einleitung .....	4
2 Standortverfahren und Stand der Erkundung potenziell geeigneter kristalliner Wirtsgesteine in Endlagerprojekten ausgewählter Länder .....	5
2.1 China .....	7
2.2 Finnland .....	8
2.3 Japan .....	11
2.4 Russland .....	12
2.5 Schweden .....	15
2.6 Schweiz .....	18
2.7 Südkorea .....	19
2.8 Tschechische Republik .....	20
2.9 Deutschland .....	23
2.10 Vergleich der Standort- und Erkundungsverfahren .....	24
3 Grundlagen zu Bruchstrukturen .....	26
3.1 Bildung von Bruchstrukturen .....	26
3.2 Unterscheidung von Bruchstrukturen .....	29
4 Erhebungsmethoden .....	31
4.1 Erhebungsmethoden für geometrische Klufdaten .....	31
4.2 Erhebungsmethoden für geochemische und petrologische Eigenschaften ...	32
5 Nutzung von Klufdaten für ein stochastisches Klufnetzwerkmodell .....	34
6 Numerische Modellierung hydraulischer Prozesse .....	37
6.1 Grundwasserströmungsgleichung im Kontinuumsmodell .....	40
6.2 Strömungsmodellierung in einem diskreten Klufnetzwerk .....	41
7 Zusammenfassung .....	44
Literaturverzeichnis .....	45
Abkürzungsverzeichnis .....	55
Tabellenverzeichnis .....	57
Abbildungsverzeichnis .....	58

---

## Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Weihmann, Sarah, Dr. Loeckle, Filip Kumar, Vinay
Titel:	Kristallines Wirtsgestein in der Endlagerung: Überblick zu Standortverfahren, Datenerhebung und Modellierung
Schlagwörter:	Bruchstrukturen, Klufnetzwerk, Kristallin, geklüftet-poröse Medien, Standorterkundung, Strömungsmodellierung

Einer der inhaltlichen Schwerpunkte des Projekts DaFNe ist es, die Grundlagen eines Arbeitsablaufes zur systematischen Erhebung der Verbreitung, Ausbildung und Eigenschaften von Klüften und Störungszonen und deren Übertragung in Modellform zu erarbeiten, um u. a. numerische Berechnungen zu ermöglichen, wie sie im Rahmen der sicherheitstechnischen Nachweiserbringung durchzuführen sind. Hierzu werden beispielhaft Standortauswahlverfahren und Erkundungsstände in ausgewählten Ländern betrachtet, in denen die Endlagerung in kristallinem Wirtsgestein angestrebt oder umgesetzt wird, und die Grundlagen der Bildung und Interpretation von Bruchstrukturen erläutert. Die einzelnen Schritte von der Aufnahme der Rohdaten hin zu einem repräsentativen DFN- oder Kontinuumsmodell werden durch die Zusammenstellung möglicher Aufnahmemethoden geometrischer Daten von Bruchstrukturen in Oberflächenaufschlüssen und der für die Modellierung benötigten Eingangsparameter sowie der Erläuterung grundlegender Gleichungen zur Modellierung der Grundwasserströmung in geklüftet-porösen Medien dargestellt.

## 1 Einleitung

Gemäß § 1 Standortauswahlgesetz (StandAG) kommt in Deutschland neben Steinsalz und Tongestein auch Kristallingestein als Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht. Für die Umsetzung des StandAG werden deshalb detaillierte Informationen zum strukturgeologischen Bau und zu den Barriereigenschaften potenziell geeigneter kristalliner Wirtsgesteine in Deutschland benötigt.

Die in vielen Ländern als Wirtsgesteine für die Endlagerung in Betracht gezogenen Kristallingesteine zeichnen sich allgemein durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit und ihr sehr geringes Lösungsverhalten aus. Zudem ist die hydraulische Durchlässigkeit im ungestörten Zustand sehr gering (BGR 2007). Allerdings setzen hydraulisch leitende Klüfte und Störungszonen, die in Gesteinsverbänden der oberen Erdkruste häufig sind, die hydraulische Durchlässigkeit signifikant herauf. Für die Bewertung der Eignung eines potenziellen Standortes in kristallinem Wirtsgestein und die Entwicklung eines Endlagerkonzeptes sind deshalb neben der Betrachtung geeigneter (geo-) technischer Barrieren auch Kenntnisse der räumlichen Lage von Störungszonen, der Eigenschaften vorhandener Kluftnetzwerke, der Orientierung und Größe der Gebirgsspannungen sowie der zukünftigen Entwicklung des Spannungsfeldes erforderlich (Hammer et al. 2009). Im Projekt Strukturinventar, Stoffbestand und Eigenschaften von Störungszonen und Kluftnetzwerken in magmatischen Gesteinen Deutschlands (DaFNe) werden dementsprechend Untersuchungen zur Verbreitung, Ausbildung und Eigenschaften von Kluft- und Störungszonen in einem Kristallengebiet in Deutschland als Fallbeispiel durchgeführt und die erhobenen Daten in ein diskretes Kluftnetzwerkmodell überführt. Dadurch soll ein Arbeitsablauf zur Erstellung diskreter Kluftnetzwerkmodelle, von der Erhebung der Rohdaten im Oberflächenaufschluss bis zum numerischen Modell, etabliert werden. Durch Upscaling der Kluftnetzwerkpermeabilitäten können anschließend Kontinuumsmodelle, mit denen beispielsweise thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch (THMC) gekoppelte Prozesse untersucht werden können, parametrisiert werden.

Zunächst wird in Kapitel 2 ein aktueller Überblick über die Standortauswahlverfahren und den Stand der Erkundung in neun Ländern gegeben, in denen eine Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in kristallinem Wirtsgestein erfolgen wird oder in denen kristalline Gesteine als Wirtsgestein in Betracht gezogen werden. In Kapitel 3 werden die Grundlagen der Bildung und der Unterscheidung von Bruchstrukturen wie Klüften und Störungen erläutert, da diese die Barriereigenschaften kristalliner Gesteine wesentlich beeinflussen. In Kapitel 4 werden Methoden zur Erhebung der notwendigen geometrischen Daten in Oberflächenaufschlüssen sowie der wesentlichen mineralogisch-petrologischen und geochemischen Eigenschaften von Kluftmineralisationen im Hinblick auf die stochastische Modellierung von Kluftnetzwerken zusammengestellt. Die Ableitung der Parameter aus den erhobenen Daten für die Modellierung diskreter Kluftnetzwerke wird in Kapitel 5

erläutert. Abschließend werden in Kapitel 6 Modellierungskonzepte für hydraulische Prozesse in gesättigten geklüftet-porösen Medien vorgestellt. Modelltypisch wird auf diskrete Klufnetzwerkmodelle (DFN-Modelle) und Kontinuumsmodelle eingegangen und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Die Grundgleichungen der Modelle werden erläutert und relevante Eingangsparameter identifiziert. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse des Berichts zusammen und bietet einen Ausblick auf weitere Arbeiten im Rahmen des Projekts DaFNe.

Auf Grund des allgemeinen Sprachgebrauchs und der Lesbarkeit wird der Begriff „Klufnetzwerk“ in diesem Bericht synonym zum englischen Begriff „fracture network“ für ein Netzwerk von Bruchstrukturen verwendet, das sowohl aus Klüften als auch aus Scherbrüchen bestehen kann. In Kapitel 3 werden die Unterscheidungen von Bruchstrukturen erläutert.

## **2 Standortverfahren und Stand der Erkundung potenziell geeigneter kristalliner Wirtsgesteine in Endlagerprojekten ausgewählter Länder**

Die Verfahren zur Standortauswahl laufen in allen Ländern in ähnlicher Weise ab, obwohl es keinen internationalen Standard für die Durchführung von Standortauswahlverfahren für geologische Tiefenlager gibt und die jeweiligen geologischen und regulatorischen Rahmenbedingungen unterschiedlich sind. Die Arbeiten zur Erkundung lassen sich grob in mehrere aufeinander aufbauende Phasen oder Schritte unterteilen, mit denen jeweils der Untersuchungsmaßstab, die Ortsauflösung und damit auch die Menge der pro Flächeneinheit gewonnenen Daten zunimmt (Hammer & Sönke 2009).

In einer initialen Vorstudienphase (oft als „screening“, „overview studies“, „feasibility studies“, „area survey stage“ oder „regionale Vergleichsstudien“ bezeichnet) werden üblicherweise bereits vorliegende geowissenschaftliche Kenntnisse zusammengetragen, auf deren Basis näher zu untersuchende Regionen oder geologische Blöcke von besonderem Interesse ausgewiesen werden. Diese Daten und Kenntnisse stammen oft aus unterschiedlichen wissenschaftlichen oder wirtschaftlichen Kontexten. Beispielsweise sind dies Ergebnisse geowissenschaftlicher Studien, Daten aus der Rohstoffprospektion, amtliche geologische Karten, Daten aus staatlichen Aktivitäten wie dem Erdbeben- oder Georisikomonitoring oder raumordnerische Datensätze wie Flächennutzungspläne oder Liegenschaftskataster. Um für das Standortverfahren verwendet werden zu können, müssen die relevanten Datensätze zunächst gesichtet, neu bewertet und gegebenenfalls transformiert, aufbereitet oder bereinigt werden. Daher stellt die Integration der vorhandenen Daten und Informationen in eine nutzbare Struktur den hauptsächlichen Arbeitsaufwand in dieser Phase dar. Dabei können auch Informations- oder Datendefizite erkannt und weitere Maßnahmen zur Datenerhebung und zum Informationsgewinn abgeleitet werden.

Untersuchungswürdige Gebiete werden anschließend meist in einer Phase der über-tägigen Erkundung untersucht, um gezielt standortspezifische Daten in einer höheren Ortsauflösung zu generieren. Die Anzahl der untersuchten Regionen sowie die Art und der Umfang der Untersuchungen ist von der geologischen Situation sowie von den regulatorischen Rahmenbedingungen in den jeweiligen Ländern abhängig. Im Zuge übertägiger Erkundungsprogramme werden an der Erdoberfläche zum Beispiel großmaßstäbliche geologische Kartierungen, Bohrprogramme und fernerkundliche oder (aero-) geophysikalische Messkampagnen durchgeführt, um gezielt Kenntnisse zur Ausdehnung sowie zum strukturellen und lithologischen Aufbau der potenziellen Wirtsgesteinsformationen und der angrenzenden Bereiche zu generieren. Diese stellen die Grundlage für erste, meist überwiegend generische Betrachtungen und Modellierungen dar und werden für die Planung der untertägigen Erkundung sowie zur Entwicklung und Optimierung des Endlagerkonzeptes verwendet. Die übertägig gewonnenen Daten werden speziell für die Standortuntersuchung erhoben, sind jedoch nicht ohne weiteres auf die Gegebenheiten in der vorgesehenen Endlagertiefe übertragbar.

In der Phase der untertägigen Erkundung werden schließlich neue Bergwerke aufgefahren oder bestehende Hohlräume genutzt, um weitergehende Untersuchungen und Experimente durchzuführen. Gängige Bezeichnungen für solche Einrichtungen sind beispielsweise Erkundungsbergwerk, Untertagelabor, Underground Research Facility (URF) oder Underground Research Laboratory (URL). Dabei kann zwischen standortspezifischen und generischen URLs unterschieden werden. Das Ziel dieser Phase ist es, alle Daten, die für die Charakterisierung des Wirtsgesteins, die standortspezifischen Sicherheitsanalysen, die Planung des Endlagerbergwerks und die standortspezifische Optimierung des Endlagerkonzeptes erforderlich sind, unter Bedingungen zu erheben, die denen im späteren Endlager möglichst nahekommen. Hierfür werden unter anderem längerfristig angelegte Experimente durchgeführt. Auf Grund des hohen technischen und administrativen Aufwands für die Auffahrung und den Betrieb des Bergwerks ist die untertägige Erkundung zeit- und kostenintensiver als die anderen Erkundungsphasen. Allerdings sind die gewonnenen Daten und Erkenntnisse am besten auf das spätere Endlager übertragbar.

Im Folgenden werden Standortverfahren und Erkundungsstand verschiedener Länder vorgestellt, welche die Möglichkeiten einer Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in kristallinem Wirtsgestein erforschen.

## 2.1 China

### Standortverfahren

1985 schlug das damalige Ministry for Nuclear Industry of China (Vorgänger der heutigen China National Nuclear Corporation, CNNC) ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm für den Bau eines geologischen Tiefenlagers vor mit dem Ziel, bis 2040 ein zentrales nationales Endlager in granitischem Wirtsgestein zu entwickeln. Die Standortsuche und der Bau des Endlagers erfolgen in mehreren Phasen. In der initialen Phase, dem „nationwide screening“ (1985 – 1986), wurden sechs große potenzielle Regionen mit grundsätzlich günstigen Bedingungen identifiziert: SW China, E China, Innere Mongolei, S China, NW China und Xinjiang. Die Großregionen wurden in einer zweiten Phase, dem „regional screening“ (1986 – 1989) durch erste Untersuchungen vor Ort auf 21 kleinere geeignete Gebiete reduziert. Im Ergebnis wurde besonders die Wüste Gobi hervorgehoben, da die seismische Aktivität hier gering ist und die regionalen Grundwasserverhältnisse auf Grund der Meereshöhe und der sehr geringen Niederschlagsmenge als besonders günstig angesehen wurden. In der seit 1990 laufenden dritten Phase, dem „area screening“ konzentrieren sich die Aktivitäten entsprechend auf die Region Beishan (NW China), ein Teilgebiet der Wüste Gobi in der Provinz Gansu. Zusätzlich wurden Bohrungen in granitischen Intrusionskörpern in Xinjiang und der inneren Mongolei abgeteuft, um Vergleichsstandorte mit ähnlicher Lithologie zu untersuchen. 2012 erging ein Beschluss zum Bau eines regionalspezifischen Untergrundlabors am Standort Xinchang (Faybishenko et al. 2016). Um Methoden der Einlagerung und Konstruktionstechnologien für das Untergrundlabor zu erproben, wurde zusätzlich der Beishan Exploration Tunnel (BET) am benachbarten Standort Jiujiing in einer Tiefe von 50 m gebaut, in dem in-situ Tests durchgeführt werden (vor allem „drill-and-blast“-Tests, Untersuchungen zur langfristigen geologischen Deformation und zur „excavation damage zone“, EDZ). Der Bau des regionalspezifischen Untergrundlabors am Standort Xinchang soll bis 2024 abgeschlossen sein. Die Arbeiten zur untertägigen Erkundung sollen bis 2040 erfolgen, bevor das eigentliche geologische Tiefenlager in der Region Beishan bis 2050 gebaut werden soll (Faybishenko et al. 2016).

### Stand der Erkundung

Die Erdkruste der Region Beishan ist im Schnitt 47 – 50 km mächtig. Langsame Hebungsbewegungen seit dem Tertiär sowie die sehr geringe seismische Aktivität (keine Erdbeben  $M_s > 4.75$ ) werden als Belege für die Stabilität der regionalen Erdkruste angesehen (Wang 2010). In der Region sind acht granitische Intrusionskörper als potenzielle Standorte identifiziert worden, von denen zwischen 1999 und 2015 fünf von der Oberfläche aus mittels hydrogeologischer, geophysikalischer und geologischer Methoden erkundet worden sind. Zusätzlich wurden 23 Bohrungen abgeteuft und für Pump- und Injektionstests, Bohrlochgeophysik, in-situ Spannungsmessungen und zur Gewinnung von Bohrkern- und Grundwasserproben verwendet.



Im Rahmen des „area screenings“ in der Region Beishan wurden Bruchstatistiken aus Oberflächenaufschlüssen nach der „window statistic method“ erzeugt. Allgemein zeigen die Ergebnisse eine sehr geringe Dichte an Bruchstrukturen, niedrige hydraulische Durchlässigkeiten und mit der Tiefe zunehmende Gebirgsspannungen im mittleren Bereich, sodass die Integrität der untersuchten Formationen als hoch und die technischen Voraussetzungen für die Endlagerkonstruktion in der Region insgesamt als gut eingeschätzt wurden (Wang 2010; Wang et al. 2018a). Der designierte Standort des Untergrundlabors am Standort Xinchang wurde seit 2015 näher untersucht. Als Hauptlithologien wurden biotitführende monzonitische Granite und Biotit-Granodiorit identifiziert, aus der räumlichen Verteilung der Einheiten sind geologische 3D-Modelle des Standortes erstellt worden. Detailliertere Untersuchungen der im Gebirge vorhandenen Trennflächen mittels akustischem Bohrloch-Televiwer (ATV) ergaben, dass die Breite von Störungen sowie die Kluftdichte um Störungen mit der Tiefe abnimmt, sodass die Integrität des Wirtsgesteins mit zunehmender Tiefe zunimmt. Die Hauptorientierungen in der Tiefe stimmen mit dem regionalen tektonischen Muster (Hauptstreichrichtung NE) überein (Wang et al. 2018b).

## **2.2 *Finnland***

### Standortverfahren

Der Standortprozess in Finnland wurde 1983 mit der Veröffentlichung grundlegender Leitlinien für den Umgang mit nuklearen Abfällen und genereller Vorgaben für ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm eingeleitet. Darin wurde bereits festgelegt, dass ein geologisches Tiefenlager bis 2020 verfügbar sein muss und dass die Standortsuche durch den schrittweisen Ausschluss von Gebieten erfolgen soll. Mit jedem Schritt sollte der Untersuchungsmaßstab zunehmen und immer höherauflösende Untersuchungsmethoden angewendet werden. Bis etwa Mitte der 1990er Jahre fanden entsprechende Voruntersuchungen statt, die die Anzahl der potenziellen Standorte wurde dadurch auf drei reduziert. Allerdings lagerten die finnischen Energieunternehmen alle Aufgaben zur Forschung und Entwicklung sowie zu Planung, Bau und Betrieb eines zentralen geologischen Tiefenlagers in die 1996 gemeinsam gegründete Gesellschaft Posiva aus. Diese schloss die Standortauswahl Ende der 1990er Jahre durch den Vergleich der drei bereits identifizierten Gebiete mit einem zusätzlichen vierten Gebiet ab und entwickelte ein auf dem schwedischen KBS-3 Konzept basierendes Endlagerdesign im Kristallin des Fennoskandischen Schildes in 400 m Tiefe (McEwen & Aikas 2000). Nachdem das finnische Parlament 2001 im Grundsatz Olkiluoto als Standort bestätigt hatte, wurde ab 2004 das standortspezifische Untergrundlabor Onkalo gebaut und ein etwa zehn Jahre andauerndes begleitendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die untertägige Erkundung durchgeführt, bevor der Sicherheitsnachweis für den Standort erfolgte (Posiva 2013). 2015 wurde die

Baugenehmigung für das eigentliche Endlager Onkalo am Standort Olkiluoto erteilt, der Bau erfolgte zwischen 2016 und 2020. Die Betriebsgenehmigung soll noch 2020 erteilt werden und für zunächst 100 Jahre gelten (Faybishenko et al. 2016).

### Stand der Erkundung

Erste geowissenschaftliche Vorstudien zu den generellen endlagerrelevanten Eigenschaften des Untergrundes wurden in den späten 1970er Jahren durch die Energieunternehmen initiiert. Dabei wurden generelle geologische Karten erstellt und großmaßstäbliche Strukturen des Grundgebirges, wie größere Störungen, beschrieben. Die eigentlichen Untersuchungen im Rahmen der Standortauswahl begannen 1983 zunächst mit einer landesweiten Studie großmaßstäblicher Scherzonen, die das kristalline Grundgebirge Finnlands in größere tektonische Blöcke zerteilen. Diese Studien beruhten auf der Interpretation von Satellitenbildern und allgemeiner geologischer und geophysikalischer Karten. Dadurch wurden Krustenblöcke in der Größenordnung von 100 km bis 200 km ermittelt, bei denen die zu erwartende regionale Deformation der Erdkruste, die zum Beispiel durch langsame postglaziale Hebung verursacht wird, voraussichtlich vollständig durch die begrenzenden Scherzonen aufgenommen wird. Das Gestein innerhalb des Blocks wird hingegen nicht deformiert und bleibt weitgehend intakt. Zunächst wurden 327 solcher Blöcke identifiziert, von denen eine Vielzahl auf Grund von Flächennutzungskonflikten vom weiteren Verfahren ausgeschlossen wurde. In 61 dieser Krustenblöcke wurden durch Analysen von Satellitenbildern und ergänzenden Untersuchungen im Feld 134 kleinere potenzielle Gebiete (5 km<sup>2</sup> bis 10 km<sup>2</sup>) identifiziert. Aus diesen wurden 1987 fünf Gebiete mit möglichst unterschiedlichen geologischen Entwicklungen in verschiedenen Teilen des Landes für die erste Vorerkundung selektiert (McEwen & Aikas 2000).

Diese fünf Untersuchungsgebiete wurden an Hand von Oberflächenaufschlüssen kartiert. Dabei wurden die anstehenden Gesteine beprobt, mineralogisch-chemisch bestimmt, petrographisch beschrieben, sowie die generellen tektonischen Prozesse und der mechanische Spannungszustand untersucht. Zudem wurden hydrogeologische und hydrogeochemische Untersuchungen (Grundwasserfluss, hydraulische Durchlässigkeit und Konnektivität, Grundwasserzusammensetzung) durchgeführt. In weiteren Untersuchungsschritten wurden geophysikalische Messkampagnen durchgeführt (hauptsächlich Magnetik, Messung der natürlichen Hintergrundstrahlung, Widerstandsmessungen) und erste Bohrungen abgeteuft, um Variationen im Gesteinstyp und der Bruchmuster in der Tiefe abschätzen zu können. Aus den Ergebnissen wurden Modelle der geologischen Struktur und der Grundwasserflüsse für jedes der Gebiete generiert. Eine Zusammenstellung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit bis 1996 erfolgte in Vuori (1997). Nach der Übernahme der Standortarbeiten durch die Posiva 1996 wurden die drei zuvor untersuchten Standorte Romuvaara, Kivetty und Olkiluoto mit einem vierten in Hästholmen verglichen. Dabei wurden

sowohl vorhandene Studien ausgewertet als auch ergänzende übertägige Erkundungs- und Modellierungsarbeiten durchgeführt, um einen vergleichbaren Wissensstand für alle Standorte sicherzustellen. Zudem wurden mindestens zehn tiefe Erkundungsbohrungen (500 m bis 1000 m) pro Standort abgeteuft. Detaillierte Methodenbeschreibungen und Ergebnisse aller im Rahmen der Voruntersuchungen zwischen 1987 bis 1992 durchgeführten Arbeiten und der Untersuchungen ab 1996 sind in vier separaten „site reports“ zusammengefasst worden (Anttila et al. 1999a; Anttila et al. 1999b, 1999c, 1999d). Die im Rahmen der Standortauswahl bis 2000 durchgeführten Arbeiten sind in McEwen & Aikas (2000) zusammengefasst.

Mit dem Baubeginn des Untergrundlabors Onkalo 2004 verschob sich der Fokus der Erkundungsarbeiten von der Erdoberfläche nach Untertage und es erfolgten geologische Kartierungen der Schacht- und Tunnelwände, sowie Untersuchungen von Erkundungsbohrungen und kurzen Bohrungen im Grubengebäude. Die Verfahren zur Erzeugung von Aufschlussanalogen und zur Parametrisierung der Bruchstrukturen in den Untergrundlaboren Onkalo und Äspö werden in einer gemeinsamen Veröffentlichung mit der Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) beschrieben (Siren et al. 2017). Die Autoren nehmen auch einen Vergleich der Bruchmustersaufnahme per Photogrammetrie und per terrestrischem Laserscanning vor. Im Ergebnis produzierte die photogrammetrische Aufnahme kleinere Fehler, sodass diese Methode für die weiteren Arbeiten bevorzugt wurde. Auch nach Inbetriebnahme des Untergrundlabors Onkalo wurden die Untersuchungen an der Oberfläche weitergeführt. Beispielsweise werden kontinuierlich weitere Kartierungsarbeiten und petrologische Untersuchungen in übertägigen Schürfen vorgenommen, sodass sich das Verständnis der Standorte und die geologischen Modelle stetig weiterentwickeln (z. B. Vaarma & Vuokko 2009; Posiva 2011).

Für die Standortsuche hat die Posiva ein eigenes Klassifikationsschema für kristallines Wirtsgestein entwickelt (McEwen et al. 2012). Aus bautechnischen Überlegungen heraus ergab sich zudem die Notwendigkeit, Forschung an hydrothermalen Alterationszonen zu betreiben, die eng mit hydraulisch leitenden Bruchstrukturen verknüpft sind und die zuvor im Bereich des Fennoskandischen Schildes nicht systematisch untersucht worden waren (Aaltonen et al. 2018).

## 2.3 *Japan*

### Standortverfahren

1976 entschied die Japan Atomic Energy Commission (AEC), dass die Entsorgung nuklearer Abfälle in Japan auf dem Konzept der geologischen Tiefenlagerung aufbauen soll. Aufgrund der erhöhten seismischen und vulkanischen Aktivität im japanischen Inselbogen sollte zunächst die grundsätzliche Machbarkeit der geologischen Endlagerung aufgezeigt werden. Diese erste Phase wurde von der Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC, später Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC, heute Japan Atomic Energy Agency, JAEA) geleitet. Ein entsprechendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm wurde über einen Zeitraum von etwa 25 Jahren verfolgt, bevor der institutionelle Rahmen und die Regularien für das Standortverfahren festgelegt wurden. Ab 1996 wurden zwei generische Untergrundlabore in kristallinem (Mizunami) und sedimentärem Wirtsgestein (Horonobe) gebaut, um konstruktionstechnische Fragen zu erforschen. Daneben werden in den Untergrundlaboren auch wissenschaftliche Kooperationen mit internationalen Organisationen durchgeführt. Auf Basis eines zweiten Statusreports (JNC 2000) wurde das japanische Gesetz zur Endlagerung radioaktiver Abfälle erlassen und im Jahre 2000 die Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) gegründet, die den Standortauswahlprozess 2002 eingeleitet hat. Die Untersuchung potenzieller Standorte soll in drei Phasen erfolgen:

- Auswahl von Gebieten für Voruntersuchungen (preliminary investigation areas, PIA) auf Basis regionalspezifischer Literaturstudien mit Fokus auf der Langzeitstabilität der geologischen Umgebung; dabei werden nur Gebiete berücksichtigt, in denen keine aktiven Störungszonen, keine unverfestigten Sedimente und keine wirtschaftlich relevanten Rohstoffvorkommen vorhanden sind und die sowohl mindestens 15 km von quartären Vulkanen entfernt liegen als auch innerhalb der letzten 100.000 Jahre weniger als 300 m gehoben wurden
- Auswahl von Gebieten für detaillierte Untersuchungen (detailed investigation areas, DIA) aus den PIAs durch übertägige Erkundung und Bohrungen
- Detaillierte Standortcharakterisierung durch untertägige Erkundung ausgewählter DIAs in standortspezifischen Untergrundlaboren, dieser Schritt resultiert schließlich in der endgültigen Auswahl des Endlagerstandorts

Vorgesehen war, dass sich Kommunen als potenzielle Standorte bewerben können, auf die dann das dreistufige Standortverfahren angewendet wird. Allerdings erhielt keine der interessierten Kommunen im ersten Anlauf ihre Bewerbung aufrecht. Nach der nuklearen Katastrophe von Fukushima 2011 wurde der Standortauswahlprozess durch die japanischen Behörden evaluiert. Nun sollen vor der Standortuntersuchung in den Kommunen zunächst

größere Gebiete identifiziert werden, die aus wissenschaftlich-technischer Sicht bevorzugt für die Endlagerung geeignet sind (sogenannte „Scientifically Preferable Areas“). Mit einer Standortentscheidung wird 2025 gerechnet, das Endlager soll etwa 2035 in Betrieb genommen werden.

### Stand der Erkundung

1992 wurde der H3-Report als erster Statusreport durch die PNC fertiggestellt, der die Erkenntnisse der etwa 25-jährigen Forschungs- und Entwicklungsaktivität bis zu diesem Zeitpunkt ausführlich wiedergibt und wichtige Themenfelder für weitere Untersuchungen benennt (Iioka et al. 1992). Die JNC führte die Untersuchungen als Nachfolgeorganisation der PNC fort und veröffentlichte 1999 einen als H12 Report bezeichneten, zweiten Statusreport, der die generelle Machbarkeit einer sicheren und technologisch zuverlässigen geologischen Endlagerung in Japan auf Grundlage von rein generischen Studien bestätigte (JNC 2000).

Die seit 1996 laufenden Projekte zu den Untergrundlaboren Mizunami und Horonobe sind jeweils in die drei Phasen „surface based investigation“, „investigation during construction“ und „investigation in drift“ gegliedert. Über die geowissenschaftlichen Untersuchungen werden kontinuierlich Berichte veröffentlicht, die nur zum Teil in englische Sprache übersetzt werden (z. B. Saegusa & Matsuoka 2011; Hama et al. 2016).

Die nach dem Neustart des Standortverfahrens zusammengetragenen Erkenntnisse zum generellen Aufbau der Erdkruste in Japan wurden durch eine Arbeitsgruppe unter Leitung des Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) in einem Bericht zusammengefasst und 2017 in Form einer kolorierten Karte auf der Internetpräsenz der NUMO veröffentlicht (METI 2017a, 2017b).

## **2.4 *Russland***

### Standortverfahren

Der Ansatz, nukleare Abfälle in tiefen geologischen Formationen einzulagern, geht bis in die 1950er Jahre zurück. Zunächst wurden unterschiedliche Optionen für die geologische Endlagerung fester und verfestigter nuklearer Abfälle geprüft. Neben der Endlagerung in ausgedienten Minen, in Kavernen, im Permafrost oder in konventionellen Endlagerbergwerken wurden auch unkonventionelle Techniken diskutiert, wie beispielsweise die Einlagerung in Bergwerken in unmittelbarer Nähe vulkanischer Schloten, in denen die Abfälle zusammen mit dem umgebenden Gestein eingeschmolzen werden sollten. Die Endlagerung in konventionellen geologischen Tiefenlagern wurde schließlich als machbar

eingestuft und es wurden Kriterien für potenzielle Wirtsgesteinsformationen formuliert und mögliche Konzepte skizziert. Aus einer Analyse der machbaren Optionen und den bis dahin gemachten Erfahrungen mit der Öffentlichkeit wurde geschlossen, dass die Endlagerung in unmittelbarer Nähe zu den abfallgenerierenden Betrieben erfolgen soll, um Probleme, die während des Transport auftreten könnten, auszuschließen (Witherspoon & Bodvarsson 2006). Forschungsaktivitäten in Verbindung mit der geologischen Tiefenlagerung in kristallinem Wirtsgestein begannen 1975 im südlichen Ural sowie ab den frühen 1990er Jahren in der Region Krasnojarsk, in den Graniten der Kola Halbinsel und in der Region Tschitinskaya im Osten des Landes. Daneben gab es Ende der 1990er auch Überlegungen zur Nutzung einer Tonformation nahe Sankt Petersburg.

### Stand der Erkundung

Auf Grund des Ansatzes in Russland, kein zentrales nationales Endlager zu bauen, sondern die radioaktiven Abfälle in der Nähe der produzierenden Betriebe einzulagern, wird der Stand der Erkundung im Folgenden für einzelne aus der Literatur bekannte potenzielle Standortregionen wiedergegeben.

#### *Oziorsk:*

Auf dem Gelände des Mayak Kombinars bei Oziorsk im südlichen Ural sind metamorphe Gesteine und Vulkanite aufgeschlossen. Der Kristallinkomplex wurde chemisch-mineralogisch charakterisiert und auf Störungen untersucht. In dem Massiv sind Diskontinuitäten unterschiedlicher Skala, Genese und Alter vorhanden, allerdings ist das Gestein außerhalb der deformierten Bereiche in seinen petrophysikalischen Eigenschaften, wie Dichte, Elastizität oder Festigkeit, relativ homogen (Zharikov et al. 2015). Dementsprechend sind vulkanische Tuffe und porphyritische Lavabrekzien mit niedriger Permeabilität sowie hoher mechanischer Stabilität und Wärmeleitfähigkeit als geeignete Wirtsgesteine eingestuft worden. Die Eigenschaften der auftretenden Bruchmuster verändern sich mit der Tiefe, während der Bereich bis etwa 35 – 40 m Teufe stark geklüftet ist, treten offene Klüfte im Tiefenbereich bis 100 m deutlich unregelmäßiger auf. Ab 200 m Teufe sind in weiten Teilen nur noch einzelne Bruchflächen im ansonsten massiven Gestein vorhanden, jedoch treten bis 2,5 km Teufe auch stärker geklüftete Bereiche mit Filtergeschwindigkeiten von  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$  m pro Tag auf (Witherspoon & Bodvarsson 2006). Auf Basis der mehrjährigen Untersuchungen in der Region sind inzwischen mehrere potenzielle Standorte in der Region Oziorsk ausgewiesen worden, von denen zwei weiter erkundet werden sollen.

#### *Krasnojarsk:*

In der Region Krasnojarsk wurden Gebiete im Nizhnekanskii Massiv untersucht, das eines der größten granitoiden Massive im mittleren Sibirien darstellt. Das Grundgebirge besteht

aus archaischen bis proterozoischen Glimmerschiefern und Gneisen, die zum intensiv verfalteten Rand der Sibirischen Plattform gehören (Jobmann et al. 2015; Zharikov et al. 2015). Durch Anwendung mehrerer Kriterien, unter anderem zur geologischen Machbarkeit, wurden aus 20 möglichen Gebieten Verkhneitatskii und Yeniseiskii als potenzielle Standorte ausgewählt. In beiden Gebieten wurden zunächst übertägige geologische, geophysikalische und hydrogeologische Studien durchgeführt. Zudem wurden Bohrungen abgeteuft sowie ingenieurgeologische und hydrogeologische Modelle erstellt.

Der Plan zum Bau eines regionalspezifischen Untergrundlabors am Standort Yeniseiskii wurde 2001 verabschiedet. In der Folge wurden durch Kartierung (neo-) tektonischer Strukturen, hydrogeologische und meteorologische Beobachtungen, chemisch-analytische Feldstudien und Überlegungen zur Infrastruktur Mitte der 2000er Jahre weitgehend homogene Krustenblöcke ausgewählt, die für die Entwicklung und den Bau eines Endlagers geeignet sind (Witherspoon & Bodvarsson 2006; Laverov et al. 2016). Dort wurden entlang von fünf etwa 10 km langen Hauptlinien sowie drei etwa 3 km langen Querprofilen geomagnetische, geoelektrische, seismische und gravitative Messungen durchgeführt sowie Gesteinsproben und Dünnschliffe untersucht. Zudem wurden drei Erkundungsbohrungen von etwa 100 m abgeteuft und eine vollgekernte tiefe Erkundungsbohrung niedergebracht, die von umfangreichen geophysikalischen Untersuchungen und Filtrationstests sowie Untersuchungen zu Petrographie und Altersbeziehungen der vorhandenen Gesteinstypen begleitet wurden (Jobmann et al. 2008). Zwischen 2008 und 2011 sind weitere Erkundungsbohrungen bis 700 m für hydrologische und petrologische Untersuchungen abgeteuft worden, die durch die Erkundung im geplanten standortspezifischen Untertagelabor fortgeführt werden sollen (Laverov et al. 2016). In alten Schächten des Minenkombinats werden derweil Techniken für die langfristige Einlagerung und zum Monitoring des späteren Endlagerbereichs getestet. Dafür wurden Experimente in tektonischen Störungszonen und trockenen, aber durchlässigen Bruchzonen durchgeführt. Eine Bewertung der mehrjährigen untertägigen in-situ Studien resultierte in einem neuen Ansatz (nach einem „risk-cost“ Kriterienkomplex) für die Endlagerung (Witherspoon & Bodvarsson 2006).

#### *Kola:*

Für die in den nördlichen Teilen der Russischen Föderation generierten festen nuklearen Abfälle ist ein Endlager auf der Halbinsel Kola geplant. Auf bereits vorhandenen Erkenntnissen zur geologischen Struktur der Halbinsel und der angrenzenden Region Arkhangelskaya wurden zunächst 22 potenzielle Endlagerstandorte identifiziert, aus denen nach weiteren Studien zwei Standorte im Norden und ein Standort im Süden der Kola Halbinsel sowie in der Region Arkhangelskaya ausgewählt wurden. Wegen der als günstig eingestuften geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Standorte wurde ein Endlagerkonzept mit Auffahrungen zwischen 100 – 150 m Tiefe gewählt. Die

grundsätzliche Langzeitsicherheit aller Standorte ist im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Studiezentrum voor Kernenergie Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK-CEN) aus Belgien bestätigt worden (Witherspoon & Bodvarsson 2006). Weitere übertägige Erkundungsarbeiten sind auf dem Gebiet des Novaya Zemlya Archipels durchgeführt worden.

#### *Krasnokamensk:*

Im Osten Russlands wird erwogen, ein Endlager in der Nähe des Priargun Kombinats in Krasnokamensk in der südöstlichen Transbaikal Region zu entwickeln. In dieser Gegend ist der Argun Komplex aufgeschlossen, der hauptsächlich aus archaischen bis proterozoischen und paläozoischen Granitoiden besteht. In der Region befindet sich auch die Uranlagerstätte Anteil, die als natürliches Endlageranalog über einen längeren Zeitraum untersucht wurde, um die Migration von Radionukliden und die Barriereigenschaften des Nebengesteins zu untersuchen (Laverov et al. 2008). Durch strukturgeologische Untersuchungen und die kinematische Analyse von Störungen in 20 Aufschlüssen in der Region wurden die thermo-magmatischen Zyklen beschrieben, die zur Anlage und Reaktivierung der Foliationen und Störungen geführt haben (Petrov et al. 2013). Mittels GIS gestützter Lineamentanalyse wurden aktive regionale Störungen und deren Kinematik identifiziert, wodurch auf die Kompressions- und Extensionsrichtungen rückgeschlossen und das rezente Spannungsfeld rekonstruiert werden konnte (Petrov et al. 2017).

## **2.5 Schweden**

### Standortverfahren

In Schweden sind die Kraftwerksbetreiber in den 1970er Jahren per Gesetz dazu verpflichtet worden, das sichere Management und die Entsorgung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten. Daraufhin gründeten die Betreiber die SKB als gemeinsame Gesellschaft, die alle Systeme und Anlagen plant, baut, betreibt und besitzt, die für den Transport sowie die Zwischen- und Endlagerung notwendig sind. Nach dem durch die SKB entwickelten KBS-3 Konzept sollen die Abfälle in mit Gusseisen ausgekleidete Kupferbehälter eingebaut und in einem Endlagerbergwerk im kristallinen Grundgebirge in etwa 500 m Tiefe in kurzen vertikalen und mit Bentonit verfüllten Bohrlöchern eingelagert werden. Nach Voruntersuchungen zwischen 1977 und 1985, Machbarkeitsstudien zwischen 1993 und 2000 und der eigentlichen Standorterkundung zwischen 2002 und 2007 fiel die Standortentscheidung 2009 auf Forsmark. Der Bau des Endlagers (SFL) wurde 2011 durch die SKB beantragt, seitdem werden vor Ort Vorbereitungen für den Baubeginn getroffen, der unmittelbar im Anschluss an die noch für 2020 erwartete Genehmigung erfolgen soll (Faybishenko et al. 2016; Witherspoon & Bodvarsson 2006).



## Stand der Erkundung

Bereits im Rahmen der zwischen 1977 und 1985 in acht über Schweden verteilten Gemeinden durchgeführten Voruntersuchungen („general siting studies“) wurde ein großer Fundus geowissenschaftlicher Daten, hauptsächlich zum generellen Aufbau der regionalen Erdkruste, aus der Literatur zusammengetragen. Darin waren auch Informationen über die Lage und Kinematik großskaliger Störungen und Lineamente von überregionaler Bedeutung enthalten. Die Erkenntnisse dieser ersten Studien sind eher grundsätzlich, so wurde beispielsweise festgestellt, dass es viele Orte gäbe, an denen die geologischen Voraussetzungen für Errichtung eines Endlagers günstig wären und dass die Eignung eines Standortes durch die unmittelbaren lokalen geologischen Gegebenheiten innerhalb des jeweiligen Krustenblocks bestimmt wird und deshalb nicht aus regionalen oder überregionalen Gegebenheiten an der Oberfläche auf die Verhältnisse an einem bestimmten Ort in Endlagertiefe geschlossen werden kann (SKB 2009). Eine Übersicht der Voruntersuchungen seit 1970 mit einer Auflistung der verwendeten geowissenschaftlichen Hintergrundstudien wurde 1995 veröffentlicht (SKB 1995b).

Von 1993 bis 2000 wurden Machbarkeitsstudien („förstudie“ oder „feasibility studies“) in den Gemeinden Storuman, Malå, Östhammar, Nyköping, Oskarshamn, Tierp, Älvkarleby und Hultsfred durchgeführt, durch die Grundgebirgsbereiche in den jeweiligen Gemeinden identifiziert werden sollten, in denen der Bau eines Endlagers prinzipiell möglich wäre. Diese Studien basierten auf den bereits vorhandenen Daten aus übertägigen geowissenschaftlichen Studien zu den Gesteinstypen, deren mineralogisch-chemischer Zusammensetzung und Strukturinventar, die beispielsweise aus dem Bergbau oder dem Bau nuklearer Anlagen stammten und gegebenenfalls durch weitere Studien ergänzt worden waren. Zusätzlich zu den Abschlussberichten der Vorstudien (SKB 1995a, 1996, 2001) wurden zu den beiden zuerst betrachteten Gebieten Mala und Storuman Unterberichte in schwedischer Sprache zur regionalen Geologie und Erläuterungen zur geologischen Karte, zu den Erzen und Mineralen, zur geophysikalische Dokumentation und Interpretation, zu den hydrogeochemischen und hydrogeologischen Gegebenheiten, zu den Böden sowie zu Daten und Erfahrungen aus dem Felsbau in der Gegend veröffentlicht. Zusätzlich wurden begleitende Studien durchgeführt, um geologische Grundlagen zu schaffen oder zu erweitern, beispielsweise zu den Gesteinstypen, deren Petrographie, deren Bildungs- und Metamorphosegeschichte, zur Entwicklung duktiler und spröder Strukturen sowie zur Mineralogie und Geochemie von Klufffüllungen (Wallin & Peterman 1999). Ein umfassender Überblick der Forschungsaktivitäten zwischen 1976 und 2000 ist in Milnes (2002) gegeben. Aus den Vorstudien wurde gefolgert, dass alleine auf Grund dieser Studien keine Positivauswahl möglich sei. Allerdings wurden einige der untersuchten Regionen als weniger günstig benannt und vom weiteren Verfahren ausgeschlossen. Im Ergebnis wurden drei potenzielle Standorte für die eigentliche Erkundung („site investigations“)

ausgewählt: Simpevarp und Laxemar in der Gemeinde Oskarshamm, in deren Nähe sich das generische Untergrundlabor Äspö befindet, sowie Forsmark in der Gemeinde Östhammar, in der Nähe eines bestehenden Atomkraftwerks.

Der Hauptteil der Erkundungsarbeiten fand zwischen 2002 und 2007 statt. Dabei wurde ein multidisziplinärer, datengetriebener Ansatz verfolgt, bei dem die in den verschiedenen Themenkomplexen erhobenen Primärdaten zunächst in ein zentrales Datenbanksystem integriert wurden (anfangs Geotab, später SICADA/GIS). Diese Daten wurden interpretiert, um daraus umfangreiche Synthesemodelle, die sogenannten „site descriptive models“, zu entwickeln. Die Synthesemodelle für jeden Standort setzen sich aus mehreren, sich ergänzenden thematischen Modellen (beispielsweise zur Geologie oder Hydrogeologie) zusammen und sollen insgesamt möglichst alle relevanten Eigenschaften abbilden, die für ein ganzheitliches Verständnis des Standorts nötig sind. Durch die für jeden Standort analog aufgebauten Synthesemodelle sollte ein objektiver Vergleich der Standorte sichergestellt werden, entsprechend richteten sich die im Rahmen der Erkundung angewandten Untersuchungsmethoden stark an den für die Modelle benötigten Eingangsdaten an. Altdaten aus den Voruntersuchungen wurden neu bewertet und gegebenenfalls zur Ergänzung herangezogen. Die im Rahmen der Erkundung verwendeten Untersuchungsmethoden und die resultierenden Modelle sind in eigenen Methodenberichten beschrieben worden:

- Geological Site Descriptive Modelling (Munier et al. 2003)
- Rock Mechanical Site Descriptive Modelling (Andersson et al. 2002)
- Thermal Site Descriptive Modelling (Sundberg 2003)
- Hydrogeological Site Descriptive Modelling (Rhén et al. 2003)
- Hydrogeochemical Site Descriptive Modelling (Smellie et al. 2002)
- Transport Properties Site Descriptive Modelling (Berglund & Selroos 2004)
- Ecosystem Descriptive Modelling (Löfgren & Lindborg 2003)

Die statistische Beschreibung von Bruchstrukturen und die Modellierung diskreter Kluftnetzwerke ist als kombinierte Erkundungsmethode im Rahmen des Berichts zum Geological Site Descriptive Modelling (Munier et al. 2003) und in einem eigenen Methodenbericht (Munier 2004) beschrieben worden. Die Primärdaten zur Geometrie und Mineralisation von Klüften und Störungszonen wurden innerhalb des Themenkomplexes „Geologie des Grundgebirges und Geophysik“ gewonnen. Der Hauptteil wurde durch Anwendung der Einzelmethoden Grundgebirgskartierung (Methodenbeschreibung MD 132.001), radio-metrische Datierung (MD 132.002), detaillierte Risskartierung (MD 132.003), Neotektonik (MD 133.001), Bohrkernanalyse (MD 143.006) und Petrographie (MD 160.001) generiert

(Munier et al. 2003). Fracture sets für die Modellierung von Kluffnetzwerken resultierten aus der statistischen Aufnahme von Bruchstrukturen in Oberflächenaufschlüssen (sowohl nach Scanline- als auch Window-statistic-Methode), aus Bohrlochuntersuchungen und aus der fernerkundlichen Lineament-Analyse. Aus den Primärdaten dieses Themenkomplexes sind die jeweiligen „bedrock geological models“, bestehend aus den drei Hauptkomponenten „rock domain model“, „deterministic deformation zone model“ und „statistical model of fractures and lineaments“ (dem sog. DFN-Modell) entwickelt worden (SKB 2005a, 2005b, 2006). Nach der Standortentscheidung für Forsmark ist die Primärdatenbasis durch Monitoringaktivitäten und weitere Studien kontinuierlich erweitert worden, sodass sich in der Zwischenzeit sowohl die Einzelmodelle als auch die Synthesemodelle weiterentwickelt haben.

## **2.6 Schweiz**

### Standortverfahren

1978 wurde per Gesetz festgelegt, dass die Machbarkeit einer Endlagerung in der Schweiz nachgewiesen werden muss, bevor die Erlaubnis zum weiteren Betrieb oder Neubau von Kernkraftwerken erteilt wird. Dieser Entsorgungsnachweis sollte durch das Projekt Gewähr erbracht werden. In dessen Rahmen wurde in den früheren 1980er Jahren ein umfangreiches Untersuchungsprogramm initiiert und ein technisches Programm zur Entwicklung eines Sicherheitsnachweises, geochemischer Datenbanken und technischer Barrieren aufgesetzt. 1984 wurde zudem ein generisches Felslabor im Aar-Granit am Grimselpass eröffnet. 1985 wurden die Ergebnisse zur Machbarkeit der Endlagerung im Abschlussbericht zum Projekt Gewähr durch die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) vorgelegt (NAGRA 1985). Der Schweizer Bundesrat sah die für die Endlagerung hochradioaktiver Stoffe gesammelten Daten allerdings als zu punktuell an. Eine geeignete Gesteinsformation war in dem Abschlussbericht nicht explizit ausgewiesen worden, sodass lediglich der Machbarkeitsnachweis zur Endlagerung niedriggradiger Abfälle durch den Bundesrat akzeptiert wurde. Die regionalen Untersuchungen kristalliner Gesteine in der Nordschweiz wurden fortgeführt, auf deren Basis schlug die NAGRA 1994 mehrere potenzielle Standorte zur Erkundung vor. 2004 äußerte das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) schließlich auf Grund der begrenzten Erkundungsmöglichkeiten starke Zweifel daran, dass eine geeignete kristalline Formation überhaupt gefunden werden kann (HSK 2004). Seitdem wird in der Schweiz Tongestein als potenzielles Wirtsgestein für die Endlagerung priorisiert. In der seit Ende 2018 laufenden dritten und letzten Etappe des Auswahlverfahrens untersucht die NAGRA vertieft die drei im Opalinuston gelegenen Standortgebiete Jura Ost, Nördlich

Lägern und Zürich Nordost. 2029 sollen einer oder mehrere Endlagerstandorte ausgewählt werden, der Bau des Endlagers für hochradioaktive Abfälle soll zwischen 2049 und 2059 erfolgen (NAGRA 2016).

### Stand der Erkundung

Im Rahmen des in den frühen 1980er Jahren initiierten Untersuchungsprogramms in der nördlichen Schweiz wurden Arbeiten zur obertägigen geologischen Erkundung durchgeführt, mehrere Erkundungsbohrungen abgeteuft und zwei seismische Profile gemessen. Ab 1982 wurde eine einheitliche geologische Karte des gesamten Untersuchungsgebiets der Nagra und der angrenzenden Gebiete im Maßstab 1:100000 zusammengestellt. Für einige Gebiete von besonderem Interesse wurden zusätzlich detaillierter geologische Karten im Maßstab 1:25000 und 1:10000 erstellt und länderübergreifende Arbeiten auf dem Gebiet des südlichen Schwarzwaldes durchgeführt (Thury et al. 1994). Die Untersuchungen haben das Verständnis des Aufbaus von Grund- und Deckgebirge in der nördlichen Schweiz sowie die Lage der tektonischen Schollen und deren Begrenzung durch zum Teil große Verwerfungen präzisiert. So wurde beispielsweise der bis dahin lediglich vermutete Nordschweizerische Permokarbondrog durch die Bohrungen erstmals direkt nachgewiesen, eine recht klare hydrogeologisch-hydrogeochemische Grenze zwischen dem oberen und tieferen Kristallinbereich mit unterschiedlichen Permeabilitäten, Salinitäten und Redoxbedingungen festgestellt sowie kluftgebundene Fließsysteme und regionale Wasserfließwege beschrieben (NAGRA 1985). Durch die bis 1994 fortgeführten regionalen Untersuchungen des kristallinen Grundgebirges in der Nordschweiz wurden die Befunde des Projekts Gewähr durch die Erhebung weiterer Daten zur geologischen Struktur und Tektonik sowie zu wasserführenden Strukturen und der Hydrochemie von Grund- und Formationswässern ausgebaut und im Wesentlichen bestätigt (Thury et al. 1994; NAGRA 1994, 2005). Seit 2004 konzentrieren sich die Standortauswahl und die Arbeiten zur Erkundung auf den Opalinuston. Das Felslabor Grimsel im Aargranit wird weiterhin betrieben und unter anderem für Experimente an wasserführenden und nichtwasserführenden Bruchstrukturen genutzt (Schneeberger et al. 2019).

## **2.7 Südkorea**

### Standortverfahren

In Südkorea gibt es ein seit 1997 andauerndes Forschungs- und Entwicklungsprogramm, in welchem zunächst ein nationales Referenz-Endlagersystem entwickelt und ein generischer Sicherheitsnachweis geführt werden soll, bevor die Standortsuche initiiert wird. Im Rahmen des F&E-Programms werden auch geo- und umweltwissenschaftliche Studien durchgeführt.

## Stand der Erkundung

Generell weist die koreanische Halbinsel eine komplexe geologische Struktur auf, die etwa 29 verschiedene (archaische bis neogene) Gesteinsarten umfasst. Mesozoische Plutonite nehmen etwa ein Drittel der südlichen koreanischen Halbinsel ein, jurassische und kretazische Granite gelten als besonders geeignete Wirtsgesteine. Das langfristige Ziel der geologischen Arbeiten ist es, Techniken zur Erhebung geologischer Parameter zu entwickeln, um das tief gelegene geologische Umfeld in einem mehrstufigen und skalenabhängigen Ansatz bewerten zu können. Die regionalgeologischen Gegebenheiten wurden speziell im Hinblick auf Trennflächen bewertet. Zudem wurden hydrogeologische, geochemische und mechanische Eigenschaften eines jurassischen Plutons durch ein Bohrprogramm untersucht. Um den generischen Sicherheitsnachweis zu unterstützen und mit möglichst realistischen Daten zu unterfüttern, wurde zwischen 2004 und 2006 der Korea Atomic Energy Research Institute Underground Research Tunnel (auch KURT Facility) gebaut. Dieses in Granit aufgefahrenes Untergrundlabor hat eine Länge von 543 m, eine maximale Tiefe von 120 m und wird für die Charakterisierung des potenziellen Wirtsgesteins sowie für in-situ Tests und die Entwicklung und Erprobung von Endlagertechniken verwendet. Bereits im Vorfeld der Bauarbeiten wurde die Umgebung seit 1997 übertägig erkundet und 17 Bohrungen abgeteuft. Dabei sind vor allem die grundlegenden geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomechanischen Eigenschaften der Granitformation untersucht worden. Zudem wurden erste Modelle zum regionalen Grundwasserfluss und zur geologischen Struktur erstellt. Aus den übertägig und untertägig erhobenen Daten und den resultierenden Modellen wurden Schätzungen zur Verteilung von Störungen und Bruchzonen in der avisierten Endlagertiefe von 500 m abgeleitet, die auch für den generischen Sicherheitsnachweis und die Ableitung von Kriterien für das finale Endlager verwendet wurden (Jeong et al. 2013).

## **2.8 Tschechische Republik**

### Standortverfahren

Die ersten geowissenschaftlichen Arbeiten für die Entwicklung eines Tiefenlagers auf dem heutigen Staatsgebiet begannen in der ehemaligen Tschechoslowakei, da damals eine geologische Tiefenlagerung auf Grund der günstigen geologischen Bedingungen im tschechischen Landesteil vorgesehen war. Nach der Teilung des Landes wurde zunächst das Nuclear Research Institute Rez mit der Koordinierung der Endlagerung beauftragt, welches zwischen 1995 und 1997 eine erste Vorstudie aus Archivdaten des Tschechischen Geologischen Dienstes durchführte. 1997 wurde ein neues Atomgesetz verabschiedet, durch das die Aufgabe der Entsorgung der nuklearen Abfälle an die SURAO (Správa

úložišť radioaktivních odpadů, engl. Bezeichnung: Radioactive Waste Repository Authority, RAWRA) als neu gegründete zuständige Behörde übergang. Diese initiierte 2001 ein eigenes fünfstufiges regionales Screening, durch das sechs Regionen in granitoiden Gesteinsformationen identifiziert wurden, die zwischen 2003 und 2005 näher untersucht worden sind. Danach wurde das Standortverfahren zunächst bis 2009 ausgesetzt.

2015 erfolgte schließlich die Genehmigung zur weiteren Untersuchung von insgesamt sieben potenziellen Standorten, die bis 2020 überflächlich erkundet wurden. Zusätzlich läuft ein begleitendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm, um Erkundungsmethoden und Einlagerungstechniken weiterzuentwickeln und die Arbeitsabläufe bei der Konstruktion zu optimieren. Zu diesem Zweck werden mit Bedřichov, Josef und Bukov drei Untertagebetriebe betrieben und Teile des Melechov Massivs als überflächiges Testgebiet verwendet. Bis Ende 2020 sollen zwei Standorte festgelegt werden, die in einem weiteren Schritt bis 2025 detailliert erkundet und miteinander verglichen werden sollen (Prachar et al. 2017). Der Baubeginn des Tiefenlagers ist für 2050 vorgesehen, die Inbetriebnahme soll 2065 erfolgen.

#### Stand der Erkundung

Bereits im Rahmen der ersten Vorstudien wurde festgestellt, dass auf dem Staatsgebiet der Tschechischen Republik nur kristalline Gesteinsformationen in einer für ein Tiefenlager ausreichenden räumlichen Ausdehnung vorhanden sind. Die petrologischen und mineralogischen Eigenschaften bekannter granitoider Komplexe und deren Umgebung wurden ab etwa 2003 im Rahmen des Projekts Geobariéra näher untersucht. Neben der grundlegenden Differenzierung einzelner Gesteinstypen dienten diese Erkenntnisse als Grundlage für die Rekonstruktion der metamorphen Entwicklung der Gesteine sowie zur Charakterisierung von Störungs- und Bruchsystemen mit dem primären Ziel, die mögliche Reaktivierung spröder Strukturen einzuschätzen. Hierfür wurden hauptsächlich bis 2005 erhobene Daten zusammengestellt und die räumliche Verteilung der Gesteinstypen, des Chemismus und der Internstruktur in entsprechenden Kartenwerken festgehalten.

Im Rahmen des aktuellen Programms zur Forschung und Entwicklung 2015 – 2025 kooperiert die SURAO im Großprojekt „Research support for safety evaluation of the in-depth repository“ hauptsächlich mit dem Nuclear Research Institute Rez. Die Arbeiten zu den geologischen Grundlagen werden durch den Geologischen Dienst der Tschechischen Republik (CGS) ausgeführt. Die Untersuchungen der potenziellen Standorte in der aktuellen Phase sollen zwei Hauptziele erfüllen: Zum einen sollen Standortmodelle („site descriptive models“) entwickelt werden, auf deren Basis der Sicherheitsnachweis geführt werden kann, zum anderen soll die technische Machbarkeit am jeweiligen Standort nachgewiesen werden. Die geowissenschaftlichen Untersuchungen teilen sich in zwei Phasen auf:

In der „surface-based exploration stage“ 2014 – 2018 wurden regionale Modelle aus Archivdaten erstellt und potenzielle Standortformationen auf größerem Maßstab aus einer Kombination von Archivdaten und Erkundungsdaten aus Fernerkundung, geologischer Kartierung, geophysikalischen Methoden sowie hydrologischen und geotechnischen Untersuchungen modelliert. Zusätzlich wurden komplexere (mittel- bis mikroskalige) strukturelle Untersuchungen von spröden und duktilen Strukturen unter Verwendung etablierter Feld- und Labormethoden aus dem Bereich der Strukturgeologie (beispielsweise Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität, AMS oder electron-backscatter-diffraction, EBSD) durchgeführt, um spröde Bruchmuster und die allgemeine Qualität von Gebirgsbereichen beurteilen zu können. In den resultierenden geologischen Modellen sollen lithologische Grenzen, Wasserquellen, tektonische Eigenschaften und Bruchmuster dargestellt werden, außerdem sollen die Rohdaten in ein Datenbanksystem integriert und erste diskrete Klufnetzwerkmodelle daraus erstellt werden. Ein Zwischenbericht zu den Arbeiten im Rahmen des laufenden Großprojekts soll bis Ende 2020 vorliegen. In einer zweiten als „exploration stage for deep horizons“ bezeichneten Phase sollen anschließend bis 2025 vier der Standorte mittels tiefer Bohrungen und geophysikalischer Methoden genauer erkundet werden.

Im Rahmen des begleitenden Forschungs- und Entwicklungsprogramms wurde ein Pilotprojekt zur stochastischen Modellierung von Bruchstrukturen durchgeführt. Dabei wurden diskrete Klufnetzwerkmodelle für einen generischen Standort, das Untergrundlabor Bukov sowie für alle sieben potenziellen Standorte generiert. Da zum Zeitpunkt des Pilotprojekts keine adäquaten Bohrdaten für die potenziellen Standorte vorhanden waren, beruhen diese Modelle ausschließlich auf Daten aus Oberflächenaufschlüssen. An jedem Standort wurden mindestens sechs repräsentative Aufschlüsse aufgenommen und dreidimensionale Aufschlussanaloge mittels Photogrammetrie (Agisoft Photoscan) erstellt. Die für jeden Aufschluss ermittelten Modelle wurden rückorientiert, georeferenziert und mit Informationen zu den Gesteinstypen, zu gegebenenfalls vorhandener Striung und ermitteltem Schersinn angereichert, um daraus die für die hauseigene DFN-Software DfraM benötigten Eingangsparameter ableiten zu können (Kabele et al. 2017). Für das Untergrundlabor Bukov wurden zusätzlich ausführliche Charakterisierungen der anstehenden Gesteine und komplexere geologische 3D-Modelle erstellt (Bukovská et al. 2018; Bukovská et al. 2019).

## 2.9 Deutschland

### Standortverfahren

In Deutschland wurde die Suche nach einem Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle 2013 mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes neu aufgenommen. Demnach soll durch einen wissenschaftlich fundierten und transparenten Auswahlprozess ein Standort gefunden werden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahre gewährleistet. Grundlegende Voraussetzungen für die Standortauswahl und die Beteiligung der Öffentlichkeit sind durch die Kommission für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erarbeitet worden (Endlagerkommission 2016). Gemäß den Empfehlungen der Endlagerkommission wurde 2017 eine Neuordnung der mit der Endlagerung betrauten Behörden eingeleitet und die gesetzliche Grundlage für das Verfahren durch die Neufassung des StandAG geschaffen. Demnach soll die Standortsuche vom Prinzip einer weißen Landkarte ausgehen und in drei Phasen erfolgen. Als Wirtsgesteine kommen gemäß §23 Abs. 1 StandAG Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht. Schritt 1 der Phase I wurde mit der Veröffentlichung des Teilgebieteberichts durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) im September 2020 abgeschlossen (BGE 2020). In Schritt 2 der Phase I sollen innerhalb dieser Teilgebiete untersuchungswürdige Regionen ausgewiesen werden, die in Phase II übertägig erkundet werden. In Phase III sollen mindestens zwei der Standorte untertägig erkundet werden. Nach dem Vergleich der untertägig erkundeten Standorte soll die Standortentscheidung im Jahr 2031 fallen. Die übertägig zu erkundenden Standortregionen, die untertägig zu erkundenden Standorte sowie die Standortentscheidung müssen jeweils durch den Bundestag bestätigt werden.

### Stand der Erkundung

Die zwischen 1983 und 1993 im Rahmen des alten Standortverfahrens durch die BGR erstellten Studien der kristallinen Gebiete in Deutschland beruhen auf Archivmaterial und Zusammenstellungen publizierter Literatur (Kosinowski & von Banchet 1983; kleine Bornhorst et al. 1984; Bräuer 1984; Sprado et al. 1991; Bräuer et al. 1993). In den Studien wurden Informationen zur Lage und Gesamtfläche der Gebiete, wirtschaftlichen Nutzung, Hydrologie, Vorzugsrichtungen von Störungen und Klüften, seismische Aktivität, Ausdehnung einzelner Kristallinkomplexe, Morphologie, strukturellen Ausbildung, Gesteinsaltern und Petrographie zusammengetragen. Auf diesen Beschreibungen aufbauend wurden die Kristallingebiete durch in unterschiedlichen Merkmalskategorien miteinander verglichen und Gebiete in Bayern (Teile des Fichtelgebirges, N Oberpfälzer Wald, Saldenburg-Granit), Sachsen (Graugneiskomplex im Erzgebirge, Granulitgebirge, Granodiorite von Radeburg-Löbau, Pulsnitz und Zawidow) sowie zwei verdeckte Vorkommen im Dreiländereck Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg (Granodiorite von Pretzsch und Prettin) als eher besser geeignet eingestuft und zur weiteren Untersuchung empfohlen (Bräuer et



al. 1994). Auf Grund der zwischenzeitlichen Festlegung auf Steinsalz als Wirtsgestein ist keine weitere Untersuchung dieser Gebiete erfolgt. 2005 wurden die vorhandenen Informationen zu den Kristallinvorkommen in Deutschland aktualisiert (Reinhold 2005). Dabei wurde die Tiefenlage der Grundgebirgsoberfläche als praktisch ermittelbares Teiläquivalent der eigentlichen Kristallinoberfläche flächenhaft dargestellt, wodurch weitere verdeckte Kristallinvorkommen in endlagerrelevanter Tiefe identifiziert werden konnten.

In Schritt 1 der Phase I des neu aufgenommenen Standortauswahlverfahrens wurden zunächst mit Hilfe der bei den staatlichen geologischen Diensten der Bundesländer vorliegenden geowissenschaftlichen Basisdaten und den im Standortauswahlgesetz formulierten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Teilgebiete ermittelt, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (BGE 2020). Insgesamt hat die BGE sieben Teilgebiete mit einer Gesamtfläche von etwa 80800 km<sup>2</sup> in kristallinem Wirtsgestein ermittelt, die sowohl ausstreichende als auch überdeckte Kristallinformationen umfassen. Die BGE fasst unter kristallinen Wirtsgesteinen sowohl Plutonite, als auch hochgradig regionalmetamorphe Gesteine zusammen, welche günstige Eigenschaften für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen erwarten lassen (BGE 2020).

## **2.10 Vergleich der Standort- und Erkundungsverfahren**

Von den rund 30 Ländern, die derzeit die nukleare Energie nutzen, erwägen etwa 18 Länder den Bau eines geologischen Tiefenlagers für hochradioaktive Abfälle in kristallinem Wirtsgestein oder haben sich bereits auf konkrete kristalline Gesteinsformationen als Endlagerstandort festgelegt (Faybishenko et al. 2016).

Das Vorgehen bei der geowissenschaftlichen Erkundung ähnelt sich im internationalen Vergleich insofern, als dass in den meisten Ländern in mehreren aufeinander aufbauenden Phasen vorgegangen wird, mit denen jeweils der Maßstab der Untersuchungen, die Ortsauflösung der erhobenen Daten und damit auch die Menge der pro Flächeneinheit gewonnenen Daten zunimmt (siehe auch Hammer & Sönke 2009).

Wesentliche Unterschiede bestehen hingegen im aktuellen Fortschritt der Verfahren, in den jeweiligen nationalen regulatorischen Rahmenbedingungen sowie in der öffentlichen Verfügbarkeit von Erkundungsdaten und Informationen. Einige Länder, wie Finnland und Schweden, haben die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bereits abgeschlossen und es wurden umfangreiche Berichte zu den abgeschlossenen übertägigen und untertägigen Erkundungsprogrammen veröffentlicht. Andere Länder, wie China oder

die Tschechische Republik, haben die übertägige Erkundung erst in den letzten Jahren abgeschlossen, sodass zwar Erkundungsergebnisse vorliegen, aber noch keine umfassenden Abschlussberichte zu den Erkundungsprogrammen veröffentlicht worden sind. In weiteren Ländern, wie etwa Japan oder Südkorea, erfolgt die Erkundung potenzieller Standorte erst im Anschluss an die Erbringung eines generischen Sicherheitsnachweises, sodass bisher lediglich niedrigauflösende Ergebnisse landesweiter Vorstudien veröffentlicht wurden. Weitere wesentliche Unterschiede bestehen in den geologischen Rahmenbedingungen in den einzelnen Ländern, die zum Teil auch Auswirkungen auf die regulatorischen Rahmenbedingungen und den Ablauf der Standortsuche haben. Während beispielsweise Finnland, Schweden oder Russland für die Endlagerung auf weitläufige Kristallingebiete auf ihren jeweiligen Staatsgebieten zurückgreifen können, die in tektonisch wenig aktiven Bereichen alter kontinentaler Schilde gelegen sind, stellt die geologische Situation Japans als Teil eines vulkanischen Inselbogens über einer aktiven Subduktionszone besondere Herausforderungen an die geologische Tiefenlagerung, die sich auch im Ablauf des dortigen Standortverfahrens niederschlagen. Im Hinblick auf die Endlagerung in Deutschland kann festgestellt werden, dass der geologische Rahmen in der Tschechischen Republik auf Grund der Lage in der Kernzone der europäischen Varisciden am ehesten mit der geologischen Situation in Deutschland vergleichbar ist, da die in Deutschland vorhandenen Kristallingebiete ebenfalls im Rahmen der variscischen Orogenese gebildet oder überprägt worden sind.

Um die Bedeutung von Bruchstrukturen wie Klüfte und Störungszonen für ein Endlager in kristallinem Wirtsgestein näher zu erläutern, werden im folgenden Kapitel 3 die Grundlagen der Bildung und der Unterscheidung von Bruchstrukturen wie Klüften und Störungszonen beschrieben, da diese das hydraulische Verhalten und Barriereigenschaften kristalliner Gesteine wesentlich bestimmen.

### 3 Grundlagen zu Bruchstrukturen

Bruchstrukturen sind diskrete Trennflächen unterschiedlicher Genese und Ausprägung im Gesteinsverband und stellen damit eine Teilmenge von Diskontinuitäten dar. Sie kommen in jeder Größenordnung vor, von kilometerlangen Störungsflächen bis zu sehr kleinräumigen Rissen, die nur im Handstück oder unter dem Mikroskop beobachtet werden können (Price 1966). Sind hydraulisch durchlässige Bruchstrukturen, wie beispielsweise offene Klüfte, miteinander vernetzt, wird die Permeabilität eines Gesteinsverbandes erheblich heraufgesetzt und Fluide können gegebenenfalls über größere Distanzen durch den Gesteinsverband migrieren.

Grundsätzlich können Bruchstrukturen (engl. „fractures“) in Klüfte (engl. „joints“) ohne sichtbaren Versatz und Störungen (engl. „faults“) mit sichtbarem Versatz unterschieden werden. Klüfte sind Extensionsbrüche und können je nach Art ihrer Füllung gegebenenfalls weiter differenziert werden. Schmale Klüfte, die lediglich (gasförmige) Fluide enthalten, werden als offene Klüfte bezeichnet. Klüfte mit hydrothermalen mineralischen Füllungen werden als Venen oder Adern angesprochen, Klüfte mit magmatischen Füllungen werden als magmatische Gänge bezeichnet. Störungen sind hingegen Scherbrüche und gehen auf Grund des Versatzes oft mit einer Veränderung des primären Gefüges einher. Je nach Art der Relativbewegung können verschiedene Störungstypen, wie Aufschiebungen, Überschiebungen, Abschiebungen oder (dextrale beziehungsweise sinistrale) Blattverschiebungen voneinander unterschieden werden. Eine Vielzahl einzelner, kinematisch in Verbindung stehender Störungsflächen werden zusammengefasst als Störungszone bezeichnet. Die Gesamtheit aller Klüfte und Störungen in einem Gesteinsverband bildet das Bruchmuster.

#### 3.1 *Bildung von Bruchstrukturen*

Grundsätzlich entstehen Bruchstrukturen durch den Verlust der inneren Kohäsion eines Materials. Diesem als spröde bezeichneten Materialverhalten liegt die Ausbreitung und Vereinigung mikroskopischer und sub-mikroskopischer Risse zugrunde, die entweder bereits im Material vorhanden sind oder die sich durch einwirkende Spannungen innerhalb von Mineralkörnern, entlang von Korngrenzen oder an Kristallgitterdefekten neu bilden können (Pollard & Fletcher 2005). Die dabei ablaufenden Materialprozesse werden unter dem Begriff Bruchbildung zusammengefasst und setzen ein, wenn eine einwirkende Spannung die Festigkeit eines Materials erreicht.

Ob sich ein Bruch in einem Gesteinsverband unter den vorherrschenden Druck- und Temperaturbedingungen bildet oder nicht, wird im Wesentlichen durch das Materialverhalten der gesteinsbildenden Minerale sowie durch die Deformationsrate bestimmt. Bis in eine

Tiefe von etwa 10 km verhalten sich die in der Erdkruste häufigsten Minerale Quarz und Feldspat in der Regel rein bruchhaft. Die hauptsächlichen Deformationsmechanismen sind Kataklyse sowie Rotation und Translation der Mineralkörner, die im Verlauf der Deformation zerbrochen und relativ zueinander neu angeordnet werden (Fossen 2010). Makroskopisch bilden sich dadurch schmale, scharf vom Nebengestein abgegrenzte Strukturen im Gesteinsverband aus, während das unmittelbar angrenzende Nebengestein oft nicht von der Deformation betroffen ist (Hobbs & Ord 2015). Mit der Tiefe reagieren die gesteinsbildenden Minerale zunehmend viskoplastisch (Abb. 1).

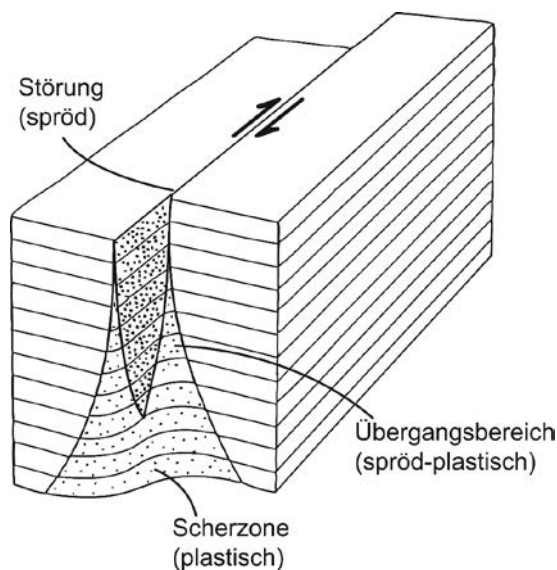


Abb. 1: Verteilung der dominierenden Deformationsstile über die Erdkruste. Im oberen Bereich dominiert spröde Deformation, im tieferen Bereichen herrscht plastische Deformation vor (verändert nach Ramsay & Huber 1987)

Allerdings unterscheiden sich die Duktilitätsgrenzen der verschiedenen Minerale, sodass sich in der mittleren Erdkruste oft breitere, spröd-duktiler Strukturen ausbilden, die sowohl Merkmale bruchhafter als auch plastischer Deformation aufweisen. In tieferen Krustenbereichen verhalten sich gesteinsbildende Minerale überwiegend plastisch, sodass Deformation von breiten duktilen Zonen aufgenommen wird (z. B. Ramsay & Huber 1987; Fossen 2010). Bruchstrukturen sind folglich ein typisches Merkmal von Deformation in der Oberkruste.

Extensions- oder Dehnungsbrüche entstehen durch Bewegungen senkrecht zur Trennfläche, weshalb sie zur Rekonstruktion der Paläospannungsrichtung herangezogen werden können. Die kleinste Hauptnormalspannung  $\sigma_3$  verläuft senkrecht zur Bruchfläche, die größte Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  ist parallel zur Bruchfläche orientiert (Abb. 2).

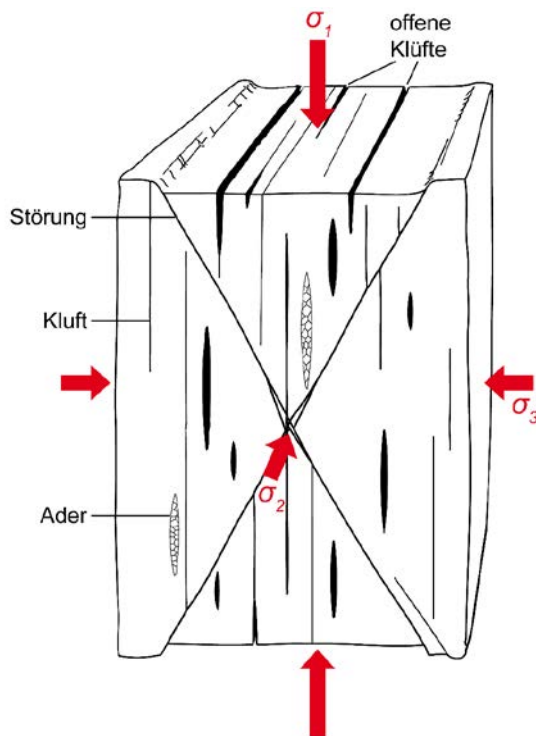


Abb. 2: Orientierung von Bruchstrukturen relativ zu den Hauptnormalspannungsrichtungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  (verändert nach Fossen 2010)

Störungen sind hingegen Scherbrüche, die durch Bewegungen parallel zur Trennfläche gebildet werden. Aus Experimenten ist bekannt, dass beim Scherbruch unter idealen Bedingungen gewöhnlich konjugierte Flächenpaare entstehen und dass der spitze Winkel zwischen den beiden Flächen in typischen Krustengesteinen um die  $60^\circ$  beträgt (Fossen 2010). Konjugierte Scherflächenpaare können deshalb gegebenenfalls zur Rekonstruktion der Paläospannungsrichtung verwendet werden, da die größte Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  den spitzen Winkel zwischen den Scherflächen halbiert, die mittlere Hauptnormalspannung  $\sigma_2$  parallel zur deren Schnittlinie verläuft und  $\sigma_3$  den stumpfen Winkel zwischen den Scherflächen halbiert (Abb. 2). Bruchflächen, die sowohl senkrecht als auch parallel zur Trennfläche verlaufende Bewegungskomponenten aufweisen, werden als hybride Scherrisse bezeichnet.

Nach dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium tritt der Scherbruch eines Festkörpers dann ein, wenn die einwirkende Scherspannung  $\sigma_s$  die Bruchfestigkeit des Materials übersteigt. Analog gilt nach dem Griffith-Kriterium für das extensionale Regime, dass sich ein Extensionsbruch bildet, sobald die Zugfestigkeit des Materials durch eine einwirkende Zugspannung überschritten wird. In Gesteinsverbänden gilt dies nur für den ungestörten Zustand. Bereits vorhandene Bruchflächen und andere physikalische Diskontinuitäten, wie beispielsweise ausgeprägte Schicht- oder Schieferungsflächen, können Schwächezonen darstellen, die die Bruchfestigkeit des Gesteinsverbands in dieser Richtung signifikant

herabsetzen. In diesem Fall wird zum Beispiel die Scherfestigkeit im Wesentlichen durch den Reibungswiderstand entlang der vorhandenen Diskontinuitäten bestimmt, während die innere Festigkeit des Gesteins selbst nahezu keine Rolle mehr spielt. Das Mohr-Coulomb-Kriterium gilt also nicht, stattdessen besteht eine proportionale Beziehung zwischen der Scherfestigkeit des Gesteinsverbandes und der auf der Bruchfläche wirkenden Normalspannung  $\sigma_n$ , die wiederum vom Umschließungsdruck abhängig ist und als Byerlee-Gesetz (Byerlee 1978) bezeichnet wird (für  $\sigma_n < 200$  MPa:  $\sigma_s = 0,85 \sigma_n$ , für  $\sigma_n > 200$  MPa:  $\sigma_s = 0,5 + 0,6 \sigma_n$ ). Die Festigkeit von Gesteinsverbänden wird durch vorhandene Bruchstrukturen und andere Diskontinuitäten also signifikant herabgesetzt und es kommt bei erneutem Spannungsaufbau und Deformation bevorzugt zu deren Reaktivierung. Ebenso können vorhandene duktile Gefüge, wie mylonitische Scherzonen oder ausgeprägte Foliationen, mechanische Anisotropien im Gesteinsverband darstellen, sodass der Kohäsionsverlust bevorzugt entlang solcher Strukturen erfolgt (Belgrano et al. 2016). Zur korrekten Interpretation komplexer Bruchstrukturen und Bruchmuster sind daher Daten aus unterschiedlichen Disziplinen sowie ein grundlegendes Verständnis der Strukturen und der Deformationsgeschichte des Gesteinsverbands notwendig.

### 3.2 Unterscheidung von Bruchstrukturen

Nach gängigen linear-elastischen Theorien ist die Ausbreitung eines Bruchs von der Spannungsverteilung entlang der Bruchfront abhängig. Die lokale Spannungsverteilung um die Bruchfront wird wiederum durch die relative Bewegung der beiden Bruchflächen bestimmt (Pollard & Fletcher 2005). Diese Relativbewegungen können anhand eines kartesischen Koordinatensystems voneinander unterschieden werden, bei dem die y-Achse senkrecht zur Bruchfläche orientiert ist und die z-Achse parallel zur Bruchfront verläuft (Abb. 3). Durch die unterschiedlichen Formen der Bruchausbreitung werden unterschiedliche Arten von Bruchstrukturen in Gesteinsverbänden generiert.

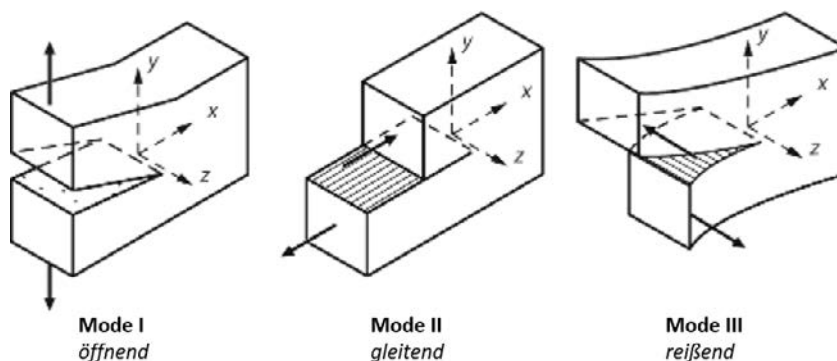


Abb. 3: Bruchmodi entsprechend der Bewegung der Bruchflächen relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem. Die Bruchfront verläuft parallel zur z-Achse, die Ausbreitung des Bruchs erfolgt in x-Richtung (verändert nach Pollard & Fletcher 2005)

- Mode I: Bewegungen senkrecht zur Bruchfläche entlang der y-Achse werden als Mode I oder öffnender Modus bezeichnet. Reine Mode I Brüche entstehen unter Zugspannung, bei niedrigem lithostatischen Druck oder erhöhtem Fluiddruck und sind mit Strukturen wie Klüften oder magmatischen Gängen verknüpft. Da beim Extensionsriss auf den Bruchflächen keine Scherkomponente wirkt, breitet sich die Bruchfront in der Bruchebene (xz-Ebene) weiter aus und es bildet sich eine ebene Bruchfläche ohne Versatz.
- Mode II: Relativbewegungen entlang der Bruchfläche parallel zur x-Achse und senkrecht zur Bruchfront (beziehungsweise zur z-Achse), werden als Mode II oder gleitender Modus bezeichnet. Bei Relativbewegungen entlang von Bruchflächen wirkt eine Scherkomponente entlang der Bruchfläche, wodurch ein Versatz entlang der Bruchfläche erfolgt und eine Störungsfläche gebildet wird.
- Mode III: Relativbewegungen entlang der Bruchfläche parallel zur Bruchfront (beziehungsweise zur z-Achse) werden als Mode III oder reißender Modus bezeichnet. Bei Scherung parallel zu einer bestehenden Bruchfront kann die Störungsfläche segmentiert und die einzelnen Segmente entsprechend des Schersinns relativ zur ursprünglichen Bruchebene rotiert werden, wodurch eine Reihe staffelartig angeordneter Fiederbrüche entsteht.

Die Unterscheidung von Bruchstrukturen in kristallinen Gesteinen ist von besonderer Bedeutung, da bestimmte Arten von Bruchstrukturen, wie offene Klüfte oder Störungen, die nicht durch mineralische Füllungen abgedichtet werden, die hauptsächlichen Wegsamkeiten für Fluide darstellen. Bereits äußerst kleinräumige, vernetzte Bruchstrukturen können hohe hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen und die Einschusswirksamkeit eines Gebirgsbereichs wesentlich herabsetzen. Neben der Beurteilung der Durchlässigkeit vorhandener Kluftsysteme muss daher auch abgeschätzt werden, ob zukünftige Deformationen, die im Falle einer Änderung des Spannungsfeldes über den gesamten Endlagerzeitraum eintreten können, hydraulisch inaktive Bruchstrukturen reaktivieren oder neue hydraulisch wirksame Bruchstrukturen erzeugen könnten.

Im folgenden Kapitel 4 werden die Methoden zur Erhebung notwendiger geometrischer Daten in Oberflächenaufschlüssen sowie die wesentlichen mineralogisch-petrologischen und geochemischen Eigenschaften von Kluftmineralisationen im Hinblick auf eine stochastische Modellierung von Kluftnetzwerken beschrieben.

## 4 Erhebungsmethoden

Bruchstrukturen, wie Klüfte oder Störungen, können in erster Näherung als planare Gefügeelemente beschrieben werden, deren Eigenschaften die primären Eingangsdaten für die Kluftnetzwerkmodellierung darstellen. Sie können im Gelände oder im Labor erhoben werden und geometrischer oder nicht-geometrischer Natur sein. Nicht-geometrische Kluftdaten beschreiben beispielsweise geochemische und petrologische Eigenschaften der Klüfte, die bedeutend für die hydraulischen Eigenschaften des Kluftnetzwerkes sein können. Verschiedene Erhebungsmethoden, die auch im Projekt DaFNe Anwendung finden, werden im Folgenden kurz erläutert.

### 4.1 Erhebungsmethoden für geometrische Kluftdaten

Zur Erhebung geometrischer Daten, wie der Orientierung und der Länge von Bruchstrukturen, können unterschiedliche Methoden angewendet werden. Bei der Scanline-Methode wird ein Maßband über die Aufschlusswand gespannt und die geometrischen Parameter für alle Klüfte erhoben, die diese Linie schneiden (Priest 1993). Um die Datengüte zu verbessern, müssen Strukturen an möglichst vielen, parallel zueinander angeordneten Scanlines pro Wand aufgenommen werden. Dabei ist die mehrfache Messung von Strukturen, die mehrere Scanlines schneiden („oversampling“), explizit gefordert (Witthüser & Himmelsbach 1998).

Alternativ können die geometrischen Parameter auch an georeferenzierten dreidimensionalen Aufschlussanalogen bestimmt werden. Solche Modelle der sichtbaren Aufschlussoberfläche können entweder mittels fotografischer Aufnahmen der Aufschlusswand, die mittels fotogrammetrischer Algorithmen zu einem dreidimensionalen Abbild der Aufschlussoberfläche verschnitten werden (z. B. Linder 2006; Heipke 2017), oder mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) (z. B. Laux & Henk 2015) erzeugt werden. Da durch beide Verfahren flächige Abbilder der Aufschlusswand erzeugt werden, ist es möglich Bereiche des Aufschlusses zu erfassen, die für die händische Messung per Kompass und Maßband nicht zugänglich sind. Zudem kann eine größere Menge an Bruchflächen in kürzerer Zeit erfasst werden, wodurch die statistische Aussagekraft des erzeugten Datensatzes erheblich verbessert wird (Laux & Henk 2015; Bisdorn et al. 2017). Nach Rückorientierung und Georeferenzierung des Modells an Hand von ausgeprägten und im Aufschluss eingemessenen Flächen können geometrische Informationen, wie Raumlage und Länge einzelner Brüche sowie Kluftabstände und damit auch die Kluftintensität von Kluftscharen, durch die Adaption der Scanline-Methode am Aufschlussanalog bestimmt werden (Bisdorn et al. 2017).



Zur Unterscheidung unterschiedlicher Kluftsysteme und -generationen im Aufschlussanalog müssen zusätzliche Informationen im Aufschluss erhoben werden. Bei der Aufnahme werden subparallel zur Scanline oder zur Aufschlusswand verlaufende Bruchflächen statistisch weniger häufig erfasst. So sind beispielsweise subvertikale Bruchflächen in Datensätzen aus vertikalen Bohrlöchern stets unterrepräsentiert. Diese sogenannte „blind-zone“ kann entweder durch die statistische Gewichtung der Bruchflächen korrigiert oder durch die Aufnahme mehrerer Scanlines oder Aufschlussflächen in unterschiedlichen Raumrichtungen ausgeglichen werden (Terzaghi 1965; Priest 1993; Witthüser & Himmelsbach 1998; Wennberg et al. 2007).

Geometrische Informationen zu einzelnen Gefügeelementen, wie etwa die Raumlage, die Öffnungsweite einer Kluft oder die Breite einzelner Störungen, können durch einfache Messung im Aufschluss bestimmt werden. Der Schersinn einer Störung kann durch Interpretation geeigneter Schersinnindikatoren, wie beispielsweise Riedel-shears, ebenfalls oft direkt im Aufschluss bestimmt werden. Wenn eindeutige Harnischlineare auf den Scherflächen ausgebildet sind, kann zudem auf die jüngere Kinematik der Störung rückgeschlossen werden.

Systematische Fehler während der Erhebung der geometrischen Parameter müssen, sofern möglich, bei der statistischen Analyse korrigiert werden. Für die Kluftöffnungsweite wird aufgrund der oberflächennahen Entspannung der untersuchten Gesteine oft ein zu großer Wert gemessen und die Längenverteilung kann durch Abschneide-, Zensur- und Längenfehler beeinträchtigt werden (Witthüser & Himmelsbach 1998).

## **4.2 Erhebungsmethoden für geochemische und petrologische Eigenschaften**

Hydrothermale Mineralisationen liefern wichtige Hinweise zu den Bildungs- beziehungsweise den Reaktivierungsbedingungen von Bruchstrukturen und Kluftsystemen. Durch die Bestimmung der Kluftmineralisation mittels Röntgendiffraktometrie (RDA), Röntgenfluoreszenz (RFA) oder petrographischer Analyse, können zum Beispiel Indexminerale wie Phrenit, Epidot oder Chlorit identifiziert werden, die Hinweise auf die Druck-Temperaturbedingungen während der Mineralisation geben. Durch die Bestimmung von Isotopenverhältnissen an geeigneten Mineralen, wie beispielsweise C-Isotopie an Calcit, kann die Kristallisationstemperatur bestimmt werden und erlaubt gegebenenfalls Aussagen darüber, ob die Mineralisation aus meteorischen oder Formationswässern gebildet wurde (Wallin & Peterman 1999). Durch geochronologische Analysen der Kluftmineralisation, wie beispielsweise Uran-Blei-Datierungen an hydrothermale Calcit oder Phrenit, kann das absolute Alter der Mineralisation ermittelt werden, wodurch auf

den Zeitpunkt der Kluftbildung rückgeschlossen werden kann (z. B. Hansman et al. 2018). Petrographische und petrologische Untersuchungen, beispielsweise mittels Durchlichtmikroskopie, Kathodolumineszenz oder Mikrosonde, geben zudem Aufschluss über die Art der Kluffentstehung und -entwicklung. So kann beispielsweise ermittelt werden, ob reine Zugrisse oder hybride Scherrisse vorliegen oder ob eine Bruchstruktur mehrfach geöffnet und mineralisiert wurde (Passchier & Trouw 2005). Durch die detaillierte Charakterisierung von Bruchstrukturen und deren Mineralisationen können individuelle Klüfte zu Klufscharen oder -generationen mit ähnlicher Genese zusammengefasst werden. In ähnlicher Weise können Störungen durch die korrekte Interpretation kinematischer Indikatoren komplexen Störungssystemen zugeordnet werden.

Im Rahmen des Projekts DaFNe sollen diese Bruchstrukturen in Modellform übertragen werden. Im folgenden Kapitel 5 wird die Nutzung der im Gelände erhobenen Kluffdaten als Modellierungsparameter diskreter Kluffnetzwerkmodelle erläutert.

## 5 Nutzung von Klufdaten für ein stochastisches Kluffnetzwerkmodell

Ein numerischer Ansatz für die Bewertung der Barriereigenschaften potenzieller kristalliner Wirtsgesteine ist die stochastische Kluffnetzwerkmodellierung. Dieser Modelltyp erlaubt die numerische Modellierung von Klüften und ihrer strömungsrelevanten Eigenschaften und kann als Grundlage eines weiterführenden Kontinuumsmodells verwendet werden (siehe Kapitel 6).

Als Grundlage des Kluffnetzwerkmodells dienen detaillierte Informationen zu Bruchstrukturen, die aus statistisch aussagekräftige Rohdaten zur Geometrie in einem zu betrachtenden Gesteinsvolumen erhoben werden. Die zu erhebenden Daten umfassen Angaben zur Häufigkeit und Kluffdichte, zur Länge und Öffnungsweite, zur Raumlage, Verteilung und Vernetzung, zu den hydraulischen und sorptiven Eigenschaften der Bruchstrukturen und zu den systematischen Beziehungen der Klüfte beziehungsweise der Kluffgenerationen untereinander (Munier 2004).

Die Integration von Bruchstrukturen in numerische Kluffnetzwerkmodelle geschieht über die Abbildung geometrischer Kluffdaten als planare Elemente mit Hilfe stochastischer Verfahren in einer geeigneten Software. Die planaren Elemente sind repräsentativ für im Aufschluss vorhandene Klüfte und Kluffstrukturen. Zu den Verfahren zählen zum Beispiel Klufflokationsalgorithmen, Verteilungen für direktionale Variablen wie Klufforientierung aus Fallwert und Fallrichtung, Wahrscheinlichkeitsverteilungen für skalare Daten wie Klufflängen, Kluffabstände und die Klufföffnungsweiten, Kluffintensitätsmaße, Verteilungen für Kluffgröße, Kluffelongation, Klufftermination sowie die Zuweisung hydraulischer Eigenschaften wie Permeabilität, Kompressibilität und Öffnungsweite für die Klüfte und Kluffsets. Eine Anleitung zu einer teilautomatisierten Kluffnetzwerkanalyse von TLS Punktwolkendaten findet sich in Laux & Henk (2015); mathematische Verfahren zur statistischen Auswertung sind in Priest (1993) erläutert.

Statistisch aussagekräftige Datensätze zur Geometrie der Bruchstrukturen können, wie in Kapitel 4 erläutert, beispielsweise durch Messungen in Oberflächenaufschlüssen oder an Bohrungen erzeugt werden. Strömungsrelevante Parameter können in Feld- oder Laborversuchen ermittelt werden. Nach Bestimmung der statistischen Merkmale der erzeugten Datensätze können diese Kennwerte für die stochastische Modellierung synthetischer Bruchstrukturen in einer Kluffnetzwerkmodellierungssoftware verwendet (Abb. 4) und den Klüften hydraulische Eigenschaften zugewiesen werden.

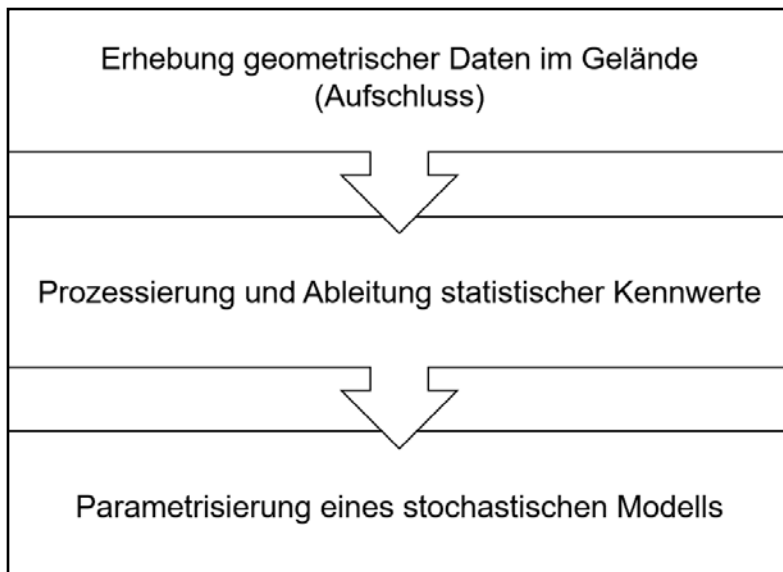


Abb. 4: Verfahren zur Nutzung von Geländedaten für die stochastische Modellierung

Die stochastischen Modelle, die auf der statistischen Verteilung und auf den Eigenschaften von hydraulisch wirksamen Bruchstrukturen sowie deren Beziehungen untereinander beruhen, können anschließend für die Bewertung der Barriereigenschaften in einem gegebenen Gesteinsvolumen anhand numerischer Strömungsmodelle verwendet werden.

Im Rahmen des Projekts DaFNe wird ein Teil dieser Parameter aus Geländedaten abgeleitet. Dies betrifft insbesondere die Parameter zur geometrischen Beschreibung des Klufnetzwerks. Tab. 1 stellt die wesentlichen Parameter sowie Möglichkeiten der Datenerhebung dar.

Tab. 1: Wesentliche Parameter zur Charakterisierung eines DFN-Modells

(Gemittelte) Parameter	Datenerhebungsverfahren und Zählverfahren
Kluftausdehnung [m]	Skizze Scanline-Methode (1D) Window-Statistic-Methode (2D) digitales Aufschlussanalog (aus Photogrammetrie oder TLS)
Kluftdichte [n/m]	
Kluftöffnungsweite [m]	
Kluftorientierung (Fallen / Streichen)	
Kluftpermeabilität [m <sup>2</sup> ]	Ableiten aus Kluftöffnungsweite
Kluftspeicherkoeffizient	Ableiten aus Kluftöffnungsweite Qualitative Beschreibung
Vernetzungsgrad	Lineamentkarte Qualitative Aussagen Korrelation mit Kluftlänge und -dichte
Matrixpermeabilität [m <sup>2</sup> ]	Feldversuche, Laborwert
Matrixporosität	
Matrixspeicherkoeffizient [1/m]	

Im folgenden Kapitel 6 werden numerische Strömungsmodelle für hydraulische Prozesse in gesättigten geklüftet-porösen Medien vorgestellt und relevante Eingangsparameter zur Charakterisierung in ihren Grundgleichungen identifiziert. Verschiedene Abstraktionsebenen, die Bedeutung des Repräsentativen Elementar-Volumens und der Einfluss der Kluftdichte auf die Wahl des numerischen Modells werden erläutert.

## 6 Numerische Modellierung hydraulischer Prozesse

Im Rahmen des Projekts DaFNe sollen numerische Modellierungsarbeiten durchgeführt werden. Hierbei sollen insbesondere Strömungs- und Transportprozesse in einem geklüftet-porösen Medium analysiert sowie Strömungspfade, Partikeltransport und hydraulische Konduktivitätstensoren evaluiert werden. Die betrachteten Größenskalen werden in Abhängigkeit von den Anforderungen, die sich in dem Standortauswahlverfahren ergeben, und nach den Möglichkeiten der in diesem Vorhaben durchzuführenden Felduntersuchungen an real vorkommenden, übertägig zugänglichen Kristallinstrukturen Deutschlands gewählt. Ziel der geologischen Datenerhebung ist es, einen repräsentativen, statistischen Datensatz von Kluffstrukturen zu erfassen, der eine stochastische Beschreibung von Klüften einer Länge von 10 m bis 1000 m für ein Kluffnetzwerk ermöglicht. Die Gesamtmodellskala wird einen Modellbereich mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung umfassen und somit im Kilometerbereich liegen.

Natürliche geologische Systeme sind hochgradig komplex bezüglich ihrer geologischen Struktur und der (physikalischen) Prozesse, die darin ablaufen. Um diese Prozesse darzustellen, ist eine Abstrahierung der natürlichen Strukturen, Geometrien und Prozesse auf angemessener Skala wichtig. Diese kann in Stufen der Abstraktion erfolgen, die einen unterschiedlichen Grad an Komplexität zur Abbildung der Strukturen sowie physischer und struktureller Prozesse abbilden (Abb. 5):

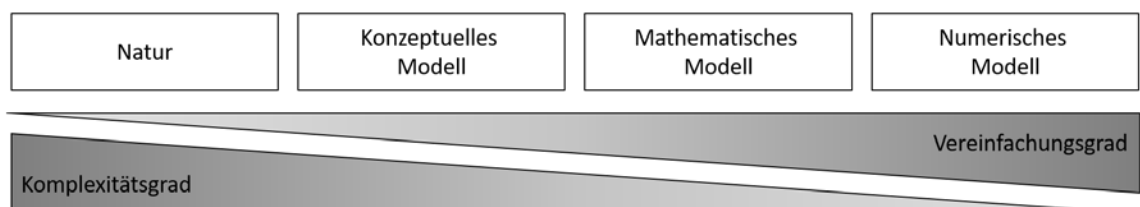


Abb. 5: Transformation von einem komplexen, natürlichen System zu einem vereinfachten numerischen Modell (verändert nach Dietrich 2005: 15)

- Konzeptuelles Modell mit einer Auswahl von betrachteten Prozessen.
- Mathematisches Modell als Beschreibung der Prozesse und geometrischer Strukturen, häufig über deterministische oder stochastische Ansätze dargestellt.
- Numerisches Modell mit räumlicher und zeitlicher Diskretisierung, Grenzbedingungen und numerischen Algorithmen.

Modelle stellen immer nur eine Annäherung an die Natur dar und ihre Modellierungsergebnisse müssen daher immer unter diesen Bedingungen bewertet werden (Dietrich 2005).

Fehlerhafte Modelle oder ungeeignete Modelltypen können unrealistische Ergebnisse produzieren, was zu falschen und kostspieligen Entscheidungen führen kann.

Geklüftet-poröses Gestein besteht aus verschiedenen Komponenten: Dem Kluftnetzwerk mit Kluftfüllung sowie der Gesteinsmatrix mit Poren und Porenfüllung. In geklüftet-porösem Gestein findet Strömung und Transport sowohl in Kluftnetzwerken als auch durch die Matrix statt (Dietrich 2005). Ob Strukturen und Prozesse besser in Modellen kontinuierlicher oder diskreter Elemente abgebildet werden können, hängt ganz wesentlich von der Größe der Strukturen im Verhältnis zum Gesamtmodell ab (Bear 1993). Stets muss dabei das Repräsentative Elementar-Volumen (REV) angemessen gewählt sein. Das REV ist ein Konzept für ein optimales Volumen, das einerseits groß genug ist, um Kleinsteigenschaften als äquivalentes Kontinuum abbilden zu können und andererseits klein genug ist, um räumliche Abhängigkeiten und Veränderungen der Eigenschaften darzustellen (Bear 1972) (Abb. 6).

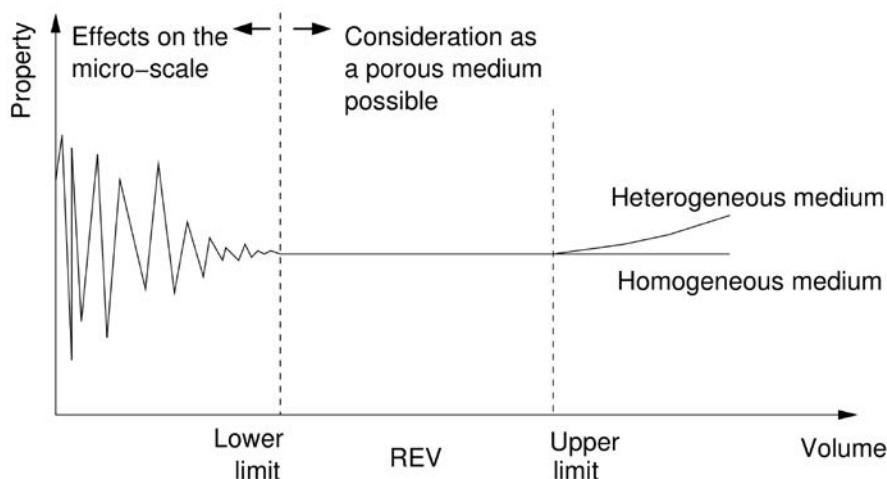


Abb. 6: Grenzen des Repräsentativen Elementar-Volumens (REV) (Dietrich 2005: 27; modifiziert nach Bear 1972)

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche Modelltypen, um geologische Strukturen und Strömungs- und Transportprozesse abzubilden: Kontinuumsmodelle und diskrete Kluftnetzwerkmodelle (Tsang 2004; Ruffert 2018). Je nach Art des geklüfteten Mediums, Kluftdichte (hoch bis gering) und -typ (dominant bis rezessiv) sind diese Modellkonzepte I-IV (Abb. 7) zur Beschreibung geklüftet-poröser Medien unterschiedlich geeignet (Kröhn 1991; Helmig 1993).

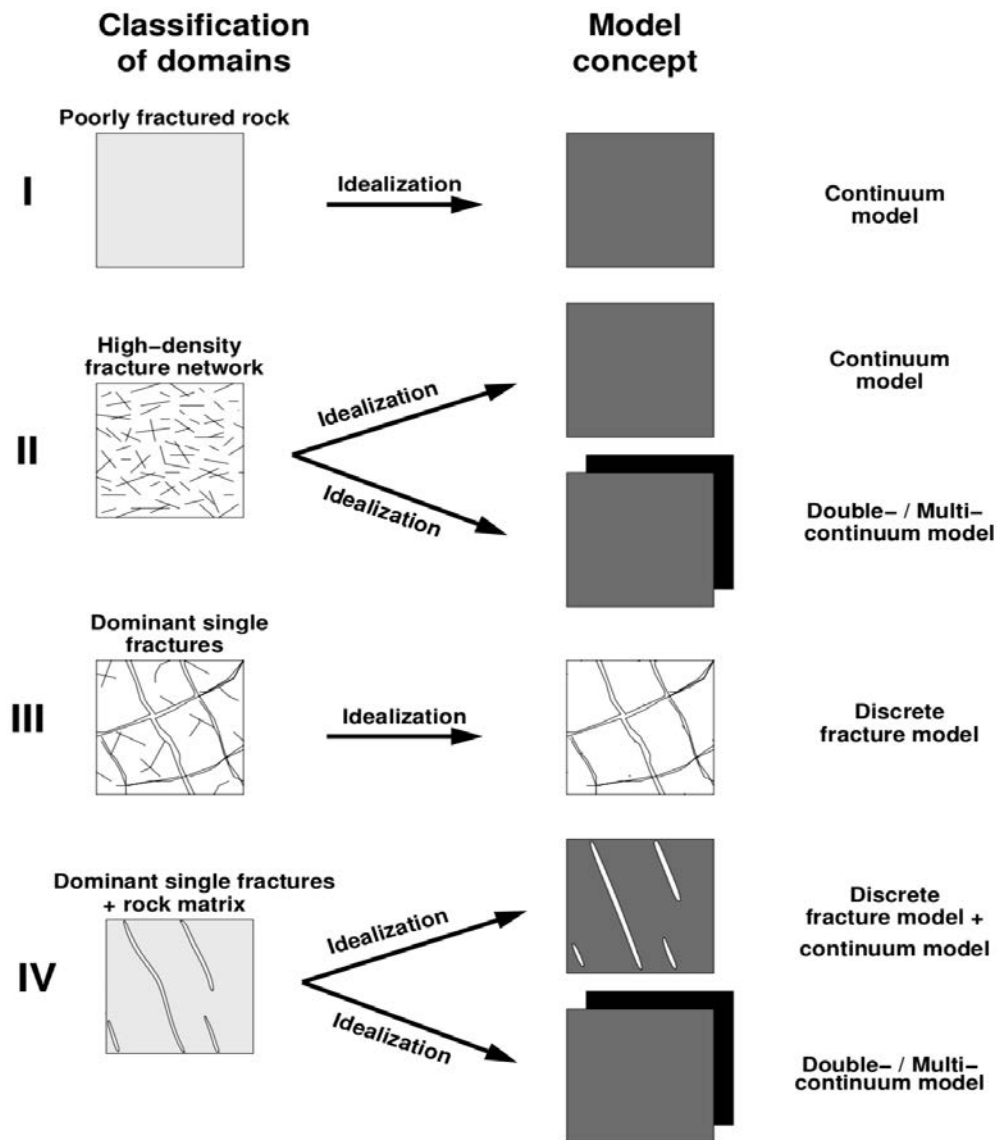


Abb. 7: Modellierungskonzepte für die Beschreibung geklüftet-poröser Medien (Dietrich 2005: 26)

Schwach geklüftetes, poröses Gestein (Typ I) kann sehr gut mit einem Kontinuumsmodell abgebildet werden, da seine Eigenschaften relativ konstant und homogen im gewählten Ausschnitt vorherrschen. Ein sehr dichtes, einheitliches Kluftnetzwerk (Typ II) kann aufgrund derselben Eigenschaften als Kontinuumsmodell dargestellt werden. Systeme mit einzelnen dominanten Klüften (Typ III) hingegen können besser mit einem diskreten Kluftmodell oder bei Vorhandensein eines dominanten Netzwerkes als diskretes Kluftnetzwerkmodell abgebildet werden. Hier würden zu große Modellierungsabweichungen beim „Verschmieren“ der Einzelrisse auf Kontinuums-skala entstehen. Sollten dominante Klüfte und eine hydraulisch nicht vernachlässigbare poröse Matrix in dem abzubildenden Raum existieren, kann eine Kombination der Modelltypen eine Option darstellen. Die Grenzen der Kontinuumsmodellierung liegen also in der Kontinuität der abgebildeten Parameter im Betrachtungsraum.



Kontinuumsmodelle stellen Eigenschaften von Medien gemittelt und konstant über den gesamten Betrachtungsraum dar (Berkowitz et al. 1988). Sie sind aufgrund ihrer Kontinuitätsannahmen und geringen Ansprüche an Rechnerkapazitäten besonders für große Skalen und Betrachtungsräume mit kontinuierlichen Eigenschaften geeignet. Die Kontinuumsmodellierung ist für geklüftetes Gestein mit geringer Matrixporosität jedoch grundsätzlich eher weniger geeignet (Zhang 2002). Diskontinuitäten, wie Klüfte, lassen sich in Kontinuumsmodellen schwierig abbilden, da diese die Kontaktlogik unterbrechen und dem Kontinuumsansatz widersprechen.

Im Unterschied zu Kontinuumsmodellen verfügen diskrete Modelle über Kontaktflächen zwischen einzelnen Bestandteilen des Modells, welche die Abbildung komplexer Störungsgebilde ermöglichen (Zhang 2002). Diskrete Kluftnetzwerkmodelle sind deshalb für Strömungs- und Transportprozesse in geklüftetem Gestein geeignet, welches von Scherzonen oder Kluftsystemen dominiert ist (Typ III) und in welchem Prozesse in der Gesteinsmatrix eine stark untergeordnete Rolle spielen. Aufgrund des hohen Maßes an benötigter Rechnerkapazität sind diskrete Kluftmodelle grundsätzlich eher für kleinere Betrachtungsräume geeignet (Ruffert 2018).

Im Projekt DaFNe wird ein kristalliner, geklüfteter Gebirgsbereich untersucht. Es wird angenommen, dass die Klüfte ein hydraulisch dominantes Kluftnetzwerk bilden und eine geringe Matrixporosität existiert. Deshalb eignet sich hier ein Kluftnetzwerkmodell für die numerische Strömungsmodellierung. Auf Basis des Kluftnetzwerkmodells kann mit Hilfe von Upscaling-Verfahren ein Kontinuumsmodell parametrisiert werden, das wiederum zur Modellierung von thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelten Prozessen besser geeignet ist. Das REV-Konzept muss hierbei immer schlüssig sein (Dietrich 2005). Das heißt, das REV muss groß genug sein, um ein Kontinuum zu etablieren. Im speziellen Fall des Kluftströmungsmodells müssen die Eigenschaften durch ausreichend kleine homogene Elemente diskretisiert werden, um den durch Klüfte beeinflussten Druckgradienten abbilden zu können. Dies kann durch den Vergleich von Ergebnissen, die mit den oben genannten Modelltypen berechnet wurden, untersucht und bewertet werden.

## **6.1 Grundwasserströmungsgleichung im Kontinuumsmodell**

Die numerische Prozesssimulation basiert auf einer mathematisch-physikalischen Formulierung von Erhaltungssätzen, wie den Massen- oder Energieerhaltungsgesetzen, sowie konstitutiven Gleichungen, wie Strömungsmodellen. So können z. B. Massenbewegungen, Temperaturfelder, Wärmefluss, Strömungswege und Strömungsgeschwindigkeiten abgebildet und berechnet werden (Zhang 2002).

Das Prinzip der Massenerhaltung bedeutet, dass die Summe der eintretenden und austretenden Massenströme identisch ist. Allein die Strömungsgeschwindigkeit ändert sich in Abhängigkeit der durchströmten Querschnitte. Das Prinzip der Massenerhaltung wird durch die sogenannte Kontinuitätsgleichung ausgedrückt, welche zeitliche und räumliche Änderungen der Fluidichte verknüpft:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1.1)$$

Mit  $\rho$  = Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  = Zeit (s),  $v$  = Filtergeschwindigkeit (m/s).

Der erste Term beschreibt hierbei die Änderung der Dichte, die eine Veränderung im zweiten Term bedingt. Der zweite Term beschreibt die Divergenz des Massestroms, also die Differenz zwischen Einstrom und Ausstrom.

Die Filtergeschwindigkeit  $v$  für eine einphasige, laminare, horizontale Strömung in porösen, gesättigten Medien berechnet sich nach Darcy's Law folgenderweise:

$$v = -k \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.2)$$

Mit  $k$  = intrinsische Permeabilität ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  = dynamische Viskosität ( $\text{Ns/m}^2$ ),  $p$  = Druck (Pa).

Mit dem Einsetzen von Darcy's Law (1.2) in den Erhaltungssatz (1.1) wird die Grundwasserströmungsgleichung dargestellt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho \frac{-k}{\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (1.3)$$

Mit  $\rho$  = Dichte ( $\text{kg/m}^3$ ) und  $t$  = Zeit (s).

## 6.2 *Strömungsmodellierung in einem diskreten Kluftnetzwerk*

In diskreten Kluftnetzwerken wird angenommen, dass das hydraulische Verhalten unter Vernachlässigung der Matrix über die hydraulische Konduktivität von individuellen Klüften und Netzwerken abgebildet werden kann. Hierfür müssen die relevanten Kluftparameter bekannt sein (Zhang 2002). Während geometrische Größen im Gelände bestimmt werden können, sind für die hydraulischen Eigenschaften umfangreiche Experimente notwendig. Eine Abschätzung der hydraulischen Eigenschaften, insbesondere der Kluftpermeabilität, kann anhand von theoretischen Betrachtungen der Strömungsvorgänge in einer einzelnen, idealisierten Kluft erfolgen. Im Folgenden wird dargestellt, wie die

hydraulische Leitfähigkeit einer Kluft in Abhängigkeit von der Öffnungsweite abgeschätzt werden kann, um anschließend z. B. den Volumendurchfluss  $Q$  in Abhängigkeit des Druckgradienten zu berechnen.

Modelle stellen immer eine Abstraktion der Realität dar. Abb. 8 zeigt die Abstrahierung einer natürlichen Kluft zum „parallel plates“ Konzept.

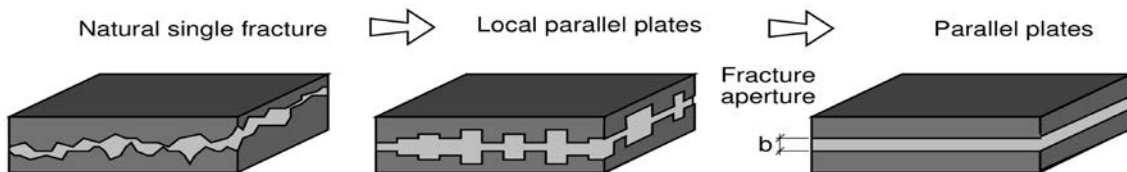


Abb. 8: Von der Natur zum „parallel plates“ Konzept (Dietrich 2005: 34)

Das „local parallel plates“ Konzept ist eine Modellierungslösung, die der natürlichen Kluft durch ihre Segmente ähnlicher ist als das grob vereinfachte „parallel plates“ Konzept. Es ist jedoch auch wesentlich rechenintensiver und daher für aufwendige Berechnungen größerer Bereiche ungeeignet.

Für das weniger rechenintensive „parallel plates“ Modell soll hier die Herleitung eines Strömungsmodells gezeigt werden, um das hydraulische Verhalten in einer idealisierten Kluft abzubilden. Annahme des „parallel plates concept“ beinhalten, dass die Länge  $l$  der Kluft einem Vielfachen ihrer Öffnungsweite  $b$  entspricht und hydraulisch glatte Wände sowie eine laminare Strömung mit einem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil vorliegen (Abb. 9).

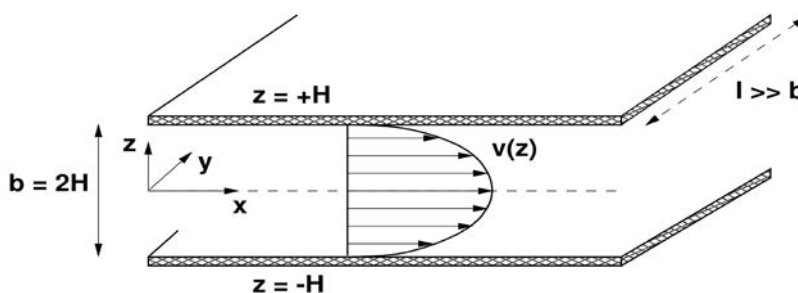


Abb. 9: Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Oberflächen mit einem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil (Dietrich 2005: 34)

Um ein Geschwindigkeitsprofil zwischen zwei parallelen Oberflächen abzubilden, kann die Navier-Stokes-Gleichung für laminare einphasige Strömungen für inkompressible Newtonsche Fluide herangezogen werden:

$$v(z) = \frac{\rho g}{2\mu} \left[ -\frac{d}{dx} \left( \frac{p}{\rho g} + z \right) \right] (H^2 - z^2) \quad (1.4)$$

Mit  $\rho$  = Dichte (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  = Erdbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>),  $\mu$  = dynamische Viskosität (Ns/m<sup>2</sup>),  $p$  = Druck (Pa),  $z$  = Ortskoordinate senkrecht zur Kluft (m),  $H = \frac{1}{2} b$  (m),  $b$  = Kluftöffnungsweite (m).

Die Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$  der laminaren Strömung in der idealisierten Kluft beträgt:

$$v_{\max} = v(z=0) = \frac{H^2}{2\mu} \left[ -\frac{d}{dx} (p) \right] \quad (1.5)$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit (arithmetischer Mittelwert) in einem parabelförmigen Strömungsprofil beträgt 2/3 der Maximalgeschwindigkeit und unter Berücksichtigung von  $b = 2H$  somit:

$$\begin{aligned} v &= \frac{2}{3} v_{\max} \\ &= \frac{2}{3} \frac{b^2}{4} \frac{\rho g}{2\mu} \left[ -\frac{d}{dx} \left( \frac{p}{\rho g} \right) \right] \\ &= \frac{b^2}{12} \frac{\rho g}{\mu} \left[ -\frac{d}{dx} \left( \frac{p}{\rho g} \right) \right] \\ &= -\frac{b^2}{12} \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Vergleicht man nun die unterste Zeile in Gleichung (1.6) mit Darcy's Law (1.2), erkennt man die ähnliche Struktur der Gleichung, nämlich den linearen Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckgradient. Somit ist Darcy's Law auch in der Kluft anwendbar und es ergibt sich, dass die Permeabilität  $k$  in der Kluft der Größe  $\frac{b^2}{12}$  entspricht. Somit kann die Kluftpermeabilität als Funktion der Kluftöffnungsweite anhand der Navier-Stokes-Gleichung bestimmt werden.

Der Volumendurchfluss  $Q$  ergibt sich anschließend durch die Multiplikation mit der durchflossenen Fläche  $A = l * b$  (vgl. Abb. 4) zu:

$$Q = -\frac{b^3}{12} \frac{1}{\mu} l \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.7)$$

Da sich der Volumendurchfluss kubisch proportional zur Kluftöffnungsweite verhält, wird dieser Zusammenhang auch Cubic Law (Witherspoon et al. 1980) genannt.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Berichts wurde ein Arbeitsablauf erarbeitet, um Kluftnetzwerkmodelle anhand von Bruchstrukturdaten und -eigenschaften zu parametrisieren. Diese zugrundeliegenden Daten sollen in einem deutschen Kristallgebiet beispielhaft erhoben werden.

In einem ersten Schritt wurden die Standortverfahren und der Stand der Erkundung in neun verschiedenen Ländern betrachtet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten und die in diesem Kontext wesentlichen Veröffentlichungen zusammengestellt. Während der allgemeine Erkundungsprozess in vielen Ländern ähnlich ist, unterscheiden sich die Fortschritte der Endlagerprojekte und die nationalen regulatorischen Rahmenbedingungen zum Teil deutlich voneinander. Zudem unterscheidet sich das allgemeine Vorgehen aufgrund der unterschiedlichen geologischen Rahmenbedingungen.

Im zweiten Schritt wurden Grundlagen zur Bildung und Reaktivierung von Extensions- und Scherbrüchen erläutert, um die Relevanz für die Abschätzung heutiger und zukünftiger hydraulischer Wirksamkeiten darzustellen. Etablierte Methoden zur Erhebung geometrischer Kluftdatensätze in Oberflächenaufschlüssen, wie die Scanline-Methode oder die Verwendung georeferenzierter dreidimensionaler Aufschlussanaloge, wurden in Hinblick auf die Verwendbarkeit im Projekt DaFNe miteinander verglichen. Zudem wurden Methoden zur Beschreibung qualitativer Kluftigenschaften, die für die hydraulische Wegsamkeit, die Bildungsbedingungen und das Reaktivierungspotenzial der Bruchstrukturen im Barrieregestein relevant sein können, zusammengestellt. Diese umfassen sowohl klassische mineralogisch-petrologische Analysemethoden als auch Methoden aus dem Bereich der Geochemie und Geochronologie.

Im dritten Schritt wurde der Weg von der Datenaufnahme zu einem parametrisierten numerischen Modell skizziert. Nach Interpretation der im Oberflächenaufschluss erhobenen Daten werden daraus Angaben zur Häufigkeit und Dichte, zur Länge und Öffnungsweite, zur Raumlage und Vernetzung von Kluftscharen abgeleitet, die im weiteren Verlauf des Projekts für die Parametrisierung numerischer Modelle für geklüftet-poröse Medien und zur Strömungsmodellierung verwendet werden können. Aufgrund der Ausprägung der Klüftigkeit im Untersuchungsgebiet erscheint ein Kluftnetzwerkmodell für die numerische Modellierung von Fließvorgängen am besten geeignet. Auf Basis des Kluftnetzwerkmodells kann anschließend mit Hilfe von Upscaling-Verfahren ein Kontinuumsmodell parametrisiert werden, das für die Modellierung thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch gekoppelter Prozesse geeignet ist.

## Literaturverzeichnis

- Aaltonen, I., Front, K., Gehör, S. & Sahlstedt, E. (2018): Hydrothermal Alteration of Bedrock at Olkiluoto. Posiva Oy: 101 S.; Eurajoki.
- Andersson, J., Berglund, J., Follin, S., Hakami, E., Halvarson, J., Hermanson, J., Laaksoharju, M., Rhén, I. & Wahlgren, C.-H. (2002): Testing the methodology for site descriptive modelling - Application for the Laxemar area. Svensk Kärnbränslehantering AB: 338 S.; Stockholm.
- Anttila, P., Ahokas, H., Front, K., Heikkinen, E., Hinkkanen, H., Johansson, E., Paulamäki, S., Riekkola, R., Saari, J., Saksa, P., Snellmann, M., Wikström, L. & Öhberg, A. (1999a): Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finnish Bedrock - Kivetty Site Report. Posiva Oy: 202 S.; Helsinki.
- Anttila, P., Ahokas, H., Front, K., Hinkkanen, H., Johansson, E., Paulamäki, S., Riekkola, R., Saari, J., Saksa, P., Snellmann, M., Wikström, L. & Öhberg, A. (1999b): Final disposal of spent nuclear fuel in Finnish bedrock - Hästholmen site report. Posiva Oy: 175 S.; Helsinki.
- (1999c): Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finnish Bedrock - Olkiluoto Site Report. Posiva Oy: 206 S.; Helsinki.
- (1999d): Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finnish Bedrock - Romuvaara Site Report. Posiva Oy: 198 S.; Helsinki.
- Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. 764 S.; (American Elsevier Publishing Company).
- Bear, J.T., Chin-Fu; de Marsily, Ghislain (1993): Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. 1 Aufl.: 560 S.; (Academic Press).
- Belgrano, T.M., Herwegh, M. & Berger, A. (2016): Inherited structural controls on fault geometry, architecture and hydrothermal activity: an example from Grimsel Pass, Switzerland. Swiss Journal of Geosciences, 109, 3: S. 345-364. DOI:10.1007/s00015-016-0212-9
- Berglund, S. & Selroos, J.-O. (2004): Transport properties site descriptive model - Guidelines for evaluation and modelling. Svensk Kärnbränslehantering AB: 120 S.; Stockholm.

- Berkowitz, B., Bear, J. & Braester, C. (1988): Continuum models for contaminant transport in fractured porous formations. *Water Resources Research*, 24, 8: S. 1225-1236. DOI:10.1029/WR024i008p01225
- BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung: 444 S.; Peine.
- BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 27 S.; Hannover Berlin.
- Bisdom, K., Nicka, H.M. & Bertotti, G. (2017): An integrated workflow for stress and flow modelling using outcrop-derived discrete fracture networks. *Computers & Geosciences*, 103: S. 21-35. DOI:10.1016/j.cageo.2017.02.019
- Bräuer, V. (1984): Aufstellung und Ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik. - 3. Teil: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Report: 117 S.; Hannover.
- Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P. & Sprado, K.-H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: 147 S.; Hannover.
- Bräuer, V., Reh, P., Schulz, P., Sprado, K.-H., Duschek, B., Maraschek, U. & Woerschling, C. (1993): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der 5 neuen Bundesländer, 2. Bericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: 223 S.; Hannover.
- Bukovská, Z., Soejono, I., Vondrovic, L., Vavro, M., Souček, K., Buriánek, D., Dobeš, P., Švagera, O., Waclawik, P., Řihošek, J., Verner, K., Sláma, J., Vavro, L., Koníček, P., Staš, L., Pécskay, Z. & Veselovský, F. (2019): Characterization and 3D visualization of underground research facility for deep geological repository experiments: A case study of underground research facility Bukov, Czech Republic. *Engineering Geology*, 259. DOI:10.1016/j.enggeo.2019.105186

- Bukovská, Z., Verner, K., Brázda, L., Buriánek, D., Dobeš, P., Dudíková Schulmannová, B., Erban, V., Franěk, J., Halodová, P., Hanák, J., Havlová, V., Holeček, J., Jačková, I., Jelének, J., Kašpar, V., Kolomá, K., Kopačková, V., Koucká, L., Kučera, P., Laufek, F., Lněničková, Z., Kočergina, J., Kučera, P., Myška, O., Nahodilová, R., Novotná, I., Pertoldová, J., Rukavičková, L., Soejono, I., Švagera, O., Tomek, F., Veselovský, F. & Zuna, M. (2018): Comprehensive Geological Characterization of URF Bukov. Czech Geological Survey (Súrao), Final Report: 126 S.; Prague.
- Byerlee, J. (1978): Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 4-5: S. 615-626. DOI:10.1007/bf00876528
- Dietrich, P.H., Rainer; Hötzl, Heinz; Sauter Martin; Köngeter, Jürgen; Teutsch, Georg (2005): *Flow and Transport in Fractured Porous Media*. 447 S.; Berlin Heidelberg (Springer-Verlag).
- Endlagerkommission (2016): Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Kommission für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht: 683 S.
- Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D. & Swift, P. (2016): *International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation - Fifth Worldwide Review*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Sandia National Laboratories, LBNL-1006984: 459 S.
- Fossen, H. (2010): *Structural Geology*. Bd. 214: 480 S. DOI:10.1017/CBO9780511777806
- Hama, K., Sasao, E., Iwatsuki, T., Onoe, H., Sato, T., Fujita, T., Sasamoto, H., Matsuoka, T., Takeda, M., Aoyagi, K., Nakayama, M., Miyakawa, K., Oyama, T., Yasue, K., Asamori, K., Niwa, M., Osawa, H., Ito, H., Nagae, I., Natsuyama, R., Semba, T. & Amano, K. (2016): *Synthesized Research Report in the Second Mid-term Research Phase*. Japan Atomic Energy Agency: 274 S. DOI:10.11484/jaea-review-2016-014
- Hammer, J. & Sönnke, J. (2009): *EUGENIA Teil 2: Methoden der Suche und Erkundung von Standorten für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht: 205 S.; Hannover.



- Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G. (2009): EUGENIA Teil I: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht: 162 S.; Hannover.
- Hansman, R.J., Albert, R., Gerdes, A. & Ring, U. (2018): Absolute ages of multiple generations of brittle structures by U-Pb dating of calcite. *Geology*, 46, 3: S. 207-210. DOI:10.1130/g39822.1
- Heipke, C. (Hrsg.) (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung Handbuch der Geodäsie. 830 S.; (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-662-47094-7
- Helmig, R. (1993): Theorie und Numerik der Mehrphasenströmungen in geklüftet-porösen Medien. Dissertation, Leibniz Universität, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen; Hannover.
- Hobbs, B.E. & Ord, A. (2015): *Structural Geology : The Mechanics of Deforming Metamorphic Rocks*. 680 S.; (Elsevier).
- HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen: 110 S.; Würenlingen.
- Iio, D., Sato, M., Hibi, N., Matsuo, A., Kawahara, T., Koike, T., Kondo, T. & Ishii, H. (1992): Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Progress Report: 486 S.
- Jeong, J.-T., Choi, H.-J., Koh, Y.-K., Kim, G.-Y. & Kim, K.-S. (2013): The role of KURT and A-KRS in the development of generic safety cases in Korea. S. 7.
- JNC (2000): H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Japan Nuclear Cycle Development Institute: 395 S.; Ibaraki.
- Jobmann, M., Brewitz, W., Fahrenholz, C., Fein, E., Hammer, J., Keesmann, S., Krone, J., Mrugalla, S., Wolf, J. & Ziegenhagen, J. (2008): WIBASTA - Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen. DBE Technology, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Abschlussbericht: 133 S.; Peine Hannover Braunschweig.

- Jobmann, M., Flügge, J., Hammer, J., Herold, P., Krone, J., Kühnlenz, T., Li, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A. & Wolf, J. (2015): Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks. DBE Technology, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Final Report: 175 S.
- Kabele, P., Švagera, O., Somr, M., Nežerka, V. & Zeman, J. (2017): Mathematical Modelling of Brittle Fractures in Rock Mass by Means of the DFN Method. Czech Technical University in Prague, Czech Geological Survey, Technical Report: 100 S.; Prague.
- Kleine Bornhorst, A., von Banchet, S. & Bräuer, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik. - 2. Teil: Die Schwarzwälder Granit-Massive. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: 242 S.; Hannover.
- Kosinowski, M. & von Banchet, S. (1983): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik. - 1. Teil: Das Bayerische Kristallin am Westrand der Böhmisches Masse. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: Hannover.
- Kröhn, K.-P. (1991): Simulation von Transportvorgängen im klüftigen Gestein mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, Leibniz Universität, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen; Hannover.
- Laux, D. & Henk, A. (2015): Terrestrial laser scanning and fracture network characterisation – perspectives for a (semi-) automatic analysis of point cloud data from outcrops. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 166, 1: S. 99-118. DOI:10.1127/1860-1804/2015/0089
- Laverov, N.P., Petrov, V.A., Poluektov, V.V., Nasimov, R.M., Hammer, J., Burmistrov, A.A. & Shchukin, S.I. (2008): The Antei uranium deposit: A natural analogue of an SNF repository and an underground geodynamic laboratory in granite. Geology of Ore Deposits, 50, 5: S. 339-361. DOI:10.1134/S1075701508050012
- Laverov, N.P., Yuditsev, S.V., Kochkin, B.T. & Malkovsky, V.I. (2016): The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste. Elements, 12, 4: S. 253-256. DOI:10.2113/gselements.12.4.253
- Linder, W. (2006): Digital Photogrammetry A Practical Course. 214 S.; Berlin Heidelberg (Springer).

- Löfgren, A. & Lindborg, T. (2003): A descriptive ecosystem model – a strategy for model development during site investigations. Svensk Kärnbränslehantering AB: 108 S.; Stockholm.
- McEwen, T. & Aikas, T. (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland. Posiva Oy, Summary report: 224 S.; Helsinki.
- McEwen, T., Aro, S., Kosunen, P., Mattila, J., Pere, T., Käpyaho, A. & Hellä, P. (2012): Rock Suitability Classification RSC 2012. Posiva Oy: 222 S.; Eurajoki.
- METI (2017a): Explanation material of the Nationwide Map of “Scientific Features” relevant for Geological Disposal. supplementary material, 30.10.2020. [www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rwm/pdf/map\\_en.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity_and_gas/nuclear/rwm/pdf/map_en.pdf)
- (2017b): Nationwide Map of Scientific Features. 30.10.2020. [www.numo.or.jp/en/jigyout/Nationwide\\_Map\\_of\\_Scientific\\_Features.pdf](http://www.numo.or.jp/en/jigyout/Nationwide_Map_of_Scientific_Features.pdf)
- Milnes, A.G. (2002): Swedish deep repository siting programme - Guide to the documentation of 25 years of geoscientific research (1976–2000). Svensk Kärnbränslehantering AB: 191 S.; Stockholm.
- Munier, R. (2004): Statistical analysis of fracture data, adapted for modelling Discrete Fracture Networks-Version 2. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB Report: 60 S.; Stockholm.
- Munier, R., Stenberg, L., Stanfors, R., Milnes, A.G., Hermanson, J. & Triumph, C.-A. (2003): Geological Site Descriptive Model - A strategy for the model development during site investigations. Svensk Kärnbränslehantering AB: 113 S.; Stockholm.
- NAGRA (1985): Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 342 S.; Baden.
- (1994): Kristallin-I: Conclusions from the regional investigation programme for siting a HLW repository in the crystalline basement of Northern Switzerland. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 127 S.; Wettingen.
- (2005): Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle - Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtsgesteine und Gebiete. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 106 S.; Wettingen.

- 
- (2016): Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 224 S.; Wettingen.
- Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J. (2005): *Microtectonics*. 366 S.; (Springer).
- Petrov, V., Lespinasse, M., Ustinov, S.A. & Cialec, C. (2017): GIS-based identification of active lineaments within the Krasnokamensk Area, Transbaikalia, Russia. *Journal of Physics: Conference Series*, 879. DOI:10.1088/1742-6596/879/1/012017
- Petrov, V.A., Lespinasse, M., Poluektov, V.V., Cuney, M., Nasimov, R.M., Hammer, J. & Schukin, S.I. (2013): Stress-time context of fault permeability at the Krasnokamensk Area SE Transbaikalia. *Journal of Physics: Conference Series*, 416. DOI:10.1088/1742-6596/416/1/012018
- Pollard, D.D. & Fletcher, R.C. (2005): *Fundamentals of Structural Geology*. 500 S.; New York (USA) (Cambridge University Press). DOI:10.2277/0521839270
- Posiva (2011): *Olkiluoto Site Description*. Posiva Oy: 1028 S.
- (2013): *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto*. Posiva Oy, Performance Assessment 2012: 520 S.
- Prachar, I., Pospiskova, I., Vokal, A., Steinerova, L. & Vondrovic, L. (2017): *DGR Development in the Czech Republic - Action Plan 2017-2025*. SURAO: 56 S.; Prague.
- Price, N.J. (1966): *Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock*. 176 S.; London (Pergamon).
- Priest, S.D. (1993): *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. DOI:10.1007/978-94-011-1498-1
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1987): *The Techniques of Modern Structural Geology Volume 2: Folds and Fractures*. 390 S.; London (Academic Press).
- Reinhold, K. (2005): *Tiefenlage der „Kristallin - Oberfläche“ in Deutschland*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht: 89 S.; Hannover.
- Rhén, I., Follin, S. & Hermanson, J. (2003): *Hydrogeological Site Descriptive Model – a strategy for its development during Site Investigations*. Svensk Kärnbränslehantering AB: 109 S.; Stockholm.

- Ruffert, C. (2018): Mathematische Beschreibung von Fluiden, Strömungstheorien im Mikrobereich. (In: Ruffert, C. (Hrsg.): Mikrofluidische Separationsverfahren und -systeme). S. 7-10; Berlin, Heidelberg (Springer Vieweg). DOI:10.1007/978-3-662-56449-3
- Saegusa, H. & Matsuoka, T. (2011): Final Report on the Surface-based Investigation Phase (Phase I) at the Mizunami Underground Research Laboratory Project. Japan Atomic Energy Agency, Final Report: 377 S. DOI:10.11484/jaea-research-2010-067
- Schneeberger, R., Kober, F., Lanyon, G.W., Mäder, U.K., Spillmann, T. & Blechschmidt, I. (2019): Grimsel Test Site: Revisiting the site-specific geoscientific knowledge. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), Technical Report: 123 S.; Wettingen.
- Siren, T., Hakala, M., Valli, J., Christiansson, R., Ivars, D.M., Lam, T., Mattila, J. & Suikkanen, J. (2017): Parametrisation of Fractures. Posiva Oy, Final report: 124 S.; Eurajoki.
- SKB (1995a): Feasibility study for siting of a deep repository within the Storuman municipality. Svensk Kärnbränslehantering AB: 146 S.; Stockholm.
- (1995b): General Siting Study 95 - Siting of a deep repository for spent nuclear fuel. Svensk Kärnbränslehantering AB: 149 S.; Stockholm.
- (1996): Feasibility study for siting of a deep repository within the Malå municipality. Svensk Kärnbränslehantering AB: 161 S.; Stockholm.
- (2001): Feasibility Studies – Östhammar, Nyköping, Oskarshamn, Tierp, Hultsfred and Älvkarleby. Svensk Kärnbränslehantering AB: 114 S.; Stockholm.
- (2005a): Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. Svensk Kärnbränslehantering AB: 745 S.; Stockholm.
- (2005b): Preliminary site description Simpevarp subarea – version 1.2. Svensk Kärnbränslehantering AB: 580 S.; Stockholm.
- (2006): Preliminary site description Laxemar subarea – version 1.2. Svensk Kärnbränslehantering AB: 643 S.; Stockholm.
- (2009): Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection. Svensk Kärnbränslehantering AB: 59 S.

- Smellie, J., Laaksoharju, M. & Tullborg, E.-L. (2002): Hydrogeochemical site descriptive model – a strategy for the model development during site investigations. Svensk Kärnbränslehantering AB: 63 S.; Stockholm.
- Sprado, K.-H., Reh, M., Bräuer, V. & Schulz, P. (1991): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der 5 neuen Bundesländer, 1. Bericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR Bericht: Hannover.
- Sundberg, J. (2003): Thermal Site Descriptive Model: A strategy for the model development during site investigations - Version 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB: 49 S.; Stockholm.
- Terzaghi, R.D. (1965): Sources of Error in Joint Surveys. *Géotechnique*, 15, 3: S. 287-304. DOI:10.1680/geot.1965.15.3.287
- Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W.H., Naef, H., Pearson, F.J., Vomvoris, S. & Wilson, W. (1994): Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland - Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: 473 S.; Wettingen.
- Tsang, C.-F.S., Ove; Kautsky, Fritz; Jing, Lanru (2004): Coupled THM Processes in Geological Systems and the Decovalex Project. Bd. 2. Elsevier Geo-Engineering Book Series: 3-16 S. DOI:10.1016/S1571996004800181
- Vaarma, M. & Vuokko, J. (2009): Geological Mapping of Investigation Trenches OL-TK15 and OL-TK16 at the Olkiluoto Study Site, Eurajoki, SW Finland. Posiva, Working Report: 104 S.; Eurajoki.
- Vuori, S.e. (1997): Publicly Administrated Nuclear Waste Management Research Programme 1994-1996. Ministry of Trade and Industry, Final Report: 204 S.
- Wallin, B. & Peterman, Z. (1999): Calcite fracture fillings as indicators of paleohydrology at Laxemar at the Äspö Hard Rock Laboratory, southern Sweden. *Applied Geochemistry*, 14: S. 953-962.
- Wang, J. (2010): High-level radioactive waste disposal in China: update 2010. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1: S. 1-11. DOI:10.3724/SP.J.1235.2010.00001

- Wang, J., Chen, L., Su, R. & Zhao, X. (2018a): The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 3: S. 411-435. DOI:10.1016/j.jrmge.2018.03.002
- Wang, X., Li, D.L., Cheng, G. & Luo, P. (2018b): Study on Structural Plane of Deep Rock Mass in Xinchang Preferred Site for Underground Research Laboratory on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste in China. 2nd International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science, 2018. Bd. 170. IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. DOI:10.1088/1755-1315/170/3/032097
- Wennberg, O.P., Azizzadeh, M., Aqrabi, A.A.M., Blanc, E., Brockbank, P., Lyslo, K.B., Pickard, N., Salem, L.D. & Svånå, T. (2007): The Khaviz Anticline: an outcrop analogue to giant fractured Asmari Formation reservoirs in SW Iran. *Geological Society, London, Special Publications*, 270, 1: S. 23-42. DOI:10.1144/gsl.Sp.2007.270.01.02
- Witherspoon P.A., Wang J.S.Y., Iwai K. & Gale J.E. (1980): Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water Resour. Res.*, 16: S. 1016-1024. DOI:10.1029/WR016i006p01016
- Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. (2006): *Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation - Fourth Worldwide Review*. Ernest Orlando Berkeley National Laboratory, University of California: 283 S.; Berkeley.
- Witthüser, K. & Himmelsbach, T. (1998): Erhebungsmethoden von Kluftparametern für eine stochastische Kluftnetzgenerierung. *Grundwasser*, 3: S. 103-109.
- Zhang, X.S., David J. (2002): *Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses*. 287 S.; Oxford (Elsevier Science Ltd).
- Zharikov, A.V., Velichkin, V.I., Malkovsky, V.I. & Shmonov, V.M. (2015): Experimental study of crystalline-rock permeability: Implications for underground radioactive waste disposal. *Water Resources*, 41, 7: S. 881-895. DOI:10.1134/s0097807814070136

## Abkürzungsverzeichnis

AEC	Japan Atomic Energy Commission
AMS	Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität
ATV	akustischer (Bohrloch-) Televiwer
BET	Beishan Exploration Tunnel
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CGS	Česká geologická služba (Geologischer Dienst der Tschechischen Republik)
CNNC	China National Nuclear Corporation
DFN	Discrete Fracture Network (diskretes Klufnetzwerk)
DIA	detailed investigation areas
EBSD	electron backscatter diffraction
EDZ	excavation damage zone
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
GIS	Geographisches Informationssystem
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute
KBS	Kärnbränslesäkerhet (Kernbrennstoffsicherheit)
KURT	Korea Atomic Energy Research Institute Underground Research Tunnel
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan
PIA	preliminary investigation areas
PNC	Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation



---

RDA	Röntgendiffraktionsanalyse
REV	Representative elementary volume (Repräsentatives Elementar-Volumen)
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SCK-CEN	Studiecentrum voor Kernenergie Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Forschungszentrum für Kernenergie)
SFL	Slutförvaret för långlivat avfall (Entsorgungsanlage für langlebige Abfälle)
SICADA	Site Characterization Database
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB / Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co
StandAG	Standortauswahlgesetz
SURAO / RAWRA	Správa úložišť radioaktivních odpadů / Radioactive Waste Repository Authority
THMC	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch
TLS	terrestrisches Laserscanning
URF	Underground Research Facility
URL	Underground Research Laboratory

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Wesentliche Parameter zur Charakterisierung eines DFN-Modells.....	36

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Verteilung der dominierenden Deformationsstile über die Erdkruste. Im oberen Bereich dominiert spröde Deformation, im tieferen Bereichen herrscht plastische Deformation vor (verändert nach Ramsay & Huber 1987) .....	27
Abb. 2: Orientierung von Bruchstrukturen relativ zu den Hauptnormalspannungsrichtungen $\sigma_1$ , $\sigma_2$ und $\sigma_3$ (verändert nach Fossen 2010) .....	28
Abb. 3: Bruchmodi entsprechend der Bewegung der Bruchflächen relativ zu einem kartesischen Koordinatensystem. Die Bruchfront verläuft parallel zur z-Achse, die Ausbreitung des Bruchs erfolgt in x-Richtung (verändert nach Pollard & Fletcher 2005) .....	29
Abb. 4: Verfahren zur Nutzung von Geländedaten für die stochastische Modellierung .....	35
Abb. 5: Transformation von einem komplexen, natürlichen System zu einem vereinfachten numerischen Modell (verändert nach Dietrich 2005: 15) .....	37
Abb. 6: Grenzen des Repräsentativen Elementar-Volumens (REV) (Dietrich 2005: 27; modifiziert nach Bear 1972) .....	38
Abb. 7: Modellierungskonzepte für die Beschreibung geklüftet-poröser Medien (Dietrich 2005: 26) .....	39
Abb. 8: Von der Natur zum „parallel plates“ Konzept (Dietrich 2005: 34) .....	42
Abb. 9: Laminare Strömung zwischen zwei parallelen Oberflächen mit einem parabelförmigen Geschwindigkeitsprofil (Dietrich 2005: 34) .....	42